２０２１年度 重点研究課題

新しいアルカリ活性材料を用いた低炭素社会における インフラ構築に関する研究

報告書

2022 年 3 月

土木学会　コンクリート委員会

2021 年度 重点研究課題

「新しいアルカリ活性材料を用いた低炭素社会におけるインフラ構築に関する研究」

土木学会コンクリート委員会

「新しいアルカリ活性材料を用いた低炭素社会におけるインフラ構築に研究小委員会（233 委員会)」

委員構成

委員長	一宮 一夫	大分工業高等専門学校
幹事長	山本 武志	電力中央研究所
幹事	新 大軌	島根大学
	菊地 道生	電力中央研究所
	国枝 稔	岐阜大学
	佐川 孝広	前橋工科大学
	佐川 康貴	九州大学
	千々和 伸浩	東京工業大学
	畑中 重光	岐阜市立女子短期大学
	藤山 知加子	横浜国立大学
	山口 明伸	鹿児島大学
委員	一宮 利通	鹿島建設
	乾 徹	大阪大学
	小野 秀一	施工技術総合研究所
	金森 洋史	清水建設
	小坂 崇	阪神高速道路
	高岡 昌輝	京都大学
	田中 亮一	東亜建設工業
	本間 淳史	東日本高速道路
	三浦 雅也	東急建設
担当幹事	牧 剛史	埼玉大学

目　次

１．はじめに……1

２．材料特性ならびに製造方法……2
2.1　ジオポリマー(GP)ならびに高炉スラグ微粉末ベースの AAM の基礎物性……2
2.1.1　ジオポリマー(GP)……2
2.1.2　高炉スラグ微粉末ベースの AAM に関する基礎実験……6
2.2　未利用資源の有効利用……9
2.2.1　海外での動向……9
2.2.2　国内での動向……9
2.2.3　各種未利用資源の反応性……10
2.3　埋立石炭灰の有効利用……16
2.3.1　フライアッシュと石炭灰……16
2.3.2　既成灰……16

３．試験施工の例……23
3.1　実施例……23
3.1.1　PC まくらぎならびに左官補修……23
3.1.2　実プラントを使用したマンホール製造……23
3.1.3　製鉄所構内の高温環境の RC 擁壁の補修……24
3.2　課題……26
3.2.1　エフロレッセンス（白華）……26
3.2.2　乾湿繰返しによる収縮膨張……29

４．鉄筋コンクリート構造物ならびに鉄筋コンクリート構造物以外への適用……31
4.1　GP コンクリート構造……31
4.1.1　GP の力学特性のまとめ……31
4.1.2　GP 構造部材の設計……32
4.2　鉄筋コンクリート構造物以外……35
4.2.1　GP モルタルの開発……35
4.2.2　建設用 3D プリンタの社会実装への道……38
4.2.3　現地直接造形 3D プリンティングシステムの可能性……39

５．環境への影響……41
5.1　環境影響評価……41
5.1.1　一般……41
5.1.2　セメント産業における資源循環と脱炭素問題……43

5.2　有害物質の固定 …… 45
5.2.1　有害元素の固定化 …… 45
5.2.2　放射性物質汚染廃棄物へのジオポリマー固化技術の適用 …… 49
5.3　地盤環境改善を目的としたアルカリ活性材料（AAMs）の適用 …… 55
5.3.1　一般 …… 55
5.3.2　地盤改良への AAMs の適用 …… 55
5.3.3　地盤改良への AAMs の適用に関する課題と展望 …… 58
5.3.4　地盤材料のアルミナシリカ材料としての利用 …… 58
5.3.5　AAMs の汚染土壌処理への適用可能性 …… 59
5.4　リサイクル方法 …… 66
5.4.1　一般 …… 66
5.4.2　粗骨材としての利用 …… 66
5.4.3　細骨材としての利用 …… 67
5.4.4　粉体・結合材としての利用 …… 67
5.4.5　人工骨材の製造 …… 68
5.4.6　今後の展望 …… 69

6．普及のための取組み（新材料導入のためのマネジメント） …… 71
6.1　一般 …… 71
6.2　高性能コンクリートの開発と実用化 …… 74
6.3　阪神高速における新技術の開発・実装プロセス …… 84
6.4　ＮＥＸＣＯ東日本におけるコンクリートの最近の話題 …… 91
6.5　今後の材料開発が取り組むべき機能・性能 …… 105

7．苛酷環境での適用 …… 109
7.1　宇宙環境での適用 …… 109
7.1.1　宇宙の環境 …… 109
7.1.2　宇宙における資源利用 …… 114
7.1.3　月・火星で AAMs を利用するための課題 …… 121
7.2　地下・海底 …… 126
7.3　海洋 …… 128
7.3.1　塩害に対する抵抗性 …… 128
7.3.2　海洋コンクリート構造物への AAMs の適用可能性 …… 131

8．AAMs の実用化に向けた課題抽出アンケートならびに文献レビュー結果 …… 133
8.1　アンケート …… 133
8.1.1　アンケートの概要 …… 133
8.1.2　アンケートの結果 …… 137

8.2　文献レビュー結果 ……143

９．おわりに ……187

１．はじめに

ジオポリマー（GP）を含むアルカリ活性材料（AAMs）は，Si，Al，Ca 成分を多く含む粉体（活性フィラー）と，水ガラスなどのアルカリシリカ溶液の縮重合反応による固化体である．セメントフリーの AAMs は，水和反応によるセメント固化体と同等の基本性能を有することに加え，低炭素（セメント製造で発生する CO_2 は総排出量の約 8%との試算もある），放射性廃棄物等の有害物質固定，地盤環境改善，耐酸性，耐高温性，耐アルカリ骨材反応性などの点で優れる．また，活性フィラーにはフライアッシュ（FA），高炉スラグ微粉末（BFS）以外にも，火山堆積物やバイオマス灰なども使用でき，未利用資源の活用先としても期待できる．現在，国内外で社会実装に向けた研究開発が進行中で，オーストラリアでは空港滑走路のエプロン部への施工実績もある．我が国でも工場製作のプレキャストコンクリートでの適用を中心に施工事例が増えてきている．

コンクリート委員会では AAMs のうち FA ならびにその一部を BFS で置換した FA-BFS 併用系 GP の実用化に向けた研究委員会（361 委員会）が，材料系の専門家を中心に活動している．それに対して，本研究委員会は，調査対象を FA，BFS 以外にも拡大した．また，材料系の専門家に加えて，環境問題を専門とする研究者，構造物の設計・施工の実務を担当する技術者，新材料導入のマネジメント経験のある技術者，ニューフロンティアでの土木技術の展開に関わる技術者の参画を得て，使用目的ごとの要求性能を明確にしたうえで，協働して AAMs が有する特徴的な材料性能とのマッチングのための情報の収集・整理をした．

調査項目は，①材料特性ならびに製造方法，②試験施工の例，③鉄筋コンクリート構造物ならびに鉄筋コンクリート構造物以外への適用，④環境への影響，⑤普及のための取組み，⑥苛酷環境での適用，⑦AAMs の実用化に向けた課題抽出アンケートならびに文献レビュー結果である．

①では GP の基礎物性に関する情報ならびに BFS ベースの AAM に関する基礎実験結果，火山灰や木質バイオマス灰などの未利用資源の有効利用に関する国内外の動向，埋立石炭灰の有効利用，各材料の反応性について調査した．②では，PC まくらぎ等への適用例ならびに課題（エフロレッセンス，乾湿繰返し時の収縮膨張によるひび割れ）を説明した．③では，GP コンクリート構造の力学特性ならびに設計，GP モルタルの開発や 3D プリント材料への適用について解説した．④では，環境影響評価，有害物質の固定，地盤環境改善，リサイクル方法について記述した．⑤では，新材料導入のためのマネジメントの例として，既往における高性能コンクリートの開発と社会実装プロセス，今後の材料開発が取り組むべき機能・性能を説明した．⑥では，宇宙環境での適用，地下や海底，海洋での適用性を解説した．⑦では，土木関係の様々な業種の技術担当者へのウェブアンケートの実施結果，ならびに海外のレビュー論文 31 編に対し，基本情報（タイトル，著者名，文献名など），アブストラクト，結論を和訳し，取りまとめた．

（執筆者：一宮　一夫）

２．材料特性ならびに製造方法

2.1　ジオポリマー（GP）ならびに高炉スラグ微粉末ベースの AAM の基礎物性

2.1.1　ジオポリマー（GP）[1)-3)]

（１）ジオポリマー(GP)の概要

ジオポリマー(GP)は，アルミナシリカ粉末(活性フィラ)とアルカリシリカ溶液(アルカリ溶液)の縮重合反応を基本とする固化体である．前者にはフライアッシュ(FA)や高炉スラグ微粉末(BFS)，後者には水ガラスや苛性ソーダが使用される場合が多い．固化に必ずしもカルシウム(Ca)を必要としないことから，製造時の CO_2 排出量を大幅に抑制できる．加えて，耐酸性，耐高温性，耐 ASR 性，有害重金属や放射性物質の固定にも優れ，インフラ長寿命化や原発汚染水および原発廃炉などの国家的課題への貢献が期待できる．ここでは，GP の概要，構成材料と分類，硬化メカニズムについて述べる．

GP は，1980 年頃にフランス人化学者のダビドビッツ氏が提唱，命名したもので，現在世界各国で研究開発が進んでいる．オーストラリアでは空港のエプロン部への適用例もある [4)]．わが国でも，鉄道枕木，下水集水ます，歩車道境界ブロックなどの工場製品を中心に施工実績が増えている．

日本コンクリート工学会(JCI)では 2015 年から 2 ヵ年にかけて「建設分野へのジオポリマー技術の適用に関する研究委員会」が設置され，わが国の GP 研究は一挙に進展した．現在は，その後継として土木学会で「土木分野におけるジオポリマー技術の実用化推進のための研究小委員会」が活動中である．

（２）材料構成と分類

図 2.1.1 に GP(コンクリート)とセメントコンクリートの構成材料の比較を示す．GP の活性フィラーとアルカリ溶液は，物質の状態からはセメントコンクリートのセメントと水に相当する．なお，GP はアスファルト同様に骨材を結合するためのバインダーを意味する場合と，骨材を含んだ混合物を意味する場合(必要に応じて，GP モルタル，GP コンクリートと表示)があり，いずれに該当するかは文脈から判断する必要がある．

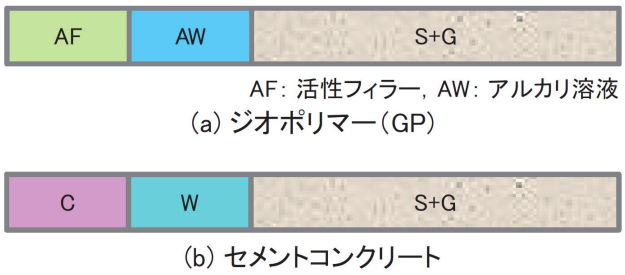
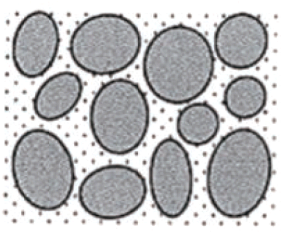
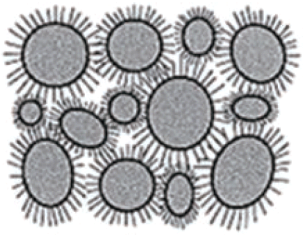


図 2.1.1 GP コンクリートとセメントコンクリートの材料構成の比較 [3)]

表 2.1.1 は GP とセメントの硬化初期段階における状態を単純化した模式図である．GP は粒子を無機質の不定形ゲルで固めた構造が特徴で，セメントとは大きく異なる [5)]．活性フィラーは，Si と Al が豊富な非晶質材料が有利で，FA が GP 材料として広く用いられる．一方の BFS は材齢初期における硬化促進材として用いられ，使用量は活性フ

表 2.1.1 GP とセメントの硬化初期の状態の比較 [3)]

GP	セメント
	
・粒子を無機質の不定形ゲルで固めた構造 ・水の蒸発 ・主としてAlの溶出	・マジックファスナーのように粒子同士が絡み合った集合体 ・水の吸収 ・Caの溶出

ィラー容積の 10-20 %の場合が多い．アルカリ溶液の主要材料の水ガラスは，粘性が非常に高く，それが GP の製造・施工の大きな支障となるが，苛性ソーダを加えることで溶液の粘性が低減し，かつ活性フィラーとの反応が促進される．さらに適量の水を加えることで流動性を高流動コンクリートに近い水準まで向上させることができる．

Ca 含有率，Al 含有率，アルカリ度で各種バインダーを比較すると**図 2.1.2** のようになる[6]．GP は Al 含有率とアルカリ度が高く，Ca 含有率が小さいことが特徴である．GP と近い材料構成の AAM(Alkali activated materials: アルカリ活性材料)は，GP よりも配合のバリエーションに富む．なお，GP と AAM の関係性は不明瞭で，「GP⊂AAM」もしくは「GP⊄AAM (つまり，GP≠AAM)」の 2 つの意見があるが，ここでは，GP と AAM は異なるものとして記述するが，これらを総称したアルカリ活性材料を AAMs と呼ぶことにする．

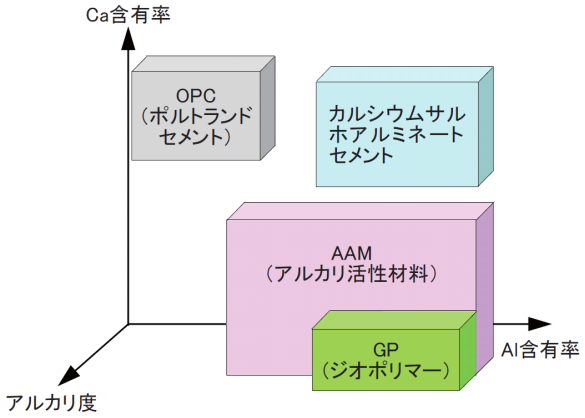


図 2.1.2 各種バインダーの Ca 含有率, Al 含有率, アルカリ度による分類[3]

表 2.1.2 に活性フィラーならびにアルカリ溶液に着目した場合の GP の分類を示す．活性フィラーによる分類では，AAM，GP に加えて，FA-BFS 併用系 GP がある．わが国では，FA-BFS 併用 GP に関する研究例が多く，「FA のみを使用した場合」と「FA-BFS 併用系」は低カルシウムの観点からいずれも GP とすることとする．

表 2.1.2 活性フィラーおよびアルカリ溶液における GP の分類

対象	種類		材料	生成物
活性フィラー	AAMs	AAM	高炉スラグ微粉末(BFS)など	C-A-S-H
		GP	フライアッシュ(FA) メタカオリン(MK)など	N-A-S-H
		FA-BFS併用系GP	FA, BFS (BFS置換率30 %以内)	N-A-S-H C-A-S-H
アルカリ溶液①	Na系		ケイ酸ナトリウム(水ガラス) 水酸化ナトリウム(苛性ソーダ)	N-A-S-H
	K系		ケイ酸カリウム 水酸化カリウム	K-A-S-H
アルカリ溶液②	一般法		水ガラス，苛性ソーダ，加水	
	溶解法		シリカフューム(SF) 苛性ソーダ，加水 ※SFと苛性ソーダから水ガラス成分を生成	

アルカリ溶液による分類には 2 系統ある．「Na 系(ナトリウム系)」と「K 系(カリウム系)」の比較では，材料コストは Na 系が K 系よりも低いことから，一般には Na 系が用いられる．施工性や耐高温性は K 系の方が有利である．「一般法」と「溶解法」の比較では，前者が広く用いられている．「一般法」はアルカリ溶液の粘性が高く，GP の製造・施工に難があるが，「溶解法」と比べて溶液の安全性は高い．「溶解法」は水ガラスを使用しないので GP の粘性を大幅に低減でき，その結果として配合の自由度が格段

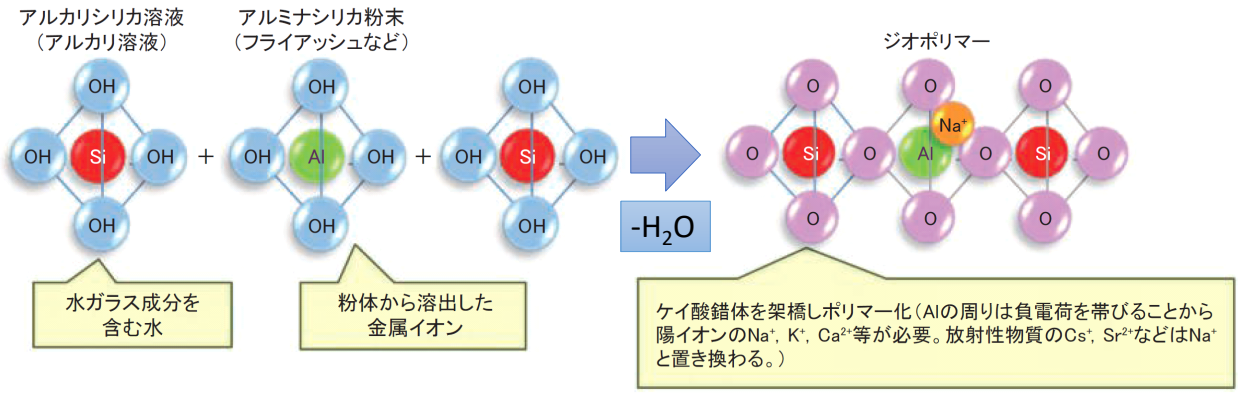


図 2.1.3　FA とアルカリ溶液の反応 [3)]

に高まるなどの利点も多く，工場製品を中心に GP 普及の牽引役となることが期待される [7,8)]．一方，苛性ソーダを GP 練混ぜ時に直に添加することから，作業安全性に対する特別な配慮が必要となる．

（3）硬化メカニズム

FA とアルカリ溶液を反応させた場合の硬化メカニズムは縮重合反応が基本であり，セメントコンクリートの水和反応とは異なる．**図 2.1.3** は反応の過程を模式的に表したものである．アルカリシリカ溶液(水ガラス)中には，ケイ酸イオン[SiO_4^{4-}]が存在する．また，強アルカリ環境下では，活性フィラーである FA, メタカオリンの非晶質相からケイ酸イオン[SiO_4^{4-}]およびアルミン酸イオン[AlO_4^{5-}]が溶出する．これらの縮重合反応が生じることでアルミノケイ酸塩のフレームワークが形成される．Si^{4+}と Al^{3+}の電荷の差から，Na^+，K^+，Ca^{2+}等の陽イオンがフレームワーク中に取り込まれる．放射性物質の Cs^+, Sr^{2+}などはこれらの陽イオンと置換できることから「有害物質の固定」が可能となり，これについては本報告書 5.2 に詳述した．以上が FA やメタカオリンなどの活性フィラーを用いたジオポリマーの硬化メカニズムである．

GP の反応生成物は，化学組成は天然ゼオライトに似ているが，非晶質構造である．ゼオライトは結晶性の化合物であり，その結晶構造は SiO_4 四面体のみで構成される石英(Quartz)のような 3 次元構造を有する．一方で GP の場合は，SiO_4 四面体中の Si^{4+}の一部が Al^{3+}に置換しており，電荷のバランスを保つためにNa^+やK^+等の陽イオンが取り込まれ, 規則性をもった長周期構造を取りにくくなる. そのため, GP の反応生成物は非晶質であり，3 次元の網目構造を有するとされている．

GP が開発された 1980 年代当初に使用されていた粉体はメタカオリンであり，これがアルカリ刺激作用を受けることで天然ゼオライトの構造に近いアルミノケイ酸塩の縮重合体を生成する．FA をアルカリ刺激条件下で養生を行うとやはりアルミノケイ酸塩の重合体が生成する．このため，FA を単独で使用したものは極めて低カルシウムであることから GP と呼んでも反応生成物の観点から差し支えない．しかし FA 単独では所要の初期強度を得ることができないために, BFS が併用されるようになってきた．

BFS を使用した場合は，ケイ酸アルミニウム系活性フィラー(メタカオリンや FA など)だけで作製したものと比べて反応生成物の構造は複雑である．ケイ酸イオンは，カルシウムイオンの存在下ではゼオライトのような 3 次元構造を形成しづらく，カルシウムケイ酸塩，すなわち C-A-S-H と記されるような層状あるいは鎖状の構造をとりやすいとされている．これは，上述の GP の反応生成物とは組成も構造も異なる．つまり，BFS を使用した場合は，その反応生成物を GP と呼ぶことは厳密には正しくない．

しかしながら，先に述べたように，わが国では，FA-BS 併用 GP に関する研究例が多く，「FA のみを使用した場合」と「FA-BFS 併用系」は低カルシウムの観点からいずれも GP とすることとした．

なお，JCI の GP 研究委員会では，わが国における GP 研究の実体を鑑みて，出発材料(使用材料)の相違で分類することとし，GP の定義を「セメントクリンカーを使用せず，非晶質のケイ酸アルミニウムを主成分とした原料(活性フィラー)とアルカリ金属のケイ酸塩，炭酸塩，水酸化物の水溶液の少なくとも 1 種類(アルカリ溶液)を用いて硬化させたもの」としている [1)]．

（執筆者：佐川　孝広）

参考文献

1) 日本コンクリート工学会，建設分野でのジオポリマー技術の適用に関する研究委員会報告書，2017
2) 日本コンクリート工学会，火山性堆積物のコンクリート用混和材としての高度利用に関するシンポジウム報告書･論文集，2022
3) 一宮一夫 : 低炭素で高機能バインダーとしてのジオポリマー～セメント産業への期待～，セメント･コンクリート，No.890, Apr., pp.18-23, 2021
4) https://www.wagner.com.au/main/our-projects/efc-geopolymer-pavements-in-wellcamp-airport/
5) 池田攻：二酸化炭素問題とジオポリマー技術，耐火物，Vol.58, No.8, pp.396-400, 2006
6) J. S. Van Deventer, J. L. Provis, P. Duxson and D. G. Brice:Chemical research and climate change as drivers in thecommercial adoption of alkali activated materials, Wasteand Biomass Valorization, Vol.1, No.1, pp.145-155, 2010
7) 上原元樹，南浩輔，平田紘子，山崎淳司／ジオポリマー硬化体の配合・作製法と諸性質，コンクリート工学年次論文集，Vol.37, No.1, pp.1987-1992, 2015
8) 山本武志，菊地道夫，大塚拓／NaOH 刺激による FA-GGBS-SF 混合型ジオポリマーにおける反応相の物理化学特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.40, No.1, pp.1869-1874, 2018

2.1.2　高炉スラグ微粉末ベースの AAM に関する基礎実験

高炉スラグ微粉末（BS）とアルカリ溶液で製造した AAM モルタルの基礎的知見収集を目的に，強度，長さ変化，高温抵抗性を調べた研究事例を示す[1)]．

活性フィラーには，BS（密度 2.92g/cm^3，比表面積 4009cm^2/g），アルカリシリカ溶液には，旧 JIS 1 号水ガラス（SS），苛性ソーダ（ペレット：SH），水道水（add-W）の混合液（A/W=0.055，Si/A=0.507），細骨材には混合珪砂を用いた．

表 2.1.1 に AAM モルタルの配合を示す．配合は 15 打フローが 200 程度になるように定めた．

表 2.1.1　AAM モルタルの配合（kg/m^3）

L			P	S
SS	SH	add-W	BS	
80.9	20.6	285.3	699.8	1129.1
	305.9			

L/P=1.39(容積比), A/W=0.055(モル比), Si/A=0.507(モル比)

練り混ぜ直後のモルタルは 4×4×16cm 供試体製作用の 3 連型枠に充填した．材齢 1 日で脱型した後は，所定材齢まで封緘養生（ラップで供試体全面をシール，20℃で静置）または気中養生（20℃，60%RH）を施した（**写真 2.1.1**）．また，比較のために製作した OPC モルタルの場合は，W/C=50%，S/C=3.0，標準養生とした．

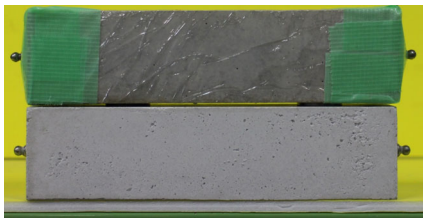


写真 2.1.1　供試体の外観（上段：封緘養生，下段：気中養生）

モルタルの強度は JIS A 5201（セメントの強さ試験），長さ変化は JIS A 1129-3（モルタル及びコンクリートの長さ変化測定方法:ダイヤルゲージ方法）に準拠して行った．

高温抵抗性試験では，角柱供試体（4×4×16cm）を長手方向で 2 分割し，電気炉（最高温度 1150℃）で加熱した[2)]．加熱温度は 200，500，800℃とし，冷却後の供試体の外観の観察ならびに圧縮強度を測定した．

図 2.1.1 に圧縮強度と材齢の関係，**図 2.1.2** に曲げ強度と材齢の関係を示す．標準養生を施した OPC モルタルの強度は，材齢とともに上昇し，その増加率は徐々に小さくなる．AAM モルタルの場合も供試体シールの有無に関わらず OPC モルタルと同じ強度上昇傾向を示している．

曲げ強度の場合も，材齢に伴う強度上昇傾向は圧縮強度と同様である．一方，AAM の強度水準は養生方法で異なり，封緘養生を施すことで曲げ強度が向上することが分かる．

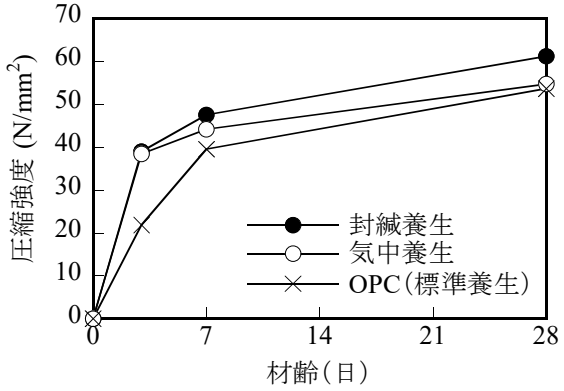


図 2.1.1　圧縮強度と材齢の関係

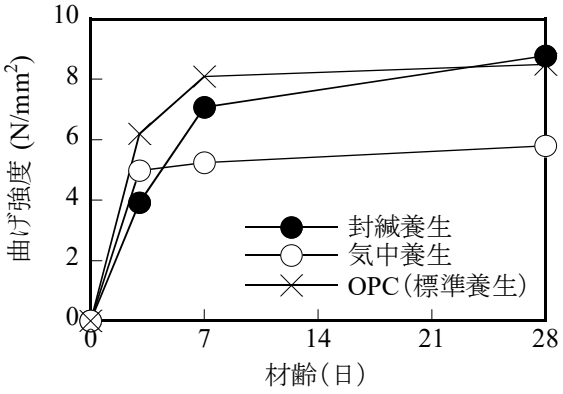


図 2.1.2　曲げ強度と材齢の関係

収縮ひずみと材齢の関係ならびに質量減少率と収縮ひずみの関係を**図 2.1.3** と**図 2.1.4** に示す. AAM モルタルは OPC モルタルの 2 倍以上の収縮ひずみが発生している．気中養生の方が封緘養生よりもひずみは大きいが，**図 2.1.4** の結果から，乾燥に伴う収縮よりも固化反応に伴う収縮が卓越することが分かる.

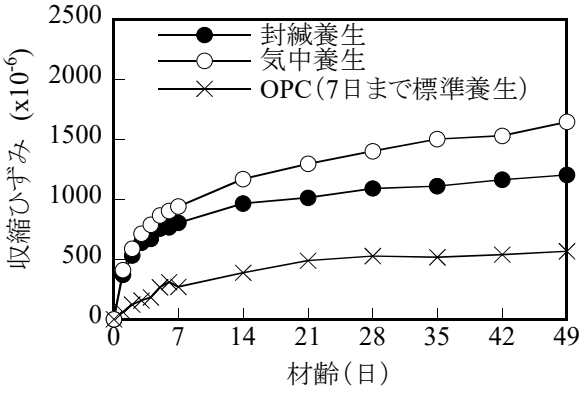


図 2.1.3　収縮ひずみと材齢の関係

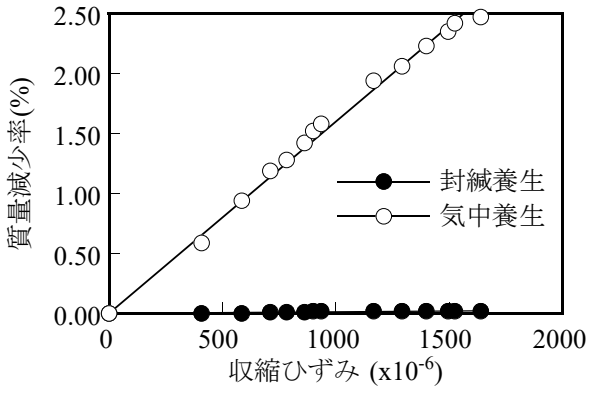
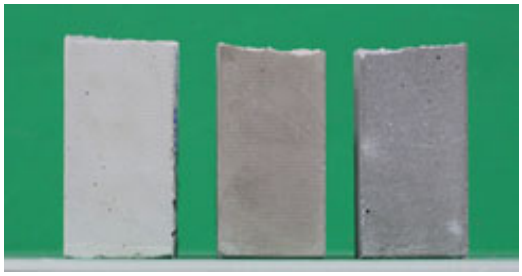


図 2.1.4　質量減少率と収縮ひずみの関係

写真 2.1.2 に加熱温度ごとの供試体外観，**図 2.1.5** に圧縮強度と加熱温度の関係，**図 2.1.6** に加熱温度ごとの加熱による質量減少率を示す．これらの結果より，AAM の高温抵抗性は一般のモルタルに近いこと, 200℃～500℃で内部水の脱水が著しいが 500℃～800℃での強度低下は内部水の脱水以外によるものであることが分かった.

本実験を通じて以下のことが分かった.

1) 材齢と圧縮強度の関係は，標準養生を施した OPC モルタルの場合と同様の傾向がある．また，封緘養生と気中養生の違いは見受けられない.
2) 材齢 28 日における曲げ強度／圧縮強度は，およそ 10%であり，OPC モルタルの場合（およそ 15%）よりも 5%程度小さい.
3) 収縮ひずみは，OPC モルタルの 2 倍以上である．また，乾燥に起因するものよりも，固化反応に起因するものが大きい.



200℃　　500℃　　800℃

写真 2.1.2　高温加熱後の供試体の外観

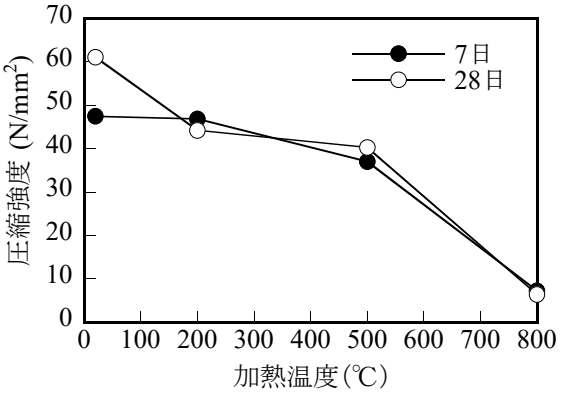


図 2.1.5　圧縮強度と加熱温度の関係

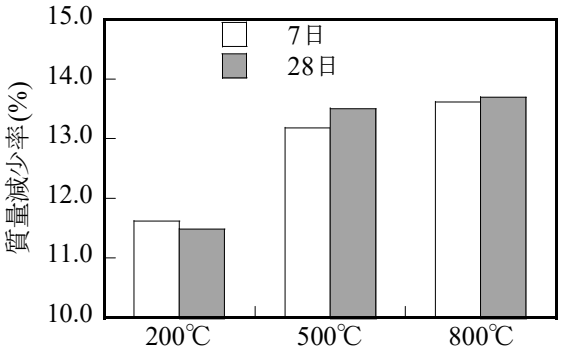


図 2.1.6　加熱温度ごとの質量減少率

4)　加熱に伴う圧縮強度は，500℃でおよそ 30%低下（加熱前との比較）した．AAM 固化体の高温抵抗性は，OPC 固化体と同等もしくはわずかに高い可能性がある．

（執筆者：一宮　一夫）

参考文献

1)　一宮一夫，甲斐みずき：高炉スラグ微粉末とアルカリ溶液で製造した AAM モルタルの基礎物性，令和 3 年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集，pp.683-684，2022

2)　一宮一夫，秋永史也，原田耕司，池田攻：フライアッシュ系ジオポリマーのアルカリ水比とフロー値ならびに高温加熱による外観や強度変化の関係，コンクリート工学年次論文集，Vol.40，pp.1851-1856，2018

2.2 未利用資源の有効利用

2.2.1 海外での動向

ジオポリマーの出発粉末(活性フィラー)は，一般にはフライアッシュ(FA)が用いられるが，ジオポリマーを生成するためのフィラー材料としては，Si，Al を主成分としたガラス質であればよく，FA 以外に多くの材料が研究対象となっている．これらの多くはアルミノケイ酸塩あるいはケイ酸塩，水酸化アルミニウム成分のいずれかを主成分とする材料である．海外の文献を調査すると，もみ殻灰，パームオイルフライアッシュ，コールボトムアッシュ，都市ごみ焼却灰，下水汚泥灰，木質バイオマス灰などの様々な業種からの灰や，鉱山等より発生する鉱さい，アルミニウムを多く含む材料（水酸化アルミニウム，α-アルミナ，ボーキサイト鉱山の廃材など)，廃ガラス，火山性堆積物(火山灰)，廃ガス脱硫セッコウ，コンクリート廃材など多岐にわたる[1)]．Google Scholar にて海外文献の調査を行うと，2022 年 3 月時点で，例えば「geopolymer, rice husk ash」で 9500 件，「geopolymer, biomass」で 7500 件，「geopolymer, volcanic ash」で 4000 件程度の文献がヒットする．これらの研究を総括したレビュー論文も存在し，本報告書の付録に示したレビュー論文の概要のうち，もみ殻灰に関するものを No.30 に，バイオマス灰に関するものを No.31 に，火山灰に関するものを No.29 に，FA 以外の材料を総括したものを No.14 と No.27 にそれぞれ掲載したので併せて参照されたい[2-6)]．

2.2.2 国内での動向

一方で，日本国内でこれらの未利用資源をジオポリマーの出発粉末として適用した研究事例は，海外と比較すると多くない．もみ殻灰をジオポリマーの出発粉体として適用した国内の研究事例は見出すことができなかった．しかし，もみ殻灰から高純度の非晶質シリカを抽出し，シリカフューム代替となるようなセメント混和材として適用できることが報告されており[7, 8)]，ジオポリマーへも適用可能と考えられる．また，ジオポリマー硬化体は，重金属の固定に優れることが一般に知られており，この特性を利用した都市ごみ焼却灰などの廃棄物焼却灰の処理技術に関する研究事例や[9-12)]，固化体を建設材料として利用するための調合，性能検討および重金属の固定率，溶出量に関する検討事例[13, 14)]が報告されている．

また，家畜排せつ物，下水汚泥，食品廃棄物，林地残材等の各種バイオマスのうち，利用率が低く最もバイオマス発電に向くのは木質バイオマスであり，近年のバイオマス発電所の急増によって木質燃焼灰発生量の増加が継続している．燃焼後の焼却灰は産業廃棄物であり，木質バイオマス灰の有効利用法の確立が急務となっている．このような観点から各種の利活用に関する研究が進められており，肥料[15)]や融雪促進剤[16)]への適用も検討されている．建設産業では，路盤材[17)]や地盤改良材[18)]としての適用やセメント混和材[19-22)]への適用が報告されているが，ジオポリマーへの適用報告は少ない[23, 24)]．

さらに，火山灰は，ガラス質を多量に含む天然ポゾランの一種であり，古くよりコンクリートの性能を向上させることが知られている．しかし，火山灰の物性は地域ごとに異なることや，天然ポゾランの一般的な課題である「反応性の遅さ」や「流動性の低下」などから幅広い普及には至っていない．一方，火山灰の非晶質量や粒度等を選別することで，火山ガラス微粉末をコンクリート用混和材として高度利用できることが報告され[25)]，2020 年には JIS A 6209 コンクリート用火山ガラス微粉末が制定された．日本コンクリート工学会(JCI)において火山性堆積物のコンクリート用混和材としての高度利用に関す

る研究委員会が設置されるなど，火山灰は「古くて新しい材料」として近年関心が高まっている．火山灰のセメント混和材としての適用検討数多くの事例があるものの[26-30]，国内でのジオポリマーへの適用を検討した研究は少ない[31-34]．

2.2.3　各種未利用資源の反応性

ジオポリマーの反応メカニズムは，2.1 にて述べたように縮重合反応が基本であり，セメントコンクリートの水和反応とは異なる．JCI の「建設分野へのジオポリマー技術の適用に関する研究委員会」では，ジオポリマーとは「セメントクリンカーを使用せず，非晶質のケイ酸アルミニウムを主成分とした原料(活性フィラー)とアルカリ金属のケイ酸塩，炭酸塩，水酸化物水溶液の少なくとも 1 種類を用いて硬化させたもの」と定義している[1]．「非晶質(ガラス)のケイ酸アルミニウム(アルミノシリケート)」の代表的なものとしてメタカオリン，フライアッシュがあるが，ここで述べたような各種の未利用資源も利用可能である．ジオポリマーの反応に求められる活性フィラーの性質としては，化学的特性として「ガラスの量」および「ガラスの質」，物理的特性として「比表面積(粉末度)」や「粒子形状」を挙げることができる．ここでは，各種未利用資源の「ガラスの量」，「ガラスの質」に着目し，ジオポリマーに適用した際の反応性について考察する．ただし，これら各種の未利用資源は，基本的には地産地消すべき材料であり，発生源や産出する地域で化学的特性は大きく異なることも考えられ，「バイオマス灰」，「火山灰」と一括りで評価することは困難であることに留意が必要である．

「ガラスの量」(ガラス化率)については，粉末 X 線回折(XRD)/リートベルト法などにより測定が可能であるが，国内での報告事例は少ない．アルミノシリケートであっても，石英(Quartz)やムライトのよう

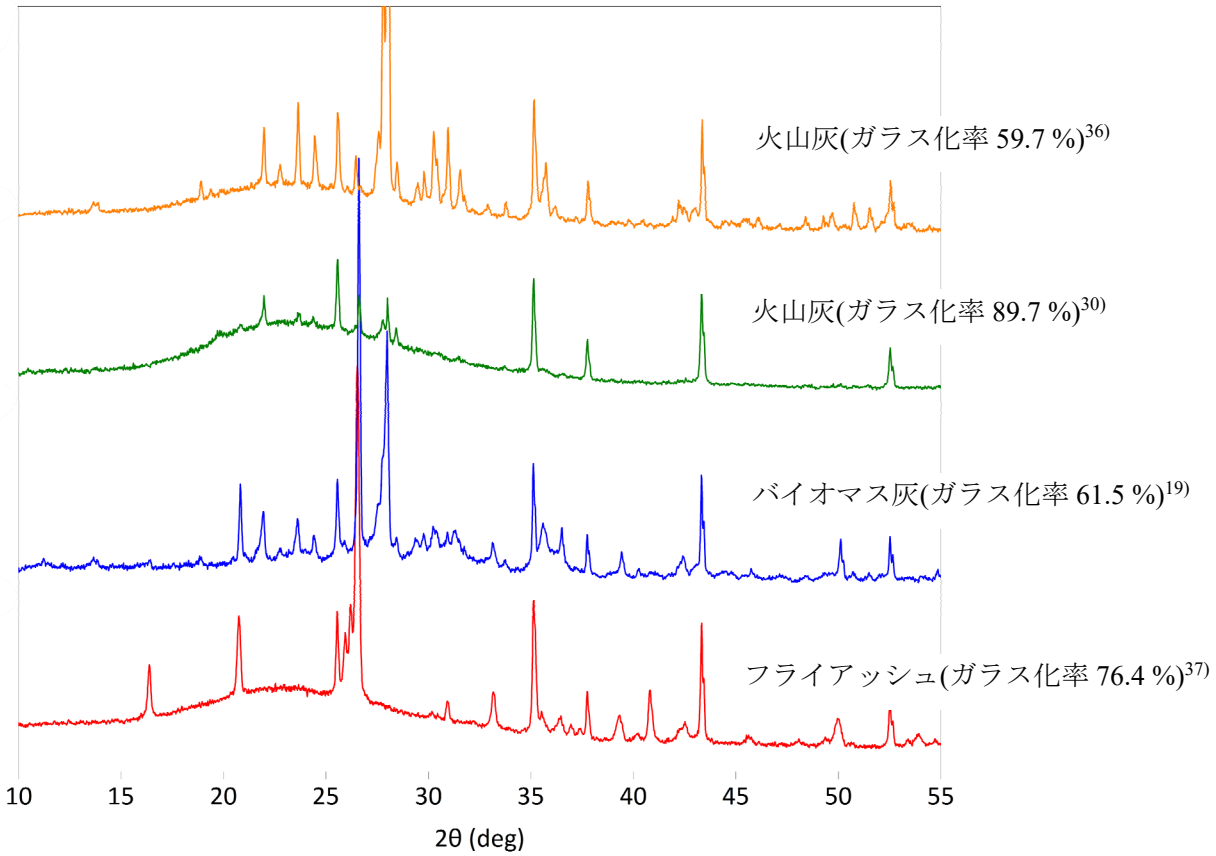


図 2.2.1　フライアッシュおよび各種未利用資源の XRD プロファイルとガラス化率

な結晶性化合物の場合，その反応性は低いと考えられ，ジオポリマーの反応に寄与する「ガラスの量」が反応性を評価する重要な指標となる．国内に流通する JIS A 6201 II 種のフライアッシュのガラス化率は 60～80 %程度であるが [35]，木質バイオマス灰のガラス化率は 60 %程度 [19]，火山灰のガラス化率は 90 %程度(北海道)[30]，60 %程度(群馬)[36]と報告されている．**図 2.2.1** には，フライアッシュ [37]，木質バイオマス灰および火山灰の XRD プロファイルを示す．非晶質を含む試料の XRD 測定を行うと，ブロードなピーク(アモルファスハロー)を示す場合が多い．

表 2.2.1　FA ガラス相の化学組成と塩基度

フライアッシュ	ガラス化率(%)	ガラス相の化学組成(%)					塩基度
		SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	
1	70.3	69.2	21.4	4.4	3.6	1.4	0.38
2	77.1	64.5	23.9	4.8	5.3	1.5	0.48
3	62.7	74.8	9.2	6.4	8.6	1.0	0.25
4	77.8	61.9	27.6	5.9	3.4	1.1	0.52
5	74.7	63.1	26.3	5.9	3.6	1.0	0.49

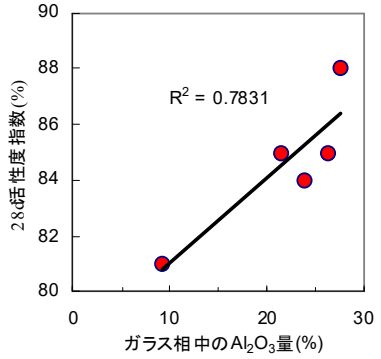


図 2.2.2 ガラス相中の Al_2O_3 量と 28d 活性度指数との関係

「ガラスの質」は，非晶質相の反応のしやすさを表し，指標としては塩基度($(CaO+MgO+Al_2O_3)/SiO_2$)が用いられることが多い．塩基度とは，酸性酸化物(電子受容体)に対する塩基性酸化物(電子供与体)の比であり，酸性酸化物(電子受容体)の主要なものとして SiO_2 [SiO_4^{4-}]，塩基性酸化物(電子供与体)の主要なものとして CaO [Ca^{2+}]，MgO [Mg^{2+}]，Al_2O_3 [Al^{3+}]の組成比から算定する．ただし，Al_2O_3 は両性酸化物であり，AlO_4^{5-} としても振る舞うため留意が必要である．非晶質アルミノシリケートは，SiO_4 四面体の主骨格の中に Ca，Mg，Al 等が取り込まれた構造を持っており，SiO_4 の中に取り込まれてる Ca，Mg，Al 等の割合が高いほど反応性が高い，すなわちガラスの塩基度が高いほど反応性が高いと考えると理解しやすい．ガラス相の化学組成は，バルクの化学組成を XRF 等により測定し，結晶相の化学組成を仮定して減じることで算定できる．

表 2.2.1 には，国内に流通する 5 種類のフライアッシュについて，ガラス相の化学組成と塩基度を算定した結果を，**図 2.2.2** には，ガラス相中の Al_2O_3 量と活性度試験での材齢 28 日活性度指数との関係をそれぞれ示す [35]．これらの結果が示すように，フライアッシュのガラス相中の塩基度が高く，Al_2O_3 量の多いほど，ポゾラン反応性が高い傾向のあることが示唆された．

ジオポリマーの活性フィラーに適用した際の「ガラスの質」について論じた研究は少なく，ガラス化率の測定を行っていない場合も多い．ここでは，まず各種未利用資源のバルクの化学組成について，いくつかの事例を示す．

表 2.2.2 には，木質バイオマス灰および火山灰のバルクの化学組成をフライアッシュと比較して示す．木質バイオマス灰は，化学組成の範囲が広く，燃焼する木質の種類や燃焼ボイラのタイプで化学組成が大きく変化することが考えられる．特に炉内脱硫するタイプのボイラの場合，投入した石灰に起因して CaO の含有量が多くなること，木材の組成に起因してアルカリ含有量が多いこと等に特徴がある．CaO の含有量が多い場合には，ガラスの量にも依存するが，フライアッシュよりも高炉スラグ微粉末に近い性質を有することも考えられる．

表 2.2.2　フライアッシュ，木質バイオマス灰，火山灰の化学組成

試料	文献	Chemical composition(%)									
		SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	TiO_2	MnO	Na_2O	K_2O
フライアッシュ	29)	62.8	21.5	4.2	2.0	0.8	0.4	1.1	0.0	0.7	1.4
バイオマス灰	18)	43.9	13.6	6.2	16.0	2.1	1.7	-	-	0.7	7.6
	19)	40.9	16.1	8.9	16.2	2.9	2.3	1.3	0.3	1.5	4.1
	20)	41.5	15.9	9.3	15.9	3.1	2.1	1.3	0.3	1.7	4.2
	21)	36.2	3.0	2.4	37.3	-	-	-	-	-	10.6
	15)	21-49	5-9	4-7	14-27	3-7	0.8-1.6	0.3-0.5	1.1-5.4	0.9-1.5	12-23
火山灰	25)	72.6	12.6	1.9	1.5	0.3	-	0.2	0.1	3.6	4.0
	29)	71.7	14.1	2.5	1.9	0.4	0.1	0.2	0.1	2.4	5.2
	29)	70.9	15.0	3.2	1.7	0.7	0.3	0.3	0.1	1.9	4.5
	36)	67.3	14.2	8.0	5.6	2.2	0.0	0.7	0.1	-	1.5

火山灰の化学組成については，比較的フライアッシュの組成に近く，フライアッシュと比較して SiO_2 量が多く Al_2O_3 量が少ない傾向にあった．ただし，これらの結果は北海道，群馬県，鹿児島県にて産出した火山灰の結果であり，より広範な地域での調査が必要と考えられる．

以上の結果を概観すると，限られた範囲での調査結果ではあるが，化学的特性の観点からは木質バイオマス灰，火山灰のいずれも非晶質のアルミノシリケートを含有し，ジオポリマーの活性フィラーとして適用できる性質を有していると判断される．ただし，フライアッシュに比較して火山灰のジオポリマー反応性は低く，木質バイオマス灰は火山灰よりもさらに反応性は低いと考えられる．一例として，**図 2.2.3** には，バイオマス灰(図中は焼却灰)および火山灰を用いたジオポリマーの圧縮強度を示す[23]．アルカリ溶液は 1 号水ガラスを用い，20 ℃封かんの養生条件である．常温養生であることや NaOH 溶液を用いていないことから，BFS 置換率が低い場合での強度発現は小さく，バイオマス灰と火山灰を比較すると，火山灰の反応性が高いと判断された．

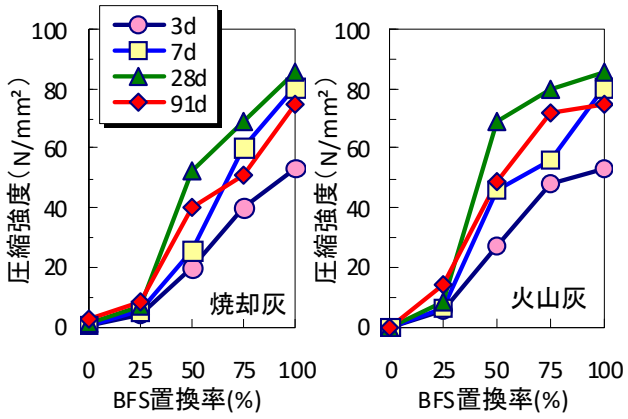


図 2.2.3　バイオマス灰（焼却灰）および火山灰を用いたジオポリマーの圧縮強度[23]

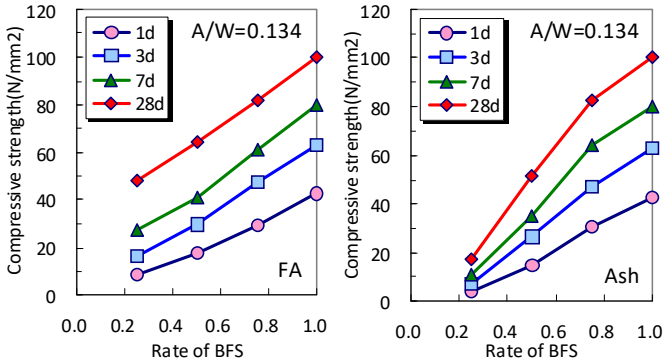


図 2.2.4　フライアッシュおよび火山灰を用いたジオポリマーの圧縮強度[34]

図 2.2.4 には，フライアッシュおよび火山灰を用いたジオポリマーの圧縮強度を示す[34]．アルカリ溶液は 2 号水ガラスおよび NaOH 水溶液を用いてアルカリ水モル比(A/W)を 0.134 に調製し，20 ℃封かん

の養生条件である．常温養生であることからBFS置換率が低い場合での強度発現は小さいが，フライアッシュと比較して火山灰の反応性は低いと判断された．

なお，ジオポリマーの反応に求められる活性フィラーの性質として，これまでに主に化学的特性である「ガラスの量」および「ガラスの質」に着目して論じてきた．一方で，セメントコンクリートと同様にジオポリマーは粉体と溶液の反応であることから，物理的特性として粉体の「比表面積(粉末度)」の影響も大きいことは論を俟たない．さらに，混錬後のフレッシュ性状は，「粒子形状」が大きく影響し，特にフライアッシュは球形粒子であり，ボールベアリング効果によってフレッシュコンクリートの流動性は向上してワーカビリティーは改善され，所要のコンシステンシーを得るために必要な単位水量を少なくすることができることが良く知られている．ジオポリマーについても同様の効果を有していると考えられ，フライアッシュの粒子形状は，他の未利用資源には具備しない優れた特徴といえ，各種未利用資源のジオポリマーの適用に際しては，フレッシュ性状を改善する化学混和剤の開発も併せて必要と考えられる．

（執筆者：佐川　孝広）

参考文献

1) 日本コンクリート工学会，建設分野でのジオポリマー技術の適用に関する研究委員会報告書，2017
2) Sk S. Hossain, P.K. Roy, Chang-JunBae: Utilization of waste rice husk ash for sustainable geopolymer: A review, Construction and Building Materials, Vol.310, No.6, 125218, 2021
3) B.S. Thomas et al.: Biomass ashes from agricultural wastes as supplementary cementitious materials or aggregate replacement in cement/geopolymer concrete: A comprehensive review, Journal of Building Engineering, Vol.40, 102332, 2021
4) S. Luhar, N.P. Rajamane, O. Corbu and I. Luhar: Impact of incorporation of volcanic ash on geopolymerization, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering , Vol.572, 012001, 2019
5) B.C. Mendes et al.: Application of eco-friendly alternative activators in alkali-activated materials: A review, Journal of Building Engineering, Vol.35, 102010, 2021
6) R.S. Krishna et al.: A review on developments of environmentally friendly geopolymer technology, Materialia, Vol.20, 101212, 2021
7) 梅田純子，高田龍一，道浦吉貞，近藤勝義：農作物非食部バイオマスから高純度非晶質シリカの抽出プロセスとコンクリート用混和材としての利活用，スマートプロセス学会誌，Vol.3，No.5，pp.323-327, 2014
8) 羅承賢，金沢智彦，近藤勝義，梅田純子：籾殻由来のナノ構造体シリカ微粒子を用いたセメントの低アルカリセメントへの適用検討，第71回セメント技術大会講演要旨，pp.8-9, 2017
9) 塩田憲司，中村祐太，高岡昌輝：ジオポリマー法による易溶性飛灰中セシウムの固定化機構の解明，KEK Progress Report, 2020
10) 辻井張希ほか：ジオポリマーによる溶融飛灰中セシウム不溶化に対するNaOH濃度の影響，第31回廃棄物資源循環学会研究発表会，pp.427-428, 2020
11) 辻井張希ほか：アルミノケイ酸塩のアルカリ溶液への溶解特性がジオポリマーによる熱処理飛灰中

セシウム不溶化に与える影響，廃棄物資源循環学会論文誌，Vol.32, pp.136-146, 2021
12) 齋藤凜太郎，小川熟人，小池裕也：都市ごみ焼却飛灰・土壌混合ジオポリマー固化に用いる土壌種と放射性セシウム溶出抑制効果の関係，第 32 回廃棄物資源循環学会研究発表会，pp.419-420, 2021
13) Z. Li, R. Kondo and K. Ikeda: Recycling of Waste Incineration Bottom Ash and Heavy Metal Immobilizationby Geopolymer Production, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.19, pp.259-279, 2021
14) Z. Li, R. Kondo and K. Ikeda: Development of Foamed Geopolymer with Addition of Municipal Solid Waste Incineration Fly Ash, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.19, pp.830-846, 2021
15) 高橋徹ほか:木質系バイオマス燃焼灰の安全性評価および有効利用, 第 19 回廃棄物学会研究発表会, 2008
16) 折橋健ほか : 木質燃焼灰の雪上散布における融雪水の安全性の検討，第 29 回廃棄物資源循環学会研究発表会，pp.221-222, 2018
17) 山田道昭，杉山悠太，松本健時：リサイクルビーズを利用した資源の有効活用に向けた取り組みについて，令和 2 年度 森林・林業交流研究発表会，2020
18) 前川明弘ほか : 木質バイオマス焼却灰の地盤改良材としての適用性に関する基礎的実験，第 30 回廃棄物資源循環学会研究発表会，pp.211-212, 2019
19) 佐川孝広，北島和樹，丹波広樹 : 木質バイオマス焼却灰のセメント混和材への適用，第 70 回セメント技術大会講演要旨，pp.100-101, 2016
20) 佐川孝広：木質バイオマス焼却灰の反応性評価とセメント混和材への適用，日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), pp.191-192, 2018
21) 堀江亮介ほか：木質系バイオマスボイラー燃焼灰の混和材利用に関する基礎的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.40, No.1, pp.1941-1946, 2018
22) 前川明弘ほか：木質バイオマス焼却灰を混入したモルタル硬化体の各種特性に関する基礎的研究, 第 29 回廃棄物資源循環学会研究発表会，pp.209-210, 2018
23) 佐川孝広：木質バイオマス焼却灰のジオポリマー活性フィラーへの適用，日本建築学会大会学術講演梗概集(中国), pp.725-726, 2017
24) 周藤将司：木質バイオマス焼却灰のジオポリマーへの利用，アグリバイオ，Vol.5, No.10, pp.879-881, 2021
25) 友寄篤，野口貴文，神山研一，東和朗：コンクリート用火山ガラス微粉末を用いたコンクリートの基本特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.40, No.1, pp.255-260, 2018
26) 日本コンクリート工学会，火山性堆積物のコンクリート用混和材としての高度利用に関するシンポジウム報告書･論文集，2022
27) 谷口円，高橋徹，垣原康之，佐川孝広：北海道に分布する火山灰の特性とポゾラン反応性，コンクリート工学年次論文集，Vol.35, No.1, pp.97-102, 2013
28) 谷口円，高橋徹，吉田行，佐川孝広：北海道に分布する火山灰のポゾラン反応性とコンクリートの耐久性，コンクリート工学年次論文集，Vol.36, No.1, pp.724-729, 2014
29) 勝野太市，上原稔生，佐川孝広：火山ガラス微粉末のセメント混和材への適用，第 74 回セメント技術大会講演要旨，pp.174-175, 2020

30) 佐川孝広，谷口円：北海道にて産出した火山灰のセメント混和材への適用，日本コンクリート工学会，火山性堆積物のコンクリート用混和材としての高度利用に関するシンポジウム報告書･論文集，pp.19-22, 2022
31) 橋本忍ほか:火山灰からのジオポリマーの作製, 日本セラミックス協会 2012 年年会講演予稿集, 2012
32) 武田はやみ：非晶質シリケートのアルカリ活性化による新規建築構造材料の創製に関する研究，名古屋工業大学博士論文，2014
33) 永縄勇人：未利用原料を用いた新規不焼成建築材料の開発と機能性の発現，あいち産業科学技術総合センター 研究報告，pp.70-73, 2016
34) 勝野太市，吉野千紘，佐川孝広：火山ガラス微粉末のジオポリマーへの適用，第 74 回セメント技術大会講演要旨，pp.172-173, 2020
35) 日本コンクリート工学会，セメント系材料の自己治癒に関するシンポジウム，2011
36) 佐川孝広ほか：旧韮塚製糸場から出土した明治初期石灰コンクリートの材料分析，第 76 回セメント技術大会講演要旨，2022
37) 坂本久宣ほか：フライアッシュの ASR 抑制効果に関する検討，令和 3 年度土木学会全国大会第 76 回年次学術講演会，V-359, 2021

2.3　埋立石炭灰の有効利用

2.3.1　フライアッシュと石炭灰

国内の石炭火力発電所から発生する石炭灰（フライアッシュ，クリンカーアッシュ，シンダーアッシュの総称）は，2021 年度に電気事業から 8,540 千トン，一般事業から 3,804 千トン，合計で 12,344 千トン発生した[1)]．これらのうち，JIS A6201 に定められるコンクリート用フライアッシュの品質基準に基づき，コンクリート混和材およびセメント混合材として品質管理して出荷されたフライアッシュは 25 万トンであった[1)]．有効利用される石炭灰のうち，セメント製造時の粘土代替材料として 8,177 千トン，道路路盤材製造用材料として 430 千トン，建材ボート用材料として 505 千トン等のように様々な製品の原料，材料として利用されている．なお，この集計値の中で「その他」として「土地造成用途」で利用される石炭灰が 1,229 千トン存在する[1)]．これは，石炭火力発電所の敷地内の海岸沿い，港湾の一部を締め切り，公有水面埋立法および廃棄物処理法に基づき遮水シート等による遮水工が施された状態で石炭灰を埋立て，平坦な土地を造成することを目的として石炭灰を利用した量に相当し，集計上有効利用された石炭灰として扱われている．一方，発電所敷地から少し離れた丘陵地の谷間に遮水工を施し，廃棄物処理法に基づき石炭灰を埋め立て，造成する場合は埋立処分として扱われるため，有効利用外として扱われる．

2.3.2　既成灰

既成灰とは上述のように土地造成用途ならびに埋立処分として埋め立てられた石炭灰を指し，埋立て時の加水，ならびに雨水の浸透，そして，海岸沿いでの埋立てでは海水が含まれる等，中長期的に湿潤状態に置かれていることを特徴とする．また，ここで「石炭灰」と称するようにコンクリート用混和材として用いられるフライアッシュのように均質な状態ではなく，クリンカーアッシュ，シンダーアッシュも混在するため，粒子径，粒子形状そしてセメントとの反応に必要な非晶質量に代表される化学特性が不均一な状態であることも特徴とする．一部地域では既成灰を掘り起こし，道路路盤材製造用原料として再利用してその埋立て地を空にしたことが知られているが，一般的には土地造成後に跡地利用を行うことを地元自治体等に対して宣言しているため，既成灰を掘り起こして再利用することは困難とされている．しかし，資源循環型社会の構築が求められている昨今では既成灰の再利用を進めることも有用であると考える．将来的に AAM 用材料として利用する可能性があるため，既成灰を採取し，物理化学特性を評価した例[2)]を以下に示す．

（1）既成灰試料

石炭灰の埋立て処分場の複数の区画から埋立て時期（1985 年～1994 年）の異なる試料を表層部から 0.5~2m の範囲を対象として 2007 年に採取した．なお，埋立て時期は，発電所に保管されている資料に記述されている情報を基に判断した．各試料の試料名と埋立て時期を**表 2.3.1** に示す．各試料は，40℃乾燥炉で自由水分量による質量減少が生じなくなる状態まで乾燥させた後にア

表 2.3.1　既成灰の埋立て時期

試料名	埋立て時期
St85a	昭和 60 年（1985 年）
St85b	昭和 60 年（1985 年）
St90	平成 2 年　（1990 年）
St93	平成 5 年　（1993 年）
St94	平成 6 年　（1994 年）

表 2.3.2　既成灰試料およびセメントの化学組成およびブレーン値・密度

	強熱減量 (%)	SiO_2 (%)	Al_2O_3 (%)	Fe_2O_3 (%)	Na_2O (%)	K_2O (%)	MgO (%)	CaO (%)	SO_3 (%)	ブレーン値(cm^2/g)	密度 (g/cm^3)
St85a	5.6	48.3	28.3	2.7	<0.02	0.59	1.65	5.8	0.24	4550	2.26
St85b	1.8	67.3	18.3	4.1	1.07	1.75	1.06	2.2	0.01	4730	2.28
St90	3.7	60.9	20.1	3.4	<0.02	1.48	1.13	2.4	0.068	4050	2.30
St93	9.5	57.3	20.0	3.9	0.43	0.95	0.93	2.2	0.075	4630	2.20
St94	7.6	44.0	26.2	5.0	<0.02	0.60	1.76	8.0	0.266	3950	2.35
OPC	0.63	21.1	5.41	2.8	0.21	0.42	1.74	64.7	2.09	3340	3.18

注）St85a～St94：同一発電所埋立て処分場から採取した既成灰，OPC：普通ポルトランドセメント

ルミナ乳鉢を用いて解砕し，目開き 0.86mm の篩で砂等の粗粒子を除去した状態で各試験に供した．なお，St85a と St85b は，いずれも 1985 年に埋め立てられた石炭灰であるが，埋立て時期が異なる試料である．

（2）既成灰の化学組成と物理特性

各試料の化学組成およびブレーン値, 密度を**表 2.3.2** に示す. 試料の強熱減量に着目した場合, St85a, St93, St94 は強熱減量が 5%以上となり, 強熱減量の指標では混和材用フライアッシュに対する規格（JIS A6201-1999）で II 種枠（強熱減量 5%以下）を満たせない．なお，強熱減量には可溶性 Ca が炭酸イオンと結合した炭酸カルシウムの分解に伴う減量，ならびに析出物を構成する結合水の気化に伴う減量が含まれるため，炭素量測定による未燃成分量の同定が必要である．

St85a と St94 の SiO_2 量は各々48.3%，44.0%であり，他の 3 試料に比べて少ない．そして，St85a と St94 の Al_2O_3 量が各々28.3%，26.2%，CaO 量が各々5.8%，8.0%であり，他の 3 試料に比べて多いことを特徴とする．

いずれの試料においてもブレーン値が 3900cm^2/g 以上となる高い値を示しており，コンクリート用混和材 JIS A6201-1999 で規定される II 種品ブレーン値（2500~5000cm^2/g）に相当した．密度はいずれの試料においても 2.20～2.35 であり，有意な差は認められなかった．

（3）粒度分布と粒子形状

St85a と St90 の粒度分布では比較的大きな相違が認められた．粒径 20～30μm 以上の粒子存在割合は St85a では多く，St90 では少なかった（**図 2.3.1**）．そこで，粒度分布に大きな相違が認められた St85a と St90 を対象として粒子の表面性状を比較することにした．St85a と St90 の SEM 像を**図 2.3.2～図 2.3.9** に示す．

St85a と St90 はともに球状の単粒子と粗大な塊状粒子が混在した状態であり，乾燥処理後の解砕処理においても単粒子に分離できない程度の固着力が単粒子間に作用していることが明らかになった．また，いずれの粒子においても表面に厚さ 20nm 程度の薄板状および粒径 100nm 以下の粒状の析出物が付着しており，長期間の貯蔵環境下で微視的な変質が生じていることを

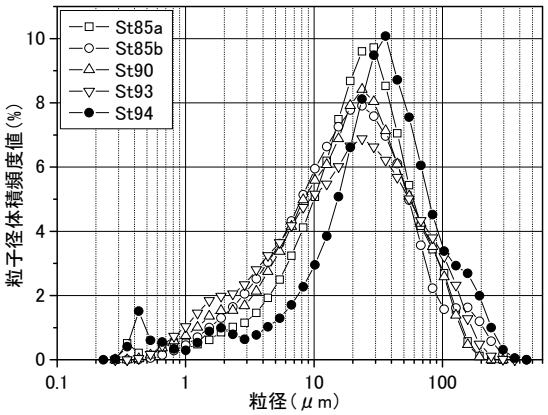


図 2.3.1　既成灰の粒度分布

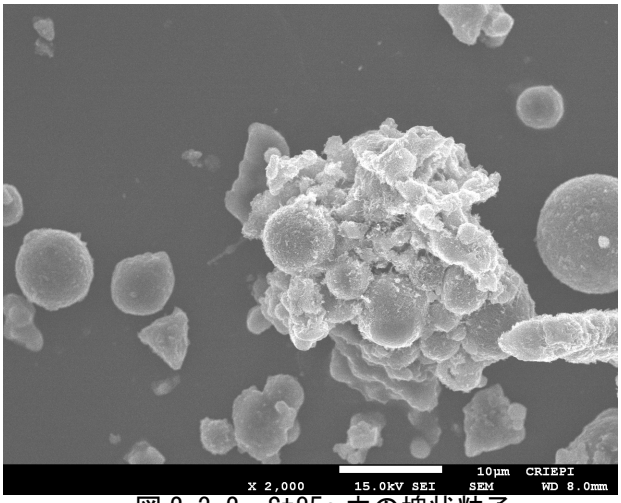


図 2.3.2　St85a 中の塊状粒子

粒径 1～10μm 程度の球状粒子が固着して粒径 30μm 程度の塊状粒子を形成している．埋立て時にセメント系固化材を使用していないが，粒子間を埋め尽くすほどに析出相が充填され状態になっている．

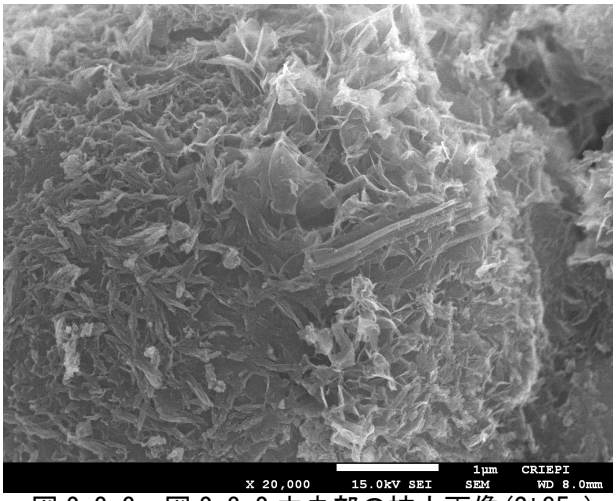


図 2.3.3　図 2.3.2 中央部の拡大画像(St85a)

塊状粒子を形成する球状粒子表面は繊維状～薄板状の析出物で覆われている．この析出物を介して粒子同士が固着したと考えられる．

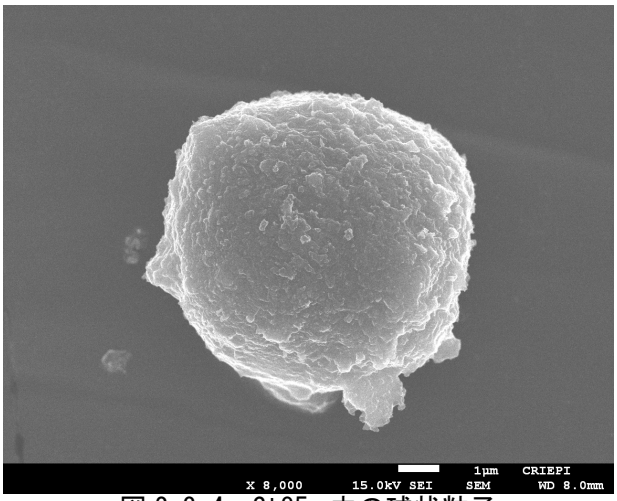


図 2.3.4　St85a 中の球状粒子

注）粒径 10μm 以下の粒子も存在するが，JIS 品として流通する一般的なフライアッシュの粒子表面のような平滑性は失われている．

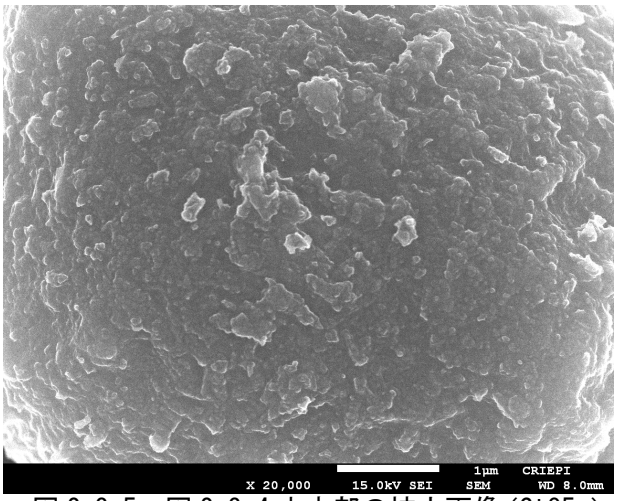


図 2.3.5　図 2.3.4 中央部の拡大画像(St85a)

注）粒子表面は粒径 100nm 以下の微細な粒状体が融着，そして積層することで凹凸面を形成している．粒径 100nm 以下の粒状体は非晶質相から溶出したコロイド状の物質であると推測される．

確認した（**図 2.3.5**，**図 2.3.9**）．これらの析出物は，**図 2.3.9** に示す画像のように粒径 20nm 程度のコロイドと推察される粒状体（**図 2.3.9**）が積層することで形成されたと考えられる．このコロイド状の粒状体は，埋立て処分された状態下でフライアッシュ表層部の Na，K 等のアルカリ成分が雨水の浸透により溶出し，フライアッシュ粒子がアルカリ性の浸出液に接触した状態に置かれることで非晶質相が変質し，溶解することで形成したと考えられる．

（4）鉱物相

各試料の鉱物相の同定結果を**図 2.3.10** に示す．構成量の多い鉱物相としてのクオーツ（Q，SiO_2）およびムライト(Mu, $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$)を示すピーク強度は試料間で有意な差が認められなかった．マグネタイト(Ma, Fe_3O_4）を示すピークは St90 と St94 で顕著に認められた．また，炭酸カルシウム（CC，$CaCO_3$）を示すピー

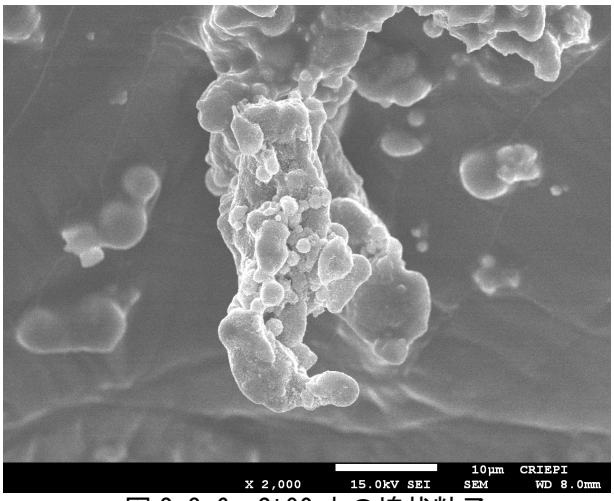


図 2.3.6　St90 中の塊状粒子

注）粒径 1～10μm 程度の粒子が固着しているが，図 2.3.2 とは異なり，粒径 5～10μm 程度の粒子は球状のみではなく，丸みを帯びた不定形状粒子も固着している．

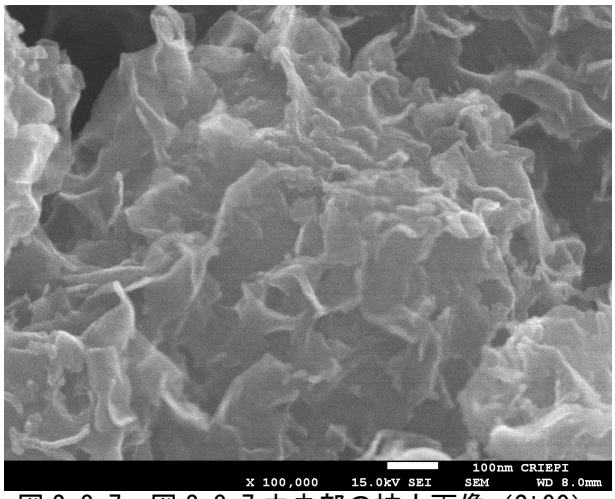


図 2.3.7　図 2.3.7 中央部の拡大画像（St90）

注）厚さ 20nm 程度の薄板状の析出物が積層している．貯蔵中に非晶質相が溶解したことに起因すると推察される．

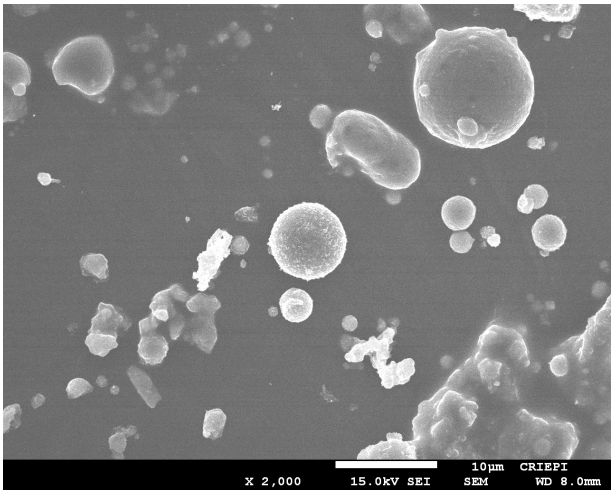


図 2.3.8　St90 中の球状粒子

注）表面が微細な凹凸を形成している球状粒子（画像中央部）と比較的平滑な面で覆われている球状粒子（画像右上部）が混在している．

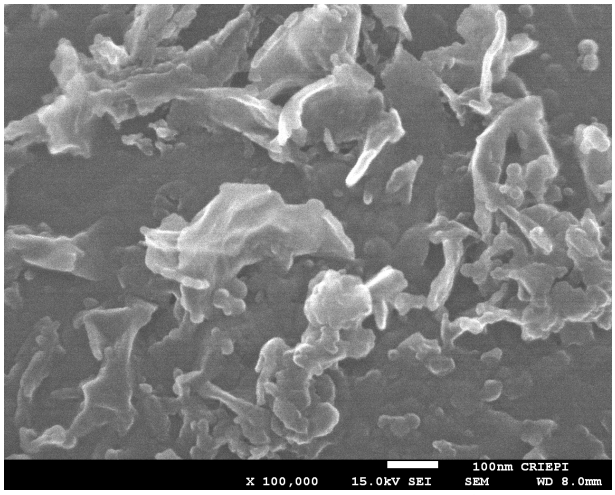


図 2.3.9　図 2.3.8 中央部の拡大画像（St90）

注）微細な凹凸面を形成した粒子の表面は，厚さ 20nm 程度の薄板状の析出物とともに，その周囲にコロイド由来と推察される粒径約 20nm の粒状体が密集している．非晶質相が溶出し易い形態になっていると推察される．

クはいずれの試料においても発生したが，St85a，St90，St94 において顕著に認められた．これは石炭灰に含まれていた生石灰（CaO）が溶出し，雨水に含まれる炭酸イオンと反応して生成したことによると推察した．

（５）結合水等の揮発成分量

各試料の質量減少曲線を**図 2.3.11** に示す．いずれの試料も 40℃の乾燥炉において質量減少が無くなるまで乾燥処理を行っているため，粒子に付着していた水が揮発した状態にあると考えられる．室温から 950℃までの間における質量減少率は St90 が-1.83%，St94 が-9.52%を示し，試料間で大きな差が認められた．特に St94 の質量減少率が大きい原因としては粒子表面の非晶質の析出物から放出される水の量が多いことが考えられ，化学組成として CaO を多く含むために Ca-Si 系の二次鉱物相を生成している可能性が示唆されるが，

原因を特定するためには析出物の元素組成の分析と併せて化学的な結合状態を NMR 等によって分析する等，詳細な検討が必要である．

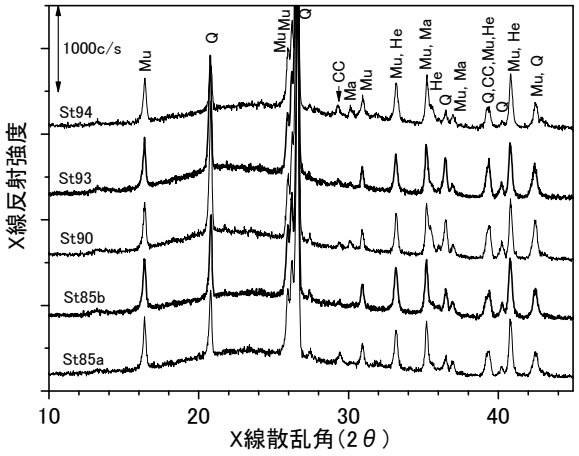


図 2.3.10　既成灰に含まれる鉱物相

注）Q：クオーツ，Mu：ムライト，Ma：マグネタイト，
He：ヘマタイト，CC：炭酸カルシウム

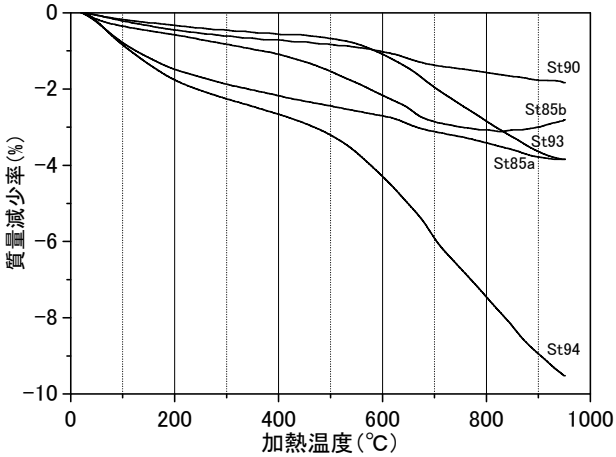


図 2.3.11　既成灰の質量減少曲線

（6）フロー値比

JIS A 6201 に示される基本的な配合としたモルタルのフロー値比を**図 2.3.12** に示す. St85b, St90, St93 を用いたモルタルのフロー値比は各々101%，96%，96%となり，JIS A6201 に示される II 種のフライアッシュに相当する良好な流動性をもたらした. 一方, St85a と St94 を用いたモルタルのフロー値比は各々80%，68%となり，流動性が大幅に低下した．これは，球状粒子が固着した塊状粒子（**図 2.3.2**）を多く形成することで粗大粒子の構成割合が高まったことに起因すると考えられる（**図 2.3.1**）．St85a および St94 のブレーン値は各々4550cm^2/g，3950cm^2/g であり，いずれも高い値であるが，フロー値比が極端に低くなることから既成灰に含まれる微粒子および粗大粒子の存在度（粉末度）を評価する場合に比表面積を表す指標であるブレーン値を用いることは適切ではないと考えられる．一方，St85a および St94 の粒度分布指標としての累積 50%粒径は各々20.5μm，28.6μm であり，他の試料に比べて大きな値を示しており，粉末度が低いと判断できる．したがって，既成灰の粉末度を評価するためには粒度分布指標として累積 50%粒径（メディアン径）を用いることが適切であると考えられる．

（7）活性度指数の経時変化

各既成灰をセメントに対して質量置換率 25%で混和したモルタルの強度発現性を各試料の活性度指数として**図 2.3.13** に示す．St90 と St93 は材齢 28 日，および 91 日における活性度指数が各々81%（28 日）および 91%（91 日），80%（28 日）および 92%（91 日）を示し，JIS A 6201 に示される II 種のフライアッシュに相当する活性度指数（28 日：80%以上，91 日：90%以上）を示した．また，St85b は材齢 28 日において活性度指数が 78%となり，IV 種相当（28 日：60%以上，91 日：70%以上）の値を示した．そして，これらの 3 試料を用いた場合は材齢 189 日時点で活性度指数が 98%以上となり，良好な強度発現性を示した．

一方，St85a と St94 の活性度指数は，材齢 28 日から 365 日にかけて他の試料より低くなり，JIS A 6201 に示される IV 種のフライアッシュの材齢 28 日活性度指数の規定値となる 60%に満たなかった．なお，St85a と St94 を用いたモルタルの流動性は他の試料を用いた場合に比べて非常に低く，ミキサーによる練混ぜが困難であったため，高性能減水剤を添加した試験も実施した．モルタルの流動性を低下させる St85a と St94 には複数の球状粒子が固着した塊状粒子（**図 2.3.2**）が多く存在し，粒径 1～10μm の微小粒子数が少ないことも強度発現性が低くなった要因の一つと考えられる．

St85a と St94 を使用する際に高性能減水剤を添加して他の試料を使用した場合と同程度のフロー値比に調整したが，活性度指数は他の試料を使用した場合に比べて 20%程度以上低下した．コンクリート用混和材として利用する場合の既成灰の品質の良否を判断する指標の一つとしてモルタル試験によるフロー値比を用いることができると考えられる．

既往の研究 [2)]の検討範囲では，良好なモルタルフロー値比を示す既成灰は材齢 28 日時点から良好な活性度指数を示し，材齢 1 年まで活性度指数の増加傾向が持続すること，そして，粉末度が低く，モルタルフロー値比が良好ではない既成灰を用いた場合でも活性度指数の増加傾向が材齢 1 年まで持続することが示された．

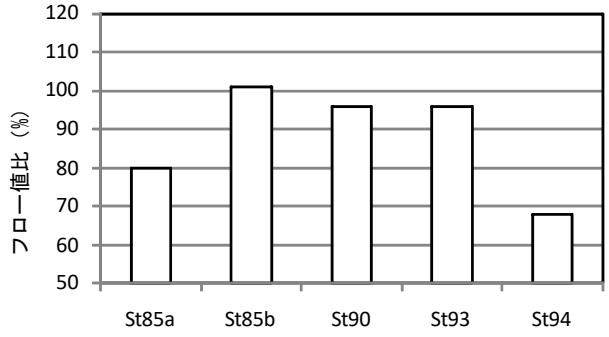


図 2.3.12　フロー値比の比較

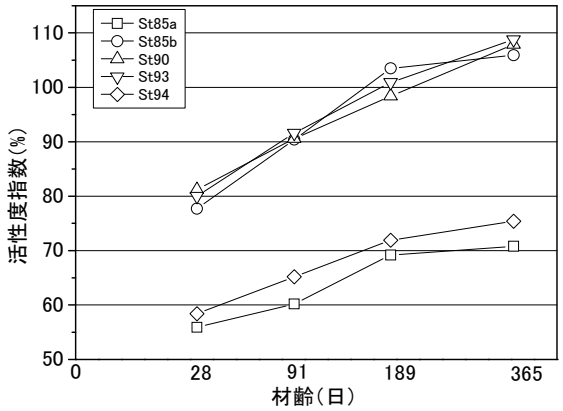


図 2.3.13　活性度指数の経時変化

（8）既成灰の混和材利用および AAM 用材料としての利用における課題

既往の研究 [2)]では内陸部の埋立て処分場から 5 種類のフライアッシュ試料を掘り出し，40℃乾燥炉を用いた乾燥処理を施した後に解砕処理と網ふるいによる砂等の粗大粒子除去を行った．

一連の前処理を行った 5 種類の試料のうち 2 試料は JIS-II 種相当の活性度指数およびモルタルフロー値比を示し，コンクリート用混和材としての適応性が示唆された．ただし，モルタル試験による基礎的な特性評価に留まるため，コンクリートによる流動性および空気量等の諸特性に係る検証試験を行う必要がある．

5 種類の試料に対して同一の前処理を施したが 2 試料はモルタル流動性を大きく低下させ，練混ぜが困難な状態になった．この原因の特定には至らなかったが，粒子同士が固着し，塊状粒子を形成することによる微小粒子の減少，すなわち粉末度の低下の影響によると推察した．また，これらの流動性を著しく低下させる試料を使用した場合はモルタルの圧縮強度も著しく低くなり，これは孔径 0.1μm 以上の粗大な細孔がモルタル硬化開始直後から形成されることに起因する．個々の粒子はいずれの試料においてもポゾラン反応をもたらし，セメント水和物相である C-S-H 相に Si，Al を拡散させ，組織の緻密化

が生じているが，粗大空隙の形成がその効果よりも強度に対して大きな影響をもたらすことが示されている．

既成灰を AAM 用材料として利用する場合は，混和材利用と同様に流動性と強度発現性の確保が課題になると推測できる．流動性を確保するためには高性能減水剤等の化学混和剤を利用する必要がある．しかし，AAM 用化学混和剤は国内では汎用品として流通しておらず，技術的に未成熟であるため，開発が望まれる．また，AAM の硬化では水ガラスのゲル相にフライアッシュ等の非晶質相から溶解した Al 等のイオンが拡散，固定化される必要がある．既成灰の表層部は一般的な混和材用フライアッシュとは異なり，低 Ca/Si 比となる C-S-H 相で覆われている場合があるため，AAM 母材となる水ガラス相に Al が溶解，拡散するまでに比較的長い時間を要すると考えられる．すなわち，AAM の硬化速度ならびに強度発現性は一般的なフライアッシュを利用する場合に比べて緩慢，そして低下すると推察する．AAM 用材料として既成灰を利用する場合はこれらの点に留意して予備的検討を行う必要がある．

（執筆者：山本　武志）

参考文献

1) 一般財団法人石炭エネルギーセンター：石炭灰全国実態調査報告書（令和元年実績），2021 年 3 月．
2) 山本武志，井野場誠治，下垣久：埋立処分石炭灰のコンクリート用混和材としての適用性評価－同一発電所の既成灰を対象とした基礎的検討，電力中央研究所報告 N11008，2012 年 4 月．

３．試験施工の例

3.1　実施例[1)]

3.1.1　PC まくらぎならびに左官補修

写真 3.1.1 は，蒸気養生の製品例として，鉄道用まくらぎに GP を活用した事例[2)]である．まくらぎは，RC である短まくらぎから PC（プレストレスト・コンクリート）まくらぎまで種々の構造のものがあり，かつ比較的高い強度が要求されるため，ここで得られた知見は，他の製品に応用が可能である．鉄道総研では繊維補強により鉄筋を減らした短まくらぎから，PC まくらぎと種々のまくらぎを GP により試作している．例えば，酸劣化が顕著で一般的なコンクリートまくらぎの適用が難しい箇所や，木質バイオマスの処理の問題から，それらを添加した GP まくらぎが，営業路線で型式登録をして試験施工されている．

一方，近年では，その耐酸性，耐糖性を活かした形で，従来のセメントモルタルでは適用が困難であり，再補修を繰り返した箇所，例えば食品関係箇所の床補修等への適用も試みられている[3)]．駐車場の床面をハンドミキサー等の非常に簡易な装備で GP 左官用モルタルを作製して左官補修した．冬場の施工，夏場の施工においても良好な施工性が確認されており，下地への付着も良好であることから，実用化が進められている．

写真 3.1.1　GP まくらぎの開発

3.1.2　実プラントを使用したマンホール製造

下水道函渠では酸による劣化が問題となり，GP の適用先として期待できる．**写真 3.1.2** はコンクリートの混練から打込み，養生および脱型に至るまでの生産サイクルを想定し，実プラントを使用した製品製造試験の実施例[4)]である．発電所構内排水溝（熱排水：70～90℃）に適用した場合の 1 年後の結果は，同時施工したセメント製のものは表面の荒れ，剥離・剥落が認められたが，GP 製のものは目立った変状は生じていない．

写真 3.1.2　実プラントを使用したマンホール製造

3.1.3　製鉄所構内の高温環境の RC 擁壁の補修

GP は可使時間が短く，現場施工には課題があるとされてきたが，**写真 3.1.3** は，「耐高温性」「2 時間以上の可使時間」「現場でのポンプ圧送」を実現した例[5)]である．施工場所は，製鉄所構内の高温環境の擁壁（鉄筋コンクリート構造）補修工事に適用した．新開発の特殊混和剤を使用することで，施工に適した流動性を保ちつつ，常温養生でも強度の確保が可能な GP コンクリートを，一般的なコンクリートと同様の施工方法で大断面かつ狭あいな擁壁補修での打ち込みに成功した．可使時間を長くできたことで大断面の薄い鉄筋コンクリート壁など，コンクリートが回りにくい箇所にも適用できた．粘性を抑えることで，一般的な現場練り型ミキサでの製造，コンクリートポンプ車での圧送が可能となった（プラントなどで製造しアジテーター車で運搬することも可能）．現場環境下（10～18℃程度）でも，3 日で 20N/mm²，7 日で 36N/mm²，28 日で 50N/mm²と，蒸気養生の GP コンクリート以上の強度を得ることができた．

写真 3.1.3　大断面かつ狭あいな擁壁補修工事への適用

（執筆者：一宮　一夫）

参考文献

1) 一宮一夫，池田攻，上原元樹：低炭素材料としてのジオポリマーの普及・活用，コンクリート工学，Vol.59，No.9，2021.9
2) 上原元樹，佐藤隆恒，東原実，大木信洋：ジオポリマーPC まくらぎの営業線への試験敷設，土木学会第 72 回年次学術講演会講演要旨，pp.167-168, 2018
3) 上原元樹，佐藤隆恒，小坂征雄，山口正廣：左官用ジオポリマーモルタルの室温養生による調製と

諸特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.41，No.1，pp1937-1942，2020.
4) 人見隆，菊地道生：セメントを使用しないフライアッシュコンクリートの製造技術開発と実用化に向けた取り組み，NEDO 主催 2017 年「石炭灰有効利用シンポジウム」講演資料，http://www.jcoal.or.jp/event/2018/01/2017-4.html
5) （株）大林組，ポゾリスソリューションズ（株），日本製鉄（株）:「ジオポリマーコンクリート」を大断面かつ狭あいな擁壁補修工事に適用，https://www.obayashi.co.jp/news/detail/news20210330_1.html

3.2 課題

3.2.1 エフロレッセンス(白華)

強酸性温泉地（大分県別府明礬地区）に設置したフライアッシュ系ジオポリマー（以下，FA ならびに GP という）製の歩車道境界ブロック（以下，ブロックという）に，設置後間もなくエフロレッセンス（白華）等の表層劣化が発生した．その対策としてシラン系表面含浸材（以下，含浸材という）を塗布したが，**写真 3.2.4** のような表層劣化が生じた．筆者らは既報 [1)]において，その原因の一つに活性フィラーに含まれる Ca とアルカリ溶液の反応生成物である C-A-S-H が影響している可能性を示した．

本報告では，含浸材の防水性能向上を期待して含浸材塗布後の供試体を加熱（60℃，1 日間）した場合の結果とともに，表層劣化とサブフロレッセンスの関係についても言及した．

写真 3.2.4 設置から 1 年後の状況（左：無塗布，右：塗布）

使用材料と配合を**表 3.2.1** と**表 3.2.2** に示す. モルタルの練り混ぜにはホバート型ミキサー(容量 5L)を用いた．練り上がったモルタルは直ぐにセメント強さ試験用型枠（圧縮強度測定用，4×4×16cm）と円筒型枠（部分吸水試験用，φ5×h10cm）にテーブルバイブレータで振動を与えながら充填した．その後，蒸気養生（最高温度 60℃，持続時間 3 時間）を施し，翌日に脱型した．

図 3.2.1 に脱型後の供試体の養生条件ならびに含浸材の塗布時期を示す．含浸材はシラン系の市販品を使用し，脱型後 3 日目に刷毛を用いて供試体全面に塗布した．供試体表層部の変化を調べるために部分吸水試験を行った．部分吸水試験では供試体下端部 1cm を浸水させ，試験材齢 16 週までの外観の変化を観察した．

表 3.2.1 GP モルタルの使用材料

項目	記号	材料ならび諸特性
活性フィラー	FA	フライアッシュ 1 種，密度 2.36g/cm^3，比表面積 5327cm^2/g
	BS	高炉スラグ微粉末，密度 2.92 g/cm^3，比表面積 4009cm^2/g
アルカリ溶液	AW	水ガラス, 苛性ソーダ, 水の混合液, A/W (Na/H_2O) 0.126, Si/A (Si/Na) 0.613
細骨材	S	混合珪砂，密度 2.64 g/cm^3

表 3.2.2　GP モルタルの配合(kg/m³)

記号	BS 置換率 (vol.%)	AW	FA	BS	S
BS0	0	295.0	640.3	0.0	1311.2
BS10	10	295.0	576.4	79.2	1311.2
BS20	20	295.0	512.3	158.4	1311.2
BS30	30	295.0	448.2	237.7	1311.2

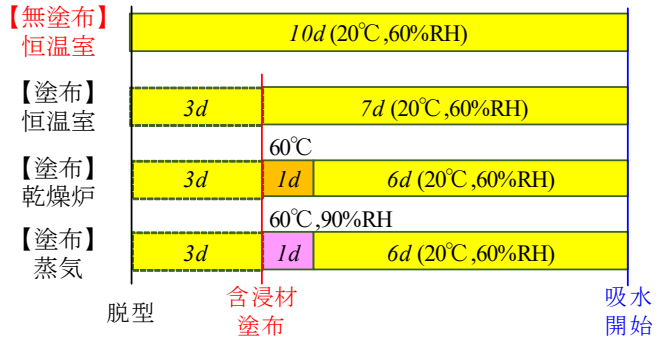


図 3.2.1　脱型後の供試体の養生条件

図 3.2.2 に材齢 7 日における BS 置換率ごとの圧縮強度を示す．この結果より，BS 置換率と圧縮強度は強い正の相関関係にあり，強度水準は土木用構造材料として適用可能な範囲にあることを確認した．

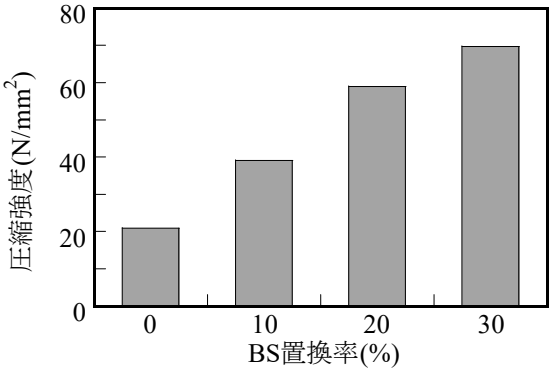


図 3.2.2　BS 置換率ごとの圧縮強度（材齢 7 日）

図 3.2.3 に含浸材無塗布ならびに塗布での BS 置換率ごとの供試体外観の比較を示す．表層の変状は，無塗布ならびに BS0 において認められ，無塗布シリーズ（図中の最上段）では BS0 と BS10 でエフロレッセンスが生じ，BS20 と BS30 では色調に変化がある．一方，BS0（図中の最左列）の含浸材塗布ではひび割れが発生し，特に含浸材塗布後に 60℃で加熱した場合は供試体上端から 1，2cm を起点とした膨張性ひび割れが生じた．

図 3.2.4 は Zhang らの研究[2)]からの引用図で，エフロレッセンスとサブフロレッセンスは湿潤部と乾燥部の境界において同じメカニズムで発生することが説明されている．

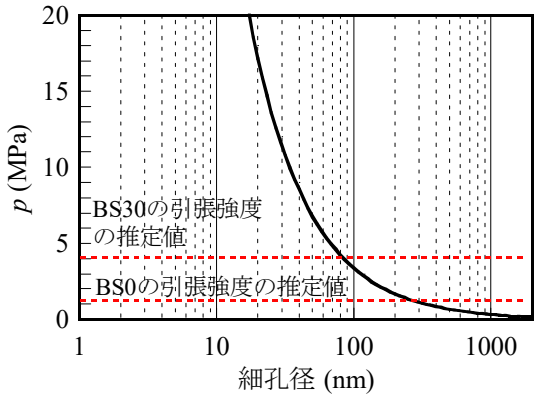


図 3.2.3　GP 生成物の結晶圧力と細孔径の関係

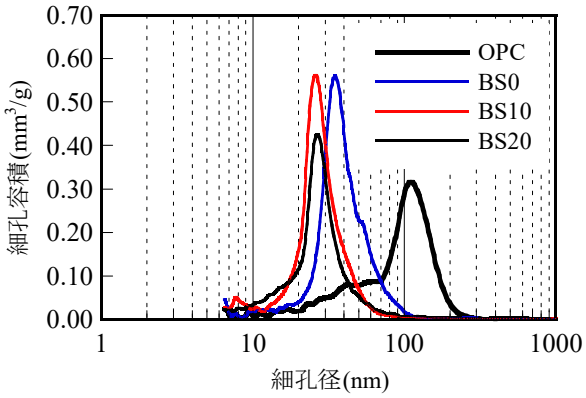


図 3.2.4　BS 置換率ごとの細孔径分布

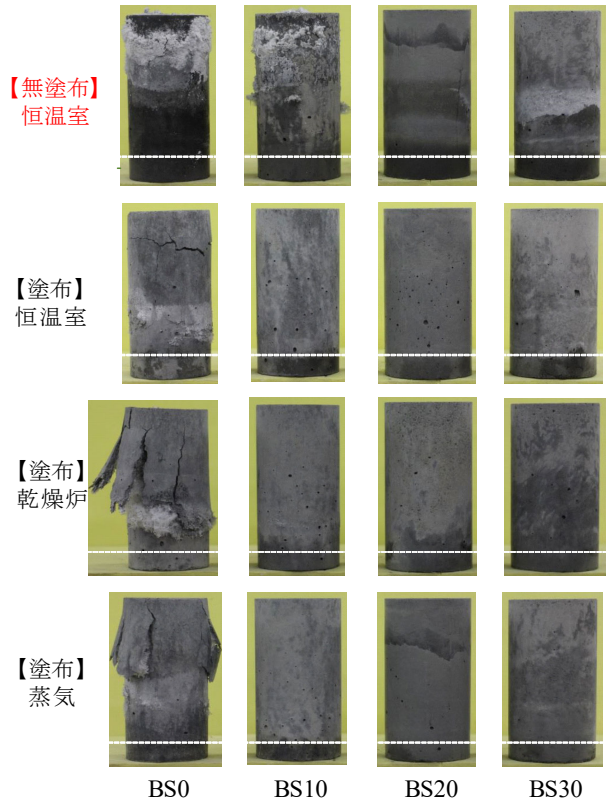


図 3.2.5　BS 置換率ごとの外観の比較

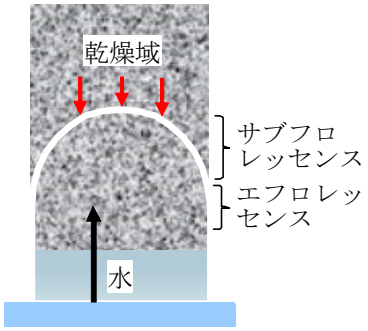


図 3.2.6　サブフロレッセンスの発生メカニズム

図 3.2.5 は同じく Zhang らの研究[2)]を参考に作成した結晶圧力(p)と細孔径の関係図である．図中の横方向の破線は，BS30 と BS0 の引張強度の推定値で，p が GP の引張強度を上回るとサブフロレッセンスが発生する．なお GP の引張強度の推定値算出においては南らの研究[3)]を参考に引張強度／圧縮強度=1/17 と仮定した．**図 3.2.6** は既報の筆者らによる OPC と GP の細孔径分布の測定結果[4)]である．**図 3.2.5** と**図 3.2.6** の結果の対応性についてはさらに詳細の検討が必要であるが，細孔径 100nm 以下で p が引張強度を上回っており，最も引張強度が低い BS0 においてサブフロレッセンスの影響が顕在化したものと考えられる．また，加熱による含浸材の透湿性（透気性）の低下が膨張ひび割れの原因となった可能性もある．

本実験を通じて，含浸材無塗布では BS 置換率 20%以上で部分吸水に伴う表層劣化を抑制できた．他

方，シラン系表面含浸材を塗布した場合は，BS 置換率 10%以上での表層劣化は認められなかったが，BS 置換率 0%ではサブフロレッセンスによる膨張ひび割れが発生した．ひび割れは含浸材塗布後に 60℃で加熱した場合に顕著であり，特に低強度の配合において，含浸材塗布後の温度が表層劣化抵抗性に大きく影響することが分かった．

（執筆者：一宮　一夫）

参考文献

1) 一宮一夫，ほか３名：別府明礬温泉におけるジオポリマー製歩車道境界ブロックの表層劣化対策，土木学会第 73 回年次学術講演会，pp.563-564，2018
2) Z. Zhang，ほか４名: Efflorescence and subflorescence induced microstructural and mechanical evolution in fly ash-based geopolymers, Cement and Concrete Composites, pp.165-177,2018
3) 南浩輔，ほか２名：ジオポリマー硬化体の諸物性に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.1987-1992，2013
4) 一宮一夫，ほか２名：ジオポリマー硬化体の諸物性に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.39，No.1，pp.2047-2052，2017

3.2.2　乾湿繰返しによる収縮膨張

鉄筋腐食性試験を行った結果，表面にひび割れが発生している供試体があることが分かった [1)]．乾湿繰返しの際の収縮・膨張が原因であるとの予想のもと，角柱供試体（4×4×16cm）を用いた乾湿繰返し試験を行った．**図 3.2.7** に乾湿繰り返し試験の概略図を示す．恒温恒湿室（20℃，60%RH）において，水道水への 3 日間の全浸漬，1 日間の気中乾燥を 10 サイクル繰り返し，モルタルの長さ変化と質量変化を測定した．

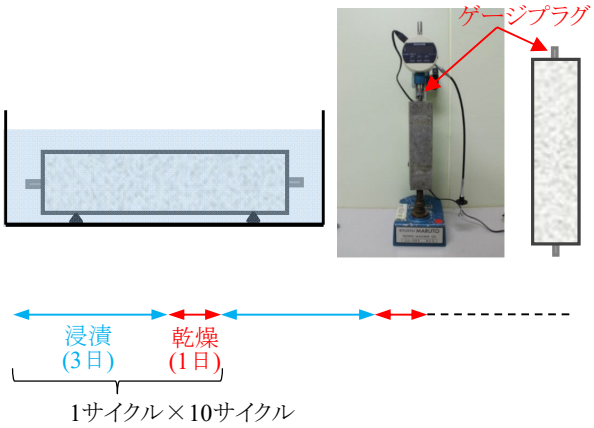
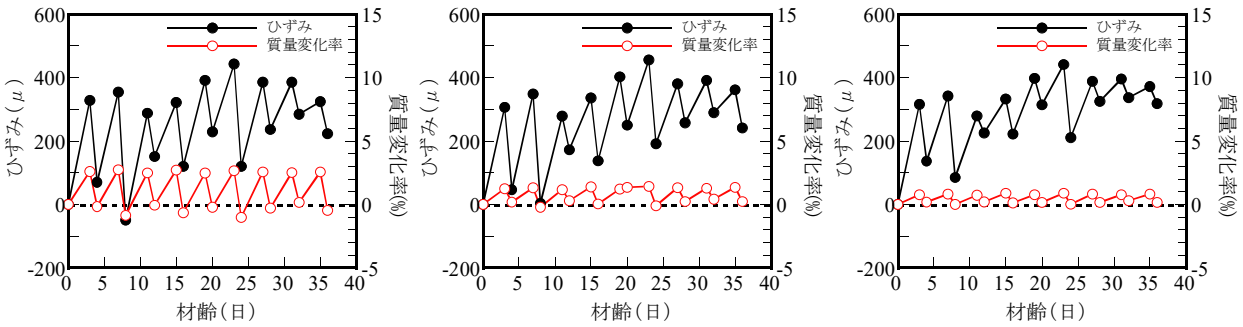


図 3.2.7　乾湿繰り返しによる長さ変化の測定

供試体の乾湿繰返しによる長さ変化ならびに質量変化を**図 3.2.8** に示す．図中において，ひずみ，質量変化率ともにピーク値は水中から取り出した直後である．ひずみの変化傾向はいずれの配合も同様であり，乾湿繰返し 3 サイクル頃から残留ひずみが増えている．つまり，この段階でひび割れが発生して

いるものと考えられ，それ以降は変動幅が徐々に小さくなることから，ひび割れが進展しているようである．



(a)BS10　　(b) BS20　　(c) BS30

図 3.2.8　乾湿繰返しに伴う長さならびに質量の変化(A/W=0.126)

他方，質量減少率の変動幅は，BS 置換率が高いほど小さい．つまり，BS 置換率が高いほど少ない吸水量で大きくひずむことを表している．この原因として主として BS から溶出する Ca で形成される C-A-S-H の影響と考えられる．**図 3.2.9** は C-A-S-H の構造のイメージである．CaO 相，四面体層，中間層からなる積層構造で，吸水により膨張する粘土鉱物のスメクタイトの構造に近く，同様のメカニズムにより BS30 において少量の吸水でも大きく膨張した可能性がある [2)]．

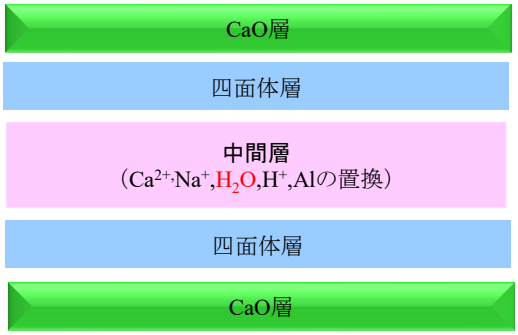


図 3.2.9　C-A-S-H の構造のイメージ

（執筆者：一宮　一夫）

参考文献

1) 一宮一夫，山本理得：ジオポリマーモルタル中の鉄筋腐食性評価のための促進試験，土木学会全国大会第 76 回年次学術講演会，pp.V117-V118，2021

2) 一宮一夫，原田耕司，津郷俊二，池田攻：フライアッシュ系ジオポリマーの部分吸水と表層の変状の関係，コンクリート工学年次論文集，Vol.42，No.1，pp.1810-1815，2020

４．鉄筋コンクリート構造物ならびに鉄筋コンクリート構造物以外への適用

４.１ GP コンクリート構造

4.1.1 GP の力学特性のまとめ

（１）圧縮特性について

GPC のヤング係数に関する研究として，Hardjito and Rangan[1)]や Diaz-Loya et al.[2)]は，圧縮強度が同程度の場合，FA をベースとした GPC のヤング係数は AS3600-2009，ACI363R-92 の OPC 用の推定式より低いことを報告している。一方で，高炉スラグをベースとした AAC のヤング係数は，OPC と同程度であるという研究例が多いことを，Ding et al.[3)]がまとめている。

GPC の応力ひずみ関係に関する研究において，圧縮軟化域を含めた完全な応力ひずみ関係を実験的に得た例は少ないが，Noushini et al.[4)]および Shibayama and Kikuchi[5)]はともに，FA をベースとした GPC の圧縮軟化挙動は OPC より顕著であり，その破壊性状が脆性的であることを報告している。

（２）引張強度について

Sarker et al.[6)]は自らの実験結果に既往の GPC の実験結果を加え分析した結果, FA をベースとした GPC は圧縮強度が同等の場合，OPC よりも割裂引張強度が高いことを示した。また，Diaz-Loya et al. 2)は，圧縮強度が同等の場合，FA をベースとした GPC の曲げ引張強度は OPC よりも高いことを示している。以上のように，FA をベースとした GPC は，引張強度が OPC より高いという報告があるため，基本的には，OPC の設計に用いられている各種引張強度推定式を準用可能であると考えられる。しかしながら，GPC の力学特性は，使用材料や配合によって大きな影響を受けるため，現状では，実験により確認することが必要である。

（361委員会報告書（未定稿）より抜粋）

参考文献

1) Hardjito, D., Rangan, B. V.: Development and Properties of Low-Calcium Fly Ash-Based Geopolymer Concrete, Research report GC1, Curtin University of Technology, pp.94, 2005.
2) Ivan Diaz-Loya, E., Allouche, E. N., Vaidya, S.: Mechanical Properties of Fly-Ash-Based Geopolymer Concrete, ACI Materials Journal, Vol.108, No.3, pp.300–306, 2011.
3) Yao Ding, Jian-Guo Dai, Cai-Jun Shi: Mechanical properties of alkali-activated concrete: A state-of-the-art review, Construction and Building Materials, Vol.127, pp.68-79, 2016.
4) Noushini, A., Aslani, F., Castel, A., Gilbert, R. I., Uy, B., Foster, S.: Compressive Stress-Strain Model for Low-Calcium Fly Ash-Based Geopolymer and Heat-Cured Portland Cement Concrete, Cement and Concrete Composites, Vol.73, pp.136–146, 2016.
6) Shibayama A., Kikuchi M.: Compressive stress-strain behavior of a fly ash-based geopolymer concrete made without the use of water glass for alkali activation, Proceedings of the fib symposium 2019, pp.407-414, 2019.

7) Sarker, P. K.: Bond strength of reinforcing steel embedded in fly ash-based geopolymer concrete, Materials and Structures, Vol.44, pp.1021-1030, 2011.

4.1.2 GP 構造部材の設計

（1）曲げについて

構造部材の設計において，応力―ひずみ関係が明確な材料に対して理論的に導くことができる曲げ応力や曲げ耐力については，従来のセメントコンクリートの諸数値の代替として GP コンクリートの圧縮・引張・せん断強度および剛性とポアソン比の値を使って，求めればよい．ただし，鉄筋と GP コンクリートとの間に十分な付着があることが前提となる．Belek ら [1)]は，水粉体比を 0.45 で統一し，一般的な OPC コンクリート, 高炉水砕スラグと KOH および水ガラスからなるアルカリ刺激剤を用いた ACC 系材料，さらにそれらの複合系としてセメントに高炉水砕スラグを混和材として用いるがコンクリート（アルカリ溶液は用いない）の 3 種類をベースとし，配合にバリエーションを加えた計 6 体の試験体について，節のない鉄筋の引抜き試験を実施した．結果としては，圧縮強度については，ACC 系材料，OPC コンクリート，混和材を用いたコンクリートの順であったが，AAC 系材料，OPC コンクリートの付着強度はほぼ同等であったと報告している．ただしこれは，圧縮強度に対する AAC 系材料の付着強度の比率が高くはなかった（10%以下）ことを示している．

それ以前，Kim らの 2016 年時点の既往研究のレビュー[2)]では，ACI や EC など既存の OPC コンクリートの付着強度算出式がかなり安全側にできているため，これをジオポリマーコンクリートに適用しても実用上は問題がないと述べている．ただし，同等の圧縮強度をもつ OPC コンクリートに比べて GP コンクリートの付着強度が高いと報告されている例が少なくない一方で，節のない丸鋼については GP コンクリートの付着の方が低いという報告もあることから，GP コンクリートでは粗骨材との節とのロッキングが優れている結果であると考察できる．そのほかには，材料による違いとしては，フライアッシュベースのジオポリマーコンクリートにおいて，フライアッシュの違いは付着特性に大きな影響を与えない一方で，もみ殻灰をフライアッシュの 38%まで混入した場合や，NaOH の濃度を高めることで，GP コンクリートと鉄筋との付着強度が増加した例が紹介されている．また，バインダーに短繊維を混入することで，付着の向上を図った例も紹介されている．

Kim らのレビュー[2)]では，ジオポリマーコンクリート梁の実験も紹介されているが，いずれも曲げ区間でのひび割れパターンは一般的な OPC 鉄筋コンクリートと同様であり，ACI 318 による曲げ耐力算定式を用いた場合，実験/算出式は 1.02～1.25 であったと紹介されている．ただし，GP の構造部材適用に関する研究では，材料や配合自体が様々であり，また再生骨材を用いたり短繊維混入したり，GFRP 筋など補強材が異なる研究例も多い．

構造自体の高耐久化を目指して鉄筋ではなく GFRP の棒材と AAC との付着を検討した研究例も見られる．文献 [3)]は，梁の曲げ区間内に GFRP 筋で重ね継手部を設け，曲げ試験および ABAQUS を用いた FEM による再現解析によって，両者の付着性能を検証した．結果として，GFRP の棒材と AAC との間には十分な付着がありひび割れが分散すること，それゆえ曲げ耐力やひび割れ間の GFRP 筋の応力分散などは OPC コンクリートで想定されているものに類似していることから，OPC コンクリートで用いられている材料構成則に若干の修正を加えることで，精度の良い構造解析が可能であることを示している．

また，Nagajothi S.ら[4]は，GFRP に加えてバサルト繊維を用いた補強材を用いた GP コンクリート梁の曲げ実験を実施している．GP コンクリートはフライアッシュの 25%を高炉スラグで置換した粉体に，NaOH と水ガラスをアルカリ刺激剤として用いたもので，圧縮強度がほぼ同等の OPC コンクリートとの比較が行われ，曲げ区間では一般的な鉄筋コンクリートと同等のひび割れ分散性が確認されている．

結局は，バリエーションに富んだ GP コンクリートを構造部材に適用するにあたっては，材料試験を行って応力―ひずみ関係を明確にしたうえで，理論的に曲げ応力や曲げ耐力を求めるという手法をとれば，概ね実用上は問題なく設計はできるということのみが確認されていると言える．

（2）せん断について

理論的に算出できる設計値とは異なり，経験的に構築されたいわゆるマクロ式（たとえば，コンクリート標準示方書に記載されている曲げひび割れ幅算定式やせん断耐力算出式）を GP コンクリートに適用できるかどうかは，慎重に検討を行う必要がある．

Yacob ら[5]は，フライアッシュベースのジオポリマーコンクリート梁と OPC コンクリート梁について，せん断スパン比や軸方向鉄筋量をパラメータとしたせん断試験を実施した．その結果，スターラップを有する梁の破壊モードやせん断耐力は OPC コンクリートと同様であり，もともと安全側に設定されている既存の OPC コンクリート用の耐力算出式も実用上使用できる可能性を示している．ただし，この研究では GP コンクリートと OPC コンクリートとのヤング係数も同等であった．

一方，Cheng Wu ら[6]は，高炉スラグベースの AAC 系材料で梁のせん断試験を行っている．こちらも梁の破壊モードやせん断耐力は圧縮強度が同等の OPC コンクリートと比べて明らかに劣ることはないが，ひび割れの発生荷重が OPC に比べて低くひび割れ分散性も低い傾向にあるため，GP コンクリート部材では設計におけるひび割れ幅に同じ許容値を用いると，GP コンクリートのほうが不利になる可能性があることを指摘している．なお，この研究シリーズでは，GP コンクリートのヤング係数は OPC コンクリートとのヤング係数よりも概ね 2 割程度低かった．

なお，前述の Nagajothi S.ら[4]は，GFRP およびバサルト繊維を用いた補強材を用いた GP コンクリート梁の試験において，実験で得有れたせん断耐力と ACI 等海外の基準および研究者が提案している FRP を用いた梁のせん断耐力式との比較を行った．CEP-FIP Model Code 1978 (CEP-FIP 1984)以外は概ねせん断耐力を実際よりも小さく見積もっているため，安全側として使用できる可能性を示している．

Hassan ら[7]は，鋼繊維を粉体の 1.5%まで混入した GP コンクリート梁を，3 種類の a/d を設定して載荷している．主材料はフライアッシュのみで，NaOH と水ガラスを用い，養生は室温である．それにもかかわらず作成した GP コンクリートは，繊維の有無によらず比較試験体として作成した OPC コンクリートよりも強度やヤング係数が高い傾向が見られ，せん断耐力においても全体に GP コンクリートの方が高かった．一方，破壊モードやひび割れ分散性は，両者は同等だったと述べている．

以上より，経験的に構築されたいわゆるマクロ式の GP コンクリートへの適用については，個別のケースに応じて，慎重な判断が求められる．

（執筆者：藤山　知加子）

参考文献

1) Vlastimi Bilek, Sabina Bonczkova Jan Hurtaa, David Pytlíka and Martin Mrovec: Bond Strength Between Reinforcing Steel and Different Types of Concrete, Procedia Engineering, 190, pp.243-247, 2017.
2) Kim Hung Mo, U. Johnson Alengaram, Mohd Zamin Jumaat: Structural performance of reinforced geopolymer concrete members: A review, Construction and Building Materials 120 (2016) 251–264
3) Biruk Hailu Tekle, Amar Khennane, Obada Kayali: Bond of spliced GFRP reinforcement bars in alkali activated cement concrete, Engineering Structures, 147, pp.740-751, 2017.
4) Nagajothi S. and Elavenil S.: Shear Prediction of geopolymer concrete beams using Basalt / Glass FRP bars, Journal of Advanced Concrete Technology Vol. 19, 216-225, March 2021
5) Noor S. Yacob, Mohamed A. ElGawady, Lesley H. Sneed, Aly Said: Shear strength of fly ash-based geopolymer reinforced concrete beams, Engineering Structures 196 (2019) 109298
6) Cheng Wu, Hyeon-Jong Hwang, Caijun Shi, Ning Li, Yunxing Du: Shear tests on reinforced slag-based geopolymer concrete beams with transverse reinforcement, Engineering Structures 219 (2020) 110966
7) Amer Hassan, Mohammed Arif and M. Shariq: Structural performance of ambient-cured reinforced geopolymer concrete beams with steel fibers, Structural Concrete, 2021, 22, pp.457-475.

4.2　鉄筋コンクリート構造物以外

4.2.1　GP モルタルの開発

粘性が高いアルカリ溶液を使用する一般的な GP では，従来のセメントコンクリートのように粗骨材と一緒に練り混ぜて打ち込みをすることが必ずしも良い選択肢であるとは限らない．GP を適切に実用化する目的で粗骨材を除いたモルタルの状態での流動特性について把握するため，基本的な研究が行われてきた．

実用的な流動性とともにある程度の強度を保証できる GP の配合設計については様々な検討がある．フライアッシュベースの GP モルタルについて，練り混ぜの手順や時間を限定した条件ではあるが，材料の重量比を決定してマトリクス表示することで，体積ベースでの配合設計を行う手法も近年開発されている [1)]．

図 4.2.1.1 に，フライアッシュベースの GP モルタルについて，体積配合比率を算出した例を示す．図中の upper および lower は，同論文の中で最もフロー値が高かったものおよび最も低かったものを意味する．一部に特異な例はあるが，概ねフライアッシュと砂が全体の 70～80%を占める配合が多く [2)~5)]，流動性を得たい場合には高性能減水剤を添加することが行われることが多い．

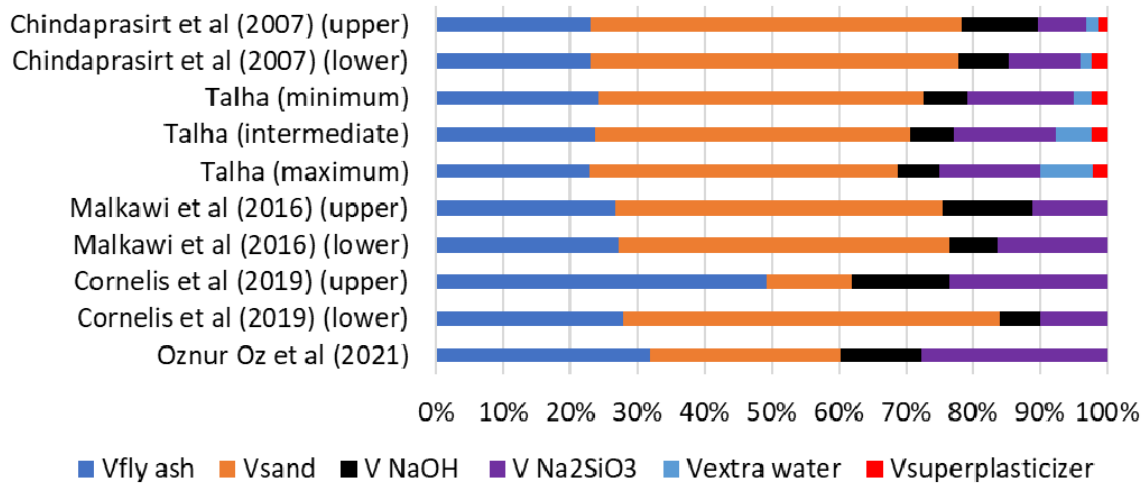


図 4.2.1.1　ライアッシュベースの GP モルタルの体積表示例

ここで，自己充填性を有するセメントモルタルの研究 [6)]を基準として，粉体としてフライアッシュのみを用いた自己充填性を有する GP モルタルにおける，相対フローと相対フロー速度の関係を比較すると**図 4.2.1.2** となる．

$$G_m=(d_1 \cdot d_2-d_0^2)/d_0^2 \quad (1)$$

$$R_m= 10/t \quad (2)$$

Gm は相対フロー，Rm は相対フロー速度， d_1, d_2 は計測されたフローの直径， d_0 はフローコーンの直径，t はモルタル用の V ロート試験装置を通過する時間（秒）で定義される．図中の薄い○で

示されるプロットと文字がセメントモルタルの水粉体比（体積比）Vw/Vp ごとの値，黒で示されるものが GP のものである．

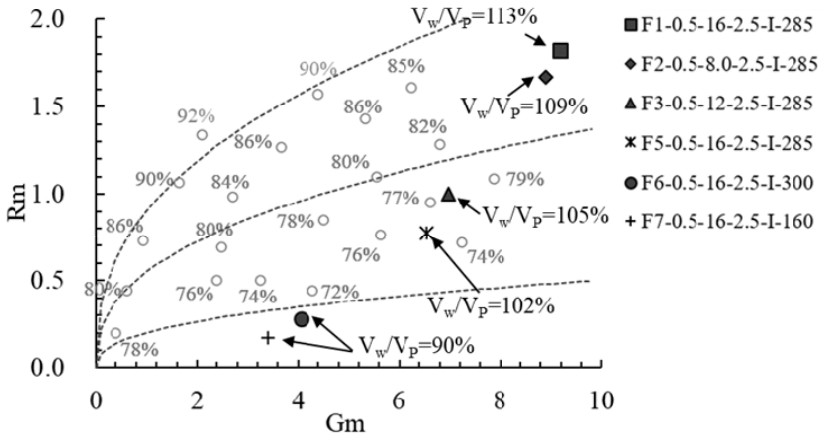


図 4.2.1.2　セメントモルタルと GP モルタルの相対フローおよび相対フロー速度と水粉体比の関係 [1)]

セメントモルタルと同程度のフローおよびフロー速度を得るために GP モルタルは相対的に多くの水を必要とすることが理解できる（本検討ではアルカリ溶液中の水の体積を Vw に含む）．水の量を増やせばすなわちアルカリ溶液の濃度が低下し，アルカリ溶液の粘性を抑えて流動性は向上するが，一般的には硬化後の強度の低下も余儀なくされる．

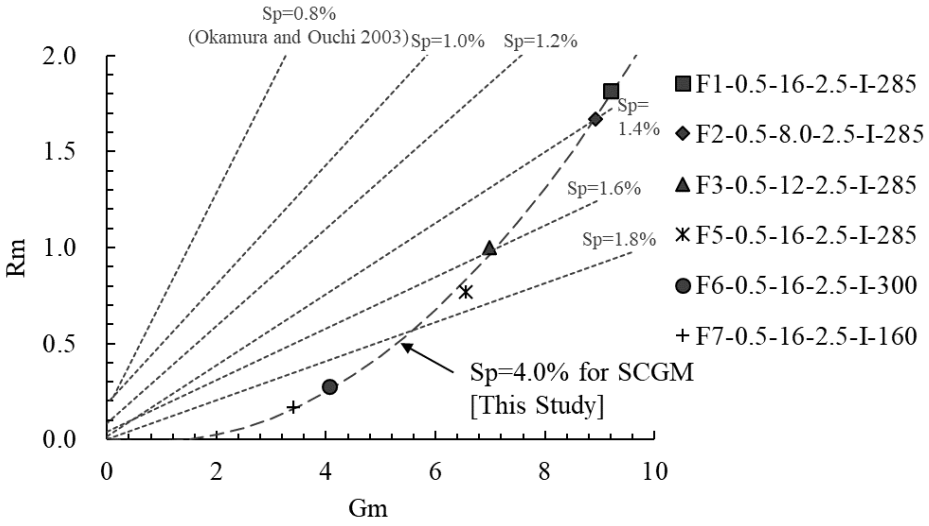


図 4.2.1.3　セメントモルタルと GP モルタルの相対フローおよび相対フロー速度と高性能減水剤添加量の関係 [1)]

図 4.2.1.3 は，ポリカーボネート系の高性能減水剤が，フローおよびフロー速度に与える影響を示したものである．**図 4.2.1.2** と同様，グレーがセメントモルタル，黒が GP モルタルを示す．セメントモルタルでは同じ高性能減水剤添加量におけるフローとフロー速度は，直線で示される比例の関係にある．一方で，GP モルタルでは，フローの増加に対してフロー速度の増加感度が鈍いため曲線的に推移して

おり，比例関係にはないことがわかる．また，図中の GP モルタルのデータでは高性能減水剤の添加量は粉体の 4%であり，セメントモルタルの 0.8～1.8%に比べて，明らかに多いことがわかる．

以上より，GP モルタルの流動性を高めるには，強度が一定以上の水準を保つ範囲で水を増やしアルカリ溶液の濃度を低下させることが有効である一方，セメント用に開発された高性能減水剤の添加量を増やすことは必ずしも効果的ではないことが確認された．

（執筆者：藤山　知加子）

参考文献

1) Muhammad Talha Ghafoor, Chikako Fujiyama, Koichi Maekawa, Mix Design Processing for Self Compacting Geopolymer Mortar, Journal of Advanced Concrete Technology, 2021, Vol. 19, No. 11, pp. 1133-1147.
2) Hatice Öznur Öz, Hasan Erhan Yücel, Muhammet Güneş, Turan Şevki Köker, Fly-ash-based geopolymer composites incorporating cold-bonded lightweight fly ash aggregates, Construction and Building Materials, Volume 272, 2021, 121963
3) Workability and Strength Properties of Class C Fly Ash-Based Geopolymer Mortar, Remigildus Cornelis, Henricus Priyosulistyo, Iman Satyarno, Rochmadi, MATEC Web Conf. 258 01009 (2019)
4) Malkawi, Ahmad & Nuruddin, Muhd & Fauzi, Amir & Al-Mattarneh, Hashem & Mohammed, Bashar. (2016). Effects of Alkaline Solution on Properties of the HCFA Geopolymer Mortars. Procedia Engineering. 148. 710-717. 10.1016/j.proeng.2016.06.581.
5) P. Chindaprasirt, T. Chareerat, V. Sirivivatnanon, Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer, Cement and Concrete Composites, Volume 29, Issue 3, 2007, Pages 224-229,
6) Okamura, H. and Ouchi, M., (2003). "Sel-Compacting Concrete, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.1, No.1, April 2003.", 1(1), pp. 5–15.

4.2.2　建設用 3D プリンタの社会実装への道

近年，建設用 3D プリンタの研究開発が加速し，構造物は限定されているものの実用化された事例も増えてきた．現時点では，鉄筋などの連続補強材を配置する合理的な方法が模索されており，構造用部材としての利用は難しい現状にある．また，現時点では練り混ぜられた材料をポンプでノズルまで送り，そのノズルを決められたパスで移動させる機構（例えば，産業用ロボットなど）により，射出，積層する 3D プリンタが主流である．

3D プリンタのメリットについては，造形物の形状の自由度，材料選択の自由度，薄肉部材による軽量化，材料使用量の低減，プロトタイプ製作の容易さ，省力化，など様々である．またデメリットとしては，装置が高価，オペレータの人材育成，連続補強材（鉄筋など）の配置方法，部材寸法が装置に依存，などがある．したがって，3D プリンタによる製造によって優位性が発揮される適用事例から検討を進めていくことが望ましい．

材料に要求される品質として，混練性，圧送性，射出性，プリント性，積層性がある．混練性は，投入した原材料を均一に練り混ぜることができる特性，圧送性は，練り混ぜられた材料をノズルまで閉塞なしに送ることができる特性，射出性は材料を連続的に割れなどなくノズルの先から送り出すことができる特性，プリント性は材料のプリントのし易さに関する特性（施工性），積層性は積層時に下層が押しつぶされて変形することに対する抵抗性，などが求められる．

さらには，材料とプリンタ（製造システム）は対の関係になっており，適切なプリントを行うためには，材料の品質を最適化すること，プリンタの特性（ノズルのサイズ，移動速度，移動パスなど）を最適化すること，あるいは両者について最適化することにより達成される．したがって，比較的自由度のある材料選定が可能であると思われる．なお，AAMs では，強アルカリ溶液（粉体）を使用することから，作業安全性への配慮がセメントコンクリートに比べるとやや大きくなる可能性がある．

そのような中，AAMs の建設用 3D プリンタへの適用は，海外において積極的に進められている．セメントコンクリートを用いた場合，プリント性や積層性を確保するために，急結剤をノズルの先で添加し，形状保持させる場合が多い．AAMs の場合には，配合の調整により比較的簡単に凝結時間を制御できること，活性フィラーや粘土鉱物の添加によりチクソ性を付与した材料である持ち味を活かした適用が試みられている．

その他の配合上の特徴としては，粗骨材を用いた配合はほとんどなく，基本的に細骨材（川砂や硅砂）を用いたものが多い．さらには，材料に粘り強さを付与するために短繊維を混和した AAMs の適用も進められている．

最後に，AAMs を用いた 3D プリンタに関する今後の課題をまとめる．海外で適用されている事例は，非構造部材（モニュメントや型枠など）であり，本格的なインフラへの利用には至っていない．これは AAMs そのものの耐久性に関する知見が不足していることによる．3D プリンタを活用する点については，社会実装においての課題とも考えられる装置導入のためのコストにより，特に，日本では研究者人口が増加していない．造形物に対するアイデアやニーズがあっても，それを試す手立てがないのが現状である．

（執筆者：国枝　稔）

参考文献

1) Amran, M. et al., 3D-printable alkali-activated concretes for building applications: A critical review, Building and Construction Materials, 319, 2022. (https//doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126126)
2) Chougan, M. et al., Investigation of additive incorporation on rheological, microstructural and mechanical properties of 3D printable alkali-activated materials, Material and Design, 202, 2021. (https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109574)
3) Scanferla, P. et al. , The effect of fillers on the fresh and hardened properties of 3D printed geopolymer lattices, Open Ceramics, 6, 2021. (https://doi.org/10.1016/j.oceram.2021.100134)

4.2.3　現地直接造形 3D プリンティングシステムの可能性

3D プリンティング技術[1)]には，材料をノズルから押し出すことで立体モデルを造形する「材料押出」，光硬化性樹脂に光を当て硬化させていく「液槽光重合」，プラスチック粉末等にレーザや電子ビームを照射することで断面形状を溶融・結合させる「粉末床溶融結合」など，多くの造形方式がある．建設分野でも様々な取り組みが見られる[2),3),4)]が，あらかじめ練り混ぜられたセメント系材料をノズルから絞り出して，下から上へ層状に積み上げて構造物を造形する「材料押出」方式が一般的である．この方式は，その造形方法から積み上げた各層間の一体性が課題と言われ，曲げやせん断力が作用した際の層間剥離が懸念される．また，セメント系材料の特性上，練り混ぜ直後から硬化が始まるため，材料の長距離搬送の場合には品質管理に関する課題や，土木構造物のように大型の構造物を造形する場合の施工機械の大型化などの課題が指摘される．特に我が国では耐震性能が求められることから，コンクリート材料の他に補強材として鉄筋などが必要となるため，室内で 3D プリンティング技術を用いて造形した部材（プレキャスト部材）を，現地で組み立てるといった手法が多く見られる．

プレキャスト化を前提とした 3D プリンティング技術が積極的に進められている一方で，現場において優位性を発揮する 3D プリンティング技術もある．例えば，最近多発する自然災害が発生した現場における復旧工事のように，作業員の二次災害に対する配慮が必須条件となる現場での施工である．

近年，建設現場では ICT 建機と言われる，3 次元設計データに基づき現場施工を行うことが可能な建設機械の導入が進んでいる．ICT 建機はリアルタイムに自己位置を測定しながら，3 次元設計データに応じて操作制御を行うものである．また ICT 建機は，これまでに建設現場での使用実績が多い建設機械がベースとなっていることから，建機自体の耐久性や機動性，使用性は高く，実際の建設環境に適応できることは言うまでもない．

このような背景に鑑みて，近年，コンクリート構造物を現地で直接造形する 3D プリンティングシステムの開発が行われている[5),6)]．この手法は，3 次元マシンコントロール・マシンガイダンス機能を搭載した ICT 建機に，コンクリート分野での実績が多い吹付け技術を組み合わせたもので，屋外の建設現場で直接造形され，かつ材料の長距離搬送も可能なシステムとなっている．現段階では，様々な研究開発が進められている状況であり，単純な形状の造形物の製造に留まっているものの，図 1 に示すように大型構造物の直接造形が可能とされている．

3D プリンティングというと，本来であれば 3D プリントにしか実現できない意匠性の高い造形物の製造が想定されるが，生産性向上や働き方改革，安全性向上に貢献できる技術としての展開も期待されて

いるものと考えられる．今後の研究開発により，さらに精緻かつ複雑な形状の構造物への適応や，高所や被災地等の安全面が懸念されるような現場での適用が期待される．また，より効率的な施工を行うためには材料面の工夫も必要であると考えられ，3D プリンティング施工に最適な材料の開発にも期待したい．

(a) 壁状部材構築の様子　　(b) 柱状部材構築の様子

図 4.2.3.1　現場での直接造形の様子

（執筆者：小野　秀一）

参考文献

1) 萩原恒夫，3D プリンターとは，ナノファイバー学会誌，5(1)，p.2-15，2014.12.
2) 石田哲也，木ノ村幸士：3D プリンティング技術がもたらす建設産業へのインパクト，コンクリート工学，58(1)，pp.45-51，2020.
3) G. D. Schutter, K. Lesage, V. Mechtcherine, V. N. Nerella, G. Habert, I. Agusti-Juan: Vision of 3D printing with concrete- Technical, economic and environmental potentials, Cement and Concrete Research, 112, pp.25-36, 2018
4) 日経 BP : 設計・施工を刷新する建設３D プリンター，日経コンストラクション，715，pp.28-47，2019.
5) 羽生賢一，八木橋宏和，永沢薫，コンクリート構造物を「現場で直接プリント造形」～On-site Shot Printer の開発～，建設機械施工 Vol.72 No.12, 2020.12.
6) 國枝稔，小野秀一，ICT 建機を援用したセメント系 3D プリント技術（On-site Shot Printer®），電気計算，2021.2.

５．環境への影響

5.1　環境影響評価

5.1.1　一般

アルカリ活性材料（以下，AAMs）の環境影響評価を行う場合，単に使用材料における環境影響のみを考慮することは必ずしも妥当ではない．すなわち，材料調達から製造方法，供用段階から廃棄に至るまでのライフサイクルにおける環境影響を評価し，例えば既存のセメントコンクリートと比較して，その優位性が発揮されることが望ましい．ただし，現時点は AAMs の適用構造物などが明確になっているわけでもなく，一般にセメントコンクリートの代替としての利用が想定されていることから，ここでは材料調達段階における環境影響について述べる．

AAMs の最大の特徴は，活性フィラーとして使用される非晶質シリカ材料に各種の産業廃棄物が適用できる可能性が高い点にある．一般には，フライアッシュ，高炉スラグ，シリカフューム，もみ殻灰，廃ガラス，火山灰，メタカオリンなどである [1)]．それ以外にも，一部ではあるが，サトウキビやヤシ油の燃焼灰などを用いた AAMs の可能性についての研究もある．

フライアッシュやスラグに関しては，シリカ含有量が 30～60%程度の比較的含有率が低いものを対象とした検討が数多くある，

もみ殻灰については，世界中で年間 7.7 億トンの排出が試算されており，そのうちの 2600～3400 万トンについて有効利用の可能性があるとされている [2)]．

シリカフュームに関しては，セメントコンクリート用混和材として一般的ではあるが，AAMs に用いる場合には，加熱を必要とする場合もある．

火山灰に関しては，多量に入手できるというメリットがあるものの，品質のばらつきが大きい場合が多く，利用にあたっての注意が必要である．例えば，日本コンクリート工学会では「火山性堆積物のコンクリート用混和材としての高度利用に関する研究委員会」[3)]が 2019 年～2021 年度にかけて活動し，製造方法や利用方法における留意点などを整理している．

具体的に AAMs を対象に，LCA を行った研究事例は多い．例えば，Fardmehr らは，4 種類の活性フィラー（フライアッシュ，高炉スラグ微粉末，セラミック粉，やし油燃焼灰）を用いた AAMs 配合を対象に，CO_2 排出量を試算しており，フィラーの種類によって大きな差があることを示している．

以上のように，他産業からの副産物を原材料として使用することで環境負荷低減に貢献する材料として AAMs への期待は大きい．一方で，サプライチェーンの視点での環境影響については，対象となる材料によって大きく異なることも当該材料の特徴であり，それらを評価する仕組みや指標の開発が急務である．

（執筆者：国枝　稔）

参考文献

1) Alnahhal,M. F., Kim, T. and Hajimohammadi, A., Waste-derived activators for alkali-activated materials: A review, Cement and Concrete Composites, 118, 2021 (https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.103980)

2) Gursel, A. P., Maryman, H. and Ostertag, C., A life-cycle approach to environmental, mechanical, and durability properties of “green” concrete mixes with rice husk ash, Journal of Cleaner Production, 112(1),pp.823-836, 2016. (https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.029)
3) 日本コンクリート工学会，火山性堆積物のコンクリート用混和材としての高度利用に関する研究委員会報告書，2022.
4) Faridmehr, et.al., Life-cycle assessment of alkali-activated materials incorporating industrial byproducts, Materials, 14(9) 2021. (https://doi.org/10.3390/ma14092401)

5.1.2 セメント産業における資源循環と脱炭素問題

セメント産業は健全な社会資本を構築する使命を果たし，同時に産業廃棄物・副産物を有効に利用している．セメント系材料は 1824 年にイギリスの Aspdin が発明し，製造特許を申請してからこれまで改良が重ねられ，現在に至るまで建設材料の中心的材料として使用され続けており，安全・安心な社会の構築に貢献している．日本では 1970 年代は高強度セメントの開発とそれを実現するための減水剤および流動化剤の研究開発，1980 年代は高性能減水剤の開発が進められ超高強度コンクリートなども実現されるようになっていった．しかし 1990 年代以降はバブル経済の崩壊に伴い，セメント生産量は大きく減少した．セメントの国内需要はバブル崩壊直前 1990 年度にピーク値 8600 万トンを記録したが，以降は長期にわたり縮小傾向が続き，2008 年度に 5000 万トンにまで減少した．これは，1970 年のセメント国内需要とほぼ同水準である．2009 年度にはさらに低下して，4300 万トンとなりピーク時の半分となった．現在はおおよそ 4000 万トン前後を推移している．このような時代の流れとともにセメントはインフラ構築のためのコンクリート製造のための材料という本来の役目だけでなく，産業廃棄物，副産物を有効利用するという社会環境材料（東京工業大学；大門正機名誉教授提唱）としての側面を色濃くしていった．

セメントは CaO 源には石灰石，SiO_2 源にはけい石，Al_2O_3 源には粘土が天然資源として用いられると教科書には記述されているが，それは過去のことであって，現在では石炭火力発電所から排出される石炭灰や各種スラグが粘土代替原料や鉄原料として多く使用されている．セメント産業で使用されている廃棄物は約 2800 万トンであり，これは東京ドーム約 16 杯分であり，日本で循環利用されている廃棄物の 12%に相当する．上述のようにセメント生産量は減少しているにもかかわらず，セメント産業が処理すべき廃棄物はほぼ横ばい状態であり，セメント産業はセメント 1 トン当たりの廃棄物使用量を技術革新によって増加させてきた．1997 年度では 1 トン当たり 287kg の廃棄物使用量であったのが，2002 年度では 361kg，2009 年度では 451kg となっており，セメント産業はリサイクル産業として進化した．セメントを製造しない社会は，現在ではこれらの廃棄物がリサイクルされない社会と同義になっている．

セメントは，石灰石，粘土類，ケイ石類，鉄原料を原料として，これらを 1450～1500℃程度の高温で焼成し，得られたクリンカーを粉砕する際にセッコウを添加して製造され，この際に大量の CO_2 を排出する．大雑把にいうとセメント 1t を製造する際に約 1t の CO_2 を排出し，その 3 分の 2 は石灰石の脱炭酸由来，3 分の 1 は燃料由来である．言うまでもなく，近年では世界規模で地球温暖化問題が叫ばれており，その原因とされる CO_2 排出量の削減は急務とされている．前環境大臣の発言により 2030 年までに CO_2 排出量 46%削減を日本は世界的にも公約？したことになった．鉄鋼産業，電力産業と並んで，CO_2 排出量の大きな事業（日本の約 4%）であるセメント産業，およびコンクリート産業においても，CO_2 排出削減を要求されることになるであろう．物事は一側面からではなく多面的にトータルで考える必要があるが，セメント製造量を削減する議論も出現してくるかもしれない．石灰石を脱炭酸させて CaO を原料とするセメント産業は本質的に『脱炭素』することはできない．しかしながらこのような事態を産業の形態を変革させるチャンスととらえて行動することが生き残り，進化のためには必要である．セメント産業は安全・安心な社会を構築し，廃棄物処理量を確保しつつ，短時間的にも製造時の CO_2 排出量を削減する（速度論？），あるいはセメント側へ CO_2 を共存させる（平衡論？）すなわち『共炭素』（あえて『脱炭素』とは表記しない）化を模索していく必要があり，そのような研究も進んでいる．

例えば，CO_2 排出量削減の観点からは，セメント協会は「脱炭素社会を目指すセメント産業の長期ビ

ジョン」を策定し，2050 年の脱炭素社会実現に向け活動を行っている．その中で二酸化炭素排出量削減に向けて，ポルトランドセメントに添加する少量混合成分の分量を 5%から増量することが検討されている．また，脱炭酸の既に終了した高炉スラグやフライアッシュなどの産業副産物を原料の粘土代替ではなく，セメントへの混合材として大量に使用する混合セメントの開発に関する研究（石灰石の利用および化石燃料の利用量を減少させようとする技術）も行われている．さらに，使用済みのセメント・コンクリート廃材へ CO_2 ガスを吸収させる技術，吸収を促進する技術およびコンクリートの製造時，製造後にセメントに CO_2 を吸収させるカーボンキュアリングと呼ばれる技術（原料の石灰石に戻すことを促進する技術）などについても研究が進んでいる．セメントコンクリートの『共炭素』のために必要不可欠である腐食しにくい鉄筋材料の開発，それを利用する研究も今後進歩するであろう．転じて，現在のセメントクリンカー組成の大幅な変更や石灰石原料の利用量を減じたセメントに代わる新材料開発も取り組み（すなわちセメント自体の在り方を変化させようとする技術）もなされている．ジオポリマーに関連する研究は，このような観点からも今後極めて重要となろう．

（執筆者：新　大軌）

5.2　有害物質の固定

ジオポリマーを含むアルカリ活性材料（Alkali Activated Materials: AAMs）への有害物質の固定に関する研究は，それほど長い歴史があるわけではない．Davidovits が 1979 年にジオポリマーを提唱して以降，国内外ともにジオポリマーを含むアルカリ活性材料研究の多くは建設資材利用（産業副産物利用を含む）である．海外では，放射性物質や有害金属の固定に関する研究が 1988 年頃から少数であるが始まった [1]．それでも 2000 年代中頃までは有害物質の固定に関する研究は多くなく，2010 年代になって急速に増加し，特にこの 5 年程度の間に著しく増加している．これは，様々な要因があると思われるが，従来から用いられているセメントや重金属安定化剤（キレート剤など）では，固定化が不十分である元素（セメント固化における Cs 等アルカリ金属）やそれぞれの薬剤の使用における別の環境負荷問題（CO_2 排出や有機キレート分解物など）を引き起こすなどから見直しがかかっていることやアルミノケイ酸塩として利用可能な産業副産物にターゲットとなる有害元素が含まれ，有害元素の固定と建設資材利用の一石二鳥の効果があることなどが考えられる．日本では東日本大震災以降，放射性廃棄物処分においてジオポリマー適用の研究が増加している [2]．そこで，本稿では 5.2.1 において有害物質の固定化機構についてまとめるとともに，5.2.2 において放射性物質への適用について述べる．

5.2.1　有害元素の固定化

（１）固定化機構

AAMs により重金属や放射性物質の様々な元素を固定可能と言われているが，その固定化機構をまとめた図を図 5.2.1 に示す．ここでは，Pb を代表的な金属元素として取り上げ，すでに先行している研究者が提唱している機構等を描いている [3, 4, 5, 6, 7, 8, 9]．有害元素の固定化機構としては，図中に示したように 5 つの機構が主なものとして挙げられる．これらの機構は便宜的に分けて説明するが，複雑に絡み合っており，区別することが難しいことが多い．

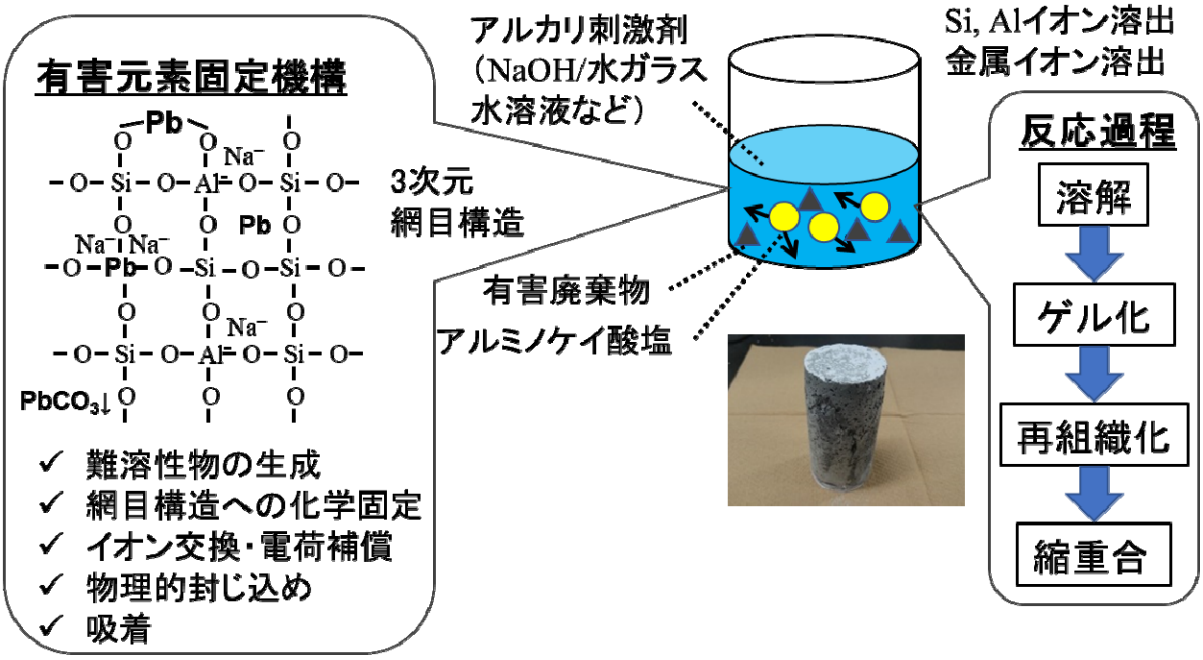


図 5.2.1　AAMs による有害元素固定機構

1） 難溶性物の形成

まず，AAMs は 3 次元の網目構造を形成するが，そのネットワークとは別に，一般に濃度の濃いアルカリを使用するため，重金属元素は水酸化物を生成する．いくつかの金属は難溶性の水酸化物沈殿を形成するし，水酸化物が生成した後，大気中の二酸化炭素と反応し，難溶性の炭酸塩を形成する場合もあると考えられる．**図 5.2.1** では $PbCO_3$ として示している．Pb は水酸化鉛と炭酸鉛の溶解度を比較した場合，1000 倍以上異なる．また，難溶性ケイ酸塩として固定される可能性もある．

2）網目構造への化学的固定

図 5.2.1 の右側に反応過程を示しているが，基本的にはまずアルミノケイ酸塩が溶解して Si，Al イオンが溶出し，高アルカリ条件下でゲル化・再組織化・脱水縮重合が生じることによって，SiO_4 と AlO_4 が四配位した形で O を共有しながら繋がっていき，三次元構造を形成する．この形成過程で，鉛が Al の代わりに架橋構造をとり固定されることや，共有結合・配位結合によりマトリクスの末端に金属が固定されることなどが考えられる．また，対象とする元素を含むゼオライト（様物質）が形成することも多い．ゼオライトの構造内部に有害元素が極めて安定に固定される場合がある．

3）イオン交換・電荷補償

Si-O-Al の 3 次元網目構造中 Al の存在箇所では，電荷が不足していることから Na^+などの 1 価イオンが電荷を補償するため存在すると考えられている．そのため，Si/Al の比率やアルカリ成分の存在量により，AAMs 中のイオン交換サイト数が変わってくる．また，必ずしも非晶質の 3 次元網目構造だけが AAMs 中にできるわけではなく，上記で述べたようにゼオライトなどが形成される場合がある．つまり，対象元素がイオン交換により固定される．なお，ここでの機構はあくまで AAMs 形成過程での取り込みの機構を想定しており，後に説明する「吸着」とは異なる．

4）物理的封じ込め

3 次元網目構造を形成する際にモノマーが重合していくが，その過程において対象元素の水酸化物イオンや難溶性塩などが物理的に取り込まれていく機構が考えられる．また，密度が高く，緻密な AAMs が形成されている場合，外部からの水の浸入なども困難になるため，容易には溶出しにくく，対象元素は高度に固定される．アルミノケイ酸塩の材料や配合，養生条件などによるがセメントよりも高い強度を発現できる場合もあり，物理的封じ込めも主たる一つの固定化機構である．実際，元素によってはそれほど低い溶解度ではない水酸化物であっても AAMs からの溶出率が低いケースがある．

5）吸着

上記の 4 つの機構は，AAMs が形成される過程での有害元素の固定を想定したものであるが，吸着は AAMs が形成された後の元素の固定機構として挙げておく．これは，作製した AAMs を排水中重金属の除去・固定に使用する場合があり，この場合，非晶質の 3 次元網目構造とともに生成したゼオライト（様物質）がイオン交換能を持っており，対象元素を固定可能な場合がある．また，ここでは必ずしもイオン交換だけでの機構ではないことから吸着という表現を使用する．有害元素を含む廃棄物を AAMs にして処分を行う場合，溶出試験を実施するが，その際，AAMs からいったん溶出試験の溶媒に対象元素イ

オンが溶出することが想定されるが，AAMs に発現した吸着能により再度表面に固定されることも十分想定される．

また，これら 5 つの機構以外に，対象とする廃棄物や使用するアルミノケイ酸塩材料やアルカリ活性剤に不純物が含まれ，それらが有害物質の吸着等にも影響することも可能性としては存在する．

（２）対象となる元素及び反応条件

図 5.2.2 に Provis らによってまとめられた AAMs に固定化される元素の分類を示す周期表を示す [4]．この図で，I，Tc，Re，Hg については別文献からをもとに加えている [10, 11]．図において緑色のハッチングは AAMs により固定される元素である．グレー色のハッチングは文献によっては固定に成功しているものもあるが，基本的に固定が難しい元素である．Provis らの報告ではアンチモンは移動性が高まると記載されている [4]．AAMs は強アルカリ溶液をアルカリ刺激剤として一般に使用することから固化体の間隙水や表面付近の水は強アルカリとなり，オキソアニオンは溶液中に存在する [12]．一般的にオキソアニオンで存在する元素はイオン交換・電荷補償でも固定困難であることから他の固定機構を促進して固定する必要がある．色がついていないものは検討例が確認されていないものである．

H																He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	Ac	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Nh	Fl	Mc	Lv	Ts	Og

La	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
Ac	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

図 5.2.2 ジオポリマー固化体に固定化される元素の分類を示す周期表 [4, 10, 11]

また，AAMs による固定対象廃棄物は，焼却灰，スラグ，汚泥，スラリー，廃水，汚染土壌，有機オイル，ゼオライト，イオン交換樹脂，プロセスでの残渣（塩）等であり，極めて幅広い廃棄物に適用可能である．これらの廃棄物中に含まれる対象元素に応じて，上記の固定化機構のうちのどれを主とするか，またどの程度の固定化率・固化（強度）を期待するのかにより反応過程における材料，条件などが

変わってくる．AAMs はアルミノケイ酸塩源であるフィラーとアルカリ刺激剤を混ぜ合わせることによって作製されるが，混練後の養生条件が元素の固定化に大きな影響を及ぼす．特に養生時間と温度は相互関係がある．養生温度が高ければ高いほど完成に要する時間は短くなるが，一律に温度が上昇すれば，固定化率が高まるわけではなく，元素によって異なる．例えば，セシウムだと，105℃といった高温において特定のゼオライト様物質が生成し，その寄与により固定化率がさらに高まる事例が報告されている（5.2.2 に記述）．AAMs の元素構成比は完成する AAMs の性質に大きく関係する．一般的に AAMs の Si/Al 比がイオン交換・電荷補償やゼオライトの生成に大きく影響する．そのため，アルミノケイ酸塩及び対象廃棄物材料の Si/Al 比を変化させて，対象元素の固定化への影響を調べている例が多い．しかし，AAMs の反応過程を考えると，これら供試材料そのものの Si/Al 比も重要であるが，最初の溶解過程においてどの程度 Si，Al が材料から溶出するかがその後の縮重合反応等に影響を及ぼす．アルカリ刺激剤としてナトリウム（Na）系アルカリ水溶液，カリウム（K）系アルカリ水溶液が使われている．アルカリ濃度の強さにより，アルミノケイ酸塩からの Si，Al の溶出率は異なり，生成するゼオライト等も変化してくる．アルカリ金属イオンは AAMs 生成時，まず水分子を整列させ，次にケイ酸塩を溶解させて AAMs の核をつくり，これが AAMs の形成に重要な働きをしていると言われている．また，対象元素の水酸化物イオンの割合等にも影響を及ぼす．以上の各因子の影響は，次項において Cs を中心に研究を紹介する．

（執筆者：高岡　昌輝）

参考文献

1) Comrie D.C. and Davidovits J, Long term durability of hazardous toxic and nuclear waste disposals, *Geopolymer '88 First European Conference on Soft Mineralurgy*, 1, 125-134, 1988.
2) Cantarel V., Motooka T., Yamagishi I., Geopolymers and Their Potential Applications in the Nuclear Waste Management Field - A Bibliographical Study -, *JAEA-Review*, 2017-014, 2017.
3) Van Jaarsverld J. G. S. and Van Deventer J. S. J., The effect of metal contaminants on the formation and properties of waste-based geopolymer, *Cem. Concr. Res.*, 29, 1189-1200, 1999.
4) Provis J. and Van Deventer J. S. J., Geopolymers Structure, processing, properties and industrial applications, *Woodhead publishing limited*, 2009.
5) El-eswed B. I., Aldagag O. M., Khalili F. I., Efficiency and mechanism of stabilization/solidification of Pb(II), Cd(II), Cu(II), Th(IV) and U(VI) in metakaolin based geopolymers, *Appl. Clay Sci.*, 140, 148-156, 2017.
6) Ji Z., Pei Y., Bibliographic and visualized analysis of geopolymer research application in heavy metal immobilization: A review, *J. Environ. Manage.*, 231, 256-167, 2019.
7) El-eswed B.I., Chemical evaluation of immobilization of wastes containing Pb, Cd, Cu and Zn in alkali-activated materials: A critical review, *J. Environ. Chem. Eng.*, 8, 104194, 2020.
8) 有害廃棄物・放射性廃棄物処分へのセメント・コンクリート技術の適用研究委員会報告書：日本コンクリート工学会, 2020.
9) 佐藤淳也, アルミノシリケート硬化体中における重金属および放射性核種の固定化機構に関する研究, 京都大学博士論文, 2021.

10) Chen S., Qi Y., Cossa J. J., Salomao Dos S. I. D., Efficient removal of radioactive iodide anions from simulated wastewater by HDTMA-geopolymer, *Prog. Nucl. Energy*, 117, 102112, 2019.
11) Mattigod S. V.; Westsik J. H.; Chung C. W.; Lindberg M.J.; Parker K. E., Waste Acceptance Testing of Secondary Waste Forms: Cast Stone, Ceramicrete and DuraLith, *Pacific North Laboratory, PNNL-20632*, 2011.
12) Álvarez-Ayuso E., Querol X., Plana F., Alastuey A., Moreno N., Izquierdo M., Font O., Moreno T., Diez S., Vázquez E., Barra M., Environmental, physical and structural characterisation of geopolymer matrixes synthesised from coal (co-)combustion ly ashes, *J. Hazar. Mater.*, 54, 175–183, 2008.

5.2.2 放射性物質汚染廃棄物へのジオポリマー固化技術の適用

放射性廃棄物の固型化材として，セメント材，アスファルト，プラスチックが日本においては規定されている[1)]．地中埋設処分した放射性廃棄物固化体から放射性物質が全量環境中に漏洩しても周辺環境への影響がないように日本においては安全性評価がなされていることから，無機固型化材としてはセメント材（ポルトランドセメント，高炉セメント）が認められてきた[1)]．しかし，できる限り放射性物質が固化体から溶出しないようにすることが多重防護の第一段階として重要であり，海外などでは放射性物質の封じ込め性能がセメントよりも高いとされる AAMs が利用されてきている．セメントが水和反応であるのに対して，AAMs は脱水縮重合反応であることから，固化体中の水分を少なくすることが可能である．この点が水の放射線分解による水素の発生を抑制し，固化体の崩壊を防ぐことができることから，AAMs の利点として期待されている[2)]．また，福島第一原子力発電所事故により環境中へ拡散された放射性物質については，事故由来放射性物質汚染廃棄物として，特別措置法の下，処理処分されるが，従来からの放射性物質廃棄物としての処理処分の流れよりも一般廃棄物・産業廃棄物としての流れの中での対応が必要となり，放射性物質が比較的高い汚染物についてはより一層の固定化が求められている．

本稿においては，放射性廃棄物へのジオポリマー固化技術の適用例として，先行している海外での適用事例を示した後，放射性物質としてはセシウム固定に対する研究が多く実施されていることから，各種影響因子がセシウムの固定化にどのような影響を及ぼすかと固定化機構に関する研究を紹介した．なお，主に物理的封じ込めを期待した炭酸塩スラリーやイオン交換樹脂分解残渣への AAMs 利用についても精力的に研究開発が実施されているが有害物質の固定という点とはやや異なることから本稿では割愛している．

（1）海外での適用事例

Amec Foster Wheeler 社（現在は，Wood 社）の”SIAL”は，最も放射性廃棄物に対して実績のあるジオポリマー材である[1,3,4,5)]. スロバキアのボフニチェ原子力発電所において 1976 年及び 1977 年に発生した燃料溶融事故によって発生した放射性ストロンチウム，セシウム及び TRU（Trans Uranium: 超ウラン元素）で汚染されたスラッジ等をオンサイトで固型化することを目的に開発された．その後，チェコのドゥコバニ原子力発電所やテメリン原子力発電所の廃棄物でテストされ，スロバキアでは 2003 年に，チェコでは 2006 年に固型化材としてのライセンスを取得している．様々な廃棄物に適用可能であり，コバルト，セシウム，鉄を含む模擬廃樹脂の固型化物では，その溶出性がコバルトで 0.01，セシウムで 0.683，

鉄で 0.004％と極めて低く保たれている．硫酸塩含有模擬廃液の固型化においても硫酸イオンですら8.4%以内の溶出率であったことが報告されている．

ドイツの WISMUT 社におけるウラン鉱山の水処理施設のパイロットスケールプラントにおいて，ウランを含む汚泥の処理にジオポリマー材”Géopolymère”が適用されている[1,5,6]．対象の汚泥は，天然ウランが 1000～7000 mg/L，ヒ素が 100～9000 mg/L 含有されているものに適用された．Géopolymère および普通ポルトランドセメントを用いた固化処理プロセスにより，固化体が作製されている．固化体の一軸圧縮強度は，28 日養生後には約 20 MPa の高い一軸圧縮強度を示した．DIN 38414-S4 に基づく溶出試験では，溶出液中のウラン濃度は 1～6 μg/L，ヒ素濃度は 100 μg/L となり，高度に固定化することができている．また，パイロットスケールプラントでは日量 3.5～4 トンの汚泥を固型化したことが報告されている．その他，開発段階として，フランスの原子力庁での研究や，アメリカエネルギー省で研究が行われている[1, 7]．

（２）放射性物質の固化に関する研究

1）Si/Al 比の影響

Aly らは，シリカフュームと NaOH 溶液，メタカオリンを混練し，少量の CsOH，$SrOH_2$ を添加して，Si/Al 比を 1.5～4.0 に変化させて（H_2O/Na_2O 比は 7～10 程度），60°C，24 時間で養生後，400°C，2 時間で自由水を除去してジオポリマーを作製している．Si，Al，Na，Cs，Sr に関する浸出試験の結果，Cs の浸出量は Si/Al =2.0 で最小値を取り，Si/Al 比が増加すると，Si/Al ≥3.0 で Si，Na，Sr の浸出量は増加し，Al の浸出量は急激に低下したことを報告している[8]．

市川らはメタカオリン，水ガラス，NaOH で調整したジオポリマーに塩化セシウムを添加し，Si/Al 比を 1.34～2.04 に変化させて，Cs/Na 選択係数への影響を調べ，Si/Al 比により生成するゼオライトが異なることから Cs の吸着率が異なることを報告している[9]．

辻井らは，いくつかのアルミノケイ酸塩試薬を用いて Si/Al 比を変化させて，ジオポリマー固化体を作製し，材料の Si/Al 比が Cs 固定化に与える影響を調べている．材料中の Si/Al 比よりもアルカリに溶解している Si，Al を用いることで，Cs 不溶化に直接寄与する Si，Al のバランスの変化が明確になると報告している[10]．

小出らは常温でアルミン酸ソーダと水ガラスに塩化セシウムを混合して AAMs を作成し，Cs の不溶化条件を探索している．Si/Al 比が小さいほど溶出率は低下し，Cs15%溶液添加で Si/Al 比＝1.5，12 日間養生で，Cs の溶出率は 5.1%になっている．常温でも Cs を含むゼオライトが形成されており，非晶質ネットワークによる固定に加え，ゼオライトの形成により Cs 溶出率が低下するものと推定している[11]．

2）養生条件の影響

Jiménez らは，石炭灰と 8 M NaOH 水溶液及び CsOH や $CsNO_3$ を用いて材料中の Cs 濃度が 1%となるようにした AAMs において Cs 不溶化効果を調査している．養生温度が 85°C よりも 120°C で Cs 溶出率が高くなり，養生時間が 5 時間よりも 7 日の方が Cs 溶出率が低くなる傾向を報告している[12]．

Li らは石炭灰を使用した AAMs とセメントによる Cs の不溶化の比較をしている．石炭灰に水ガラスと安定性 Cs を，ポルトランドセメントにイオン交換水と安定性 Cs を加え，60ºC で 28 日間養生することでそれぞれの固化体を作製している．溶出試験の結果，AAMs からの Cs 溶出量がセメント固化体に

比べてはるかに少なく, また, 耐酸性や圧縮強度の面でも, AAMs の方が優れていると報告している [13].

中村らは, Cs を含む模擬飛灰をメタカオリン, ケイ酸ソーダ, NaOH を材料として, 80ºC, 90ºC, 105ºC で変化させて AAMs を作製し, 養生温度の影響を調べている. 105ºC養生での固化体からの Cs の溶出は 80ºCに比べて 1/5 程度に抑えられていることを実験的に示している. また, その際, X 線吸収微細構造分析より 105ºCの方が AAMs 中の Cs の存在状態がポルサイトの形状に近くなり, このことが溶出を抑えている要因であると推定している [14].

高岡らは, Cs を含む溶融飛灰をメタカオリン, ケイ酸ソーダ, NaOH を材料として, 養生温度 105ºC 一定として, 養生時間を変化させて AAMs を作製し, 養生時間の影響を調べている. 6h では, Cs 溶出率は 20%程度であるが, 12 時間以上で 5%以下にすることができ, 養生時間が長い方がよいことを示している [15].

このように温度が高い方が Cs の溶出抑制効果が高いが, 小出らは常温でアルミン酸ソーダと水ガラスに塩化セシウムを混合して AAMs を作製し, 養生時間が Cs 溶出率に与える影響を調べている. 養生時間 3 時間では, 30%程度の溶出率であったものが 60 日養生で 1.7%まで低下することを示している [11].

3) アルカリ刺激剤濃度の影響

高岡らは, Cs を含む溶融飛灰をメタカオリン, ケイ酸ソーダ, NaOH を材料として, 養生温度 105ºC, 養生時間 24 時間として, NaOH 濃度を変化させた固化体を作製し, 溶出試験を実施したところ, NaOH 濃度を変化させた固化体の中で最も Cs 溶出が抑えられていたのは 10M NaOH を使用した場合であり, それ以外の NaOH 濃度ではどれも Cs 溶出率が 20%を超えていた [15].

辻井らはより詳しく NaOH 濃度の影響を調べている. NaOH 濃度が 7-10 M の条件で急激に Cs 溶出率が減少し 10%以下となり, 最も低い 8 M の条件では 2.6%であった. XRD 分析から, Cs 溶出率が 10%以下となる条件では, Chabazite-Na の生成が確認され, 生成すればするほど Cs 溶出率が減少するという結果になった. NMR 分析からは, XRD 分析の結果と同様に, 8, 10 M の固化体で結晶質構造が明確となりゼオライトの生成が示された. これらの結果から, AAMs による溶融飛灰中 Cs 不溶化において, NaOH 濃度は AAMs の Cs 不溶化性能や構造に対して大きく影響することを明らかにした [16].

4) Cs の固定化機構

He らは, SiO_2 ゾルおよび CsOH 水溶液を混ぜて作成したアルカリシリケート溶液に, 合成メタカオリンを加えて 50°C で 48 時間養生した固化体の TG/DSC 分析を行い, その結果と XRD 分析を比較している. TG/DSC 分析から, 97.7°C に水分の蒸発に伴う吸熱ピークと 1216.3°C にポルサイトの結晶化に由来する発熱ピークを確認した. XRD 分析からは, 1000°C までは非晶質相が確認でき, 1100°C を越えるとポルサイトが生成することを報告している [17].

Chlique らは, CsOH と NaOH の割合を調整して脱イオン水に溶解させ, 非晶質シリカを混ぜて作成したアルカリシリケート溶液に, メタカオリンを加え, 室温で 5 日養生した後に 1100°C で加熱して作製した固化体に対して, XRD 分析を行っている. その結果, CsOH のみを使用した固化体では, 主にポルサイト相が形成され, 少量のセシウムアルミノシリケート, 微量の非晶質シリカ相が検出された. また, Na を含む固化体では, ネフェリンおよびポルサイトの両方が検出されたが, Na 量の増加とともにポルサイト由来のピークは小さくなり, また, セシウムアルミノシリケートの形成が阻害される結果を報告

している [18)]

Blackford らは，メタカオリン，水ガラス，脱イオン水を用いて，Si/Al が 2.0，Na/Al が 1.0 の条件で，安定性 Cs を硝酸塩あるいは水酸化物の形態で 5 wt%となるように添加し，40°C で作製した固化体に対して，NMR 分析，TEM/EDX 分析，XRD 分析を行っている．XRD 分析や TEM/EDX 分析の結果，結晶質のものが観察されなかったことから，完成したジオポリマーが非晶質であり，Cs が非晶質相に組み込まれていることが示された．NMR 分析の結果から，Cs や Na はアルミノケイ酸塩フレームワークと結合していると推定している [19)]．

Shiota らは，都市ごみ焼却飛灰と焼成パイロフィライト，水ガラス，NaOH を用いて養生温度 105°C で AAMs を作成し，溶出試験を実施して，低溶出率であることを確認するとともに XRD，SEM，XAFS 分析により Cs の化学状態を調べ，ポルサイトへ変化することにより不溶化されていることを示している [20)]．さらに，様々な条件でのサンプルを作成し，XAFS 分析によりポルサイト含有率を算出し，溶出率の関係を調べている．ポルサイト含有率が増加するにつれて，Cs 溶出率が減少する正の相関が観察されたことからポルサイト化が不溶化の主たる要因であると結論づけている [21)]．

5) Sr と Cs の固定

He ら [22)]は，模擬放射性 Cs^{+}および Sr^{2+}の固定化を目的として，メタカオリンをベースに，シリカゾル及び NaOH または KOH 溶液を刺激剤として用いて 25，60°C で AAMs を作製し，長期浸出試験を行っている．その結果，Cs^{+}の固定化については，同じ浸出条件であれば，Na 系 AAMs は K 系 AAMs よりも低い浸出率を示した．さらに浸出試験で脱イオン水ではなく NaCl 水溶液を用いた条件においては，脱イオン水の場合よりも Cs^{+}および Sr^{2+}の浸出が比較的促進される結果となった．これらは，NaCl による AAMs の腐食（浸出試験中の亀裂や細孔の出現）が原因と推定している．

中村らは，Cs と Sr の同時固定化に関する検討を行っている．ごみ焼却飛灰，焼成パイロフィライト，NaOH および水ガラスを用いて，AAMs を作製している．その結果，Sr の溶出率はどの条件でも 0.7%以下に抑えることができるが，ごみ焼却飛灰の全混合材料中の割合を 49%にした場合で Cs の溶出率が 7.2%，25%に減じた場合で Cs の溶出率が 0.83%となり，配合設計は Sr よりも Cs に依存することを示した [23)]．

（執筆者：高岡　昌輝）

参考文献

1) 目黒義弘，佐藤淳也，アルカリ活性材料（ジオポリマー）を用いた放射性廃棄物の固化技術の現状，デコミッショニング技報, 54, 48-55, 2016.

2) Cantarel, V.; Arisaka, Makoto; Yamagishi, Isao, On the hydrogen production of geopolymer waste forms under irradiation, *J. Am. Ceram. Soc*., 102, 7553-7563, 2019.

3) 小野崎公宏, アルカリ活性材料固型化材 SIAL®の特性試験, デコミッショニング技報, 55, 28-35, 2017.

4) Lichvar P., Rozloznik M., Sekely S., Behavior of Aluminosilicate Inorganic Matrix SIAL® during and After Solidification of Radioactive Sludge and Radioactive Spent Resins and Their Mixtures, *IAEA/INIS, RN-44122421* , 2013.

5) 佐藤淳也, アルミノシリケート硬化体中における重金属および放射性核種の固定化機構に関する研究, 京都大学博士論文, 2021.
6) Hermann E., Kunze C., Gatzweiler R., Kiessig G., Davidovits J., Solidification of various radioactive residues by géopolymère with special emphasis on long-term-stability, *Géopolymère '99 Proceedings*, 211-228 1999.
7) Mattigod, S. V.; Westsik, J. H.; Chung, C. W.; Lindberg, M.J.; Parker, K. E., Waste Acceptance Testing of Secondary Waste Forms: Cast Stone, Ceramicrete and DuraLith, *Pacific North Laboratory, PNNL—20632*, 2011.
8) Aly Z., Vance E.R., Perera D.S., Hanna J.V., Griffith C.S., Davis J., Durce D., Aqueous leachability of metakaolin-based geopolymers with molar ratios of Si/Al=1.5–4. *J. Nucl. Mater.*, 378, 172-179, 2008.
9) 市川恒樹，山田一夫，渡邊禎之，芳賀和子，大迫政浩，メタカオリンと水ガラスから作成したジオポリマーのセシウム保持能，第 7 回環境放射能除染研究発表会要旨集，15, 2018.
10) 辻井張希, 中村祐太, 塩田憲司, 藤森崇, 大下和徹, 高岡昌輝, アルミノケイ酸塩のアルカリ溶液への溶解特性がジオポリマーによる熱処理飛灰中セシウム不溶化に与える影響, 廃棄物資源循環学会論文誌, 32, 136-146, 2021.
11) 小出南，塩田憲司，藤森崇，大下和徹，高岡昌輝，アルカリ活性化されたアルミノケイ酸塩によるセシウム溶液の不溶化処理，環境放射能除染学会誌，9, 173-182, 2021.
12) Jiménez A. F.， Macphee D.E.， Lachowski E.E.， Palomo A., Immobilization of cesium in alkaline activated fly ash matrix, *J. Nucl. Mater.*, 346, 185-193, 2005.
13) Li Q., Sun Z., Tao D., Xu Y., Li P., Cui H., Zhai J., Immobilization of simulated radionuclide $133Cs^{+}$ by fly ash-based geopolymer, *J. Hazar. Mater.*, 262, 325-331, 2013.
14) 中村祐太，高岡昌輝，鈴木泰博，菊池孝浩，石田泰之，市村高央，鈴木務，易溶性セシウムを含有した飛灰のジオポリマー固化(2)Cs の化学形態と不溶化の関係，日本原子力学会 2017 年春の大会，2L21，2017
15) 高岡昌輝，中村祐太，塩田憲司，日下部武敏，藤森崇，大下和徹: 溶融飛灰中Csのジオポリマー固化による不溶化, 第24回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会, 福島, 2018.
16) 辻井張希,塩田憲司, 日下部武敏, 藤森崇, 大下和徹, 高岡昌輝, ジオポリマーによる溶融飛灰中セシウム不溶化に対する NaOH 濃度の影響，第 31 回廃棄物資源循環学会研究発表会講演論文集，427-428, 2020.
17) He, P., Jia, D., Low-temperature sintered pollucite ceramic from geopolymer precursor using synthetic metakaolin, *J. Mater. Sci,* 48, 1812-1818, 2013.
18) Chlique C., Lambertin D., Antonucci P., Frizon F., Deniard P., XRD analysis of the role of cesium in sodium-based geopolymer, *J. Am. Ceram. Soc.*, 98, 1308-1313, 2015.
19) Blackford M. G., Hanna J. V., Pike K. J., Vance E. R., Perera D. S., Transmission Electron Microscopy and Nuclear Magnetic Resonance Studies of Geopolymers for Radioactive Waste Immobilization, *J. Am. Ceram. Soc.*, 90, 1193-1199, 2007.
20) Shiota K., Nakamura T., Takaoka M., Aminuddin S. F., Oshita K., Fujimori T., Stabilization of cesium in alkali-activated municipal solid waste incineration fly ash and a pyrophyllite-based system, *Chemosphere*, 187, 188-195, 2017.

21) Shiota K., Nakamura T., Oshita K., Fujimori T., Takaoka M., Quantitative cesium speciation and leaching properties in alkali-activated municipal solid waste incineration fly ash and pyrophyllite-based systems, *Chemosphere*, 213, 578-586, 2018.
22) He P., Cui J., Wang M., Fu S., Yang H., Sun C., Duan X., Yang Z., Jia D., Zhou Y., Interplay between storage temperature, medium and leaching kinetics of hazardous wastes in Metakaolin-based geopolymer. *J. Hazar. Mater.*, 384, 121377, 2019.
23) 中村祐太，高岡昌輝，塩田憲司，大下和徹，藤森崇，ジオポリマーによるごみ焼却飛灰中のストロンチウムの不溶化処理，第 27 回廃棄物資源循環学会研究発表会講演論文集，479-480, 2016.

5.3 地盤環境改善を目的としたアルカリ活性材料（AAMs）の適用

5.3.1 一般

地盤工学分野においては，従来よりセメント系固化材（セメントを母材として，土質に応じて特定成分量や粒度を調整した固化材）や石灰系固化材等の材料を用いて，強度変形特性，遮水性の改善や重金属等の有害物質の溶出抑制を目的とした地盤改良が広く実施されている．地盤改良分野においてもコンクリート材料と同様に，材料に起因する二酸化炭素発生量の削減，副産物等の有効利用は喫緊の課題であり，ジオポリマーをはじめとするAAMsの利用が進められている．

一方，ジオポリマーの主材となるアルミナシリカ粉末材料（活性フィラー）としてメタカオリン（カオリン粘土を焼成した非結晶性材料）が広く用いられているが，非晶質成分を多く含む天然の火山灰土や黒ボク土もアルミナシリカ粉末としての適用性があると考えられる．

本節では，地盤工学分野におけるアルカリ活性材料の適用事例として，①ジオポリマー技術の地盤改良分野への適用，②土壌のアルミナシリカ粉末材料としての適用，の2つの観点から既往研究をレビューする．観点①については，処理効果の影響要因として知られている活性フィラーの種類，アルカリ刺激剤の種類や濃度，養生温度，配合などの条件が改良効果に及ぼす影響について調査を行う．観点②については，火山灰質土等の土壌をアルミナシリカ粉末材料の代替材として利用した事例と改良効果への影響について，評価を行う．

5.3.2 地盤改良へのAAMsの適用

ジオポリマリゼージョンはセメントクリンカー以外の非晶質のアルミナシリカ粉末（活性フィラー）とアルカリ溶液の縮重合反応で生じる硬化反応の総称である．一般的には，アルミノシリケートを含有するアルカリ活性材料に，水ガラスあるいはNaOHなどのアルカリ刺激剤を含む溶液を混合し，常温養生あるいは給熱養生を行って硬化させる．コンクリート工学分野においてはこの反応を利用することにより，AAMs をセメント代替材としての利用が従来より実施されているが，地盤工学分野においても2010年代前半より，ジオポリマー技術の適用事例が増加しており，代表的なものを**表5.3.1**にまとめる．特に，産業副産物を有効利用する観点から，活性フィラーとして石炭灰フライアッシュ，高炉スラグ，バイオマス灰等を利用する事例が海外を中心に数多く報告されている．

AAMsを利用した地盤改良の原理を大きく2つに大分される．第一の原理は，カルシウム含有量が低く，アルミノシリケート含有量が高いフライアッシュやメタカオリンをナトリウムベースのアルカリ刺激剤によって活性化させるもので，水和物としてはN-A-S-H（Sodium Aluminate Silicate Hydrate）が支配的である．地盤改良分野においては，活性フィラーとしては石炭灰フライアッシュの利用事例が非常に多く，特にASTM C 618に基づくClass Fのフライアッシュ（CaO含有率が10%以下）が広く適用されている．一方，アルカリ刺激剤としてはナトリウム系（Na_2SiO_3，NaOH）が主体であるものの，カリウム系が使用される場合もある．いずれも，ケイ酸塩と水酸化物を混合して利用している事例が多い．Liu et al. (2016) [1)]によると，KOHの方がNaOHより硬化性が高く，強度も大きいとしているが，コストの面での制約があり，ナトリウム系材料が広く使用されているようである．さらに，地盤改良への適用においては高温環境下で養生することが困難であるが，大半の研究では常温環境下で養生を行いつつアルカリ刺激剤の濃度を上昇させることによって強度発現を図る事例が多い．

第二の原理としては，フライアッシュのようなアルミノシリケートを主成分とする材料に，スラグ等のカルシウムを主成分とする材料を混合し，N-A-S-H に加えて C-A-S-H（Calcium Aluminate Silicate Hydrate）の生成による硬化反応である．前者と比較して，高濃度のアルカリ刺激剤や昇温の必要性がないことから，原位置での地盤改良には比較的適用しやすいと考えられる．代表的な事例としては，Phetchuay et al. (2016) [2]では，CCR（Calcium Carbide Residue：水と炭化カルシウムとを反応させてアセチレンを生成する際に発生する残渣で水酸化カルシウムが主成分）をカルシウム供給源として使用している．液性限界状態の粘性土を石炭灰フライアッシュ，およびアルカリ刺激剤として Na_2SiO_3＋NaOH 水溶液を用いて改良を行った際に，CCR の添加量が 7%～12%の範囲で強度改善効果があること，また 12%の CCR 添加量で非添加時と比較して 1.5 倍の圧縮強度が得られることを報告している．Arulrajah et al. (2018)[3]や Abdullah et al. (2019)[4]は高炉水砕スラグ粉砕物によってフライアッシュの一部を置換することにより，高い硬化性を得られることを報告している．

表 5.3.1　軟弱地盤を対象としたジオポリマリゼージョンによる改良事例

改良目的	改良対象土	活性フィラー	アルカリ刺激材	固化助材	養生温度	主な成果	出典
高圧噴射攪拌工法への適用	低塑性砂混じり粘土	石炭灰フライアッシュ（Class F）	濃度：12.5M Na_2SiO_3+NaOH (6:1)	なし	室温，土中	・ 強度発現にはセメント改良と比較して時間を要し，3ヶ月養生時強度は 1 年養生時強度の 40～60%程度に留まる． ・ 高圧噴射攪拌工法の施工性には大きな影響を与えない．	Cristero et al. 2011[5]
海成粘土の強度改善	高塑性粘土	石炭灰フライアッシュ	Na_2SiO_3+NaOH	炭化カルシウム残渣 (Calcium carbide residue)	室温	・ 7～12%の CCR 添加が効果的であり，12%添加時には石炭灰フラアッシュ単体の改良と比較して 1.5 倍の一軸圧縮強さが得られる． ・ 同程度の強度の OPC 改良土と比較して CO_2 排出量は 22～44%程度削減することができる．	Phetchuay et al. 2016[2]
改良杭工法への適用性検討	高塑性粘土	Palm oil fuel ash (POFA，パーム油生産時の廃棄物焼却灰)	濃度：5～15M NaOH KOH	なし	室温	・ 土と POFA を活性フィラーとして使用．土に対して POFA20～25%添加が効果的． ・ KOH をアルカリ刺激材として用いた場合に最も高い強度が得られる． ・ 養生前に 1 時間 100℃に加熱することで，大幅な強度改善が図られる．	Pourakbar et al. 2016[6]
気泡混合改良土への適用	低塑性粘土 (CL)	高炉水砕スラグ粉砕物 (Ground granulated blast furnace slag)	Na_2SiO_3+炭化カルシウム残渣 (Calcium carbide residue) (50:50)	なし	室温	・ 同程度の密度のセメント改良体と比較して，空隙率が高く，強度も改善され，C-S-H の含有量も上昇する．	Du et al. 2017[7]
ジオポリマー改良土の路盤材への適用・長期耐久性評価	シルト質砂	石炭灰フライアッシュ	濃度：5～12.5 M Na_2SiO_3+NaOH（1:2, 1:1)	なし	20 C°	・ セメント改良土と同程度の浸漬，乾湿繰返しに対する耐久性が確認することができた．ただし，初期強度が小さいことから材齢 7 日程度で水浸させると強度が低下した．	Rios et al. 2017[8]
強度改善，深層混合処理への適用	海成シルト	石炭灰フライアッシュ（Class F） スラグ（排出源の記載なし）	濃度：8M NaOH Na_2SiO_3+NaOH (70:30) KOH K_2SiO_3+KOH (70:30)	なし	23 ± 1 C°	・ アルカリ刺激剤は Na_2SiO_3+NaOH の改良効果が最大．KOH，NaOH も養生に伴う強度発現を確認． ・ ある一定量（土に対して 15%）までのスラグ添加はスラグ中の Ca が強度発現に貢献． ・ 深層混合処理に適用可能が数 MPa 程度の強度発現	Yaghoubi et al. 2018[9]
路盤材への適用可能性	軟弱土	Palm oil fuel ash (POFA，パーム油生産時の廃棄物焼却灰)	Na_2SiO_3+NaOH	なし	室温	・ POFA と軟弱土の配合比によって，最適な Na_2SiO_3 と NaOH の比率が変化し，POFA の比率が高いほど Na_2SiO_3 量が多い配合が適切となる． ・ C-A-S-H と C-(N)-A-S-H が主たる生成物である．	Sukmak et al. 2019[10]
ジオポリマー改良土の強度変形特性	カオリン粘土 低塑性・高塑性の自然粘土	高炉水砕スラグ粉砕物 (Ground granulated blast furnace slag) 石炭灰フライアッシュ	Na_2SiO_3+NaOH (Na_2SiO_3/NaOH = 2.33)	なし	20-25 C°	・改良材の添加量増加に伴い，延性的破壊から脆性的破壊挙動に移行する．また，改良に伴い過圧密土に近い挙動が得られた． ・ 改良効果は対象土の鉱物組成に依存する．	Abdullah et al. 2019[4]

5.3.3 地盤改良への AAMs 適用に関する課題と展望

地盤改良に利用する際の課題としては，改良対象となる土の鉱物組成によって改良効果に大きな差異が生じることが挙げられる．体系的に土の鉱物組成の影響を調査した事例はほとんどないが，高塑性でかつ活性度が高い粘土は緩衝能が高く，溶解したイオンが水酸化物イオンを含めて吸着されることによって，セメント改良土と同様に pH や水和反応に影響を及ぼす可能性が指摘される．例えば，Abdullah et al. (2020)[11]は，改良対象土の粘土分含有量が高く可塑性が高い場合，改良材の混合性が低下すること，および pH の影響によって，改良効果が低下することを示しており，おおむね塑性指数が 26%以下の粘性土への適用性が高いとしている．

地盤工学分野では副産物を活性フィラーとして用いることが多い．現時点ではフライアッシュ，およびスラグが用いられているが，他の副産物の利用を検討する場合には，改良体の膨張に留意する必要があると推測される．例えば，李 (2016) [12]は都市ごみ焼却灰溶融スラグを粉砕した粉末を原料としたジオポリマーの検討を行っており，焼却灰に含まれる金属アルミニウムによって水素が発生し，凝結過程で発泡・膨張が生じることを明らかにしている．改良体の膨張は強度や遮水性に影響を及ぼすことから，使用材料中の金属アルミニウム量には留意が必要である．また，水素による膨張が改良体の性能に及ぼす影響については十分に解明されていない部分も多く，一層の知見の蓄積が期待される．

一方，同じく膨張を引き起こすエトリンガイトの生成に関しては，改良体の配合が影響する．Chindaprasirt (2013)[13] の検討では，生石灰や無水石膏を含有する流動床石炭灰を原料に用いて，アルカリ刺激剤として用いる NaOH 溶液の濃度を変えて，物理的特性，生成物，体積変化について測定を行っている. アルカリ刺激剤の濃度が 10M, 12M の条件では XRD によりエトリンガイトの生成が認められ，SEM の観察では微細なひび割れを生じている部分に析出することを明らかにしている．一方，刺激剤の濃度が 15M の条件，あるいは原料に $Al(OH)_3$ を添加した条件では，エトリンガイトが生成しないことを明らかにしている．ただし，これらはコンクリート材料を対象とした検討であり，地盤改良への適用に際して課題となるかについては留意が必要である．その理由としては，改良土は，空隙率がコンクリートと比較して大きく，エトリンガイトの生成を高含水比の土の改良に積極的に活用するなど，エトリンガイトの生成がコンクリートの場合のように問題にならないことが多いためである．

また，前述のとおり常温環境下での養生になることが多いため，養生初期の強度が小さい点や高濃度のアルカリ刺激剤を利用が必要となる点も課題である．例えば，Cristero et al. (2011)[5]は，28 日養生時，および 3 ヶ月養生時の強度が 1 年養生時の発現強度のそれぞれ 20～40%，40～60%に留まることを指摘しており，通常のセメント改良土と比較して強度発現に長期を要することは明らかである．

以上より，AAMs の地盤改良分野における利用に関する研究は一定の成果が示されている一方で，適用性の高い土の選定，適切な配合設計の指針等は未だ確立されていない．今後は，高濃度のアルカリ刺激剤を利用することによる安全面やコスト面の課題を含めて，体系的な施工指針やガイドラインの作成が重要であると考えられる．

5.3.4 地盤材料のアルミナシリカ材料としての利用

5.3.2 では活性フィラーとして，フライアッシュ等を利用する事例を示したが，天然の地盤材料も Si や Al を主成分とすることから，ジオポリマー処理におけるアルミナシリカ材料として適用する事例が数多く報告されている．例えば，Bondar et al. (2011)[14]は，天然の Dacite（火成岩）と Andesite（安山岩）

の微粉末をアルミナシリカ材料として利用したコンクリートを対象に，適切なアルカリ刺激剤の種類や添加量等を検討しており，適切な配合で 40℃環境で養生することにより構造体として利用可能な圧縮強さが得られることを報告している．Tchakouté et al. (2013) [15]は，2 種類の火山灰を用いてジオポリマー硬化体を作成し，火山灰の物理化学特性が硬化体の品質に及ぼす影響を検討している．その結果，火山灰中に非晶質の $Al_2O_3 + SiO_2$ の比率が高く（結果として硬化体の Na_2O/Al_2O_3 比が比較的低く），比表面積が大きい火山灰を用いた場合，常温環境での養生でも最大 50 MPa 程度の強度を発現した．また，Lemougna et al. (2014) [16] も，同様に火山灰の化学組成に加えて非晶質成分量が硬化体の強度特性に大きな影響を及ぼすことを明らかにしている．

国内では，鹿児島大学のグループ（例えば，Katpady et al. 2015 [17]）がシラスのアルミナシリカ粉末材料としての利用可能性を検討している．シラスは，カルデラから高温のマグマが火山ガスとともに噴出する際に，火山ガラスを主とする溶融物質の破片および粒子が流下，堆積することによって形成される火砕流堆積物の一種である．鹿児島県を中心とした南九州一帯には 2～10 万年前に噴出した火砕流によって大規模のシラス地層が堆積しており，鹿児島県内だけでも 600 億 m^3 を超えるといわれている．武若 (2004) [18]によると，シラスはシリカ含有量が概ね 70%前後であり，鉱物組成としは非晶質の火山ガラスが 60%前後を占める．このことから，ポゾラン活性を有しており，コンクリートにも適用が図られている．

Katpady et al. (2015) [17]は，シラスをジオポリマーモルタルの活性フィラーとして利用するために，粒径が 75 μm 以下のシラス微粒分を用いて 80～90℃の環境で養生したジオポリマー硬化体を対象に強度試験を実施し，活性フィラーにフライアッシュを用いた配合との比較，検討を行っている．その結果，シラスを用いて作製したジオポリマーは，フライアッシュを用いた場合より不純物の影響や溶解速度が遅いことによる強度低下はみられるものの，一定の強度が発現することを確認している．

5.3.5 AAMs の汚染土壌処理への適用可能性

ジオポリマー技術は，放射性廃棄物をはじめとする有害廃棄物の処理に適用されている．これらの処理においては，放射性物質や重金属を硬化体中に化学的結合や物理的封じ込めによって不溶化，固定化するものであり，汚染土壌処理への適用可能性も期待される．一方で，汚染土壌処理にジオポリマー技術を使用した事例はほとんどみられないが，本節では国内の汚染土壌処理における不溶化技術の位置付けを説明した上で，ジオポリマー技術の適用可能性を議論する．

（1）土壌汚染とその対策の現状

汚染土壌や埋立処分された廃棄物が雨水や地下水が接触し，有意な濃度で有害物質が液相に溶出する場合，地下水汚染を引き起こす可能性が懸念される．対策実施の判断や工法の選定は有害物質の種類，濃度，汚染の範囲に大きく依存するが，不溶化，原位置封じ込めや遮水工封じ込めといった汚染の拡散防止を目的とした対策においては，地盤改良技術が重要な役割を果たしている．ただし，これらの対策は有害物質が土壌・地下水中に残存した状態で適用されることから，高い水準での施工，品質評価・管理が求められる．

保全対象となる地下水の水質については，土壌と同様に人の健康を保護する上で維持することが望ましい基準が環境基準として定められている．**表 5.3.2** に項目と基準値，および 2020 年 3 月時点の基準

超過状況[19]を示す．超過事例件数が多い項目の主たる汚染原因は，砒素，ふっ素，ほう素については地質に由来する自然的原因，テトラクロロエチレン，トリクロロエチレン等の揮発性有機塩素化合物については工場，事業場からの排水・廃液・原料等の漏えい，硝酸性窒素及び亜硝酸性窒素については過剰な施肥，家畜排せつ物の不適正処理等による農業・畜産業による窒素負荷であると報告されている．

表 5.3.2　地下水環境基準と地下水汚染の事例件数[19]（2020 年 3 月末時点）

項目	地下水環境基準 (mg/L)[注1]	合計	件数[注2]				
			超過事例		一時達成事例	改善事例	調査不能事例
			超過している項目	現在は超過していない項目[注3]			
カドミウム	0.003	21	11	1	2	7	0
鉛	0.01	353	86	32	60	139	36
六価クロム	0.02	86	36	6	14	24	6
砒素	0.01	1,435	967	31	134	164	139
総水銀	0.0005	129	40	8	15	48	18
アルキル水銀	ND	2	1	1	0	0	0
セレン	0.01	24	16	2	1	3	2
ふっ素	0.8	625	405	22	78	59	61
ほう素	1	253	147	21	28	27	30
全シアン	ND	59	30	8	9	10	2
クロロエチレン	0.002	286	162	41	49	21	13
ジクロロメタン	0.02	59	7	20	8	21	3
四塩化炭素	0.002	115	27	22	14	48	4
1,2-ジクロロエタン	0.004	81	15	27	9	23	7
1,1-ジクロロエチレン	0.02	281	30	115	42	84	10
1,2-ジクロロエチレン	0.04	422	173	88	86	48	27
1,1,1-トリクロロエタン	1	140	5	37	23	65	10
1,1,2-トリクロロエタン	0.006	41	6	18	5	11	1
トリクロロエチレン	0.01	1,300	387	169	223	400	121
テトラクロロエチレン	0.01	1,478	464	94	253	492	175
ベンゼン	0.01	334	93	16	41	169	15
1,3-ジクロロプロペン	0.002	1	1	0	0	0	0
1,4―ジオキサン	0.05	25	20	3	2	0	0
PCB	ND	9	2	0	2	4	1
チウラム	0.006	0	0	0	0	0	0
シマジン	0.003	0	0	0	0	0	0
チオベンカルブ	0.02	0	0	0	0	0	0
硝酸性窒素及び亜硝酸性窒素	10	3,475	1,962	0	654	623	236
母数[注4]		8,692	4,435		1,423	2,074	760

注１　ND：検出されないこと

注２　「超過事例」とは，調査時点でいずれかの項目で環境基準を超過している事例．
「一時達成事例」とは，最新のデータはいずれの項目も環境基準を超過していないが，一時的な達成の可能性があり，恒久的な改善確認はできていない事例．
「改善事例」とは，過去は環境基準を超過していたが，現在はいずれの項目も超過しておらず，将来的にも環境基準を超過することはないと判断できる事例．
「調査不能事例」とは，井戸の廃止等により調査できなくなった事例．

注３　過去に複数項目の汚染があった場合で，現在は他項目において環境基準超過があるものの，当該項目は環境基準を超過していない項目の事例件数をカウントしたもの．

注４　1 事例で複数項目による汚染がある場合があり，各項目の和と母数は一致しない．

国内の多くの土壌汚染は，土壌汚染対策法（以下，土対法）に基づいた対策が行われる．土対法は，適宜契機をとらえて土地の土壌汚染状況を把握し，人の健康に被害が生じる恐れ（リスク）を判断し，リスクがある場合にはその情報を公開した上で，適切にリスクの低減措置を実施することを定めたものである．土地利用の履歴などから土壌汚染の可能性がある土地において一定規模以上の建設工事を行う場合，土対法の調査の対象となり，その結果，土壌や地下水の汚染が顕在化することがある．土対法においては，「地下水の飲用摂取」，および表層への蓄積性が高い重金属等については「土壌の直接摂取」を含めた 2 つの経路によるリスクを対象としている．それぞれのリスクに対応して，土壌の 10 倍質量

に相当する体積の水に接触した際の溶出量（濃度）に対する「土壌溶出量基準」，および含有されている有害物質のうち，体内に吸収しうる量に対する「土壌含有量基準」が定められている．ただし，土対法はあくまで土壌汚染の調査・対策方法を規定するものであり，地下水汚染については，地下水を涵養する土壌の汚染状態を適切に管理することで，その防止を図っている．さらに，人の健康を保護する上で維持することが望ましい基準が環境基準として定められている．これらの基準項目と基準値を**表 5.3.3** にまとめる．**表 5.3.3** 中の「第二溶出量基準」は後述するが不溶化や原位置封じ込めの適用の可否にも係る基準であり，重金属等は土壌溶出量基準の 30 倍値，揮発性有機塩素化合物や農薬は土壌溶出量基準の 10 倍値が原則として定められている．

表 5.3.3　土壌汚染に係る基準値

項目	土壌環境基準 (mg/L)	土壌溶出量基準 (mg/L)	第二溶出量基準 (mg/L)	含有量基準 (mg/kg)	土壌汚染対策法での分類
カドミウム	0.003	0.003	0.09	45	重金属等（第二種特定有害物質）
鉛	0.01	0.01	0.3	150	
六価クロム	0.05	0.05	1.5	250	
砒素	0.01	0.01	0.3	150	
総水銀	0.0005	0.0005	0.005	15	
アルキル水銀	ND	ND	ND	-	
セレン	0.01	0.01	0.3	150	
ふっ素	0.8	0.8	24	4,000	
ほう素	1	1	30	4,000	
全シアン	ND	ND	1	50（遊離シアン）	
クロロエチレン	0.002	0.002	0.02	-	揮発性有機化合物等（第一種特定有害物質）
ジクロロメタン	0.02	0.02	0.2	-	
四塩化炭素	0.002	0.002	0.02	-	
1,2-ジクロロエタン	0.004	0.004	0.04	-	
1,1-ジクロロエチレン	0.02	0.02	0.2	-	
1,2-ジクロロエチレン	0.04	0.04	0.4	-	
1,1,1-トリクロロエタン	1	1	3	-	
1,1,2-トリクロロエタン	0.006	0.006	0.06	-	
トリクロロエチレン	0.01	0.01	0.1	-	
テトラクロロエチレン	0.01	0.01	0.1	-	
ベンゼン	0.01	0.01	0.1	-	
1,3-ジクロロプロペン	0.002	0.002	0.02	-	
1,4―ジオキサン	0.05	-	-	-	
PCB	ND	ND	0.003	-	農薬等（第三種特定有害物質）
チウラム	0.006	0.006	0.06	-	
シマジン	0.003	0.003	0.03	-	
チオベンカルブ	0.02	0.02	0.2	-	
有機燐（りん）	ND	ND	1	-	

ND: 検出されないこと

（2）土壌汚染対策法におけるリスク管理

土対法は 2017 年 5 月に大幅に改正され，2019 年 4 月に全面施行された．2017 年の改正においては，従前のように健康被害が生じる恐れの判断や対策完了の判断を画一的に行うのではなく，個別のサイトにおけるリスクに応じて規制を合理化するという考え方が導入されている．ここでは，「地下水の飲用摂取」によるリスクの評価・管理の基本的な考え方を概説する．

土壌溶出量基準に適合しない土壌は，地下水汚染を生じさせる可能性があるとして，100 年経過後に地下水基準を超過する可能性がある範囲，すなわち「地下水汚染が到達しうる範囲」を解析的に評価し，その範囲に飲用井戸があれば，健康被害が生じる恐れがあるとする（**図 5.3.1**[20]中の評価①）．改正前は，環境省が参考として通知している物質毎に設定された「到達範囲の一般値」が範囲の設定に広く用いら

れていた．この一般値は，一般的に想定される地下水流動条件や到達距離の実例を踏まえて設定されているが，帯水層の土質や動水勾配によっては到達範囲が大きく異なるため，個々の事例毎に到達範囲を評価することが認められた．

評価①において健康被害が生じる恐れがあると判断される場合，地下水質の測定，原位置浄化，原位置封じ込めなどの対策が実施される．その後，対策が適切に実施されたこと，すなわち「対策完了」の確認が必要となる．満たすべき条件として，改正前は汚染土壌の周縁において**表 5.3.2** に示す地下水環境基準を一定期間満たすことが求められていた．しかし，実際には飲用井戸において地下水環境基準を超過しなければ，健康被害が生じないと判断できる．これを受けて今回の改正では，対象となる飲用井戸と汚染土壌の間に任意に地下水環境基準適合を評価する地点を「評価地点」として設定し，評価地点において地下水環境基準に適合することを最終的な目的として，対策実施区域で達成すべき土壌溶出量，地下水濃度の目標値を土壌溶出量基準や地下水環境基準よりも高い値で設定できるようになった（**図 5.3.1** の評価②）．

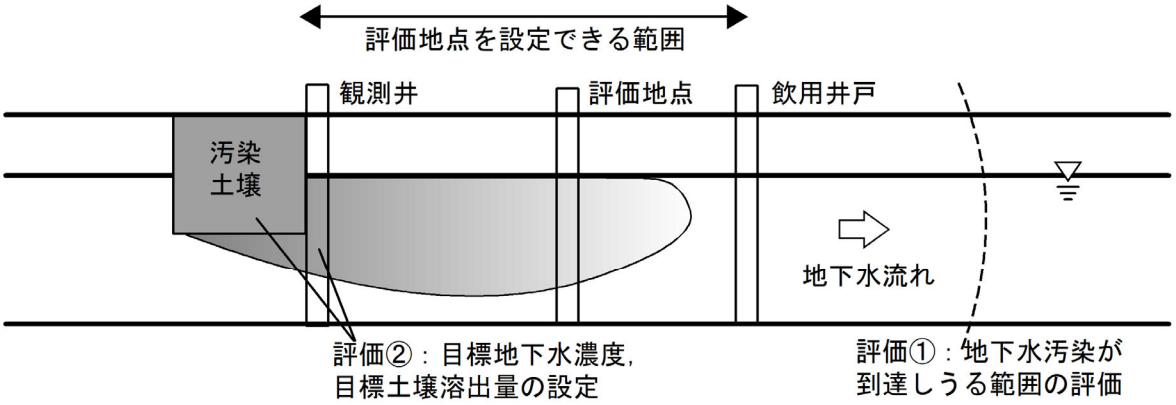


図 5.3.1　土対法における地下水汚染リスクの管理の考え方 [20)]

（3）土壌汚染対策におけるジオポリマー技術適用の可能性

ジオポリマー技術は 5.3.2 で述べたように，セメント固化等の地盤改良技術の代替技術として適用が可能である．土壌汚染対策における地盤改良技術の適用範囲としては，以下の 4 つが考えられる [21)]．

i)　盛土等の損壊を防止するための固化処理
ii)　原位置封じ込めにおける遮水抗力を有する構造物にかかわる固化処理
iii)　不溶化対策の実施にかかわる固化・不溶化処理
iv)　土壌の搬出にかかわる飛散防止，ハンドリング改善のための固化処理

このうち ii) の原位置封じ込めは，**図 5.3.1** に示した土壌溶出量の目標値を超える溶出量を示す汚染土壌の周辺に鉛直遮水遮水工を設置し，地下水流動や雨水浸透から遮断することで，地下水の飲用摂取によるリスクを防止するものであり，鉛直遮水工に固化処理が適用される．

iii) の固化・不溶化処理は，汚染物質が重金属等（第二種特定有害物質）の場合に適用されるが，対象となる汚染土壌が**表 5.3.3** に示す第二溶出量基準を超過するか否かで適用方法が異なる．

第二溶出量基準を超過しない場合は，掘削した状態もしくは原位置において汚染土壌と不溶化材を混合して溶出を土壌溶出量基準値以下に低減させる．なお，第二溶出量基準は，廃棄物の有害性を判定する金属等を含む産業廃棄物に係る基準（以下，判定基準）と同等の値で設定されている．廃棄物処理に

おいては，この判定基準を満たすものが管理型処分場に埋め立てることができる．原位置封じ込めの鉛直遮水工に求められる基準が「一般廃棄物の最終処分場及び産業廃棄物の最終処分場に係る技術上の基準を定める命令」における地下の全面に不透水性地層が存在する場合の遮水工構造基準，すなわち管理型処分場の遮水工構造基準に準じており，廃棄物処分と土壌汚染対策の間で封じ込め対象の有害性と遮水工構造が整合することになる．よって，対象となる汚染土壌が第二溶出量基準を超過する場合は，原位置での不溶化処理や浄化，掘削後に不溶化や浄化した土壌を埋め戻すことにより，第二溶出量基準に適合させた上で，封じ込めを行う必要がある．

ジオポリマー処理が有害廃棄物処理に広く利用されてきたことを考慮すると，iii) の有害物質の不溶化処理への適用性が期待できる．ジオポリマー処理による有害物質の固定化メカニズムを**表-5.3.4**[22]に示す．これらのメカニズムの詳細は文献[22]を参照されたい．汚染土壌への適用性については今後検討を進める必要があるが，イオン交換や化学的結合においてはカチオン系の有害物質に対して有効であることは明らかである．一方で，土壌汚染対策法の規制対象にはふっ素，砒素等のアニオン系の物質も含まれておりが．オキソアニオン系の物質に対してはジオポリマー処理による不溶化効果が小さいとされている[23]．よって，ジオポリマー処理による密実な構造形成による物理的封じ込め効果，高アルカリ化による溶出促進の可能性等，様々な観点から汚染土壌処理への適用性を検証する必要がある．

表-5.3.4　ジオポリマーによる有害物質の固定メカニズム[22]

イオン交換	・ジオポリマー中の四面体構造における Al の電荷補償に必要な Na^+，K^+とのイオン交換 ・局所的なゼオライト細孔構造によるイオン交換
化学的結合・ 物理的封じ込め	・アルミノシリケート構造内の共有結合 ・末端の非架橋酸素と重金属イオンとの化学配位 ・物理的封じ込め
難溶性塩の生成	・重金属の水酸化物，炭酸化物，ケイ酸塩，アルミネート塩の生成

（執筆者：乾　徹）

参考文献

1) Liu, Z., Cai, C., Liu, F., Fan, F. (2016): Feasibility study of loess stabilization with fly ash–based geopolymer, J. Mater. Civ. Eng., 28, 04016003.
2) Phetchuay, C., Horpibulsuk, S., Arulrajah, A., Suksiripattanapong, C., Udomchai, A. (2016): Strength development in soft marine clay stabilized by fly ash and calcium carbide residue based geopolymer, Appl. Clay Sci., 127, pp.134-142.
3) Arulrajah, A., Yaghoubi, M., Disfani, M.M., Horpibulsuk, S., Bo, M.W., Leong, M. (2018): Evaluation of fly ash-and slag-based geopolymers for the improvement of a soft marine clay by deep soil mixing. Soils Found. 58 (6), pp.1358–1370.
4) Abdullah, H.H., Shahin, M.A., Walske, M.L. (2019): Geo-mechanical behavior of clay soils stabilized at ambient temperature with fly-ash geopolymer-incorporated granulated slag, Soils and Foundations, 59, pp.1906-1920.
5) Cristero, N., Pinto, A.M., Glendinning, S. (2011): Deep soft soil improvement by alkaline activation, Ground

Improvement, 164, pp.73-82.
6) Pourakbar, S., Huat, B.B., Asadi, A., Fasihnikoutalab, M.H. (2016): Model study of alkali-activated waste binder for soil stabilization. Int. J. Geosynth. Ground Eng., 2(4), 35.
7) Du, Y.J., Yu, B.W., Liu, K., Jiang, N.J., Liu, M.D. (2017): Physical, hydraulic, and mechanical properties of clayey soil stabilized by lightweight alkali-activated slag geopolymer. J. Mater. Civ. Eng. 29(2), 04016217.
8) Rios, S., Ramos, C., Viana da Fonseca, A., Cruz, N., Rodrigues, C. (2017): Mechanical and durability properties of a soil stabilised with an alkali-activated cement, European Journal of Environmental and Civil Engineering, 23, pp.245-267.
9) Yaghoubi, M., Arulrajah, A., Disfani M.M., Horpibulsuk, S., Bo, M.W., Darmawan, S. (2018): Effects of industrial by-product based geopolymers on the strength development of a soft soil, Soils and Foundations, 58, pp.716-728.
10) Sukmak, P., Sukmak, G., Horpibulsuk, S., Setkit, M., Kassawat, S., Arulrajah, A. (2019): Palm oil fuel ash-soft soil geopolymer for subgrade applications: strength and microstructural evaluation, Road Mater. Pav. Design, 20, pp.110-131.
11) Abdullah, H.H., Shahin, M.A., Walske, M.L., Karrech, A. (2020): Systematic approach to assessing the applicability of fly-ash-based geopolymer for clay stabilization. Can. Geotech. J., 57, pp. 1356–1368.
12) 李柱国 (2016) : ジオポリマーおよびその建材分野における実用化に向けて　その２　使用材料および利用状況，建材試験情報, 52, 12, pp. 2-7.
13) Chindaprasirt, P. (2013): Controlling ettringite formation in FBC fly ash geopolymer concrete, Cement and Concrete Composites, 41, pp.24-28.
14) Bondar, D., Lynsdale, C.J., Milestone, N.B., Hassani, N., Ramezanianpour, A.A. (2011): Effect of type, form, and dosage of activators on strength of alkali-activated natural pozzolans, Cem. Concr. Compos. 33, pp.251-260.
15) Tchakouté, H.K., Elimbi, A., Yanne, E., Djangang, C.N. (2013): Utilization of volcanic ashes for the production of geopolymers cured at ambient temperature, Cem. Concr. Compos., 38, pp.75–81.
16) Lemougna, P.N., Chinje Melo, U.F., Delplancke, M.P., Rahier, H. (2014): Influence of the chemical and mineralogical composition on the reactivity of volcanic ashes during alkali activation, Ceram. Int., 40, pp.811–820.
17) Katpady, D.N., Takewaka. K., Yamaguchi, T. (2015): Development of geopolymer with pyroclastic deposit called Shirasu, Advance in Materials Research, 4, pp.179-192.
18) 武若耕司 (2004): シラスコンクリートの特徴とその実用化の現状，コンクリート工学，42(3), pp.38-47.
19) 環境省 水・大気環境局 (2021): 令和元年度地下水質測定結果.
20) 乾徹 (2020): 土壌汚染対策における環境リスクの評価･管理とその課題, 地盤工学会誌, Vol.68, No.3, pp.10-11.
21) 一般社団法人セメント協会 (2021): セメント系固化材による地盤改良マニュアル第 5 版，技報堂出版.
22) 日本コンクリート工学会 (2020)：有害廃棄物・放射性廃棄物処分への セメント・コンクリート技

術の適用研究委員会報告書.
23) El-Eswed, B.I. (2018): Solidification versus adsorption for immobilization of pollutants in geopolymetric materials: A review, Solidification, A.E. Ares (Ed.), DOI: 10.5772/intechopen.72299.

5.4 リサイクル方法

5.4.1 一般

ポルトランドセメントの製造に起因する CO_2 排出量を削減するために，AAMs をはじめとする環境負荷低減型の結合材を用いたコンクリートに関する研究開発が行われている．結合材がポルトランドセメントから AAMs に代わったとしても，長期的な視点では当然，解体などに伴うコンクリート塊（コンクリート廃材）が発生する．よって，AAM コンクリートの普及を図る上では，そのリサイクルの可否，具体的な方法，留意点などについても検討する必要が生じる．AAM コンクリートのリサイクル方法については，まだ研究事例は多くないものの，以下では，関連する文献の調査結果について，粗骨材，細骨材, 粉体・結合材の順で示す. また, AAMs のリサイクル時に参考になる可能性がある研究として, AAMs を用いて人工骨材を製造する研究事例についても示す．最後に，今後の展望について述べる．

なお，以下では基本的に，次のように用語・記号を定義する．

・GPC： ジオポリマーコンクリート（骨材は，原則として天然骨材（砕砂・砕石を含む））
・OPCC または PCC： セメントコンクリート（骨材は，原則として天然骨材（砕砂・砕石を含む））
・RGA： GPC を破砕・分級して得られる再生骨材
・RCA： OPCC を破砕・分級して得られる再生骨材
・RGC： RGA を用いたコンクリート（結合材がジオポリマーか，セメントかは，必要に応じて明記する.）
・RAC： RCA を用いたコンクリート（結合材がジオポリマーか，セメントかは，必要に応じて明記する.）

5.4.2 粗骨材としての利用

Akbarnezhad ら [1]は，ジオポリマーコンクリート（GPC）を破砕し，粗骨材として利用した再生ジオポリマーコンクリートの特性を調べている．比較対象として，セメントコンクリートを破砕した再生骨材を用いた再生骨材コンクリートを用いている．原 GPC はフライアッシュ，カオライト高性能灰，高炉スラグ微粉末，アルカリ溶液（12M NaOH 溶液＋ケイ酸ナトリウム溶液），天然砂，玄武岩砕石を用いて作製された．比較用として同程度の強度を有するセメントコンクリート（OPCC）も作製された．60 日経過後に GPC および OPCC を破砕，分級し，ジオポリマーコンクリート由来の再生骨材 RGA およびセメントコンクリート由来の再生骨材 RCA を作製した．RGA および RCA を天然骨材の 0%，25%，50%，100%置換したセメントコンクリートの強度を比較した．その結果，RGA は RCA と比較して吸水率が高く，また，ロサンゼルス試験から得られるすりへり減量が大きいことから，耐摩耗性が求められる部材には適さない可能性があることを指摘している．また，RGA を 100%用いた場合であっても強度の低下率は 15.2%であり，RCA の場合の 20.5%よりも小さいことから，ジオポリマーコンクリートが潜在的にリサイクル可能な建設材料であることを述べている．

また，文献 [1]と同じグループの研究として，Mesgari ら [2]による，天然粗骨材骨材（玄武岩）の 0～100%をジオポリマー再生粗骨材（RGA）またはポルトランドセメント再生粗骨材（RCA）で置換した研究がある．RGA を用いたポルトランドセメントコンクリート（RGAC），RCA を用いたポルトランドセメン

トコンクリート（RAC），および，RGA を用いたジオポリマーコンクリート（RAG）の 3 種類のコンクリートの強度を比較している．その結果，RGA を 20%置換した場合の RGAC の圧縮強度，弾性係数，曲げ強度の低下はそれぞれ約 14%，1%，3%にとどまることが明らかにしている．また，RGA100%置換時の RGAC の圧縮強度，弾性係数，曲げ強度の低下は，それぞれ約 33%，26%，21%であり，同じ RGA 置換率で RAG の各特性が約 12%，8%，19%低下したことを踏まえると，本研究の範囲内では，RGA はセメントコンクリート用の骨材ではなくジオポリマーコンクリート用の骨材として用いた方が有利であると言える．

5.4.3 細骨材としての利用

次に，細骨材に関する研究として，Zhu ら [3]の研究がある．ジオポリマーモルタルを破砕して製造した再生ジオポリマー細骨材 RGFA（recycled geopolymer fine aggregate）を用いたジオポリマーモルタルの強度に関する研究を行っている．バインダーにはメタカオリンが，アルカリ溶液には 12M の NaOH とケイ酸ナトリウムが用いられている．RGFA を用いたジオポリマーモルタルについて，RGFA を川砂の 0, 20, 50, 80, 100%置換した結果，圧縮強度は，61.1，59.0，55.7，49.6，37.0 MPa となり、低下率は 3.4%, 8.8%, 18.8%, 39.4%となり，置換率 50%までであれば，性能の低下は小さいとしている．また，界面特性に着目して RGFA モルタルの機械的性質が低置換率で優れている理由を考察した結果，RGFA モルタルに生じた二次的なジオポリマー化とフィラーの効果であり，RGFA の未反応メタカオリンがアルカリ活性化溶液により再び活性化され，新たなジオポリマー化が促進され，同時に多くの N-A-S-H ゲルを生成し，川砂を用いたジオポリマーよりもはるかに厚く，密な ITZ となっていることを明らかにした．さらに，RGFA モルタルの機械的性質の低下は，ITZ よりもむしろ RGFA の性質が川砂よりも弱いことに起因していると考えられる，とも述べている．

5.4.4 粉体・結合材としての利用

結合材がポルトランドセメントであっても，AAM であっても，再生骨材の品質を高めようとする場合，高度な破砕処理もしくは加熱処理によって原骨材（元のコンクリートに使用されていた骨材）とペースト部分を分離する必要がある．AAM コンクリートをリサイクルする上で，最も課題となるのは，処理によって生じる AAM ペースト部（多くの場合は，AAM 微粉の状態と想定される）の有効利用方法である．

Hattaf ら [4]は，フライアッシュとメタカオリンを原料（出発材料）とした 2 種類のジオポリマーペースト（FAref, MKref）を作製し，大気中で 1 年間保管した後に粉砕して粉体と再生ジオポリマー（FARG, MKRG）を試料した実験を行っている．平均粒径は 90 μ m で，出発材料と同等の粒度分布である．FARG と MKRG を用いて，以下の 3 種類のジオポリマーモルタルを用いて評価が行われた（置換率 0～50%）．

(1) FARG を用いたフライアッシュベースのジオポリマーモルタル（FA/FARG）

(2) MKRG を用いたメタカオリンベースのジオポリマーモルタル（MK/MKRG）

(3) FARG を用いたメタカオリンベースのジオポリマーモルタル（MK/FARG）

いずれの再生ジオポリマーにおいても，置換率が高くなるほど，ペーストの粘性が低下することを示している．これは，活性化溶液に関して反応性アルミノシリケート粉末（MK または FA）が，より低い吸水率を特徴とする化学的に不活性な添加剤（FARG および MKRG）に徐々に置き換えられることに起

因し，溶解後に生成するシリケートおよびアルミネートモノマーの量が減少すること，すなわち媒体中に生成するオリゴマーが減少することによると述べられている．また，材齢 3，7，28 日での圧縮強度試験の結果，置換率が 0～40%の範囲では強度は同等であるが，50%になると強度が低下している．40%以上になると反応性原料の量が減少し，新しく形成されたジオポリマー相の体積が減少することが原因としている．このことは，置換率 50%ではモルタルの密度が小さく，吸水率が大きいという結果を一致している．さらに，置換率 30%の破断面の SEM 観察の結果，再生ジオポリマーと新たに形成されたジオポリマーとを区別することができなかった，と述べている．このことから，新しく形成されたジオポリマーとリサイクル骨材とは良好な接着能力を有している可能性がある．

また，Wang ら[5]は，メタカオリンを原料として製造したジオポリマー粉末を 0～100%で置換した 5 種類のジオポリマーを製造し，強度および微視的構造について調べている．アルカリ溶液は 12M NaOH 溶液＋ケイ酸ナトリウムで，60℃で 6 時間養生した後，20℃，95%R.H.以上で 7 日間保存したものを粉砕し，75 μm 通過分を再生ジオポリマー粉末として用いた．再生ジオポリマー粉末の置換率が 0, 20, 50, 50, 80, 100%に対し，圧縮強度はそれぞれ約 80, 74, 65, 23, 1 MPa となっている．強度低下の原因として，再生ジオポリマー粉末が混入すると，重縮合反応が阻害され，反応度が低下し，微細ひび割れが多くなるとともに，未反応粉末と新しいジオポリマーとの結合強度が低くなることを述べている．

5.4.5　人工骨材の製造

Qian ら[6]は，アルカリ活性化骨材（AAA）として，2 種類の人工骨材，すなわち，コールドボンド AAA（CB-AAA）および，焼結 AAA（ST-AAA）の製造工程および工学的特性についてレビューしている．また，コンクリートへの応用として，力学的評価，耐久性能，溶出挙動などについて既存の研究成果を踏まえてまとめている．AAA は，密度が 2.0g/cm^3 以下で，単位容積質量（かさ密度）が 1,200kg/m^3 以下となり，軽量骨材として利用できるが，前駆体，活性剤，添加剤，製造方法および硬化プロセスは，AAA の特性に大きな影響を与える．また，CB-AAA を用いたコンクリートは，耐凍結融解性が劣る，収縮率が高い，密度が低い，塩化物イオンの浸透性が低い，アルカリシリカの膨張や炭酸化に対する抵抗性が高いなどの結果が報告されている．

Tian ら[7]は，アルミナ精錬時に発生する赤泥（red mud）とフライアッシュを用い，アルカリ活性化技術で冷間結合型人工骨材を合成し，その物性を調べている．その結果，red mud とフライアッシュの混合比が 80 : 20 の際に，比較的均一な細孔分布と，溶解した FA 粒子と微細な RM 粒子との良好な結合が得られることを明らかにしている．製造された骨材の内部構造特性は，中心部は多孔質であるが，表面付近は緻密な構造となっている．

Xu ら[8]は，一液型ジオポリマー技術を用いて 100×100×100 mm の寸法のジオポリマー立方体を製造し，それを破砕して粗骨材（GLA）を製造している．原料は，フライアッシュ，高炉スラグ微粉末および工業用無水メタケイ酸ナトリウム粒子が使用されている．アルカリ度やスラグ添加率を増加させることにより，立方体の圧縮強度が高くなり，より良い骨材形状が得られるが，高い破砕エネルギーを必要とし，骨材に初期損傷を与える可能性があることが示されている．ジオポリマー骨材を用いたコンクリートのシリンダー圧縮強度は，GGBS 添加量 20%，活性剤/前駆体比 12%の GLA を用いた場合に最も高くなったことが報告されている．

Gunasekara ら[9),10),11)]は，フライアッシュベースのジオポリマーでジオポリマー骨材（GPA）を製造し，天然骨材を用いた場合との比較を行っている．SEM 観察の結果，7 日目には，セメント-天然骨材界面よりもセメント-ジオポリマー骨材界面でより多くのマイクロクラックが認められ，ジオポリマー骨材コンクリート内にクラックネットワークが形成されたが，28 日後の GPA を用いたコンクリートは，天然骨材コンクリートと同様に，緻密で密度の高い ITZ が観察されたことを報告している．また，材齢 1 年まで観察した結果，GPA を用いたコンクリートは，天然骨材コンクリートと同様に強度などが増進するものの，ACI やオーストラリア規格の曲げ強度，引張強度の設計式ではこれらを過小評価してしまうことが報告されている．

5.4.6　今後の展望

以上の調査結果に基づくと，AAMs は従来のセメントコンクリートと同様にリサイクル可能な材料であると考えられる．AAMs のリサイクルは，天然資源の保護をはじめとする環境負荷低減に寄与できる．セメントコンクリートのリサイクルにおいて，再生骨材（特に，再生骨材 M，L の場合）は再生骨材コンクリートの強度や耐久性を低下させることが多いが，ジオポリマーコンクリートを破砕・分級したものを再びジオポリマーコンクリートの原材料として用いた場合には，条件によっては再活性化により強度の低下を抑制することができる可能性があり，最終的にはアルカリ活性溶液の使用量も減らせる可能性がある．

一方，元となる AAM コンクリートの品質が新しい再生 AAM コンクリートの品質に及ぼす影響や，最適な製造方法，長期的な安定性，耐久性，AAMs のリサイクルの環境的な意義，経済性については，さらなる研究，検討が必要である．

（執筆者：佐川　康貴）

参考文献

1) A. Akbarnezhad, M. Huan, S. Mesgari, A. Castel: Recycling of geopolymer concrete, Construction and Building Materials, Volume 101, Part 1, 30 December 2015, Pages 152-158
2) S. Mesgari, A. Akbarnezhad, J. Z. Xiao: Recycled geopolymer aggregates as coarse aggregates for Portland cement concrete and geopolymer concrete: Effects on mechanical properties, Construction and Building Materials, Volume 236, 10 March 2020, 117571
3) Pinghua Zhu, Minqi Hua, Hui Liu, Xinjie Wang, Chunhong Chen: Interfacial evaluation of geopolymer mortar prepared with recycled geopolymer fine aggregates, Construction and Building Materials, Volume 259, 30 October 2020, 119849
4) Hattaf R., Aboulayt A., Samdi A., Lahlou N., Ouazzani Touhami M., Gomina M., Moussa R.: Reusing Geopolymer Waste from Matrices Based on Metakaolin or Fly Ash for the Manufacture of New Binder Geopolymeric Matrices. Sustainability, 2021,13,8070. https:// doi.org/10.3390/su13148070
5) Xinjie Wang, Wei Yang, Hui Liu, Pinghua Zhu, Ningwen Zong & Jincai Feng: Strength and Microstructural Analysis of Geopolymer Prepared with Recycled Geopolymer Powder, "Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed. 36, pages439–445 (2021)

6) Lan-Ping Qian, Ling-Yu Xu, Yazan Alrefaei, Tiao Wang, Tetsuya Ishida, Jian-Guo Dai, Artificial alkali-activated aggregates developed from wastes and by-products: A state-of-the-art review, Resources, Conservation and Recycling, Volume 177, 2022, 105971, ISSN 0921-3449, https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105971.
7) Kaige Tian, Yanshuai Wang, Shuxian Hong, Jinrui Zhang, Dongshuai Hou, Biqin Dong, Feng Xing, Alkali-activated artificial aggregates fabricated by red mud and fly ash: Performance and microstructure, Construction and Building Materials, Volume 281, 2021, 122552, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122552.
8) Ling-Yu Xu, Lan-Ping Qian, Bo-Tao Huang, Jian-Guo Dai, Development of artificial one-part geopolymer lightweight aggregates by crushing technique, Journal of Cleaner Production, Volume 315, 2021, 128200, ISSN 0959-6526, https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128200.
9) Chamila Gunasekera, David W. Law, and Sujeeva Setunge: Effect of Geopolymer Aggregate on Strength and Microstructure of Concrete, ACI Materials Journal, V. 115, No. 6, November 2018
10) Chamila Gunasekara; Sujeeva Setunge; David W. Law; Nick Willis; and Trevor Burt: Engineering Properties of Geopolymer Aggregate Concrete, J. Mater. Civ. Eng., 2018, 30(11): 04018299
11) Charitha Seneviratne, Chamila Gunasekara, David W. Law, Sujeeva Setunge, and Dilan Robert: Long-Term Mechanical Properties of Geopolymer Aggregate Concrete, ACI Structural Journal, V. 118, No. 5, September 2021.

６．普及のための取組み（新材料導入のためのマネジメント）

6.1　一般

ジオポリマーコンクリートの素材としての特性については，これまでの研究開発によって解明が進められてきた．現時点のわが国では試験施工止まりの状況であるが，今後の更なる技術開発の進展に伴って，徐々に商品として市場性を獲得し，一般普及を図っていくフェーズへと移行していくものと考えられる．いかに材料が高い性能を有していたとしても，ただちに一般普及するとは限らない．それには少なからず社会的な側面を踏まえた対応が必要である．本稿では近年の革新的な材料開発の例として，自己充填コンクリート[1)]ならびに繊維補強コンクリート[2)]に着目し，それらコンクリートの一般化を図るためになされた取り組みや，実装において課題となった点を調べることで，ジオポリマーコンクリートという新たなセメント系材料がこれから一般化を図っていくために必要な方策を考察する．

自己充填コンクリートは施工不良に伴って生じたコンクリート構造物の急速な劣化の解決策を施工技術者の技能向上に求めるのではなく，素材そのものの特性を改良し自重で密実に充填する特性を付与することで，施工技術者の技能によらないコンクリート構造物の施工を可能としたものである．さらには熱や収縮の問題への対応もなされており，まさしく「ハイパフォーマンスコンクリート」と呼ぶにふさわしいコンクリートであった．しかし，その特性は従来のコンクリートと大きく異なり，コンクリートの性能を享受するためには発注システムを含めた生産供給システムに大きな変革が必要となることから，プロトタイプの開発後には市場性を持たせるための方法が様々に検討されており，ジオポリマーコンクリートの一般化を検討する際の参考になる．一方，繊維補強コンクリートは引張に弱いというコンクリートの弱点を，繊維補強材の架橋効果によって直接的に補うことを目指したコンクリートである．ナノテクノロジーによる近年の素材開発の速度は目覚ましく，繊維素材としても鋼繊維だけではなく，炭素繊維をはじめとした様々な繊維を用いた繊維補強コンクリートが開発され続けており，今なお一層の高機能化に向けた研究がおこなわれているところである．高強度化や鋼耐久化の流れに乗って，実績を伸ばしつつあるコンクリートであるものの，いわゆる普通の生コンクリートとは違うコンクリートのカテゴリーに位置づけられることに由来した制度上の壁が存在しており，その解消に向けた議論はジオポリマーコンクリートの一般化においても参考になると考えらえれる．

これらのコンクリーとの先行事例から浮かび上がる，一般化における一つ目のハードルは，新たに開発されたセメント系材料が，いかなる場所においても同品質のものを「入手可能」な状態にできているか否かにある．そしてその実現のためには，製造体制を整備するとともに性能の評価方法を確立することが必要となる．セメント系材料において，骨材は安定性の源でもあり，低コスト材料であることを実現するための要でもある．建設において，骨材は建設現場あるいは工場に近い場所から調達されるものであり，骨材の加工度も低いため，コンクリートの特性もその産地の地質に依存することになる．またセメントは製造時の投入材料の調整と，セメントキルン内で溶融定常状態を経て製造されるものであるため，ほぼ均一な性状が得られるようになっているのに対し，ジオポリマーコンクリートの結合剤となるフライアッシュや高炉スラグでは，このような調整がなされておらず，元の石炭の特性がそのままジオポリマーコンクリートの性情に影響してしまうことになる．つまり他のプラントで定められた配合が他の工場で適用できないことが多いのである．今後，ジオポリマーコンクリートが市場性を獲得していくには，これらの材料の地域性に由来した差異を平準化し，どこの場所で製造しても同じ品質のコンク

リートが得られるようにする必要があり，そのためには多様な材料に対応可能な配合設計法が必要になる．また多くのコンクリートプラントが小規模であることから，その配合設計法は比較的容易に習得可能であることも重要である．昨今では，職人の勘のようなノウハウを AI で共有していくようなことも可能になってきており，このような IT 支援を前提とした新たな配合設計の可能性も考えられる．

一般化における二つ目のハードルは，品質の評価法である．これはセメントコンクリートの配合設計においても同様の状況にあり，フレッシュコンクリートの時点で直接的に評価できる事項はスランプや空気量だけに限られ，耐久性などの他の品質評価については，過去の実績や配合記録，完成後のサンプル試験の結果に基づいて間接的になされているのが実態である．構造物は数十年以上の時間スパンで供用され続けるものであり，ライフサイクルコストの考え方によって，初期コストの高い材料を用いることの方が合理的な場合がある．しかしその判断には定量的な性能評価法が確立されていることが必須であり，概念的なアプローチにとどめないためにも，この定量的な性能評価法の確立が急務である．特にジオポリマーコンクリートはセメントコンクリートに比べて歴史が浅く，技術開発の途上にある段階であるため，長期供用後の性能に関する実績など，定量評価法の確立に必要なデータが現時点では不足している．低炭素化社会実現への寄与可能性など，ジオポリマーコンクリートならではの潜在可能性をさらに探求し，企業 CSR としての採用可能性を増やしていくことによって，事例を獲得していくことが一つの近道と思われる．また品質評価法の確立においては，ジオポリマーコンクリートが，セメントコンクリートの代替品のように位置づけられていることについても留意する必要がある．セメントコンクリートには頑健な供給システムが構築済みであり，ジオポリマーコンクリートを利用するには，まずその代替として割り込まざるを得ないことは事実である．しかしこれらの材料は本来的には異なるものであって，セメントコンクリート向けの特性評価試験にジオポリマーコンクリートを当てはめる必要はない．ジオポリマーコンクリートが際立つような特性を見出し，その優位性が際立つような品質評価法を用いることで，一般化を促進するというアプローチも一つのオプションであろうと考えられる．

三つ目のハードルは法律の問題である．ここでは参考事例として，建築における新材料導入の問題を示す．建築の施工においては建築基準法を順守することが求められる．コンクリートは，建築基準法 37 条の詳細を示した告示 1446 号に定められた指定建築材料であり，その規格として JIS A 5308 レディーミクストコンクリートが指定されている．多くの工事では，この規格を満たしたコンクリートが用いられているが，時に適合しないコンクリートが使われる場合があり，そのようなときには大臣認定を取得して使用することになっている．この大臣認定を得るには，レディーミクストコンクリート工場や材料，配合，品質管理法が厳格に定められていることや，指定性能評価機関での性能評価をうけていることが求められるなど，相当量の認定資料の準備が必要となる．ジオポリマーコンクリートの位置づけを考えてみると，まずジオポリマーコンクリートは「指定建築材料ではない」．このため 37 条での一般的な認定プロセスを通じた大臣認定を受けることができず，建築工事で使うには特殊なパスを経ることが要求されることになる．特殊なコンクリートを使うために新たに基準法 20 条に設けられた特例事項がある．これは 60m を超えた高層建築物での個別建物の性能評価において，当該建物の使用に限定した範囲で構造材料を含めた審査を行うことができるというものであり，この条項を使うことによって指定建築材料以外の材料を構造材料として用いることが可能になる．ただしこの規定は構造建築物を対象にしたものであり，その認定においては時刻歴応答解析などが行われることが前提となっている．中低層建築など，より一般的な建築物において，時刻歴応答解析は行われることはまれであり，20 条を適用しようとする

新たに時刻歴応答解析を行う必要が生じたりするなど，手続きが煩雑になることは否めない．また認定を受けようとするコンクリートの製造管理においても，37 条と同様の厳格な管理や評価が求められるなど，手続きとしては極めて煩雑なものとなっており，決して使用が禁じられているわけではないものの，その壁は高いのが実態である．この解決のためには，圧縮強度以外の項目での基準値や性能評価法の整備を進め，新材料の使用に柔軟に対応可能なシステムを構築する必要がある．土木分野での活用においては，土木学会の技術推進機構による認証制度なども用意されており，このような制度を積極活用し，実績を積み重ねることも一般化にむけた着実な活路であろうと思われる．

（執筆者：千々和　伸浩）

参考文献

1) 岡村甫編：自己充填性ハイパフォーマンスコンクリート －黎明期から実用化へ向けた挑戦の記録－，株式会社コムスエンジニアリング，1999.
2) コンクリートの生産・供給・施工システムの革新に関する研究委員会：コンクリートの生産・供給・施工システムの革新 報告書，日本コンクリート工学会，2019.9.

6.2　高性能コンクリートの開発と実用化

この節は，新材料を開発してから実用化した事例として，高性能コンクリートである「低収縮型高強度コンクリート」および「エトリンガイト生成系超高強度繊維補強コンクリート」を開発して実用化した例を紹介する．

6.2.1　低収縮型高強度コンクリートの開発と実用化

（1）開発から実用化までの流れ

コンクリート標準示方書［設計編］[1]本編の目次を**表 6.2.1** に示す．新たに開発した新材料を構造体に適用する場合，性能照査型の基準であるコンクリート標準示方書［設計編］に準じて設計できるように性能を検証することができる．手順としては，まず「5 章　材料」に記載されている材料強度や材料特性などの材料の設計値を設定し，次に「9 章　安全性に関する照査」および「10 章　使用性に関する照査」にしたがって照査できる手法を検証する．なお，本編の 9 章および 10 章では，考え方が示されているため，具体的な手法については，［設計編：標準］の「3 編　安全性に関する照査」および「4 編 使用性に関する照査」を参照して具体的な手法について検討された．また，必要に応じて，8 章　耐久性に関する照査，11 章　復旧性に関する照査，12 章　初期ひび割れに対する照査，ならびに 13 章　鉄筋コンクリートの前提に関連する性能ついても確認する．

表 6.2.1　コンクリート標準示方書［設計編)］本編の目次 [1]

［設計編：本編］

1章　総　　則…… 1
2章　要求性能……14
3章　構造計画……17
4章　性能照査の原則……25
5章　材　　料……35
6章　作　　用……54
7章　応答値の算定……67
8章　耐久性に関する照査……76
9章　安全性に関する照査……83
10章　使用性に関する照査……87
11章　復旧性に関する照査……91
12章　初期ひび割れに対する照査……95
13章　鉄筋コンクリートの前提…… 103

（2）材料の開発

低収縮型高強度コンクリートは，主としてプレストレストコンクリート（PC）橋に適用することを目的として 2005 年頃に開発された [2]．当時は，高性能減水剤の性能が改善されたことや，シリカフューム

の利用が容易になったことから，圧縮強度 150 N/mm^2 程度の高強度コンクリートが特別な養生なしに実現可能となっており，高層建物の分野では設計基準強度が 100 N/mm^2 程度の超高強度コンクリートの実績が増えてきていた．一方，PC 橋も，プレストレスを大きくすることによって部材厚を薄くして軽量化を図ることができ，高強度コンクリートを効果的に利用できる構造物のひとつであるが，まだ実用段階にはなかった．その理由として，PC 橋などの曲げを伴う構造部材に使用する場合，コンクリートを高強度化するにつれて増大する自己収縮が構造耐力の低下やひび割れに伴う耐久性の低下の原因になり得ることが一因として考えられたため，自己収縮の少ない超高強度コンクリートが開発された．自己収縮を低減させる方法は，これまで膨張材や収縮低減剤を使用する一般的な方法のほか，石炭灰人工骨材を併用するのが特徴である．低収縮型高強度コンクリートの配合を**表 6.2.2** に示す．

表 6.2.2　低収縮型高強度コンクリートの配合 [2)]

Symbol	W/(C+EX) (%)	Air (%)	Mass for unit volume(kg/m^3)						SP (C×%)	RA (C×%)	JL/(G+JL) Ratio by volume(%)	Notes
			W	C	EX	S	G	JL				
B	17.0	1.5	155	912	－	622	798	－	1.5	－	－	Basic UHSC
E20	17.0	1.5	155	892	20	608	795	－	1.5	－	－	UHSC with low autogenous shrinkage
JLR	17.0	1.5	155	912	－	622	638	108	1.5	0.5	20	
N	50.0	4.5	165	330	－	807	999	－	0.3	－	－	Normal strength concrete

SP：Superplasticizer，EX：Expansive admixture，RA：Shrinkage reducing agent，JL：Artificial lightweight aggregate

（3）材料の設計値の設定

コンクリート標準示方書の圧縮強度の適用範囲は 80N/mm^2 以下であるが，引張強度やクリープ係数などが圧縮強度や配合などから算定できるようになっているため，算定式を外挿して適用できるか検討された．引張強度およびクリープ係数について，検討された結果を**図 6.2.1** および**図 6.2.2** に示す．引張強度は圧縮強度の関数として算定可能であることが示された．また，クリープ係数は算定値よりも小さく，圧縮強度が 40N/mm^2 のコンクリートの 4 分の 1 程度に小さくでき，PC 橋に適用する場合にプレストレスのロスを低減できることが示された．

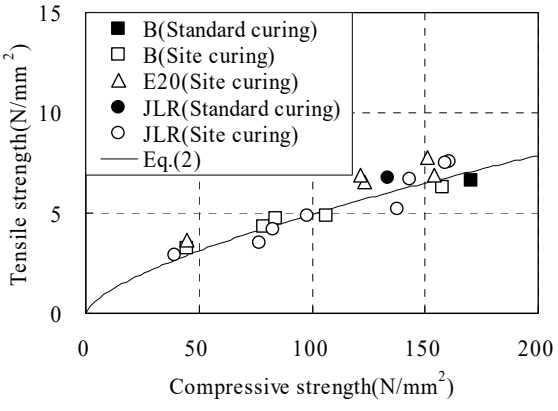


図 6.2.1　圧縮強度と引張強度の関係 [2)]

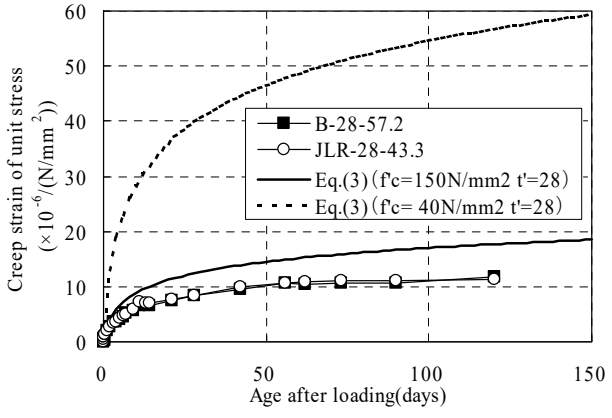


図 6.2.2　クリープ係数試験結果 [2)]

（4）部材の構造性能の検証

曲げ耐力を算定する場合に必要となる圧縮応力－ひずみ曲線を**図 6.2.3** に示す．また，RC および PC 部材の曲げ実験結果をコンクリート標準示方書に準じて平面保持を仮定し，**図 6.2.3** の応力ひずみ曲線

を用いて解析した結果を**図 6.2.4** に示す．曲げ耐力および変形性能とも，コンクリート標準示方書に準じて予測可能であることが示された．

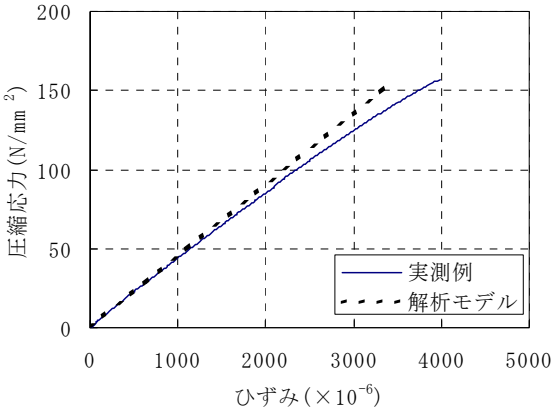


図 6.2.3　圧縮強度と引張強度の関係 [3)]

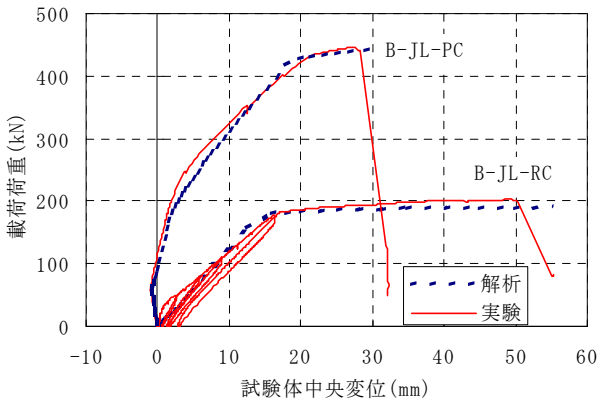


図 6.2.4　クリープ係数試験結果 [3)]

せん断補強筋のない RC 部材のせん断実験が実施なされており，コンクリート標準示方書および鈴木らの式 [4)]で求めたせん断耐力を比較した結果を**図 6.2.5** に示す．コンクリート標準示方書および鈴木らの式を用いて，圧縮強度が約 150N/mm^2 の高強度コンクリートを用いた部材についても適用可能であることが示された．

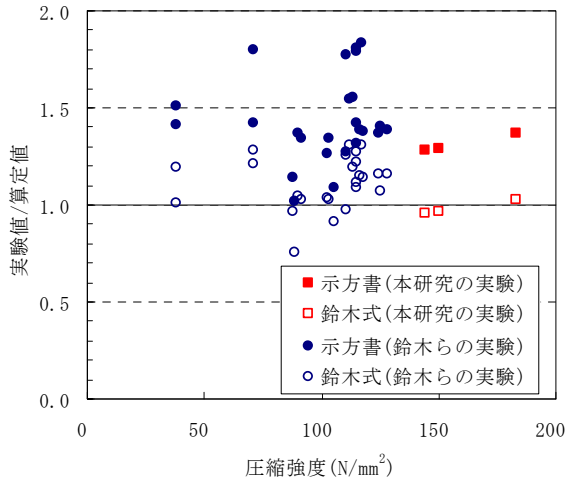


図 6.2.5　圧縮強度と（せん断耐力の実験値／算定値）との関係 [3)]

（5）実構造物への適用

低収縮型高強度コンクリートは，PC 歩道橋であるアキバブリッジ（**写真 6.2.1**）に適用された [5)]．接続する各高層ビルの階高制限および桁下を通る一般道路の建築限界により，通常の PC 橋では実現できないスレンダーな構造が求められたことから採用されたものである（**図 6.2.6**）．

写真 6.2.1　アキバブリッジ [5)]

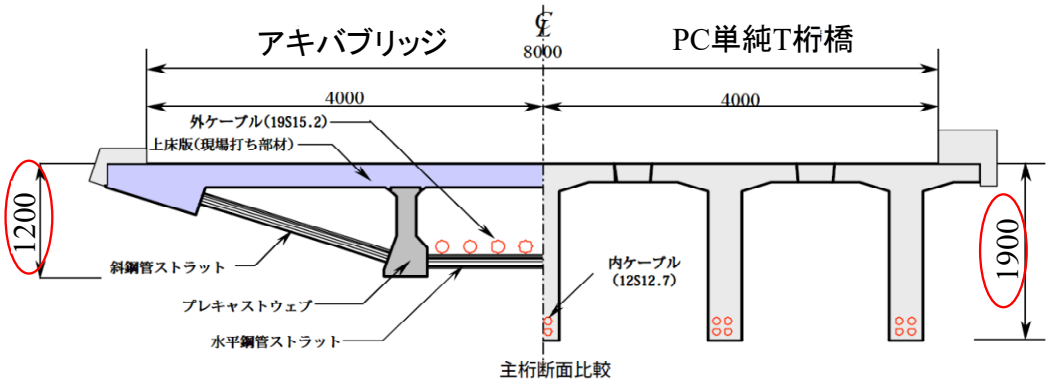


図 6.2.5　主桁断面の比較

主桁断面のうち，ウェブをプレキャスト部材として工場製作され，床版と横桁部を現場打ち施工された．配筋が密なプレキャストウェブと横桁部は高流動自己充てん型の高強度コンクリートを用い，2%の縦断勾配を持つ床版は振動締固め併用型の高強度コンクリートを用いて施工された．異なるフレッシュ性状を持つ高強度コンクリートを使い分けることにより，良好な施工性を確保しながら優れた品質の構造物が実現された．

（6）設計施工基準の整備

高強度コンクリートを広く普及させるため，プレストレストコンクリート工学会（当時はプレストレストコンクリート技術協会）により「高強度コンクリートを用いたＰＣ構造物の設計施工規準」[6)]が作成された．本規準の構成を**表 6.2.3** に示す．適用範囲は設計基準強度 60～160N/mm^2 であり，コンクリート標準示方書(適用範囲 80N/mm^2 以下)と「超高強度繊維補強コンクリートの設計施工指針(案)」[7)](適用範囲 150N/mm^2 以上)で対象としていない強度範囲を補完している．本規準では，既往の設計基準を参考としながら最新の研究成果が取り入れられ，高強度コンクリートを用いた PC 構造物の設計施工について記述されると伴に，高強度コンクリート特有の利点や留意点について記述されている．

表 6.2.3　規準の目次

1章　総則
2章　設計の基本事項
3章　使用材料
4章　材料の設計値
5章　荷重
6章　構造解析
7章　供用限界状態に対する検討
8章　終局限界状態に対する検討
9章　疲労限界状態に対する検討
10章　一般構造細目
11章　耐久性に対する照査
12章　初期ひび割れに対する照査
13章　施工

6.2.2　エトリンガイト生成系超高強度繊維補強コンクリートの開発と実用化

（1）開発から実用化までの流れ

圧縮強度が約 200N/mm^2，引張強度が約 10N/mm^2 の超高強度繊維補強コンクリート（UFC）がフランスで実用化された．日本にも UFC が技術導入され，2004 年 9 月に土木学会から「超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針（案）」[7]（UFC 指針）が刊行された（**表 6.2.4**）．日本でもエトリンガイト生成系の UFC（AFt 系 UFC）が開発され，実用化されている[8]．実用化にあたっては，UFC 指針に沿って材料の性能や部材の構造性能，施工性等が確認され，UFC 指針にしたがって設計施工できることを土木学会から技術評価されている[8]．

表 6.2.4　UFC 指針の目次

1章　総　則
2章　設計の基本
3章　材料の設計値
4章　荷　重
5章　構造解析
6章　構造物の安全性照査
7章　構造物の使用性能の照査
8章　疲労に対する構造物の性能照査
9章　一般構造細目
10章　プレストレストコンクリート
11章　耐久性能の照査
12章　施　工
13章　寒中コンクリートの施工
14章　暑中コンクリートの施工
〈参考資料〉

（2）材料の開発

AFt 系 UFC では，圧縮強度を高めるため次の三つの工夫がなされている。

・球形に近いポゾラン材と高性能減水剤による水結合材比の低減

・エトリンガイト生成によるセメント水和組織の緻密化

・適切な熱養生による細孔構造の改善

これらを満たすためにコンクリートマトリクスは専用の材料で構成されており，ポゾラン材，エトリンガイト生成系混和材およびポルトランドセメントからなるプレミックス結合材，粒径 2.5mm 以下の骨材，高性能減水剤ならびに水で構成される（**表 6.2.5**）．養生としては，5～40℃での湿潤養生を 24 時間行った後，85℃の蒸気養生を 20～24 時間行うことを基本としている．AFt 系 UFC は，水和初期段階でのエトリンガイトの生成とその後のセメントの水和ならびにポゾラン材の活性をコントロールすることによって微細空隙を埋め，写真 6.2.2 に示すような安定したエトリンガイトが微細な空隙を充てんすることにより，通常のコンクリートと比べて格段に高い圧縮強度および耐久性を得ることができる。

補強繊維としては，引張強度が 2000N/mm^2 以上で，直径が 0.2mm，繊維長が 22mm と 15mm の２種類の鋼繊維を混合したもの（**写真 6.2.3**）を用いて，コンクリートマトリクスに対する体積比 1.75%の割合で混入している．**図 6.2.6** は繊維長が 22mm と 15mm の２種類の鋼繊維をそれぞれ単独で使用した場合と混合して使用した場合について，100×100×400mm の試験体を用いて曲げ強度試験を実施した結果である．繊維長が長い方が少ない繊維混入率で高い曲げ強度が得られるが，繊維長が長いと繊維が絡みやすくなって流動性が阻害されやすくなる．そこで，AFt 系 UFC では，2 種類の長さの鋼繊維を適切に混合することによって，**写真 6.2.4** に示すように優れた流動性を保ちながら，高い曲げ強度すなわち高い引張強度と引張じん性を効率的に実現している．

表 6.2.5　AFt 系 UFC の配合

空気量 (%)	単位量(kg/m^3)				サクセム用補強繊維 (kg)
	水	サクセムセメント	サクセム用骨材	サクセム用高性能減水剤	
2	195	1287	905	32.2	137.4 (1.75Vol %)

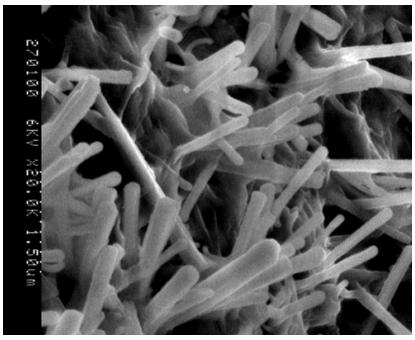


写真 6.2.2　空隙を充填するエトリンガイト [9)]

写真 6.2.3　補強用鋼繊維 [8)]

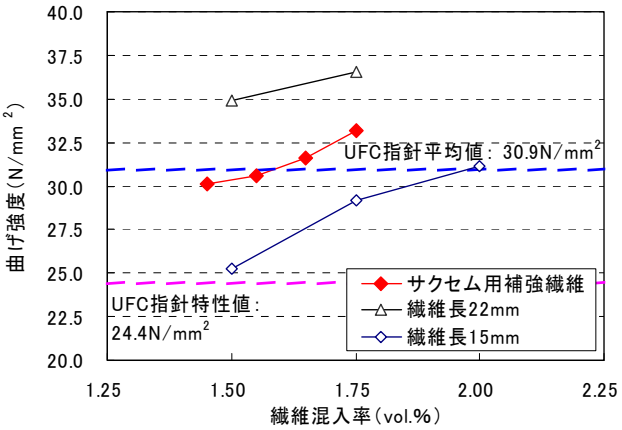


図 6.2.6　繊維混入率と曲げ強度の関係 [8)]

写真 6.2.4　優れた流動性 [8)]

（3）材料の設計値の設定

UFC 指針では，UFC の定義として圧縮強度 150N/mm^2 以上，ひび割れ発生強度 4N/mm^2 以上，引張強度 5N/mm^2 以上と定義されている．AFt 系 UFC では，室内および実機の試験練りから，上記強度のデータを収集し，特性値として圧縮強度 180N/mm^2，ひび割れ発生強度 8N/mm^2，引張強度 8.8N/mm^2 を用いてよいことが確認されている（図 6.2.7～図 6.2.10）．なお，ひび割れ発生強度は曲げひび割れ発生強度から，引張強度は曲げ強度から換算して求められる．

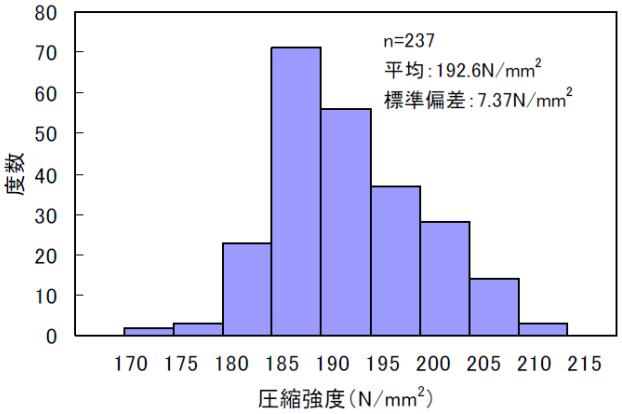


図 6.2.7　圧縮強度の度数分布 [8)]

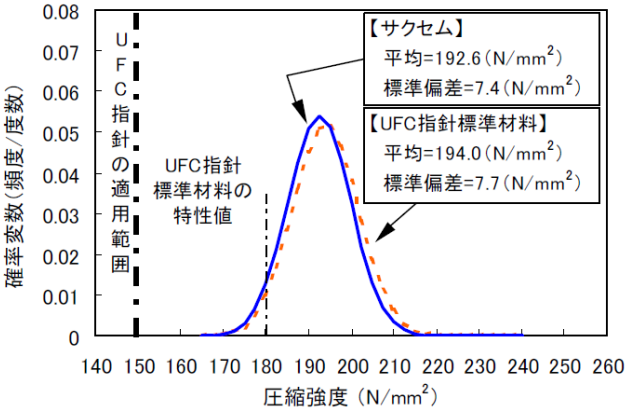


図 6.2.8　圧縮強度の確率密度 [8)]

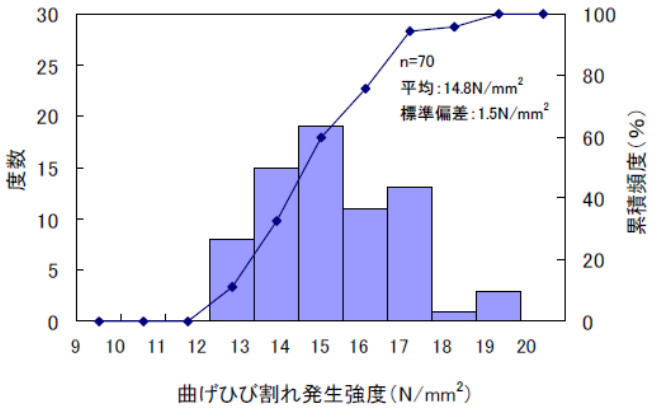


図 6.2.9　曲げひび割れ発生強度の度数分布 [8)]

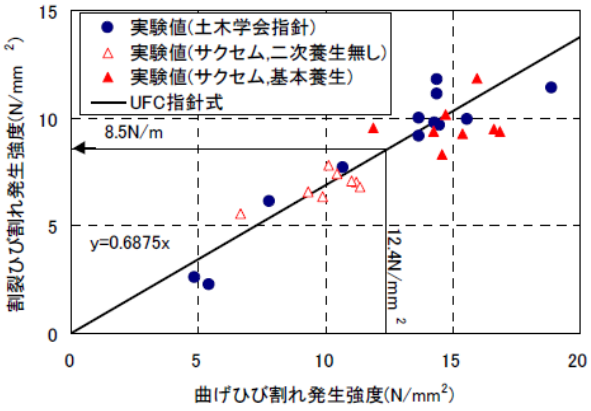


図 6.2.10　曲げひび割れ発生強度と
ひび割れ発生強度の関係 [8)]

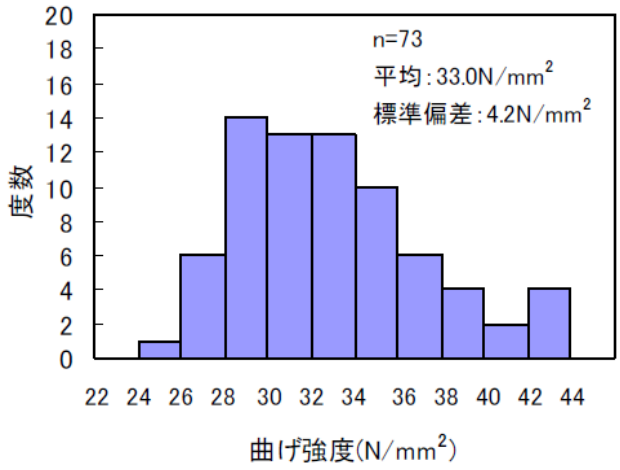


図 6.2.11　曲げ強度の度数分布 [8)]

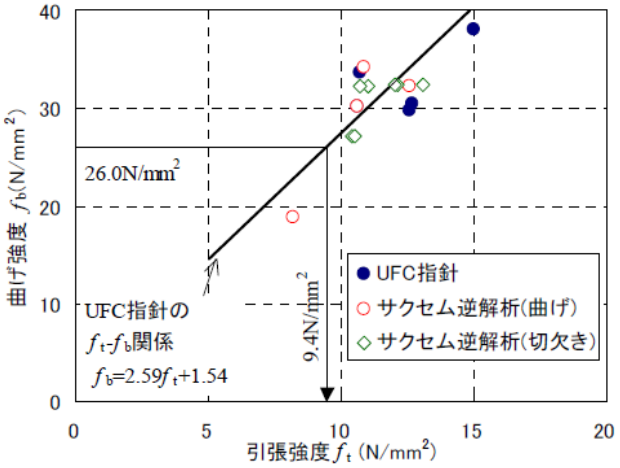


図 6.2.12　曲げ強度と引張強度の関係 [8)]

（4）部材の構造性能の検証

AFt 系 UFC 部材の曲げ実験およびせん断実験を行い，UFC 指針にしたがって曲げ挙動を解析した結果およびせん断耐力を算定した結果と比較したものを**図 6.2.13** および**図 6.2.14** に示す．UFC 指針により曲げ耐力およびせん断耐力を安全側に評価できることが示されている．

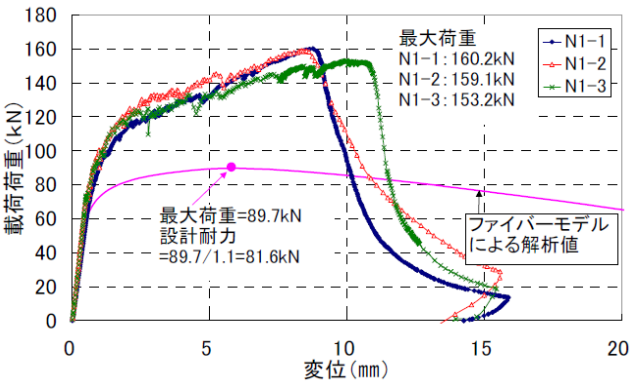


図 6.2.13　曲げ実験結果と解析結果の比較 [8)]

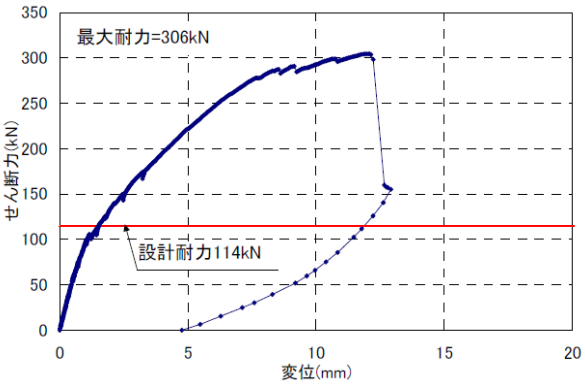


図 6.2.14　せん断実験結果と設計耐力の比較 [8)]

（5）実構造物への適用

UFC は高強度で鉄筋を省略できることから，PC 構造として適用した場合，部材断面の縮小化を図ることができる．軽量化により架設作業や下部構造への負担を小さくしたり，桁高の低減により建築限界をクリアしたりするなどのメリットを狙ったものである．PC 構造に適用された事例として，PC 歩道橋および桟橋の床版に適用された事例を紹介する．

PC 歩道橋としては，道路を挟んで建設された商業施設の 2 階同士を連絡する歩道橋であるリバーサイド千秋連絡橋に適用された（**写真 6.2.5**）．本橋は橋長 30m，支間長 26m の 3 径間連続ラーメン PC 橋であり，建物の階高制限と道路上空の建築限界から通常の PC 橋では実現不可能な低い桁高が求められ，AFt 系 UFC が採用された．**図 6.2.15** に示すように，厳しい建築限界をクリアするために桁高は 500mm と極限まで小さくして桁高と中央径間との比率は 1/52 となっており，通常の PC 橋の 1/20 程度に比べて非常に小さくなっている．また，鉄筋が不要であるため，部材の最小厚さを 70mm と薄くしている．AFt

系 UFC を採用したことにより桁高だけでなく上部工の重量が大幅に軽量化でき，耐震性に優れる橋脚を併用したこともあって，基礎工に関しては約 50%と大幅なコストダウンにつながった．

写真 6.2.5　リバーサイド千秋連絡橋 [10)]

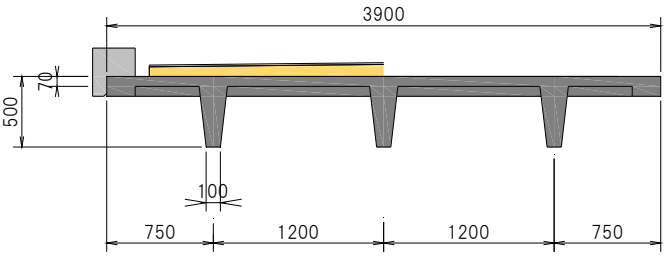


図 6.2.15　主桁断面図 [10)]

桟橋の床版としては，羽田空港 D 滑走路桟橋部の床版に適用された．D 滑走路の桟橋部は，海中に打設した鋼管杭と鋼製のジャケット，ならびにジャケットの上部桁上に配置するコンクリート床版から構成される．このうち，外周部の着陸帯に UFC を使用したプレキャスト PC 床版が採用された（**写真 6.2.6**）．AFt 系 UFC は一般のコンクリートと比較して力学的性能が高いため床版を薄く，軽くすることが可能である．普通コンクリート製の PC 床版に比べ重量が約半分となり，桟橋ジャケットおよび鋼管杭の鋼材量が低減できた．また，緻密な組織が塩分の浸透を防ぎ，塩害に対して優れた抵抗性を有するため，維持管理費の低減も期待できる．

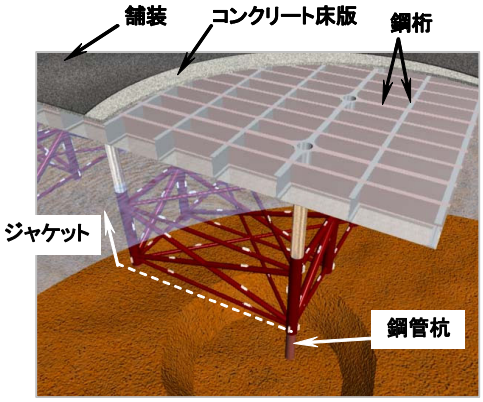


図 6.2.16　桟橋部の構造 [10]

写真 6.2.6　UFC 床版 [10]

（6）設計施工基準の整備

1)で述べた通り，土木学会から UFC 指針が刊行されている．新たな UFC を開発する場合，UFC 指針に沿って材料の性能や部材の構造性能，施工性等を確認して UFC 指針に準拠して設計施工することができる．AFt 系 UFC では，UFC 指針にしたがって設計施工できることを土木学会から技術評価されている（**図 6.2.17**）．また，研究会が組織されており [10)]，設計施工マニュアルが整備されて更なる技術の向上および普及展開が図られている．

第0003号

技術評価証

【技術名称】

「超高強度繊維補強コンクリート『サクセム』」

【依頼者】

サクセム研究会

【有効期間】

下記発行日から5年間

【技術評価】

技術評価委員会は、評価を依頼された「超高強度繊維補強コンクリート『サクセム』」（以下、「サクセム」と称する）の評価対象項目について慎重かつ慎重に審議を行い、以下の通り評価した。

1.「サクセム」の材料特性

「サクセム」の材料特性は、「超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針（案）」*に示される標準材料と同等であることを試験データに基づき確認した。

2.「サクセム」の耐久性

「サクセム」の耐久性は、「超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針（案）」*に示される標準材料と同等であることを試験データに基づき確認した。

3.「サクセム」を用いた部材の設計・施工

「サクセム」を用いた構造物の部材は、「超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針（案）」*に準拠して設計・施工することが可能であることを試験データに基づき確認した。

*土木学会：超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針（案），コンクリートライブラリー第113号，平成16年9月

以上

平成18年11月15日
平成23年11月15日更新
平成28年11月15日更新

JSCE 公益社団法人 土木学会
会長 田代 民治

図 6.2.17　土木学会技術評価証

（執筆者：一宮　利通）

参考文献

1) 土木学会：コンクリート標準示方書［設計編］，2017
2) 日柴喜剛啓，一宮利通，大野俊夫，高田和法，平陽兵，藤井秀樹：超高強度コンクリートのプレテンション部材への適用性に関する基礎的研究，材料，Vol.53,No.6，pp678-685，2004
3) 一宮利通，日柴喜剛啓，大野俊夫，高田和法，平陽兵，盛田行彦：自己収縮を低減した超高強度コンクリート部材の構造性能，鹿島技術研究所年報，第 52 号，2004
4) 鈴木基行，秋山充良，王衛侖，佐藤成禎，前田直己，藤澤豊：コンクリート圧縮強度 130MPa までを対象とした腹鉄筋のない RC はりのせん断強度式，土木学会論文集，No.739/V-60，pp.75-91，2003
5) 岡本裕昭，一宮利通，坂井吾郎，松原喜之：低収縮型超高強度コンクリートを用いた秋葉原公共デッキの設計と施工，橋梁と基礎，2005.8
6) プレストレストコンクリート工学会：高強度コンクリートを用いた PC 構造物の設計施工規準，2008.10
7) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリートの設計施工指針(案)，2004.9
8) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリート「サクセム」の技術評価報告書，2006.11
9) 一宮利通，日紫喜剛啓，大野俊夫，芦田公伸，野口孝俊：超高強度繊維補強コンクリート「サクセム®」を用いた構造物の特徴，未来材料，Vol.8,No.10，pp46-52，2008
10) サクセム研究会 HP：http://www.suqcem.com/index.html

6.3　阪神高速における新技術の開発実装プロセス

6.3.1　新技術の開発と実装

新材料を開発し，構造物に実装するためには，開発時の開発者側，実装時の構造物を建設，管理する事業者側の双方における新材料に対するマネジメントが必要となる．本節ではこのマネジメントについて，新技術の開発と実装や，低収縮型高強度コンクリート及び超高強度繊維補強コンクリート（以下，UFC という.）を事例に，そのマネジメントについて述べる．新しい材料を含む新技術の開発から構造への実装のプロセスは大きく３つの段階に分けられる．３つの段階は，着手段階，開発段階及び実装段階であり，本節ではそれぞれの段階ごとに，高速道路会社における場合を例に事業者側の視点で解説する．

（1）着手段階

高速道路会社における着手段階における開発の枠組み構築のプロセスを**図 6.3.1** に示す．最初に，建設，管理の担当部署が抱える技術的課題の抽出が挙げられる．この課題に対し，社内外にある技術を調査し，その技術に対して FS（フィジビリティスタディ）や，SWOT 分析（**表 6.3.1**）の手法を用いて，事前検討を実施する．この結果を踏まえ，既存の技術で対応可能な場合や，技術開発に対して QCD（品質，コスト，工期）の面で難しい場合は，技術開発以外の方策を検討する．事前検討の結果，技術的課題に対して技術開発できそうな場合は，戦略会議等の場で実施するかどうかの最終的な意思決定が行われる．ここで，実施するとなれば，共同研究等の募集，契約に向けた段階となる．

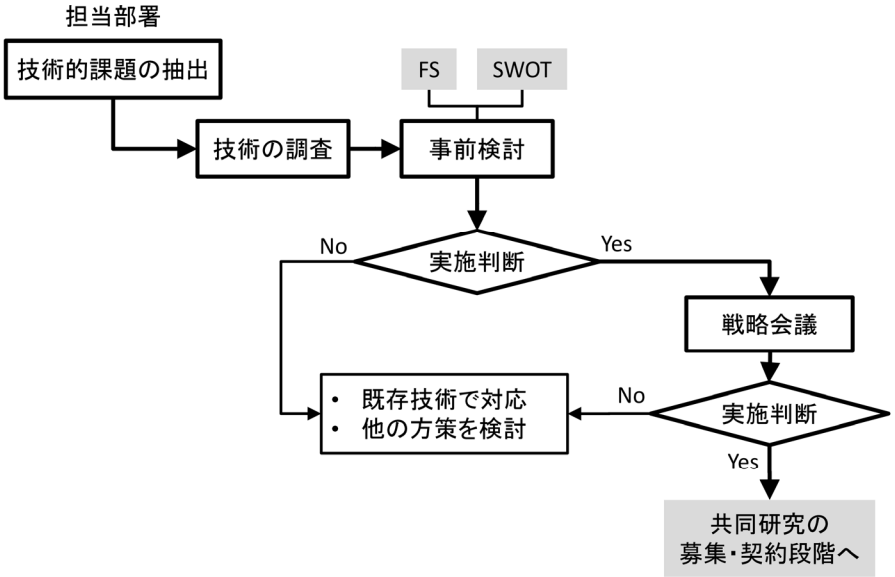


図 6.3.1　着手段階における開発の枠組み構築のプロセス

表 6.3.1　SWOT 分析

	プラス要因	マイナス要因
内部環境	強み（Strength）	弱み（Weakness）
外部環境	機会（Opportunity）	脅威（Threat）

技術開発にあたっての枠組み構築や契約方式の選定フローチャートを**図 6.3.2** に示す．このフローチャートは阪神高速道路株式会社の場合を例示したものである．最初に技術開発のニーズ型かシーズ型に別れる．求める技術的課題が明確な場合はニーズ型となる．ニーズ型については，知財の共有や相手方の有無などによって，コンサルタント業務，委託研究，共同研究を使い分ける．新しい材料や技術などのシーズに対して，そのシーズを使って解決できる技術的課題が無いか模索する場合は，シーズ型となり，阪神高速では公募型共同研究（コミュニケーション型）という枠組みがある．

公募型共同研究（コミュニケーション型）の手順を**図 6.3.3** に示す．事業者が年２回開催する公募相談会に，シーズを保有する会社が応募し，コミュニケーションを通じて，事業者側のニーズとのマッチングをはかるものである．コミュニケーションの過程で，前述の FS や SWOT 分析を行い，技術開発の可能性を模索するとともに，その妥当性を有識者からなる第三者委員会で審議した上で，妥当と判断された場合に共同研究を契約することになる．また，この方式で契約した共同研究については，共同研究完了時点で，前述の委員会に結果を報告することとしている．

このように，技術開発の着手時点では，技術的課題の抽出，枠組みの構築および共同研究等の契約という段階を経て，開発段階へ進むこととなる．

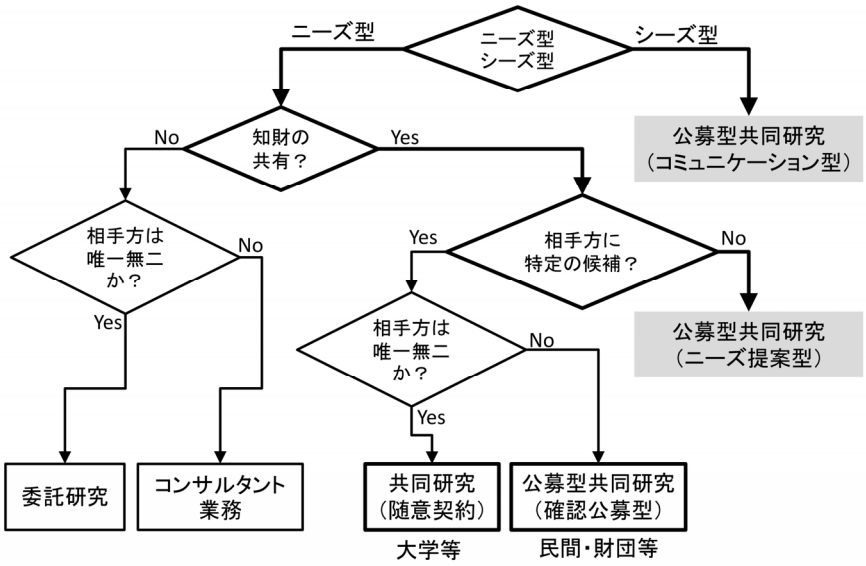


図 6.3.2　技術開発の枠組み・契約方式の選定

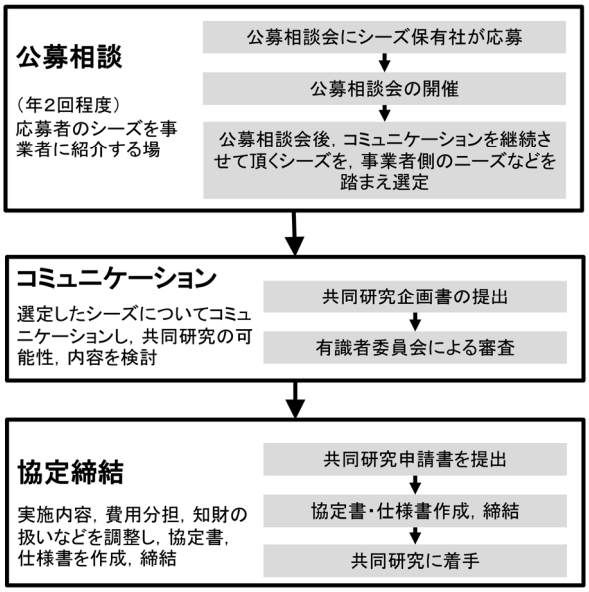


図 6.3.3　公募型共同研究（コミュニケーション型）[1)]

（2）開発段階

開発段階では，開発者と事業者が共同研究を進める．その過程では共同研究の内容や進め方の妥当性を，有識者委員会で審議する場合がある．その場合のプロセスを**図 6.3.4** に示す．研究実施の段階における実施内容を有識者に説明し，審議，助言を得るものである．また，社内の有識者委員会以外の第三者に技術の審査を委託する場合もあり，土木学会技術推進機構の技術評価制度[2)]を活用する場合もある．

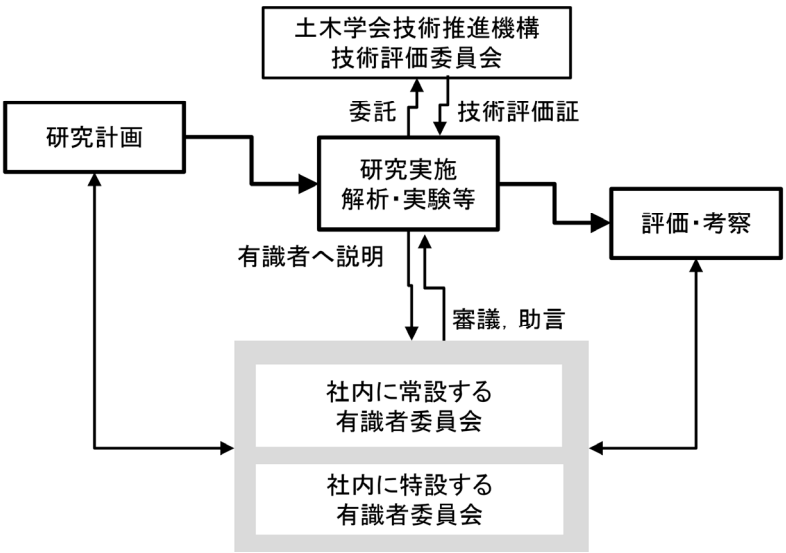


図 6.3.4　開発と審査のプロセス

また，技術開発段階においては，**図 6.3.5** に示すように情報発信していくことも重要である．情報発信の手段は，論文投稿，プレスリリース，特許等の知的財産の登録，国土交通省の新技術活用システム NETIS への登録などが挙げられる．このような情報発信を行うことで，開発者以外の第三者からの質問などのフィードバックが得られ，技術開発の精度や品質の向上につながるものといえる．また，当該研究を実施する事業者以外の事業者の構造物への適用など，実装段階に向けた宣伝効果も期待できる．

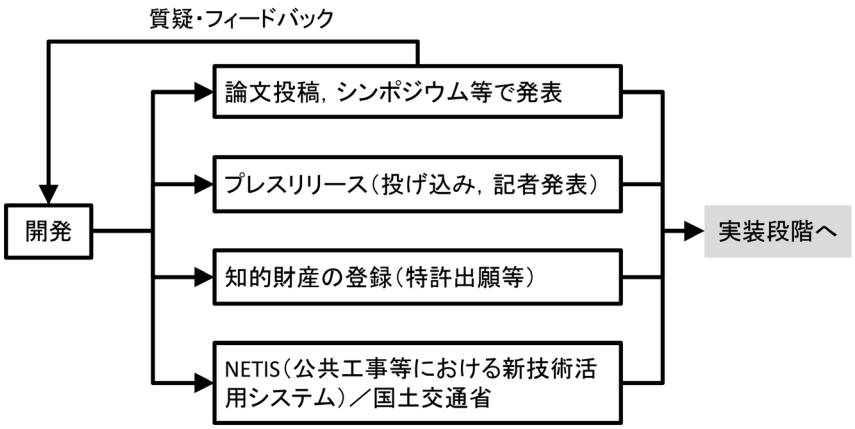


図 6.3.5　開発段階における情報発信

開発が進み，新技術の構造が実用可能な段階になると，**図 6.3.6** に示すような実装時の品質確保に向けた対策が必要になることがある．品質確保の対策としては，基準化，試験施工，技術協会の設立，特許出願などが挙げられる．技術開発におけるシーズを保有する会社だけでなく，幅広く使える技術にするには，このような取り組みをもって，技術の品質確保を目指すことが必要といえる．

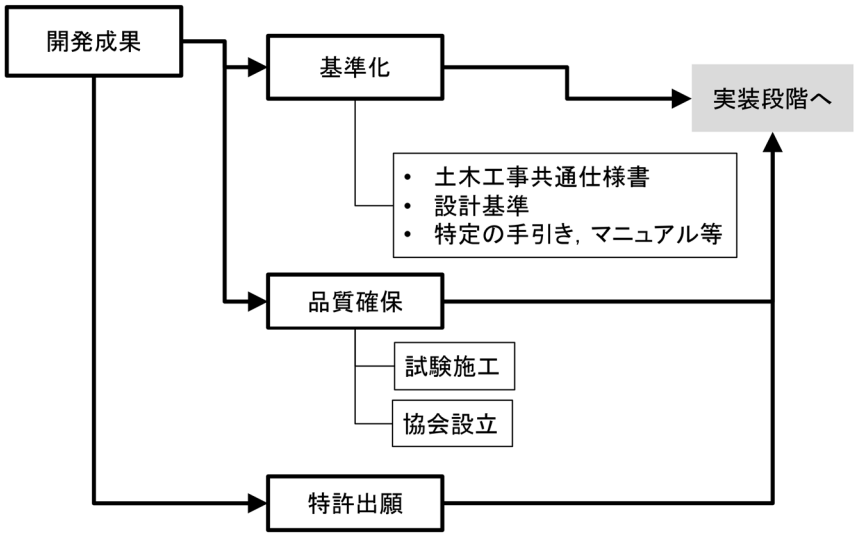


図 6.3.6　開発段階における品質確保に向けた対策

（3）実装段階

技術開発が進み，実際の構造物へ適用できる段階を実装段階と呼ぶ．実装段階における実構造へ適用決定までのプロセスを**図 6.3.7** に示す．このプロセスは阪神高速道路の場合であるが，建設事業等に開発案件を適用する場合，試験施工として実施するか，設計業務等で選定することとなる．業務で選定する場合は，図に記載のような観点で他案と比較した上で選定することとなる．

次に，試験施工の実施や業務での選定に対して，工事発注に向けた審査会で，その選定や発注仕様，積算の妥当性を審議する．審議の結果，妥当と判断された場合に，実構造への適用が決定する．

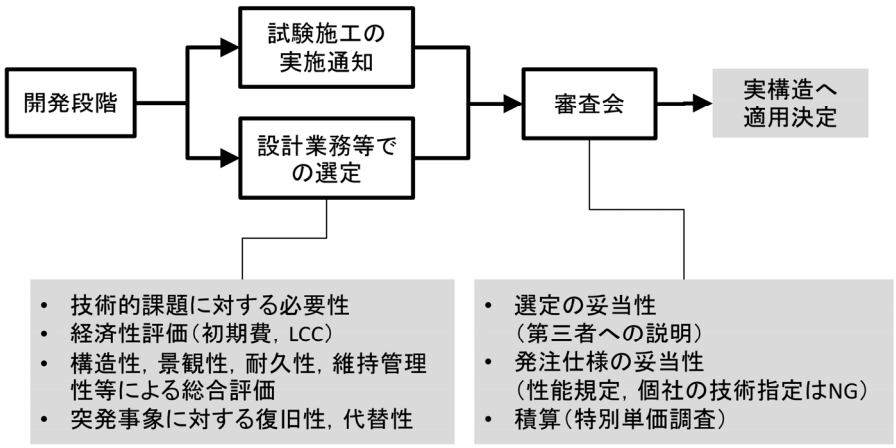


図 6.3.7　実装段階の実構造への適用までのプロセス

試験施工として実施する場合の流れを**図 6.3.8** に示す．試験施工の目的，費用，対象を踏まえ実施するかどうか判断した上で，実施する場合はその枠組みを検討する．枠組みについては工事や共同研究が挙げあれる．これらを決定した上で，試験施工を実施する．施工後に施工時の状況や課題を整理して，事後の評価を実施する．

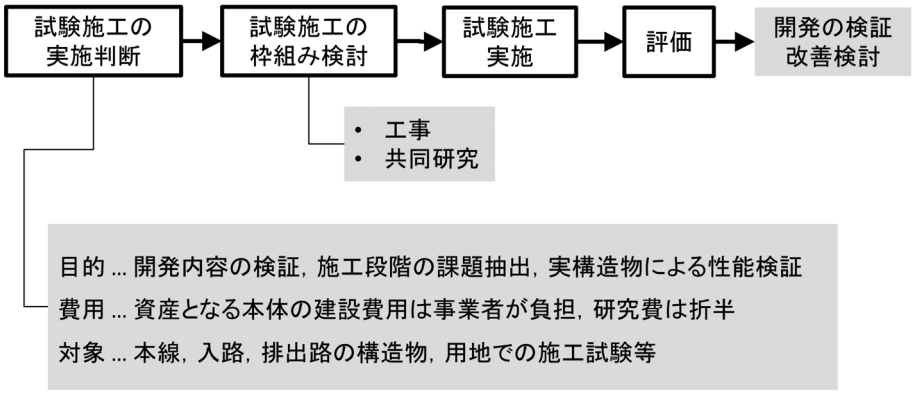


図 6.3.8　実装段階における試験施工

試験施工や，初めて実構造に適用する技術については，その技術が開発時に想定していた性能を発揮するかどうかの検証や，経年的に変化しないかをモニタリング等によって，調査することが必要である．

モニタリングを実施する場合，その目的，費用，対象を検討した上で実施の判断を行う．実施するとなった場合，モニタリングの枠組みを検討する．事業者が単独で維持管理の一環として実施する場合や，共同研究として開発者と一緒に実施する場合もある．このようなモニタリングは評価，データ蓄積を数年にわたって継続することが重要であり，これが，開発した技術の検証や改善につながっていくものといえる．

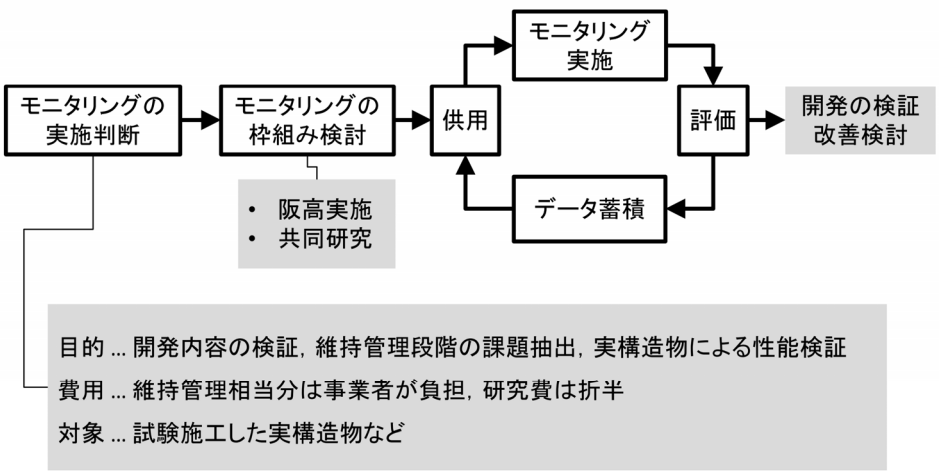


図 6.3.9　実装段階におけるモニタリング

6.3.2　UFC 道路橋床版への適用事例

阪神高速道路では，UFC を用いた道路橋床版を技術開発し，構造へ実装している．ここでは，新技術と実装の事例として紹介する．UFC 道路橋床版の開発については，前述の着手段階，開発段階，実装段階を経て実構造へ適用しており，その経緯を**表 6.3.2** に示す．

着手段階の背景として，阪神高速における鋼床版の疲労亀裂の顕在化に対する維持管理の負担があった．このような状況を踏まえ，鋼床版を代替する疲労に強い床版が必要ということを技術的課題として，研究開発に着手することとなった．これに対し，「軽量かつ耐久性の高いコンクリート系床版に関する共同研究」を 2010 年に公募し，応募技術の中から UFC を選定し技術開発をスタートした．

開発時点においては，学識者による有識者委員会である，「UFC を用いた道路橋床版に関する検討会」を設立し，実験や解析など研究・開発の内容を審議しながら技術開発を進めた．基本的な性能を確認できた 2013 年にプレスリリースするとともに，学協会への論文投稿や発表を行った．また，品質確保のために，「UFC 道路橋床版研究会」を設立した．この研究会には，コンサルタント，施工会社，材料メーカーが参加し，設計，施工，維持管理の観点で品質確保に取り組んでいる．

実装段階においては，2018 年以降，3 橋の試験施工を共同研究の枠組みで実施している．これらの橋梁では 10 年間のモニタリングを実施する計画としており，ひずみや加速度の計測を定期的に実施している．

表 6.3.2　UFC 道路橋床版の開発経緯

開発プロセス		時 期	内 容
1.着手段階	(1)戦略の立案	2010	• ビジョンを踏まえ，鋼床版の疲労劣化顕在化を受け，軽量かつ耐久性の高いコンクリート系床版の開発を戦略に立案
	(2)マネジメント	2010～現在	• 研究・技術開発戦略会議で実施判断，進捗を報告
	(3)枠組み構築	2010～	• 公募型共同研究で「軽量かつ耐久性の高いコンクリート系床版の開発に関する共同研究」を公募 • その後，現在まで20件の共同研究，業務を実施
2.開発段階	(1)開発と審査	2011～2019 2014～現在	• UFCを用いた道路橋床版に関する検討会を開催（全15回） • 技術審議会構造技術委員会コンクリート構造分科会で審議 • 土木学会技術推進機構・技術評価
	(2)情報発信	2013/8 2013/9～	• 開発に関するプレスリリース．その後，5回のプレスリリース • 学協会，専門誌等での情報発信（約90件，質疑約180件） • NETISへ登録
	(3)品質確保，特許	2017/5～ 2017/6	• UFC道路橋床版研究会を設立 • 「UFC床版の設計・施工・維持管理の手引き」をリリース
3.実装段階	(1)実構造への適用	2019 2020	• ワッフル型UFC床版の新設（信濃橋入路） • 本線での平板型UFC床版による床版取替え（守口線本線）
	(2)試験施工	2018	• 平板型UFC床版による床版取替え（玉出入路）
	(3)モニタリング	2018～	• 上記の3橋でのモニタリング，試験体の強度確認を実施中（10年間）

（執筆者：小坂　崇）

参考文献

1)　阪神高速道路株式会社：https://www.hanshin-exp.co.jp/company/topics/koubo20210927.html

2)　土木学会：技術評価制度, https://committees.jsce.or.jp/opcet/hyoka

6.4　ＮＥＸＣＯ東日本におけるコンクリートの最近の話題

高速道路事業では，従来から大量のコンクリートを使用して数多くのコンクリート構造物を施工しており，これに伴い，その時々の課題に対応するためコンクリート材料や施工方法に関する技術開発に取り組んでいる．ここでは，NEXCO 東日本における最近の事例として，超高強度繊維補強コンクリート（UFC）およびフライアッシュコンクリートを構造物に適用するための経緯や課題への取組み，試験施工の状況などについて紹介する．

6.4.1　防水層に UFC を用いた複合プレキャスト PC 床版の開発

（１）UFC 複合床版の開発経緯と構造概要

現在，高速道路各社（NEXCO）では，経過年数に伴う老朽化に加えて，大型車交通量の増加，車両総重量の増加，凍結防止剤の散布などによりひび割れや剥離などが進行した鉄筋コンクリート床版を，より耐久性の高いプレストレストコンクリート床版に取替えるリニューアル事業を進めている（**図 6.4.1**）．

このリニューアル事業では，工事による通行への影響を軽減させるため，通行止めは行わず，対面通行規制を行いながら上下線片側ずつの取替えを基本としているが（**図 6.4.2**），床版取替工事は交通規制を伴うため交通・物流への影響が大きく，施工期間短縮が重要課題となっている．工事は交通量の少ない 5 月～7 月，9 月～11 月に施工時期が限定されることが多く，春施工は梅雨の降雨期，秋施工は施工時期の後半が雪氷期と重なるが，現場防水工は工事終盤に計画されるため，降雨が続くと規制期間内に防水工が完了できないため，規制期間を短縮し，かつ天候に左右されない防水工の開発が課題となっていた．

図 6.4.1　床版取替え工事

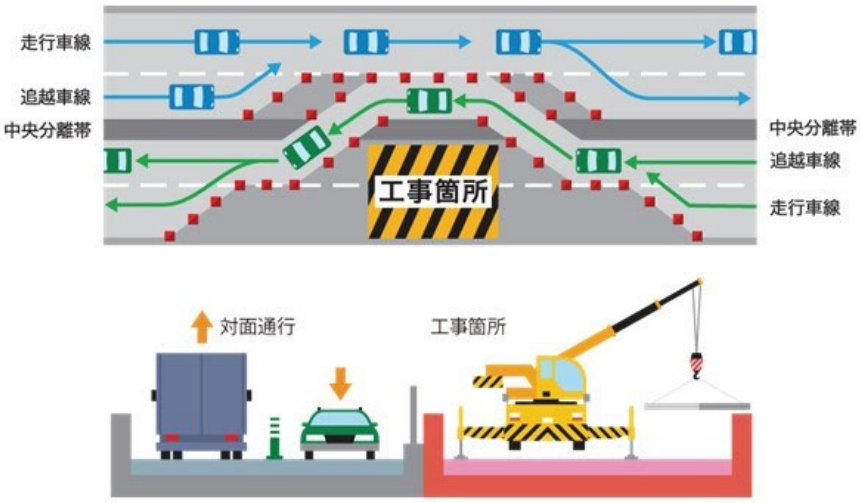


図 6.4.2　床版取替え工事における車線規制の例

このような背景から，現場での床版防水工の施工をなくし，天候による工程遅延リスクの低減に貢献する方策として，防水性能を有する超高強度繊維補強コンクリート（UFC）をプレキャスト PC 床版上面に予め工場で施工した床版（以下，UFC 複合床版）を開発した（**図 6.4.3～5**）.

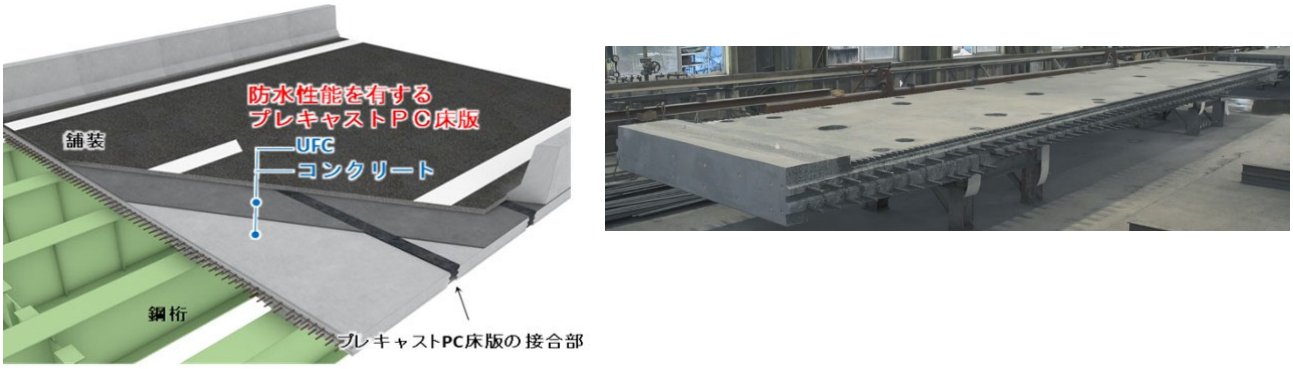


図 6.4.3　超高強度繊維補強コンクリート（UFC）を上面に配置したプレキャスト PC 床版

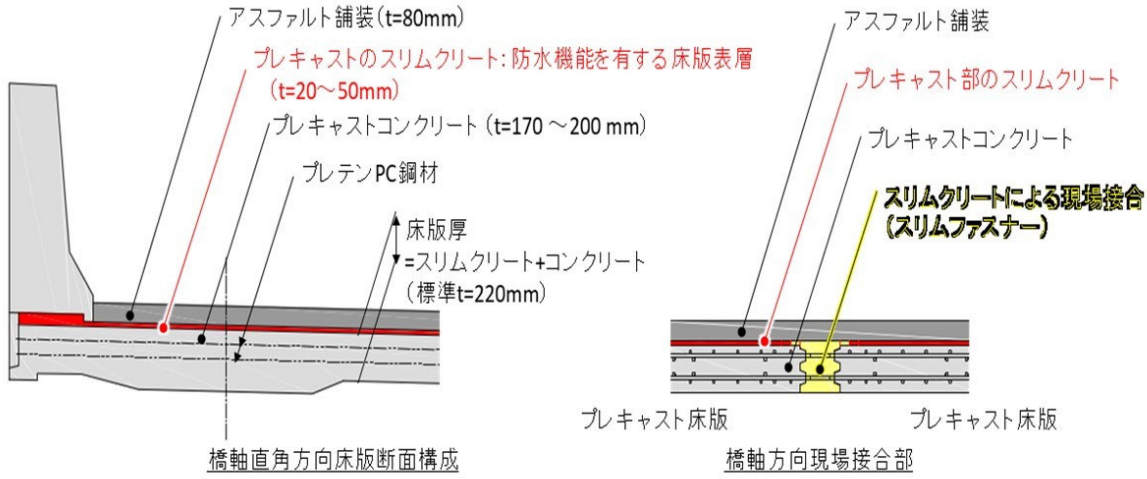


図 6.4.4　UFC 複合床版の構造図

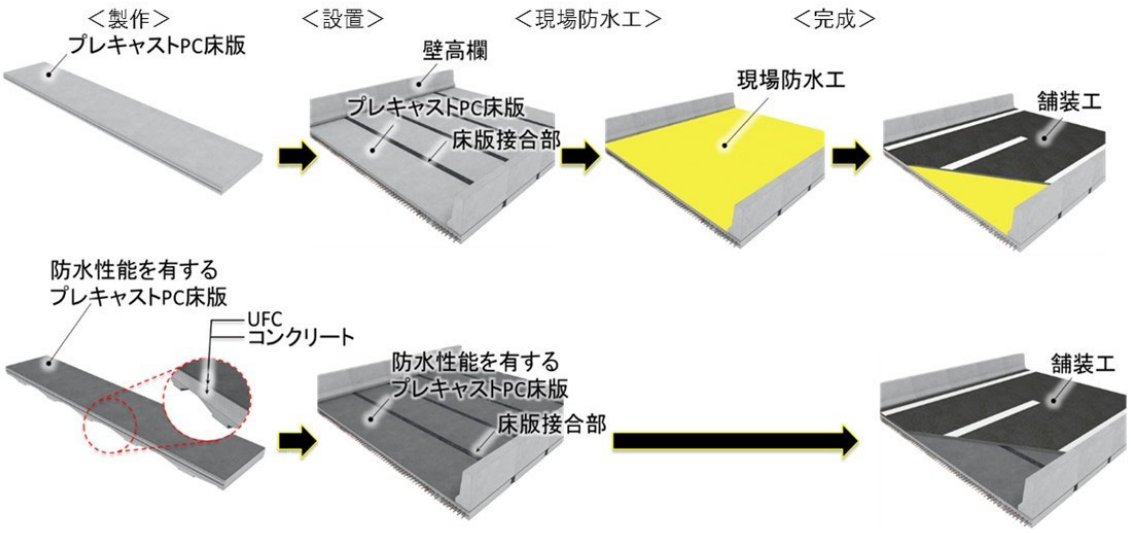


図 6.4.5　一般的な施工手順（上段）と UFC 複合床版を用いた施工手順（下段）の比較

UFC 複合床版は超高強度セメント系材料である UFC の優れた水密性・気密性を活用し，PC 床版の上面のかぶりの一部に製造および供用中に想定される荷重作用に対してひび割れが生じない 20～50mm の厚さで UFC を敷設し，これを防水層とした床版である．床版製作は，上層の UFC を含めて，プレキャストによる工場製作としている．一方で，床版同士の接合部は現場施工を想定しているため，現状は現場施工に適した常温硬化型の UFC であるスリムクリートを用いており標準配合を**表 6.4.1** 示す．

スリムクリートの材料特性のうち，設計に使用する特性値は，圧縮強度 180 N/mm^2，ひび割れ強発生強度 8.0 N/mm^2，引張強度 8.8N/mm2 である．反応速度の速いエーライトを多く含むポルトランドセメントを使用することで，給熱養生を行わなくても水温 20℃で養生した材齢 28 日で圧縮強度 180 N/mm^2 などの力学特性が得られる．鋼繊維は，直径 0.16mm，長さ 13mm，引張強度 2 700N/mm^2 であり，混入量は 2.0vol.%である．圧縮強度以外の材料特性を**表 6.4.2** に示す．

表 6.4.1　常温硬化型 UFC（スリムクリート）の標準配合

フロー値 (mm)	空気量 (%)	単位量 (kg/m^3)				鋼繊維 (kg/m^3)
		水	結合材	骨材	高性能減水剤	
260	2.0	230※1	1,830	330※2	32	157 (2.0vol.%)

超高強度モルタル

超高強度鋼繊維

UFC 層（スリムクリート）の打設状況

図 6.4.6　スリムクリートの材料

表 6.4.2　スリムクリートの主な材料特性

項目	使用したUFC	コンクリート(σ_c' =50N/mm^2)
ヤング係数 (N/mm^2)	4.6×10^4	3.5×10^4
ポアソン比	0.2	0.2
熱膨張係数	10.7×10^{-6}	10×10^{-6}
自己収縮ひずみ	660×10^{-6}	172×10^{-6}
クリープ係数	0.8	0.8
透気係数 (m^2)	1.1×10^{-21}	8.3×10^{-17}
透水係数 (m/s)	6.8×10^{-20}	2.5×10^{-11}
塩化物イオン拡散係数(cm^2/年)	0.0034	0.2510

本技術は UFC（床版上部）の発生応力度をひび割れ発生強度の制限値以下とすることで，100 年耐久を担保した構造である)．本技術の UFC の厚さは，①防水性の確保，②施工性の確保，③ひび割れ発生強度の制限値以下，の 3 つの条件より定めている．

従来の現場での床版防水層の施工を不要とすることで，床版取替工事による工事規制期間を短縮するとともに，天候不順による遅延リスクを回避できる．また，防水機能が 100 年に亘って保持されるため，ライフサイクルコストを削減するとともに，優れた（疲労）耐久性による維持管理作業（費用）の低減にも寄与する構造である．

（2）防水性能の設定

道路橋床版防水便覧（日本道路協会，2007 年）では，防水層に求める性能を下記のように定めており，透水係数の規定はないが，試験方法から逆算すると 2.1×10^{-13}～4.9×10^{-13}m/s と想定される．

防水材料の性能は防水便覧では以下のように定められている。

表-4.2.2　基本照査試験の目的及び合否判定の目安

試験項目		試験目的	試験温度[2)]	合否判定の目安	試験方法
防水性試験[1)]	Ⅰ	床版防水層の防水性を照査する。	23℃	減水量0.2ml以下	付録１
	Ⅱ	床版防水層の防水性を照査する。	23℃	漏水がないこと	〃

→　透水係数の規定はない

要求されている試験から透水係数を逆算すると、

防水性試験Ⅰ：防水層単体の試験

0.1MPa、3 分～33 分の 30 分間の減水量を 0.1ml 単位で測定

ダルシー則にしたがうと仮定して合否の目安となる透水係数を試算

Q=0.2ml/30min＝20mm^3/1800sec＝0.011mm^3/sec

ϕ 100mm→A=7854mm^2

$q=Q/A$=0.011/7854=1.41×10^{-6}mm/s＝1.41×10^{-9}m/s

0.1MPa→h=10m

防水材厚さを L=1.0～3.5mm と仮定すると

i=10000/1.0～10000/3.5=6667～2857

$k=q/i$=1.41×10^{-9}/6667～2857＝2.1×10^{-13}～4.9×10^{-13} m/s

防水性試験Ⅱ：舗装と防水層の複合

0.5MPa，24 時間加圧

コンクリートへの浸透の有無を確認→透水係数を逆算できない

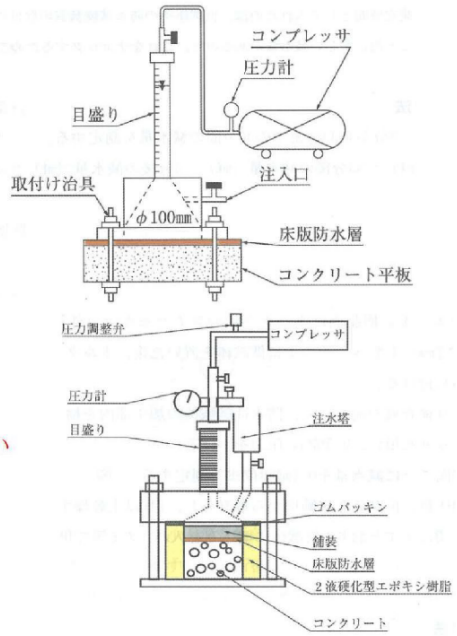


図-付1.5　防水性試験Ⅱ

参考として，道路橋床版防水便覧以外の基準類に関して透水係数に関する規定を調べたところ，おおむね 1.0×10^{-8}～1.0×10^{-13}m/s であったため，UFC 複合床版に求める防水性能の指標として，透水係数の制限値を 1.0×10^{-13}m/s 以下と定め，100 年間（設計供用期間）にコンクリート部に雨水が浸入しない UFC の厚さを照査した．

表 6.4.2 に示すとおり，負荷を与える前のスリムクリートの透水係数は 6.8×10^{-20}m/s であるが，100 年相当の曲げ引張疲労と凍結融解の負荷を与えた後も，UFC の透水係数が制限値以下であることを実験により確認した．なお，施工性については，「UFC の厚さを UFC に含まれる超高強度鋼繊維長の 1.5 倍程度とする」ことで，UFC 内の鋼繊維の分散性を確保している．

② 遮水シートの規準

「廃棄物最終処分場　遮水工技術・施工マニュアル（日本遮水工協会）」より抜粋

表 2-6.2 遮水シートの自主規格表

項目			∨合成ゴムおよび合成樹脂系 非補強タイプ 低弾性タイプ	非補強タイプ 中弾性タイプ	非補強タイプ 高弾性タイプ	補強タイプ	∨アスファルト系 シートタイプ 含浸及び積層	吹付けタイプ 単独	吹付けタイプ 繊布
基本特性	外観		1.極端に湾曲していないこと 2.異常に起伏していないこと 3.異常に粘着していないこと 4.裂けた個所,切断個所,貫通した穴がないこと 5.凹み,異常に厚みの薄い箇所がないこと 6.層間に剥離している部分がないこと 7.異常な傷がないこと				1.異常に粘着していないこと 2.裂けた個所、切断個所、貫通した穴がないこと		
	厚さ（mm）		∨1.5 以上　平均値が公称厚さの－0～+15% ただし、測定値は－10%～+15%以内				∨3 以上		
	透水係数		∨1×10^{-9} cm/sec 相当以下						
	引張性能	引張強さ（N/cm 以上）	120	140	350	240	100	10	80
		伸び率（%以上）	280	400	560	15	30	10	80
	引裂性能 引裂強さ（N 以上）		40	70	140	50	30	10	70
	接合部強度性能 せん断強度（N/cm 以上）		60	80	160	140	50	————	

→　透水係数 1.0×10^{-11} m/s(=1.0×10^{-9} cm/s)以下であることを規定

③ 道路橋鉄筋コンクリート床版防水層設計・施工資料，日本道路協会，昭和 62 年 1 月

舗装系防水材料の透水係数の標準値

表—3.14　透水係数および通気係数の標準値

項目		標準値	試験方法
透水係数	cm/sec	1.0×10^{-6}～1.0×10^{-7}	JIS A 1218
通気係数	ml/min	1.0～10.0	ASTM D 3637 (付録—2.3 参照)

注1）透水性試験は定水位透水試験方法による。供試体は両面とも75回突固めたマーシャル供試体とする。

注2）通気性試験の供試体は両面とも75回突固めたマーシャル供試体とする。

→透水係数 1.0×10^{-8} ～1.0×10^{-9} m/s で防水材としている

④ 舗装調査・試験法便覧，日本道路協会，平成 19 年 6 月

(1) 防水層（不透水層）の透水係数の目安

各種アスファルト混合物と代表的な土の透水係数および透水性の区分を**表－B017･2**[1)] に示す。橋面舗装に使用する砕石マスチックアスファルト混合物（以下，SMAという）のように通常の機能以外に防水性の機能を付加する場合，**表－B017･2**に示すように水利用アスファルト混合物の 1×10^{-7}cm/s以下の透水係数を目安として配合設計を行う。

表－B017･2　代表的な土とアスファルト混合物の透水係数の概略値

代表的な土	透水係数 (cm/s)	アスファルト混合物	透水性
れ　き	10^{-1}	開粒度アスファルト混合物	透水性が高い
砂	10^{-2}		中位の透水性
	10^{-3}		
砂 質 土	10^{-4}		透水性が低い
	10^{-5}	粗粒度アスファルト混合物	
粘 質 土	10^{-6}	密粒度アスファルト混合物	透水性が非常に低い
	10^{-7}	細粒度アスファルト混合物	
粘　土		水利用表層混合物	不透水性

→透水係数 1.0×10^{-9} m/s（1×10^{-7} cm/s）で防水層（不透水層）としている

→グースアスファルトの透水係数は、1×10^{-9} m/s より小さい

（3）UFC 複合床版の一体性の確保

UFC 複合床版の採用において，アスファルト舗装と UFC，UFC と下層コンクリートの一体性を確保することが重要である．アスファルト舗装との一体性は NEXCO 設計要領に基づき，ホイールトラッキング負荷も考慮した引張接着試験やせん断接着試験を行い，接着性能を確認した．また，下層コンクリートとの一体性は，一軸引張試験や簡易一面せん断試験によるせん断性能の確認に加え，梁試験体を用いた静的・疲労載荷試験によりひび割れ発生強度以上の耐荷性能や UFC に剥がれが生じないことを確認した．

UFC 同士の一体性は，UFC 打継面の引張強度が UFC の引張強度よりも小さいため，直線状の打継形状では十分な一体性が確保できない．そこで，新たに鋸歯形状の接合構造を開発した．鋸歯形状とすることで，UFC 間の引張接着抵抗に一面せん断抵抗が加わるため，UFC 打継部の引張強度は UFC 母材よりも高くなり，UFC の性能を十分に発揮できる構造を実現した（**図 6.4.7**）．さらに，鋸歯部に曲げ引張疲労と凍結融解による負荷を与えた後も，接合部の透水係数が制限値以下であることを実験により確認している．

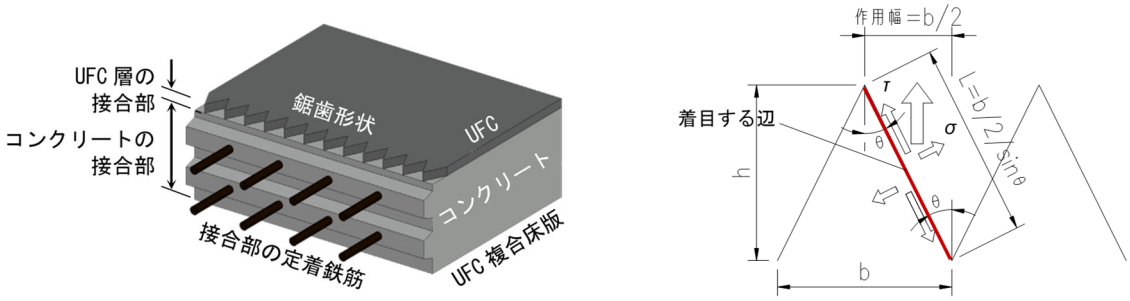


図 6.4.7　鋸歯状の接合構造

UFC 複合床版の性能の最終確認として，実物大の床版模型を作成し，輪荷重走行試験により設計供用期間 100 年以上の負荷を与えても UFC とコンクリートの一体性が確保されることを確認した（**図 6.4.8～10**）．走行回数に対する床版中央での鉛直たわみの推移を（**図 6.4.11**）に示す．本試験では，100 年の設計供用期間を再現できる乾燥状態での 250kN×10 万回の載荷後に，水張状態でさらに 250kN×10 万回を載荷したが，たわみ量の変化は生じなかった．同図には，UFC を打設せず上面まで下層コンクリート（50N/mm^2）を打設したプレキャスト PC 床版の試験結果を比較して示している．UFC を打設しない床版は，乾燥状態での 250kN×10 万回の間でたわみが増加しており，20mmUFC に置き換えるだけで疲労耐久性が向上することを確認できた．

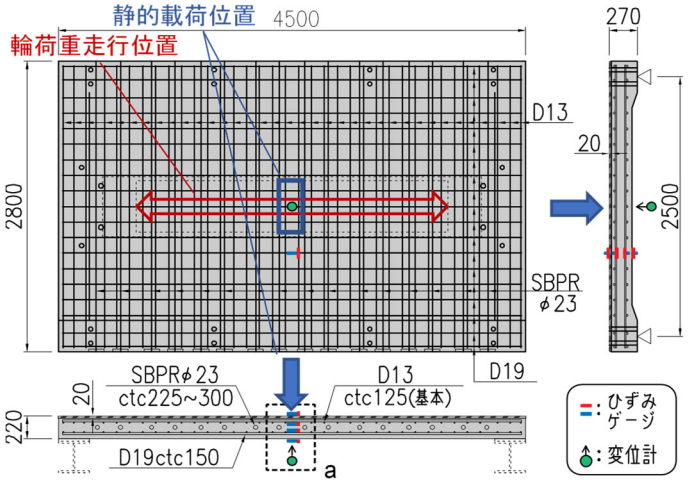


図 6.4.8　実物大床版模型

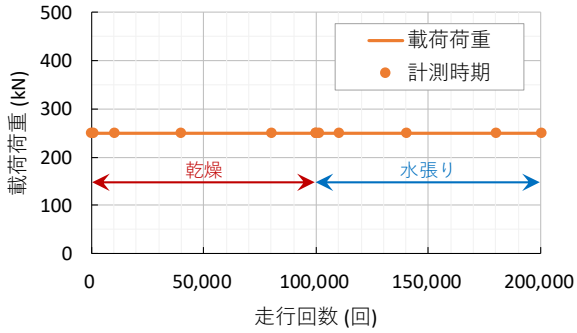


図 6.4.9　載荷パターン

(a) 乾燥条件　　(b) 水張条件

図 6.4.10　輪荷重走行試験状況

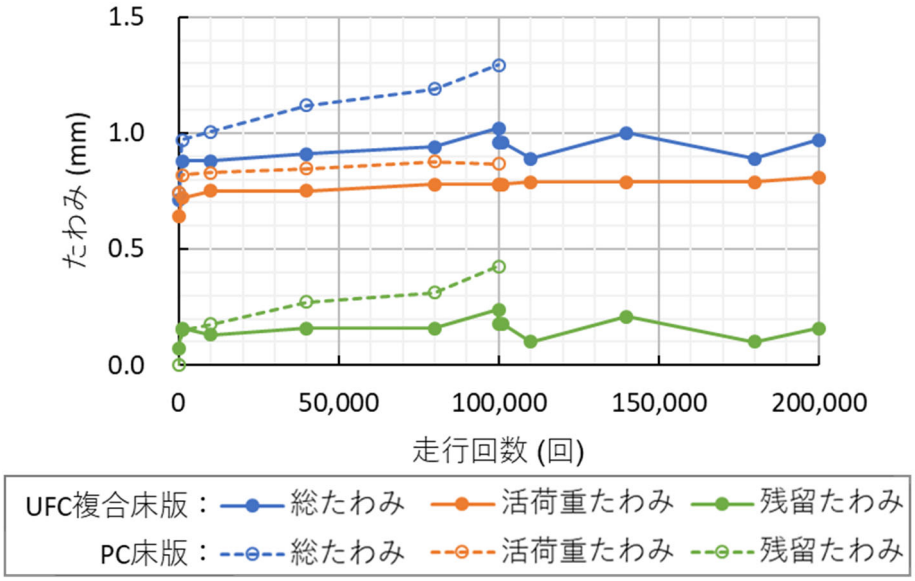


図 6.4.11　輪荷重走行試験によるたわみの推移

（4）UFC 複合床版の効果

UFC 複合床版を初めて適用した宮城白石川橋（上り線）は，東北自動車道 白石インターチェンジの南に位置し，橋長 276.9m，有効幅員 9.81m，2 連の鋼 3 径間連続非合成鈑桁橋である（図 6.4.12）.

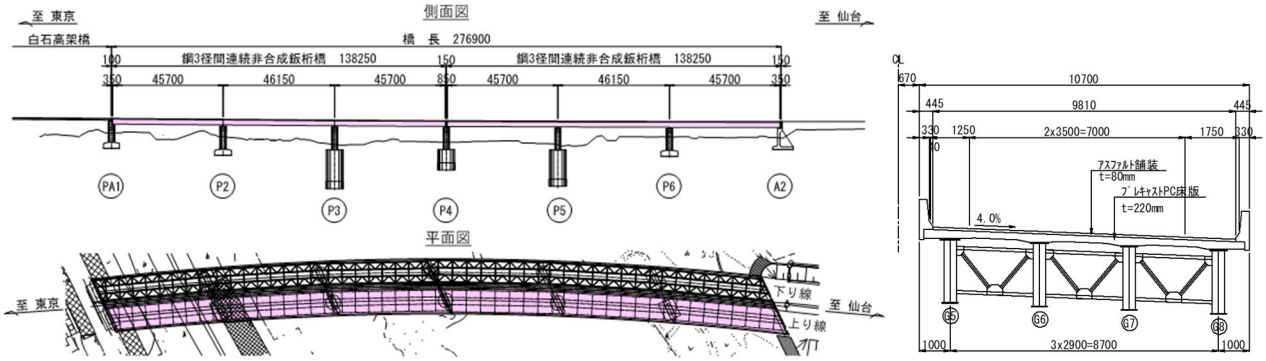


図 6.4.12　宮城白石川橋　橋梁一般図

宮城白石川橋の床版取替え工事の工期短縮効果について図 6.4.13 に示す. 通常のプレキャスト PC 床版による工事の計画（標準工法）では交通規制の解除まで 45 日を見込んでいたが，UFC 複合床版の採用により現場での床版防水工が不要となったため 3 日間の工期短縮が図れている．ここで注目したいのが, 実施工程において 7 回の雨天に見舞われており, その影響で舗装工事が 1 日延びていることである．実際のところ，UFC 複合床版を採用していない宮城白石川橋（下り線）の工事においては，雨天のため PA1～P4 間の床版防水工を未施工の状態で交通規制の解除を余儀なくされており，後日，改めて交通規制を行い床版防水工の再施工を実施している．これより現場で床版防水工を実施しないことによる工程遅延リスクの回避効果はかなり大きいと評価できる．

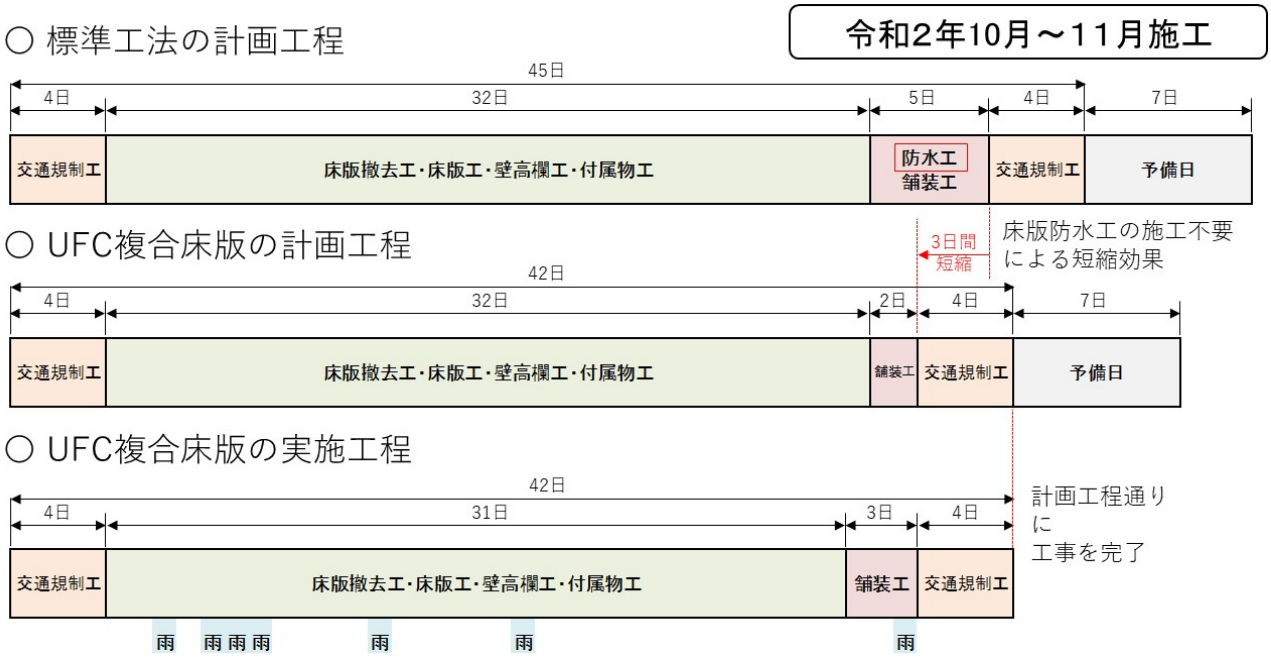


図 6.4.13　宮城白石川橋の床版取替え工事工程の比較

（5）評価

リニューアル工事における工事期間の短縮を目的に UFC 複合床版の開発を行い，実施工においても期待どおりの効果を確認した．特に，床版防水工の施工自体は数日なので全体工程のおける短縮効果は大きなものではないが，天候の影響を受ける防水工の施工の廃止は工程遅延リスクの回避の観点で大きな効果を得ることが分かった．

また，実物大供試体による輪荷重走行試験の結果から，床版のかぶり部分を UFC に置き換えただけでも疲労耐久性の向上が見込めることが確認できた．

技術が開発されて久しい超高強度繊維補強コンクリート（UFC）は，その優れた性能は評価されているものの高価なために採用判断が難しく，一般にはなかなか普及されない状況であった．しかしながら，今回開発した UFC 複合床版では，構造の一部に適用することで，費用の増加を抑制しつつ，UFC の効果を発揮する点で新しい技術開発であり，今後の普及が期待されるものである．

参考文献

1) 安川義行，大場誠道：防水性能を有するプレキャスト PC 床版の実用化，道路，Vol.953，No.8，pp.46-47，2020.8
2) 塩畑英俊，平野勝彦，川西貴士，佐々木一成：防水層に UFC を用いた複合プレキャスト PC 床版の開発，コンクリート工学，Vol.59，No.7，pp.574-581，2021.7
3) 塩畑英俊，安川義行，本間淳史，大場誠道，佐々木一成：防水層に UFC を用いた複合プレキャスト PC 床版の実用化に向けた検証，橋梁と基礎，Vol.55，No.10，pp.31-36，2021.10
4) 横山貴士，宇山友理，笠原怜，大賀猛，古賀裕史，大場誠道：UFC 複合床版による床版取替え工事の設計・施工－東北自動車道宮城白石川橋での適用－，橋梁と基礎，Vol.55，No.12，pp.21-28，2021.12

6.4.2　フライアッシュコンクリートを用いた場所打ち PC 床版の施工

近年，東日本大震災以降，火力発電所の依存が高まり，福島県の浜通りでは大量に排出される産業副産物としてのフライアッシュ（FA）の有効活用が課題となっているが，FA は混和材として使用することで，コンクリートの品質改善効果及び ASR の低減効果が期待されている．これより，常磐自動車道大日川橋の PC 床版用コンクリートにおいて，“地産地消”を前提に，地元の東北電力（株）原町火力発電所から排出される FA を活用して，コンクリート構造物の耐久性の向上及び ASR 低減を目指すこととした（**図 6.4.14**）．特に本工事では，一般的に建設現場で利用される JIS 規格II種ではなく，IV種の FA を採用する点で NEXCO 東日本管内における初の試みとなった．

図 6.4.14　常磐自動車道大日川橋の位置図

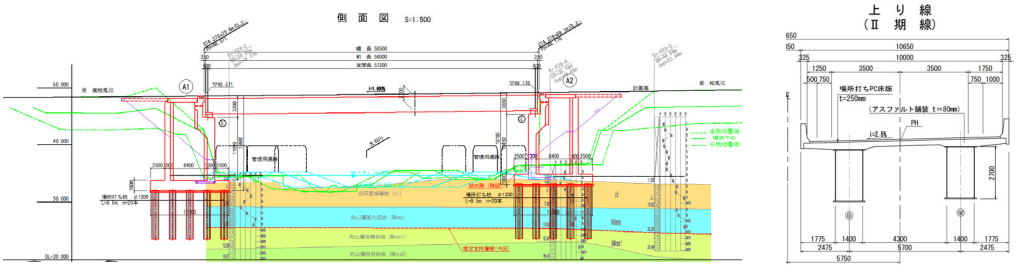


図 6.4.15　常磐自動車道大日川橋の一般図

（1）試験施工の概要

大日川橋（鋼上部工）工事は，現在いわき管理事務所で行っている常磐自動車道付加車線事業に係る工事である．常磐自動車道南相馬 IC～相馬 IC 間に位置し，橋長 58.5m の鋼単純合成細幅箱桁橋である（**図 6.4.15**）．有効幅員は 10m，床版の厚さは 0.25m，床版へのコンクリート打設量は約 178m^3 である．本工事は 2020 年 5 月下旬に床版打設，2020 年 10 月にしゅん功済みである．

図 6.4.16　FA 手投入の様子

実施工に先立ち，IV種の FA の使用による，コンクリートの品質・施工性に与える影響の把握を目的に，模擬供試体（2830mm×250mm×2955mm）を打設する試験施工を実施し，フレッシュ性状と硬化性状について検討した．また，模擬供試体打設から脱型までを実施し，施工方法，配置人数，使用機械の妥当性の検討を行った．

表 6.4.3　FA の品質規格値と原町火力発電所 FA の物性値

		Ⅰ種	Ⅱ種	Ⅲ種	Ⅳ種	原町火力発電所 FA
二酸化ケイ素【%】		45.0以上				60.8
湿分【%】		1.0以下				0.2
強熱減量【%】		3.0以下	5.0以下	8.0以下	5.0以下	2.9
密度【g/cm^3】		1.95以上				2.19
粉末度	網ふるい方法 45μmふるい残分【%】	10以下	40以下	40以下	70以下	18.0
	ブレーン方法（比表面積）【cm^2/g】	5,000以上	2,500以上	2,500以上	1,500以上	3,310
フロー値比【%】		105以上	95以上	85以上	75以上	105
活性度指数	材齢7日【%】	-				77
	材齢28日【%】	90以上	80以上	80以上	60以上	-
	材齢91日【%】	100以上	90以上	90以上	70以上	-

試験施工では，**図 6.4.16** のように FA をサイロに手投入した．使用した FA の物性値を**表 6.4.3** に示す．FA の品質は，JIS A 6201 によって管理され，原町火力発電所から排出される FA は，II種を一部満足するIV種に該当する．FA の使用に関しては，事前に FA の選定と適切な貯蔵管理が必要である．

コンクリートの配合は，W/C=47.4%とし，セメントは通常の PC 床版仕様（設計基準強度 40MPa）のコンクリートに用いられる早強ポルトランドセメント（H）を採用した．**表 6.4.4** に試験施工で用いたフライアッシュコンクリートの配合を示す．FA をセメントの 15%質量を外割りで添加した配合とし，混和剤は膨張材 20 型，助剤は AE 剤，打設時期を考慮して遅延型の高性能 AE 減水剤を用いた．

（2）試験施工結果

JIS A 1101，JIS A 1128 に準拠し，コンクリートの日常管理試験を実施した．**表 6.4.5** にフレッシュ性状（スランプ・空気量）の目標値と測定した日常管理試験の結果を示す．FA の使用にあたり，経時変化による空気量の低下が確認できたものの，コンクリートのフレッシュ性状は目標値の許容値にほぼ収まる結果となった．

表 6.4.4　フライアッシュコンクリートの配合

配合条件				単位量【kg/m^3】						混和剤		
						混和材				高性能AE減水剤SP8RV　遅延型		AE剤202
水セメント比（水/セメント）W/C【%】	水結合比（水/セメント+膨張材）W/B【%】	水結合比（水/セメント+膨張材+フライアッシュ）W/B'【%】	細骨材率（細骨材/細・粗骨材）S/a【%】	水 W	セメント C	膨張材 EX	フライアッシュ FA	細骨材 S	粗骨材 G	使用率【C×%】	使用量【kg/m^3】	添加量【A】
47.4	45.0	39.0	40.0	168	354	20	56	681	1042	0.70	2.618	25

表 6.4.5　日常管理試験の結果.

	経過時間【分】	スランプ		空気量		コンクリート温度【℃】	気温【℃】
		試験値	目標値	試験値	目標値		
製造時	0	20.0	19±2.5	6.6	6.5±1.5	15	15
現場受入時（1回目）	30	18.5	16±2.5	5.5	4.5±1.5	16	15
ポンプ中筒先時	－	18.0	現場受入時スランプ−1.0範囲	6.5	－	17	15
現場受入時（2回目）	30	17.5	16±2.5	5.8	4.5±1.5	17	20
打設途中	60	16.5	－	3.9	－	17	18

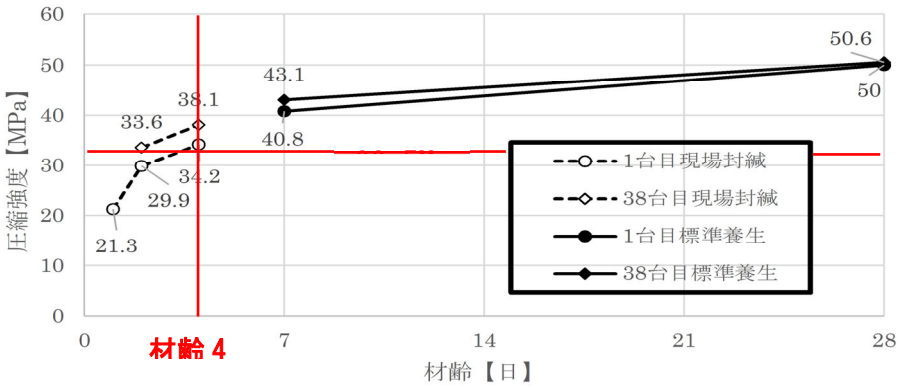


図 6.4.17　圧縮強度試験結果.

JIS A 1108 に準拠し，コンクリートの圧縮強度試験を実施した（**図 6.4.17**）．4 日強度で設計基準強度の 80%以上が要求される緊張力導入に必要な圧縮強度 32.5N/mm^2 を満足した結果が得られたことから，本配合では FA の使用上，強度発現性に対する影響は少ないと考えられた．

今回，左官工の機械仕上げ（2 次仕上げ），最終金コテ仕上げ（3 次仕上げ），散水・養生マット敷設のタイミングを評価するために N 式貫入試験を実施した．**図 6.4.18** のように，スランプ試験で用いる突き棒の中心を 1m 上方から自由落下させ，コンクリート面へのめり込み量［貫入深さ N（mm)］を測定する．試験結果を**図 6.4.19** に示す．2，3 次仕上げの開始については，N=40～20mm が仕上げの目安とされており，**図 6.4.19** より出荷開始から 3 時間 20 分後が妥当であることが分かった．散水・養生マット敷設については，N=10mm が目安とされており，かつ，供試体上に人が乗っても，コンクリートに跡が付かないことが確認できたため，出荷開始から 5 時間 20 分後が妥当であることが分かった．

（3）実橋での施工結果

JIS A 1101，JIS A 1128 に基づき，各生コン車において，工場出荷時と現場受入時（運搬時間約 20 分）のコンクリートのスランプと空気量を測定した．図 6.4.20 にスランプおよび空気量の測定結果，現場受入時の各目標値，試料温度，外気温度を示す．現場受入時の目標値は，室内試験等により，スランプを 13.5cm～ 19.0cm, 空気量を 3.0%～6.0%と設定した. 工場出荷時の各目標値をスランプは 17.5cm～20.5cm, 空気量は 5.0%～8.0%と通常時より高めに設定することで経時変化に伴うフレッシュ性状の降下対策を

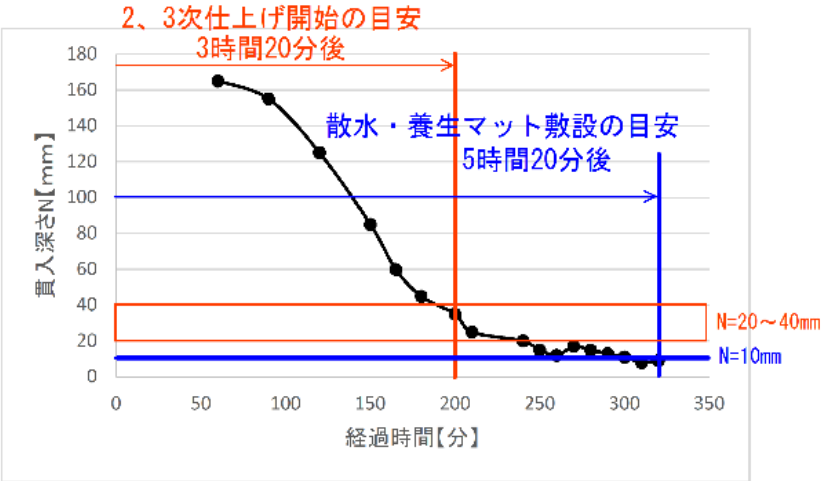
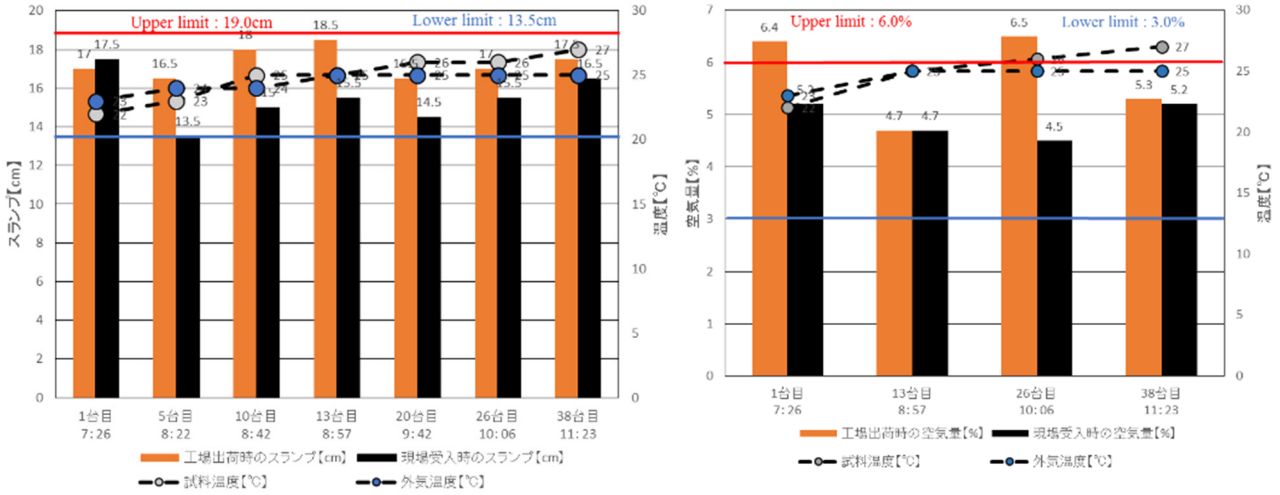


図 6.4.19　N 式貫入試験結果.

図った．**図 6.4.20** より，後半の外気温が高くなる状況下においても，各混和剤が有効に作用し，現場受入時の目標値を満足する結果が得られた．

打設完了後の床版面の養生については，湿潤性能を確保できる養生シート「アクアマット SP」を打設表面に敷設し，通常よりも長めの 1 カ月に設定したこともあり，初期ひび割れ等も確認されなかった．FA コンクリートの施工性については問題無く，施工業者からも，若干の仕上げの難さは感じたが，十分に施工可能なコンクリートであるという意見を得ることが出来た．



(a)スランプの測定結果.　　(b)空気量の測定結果.

図 6.4.20　スランプおよび空気量の測定結果

（4）評価

東日本大震災以降の火力発電所への依存の高まりに伴い，大量に排出される産業副産物が問題となる中，特に産業副産物のおよそ 90%を占めるフライアッシュを高速道路事業で活用することは，環境問題への取組みの一つと考えられた．これを背景に，NEXCO 東日本東北支社では，ASR 対策という構造物の耐久性向上に着目して，地産地消の観点からフライアッシュコンクリートの適用性について試験施工を実施した．

今回の試験施工では，JIS 規格 IV 種の FA を橋梁の上部構造物に適用するという初の試みであったが，無事に本体工事を完了することが出来た．配合については，室内試験等により FA をセメント量の 15%と限定した上で使用し適切に設計を行い，フレッシュ性状を阻害せず，NEXCO が定める品質・出来形基準を満足するコンクリートを施工した．今後は，試験施工時に製作した暴露供試体の追跡調査を実施し，FA コンクリートの耐久性向上の効果について検討する予定である．

フライアッシュコンクリートの適用範囲が広がることにより，環境対策への貢献および構造物の耐久性向上に寄与するだけでなく，若手技術者のコンクリート材料および配合に対する技術の研鑽を期待している．

（執筆者：本間　淳史）

参考文献

1）榊原直樹，冨塚翔太，子田康弘，岩城一郎：フライアッシュ IV 種で管理される石炭灰を用いたコンクリートの品質と性能評価, Cement Science and Concrete Technology, Vol.73, 2016.

6.5　今後の材料開発が取り組むべき機能・性能

AAMs の各性能に対する，特徴，特徴と紐づく用途ならびに用途開発，課題を**表 6.5.1** に示す．

まず，「フレッシュ性能」は，粘性が高いため材料分離しにくい，配合によって凝結性が大きく変化する（速硬性を付与することが可能），固化時の反応熱が低い見込みなどがある．その結果，中高流動コンクリート，吹付けコンクリートや補修材（速硬性）への適用が期待できる．用途開発では 3D プリンター材料，トンネル関連材料などが考えられる．課題として，各種化学混和剤の開発や反応熱の定量的評価がある．

「力学・変形性能」は，静弾性係数が小さく，鉄筋付着性はセメントコンクリートと同等であり，地盤改良や流動化処理土などの地盤工学関連材料としての利用，目地材や舗装材としての利用の可能性がある．一方，RC 材料としての利用のためには更なる知見の積み重ねが必要である．

「耐久性能」は，耐酸性が高い（GP（低 Ca））ことや耐火性が高い見込み（GP（低 Ca））である．下水道，酸性温泉地，化学工場資材（耐酸性），トンネルセグメント，航空材料への利用が見込まれる．具体的には，耐火パネル，耐火被覆材，化学・食品工場の床材（耐酸性），化学薬品の保管・廃棄容器（耐酸性），高温となる物（窯等）の構成材（耐火性）などが挙げられる．耐中性化性，耐塩害性，耐熱性（耐火性），耐乾燥性，耐凍害性，耐 ASR 製に関する知見の拡充，鉄筋腐食に関する知見拡充などが課題である．

「環境性能」は，セメントが不要，産業副産物の有効利用，CO_2 排出量が少ないことが特徴であり，低炭素社会，サステナブルな社会の構築に対する貢献が期待できる．今後は・資源循環の形成，未利用物質の開拓，そして総合的な環境性能を定量化する手法の開発が課題である．

「その他」として，放射性核種，重金属の固定，水を用いずとも固化が可能（原材料や製造方法の工夫が必要），堆積岩の固化メカニズムに近いなどの特徴を生かした活用がある．重金属含有廃棄物および放射性廃棄物の処理，処分用途，水が貴重な地域や地球外における構造物資材，疑似堆積岩の製造による各種モデル実験への利用，さらには自然由来の重金属処理用途，盛土・補強盛土材，廃アルカリの活用，処分地のスペース削減，有害物質の固定が可能，CO_2 固定 AAMs なども可能性がある．そのための放射性核種・重金属固定化に関する知見の拡充，無水固化技術の開発（一部メーカーが開発中），より詳細な反応メカニズムの解明，反応モデルの構築が求められる．

また，**表 6.5.1** のように，適用先としてトンネルへの可能性が高いことから，以下にトンネルの概要と施工について解説する．

トンネルの構築方法は，おもに，開削工法，シールド工法，山岳工法に分類される．開削工法は，地表面から土留め工を施しながら掘削を行い，所定の位置に構造物を構築して，その上部を埋め戻し，地表面を復旧する工法，シールド工法は，泥土あるいは泥水等で切羽の土圧と水圧に対抗して切羽の安定を図りながら，シールドを掘進させ，セグメントを組み立てて地山を保持し，トンネルを構築する工法，山岳工法はトンネル周辺地山の支保機能を有効活用し，吹付けコンクリート等により地山の安定を確保して掘進する工法である [1)]．

表 6.5.1　AAMs の用途ならびに用途開発

性能分類	特徴	特徴と紐づく用途	特徴と紐づく用途開発	課題
フレッシュ性能	・粘性が高いため，材料分離しにくい ・配合によって凝結性が大きく変化する（速硬性を付与することが可能） ・固化時の反応熱が低い見込み	・中高流動コンクリート（材料分離しにくい） ・吹付けコンクリート，補修材（速硬性）	・3D プリンター材料（材料分離抵抗性,速硬性,反応熱が低い） ・山岳トンネル一次支保-吹付けコンクリート（速硬性） ・インバートコンクリート（速硬性） ・ロックボルト定着材（速硬性） ・トンネル裏込め注入材 ・地下空洞充填材 ・接着系アンカーの定着材（材料分離抵抗性,速硬性,反応熱が低い） ・止水注入材（速硬性）	・AAM および GP 用各種化学混和剤の開発 ・反応熱の定量的評価
力学・変形性能	・静弾性係数が小さい ・鉄筋付着性は CC と同等		・地盤改良 ・流動化処理土 ・目地材 ・舗装材	・RC としての構造性能の知見拡充
耐久性能	・耐酸性が高い（GP（低 Ca）） ・耐火性が高い見込み（GP（低 Ca））	・下水道，酸性温泉地，化学工場資材（耐酸性） ・トンネルセグメント，航空材料（耐火性）	・耐火パネル ・耐火被覆材 ・化学・食品工場の床材（耐酸性） ・化学薬品の保管・廃棄容器（耐酸性） ・高温となる物（窯等）の構成材（耐火性）	・耐中性化性，耐塩害性，耐熱性（耐火性），耐乾燥性，耐凍害性，耐 ASR 製に関する知見の拡充 ・鉄筋腐食に関する知見拡充
環境性能	・セメントが不要 ・産業副産物の有効利用 ・CO_2 排出量が少ない	・低炭素社会，サステナブルな社会の構築に対する貢献	・資源循環の形成 ・未利用物質の開拓	・総合的な環境性能を定量化する手法の開発
その他	・放射性核種，重金属の固定 ・水を用いずとも固化が可能（原材料や製造方法の工夫が必要） ・堆積岩の固化メカニズムに近い	・重金属含有廃棄物および放射性廃棄物の処理，処分用途 ・水が貴重な地域や地球外における構造物資材 ・疑似堆積岩の製造による各種モデル実験への利用	・自然由来の重金属処理用途 ・盛土，補強盛土材 ・廃アルカリの活用 ・処分地のスペース削減 ・AAM でも有害物質の固定が可能？ ・CO_2 固定 GP	・放射性核種・重金属固定化に関する知見の拡充 ・無水固化技術の開発（一部メーカーが開発中） ・より詳細な反応メカニズムの解明，反応モデルの構築

ここでは，山岳工法について概説するとともに，本工法で用いられているセメント系材料を取り上げ，現状使用されているポルトランドセメントの代替として新材料を適用していく場合の要求性能について述べる．

図 6.5.1 に代表的な山岳工法である NATM のトンネル構造の概念図を示す．NATM とは New Austrian Tunneling Method の略であり，吹付けコンクリートとロックボルトで掘削後の地山を保持する工法である．現状における山岳トンネルはほとんど NATM で構築されているが，それ以前に用いられていた矢板工法（在来工法とも呼ぶ）は掘削後の地山面を鋼製支保工と矢板によって支え，コンクリートで巻きたてることによりトンネルを構築する工法である．このため，矢板工法では，土圧が覆工コンクリートに均一に作用しにくいこと，地山が緩みやすいこと，矢板と地山，矢板とコンクリートの間に空洞ができやすいこと，等の問題があった．これらの課題を吹付けコンクリートとロックボルト等の使用により解決したのが NATM 工法である．

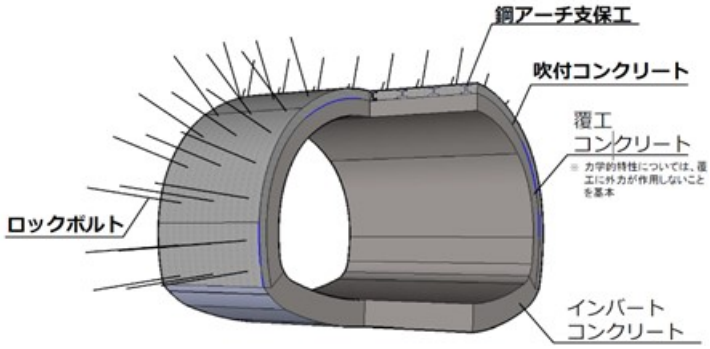


図 6.5.1　NATM のトンネル構造

表 6.5.2 に，NATM に使用される吹付けコンクリートの配合例を示す．NATM に用いる吹付コンクリートには，掘削後ただちに施工し地山を保持するための初期強度，施工中の切羽近傍でのトンネルの安定性を確保するための早期強度，長期にわたり地山を支持する長期強度が必要となる．このほか，はね返り率の抑制，作業環境保全上等の観点から粉じん発生量の低減が求められる．表に示すように，初期強度や地山との付着性を確保するため急結剤を併用するのが特徴であり，圧送したコンクリートとノズル手前で急結剤を混合して吹き付けられる．

表 6.5.2　吹付けコンクリートの配合例

区分	G_{MAX} (mm)	ｽﾗﾝﾌﾟ (cm)	ｾﾒﾝﾄ C(kg)	減水剤 C×%	粉体急結材 C×%
普通配合	15	10±2	360	―	9.0
高強度配合	15	10±2	450	1.0	12.0

図 6.5.2 に，ロックボルトの分類について示す．NATM では，ロックボルトにより地山の保持力によって土圧に抵抗するため，ロックボルトと地山を一体化させる必要があり，地山との定着材としてセメントモルタルや樹脂が用いられている．一般には，ばらつきが少ないプレミックスタイプのモルタル材が使用されており，材齢 1 日で 10N/mm^2 程度の圧縮強度が設定されている．このように，NATM 工法に用いられる吹付けコンクリートとロックボルト定着材には，一般的な RC 構造物に用いるコンクリートと比較して，地山の早期安定のため初期強度が要求される特徴がある．

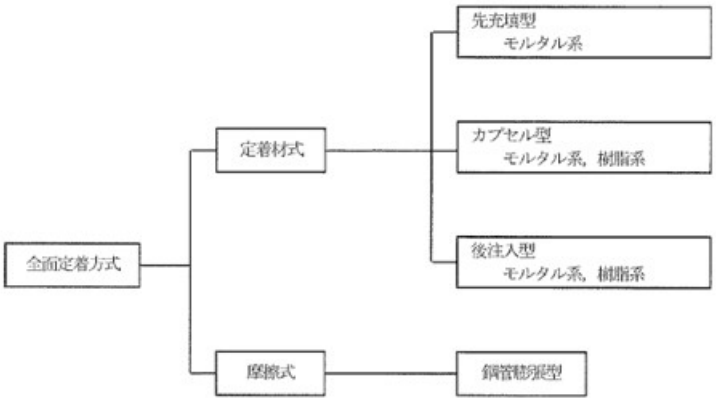


図 6.5.2　ロックボルトの分類 [1)]

これら吹付けコンクリートとロックボルト等による一次支保工が完了し，地山変位の収束を確認した後，インバート工，防水シートの設置，覆工コンクリートの施工が行われる．インバートや覆工に用いるコンクリートは一般的な RC 構造物に用いるコンクリートと要求性能は概ね同様であるが，覆工コンクリートはセントル型枠を用い，天端部は吹上げ施工で実施されるため，スランプ 15～21 ㎝程度の比較的流動性の高いコンクリートが利用される．また，覆工コンクリートの施工サイクルより施工の翌日にセントルダウンすることが多いため，打込み 16～24 時間で脱型強度 2～3N/mm^2 の強度発現が必要となる．

（執筆者：三浦　雅也）

参考文献

1） 土木学会：2016 年度制定トンネル標準示方書［共通編］・同解説/［山岳工法編］・同解説，平成 28 年 8 月

7．苛酷環境での適用

7.1　宇宙環境での適用

7.1.1　宇宙の環境

（1）　月面の環境パラメーター

表 7.1.1 に地上，地球軌道上，月面および火星面における環境を示す．表に示した数値は各種の条件によって変化するため代表的な数値として示している [1)]．

表 7.1.1 主な宇宙環境※

	地　上	地球低軌道	月　面	火　星　面
重力加速度	1 G (9.8 m/s^2)	0.9G / 10^{-6}G (ISS)	0.16G (1.6 m/s^2)	0.38G (3.7 m/s^2)
大気圧	10^5 Pa	10^{-5} Pa	10^{-8} Pa	750 Pa
温度（熱）	-100～94 ℃	太陽定数：1350 W/m^2 宇宙背景放射：3 K	-170～110 ℃（赤道） -238～-50 ℃（極地）	-140～20 ℃ -56 ℃（有効温度）
日照周期	1 日	約 90 分 (ISS)	29.5 日	1.026 日
宇宙放射線	0.39 mSv/yr	～360 mSv/yr (ISS)	～500 mSv/yr	～300 mSv/yr
飛来物	隕石	隕石，デブリ	隕石（微小含む）	隕石（微小含む）
磁場	双極	地球磁場の影響	非双極，磁気異常	非双極，磁気異常
地震動	～M10	―	～M4	―

※　各種の一般公開情報から筆者がまとめたもの

1)　重力

地上の重力 1G に対し，月面は 0.16G，火星面は 0.38G である．いずれも地上より低重力となるため，各種の装置や人間の活動はその重力に適応させたものとする必要がある．なお，宇宙ステーションでは無重量環境を活用した様々な実験が行われているが，地上約 400km の軌道上に働く地球の重力は，実際には概ね 0.9G である．宇宙ステーションが約 90 分で地球を 1 周するような高速（約 28,000 km/h）で周回しているため，見かけ上重量が無くなったような環境（微小重力環境）が得られている．

建設構造物への影響としては，死荷重や上載荷重を地上よりも小さく見積もれることから，構造断面や材料強度を小さくできると期待されている．一方，製造過程において重力による締固め効果を期待するような材料に対しては，密実性を得るための対応が必要となるかもしれない．

2)　大気圧

月や地球軌道上の大気圧は地上に比べて桁違いに低く，実用上は「真空」となっている．一方火星には二酸化炭素を主成分とする大気が存在しており，羽根による飛翔も試みられている．それでも気圧は地上の 1/100 以下と非常に薄い．人が月面や火星面で生活するためには適切な与圧環境が必要となるた

め，居住施設は内圧に耐えられるような構造とする必要がある．また，そこに使用される材料には引張に強い性質を有することが望まれる．

3)　表面温度

地球上で観測された地表面の温度は，最低で-100℃（南極域），最高で 94℃（北米・デスバレー）となっているが, 月面では, 赤道上の同一の場所であっても昼夜で-170℃～110℃の変化が観測されている．さらに月の極域では最高温度が-50℃程度となっている．また，火星は地球よりも太陽から遠いため，有効温度（大気や地表面の平均温度）が-56℃と地球の有効温度-18.7℃に比べてかなり低い温度環境となっている．

このような地表面温度の極端な変化や低温の環境は，建設資材の膨張収縮に伴う劣化や構造的な損傷を引き起こす可能性がある．そのために構造部材そのものに極端な温度環境を与えないような工夫（例えばレゴリスを用いた断熱など）が必要となり，その厚さは使用する建設材料の特性に依存することになる．

4)　日照周期

月の日照周期は地球の 29.5 日，火星は約 1 日である．即ち月の昼は地球の約 15 日間続き，夜も同程度続くことになり，これが地表面温度の変化を大きくしている理由の一つである．このような日照周期の違いは，月面における人間の生活や建設を含む各種の活動に影響を及ぼすと考えられている．一方，火星の 1 日は地球とほぼ変わらないことから，地球上とほぼ同じサイクルでの生活か可能となる．

5)　宇宙放射線

地球近傍の宇宙放射線は，X 線，ガンマ線などの電磁波のほか，陽子，中性子，電子，アルファ線，重粒子などの粒子線から構成される．大別すると，太陽から飛来する太陽風（粒子）と遠い銀河から飛来する銀河宇宙線があり，地球近傍では太陽風の影響が卓越すると言われている．これらの放射線は，地球では磁場や大気（鉛換算にして約 90cm 厚に相当）などによって遮られ，地表面における生物の生存を可能としている．地球表面における自然放射線量（地殻や空気中，体内からの被ばく量）が 2.1 ～ 2.4 mSv/yr.であることに対し，宇宙放射線はそのうちの 0.39 mSv/yr. を占めているに過ぎない．一方，月面の放射線被ばく量は地上の約 200 倍とも言われており，地上での 1 年分の放射線被ばく量を月面では 2 日足らずで浴びてしまうことになる．このような放射線環境に対し，レゴリスや人工磁場を用いた遮蔽方法なども検討されている．

月や火星で使用される建設資材は，このような放射線への耐久性に加え遮蔽性などの性質を備えることが望まれる．

6)　飛来物

主な飛来物は隕石である．地上では大気により焼失してしまう隕石も多いが，月面上には大小様々な隕石が衝突しており，石の表面にも微小なクレータが認められている．月面のクレータの観察から，隕石の寸法が大きいほど落下頻度は小さいという傾向があり，月面活動に支障を及ぼす隕石の直接的な衝

突は少ないと考えられている．しかし，その衝突速 度は十数 km/s と非常に高速であることから，衝突によって発生する破砕物の影響が危惧されている．

将来的には，隕石の大きさに対応した構造物の設計レベルが規定されるようになるかもしれない．

7) 磁場

月や火星における磁場の大きな特徴は,いずれも非双極ということにある.N 極と S 極が無いことは，放射線が地表面に到達しやすくなることに加え，方位磁石が使えないために様々な探査や建設活動における自己位置／方角の認識には，他の手段が必要となる．

8) 地震動

月においても地震（月震）が観測されている．その原因は太陽や地球による潮汐作用，隕石衝突，熱応力による破壊振動などと考えられている．主な特徴は継続時間が長いことにあり，数十分間継続したことも観測されている．地震のエネルギはあまり大きくはなく最大規模でも M4 程度と言われている．

構造物を破壊する規模の地震発生は少ないと考えられるが，その継続時間が長いことや基礎地盤がレゴリスであることなどを考慮すると，ある程度の対策は必要と考えられる．

（2） レゴリス

1) レゴリスとは

一般に，天体表面に存在する岩石由来の破砕堆積物をレゴリスと呼んでいる．そのうちの 1cm よりも小さい寸法のものをソイル（土），20μm よりも小さいものをダストと呼んでいる．

2) レゴリスの組成

表 7.1.2 に月レゴリスの鉱物組成例を示す[2)]．月の鉱物は，大きく海および高地に分類されている．試料番号 71501 はアポロ 17 号ミッションによって月の海から採取した試料，試料番号 61221 はアポロ 16 号ミッションによって月の高地から採取した試料である．主な特徴は，月の海にはイルメナイト（チタン鉄鉱）が多く含まれている一方，高地には灰長石（斜長石）が多いことにある．その結果，**表 7.1.3** に示すように，A-16（アポロ 16 号試料）の TiO_2 は少なく CaO は多くなっている[3)]．地球の鉱物と比較すると，月レゴリスは Fe の酸化度が低いことと，Na 等のアルカリ成分が少ないことが特徴となっている．このことは，アルカリを必要とするジオポリマーにとっては不利と言える．

表 7.1.2 月レゴリスの鉱物組成（海および高地）[2)]

	71501		
	20-45μm	10-20μm	<10μm
Ilmenite	12.3	9.7	7.6
Plagioclase	16.5	19.8	20
Pyroxene	21.3	13.7	8.8
Olivine	3.6	3.4	3.2
Agglutinitic Glass	38.3	44.8	53.1
Volcanic Glass	6.7	7.5	5.9
Others	1.3	1.1	1.5

	61221		
	20-45μm	10-20μm	<10μm
Ilmenite	0.6	0.3	0.9
Plagioclase	58.7	59.4	54.4
Pyroxene	7.4	5.3	1.5
Olivine	3.9	2	0.9
Agglutinitic Glass	28.9	32.6	41.6
K-Phases	0.2	0.2	0.3
Others	0.3	0.2	0.4

表－7.1.3 月レゴリスの化学組成 [3)]

Element	A-11	A-12	A-14	A-15	A-16	A-17
SiO_2	42.2	46.3	48.1	46.8	45.0	43.2
TiO_2	7.8	3.0	1.7	1.4	0.5	4.2
Al_2O_3	13.6	12.9	17.4	14.6	27.3	17.1
Cr_2O_3	0.30	0.34	0.23	0.36	0.33	0.33
FeO	15.3	15.1	10.4	14.3	5.1	12.2
MnO	0.20	0.22	0.14	0.19	0.30	0.17
MgO	7.8	9.3	9.4	11.5	5.7	10.4
CaO	11.9	10.7	10.7	10.8	15.7	11.8
Na_2O	0.47	0.54	0.70	0.39	0.46	0.40
K_2O	0.16	0.31	0.55	0.21	0.17	0.13
P_2O_5	0.05	0.40	0.51	0.18	0.11	0.12
SO_3	0.12	0.00	0.00	0.06	0.07	0.09

表 7.1.4 および**表 7.1.5** に火星の鉱物組成および化学組成をそれぞれ示す [4)]．ここに示す鉱物組成は直接分析されたものではなく，化学組成から推定されたものであるため，推定時の仮定に応じて組成は変化する可能性がある．また，Gusev および Meridiani はそれぞれ火星上の試料採取場所を示している．

斜長石，輝石，カンラン石などの主要鉱物については火星レゴリスも月と同様であるが，さらに硫酸塩鉱物の多いことが特徴となっている．シリカやアルカリ成分も比較的多く含まれていることから，火星においてはジオポリマーの製造に必要な原料を得やすいことが期待される．

表 7.1.4 火星レゴリスの鉱物組成 [4)]

	Gusev	Meridiani
Plagioclase	34.3	29.8
Pyroxene	18.6	20.8
Olivine	14.0	14.3
Magnetite+Chromite	2.0	2.0
Apatite	1.8	1.9
npOxide	3.2	3.0
Hematite	0.1	0.6
Sulfates	11.3	10.8
Chlorides	2.7	2.0
Silica	8.0	10.0
Clays	4.0	5.0

表 7.1.5 火星レゴリスの化学組成 [4)]

Element	Gusev	Meridiani
SiO_2	46.30	46.10
TiO_2	0.87	1.03
Al_2O_3	10.10	9.38
Cr_2O_3	0.35	0.40
FeO	11.20	14.50
Fe_2O_3	5.40	4.00
MnO	0.32	0.37
MgO	8.60	7.41
CaO	6.34	6.94
Na_2O	3.00	2.23
K_2O	0.44	0.49
P_2O_5	0.82	0.85
SO_3	6.00	5.90
Cl	0.72	0.66

3)　月レゴリスの機械的性質 [3)]

月レゴリスの粒径分布を**図 7.1.1** に示す．図中の赤線は月レゴリスの平均的な粒径分布曲線を示している．粒径中央値（D50）は 70μm であり，土質分類的にはシルト質砂あるいは砂質シルトとなっている．この粒度は月の岩が隕石の衝突などによって粉砕された結果であると言われている．

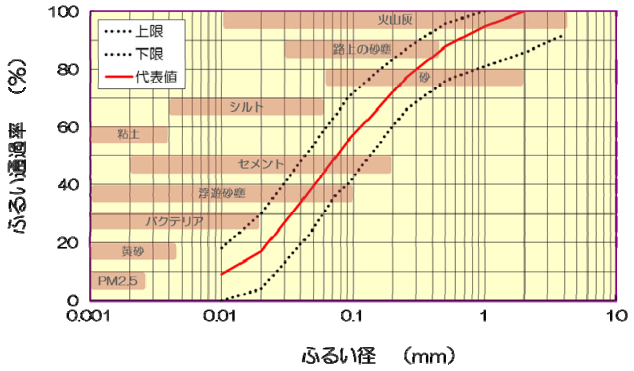


図 7.1.1 月レゴリスの粒径分布 [3)]

その他の主な特性としては以下となっている．

・粒子密度

玄武岩質：3.32 g/cm^3

アグルチネート／ガラス：1.0 – 3.32 g/cm^3

角礫岩：2.9 – 3.1 g/cm^3

・嵩密度（**図 7.1.2**）

・土質特性

粘着力 c：0.1 – 1 kPa

内部摩擦角 Φ ：30 – 50 °

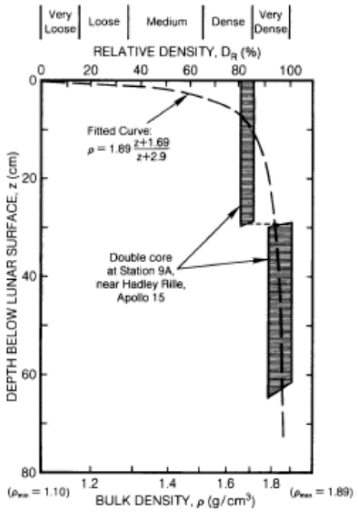


図 7.1.2 月レゴリスの深さと嵩密度（Lunar Sourcebook より） [3)]

7.1.2　宇宙における資源利用

（１）国際的な宇宙開発動向

現在，世界 26 の宇宙機関から構成される国際宇宙探査協働グループ（ISECG: International Space Exploration Coordination Group）では，これからの宇宙開発の方向性を示す Global Exploration Roadmap（GER）を制定している（**図 7.1.3**）[5]．これによると，2020 年代には月周辺および月面の開発が先行して進められ，そこを拠点として 2030 年代には火星を目指す道筋が示されている．このロードマップは世界の宇宙機関がすべて一緒になって開発を進めるというものではなく，各機関が個別に開発を進めるものの互いに協力できるところは協力するという枠組みとなっている．

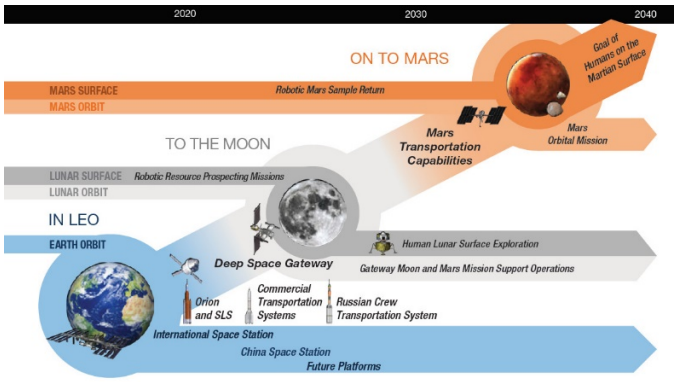


図 7.1.3 ISECG による宇宙開発ロードマップ（NASA）[5]

当面の開発対象は月であり，具体的には NASA が推進する Artemis 計画 [6]が日本や欧州の協力のもとに進められている．この計画では，月の周回軌道上に Gateway と呼ばれるステーションを建設し，そこを拠点に月面との往来を活発化させるとともに，将来的な火星へのアクセス準備を進めることになっている．

わが国は上記の計画に参画するとともに，月極域における水の存在を調べるための探査ミッションの検討も進めている [7]．その主な理由は，月に水が存在しそれが現地で利用できることが確認されると，その水を宇宙機の燃料や人の生命維持に活用することによって，将来の宇宙活動をより活発化できるからである．

このような背景から現在，月の水を求めて世界各国が開発競争を繰り広げているが，これまでの宇宙開発と大きく異なることは，民間事業の参入が活発化していることにある．既に宇宙へ行くための打上げサービスは，SpaceX 社や Blue Origin 社，あるいは三菱重工などの民間会社が担っているが，月面への物資の輸送サービスなども将来的には民間事業が主体になると考えられている [8]．

（２）宇宙資源利用の意義

このような宇宙活動の活発化には，宇宙資源の利用が重要な役割を演ずることになる．一つの理由として，将来の地上で使われるエネルギや様々な原料の源を宇宙に求めることが挙げられるが，さらに重要な役割として，宇宙開発に必要な資材を現地で調達することが挙げられる．具体的には，先に述べたように現地で回収された水を分解して宇宙機の燃料や生命維持活動に利用することや，拠点の建設に必要な建設資材を現地の土質材料から作製することなどである．もちろん，地球から運び込む必要のある

資材も一定量あると思われるが，現状において月面までの搬送コストが 1 億円／kg 程度であることを考えると，重たくて嵩張る建設資材を現地資源から作製することは必須と考えられる．

（３）月資源からの建設資材製造検討例

月資源から製造する建設資材については，これまで様々な提案がなされている．

1)　セメント系

地上で一般的に使われているセメント系材料（セメントの水和反応を強度発現の基盤とする材料）の月面での利用可能性について，筆者らが検討を行っている [9), 10), 11)]．

図 7.1.4 は月コンクリートの製造方法の一例を示したものである．ここでは，月の鉱物の一種であるイルメナイト（チタン鉄鉱：$FeTiO_3$）を地球から運び込んだ水素で還元して水を製造する方式を採用している．また，月の高地には灰長石（$CaAl_2Si_2O_8$）などのカルシウム成分を多く含む鉱物が存在していることから，これを焼成してセメント的な材料を作り出すことを想定している．この工程では，地球から約 7kg の水素を運ぶことによって 1 トンのコンクリートを製造できることになる．月資源からのセメントの製造方法に関する詳細な検討として，畑中の研究がある [12)]．

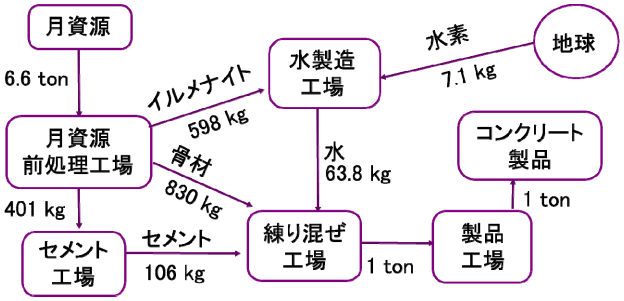


図 7.1.4 月コンクリートの製造方法例 [9)]

図 7.1.5 はモルタルの強度に及ぼす重力の影響について実験的に調べた結果である．地上においては，セメント水和反応の影響を把握できるほど継続的に月面の低重力（1/6G）環境を作り出すことは難しい．そこでここでは，打設直後に遠心加速器による高重力加速度を付加したモルタル試験体の材齢 7 日強度を調べた．その結果，重力加速度が大きいほど，余剰水の脱水や締固め効果などの影響により強度が高くなる傾向を示した．月面の 1/6G 環境下で養生した試験体は，地上で養生した試験体の 90%程度の強度を期待できることが明らかになった．

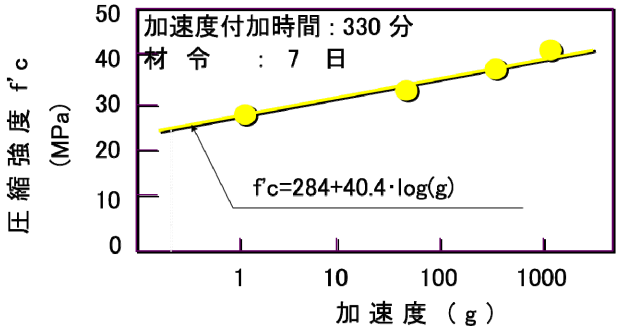


図 7.1.5 モルタルの圧縮強度に及ぼす重力の影響 [9)]

セメント系材料の圧縮強度におよぼす真空環境の影響に関する検討例を図 7.1.6 に示す．打設後に水中養生を行ったモルタル試験体を，その後材齢 1 日，3 日，7 日および 28 日において真空環境に曝露し，その後の圧縮強度の変化を調べたものである．若材齢で真空に曝露した試験体は強度の発現が途中で停止し，水中養生を継続した試験体に比べて低い強度を示した．一方，材齢 28 日まで水中養生を行った試験体は，その後真空環境に曝露しても水中養生試験体を上回る強度を示した．このことから，十分に養生を行ったコンクリートであれば，その後真空環境に曝露しても強度的には問題なく使用できる可能性のあることが見いだされた．

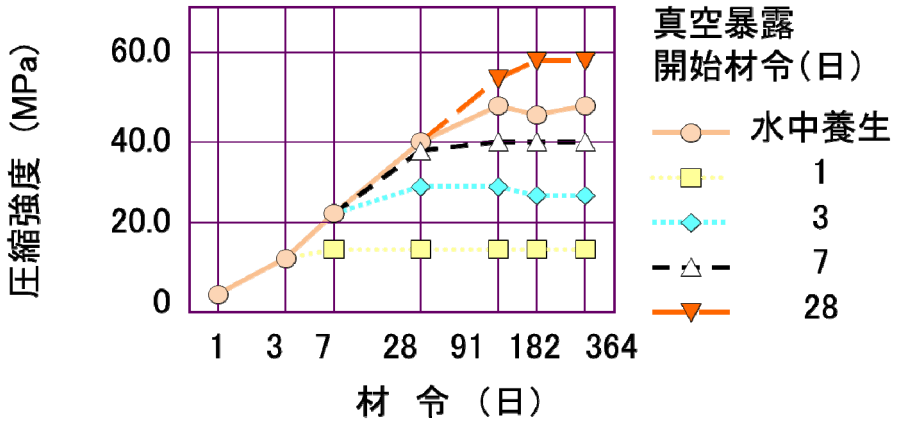


図 7.1.6 真空に曝露したセメント系材料の圧縮強度 [10)]

月面におけるコンクリートのコストに関する検討も行われている．表 7.1.6 は，文献 13)をベースに様々な前提条件（地球からの搬送単価や必要なプラント施設重量など）を見直して試算した各材料の月でのコストを示したものである．これらの条件は技術の進歩とともに変化するため，数値そのものが具体的な意味を持つものではないが，同条件で製造（あるいは運搬）する他材料等との比較において有用な知見が得られる．これによると，①水素のみを地球から運搬する場合においても月コンクリートのコストは地上とは桁違いに大きくなること，②その場合においても，コンクリートと同強度を得るに必要なアルミニウムを地球から運搬するコストに比較して 1/30 程度で収まること，③極地にあるかもしれない水を利用すると，水素を地球から運ぶ場合に比べてコストは 1/3 程度まで抑えられることなどが明らかとなっている．

表 7.1.6 月コンクリートのコスト試算例 [13)]

月コンクリートのコスト
＝工場設置コスト＋原料コスト＋製造コスト

試算例

材 料	単位コスト（万ドル/ton）	比強度当たりコスト比
コンクリート（水素運搬）	12	1.00
コンクリート（極地水利用）	3.7	0.32
鉄鋼（水素運搬）	37	1.06
鉄鋼（極地水利用）	31	0.89
アルミニウム（運搬）	1000	29.62

2)　その他バインダ混入系

水硬性セメント以外のバインダ材を利用して建設資材を製造する検討も行われている．

Khoshnevis らは，月面での Contour Crafting（3D プリンタの FDM 方式に類似）の利用についての検討を行っている[14]．**図 7.1.7** に，本方式を適用した月面での施工イメージを示す．この方式を真空の月面で適用するためには，一般的な水硬性セメントでは困難（水分の逸散やそれに伴う凍結等による施工性の低下や水和反応の停止などによる）と予想されたことから，Khoshnevis らは硫黄コンクリートの適用を提案している．月資源にはトロイライト（FeS）のような硫黄成分を含む鉱物の存在が確認されていることから，ここから硫黄を抽出し，これをバインダ材として骨材（月レゴリスをベースとする）と混合した材料を使用するという技術である．ただし，十分な量の硫黄を月資源から抽出する可能性や，使用環境温度への硫黄の適応性などにおいて技術的な課題を有している．

図 7.1.7 Contour Crafting による月面施工イメージ[14]

バインダ材として，ポリマーを利用する検討も行われている[15), 16), 17), 18)]．いずれも月面における水の利用が，その調達性や反応性において課題を有していることから，バインダ材としてポリマーを使用するという提案である．ポリマーの種類が具体的に示されていない提案も多いが，月面農場で藻類を育成しそこから Biopolymer を生成して利用するというユニークな提案もなされている．模擬レゴリスとポリマーを混合して試験体を作製（**図 7.1.8**）し，その物性や月面の離着陸パッドに適用した場合のロケット噴射への耐性などを把握する検討も行われているが，ポリマー材の地球への依存度や月面環境への適用性などさらなる検討が必要な状況にある．

図 7.1.8 模擬月土とポリマーから作製した試験体の例
（ISERI/Hanyang Univ./KICT）[15]

3)　焼結・溶融系

月レゴリスを焼結あるいは溶融固化（いわゆる鋳物）させて建設資材を製造するという検討も多くなされている．これは，地球から持ち込む物質に依存することなく現地の資源にエネルギのみを投入することによって製造できるという利点を生かした提案である．加熱方法として，太陽熱を利用する方法[19),20)]，マイクロ波を利用する方法[21),22)]，高周波を利用する方法[23)]などが考えられている．これらはいずれもレゴリスが乾燥した状態で利用する方法となっているが，地上の陶器製造と同様に湿式で（レゴリスと水を混合させて）成型・焼結させる方法なども提案されている[24)]．

図 7.1.9 に太陽集光熱を直接利用した 3D プリンタ装置の例を，**図 7.1.10** にマイクロ波を使ったレゴリスの焼結状況を示す．**図 7.1.10** の装置は筒状の炉芯内にレゴリスシミュラントを投入し，その部分にマイクロ波を照射して焼結（図のオレンジに輝いている部分）させるもので，砂状のレゴリスから礫状の物質（いわゆる砂利）を作り出し，それを舗装や地盤改良などの用途に利用することを目指した検討である．

図 7.1.9 移動式 3D プリンタヘッド（© European Union, 2022）[20)]

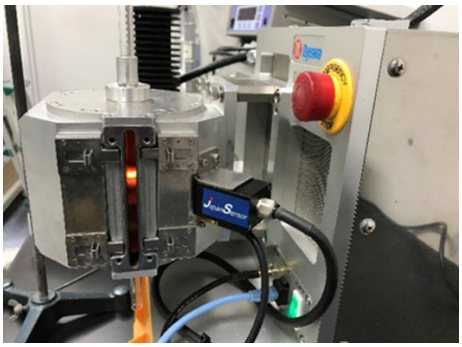


図 7.1.10 マイクロ波焼結装置の例（JAXA/東工大）[21)]

レゴリスに高周波電磁波を照射して誘導加熱の原理で加熱焼結させる方法についても検討が行われている[23)]．

これらの焼結・溶融系の加工方法に共通した課題として，①1,000℃を超える加熱が必要，②レゴリス粉体の熱伝導率が低く，製品全体を均一に加熱することが困難（生焼け部分や温度ひびわれが発生しやすい），③大きな製品を作ることが難しい，④成型のための処理（型枠，脱型，仕上げ成形など）が必要，などが挙げられる．

4)　ジオポリマー系

月や火星におけるジオポリマーを利用した建設資材製造については, 2015 年頃から検討が進められている．その多くは模擬月土（シミュラント）をベースとしてジオポリマー試験体を作製し，その特性を調べる研究となっている．

Montes らの研究では，JSC-1A と呼ばれる NASA が開発した模擬月土をベース材料として使用し，そこにケイ酸ナトリウム溶液（SiO_2/Na_2O = 3.22，37.2 wt%）及び NaOH（10M）を加え，養生日数 3 日および 7 日，養生温度 60℃および 23℃（室温）で固化させ，圧縮強度や放射線遮蔽性能などを調べた [25]．その結果，①月資源をベースに建設資材レベルの圧縮強度（30MPa 程度）を有するジオポリマー硬化体を製造できること，②硬化前のジオポリマー試験体を静的に圧縮することによって，強度および放射線遮蔽性能を向上できること，③通常の月面の放射線環境に対してジオポリマーは遮蔽材として機能するが，太陽フレア活動に対しては別の対策が必要であることなどを示した．

Davis らの研究では，先の Montes らと同じ配合の試験体について，養生環境（気中，真空中），養生期間（1, 3, 7, 28 日），養生温度（26℃（常温），106℃（月の昼間温度を想定））などを変化させた硬化体について，圧縮強度やバインダ構造などを調べた [26]．その結果，①常温および気中では材齢とともに強度が増加すること，②高温および気中では，初期発現強度が一旦低下し，その後徐々に増加すること，③真空養生により強度は材齢とともに低下することなどを示した．

佐藤らは，JAXA 宇宙探査イノベーションハブ事業の公募研究において，月面でのジオポリマーの製造可能性に関する検討を行っている [27]. 一般にジオポリマーの製造には一定量の Na（水ガラスや NaOH）が必要となることから，Na を地球から補給する必要があると考えられている．しかしながら月にはわずかながらも Na が存在していることから，これを抽出することにより，水のみで現地資源を固化する可能性について検討した．その結果，①月資源成分のみからでは，建設資材として利用可能な硬化体を製造することは困難であること，②月で貴重な水はジオポリマー製造過程においてある程度回収可能なことなどを示した．

Alexiadi らは，月および火星の模擬土をベースにジオポリマー硬化体を作製し，その圧縮強度を調べた [28]．模擬月土として JSC-1A，模擬火星土として JSC Mars-1A（いずれも NASA 開発），活性剤として水ガラス 37.5wt%，NaOH（10M），ケイ酸カリウムなどを使用し，種々の配合について検討した．その結果，模擬月土に関しては NaOH の混入量の増加にともなう圧縮強度の増加がみられ，10MPa を超える強度が得られた一方，模擬火星土については最大でも 2.5MPa と低い圧縮強度となった．模擬土が必ずしも実際の反応性を示しているとは限らないことから，今後の検討が必要と考えられた．**図 7.1.11** に試験体の外観を示す．

図 7.1.11 模擬月土（上）および模擬火星土（下）をベースとした
ジオポリマー試験体（University of Birmingham）[29)]

硬化前のジオポリマーは水ガラスの影響などにより一般に粘度が高く，特に 3D プリンタなどに適用する場合には，変形性や積層性を適切に制御する必要があることから，Arnhof,および Pilehvar らはジオポリマーに混入する流動化剤についての検討を行っている [30), 31)]．原料として，DNA-1 と呼ばれる模擬月土をベースに NaOH（12M）を 35wt%，さらに混和剤として，尿素，ポリカルボン酸系流動化剤ならびにナフタレン系流動化剤等を個別に使用した．その結果，①流動化剤を含まない試料は 3D プリンタにおける成形性が悪いこと，②尿素を混入させた試料は，凝結時間を遅延させる一方，初期強度の発現が早くなることから，3D プリンタに適していること，③尿素を混入させたジオポリマー試験体は，他の混和剤を使用した試験体に比較して低い圧縮強度を示したが，15MPa 程度は発現しているので建設資材に適用することは可能であることなどを示した．筆者らは，この結果を受けて宇宙飛行士の尿を尿素源として利用することも提案している．**図 7.1.12** に硬化前のジオポリマー材料の変形性と積層性の状況を示す．

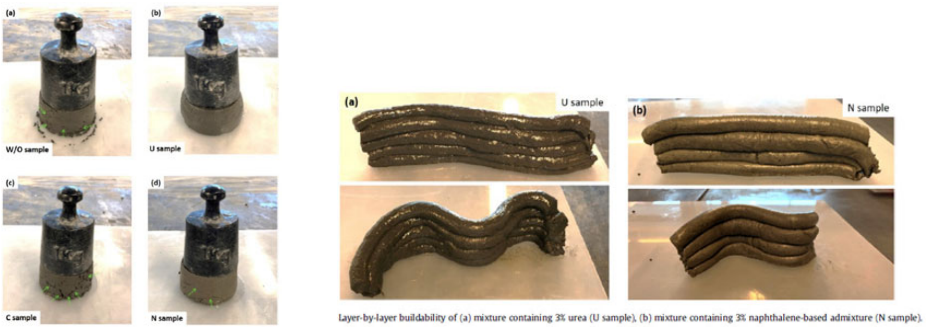


図 7.1.12 混和剤を混入したジオポリマー材料の変形性（左）と積層性（右）の評価 [31)]

Alrefaei らは，流動化剤としてナフタレン，メラミンおよびポリカルボン酸塩などを $Ca(OH)_2/Na_2SO_4$ 系のジオポリマーに適用した場合の，流動性，凝結時間ならびに圧縮強度を調べた [32)]．その結果いずれ

の流動化剤を用いた場合にも，使わない場合に比べて流動性および圧縮強度の増加を示した．その中でもポリカルボン酸塩の効果が特に特に大きく認められた．

Zhou らは火山性岩砕（スコリア）を原料として新たな模擬月土を開発し，ジオポリマー原料としての適用性について評価を行った[33),34)]．アルカリ活性剤には市販の水酸化ナトリウムおよびケイ酸ナトリウムを使用し，それらの混入率ならびに養生温度を変えてジオポリマー硬化体を作製し，圧縮および曲げ強度，マトリックス構造観察などを行った．その結果，材齢 28 日において最大 75.6MPa の圧縮強度および 6.3MPa の曲げ強度を得ることができた．また，アルカリ活性剤は，その濃度と養生温度との関係を考慮しないと十分な効果が得られない場合のあることなどを示した．さらに，Metakaolin や Al_2O_3 を混入させた場合についても検討を行い，これらの物質がジオポリマーの機械的性質や質量強度比を向上させること，また Metakaolin の粒子が細かく可溶性非晶質が多いほど，その影響が大きいことを示した．**図 7.1.13** に Al_2O_3（図中では Al と表記）および Metakaolin（同 Kao）の混入率と圧縮強度の関係を示す．

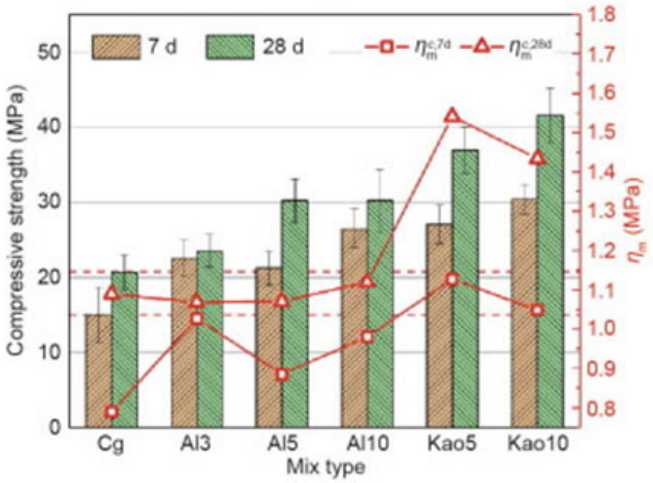


図 7.1.13 Al_2O_3 および Metakaolin の混入量と圧縮強度の関係（Beihang Univ.）[34)]
（横軸中の数字はベース材に対する重量%を示す）

7.1.3　月・火星で AAMs を利用するための課題

これまでの検討状況から，月や火星で AAMs を利用するために解決すべき課題を**表 7.1.7** にまとめる．大きく原料の調達性，製造工程に及ぼす環境の影響，供用時における環境の影響などに課題を分類している．

表 7.1.7　月・火星で AAMs を利用するための課題

分類	要　素	月・火星での適用	課　題	備　考
原料	活性フィラー	レゴリスの細粒分（45μm 以下）を利用？	レゴリスに活性フィラーとしての性能があるか？	本物のレゴリスを用いた評価が必要（シミュラントでは活性度が再現されているか不明）
	アルカリ活性化液	Na：斜長石，輝石中に僅かに存在（月：Na_2O として 1wt%以下・火星：Na_2O として 3%程度）	AAMs としての Na 必要量は？ Na の抽出あるいは補充をどうするか？	地球からの輸送 vs. 現地での抽出 トレード検討
		Si：鉱物中に多く存在 （SiO_2 として 40～50wt%程度）	SiO_2（シリカ単体）としての存在量は低い（石質成分中に 1 wt%以下） 鉱物からの抽出をどうするか？	効率的な Si の抽出手法
		水：月極域水氷，火星地下水氷，酸化鉱物の水素還元による製造	水の確保をどうするか. 月極域水氷の利用可能性は不明（2021 年現在） AAMs としての水所要量をどこまで減らせるか？ 硬化過程においてどれだけの水を回収できるか？	水回収量はシステムによる
	不活性フィラー（骨材）	レゴリス	最適粒度となるように分級が必要か？	
	補強材	レゴリス抽出金属／ガラス	補強材が必要か？ 補強材に要求される機能・性能は？	補強材の適用方法
製造	製造設備	コア設備は地球から搬送	コンパクト化・可搬化・軽量化が必要	原料採取・搬送・分級・貯蔵・投入・混合・成型・養生・脱型・搬出など 必要に応じて，補強材製造システムが対象
	エネルギ	太陽電池（日照周期が影響） 二次電池	製造および養生に必要なエネルギは？ 二次電池の種類（設備維持，越夜用）は？	高効率システム 連続運転可能時間→養生条件に影響
	環境	低気圧(月：10^{-8}Pa・火星：750Pa)	低気圧下での製造・養生は可能か？	製造・養生のための与圧システム
		温度変化 （月面：-170 ～ 110℃・火星面：-140 ～ 20℃）	極端な温度変化・変化幅において製造・養生が可能か？	製造・養生のための断熱システム
		重力 （月：0.16G・火星：0.38G）	低重力環境が製造過程に及ぼす影響は？	締固め・製品密度・強度への影響
		放射線（太陽風粒子，銀河宇宙線） （月面：～500 mSv/yr.・火星面：～300 mSv/yr.） 太陽フレア時：通常の 100～1,000 倍	放射線が製造過程に影響するか？	製造・養生のための遮蔽システム
組立・施工	組立（施工）設備	地球から搬送	部材の組立方法は？ 適用構造物は？ 補強材の適用方法は？ コンパクト・可搬型・軽量	適用構造物に応じた組立システム
	エネルギ	太陽電池（日照周期が影響） 二次電池	組立・施工に必要なエネルギは？ 設備維持・越夜に必要なエネルギは？	供給エネルギ環境に応じた施工計画・工期設定
	環境	低気圧(月：10^{-8}Pa・火星：750Pa)	低気圧下での組立・施工は可能か？	組立のための与圧システム 気密材 シール機構
		温度変化 （月面：-170 ～ 110℃・火星面：-140 ～ 20℃）	極端な温度変化・変化幅において組立・施工が可能か？	組立のための断熱システム
		重力	低重力環境が組立・施工過程に	部材の軽重量化に伴うシステ

		（月：0.16G・火星：0.38G）	及ぼす影響は？	ムのコンパクト化
		放射線（太陽風粒子，銀河宇宙線） （月面：～500 mSv/yr.・火星面：～300 mSv/yr.） 太陽フレア時：通常の 100～1,000 倍	放射線が施工過程に影響するか？	組立のための遮蔽システム
		隕石	どの程度の大きさの隕石に耐えられるか？ その場合の頻度は？	
供用	環境	低気圧(月：10^{-8}Pa・火星：750Pa)	低気圧下での耐久性は？ 供用に必要な気密性が保てるか？	気密材 シール機構
		温度変化 （月面：-170 ～ 110℃・火星面：-140 ～ 20℃）	極端な温度変化・変化幅に耐えられるか？	断熱システム
		重力 （月：0.16G・火星：0.38G）	低重力環境が組立・施工過程に及ぼす影響は？	部材の軽重量化に伴うシステムのコンパクト化
		放射線（太陽風粒子，銀河宇宙線） （月面：～500 mSv/yr.・火星面：～300 mSv/yr.） 太陽フレア時：通常の 100～1,000 倍	放射線が施工過程に影響するか？	組立のための遮蔽システム
		隕石	どの程度の大きさの隕石に耐えられるか？ その場合の頻度は？	

（執筆者：金森　洋史）

参考文献

1) 例えば，「月面の環境（レゴリスを中心に）」，JAXA ホームページなど <4D6963726F736F667420576F7264202D2032303130203033203039208175 8BB38DDE825181768C8E96CA82CC8AC28BAB8169838C8353838A835882F09286905382C9816A2E646F63> (jaxa.jp), 2022
2) Lunar Soil Characterization Consortium (LSCC) Data: Lunar Soil Characterization Consortium (LSCC) Data | Planetary Geoscience Institute (utk.edu), 2022
3) Heiken, G., Vaniman, D. and French, B.M.(Eds), Lunar Sourcebook: A User's Guide to the Moon, Cambridge University Press Archive, New-York, 1991.
4) McSween, H. Y. Jr., McGlynn, I. O. and Rogers, A. D., Determining the modal mineralogy of Martian soils, Journal of Geophysical Research Planets, Vol. 115, Issue E7, doi: 10.1029/2010JE003582, 2010.7.
5) ISECG (globalspaceexploration.org), 2022
6) NASA Artemis, 2022
7) JAXA 国際宇宙探査センター, 2022
8) Commercial Lunar Payload Services | NASA, 2022
9) 金森洋史，月構造物へのコンクリートの適用方法，宇宙開発建設研究会，第 1 回宇宙と建設シンポジウム，1991.10.
10) 金森洋史，松本信二，真空曝露および種々の乾燥作用を受けたモルタルの物性変化，土木学会論文集，No. 478, V-21，1993.11.
11) 金森洋史，真空環境に曝露されたモルタルおよびコンクリートの基礎的性質に関する研究，土木学会論文集，No. 514, V-27，1995.5.

12) 畑中菜穂子，ルナコンクリートの実現に向けて，コンクリート工学，Vol. 55, No. 1, 2017.1.
13) Kanamori, H., Matsumoto, S., Fujishiro, H., and Yatsuyanagi, K., A Cost Study of Concrete Production on the Moon, Engineering, Construction and Operations in Space II, ASCE, pp. 1523-1532, 1990.4.
14) Khoshnevis, B., et al., Lunar Contour Crafting – A Novel Technique for ISRU Based Habitat Development, 43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2005.1./ DOI: 10.2514/6.2005-538
15) Lee, T. S., et al., Manufacturing for Planetary Construction using Polymeric Concrete, Joint Meeting of Planetary & Terrestrial Mining Science Symposium and Space Resources Roundtable (PTMSS/SRR), 2016.6.
16) Muscatello, A., Architecture for a Farm in a Moon Village with In-situ Materials for Infrastructure, Joint Meeting of Planetary & Terrestrial Mining Science Symposium and Space Resources Roundtable (PTMSS/SRR), 2019.6.
17) Metzger, P. and Autry, G., Trade Study of Techniques to Build Lunar Landing Pads, Joint Meeting of Planetary & Terrestrial Mining Science Symposium and Space Resources Roundtable (PTMSS/SRR), 2021.6.
18) Mueller, R. P., et al., Large Vehicle Lunar Landing Surface Interaction and In-situ Resource Based Risk Mitigation, Joint Meeting of Planetary & Terrestrial Mining Science Symposium and Space Resources Roundtable (PTMSS/SRR), 2021.6.
19) Urbina, D. A., Robotic Prototypes for the Solar Sintering of Regolith on the Lunar Surface Developed within the RegoLight Project, Joint Meeting of Planetary & Terrestrial Mining Science Symposium and Space Resources Roundtable (PTMSS/SRR), 2018.6.
20) https://cordis.europa.eu/project/id/686202/reporting, 2022.
21) Kanamori, H. et al., Mechanical Property of Gravel Produced from Lunar Soil Simulant by Rapid Sintering Using Single-mode Microwave, Joint Meeting of Planetary & Terrestrial Mining Science Symposium and Space Resources Roundtable (PTMSS/SRR), 2019.6.
22) Rickman, D., et al., Basis of Creating a Microwave-Based Construction System for the Moon, Joint Meeting of Planetary & Terrestrial Mining Science Symposium and Space Resources Roundtable (PTMSS/SRR), 2021.6.
23) Whizin, A., et al., Additive Manufacturing and Resource Extraction Using Lunar Regolith, Joint Meeting of Planetary & Terrestrial Mining Science Symposium and Space Resources Roundtable (PTMSS/SRR), 2019.6.
24) Karl, D. and Gurlo, A., Synthetic H2O Weathering and Wet-processing of Unrefined Regolith towards High Strength 'Sandcastles', Joint Meeting of Planetary & Terrestrial Mining Science Symposium and Space Resources Roundtable (PTMSS/SRR), 2021.6.
25) Montes, C. et.al., Evaluation of lunar regolith geopolymer binder as a radioactive shielding material for space exploration applications, Advances in Space Research, Vol. 56, Issue 6, pp. 1211-1221, 2015.9.
26) Davis, G., Montes, C. and Eklund, S., Preparation of lunar regolith based geopolymer cement under heat and vacuum, Advances in Space Research, Vol. 59, Issue 7, pp.1872-1885, 2017.4.
27) 佐藤久夫ほか，現地資源からの建設資材の製造システム，第２回宇宙探査オープンイノベーションフォーラム，2016.3.
28) Alexiadis, A., Alberini, F. and Meyer, M., Geopolymers from Lunar and Martian Soil Simulants, Advances in Space Research, Vol. 59, Issue 1, pp. 490-495, 2017.1.

29) https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lunar_Martial_Geopolymers.jpg, 2022
30) Arnhof, M., et al., Basalt fibre reinforced geopolymer made from lunar regolith simulant, The 8th European Conference for Aeronautics and Space Sciences (EUCASS), 2019.7.
31) Pilehvar, S., et al., Utilization of urea as an accessible superplasticizer on the moon for lunar geopolymer mixtures, Journal of Cleaner Production, Vol. 247, 2020.2.
32) Alrefaei, Y., e al., Effect of Superplasticizers on Properties of One-part Ca(OH)2/Na2SO4 Activated Geopolymer Pastes, Construction and Building Materials, Vol. 241, 2020.4.
33) Zhou, S. et al., Synthesis and characterization of geopolymer from lunar regolith simulant based on natural volcanic scoria, Chinese Journal of Aeronautics, Chinese Society of Aeronautics and Astronautics, 2020.5.
34) Zhou, S. et al., Preparation and characterization of high-strength geopolymer based on BH-1 lunar soil simulant with low alkali content, Engineering (Open Access, Chinese Academy of Engineering), 2020.12.

7.2 地下・海底

地下や海底環境での利用を促進するには，陸上環境との差異を考慮し，それぞれの環境下におけるジオポリマーコンクリートの特性を実験によって明らかにする必要がある．

第一の環境違いは，常時周囲から持続応力が作用し続けることである．その結果，コンクリートにはクリープ変形が生じることになるため，ジオポリマーコンクリートを利用した地下・海底構造物を建設するにはクリープ特性を把握しておく必要がある．同じ持続応力作用といっても，地下と海底構造物では作用機構に差異がある．地下環境では場合には土粒子がコンクリート表層のセメント骨格と接触することによって応力が作用し続ける．これに対して地下水位以下，あるいは海底の場合には水圧による持続応力作用である．土粒子による持続応力作用の場合には，構造物がクリープ変形することで土圧が低減し，構造設計にとって有利な側面があるが，水圧作用の場合にはそのような効果がないため，クリープ変形を適切に見込んでおくことが必要となる．ジオポリマーコンクリートの材料と配合，養生条件から予見されるクリープ特性を整理し，設計で利用できるような形に整備しておく必要があると考えらえる．

また同じ持続応力作用でも，深海底のような場所では，高圧下の水分子がコンクリート空隙中にも浸入し，微細空隙構造の破壊を生じさせる可能性があり．特別な配慮を必要とする．昨今ではレアメタルやメタンハイドレートなどの海底資源利用に向けて，深海底でのコンクリート利用を目指した研究が進められている．その結果，空隙構造の緻密度によって，水の浸透度が変化することで，微細空隙に作用する応力が変化し，その結果破壊挙動が異なるものとなることが明らかにされつつある[1)]．現時点ではジオポリマーコンクリートを対象にした実験検討は行われておらず，今後の実験が待たれるところである．

第二の環境の違いとして，周辺環境からの化学的劣化因子の供給が挙げられる．地下環境においては，硫酸塩や硝酸塩などが地下水から供給され，海底では海水中に含まれる硫酸塩が常時供給され，ジオポリマーコンクリートの表面の劣化を促進させる可能性がある．ジオポリマーコンクリートの耐酸性は極めて高いことが知られており，これらの環境での優位性を示すことができる可能性がある[2)]．

第三の環境の違いは使用環境が閉鎖空間となる点であり，内部空間を安全に使うためには水密性や耐火性に関して留意しておく必要がある．ジオポリマーコンクリートでは材料によって大きな収縮がみられる場合があるが，これは水密性を維持する上では不利である．地下や海底構造物では完成後に外側から補修を施すことができないことから，これらの対策を設計から織り込んでおく必要がある．この点について，例えばひび割れ誘発目地などを適切に組み込むなどの積極的な措置を講じることで，問題を制御することができると考えられる．耐火性についてはジオポリマーコンクリートがセメントコンクリートよりも優れているという報告があり，この特性を生かすことによって構造物の安全性を高めることができる可能性がある[3)]．

（執筆者：千々和　伸浩）

参考文献

1) 田中佳南，中山一秀，岩波光保：高水圧を受けるコンクリートの力学的挙動に関する基礎的研究，

コンクリート工学年次論文集, Vol. 42, No. 1, 2020.7.
2) 一宮一夫，畑中重光，新大軌：ジオポリマーの現状と今後の展望，コンクリート工学, Vol. 56, No. 5, 2018.5.
3) 橋本忍, 鎌田隼人, 山崎裕司, 武田はやみ : ジオポリマーの耐火材料への適用, 耐火物, Vol. 64, 2012.9.

7.3 海洋

7.3.1 塩害に対する抵抗性

海洋環境下に建設されるコンクリート構造物は多岐にわたり，波浪や津波から港を守るための防波堤や護岸，船舶が接岸するための岸壁や桟橋，物資や人を運ぶための臨港道路や海上橋梁など，用途や機能によって様々な構造形式がある。これらコンクリート構造物は設置される環境に応じて，海中や干満帯にあって海水作用を直接受けたり，飛沫帯や海上大気中にあって波しぶきや海水飛沫の影響を受けたり，陸上や海面上にあって海塩粒子の飛来の影響を受けたりするが，総じて厳しい塩害環境下に曝される。そのため，海洋コンクリート構造物には塩害劣化に対する耐久性が優れる高炉セメントB種を用いたコンクリートを用いる場合が多く，要求性能および設計供用期間を満足するようにコンクリートの配合とかぶりが設定される。港湾の施設の技術上の基準・同解説では，設計供用期間中に構造部材の性能の低下が生じないことを照査することを基本としており，塩化物イオンの侵入による鉄筋腐食に関する照査方法やかぶりの設定方法などが示されている[1)]。

AAM中の塩化物イオンの移動については，例えば，文献[2)]のレビュー論文にまとめられている。アルカリ活性化セメント（AAC）ペースト，モルタル，およびコンクリート中の塩化物輸送に関する実験データのメタ分析が行われている。66件の研究を，測定方法，混合物の設計，微細構造の形成（すなわち，空隙率，細孔径分布），塩化物の拡散，塩化物の結合に関するプロセスと構造・特性の関係に主眼を置いてレビューされている。この中では，細粒化や低結晶化といった物理化学的な前駆体の特性が，耐久性の向上につながるAACの溶解，反応性，微細構造の形成に重要な役割を果たしていることが示されている。また，前駆体にカルシウムが含まれているだけでは，塩化物の耐久性向上の指標にはならず，カルシウムの相（すなわち，非晶質，半結晶，結晶）が耐久性向上のより良い予測因子となることも示唆されている。一般的に，シリカ含有量が多い（Si:Al比），アルカリ含有量が多い（Na:Al比），水分含有量が少ない（L:S比）と，塩分に対する抵抗性が向上することが示されている。

以下では，AAMが用いられたコンクリートや鉄筋コンクリート部材に海水が及ぼす影響，および，海洋環境での曝露試験結果について文献調査した結果を述べる。

Bayuajiら[3)]は，フライアッシュベースのジオポリマーコンクリート梁（100×150×1500mm）の曲げ強度に及ぼす海洋環境の影響を調査している。加熱養生を行わず海岸の海水中で28日間養生した後，4点曲げ試験を行い，室温で養生したジオポリマーコンクリート梁と比較している。海水養生と気中養生とで終局荷重とクラックパターンは非常によく似ているが，海水で養生した梁の曲げひび割れ発生荷重は気中養生した梁よりも高いことが報告されている。同時に作製された円柱供試体の結果からも，圧縮区強度に対する割裂引張強度がセメントコンクリートの場合よりも大きいことが報告されている。

Reddyら[4)]は，海洋環境下に置かれた低カルシウムフライアッシュベースのジオポリマーコンクリートの耐久性特性を評価している。フライアッシュに8M，14MのNaOHおよびSiO_2/Na_2O溶液を加え，13mm鉄筋で補強したGPC梁を，人工海水および誘導電流中で湿乾サイクルによる加速腐食暴露試験を実施している。その結果，ジオポリマー梁における海水浸漬後の曲げひび割れ発生荷重は，普通のコンクリート梁よりも最大で24%高かったことを示している。しかし，Yodsudjai[5)]は，NaCl溶液下では，従来の鉄筋コンクリート梁と比較して，フライアッシュを使用したジオポリマー鉄筋コンクリート梁では，鉄筋の腐食がより深刻で，曲げ強度の低下も大きいことを明らかにしている。

Pasupathy ら[6]は，ジオポリマーと OPC コンクリートを使用したボックスカルバートを，塩分を含む湖の環境に 6 年間曝露した後，耐久性を調査している。カルシウム含有量の少ないフライアッシュを水酸化ナトリウムとケイ酸塩溶液で活性化したジオポリマーバインダーが用いられている。カルバートの底版と頂版からコア試験片を採取し，炭酸化深さ，塩分の浸透，微細構造などの評価が行われている。ジオポリマーコンクリートは，OPC コンクリートと比較して，平均細孔径は小さいものの，空隙率がやや高く，炭酸化や塩化物の浸透の影響を受けやすかったことが報告されている。例えば，OPC コンクリート製カルバートの底版では，炭酸化と塩化物の浸透の深さがそれぞれ 10mm と 20mm しかなかったのに対し，ジオポリマーでは完全な炭酸化と塩化物の浸透が見られた。また，ジオポリマーコンクリートでは鋼材とコンクリートの界面に腐食生成物が観察されたが，OPC コンクリートでは観察されたなかった，としている。

Zhang[7),8),9)]らは，海洋環境下のコンクリートを保護するための耐久性のある防食コーティングとしてのジオポリマーの可能性を調査するため，一連の実験を行っている。固化時間，透水性，収縮率，接着強度，耐食性などの基本特性，ジオポリマーの微細構造，防食メカニズムなどの実験的検討の結果，アルカリ活性化繊維強化スラグ／メタカオリンをベースにしたジオポリマーペーストが保護コーティングに使用できる可能性があることが明らかにされている。このような材料を，消波ブロックの表面に 3mm または 5mm の厚さで塗布した結果，現場では適切な硬化時間と高い接着強度，化学的安定性が得られたと報告されている。強風の影響で塗膜に収縮クラックが発生したものの，厚さを増すことや湿度を上げること，適切な骨材を配合することで問題は解決できたとしている。これらの結果から，ジオポリマーは，低透水性で耐海水腐食性の高い理想的なコーティング材料として使用できる，と述べられている。

Nardos ら[10)]は，フライアッシュ-高炉水砕スラグ（GGBS）ベースのジオポリマーコンクリート（GPC）における塩化物による鉄筋腐食に対する亜硝酸ナトリウム（$NaNO_2$）の腐食防止剤としての効果を検討している。NaCl および $NaNO_2$ を GPC 練混ぜ時に混入し，塩化物による腐食に対する $NaNO_2$ の有効性を電気化学的計測により評価している。NaCl はワーカビリティーを低下させる。$NaNO_2$ はワーカビリティーを向上させるものの，圧縮強度を低下させる。GGBS 含有量が高く，NaOH 溶液のモル比が高いジオポリマーコンクリートの方が，鉄筋腐食の発生確率および腐食速度が小さいことが報告されている。また，$NaNO_2$ の添加率 3%と 5%を比較した場合，添加率が大きい方が腐食抑制効果が高いこと，また，抑制効果は経時的に小さくなるが，5%の方が抑制効果の低下が小さかったことが示されている。

（執筆者：佐川　康貴）

参考文献

1) （公社）日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，pp.598-602，平成 30 年 5 月
2) Jorge Osio-Norgaard, Juan Pablo Gevaudan, Wil V. Srubar: A review of chloride transport in alkali-activated cement paste, mortar, and concrete, Construction and Building Materials, Volume 186, 2018, Pages 191-206, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.119.
3) Bayuaji Ridho, Darmawan Muhammad, Wibowo Boedi, Husin Nur, Subekti Srie: Utilization of High Calcium Content Fly Ash: Flexural Strength of Geopolymer Concrete Beams in Sea Water Environment. The Open Civil Engineering Journal. 10. 782-793. 10.2174/1874149501610010782. (2016).

4) D. V. Reddy, Jean-Baptiste Edouard, and Khaled Sobhan: Durability of Fly Ash-Based Geopolymer Structural Concrete in the Marine Environment, JOURNAL OF MATERIALS IN CIVIL ENGINEERING, Vol. 25, No.6, pp.781-787, 2013, DOI 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000632
5) Jodsudjai Wnachai: Application of Fly Ash-based Geopolymer for Structural Member and Repair Materials, Advances in Science and Technology, Vol. 92, pp 74-83, https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AST.92.74
6) Kirubajiny Pasupathy, Marita Berndt, Jay Sanjayan, Pathmanathan Rajeev, Didar Singh Cheema: Durability of low-calcium fly ash based geopolymer concrete culvert in a saline environment, Cement and Concrete Research, Volume 100, 2017, Pages 297-310, https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.07.010.
7) Zuhua Zhang, Xiao Yao, Huajun Zhu, Potential application of geopolymers as protection coatings for marine concrete: I. Basic properties, Applied Clay Science, Volume 49, Issues 1–2, 2010, Pages 1-6, https://doi.org/10.1016/j.clay.2010.01.014.
8) Zuhua Zhang, Xiao Yao, Huajun Zhu: Potential application of geopolymers as protection coatings for marine concrete: II. Microstructure and anticorrosion mechanism, Applied Clay Science, Volume 49, Issues 1–2, 2010, Pages 7-12, https://doi.org/10.1016/j.clay.2010.04.024.
9) Zuhua Zhang, Xiao Yao, Hao Wang: Potential application of geopolymers as protection coatings for marine concrete III. Field experiment, Applied Clay Science, Volumes 67–68, 2012, Pages 57-60, https://doi.org/10.1016/j.clay.2012.05.008.
10) Nardos Sheferaw Teklegiorgis; Bulu Pradhan; Jnyanendra Kumar Prusty; and Jyotish Kumar Das: Effect of Sodium Nitrite as Corrosion Inhibitor against Chloride-Induced Corrosion of Steel Rebar in Geopolymer Concrete Containing Fly Ash and GGBS, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 34, Issue 4 (April 2022), https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004139

7.3.2　海洋コンクリート構造物への AAMs の適用可能性

AAMs を海洋環境下のコンクリート構造物に適用することを検討する場合，AAMs に関する既往の知見から，使用材料を扱う際の安全性，製造方法，養生方法，塩害劣化に対する耐久性（鉄筋腐食に対する照査方法の構築を含む），経済性が課題になると考えられる．

海洋コンクリート構造物は比較的大規模であるため，基本的には現地もしくはケーソンのように現地近くの岸壁上で構築することが多い．コンクリートの場合は，近隣の生コン工場から調達・運搬して施工することがほとんどであるため，AAMs に置き換えて適用する場合にはコンクリートのように大量に製造できることが望まれる．国内に大量製造の施工実績はないが，海外には現地に大型の製造設備を設置して大規模に施工された実績[1)]があり，参考になると考えられる．なお，海洋コンクリート構造物はコンクリートプラント船を用いて製造・打設する場合があり，この場合は海上での材料供給体制と船上の材料貯蔵設備を検討する必要がある．また，海洋では水中にコンクリートを打設して構造物を構築する場合があり，この場合は打設する材料自体に水中での材料分離抵抗性が求められる．

海洋コンクリート構造物は厳しい塩害環境下にあるため，材料自体の耐久性の確保が重要である．既往の知見において，AAMs の高炉スラグ微粉末の置換率やアルカリ濃度が大きいほど塩化物イオンの浸透抵抗性が高いことは検証されているが，埋設鉄筋の腐食に関する知見は少なく，鉄筋腐食に対する照査方法は確立されていない．照査方法の確立にはデータの蓄積が必要であるが，使用する材料や養生方法によって特性が大きく変化することが課題のひとつと考えられる．物質移動に対する抵抗性およびコンクリート劣化に対する抵抗性については，従来のセメントコンクリートベースで構築されている耐久設計のフレームと同等に扱えるかの検証がまずは必要である．しかし，海洋コンクリート構造物への用途として AAMs の配合のバリエーションを限定するのであれば，暴露実験や試験施工等でのデータの蓄積によればよく，従来の耐久設計のフレームとは別に考えたほうがよい．

コンクリートは海水作用によって劣化するが，劣化の主要因は海水に含まれる硫酸塩である．これによる劣化の進行速度は緩やかであるが，常時海水作用を受ける海洋コンクリート構造物は，表面から徐々に劣化する．また，海洋コンクリート構造物は中性化やアルカリ骨材反応，凍害，化学的浸食，繰り返し荷重による疲労，漂流物等の衝突による損傷やすり減りなど，様々な要因と複雑に絡まって劣化・損傷している場合がほとんどであり，これら要因に対する耐久性データの蓄積も望まれる．

AAMs の材料特性から，常時海水作用を受けて耐硫酸塩性が求められるシチュエーションに適用の可能性がある．海岸近くの火力発電所では，復水器などを冷却する大量の海水を取り込むための取水口および放水口が擁壁やボックスカルバート構造で構築される．これら構造物は，火力発電が稼働し続けている状況ではメンテナンスが容易ではなく，そのため海水作用による硫酸塩劣化やすり減りが生じやすい．硫酸塩劣化に対して高い抵抗性を有する AAMs はそれら構造物に適用できる可能性があるが，すり減りに対する長期耐久性も有するのであれば，さらに適用可能性は高まると考えられる．

近年，海洋分野においても生産性向上を目的としてプレキャストコンクリートの適用事例が増えている．AAMs は使用材料を扱う際に懸念される安全性の確保や場合によっては蒸気養生の実施のため，現時点ではプレキャスト製品工場で製造するほうが社会実装の近道と考えられる．海洋分野におけるプレキャストコンクリートの適用事例としては，護岸の上部工に適用される笠コンクリートブロックや埋設型枠，桟橋の梁や床版，L 型ブロック，鋼管杭のモルタル被覆工に適用される GRC カバーなどがあり，AAMs の適用先としてプレキャストコンクリートは有力である．また，付帯設備である渡版，側溝，照

明電柱，係船柱，車止め基礎などは取り換えが頻繁に行われており，耐久性が高い AAMs の適用により維持管理性の向上に貢献できると考えられる．その他，消波ブロックや根固めブロック等も大型のプレキャストコンクリートと考えれば，適用の可能性は広がると考えられる．

海洋分野における新たな構造物として洋上風力発電施設があり，カーボンニュートラルの実現のためには浮体式洋上風力発電の導入拡大が必要不可欠と言われている．これは，日本の海域は着床式洋上風力発電の設置に向いている風が強い遠浅の海底（水深 50m 以浅）が少ないためであり，安定的に風を得るためには水深の深い沖合に設置する必要があるためである [2)]．新規事業のため AAMs の適用先として検討しやすいと考えられるが，浮体構造部に適用する場合には沖合の激しい波浪環境に曝されることによる疲労と塩害の複合劣化や維持管理の問題などが課題となる．文献 3)には，洋上風力発電にコンクリートを使用した構造事例や検討事例，また今後の動向や課題が整理されている．これまでコンクリートの使用事例は比較的少なかったにもかかわらず，新技術の研究開発は進められており，風車の大型化や設置環境の水深が大きくなるにつれて，コンクリートが選択肢となり得る可能性が示されている．これは，鉄製ではコスト面に課題が残るためであり，強度確保やコストダウンの観点から，コンクリートをうまく使いこなすことが望まれている [4)]．浮体構造部以外での適用候補としては，浮体式洋上風力発電を係留するために海底に沈められるシンカーが考えられ，維持管理が困難であることから長期にわたる耐海水性が求められる．

（執筆者：田中　亮一）

参考文献

1) T. Glasby, et al.: EFC Geopolymer Concrete Aircraft Pavements at Brisbane West Wellcamp Airport, Concrete 2015 Conference, Melbourne Australia, 2015
2) 新エネルギー・産業技術総合開発機構：浮体式洋上風力発電技術ガイドブック，平成 30 年 3 月
3) Alexandre Mathern, Christoph von der Haar and Steffen Marx: Concrete Support Structures for Offshore Wind Turbines: Current Status, Challenges, and Future Trends, Energies 2021, 14, 1995
4) 月刊コンクリートテクノ：風力発電にコンクリートの風は吹くか？，Vol.41，No.2，pp.6-33，2022.2

８．AAMs の実用化に向けた課題抽出アンケートならびに文献レビュー結果

8.1　アンケート

8.1.1　アンケートの概要

アルカリ活性材料の実用に向けた課題を抽出するため，2022 年 3-4 月にかけて，土木関係の様々な業種の技術担当者へ，土木学会コンクリート委員会の 233 委員会によるアンケートであることを明示したうえで，ウェブアンケートを実施した．回答数は 122（2022/04/04 現在）．次頁に，アンケートの内容を示す．

新しいアルカリ活性材料を用いた低炭素社会におけるインフラ構築に関する研究委員会　アンケート
※令和4年度土木学会全国大会にて同委員会は研究討論会を実施します．

2022/4/4日中のご回答ご協力ください

* 必須

1. ジオポリマーコンクリートあるいはAAMという材料についてご存知ですか？

参考：ジオポリマーを含むアルカリ活性材料（AAMs)は、Si、Al、Ca 成分を多く含む粉体（活性フィラー）と水ガラスなどのアルカリシリカ溶液の縮重合反応による固化体です．水和反応によるセメント固化体と同等の基本性能を有することに加え，低炭素，有害物質固定，地盤環境改善，耐酸性、耐高温性、耐ASR 性などの点で優れると言われています．活性フィラーにはフライアッシュ，高炉スラグ微粉末以外にも，火山堆積物やバイオマス灰なども使用でき，未利用資源の活用先としても期待されています． *

- ◯ 理解している
- ◯ 聞いたことはあるが詳しくはわからない
- ◯ 全く知らない，聞いたこともない

2. あなたの仕事の中で，ジオポリマーコンクリートあるいはAAMという材料を使用してみたいですか？ *

- ◯ 使用したことがある
- ◯ 使用してみたいが，不安がある
- ◯ 使用したいと思わない

3/31/2022

3. 質問2.で「使用したことがある」と回答された方のみにお尋ねします．どのような目的，対象物で使用されましたか．（自由記入欄）

4. 質問2.で「使用してみたいが不安がある」「使用したいと思わない」と回答された方にお尋ねします．どのような理由でしょうか．（複数回答可）

- [ ] JISなどの規格が未整備であり，品質管理に不安があるから．
- [ ] 通常のセメントコンクリートよりもコストがかかりそうだから．
- [ ] 通常のセメントコンクリートよりも設計や施工に手間がかかりそうだから．
- [ ] ＧＰやＡＡＭを用いた構造物の設計規準等が未整備であり，何を参考に設計施工したらよいのかわからないから．
- [ ] 新しい材料なので，長期耐久性の検討が十分でないと考えるから
- [ ] その他

5. あなたの職場においてSDGs，脱炭素への取組は近年推進されていると感じますか？ *

- ○ 推進されている
- ○ 特に推進されてはいない

6. あなたの職場において，GPやAAMの使用がSDGs，脱炭素への取組につながると感じますか？ *

- ○ つながると感じる
- ○ 関係ないと思う／わからない

3/31/2022

7. GPあるいはAAMの今後の活用について，あなたのご意見をお聞かせください（自由記入欄）

8. あなたの業種を教えてください *

- ◯ 発注者（公的機関）
- ◯ コンサルタント（個人営業含む）
- ◯ 建設会社
- ◯ 材料・素材メーカー
- ◯ 研究機関
- ◯ その他

9. あなたの年代を教えてください． *

- ◯ 20代以下（就職前）
- ◯ -30歳
- ◯ 31-40歳
- ◯ 41-50歳
- ◯ 51-60歳
- ◯ 61-70歳
- ◯ 71歳以上

3/31/2022

8.1.2　アンケートの結果

1. ジオポリマーコンクリートあるいはAAMという材料についてご存知ですか？

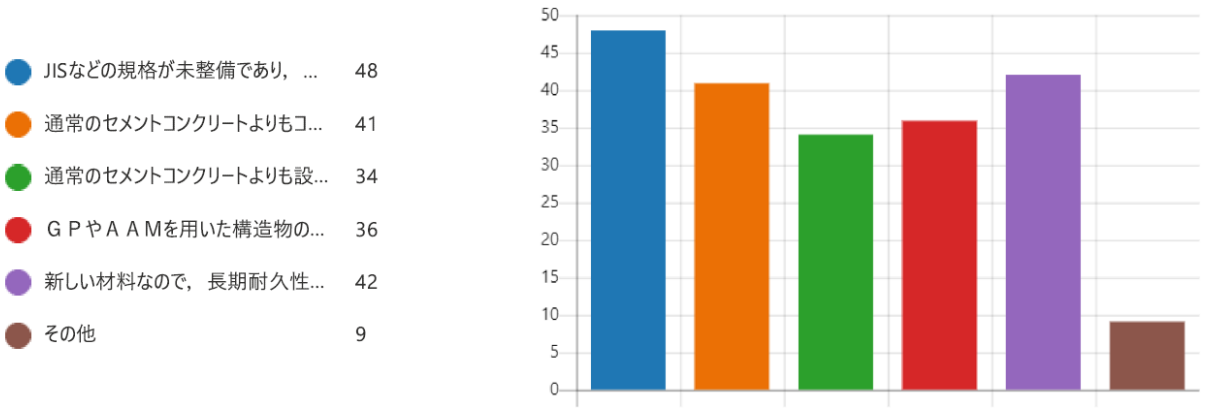
参考：ジオポリマーを含むアルカリ活性材料（AAMs)は、Si、Al、Ca 成分を多く含む粉体（活性フィラー）と水ガラスなどのアルカリシリカ溶液の縮重合反応による固化体です．水和反応によるセメント固化体と同等の基本性能を有することに加え，低炭素，有害物質固定，地盤環境改善，耐酸性、耐高温性、耐ASR 性などの点で優れると言われています．活性フィラーにはフライアッシュ，高炉スラグ微粉末以外にも，火山堆積物やバイオマス灰なども使用でき，未利用資源の活用先としても期待されています．

2. あなたの仕事の中で，ジオポリマーコンクリートあるいはAAMという材料を使用してみたいですか？

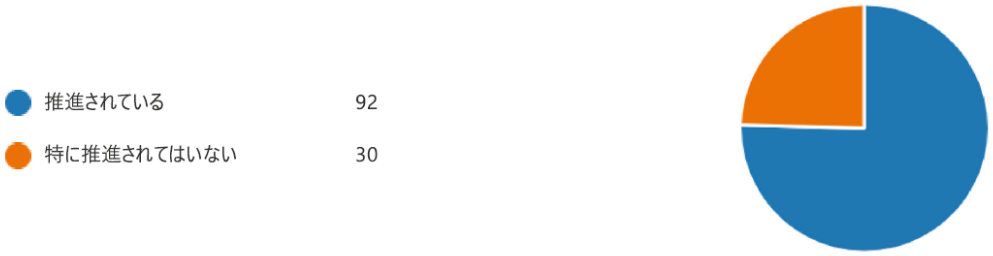
3. 質問 2. で「使用したことがある」と回答された方のみにお尋ねします．どのような目的，対象物で使用されましたか．（自由記入欄）
   - ✧ 実験目的，圧縮試験やはり試験体など
   - ✧ 研究目的
   - ✧ 耐酸性目的にて下水道資材、その他側溝等
   - ✧ 放射性廃棄物処理関連の研究開発
   - ✧ ジオポリマーの耐火性の研究
   - ✧ 放射性廃棄物の固化処理材としての適用性検討
   - ✧ 繊維補強モルタルのマトリックスとして使用した。
   - ✧ 研究目的
   - ✧ 研究
   - ✧ 研究目的
   - ✧ 研究素材として使用している。
   - ✧ 研究対象として
   - ✧ ジオポリマの混練に適している混練機構（ミキサ）の確認。

- ✧ 学術研究の一環として
- ✧ 研究、RC はり
- ✧ 耐酸性が必要な個所での試験適用
- ✧ ジオポリマーコンクリートの開発に向けた実験
- ✧ 二次製品
- ✧ 研究開発
- ✧ 実製品の製造試験、コンクリート 2 次製品（小型ブロック製品）
- ✧ 耐薬品性架台
- ✧ 放射性廃棄物の固型化

4. 質問2.で「使用してみたいが不安がある」「使用したいと思わない」と回答された方にお尋ねします．どのような理由でしょうか．（複数回答可）



5. あなたの職場においてSDGs，脱炭素への取組は近年推進されていると感じますか？



6. あなたの職場において，GPやAAMの使用がSDGs，脱炭素への取組につながると感じますか？

7. GP あるいは AAM の今後の活用について，あなたのご意見をお聞かせください（自由記入欄）

7-1　発注者（公的機関）

- ✧ ジオポリマーコンクリートあるいは AAM については聞いたことがなく、どのように脱炭素に寄与するものかわかりませんが、脱炭素に寄与するのであれば社会的状況を鑑みると今後の適用への動きに期待したいです。
- ✧ 材料の特徴や費用対効果がわかれば，事業者側のニーズに合致するかどうか検討した上で，適材適所に使われるようになるのではないかと感じています.
- ✧ これまでの普通コンクリート等に比べ、低炭素の効果が、どの程度あるのかがわかると、使用してみるというモチベーションになると思います。
- ✧ 積極的に試行してみるべきだと思う。
- ✧ 実装化に向けてまだまだ課題があるかと思いますが、このような環境に寄与する技術は大切に育てて、海外に売り出すなど高い目標を持って、頑張って頂きたいと思います。
- ✧ 脱炭素社会への転換は今後、必要な事柄です。それに資する材料としての期待が高いことから、実務で使用できるように設計施工指針等を整備いただきたいです。
- ✧ まだ、一般的ではないので、技術的な蓄積が必要である。
- ✧ カーボンニュートラルに寄与する材料を検討中。GP、AAM だけでなくこのような材料の特性を把握し、どの部材に、どの程度使うかが課題。
- ✧ "脱炭素社会に向けた様々な選択肢が増えることは有意義であると思う。
- ✧ ただし、明確で客観的な性能や効果の評価が必要と考える。"
- ✧ ASR 抑制に効果があるのであれば，多少のコスト増であっても使用してみたい。
- ✧ 低炭素化の手段のひとつとして期待されている材料です．研究が進み，ユーザーが安心して使用できるようになることを望みます.
- ✧ 材料の品質にバラツキが少なく，施工時の取扱いが特に困難でなければ，材料の特性値が提示頂ければ，設計・施工基準を作成のうえ，業務に活用することが可能であると考える。
- ✧ 今後のカーボンニュートラルへの取組等に重要と思われるので、研究・施工事例が進むと良い。

7-2　材料・素材メーカー

- ✧ GP、AAM の特徴を活かした用途開発と規準類の整備が必要。
- ✧ 海外の活用事例の紹介も普及に貢献するかもしれない。確か、シンガポールでは、水が貴重であるためにセメントコンクリートの使用が制限され、廃棄物の固化のためにジオポリマーを使用していると国際会議（International Congress on Polymers in Concrete）で発表していたと記憶しています。海外では、日本とは異なる考え方での使用事例もあるように思います。
- ✧ コストはセメントコンクリートよりも高くなると想定されるので、普及のためには、用途に即した価格体系にできるような仕組みが必要。
- ✧ 基本配合、基本的な使い方についての基本特許が新規参入障壁となり、普及しない。学会などで基本的な配合設計法、基本配合などを紹介して、GP、AAM の裾野が広がるような取り組みも必要。

✧ 活用に向けた取り組みとして、例えば、基本特許や基本技術を保有する企業を中心として工業会（例えば、ジオポリマー工業会）を設立し、技術、特許使用権を工業会内で共有し、会員が使用できるような仕組みがあると普及しやすくなるかもしれない。工業会が特許や技術をデータベース化して、工業会がマッチングを行う。会員は特許使用料を工業会に納め、工業会が特許の権利者に使用料を支払う。開発した技術を僅かでもお金に換えたい企業と、なるべく開発費を抑えて製品化したい企業のマッチングができれば、社会実装に向けてスピードアップするかもしれない。どうでしょうか。

✧ 物性、耐久性、用途開発、規準類の整備など、まだまだ不足していると思う。どの程度まで社会実装させるかにもよるが、基礎研究の継続も必要と考えます。

✧ 水ガラスメーカの協力が必須であると感じています。アルカリ溶液の調整技術は、水ガラスメーカの知見が大いに期待されます。学会の委員として協力頂くと良いと考えます。

✧ 海外でジオポリマーが実際に使用されて、数年が経過しております。その後、劣化はないか。当初の想定通りの使用ができているのか、補修、補強が必要となった事例はないか、などについて情報収集と紹介が望まれます。

✧ 国交省の省 CO_2 コンクリート活用促進が掲げられている中、省 CO2 やライフサイクルコストといった優位性があると考えられることから、JIS 等の規格整備を促進していただきたい。また、微妙に各技術違いがあることから、AMM 技術の整理をお願いしたい。

✧ プレキャストコンクリート製品への活用を考えたとして、購入側が GP または AAM 使用で価格高くとも使用して頂けるか不安である。

7-3　建設会社

✧ 質問４の点が現場利用という観点では、試験適用にとどまってしまう要因となっています。

✧ "GP は産業副産物の有効利用という面では優れていると思います。一方で，水ガラスなどアルカリ刺激剤の CO2 排出量を踏まえたＧＰ全体としての CO2 排出量を知ってから使用などの検討をしたい。（勉強不足で水ガラスの CO2 排出原単位を存じ上げません）

✧ 新材料として漠然とした不安がある。また，どういったことを試験すれば性能を評価できるのかが不安である。

✧ セメントコンクリートの製造・施工コストに比べて高いと思われるため，同等以下を目指した検討，あるいは GP あるいは AAM の優れた特性を活かした適用と実績の積み上げが，活用推進のためには望まれる。

✧ 特殊な適用用途，製品などでは使用するケースもあると思う。

✧ オーストラリアで多く使用されたが、現在は、価格が課題で普及していない。価格だけでなく、脱炭素性能、耐久性能等を評価して頂かないと、普及は望めないと考えている（特殊な条件以外で）。

✧ 研究成果を設計・施工に活かせるような基準作成を望む。

✧ SDGS,脱炭素を実装するためには、法・基準整備に加えて、コストのみではなく、CO2 削減量あるいは他の指標で総合的に評価するシステムが必要ではないかと考えます。

7-4　コンサルタント

✧ セメントは一切使用してはならないという世の中が来ない限り、普及は難しいと思う。

✧ 弊社はコンサル会社で既設コンクリート構造物（主に道路橋）の調査を主業務としているため，自社で建設材料を使用することはない（微破壊調査やコア試料採取時の復旧程度には使用するが）．一方，構造物の補修方法の検討・提案などが含まれる業務もあるので，補修材料として優れた性質があるのであれば適用を推薦したい．

✧ 建設分野での低炭素化の取組の一つとして積極的に推奨すべきであるが，規格や試験方法など学会が主体的に取り組むできと考える。

✧ 設計委託側の立場なので、共通仕様書やマニュアルが変更されないと、活用が難しい。

✧ GP・AAM の利用が、SDGs・脱炭素への効果（予想でもよいと思う）がどの程度あるのか、また この時の利用価格はどの程度になるのかが、想像できれば研究・開発につながると考える。

7-5　研究機関

✧ GP や AAM に限らず、新材料が採用（実装）されやすいような制度や仕組みが重要だと思います。実績重視の考え方だけだと、新材料の実装は難しいので、環境性といった新たな仕様やある程度のみなし規定などで設計する必要があると思います。

✧ セメントの代替品としての地位を獲得してくために，それを上回る費用便益効果を示す必要がある．性能評価面での技術開発が必要．

✧ 廃資源の有効活用となるので期待はしているが，利活用があまりに進みすぎるとフライアッシュやスラグ自体枯渇することになるので，法整備等を慎重に行う必要があると思います．

✧ アルカリ溶液の製造供給過程が環境的であるのかが疑問である．

✧ SDGs の達成の観点からは，単に環境に良いというだけではなく，材料的あるいはビジネス的な付加価値が必要である．

✧ 「使用してみたいが，不安がある」は正確ではなく，「使用してみたいが，研究として扱うには優先度が低い」というのが正直なところです．

✧ 課題はありますが、ネガティブエミッション技術や３Ｄものづくり技術など、新しい技術分野においても活用が期待できる材料だと思っています。

✧ 自治体は新技術導入を試みているが、ドローン点検などに偏りがちである。低炭素も実現する新技術を活用できる道を作りたいが、問４で回答した項目がすべて課題である。新技術採用に至るポイントを端的に言えば、コストと信頼性、実績性（NETIS 登録など）に尽きる。GP、AAM にはそこをクリアしていっていただきたい。

✧ 設計、施工の容易性観点から汎用性のある材料として普及の可能性が見込めるかといった観点の整理を期待したい。

7-6　その他

✧ プレキャストとの相性は非常に良いと感じる．また個人的には宇宙での利用を期待している．

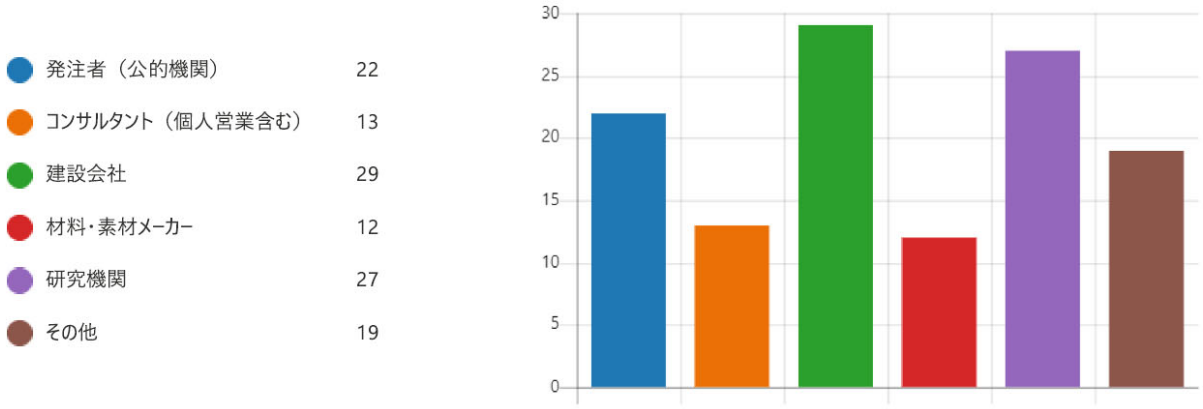
✧ 施工性、コストの面で OPC より劣っている状況が続く場合普及は困難ではないか。

✧ ジオポリマーコンクリートの作製は一般的なコンクリートに比べると煩雑であると感じた．しかし，特殊な条件下でジオポリマーコンクリートならではの特性を活用した場合その煩雑さを加味して

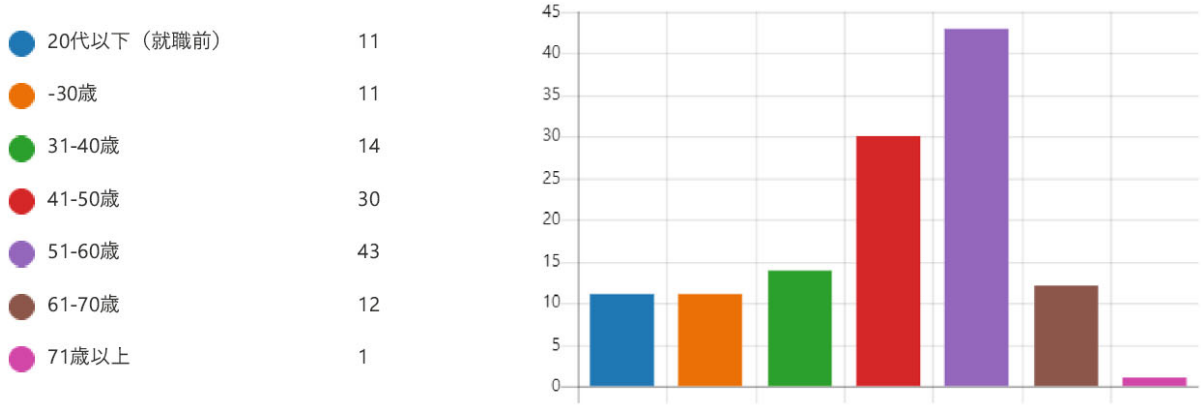
もとても優位であると感じた．そのため，環境面に考慮し一般的に広く使うことは現実的ではないと思う．

- ✧ 可能性のある材料であるため，積極的な活用を業界として模索するべき。
- ✧ セメントの代替となることで、CO_2 排出抑制につながる。建築資材は GP に置き換わっていくことを期待している。
- ✧ 弊社グループとしては 2022 年度より本格的に GP の研究開発に取り組む予定
- ✧ 放射性廃棄物の処分において、国土の狭い日本においては、如何に効率的に長半減期核種の閉じ込め能力のある固型化・安定化方法にて処理するかが急務である。その手法としてガラス固化が高レベルでは期待されているが、コストが高い、ハンドリングが大変というデメリットがある。GP、AAM は新しくて古い技術であり、積極的に使ってみることが大切と思う。

8. あなたの業種を教えてください



9. あなたの年代を教えてください.



（執筆者：藤山　知加子）

8.2 文献レビュー結果

本委員会では，活動の一環として，海外論文を中心に，以下に示す 31 編のレビュー論文を収集し，活動の基礎情報とした。各論文について，基本情報（タイトル，著者名，文献名など），アブストラクト，結論を和訳し，取りまとめたものを次項以降に示す。なお，和訳には，オンライン翻訳サービス DeepL を用い，一部，表現に修正を加えた。

参考文献

1) Jorge Osio-Norgaard et al.: A review of chloride transport in alkali-activated cement paste, mortar, and concrete, Construction and Building Materials, Volume 186, 20 October 2018, Pages 191-206, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.119

2) Osama Ahmed Mohamed: A Review of Durability and Strength Characteristics of Alkali-Activated Slag Concrete, Materials 2019, 12(8), 1198, https://doi.org/10.3390/ma12081198

3) Wengui Li et al.: An Review on Durability of Alkali-activated System from Sustainable Construction Materials to Infrastructures, ES Materials & Manufacturing, 2019, 4, 2-19, https://dx.doi.org/10.30919/esmm5f204

4) Kamel Arbi: A Review on the Durability of Alkali-Activated Fly Ash/Slag Systems: Advances, Issues, and Perspectives, Industrial & Engineering Chemistry Research 2016 55 (19), 5439-5453, https://doi.org/10.1021/acs.iecr.6b00559

5) M. B. Mohd Salahuddin et al: A review on thermophysical evaluation of alkali-activated geopolymers, Ceramics International, Volume 41, Issue 3, Part B, April 2015, Pages 4273-4281, https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.11.119

6) Vishojit Bahadur Thapa et al.: A short review on alkali-activated binders and geopolymer binders, University of Luxembourg Library, https://orbilu.uni.lu/handle/10993/35284

7) Adeyemi Adesina: ALKALI ACTIVATED MATERIALS: REVIEW OF CURRENT PROBLEMS AND POSSIBLE SOLUTIONS, SynerCrete'18 International Conference on Interdisciplinary Approaches for Cement-based Materials and Structural Concrete

8) John L. Provis et al.: Advances in understanding alkali-activated materials, Cement and Concrete Research, Volume 78, Part A, December 2015, Pages 110-125, https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.04.013

9) Fernando Pacheco-Torgal et al.: Alkali-activated binders: A review: Part 1. Historical background, terminology, reaction mechanisms and hydration products, Construction and Building Materials, Volume 22, Issue 7, July 2008, Pages 1305-1314, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.10.015

10) Fernando Pacheco-Torgal et al.: Alkali-activated binders: A review. Part 2. About materials and binders manufacture, Construction and Building Materials, Volume 22, Issue 7, July 2008, Pages 1315-1322

11) Mehrab Nodehi et al.: Alkali-Activated Materials and Geopolymer: a Review of Common Precursors and Activators Addressing Circular Economy, Circular Economy and Sustainability (2021), https://doi.org/10.1007/s43615-021-00029-w

12) John L. Provis: Alkali-activated materials, Cement and Concrete Research, Volume 114, December 2018,

Pages 40-48, https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.02.009
13) Tero Luukkonen et al.: Application of alkali-activated materials for water and wastewater treatment: a review, Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, 18, pages271–297 (2019), https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11157-019-09494-0
14) Beatryz C. Mendes et al.: Application of eco-friendly alternative activators in alkali-activated materials: A review, Journal of Building Engineering, Volume 35, March 2021, 102010, https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.102010
15) Katalin Orosz et al.: Autogenous Deformation of Alkali-Activated Blast Furnace Slag Concrete Subjected to Variable Curing Temperatures, Advances in Civil Engineering, Volume 2019 Article ID 6903725, https://doi.org/10.1155/2019/6903725
16) Bahmani, S.H. et al: Review on recent developments in alkali-activated materials, Proc. 20th NZGS Geotechnical Symposium. Eds. GJ Alexander & CY Chin, Napier
17) Zhu Pan et al.: Effect of Temperature on Thermal Properties of Alkali activated Fly Ash/Slag Binders, Proc. 1st International Conference on Structural Engineering Research (iCSER 2017), ISBN: 978-0-6480147-6-8
18) QINGBO TIAN et al.: EFFECTS OF COMPOSITION OF FLY ASH-BASED ALKALI-ACTIVATED MATERIALS ON COMPRESSIVE STRENGTH: A REVIEW, Ceramics-Silikáty 65 (1), 9-23 (2021), https://doi.org/10.13168/cs.2020.0037
19) Mugahed Amran et al.: Fiber-reinforced alkali-activated concrete: A review, Journal of Building Engineering, Volume 45, January 2022, 103638, https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103638
20) Priyadharshini Perumal et al.: Influence of alkali source on properties of alkali activated silicate tailings, Materials Chemistry and Physics, Volume 271, 1 October 2021, 124932, https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2021.124932
21) Cuifang Lu et al.: Rheology of alkali-activated materials: A review, Cement and Concrete Composites, Volume 121, August 2021, 104061, https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104061
22) R. V. Silva et al.: Us of municipal solid waste incineration bottom ashes in alkali-activated materials, ceramics and granular applications: A review, Waste Management, Volume 68, October 2017, Pages 207-220, https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.06.043
23) Peiliang Cong et al.: Advances in geopolymer materials: A comprehensive review, "Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), Volume 8, Issue 3, June 2021, Pages 283-314, https://doi.org/10.1016/j.jtte.2021.03.004
24) Ning Li et al.: A review on mixture design methods for geopolymer concrete, Composites Part B: Engineering, Volume 178, 1 December 2019, 107490, https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107490
25) Furqan Farooq et al.: Construction and Building Materials, Volume 306, 1 November 2021, 124762, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124762
26) Mohsin Nawaz et al.: Geopolymers in construction - recent developments, Construction and Building Materials, Volume 260, 10 November 2020, 120472, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120472
27) R.S. Krishna et al.: A review on developments of environmentally friendly geopolymer technology, Materialia, Volume 20, December 2021, 101212, https://doi.org/10.1016/j.mtla.2021.101212

28) Peng Zhang et al.: A review on properties of fresh and hardened geopolymer mortar, Composites Part B: Engineering, Volume 152, 1 November 2018, Pages 79-95, https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.06.031
29) S. Luhar et al.: Impact of incorporation of volcanic ash on geopolymerization of eco-friendly geopolymer composites: A review, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 572 (2019) 012001, https://doi.org/10.1088/1757-899X/572/1/012001
30) Sk S. Hossain et al. Utilization of waste rice husk ash for sustainable geopolymer: A review, Construction and Building Materials, Volume 310, 6 December 2021, 125218, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125218
31) Blessen Skariah Thomas et al.: Biomass ashes from agricultural wastes as supplementary cementitious materials or aggregate replacement in cement/geopolymer concrete: A comprehensive review, Journal of Building Engineering, Volume 40, August 2021, 102332, https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102332

No.1

A review of chloride transport in alkali-activated cement paste, mortar, and concrete
アルカリ活性化セメントペースト，モルタル，コンクリート中の塩化物輸送に関するレビュー
Jorge Osio-Norgaard, Juan Pablo, Gevaudan Wil, V.Srubar III
Construction and Building Materials Volume 186, 20 October 2018, Pages 191-206
https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.119
Abstract
本レビューでは，アルカリ活性化セメント（AAC）ペースト，モルタル，およびコンクリート中の塩化物輸送に関する実験データのメタ分析を行った。66件の研究を，測定方法，混合物の設計，微細構造の形成（すなわち，空隙率，細孔径分布），塩化物の拡散，塩化物の結合に関するプロセスと構造・特性の関係に主眼を置いてレビューした。一般的に，この総説では，非晶質含有率が高く微細化されたアルミノシリケート前駆体が，高アルカリ度（Na:Al ≥ 0.75）およびシリカ含有率（Si:Al ≥ 1.5）の溶液で活性化され，熱硬化（40℃以上）と組み合わされることで，これらの要因間の相互作用は十分に理解されていないにもかかわらず，塩化物耐久性を向上させる微細構造特性（例えば，バインダーゲルの化学的性質）をもたらすことが明らかにされている。報告されているAACペーストの空隙率とAACコンクリートの塩化物拡散係数の記述統計を，アルミノシリケート前駆体（すなわち，フライアッシュ，スラグ，焼成粘土，天然粘土，二種類の混合物）別に紹介するとともに，AACにおける塩化物の輸送に関する現在の科学的理解を深めるための新たな機会について総括的に議論する。
6. 結論
本レビューでは，アルカリ活性化セメント（AAC）ペースト，モルタル，コンクリート中の塩化物輸送に影響を与える要因について，プロセス，構造，特性の評価を行った。レビューした文献によると，細粒化や低結晶化といった物理化学的な前駆体の特性が，耐久性の向上につながるAACの溶解，反応性，微細構造の形成に重要な役割を果たしていることが示されている。さらに，検討された文献によると，前駆体にカルシウムが含まれているだけでは，塩化物の耐久性向上の指標にはならず，カルシウムの相（すなわち，非晶質，半結晶，結晶）が耐久性向上のより良い予測因子となることが示唆されている。この挙動は，HCFAの耐久性をLCFAおよびスラグAACと比較した場合に特に顕著であり，HCFAは最も悪い結果となった。アマルガム化した前駆体の物理化学的特性により，反応速度や微細構造の発達が異なるため，塩化物耐久性の観点からブレンドされたAACの挙動を理解し予測することは，依然として科学的課題である。
さらに，公開されている実験データをメタ分析した結果，一般的に，シリカ含有量が多い（Si:Al比），アルカリ含有量が多い（Na:Al比），水分含有量が少ない（L:S比）と，耐塩素性が向上することが示唆されている。反対に，シリカの含有量が多いことは一般的に有益であるが，実験的には，N-A-S-H系のAACではゲル化が進み，空隙率の低下は有益であるが，細孔溶液の減少は有害であるというトレードオフの関係にあることが示唆されている。この継続的なゲル化は，長期的な塩化物耐久性を実現するためには，シリカの化学的性質をより深く理解する必要があることを示唆している。最後に，予想通り，アルミノ珪酸塩の前駆体に関わらず，熱硬化によって気孔率が向上し，結果的に耐塩素性が向上した。
その結果，AACペースト，モルタル，コンクリート中の塩化物輸送をより正確に評価するためには，X線コンピュータマイクロトモグラフィーや電子顕微鏡分析などの高度な技術を用いて，通常のポルトランドセメント（OPC）コンクリート用に開発された塩化物輸送特性評価法の限界を克服することが必要であることが文献から明らかになった。さらに，塩化物の結合に関する鉱物学的な理解を深めることは，科学的な理解を深め，最終的には，塩化物の多い環境で使用する耐久性のあるアルカリ活性化材料の設計やエンジニアリングに役立てるために不可欠である。

No.2

A Review of Durability and Strength Characteristics of Alkali-Activated Slag Concrete
アルカリ活性化スラグコンクリートの耐久性と強度特性の検討
Osama Ahmed Mohamed
Materials 2019, 12(8), 1198
https://doi.org/10.3390/ma12081198
Abstract
アルカリ活性化スラグ（AAS）は，普通ポルトランドセメント（OPC）に代わる有望な鉄筋コンクリート構造用の単独バインダーである。OPCは全世界のCO2排出量の5%以上を占めていると言われています。また，スラグは工業副産物であり，再利用しない場合は埋め立てなければならない。そのため，環境に優しいOPCの代替品として，多くの研究者によって研究されています。リサイクルに加えて，AASは圧縮強度の急速な向上や硫酸塩攻撃に対する高い耐性など，コンクリートに好ましい特性をもたらす。しかし，AASの潜在的な欠点として，高い収縮率，短い硬化時間，高い炭化率などが挙げられる。OPCの代替として高炉水砕スラグ（GGBS）を使用する場合，水酸化ナトリウム（NaOH），硫酸ナトリウム（Na2SO3），炭酸ナトリウム（Na2CO3）などの高アルカリ性化合物，またはこれらの化合物を組み合わせたもの（NaOHとNa2SO3）で活性化する必要がある。アルカリ活性化のメカニズムはまだ完全には解明されておらず，さらなる研究が必要である。本稿では，AASコンクリートの特性，利点，および潜在的な欠点について概説する。
11. 結論
通常のポルトランドセメントを高炉水砕スラグに置き換えることで，CO2排出量や工業生産エネルギーの面で大きな環境効果が得られる。アルカリ処理したスラグを用いたコンクリートやモルタルの強度や耐久性について，以下のような結論を得た。
アルカリ処理スラグの主な水和生成物はC-S-Hであり，これに加えて(1)多孔質構造が少なく圧縮強度が高いハイドロタルサイト様相，(2)アルミネート・フェライト・モノ(サルフェート)(AFm)水和物相が存在する。アルカリ活性剤の高いpHにより，GGBSの溶解が促進され，化学反応と強度発現が促進される。
アルカリ活性化スラグを用いて調製したコンクリート／モルタルの圧縮強度は，アルカリ活性化剤溶液のモル度が高くなるにつれて増加した。同様に，GGBSの重量に対する酸化ナトリウム（Na2O）の割合が増えると，硬化温度に依存する最適値まで圧縮強度が増加し，その後，Na2Oの割合がさらに増えると圧縮強度が減少する。一般的に研究されている酸化ナトリウムの含有率は，4%，6%，8%，10%，および12%です。
また，圧縮強度に対するNa2Oの効果は，活性剤溶液SiO2/Na2Oのケイ酸塩率にも依存する。
アルカリ活性化スラグコンクリート/モルタルに使用するGGBSの微粉末化度が高いほど，28日圧縮強度が高くなる。しかし，細粒度が高いと，フレッシュコンクリートの流動性が低下する。
硬化温度が低いほど，短期的には圧縮強度が低くなる。しかし，長期的な圧縮強度は，硬化温度が低くても悪影響を受けない。同様に，アルカリ活性化スラグコンクリートの水養生は，プラスチックカバー下での養生に比べて高い圧縮強度が得られる。
OPCコンクリートと比較して，アルカリ活性化スラグコンクリートは，塩化物の浸透，硫酸塩攻撃，凍結融解サイクル，アルカリ骨材反応に対して，一般的に優れた耐性を示します。
アルカリ処理したスラグコンクリートでは，OPCコンクリートと比較して自生収縮が大きく，またその状態が長く続く。アルカリ活性化スラグ中のGGBSを15%までシリカフュームで置換すると，自生収縮が減少する。いくつかの研究では，アルカリ処理したスラグコンクリートはOPCコンクリートに比べて乾燥収縮が大きいと報告されているが，これはアルカリ処理したコンクリートのメソポアの割合が大きいことが主な原因である。
アルカリ活性化コンクリート／モルタルの炭酸化は，OPCベースのコンクリート／モルタルよりも一般的に高く，C-S-Hの脱灰やそれに伴う圧縮強度の低下につながる可能性がある。アルカリ活性化コンクリートの炭酸化は，温度や使用するアルカリ活性剤の種類にも影響される。

No.3

An Review on Durability of Alkali-activated System from Sustainable Construction Materials to Infrastructures
持続可能な建築材料からインフラまで，アルカリ活性化システムの耐久性に関するレビュー
Wengui Li, Zhuo Tang, Vivian W. Y. Tam, XinYu Zhao and Kejin Wang
ES Materials & Manufacturing, 2019, 4, 2-19
https://dx.doi.org/10.30919/esmm5f204
Abstract
温室効果ガスの排出に対する懸念が高まる中，二酸化炭素の排出量が少ないという利点を持つアルカリ活性化材料（AAM）が大きな注目を集めている。AAMsの大規模かつ商業的なアプリケーションを促進する過程で，最も重要な懸念の1つは長期的な耐久性である。本研究では，アルカリ活性化システムの耐久性能に関する重要なレビューを行う。材料レベルでは，AAMの物質輸送特性に影響を与える要因を検討し，物理的および化学的な劣化にさらされたAAMの耐久性に及ぼす化学活性剤，原料，硬化レジーム，暴露環境などの多くの要因の影響を検討した。構造物レベルでは，ビーム，スラブ，ボックスカルバート，補修材および保護コーティングを含むAAMから作られた構造物の極限状態での耐久性能をレビューした。このレビューにより，AAMsは，原材料，化学的活性化剤の適切な選択と混合設計の最適化により，耐久性のある材料を製造する可能性があることが示された。さらに，材料と構造の両方のレベルでのAAMsの耐久性に関する更なる研究のための展望が提案されている。これらの結果は，研究者のみならず，製品の持続可能性を求めるAAMs産業の関係者にとっても興味深いものである。
結論
環境意識の高まりとともに，温室効果ガスの排出量を削減し，持続可能な開発に貢献し，固形廃棄物の管理に役立つ素材として，AAMが注目されています。高度な持続可能性を実現するためには，AAMはメンテナンスコストを削減し，耐用年数を延ばすための高い耐久性を備えていなければならない。本研究では，材料から構造まで，AAMの耐久性能に関する批判的なレビューを行った。いくつかの結論が導き出され，このグリーンマテリアルのより持続可能な使用を促進するために，研究コミュニティとAAMs産業に参考資料を提供している。
1. AAMsは，原料の適切な選択，化学的活性化剤の調整，および混合設計の最適化により，耐久性のある材料になる可能性がある。異なる場所からの産業副産物のための最適な混合物を決定することは，AAMsの適用を容易にすることができ，それはまた，それらの地域または地域における産業廃棄物管理問題を解決する可能性がある。
2. AAMの劣化の速度と深刻さは，外部環境のパラメータ，例えば，二酸化炭素の濃度，同伴する硫酸塩のカチオン，酸の種類などと密接に関係している。特定の環境のためにAAMを設計する際には，耐用年数中の高性能と低メンテナンスを実現するために，すべての可能な劣化プロセスを考慮する必要がある。
3. AAMの耐久性を向上させるには，原料の微細化，熱処理などの硬化処理，ナノ材料の導入など，化学的安定性や物理的透過性を向上させる方法がある。
4. AAMの機械的負荷や環境作用などの使用条件は，劣化の速度を変化させる。さらに，複数のエージングプロセスが同時に起こるため，使用環境下でのAAMの耐久性能は，単一のプロセス下での耐久性能とは異なる。
展望
AAMの耐久性に関する研究は急速に進んでいるが，AAMの腐食メカニズムや幅広い応用についての包括的な理解にはまだ大きなギャップがある。それゆえ，さらなる研究が必要である。
1. 繊細な研究，特に様々なアグレッシブな環境下での反応速度に関連する研究は，完全な解明とモデル化を開発するために必要である。これらは，研究者や設計者が，AAMの設計や製造において考慮すべき重要な要素やパラメータを特定するための一般的なガイドラインとなりうるものである。

2. AAMとOPCシステムは，現行の仕様がAAMにも適用できるかどうかを検討するために，広範な比較研究が必要である。一方で，AAMの耐久性能を評価するための新しい標準的な方法論の開発が急務となっている。これは，信頼性の高い耐久性試験データを提供するだけでなく，研究者が比較可能な環境条件下で実験結果を比較することを容易にし，さらに腐食メカニズムについての洞察を与えるものである。
3. AAMsをベースにした材料や構造物の耐久性をスーツで検証する必要性が明らかになった。さらに，材料設計と構造設計の間のより良いコミュニケーションを確立することが重要であり，そうすることでAAMsに基づく構造物は，改良された化学的配合でより良い設計が可能になる。
4. AAMの環境的・社会的信頼性と性能は，材料の耐久性と耐用年数を考慮したライフサイクル評価に基づく総合的な検討が必要である。加えて，生産者にアクセスして地域規模での関連データを収集するだけでなく，国や地域規模でのデータ収集も急務である。

No.4

A Review on the Durability of Alkali-Activated Fly Ash/Slag Systems: Advances, Issues, and Perspectives
アルカリで活性化されたフライアッシュ／スラグシステムの耐久性に関するレビュー。進歩，課題，そして展望
Kamel Arbi, Marija Nedeljković, Yibing Zuo, and Guang Ye
Industrial & Engineering Chemistry Research 2016 55 (19), 5439-5453
https://doi.org/10.1021/acs.iecr.6b00559
Abstract
アルカリ活性化材料（AAM）は，高性能でありながらCO2排出量が少ないことから，普通ポルトランドセメント（OPC）の代替バインダーとして期待されている。AAMの強度がOPCより優れていることについては一般的なコンセンサスが得られているが，その耐久性については広く議論されている。幅広い科学技術的背景があり，OPCの耐久性の問題が既に知られていることから，実用化には十分であると考えるグループもあれば，AAMの耐久性は実証されていないと考えるグループもある。この論争は，AAMを大量に使用する際の制限の1つとなっている。本研究では，フライアッシュ／スラグをベースとしたAAMの耐久性に関する最新の開発状況を概観し，攻撃的な条件（硫酸塩，凍結融解，塩化物，炭酸化，酸，エフロレッセンス）下での挙動に関する最近の知見を更新することを目的としている。このレビューにより，AAMsの耐久性の問題に対する理解が深まり，適切な試験方法を開発するためのさらなる研究が促進され，AAMsの商業化を促進することができる。
3 おわりに
過去10年間のフライアッシュ／スラグベースのAAMの長期性能に関するこのレビューから，以下の結論を導き出すことができる。
AAMは，耐久性（主に酸や硫酸などの化学的攻撃に対する耐性）の面で，概ね良好な性能を有していることが発表されています。
AAMsの耐久性は，主に細孔溶液の化学的性質，反応生成物の微細構造，および前駆体の化学的性質によって制御される。
フライアッシュ，スラグ，またはそれらの混合物から得られるAAMの長期的な性能を調査するために使用される試験方法のほとんどは，OPCベースのシステムの耐久性をチェックするために同じように開発されています。しかし，OPCに関するこれらのバインダーの化学的および構造上の違いは，これらの基準を採用する際に，不正確な結果を引き起こす可能性があります。
一般的な試験方法の限界もいくつか指摘されています。例えば，加速炭化の再現性や再現性，塩化物浸透試験時の臨界塩化物閾値の決定などが挙げられます。これらの問題には，コンクリート間隙液のpH，混和剤の投与量，検出方法など，多くの要因が関係していると考えられる。
フライアッシュ／スラグベースのAAMの耐久性を調査するための統一された耐久性試験方法のための適切なプロトコル，仕様，規格がないため，いくつかの発表された結果には乖離や矛盾さえ生じており，それらの間の最終的な比較をより困難にしている。
科学界とセメント業界は，基本的な推奨事項や規格の策定に実際に取り組んでいる技術委員会に必要な支援を行うべきである。そうすれば，AAMが市場で受け入れられるだけでなく，異なる研究グループ間で結果を検証し比較するのにも役立つだろう。RILEMの委員会，特にTC 247-DTAとASTM C01委員会（小委員会C01.13）は，AAMの耐久性を試験するためのOPC標準の適合性を評価し，この目標を達成するための最初の標準を構築するために，過去数年間取り組んできた。
前駆体や反応生成物のための新しい高度な特性評価技術が必要である。中性子小角散乱やX線小角散乱は，詳細な微細構造を明らかにし，これらの技術を用いてその場での実験を行うことができるため，時間とともに成長する微細構造の評価に役立つだろう。また，ラマン分光法，共焦点顕微鏡，X線光電子分光法なども重要な情報を提供してくれるだろう。
主に低CaのAAMにおけるゲル形成に関わる熱力学的プロセスを正確に記述し予測するためには，この目的のために必要なすべての入力パラメータを提供する開発されたデータベースが必要である。
耐久性は輸送現象に直接関係しているため，ジオポリマーシステムやAAMの輸送メカニズムを深く理解することは，まだ別の大きな課題である。

AAMsへの関心が高まり，この分野の科学的知識が豊富になってきたにもかかわらず，同時劣化プロセスにおける劣化メカニズムなど，耐久性を正確に評価するためには，まだ深く調査しなければならない点がある。これは，適用される特定の条件に望ましい性能を持つ適切なコンクリートを設計するのに非常に役立つだろう。

No.5

A review on thermophysical evaluation of alkali-activated geopolymers
アルカリ活性化したジオポリマーの熱物性評価に関するレビュー
M.B.Mohd Salahuddin, M.Norkhairunnisa, F.Mustaph
Ceramics International Volume 41, Issue 3, Part B, April 2015, Pages 4273-4281
https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.11.119
概要
ここでは，非晶質のシリカベースのアルカリ活性化ジオポリマーの主要な熱膨張特性に関する研究の最近の進展と，その潜在的な応用についてレビューし，取り上げます。ジオポリマーは，断熱材や可燃物ではないので耐火材としての可能性が高いだけでなく，航空機の内装部品として耐火性を向上させたり，断熱材用途のコーティング剤として応用できるなど，さまざまな可能性を秘めている。ジオポリマーの原料となるのは，フライアッシュ，高炉水砕スラグ，焼成カオリナイトなどのアルミノケイ酸塩である。また，もみ殻灰，パーム油灰，もみ殻樹皮灰などのバイオマス廃棄物からも原料を得ることができます。原料が異なると，化学組成が異なるため，熱膨張・収縮率が異なる。また，ジオポリマー素材を加工すると，使用するアルカリ活性液のモル度や調製方法が異なるため，熱特性が多様になる。興味深いことに，ダイラトメーター曲線は，アルミノシリケート源，シリカとアルミナの比率，ジオポリマーの混合比率，化学組成，ジオポリマーの種類（複合，コーティング，ハイブリッドなど）など，多くの要因に影響されることがわかりました。このレビュー論文では，これらの特性をさらに調査しています。
6. 結論
熱膨張／収縮は多くの研究者によって議論されており，ジオポリマー複合材料における重要な熱特性の一つであることが証明されています。ダイラトメーター曲線のほとんどは，6つの領域に特徴づけられる。ダイラトメーター曲線は，アルミノシリケートの供給源，シリカとアルミナの比率，ジオポリマーの混合比率，化学組成，ジオポリマーの種類（コンポジット，コーティング，ハイブリッドなど）など，多くの要因に大きく影響されます。さらなる研究のためには，他の新しいアルミノシリケートやハイブリッド材料を使用することができ，その特性を研究して，ジオポリマー複合体の特性を改善し，他の潜在的な用途のために探索する必要があります。

No.6

A short review on alkali-activated binders and geopolymer binders
アルカリ活性化バインダーとジオポリマーバインダーに関するショートレビュー
Vishojit Bahadur Thapa, Danièle Waldmann
Open Repository and Bibliography, University of Luxembourg Library
https://orbilu.uni.lu/handle/10993/35284
概要
近年，廃棄物や産業副産物を再利用して，コンクリート構造物中の普通ポルトランドセメント（OPC）の使用量を削減しようという動きが，産業界や研究機関の重要な課題となっています。OPCは水に次いで世界で2番目に多く使用されている材料であり，OPCのライフサイクルが世界の年間CO2排出量の最大5%の発生に寄与しているという統計が確認されています。OPCがこのように環境に悪い影響を与えている主な原因は，セメントの製造工程，すなわち石灰石の脱酸と1400℃以上の高温でのクリンカー原料の燃焼に関連して大量のCO2を排出していることです。現在，セメント系バインダーの需要はかつてないほど高まっているが，一方で，持続可能で堅牢な建築物を建設するという動機は，ますます重要性を増している。そのため，OPCバインダーに代わる，より耐久性があり環境に優しい新しいバインダーの開発が求められている。そのため，ここ数十年でセメント代替材料の研究が盛んになり，市場の要求を満たすために多くの研究が行われてきた。この作品では，アルカリ活性化材料とジオポリマーの概念を提示し，それらの特性を比較検討している。また，簡単な歴史的レビューも行っている。さらに，これらのバインダーの反応メカニズムと水和生成物を特徴づけ，文献を参照して説明しています。最後に，廃棄物をベースにした新しいバインダーを紹介し，残された問題と将来の課題についての短い展望で締めくくります。
5 締めくくりの言葉
アルカリ活性化バインダーまたはジオポリマーセメントは，機械的および環境的に優れた性能を発揮する可能性が高いため，現在大きな関心を集めている。したがって，バインダーの特性を改善するためには，これらのシステムの化学反応，構造および耐久性に関する理解を深める必要がある。この文章から，この分野ではすでに広範な研究が行われていることが推察される。しかし，アルカリで活性化されたバインダーの正確な反応メカニズムは，原材料の適合性と活性化剤のアルカリ度に強く依存するため，まだ完全には理解されていません。幸いなことに，科学界では，材料のアルカリ活性化の反応メカニズムは，分子レベルでの溶解と再構築，そして最終的な硬化という3つの主要な段階を経るというコンセンサスが得られている。一般的に，最終的な反応生成物は，カルシウムを多く含む前駆体のアルカリ賦活ではC-S-H様のゲル，低カルシウムの前駆体のアルカリ賦活ではゼオライト様のポリマーと判断できる。より「商業的」な用語である「ジオポリマー」が，低カルシウム，あるいはカルシウムを含まないアルカリ活性化材料としてすでに広く受け入れられていることを考慮すると，異なる結合剤の適切な用語を解決しなければならない。この分野で多くの研究が行われていても，[34]で述べられているように，これらのバインダーの使用に関連して未知の部分が残っている。
規格： OPCのようなアルカリ活性化バインダーは，強度，弾性，硬度，作業性などの特性が混合物によって異なるため，性能に基づいた規格の開発が不可欠となる。規格は，異なるバインダーの比較を容易にするための評価基準と手順を規定します。さらに，原材料と活性化溶液の一貫性と適合性の検証についても定義される。
データベースの開発： 様々な原材料の鉱物学的・化学的組成と，アルカリ賦活後の性能をまとめたグローバルなデータベースがあれば，新しい原材料の性能をより正確に予測することができます。
反応性と反応メカニズム： 反応性と反応メカニズムの理解を深める必要がある。さらに，異なるタイプのアルカリの活性化効果をより明確にする必要がある。
特性評価： アルカリ活性化バインダーの長期的な挙動に対する影響を分析するためには，複雑な固相の理解が不可欠であるため，アルカリ活性化バインダーの複雑な鉱物学的システムを特性化するための新しい方法が必要である。
原料の加工： 原料の準備，粒度，温度，アルカリの濃度，水和条件など，原料のさまざまな加工パラメータがバインダー特性に与える影響を明らかにするには，さらなる研究が必要である。

No.7

ALKALI ACTIVATED MATERIALS: REVIEW OF CURRENT PROBLEMS AND POSSIBLE SOLUTIONS
アルカリ活性化材料。現在の問題点と可能な解決策のレビュー
Adeyemi Adesina
SynerCrete'18 International Conference on Interdisciplinary Approaches for Cement-based Materials and Structural Concrete
概要
アルカリ活性化材料（AAM）は，普通ポルトランドセメント（OPC）の代替となる可能性があるため，近年注目を集めている。しかし，製造時の問題や得られたAAMの特性などから，OPCの代替となるAAMの開発は未だに難航している。OPCは，世界の人為的な二酸化炭素排出量の約7%を占めているため，OPCの代替品の開発が急務となっています。OPCは世界の人為的な二酸化炭素排出量の約7%を占めており，世界的な開発の増加に伴い，今後も排出量の増加が予想されています。そのため，天然資源を節約しつつ，環境への影響が少ない代替グリーンバインダーの開発が必要とされています。
このレビューでは，AAMsの普遍的な受け入れと大規模なアプリケーションを妨げている現在の問題を探った。その結果，AAMsはユーザーフレンドリーな活性剤の研究開発を進めれば，OPCの代替品として競争力を持つようになると結論付けた。
4 結論
このレビューでは，AAMsがOPCのすべての限界を克服することができれば，OPCの良い代替品となることが示された。このレビューに基づき，以下の結論が導き出された。
代替のグリーンアクチベーターを使用することで，AAMのフレッシュな特性と硬化した特性が直面する問題のほとんどを解決することができます。
AAMの収縮は，適切な湿潤養生，収縮を抑える混和剤の使用，粗骨材を多く使用した適切なミックスデザインによって抑制することができる。
コンクリート業界のさまざまなステークホルダーが関与することで，持続可能な代替建築材料としてのAAMの受け入れが促進されるだろう。

No.8

Advances in understanding alkali-activated materials
アルカリ活性化材料の理解の進展
John L. Provis, Angel Palomo, Caijun Shi
Cement and Concrete Research Volume 78, Part A, December 2015, Pages 110-125
https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.04.013
概要
アルカリ活性化は，世界の研究開発コミュニティにおいて，非常に活発で急速に発展している分野である。アルカリ活性化されたセメントやコンクリートの商業規模での展開は，現在，複数の国で急速に進んでいる。本論文では，2011年以降のアルカリ活性化材料の主要な開発を，特性評価技術と構造的理解，バインダー前駆体と活性化アプローチ，耐久性試験と設計，加工，持続可能性の進歩に特に焦点を当ててレビューする。この論文で紹介する科学的・工学的な開発は，現在進行中のスケールアップ活動を支えています。また，持続可能な未来の建設材料産業の構成要素としてアルカリ活性化材料を最適かつ適切に利用するために，今後の研究開発の重要なニーズを明らかにする。
7. 結論と展望
AAMは，ポルトランドセメントに代わる建設資材として，ここ数年で急速に開発・利用が進んでいます。これらの材料は現在，インフラ，一般建築，舗装，核廃棄物の固定化，その他様々なニッチな用途で，世界の複数の国で商業規模で展開されている。アルカリ活性化とポルトランドセメント化学の両方の概念と成分を利用したハイブリッドバインダー処方も，AAMsへのより強固で安価な道筋を提供する可能性があるため，魅力的になってきている。
このクラスの材料を大規模に利用するために必要な科学は，ボトムアップとトップダウンの両方の分析手順と設計プロトコルに基づいて開発されました。しかし，科学的・技術的な観点から，特に硬化時間やレオロジーの制御など，注意を要する分野が数多くあります。ますます多様化する廃棄物由来の前駆体を用いたアルカリ活性化バインダー処方の開発と最適化は，世界中の多くの研究チームの努力の焦点となっており，しばしば地元で入手可能な材料や問題のある材料に焦点を当てています。この多様化は，アルカリ活性化プロセスの多様性を浮き彫りにすると同時に，材料の特性評価と最適化に関する重要な科学的問題を提起するものであり，このようにして製造されたAAMの法制化された受け入れと標準化に必要なものである。耐久性と環境持続性の両方について，適切で意味のある試験と説明を行うことは，将来の世界の建設産業におけるアルカリ活性化バインダーシステムの役割を確実にするために不可欠であり，高度な処理方法は，このクラスの材料の真の価値を解き放ち，実現するために価値がある。
また，材料全体としての環境負荷を最小限に抑えながら，望ましい初期および後期の特性を提供するAAM製剤や新しい活性剤（単独成分または組み合わせ）を開発することも不可欠である。活性剤として商業的に生産されたケイ酸ナトリウムを大規模に利用することは，スケーラビリティ，コスト，実際の取り扱い上の問題，環境コストの面で限界がある。そのため，適切な代替品を開発することが不可欠である。また，同等の性能を持つ活性剤の使用量を削減し，より効率的な使用を可能にする処理ルートの開発も重要である。
アルカリ活性化の分野における科学技術の成熟度は急速に高まっています。これらの材料は現在，実験室から現場へと本格的に移行しており，環境持続性と工学的性能（ひいては利益）を向上させる機会を生み出しており，世界中の産業界，設計者，規制当局の関心と支持を集めています。いくつかの重要な側面は，今後数年間で詳細な研究を行う必要があります。
・複雑な前駆体の物理化学的特性，選択された活性化剤，および結果として得られるバインダーの性能の間の関連性を詳細に定義すること。鉱物学的に複雑で不均質であり，しばしば広範な粒子サイズと形状を有する前駆体材料自体の特性を改善するための推奨事項。
・これまでAAMの研究ではあまり利用されていなかった，あるいは全く利用されていなかった分析ツール（ラマン分光法，共焦点顕微鏡，X線光電子分光法など）を用いて新たな情報を得る。
・相と残存する前駆体を分離するための選択的化学攻撃法の開発，およびAAMにおけるアルミノシリケート前駆体の反応範囲の正確な定量化。

・化学試薬からの純製品の合成，「実際の」アルカリ活性化バインダーゲルの化学的シミュレーションを行い，純製品と実際の前駆体からのAAMとの特性比較を可能にし，微量元素の構造的・化学的効果を理解する。
・安価なバインダーシステムの構築，持続可能なプロセス，非危険物の取り扱いに貢献するために，新しい活性化剤の研究が必要です。
・イオン強度が高く，化学的にアグレッシブな条件であるAAM内での粒子表面化学の特性を評価する方法。
・N-A-S-Hゲルの熱力学的な記述を，地球化学的なモデルに組み込むためのもの。
・アルカリ活性化されたペーストやコンクリートのレオロジー特性の特定とモデリング。これには，レオロジー特性に及ぼすさまざまな化学添加物（新しい減水剤，収縮制御剤，発泡剤など）の効果が含まれる。
・AAM内の凝集体-ペーストまたは補強材-ペースト間のtransition zoneの特徴化。

No.9

Alkali-activated binders: A review: Part 1. Historical background, terminology, reaction mechanisms and hydration products
アルカリ活性化バインダー。 A review: パート1. 歴史的背景，用語，反応機構と水和生成物
Fernando Pacheco-Torgal, João Castro-Gomes, Said Jalali
Construction and Building Materials Volume 22, Issue 7, July 2008, Pages 1305-1314
https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.10.015
概要
普通ポルトランドセメント（OPC）を使用したコンクリート構造物の崩壊は，憂慮すべき問題であり，重要性を増している。そのため，より長い耐久性を持つ新しいバインダーの開発が求められている。アルカリ活性化バインダーは，OPCバインダーに代わるものとして浮上しており，耐久性と環境への影響に優れていると思われる。本稿では，アルカリ活性化バインダーに関する現在の知識をレビューする。本稿の第1部のテーマは，歴史的背景，用語，水和生成物である。これらの新しいバインダーを指定するための適切な用語について議論する。反応メカニズムや反応生成物の性質に及ぼす主材料やアルカリ活性剤の種類の影響について説明する。
6. 結論
アルカリ活性化されたバインダーの開発は，OPCに代わるより環境に優しい選択肢を提示しているように思える。本稿では，その歴史的背景，用語，反応メカニズム，水和生成物についてレビューする。このレビューから，すでに広範な研究が行われていると結論づけることができる。これらのバインダーの正しい名称は，一般的にはアルカリ活性化バインダーであるが，場合によっては「ジオポリマー」という用語も受け入れられる。アルカリ活性化バインダーの正確な反応メカニズムは，主材料とアルカリ活性化剤に依存するものの，まだ完全には理解されていません。にもかかわらず，ほとんどの著者は，溶解，配向，硬化の3段階のモデルで構成されていることに同意しています。反応生成物は，活性剤と主材料にも依存し，（Si＋Ca）系では，主な反応生成物としてC-S-Hゲルが生じる。Si+Al系では，反応生成物はゼオライトのようなポリマーである。

No.10

Alkali-activated binders: A review. Part 2. About materials and binders manufacture
アルカリで活性化された結合剤。A review. その2。材料とバインダーの製造について
Fernando Pacheco-Torgal, João Castro-Gomes, Said Jalali
Construction and Building Materials Volume 22, Issue 7, July 2008, Pages 1315-1322
https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.03.019
概要
本稿では，過去に発表された研究をレビューすることで，アルカリ活性化バインダーに関する現在の知識をまとめた。第1部で示したように，アルカリ活性化バインダーは（普通ポルトランドセメント）OPCバインダーの代替として登場しており，耐久性や環境への影響が優れていると思われる。この論文の第2部の主題は，主材料，アルカリ活性剤，添加剤，硬化タイプおよび構成要素の混合順序である。実用上の問題点と理論上の疑問点が議論されている。また，この分野における将来の研究テーマについても提案する。
7. 結論
これまでのアルカリ活性化バインダーに関する研究では，メタカオリンのような反応性の高い主材料や，フライアッシュやスラグのような工業副産物の他に，いくつかのアルミノケイ酸塩鉱物もアルカリ活性化に供することができると結論づけられています。しかし，これらの研究は高純度の鉱物サンプルを使用しており，純度の低い鉱物や廃棄物であっても同じ反応性を持つとは考えられないことに注意しなければならない。そのため，アルミノケイ酸塩鉱物の廃棄物のアルカリ活性化に関する今後の研究が必要である。
アルカリ活性剤に関する現在の知見では，水酸化物と可溶性シリカからなるものが最も適していることがわかっている。にもかかわらず，水酸化ナトリウムの濃度と水ガラス／水酸化物の比率の影響は完全には理解されていない。なぜなら，異なる素地を使用した場合に，最適なアルカリ濃度と最適なシリカの弾性率が同じであるとは考えられないからである。
水酸化カルシウムを使用することで，機械的強度が向上することがわかった。しかし，それがなぜなのかはまだ明らかになっていません。また，その添加剤の最適な量はどのくらいなのか，そしてその挙動は異なる素地によってどのように影響されるのか。さらに，水酸化カルシウムの溶解はアルカリ濃度に依存するため，このパラメータは活性剤の組成と一緒に分析しなければならない。また，OPCバインダーの強度向上に寄与することは知られていますが，アルカリ活性化混合物中の鉄酸化物が果たす役割については，知識が不足しています。この問題は，主材料として使用される鉱物廃棄物のほとんどが鉄分を豊富に含んでいるため，非常に重要です。

No.11

Alkali-Activated Materials and Geopolymer: a Review of Common Precursors and Activators Addressing Circular Economy
アルカリ活性化材料とジオポリマー：循環型経済に対応した共通の前駆体と活性化剤のレビュー
Mehrab Nodehi & Vahid Mohamad Taghvaee
Circular Economy and Sustainability (2021)
https://doi.org/10.1007/s43615-021-00029-w
概要
ここ数十年の間にCO2や廃棄物の発生量が大幅に増加したことは，持続可能な開発と持続可能性にとって大きな障害となっています。建設業界では，普通ポルトランドセメントの生産は，世界のCO2総生産量の約8%を占める主要な温室効果ガスの排出源となっています。この問題を解決するために，最近ではアルカリ活性化材料やジオポリマーが，環境負荷を大幅に低減したグリーンで持続可能な普通ポルトランドセメントの代替材料として導入されています。これらをポルトランドセメントの代替として使用することで，エネルギーやバージン材を大幅に削減し，持続可能なコンクリート生産が可能になります。また，産業や製造業で発生する固形廃棄物を再利用することで，循環型経済を実現しています。その結果，通常のポルトランドセメントの使用量を減らし，それに伴うCO2の発生を抑えることができます。
結論
この記事では，前駆体，活性化剤，およびそれらの報告された特性についてのレビューに加え，現在の状況と将来の材料の利用可能性についての予測を示しています。以下では，この総説の中で述べられた点をさらに要約し，強調する。
フライアッシュ，粉砕水砕高炉スラグ，メタカオリン，籾殻灰は，文献で使用されている主なアルミノシリケート源（プレカーサ）である。
アルカリ活物質には，高カルシウム系，低カルシウム系（ジオポリマー），そしてカルシウムと普通ポルトランドセメントの含有量の比率を変えた混合物からなるハイブリッド（ブレンド）系の3つの主なシステムがあります。
2液型アルカリ活性剤と1液型アルカリ活性剤の主な活性剤は，メタケイ酸ナトリウムではなく，ケイ酸ナトリウムと水酸化ナトリウムであるが，これらはそれぞれ2液型と1液型のアルカリ活性剤に使用される。
アルカリ活性化材料の主な硬化システムとしては，システムに応じて，加熱，シール（包装），蒸し，水浸しなどがある。
適切な硬化技術の使用は，アルカリ活性化材料の気孔率，機械的特性，耐久性，および耐用性に大きく影響する。
低カルシウム系のアルカリ活性材料は，化学反応性を高めるために熱硬化が必要な場合が多い。
高カルシウム系のアルカリ活性化材料は，低カルシウム系に比べて収縮率が高いなど，耐久性が相対的に低下する。
低カルシウム系，高カルシウム系ともに，通常のポルトランドセメント系に比べて耐熱性が高い。

No.12

Alkali-activated materials
アルカリ活性化材料
John L.Provis
Cement and Concrete Research Volume 114, December 2018, Pages 40-48
https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.02.009
概要
本ペーパーは，環境効率の高いセメントに関するUNEPホワイトペーパーシリーズの一部であり，「アルカリ活性化バインダー」として知られるセメント材料のクラスについて簡単に説明している。これらのセメントは，サプライチェーンの制限，いくつかの用途における実用的な課題，配合と硬化の慎重な管理の必要性などの理由から，ポルトランドセメントの全用途において同等の代替品を提供することは期待できない。しかし，地元で入手可能な原材料を使用し，適切な配合設計（特にアルカリ活性剤の環境への影響を考慮したもの）を行い，適切なレベルの品質管理の下で製造された場合，アルカリ活性化バインダーは，将来の持続可能な建設材料のツールキットの中で，重要かつ費用対効果の高いコンポーネントとなる可能性があります。
10. さらなる研究の優先順位
アルカリ活性化材料の分野における研究の優先事項は以下の通りですが，これらに限定されるものではありません。 - 1液型および2液型のバインダーシステムを含む，これまで以上に広範な原材料と活性剤に基づいたミックスデザインの開発と最適化 - 耐久性の分析，特にバインダーと埋め込み鉄筋との相互作用の分析 - レオロジーコントロールを可能にする適切な混和剤の開発 - 水酸化ナトリウムやケイ酸ナトリウムよりも環境への影響が少なく，同様に早期強度発現が期待できる活性剤の開発 - アルカリ活性化セメントおよびコンクリートに直接適用できる試験方法および性能に基づく仕様の検証と標準化。 - 活性剤，前駆体，およびコンクリート混合物の環境評価の精度と技術的基盤の向上。

No.13

Application of alkali-activated materials for water and wastewater treatment: a review
アルカリ活性化材料の水・廃水処理への応用:レビュー
Tero Luukkonen, Anne Heponiemi, Hanna Runtti, Janne Pesonen, Juho Yliniemi & Ulla Lassi
Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, 18, pages271–297 (2019)
https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11157-019-09494-0
概要
アルカリ活性化(またはジオポリマー)技術は，過去10年間，水処理や廃水処理への応用の可能性から大きな関心を集めてきた。アルカリ活性化材料は，比較的簡単で低エネルギーのプロセスで調製することができ，最も一般的な方法は，アルミノシリケート前駆体を(ほぼ)常温で濃厚な水酸化アルカリやケイ酸塩溶液で処理することである。このようにして得られた材料は，一般的に非晶質で，物理的・化学的に安定しており，イオン交換性があり，多孔質構造を有しています。前駆体のいくつかは，工業副産物やその他の容易に入手可能な低コストの材料であるため，環境面や経済面での実現可能性がさらに高まります。水処理および廃水処理におけるアルカリ活性化材料の応用分野は，吸着剤/イオン交換体，光触媒，高圧膜，フィルター媒体，抗菌材料，pH緩衝剤，バイオリアクターのキャリア媒体，水処理残渣の固化/安定化などである。本レビューの目的は，水処理および廃水処理において急速に成長しているアルカリ活性化技術の展望を包括的に評価することである。
結論
アルカリ活性化材料(AAM)を用いた水処理および廃水処理に関する研究は，過去10年間で著しく増加している。この関心の主な要因の1つは，AAMが競合材料(従来のセラミック，合成ゼオライト，有機ポリマーなど)と同様の多くの有益な特性(機械的強度，耐久性，多孔性，イオン交換容量など)を有しているにもかかわらず，その調製プロセスが簡単で低エネルギーであることである。さらに，AAMはいくつかの産業副産物から調製できるため，循環型経済にも合致している。
吸着剤やイオン交換体としてのAAMは，さまざまな金属，希土類元素，アンモニウム，硫酸塩，有機色素などの除去や回収に有望な可能性を示している。触媒や触媒担体としてのAAMの使用に関する研究では，これらの材料が難分解性の有機化合物(微量汚染物質)の光触媒による分解に大きな可能性を持っていることが示されている。AAMを用いた膜は，材料の持つ固有のメソ細孔性を利用しているため，精密ろ過や限外ろ過の用途に使用することができる。しかし，より大きなポアサイズを生成すれば，AAMは低圧のろ過媒体としても使用することができる。様々な潜在的毒性元素を固化/安定化させるAAMの能力は，スラッジや使用済み吸着剤などの水処理残渣の管理と利用に活用できる。水処理におけるAAMsの他の革新的な用途としては，pH緩衝材，抗菌材，生物処理プロセス用のキャリアメディアなどがある。最後に，検討されたアプリケーションでの性能は有望であるが，これらの材料の技術的準備が整っていることを実証するためには，より大規模かつ長期間の研究が必要であると結論づけることができる。

No.14

Application of eco-friendly alternative activators in alkali-activated materials: A review
環境に優しい代替活性剤のアルカリ活性化材料への応用。レビュー
Beatryz C.Mendes　ほか
Journal of Building Engineering Volume 35, March 2021, 102010
https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.102010
概要
アルカリ活性化材料は，新しいクラスの化合物であり，世界中の複数の著者によって研究されている。アルカリ活性化されたバインダーは，特に環境へのCO2排出に関して，従来のポルトランドセメントに代わる競争力のある材料となり得る。しかし，この利点を得るためには，クリーンで持続可能な方法で製造された活性剤を使用することが不可欠であり，これはNaOHやケイ酸ナトリウムなどの市販製品の場合とは異なる。本稿では，従来使用されてきた活性剤について簡単に説明し，農業廃棄物や産業廃棄物から製造された代替活性剤に関する既存の文献をレビューします。また，モル比や溶液の調製方法などの要因にも注目した。また，ペーストやモルタルの機械的挙動を評価し，代替活性剤の性能が従来の活性剤と同等かそれ以上になり得ることを示した。最後に，この分野の研究を活性化するために，新しい活性剤に関する今後の研究テーマをいくつか挙げた。
5. 今後の展望
現在の傾向として，建設業界が引き起こす環境への影響を軽減するために，持続可能な原材料（前駆体または活性剤）の使用に関する研究が発展しています。その上，研究者たちは，アルカリ活性化反応の発生，反応のカイネティクス，その発生に関連する要因は何か，などの疑問をよりよく理解しようとしている。
前述したように，ここで取り上げた代替活性剤を使用しても，良好な機械的強度を持つ製品を製造することができた。得られた圧縮強度の値は，ポルトランドセメントをベースにしたコンクリート，モルタル，セメント系ペーストの値に匹敵する。このことから，アルカリで活性化された材料は，構造的な機能にも魅力的に使用することができる。しかし，もう一つ注目すべき点は耐久性である。
何人かの著者は，従来の活性剤を用いて製造されたアルカリ活性化材料が，従来のセメント系材料よりも優れた，良好な耐久性特性を持つことを既に実証している。例えば，ジオポリマーの場合，半結晶種は自然の岩石に見られるゼオライトに似ており，風化に非常に強い。
籾殻灰，サトウキビバガス灰，オリーブバイオマスなどの代替活性剤を使用して得られた製品が，従来のものと同じ耐久性条件を持つかどうかはまだ不明である。このテーマに関しては，紫外線，湿潤・乾燥サイクル，氷結・融解，炭酸化，塩化物の影響などにさらされた場合のモルタル，コンクリート，アルカリ活性化ペーストの性能について，さらなる研究・調査が必要です。上記のような特定の条件にさらされた場合，材料の強度が低下するかどうかを知る必要があるため，耐久性の面は重要です。
また，産業廃棄物や農業廃棄物から製造されたモルタルやアルカリ活性化コンクリートの環境特性を明らかにすることも研究の優先課題となるでしょう。環境や建築物の使用者に危険を及ぼす可能性のある元素の溶出や可溶化の可能性を調査した研究はほとんどありません。この検証は，とりわけ鉱山から出る残渣などの産業残渣（バイヤー液）を考慮すると重要である。これらの材料は，鉱石の探査と処理に使用された様々な物質のために，より多くの不純物を含んでいます。
レオロジーの制御は，特に代替活性剤に関連する研究では，ほとんど適用されていない。これらの活性剤が，新鮮な状態のペースト，モルタル，コンクリートに，コンシステンシーや作業性に関連して，大きな変化をもたらすかどうかを理解する必要がある。

No.15

Autogenous Deformation of Alkali-Activated Blast Furnace Slag Concrete Subjected to Variable Curing Temperatures
硬化温度を変化させたアルカリ活性化高炉スラグコンクリートの自己変形
Katalin Orosz, Abeer Humad, Hans Hedlund, and Andrzej Cwirzen
Advances in Civil Engineering, Volume 2019 |Article ID 6903725
https://doi.org/10.1155/2019/6903725
概要
MgOとAl2O3の含有量が高いアルカリ活性化スラグコンクリート（AASC）の硬化温度を変化させたときの変形を調べた。アルカリ活性化剤として，ケイ酸ナトリウムと炭酸ナトリウムを用いた。得られた結果は，収縮と膨張の両方からなる変形の発生を示した。収縮は活性剤の種類に影響されないようであったが，膨張は安定した等温状態での冷却段階の後に発生し，試験期間中は止まらなかった。冷却後すぐに行ったX線回折分析では，結晶性のハイドロタルサイトが形成されており，これは観察された膨張と関連していた。これは，水和とジオポリマー化が促進され，バインダーマトリックスの剛性が向上したためと考えられる。
4. 結論
硬化温度を変化させた高MgO含有BFSベースのアルカリ活性化コンクリートの自生変形量を測定した。適用した硬化手順は，現実的な温度変化をシミュレートすることを目的としたものである。一般に，観測された極限収縮値は，ポルトランドセメントをベースとしたコンクリートに関する既報の結果と比較して高かった。アルカリ活性化スラグ系で発生する水和プロセスとジオポリマー化プロセスの組み合わせにより，より小さな細孔を大量に含む微細構造が生成されると結論づけられた。これにより，引張応力が大きくなり，その結果，収縮率が大きくなる可能性がある。
記録された究極の最大変形量は，熱硬化性試料に使用したアルカリ活性剤の種類に影響されなかった。しかし，ケイ酸ナトリウムの添加量を10～14wt.%に増やすと，変形量が著しく大きくなった。
すべてのAASC混合物で自生膨張が検出された。自己膨張と熱変形を切り離すことなく，膨張の正確な開始時期を決定することはできなかったが，自由変形プロットの傾きの変化から，冷却段階で膨張が始まったと推定された。膨張は試験期間中，横ばいであった。この膨張は，使用したBFSのMgO含有量が多いため，ハイドロタルサイトの形成と関連していた。

No.16

Review on recent developments in alkali-activated materials
アルカリ活性化材料の最近の進展についてのレビュー
Bahmani, S.H. & Orense, R.P.
Proc. 20th NZGS Geotechnical Symposium. Eds. GJ Alexander & CY Chin, Napier
概要
近年，先進国を中心に産業界のグローバル化が著しく進んでいます。そのため，産業廃棄物の副産物は，その量の多さと処理場所の少なさから，大きな課題となっています。産業廃棄物の副産物や，従来のセメント系バインダー（石灰，セメント，石膏など）を地盤に使用することは，温室効果ガスの排出量が多いこと，エネルギーを大量に使用すること，天然資源を枯渇させることなどから，多くの課題に直面している。さらに，従来のバインダーのほとんどは，厳しい労働安全衛生上の問題や，土壌・地下水環境への脅威のため，容易には受け入れられません。これらの課題に対処するために，産業廃棄物の副産物を利用した新しいバインダーが研究されています。その中でも，アルカリ賦活法は，セメント系バインダーと同等以上の性能を持ちながら，環境問題やコストを低減できるという点で，最も注目されている方法の一つである。この論文では，2011年以降のアルカリ活性化材料の主要な開発について，特に特性評価技術，構造的理解，バインダー前駆体，活性化アプローチ，設計と加工，反応メカニズムの進歩に焦点を当ててレビューする。最後に，さらなる研究開発のテーマを提案し，これらの材料の地盤改良への応用の可能性を高めるためのステップを提案する。
8 結論
議論の結果，アルカリ活性化法は，地盤工学の応用における新しい方法として，かなりの可能性を秘めていると結論づけられた。ますます多様化する廃棄物由来の前駆体を用いたアルカリ活性化バインダー製剤の開発と最適化は，世界中の多くの研究チームの努力の焦点となっており，多くの場合，地元で入手可能な材料や問題のある材料に焦点を当てている。ニュージーランドでは，入手可能なガラスの量と国内のリサイクルガラスの利用が主な課題となっています。これまでのところ，再生ガラスを使って新しいバインダーを開発する方法としては，セメントと比較して，環境問題やコストが低いアルカリ賦活が最も有望視されています。しかし，科学的・技術的な観点から，特に硬化時間やレオロジーの制御など，注意すべき点が多く残されています。したがって，アルカリ活性化バインダーシステムの将来的な役割を確実にするためには，高度な処理方法と環境持続性の両方について，適切かつ有意義な試験と説明が不可欠である。詳細な研究を必要とするいくつかの重要な側面は以下の通りである。
・アルカリ溶液の濃度が異なるAAMが土壌の地盤工学的パラメータに及ぼす影響を実験的に調査。
・前駆体の物理化学的特性と選択された活性化剤との関連性の詳細な定義。
・地盤改良技術におけるAAMの特性評価のための適切な方法の検討。
・ラマン分光法，共焦点顕微鏡，X線光電子分光法など，これまでAAMの研究ではあまり利用されていなかった，あるいは全く利用されていなかった分析ツールを用いて，新たな情報を得る。
・ AAM処理された土壌の地震荷重下での繰返し挙動の評価。
・ AAMsによる処理の前後における土壌の微細構造および鉱物学的相の研究
・ユーザーフレンドリーな数値（FEM）コードに組み込むための構成モデルの導出。

No.17

Effect of Temperature on Thermal Properties of Alkali activated Fly Ash/Slag Binders
アルカリ活性化フライアッシュ/スラグバインダーの熱的特性に及ぼす温度の影響
Zhu Panら
Proc. 1st International Conference on Structural Engineering Research (iCSER 2017)
ISBN: 978-0-6480147-6-8
概要
ジオポリマーバインダーは高い熱安定性を示し，その結果，これらの材料は，火災の安全性が重要視されるインフラの建設に幅広く使用できると考えられています。このような用途では，熱伝導計算において熱特性が基本的な役割を果たします。本論文の目的は，様々なジオポリマーバインダーの高温における熱特性を包括的に実験的に研究することです。このバインダーは，アルカリで活性化された低カルシウムのフライアッシュと高炉水砕スラグを100/0, 50/50, 10/90, 0/100 wt%の比率で使用して調製した。熱容量と熱伝導率を評価するために，23～600℃の温度範囲で，過渡的な平面ソース測定技術を適用した。生成されたデータは，温度の関数として熱特性を推定するための解析式を作成するために利用されました。この簡略化された関係は，ジオポリマー材料で作られた構造要素の耐火性を見積もるために使用することができます。
4. 結論
常温では，Al-Siジオポリマー系の熱伝導率はOPC系のそれよりも低い。これは，これら2種類のバインダーのゲル構造が異なることに起因する。C-S-Hゲルは，S100とOPCの両方で主要な反応生成物であると考えられる。その結果，S100とOPCの熱伝導率の測定値は類似している。常温では，すべてのバインダータイプの比熱にわずかなばらつきがあるという結果になりました。高温では，Ca-Siジオポリマー系とOPC系の熱伝導率は温度の上昇とともに減少し，Al-Siジオポリマー系の熱伝導率は温度の上昇とともに増加した。高温では，すべてのバインダータイプの比熱は，一般的に温度とともに増加します。しかし，F100は200～300℃の範囲で，S100は100～200℃の範囲で，比熱の急激な低下が観察された。提案された熱特性（高温時）の関係は，ジオポリマー材料で作られた構造物の耐火性を評価するために使用することができます。

No.18

EFFECTS OF COMPOSITION OF FLY ASH-BASED ALKALI-ACTIVATED MATERIALS ON COMPRESSIVE STRENGTH: A REVIEW

フライアッシュベースのアルカリ活性化材料の組成が圧縮強度に及ぼす影響:レビュー

QINGBO TIAN, SHUO SUN, YUWU SUI, YUE WANG, ZHIJIE LV

Ceramics-Silikáty 65 (1), 9-23 (2021)

https://doi.org/10.13168/cs.2020.0037 （開けない）

概要

フライアッシュベースのアルカリ活性化材料（FAAM）は，アルカリ活性化されたジオポリマーの重要なメンバーである。この材料の 圧縮強度は，建設材料として使用する際に，FAAMにとって最も重要な機械的特性の一つである。このような フライアッシュを原料とした前駆体，アルカリ活 性剤，添加剤などの成分が，FAAMの圧縮強度に及ぼす影響について検討した。の影響について検討した。SiO2/Al2O3，Al2O3/Na2Oおよび水/固体（W/S）比は，FAAMの圧縮強度を開発する上で重要である。強度マップを作成した。SiO2/Al2O3およびSiO2/Na2O比の変化に応じた強度マップが作成された。確立されています。SiO2/Al2O3比は約4.20～4.30に臨界値があり，この値ではSiO2/Al2O3比を一定にした場合の圧縮強度の増減が大きくなる。Al2O3/Na2O比を変化させた場合のSiO2/Al2O3比一定の圧縮強度の増減が見られる。活性のあるCaO資源。高炉セメント（GBFS），普通ポルトランドセメント（OPC），またはCa(OH)2やCaOなどの化学物質に由来する活性のあるCaO資源が役立つ。やCaOなどの化学剤に由来する活性CaO資源は，FAAMの強度向上に有効であるが，C-A-S-H，しかし，N-A-S-HやA-S-Hゲルではなく，C-A-S-H，N-C-A-S-H，C-S-Hゲルの形成が支配的になるのを避けるために，OPCを7.5～10%，GBFSを15～20%添加することが推奨される。硬化時間，作業性，強度発現を考慮して，OPCを7.5%～10%，GBFSを15%～20%置換することが推奨される。また また，フライアッシュ中のFe2O3とシリカがFAAMの圧縮強度に及ぼす影響についても一般化した。

結論

バインダー資源の成分は，FAAMの圧縮強度に大きな影響を与える。使用するフライアッシュの違いにより，最適なSiO2/Al2O3比，Al2O3/Na2O比は異なります。バインダーの適切な成分量をまとめると，SiO2/Al2O3およびAl2O3/Na2O比の範囲はそれぞれ1.5～3.5および0.7～1.4であった。CaOの積極的な添加は，強度を高めるために有効な選択肢であることが証明された。一般に，バインダーの強度は修飾QAによって増加するが，活性CaOの効果はSiO2/Al2O3およびAl2O3/Na2O比の効果によって妨害されることがある。鉄の役割とその反応の可能性 は，まだ十分に解明されていない。とはいえ ほとんどの飛灰に鉄分が含まれており，中には は鉄分を多く含んでいるため，鉄分の含有量がFAAMsはさらに調査が必要である。

No.19

Fiber-reinforced alkali-activated concrete: A review
繊維補強アルカリ活性化コンクリート。レビュー
Mugahed Amran ら
Journal of Building Engineering Volume 45, January 2022, 103638
https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103638
概要
アルカリ活性化材料（AAM）は，世界中の多くの研究者から広く認知されており，現代の建築に応用できる可能性がある。AAMとスチールファイバーを併用することで，マトリックスとファイバーが優れた接着強度を示すため，一般的なバインダーシステムよりも優れている。様々な著者によって得られた結果は，繊維の良好な分散により，繊維とAAMマトリックス間の良好な相互作用が保証されることを示している。FR-AACの引張強度は普通ポルトランドセメント（OPC）ベースの材料よりも優れており，特にシリカフューム（SF）の添加が顕著である。しかし，繊維強化アルカリ活性コンクリート（FR-AAC）の引張強度は，繊維長が長くなるにつれて低下する。接着強度は，コンクリートのグレードや界面の粗さ，アルカリで活性化された溶液の強さが増すほど高くなる。繊維の種類に関わらず，AACの弾性係数は圧縮強度と直線的な相関関係にある。繊維は，繊維の硬さと複合材の空隙率により，コンクリートの弾性率に影響を与える。AACのポアソン比は，ASTM C469-14規格（約0.22）に対応し，シリカフュームの添加により約0.15～0.21に減少した。実験的なポアソン比の資料は限られており，利用可能な予測式を用いて推定するしかない。したがって，FR-AAC複合材のポアソン比を推定するために，追加の実験的研究を行う必要がある。FR-AACステンレス鋼複合材は，800℃および1050℃の環境下で曲げ強度が59%および44%保持され，チョップドアルミナ繊維はこれらの温度で高い降伏強度を示した。フックエンドを持つ1%SFを用い，NaOHとケイ酸ナトリウムの水溶液で活性化させたFAベースのAACモルタルでは，曲げ部の数を増やすと，接着強度，荷重引き抜き強度，最大引き抜き強度が向上した。自生収縮率と乾燥収縮率はケイ酸塩の含有量が多いほど大きくなり，収縮率はNaOH濃度が高いほど小さくなった。FR-AACについては，耐久性や異なる環境条件での研究は比較的少ない。さらに，現代建築のための堅牢でグリーンなコンクリート複合材料を開発するための適切なコンクリート材料としてのFR-AACの応用の可能性を広く理解するための開発研究の動向を広範囲にレビューした。
6. 結論
アルカリ活性化コンクリートは，様々な応用分野で関心が急激に高まっている。これらの関心には，高温性能を持つもの，持続可能なコンクリート，環境に優しい建設材料など，改良された複合材料を製造するためのAACの開発や特性評価の調査が含まれる。しかし，AACの主な問題点は，低い引張強度と脆い破壊挙動である。この包括的なレビュー調査では，コンクリート技術に望ましい特性を得るために，さまざまな繊維の組み込みによってこれらの弱点を克服することに集中した。さまざまな繊維の種類，繊維の形状，バインダーの化学組成，環境条件，硬化条件，鋳造手順を用いたさまざまな複合材料について，幅広い特性を得ることができる。
このレビューは，効果的な繊維選択のためのフォーラムを提供し，FR-AAC複合材のフレッシュおよびハードな特性，耐久性，耐熱性に影響を与えるパラメータの基本的なメカニズムについての認識を深めるものである。この論文では，合成繊維や天然繊維で強化されたさまざまなAACペーストやモルタルに関する研究成果をまとめるために，最新のレビューを行った。AACは，その原料であるシリコアルミネートが人工廃棄物であり，強化繊維が地元で入手可能な材料であることから，環境に優しい建築材料として注目されている。FR-AACコンポジットは，非構造的な用途以外にも，特別な硬化条件が要求されることから，建設業界におけるプレハブ構造要素に適用できる可能性がある。

AASとスチールファイバーを使用することで，マトリックスとファイバーが優れた結合強度を示すため，一般的なバインダーシステムよりも優れていることがわかっている。AACは，OPCコンクリートと比較して，FA，スラグ，RHA，SF，GGBS，RM，コンクリート解体廃材，鉱山廃材などの原料から製造され，機械的特性を向上させることができる。機械的特性に優れたAACを配合するためには，NaOH濃度，アルカリ溶液/固体比，原料（SiO2/Al2O3のモル比，形状，形態），全アルカリ溶液中のSiO2/M2Oのモル比，硬化条件など，いくつかの重要なパラメータが考慮され，これらのパラメータは他の材料（繊維など）にも適応させる必要がある。様々な著者によって得られた結果は，繊維の良好な分散により，繊維とAAMマトリックスの良好な相互作用が保証されることを示している。FR-AACの引張強度はOPCベースの材料よりも優れており，シリカフュームの添加が特に顕著である。接着強度は，コンクリートのグレード，界面の粗さ，アルカリで活性化された溶液の強さの増加に伴って増加する。
これまでの研究では，繊維の種類，含有量（一般的には1%から5%），形状，強度がAACの挙動に大きく影響することが明らかになっている。ウール，コットン，スイートソルガム，サイザル，コアーなどの天然繊維をAACに組み込んだ場合，繊維を含まないマトリックスと比較して，引張強度，曲げ強度，圧縮強度がそれぞれ111%，450%，53%向上することが確認された。さらに，繊維や布地を追加して層状にすることで，非強化のマトリックスと比較して，さらなる向上（圧縮強度360%，耐衝撃性650%，曲げ強度1110%）を達成することができる。その効果は，主に不織布や織物の層の量（繊維含有率2.1%～10%）と製造技術に依存します。しかし，FR-AACの引張強度は，繊維長が長くなるにつれて低下する。繊維の種類に関わらず，AACの弾性率は圧縮強度と直線的な相関関係にあります。繊維は，繊維の剛性と複合材の空隙率により，コンクリートの弾性率に影響を与える。普通のAACと鋼製FR-AACのポアソン比は，0.08から0.22の範囲でした。実験的には，AACのポアソン比はASTM C469-14規格（約0.22）に対応し，SFの添加により約0.15～0.21に低下した。
剥離した繊維を含むことで，AACベースのコンクリート複合材料の強靭性と耐クラック性を大幅に向上させることができる。繊維-マトリックス界面とマトリックスの緻密化は，繊維の靭性に応じて，AACベースのコンクリート複合材に大きな耐荷重性をもたらすことができる。FR-AAC(FR-AAC)複合材は，複数の負荷サイクルにおいて複合材のクラック発生後の延性を拡張する。それにもかかわらず，FR-AACは環境に優しい建築材料であり，世界中の建設業界で大きな注目を集めている。綿布（8wt%）で補強したACCベースのフライアッシュの耐衝撃性は，綿布を水平に重ねて補強することで延性の度合いが増すことを示した。
本稿では，繊維の分類，微細構造，および化学組成についてレビューする。この論文は，FR-AACコンクリート複合材料の特性，強靭化特性，および挙動に関する最新のレビューを提供することを目的としている。さらに，開発中の研究の動向は，現代の建設のための堅牢でグリーンなコンクリート複合体を開発するための適切なコンクリート材料としてのFR-AACのアプリケーションの可能性に関する幅広い理解に向かっています。結論として，AACの開発には重要なベンチマークが考慮されるべきであり，それらは優れた機械的特性をもたらす組成と製造に基づいて集約され，比較された。文献調査によると，いくつかの点が今後の研究のために強調されている。
FR-AAC複合材のポアソン比を近似するには，さらなる検討が必要である。
機械的特性やその他の特性を向上させたFR-AAC製造のための配合を最適化するための広範な調査が必要である。
FR-AACの新たな応用を模索する価値があり，AACベースのコンクリートは新しい超高性能コンクリートのクラスとして製造することができる。
高放射線遮蔽コンクリートの開発は，FR-AACコンクリート複合材料の可能性をさらに研究するために，原子力促進のための理想的な放射線吸収体の靭性を高めるものである。
様々な繊維や要因，状況に対応しながら，データベースやコード，現実的な設計基準を更新していくためには，さらなる検討が必要です。
再生ガラス繊維，織物繊維，炭素繊維，再生タイヤ鋼繊維は，AACの中で最も高い融点を示すため，いくつかの研究では再生ガラス繊維を扱っていた。
高温にさらされる再生繊維-AACの耐火性能に関する最新の開発状況について，包括的な文献調査を行うことが緊急に必要である。
リハビリテーション用のマイクロファイバー強化AACモルタルの接着性（コンクリート基材への接着）と耐久性に関する追加研究が必要である。

ボロアルミノシリケートGPCの特性を向上させるために繊維を使用する場合，使用する繊維や原料の種類，各種特性への影響の違いなど，いくつかの要素に対処する必要があります。
繊維の分散，品質，作業性などの問題については，さらなる研究が必要である。
さらに，長期的な複合材に対する火災の影響を調べるために，これらの種類の再生繊維の高温での性能に関する追加研究が必要である。
また，生分解性複合材料の製造，電磁波吸収，核の浄化と輸送，鉱山工学，深海の土木インフラ，環境への応用など，生物学における再生繊維の利用について，包括的なレビューや調査が早急に必要であると著者は考えている。
さらに，高温や火災時の効果を維持するために，様々な再生繊維強化AACシステムの限界や重要な温度の限界をより良く判断するための緊急研究が必要である。

No.20

Influence of alkali source on properties of alkali activated silicate tailings
アルカリ活性化されたケイ酸塩テーリングの特性に及ぼすアルカリ源の影響
Priyadharshini Perumal, Jenni Kiventerä, Mirja Illikainen
Materials Chemistry and Physics Volume 271, 1 October 2021, 124932
https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2021.124932
世界的な工業化・都市化の進展に伴い，鉱業活動は避けて通れないものとなっています。鉱山残渣の廃棄は，環境に，そして最終的には社会に深刻な影響を与えます。鉱滓を潜在的な二次原料として利用する方法を特定することは，鉱業界が循環型経済を実現するのに役立ちます。鉱滓をアルカリで活性化し，建築資材や鉱山の埋め戻し材として利用することは，そのような一般的な手法の一つです。本論文では，アルミノケイ酸塩前駆体として使用するために，マグネシウム／アルミニウム含有量の多い機械処理されたケイ酸塩テーリングを選択した。活性化剤としてケイ酸ナトリウム（Na2SiO3），硫酸ナトリウム（Na2SO4），炭酸ナトリウム（Na2CO3）を用いて，異なるアルカリ源の効果を調べた。アルカリ活性化されたテーリングペーストは，圧縮強度と微細構造の特性を調べることによって研究された。高マグネシウム滓は，ケイ酸ナトリウム系活性剤で良好な強度結果を示したが，硫酸塩系活性剤は高アルミナ滓で良好な結果を示した。炭酸ナトリウムは，初期段階では効果的であるが，後期段階では改善が見られないようである。異なるアルカリ源を用いてアルカリ活性化したテーリングのこの挙動は，FTIR，XRD，TGAを用いて，テーリングの鉱物学とその反応性との相関性を試みた。
結論
機械的に処理（粉砕）された高マグネシウム／高アルミニウムケイ酸塩テーリングの圧縮強度に及ぼす活性剤の種類の影響を調査しました。このような観点から，本論文では，アルカリ活性化テーリングの機械的，化学的，および微細構造的特性の詳細な理解を示しました。
珪酸ナトリウムを唯一の活性剤とすると，ハイドロタルサイトの形成とC-S-Hの共存により，マグネシウム系で高い強度が得られる。両方の反応生成物のバランスは，反応に利用できるマグネシウムの量によって定義される。一方，ゼオライトは，シリカを多く含む高アルミナ滓で形成される主要な相であり，ケイ酸ナトリウムを含んでいる。
層状複水酸化物（ハイドロタルサイトの形態）は，硫酸アルカリを活性化剤とした場合，高マグネシウム滓ではケイ酸塩活性化剤と同等の強度を示し，優位に立つようである。高アルミニウム環境下で硫酸ナトリウムを活性剤として形成されたエトリンガイトは，他の活性剤と比較して最大の強度を示す。
硫酸ナトリウムによる高い強度は後期に見られるが，初期には炭酸塩が優れた活性剤であると思われる。アルカリ炭酸塩は，使用したテーリングの種類にかかわらず，長期的な強度の向上には効果がなかった。
様々な活性剤を用いて製造された異なる混合物の微細構造は類似しているが，エトリンガイトの針や球状の炭酸カルシウムのような反応生成物の形成が依然として顕著であった。
この研究から明らかなように，アルカリ活性化テーリングの最大の強度特性を達成するためには，異なる組成に特定の活性剤源が必要です。結果として得られる材料の特性を定義するのは，生成物の相の性質です。例えば，この研究では，エトリンガイトとハイドロタルサイトが細孔充填剤として作用し，硫酸塩／ケイ酸塩ベースのアルカリ活性化剤の存在下で，高アルミニウム／高マグネシウム滓の強度をそれぞれ向上させました。したがって，さまざまな用途の強度基準に基づいて，アルカリ活性化テーリングを製造するために，低コストでエネルギー効率の高いナトリウム代替物を選択することは常に可能である。

No.21

Rheology of alkali-activated materials: A review
アルカリで活性化された材料のレオロジー。レビュー
Cuifang Lu ら
Cement and Concrete Composites Volume 121, August 2021, 104061
https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104061
概要
アルカリ活性化材料（AAM）の多くは，ペーストの粘度が高く，硬化が早いため，混合時の作業性が悪い。また，ポルトランドセメント系材料に一般的に使用されている化学混和剤（レオロジーコントロール添加剤や過可塑剤など）は，AAM系では効率が悪くなる。様々なAAMのレオロジー特性とその制御を理解することは，大規模な，特に揚水・打設，グラウト，3Dプリントなどの分野での応用に向けた貴重な指針となる。本稿では，活性剤，前駆体，混和剤，添加物，凝集体，繊維などの組成因子がAAMのレオロジーに及ぼす影響，およびそのレオロジー挙動を記述するモデルについて，包括的なレビューをお届けすることを目的としています。現在の進捗状況を見ると，大きな知識のギャップがあるため，科学的メカニズムから，作業性と力学的要件の両方を満たすペースト，モルタル，コンクリートの堅牢なフォーミュレーションまで，実質的な研究が必要であることがわかります。
9. 結論と展望
9.1. 結論
本稿では，活性剤，前駆体，混和剤，添加剤などの組成因子の影響を受けたAAMのレオロジーに関する進歩をレビューした。これらの議論に基づき，以下の結論を導き出すことができる。
活性化剤の種類は，レオロジーモデルを制御する主な要因であると考えられる。一般にNaOHで活性化されたペーストにはBinghamモデルが推奨され，ケイ酸ナトリウムで活性化されたペーストにはH-Bモデルが適している。また，前駆体や化学的混和剤などの他の構成要素もレオロジーパラメータに重要な影響を与える。例えば，Na-silicate活性化フライアッシュペーストはBingham流体のように振る舞うという報告もあるが，フライアッシュ-スラグ複合体のレオロジー挙動はH-Bモデルとより一致している。
AAMのレオロジー特性に影響を与えるのは，活性剤溶液からのシリケート種の重合状態と，前駆体表面への吸着メカニズムであること。さらに，イオンサイズの違いから，Na系活性剤はK系活性剤に比べて，通常，高い降伏応力，高い粘度，および懸濁液の速い粘弾性変化を引き起こす。適切な量のケイ酸塩系活性剤は，優れた可塑化効果を発揮する。一般に，活性剤の臨界濃度（モジュラスおよびNa2O%）が存在し，イオン分布と活性化に影響を与えることでレオロジー特性の傾向を逆転させることができる。
前駆体の物理的特性は，その表面吸水率や充填密度に影響を与え，化学的特性は，前駆体粒子の溶解挙動や析出ゲルの種類を変化させ，いずれもAAMのレオロジーを変化させる。アルカリ活性化されたブレンド系では，通常，比表面積の大きい前駆体（MKなど）の含有量が降伏応力と可塑性粘度を増加させる主な要因となる。
現在，PCM用の一般的な化学混和剤のほとんどは，AAMへの分散効率が低い。これは，極アルカリ環境での化学的安定性，アルカリ性媒体への溶解性，活性剤のアニオン種とアニオン性化学混和剤との間の競合吸着という3つの側面から説明できる。これらの点はすべて，ポリマーの分子構造と電荷の合理的な設計に依存する。いくつかの候補は，いくつかの特定のシステムに有効であることを示しています。アニオン性が高く，分子量が大きく，側鎖の長さが短いHPEG PCEは，高カルシウム系で良好な分散性を示した。
細砂や石灰石パワーなどの不活性ミネラル添加物は，粒子の緻密なパッキングモデルが良くなるため，レオロジー特性の改善にプラスの効果を示し，高比表面積や核生成効果のマイナスの影響を補うことができるという。一方，反応性鉱物の添加がAAMのレオロジーに与える影響は，その物理化学的特性と懸濁液の水／バインダー比に依存する複雑なものである。
Binghamモデルは，AAMsモルタル/コンクリートのレオロジー挙動をよく説明できる。さらに，AAMsモルタルの流動性は液体／固体の比率に比例し，骨材の種類に大きく影響される。繊維強化AAMについては，PCMと同様に，繊維の形状とアスペクト比が2つの重要な要素である。

9.2. 展望
この分野では多大な努力が払われてきたが，最近の進歩とAAMのレオロジーの完全な理解と工学的応用の促進との間には，まだ大きなギャップがある。今後の研究では，以下のようなコンセプト（懸念事項）が考えられる。
AAMにおける組成因子と粒子間力の関係，および水和キネティクスのより詳細な研究。これにより，相互作用のメカニズムをより深く理解し，様々な成分の影響の全体像を把握することができる。
活性剤の添加方法，NaOH-MKをベースにしたシステム，より環境に優しい活性剤（Na2CO3やそれらの混合物など）を使用したシステムなど，いくつかの研究のギャップや限定的な研究に関して，より多くの努力が必要です。
AAMsのレオロジー的，機械的要求を満たすための堅牢な処方と関連化学物質。例えば，AAMに合わせた有機可塑剤の開発や，AAMの作業性の悪さを改善するための無機可塑剤の適切な添加が必要である。
AAMコンクリートのレオロジー研究。ペーストやモルタルに関する研究はあるが，コンクリートに関する研究は限られており，特に繊維や添加剤がレオロジーに及ぼす影響については不明である。これらの材料とAAMのレオロジー特性との関係を定量的に記述する経験式を確立することが必要であり，それによってAAMの大規模な商業的応用を促進することができる。

No.22

Use of municipal solid waste incineration bottom ashes in alkali-activated materials, ceramics and granular applications: A review
都市ごみ焼却ボトムアッシュのアルカリ活性化材料，セラミックス，粒状物への利用。レビュー
R.V.Silvaら
Waste Management Volume 68, October 2017, Pages 207-220
https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.06.043
概要
本論文では，都市ごみ焼却ボトムアッシュを，従来使用されていた市場以外のいくつかの市場，例えば，地盤工学的用途や道路舗装工事などに原料として取り入れることに関する文献調査を紹介する。ボトムアッシュをアルカリ活性化材料の前駆体として，廃水や埋立ガスから有害元素を除去するための吸着材料として，農業活動における土壌代替物として，セラミックベースの製品を製造するための原材料の一部または全部の代替物として，埋立地のカバーとして，バイオガス生産増強剤として使用するための十分な数の実験的調査の主な結果を集め，照合し，分析した。
7. 結論
都市ごみ焼却ボトムアッシュのアルカリ活性化材料，セラミック製品，および残渣を粒状で使用する用途での使用に関する文献調査の結果，以下のような結論が得られました。
MIBAを様々な用途で価値のある製品に取り入れることは，MSWの焼却から生じる残留物による環境への影響を軽減することを主な目的として，広く研究されている。さらに，天然資源の保護とは別に，この副産物を互換性のある原料の一部または完全な代替品として使用することは，かなりの経済的な利点を意味することもある。さらに，上述の用途における材料の使用の技術的実現可能性の観点から見ると，MIBAは貴重な原材料として考えられることが確認された。しかし，この灰の使用に関する研究はまだ初期段階にあり，この材料の広範な使用を促進するために，あらゆる分野でさらなる実験的キャンペーンが必要である。
アルカリ活性化材料の前駆体としてのMIBAの使用に関する研究は少ないにもかかわらず，副産物に通常見られるアルミノケイ酸塩の組成により，有望な結果を示している。MIBAは反応性があり，非常に微細であることから，アルカリ溶液に溶解すると，セメントに代わるバインダーが形成され，建設関連製品の製造に付加価値を与えることができる。これ以外にも，アルカリによる活性化は，有害な化合物をそのポリマー微細構造内に結合させるのに適度な効果がある。
MIBAは，最小限の処理を施したものとアルカリ水熱処理を施したものの両方が，排水中の染料や有害元素の除去，および埋立地ガスの浄化のための吸着材として，天然ゼオライトやその他の選択肢と同等の品質で良好な性能を示すことができる。吸着剤は容量が限られているため，MIBAを用いた吸着剤は経済的にも魅力的な選択肢となります。しかし，いくつかの結果から，この製品はいくつかの元素の高い移動性を示す可能性があることがわかっており，これを軽減するためにはさらなる研究が必要である。
農業における土壌代替物としての灰の使用に関しては，重金属の蓄積とその結果としての動植物の生物毒性のリスクが，肥料としてのいくつかの良い特性を上回ると一般に示されている。したがって，農業用地へのMIBA（できれば風化したもの）の散布は厳密に規制されなければならず，その最大量は，灰からの溶出可能な元素の量と土壌中の元素の量との関係に基づいて決定されなければならず，そうすれば，後者が深刻な汚染を受けることはないだろう。
MIBAは，セラミック製品の製造に一般的に使用される材料と非常に高い互換性を持っています。高温処理後の製品は，十分な緻密さと機械的性能を備えています。また，MIBAに含まれる有害元素の固定化にも有効であり，環境に優しい製品を作ることができる。しかし，セラミック製品の機械的・物理的特性はMIBAの粒子径に影響されるため，性能を向上させた材料を得るためには，粉砕時間を長くして微粉化することが好ましいが，粉砕にはコストがかかる。

これまでの研究では，1400～1500℃の高温をかけることで，MIBAの化学的・鉱物学的組成に適合したガラスがかなり容易に製造できることがわかっている。その結果，従来のガラスとほぼ同様の物理的・機械的特性を持つガラスが得られる。さらに，このプロセスに別の熱処理段階を加えることで，高密度化と結晶化が進み，透過性の少ないガラスセラミックスを製造することも可能である。このMIBAを含む結晶材料は，高いヤング率と曲げ強度を示すことができる。
MIBAの特異な組成とセラミックレンガやタイルの製造工程の柔軟性により，これらの用途に灰を使用することは，多量の残留物を有効利用する素晴らしい機会となります。MIBAを含むレンガやタイルは，機械的および耐久性に関する十分な性能を示します。しかし，MIBAは不均質であるため，かなり高い確率で汚染物質を含んでおり，材料の表面の美観が損なわれる可能性があります。このため，材料を焼結する前に，組成の評価と前処理を行い，投入量のばらつきを抑える必要がある。
MIBAを埋め立てカバーとして使用したり，MSWと混合して使用したりする研究では，有機物の生分解において微生物の活性が高まることが示されている。灰を添加することで，浸出液中の窒素や溶存有機物の含有量が減少する可能性があり，特に浸出液が混合廃棄物の中を再循環する場合には，その可能性が高い。生分解が進んだ結果，バイオガスの生産量が増加することも確認された。

No.23

Advances in geopolymer materials: A comprehensive review
ジオポリマー材料の進歩: 総説
Peiliang Cong, Yaqian Cheng
Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition) Volume 8, Issue 3, June 2021, Pages 283-314
https://doi.org/10.1016/j.jtte.2021.03.004
概要
ジオポリマーは，優れた機械的特性だけでなく，耐火性や耐腐食性など一連の優れた特性を備えているため，セメント産業の発展による二酸化炭素の排出を削減することができます。産業廃棄物やごみ焼却灰は，そのほとんどが勝手に積み上げられ，土地資源を占有するだけでなく，環境にも悪い影響を与えています。これらをリサイクルすることで，ジオポリマーの原料として利用することができます。ジオポリマーは，重金属や染料などの放射性物質を効果的に吸着することができ，今後の社会の発展に大きく貢献する材料です。しかし，ジオポリマーは，その優れた特性から，さらに応用範囲が広がっています。この論文では，ジオポリマー材料に関するいくつかの有用な情報を紹介し，ジオポリマーの重合，原料の供給源，活性剤の種類，調製方法，およびさまざまな応用分野などを説明した。また，ジオポリマー材料のフレッシュな特性や機械的性質に影響を与える要因について考察した。この論文では，ジオポリマー材料の欠点と応用限界を要約し，その進歩をまとめ，ジオポリマー材料の長期的な発展のための理論的基礎を築いた。
結論と展望
ジオポリマー材料に関するいくつかの有益な情報を紹介しました。この論文で紹介するのは，反応原理，原料の供給元，加振装置の種類，調製方法などジオポリマー材料の基本的な特性，および機能的な用途を，さまざまな分野で展開しています。
(1) ジオポリマー化は，主に前駆体の溶解，初期ゲルの形成，ケイ酸塩ネットワーク構造の形成の3つのステップから構成される。
(2) ジオポリマーの原料は，活性なシリコンとアルミニウムが豊富である。そして，ジオポリマーの原料には，一般にMK，FA，BFS，RM， また，一般的に使用される鉄鋼スラグ，SF，火山灰，廃ガラス，石炭ガンジュー，珪藻土，ボーキサイト，高マグネシウムニッケルスラグ等もあります。
(3) ジオポリマー材料の一般的な活性剤としては，水酸化ナトリウム，珪酸ナトリウム，炭酸ナトリウム，硫酸ナトリウム，炭酸カルシウム，水酸化リチウムなどが挙げられる。また，リン酸も活性剤に使用される。
(4) ジオポリマーの調製方法は様々である。現在，ジオポリマー材料の大部分は，固体材料を混合し，次に液体ミックスと徹底的に混合することを指摘する必要があります。
(5) ジオポリマーはセメント系材料に使用され，優れた機械的特性を発揮している。原料の種類，粒度，化学組成のすべてが重要な役割を担っている。固体と液体の状態，活性剤の種類と含有量は，すべてジオポリマーの強度に影響を与える。調製したジオポリマーの強度は硬化温度が60-100℃のときに高くなる。骨材の粒子形態と組成もジオポリマーに影響を及ぼす。
(6) ジオポリマー材料は，もともと防火のために使用されていた。現代生活の発展に伴い，生活環境の最適化はジオポリマーにとってより重要なものとなっている。遮音断熱材は，可燃性の有機ポリスチレン発泡プラスチックやポリウレタンフォームに取って代わるだけでなく，エアロジェル断熱材よりも経済的な材料となります。重金属吸着性能のあるジオポリマー材料は，原発漏洩の汚染問題解決に有益であり，原子力のさらなる発展に推奨される。ジオポリマー嫌気性消化システムの調整に使用される材料は，pH不安定な現象，およびジオポリマーを解決するのに役立ち，触媒として，それはあります。環境にやさしい。したがって，ジオポリマー材料の普及には大きな意義があると思われる。

本稿では，さまざまな材料から調製されたジオポリマーについてまとめた。そして，フレッシュな状態での特性や硬化後の機械的性質に影響を与える主な要因について考察している。しかし，化学組成が異なるため原料のばらつきや既存の試験規格の不確実性から，異なる原料から調製されたジオポリマーの長所と短所を徹底的に比較することは困難である。一般に，通常のモルタルやコンクリートと比較すると，ジオポリマーモルタルやジオポリマーコンクリートは機械的強度は同等かそれ以上で，酸や塩分に侵されにくく，耐火性にも優れています。
したがって，今後の科学技術の進歩に伴い，原料の管理・分析の強化，触媒の合理的使用，標準的なエフロレッセンス現象やASR評価の策定などにより，ジオポリマーがセメント材料として広く使用されることが期待されている。多くの研究者が期待しているように，ジオポリマーの応用は地球環境と経済にとって有益である。

No.24

A review on mixture design methods for geopolymer concrete
ジオポリマーコンクリートの配合設計法に関する総説
Ning Liら
Composites Part B: Engineering Volume 178, 1 December 2019, 107490
https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107490
概要
ジオポリマーコンクリート(GPC)は，産業副産物や加工品を化学的に活性化することで製造することができます。アルミノケイ酸塩を含む天然鉱物を使用しています。を使用した実証実験がいくつか行われています。GPCは，ポルトランドセメントコンクリート(PCC)に代わる，より環境に優しいコンクリートとして注目されています。GPC混合物の設計のためのガイドラインの仕様。これは部分的には，多くの変数が影響するためです。GPCの製造には，原材料の特性，活性剤の種類と量，硬化スキームなどがあります。しかし 建築業界の慣例として，適切な混合設計法がないため，広く受け入れられるには限界があります。GPCの産業界への展開 この論文では，現在報告されているGPCの混合設計法についてレビューする。スラグとフライアッシュを紹介した。様々な方法は，目標強度法，ターゲット強度法，フライアッシュ法の3つに分類される。性能ベース法，統計的要因モデル法である。その手順の違い，利点 また，これらの手法の長所と短所についても考察した。その結果，適切な設計方法を選択することが推奨される。実際の生産状況やGPCの要求性能に応じて選択する。
結論と展望
各種スラグおよびFAを用いたGPCの設計法が提案されている。このようなGPCの混合比率を検討した結果，次のような結論を得ることができた。
(1)最も多く使われているのは目標強度法である。AL/BとW/BはGPCの強度や作業性に相関しており，PCCにおけるW/Bと同様である。
(2) 定水量法に基づく方法は，一般に骨材の種類，繊度，グラデーション，最大骨材径を考慮する。このような設計法は，通常，GPCおよびPCCの既存の設計基準を参照する。
(3)結合材含有量一定法は，圧縮強度に依存する．GPCの強度は，骨材の影響が考慮されていない。GPCの粘性を高めるために高い含水率を必要とする場合があり，強度が低下する。
(4)ペーストの含有量を一定とする方法は，必要なペーストの含有量に依存する。GPCの作業性または圧縮強度。この混合比率は，充填モデルに従って骨材間の適度な空隙を得ることでペースト量を決定している。
(5) パフォーマンスベースアプローチは，GPCの製造の微妙さを維持しつつ，耐久性など他の性能も考慮したものであり，GPCを製造する上で非常に有効である。性能に基づくアプローチは，GPC市場の信頼性を向上させることに寄与する。
(6)統計的モデリング法は，設計パラメータ間の等質性を保ちながら，GPCの設計に時間効率を与えることができる。しかし，統計的関係の構築には，事前に大規模なデータベースが必要である。
科学・産業分野において，GPCの設計手法にますます注目が集まっています。 GPCの製造と応用を促進するために，今後の研究では以下の概念に焦点を当てる必要がある。
スラグ，フライアッシュ，活性剤の GPC に対する反応性の評価方法の確立。
・GPC のスラグ，フライアッシュ，活性剤の反応性に関する評価方法の確立， GPC 混合物の性能評価方法(特に耐久性)の開発
目標強度法，性能基準法，統計的要因モデル法からなる総合的な設計手法のさらなる開発。
GPC混合物のレオロジーに基づく設計手法のさらなる開発。

No.25

Geopolymer concrete as sustainable material: A state of the art review
持続可能な材料としてのジオポリマーコンクリート。最新技術のレビュー
Furqan Farooqら
Construction and Building Materials Volume 306, 1 November 2021, 124762
https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124762
概要
人口の増加や人類のライフスタイルの向上により，現代では建築物のエネルギー需要が急激に増加しています。エネルギー需要の急増，化石燃料の不足，環境問題は，持続可能で実行可能なインフラストラクチャの開発に重要な動機を与えています。Al2SiO3とNa2SiO3/NaOH（アルカリ活性化シリカ）を多量に含む様々な廃棄物から作られた，セメントを使わないジオポリマー（GP）複合材料は，持続可能性を目的とした優れた材料として発展しています。また，普通ポルトランドセメント（OPC）と比較して，温室効果ガスの排出が少ないという点でも好まれている。本論文では，GPコンポジットの持続可能な領域と最新技術について紹介することを目的としている。様々なジオポリマー廃棄物バインダーから作られたコンポジットの特性が示されている。さらに，GPコンポジットの微細構造と化学的特性についても議論しています。GPコンポジットの耐久性についても，様々な過酷な環境下での劣化を考慮し，強調されています。最後に，地球温暖化係数（GWP）評価を実施し，建築業界におけるGPコンポジットの実用的なアプリケーションも提供しています。
結論
GPCは，化学的活性を持つ廃棄物を原料としたサステナブルな新素材です。環境にやさしいコンクリートとして，OPCの代替建設材料として利用できます。 さらに，環境や経済的な要因から，既存のコンクリート製造材料の改良が求められています。GPCの製造に廃棄物を使用することは，廃棄の問題を減少させるだけでなく，OPCと比較して頑強な耐久性，超高強度，CO2排出量の減少など，頑強な特性を与えることができるのです。文献調査により，以下の結論が得られています。
1. プレキャストコンクリート業界では，初期強度が高く得られることから，GPCが利用されている。また，GPCの大規模な生産は，その重要な特性によるものである。
2.スラグ系GPは不定形粒子であるため，混合物の作業性を低下させる。また，GPはスラグの添加量が多いほど硬化時間が早くなり，圧縮強度や耐久性の面で有利となる.
3. MKをベースとしたGPCでは，機械的性質の大幅な向上が認められた．また，MK粒子を細かくすることにより，気孔を充填し，気孔率を低下させ，充填密度を増加させることができた.
4.代替セメント材料および廃棄物を用いたOPCベースコンクリートおよびGPCの製造は，耐久性の向上，経済性，温室効果ガス排出の削減，RC部材の耐用年数の向上，およびケイ酸ナトリウム溶液の削減と関連している。さらに，このような材料は従来のOPCの最適な代替品となる。
5. FA入りGPCの圧縮強度は，アルカリ溶液の濃度および温度の上昇に伴い向上したが，アルカリ/FA比の上昇に伴い低下した．また，Na2SiO3/NaOH比が2.5までは強度が向上したが，それ以降はNa2SiO3/NaOH比の上昇に伴い低下した。また，静置した試料は，Na2SiO3/NaOHの比率が高くなるにつれて，熱硬化前の1日間，強度発現に有効であった。
6. GPは高温に耐えることができるため，熱的に安定であると考えられる。このような材料の膨張率，重量減少，熱伝導率はOPCよりはるかに低く，GPの成分に起因していると考えられる。GPの膨張はシリコン系フィラーによって向上させることができるが，熱伝導率には悪影響を及ぼす。
7. SEM像から，水酸化ナトリウムに対するケイ酸ナトリウムの比率を2～2.5に減少させたバインダーは，より多くの表面積を持つため活発に反応し，余分な水の存在にもかかわらず結合する傾向があることがわかった。しかし，高温下では水酸基の減少が観察された。
8. GPCの耐久性の側面については，限られた研究しか行われていない。その結果，GPCは収縮に対して良好な耐性を有し，OPCを用いたマグネシウムに対してより良い性能を発揮することが示された。

9.FA系GPCの構造用途の実験はほとんど行われていないため，GPCを建設業界に広く普及させるために，様々な構造用途の分野でより集中的な研究が必要である。GPCの使用は，建設分野における持続可能な建設の実現に向けた有望な技術であると思われる。
10.本研究の結果，GPMは環境に優しい建築材料として，将来的に従来のセメントモルタルの代替材料となる可能性があることが示された。
11. GPC は環境に優しい建築材料であり，より優れた耐久性と機械的特性を有している。産業廃棄物や農業廃棄物が十分に利用可能であれば実現可能であり，OPC コンクリートの代替材料として優れていると考えられる。
12. 研究者たちは，HCWA，FA，PFOA，MK，シリカフューム，GGBFS，またはRHAの組み合わせといった代表的なアルミノケイ酸塩の効率を比較しました。しかし，ほとんどの研究はFAベースのジオポリマーモルタルとコンクリートで行われました。これは，FAが他のアルミノケイ酸塩ベースのジオポリマーよりも優れた物理的および機械的特性を提供するためです。 GPCの最も一般的に採用されている活性化剤はNaOHとNa2SiO3，またはその混合物です。ジオポリマー化反応には，体積，モル濃度，反応性などのいくつかの要因が重要な役割を果たします。より優れた耐久性と ジオポリマーブレンドにおける最適な活性剤用量は重要である。水酸化物系活性剤と比較すると，可溶性ケイ酸塩はジオポリマー化反応が早いことがわかります。
13. GPC の微細構造，力学特性および耐久性は，配合設計における各成分の配合量に依存する。配合設計の際には，結合剤に対する活性剤の割合，水酸化物ケイ酸塩の割合，結合剤の量，活性剤の投与量およびモル比，骨材の種類および等級，高性能AE剤の量，結合剤，水および砂の割合など，機械的性質の向上にかかわるすべての事柄を考慮しなければならない.
14. GPCにOPCを配合することにより，コンパクトで緻密なGPCが得られる。 C-S-H とGP生成物の両方を含むことにより，微細構造を形成している。そのため，耐久性，力学特性，組織挙動，耐吸水性が向上する.
15. これまでの研究では，NaOH/Na2SiO3 比，NaOH/スラグ比，結合剤/活性剤比，異なる活性剤の混合，硬化環境，時間，温度，骨材の種類，ナノ粒子の含有など，多くの変数について，力学特性，耐久性，微細構造の改善に関する研究が行われてきた。
16. 3Dプリンティングや繊維で強化したGPCなど，最近のGPCの開発については，さらに詳細な研究が必要である。持続可能な成長は，地球温暖化係数（GWP）推定やライフサイクル評価（LCA）技術によって分析することができる。しかし，アルミノケイ酸塩と活性剤の様々な形態に基づいて，さらなる調査が必要である。
17. 一般的な混合設計の開発，新しく適合したアルミノシリケートと活性剤，微細構造，延性，エフロレッセンス，初期収縮，費用対効果，取り扱いやすさ，および現場適用可能なGPCの製造に関する実験研究を実施することが推奨されます。
以上の考察から，緻密で詰まった微細構造を伴うGPCの脆性挙動を研究する必要がある。 さらに，GPを用いたコンクリートの剛性低下，回復，および多軸応力状態について検討し，構造性能の理解を深める必要がある。

No.26

Geopolymers in construction - recent developments
建設分野におけるジオポリマー - 最近の動向
Mohsin Nawaz, Ana Heitor, Muttucumaru Sivakumar
Construction and Building Materials Volume 260, 10 November 2020, 120472
https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120472
概要
ジオポリマーは，アルミノケイ酸塩をアルカリで活性化した無機材料である。アルミノケイ酸塩の原料は，天然に存在するもの（カオリン，メタカオリン，もみ殻灰，火山岩粉末など）と，工業プロセスによって生産されるもの（フライアッシュ，高炉スラグなど）がある。ジオポリマーの建設資材（コンクリート製造や土壌安定化など）としての応用の可能性は過去に研究されてきたが，その普及は限定的であった。これは，この技術がまだ比較的新しく，この分野の研究がまだ立ち上がっていないことが主な理由です。しかし，従来のバインダー（セメントや石灰など）の代わりにジオポリマーを使用することは，特にその製造に費やされるエネルギーや温室効果ガス排出の面で，環境面で大きな利点があります。建設業界では，持続可能な社会の実現に向けた取り組みが進められており，この分野での研究も進んでいます。本論文では，様々な前駆体から合成されたジオポリマーに関する過去の研究，ジオポリマー化プロセスに影響を与える要因，ジオポリマーの微細構造特性，さらに機械的，化学的，熱的，環境的特性について包括的に説明することを目的としている。さらに，土木用途の建設材料としてのジオポリマーの使用に関連する最近の動向についても論じている。研究の結果，ジオポリマーは，せん断強度と耐久性の面で従来のバインダーやコンクリートと同等またはそれ以上の性能を達成することができ，かつ環境負荷も低減できることがわかりました。
結論と展望
ジオポリマーは，天然でも無機でも，建設現場での応用に適した特性を持っています。最も一般的な用途は，土壌の安定化およびコンクリート産業である。ジオポリマー技術をより広く利用するために多くの研究が行われていますが（沿岸インフラなど），前駆体材料を最大限に活用するためには，さらなる研究が必要な側面が数多くあります。この分野の将来の研究は，セメントや石灰などの従来の材料が原因で現在発生している様々な問題に対する環境に優しい解決策として，この材料の商業的・産業的成功を高めるものです。例えば，いくつかの課題を以下に提案する。
(1) 本来，ジオポリマーの生産制御や性能向上のためには，熱力学，動力学，中間状態構造，-Si-O-Alのオリゴマー化・重合度などの反応機構を解明することが必要である。これは，ジオポリマーの性能を向上させ，追加元素や添加剤の配合を決定するために不可欠である。
(2) ジオポリマーペースト，モルタル，コンクリートは脆く，ひび割れしやすいものが多い。このような挙動は，用途に制約を与えるだけでなく，長期耐久性にも影響を与える。ひずみ硬化挙動を示すジオポリマーを確立するためには，潜在的な添加剤の検討とアルカリモル比の調整が必要である
(3) また，ジオポリマー材料は，有害金属の吸着・固定化除去や二酸化炭素（CO2）隔離などの用途も出てきている。しかし，最近の研究では，その性能はまだ満足できるものではなく，レシピ成分の研究が必要であることが分かっている。また，フライアッシュベースのジオポリマーにバイオマスを配合することで，新規軽量耐火材料の一種として新たな用途が開発される可能性があります。最後に，ジオポリマーは，土木工学産業において経済的で持続可能な材料であることが間違いなく証明されるでしょう。

No.27

A review on developments of environmentally friendly geopolymer technology
環境に優しいジオポリマー技術の開発に関するレビュー
R.S. Krishnaら
Materialia Volume 20, December 2021, 101212
https://doi.org/10.1016/j.mtla.2021.101212
概要
本研究では，ジオポリマーコンポジットの構成要素（バインダー，活性剤，骨材）および製造技術に関する最新の開発状況について，その概要を紹介することを目的としている。従来のアルミノケイ酸塩バインダーの生態学的，経済的，産業的な限界から，代替バインダーがこの間追求されてきた。この論文では，フェロクロム灰，鉱山尾鉱，籾殻灰，赤泥などの最新のバインダーについて取り上げている。また，鉱山尾鉱（鉄鉱石尾鉱），再生・軽量骨材などの天然細骨材や粗骨材のジオポリマー調製への代替に関する現在の進歩についても過去の文献からレビューしています。また，従来ジオポリマー複合材料の調製における結合剤と考えられていた新しいクラスのグリーンアルカリ性および酸性活性剤に関する開発にも焦点を当てる。強度と耐久性に優れた複合材料を実現するための有効性を研究するために，さまざまなジオポリマーの製造方法について簡単に説明した。この論文は，機械的特性を向上させた，より持続可能で費用対効果の高いジオポリマー複合材料を実現するためのさらなる実験的研究作業を促す役割を果たすと思われる。
結論
本論文では，様々なバインダー，活性剤，アグリゲート，製造技術を含むジオポリマーコンポジットの最近の開発について包括的にレビューしている。以下の結論が導き出された。
フライアッシュや高炉スラグに加え，フェロクロムアッシュ，フェロクロムスラグ，鉱山尾鉱，もみ殻灰，赤泥など，様々な産業副産物がジオポリマーのバインダー材料として広く研究されている。フェロクロムアッシュは，最適な濃度のアルカリ活性剤溶液を使用すれば，ジオポリマー前駆体となる可能性があることが報告されている。フェロクロムアッシュベースのジオポリマーを理解するために，さらなる再探索が必要である。鉱さい中の重金属や難分解性元素（As，V，Sbなど）を鉱さいの地中重合で効率的に固定化できることは，様々な研究により確認されている。また，籾殻灰の含有量を増やすと，そのスポンジ状の粒子形態により，機械的特性が大きく影響されることが示された。また，籾殻灰の分解・反応速度が低いこともジオポリマーの機械的特性を低下させる原因であり，30%を上限とすることが示唆された。赤泥と他の前駆体を用いたジオポリマーの製造には，赤泥のアルカリ熱前活性化が有効であることがわかった。
軽量ジオポリマーコンクリートの製造には，ボトムアッシュ，クラムゴム，フェロニッケルスラグ，建設・解体廃材，鉄や尾鉱などのさまざまな産業副産物が軽量細・粗骨材として使用されます。粗骨材として100%ベントナイトクレーを用いた軽量ジオポリマーコンクリートの28日目の圧縮強度が35MPaであった。
シリカフューム，廃ガラス粉，サトウキビバガス灰，もみ殻灰をジオポリマーのグリーンアルカリ活性剤とすることができることは，多くの研究により明らかにされている。また，室温で硬化させたもみ殻灰と水酸化ナトリウムを用いたジオポリマーは，標準的なケイ酸ナトリウム-水酸化ナトリウムを用いた場合と同様の微細構造を示すことが分かっています。同様の結果は，シリカフュームベースの活性剤についても報告されている．廃ガラス粉末ベースの活性剤で製造したジオポリマーは，籾殻灰ベースの活性剤で製造したものよりも優れた機械的および微細構造的特性を示した。リン酸やリン酸アルミニウムなどの酸系活性剤は，アルカリ系活性剤の代替となる可能性があることが判明した。リン酸塩系活性剤で製造したジオポリマーは，アルカリ系活性剤よりも優れた力学的および微細構造的特性を示し，アルカリイオンの不在と架橋酸素の増加が優れた性能の理由であることが明らかになった。
最近開発された高温でプリセットするホットプレス技術は，従来のキャスト型ジオポリマーよりも緻密なミクロ構造と高い機械的特性を示す。また，ジオポリマーの3Dプリンティングも最近研究されており，建設産業におけるジオポリマーの普及に有望な可能性を示している。ジオポリマーの強度に基づいた配合設計の標準化は有用であり，さらなる研究が必要である。

No.28

A review on properties of fresh and hardened geopolymer mortar
ジオポリマーモルタルのフレッシュおよび硬化体の特性に関する総説
Peng Zhang, Yuanxun Zheng, Kejin Wang, Jinping Zhang
Composites Part B: Engineering Volume 152, 1 November 2018, Pages 79-95
https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.06.031
概要
ジオポリマーモルタルとは，砂とジオポリマーを用いて製造されるモルタルのことで，アルカリ溶液を用いて活性化したアルミニウムとケイ素を含む基材をバインダーとして構成されています。ジオポリマーモルタルは，その持続的な特性から，研究者やセメント産業界でその特性や用途が注目されつつある。本研究では，ジオポリマーモルタルのフレッシュ性能（作業性，硬化時間，フレッシュモルタルの温度），物性，力学特性（圧縮強度，引張強度，弾性特性，曲げ性能，接着挙動，破壊挙動），耐久特性（耐酸性，耐高温，耐凍性，吸水性，収縮性）および微細構造解析について概説した．また，本研究では，さまざまな原料を基材として調製したジオポリマーモルタルの各種特性についても検討した．本研究の結果，ジオポリマーモルタルは，環境に優しい建築材料として，将来的に従来のセメントモルタルの適切な代替材料となり得る，大きな実現可能性と応用の見通しを示した。
結論
ジオポリマーモルタルの特性および用途の検討は，その持続的な利点から，研究者やセメント系産業界からますます注目を集めている。そこで，様々な原料を用いて調製したジオポリマーモルタルの特性について，最近および過去の119の文献から検討した．新鮮なジオポリマーモルタルの作業性，硬化時間，温度，および硬化したジオポリマーモルタルの物性，圧縮強度，引張強度，弾性特性，曲げ性能，接着挙動，破壊挙動，耐酸性，耐高温性，耐凍性，吸水性，収縮性，微細構造について検討した．本研究では，一般的なFA，GGBFS，BA，循環流動層燃焼FA，POFA，メタカオリン，カオリン，火山灰，粘土，高カルシウムフライアッシュ，空冷スラグ，鉄鋼スラグ，パーライト粉砕，古紙スラッジ灰，もみ殻灰，フェロクロームスラグ，シリカ廃材などの各種原料を用いて作成したジオモルタルの上記特性について検討した．本研究の結果，ジオポリマーモルタルは，環境に優しい建築材料として，将来的に従来のセメントモルタルの適切な代替材料となり得る，大きな実現可能性と応用の見通しを示した。

No.29

Impact of incorporation of volcanic ash on geopolymerization of eco-friendly geopolymer composites: A review
環境対応型ジオポリマー複合材料における火山灰の混入がジオポリマー化に与える影響 レビュー
S Luhar, N P Rajamane, O Corbu and I Luhar
IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 572 (2019) 012001
https://doi.org/10.1088/1757-899X/572/1/012001
概要
結論と展望
火山灰は，ジオポリマーコンクリート，ジオポリマーモルタル，ジオポリマーセメントなどの新しいジオポリマーコンポジットを開発するための適切で持続可能な材料として考えることができる。ジオポリマーは，世界各地で容易に入手でき，環境に対する悲観的な影響を低減し，費用対効果も高いため，その応用は有利であることが証明されています。しかしながら，スラグやフライアッシュなどの産業廃棄物の埋め立てや処分の問題を解決するために，多くの研究者によってこれらの原料は他のアルミノケイ酸塩に比べて採用が遅れていることが示されています。また，火山灰のジオポリマー化の温度依存性については，まだ方法論的に検討する必要があるとの誤解もあるようです。火山灰を原料とするジオポリマー複合材料（GP-コンクリート，GP-モルタル，GP-セメント）は，OPCと比較して，優れた力学的・物理的特性および耐久性を示しています。
しかし，フライアッシュ，スラグ，メタカオリンなどのジオポリマー複合材料と同様に，その普及のために，データの空白を埋め，知識を深めるための補足研究が必要である。炭酸化，アルカリシリカ反応（ASR），凍結融解耐性などの耐久性試験にも重点を置く必要があります。また，火山灰を原料としたジオポリマーコンポジットは，繊維強化ジオポリマーと合わせて，構造物への適用性を事前に評価する必要がある。これまでのところ，この軽量で多孔質の原料，すなわち火山灰を用いて開発されたジオポリマーコンポジットの詳細な調査は行われておらず，したがって，あらゆる種類の前駆体に一般化することはできないため，製造する際の原料としての適性を評価することが非常に重要である。
さらに，火山灰を原料として開発されたジオポリマー複合材料のLCA（ライフサイクルアセスメント）のレビューも，そのような製品の持続可能性とこの新規で革新的なジオポリマー技術の潜在的利点に光を当てるという目的から望ましいと思われる。特に，その悲観的な影響に悩まされている国々では，政府やメディアを通じて，技術者，建設関係者，環境保護主義者などの間で，その体系的な適用を促進するための啓発活動が行われるべきです。

No.30

Utilization of waste rice husk ash for sustainable geopolymer: A review
廃籾殻灰の持続可能なジオポリマーへの利用。レビュー
Sk S. Hossain ,, P.K. Roy , Chang-Jun Bae
Construction and Building Materials Volume 310, 6 December 2021, 125218
https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125218
概要
水稲栽培国では，精米過程で籾殻（RH）が大量に発生する。この籾殻は，通常，ボイラー燃料として利用され，固形廃棄物である籾殻灰（RHA）を生成します。RHAは，生物起源シリカを多く含み，ポゾラン反応性に優れているため，持続可能な建設材料として使用することができます。そのため，過去10年間にわたり，RHAをセメント系材料，例えばジオポリマーの製造に利用するための多くの研究が行われてきた。ジオポリマーは，通常のポルトランドセメント（OPC）に比べ，CO2排出量の削減，優れた物理的・機械的特性，廃棄物の利用が可能であるなど，多くの利点を有している。本研究では，ジオポリマーをよりクリーンに製造するために，廃棄物であるRHAの利用について検討した。本研究では，作業性，硬化時間，圧縮強度，耐久性などの主要な特性に対するRHAの配合効果について詳細に検討した。RHAのジオポリマーへの影響を評価した結果，10-20 wt%のRHAの配合がジオポリマーの短期および長期特性を向上させることがわかった。したがって，RHAの使用は，建設業界にとって持続可能で環境に優しい方法であると言える。さらに，本論文では，より持続可能性を高めるための今後の研究の方向性を示し，ジオポリマーをよりクリーンに製造するためにRHAを活用することを推奨している。
結論
廃RHAを活性剤の合成やジオポリマーのシリカ源として利用することで，OPCに代わる持続可能で環境に優しい材料となります。また，廃棄物を建設資材として利用することも可能である。RHAベースのジオポリマーに関する現在の文献を総合的に検討した結果，以下の重要な事実を導き出すことができました。
RHAの特性は，原産地の土壌化学，植林時の使用肥料組成，RHの燃焼温度と時間などの生態的性質に依存します。一般にRHAは85-95wt%の生物起源シリカを主成分としており，この値は熱処理，酸洗浄，アルカリ反応等の加工パラメータに大きく影響される。
RHAは優れたポゾラン活性（PA）を有し，その特性はRHA粒子の細かさ，表面積，および現存するシリカの結晶化度合いに依存する。したがって，焼却温度（700℃以下），焼却時間，粉砕パラメータ（粒径～5～10μm）は，RHAのPAに影響を与える。
RHAは，一般にジオポリマーの活性剤として使用される安価なナトリウム/カリウムシリケートを合成するための非常に優れた生物由来のSi源である。Siの溶解効率は，NaOH溶液の濃度，温度（80-100 °C），およびRHAに含まれるシリカの結晶化度に依存する。さらに，非晶質シリカを保持するRHAは，従来のオートクレーブプロセスよりもケイ酸ナトリウムの処理コストを削減することができる。
MKを10～20 wt%程度RHAで置換すると，ジオポリマーの特性に好影響を与えることがわかった。RHAの含有は，充填効果およびジオポリマー中の強いSi-O-Si結合の数を増加させることにより，CSを著しく改善し，収縮率を低下させる。しかし，ジオポリマーの作業性（流動性）は低下し，望ましい流動性を得るためには，やや多めの水量が必要となる．RHAの添加により，その層構造およびジオポリマー組成物中のSiO2/Al2O3比の増加により，セットタイムが延長される。
また，RHAの添加により防水性（K，軟化係数）および耐凍害性が20wt%まで向上する．しかし，過剰なRHAや未粉砕のRHAは，それぞれAl種の減少と全マイクロポア容積の増加によりジオポリマーシステムに負の影響を及ぼすことが明らかとなった。さらに，RHAは軽量なGCを作るための良い候補となります。
RHAは，FAおよびBFSベースのジオポリマーにおけるジオポリマー化およびポゾラン反応性の組み合わせに寄与している。したがって，このシステムではさらにC-S-Hゲルが形成され，緻密な微細構造と強度の向上がもたらされます。RM系ジオポリマーはRHAがRM中のアルカリ化合物と活発に反応し，ジオポリマー化するため，低濃度の活性化剤が必要である。

本研究から，ジオポリマーの本質的な特性を損なうことなく，廃RHAをジオポリマーの製造に15%程度使用できることがわかった。また，ジオポリマーの製造にRHAを利用することで，機械的特性の向上，製造コストの削減，環境への悪影響の最小化が期待できることが示唆された。このレビューは，産業界がRHAをリサイクルするための新しい道を見つけ，学術界が将来の研究の方向性を見出すのに役立つことでしょう。

No.31

Biomass ashes from agricultural wastes as supplementary cementitious materials or aggregate replacement in cement/geopolymer concrete: A comprehensive review

セメント/ジオポリマーコンクリートにおける補助セメント材料または骨材代替としての農業廃棄物由来のバイオマス焼却灰：包括的レビュー

Blessen Skariah Thomasら

Journal of Building Engineering
Volume 40, August 2021, 102332

https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102332

概要

本論文は，普通ポルトランドセメント（OPC）およびジオポリマーコンクリートへの農業廃棄物由来のバイオマス灰の配合に関する最近の動向を包括的にレビューすることを目的としている。さまざまなバイオマス灰の材料特性，およびそれらがフレッシュおよび硬化したコンクリートの特性（すなわち，力学特性および耐久性）に及ぼす影響についてレビューする。OPCの一部を副産物，例えば竹葉灰，ナツメヤシ灰，ゾウ葉灰，バナナ葉灰，オオバコ皮灰，稲わら灰，オリーブ粕灰，麦わら灰，コーンコブ灰で置換することにより，二酸化炭素の排出量と地球温暖化の抑制に寄与することができます。また，ゼロ・ウェイスト技術や持続可能な開発の実現にも貢献することができます。

本論文では，グリーンおよびサステイナブルなセメント系材料の世界的な状況，組成，および灰の調製方法に関する重要な背景情報を提供し，次にその潜在的な用途について検討する。また，さらなる研究が必要な分野と，これらの非伝統的な補助セメント材料（SCMs）を利用することで起こりうる負の影響についても言及する。このレビューから得られた知見は，セメントコンクリート中のポゾラン材料として，あるいはジオポリマーコンクリート中の代替活性剤として，建築材料として必要な特性を備えたバイオマス灰の利用が可能であることを確認するものである。また，このレビューにより，コンクリート中に取り込まれたバイオマス灰について，学術・基礎研究および建設業界のためになる知見が得られることが期待される。

結論

本論文では，農業系廃棄物のバイオマス灰を含むコンクリートに関する先行研究および現在の動向について，包括的なレビューと知見を紹介する。これらの知見から，竹葉，ナツメヤシ，象牙葉，バナナ葉やオオバコの皮，稲わら，オリーブくず，麦わら，コーンコブなどのバイオマス灰をセメントコンクリートのポゾラン材料として，あるいはジオポリマーコンテストの代替活性剤として，建築材料として必要な特性を有することが確認された。したがって，農業バイオマス灰をセメントコンクリートで効率的に使用するために，この分野でより焦点を絞った研究を行う必要がある。これは，建設業界の持続可能性に向けた有望かつ重要な貢献であると思われる。

９．おわりに

本研究小委員会では，水ガラスを水酸化ナトリウム溶液で希釈したアルカリシリカ溶液にメタカオリンを活性フィラーとして接触させて固化するジオポリマーから，高炉スラグ微粉末およびフライアッシュを活性フィラーとして接触させて固化する AAM までの各種のセメントフリーAAMs を対象とし，それらの基礎物性値，コンクリートを構造部材として利用する際の諸物性値に関する国内外の知見を整理した. そして, セメントコンクリートと比較した際の AAMs の利点と不利な点を整理することと併せて，セメントコンクリートで対象としなかった利用方法の模索を行った.

（１）AAM コンクリート

セメントコンクリートで使用するセメントとは異なり，AAMs の材料特性は高炉スラグ微粉末およびフライアッシュ等の活性フィラーの品質，そしてそれらの組合せ方によってコンクリートの流動性，力学特性が変化に富むものになる．また，アルカリシリカ溶液の濃度等の設定によってコンクリートの流動性と圧縮強度等の物性値も変化する．材料面ではこのような現象が認められるが，コンクリートの圧縮強度を一定の水準で確保できる材料構成，配合を設定した上で構造部材の設計に関する研究が現在国内外で進められている．

（２）AAM の特性に応じた用途

AAM の硬化までの反応メカニズムはセメントの水和反応とは異なり，アルカリシリカ溶液と活性フィラーを接触させることで Si，Al 等のイオンの縮重合反応を進展させる．その過程で特定の元素（有害元素）を取り込む効果，縮重合反応で形成された相に吸着する効果がもたらされ，一定の固定化効果を得ることが出来る．この効果を活用した AAM の利用方法が期待される．

AAM の活性フィラーとしてアルカリシリカ溶液に Al 等の元素を溶出，拡散させる効果をもたらす材料として，下水汚泥溶融スラグ，バイオマス灰，石炭灰埋め立て処分場の既成灰と併せて火山灰の利用も有望であり，実用化に向けた研究の深化が期待される．

使用材料の組合せと配合の調整が必要となるが，塩化物の浸透抑制効果をもたらすコンクリート，もしくはコーティング材を製造することが可能であり，塩害に対する抵抗性が求められる環境での AAM コンクリートの使用が期待される．

月や火星におけるジオポリマーを利用した建設資材製造に関する検討が 2015 年頃から進められており，模擬月土にケイ酸ナトリウム溶液および NaOH を加えることで硬化体を製造できることが示されている．なお，月面には Na の存在量が少ないため，地球から補給する必要がある等の課題整理も行われている．

（３）普及に向けた取組み

社会実装に向けては試験体を対象とした室内試験を通した基礎データの集積と現場での試験施工を通した実績作り，そして公的機関における技術審査等を通したデータのさらなる集積を通して規格化・基準化を図る必要がある．

AAM コンクリートの規格化・基準化に際しては，技術面で利害関係者ならびに中立者間で合意形成を図ることが肝要となるため，定期的もしくは断続的に本委員会のような活動を実施することを期待する．

以下では，各章の項目ごとに AAMs の特徴や要点をピックアップし，示す．

(a) 材料特性ならびに製造方法（第２章）

（1）**表 9.1.1** に，活性フィラーならびにアルカリ溶液に着目した場合のジオポリマー（GP）の分類を示す. 活性フィラーによる分類では, AAM, GP に加えて, FA-BFS 併用系 GP がある. わが国では, FA-BFS 併用 GP に関する研究例が多く,「FA のみを使用した場合」と「FA-BFS 併用系」は低カルシウムの観点からいずれも GP とすることとする．アルカリ溶液による分類には 2 系統ある．「Na 系(ナトリウム系)」と「K 系(カリウム系)」の比較では，材料コストは Na 系が K 系よりも低いことから，一般には Na 系が用いられる．施工性や耐高温性は K 系の方が有利である．「一般法」と「溶解法」の比較では，前者が広く用いられている．「一般法」はアルカリ溶液の粘性が高く，GP の製造・施工に難があるが,「溶解法」と比べて溶液の安全性は高い.「溶解法」は水ガラスを使用しないので GP の粘性を大幅に低減でき，その結果として配合の自由度が格段に高まるなどの利点も多く，工場製品を中心に GP 普及の牽引役となることが期待される．一方，苛性ソーダを GP 練混ぜ時に直に添加することから，作業安全性に対する特別な配慮が必要となる．

表 9.1.1　AAMs・GP の分類

対象	種類		材料	生成物
活性フィラー	AAMs	AAM	高炉スラグ微粉末（BS）など	C-A-S-H
		GP	フライアッシュ（FA），メタカオリン（MK）など	N-A-S-H
		FA-BS 併用系 GP	FA,BS（BS 置換率 30%以内）	N-A-S-H C-A-S-H
アルカリ溶液①	Na 系		ケイ酸ナトリウム（水ガラス） 水酸化ナトリウム（苛性ソーダ）	N-A-S-H
	K 系		ケイ酸カリウム，水酸化カリウム	K-A-S-H
アルカリ溶液②	一般法		水ガラス，苛性ソーダ，加水	
	溶解法		シリカフューム（SF），苛性ソーダ，加水 ※SF と苛性ソーダから水ガラス成分をつくる	

（2）高炉スラグ微粉末とアルカリ溶液で製造した AAM モルタルの強度，長さ変化，高温抵抗性を調べた．その結果，次のことが分かった．①材齢と圧縮強度の関係は，標準養生を施した OPC モルタルの場合と同様の傾向がある．また，封緘養生と気中養生の違いは見受けられない．②材齢 28 日における曲げ強度／圧縮強度は，およそ 10%であり，OPC モルタルの場合（およそ 15%）よりも 5%程度小さい．③収縮ひずみは，OPC モルタルの 2 倍以上である．また，乾燥に起因するものよりも，固化反応に起因するものが大きい.

（3）未利用資源の具体例を示した（もみ殻灰, パームオイルフライアッシュ, コールボトムアッシュ, 都市ごみ焼却灰，下水汚泥灰，木質バイオマス灰などの様々な業種からの灰，鉱山等より発生する鉱さ

い，アルミニウムを多く含む材料，廃ガラス，火山性堆積物，廃ガス脱硫セッコウ，コンクリート廃材など）．海外では多くの材料が研究対象となっている一方で，国内では未利用資源の利用に関する研究事例は，海外と比較すると多くない．ジオポリマーの反応に求められる活性フィラーの評価指標として，化学的特性として「ガラスの量」および「ガラスの質」，物理的特性として「比表面積（粉末度）」や「粒子形状」を挙げることができ，各種未利用資源の「ガラスの量」，「ガラスの質」に着目し，ジオポリマーに適用した際の反応性について考察した．

（４）既成灰を AAM 用材料として利用する場合は，混和材利用と同様に流動性と強度発現性の確保が課題になると推測できる．流動性を確保するためには高性能減水剤等の化学混和剤を利用する必要がある．しかし，AAM 用化学混和剤は国内では汎用品として流通しておらず，技術的に未成熟であるため，開発が望まれる．また，AAM の硬化では水ガラスのゲル相にフライアッシュ等の非晶質相から溶解した Al 等のイオンが拡散，固定化される必要がある．既成灰の表層部は一般的な混和材用フライアッシュとは異なり，低 Ca/Si 比となる C-S-H 相で覆われている場合があるため，AAM 母材となる水ガラス相に Al が溶解，拡散するまでに比較的長い時間を要すると考えられる．すなわち，AAM の硬化速度ならびに強度発現性は一般的なフライアッシュを利用する場合に比べて緩慢，そして低下すると推察する．AAM 用材料として既成灰を利用する場合はこれらの点に留意して予備的検討を行う必要がある．

(b) 試験施工の例（第３章）

（１）酸劣化が顕著で一般的なコンクリートまくらぎの適用が難しい箇所や，木質バイオマスの処理の問題から，それらを添加した GP まくらぎが，営業路線で型式登録をして試験施工されている．近年では，その耐酸性，耐糖性を活かした形で，従来のセメントモルタルでは適用が困難であり，再補修を繰り返した箇所，例えば食品関係箇所の床補修等への適用も試みられている．

（２）下水道函渠では酸による劣化が問題となり，GP の適用先として期待できる．発電所構内排水溝（熱排水：70～90℃）に適用した場合の 1 年後の結果は，同時施工したセメント製のものは表面の荒れ，剥離・剥落が認められたが，GP 製のものは目立った変状は生じていない．

（３）施工場所は，製鉄所構内の高温環境の擁壁（鉄筋コンクリート構造）補修工事に適用した．新開発の特殊混和剤を使用することで，施工に適した流動性を保ちつつ，常温養生でも強度の確保が可能な GP コンクリートを，一般的なコンクリートと同様の施工方法で大断面かつ狭あいな擁壁補修での打ち込みに成功した．

（４）強酸性温泉地に設置したフライアッシュ系ジオポリマー製の歩車道境界ブロックに，設置後間もなくエフロレッセンス（白華）等の表層劣化が発生した．その対策としてシラン系表面含浸材を塗布したが，顕著な効果は認められなかった．

（５）ジオポリマーでは乾湿繰返しによりひび割れが発生し，内部の鉄筋の腐食を促進させる可能性がある.ひび割れの原因として主として BS から溶出する Ca で形成される C-A-S-H の影響と考えられる．

(c) 構造部材への適用（第４章）

（１）GPC のヤング係数は，圧縮強度が同程度の場合，FA をベースとした GPC のヤング係数は AS3600-2009，ACI363R-92 の OPC 用の推定式より低い．一方で，高炉スラグをベースとした AAC のヤング係数は，OPC と同程度であるという研究例が多い．GPC の応力ひずみ関係に関する研究において，

圧縮軟化域を含めた完全な応力ひずみ関係を実験的に得た例は少ないが，FA をベースとした GPC の圧縮軟化挙動は OPC より顕著であり，その破壊性状が脆性的である．

（2）引張強度について，FA をベースとした GPC は圧縮強度が同等の場合，OPC よりも割裂引張強度が高い．圧縮強度が同等の場合，FA をベースとした GPC の曲げ引張強度は OPC よりも高い．FA をベースとした GPC は，引張強度が OPC より高いという報告があり，基本的には，OPC の設計に用いられている各種引張強度推定式を準用可能であると考えられる．しかしながら，GPC の力学特性は，使用材料や配合によって大きな影響を受けるため，現状では，実験により確認することが必要である．

（3）構造部材の設計において，応力―ひずみ関係が明確な材料に対して理論的に導くことができる曲げ応力や曲げ耐力については，従来のセメントコンクリートの諸数値の代替として GP コンクリートの圧縮・引張・せん断強度および剛性とポアソン比の値を使って求めればよい．ただし，鉄筋と GP コンクリートとの間に十分な付着があることが前提となる．

（4）構造部材のせん断については，理論的に算出できる設計値とは異なり，経験的に構築されたいわゆるマクロ式（たとえば，コンクリート標準示方書に記載されている曲げひび割れ幅算定式やせん断耐力算出式）を GP コンクリートに適用できるかどうかは，慎重に検討を行う必要がある．

（5）粘性が高いアルカリ溶液を使用する一般的な GP では，従来のセメントコンクリートのように粗骨材と一緒に練り混ぜて打ち込みをすることが必ずしも良い選択肢であるとは限らない．GP を適切に実用化する目的で粗骨材を除いたモルタルの状態での流動特性について把握するため，基本的な研究が行われてきた．GP モルタルの流動性を高めるには，強度が一定以上の水準を保つ範囲で水を増やしアルカリ溶液の濃度を低下させることが有効である一方，セメント用に開発された高性能減水剤の添加量を増やすことは必ずしも効果的ではないことが確認された．

（6）AAMs の建設用 3D プリンタへの適用は，海外において積極的に進められている．AAMs の場合には，配合の調整により比較的簡単に凝結時間を制御できること，活性フィラーや粘土鉱物の添加によりチクソ性を付与した材料である持ち味を活かした適用が試みられている．配合上の特徴としては，粗骨材を用いた配合はほとんどなく，基本的に細骨材（川砂や硅砂）を用いたものが多い．さらには，材料に粘り強さを付与するために短繊維を混和した AAMs の適用も進められている．海外で適用されている事例は，非構造部材（モニュメントや型枠など）であり，本格的なインフラへの利用には至っていない．これは AAMs そのものの耐久性に関する知見が不足していることによる．3D プリンタを活用する点については，社会実装においての課題とも考えられる装置導入のためのコストにより，特に，日本では研究者人口が増加していない．造形物に対するアイデアやニーズがあっても，それを試す手立てがないのが現状である．

（7）3D プリンティングというと，本来であれば 3D プリントにしか実現できない意匠性の高い造形物の製造が想定されるが，生産性向上や働き方改革，安全性向上に貢献できる技術としての展開も期待されていると考えられる．今後の研究開発により，さらに精緻かつ複雑な形状の構造物への適応や，高所や被災地等の安全面が懸念されるような現場での適用が期待される．また，より効率的な施工を行うためには材料面の工夫も必要であると考えられ，3D プリンティング施工に最適な材料の開発にも期待したい．

(d) 環境への影響（第５章）

（1）具体的に AAMs を対象に，LCA を行った研究事例は多い．例えば，Fardmehr らは，4 種類の活性フィラー（フライアッシュ，高炉スラグ微粉末，セラミック粉，やし油燃焼灰）を用いた AAMs 配合を対象に，CO_2 排出量を試算しており，フィラーの種類によって大きな差があることを示している．他産業からの副産物を原材料として使用することで環境負荷低減に貢献する材料として AAMs への期待は大きい．一方で，サプライチェーンの視点での環境影響については，対象となる材料によって大きく異なることも当該材料の特徴であり，それらを評価する仕組みや指標の開発が急務である．

（2）CO_2 排出量削減の観点からは，セメント協会は「脱炭素社会を目指すセメント産業の長期ビジョン」を策定し，2050 年の脱炭素社会実現に向け活動を行っている．現在のセメントクリンカー組成の大幅な変更や石灰石原料の利用量を減じたセメントに代わる新材料開発も取り組み（すなわちセメント自体の在り方を変化させようとする技術）もなされている．ジオポリマーに関連する研究は，このような観点からも今後極めて重要となろう．

（3）AAMs への有害物質の固定に関する研究は，それほど長い歴史があるわけではない．海外では，放射性物質や有害金属の固定に関する研究が 1988 年頃から少数であるが始まった．有害物質の固定研究は，2010 年代になって急速に増加し，特にこの 5 年程度の間に著しく増加している．これは，従来から用いられているセメントや重金属安定化剤（キレート剤など）では，固定化が不十分である元素やそれぞれの薬剤の使用における別の環境負荷問題を引き起こすなどから見直しがかかっていることやアルミノケイ酸塩として利用可能な産業副産物にターゲットとなる有害元素が含まれ，有害元素の固定と建設資材利用の一石二鳥の効果があることなどが考えられる．日本では東日本大震災以降，放射性廃棄物処分においてジオポリマー適用の研究が増加している．

（4）放射性廃棄物の固型化材として，セメント材，アスファルト，プラスチックが日本においては規定されている．地中埋設処分した放射性廃棄物固化体から放射性物質が全量環境中に漏洩しても周辺環境への影響がないように日本においては安全性評価がなされていることから，無機固型化材としてはセメント材が認められてきた．しかし，できる限り放射性物質が固化体から溶出しないようにすることが多重防護の第一段階として重要であり，海外などでは放射性物質の封じ込め性能がセメントよりも高いとされる AAMs が利用されてきている．セメントが水和反応であるのに対して，AAMs は脱水縮重合反応であることから，固化体中の水分を少なくすることが可能である．この点が水の放射線分解による水素の発生を抑制し，固化体の崩壊を防ぐことができることから，AAMs の利点として期待されている．また，福島第一原子力発電所事故により環境中へ拡散された放射性物質については，事故由来放射性物質汚染廃棄物として，特別措置法の下，処理処分されるが，従来からの放射性物質廃棄物としての処理処分の流れよりも一般廃棄物・産業廃棄物としての流れの中での対応が必要となり，放射性物質が比較的高い汚染物についてはより一層の固定化が求められている．

（5）地盤工学分野においては，従来よりセメント系固化材や石灰系固化材等の材料を用いて，強度変形特性，遮水性の改善や重金属等の有害物質の溶出抑制を目的とした地盤改良が広く実施されている．地盤改良分野においてもコンクリート材料と同様に，材料に起因する二酸化炭素発生量の削減，副産物等の有効利用は喫緊の課題であり，ジオポリマーをはじめとする AAMs の利用が進められている．一方，ジオポリマーの主材となるアルミナシリカ粉末材料（活性フィラー）としてメタカオリン（カオリン粘

土を焼成した非結晶性材料）が広く用いられているが，非晶質成分を多く含む天然の火山灰土や黒ボク土もアルミナシリカ粉末としての適用性があると考えられる．

（6）AAMs は従来のセメントコンクリートと同様にリサイクル可能な材料であると考えられる．AAMs のリサイクルは，天然資源の保護をはじめとする環境負荷低減に寄与でき．セメントコンクリートのリサイクルにおいて，再生骨材は再生骨材コンクリートの強度や耐久性を低下させることが多いが，GP コンクリートを破砕・分級したものを再び GP コンクリートの原材料として用いた場合には，条件によっては再活性化により強度の低下を抑制することができる可能性があり，最終的にはアルカリ活性溶液の使用量も減らせる可能性がある．一方，元となる AAM コンクリートの品質が新しい再生 AAM コンクリートの品質に及ぼす影響や，最適な製造方法，長期的な安定性，耐久性，AAMs のリサイクルの環境的な意義，経済性については，さらなる研究，検討が必要である．

(e) 普及のための取組み・新材料導入のためのマネジメント（第６章）

（1）ジオポリマーコンクリートの素材としての特性については，これまでの研究開発によって解明が進められてきた．現時点のわが国では試験施工止まりの状況であるが，今後の更なる技術開発の進展に伴って，徐々に商品として市場性を獲得し，一般普及を図っていくフェーズへと移行していくものと考えられる．いかに材料が高い性能を有していたとしても，ただちに一般普及するとは限らない．それには少なからず社会的な側面を踏まえた対応が必要である．本稿では近年の革新的な材料開発の例として，自己充填コンクリートならびに繊維補強コンクリートに着目し，それらコンクリートの一般化を図るためになされた取り組みや，実装において課題となった点を調べることで，ジオポリマーコンクリートという新たなセメント系材料がこれから一般化を図っていくために必要な方策を考察する．

（2）新材料を開発してから実用化した事例として，高性能コンクリートである「低収縮型高強度コンクリート」および「エトリンガイト生成系超高強度繊維補強コンクリート」を開発して実用化した例を紹介する．

（3）一般新材料を開発し，構造物に実装するためには，開発時の開発者側，実装時の構造物を建設，管理する事業者側の双方における新材料に対するマネジメントが必要となる．本節ではこのマネジメントについて，新技術の開発と実装や，低収縮型高強度コンクリート及び超高強度繊維補強コンクリート（UFC）を事例に，そのマネジメントについて述べる．新しい材料を含む新技術の開発から構造への実装のプロセスは大きく３つの段階に分けられる．３つの段階は，着手段階，開発段階及び実装段階であり，本節ではそれぞれの段階ごとに，高速道路会社における場合を例に事業者側の視点で解説する．

（4）高速道路事業では，従来から大量のコンクリートを使用して数多くのコンクリート構造物を施工しており，これに伴い，その時々の課題に対応するためコンクリート材料や施工方法に関する技術開発に取り組んでいる．ここでは，NEXCO 東日本における最近の事例として，超高強度繊維補強コンクリート（UFC）およびフライアッシュコンクリートを構造物に適用するための経緯や課題への取組み，試験施工の状況などについて紹介する．

（5）今後の材料開発が取り組むべき機能・性能として，AAMs の各性能に対する，特徴，特徴と紐づく用途ならびに用途開発，課題を**表 9.5.1** にまとめた．また，適用先としてトンネルへの可能性が高いことから，山岳工法について概説するとともに，本工法で用いられているセメント系材料を取り上げ，

現在使用されているポルトランドセメントの代替として新材料を適用していく場合の要求性能について述べる．

表 9.5.1　AAM の用途開発に関する課題

性能分類	特徴	特徴と紐づく用途	特徴と紐づく用途開発	課題
フレッシュ性能	・粘性が高いため，材料分離しにくい ・配合によって凝結性が大きく変化する（速硬性を付与することが可能） ・固化時の反応熱が低い見込み	・中高流動コンクリート（材料分離しにくい） ・吹付けコンクリート，補修材（速硬性）	・3D プリンター材料（材料分離抵抗性，速硬性,反応熱が低い） ・山岳トンネル一次支保-吹付けコンクリート（速硬性）	・AAM および GP 用各種化学混和剤の開発 ・反応熱の定量的評価
力学・変形性能	・静弾性係数が小さい ・鉄筋付着性は CC と同等	中略		
耐久性能	・耐酸性が高い（GP（低 Ca）） ・耐火性が高い見込み（GP（低 Ca））			
環境性能	・セメントが不要 ・産業副産物の有効利用 ・CO_2 排出量が少ない			
その他	・放射性核種，重金属の固定 ・水を用いずとも固化が可能（原材料や製造方法の工夫が必要） ・堆積岩の固化メカニズムに近い			

(f) 苛酷環境での適用（第 7 章）

（1）月や火星におけるジオポリマーを利用した建設資材製造については，2015 年頃から検討が進められている．その多くは模擬月土（シミュラント）をベースとしてジオポリマー試験体を作製し，その特性を調べる研究となっている．Montes らの研究では，JSC-1A と呼ばれる NASA が開発した模擬月土をベース材料として使用し，そこにケイ酸ナトリウム溶液及び NaOH を加え，養生日数 3 日および 7 日，養生温度 60℃および 23℃（室温）で固化させ，圧縮強度や放射線遮蔽性能などを調べた．その結果，①月資源をベースに建設資材レベルの圧縮強度（30MPa 程度）を有するジオポリマー硬化体を製造できること，②硬化前のジオポリマー試験体を静的に圧縮することによって，強度および放射線遮蔽性能を向上できること，③通常の月面の放射線環境に対してジオポリマーは遮蔽材として機能するが，太陽フレア活動に対しては別の対策が必要であることなどを示した．佐藤らは，JAXA 宇宙探査イノベーションハブ事業の公募研究において，月面でのジオポリマーの製造可能性に関する検討を行っている．一般にジオポリマーの製造には一定量の Na（水ガラスや NaOH）が必要となることから，Na を地球から補給する必要があると考えられている．しかしながら月にはわずかながらも Na が存在していることから，これを抽出することにより，水のみで現地資源を固化する可能性について検討した．その結果，①月資源成分のみからでは，建設資材として利用可能な硬化体を製造することは困難であること，②月で貴重な水はジオポリマー製造過程においてある程度回収可能なことなどを示した．また，これまでの検討状況から，月や火星で AAMs を利用するために解決すべき課題を**表 9.6.1** にまとめた．

表 9.6.1　月や火星で AAMs を利用するために解決すべき課題

分類	要　素	月・火星での適用	課　題	備　考
原料	活性フィラー	レゴリスの細粒分（45μm 以下）を利用？	レゴリスに活性フィラーとしての性能があるか？	本物のレゴリスを用いた評価が必要（シミュラントでは活性度が再現されているか不明）
	アルカリ活性化液	中略		
	不活性フィラー（骨材）			
	補強材			
製造	製造設備			
	エネルギ			
	環境			
組立・施工	組立（施工）設備			
	エネルギ			
	環境			
供用	環境			

（2）地下や海底環境での利用を促進するには，陸上環境との差異を考慮し，それぞれの環境下におけるジオポリマーコンクリートの特性を実験によって明らかにする必要がある．第一の環境違いは，常時周囲から持続応力が作用し続けることである．第二の環境の違いとして，周辺環境からの化学的劣化因子の供給が挙げられる．第三の環境の違いは使用環境が閉鎖空間となる点であり，内部空間を安全に使うためには水密性や耐火性に関して留意しておく必要がある．

（3）　AAM 中の塩化物イオンの移動については，例えば，文献のレビュー論文にまとめられている．アルカリ活性化セメント（AAC）ペースト，モルタル，およびコンクリート中の塩化物輸送に関する実験データのメタ分析が行われている．66 件の研究を，測定方法，混合物の設計，微細構造の形成（すなわち，空隙率，細孔径分布），塩化物の拡散，塩化物の結合に関するプロセスと構造・特性の関係に主眼を置いてレビューされている．この中では，細粒化や低結晶化といった物理化学的な前駆体の特性が，耐久性の向上につながる AAC の溶解，反応性，微細構造の形成に重要な役割を果たしていることが示されている．また，前駆体にカルシウムが含まれているだけでは，塩化物の耐久性向上の指標にはならず，カルシウムの相（すなわち，非晶質，半結晶，結晶）が耐久性向上のより良い予測因子となることも示唆されている．一般的に，シリカ含有量が多い（Si:Al 比），アルカリ含有量が多い（Na:Al 比），水分含有量が少ない（L:S 比）と，塩分に対する抵抗性が向上することが示されている．以下では，AAM が用いられたコンクリートや鉄筋コンクリート部材に海水が及ぼす影響，および，海洋環境での曝露試験結果について文献調査した結果を述べる．

（4）海洋コンクリート構造物は厳しい塩害環境下にあるため，材料自体の耐久性の確保が重要である．既往の知見において，AAMs の高炉スラグ微粉末の置換率やアルカリ濃度が大きいほど塩化物イオンの浸透抵抗性が高いことは検証されているが，埋設鉄筋の腐食に関する知見は少なく，鉄筋腐食に対する照査方法は確立されていない．照査方法の確立にはデータの蓄積が必要であるが，使用する材料や養生方法によって特性が大きく変化することが課題のひとつと考えられる．物質移動に対する抵抗性およびコンクリート劣化に対する抵抗性については，従来のセメントコンクリートベースで構築されている耐久設計のフレームと同等に扱えるかの検証がまずは必要である．しかし，海洋コンクリート構造物への用途として AAMs の配合のバリエーションを限定するのであれば，暴露実験や試験施工等でのデータの

蓄積によればよく，従来の耐久設計のフレームとは別に考えたほうがよい．また，洋上風力発電の浮体構造部への AAMs の適用が期待される．

(g) AAMs の実用化に向けた課題抽出アンケートならびに文献レビュー結果（第８章）

（1）アルカリ活性材料の実用に向けた課題を抽出するため，土木関係の様々な業種の技術担当者へのウェブアンケートを実施し，122 件の回答を得た．「ジオポリマーコンクリートあるいは AAM とういう材料についてご存じですか？」に対して，およそ 1/3 は「全く知らない，聞いたことがない」との回答があり，本技術の更なる PR が必要であることが分かった．「使用してみたが不安がある」「使用したいと思わない」理由として，「JIS などの規格が未整備であり，品質管理に不安があるから」には 48 件の回答があり，本研究会の意義ならびに次のステップに向けた活動の必要性を再確認した．

（2）海外論文を中心に，31 編のレビュー論文を収集し，活動の基礎情報とした．各論文について，基本情報（タイトル，著者名，文献名など），アブストラクト，結論を和訳（オンライン翻訳サービス DeepL による訳を一部修正）し，取りまとめた．

（執筆者：山本　武志・一宮　一夫）