

平成 30 年度 重点研究課題（研究助成金）

グリーンインフラとグレーインフラの融合に関する研究  
～グレーインフラに携わる技術者の立場から～

報告書

平成 31 年 3 月

土木学会 複合構造委員会

## まえがき

本報告書は、土木学会の平成 30 年度重点研究課題に採択された、「グリーンインフラとグレーインフラの融合に関する研究」を実施するために複合構造委員会内に設置された、グリーンインフラとグレーインフラの融合に関する研究小委員会（H107）の研究成果をまとめたものである。

近年、グリーンインフラに関する様々な検討や実施の事例が増えてきている。しかし、その定義は必ずしも一定ではないようであり、グリーンインフラとはどのようなものを指すか、あるいはその目的などにはやや分かりにくいところがある。

グリーンインフラは、これまで環境分野を主たる専門にされている方々によって検討されてきており、鋼やコンクリートを用いた従来のインフラ（グレーインフラ）を専門とする立場からの取り組みは、あまりなかったように思われる。このようなことも、グレーインフラの立場からは特に、グリーンインフラとは何か？が分かりにくい一因と想像される。本研究は、グレーインフラを主に検討する立場から、グリーンインフラについて真正面から検討対象として取り上げ、グレーインフラとの融合の可能性を探ることを主目的としている。

グリーンインフラの様々な定義は本文に譲るが、大まかに言って、そのコンセプトは、自然が有する多様な機能をインフラ整備に取り込むという考え方と言えらる。グレーインフラの分野でも、これまでに環境関係の様々な検討がなされてきている。しかしこれらは主として、インフラを整備する際の二酸化炭素排出量やその他の環境負荷物質排出の削減、材料の再生利用や副産物の活用など、持続可能性の向上に資するものが中心であった。この点、これまでのグレーインフラの環境関連の取り組みの多くは、グリーンインフラのコンセプトとはやや異なるかもしれない。

これまでのグリーンインフラについての様々な記述の中には、グリーンインフラとグレーインフラを両極の様に対比させた記述も見受けられる。これは対比させるべき概念であろうか？自然には豊富な恵みもあるが、一方で大いなる脅威があるのも事実である。グレーインフラは自然の脅威を何とかやり過ごし、その中で生きていく基盤として整備されてきた。グレーインフラによって人類は発展してきたといっても過言では無いように思われる。

グリーンインフラでは、自然の脅威への対応の必要がなくなるのではなく、これまでグレーインフラのみで対応していた自然への脅威の点を一部、自然構造物の部分に負担してもらい、なおかつ平常時にも自然の恵みを得よう、ということになるものと思われる。人工構造物のみで自然への脅威に対抗しようということではなく、グリーンインフラに人工構造物を全く用いないということでもない。このようなことから、グリーンインフラとグレーインフラは、対比して考えるべきではなく、より良い融合を考えることが、より良いインフラにつながると考えられる。また、これまであまりグリーンインフラのコンセプトに係わってこなかった、グレーインフラの立場でインフラに携わっている立場から検討した時に、これまで思いついていなかった新たな融合の可能性がまだまだあることも期待されよう。本研究ではこのような観点からの検討も行った。

複合構造委員会は鋼とコンクリートによる複合構造を中心に、材料の種類によらず様々な組み合わせを念頭において構造物を検討する、グレーインフラに関する研究委員会である。グリーンインフラとは直接関連が薄いように思われるが、あらゆる材料の組み合わせを前提にしていることから、「組合せる」という点において慣れている。より材料の範囲を広く考える過程で、従来の材料と環境に向け配慮された材料の組み合わせ、グレーインフラとグリーンインフラの組み合わせの検討が提案されて、この度の研究の実施に至った。なお、本報告書ではグリーンインフラについての統一の考え方をまとめるものではなく、研究に係わった各研究者のグリーンインフラに対する様々な考え方を集積したものとしている。本報告書が、グリーンインフラとグレーインフラの融合による、双方の充実につながることを願ってやまない。

本委員会の委員の大半は、グレーインフラを専門とする方々であり、グリーンインフラについては専門外であった。そのため指南役として、グリーンインフラの分野を専門とする土木研究所の中村圭吾上席研究員および、港湾空港技術研究所の桑江朝比呂グループ長に委員会に参画頂いた。研究の実施は複合構造委員会の幹事団の他、特に興味をもって頂いた複合構造委員会の委員にも参画頂いた。最後に本委員会の企画・運営を全面的に取り仕切って頂いた溝江慶久幹事長、研究の方向性について様々にサポートをして頂いた下村匠副委員長、各WGの主査を務めて研究推進にご尽力頂いた、川端雄一郎、滝本和志、仁平達也、牧剛史の各幹事、および様々な想いで研究に携わって頂いた委員各位に感謝申し上げたい。

平成 31 年 3 月

土木学会 複合構造委員会  
グリーンインフラとグレーインフラの融合に関する研究小委員会  
委員長 西崎 到

土木学会 複合構造委員会  
グリーンインフラとグレーインフラの融合に関する研究小委員会

委員名簿

委員長	西崎 到	(国研)土木研究所 材料資源研究グループ
副委員長	下村 匠	長岡技術科学大学 大学院 工学研究科
幹事長	溝江 慶久	川田工業(株) 鋼構造事業部
委員兼幹事	川端 雄一郎	(国研)海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所 構造研究領域
	滝本 和志	清水建設(株) 技術研究所
	仁平 達也	(公財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部
	牧 剛史	埼玉大学 大学院 理工学研究科
委員	大久保 宣人	日本ファブテック(株) 技術本部 技術研究所
	葛西 昭	熊本大学 大学院 先端科学研究部
	北根 安雄	名古屋大学 大学院 工学研究科
	斉藤 成彦	山梨大学 大学院 総合研究部
	齋藤 隆	(株)大林組 本社 生産技術本部
	平 陽兵	鹿島建設(株) 技術研究所
	中村 一史	首都大学東京 大学院 都市環境科学研究科
	橋本 国太郎	神戸大学 大学院 工学研究科
	広瀬 剛	(株)高速道路総合技術研究所 道路研究部
	松本 高志	北海道大学 大学院 工学研究院
	桑江 朝比呂	(国研)海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所 沿岸環境研究領域
	中村 圭吾	(国研)土木研究所 水環境研究グループ
	三ツ木 幸子	(株)平設計 技術部

# 執筆者

## 第1章 はじめに

西崎 到 (国研)土木研究所 材料資源研究グループ  
下村 匠 長岡技術科学大学 大学院 工学研究科  
溝江 慶久 川田工業(株) 鋼構造事業部  
川端 雄一郎 (国研)海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所 構造研究領域

## 第2章 グリーンインフラとグレーインフラの協働事例の調査と分析

牧 剛史 埼玉大学 大学院 理工学研究科  
大久保 宣人 日本ファブテック(株) 技術本部 技術研究所  
北根 安雄 名古屋大学 大学院 工学研究科  
橋本 国太郎 神戸大学 大学院 工学研究科  
三ツ木 幸子 (株)平設計 技術部  
溝江 慶久 川田工業(株) 鋼構造事業部

## 第3章 グリーンインフラとグレーインフラの新たな融合に関する検討

滝本 和志 清水建設(株) 技術研究所  
仁平 達也 (公財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部  
斉藤 成彦 山梨大学 大学院 総合研究部  
齋藤 隆 (株)大林組 本社 生産技術本部

## 第4章 グレーインフラへのグリーンの取入れに関する検討

川端 雄一郎 (国研)海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所 構造研究領域  
平 陽兵 鹿島建設(株) 技術研究所  
中村 一史 首都大学東京 大学院 都市環境科学研究科  
松本 高志 北海道大学 大学院 工学研究院

## 第5章 おわりに

下村 匠 長岡技術科学大学 大学院 工学研究科

# 目 次

第1章	はじめに	1
1.1	研究の背景と目的	1
1.2	グリーンインフラとグレーインフラ	1
1.3	活動概要と報告書の構成	5
第2章	グリーンインフラとグレーインフラの協働事例の調査と分析	8
2.1	グリーンインフラとグレーインフラの協働事例	8
2.2	海岸樹林と防潮堤の協働	11
2.3	植栽と砂防堰堤の協働事例～立山砂防～	15
2.4	干潟と護岸の協働事例～中津干潟～	26
2.5	グリーン・グレー・ハイブリッドインフラの比較事例	31
第3章	グリーンインフラとグレーインフラの新たな融合に関する検討	38
3.1	グリーンインフラを有効活用するためのグレーインフラの活用事例	38
3.2	今後効果が期待できる融合案の検討	44
3.3	グリーンインフラとグレーインフラの融合に関するコンセプト	47
3.4	まとめ	47
第4章	グレーインフラへのグリーンの取入れに関する検討	49
4.1	グレーインフラの性能向上のためのグリーンインフラの活用事例	49
4.2	グレーインフラへのグリーンインフラの取入れに関する基本的考え方	51
4.3	緑化による部材への効果の検討	53
4.4	海生生物の付着によるコンクリート部材の耐久性向上効果	66
4.5	まとめ	71
第5章	おわりに	73

# 第1章 はじめに

## 1.1 研究の背景と目的

近年、我が国においては、人口減少や少子高齢化の進展、地方自治体の財政難という制約条件の下で、大地震や巨大台風、頻発する集中豪雨等の自然災害に対して、安全で安心な社会インフラを構築・維持管理していくことが求められている。

一方、地球環境問題への人々の関心の高まりの中、第4次社会資本整備重点計画では、「国土の適切な管理」「安全・安心で持続可能な国土」「人口減少・高齢化等に対応した持続可能な地域社会の形成」といった課題への対応の一つとして、「グリーンインフラ」の取り組みを推進することが盛り込まれた。グリーンインフラは、1990年代後半に、イギリスとアメリカを中心に発展してきた社会資本整備手法で、自然環境が有する多様な機能をインフラ整備に活用するという考え方を基本としている。ただし、明確に定義が定まっているわけではなく、アメリカでは、雨水管理、水資源管理の観点から都市の緑地形成に重点を置いているのに対して、EUでは生態系の多機能性とネットワーク性に着目しており、多様な生態系サービスを発揮した自然的土地利用のネットワーク構築をグリーンインフラと捉えている。

我が国にグリーンインフラの概念が本格的に導入されたのは2013年頃である。当初は、鋼やコンクリートを主材料とした従来からの構造物を「グレーインフラ」と称し、グリーンインフラをこれらの従来型インフラと比較する議論がなされてきたが、最近では、双方の特性を踏まえて適切に組み合わせることで、新しい価値をもたらすことが期待されている。

以上のような背景から、グリーンインフラと従来型インフラであるグレーインフラの適切な組み合わせは、グリーンインフラが有する多様性を十分に発揮させ、安全・安心で持続可能な国土形成に役立つものと考えられるため、本研究では、これらインフラの組み合わせ（融合）について検討を行う。

## 1.2 グリーンインフラとグレーインフラ

上述のとおり、グリーンインフラについては、明確にその定義が定まっているわけではなく、検討が行われた機関ごとにそれぞれ定義がなされている。ここでは、本研究で参考にした、国土交通省<sup>1-1)</sup>、グリーンインフラ研究会<sup>1-2)</sup>、日本学術会議<sup>1-3)</sup>における定義を表1.2.1に紹介する。

国土交通省では、自然環境が有する多様な機能を活用し、持続可能で魅力ある国土づくりや地域づくりを進めるものと定義し、自然環境が有する機能を引き出し、地域課題に対応することを目的とした社会資本や土地利用は、概ね、グリーンインフラの趣旨に合致すると説明している。

グリーンインフラ研究会における定義もほぼ同様であるが、その一方で、同研究会では、グレーインフラを「人工構造物によりつくられた、限られた社会・経済目的のみに寄与するインフラ」と定義し、グリーンインフラとグレーインフラは概念的な対極をなすと説明している。

表 1.2.1 各機関におけるグリーンインフラの定義

機 関	定 義
国土交通省 <sup>1-1)</sup>	<p>社会資本整備や土地利用等のハード・ソフト両面において、<u>自然環境が有する多様な機能</u>（生物の生息の場の提供，良好な景観形成，気温上昇の抑制等）を活用し，<u>持続可能</u>で魅力ある国土づくりや地域づくりを進めるもの。</p> <p>従って，自然環境への配慮を行いつつ，自然環境に巧みに関与，デザインすることで，自然環境が有する機能を引き出し，地域課題に対応することを目的とした社会資本整備や土地利用は，概ね，グリーンインフラの趣旨に合致する。</p>
グリーンインフラ研究会 <sup>1-2)</sup>	<p><u>自然が持つ多様な機能を賢く利用することで，持続可能な社会と経済の発展に寄与するインフラ</u>や土地利用計画。</p> <p><u>自然が持つ多様な機能</u>は，自然環境や動植物などの生きものが人間社会に提供する様々な自然の恵み（生態系サービス）を指す。多機能な生態系サービスの提供こそが，グリーンインフラの最大の特徴とも言える。生態系サービスには，人間が利用するモノだけでなく，自然が持つ防災・減災機能や水質浄化など，人間の安全で快適な暮らしに役立つ様々な機能が含まれる。一般に，自然の恵みの大きさやその多機能性は，生物多様性が高いほど大きく，<u>より持続的である</u>といわれる。</p> <p>多機能性だけでなく，<u>環境の変化や人為的な影響に対する安定性</u>（しなやかさ，レジリエンス）もグリーンインフラの特徴である。豊かな生物多様性に支えられた健全な生態系は，一定の範囲内で変動しながらもその働きを維持していく性質を内在している。また生態系の状態が大きく変わる場合でも，環境と生物の関わりを介して，生態系は<u>自律的に回復</u>していく性質をある程度備えている。</p>
日本学術会議 <sup>1-3)</sup>	<p><u>広義には自然・人工のものを問わず</u>，緑地や湿地およびそれらのネットワークを活かすインフラストラクチャー。</p>

また，日本学術会議では，表 1.2.1 に示した広義のグリーンインフラから人工的な緑地／水域などによるインフラストラクチャーを除き，生態系（自然・半自然環境）を活かすもののみを生態系インフラと別途定義して，同インフラとグレーインフラ（人工構造物によるインフラ）の特徴を表 1.2.2 に示すように比較している。これによると，生態系インフラは，人工物インフラに比べて，目的とする機能を発揮する確実性に乏しいものの，機能の多さや不確実性への対処の容易さ，環境負荷の少なさといった点で優位にあるとされている。なお，ここでいう不確実性とは，自然環境や経済社会的状況（人口，年齢構成，人口の空間分布など）の変化を指している。

このような比較は他の文献にもあり，西廣 <sup>1-4)</sup>は，Sutton-Grier ら <sup>1-5)</sup>の文献を引用して，グリーンインフラとグレーインフラ（人工インフラ）に加え，これらの複合インフラ（ハイブリッド型インフラ）の長所と短所を表 1.2.3 のように整理している。これによると，グリーンインフラの利点は，先述の表 1.2.2 の内容に加え，時間とともにその機能が強化されたり，損傷しても自律的に回復できたりするところにある。しかしながら，短所として，機能の評価が困難であることが挙げられており，目的とする機能が確実に発揮されるか信頼性に乏しいものと考えられる。

表 1.2.2 生態系インフラと人工構造物によるインフラの特徴の比較

(文献 1-3) の表 1 を簡略化して作成)

	生態系インフラ	人工構造物によるインフラ
単一機能の確実な発揮	△	◎
多機能性	◎	△
不確実性への順応的な対処	○	×
環境負荷の回避	◎	×

◎大きな利点, ○利点, △どちらかといえば欠点, ×欠点

表 1.2.3 グリーンインフラと人工インフラとハイブリッド型インフラの長所と短所

(文献 1-4) の表 1 を簡略化して作成)

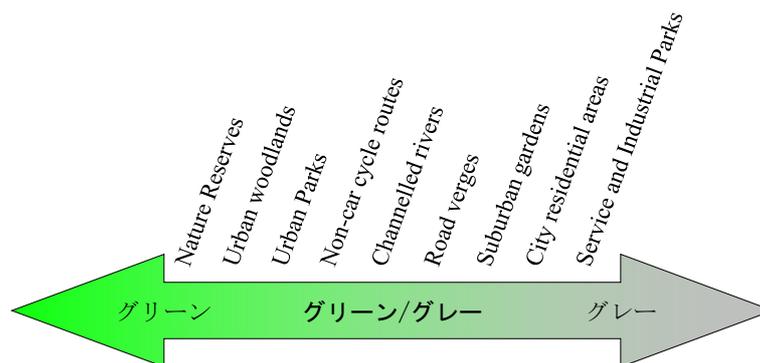
	長 所	短 所
グリーンインフラ	<ul style="list-style-type: none"> <li>多様な機能を発揮する.</li> <li>時間とともに機能が強化される.</li> <li>損傷しても自律的に回復できる.</li> <li>海面変動などの状況変化に対応できる.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>機能の評価が困難である.</li> <li>自然再生によって整備される場合, 機能発揮までに時間を要する.</li> </ul>
人工インフラ	<ul style="list-style-type: none"> <li>効果の大きさが既知である.</li> <li>完成後, すぐに効果を発揮する.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>海面変動などの状況変化に対応できない.</li> <li>時間とともに劣化する.</li> <li>生態系サービスのバランスを損なう.</li> <li>有事には機能するが平常時は役に立たない.</li> </ul>
ハイブリッド型インフラ	<ul style="list-style-type: none"> <li>グリーンと人工の両方の長所を持ちうる.</li> <li>さまざまな要求を両立させうる.</li> <li>自然のみに頼るよりも信頼性が高い.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>研究が不足しており, 効果についての実証的なデータが少ない.</li> <li>自然生態系と同等のサービスまでは発揮されない.</li> <li>人工的な部分は自然に対して何らかの負の影響をもたらさう.</li> </ul>

グリーンインフラについては、プラスの効果がある反面、マイナスの影響もあるとの指摘もある。常田<sup>1-6)</sup>は、通常、斜面の植生は、のり面被覆による表土流出や雨水浸透の抑制などにより、斜面の安定性の向上に効果があるとされているが、2016年の島根県の落石事故では、樹木の根系の成長によって不安定化した岩塊が、強風により根系を介して揺動し、落下したと説明している。また、2011年の東日本大地震では、沿岸部の保安林による津波流の減勢が見られたが、保安林自身の残留要因は、保安林の海側にある河川堤防の裏法先に形成された落堀による流速低下であり、保安林が流出した箇所では流木被害が発生し、津波瓦礫としての処理問題も発生したとしている。そして、このような植生によるマイナスの影響を低減・防止するためには、日常の適切な管理が必要であると注意喚起している。

また、グレーインフラについても、上述の比較に示されたマイナスの面は必ずしも正しくはなく、複数の機能を期待した活用や環境問題に寄与する検討がなされたりしている。国土交通省<sup>1-7)</sup>では、東日本大震災の被災地において、盛土構造の道路が住民の避難場所としての「高台」と浸水の拡大防止に寄与する「防潮堤」としての機能を発揮するとともに、道の駅、SA・PA、港湾・空港や公園などが災害対策活動の拠点として活用されるなど、社会資本（グレーインフラ）が本来期待されていた機能とは別の機能を副次的に有していることが改めて認識されたとし、2014年、このような「社会資本の多面的活用」を、災害に強い地域づくりを目指すための一つの方策として提案し、全国の地方自治体等から収集した多面的活用の事例を公開して、導入のノウハウ等を広く展開している。また、橋梁やダムなどのグレーインフラは、目的とする機能を発揮するだけでなく、古くから地域固有の観光資源として地域振興に大きく貢献してきた。国土交通省<sup>1-8)</sup>では、2013年に政府が策定した「観光立国実現に向けたアクション・プログラム」の一環として、このようなインフラの活用をさらに推進することとし、工事現場を含む全国のインフラの観光ツアーを紹介するポータルサイトを開設するなどして、年間集客数の増大を目指している。

さらに、港湾分野では、環境問題への取組みとして、グレーインフラを構成する主要材料であるコンクリートや鋼を用いた検討が盛んに行われている。例えば、セメントの一部を産業廃棄物であるフライアッシュに置き換えたコンクリートを使用し、その表面を鉄塩入りの塗材でコーティングすることにより、藻類や海洋生物の生長が促進され、海洋環境の保全・再生に優れた効果を発揮することが確認されている<sup>1-9)</sup>。同様に、藻類の生長を促進するコンクリートとして、アミノ酸の一種であるアルギニンを追加したコンクリートが開発され<sup>1-10)</sup>、国内で実績を重ねている。アルギニンの添加は、藻類の生長促進だけでなく、その高い塩基性によりコンクリート中の鉄筋腐食環境を改善したり<sup>1-11)</sup>、フライアッシュコンクリートの自己治癒性能を高めたりする傾向も示されており<sup>1-12)</sup>、コンクリートの耐久性や維持管理性の向上に期待されている。また、コンクリートがもたらす地球環境への好影響として、高いpHが海洋酸性化による海洋生物へのストレスを低減させる可能性も指摘されている<sup>1-13)</sup>。さらに、海洋植物プランクトンの増殖に必要な鉄が不足している海域に対して、鋼材の製造過程で副次的に生産される製鋼スラグをプランクトンの栄養源として利用し、海水中の二酸化炭素を固定するといった検討も行われ、多くの実証試験が行われている<sup>1-14)・1-17)</sup>。また、製鋼スラグを干潟造成時などに浚渫土に混合することで、赤潮や青潮の原因となるリンや硫化物の発生を抑制して、海域の水質を改善しようとする取り組みも行われている<sup>1-17)</sup>。

以上のようなことから、グリーンインフラとグレーインフラを自然と人工といった生産方法の違い以外で区別することは難しく、必要な性能に応じて双方を適切に組み合わせることが重要であると考えられる。国土交通省<sup>1-1)</sup>では、欧米におけるグリーンインフラに関する議論<sup>1-18)</sup>を参照して、**図 1.2.1**に示すようなグリーンインフラとグレーインフラの相関関係を紹介し、「災害リスクが避けられず、土地利用条件の厳しい我が国では、要素技術、空間配置、相互関係のいずれから見ても、人工構造物とグリーンインフラを切り離すことはできず、双方特性の理解の下、組み合わせさせて使っていくことが重要である」と説明している。本研究では、このような考え方を念頭に置いて、グリーンインフラとグレーインフラの融合について検討することとした。



**図 1.2.1** グリーンインフラとグレーインフラの連続性

(文献 1-1) の p.11 の図を参考に作成)

## 1.3 活動概要と報告書の構成

### 1.3.1 各WGの活動概要

本研究では、以下の3つのワーキングを設置して活動を行った。以下に、それぞれのワーキングの活動概要を示す。

#### (1) WG1：グリーンインフラとグレーインフラの協働事例の分析 WG

WG1では、グリーンインフラとグレーインフラを協働させて機能を発揮させた事例を調査し、その事例をグレーインフラに携わる者の立場から分析した。

#### (2) WG2：グリーンインフラとグレーインフラの新たな融合に関する検討 WG

WG2では、協働とは異なる融合のありかたとして、グリーンインフラの機能保持あるいは有効活用のためにグレーインフラを利用した事例を調査するとともに、そのほかの新たな融合を生み出す際の考え方（コンセプト）について検討した。

#### (3) WG3：グレーインフラへのグリーン(インフラ)の取り入れに関する検討 WG

WG3では、グレーインフラにグリーン(インフラ)を取り入れた事例を調査し、その取り入れによって得られる付加価値等について検討した。

### 1.3.2 報告書の構成

報告書は、上記3つのWGの活動成果をもとに、以下の内容でとりまとめた。

第1章では、本研究の目的ならびに活動概要について記述した。

第2章はWG1の活動成果であり、グリーンインフラとグレーインフラを協働させて機能を発揮させた事例の概要を示すとともに、海岸林と防波堤・防潮堤、自然林と人工堰堤などのいくつかの協働事例について調査・分析した内容を詳述した。

第3章はWG2の活動成果であり、グリーンインフラの機能保持あるいは有効活用のためにグレーインフラを利用した事例の概要を示すとともに、付加価値が期待できる新たな融合案のイメージや、新たな融合案を生み出す際の考え方（コンセプト）について記載した。

第4章はWG3の活動成果であり、グレーインフラにグリーン(インフラ)を取り入れた事例の中から、主に緑とフジツボを取り入れた事例に着目し、それらの取り入れがグレーインフラに及ぼす効果について試算した。

第5章では、本研究の成果をまとめるとともに、今後の展望について記述した。

### 参考文献

- 1-1) 国土交通省：グリーンインフラストラクチャー～人と自然環境のより良い関係を目指して～，2017.3.
- 1-2) グリーンインフラ研究会：決定版！グリーンインフラ，日経BP社，2017.1.
- 1-3) 日本学術会議：復興・国土強靱化における生態系インフラストラクチャー活用のすすめ，2014.9.
- 1-4) 西廣淳：仙台湾岸の砂丘と海岸林 グリーンインフラに向けた「再生」の可能性（特集 震災後5年の森・地域を考える），森林環境，pp.50-60，2016.
- 1-5) Ariana E. Sutton-Grier, Kateryna Wowk, Holly Bamford：Future of our coast：The potential for natural and hybrid infrastructure to enhance the resilience of our coastal communities, economies and ecosystems, *Environmental Science & Policy* 51(2015), pp.137-148.
- 1-6) 常田賢一：土木構造物における植生の効果と影響，土木技術資料，第60巻，第4号，pp.52-55，2018.4.
- 1-7) 国土交通省：地域防災力強化のための社会資本の多面的活用～基本的考え方と活用事例～，2014.2.
- 1-8) 国土交通省：インフラツーリズムポータルサイト，  
<http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/region/infratourism/index.html>
- 1-9) 財団法人南西地域産業活性化センター：平成14年度地域新生コンソーシアム研究開発事業「亜熱帯地域の海洋開発計画に伴う新技術の研究」成果報告書，2003.3.
- 1-10) 上月康則，中西敬，佐藤和博，多良千鶴，西村博一，山口奈津美，岩城嘉宏，山中亮一：アミノ酸混和コンクリート表面上での付着微細藻類の生長特性に関する研究，海洋開発論文集，第26巻，pp.111-116，2010.6.
- 1-11) 上田隆雄，佐藤和博，飯干富広，宮川豊章：アルギニンを混入したコンクリートの塩害抵抗性能に関する研究，セメント・コンクリート論文集，Vol.68，No.1，pp.330-336，2015.3.
- 1-12) 上田隆雄，河野惇平，飯干富弘，江里口玲：アミノ酸の添加がコンクリートの自己治癒性能に与える影響，セメント・コンクリート論文集，Vol.70，No.1，pp.321-327，2017.3.
- 1-13) B. Mos, S.A. Dworjanyn, L.T. Mamo and B.P. Kelaher：Building global change resilience：Concrete has the potential to ameliorate the negative effects of climate-driven ocean change on a newly-settled calcifying invertebrate, *Science of the Total Environment*, Vol. 646, pp.1349-1358, 2019.

- 1-14) 日野光元: 製鋼スラグを栄養源として利用した海洋植物プランクトン増殖による CO<sub>2</sub> 固定化, 鉄と鋼, Vol.89, No.4, pp.381, 2003.4.
- 1-15) 月橋文孝, 松浦宏行: 鉄鋼スラグリサイクリングの技術発展と課題, Journal of MMIJ, Vol.129, No.5, pp.185-191, 2013.5.
- 1-16) 松元弘昭, 森英一郎, 小北雅彦, 福崎良雄, 幸田隆史: 鉄鋼スラグ製品の紹介と海域実証試験の現況, 神戸製鋼技報, Vol.64, No.1, pp.18-21, 2014.4.
- 1-17) 加藤敏朗, 小杉知佳, 木曾英滋: スラグ資材の海域適用時の影響評価, 新日鉄住金技報, No.399, pp.85-89, 2014.9.
- 1-18) The Mersey Forest : GREEN INFRASTRUCTURE PLANNING GUIDE Version:1.1,  
[http://www.greeninfrastructurenw.co.uk/resources/North\\_East\\_Green\\_Infrastructure\\_Planning\\_Guide.pdf](http://www.greeninfrastructurenw.co.uk/resources/North_East_Green_Infrastructure_Planning_Guide.pdf)

## 第2章 グリーンインフラとグレーインフラの協働事例の調査と分析

### 2.1 グリーンインフラとグレーインフラの協働事例

#### 2.1.1 実施事例

本章では、グリーンインフラとグレーインフラの協働事例について調査を行った。抽出した事例を一覧にして表 2.1.1 に示す。以下、各々の事例について、その概要を記す。

なお、海岸樹林と防潮堤の協働（WG1-1）および植栽と砂防堰堤の協働（WG1-6）については詳細調査および分析を行い、干潟と護岸の協働（WG1-3）については、現地視察を行った。これらの3事例については、2.2～2.4 にてそれぞれ詳述している。さらに、海外において、グリーンインフラ・ハイブリッドインフラ・グレーインフラの案を複数設定して定量的な比較評価を行った事例について 2.5 に記している。

表 2.1.1 グリーンインフラとグレーインフラの協働の事例

No.	グリーンインフラ	グレーインフラ	目的・効果	参考文献
WG1-1	海岸樹林	防潮堤・防波堤	津波・高潮・海岸侵食対策	2-1)～2-5)
WG1-2	遊水池, 湿地帯	堤防	洪水対策	2-1), 2-6), 2-7)
WG1-3	干潟	護岸	高潮対策	2-8)～2-10)
WG1-4	サンゴ礁	防波堤	高潮対策	2-11)
WG1-5	緑化	都市	都市型水害対策	2-12), 2-13)
WG1-6	植栽	砂防堰堤	砂防機能向上	2-14), 2-15)
WG1-7	樹木	法枠・地盤改良	斜面崩壊対策	2-16)
WG1-8	海岸	築磯	大波対策, 生態系復元	2-17)
WG1-9	里山防災林	都市	土砂災害対策	2-18)
WG1-10	緑地	道路, 公園, 建物	都市型水害対策 および 緑化, ヒートアイランド対策	2-19)

#### 2.1.2 実施事例の概要

##### (1) 津波・高潮対策, 洪水対策 (WG1-1～4)

津波・高潮対策におけるグリーンインフラは海岸樹林帯や湿地帯, 洪水対策におけるグリーンインフラは遊水池や湿地帯を設けることが該当し, これとグレーインフラである防波堤や防潮堤, 堤防との協働が期待される。また, 本来の目的である洪水対策, 津波・高潮対策に加えて, 二酸化炭素の低減, 緑地化, レクリエーションの場の提供などの付加価値が期待される<sup>2-1)</sup>。仙台湾南部の岩沼海岸では, 津波・高潮対策として造成された海岸盛土に, 「緑の防潮堤」と銘打ってボランティアや一般市民による植樹が行われた<sup>2-2)</sup>。静岡県浜松市においても, 同様のプロジェクトが実施されている<sup>2-3)</sup>。樹木が成長した将来的には, グレーインフラの防潮堤と協働して, 津波・高潮被害の軽減や, 海岸侵食の抑制が期待される。また, 大分県の中津港では, 港の拡張整備事業において, 高潮対策および干潟の生態系保護の観点から, 当初予定されていた浚渫土砂による覆砂を取りやめ, 護岸形状を変更して干潟を残す整備が実施された<sup>2-8)-2-10)</sup>。海岸樹林以外に,

沖合のサンゴ礁も波を減勢させる効果があることが示されている<sup>2-11)</sup>。海外でも、タンパベイにおける河川分岐点の低地エリアでの洪水危険性評価<sup>2-6)</sup>、ニューヨーク市のハワードビーチにおける嵐による高潮・浸水対策としての改善案の評価<sup>2-7)</sup>などの事例がある。

Sutton-Grier ら<sup>2-4)</sup>は、レジリエントな海岸を推進するために、Natural および Hybrid infrastructure の可能性を論じている。Natural infrastructure の例として、沖合の Barrier island、海岸陸地内のカキ床 (Oyster beds) および湿地帯 (Salt marsh) の組合せを挙げている。また、これを若干改変した”Managed realignment”の例として、沖合の Barrier island の代わりに、湿地帯よりも内陸部に防潮堤 (Sea wall) を設置する組合せを示している。これは、カキ床と湿地帯による波の減勢効果に期待して、人工物である防潮堤の小型化および長寿命化を図るものである。さらには、Hybrid infrastructure の例として、冒頭の Natural infrastructure に追加して、開閉可能な水門 (Operable flood gate) を併設した防潮堤を内陸部に設置する組合せを示している。オプションとして、防潮堤内の家屋を防潮堤からやや下げて配置したり、高床式とするような対策も有効であるとしている。このような Natural あるいは Hybrid infrastructure を実現するには、Natural infrastructure の有効性の検証や、災害のタイプや規模に応じた効果の定量的な評価などが課題であるとしている。

## (2) 都市型水害対策 (WG1-5)

東京都世田谷区では、「みどりの基本計画」としてグリーンインフラを用いた都市型水害対策に関する基本方針を示している<sup>2-12)</sup>。具体的には、農地などの自然面の保全、雨水浸透施設の設置促進、透水性舗装の拡大、広域の上流域の自治体と連携した流域対策等を進め、健全な水循環の回復や都市型水害の緩和を図ることを目指している。

鳥取県米子市を流れる宇田川流域の河川整備計画の策定に先立ち、地域住民を交えた協議会が設置され、農地を洪水の一時貯留機能場所として活用し、現在の土地利用を大きく変更しないことを前提とした家屋の浸水対策が提案された<sup>2-13)</sup>。

## (3) 砂防機能向上 (WG1-6)

富山県の常願寺川における直轄砂防事業では、大雨等による天然ダムの生成および下流域への洪水被害を、多くの砂防堰堤を構築することで低減することを目指している<sup>2-14), 2-15)</sup>。一見、グレーインフラを構築する事業であるが、グリーンインフラとしての「山」を、時間をかけて生態系を考慮した緑に戻していこうとするものである。

## (4) 斜面崩壊対策 (WG1-7)

斜面崩壊対策の一般的な手法の一つとして法枠工があるが、法枠の数区画に 1 本程度の密度で樹林を配置することにより、樹木の根と法枠が互いを補強し合い、強固な面を形成することが期待される<sup>2-16)</sup>。また、樹木が繁殖した緑斜面の崩壊危険性を低減するために、崩壊危険個所に分散して部分的な地盤改良を施す工法も提案されている<sup>2-16)</sup>。

## (5) 大波対策および生態系復元 (WG1-8)

青森県むつ市大畑地区の木野部海岸整備事業において、①砂に覆われていた海岸を磯浜海岸として復元し、安定した海の暮らしを送ったかつての地域環境の再生に貢献する、②海に張り付くように暮らしている集落を、波浪災害から守る防護面に配慮する、③ビジターや近くに立地する少年自然の家を訪れる子ども達に、海岸特性を学び、体験する環境教育の場となる海岸整備を目指す、といったテーマを掲げて築磯が実施された<sup>2-17)</sup>。

#### (6) 土砂災害対策 (WG1-9)

兵庫県内で2004年に生じた一連の台風による森林被害を踏まえ、「新ひょうごの森づくり」に加え、防災面での機能を高める「災害に強い森づくり」に取り組み、県土の保全や安全・安心な生活環境の創出を目指している。2006年度から「県民緑税」（県民税均等割の超過課税）を導入し、これにより「災害に強い森づくり」事業が進められた。その一環である里山防災林整備では、倒木や崩壊の危険性の高い集落裏山の森林を対象に、山地災害防止機能等を高めるため、危険木伐採などの森林整備や簡易防災施設の設置等を実施している<sup>2-18)</sup>。

#### (7) 都市型水害対策および緑化、ヒートアイランド対策 (WG1-10)

近年では、地球温暖化等の影響もあり、豪雨災害の多発化・激甚化による都市型水害が頻発している。これを受けて、地下貯留管などのハード整備のみならず、ゲリラ豪雨などの局所的な豪雨への対応においてはグリーンインフラも活用して総合的に取り組むことが肝要である。欧米では、グリーンインフラの積極導入の取組みが先行しており、行政がその効果を推計して、雨水対策・洪水対策を全てグレーインフラで行うよりも、効果やコスト面で有利であるという試算がされている。その例<sup>2-19)</sup>として、ニューヨーク市では、雨水管理に対するグリーンインフラを活用し、下水道のオーバーフローを防いで水質改善が図られている。また、フィラデルフィア市も同様に、各所にグリーンインフラを追加することで、下水道や河川に流入している雨水を減少させ、合流式下水道越流水の削減や費用の削減を狙っている。いずれの事例でも、グリーンインフラの効果を多面的に評価し、「経済的便益」「社会的便益」「環境的便益」を推計して、費用対効果を考えながら活用を推進していく仕組みが特徴的である。

## 2.2 海岸樹林と防潮堤の協働

### 2.2.1 はじめに

本節では、海岸樹林と防潮堤の協働による津波・高潮・海岸侵食対策<sup>2-20) - 2-23)</sup>を対象として、グリーンインフラとグレーインフラを組み合わせたハイブリッドインフラの効果を定量的に評価するために必要な事項を調査し、整理・分析した。なお、以下では、海岸樹林帯をグリーンインフラ、防潮堤をグレーインフラと定義して記述している。

### 2.2.2 グリーンインフラによる波の減勢効果

過去の事例より、沿岸部に樹林帯（グリーンベルト）が設置されている場合に、津波による被害が軽減されることが知られている。樹林帯を構成する樹木には様々あるが、例えばマングローブはその形状における特徴から、波の減勢効果が期待できるとされている。2004年12月26日に発生したスマトラ沖地震では、最大で40mを超える津波がインドネシア、タイ、スリランカ、さらにはアフリカまでを襲った。その後の調査結果によると、海岸にマングローブ林があったところでは、開発などでマングローブ林が伐採されていたところと比べて、津波被害が相対的に軽減されていることが明らかとなった<sup>2-24), 2-25)</sup>。

マングローブとは、熱帯および亜熱帯地域の海岸線など、潮の干満が生じ、かつ淡水と海水が混じり合うような地域に繁殖する植物群の総称であり、その種類は約100種類程度であると言われている。マングローブの構造上の特徴の一つとして、写真2.2.1に示すように、複数本の根がタコの足のように伸びて地面をつかむことで幹を支える支柱根を有することが挙げられる。また、上部の幹部分は比較的柔軟性があり、高さは10~20m程度まで成長する。先のスマトラ地震津波の調査では、マングローブ林により漂流物（debris）が捕捉されて住居破壊を抑制する効果や、津波自体のエネルギーを減衰させる効果があるものと推測された。



写真 2.2.1 マングローブ林の例（沖縄県名護市）

山本ら<sup>2-26), 2-27)</sup>は、タイ沿岸部を対象として、マングローブ林による消波効果および海岸侵食防止効果の定量的評価を、現地調査、模型実験、数値解析により試みている。さらに、人工的な海岸侵食対策である竹杭製消波堤や、ジオテキスタイル袋に土砂を詰めた離岸堤による効果との比較検証を行っている。既往の研究の調査から、支柱根タイプのマングローブ林の幅（波の入射方向の長さ）と波高の透過比（＝透過波高／

入射波高)に関するデータを集め、地面  $1\text{m}^2$ あたりのマングローブ主幹本数(すなわち樹林密度)毎に、図 2.2.1 に示すような関係を得た。これによれば、例えば樹林密度が  $1\text{本}/\text{m}^2$  の場合、樹林帯幅が  $200\text{m}$  もあれば波高を  $40\%$ 程度に低減できることになる。

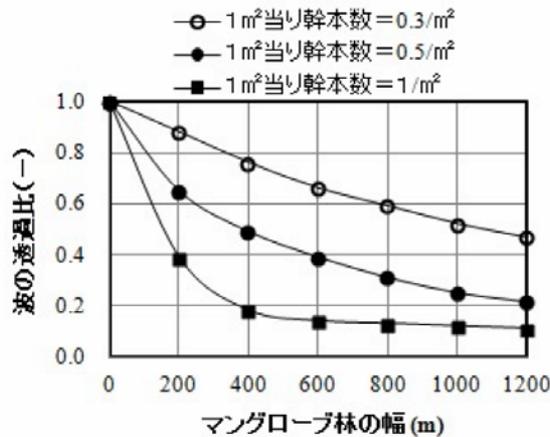


図 2.2.1 マングローブ林の幅と波高の透過比の関係<sup>2-26)</sup>

なお、文献 2-27) では、図 2.2.1 に示したデータを元に樹林帯部分の透過係数を設定した流体解析を実施し、典型的なジオテキスタイル製離岸堤と同程度の海岸侵食抑制効果を期待できるマングローブ林は  $1\text{本}/\text{m}^2$  で幅  $170\text{m}$  程度と結論付けている。しかし、幅  $170\text{m}$  の樹林帯を沿岸部に人工的に構築することは非常に困難が予想されるとともに、マングローブが十分な高さまで成長するには  $10$  年程度の時間が必要であることも考えると、樹林帯のみに津波減勢効果を期待するのは現実的ではないと言える。

また、対象をマングローブに限定せず、樹林帯による減勢効果を一般化する試みとして、樹林密度、樹幹径や樹幹高さ、枝の分岐高や分岐角等に応じた抗力係数等の流体力指標を設定する試みも行われている。山本ら<sup>2-28)</sup> は、樹木を単純化した模型を用いた水理実験で樹木に働く流体力を測定し、樹木形状に応じた抗力係数  $C_D$ 、慣性力係数  $C_M$  の特性を検討し、複雑な影響を有する樹木の流体力係数は、ばらつきは有するものの、既往の単円柱に対する値 ( $C_D=1.5\sim 2.0$  程度,  $C_M=1.0\sim 1.5$  程度) に近い結果となることを明らかにした。また、複雑な形状を有する樹木を多質点系骨組みにモデル化した数値解析により、樹木の破壊可能性について検討した。平石<sup>2-29)</sup> は、植生のタイプを幹のみ、幹+葉、葉のみの  $3$  パターンに分類し、それぞれについて樹林帯幅と配置タイプ(直線, 千鳥, ギャップ)を変化させた数値解析を行い、適切な樹木タイプと樹林帯幅、配置の組合せについて検討した。この検討では、抗力係数  $C_D$  と慣性力係数  $C_M$  は既往の模型実験結果から以下のように与えている。これによれば、例えば樹木の有効体積が総水塊量の  $10\%$ 程度の場合、抗力係数は  $1.5$  となる。

$$C_D = 8.4(V_1/V + V_2/V) + 0.66$$

$$C_M = 1.70$$

ここに、

$V_1$  : 幹部の有効体積

$V_2$  : 葉部の有効体積

$V$  : 樹林帯位置の総水塊量 (樹林帯面積×浸水深)

樹林帯あるいは樹木による波の減勢効果を評価するために提案された各種の評価式が、文献 2-30) にまとめられているので参照されたい。なお、樹林帯が津波性状に与える影響に関する既往の研究は、樹木に働く流体力を定量的に評価し、樹木の破壊・倒壊強度と合わせて樹木流失の可能性を判断するために行われたものも多い。これは、樹木に津波減勢効果が認められる一方で、過度の流体力によって樹木が流失して漂流物となると、住居等への被害が拡大することが背景にある。したがって、樹林帯に一定の津波減勢効果を期待する場合には、樹林帯の流失可能性についても併せて検討しておくことが重要となる。

### 2.2.3 グリーンインフラとグレーインフラの協働による波の減勢効果

#### (1) 樹林帯と防潮堤の位置関係

グリーンインフラとグレーインフラの協働を期待する場合、それぞれの役割に応じて適切な配置を検討する必要がある。樹林帯（グリーン）と防潮堤（グレー）の組合せに対して、考えられる位置関係のイメージを図 2.2.2 に示す。(a)は、海岸線に防潮堤を設置し、その内側に樹林帯を配置するものである。(b)は(a)の派生形で、防潮堤と樹林帯を一体化するものであり、国土交通省「緑の防潮堤」構想において提示される形式である。内側のり面の斜度にもよるが、防潮堤の内側に十分なスペースを確保できない場合には有効な形式となる可能性がある。(c)は逆に、海岸線に樹林帯を配置し、その内側に防潮堤を設置するものである。

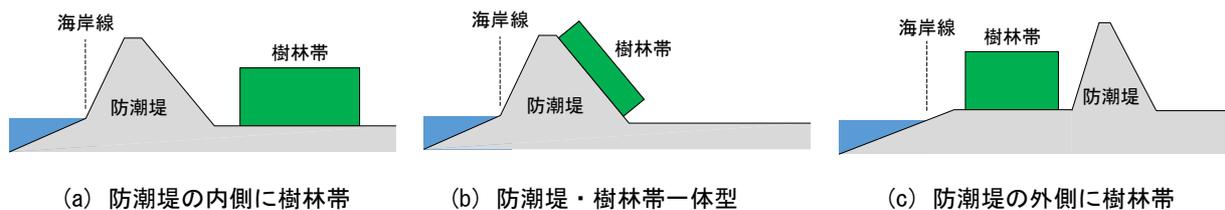


図 2.2.2 防潮堤と樹林帯の位置関係のイメージ

#### (2) 協働による効果

防潮堤の内側に樹林帯を配置する場合（タイプ a）では、沖合から来襲する津波に対して、まず防潮堤で抵抗することになる。このとき、防潮堤を越流する規模の津波の場合は、越流した波に対して樹林帯が浸水深やエネルギーを低減する。しかし、樹林帯でそれらを完全にゼロとすることは難しいと考えられ、このタイプにおける樹林帯は、万が一越流した場合のリスクを軽減する役割を担うものと言える。言い換えると、設計津波に対しては原則として防潮堤で抵抗し、想定を超える津波に対して樹林帯で被害を低減する、といった考え方となる。なお、防潮堤を越流した際の流れは、跳水を生じて浸水深が増加する恐れがあるが、背後の樹林帯の役割がこのエネルギーの低減である場合、樹林帯の幅はさほど大きくする必要はないと考えられ、樹林帯の設置空間の確保の観点からも現実的であると言える。

一方、防潮堤の外側に樹林帯を配置する場合（タイプ c）では、沖合から来襲する津波に対して、まずは樹林帯が抵抗して津波エネルギーを減衰し、その後防潮堤によって阻止することになる。すなわち、設計津波に対して樹林帯による減勢効果を定量的に評価し、それを加味して防潮堤の高さ等を設計すればよい。したがって、上記のタイプに比べて、こちらのタイプの方が「協働」のニュアンスに近いシステムと言える。

前節にて述べたように、樹林帯による大きな減勢効果を期待するには、樹林帯の幅をかなり大きくする必要があり、樹林帯設置空間の確保が困難であると予想される。既往の研究<sup>2-31)</sup>でも、このタイプについて定量的な検討が行われ、その有効性が示されているが、樹林帯幅がやはり 100～数 100m のオーダーで議論されており、空間確保の点での問題を解決することが必須となる。

なお、樹林帯と防潮堤の位置関係が及ぼす影響について検討した既往の研究<sup>2-32)</sup>によれば、タイプ **c** では津波が持つ初期の大きなエネルギーを樹林帯が真っ向から受けることになるため、樹林帯の破壊のリスクが高い。その背後に防潮堤があるので、破壊された樹木が漂流物となって家屋へ影響を及ぼす被害は防止できるものの、樹林帯が破壊されてしまう場合にはやはり防潮堤が単独で津波被害を抑制する必要がある。一方、タイプ **a** においては、防潮堤によって津波エネルギーがある程度減衰した状態で、樹林帯に水流が衝突するため、樹林帯の破壊は回避できる可能性が高い。

#### 2.2.4 まとめ

本節では、海岸樹林帯と防潮堤の協働を題材として取り上げ、関連する既往の研究を調査するとともに、協働による効果を評価するための考え方について分析を試みた。樹林帯自体による減勢効果に関しては、特に2004年インド洋津波以降、急速に研究が進展しており、ある一定の定量評価は可能なレベルにある。したがって、水理学的観点からは、防潮堤による効果との組合せで協働システムを設計することは技術的に可能であると考えられる。問題点としては、樹林帯の成長に要する時間の対応と、樹林帯の持続性が挙げられるので、学術的観点だけでなく、社会的状況も考え合わせて、長期的視点に立った検討が必要である。

今回の検討では、定量的な評価手法の提案やそれによる試算結果の提示には至らなかったものの、今後の方向性は示せたのではないかと考えている。

## 2.3 植栽と砂防堰堤の協働事例～立山砂防～

### 2.3.1 調査経緯

立山の砂防施設をグリーンインフラとグレーインフラの協働事例として調査を開始したが、調査を進める過程で、砂防における基本的な考えを理解しないと、立山砂防におけるグリーンインフラとグレーインフラの協働についてまとめることができないと考え、砂防の基本について調査することにした。

調査方法は、まずインターネットで立山砂防について資料を収集後、立山砂防に勤務していた国土交通省の職員にヒアリングを行なった。このヒアリングに、砂防を専門とする職員にも同席して頂き、砂防の基本を理解するための資料として「よくわかる砂防百科」を紹介頂いた。

したがって、本報告では、次の3つを基に、グリーンインフラとグレーインフラの協働事例として、砂防についてまとめた。

- ・インターネットから収集した資料
- ・国土交通省北陸地方整備局の職員へのヒアリング
- ・よくわかる砂防百科 vol.4<sup>2-33)</sup>, vol.6<sup>2-34)</sup>, vol.9<sup>2-35)</sup>, vol.10<sup>2-36)</sup>

### 2.3.2 砂防の心

本項では、「よくわかる砂防百科 vol.6 砂防の仕組み」<sup>2-34)</sup>の第1章に記載されている「砂防の心」の全文を以下に収録する。

『山は古代から神々が住む神聖な地域でもあり、都や寺社等の造営そして個人の家屋建築のための建築材、製塩・製鉄・瓦や陶磁器生産等の燃料としての薪炭材、暖や食事などに必要な生活材、田畑の肥料のための肥料材等々、国・都市の成立に必要な生産を支え、国民の生活になくなくてはならない存在でした。新幹線が走り、ITが発達し、宇宙にも旅行が出来る現代でも、古代から続く山への信仰とその価値は変わりません。それどころか、美しい山並みは観光に、緑多い森林は健康に、緑の力は地球温暖化防止にと、ますます多面的な価値を持つようになってきています。

一方、多くのなくてはならない恵みを与えてくれる山々も、人間の活動が働きかけるさまざまな作用により、自然界に保たれていた絶妙なバランスを崩すことがあります。民話には、山に住む大蛇が暴れ、村人を恐怖のどん底に陥れる話が言い伝えられています。大蛇は土石流であり、洪水だと言われています。人間の過度な山への働きかけにより、山の恵みの川や泉は枯れ、荒廃した山々には木々が無くなり、きのこや木材の代わりに土砂が生産され、雨が降るたびにその土砂が下流に流れ、麓の集落を災害に巻き込みました。山をむやみに荒らすことの戒めをこのような民話で伝えたのではないのでしょうか。

砂防という言葉の起源は、一般的に明治政府が出した明治四年（1871年）の民部省達第二号による条文の「土砂ノ溢漏ヲ防グ可キ事」の中の土砂溢漏防止からの二文字だとされています。江戸時代に使われていた土砂流出防止の工事である土砂留に、工法や工事だけではなく、法体系や生活の営みの中で、土砂災害を防止するという概念の言葉として砂防が明治の初め頃から使われ定着してきたと思われます。

農耕民族である日本人は、水を産み、生活の恵みを供給してくれる山・森林を祭り、守るという思想は古来より変わることなく続いていることを考えると、砂防の思想も変わることなく私たちの心の中に脈々と流れています。

砂防は、大地震や火山噴火、豪雨・台風等による自然現象および人間の営みや生産活動による人為的現象を原因として流出した土砂により荒廃した自然を、穏やかな自然に戻し、人間生活に対する自然災害からの

脅威を軽減・緩和することを目的とする仕事です。そのため、美しい自然、実り豊かな自然を保全、回復、創造しつつ、下流の人間生活・田畑を災害から守り、地域に活力をもたらすために、山林を保護し、山地や流域を保全することが砂防の原点・出発点となっています。砂防技術者に農学部林業科の卒業生が多いのは、このような理由からです（残念ながら現在は、多くの大学で農学部や林学科の名称も消え、自然環境、生物環境等の名前に変更されています）。』

### 2.3.3 用語の定義

#### (1) グリーンインフラとグレーインフラ

用語の定義については第1章に述べられている。立山砂防調査では、「立山砂防をグリーンインフラとグレーインフラの協働事例として考えることができるか」という問題が調査過程で浮上したため、グリーンインフラとグレーインフラの定義について、本委員会の他の調査の動向を追いながら、本調査でのイメージを以下のように考えて、本報告書をまとめることにした。

なお、「インフラ」という視点から、産業や社会生活の基盤となることを必要条件と考え、砂防におけるグリーンインフラとグレーインフラについて以下のイメージで報告書をまとめる。

#### グリーンインフラ

- ・砂防におけるグリーンインフラの主要な対象は「山」。
- ・山は国民の生活になくってはならない存在で、その価値は今も変わらない。それどころか、観光に、健康に、地球温暖化防止にと多面的な価値を持ってきている<sup>2-34)</sup>。
- ・グリーンのイメージに対応する山の構成要素は、森林、下草、こけなどの植物。このほか、山は土、岩、石、砂利、砂、水（利水、水流、土石流）によっても構成されている。

#### グレーインフラ

- ・砂防におけるグレーインフラは堰堤などの構造物
- ・山を自然な状態に戻していく（近づけていく）ための短期的な対策。
- ・短期対策だとしても、グリーンインフラと協働して下流の街を守るためのインフラ（基盤）。

なお、土砂生産に対して行われた植栽による樹木もグレーインフラと捉えて考えることもできるが、ここでは、山全体をグリーンインフラとするイメージを持って、報告書をまとめることにした。

#### (2) 協働事例としての砂防

短期的にであったとしても、自然の営みによって生じる山体崩壊をはじめとする山の荒廃による自然災害（主として土石流）から、麓のあるいは下流の人の営みを守るため、山林などのグリーンインフラと堰堤などのグレーインフラが協働して機能を発揮する事例として砂防を捉えることができると考えた。

あえて捉え方を明記したのは、当初、堰堤などの構造物は短期的な対策で、砂防の思想は自然に戻すことという考えから、協働という言葉は適切でないと考えたためである。

しかしながら、自然のなりゆきに任せると自然は年月の経過で荒廃もする。この荒廃を自然のことを理解して構造物を配置、設計することで、自然の力、自然の自己治癒力を最大限に生かして、時間をかけて、目的（下流での人の営みを守る）を達成する。このように考え、協働事例として考えることができるとして調査を継続し、その結果をまとめることにした。

## 2.3.4 立山砂防

### (1) 立山砂防

鳶山崩れ（とんびやまくずれ）は、1858年4月9日（安政5年2月26日）の飛越地震（安政の大地震）により発生した、立山連峰・鳶山の山体崩壊である。鳶崩れ（とんびくずれ）、大鳶崩れ（おおとんびくずれ）ともいう（図2.3.1の右上）。この時に崩れた土砂が白岩砂防堰堤の背後に貯まっている（図2.3.1の中央の若干下方）。

大地震で常願寺川の姿は一変し、毎年のように出水が起こり、年とともに流出土砂のため河床が高くなり、これを防ぐため、富山県が砂防工事に着手したのが1906年。基幹となる砂防堰堤として1913年に湯川第一号堰堤の工事が着手されたが1919年と1922年の豪雨により根底から破壊、これを契機に国による直轄工事で行われるようになった。

1926年に直轄工事が始まり初代立山砂防事務所長となった赤城正雄は、約1か月間現地調査を行い、常願寺川全体の砂防計画を立てた。



図 2.3.1 鳶山崩れと白岩砂防堰堤<sup>2-37)</sup>

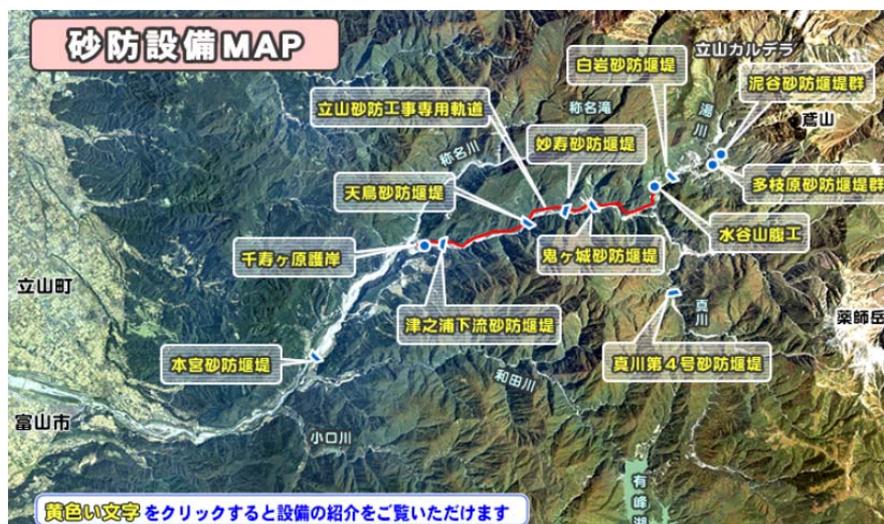


図 2.3.2 砂防設備マップ<sup>2-38)</sup>

## (2) 白岩砂防堰堤

高さ 63m, 7 基の副堰堤を合わせるとその落差は 108m. 常願寺川の上流に大量にある不安定土砂を抑える基幹となるのが白岩砂防堰堤の役割. 1939 年完成.

白岩砂防堰堤の背後には, 今も安政の大地震で発生した不安定土砂が貯められている. 1998 年に右岸部の補強工事に着手し, 2005 年竣工. 左岸部の補強も 2006 年度より実施し, 2009 年度に竣工. 今なお工事が続けられている.

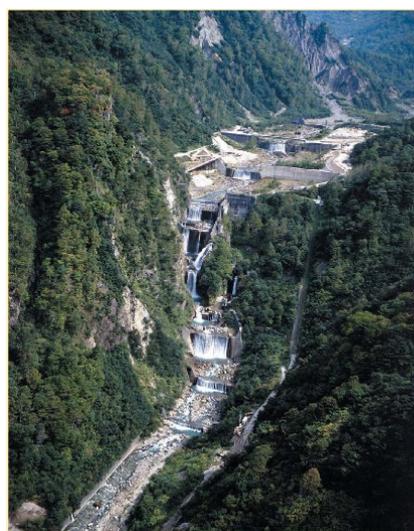


図 2.3.3 白岩砂防堰堤<sup>2-37)</sup>



図 2.3.4 白岩砂防堰堤<sup>2-39)</sup>

## (3) 泥谷砂防堰堤

赤城正雄は土砂の生産が著しい条件に適用させるため, 立山カルデラ内の泥谷で, 従来の山腹工に, 溪流工事を組み合わせた新しい砂防技術を示した. 谷に沿った土砂流に対して砂防堰堤群を構築するとともに, 山腹の斜面に山腹工を施すことによって, 不安定な土砂が安定し, 植物は定着する. 自然の力と砂防工事が一緒になって荒れた山腹を緑に変えられた事例である.

図 2.3.5 から, 泥谷砂防堰堤群によって施工後約 80 年の緑の回復がわかる. また, 図 2.3.6 から, 土砂が生産される山腹(斜面)の裸地の緑の回復がわかる.



被災直後(昭和 4 年)



砂防施設建設途中(昭和 8 年)



植生が回復(平成 25 年)

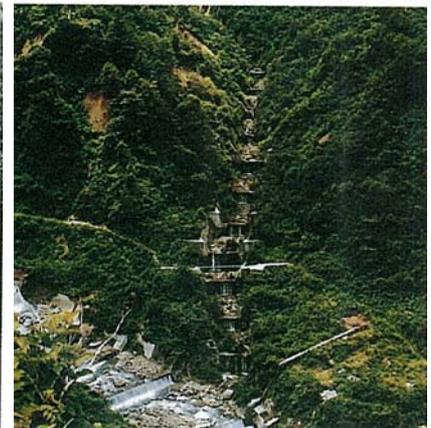
図 2.3.5 泥谷砂防堰堤(約 80 年後の緑の回復)<sup>2-40)</sup>



崩壊直後



砂防施設完了直後



緑のよみがえった現在

図 2.3.6 泥谷砂防堰堤（山腹の裸地の緑化）<sup>2-41)</sup>

荒れた山腹の土砂生産に対する対策として、図 2.3.7 に示す山腹緑化工がある。地被別の年侵食土量<sup>2-36)</sup>は、荒廃地でおおよそ 100~10mm/年、裸地でおおよそ 10~1mm/年、農耕地でおおよそ 1~0.1mm/年、草地でおおよそ 0.1~0.01mm/年と言われており、これらの数値から、荒廃地あるいは裸地を放置すると山腹の侵食が加速的に進むことがわかる。

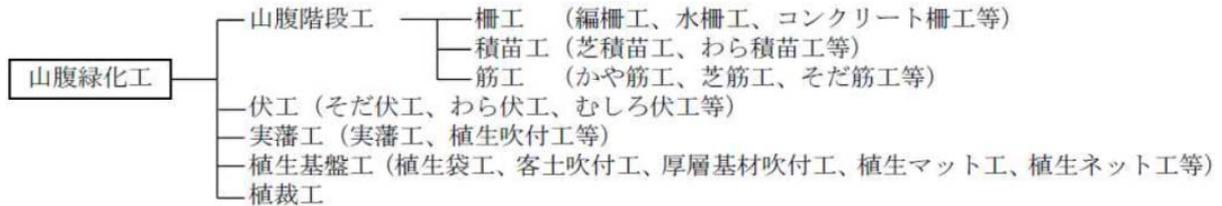


図 2.3.7 山腹緑化工<sup>2-42)</sup>

堰堤は、図 2.3.8 に示すように、土砂移動対策として建設される。最近では、必要に応じて、通常流は流し、異常土砂をせき止める透過型砂防堰堤（図 2.3.9 参照）が建設される傾向にある。



図 2.3.8 土石流および流木を止めた砂防堰堤<sup>2-43)</sup>



図 2.3.9 鋼製透過型砂防堰堤<sup>2-44)</sup>

### 2.3.5 砂防

#### (1) 我が国にとっての砂防の重要性

我が国は、小さい国であるが、国土面積に対する割合で考えると、もともとグリーンインフラを使える国であった。すなわち、地球上の陸地面積は全体の 33%、森林はその陸地の 33%であり、森林は地球の表面積の 10%弱の広がりでしか残っていない。これに対して、我が国は国土の 65%が森林で覆われている。そのため、空気と同様にその有難味を忘れがちである。

一方で、我が国は、周知のように自然災害が多い。ここでは、この自然災害に対する脆弱さについて、山岳国、火山国、多雨国、多雪国、台風常襲国、地震多発国、可住面積／人口集中の 7 視点から再確認する。

#### 山岳国<sup>2-33)</sup>

日本の国土面積の約 70%が山地。急峻な脊梁山脈が列島を縦横断。日本は世界有数の山岳国。

#### 火山国<sup>2-33)</sup>

地球の陸地のわずか 0.1%の面積に、世界の活火山の 10%以上にあたる 86 活火山が集中。日本の火山密度は世界の 100 倍。

#### 多雨国<sup>2-33)</sup>

日本の年間雨量は約 1700mm（世界平均は約 970mm）。日本は世界の 2 倍の多雨国。

#### 多雪国<sup>2-33)</sup>

日本の国土の約 50%が積雪地帯。その人口密度は 107 人/km<sup>2</sup>(カナダ 2 人/km<sup>2</sup>, ノルウェー 12 人/km<sup>2</sup>)。積雪 50cm 以上の地域に 2,000 万以上の人口が居住。

#### 台風常襲国

毎年、夏から秋にかけて台風が常襲。太平洋で発生する台風は、太平洋高気圧の縁を廻って北上し、日本付近を通過する傾向がある。

#### 地震多発国<sup>2-33)</sup>

日本は、地球の陸地のわずか 0.1%の面積で、地震放出エネルギーは約 10%。世界の 100 倍の地震国。

#### 可住面積／人口集中<sup>2-33)</sup>

日本の可住面積は国土の 1/4。諸外国に比べて極めて少ない。少ない可住地に多くの人口、資産が集中。

以上で見てきたように自然災害に脆弱な我が国にとって、今後、砂防事業をどのように進めていくかはますます重要になるものと考えられる。

我が国は、比較的急勾配で海に流れる早い流れの川の水は清澄な状態になることが多く、昔からごく普通の人々がきれいな水に接することができた。グリーンインフラをグレーインフラと協働させて、その価値を保全していくにあたって、この川は水源から海まで国内にあるため、一つの国で管理することが可能であることも忘れてたくない視点である。

我が国は国土の面積は小さいが豊かな国であることをこの機会に再認識したい。

(2) 砂防事業

a) 水害や土砂災害から生活を守る法律

我が国には山から流れ出る河川の流域を水害や土砂災害から守るため治水三法と呼ばれる以下の3つの法律がある。

- ・山地保全のための「森林法」(1896年制定)
- ・土砂流出防止を図る「砂防法」(1897年制定)
- ・洪水災害から下流域を守るための「河川法」(1896年制定)

「砂防法」は土石流の土砂災害から国民の生命・財産を守るために土砂の生産や流送土砂を止めたり調整したりする事業(砂防)に対する法律で、「森林法」は国土の保全と国民経済の発展に資するために森林の造成や維持に必要な事業(治山)のための法律で、重複を避けるため、毎年、砂防治山連絡調整会議が開催される。砂防法では、砂防指定地を指定し、その地域での行為の制限、砂防工事の施行、砂防施設の維持・修繕について規定している。

砂防事業は土砂流出防止を図る事業であり、治山という概念から、その対象は、土石流、地すべり、がけ崩れ全体に広がり、従来の砂防3法に、新法として、2001年に土砂災害防止法が施行されている。なお、従来の砂防3法とは、砂防法(1897年施行)、地すべり等防止法(1958年施行)、急傾斜地の崩壊による災害防止に関する法(1969年施行)である。

b) 行政

砂防工事は、主として都道府県が担ってきたが、白岩堰堤が建設された常願寺川の砂防工事をきっかけに、一つの県内を対象とした砂防工事も、高度な技術や費用を要する場合は国の直轄事業として実施されている。

砂防部は、図2.3.10に示すように、国土交通省の水管理・国土保全局の中にある。また、2.3.2の最後に示したように、砂防の技術者は林業科出身の方が多い。

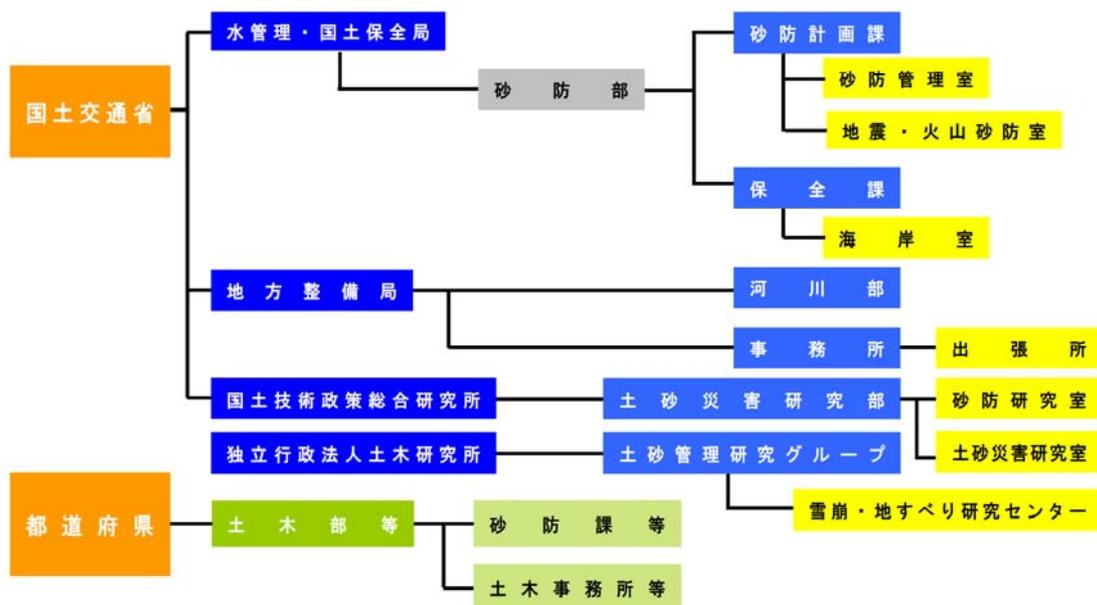


図 2.3.10 全国砂防関係行政組織図 (2015年度) <sup>2-45)</sup>

砂防に関連した事業は多岐にわたり、災害対策、火山対策、総合土砂災害対策、設備修繕、地域活性化支援、自然環境保全・創出が行われている<sup>2-45)</sup>。また、我が国の土砂災害警戒区域等の指定状況を表 2.3.1 に示す。これらから、近年の災害とその取り組みの一端を読み取ることができる。

### (3) 緑と砂防

砂防では自然に戻すことを基本に行われているが、その中で、時間をかけて元の生態系に戻すことが考えられている。

今後の砂防事業を展開していくには、緑をどれくらいうまく利用していくかにその成否が問われている。

砂防事業では、わが国ではもともと豊かな自然環境に恵まれていたにもかかわらず、ある時期からコンクリート工事一辺倒に傾き過ぎたことを反省して、より豊かな自然環境を保全し、破壊された自然を回復させ、新しい環境を創造し、かつ、市民の憩いの場として利用される環境づくりに全力を尽くすべく様々な取り組みが実施されているようである。

### (4) 砂防における課題

砂防事業では、今後の課題として以下の7つを現在取り組んでいるようである。

- ・ 流す砂防の推進（透過型堰堤など）
- ・ 省力化（危険工事の対策）
- ・ 木材
- ・ 緑の活用・創造
- ・ 災害弱者対策
- ・ 自然環境の保全（復元，維持，創造）
- ・ 活力ある地域の創出

構造技術者として協力あるいは取り組める課題もあるかと思う。また、今後、この課題で得られる成果は、他の事業でも利用できることもあるものと考えられる。

表 2.3.1 全国における土砂災害警戒区域等の指定状況  
(2019年2月28日時点，文献2-46)の表を抜粋して作成)

都道府県	土石流	急傾斜地の崩壊	地滑り	計
北海道	2212	3546	16	5774
青森県	1155	2799	84	4038
岩手県	2,975	3,373	4	6,352
宮城県	2,330	2,843	91	5,264
秋田県	3,714	2,896	125	6,735
山形県	2,172	2,224	750	5,146
福島県	2,494	2,220	75	4,789
茨城県	1,661	2,225	103	3,989
栃木県	3,255	3,361	94	6,710
群馬県	2,826	5,797	342	8,965
埼玉県	1,497	3,619	108	5,224
千葉県	0	3,638	0	3,638
東京都	1,871	11,381	29	13,281
神奈川県	1,683	8,731	55	10,469
山梨県	2,442	4,360	289	7,091
長野県	6,698	18,737	1515	26,950
新潟県	5,217	7,144	1443	13,804
富山県	1,383	2,843	657	4,883
石川県	2,115	1,911	394	4,420
岐阜県	6,582	8,445	96	15,123
静岡県	4,489	11,101	110	15,700
愛知県	3,508	8,798	1	12,307
三重県	3,973	7,800	0	11,773
福井県	4,531	7,041	132	11,704
滋賀県	2,143	2,971	31	5,145
京都府	6,719	9,977	57	16,753
大阪府	1,823	6,528	16	8,367
兵庫県	6,968	13,698	271	20,937
奈良県	3,824	6,980	163	10,967
和歌山県	4,237	10,331	368	14,936
鳥取県	2,607	3,474	120	6,201
島根県	13,246	18,312	721	32,279
岡山県	6,743	5,636	197	12,576
広島県	12,221	21,741	54	34,016
山口県	9,866	15,409	329	25,604
徳島県	1,699	6,191	135	8,025
香川県	3,260	4,612	123	7,995
愛媛県	3,773	2,189	57	6,019
高知県	3,855	9,230	0	13,085
福岡県	5,184	12,272	206	17,662
佐賀県	3,311	8,630	107	12,048
長崎県	3,316	19,964	11	23,291
熊本県	4,521	16,633	114	21,268
大分県	3,574	10,746	115	14,435
宮崎県	2,601	8,408	7	11,016
鹿児島県	5,893	12,776	3	18,672
沖縄県	248	850	83	1,181
合計	182,415	364,391	9801	556,607

a) 流す砂防の推進（透過型堰堤など）  
 砂防堰堤には、図 2.3.11 に示すように、不透過型と透過型がある。古くは、コンクリート製の不透過型堰堤が用いられてきたが、近年では、上記の図 2.3.9 や図 2.3.12 に示すような透過型堰堤が多く用いられるようになってきた。必要に応じて、既存の不透過型堰堤を透過型堰堤へ更新することも行われている。また、この考えに共通する部分のあるものとして、宇奈月ダムのような排砂設備を有するダムの建設がある。

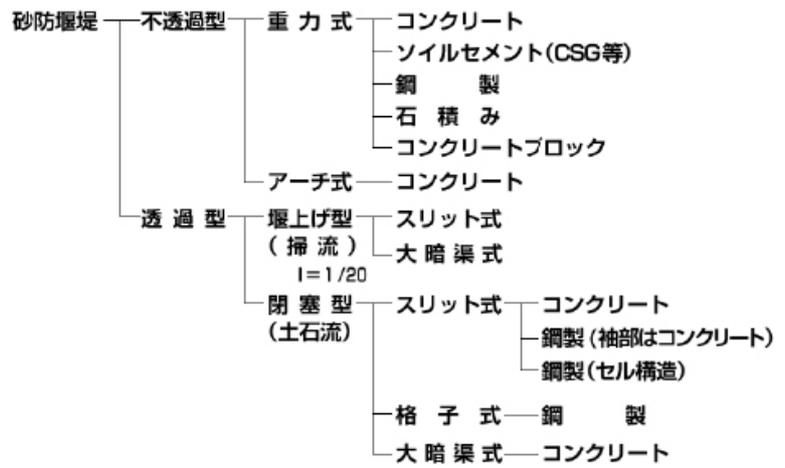


図 2.3.11 砂防堰堤の種類<sup>2-47)</sup>



(a) スリット砂防堰堤<sup>2-48)</sup>



(b) スーパー暗渠砂防堰堤<sup>2-49)</sup>

図 2.3.12 透過型砂防堰堤の例

b) 省力化

省力化はどの分野でも行われているが、砂防工事は、命を落とす自然災害の危険がある場所での工事もあり、重機の遠隔操作による施工も行われている。

c) 木材の活用や緑の活用・創造

砂防事業では、図 2.3.13 に示すような既存木を保存した法枠工や、図 2.3.14 に示すような丸太を利用した土留工などを採用し、木材の活用や緑の活用・創造を推進している。

また、北海道では、法枠工に工事を行う前に現地にて自生した植物を使うことでコスト削減を図っている。この考えは元の生態系に戻していくという砂防の考えにも合致している。



図 2.3.13 既存木を保存した法枠工<sup>2-50)</sup>

d) その他

災害弱者対策，自然環境の保全，活力ある地域の創出は，今後の社会で求められることとして，この分野の動向は学ぶものが多いと考えられる。

生活空間の安全性の確保のための砂防事業は今後も延々と継続されていく。従来は行政主導であったこれらの事業は，より実のあるものにすべく住民と緊密な連携をとって進めていく方向で進められている。

地域の人々と協力して，守るべき自然を守り，新しい生活空間を作り出し，これらの空間を使用して快適な生活が営める社会を目指すための砂防事業を目指しているようである。



図 2.3.14 丸太を用いた土留工<sup>2-51)</sup>

### 2.3.6 グレーインフラに携わる者の立場からの分析

グリーンインフラとグレーインフラの定義の仕方にもよるが，例えば，山をグリーンインフラとすると，このインフラは生活の重要な基盤であるが，地震や豪雨などで自然災害も引き起こす。このインフラを利用する立場から，グリーンインフラが自然災害で荒廃した部分を人が手を加えることで災害を起こす前の状態に近づけて，インフラとしての機能を回復する。一方，グリーンインフラは時間とともに変化する。そのため，調査の終盤では，砂防事業は元の状態に戻すというより，自然の原理に従って，インフラとしての機能を享受できるように新たな状態を作り出す事業ではないかと考える。その際には元の生態系に戻すという意味を十分理解する必要があると考えられる。

以下，砂防を調査して，今後さらに調査すると，意味のある知見が得られる可能性について思うところをまとめる。

#### (1) 要求性能と特性値

砂防では長い時間をかけて元の状態に戻していく，あるいは，目標の状態に近づけていくという考えで事業を進めてきている。そこでは，時間を考慮した耐久性についての経験が蓄積されているものと考えられる。一方，自然災害を相手に構造物を設計することを考えると，確率統計論に基づいて捉える必要のある設計荷重の考え方，その設計荷重に対して構造物に求める性能，不確実な特性値の取り扱いについての実務における経験をもとに整備されてきている知見は，2002年度に性能照査型設計が導入され，2017年に限界状態設計法が導入された道路橋の設計において参考になることがあるものと考えられる。

#### (2) 広大な対象

立山砂防の白岩砂防堰堤は赤木正雄が常願寺川の広大な流域を一か月間調査してその位置を決定し，他の堰堤群などの施設と協働させて常願寺川の治水を行っている。このように砂防や河川の分野では広大な領域の状況を把握してこれらとの関係を考えて個々の構造物を計画している。構造技術者は比較的個々の構造物に着目して設計することが多く，周囲の状況から構造物を見る機会は比較的少ないように思われる。今後の構造技術者は，広い領域での個々の構造物の意味を考え，関係を把握して，個々の構造物を設計施工していくと，解としての構造物は異なったものとなってくる可能性があると考えられる。

### (3) 構造物の設計手法

砂防の技術者は農学部林業科出身の方が多く、また、砂防が国土交通省の河川局に属していたことを考えると、構造物を設計する場合、橋梁を対象として整備されてきた道路橋示方書を参考にすることも考えられる。堰堤はコンクリートで建設されることが多く、マスコンクリートの代表的なダム設計基準で整備されてきたことも考えられる。しかしながら、近年の透過型堰堤では巨大な鋼製の構造が採用され、こうした構造物が求める性能の照査がどのように行われているか調査する意味があるものと考えられる。

国土交通省には、港湾局もあり、それぞれの構造物がどのような規定で、どのような考えで設計施工されているか、構造技術者の視点から調査し、比較検討して、より望ましい建設システムを創っていく意味はあるものと考えられる。このことは、限界状態設計法に移ってまもない道路橋の設計にもフィードバックできる知見が得られる可能性がある。

### (4) 複合構造

コンクリートと鋼のそれぞれの特性を生かして個々では得られない性能を持つ複合構造を開発してきたことから、グリーンインフラとグレーインフラの融合あるいは協働についても、調査の初期に、鋼及びコンクリートの複合のように、協働させた場合の機能ないし仕組みを見出そうと試みたが、難しかった。

グリーンインフラとしての山が荒廃すると、自然の成り行きに従うと地形は加速的に変化していく。自然のシステムを理解し、人工物であるグレーインフラを建設し、時間をかけて生態系を考慮した緑に戻す砂防の取り組みは、グリーンインフラとしての山がなくても、人工物であるグレーインフラがなくても、できないことである。時間的な視点が入るため、従来の複合構造の組み合わせの理解で捉えることが難しい。

複合構造で必要となるそれぞれの材質特性の理解が必要のように、グリーンインフラとグレーインフラを理解する必要があるが、その具体的事例に対して詳細な調査を行うには1年という調査研究期間は短い。

本調査では砂防の基本の調査を行うことにした。基本をある程度把握した段階で、今後の課題として、砂防における構造物の設計に用いる基準類や個々の設計・施工事例の調査の必要性を考えている。

今回の砂防調査を通して、協働事例における機能の発揮の仕組みを抽出して他のケースに応用するというより、砂防分野の計画実施手法の他の構造物への応用、あるいは、砂防分野で建設される構造物の設計施工に関する研究課題を構造技術者の視点からの発掘する意味はあるように考えられる。

構造物の管理者が異なっても、施工する建設業者が同じであれば、建設業者によって技術は伝わっていくと考えられる。しかしながら、対象構造物によって求められる性能は異なるため、対象構造物の研究によって、より適した構造が建設されることになると考えられる。

最後に、今後ますます重要になる安全安心な社会への要求を合理的に満足させていくためには、砂防を専門とする技術者、河川を専門とする技術者そして構造を専門とする技術者が個々に作り上げてきた知見を共有することで、個々の事業をより合理的に展開できるように感じている。

## 2.4 干潟と護岸の協働事例～中津干潟～

### 2.4.1 中津干潟の概要 <sup>2-52), 2-53)</sup>

大分県中津干潟は、瀬戸内海西部の周防灘に面し、重要港湾である中津港を挟んで山国川から犬丸川までの海岸線延長約 10km、面積約 1,347ha を有する広大な干潟である (図 2.4.1 参照)。干潟にはカブトガニ、アオギス、ナメクジウオ、スナメリなど数多くの希少生物が生息し、また、貝類漁業の盛んな好漁場としても知られる。



図 2.4.1 中津干潟の位置

(国土地理院の地図に加筆して作成)

干潟に挟まれて位置する中津港が 1999 年に重要港湾になり、港の拡張整備の浚渫土砂を使つての覆砂 (エコポート) 事業が干潟の大新田地区に計画された。この計画に対して干潟生態系への影響が懸念され、地元の市民団体である「水辺に遊ぶ会」から協議の場の設置要望があり、県は 2000 年に「中津港大新田地区環境整備懇談会」を設置した。この懇談会では、侵食が懸念される地域の「防護」と干潟の多様で豊かな生態系の「自然保護」の考え方の両立について活発な協議が行われ、エコポート事業は白紙となった。この懇談会の体制は、住民の関心が高い舞手川河口域の高潮対策 (別事業) にも引継がれ、2002 年に設置された「大新田地区 (舞手川河口) 環境整備協議会」では、高潮対策だけではなく、干潟環境の保全も考慮した護岸建設について協議が行われ、両方の要件を満たす工法として、セットバック護岸案が選定された。

同案は、湿地自体を面的防護施設と位置付け、その湿地の陸側に護岸を設ける案であり（図 2.4.2 参照）、護岸の外側の一部では海岸侵食を受けるものの、湿地の環境は保全され、護岸の内側は高潮や波浪から防護できると技術的に判断された。また、湿地による防護効果を考慮することにより、新設護岸の強度、高さや距離を抑えることができると考えられた。実際、新設護岸は捨石を用いた被覆石工法にて構築された。

図 2.4.3 に中津干潟舞手川河口部の全景を示す。

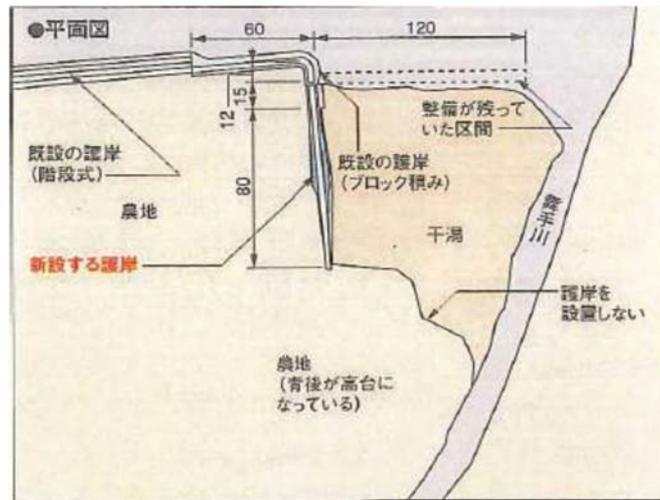


図 2.4.2 中津干潟セットバック護岸の概要<sup>2-52)</sup>



図 2.4.3 中津干潟舞手川河口部  
(国土地理院の空中写真に加筆して作成)

## 2.4.2 現地視察

### (1) 視察の概要

日 時：2018年11月22日(木)

場 所：大分県中津市 中津干潟 舞手川河口部

参加者：西崎委員長，下村副委員長，溝江幹事長，滝本幹事，仁平幹事，牧幹事，齋藤(隆)委員，  
平委員，中村(一)委員，三ツ木委員

### (2) 視察の結果

写真2.4.1は干潟の様子であり，右手が防護施設として考慮された湿地帯である．視察した時間帯は，干潮の時刻に近かったため，砂泥地が広範囲に広がっていた．また，同湿地帯は，写真2.4.2に示すとおりであり，海側は雑木林になっている．



写真 2.4.1 干潟の様子



写真 2.4.2 防護施設として考慮された湿地帯

写真 2.4.3 は、干潟から見た被覆石護岸の様子である。右手の海側から左手の陸側に向かって、約 100m にわたり、護岸が続いている。その陸側へ続く護岸の様子を写真 2.4.4 に示す。護岸の頂部の幅は約 2m あり、護岸の左右には草木が生い茂っている。



写真 2.4.3 干潟から見た被覆石護岸



写真 2.4.4 陸側の被覆石護岸

写真 2.4.5 は，被覆石護岸の側面を示している．護岸の高さは約 3m である．また，同写真は，護岸が海側から陸側へ曲がる位置で撮影したものであるが，手前に消波ブロックがあり，侵食を防いでいるものと推察される．



写真 2.4.5 被覆石護岸の側面

## 2.5 グリーン・グレー・ハイブリッドインフラの比較事例

### 2.5.1 はじめに

本節では、文献 2-54) の報告書にまとめられている米国ニューヨークのハワードビーチの沿岸レジリエンス向上におけるグリーンインフラの役割およびその評価方法について以下にまとめる。本報告書から得られる重要な知見は、沿岸レジリエンス向上のために、グリーンインフラのみ、グレーインフラのみだけでなく、グリーンインフラとグレーインフラを融合したハイブリッドインフラについても代替案として取り上げ、その災害レジリエンス向上への効果を数値的に評価していること、さらに、グリーンインフラを融合させることによる環境および市民の生活の質の向上に対する効果を具体的に評価し、貨幣価値に換算することで、災害レジリエンス向上効果と環境および生活の質向上効果を合わせて、代替案の選定方法を示しているところにある。

### 2.5.2 検討の全体概要

2012年10月29日の超大型の嵐 Sandy は、ニューヨーク市に、48人の犠牲者を出し、190億ドルの損害を与えた。これを契機にニューヨーク市が気象災害に対する対策を検討し、その一環として2012年の嵐 Sandy で被害の大きかったハワードビーチ (Howard Beach) の沿岸レジリエンス向上についても検討を行った。ハワードビーチで Sandy により浸水した地域を図 2.5.1 に示す。レジリエンス向上の検討の中で、グリーンインフラ (nature and nature-based infrastructure) の役割について評価した結果を示したのが文献 2-54) の報告書である。

対策を何もしない場合 (Base Case) は、100年に1度の洪水で、12.16億ドルの損害が出ると予想し、その対策のために、グリーンインフラのみから、ハイブリッドインフラ、グレーインフラまで5つの対策案を提案している。この5つの対策案の中で、どれが良いのか比較を行うために、100年に1度の洪水による損害だけでなく、初期投資費、維持管理費、環境や生活の質の向上効果などを評価項目として取り上げ、すべてを貨幣価値に換算することで、グリーンインフラの効果も含めた比較方法を示している。

最終的に、洪水による損害を最小にするという観点からでは、グレーインフラが最も優れているという結果であるが、上記の評価項目をすべて含めた比較では、費用便益の観点から、ハイブリッドインフラ (グリーンインフラとグレーインフラの融合) の1案が最も優れているという結論を導き出している。

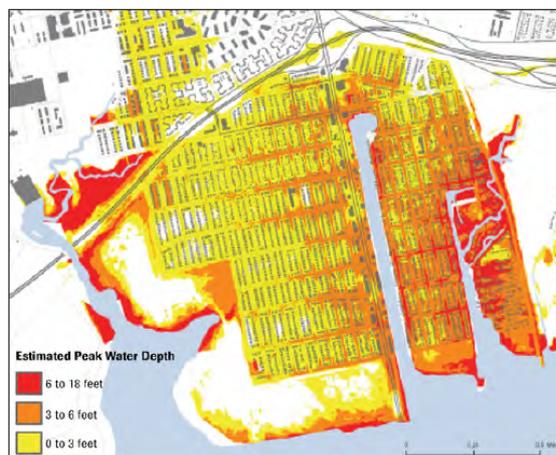


図 2.5.1 超大型嵐 Sandy により浸水した地域<sup>2-55)</sup>

### 2.5.3 グリーン・グレー・ハイブリッドインフラの比較検討

#### (1) 検討対象と分類の詳細

本検討では、沿岸環境における堤防を対象構造物としている。検討に際して設定したグリーンインフラとグレーインフラを表 2.5.1 に、後に行う比較評価に際して設定した性能と効果・付加価値を表 2.5.2 にそれぞれ示す。

表 2.5.1 検討に際して設定したグリーンインフラとグレーインフラ

グリーンインフラ	グレーインフラ
<ul style="list-style-type: none"> <li>● バーム (berm, 汀段)</li> <li>● 湿地 (marsh)</li> <li>● スジヒバリ貝 (ribbed mussels) で固められた海岸線</li> <li>● 岩石を使用した突堤と防波堤</li> <li>● 造成された内地と湿地</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 撤去可能な防潮壁</li> <li>● 防潮壁</li> <li>● 防潮扉</li> </ul>

表 2.5.2 検討に際して設定した対象性能および効果・付加価値

対象性能	効果・付加価値
<ul style="list-style-type: none"> <li>● 安全性</li> <li>● 環境との調和</li> <li>● 景観</li> <li>● レクリエーション</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 沿岸レジリエンスの向上</li> <li>● 環境の改善</li> <li>● 生活の質の向上</li> </ul>

#### (2) グリーン・グレー構造物の代替案

本検討では、ハードビーチにおける沿岸レジリエンス向上対策として、5つの代替案を検討している。5つの代替案の位置づけは、図 2.5.2 に示されるが、グリーンインフラのみから、グリーンインフラとグレーインフラを含むハイブリッドインフラ、グレーインフラのみの案を含んでいる。また、具体的に検討された5つの代替案を表 2.5.3 に示す。

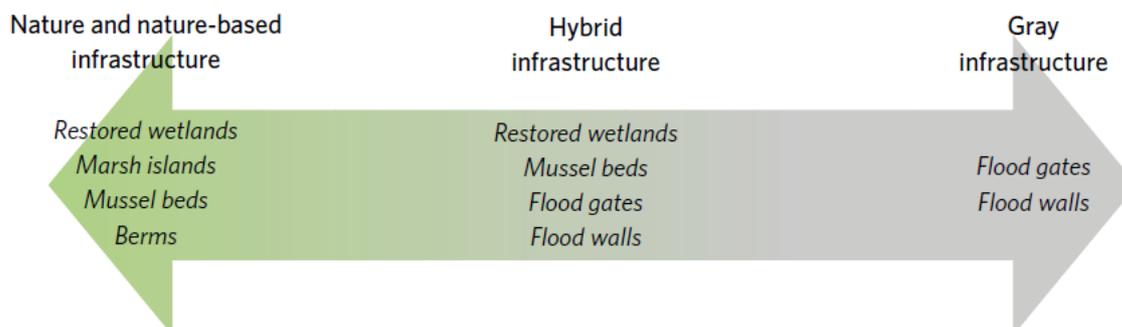


図 2.5.2 検討された代替案の範囲<sup>2-54)</sup>

表 2.5.3 検討に用いられた 5 つの代替案 (表中の図は文献 2-54) より引用)

<p>代替案 1：全てグリーンインフラ</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 湿地帯 (海岸線) の復元, 142 acres</li> <li>● スジヒバリ貝で固めた海岸線, 2,700 cubic yards</li> <li>● 湿地帯での汀段 (高さ 13 feet), 5,400 feet</li> <li>● 砂浜の復元, 11 acres</li> <li>● 岩石を用いた防波堤, 600 feet</li> <li>● 岩石を用いた 2 つの突堤, 700 feet</li> </ul> 	<p>代替案 2：全てグリーンインフラ (最も環境に配慮した案)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 湿地帯 (海岸線) の復元, 142 acres</li> <li>● スジヒバリ貝で固めた海岸線, 2,700 cubic yards</li> <li>● 湿地帯での汀段 (高さ 13 feet), 5,400 feet</li> <li>● 砂浜の復元, 11 acres</li> <li>● 湿地帯 (内地) の復元, 121 acres</li> <li>● 湿地帯 (内地) の造成, 72 acres</li> <li>● スジヒバリ貝で固めた海岸線 (島の周囲), 8,000 feet</li> </ul> 	<p>代替案 3：ハイブリッドインフラ (撤去可能な防潮壁を利用)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 湿地帯 (海岸線) の復元, 142 acres</li> <li>● スジヒバリ貝で固めた海岸線, 2,700 cubic yards</li> <li>● 湿地帯での汀段 (高さ 13 feet), 5,400 feet</li> <li>● 砂浜の復元, 11 acres</li> <li>● 岩石を用いた 2 つの突堤, 700 feet</li> <li>● 撤去可能な防潮壁 (Belt Parkway), 800 feet</li> <li>● 撤去可能な防潮壁 (Howard Beach and Old Howard Beach), 13,200 feet</li> </ul> 
<p>代替案 4：ハイブリッドインフラ (防潮門を利用)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 湿地帯 (海岸線) の復元, 142 acres</li> <li>● スジヒバリ貝で固めた海岸線, 2,700 cubic yards</li> <li>● 湿地帯での汀段 (高さ 13 feet), 3,120 feet</li> <li>● 砂浜の復元, 11 acres</li> <li>● 防潮門 (Belt Parkway)</li> <li>● 鋼矢板による水路の減幅</li> <li>● 水路の入り口での防潮門</li> </ul> 	<p>代替案 5：グレーインフラ (防潮壁と防潮門)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 防潮門 (Belt Parkway)</li> <li>● 鋼矢板による水路の減幅</li> <li>● 水路の入り口での防潮門</li> <li>● 防潮壁 (高さ 13 feet) (Spring Creek Park and western perimeter of Howard Beach and Belt Parkway), 12,600 feet</li> <li>● 防潮壁 (高さ 14 feet) (Charles Memorial Park and Hamilton Beach), 1,950 feet</li> </ul> 	

### (3) 評価方法

代替案の評価方法の概要を図 2.5.3 に示す。ここでは、コストとして、建設コスト (C1)、維持管理コスト (C2)、対策によって回避できる損害額 (B1)、生態系への便益 (B2)、人々が生態系から受ける便益 (B3) を考慮しており、これらを現在の貨幣価値に換算することにより、費用便益分析を行い、5 つの代替案の比較を行っている。

災害の推定には、100 年に 1 度の洪水モデルを用いており、構造物の耐用年数は 50 年と想定している。グリーンインフラ特有である生態系機能の保全と生態系サービスの評価は生息地同等分析 (Habitat Equivalency Analysis, HEA) によって行われているが、詳細は割愛する。

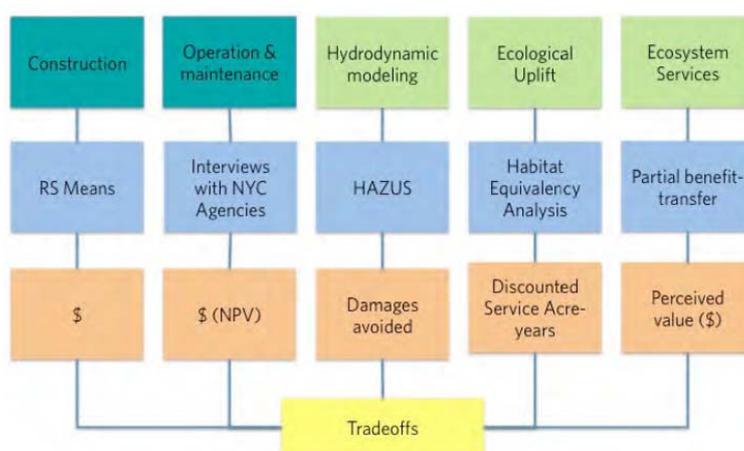


図 2.5.3 代替案の評価方法<sup>2-54)</sup>

### (4) 代替案の比較

100 年に 1 度の洪水による被害額は、次のように計算された。対策なし：12.16 億ドル，代替案 1：12.12 億ドル，代替案 2：11.51 億ドル，代替案 3：1.72 億ドル，代替案 4：0.01 億ドル，代替案 5：0 ドル。したがって、5 つの代替案の中では、グレーインフラを用いることで、100 年に 1 度の洪水に対して損害をなくすことができる。しかし、表 2.5.4 に示す費用便益分析の結果を見ると、ハイブリッドインフラである代替案 4 が最も好ましい代替案であるといえる。

表 2.5.4 費用便益分析の結果 (割引率 3%, 2014 年の億ドル)

	代替案 1	代替案 2	代替案 3	代替案 4	代替案 5
便益 (B)	0.258	0.397	2.185	2.501	2.253
コスト (C)	0.394	0.858	2.328	0.746	0.93
B-C	-0.136	-0.46	-0.144	1.755	1.322

### (5) 技術的課題・実現可能性

- グレーインフラとグリーンインフラの融合
- グリーンインフラの効果の評価方法
- グレーインフラ，グリーンインフラ，ハイブリッドインフラを含む代替案の比較方法

#### 2.5.4 まとめ

ここに示した事例は、さまざまな仮定の下での分析結果であり、ハワードビーチ特有の条件での検討結果であるので、常にハイブリッドインフラがグリーンインフラやグレーインフラに比べて便益の大きい対策になるわけではないが、グレーインフラ、グリーンインフラ、ハイブリッドインフラを同じ土俵で評価し比較する方法を示している貴重な事例である。

#### 参考文献

- 2-1) 防災情報機構 NPO 法人発行, 防災情報新聞社編集, 防災情報新聞 (無料版),  
[http://www.bosaijoho.jp/topnews/item\\_7253.html](http://www.bosaijoho.jp/topnews/item_7253.html)
- 2-2) 国土交通省東北地方整備局:「緑の防潮堤」岩沼海岸植樹式実施状況,  
[http://www.thr.mlit.go.jp/sendai/kasen\\_kaigan/fukkou/pdf/130711syokujyu.pdf](http://www.thr.mlit.go.jp/sendai/kasen_kaigan/fukkou/pdf/130711syokujyu.pdf)
- 2-3) 静岡県, 浜松市沿岸域防潮堤整備事業, 静岡県ホームページ,  
<http://www.pref.shizuoka.jp/kensetsu/ke-890/bouchoutei/yy>
- 2-4) Sutton-Grier, A. E., Wowk, K. and Bomford, H.: Future of our coasts: The potential for natural and hybrid infrastructure to enhance the resilience of our coastal communities, economies and ecosystems, *Environmental Science & Policy*, Vol.51, pp137-148, 2015
- 2-5) Vuik, V., Jonkman, S. N., Borsje, B. W. and Suzuki, T.: Nature-based flood protection: The efficiency of vegetated foreshores for reducing wave loads on coastal dikes, *Coastal Engineering*, Vol. 116, pp.42-56, 2016
- 2-6) Joyce, J., Chang, N. B., Harji, R. and Ruppert, T.: Coupling infrastructure resilience and flood risk assessment via copulas analyses for a coastal green-grey-blue drainage system under extreme weather events, *Environmental Modelling & Software*, Vol.100, pp.82-103, 2018
- 2-7) The Nature Conservancy (2015) : Urban Coastal Resilience : Valuing Nature's Role, Case Study: Howard Beach, Queens, New York, <https://www.nature.org/media/newyork/urban-coastal-resilience.pdf>.
- 2-8) 国土交通省:安心・安全で持続可能な国土の形成について(参考資料), 第4回計画部会配布資料, 2014.11.
- 2-9) 平成22年度内閣官房総合海洋政策本部事務局調査:中津干潟の保全の取組み, 沿岸域の総合的管理の取組み事例に関する調査報告書, 2011.3.
- 2-10) 里浜づくり研究会:「里浜づくり」のみちしるべ, 国土交通省港湾局「里浜づくり」ホームページ  
[http://www.mlit.go.jp/kowan/umibe\\_bunka/satohama/18/main2-1.pdf](http://www.mlit.go.jp/kowan/umibe_bunka/satohama/18/main2-1.pdf)
- 2-11) 伊藤誠記, 安仁屋勉, 座覇洋:琉球諸島沿岸サンゴリーフの天然防災機能評価検討調査,  
[http://www.dc.ogb.go.jp/Kyoku/kengyo/kokudo\\_kenkyukai/20090807\\_sougou/pdf/gaiyou/gaiyou\\_03.pdf](http://www.dc.ogb.go.jp/Kyoku/kengyo/kokudo_kenkyukai/20090807_sougou/pdf/gaiyou/gaiyou_03.pdf)
- 2-12) みどりの基本計画, 世田谷区ホームページ,  
<http://www.city.setagaya.lg.jp/kurashi/102/126/419/408/d00017133.html>
- 2-13) 宇田川治水計画策定協議会ホームページ, [http://www.athena-int.co.jp/udagawa/udagawa\\_top.html](http://www.athena-int.co.jp/udagawa/udagawa_top.html)
- 2-14) 国土交通省北陸地方整備局立山砂防事務所ホームページ, <http://www.hrr.mlit.go.jp/tateyama/>
- 2-15) 国土保全を担う砂防の発展と現状, 地理空間情報技術ミュージアムホームページ,  
<http://mogist.kkc.co.jp/history/development/06/index.html>
- 2-16) 緑斜面研究会:緑斜面の健全性診断と再生のための新技術 — 里山や道路を土砂災害から護る —, 2012.10.

- 2-17) 里浜づくり研究会：「里浜づくり」のみちしるべ，国土交通省港湾局“里浜づくり”ホームページ，  
[http://www.mlit.go.jp/kowan/umibe\\_bunka/satohama/18/main2-3.pdf](http://www.mlit.go.jp/kowan/umibe_bunka/satohama/18/main2-3.pdf)
- 2-18) 災害に強い森づくり～県民緑税の活用～，兵庫県ホームページ，  
[https://web.pref.hyogo.lg.jp/nk21/af15\\_000000004.html](https://web.pref.hyogo.lg.jp/nk21/af15_000000004.html)  
<https://web.pref.hyogo.lg.jp/nk21/documents/02satoyama.pdf>
- 2-19) 人口減少時代におけるグリーンインフラの活用方策について，名古屋都市センターホームページ，  
<http://www.nup.or.jp/nui/user/media/document/investigation/h29/No131.pdf>
- 2-20) 防災情報機構 NPO 法人発行，防災情報新聞社編集，防災情報新聞（無料版），  
[http://www.bosaijoho.jp/topnews/item\\_7253.html](http://www.bosaijoho.jp/topnews/item_7253.html)
- 2-21) 国土交通省東北地方整備局：「緑の防潮堤」岩沼海岸植樹式実施状況，  
[http://www.thr.mlit.go.jp/sendai/kasen\\_kaigan/fukkou/pdf/130711syokujyu.pdf](http://www.thr.mlit.go.jp/sendai/kasen_kaigan/fukkou/pdf/130711syokujyu.pdf)
- 2-22) 静岡県，浜松市沿岸域防潮堤整備事業，静岡県ホームページ，  
<http://www.pref.shizuoka.jp/kensetsu/ke-890/bouchoutei/>
- 2-23) Sutton-Grier, A. E., Wowk, K. and Bomford, H. : Future of our coasts: The potential for natural and hybrid infrastructure to enhance the resilience of our coastal communities, economies and ecosystems, *Environmental Science & Policy*, Vol.51, pp137-148, 2015
- 2-24) Danielsen, F. et al. : The Asian Tsunami : A protective role for coastal vegetation, *SCIENCE*, Vol.310, p.643, 2005
- 2-25) Tanaka, N., Sasaki, Y., Mowjood, M. I. I. and Jinadasa, K. B. S. N. : Coastal vegetation structures and their functions in tsunami protection : Experience of the recent Indian Ocean tsunami, *Landscape and Ecological Engineering*, Vol.3, pp.33-45, 2007
- 2-26) Arjong NOPMUENG, 山本吉道, Puangpet RATTANARAMA : タイ国でのマングローブ林の特徴と海岸侵食防止効果, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol.70, No.2, pp.I\_768-773, 2014
- 2-27) 山本吉道, Puangpet RATTANARAMA, Arjong NOPMUENG : マングローブ林による消波と侵食防止の効果評価法, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol.71, No.2, pp.I\_799-804, 2015
- 2-28) 山本洋平, 浅野敏之, 林建二郎 : 海岸林樹木に作用する流体力に関する実験的研究, 海洋開発論文集, 第 26 巻, pp.1023-1028, 2010
- 2-29) 平石哲也 : 植栽による津波力減殺効果に関する研究, 港湾空港技術研究所資料, No.1171, 2008
- 2-30) 森林保全・管理技術研究会 : 津波と海岸林に関する調査研究事業, 平成 22 年度調査報告書, 2012
- 2-31) Vuik, V., Jonkman, S. N., Borsje, B. W. and Suzuki, T. : Nature-based flood protection : The efficiency of vegetated foreshores for reducing wave loads on coastal dikes, *Coastal Engineering*, Vol. 116, pp.42-56, 2016
- 2-32) 飯村耕介, 田中規夫, 池田裕一 : 樹林帯と堤防の位置関係の違いが樹木破壊や津波減災効果に与える影響, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.69, No.2, pp.401-405, 2013
- 2-33) 矢野勝太郎 : 土砂災害の実態, よくわかる砂防百科, vol.4, (社)全国治水砂防協会, 2001.12.
- 2-34) 岡本正男 : 砂防行政の仕組み, よくわかる砂防百科, vol.6, (社)全国治水砂防協会, 2005.10.
- 2-35) 岡本正男, 阿部宗平 : 自然に生きる砂防, よくわかる砂防百科, vol.9, (社)全国治水砂防協会, 2006.10.
- 2-36) 大手桂二 : 緑と砂防, よくわかる砂防百科, vol.10, (社)全国治水砂防協会, 2001.12.
- 2-37) 国土交通省 北陸地方整備局 立山砂防事務所 : ～防災機能の保持と文化財的価値の保存～ 白岩砂防堰堤, 2018.3.

- 2-38) 国土交通省 北陸地方整備局 立山砂防事務所 ホームページ,  
<http://www.hrr.mlit.go.jp/tateyama/jigyo/shisetu.html>
- 2-39) 国土交通省 北陸地方整備局 立山砂防事務所 ホームページ,  
<http://www.hrr.mlit.go.jp/tateyama/jigyo/shisetu/shiraiwa.html>
- 2-40) 国土交通省 北陸地方整備局 立山砂防事務所 ホームページ,  
<http://www.hrr.mlit.go.jp/tateyama/jigyo/shisetu/dorodani.html>
- 2-41) 国土交通省 北陸地方整備局 立山砂防事務所：富山の暮らしと立山砂防～常願寺川の上流をたずねて～, 1993.
- 2-42) 国土交通省 北陸地方整備局：設計要領（河川編），第3章 砂防編，2018.7.
- 2-43) 国土交通省 砂防部：砂防施設の効果事例，2018.3.
- 2-44) 国土交通省 砂防部：平成29年7月九州北部豪雨を踏まえた今後の流木対策，2017.7.
- 2-45) 国土交通省 砂防部：砂防関係事業の概要，2016
- 2-46) 国土交通省：全国における土砂災害警戒区域等の指定状況（H31.2.28時点）
- 2-47) 国土交通省 東北地方整備局 北上川下流河川事務所 ホームページ,  
<http://www.thr.mlit.go.jp/karyuu/construction/sandcontrol.html>
- 2-48) 国土交通省 北陸地方整備局 湯沢砂防事務所 ホームページ,  
<http://www.hrr.mlit.go.jp/yuzawa/sabo/shisetsu3.html>
- 2-49) 国土交通省 北陸地方整備局 ホームページ,  
<http://www.hrr.mlit.go.jp/river/saboukan/area/03.hokurikuchiho/10.seibikyoku/hokurikutop/matu4kai/ch-hok01.htm>
- 2-50) 国土交通省 ホームページ,  
<http://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sabo/purpose.html>
- 2-51) 農林水産省 林野庁 関東森林管理局 ホームページ,  
<http://www.rinya.maff.go.jp/kanto/policy/business/santi-saigai/mokuzairiyou.html>
- 2-52) 国土交通省：安心・安全で持続可能な国土の形成について（参考資料），第4回計画部会配布資料，2014.11.
- 2-53) 平成22年度内閣官房総合海洋政策本部事務局調査：中津干潟の保全の取組み，沿岸域の総合的管理の取組み事例に関する調査報告書，2011.3.
- 2-54) The Nature Conservancy (2015) : Urban Coastal Resilience : Valuing Nature’s Role, Case Study: Howard Beach, Queens, New York, <https://www.nature.org/media/newyork/urban-coastal-resilience.pdf>.
- 2-55) Freed, A., Percifull, E., Kaiser, C., Goldstick, J., Wilson, M., and Maxwell, E. (2013) : Integrating natural infrastructure into urban coastal resilience : Howard Beach, Queens, New York, The Nature Conservancy.

## 第3章 グレーインフラとグリーンインフラの新たな融合に関する検討

本章では、前章の協働とは異なる融合のありかたとして、グリーンインフラを活かすためのグレーインフラの追加について検討するとともに、そのほかの新たな融合を生み出す際の考え方（コンセプト）について示す。

### 3.1 グリーンインフラを有効活用するためのグレーインフラの活用事例

#### 3.1.1 実施例

本節では、グリーンインフラを有効活用するために、グレーインフラによって付加価値が追加された事例調査を行った。既に世の中にある以下のハイブリッドインフラの事例として8例（WG2-1～WG2-8）の事例を挙げる。

表 3.1.1 グリーンインフラの有効活用とグレーインフラによる付加価値追加の事例

No.	グリーンインフラ	グレーインフラ	ハイブリッドインフラ	付加価値	実施例
WG2-1	砂浜	防砂堤、離岸堤	防砂堤	海岸浸食防止（漂砂による航路・泊地の埋没防止）	金沢港 など
WG2-2	風	道路、建物	風の道	一酸化炭素濃度の低下、ヒートアイランド現象の緩和	シュツットガルト、東京駅・八重洲通り周辺 など
WG2-3	河川	ポーラスコンクリート	ポーラスコンクリート河川護岸	堤防の浸食防止、生態系の保全、景観	多摩川の護岸の一部 など
WG2-4	森林	防雪柵	鉄道林と防雪柵	線路への雪の吹込み抑制、苗木の成長促進	丸松2号林地 など
WG2-5	森林	砂防柵	海岸林と防風柵	飛砂、潮風、波浪、高潮等による被害の防止又は軽減	島根県海岸砂丘地 など
WG2-6	植物	舗装	緑化系舗装	温暖化対策	箱根エコパーキング、創エネハウス（横浜）駐車場 など
WG2-7	森林	利用促進設備、保全設備	森林公園	リラクゼーション効果、景観保全、土壌保全	国営武蔵丘陵森林公園、群馬県立森林公園、広島県仙養ヶ原森林公園 など
WG2-8	農地	利用促進設備、保全設備	農業パーク	遊休農地・荒廃農地の抑制、生態系の保全、文化伝承・食育	なめがたファーマーズビレッジ、伊賀の里モクモク手伝いファーム など

#### 3.1.2 実施例の概要

##### (1) 防砂堤（WG2-1）

防砂堤は、砂浜における漂砂の移動を阻止して、防砂堤の両側に堆砂させることで、海岸線の安定を図る構造物<sup>3-1)</sup>である。海岸における浸食防止<sup>3-2)</sup>と港湾における航路泊地の埋没防止<sup>3-3), 3-4)</sup>を目的として、各地で施工されている。防砂堤には、透過性か不透過性、一本突堤かT型突堤という構造の違いがあり、この違いが防砂堤左右の地形変化や貯砂能力と密接な関係<sup>3-5)</sup>がある。

図 3.1.1 に示す、金沢港では、船舶の大型化に対応するため、国際ターミナル整備事業において、港内に運ばれる漂砂を抑制する目的で防砂堤が延伸されたが、防砂堤の効果と影響を確認するために、領域別の埋

没速度が測定された。その結果、防砂堤の延伸前後で埋没域に変化が生じるものの、ほぼ一様な埋没速度で増加していることが明らかとなった。また、埋没の主要起因は、大きな砂移動を生じさせる波浪と浮遊砂の移動を助長する副振動であることも明らかとなった。



図 3.1.1 金沢港の防砂堤とその他の岸壁（文献 3-4）を一部修正）

(2) 風の道 (WG2-2)

「風の道」<sup>3-6), 3-7)</sup>とは、ドイツのシュツットガルト市の都市計画で採用され、注目を集めた概念である。図 3.1.2 に示すように<sup>3-8)</sup>、用途地域や建築物を計画的に配置することにより、自然の冷気流を用いて、都市の大気汚染物質をすみやかに吹き飛ばすとともに、日射による舗装面の蓄熱や人工廃熱で熱くなった都市を冷やそうというねらいもある。ドイツを代表する自動車産業の中心地であるシュツットガルト市は、産業発展とそれに伴う都市の発展により大気汚染の問題が深刻となった。このような状況を受けて、都市計画担当者と気候学者が協力し、市街地を取り囲む丘陵からの夜間に発生する斜面冷気流を市街地内部へ途切れなく導入させるため、ドイツ特有の厳しい都市計画制度を実施し、新鮮で冷涼な空気の侵入経路「風の道」を創り出した。その結果、シュツットガルト市の一酸化炭素濃度はドイツの基準値を大幅に下回り、図 3.1.3 に示すように、夏季の気温上昇の緩和にも貢献したとされている。

我が国でも「風の道」に関する検討が数多く行われている。宮越ら<sup>3-9)</sup>は、東京都心・八重洲通り周辺を対象とした風洞実験により、現状における街路の「風の道」の実態の検証と街路周辺の市街地形態変化による風向および風速変化の分析から、市街地形態と街路内の風の流れの関係を検証して、東西道路が「風の道」として機能している状況や建物高さを変更した場合の風速等に及ぼす影響を明らかにしている。地球シミュレータを用いた大規模シミュレーション<sup>3-10)</sup>では、東京駅前のビルを撤去することで、体感温度が 2℃程低下する結果が得られている。

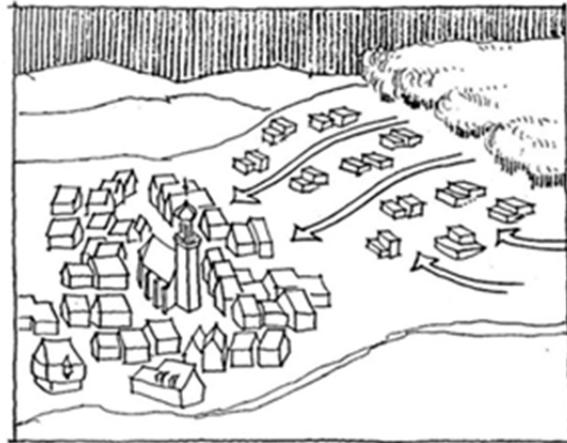


図 3.1.2 ドイツの「風の道」のイメージ<sup>3-10)</sup>

### (3) ポーラスコンクリート (WG2-3)

ポーラスコンクリート<sup>3-11)</sup>は、少量の細骨材もしくは細骨材を使用しないで、セメント、水、粗骨材のみで製造する多孔質のコンクリートで、空隙が多いため、透水・排水・保水性能、水質浄化性能、吸音性能、温熱性能、調湿・吸着性能等に優れた機能を有しており、植生基盤等への適用が可能なコンクリートである。ここで対象とするポーラスコンクリートは、当初は自然現象の変化から植物を保護するが、植物の根の生育とともにその役割を終えるものとする。

河川護岸に用いられるポーラスコンクリート<sup>3-12)</sup>は、「植生重視護岸タイプ」と「強度重視護岸タイプ」に分けられる。植物の生育が良好となるよう設定された前者の圧縮強度は  $10\text{N}/\text{mm}^2$  程度で、一般的なコンクリート構造物としての強度を満足できるよう設定された後者の設計基準強度は  $18\text{N}/\text{mm}^2$  以上とされており、ポーラスコンクリート河川護岸施工事例の追跡調査<sup>3-13)</sup>では、調査した 28 件すべての圧縮強度が  $10\sim 18\text{N}/\text{mm}^2$  の範囲に入っており、現在、河川護岸に用いられているポーラスコンクリートは、図 3.1.3 に示すように、植物の根の肥大力によって破壊することはないものと考えられる。

研究段階ではあるが、粗骨材に人工軽量骨材を用いた場合、クマザサの地下茎の肥大力で破壊可能であるという検討結果<sup>3-14)</sup>や、植物の根が部材の端部で生長した場合、局所的なひび割れが発生する懸念<sup>3-15)</sup>が報告されている。

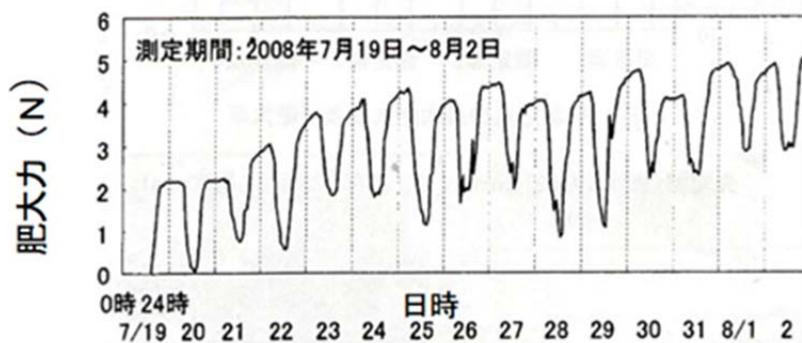


図 3.1.3 肥大力測定結果<sup>3-14)</sup>



## 2) グレーインフラからグリーンインフラに置き換わった事例（雪覆いと防雪林）

野辺地近辺である東北本線の乙供～小湊間には、東北本線の開通間もない時期には 15 カ所、延長約 5km の雪覆いが設置されていた。しかしながら、防雪林の生育に伴って次第に不要となり、昭和 3 年（1928 年）にはすべて撤去された<sup>3-17)</sup>。グレーインフラとしての雪覆いが、グリーンインフラとしての防雪林の成長に伴いその役目を引き継いだ。

## 3) グレーインフラがグリーンインフラの成長を促した事例（防雪柵と防雪林）

吹雪の常襲地は、寒冷地域の原野なので林木の生育に適さない飛砂地や泥炭地であることが珍しくない。原野に造成された吹雪防止林が吹雪防止機能を発揮するまで成長するには、20 年以上の長い年月を要することもまれではない。そのため、植えられた苗木を飛砂や寒風から守る目的で鉄道林の前線に保護柵として防雪柵を設置する<sup>3-18)</sup> ことがある。図 3.1.5 に、鉄道林と防雪柵の典型的な配置の例を示す。

図のような配置を行っても、防雪林が育成されず、本来主役となるべきグリーンインフラに役目を引き継げなかった事例も存在するが、防雪林が成長した場所では、過去に吹雪防止機能を担いかつ、苗木の成長を守った防雪柵の姿を見ることができる。図 3.1.6 に防雪林に吹雪防止機能を引き継いだ防雪柵を示す。グレーインフラとしての雪覆いが、グリーンインフラとしての防雪林の成長を促しながら、その役目を引き継いだ。



図 3.1.6 鉄道林に吹雪防止機能を引き継いだ防雪柵<sup>3-18)</sup>

## 4) おわりに

グリーンインフラを有効活用するために、グレーインフラによって付加価値が追加された事例として、鉄道の防雪林と雪覆い、および防雪林と防雪柵の例を紹介した。

## (5) 海岸林と防風柵 (WG2-5)

海岸林は風光明媚な景観を構成する重要な森林であるとともに、強風や塩害から家屋や農地を守る役割を担う。しかし、虫害などにより、海岸林の面積が低下している地域等では、海岸砂丘地における海岸林を再生や整備を進められている<sup>3-19)</sup>。砂丘造成においては、整備を行う海岸林の前面に砂丘を造成し、海岸からの風力の減殺、および均一化を図ることによって、飛砂を防止し、砂地を固定し、植栽木の正常な生育を促す。森林造成においては、グレーインフラである防風柵を設置しながら、グリーンインフラである防風林帯を造成して飛砂、潮風等を防止、または軽減し、耕作地や住宅地等の後背地の保全を図る。

#### (6) 緑化系舗装 (WG2-6)

緑化系舗装は、芝生などの植物により路面を部分的もしくは全面的に被覆している舗装であり、日常生活では駐車スペースや交通車両が乗り入れる広場やなどで主に見かけるものである。図 3.1.7 に緑化系舗装の例<sup>3-20)</sup>を示す。

緑化系舗装は、グリーンインフラの植物+グレーインフラの保護材という非常にシンプルな構成により成立しており、グリーンインフラだけでは耐荷性や耐久性の観点から舗装としての成立が困難であることに對して、グレーインフラを追加することで不足していた機能が補完される。

植物は車両荷重による繰り返し踏圧によって損傷を受けやすいため、その保護材としてコンクリート製等のブロック部材や、樹脂製もしくは鋼製のマットと組み合わせて植栽を行う。保護材の設置方法は、例えば、コンクリート製ブロックの場合は、最初に隙間を設けてブロックを敷設し、そのブロック間に植栽を施すことで緑化を行う。樹脂製マットの場合は、最初に突起が付いた面を上にしてマットを全面に敷設して、その上に植栽を施すこととなる。いずれの場合も、ブロックの隙間および突起の間隔がタイヤ接地面の幅よりも狭く、植栽の仕上がり高さがブロックや突起の天端から少し下がっているため、車両の踏圧は保護材が負担することとなる。

緑化系舗装に期待される効果としては、貯留水分の増加による気化作用、植物の蒸散作用および緑化色の赤外線反射作用による路面温度の上昇抑制が主であり、アスファルト舗装に対して $-13\sim 15^{\circ}\text{C}$ の低減効果が得られるとの報告もある<sup>3-20), 3-21)</sup>。また、その他にも、景観の向上、雨水の地下浸透作用の促進、路面の衝撃吸収性の向上など、グリーンインフラが本来持っている様々な効果が発揮される。



図 3.1.7 緑化系舗装の例<sup>3-20)</sup>

#### (7) 森林公園 (WG2-7)

森林公園とは、森林を中心として整備された公園であり、地名を付け加えて〇〇森林公園と呼ばれる施設が日本全国に存在している<sup>3-22) - 3-24)</sup>。従来、森林に期待される機能は、木材生産の場であること、地すべり災害の防止効果、雨水等の水資源の涵養効果などであった。一方で、現在ではレクリエーションおよび地域交流の場であることや、CO<sub>2</sub>削減に寄与する環境保全効果など、期待する機能の多様化が進んでいる。

環境保全効果を期待する場合は、森林をグリーンインフラとしてそのままの状態を利用・管理することとなるが、レクリエーションや地域交流の場として森林公園の形態で利用する場合には、森林というグリーンインフラを中心に、公園内施設、アクセス路、および周辺斜面の整備などのグレーインフラを追加して一緒に管理していく必要がある。

森林公園の利点は、主な資源である森林がグリーンインフラとしての機能を最初から有しており、景観性の向上、リラグゼーション効果、防災効果などを持続的に利用できることである。追加されるグレーインフラには、グリーンインフラの効果をさらに有効活用するための機能が期待されており、利用者数の増加や安全な利用環境の整備が目的となる。森林公園は、観光産業などの地域産業の活性化や地域防災の拠点確保につながる可能性を秘めていることから、地域再生の一手段として今後も期待されるものと考えられる。

#### (8) 農業パーク (WG2-8)

水田や畑地などの農地は、食糧生産を目的として所有者や管理者が手を加えることで成立しているが、自然環境や景観を維持し、生態系の一部をなしていると考えられることから農地自体はグリーンインフラと捉えることができる。このグリーンインフラとしての農地を、地域振興のための観光資源として利用する手段としては、栽培された農作物の直接販売を行う観光農園化が挙げられるが、さらに農地を中心とした大規模なテーマパーク化を行ったものが農業パークである。

農地では、元々、土地の造成や圃場整備にグレーインフラの構築技術が用いられているだけでなく、農作業用の灌漑用水や農道など、農業土木施設としてのグレーインフラが活用されているが、さらに農業パークでは、農業体験施設、レクリエーション施設および農作物の販売施設やレストランなどのグレーインフラが追加される<sup>3-25)</sup>。

農村における人口減少や高齢化が進む中で、農業パークは、次世代の農業の担い手への技術伝承や、6次産業の活性化などの地域振興対策に有効であり、今後も大きな問題となっていく荒廃農地、遊休農地や耕作放棄地の増加<sup>3-26)</sup>の抑止対策としても用いられる事例が増えて行くと思われる。

### 3.2 今後効果が期待できる融合案の検討

本節では、まだ広く普及していないものの、今後効果が期待できるグリーンインフラとグレーインフラの融合案を検討するために、まず、3.2.1では協働が考えられるグリーンインフラとグレーインフラの融合案を挙げる。また、3.2.2では両者の協働で得られる付加価値の例を挙げる。これらの組合せと付加価値を参考にして、新たな融合案のイメージを3.2.3に示す。

#### 3.2.1 グリーンインフラとグレーインフラの融合案

河川：ダム、堰、放水路、ポーラスコンクリート

干潟：離岸堤、堤防、砂止潜堤

森林：治山ダム、林道、利用促進設備、保全設備、防雪柵、橋梁

農地：用水路、排水路、農道、ため池、頭首工

空地：防災空地、避難路

海岸：岸壁、護岸、防波堤、離岸堤、航路、洪水ゲート

沿岸：消波ブロック、根固ブロック、ケーソン

砂浜：防砂堤（離岸堤）、埋設護岸、浚渫土砂・リサイクル材

珊瑚礁：土砂流出防止柵

緑道：透水性舗装、埋設管、共同溝、涵養施設

街路樹：埋設管，共同溝，砕石

湿地：排水設備

遊水池：水路，堤防

水路：橋梁，擁壁，堰，枡

庭：雨水貯留・浸透施設，塀，石垣，生け垣

公園：緑地：歩道，調整池，石垣，生け垣，給水・排水設備

風：道路，建物

間伐材：撤去・再利用が容易なグレーインフラ

人工地盤：道路，駐車場，広場，公園，住宅

道路・鉄道：トンネル，橋梁，落石防護工，擁壁，共同溝，埋設管，側溝

住宅地：道路，共同溝

街区：道路，公園

建物：駐車場，車庫，塀

### 3.2.2 グリーンインフラとグレーインフラの融合で得られる付加価値の例

地震減災，洪水対策，治水，津波減災，海岸浸食防止，土壌保全，土砂災害防止，雪崩対策，風雪害対策，苗木の成長促進，インフラ維持管理の省力化，大災害時の避難所，山火事防止，生態系の保全，水源・地下水涵養，水質・大気浄化，騒音の抑制，生物多様性の保全，気候変動（ヒートアイランド）緩和，景観，レクリエーション機会の提供，環境教育の場の提供，コミュニティ形成，リラクゼーション効果，観光資源，資産価値の上昇

### 3.2.3 新たな融合案のイメージ

#### (1) 間伐材の更新構造物への再利用

地球温暖化問題の観点では，森林の間伐材は焼却処分してしまうと定着されている CO<sub>2</sub> が解放されてしまい，環境負荷が増加する．このため，グリーンインフラとしての間伐材は，CO<sub>2</sub> が定着された状態のまま構造物に利用することが望ましい．木材が負担できる荷重強度は，鉄やコンクリートに比べて低いことから都市部の大規模構造物への適用は難しいと思われるが，地方部の小規模構造物の荷重レベルであれば，木杭を初めとして構造物本体への部分的な適用も可能である．今後の構造物更新におけるグリーンインフラ＋グレーインフラの技術は，環境面に対する必須な選択肢になると考えられる．

#### (2) グリーンインフラとグレーインフラの融合による景観の向上

グレーインフラのみのデザインだけではなく，周囲の環境との融合，すなわち，グレーインフラのデザインはグリーンインフラとの融合が必要となる．これらを総合的に評価する仕組みを計画段階や設計段階で取り入れることで，景観に優れたインフラのデザインを選択することがより可能になると考えられる．

昨今，「防災」，「安全・快適」，「景観・観光」の観点から，道路の地下空間を活用して，電力線や通信線などをまとめて収容する電線共同溝などの整備による無電柱化が推進されている<sup>3-26</sup>．今後，無電柱化が進むことにより，電柱に代わり歩道に街路灯と街路樹がより設置される可能性があり，**図 3.2.1** にイメージするような，グレーインフラ由来の街路灯を設置することも可能となると考える．また，防護柵は，車両等の侵入を防ぐために設置されているものであるが，必ずしもグレーインフラである必要はない．**図 3.2.2** にイ

メージするような、木材や木材由来の材料の性能を活かした防護柵等を設置することで、安全性を確保するとともに景観に優れた防護工を設置することも可能となると考える。



図 3.2.1 景観に優れた街路灯と街路樹のイメージ



図 3.2.2 景観に優れた防護工のイメージ

### (3) グレーインフラのグリーンインフラ回帰による融合

グレーインフラは、管理者や利用者の利便性向上を目的に構築されたものが殆どであるが、時間が経過して供用期間が長くなってくると、当初想定していた社会的環境や利用者からの要求が変わってくるものがある。この時に構造物や構造ネットワークの一部を、グレーインフラからグリーンインフラに戻すことにより、グリーンとグレーが融合した新しいインフラが誕生する可能性がある。例えば、交通量が減少した舗装道路の一部車線の舗装を撤去して緑溝や緑道に作り替えたり、温暖化対策や景観を優先するために道路ネットワークの一部を昔そこにあった河川の状態に戻したりするということである。設計耐用期間を迎えるグレーインフラに対しても、当たり前のようにグレーインフラとして更新・改築するのではなく、構造物やネットワークの一部をグリーンインフラに回帰させることも考えるべきである。グリーンインフラでしか得られない効果を再度見直し、新しい技術としてグレーインフラとの融合を図ることで、時代背景に沿った新たな効果が得られるものと考えられる。

### 3.3 グリーンインフラとグレーインフラの融合に関するコンセプト

持続可能な社会の実現に向けて、国連では持続可能な開発目標（SDGs）が示され、持続可能かつレジリエントなインフラの整備が必要とされている。日本においては国土形成計画の策定により、頻発する自然災害や人口減少・高齢社会といった課題への対応が重要とされており、その中でグリーンインフラの推進が必要とされている。グリーンインフラは、自然が有する多様な機能を活用したインフラ整備や土地利用と定義されるが、あくまで目的は持続的な社会の実現である。つまり、グリーンインフラを活用する事業は、緑化したインフラのみを対象とするのではなく、複合的・多面的なインフラ整備によって地域全体の効用を最大化するものでなければならない。都市部における緑化事業は、単に住環境の改善や景観的な効果を期待するのではなく、水循環プロセスの構築を目指さなければ自然との共生にはほど遠い。一方、地方における森林保全や多自然川づくり等は、単に自然環境の保護を目的とするのではなく、防災・減災の効果を期待しなければ地域の持続性は達成されない。都市部と地方にはグレーインフラとグリーンインフラが偏在しているのが現状であり、それぞれに一方的な役割を担わせるのは受け入れがたいであろうし、それぞれで融合を目指し国土を平準化させることも効果的ではない。例えば水循環の観点では、都市部ではいかに効率よく流下・放水するかが求められ、地方では貯留機能を求められる。その地方の森林は水源かん養機能や土砂流出防止機能を維持するために間伐が必要となるが、産出される間伐材は品質が問題視され、いかに付加価値を与えて利用を促進するかが課題となっている。地方の過疎化が進む山間部の橋梁には、耐用期間を100年も必要としない場合も考えられ、鋼材と間伐材による複合構造とすれば、不要になった際に容易に撤去でき、鋼材は再利用が可能である。一方で防災の観点では、地方におけるグレーインフラは貧弱な場合が多く、都市部のソフト的な支援を必要としており、ある種のグリーンインフラの導入ともいえる。グリーンインフラとグレーインフラの融合は、地域内のローカルな視点と地域外の広域な視点での両方で取り組み、ある領域で効用を最大化できるようにパッケージングすることが必要と考えられる。

### 3.4 まとめ

本章では、グリーンインフラとグレーインフラを融合した事例や今後期待できる融合案について検討した。グリーンインフラとグレーインフラの融合は、様々な付加価値を生み出す可能性があることから、日本の持続的な成長を手助けするインフラとして、今後の融合の検討例や実施例が増加することが期待される。

#### 参考文献

- 3-1) 永井莊七郎：海岸防砂堤について，第2回海岸工学講演会講演集，1955
- 3-2) 宇多，三波，長山，住谷，熊田：茨城県成沢・多賀・河原子海岸の浸食実態，海洋開発論文集，第24巻，2008
- 3-3) 田中，由比，高山，栗山，山田，石田：金沢港の埋没実態とそのメカニズム，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol.66，No.1，pp.451-455，2010
- 3-4) 港湾事業の再評価説明資料（金沢港 大野地区 多目的国際ターミナル整備事業（防砂堤）），北陸地方整備局，2010
- 3-5) 石原藤次郎，榎木亨：防砂堤による海岸線の安定に関する一考察，第10回海岸工学講演会講演集，1963
- 3-6) 一ノ瀬俊明：シュトゥットガルトにおける「風の道」－都市計画で都市気候を制御する試み－，天気，40，pp.31-33，1993
- 3-7) 持田灯，石田泰之：風の道，天気，56，pp.79-80，2009

- 3-8) 国土交通省都市局都市計画課：ヒートアイランド現象緩和に向けた都市づくりガイドライン，2017
- 3-9) 宮越，大橋，瀬野，鍵屋，増田，高橋，尾島：東京都心・八重洲通りにおける「風の道」に関する風洞実験研究，日本建築学会関東支部研究発表会研究報告集，Vol.77，pp.457-460，2007
- 3-10) 鍵屋浩司，足永靖信：ヒートアイランド対策に資する「風の道」を活用した都市づくりガイドライン，国土技術政策総合研究所資料，No.730，2013
- 3-11) ポーラスコンクリートの設計・施工法の確立に関する研究委員会の活動，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.1，pp.13-22，2003
- 3-12) 横関，取達，高山，樋口：ポーラスコンクリートの植物生育能力向上に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.1405-1410，2013
- 3-13) 浦上將人，福田晴耕，前田論：ポーラスコンクリート河川護岸における構成諸要素と植生状況に関する分析，土木学会第4回河道の水理と河川環境に関するシンポジウム論文集，Vol.4，pp.71-76，1998
- 3-14) 市丸，野上，湊，岡本：植物の生育に配慮した新しいポーラスコンクリート，平成24年度土木学会関西支部年次学術講演会講演集，V-22，2012
- 3-15) 源田，塚越，石原，上田：植栽型ポーラスコンクリートの耐根性評価試験，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.1441-1446，2013
- 3-16) 小野田滋：鉄道人物伝 鉄道林の父 本多静六，RRR，Vol.75，No.3，2018
- 3-17) 土木学会ホームページ：<http://committees.jsce.or.jp/heritage/node/313>
- 3-18) 宍戸真也：鉄道技術来し方行く末 鉄道の防雪柵，RRR，Vol.75，No.2，2018
- 3-19) 島根県農林水産部 森林整備課・林業課 島根県中山間地域研究センター：島根県の海岸砂丘地における海岸林の再生と管理の手引き，2013
- 3-20) 国土交通省中部地方整備局ホームページ：<http://www.cbr.mlit.go.jp/index.html>
- 3-21) 光谷，赤川，大湊：緑化舗装の改良とその効果，土木学会土木建設技術発表会，2009
- 3-22) 国営武蔵丘陵森林公園ホームページ：<https://www.shinrinkoen.jp/>
- 3-23) 群馬県立森林公園さくらの里ホームページ：<http://g-kikin.or.jp/sakura/sakutop.html>
- 3-24) 広島県神石高原町仙養ヶ原森林公園整備等事業：<http://www.mlit.go.jp/common/001119426.pdf>
- 3-25) なめがたファーマーズビレッジホームページ：<https://www.namegata-fv.jp/concept/index.html>
- 3-26) 農林水産省ホームページ：荒廃農地の発生防止・解消等，<http://www.maff.go.jp/j/nousin/tikei/houkiti/>

## 第4章 グレーインフラへのグリーン（インフラ）の取入れに関する検討

本章では、グレーインフラに対してグリーン（インフラ）を取り入れた事例を調査し、その取り入れによって得られる性能向上効果について検討した。なお、本章の目的は既存または新規のグレーインフラに対してグリーンインフラを取り入れることによる性能向上効果を検討するものであるが、事例を収集した結果、グリーンインフラを構成する素材に主に着目されたものが多かった。したがって、本章で取り扱うグリーンインフラはインフラそのものではない場合も含まれるが、これらも総合してグリーンインフラとして取り扱うこととする。

### 4.1 グレーインフラの性能向上のためのグリーンインフラの活用事例

表 4.1.1 にグレーインフラの性能向上のためのグリーンインフラの活用事例の収集結果を示す。なお、これらの事例は必ずしもグレーインフラの性能向上を目的としたものではない場合もあるが、そのような可能性が考えられるものは事例として取りまとめた。以下では、それぞれの事例について、概要を記載する。

表 4.1.1 グレーインフラへのグリーンインフラ取入れ事例

No.	グレーインフラ	グリーンインフラ	期待される効果	事例, 文献
WG3-1	コンクリート	植物	温度変化の緩和	国分川, 信濃川, 木曾川, 石原川など
WG3-2	軌道, 道路舗装	植物	温度変化の緩和	鹿児島市交通局, 土佐電鉄, 広島電鉄, 京阪電鉄大津線, 富山ライトレール, 長崎電気軌道, 熊本市交通局など, 東京都交通局 (計画中), 緑化系舗装
WG3-3	コンクリート	海生生物	物質移動抵抗性の向上	研究レベル (海洋構造物)
WG3-4	鋼	サンゴ	腐食抑制の可能性	海洋構造物
WG3-5	コンクリート	微生物	ひび割れの治癒	建築物等
WG3-6	地盤材料	微生物	地盤材料の固化	海岸
WG3-7	FRP	植物	紫外線照射の緩和	護岸

#### (1) コンクリートの緑化による温度変化の緩和 (WG3-1)

緑化コンクリートに関して、多くの研究論文が発表され、また実務においても活用されている。これらの多くは、ポーラスコンクリートを河川護岸に適用することで、堤防の浸食防止機能を確保すると同時に生態系の保全、景観、親水性の機能を持つ護岸形式を構築することが目的とされている<sup>4-1), 4-2)</sup>。日本コンクリート工学会では過去にポーラスコンクリートに関する研究委員会が数回設置されており、これらの観点では多くの知見を有する。これまでの事例の多くで報告されているのは、ポーラスコンクリートを用いた緑化によって構造物表面の温度低減効果である。夏季晴天時のスラブの表面温度が 30°C 低下したことなどが報告されている<sup>4-3)</sup>。このような温度変化の緩和は構造物表面で生じる物理化学的風化の緩和などに貢献できる可能性がある。

### (2) 軌道および道路舗装の緑化による温度変化の緩和 (WG3-2)

緑化軌道の採用事例は近年数例報告されているが、ここでは鹿児島市交通局の事例を紹介する<sup>44)</sup>。鹿児島市の路面電車において、2004年3月に、駅前広場の植栽と一体化した快適な空間の形成を図るため、短区間（延長約140m）の軌道敷が芝生により緑化された。その後、2008年に本格的に全区間（約2800m）で緑化軌道が採用され、我が国初の本格的な芝生軌道が実現した。

施工として、まず軌道内のアスファルト舗装を切削機械で除去し、芝生が電車車輪に悪影響を及ぼさないように、レールから内側に約70mm程度離して土留め壁を設置している。芝種には、踏厚などのダメージからの回復が早く、緑色を保持する期間が長いものが検討され、高麗芝の品種であるビクトールが採用されている。

芝生軌道の整備効果として、レール間（芝生面）で17～18℃、中央分離帯で24℃の温度低減効果が得られたほか、沿線の騒音低減、景観・魅力の向上などにも寄与したとされている<sup>45)</sup>。特に、温度変化の緩和は部材変形に影響することから、グリーンインフラを活用してグレーインフラの温度変化を緩和することで、構造物・部材の使用性向上に寄与する可能性が考えられる。

このような効果は道路舗装においても期待できる。道路舗装の緑化に関しては、これまでヒートアイランド現象の緩和等の観点からの検討が多かったものの、グレーインフラの性能向上という観点で再整理すると、構造物・部材の使用性向上に寄与する可能性がある。

### (3) 海生生物によるコンクリートの耐久性向上 (WG3-3)

フジツボや牡蠣がコンクリート表面に付着することによってコンクリートへの有害物質の侵入が抑制され、耐久性が向上することが既往の研究で報告されている<sup>46)</sup>。この効果は約7年の暴露試験で確認されている<sup>47)</sup>。また、同様の耐久性向上効果はバイオフィームでも確認されている<sup>48)</sup>。また、フジツボがコンクリートや岩石に付着することで、日射気温等の環境作用による素材表面の温度変化が小さくなり、風化等の緩和効果がある<sup>49)</sup>。このように、コンクリート構造物表面に海生生物を付着させることで、有害物質の侵入抑制や温度変化の緩和が期待され、ひいては構造物の耐久性を向上できる可能性がある。

### (4) サンゴによる鋼構造物の腐食抑制 (WG3-4)

海洋鋼構造物で適用される流電陽極方式の電気防食を実施した浮栈橋で、サンゴが活発に育成した事例が報告されている<sup>410)</sup>。この理由として、鋼材表面に形成されるエレクトロコーティングがサンゴの骨格とほぼ同じ組成であること、電気防食で発生する電流密度による刺激による影響が考察されている。実験によれば、電着基盤の電流密度が50mA/m<sup>2</sup>程度でサンゴが着生しやすいことが報告されている。コンクリートへの海生生物の付着と同様に、サンゴの存在によりエレクトロコーティングが安定化すれば、犠牲陽極の延命化や鋼材腐食の抑制を期待できる可能性がある。

### (5) 微生物によるコンクリートのひび割れ治癒 (WG3-5)

近年、コンクリート分野において、微生物を利用したコンクリートのひび割れ治癒技術の開発が国際的に進められており、日本コンクリート工学会でも2007～2010年に研究委員会（TC-075B, TC-091A）が設置されたほか、最近ではRILEM（国際材料構造試験研究機関・専門家連合）ではTC 253-MCIで微生物とセメント系材料の相互作用が検討されている。研究者によって微生物の種類等は異なるが、本分野で著名なデルフト工科大学のJonkersはバクテリアが乳酸カルシウムと酸素を取り込み分解することで、炭酸カルシウム

を生成させ、それによってひび割れを充填させる技術を用いている<sup>4-11)</sup>。国内では、イースト菌や納豆菌を用いた治癒技術などを開発している愛媛大学のグループでなどがある<sup>4-12)</sup>。

#### (6) 微生物による地盤材料の固化・修復 (WG3-6)

川崎らの研究グループは、微生物代謝を利用した鉱物形成作用であるバイオミネラリゼーションに着目し、炭酸カルシウムの析出に適した微生物を用いて土を短期間で固化させる技術を開発している<sup>4-13)</sup>、<sup>4-14)</sup>。また、ビーチロック（砂浜の潮間帯に生ずる非常に新しい石灰質岩）の形成メカニズムに着目した検討を行い、人工地盤に関する検討を行っている<sup>4-15)</sup>。このようなバイオミネラリゼーションを活用することで、既存の地盤材料（グレー）を固化することが可能になり、海岸の侵食防止や地盤材料などの強度向上が期待される。

#### (7) 植物による FRP の保護 (WG3-7)

FRP 製の基盤を用いた多孔質な溶岩のパネルに対して植物を絡ませることで壁面緑化等を可能とする工法が開発されている<sup>4-16)</sup>。本工法では、多孔質溶岩に植物の根が付着生育し、直接ミネラルや水分を吸収するので上部も下部も緑化が安定化できる。本事例はグレーインフラにグリーンを取り入れた事例ではないが、グリーンが FRP を保護する役割を担う可能性がある。植物の役割として、例えば紫外線照射の緩和等が考えられる。

## 4.2 グレーインフラへのグリーンインフラの取入れに関する基本的考え方

前節の事例収集結果から、グレーインフラへのグリーンインフラの取入れによって、主に外部から構造物に与えられる温度や物質などの環境作用を遮断または緩和させる効果を有する可能性が見いだされた。例えば、緑化はグレーインフラの表面温度を低減することで、温度変化によるグレーインフラの応答を小さくすることができ、従来のグレーインフラの使用性や耐久性が改善される可能性がある。また、生物がグレーインフラに付着することで、グレーインフラと周辺環境における化学物質の移動などが制限され、耐久性が改善される可能性がある。例えば、それぞれの環境作用で以下のような効果が考えられる。

- ・温度：構造物の表面温度の低減
- ・湿度・水分：コンクリートの収縮・クリープの低減
- ・日射：構造物の表面温度の低減、紫外線照射量の低減（FRP は一般に紫外線対策でコーティングされているが、グリーンで紫外線を遮断できればコーティングが不要になる可能性がある）
- ・化学物質：コンクリートへの塩化物イオンの供給量の低減

従来のグレーインフラにグリーンインフラを取り入れる場合、その取入れ効果は主に境界条件の変化で表現する。例えば、温度、日射、水分、化学物質などの環境作用について、グリーンインフラの吸収量等を加味して、グリーンインフラ表面での境界条件を設定することで、その取入れ効果を評価可能である。例えば、温度や日射の境界条件として、人工地盤の緑化では、芝生で屋上面を緑化することでスラブへの伝熱量を 1/4 以下に抑えることができ、スラブの表面温度を 12～15℃ 低減できることが報告されている<sup>4-17)</sup>。また、壁面緑化では、日射エネルギーの 90%以上を遮蔽することができ、壁面表面温度を 10～14℃ 低減できることが示されている<sup>4-17)</sup>。また、緑化によってコンクリートが湿潤に保たれ、その結果、中性化の進行が遅れることも報告されている<sup>4-17)</sup>。これらのデータは主にコンクリートに対するものであり、鋼材や FRP に対する効果については引き続き調査が必要である。

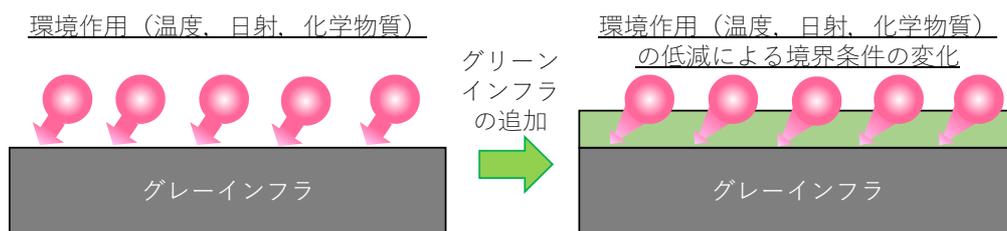


図 4. 2. 1 グレーインフラへのグリーンインフラの取入れの基本的イメージ

このような環境作用の緩和効果はグレーインフラの境界条件を変化させることでモデル化できる可能性がある。例えば、温度変化による応力変化等を検討する場合、グリーンインフラの効果を考慮して、温度変化量を低減させることで、より合理的な断面設計が可能になる可能性がある。また、コンクリート部材への塩化物イオン等の化学物質の侵入を検討する場合、グリーンインフラによる化学物質の遮断効果を境界条件として考慮することで、腐食発生時期を遅らせることが可能になる。

次節および次々節では、これらの点に着目し、グリーンインフラの取入れによるグレーインフラの応答への影響について、試算等を行うことで検討した。検討においては、特にグリーンインフラがグレーインフラに及ぼす好影響に着目し、さらには将来的なグリーンインフラを活用したグレーインフラの設計体系への取り込みも見据え、グリーングレーインフラのメリットを可能な限り定量的に示せるよう取りまとめた。

### 4.3 緑化による部材への効果の検討

本節では、グリーンインフラとして植物（緑化）に着目し、緑化がグレーインフラに対してどのような影響を及ぼすか、特に好影響に着目して検討を行った。

#### 4.3.1 コンクリート部材

グレーインフラであるコンクリート構造物にグリーンインフラを取入れたことにより、コンクリートがもっとも影響を受ける状況としては、建築構造物の屋上緑化や壁面緑化に代表されるようにコンクリート表面に土壌と植物を配置したグレーインフラとグリーンインフラが接している、あるいは近接している状況が考えられる。この場合、前節で示した通り植物によりコンクリート構造物の表面温度の低減や化学物質の供給量の低減などの効果が考えられ、結果としてコンクリートの耐久性に影響を及ぼすものと考えられる。

このような植物によるコンクリートへの影響は、コンクリート部材の表面にほぼ限定されると思われるが、RC構造物の耐久性確保に重要なかぶり部分の性能を向上、あるいは構造物表面の植物が耐久性におけるかぶりと同様の機能を発揮し、これらを考慮することでコンクリート部材の新たな設計が可能となる可能性がある。

ここでは改めていくつか事例を紹介するとともに、緑化によるコンクリート部材表面の温度変化の低減に着目し、試解析を行った結果を示す。

##### (1) 温度変化の低減

人工地盤における緑化事例では、芝生で屋上面を緑化することでスラブの表面温度を12～15℃低減できていたデータが得られている<sup>4-17)</sup>。屋上緑化したコンクリートスラブ面と緑化を行っていない部分の温度変化を比較したところ、スラブ露出面の日温度変化は42℃に達するのに対し、緑化したスラブ面の日温度変化は4℃以下に抑えられている。

このように、温度変化が小さくなることで、コンクリートの伸縮量の変化が小さくなることから、例えば防水層などの損傷を抑えることが可能となる。また、ひび割れ幅の変化量も小さく抑えられることから、耐久性の評価をより合理的にできる可能性がある。

また、コンクリート構造物の補修工法のひとつとして表面被覆工法がある。表面被覆工法では、当初想定した性能が発揮されずに補修部位が劣化する事例が報告されている。劣化は施工時の環境条件によるものや施工の不備のほか供用時の環境条件によっても生じ、表面被覆工の性能が低下する。供用時においては、外力などによりひび割れが発生してそのひび割れに被覆が追従できない場合のほか、日々の温度変化によるひび割れ幅の変動に耐えられずに被覆が劣化する場合もあり、表面被覆材にはひび割れ追従性が求められる。よって、このような補修と部材表面の緑化をセットで行うことにより、コンクリートの温度変化を抑えられれば、表面被覆による補修後の劣化を抑えられる可能性もある。

##### (2) 土壌による中性化の抑止

土壌にはpHの変動を小さく抑える緩衝性がある。もちろん、土壌の種類によっても異なるが、屋上庭園のように土壌がある場合には酸性雨に対し土壌中の粘土成分の効果によって雨水が中和され、土壌中を通過した雨水はほとんど中性の水に変わる。その結果、コンクリートのアルカリ性が保たれる事例が見られる。

写真4.3.1、4.3.2は屋上緑化部分の発掘調査事例である。この事例は、18年経過した屋上緑化部分の発掘調査をしたもので、緑化部分を取り除いてコンクリート表面を調査したところ劣化はほとんど認められな

かった(写真 4.3.1).一方,緑化がなくコンクリートが露出していた場合は,劣化が認められた(写真 4.3.2).  
緑化部分とコンクリート露出部分の双方の表面を研磨して調査したところ,緑化部分のコンクリート面はアルカリ性を保っていたが,露出部分は完全に中性化していたというデータも得られているようである.

このような背景から,最近では屋上緑化を組み合わせることを前提に建築構造物の保護コンクリートの防水保証期間を長く設定するものもあるようである.



写真1 緑化部分のコンクリート表面...施工当時そのままを思わせる新鮮な表面

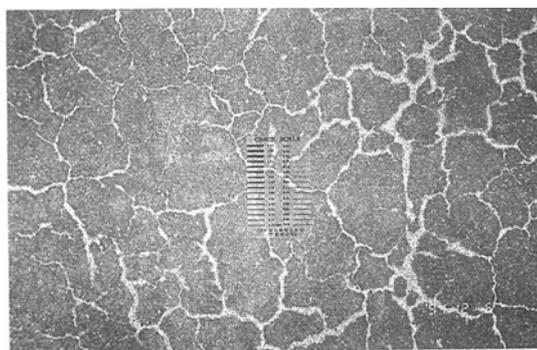


写真2 露出部分のコンクリート表面...かなり劣化している

写真 4.3.1 緑化部分のコンクリート表面<sup>4-17)</sup>

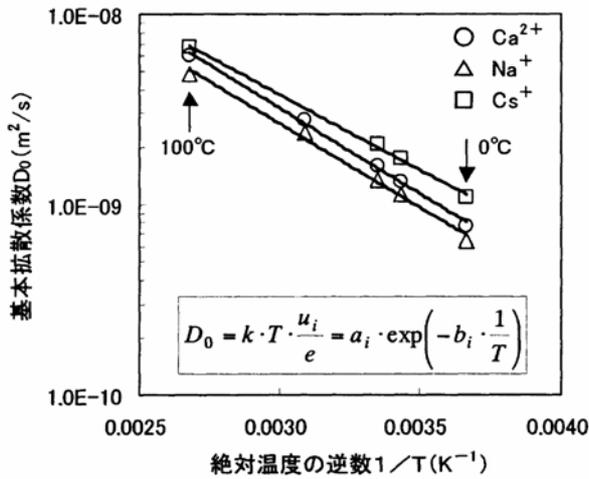
写真 4.3.2 露出部分のコンクリート表面<sup>4-17)</sup>

一方で,酸性雨が作用するコンクリート構造物に関しては,その劣化メカニズムや試験方法に関する研究が行われている<sup>4-18) - 4-20)</sup>.酸性雨による劣化は,劣化速度で分類するとアルカリシリカ反応や塩害による劣化に比べ進行が遅く,様々な要因が絡み合っている生じる実際の構造物の劣化において,酸性雨による寄与がどの程度であったかを判別するのは困難とされている.しかしながら,今後,実構造物での被害調査や現象解明が進めば,酸性雨による劣化に対して植生がその抵抗機構とできる可能性がある.

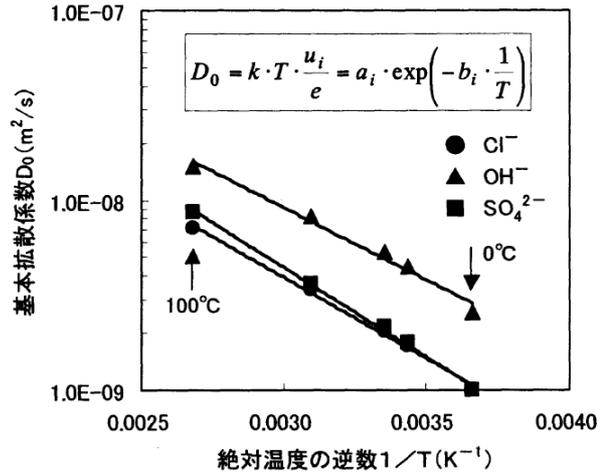
### (3) コンクリートの耐久性確保への貢献

コンクリートの劣化としては,中性化,水の浸透および塩害による鋼材腐食,凍害あるいは化学的侵食が挙げられるが,いずれの場合もコンクリート中の物質移動に起因するものである.イオンの移動は,移動速度である拡散係数で表現され,塩化物イオンの侵入に伴う鋼材腐食に着目すると,コンクリート標準示方書では塩化物イオンに対する設計拡散係数を求める式が示されている.

拡散係数は結合材の種類や水セメント比,あるいは環境条件によって大きく変化するが,温度依存性があることも分かっている.図 4.3.1 は,代表的なイオンについて絶対温度の逆数と基本拡散係数の関係を示したものである<sup>4-21)</sup>.図より,絶対温度の逆数と基本拡散係数の関係には高い相関があり,温度が高いほど基本拡散係数は高くなっている.



(a) 陽イオン



(b) 陰イオン

図 4.3.1 絶対温度と基本拡散係数の関係<sup>4-21)</sup>

ここで、図 4.3.1 (b) に示される塩化物イオンに着目し、極端な例ではあるが平均的な温度条件を 10°C と 40°C の場合を考え基本拡散係数を算出する。論文より、 $a_i=1.43 \times 10^{-6}$ 、 $b_i=1.97 \times 10^3$  を代入して 10°C と 40°C における基本拡散係数を求める。

$$D_0 = a_i \cdot \exp\left(-b_i \cdot \frac{1}{T}\right) \quad (1)$$

その結果、

$$10^\circ\text{C} \text{ の時 } D_0 = 1.36 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$40^\circ\text{C} \text{ の時 } D_0 = 2.65 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$$

が得られ、40°C の場合は 10°C に比べて 1.95 倍だけ大きな値となり、コンクリート表面温度だけに着目すれば、温度を低く抑えることはコンクリート構造物の耐久性向上につながる可能性がある。また、コンクリートの表面温度は気温や日射によって変化するが、その変化を想定することで拡散係数の変化を想定でき、耐久性を定量的に評価できる可能性がある。

なお、この論文では図 4.3.2 に示すように基本拡散係数に配合や温度、相対湿度の影響を考慮して、コンクリートの見掛けの拡散係数を求めるフローになっている。

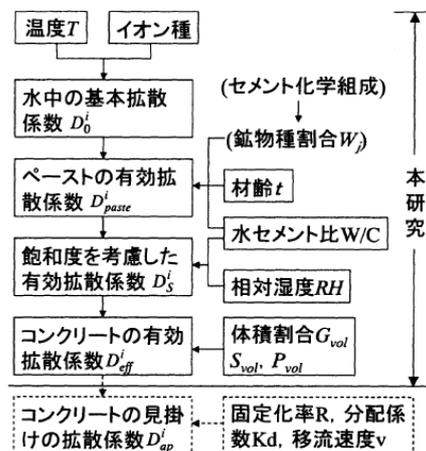


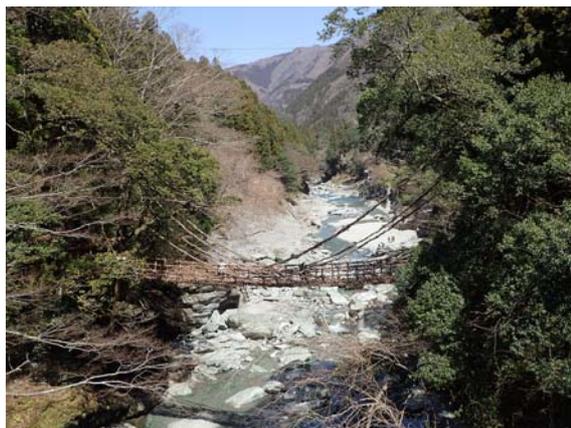
図 4.3.2 拡散係数算出フロー<sup>4-21)</sup>

#### 4.3.2 鋼部材の緑化の事例とその効果

鋼部材の緑化の事例として、図 4.3.3 に、かずら橋の現況を示す。本橋は、つた植物の「かずら」を吊材とした、伝統的な木製吊橋であるが、安全性、耐久性の観点から吊材に鋼製ケーブルが使われている。図 4.3.3 (c) に、示すように、鋼製ケーブルはかずらで被覆され、その外観は、木製吊材に擬態している(図 4.3.3 (d))。このように植物で被覆された状態では、部材に生じる温度変化が小さくなることが考えられるが、定量的な評価は行われていない。そこで、本検討では、鋼製の部材が植物で被覆された場合を想定して、歩行者専用の吊橋を対象に、主ケーブルに生じる温度変化の低減による構造特性を検討する。



(a) かずら橋 (全景 1)



(b) かずら橋 (全景 2)



(c) かずらが被覆されたケーブル



(d) 無補剛桁とケーブル

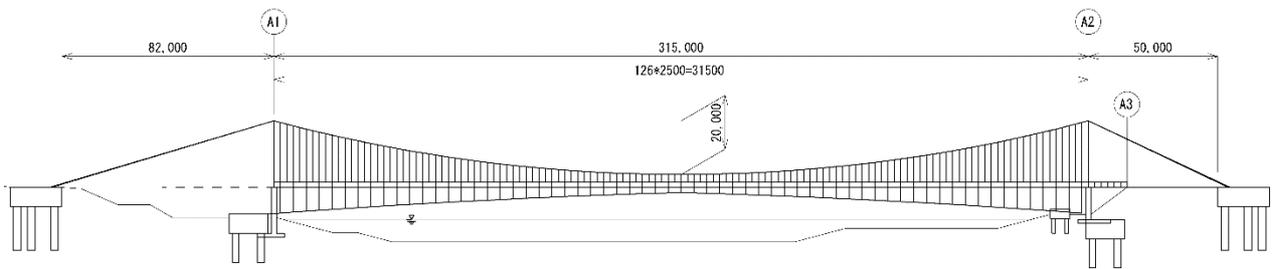
図 4.3.3 かずら橋の現況

##### (1) 検討対象と設計条件

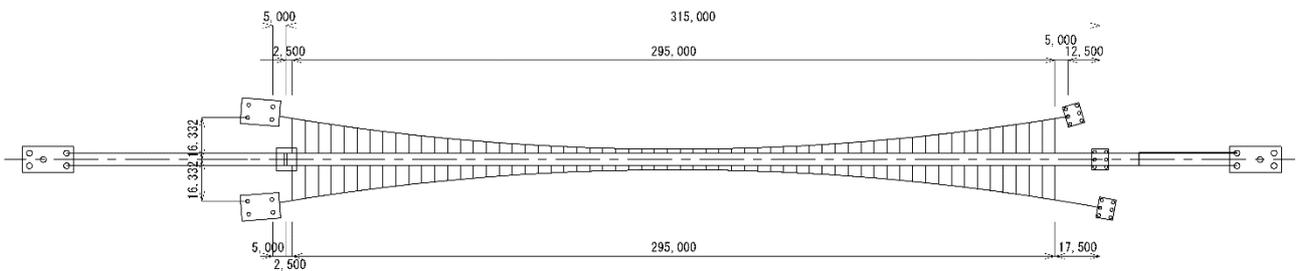
対象は、支間長 315m の単径間吊橋<sup>4-22)</sup>である。表 4.3.1 に本橋の設計条件を、図 4.3.4 に一般図を、図 4.3.5 に主塔一般図を、図 4.3.6 に桁断面図を、それぞれ示す。上部構造の構成部材は鋼製であるが、床版は木製である。

表 4.3.1 検討対象の小規模吊橋の設計条件<sup>4-22)</sup>

形式	無補剛吊橋
支間	315.000 m
幅員	1.700 m
活荷重 (等分布)	床組に対して 300 kgf/m <sup>2</sup> 主構に対して 200 kgf/m <sup>2</sup>
風荷重 (風上側のみ)	450 kgf/m <sup>2</sup>
設計水平震度 (kh)	0.200
床版	木床版
塔形式	鋼製ロッキングタワー
サグ比	1/16
耐風索	有
縦断勾配	1.000 % 放物線
横断勾配	水平
適用基準	小規模吊橋指針 道路橋示方書



(a) 側面図



(b) 平面図

図 4.3.4 上部構造一般図<sup>4-22)</sup>

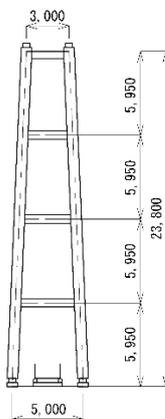


図 4.3.5 主塔一般図<sup>4-22)</sup>

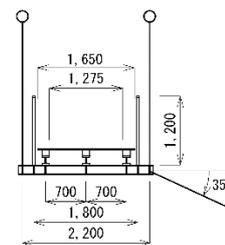


図 4.3.6 桁断面図<sup>4-22)</sup>

(2) 骨組構造解析モデルと解析条件

検討では、温度変化による構造特性の把握を目的としていることから、対象橋梁を立体骨組構造でモデル化して、解析的な検討を行うこととした。図 4.3.7 に、対象橋梁の立体骨組構造解析モデルを示す。吊索（ハンガー）の定着間隔で節点を設け、H形鋼の桁（3 主桁）および横桁をはり要素で、主索（主ケーブル）、吊索、耐風索をトラス要素でモデル化した。表 4.3.2 に、部位の断面諸元を、また、表 4.3.3 に、各部位の死荷重と設計時の活荷重、風荷重をそれぞれ示す。耐風索の傾斜角度は、水平軸から 35°とした。なお、本解析モデルでは、主塔、縦断勾配は考慮しなかった。

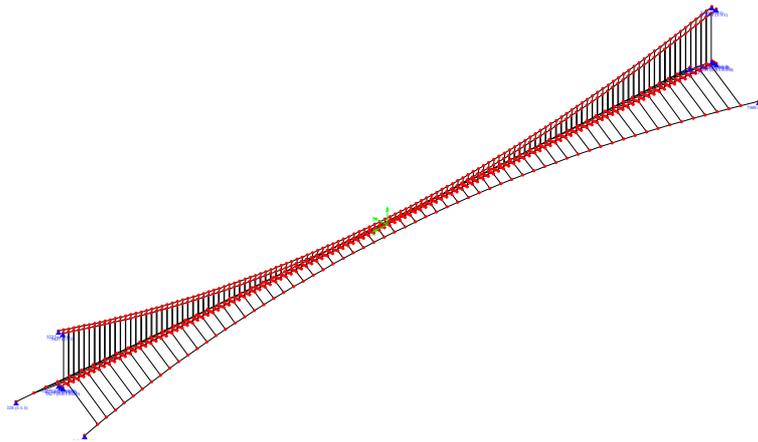


図 4.3.7 対象橋梁の立体骨組構造解析モデル<sup>4-22)</sup>

表 4.3.2 各部位の断面諸元<sup>4-22)</sup>

部材	断面積 A (m <sup>2</sup> )	ねじり定数 J (m <sup>4</sup> )	断面2次モーメント		弾性係数 E (kN/m <sup>2</sup> )	せん断弾性係 数G (kN/m <sup>2</sup> )
			Iz (m <sup>4</sup> )	Iy (m <sup>4</sup> )		
桁（縦桁）	9.09E-03	2.12E-07	3.24E-05	2.54E-05	2.00E+08	7.70E+07
横桁	3.77E-03	7.75E-08	2.94E-06	4.05E-05	2.00E+08	7.70E+07
主ケーブル	8.33E-03	—	—	—	1.40E+08	—
ハンガー	4.87E-05	—	—	—	1.40E+08	—
耐風索	4.78E-03	—	—	—	1.40E+08	—

表 4.3.3 各部位の死荷重と設計時の活荷重、風荷重<sup>4-22)</sup>

荷重	部位	値	単位	備考
死荷重	桁	3.796	kN/m	
	床版	0.453	kN/m	
	地覆	0.098	kN/m	
	枕木	0.294	kN/m	
	縦桁	0.706	kN/m	
	横桁	0.287	kN/m	
	横構	0.822	kN/m	
	高欄	0.686	kN/m	
	その他	0.451	kN/m	
	主索	0.678	kN/m	片側当たり
	吊索	0.154	kN/m	片側当たり
	主索ケーブルバンド	0.339	kN	1箇所当たり
	耐風索	0.682	kN/m	片側当たり
	支索	0.055	kN/m	片側当たり
耐風索ケーブルバンド	0.254	kN	1箇所当たり	
活荷重		3.0	kN/m	
風荷重		4.5	kN/m <sup>2</sup>	

表 4.3.4 に、各部位の温度変化を示す。設計条件に基づいて、各部位の温度変化を $\pm 30^{\circ}\text{C}$ とした（被覆なし）。本検討では、主索（主ケーブル）が、植物で覆われていることを想定する場合（被覆あり）、一律に  $15^{\circ}\text{C}$  の温度の抑制効果があるものと仮定して検討を行うこととした。さらに、温度変化時において、固有振動解析を行うことで、振動特性に及ぼす影響も検討することとした。

表 4.3.4 各部位の温度変化

部材	温度上昇時 ( $^{\circ}\text{C}$ )		温度下降時 ( $^{\circ}\text{C}$ )	
	被覆なし	被覆あり	被覆なし	被覆あり
桁（縦桁），横桁	+30	+30	-30	-30
主索（主ケーブル）	+30	+15	-30	-15
吊索（ハンガー）	+30	+30	-30	-30
耐風索，支索	+30	+30	-30	-30

線膨張係数： $1.2 \times 10^{-6}$  ( $/\square$ )

(3) 主ケーブルに生じる温度の低減が構造特性に及ぼす影響

解析結果の一部として、図 4.3.8 に、温度変化に伴う桁の鉛直変位の分布図を示す。図より、通常の変位（ $\pm 30^{\circ}\text{C}$ ）によって、支間中央部で、 $\pm 0.2\text{m}$  程度の鉛直変位が生じること、また、ケーブルの温度抑制により、温度変化に伴う鉛直変位がそれぞれ半分以下になることがわかる。

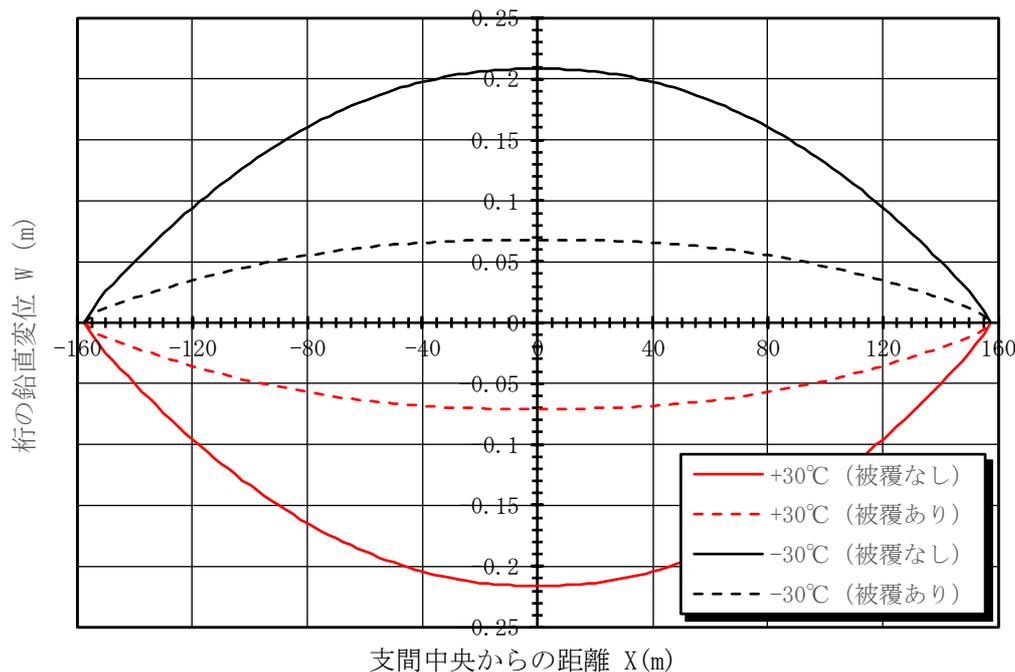


図 4.3.8 温度変化に伴う桁の鉛直変位の分布図

図 4.3.9 に、温度変化に伴う主索の張力分布図を、また、表 4.3.5 に、温度変化によって主索に生じる最大張力の比較を示す。

表 4.3.5 温度変化によって主索に生じる最大張力の比較

	死荷重時	温度上昇時		温度下降時	
		被覆なし	被覆あり	被覆なし	被覆あり
最大張力 (kN)	2021.0	1868.5	1900.2	2183.4	2145.4
最大張力差 (kN)	0.0	-152.5	-120.8	162.5	124.4
変化率 (%)	—	-7.5	-6.0	8.0	6.2

これらの図表より、死荷重時（定常状態）の主索の張力に対して、被覆なしの通常の温度変化（±30℃）によって、150kN程度の張力変化が生じること、張力は、温度上昇時に小さくなり、温度下降時に大きくなるのがわかる。これに対して、被覆ありでは、死荷重時の張力に対する張力変化の割合は、被覆なしに比べて小さくなっており、桁の鉛直変位と同様の効果が見られる。張力変化の抑制は、死荷重時の張力に対して約1.5%程度であった。

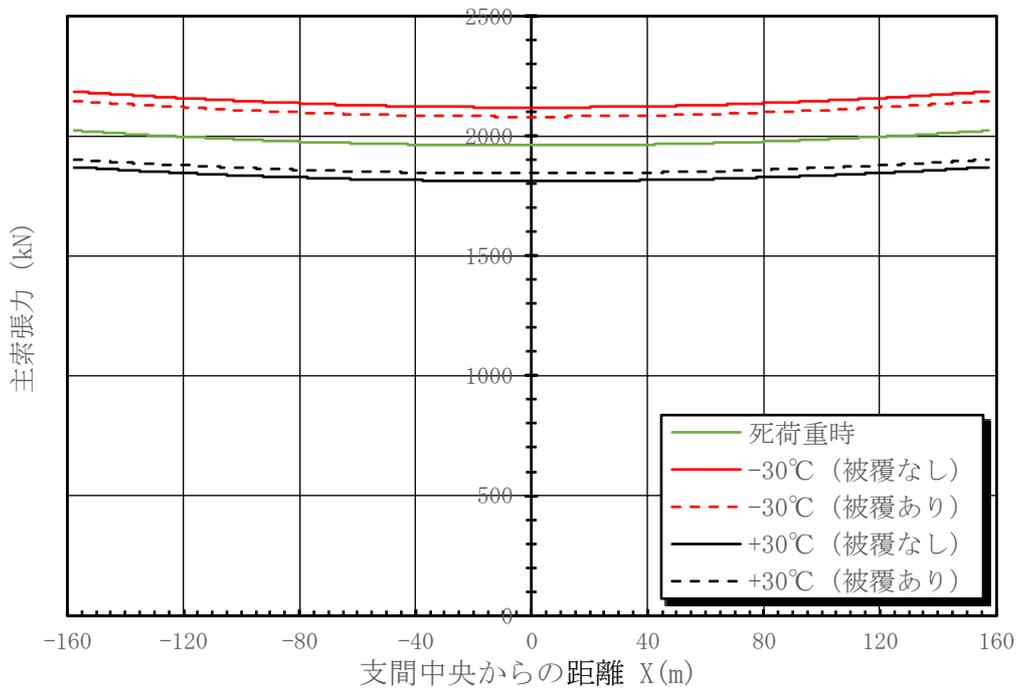


図 4.3.9 温度変化に伴う主索の張力分布図

表 4.3.6, 図 4.3.10 に、温度変化時における固有振動モードと固有振動数の関係を、また、図 4.3.11 に、死荷重時の固有振動数  $f_a$  で除した、温度変化時の固有振動数  $f$  の比 ( $f/f_a$ ) を固有振動モード別にそれぞれ示す。

表 4.3.6 温度変化時における固有振動モードと固有振動数

固有振動モード	面外モード	面内モード	死荷重時 (Hz)	温度上昇時 (Hz)		温度下降時 (Hz)	
				被覆なし	被覆あり	被覆なし	被覆あり
水平たわみ 逆対称1次			0.188	0.148	0.155	0.219	0.215
水平たわみ 対称1次			0.192	0.168	0.183	0.299	0.293
面内たわみ 逆対称1次			0.256	0.251	0.256	0.284	0.280
水平たわみ 逆対称2次			0.277	0.207	0.220	0.346	0.338
水平たわみ 対称2次			0.345	0.251	0.264	0.422	0.414
面内たわみ 対称2次			0.356	0.341	0.346	0.393	0.388
水平たわみ 逆対称3次			0.384	0.263	0.282	0.476	0.466
水平たわみ 対称3次			0.447	0.307	0.328	0.554	0.543
水平たわみ 逆対称4次			0.478	0.320	0.343	0.595	0.584
面内たわみ 対称3次			0.514	0.502	0.503	0.527	0.526
面内たわみ 逆対称2次			0.529	0.490	0.496	0.558	0.552
ねじり 逆対称1次			0.536	0.447	0.461	0.595	0.595
水平たわみ 対称4次			0.547	0.367	0.394	0.686	0.673
水平たわみ 逆対称5次			0.571	0.378	0.407	0.712	0.699

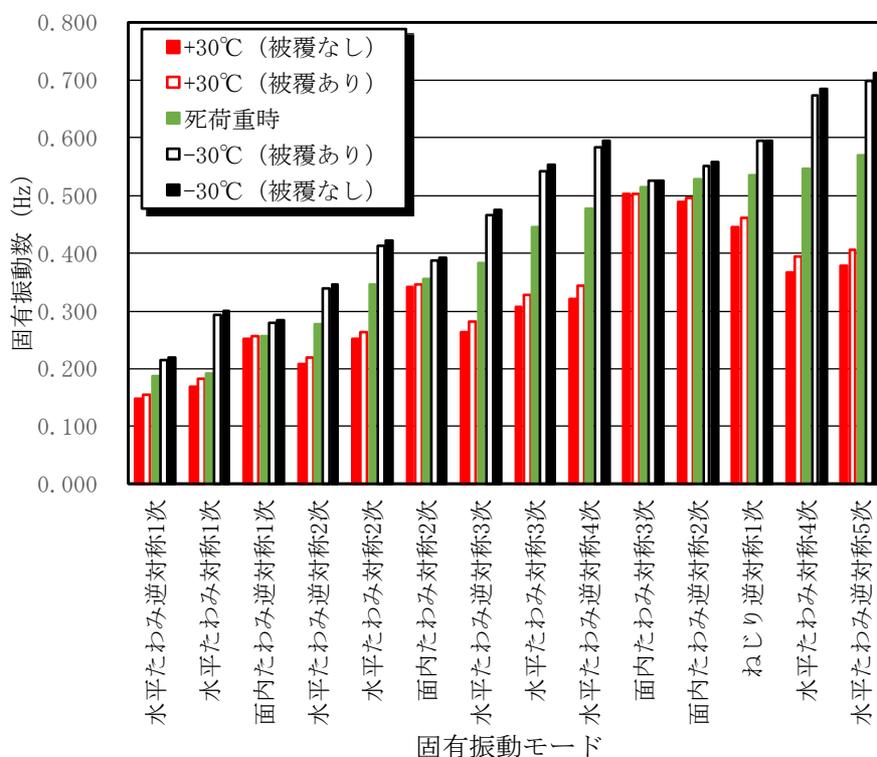


図 4.3.10 温度変化時における固有振動モードと固有振動数

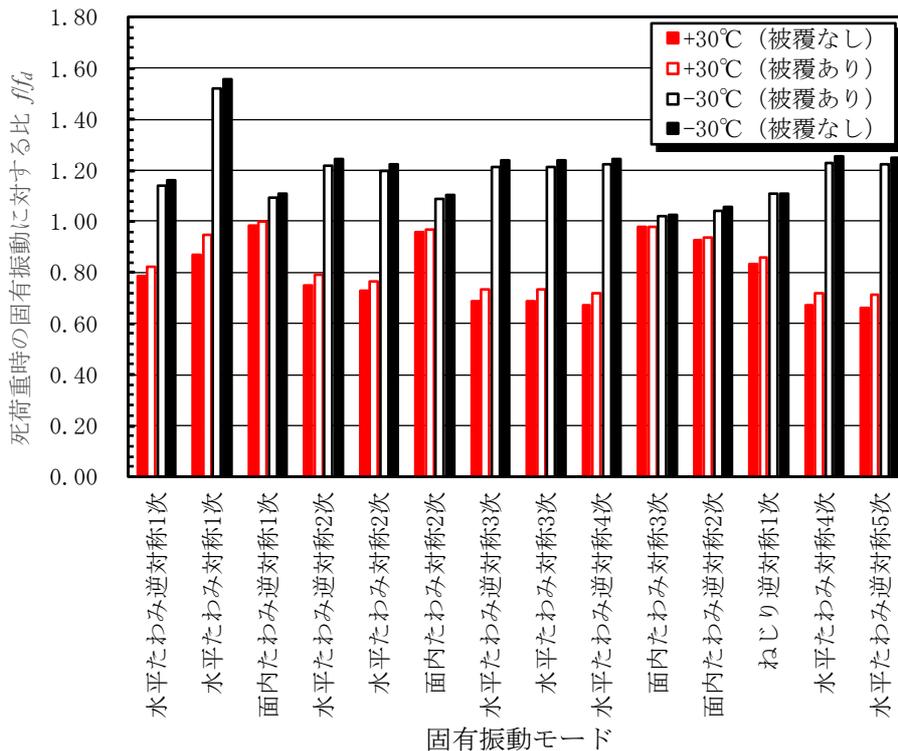


図 4.3.11 死荷重時の固有振動数  $f_d$  で除した、温度変化時の固有振動数  $f$  の比 ( $f/f_d$ )

これらの図表より、死荷重時の固有振動数と比べて、固有振動数は、温度上昇時に小さく、また、温度下降時に大きくなるのがわかる。これは、前述したように、主索の張力変化の傾向に連動しており、温度上昇時には主索の張力が小さくなる（緩む）ため、固有振動数が小さくなり、温度下降時には、その逆の挙動を示すことによるものといえる。被覆なしの通常温度変化 ( $\pm 30^\circ\text{C}$ ) によって、固有振動数は、2割程度の変化が生じることがわかる。なお、固有振動モード別に固有振動数は、面内モードでは、温度変化による影響を受けにくい、面外モードでは、変化が大きく、影響を受けやすいことがわかる。さらに、被覆ありにおける固有振動数の変化は、被覆なしに比べて、わずかに小さくなるものの、挙動はほぼ同じであることから、被覆による温度抑制が固有振動特性に及ぼす影響は小さいことがわかった。

#### (4) まとめ

以上のことから、検討の対象や形式が限定的ではあるが、歩道吊橋を対象に、植物の被覆によって、主索の温度変化が抑制される場合を想定して、温度変化における静的、動的挙動を解析的に検討した。その結果、定常時（死荷重時）の構造特性に対して、温度変化時の挙動が、ある程度、抑制される効果があることが確かめられた。例えば、桁下空間等に制限がある場合、温度変化による桁の変形を抑制できるメリットがある。ただし、その抑制の効果は、定常時に対して小さい場合があり、他の作用（活荷重など）との組み合わせを含めて検討する必要がある。

今後、植物の被覆による構造物の挙動をより定量的に評価するためには、具体的な温度変化を把握する必要がある。一方で、植物の被覆により湿潤状態となることから、構造物の耐久性の影響や、被覆が目視点検に与える影響などが懸念される。これらを考慮するとともに、費用対効果を含めて、総合的に検討するのがよいと思われる。

### 4.3.3 FRP 部材

#### (1) FRP 部材への日射による悪影響

FRP への日射つまり紫外線による悪影響について、FRP 水門設計・施工指針（案）<sup>4,23)</sup>によって以下に概要を述べる。

一般的にプラスチックは、紫外線や水・湿気により、チョーキング（白亜化）や樹脂やせを通常起こす。FRP では、積層部の保護層として、耐候性や耐水性を有するゲルコートやトップコート、または表面塗装を施す必要がある。つまり、FRP は、強化材とマトリックス樹脂からなる FRP 層と、表面のゲルコート／トップコート／塗膜による表面保護層から、一般的に断面が構成されている。

FRP のマトリックス樹脂には一般的に熱硬化性樹脂が用いられ、樹脂の種類には不飽和ポリエステル樹脂、ビニルエステル樹脂、エポキシ樹脂、フェノール樹脂などがある。

ゲルコートは、住宅設備部材、浴室部材、舟艇関連製品に代表される FRP 成形品や、FRP 防水材などに代表される FRP 成形品の美観および保護を目的として使用される。ゲルコートは空気中の酸素により硬化阻害を起こすため、成形時にゲルコートが空気に接触しない成形法で使用され、離型処理した成形型に硬化剤を添加したゲルコートを塗布し、硬化を行う。その後 FRP 層を積層し、FRP 層硬化後に型から脱型することで、ゲルコート層が製品表面となり、表面保護層となる。

トップコートは、FRP 防水材、タンク内外面、水槽内外面、舟艇内装などの FRP 製品の美観および FRP 層の保護を目的として、FRP 成形の後から表面保護層を形成する方法として使用され、ゲルコートと同様の特性が求められる。トップコートは、ゲルコートに空気遮断のためのパラフィンワックスを添加し、そのパラフィンワックスが空気中の酸素遮断層を形成することで不飽和ポリエステル樹脂が表面硬化できるようにしたもので、FRP 層の上から塗布できる。そのため、ゲルコート層のない FRP 層裏面や端面処理、表面保護層の補修時にも使用される。

表面塗装については、耐候性の良い塗料を表面保護層として塗装する場合がある。また、経年によりゲルコート・トップコートが劣化し、補修する場合にも表面塗装を施す場合がある。表面塗装に使用する塗料は、イソフタル酸系不飽和ポリエステル樹脂ゲルコートの耐候性・耐久性と同等以上のものとしている。

ゲルコートを用いる場合、樹脂膜厚は厚すぎると繊維積層部との膨張差が要因となり、成形硬化時、製作加工中、または製品供用中に、そり、割れ、欠けなどを起こすことがある。膜厚 1000 $\mu\text{m}$  ではクラックが入る事例もある。特別な条件を除き、ゲルコートの平均膜厚値は施工実績上 500 $\mu\text{m}$  程度が望ましいとされ、トップコートも同様に平均膜厚値は 500 $\mu\text{m}$  程度が望ましいとされている。

紫外線（UV）による FRP の劣化は樹脂の光分解によっており、表面保護層の樹脂の脱落を引き起こし、表面保護層が全て脱落した後は、マトリックス樹脂の劣化による脱落を引き起こす（図 4.3.12 参照）。この劣化は表面から内部に時間をかけて進行する。紫外線は波長によって UV-A、UV-B、UV-C に分けられる。UV-A は 320～390nm の波長域、UV-B は 280～320nm、UV-C は 200～280nm の波長域であり、波長の短い紫外線ほど生物に有害であるものの 290nm 以下は地面に達する前にオゾン層に完全に吸収される。問題なのは 290～400nm の紫外線である。不飽和ポリエステル樹脂を劣化させる紫外線の最大波長は 325nm である<sup>4,24)</sup>。

紫外線による光分解を防ぐためには、紫外線を散乱か吸収させることが行われる。前者は無機物の微粒子による反射・散乱効果を利用するものであり、後者は芳香族化合物などにより紫外線を吸収し熱エネルギーに変換して放出するものである。



図 4.3.12 FRP 部材の紫外線による表面性状劣化<sup>4-23)</sup>

### (2) 緑化による紫外線吸収の可能性

植物は紫外線を吸収することが知られている。植物は種子植物と孢子植物に分類され、後者はさらにシダ植物、コケ植物、藻類に分類される。概要を以下に記述する。

植物の葉や花の色は主にフラボノイド、カロテノイド、ベタレイン、クロロフィルの4種類の色素により発現している<sup>4-25)</sup>。これらの色素は特定の波長の光を吸収し、残りの波長の光は反射する性質がある。フラボノイド、カロテノイド、ベタレイン、クロロフィルというのは、それぞれ構造が似通った化合物の総称であり、それぞれのグループには数種類から数千種類の構造がわずかに異なる化合物が含まれている。中でもフラボノイドはUV吸収色素として紫外線の影響から植物を防御しており、高山植物には数種類のフラボノイドを多量に含んでいるものがある<sup>4-26)</sup>。

また、藻類の海藻の一分類である紅藻はマイコスポリン様アミノ酸(MAA)によりUV吸収効果を有している。MAAはサンゴなどの海産無脊椎動物や地衣類などの様々な生物で見つかっている<sup>4-27)</sup>。海苔は、海岸の岩場の潮干帯と呼ばれる、潮の満ち引きによって海面下に沈んだり、海から顔を出したりする場所で生息、もしくは同様に潮位によって顔を出したり(干出)沈んだりするような浅い海で養殖栽培されている<sup>4-28)</sup>。海苔は、海面上では太陽の紫外線や乾燥による強いストレスにさらされるため、このような過酷な環境に適応するシステムを持つように進化してきたとされている。

こうした植物による紫外線吸収の利用について以下に二つの事例を挙げる。

まず、衣服の紫外線遮蔽性能について、フラボノイド系植物色素染色布の研究がある<sup>4-29)</sup>。フラボノイド系色素を含有しているタマネギ外皮(黄色系色素のケルセチン)と赤ダイコンおよび紫イモ(赤—紫—青緑系の色を持つアントシアニン)により染色を行った綿布と絹布について紫外線遮蔽性能を検討しており、遮蔽性能が向上する場合を見出している。

次に、国際宇宙ステーションの日本実験棟「きぼう」におけるコケ植物の研究がある<sup>4-30)</sup>。ここでは過酷な宇宙環境でも生育可能なスーパーコケ植物「スペース・モス」の開発への挑戦が挙げられている。地上には届かないUV-C領域を含めた紫外線、また宇宙放射線、電磁波などのストレス環境におけるコケ植物の生育について研究が行われており、人類の宇宙ステーションでの長期滞在につながる成果を目指している。

### (3) FRP 水門の材料試験による劣化調査

上記の調査による知見を組み合わせると緑化によりFRPに対する紫外線を遮蔽できる可能性があるが、実際に緑化によりFRPを覆ったり紫外線吸収物質をFRP製作時に混入したりすることにより、その効果を確

かめた事例は入手できていない。緑化においては蔭のような植生により葉陰になる場合や苔や地衣類に表面が覆われる場合があると考えられる。いずれの場合においても、力学的特性などに悪い影響がないか確認することも必要である。

一つの事例として、FRP 水門設計・施工指針（案）の付属資料（2）に記載されている「35 年以上供用された FRP 水門扉の材料試験による劣化調査」について、以下にその概要をまとめる<sup>4-23)</sup>。

この資料では、実際に 35 年以上供用されていた FRP 水門扉の経年劣化状態を定量的に評価するため、農業用水路に使用されている FRP 製扉体を回収・解体して、引張特性を調査している。回収された FRP 製扉体を図 4.3.13 に示す。



図 4.3.13 解体調査された FRP 製扉体<sup>4-23)</sup>

この FRP 製扉体の外観上の変化として、扉体表面に水垢の付着があり、苔の付着も多くみられたとのことである。また、吸水による問題発生はなく、摺動部における損傷、摩耗はなく、若干の変色が認められた状態であった。引張試験は、解体した扉体の主桁（溝形材）から 6×10×250mm の試験片を 5 本採取し、JIS K 7054 「ガラス繊維強化プラスチックの引張試験方法」に準拠して行われた。また、初期の強度に関するデータが入手できなかったため、全く同じ積層構成と成形方法により新たに製作した溝形材から同様の方法で引張強度を求めて双方のデータを比較している。表 4.3.7 は、これらの積層板について引張強度と引張弾性率の平均値を示している。比較によるとほぼ同程度の値を示すことが分かり、この FRP 水門扉は 35 年以上もの間補修されておらず、苔の付着もある状況であっても、強度と弾性率の低下は発生していなかった。

この FRP 水門扉の事例以外に同種の事例は入手できておらず、今後緑化を考える際には、緑化による力学的特性への悪影響の有無と程度についてより広範囲の検証が必要と考えられる。

表 4.3.7 引張特性の比較<sup>4-23)</sup>

	35 年以上経過した扉体から採取した積層板		新たに製作した積層板	
	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張弾性率 (kN/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張弾性率 (kN/mm <sup>2</sup> )
平均	201.0	27.3	204.4	25.2

#### 4.4 海生生物の付着によるコンクリート部材の耐久性向上効果

海洋環境に位置する構造物の表面には海生生物が付着し、それにより構造物の耐久性が向上するという報告がある。このような報告は特にコンクリート構造物に多いが、現場技術者等へのヒアリングによれば、鋼材でも同様の効果が確認された事例がある。また、海外の寒冷地では、フジツボの着生はコンクリートよりも鋼材に対しての方が早いとの報告もある<sup>4-31)</sup>。このようなグリーンインフラのグレイインフラに対する好影響について、今後さらなる検証が必要ではあるものの、将来的にどのように設計に取り入れられるか、試行的に検討した。

##### 4.4.1 海生生物とグレイインフラの相互作用

###### (1) 海生生物の付着によるコンクリートおよび石材への影響

海生生物がコンクリート表面に強固に付着すると、その海生生物の緻密な付着層（図 4.4.1）が外部からの侵入を遮断する効果を有する（図 4.4.2, 図 4.4.3）<sup>4-6), 4-7)</sup>。このような効果は実験レベルでなく、実際のコンクリート構造物でも確認されている<sup>4-32)</sup>。したがって、グリーンインフラである海生生物を活用し、コンクリート表面を海生生物で完全に覆うことで、外部からの物質の侵入を遮断することができる可能性がある。例えば、コンクリート構造物で問題となる塩害の主要因となる塩化物イオンの侵入を、海生生物で遮断させることが可能になれば、表面被覆工と同様の効果を得られることが期待できる。

一方、構造物はフジツボの寿命に対してより長期間の供用が求められることから、グリーンインフラの効果も構造物の設計等に取り込めるかは議論の余地がある。ただし、既往の研究では、フジツボが構造物に付着する際に発するセメントはコンクリートに強固に付着し（図 4.4.4）、またフジツボが剥離する際に二次セメンティングを行うことでコンクリート表面に緻密な層が形成され（図 4.4.5）、これらは少なくとも7年間で失われることはなかったことが報告されている<sup>4-7)</sup>。

ただし、一般的には鉄筋コンクリートでは、ひび割れが許容されることとなる。既往の研究によれば、フジツボによるひび割れ閉塞は鉄筋腐食の抑制に十分ではない可能性もあり（図 4.4.6）、これらは今後さらに検討する必要がある。

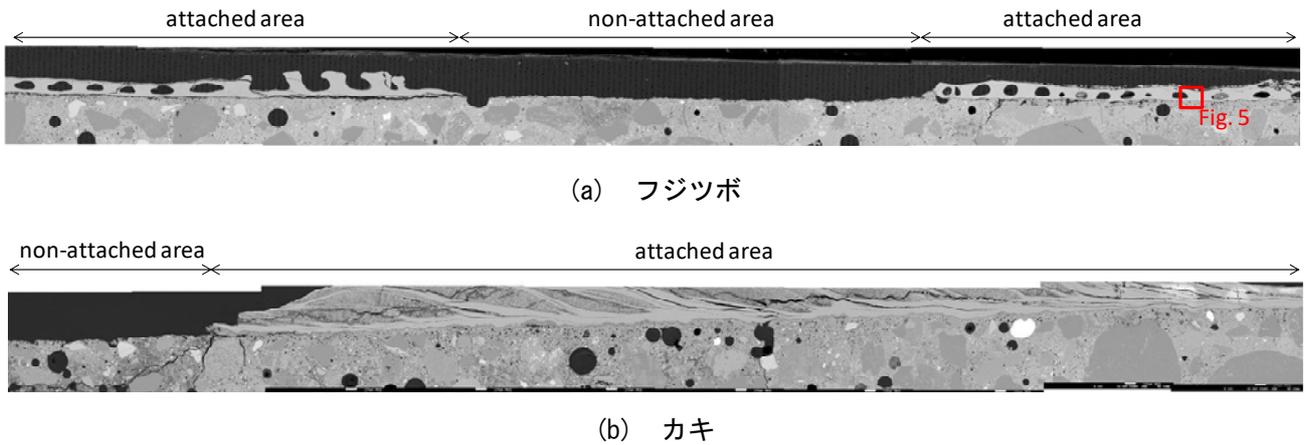


図 4.4.1 コンクリート表面に付着した海生生物の反射電子像<sup>4-7)</sup>

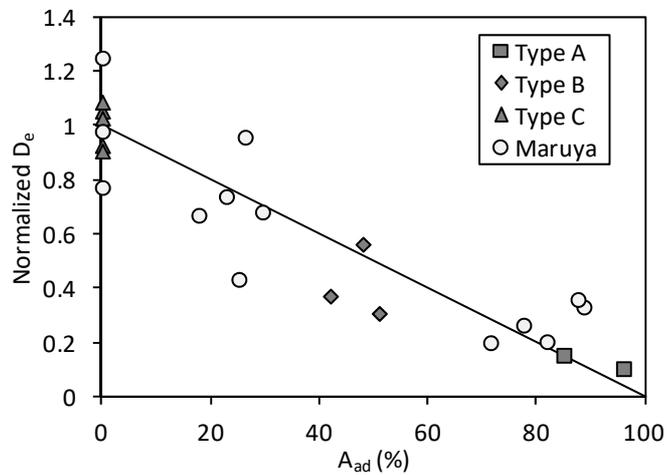


図 4.4.2 コンクリート表面への海生生物付着面積率 ( $A_{ad}$ ) と  
コンクリートの塩化物イオンの実効拡散係数 ( $D_e$ ) の関係<sup>4-7)</sup>

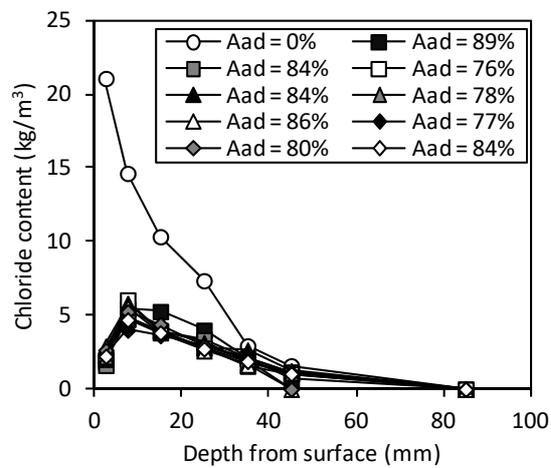
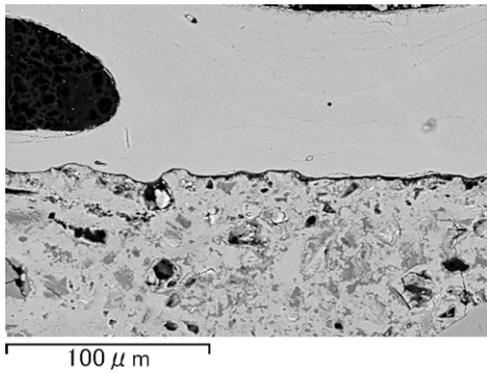
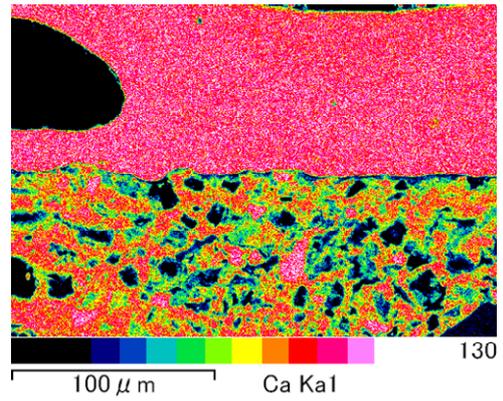


図 4.4.3 コンクリートの塩化物イオン濃度分布<sup>4-7)</sup>

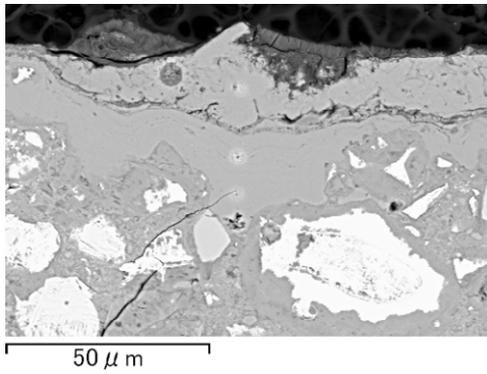


(a) 反射電子像

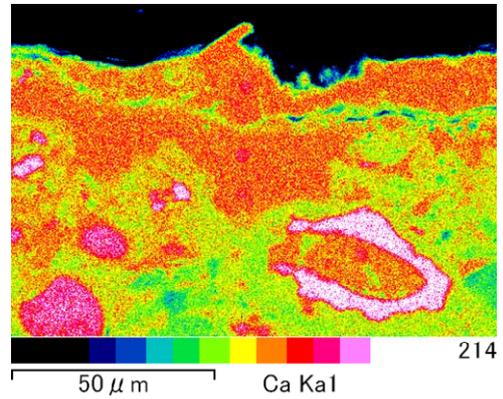


(b) Ca

図 4.4.4 コンクリートとフジツボの底殻の界面<sup>4-7)</sup>



(a) 反射電子像



(b) Ca

図 4.4.5 フジツボの剥離箇所における二次セメンティングの痕跡<sup>4-7)</sup>

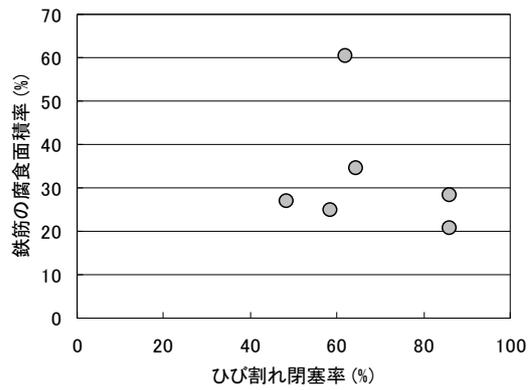


図4.4.6 フジツボによるひび割れ閉塞率と鉄筋の腐食面積率の関係<sup>4-6)</sup>

また、フジツボが付着したコンクリートや石材（石灰岩、花崗岩）に対して、干満帯を模擬した環境条件（日射、温度 18~29°C 等）で試験体表面の温度を計測したところ、フジツボの付着面積が大きいほど最高温度が低くなることが確認された<sup>49)</sup>。同様の効果は海藻でも確認されており、マイクロ環境での温度変化の抑制に加え、蒸発水量の減少により建設材料表面で生じる風化を緩和する効果がある可能性が指摘されている<sup>4-33)</sup>。

一方、海生生物が付着することで、構造物に悪影響を与える場合も指摘されている。例えば、取水口などに海生生物が付着すると抵抗が大きくなることから、一般に海生生物の付着は好ましくない。また、生物の作用によって建設材料が劣化することもよく知られており、これは海洋環境でも同様である。

このように、海生生物による構造物への好影響は幾つか報告されているが、現状ではデータの蓄積が少なく、今後基礎研究が必要である。また、海生生物によって負の作用が生じる場合もあることから、これらに十分に留意しながらグリーンインフラとグレーインフラの融合の検討が進展することが望まれる。

## (2) 海生生物の付着促進のための技術

コンクリートに対する海生生物の付着促進のための研究はこれまで比較的多く実施されてきた。これらの多くは構造物や製品の形状などを改良することで付着促進を図るものが多かったが、最近ではマクロな形状だけでなく、表面のマイクロ形状の影響についても検討がなされている。Coombes らはコンクリートの表面を加工し、フジツボの付着面積への影響を検討している<sup>4-34)</sup>。その結果、表面に凹凸形状を設けた試験体（実験ではワイヤブラシで表面をこすった状態）に対してフジツボが好んで付着する一方、平滑な試験体に対するフジツボの付着量は少なかった。また、フジツボの付着が多いほど無脊椎動物が多く存在していた。これらの結果から、タイドプールなどの大型の施設を単に建設するだけでなく、表面の微細な形状変化を与えることで、生態学的価値をより高めることができると報告している。また、アミノ酸の一種であるアルギニンコンクリートに添加することで、藻類の付着を活性化させる技術が開発されている<sup>4-35)</sup>。

### 4.4.2 海生生物付着による物質侵入遮断のモデル化

ここでは、海生生物付着による物質侵入遮断効果のモデル化について、コンクリート構造物で問題となる塩害の主要因となる塩化物イオンの侵入を一例として検討した。すなわち、海生生物付着による物質侵入遮断効果を境界条件の変化によって表現した。

一般に、コンクリート構造物の塩害環境下における鋼材腐食に対する照査では、鋼材位置における塩化物イオン濃度の設計値  $C_d$  の鋼材腐食発生限界濃度  $C_{lim}$  に対する比に構造物係数  $\gamma_i$  を乗じた値が、1.0 であることを確かめることにより行うことが原則である。コンクリート中における塩化物イオンの浸透は以下で表現される。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (1)$$

一般には、境界条件は固定境界条件で表現される。

$$C(0,t) = C_0 \quad (2)$$

一方、海生生物がコンクリート表面を被覆することで、塩化物イオンの侵入が完全に遮断されるので、その効果を駆動境界条件として表現する。

$$\frac{\partial C}{\partial x}(0,t)=0 \quad (3)$$

海生生物の付着後に境界条件を変更することで、外部から侵入する物質を遮断することが可能になり、コンクリート中での塩化物イオンの内部拡散問題とすることができる。ただし、海生生物の付着の時期や程度を定量的に表現するモデルがなく、これらは今後の課題である。

#### 4.4.3 海生生物付着によるコンクリート部材の耐久性向上効果の試算

上記のモデルを用いて、海洋環境に位置する鉄筋コンクリート（RC）構造物を対象に試算を行った。対象構造物は以下の条件とし、主な定数は土木学会コンクリート標準示方書【設計編】を基に設定した。

- (1) 構造物の立地する地域区分：飛沫帯  
(コンクリートの表面塩化物イオン濃度  $C_0=13.0 \text{ kg/m}^3$ )
- (2) コンクリートの水セメント比：50%  
コンクリートの設計拡散係数  $D_d=0.50 \text{ cm}^2/\text{年}$ （ひび割れはないものと仮定）  
鋼材腐食発生限界濃度  $C_{lim}=1.9 \text{ kg/m}^3$
- (3) かぶり：70mm
- (4) 海生生物の付着時期：5、10年、海生生物付着無し

既往の研究によれば、海生生物の一種であるフジツボの付着の時期や程度には地域性があることが報告されており、ある地域では数年でコンクリート表面を完全に覆った事例もあることから、5、10年で試算した。また、比較として海生生物付着無し（一般的なコンクリート）についても計算した。なお、付着面積率（海生生物によるコンクリートの被覆割合）は100%と仮定した。

図4.4.7に試算結果を示す。試算の結果、海生生物の付着がないケースでは、供用24年後に鋼材位置における塩化物イオン濃度が鋼材腐食発生限界濃度に達した。一方、海生生物が付着するケースでは、内部拡散が進むものの、供用24年後で鋼材位置における塩化物イオン濃度は鋼材腐食発生限界濃度に達しなかった。なお、海生生物が10年で付着した場合には、腐食発生は供用27年後、また5年で付着した場合には供用50年経過しても腐食発生には至らなかった。

このように、海生生物の付着が構造物の耐久性向上に寄与する可能性がある。

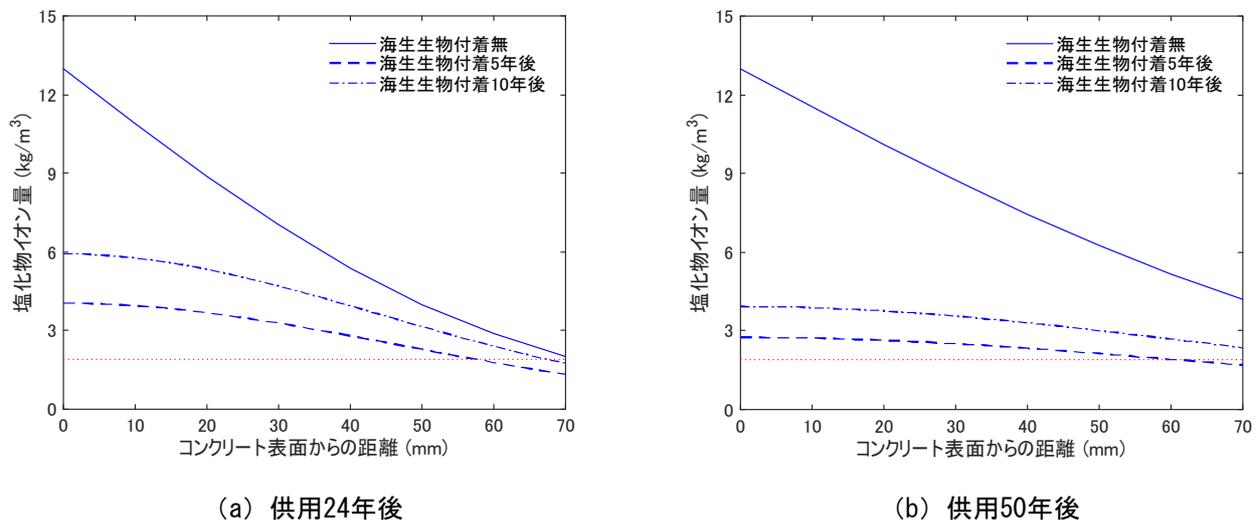


図4.4.7 試算結果（付着面積率100%を仮定）

## 4.5 まとめ

本章では、グレーインフラに対してグリーンインフラを取り入れた事例を調査し、その取り入れによって得られる性能向上効果について検討した。その結果、グレーインフラに対してグリーンインフラを陽に取り入れることで、構造物の性能を向上できる可能性が示された。また、その効果について、境界条件を変化させることで考慮できる可能性が示唆された。一方で、このような視点からの研究開発事例は多くなく、逆にグレーインフラにグリーンインフラを取り入れることで負の影響が生じる可能性もある。今後多様な観点からの検証がなされ、グレーインフラにグリーンインフラを取り入れることによる相乗作用を期待できるよう、その手法や評価方法などの構築が期待される。

## 参考文献

- 4-1) 田中博一ほか：場所打ち緑化コンクリートの河川護岸への適用，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.22，No.1，pp.1231-1236，2000
- 4-2) 玉井元治：ポーラスコンクリート河川護岸工法の概要，コンクリート工学，Vol.39，No.8，pp.10-15，2001.8
- 4-3) 唐沢明彦，土田保：建築物の熱環境に及ぼす軽量ポーラスコンクリート屋上緑化システムの開発，日緑工誌，Vol.27，No.1，pp.205-208，2001
- 4-4) 前村格治，引地瑞穂：鹿児島市軌道敷緑化事業の概要，九州技報，Vol.45，2009
- 4-5) 鹿児島市：鹿児島市市電軌道敷緑化整備事業，<http://www.city.kagoshima.lg.jp/kensetu/kensetukanri/kouenryokuka/machizukuri/machizukuri/documents/panhu.pdf>
- 4-6) 渡邊弘子，岩波光保，浜田秀則，横田弘：海生生物付着による海洋構造物の耐久性向上に関する研究，港湾空港技術研究所報告，pp.49-105，Vol.41，No.3，pp.49-105，2002
- 4-7) Y. Kawabata et al. : Enhanced long-term resistance of concrete with marine sessile organisms to chloride ion penetration, *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 10, No.4, pp.151-159, 2012
- 4-8) T. Chlayon et al. : Combined protective action of barnacles and biofilm on concrete surface in intertidal areas, *Construction and Building Materials*, Vol.179, pp. 477-487, 2018
- 4-9) M.A.Coombes et al. : Cool barnacles : Do common biogenic structures enhance or retard rates of deterioration of intertidal rocks and concrete ?, *Science of the Total Environment*, Vol.580, pp. 1034-1045, 2017
- 4-10) 木原一禎ほか：サンゴ増殖用電着基盤の構築，第17回地球環境シンポジウム，2009
- 4-11) H.M.Jonkers : Bacteria-based self-healing concrete, *HERON*, Vol. 56, pp.1-12, 2011
- 4-12) 松下ゆかり，岡崎慎一郎，安原英明，氏家勲：微生物代謝を利用したコンクリートのひび割れ補修工法の開発，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.1，pp.1589-1594，2010
- 4-13) 寺島麗，島田俊介，小山忠雄，川崎了：微生物代謝により固化するシリカ計地盤注入材バイオグラウトの基礎研究，土木学会論文集 C，Vol.65，No.1，pp.120-130，2009
- 4-14) 椋木俊文，吉永智昭，川崎了：溶媒の pH および有機栄養源がバイオカバーソイルの生成と特性に及ぼす影響評価に関する基礎的研究，地盤工学ジャーナル，Vol.5，No.1，pp.69-80，2010
- 4-15) 檀上堯，川崎了：セメント物質に着目したビーチロックの形成メカニズムに関する考察，*Journal of MMIJ*, Vol.129, No.7, pp.520-528, 2013
- 4-16) 日本ナチュロック：基盤 FRP 製 ビオボード BOX 工法，パンフレット，[http://www.naturrock.co.jp/tokushu/river\\_green.pdf](http://www.naturrock.co.jp/tokushu/river_green.pdf)

- 4-17) 都市緑化機構：Neo Green Space Design (2) 技術マニュアル，1996
- 4-18) 久場公司，審良善和，武若耕司，山口明伸：酸性雨が作用したコンクリートの内部組織の変化に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.1，pp.713-718，2003
- 4-19) 小林一輔，宇野祐一，森弥広：酸性雨によるコンクリート構造物の劣化機構に関する基礎的研究，土木学会論文集，No.564/V-35，pp.243-251，1997
- 4-20) 審良善和ほか：酸性雨によるコンクリート構造物の劣化機構に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.2，pp.649-654，2001
- 4-21) 横関ほか：水和反応と温度依存性を考慮したセメント系材料のイオン拡散係数予測モデル，土木学会論文集 No.725/V-58，131-142，2003.2
- 4-22) 新橋梁形式研究部会編：新橋梁形式研究部会報告書，鋼橋技術研究会，No.076，2014.3
- 4-23) 土木学会：FRP 水門設計・施工指針（案），2014.
- 4-24) Chemical Book：UV 吸収剤，[https://www.chemicalbook.com/ProductCatalog\\_JP/2212.htm](https://www.chemicalbook.com/ProductCatalog_JP/2212.htm)，2019.
- 4-25) 農研機構：色素の基礎知識，[http://www.naro.affrc.go.jp/archive/flower/kiso/color\\_shikiso/](http://www.naro.affrc.go.jp/archive/flower/kiso/color_shikiso/)，2019.
- 4-26) 岩科司：花の色の発現の仕組みを探る，[https://www.kahaku.go.jp/research/researcher/my\\_research/botany/iwashina/index.html](https://www.kahaku.go.jp/research/researcher/my_research/botany/iwashina/index.html)，2019.
- 4-27) 日本光合成学会：UV 吸収色素，[http://photosyn.jp/pwiki/index.php?UV 吸収色素](http://photosyn.jp/pwiki/index.php?UV%20吸収色素)，2019.
- 4-28) 水産研究・教育機構：海苔エキスを配合した化粧品を開発，<http://www.fra.affrc.go.jp/pressrelease/pr24/240806/index.html>，2019.
- 4-29) 小林優子，鈴木恒夫：フラボノイド系植物色素染色布の紫外線遮蔽性能，長野県短期大学紀要，Vol. 66，pp. 53-59，2011-12.
- 4-30) 藤田知道ほか：コケ植物を用いた宇宙実験に向けて：スペース・モスの活動報告，Space Utilization Research，Vol. 29，pp. 19-20，2015.
- 4-31) M.H. Andersson, M. Berggren, D. Wilhelmsson and M.C. Ohman：Epibenthic colonization of concrete and steel pilings in a cold-temperature embayment：a field experiment, Helgol. Matr. Res., Vol. 63, pp. 249-260, 2009
- 4-32) Y. Kawabata, E. Kato, M. Iwanami and T. Yamaji：High-durable concrete structures co-habiting with marine tidal ecological system, Proceedings of 1<sup>st</sup> International Conference on Concrete Sustainability, pp.359-364, 2013
- 4-33) M.A. Coombes, L.A. Naylor, H.A. Viles and R.C. Thompson：Bioprotection and disturbance: Seaweed, microclimatic stability and conditions for mechanical weathering in the intertidal zone, Geomorphology, Vol. 202, pp.4-14, 2013
- 4-34) M.A. Coombes et al.：Getting into the groove：Opportunities to enhance the ecological value of hard coastal infrastructure using fine-scale surface textures, Ecological Engineering, Vol.77, pp.314-323, 2015
- 4-35) 上月康則，中西敬，佐藤和博，多良千鶴，西村博一，山口奈津美，岩城嘉宏，山中亮一：アミノ酸混和コンクリート表面上での付着微細藻類の生長特性に関する研究，海洋開発論文集，第 26 巻，pp.111-116，2010

## 第5章 おわりに

グリーンインフラという概念は近年登場した造語であり、環境問題、持続可能な社会、防災、災害軽減など現代社会が抱える共通の課題に対して、誰もが賛同できる解決策のような良いイメージとともに受け入れられている。グリーンインフラという用語やコンセプトが社会に歓迎され、注目される理由として、従来のインフラはコンクリート、鋼などの工業的に作られる人工物の塊（グレーインフラ）であり、今日明日の社会の利便性には供するが長い目で見た地球環境の保全にはマイナスであるとの考え方があると思われる。しかし、社会インフラを責任もって世の中に実現する立場にある我々土木技術者は、社会の感性や動向は認識しつつも、科学的根拠に基づき、真に良いインフラを目指さなければならない。本研究は、グリーンインフラ、グレーインフラ双方に植え付けられたいわゆる先行イメージにとらわれず、情報収集・整理し、客観的、科学的、技術的に、グリーンインフラについて分析し、インフラとしての実力、従来のグレーインフラの補完や協働の可能性などについて検討することを旨としたものである。

本研究は、土木学会重点研究課題に採択されたことを受け、複合構造委員会に設置した研究委員会により行った。以下の3つのWGを設けて検討した。

### WG1：グリーンインフラとグレーインフラの協働事例の分析WG

グリーンインフラとグレーインフラを協働させて機能を発揮させた事例を調査し、その事例をグレーインフラに携わる者の立場から分析した。その成果は報告書第2章に取りまとめている。事例の概要を示すとともに、海岸林と防波堤・防潮堤、自然林と人工堰堤などのいくつかの協働事例について調査・分析した内容を詳述した。

### WG2：グリーンインフラとグレーインフラの新たな融合に関する検討WG

協働とは異なる融合のありかたとして、グリーンインフラの機能保持あるいは有効活用のためにグレーインフラを利用した事例を調査するとともに、そのほかの新たな融合を生み出す際の考え方（コンセプト）について検討した。その成果は本報告書第3章に取りまとめている。

### WG3：グレーインフラへのグリーン（インフラ）の取り入れに関する検討WG

グレーインフラにグリーン（インフラ）を取り入れた事例を調査し、その取り入れによって得られる付加価値等について検討した。第4章はWG3の活動成果であり、主に緑とフジツボをグレーインフラに取り入れた事例に着目し、それらの取り入れがグレーインフラに及ぼす効果について試算した。

本報告書第1章に示したように、グリーンインフラといっても提唱者や場面によってその意味するところに幅があり、共通の明確な定義があるわけではない。一方、従来のグレーインフラについても単に人工構造物として括ることに無理がある。国土交通省では、「災害リスクが避けられず、土地利用条件の厳しい我が国では、要素技術、空間配置、相互関係のいずれから見ても、人工構造物とグリーンインフラを切り離すことはできず、双方特性の理解の下、組み合わせて使っていくことが重要である」と説明している。つまり、従来からあるインフラこれから造るインフラを含めて、実はすべてグリーン（自然）的側面とグレー（人工）的側面を併せ持っていることになる。では、あえてグリーン、グレーとステレオタイプ化して考える意義は何か。それは、 1.2.1 に示したグリーンインフラとグレーインフラの連続性を表す座標軸における個別の構造物の位置を意識し、今後造られる構造物では計画時にそのバランスを積極的にコントロールすることではないだろうか。

橋梁などの構造物の設計は、構造物の性能を定量的に表し、科学的方法により構造物の保有する性能を予測・評価し、必要な性能が確保されていることを客観的に確認することを基本としている。構造物の性能は多岐にわたるため、もちろんすべての種類の性能が容易に定量化できるわけではないが、安全性や耐久性など一般的な性能は何らかの工学指標で定量的に表すことを基本として構造物の設計体系が構成されている。構造物のグリーンとグレーのバランスを今後積極的に考えるには、どのような形で既往の構造物の設計体系の中に取り込むべきなのか、あるいはそもそも個別の構造物の設計とは異なる段階で検討すべきなのか、今後のそのような課題についても考えてゆく必要がある。本研究を単にグリーンインフラの検討とするのではなくグリーンとグレーとの関係をキーワードとしたのは、既往の構造物（グレーインフラ）の設計技術体系との関係を重視したからである。

本研究はグリーンインフラをグレーインフラに携わる技術者の立場から、両者の関係に焦点を当てて取り扱ったはじめての組織的な研究である。本研究が今後のグリーンインフラに関する研究の参考となれば幸いである。