

平成 23 年度重点研究課題  
「CCS（二酸化炭素岩盤内貯留）実現のための岩盤の調査モニタリング技術  
および関連技術の現状と課題に関する調査研究」  
報告書

研究代表者：京谷孝史 東北大学 大学院工学研究科土木工学専攻

研究メンバー：

長田昌彦 埼玉大学 地圏科学研究センター

岸田 潔 京都大学 大学院工学研究科都市社会工学専攻

奥野哲夫 清水建設技術研究所地下技術グループ

鈴木健一郎 大林組技術研究所地盤技術研究部

森岡宏之 東電設計株式会社地下環境技術部岩盤グループ

清木隆文 宇都宮大学 大学院工学研究科地球環境デザイン学専攻

澤田昌孝 電力中央研究所 地球工学研究所地圏科学領域

（推薦委員会：岩盤力学委員会）

## 1. 研究目的

岩盤力学委員会では、昨年度（平成22年度）の重点領域研究助成を受けて、「我が国における CCS 実現における課題の抽出・整理と岩盤工学の果たす役割に関する調査研究」を実施した。その成果として、深部岩盤の調査技術、超長期の岩石の物理化学的特性の把握、深部岩盤において超臨界流体となる二酸化炭素の移動・滞留挙動のモニタリング技術、およびその高精度の予測解析手法など、CCS 実現のために必要不可欠な技術と要求される技術レベルが明らかとなると同時に、それらの技術は現在の岩盤力学・岩盤工学の延長線上での発展的体系化により実現可能であるという知見を得た。また、仮に、世界経済の状況によって CCS が我が国で実現しないことになったとしても、体系化された高いレベルの岩盤力学・工学の技術は、CDM(Clean Development Mechanism)を組み合わせた発展途上国への援助活動の柱となり得る。したがって、こうした二重の意味において、CCS という新しい総合技術を近未来において支え得る岩盤力学・岩盤工学の体系化こそは、今まさに土木学会が果たさねばならない事業であるとの認識に至った。

そこで、今年度（平成23年度）は、「CCS の実現」を羅針盤的キーワードとして、岩盤の調査モニタリング技術および関連技術についての現状および克服すべき課題を体系的に整理することを目的とした調査研究を実施するものである。

## 2. 研究内容

本調査研究では「CCS 実現」を羅針盤的キーワードとして、以下の二つの項目の調査研究を行った。

- 1) 深部岩盤の構造調査に利用可能な技術（物理探査技術、深部ボーリング技術など）の現状調査と課題整理。
- 2) CO<sub>2</sub> 圧入（超臨界、相変化など）と貯留に関するシミュレーターの現状と課題整理

3. 深部岩盤の構造調査に利用可能な技術（物理探査技術、深部ボーリング技術など）の現状調査と課題整理。

モニタリング技術に関しては、IEA のホームページ（<http://www.ieaghg.org/>）に Monitoring Selection Tool があり、CCS に必要なモニタリング技術全 40 手法が、条件により選定されるようになっている。

モニタリング 40 技術を表 3-1 に、条件を 3-2 に示す。

表 3-1 CCS に係るモニタリング技術

2次元表面反射法探査	3D地表面地震探査	地表電磁探査	地表電磁気探査
空中電磁気探査	空中写真判読	長期ダウンホールpH測定	微小地震測定
音波探査	気泡流化学	マルチビーム測深	多成分地表地震探査
気泡流検知	孔間比抵抗トモグラフィ	非分散赤外線ガス分析	干渉SAR
孔間比抵抗トモグラフィ	孔間弾性波トモグラフィ	海底電磁探査	海底ガス採取
ダウンホール流体化学検層	ダウンホール圧力/温度検討	海水化学調査	サイドスキャンソナー
生態系調査	渦相関CO2濃度計測	単孔電磁検層	土壌ガス濃度
自然電位測定	流体地化学測定	地表ガス流束	重力探査
物理検層	地中レーダー探査	傾斜計	トレーサ
高分解能地震探査	赤外ダイオードレーザー計測	VSP探査	孔内重力検層

表 3-2 モニタリング選定ツールの条件と選択肢

条件	選択肢
貯留層位置	海上、陸上、両方
貯留層深度	500～1500、1500～2500、2500～4000、4000 以深
貯留層タイプ	帯水層、油田、ガス田、炭田
注入量	注入レート（10Mt）、期間を直接入力（10years）
サイトの土地利用状況	都市、農地、森林、砂漠、保護地
モニタリングフェイズ	注入前、注入中、注入後、孔井閉鎖後
モニタリング目的	プリューム、シール層、移行、漏洩、他震など
モニタリングパッケージ	コア、付加的、全て

各モニタリング技術の詳細は、それぞれをクリックすることで、技術の詳細、コスト、成熟度、およびケースステディなどを知ることができる。

条件の選択により、条件に合った適切なモニタリング項目が選択されるようになっている。赤で示した項目にチェック、入力して実行した時の例を表 3-4 に示す。

表 3-4 実行結果の CSV ファイル

Tool	Rating %	Plume	Migration	Leakages	Seismicity
3D surface seismic	56	4	4	1	0
Downhole fluid chemistry	38	1	2	3	0
2D surface seismic	31	2	2	1	0
Downhole pressure/temperature	25	1	1	0	2
Soil gas concentrations	21	0	0.7	2.7	0
Geophysical logs	19	1	2	0	0
Non dispersive IR gas analysers	17	0	0.7	2	0

#### 4. CO<sub>2</sub> 圧入と貯留に関するシミュレータの現状と課題整理

CO<sub>2</sub>の安定貯留に関しては、注入されたCO<sub>2</sub>の地下挙動を事前に予測するとともに、注入中および注入後の長期にわたる観測により、予測を修正してさらに長期の挙動を推定していくことが求められる。

##### 4.1 解析評価において必要な機能

地下の深部塩水層にCO<sub>2</sub>を圧入して貯留するステップでは、次の4つのステップが存在すると云われている;1)貯留層堆積岩を満たした深部地下水に圧入CO<sub>2</sub>が置換される(構造的にトラップされることで構造トラップと呼ばれる)、2)超臨界状態CO<sub>2</sub>が上部に移動して、その位置での温度、圧力条件から気化してガス状態として空隙に留まる(残留ガストラップと呼ばれる)、3)圧入CO<sub>2</sub>が分子状態で溶解する、溶解したCO<sub>2</sub>が解離してイオン(例:HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>)となり深部地下水を酸性に傾ける(溶解トラップ)、そして化学的性質の変化した深部地下水が堆積岩を構成する鉱物と反応しそれらを溶解あるいは変質し、5)さらに組成の変わった深部地下水から安定な新鉱物(主に炭酸塩鉱物類)が生成されて地層中に固定される(鉱物トラップと称されている)(IPCC、2005)<sup>2)</sup>。ステップ3)および4)のステップは、社会的時間をこえた超長時間にて機能するものと漠然と考えられている。

これらの全て過程を解析により評価する必要がある。解析に必要な機能を整理して抽出した。

##### ◆水理地質構造モデルへの要求

貯留層は、複数の積層構造になっている場合が多く、上部に遮蔽層を有している。さらに貯留域とは離れていても潜在的漏洩経路となる断層などが含まれる広域の複雑な地質構造を再現することが必要である。

地質的要求：貯留層および遮蔽層、周辺の断層などの地質構造の詳細モデルが広域において作成できること。そして、情報が蓄積された時にモデルの変更が容易なこと、が必要である。

物理的要求：貯留層の容量(厚さ、広がり、間隙率)、貯留深度(深度における圧力、温度)、遮蔽層の容量(厚さ、広がり、間隙率、強度、変形特性)

浸透流に関する要求：広域地下水流動、岩石試料の輸送特性の異方性、微視的地下水流動

また、モデルに関して、IEAは「CCS規制枠組み」の中で次のように述べている<sup>1)</sup>。

「BOX14 貯留境界表現のフレキシビリティの必要性：CO<sub>2</sub>の地下貯留層の地質構造モデル作成には不確実性が伴う。事後に修正できるフレキシビリティが必要である。そのため、モデル境界で誤差が許容されるような解析が必要であり、ヒストリーマッチングを行い、予測結果の観測値との調整が可能なような境界設定のダイナミックなアプローチを行う。」ことが要求されている。

◆CO<sub>2</sub>の相変化への対応の要求

注入する CO<sub>2</sub> は、注入深度および温度において超臨界状態であるから地下水より軽い  
ため帯水層上部に貯留され、時間とともに CO<sub>2</sub> が溶解した溶解水は、周囲の地下水に比べ比  
重が若干高いため、ゆっくりとではあるが沈降していく。このような状態をシミュレート  
した例を図 3-1 に示す。しかし、移流経路などの何らかの理由により浅い深度方向に飽和の  
まま移動した場合、静水圧の減少による圧力低下により飽和濃度の現象が起り、ガス化  
することが懸念されている。ガス化した CO<sub>2</sub> が貯留層上部に滞留する可能性はあるのか、  
さらに上部の地層に侵入することはあるのか、そのために帯水層は必要なかが問われる  
ことになる。解析においても、このようなシナリオを想定した場合には、相変化を追うこ  
とのできるツールが必要となる。

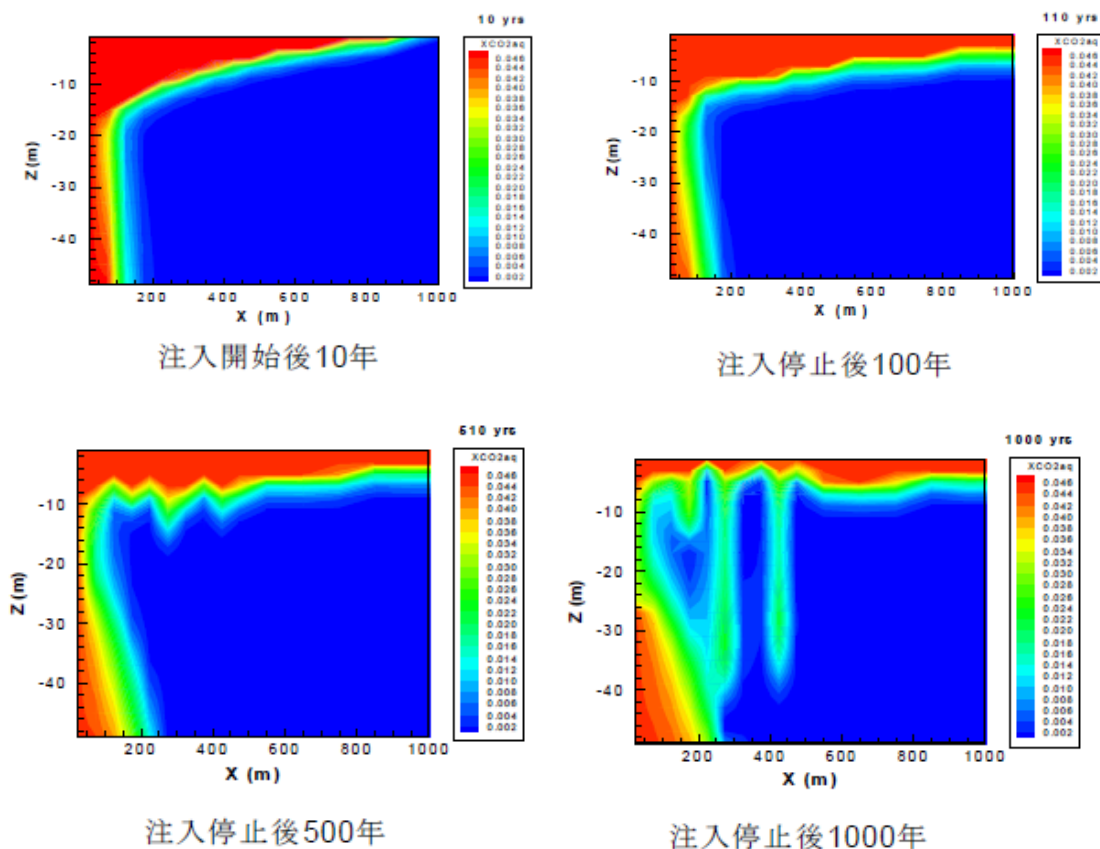


図 3-1 厚さ 50m×延長 5km の 2 次元帯水層モデルでの予備的 TOUGH-REACT シミュレーションによる溶存 CO<sub>2</sub> 分布の 1000 年間の変化<sup>3)</sup>

(注入 CO<sub>2</sub> は速やかに貯留層上面に達し、その後側方に広がる。長時間経過後は、CO<sub>2</sub> を溶解して密度の高くなった水の沈下がおきる。)

出典：平成 19 年度 二酸化炭素固定化・有効利用技術等対策事業 二酸化炭素地中貯留技術研究開発成果報告書 第 3 章 地中挙動予測手法の高精度化 財団法人 地球環境産業技術研究機構 平成 20 年 3 月、p.503

以上をまとめると

化学的要求：貯留層および遮蔽層の化学組成、地下水の化学組成、それぞれの CO<sub>2</sub> との反応特性、CO<sub>2</sub> が溶解した地下水が岩石と化学反応を起こし、地下水中に溶出する可能性が考えられる岩石を構成する主要・微量元素。

CO<sub>2</sub> の特性に関する要求：温度、圧力による CO<sub>2</sub> の相変化に関する構成則が扱えること

浸透流に関する要求：地下水、CO<sub>2</sub> の相変化に対応した多相流の流れが扱えること。

さらに貯留域は、沿岸地域となる場合が多いため、地下水には淡水と塩水が存在する。

#### ◆ 高圧入圧力による貯留層周囲の岩盤の力学的安定評価への要求

CO<sub>2</sub> の注入は、注入深度の地下水圧プラス  $\alpha$  の高圧注入となる。注入孔周辺における貯留層岩盤およびキャップロックの変形および破壊、超臨界 CO<sub>2</sub> の浮力によるキャップロックの亀裂進展や水圧による破碎、地表での変形などが考えられる。破壊地下水溶解させた水は、圧力をかけて貯留層へ注入される。透水係数が低い場合、移流速度が低いため圧力伝達も狭い範囲となるため、応力集中が起きることが予想される。このため、解析による注入時の周辺地盤への応力分布状態の算出が求められるものと思われる。

#### ◆ 広域地下水流動への要求

地質構造モデルへの要求でも述べたように、貯留量が大量となると貯留域も広範囲となり、短期的には、貯留した CO<sub>2</sub> が設計した貯留域で保持されているか、設計通りの貯留形態となっているかを予測することが必要となる。バックグラウンドとして貯留域における地下水流動も重要となる。すなわち、貯留の成立性で行う CO<sub>2</sub> イオンの拡散解析に加え、広域地下水流動を検討に入れなければならない。

我が国における広域地下水流動の流速は非常に遅く数年ではセンチメートルのオーダーでしか流速を持たないと考えられるが、貯留状況のモニタリングに CO<sub>2</sub> のイオン濃度の計測を用いた場合、精密な濃度変化を求めないとモニタリングが困難になる可能性がある。

長期的には、CO<sub>2</sub> が長距離の移流によって動き、生活利用水圏に到達する可能性が否定できない。この場合においても、長期の移流・拡散解析を行い、まず地下水が、そのようなエリアに到達する可能性の有無、さらに、到達が懸念される場合には、それまでの期間、また、流れの乱れや拡散の影響を考慮したうえで、どれほどの濃度の CO<sub>2</sub> イオンが到達するかの評価が必要となる。

#### ◆ 岩盤中での微視的な CO<sub>2</sub> の挙動

計画域における透水係数や、予測される CO<sub>2</sub> イオンの拡散係数を用いて解析を実施し、モニタリングに結果と異なる場合、岩種を詳しく調べ、その領域における透水係数や CO<sub>2</sub>

イオンの拡散係数を求める必要が生じる可能性がある。

このような場合には、計画域の岩のサンプリングを行い、空隙データなどを入力値として、ミクロな移流拡散解析を行い、岩としての物性値を決める必要がある。

岩盤は本来多孔質であり、また亀裂などの浸透経路を有するものである。岩盤に注入した超臨界  $\text{CO}_2$  がガス化した  $\text{CO}_2$  もしくはその他の気体が孔隙を閉鎖する形で存在し、水の経路としての目詰まりを起こす可能性が考えられる。これに関してもこのような媒質中の気泡が物性に及ぼす影響として検討を要する課題と考えられる。この場合は、当然、間隙中を超臨界  $\text{CO}_2$  とガス化  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CO}_2$  溶解水および地下水の三相が移動する問題を解くことになる。

ガス化とは異なり、多孔質媒質中を移動する  $\text{CO}_2$  イオンが、例えば移流速度が非常に遅く、また周囲の岩種にもよるが、地下水中に溶出した岩の成分と結合し固体として析出する場合がある。この場合、析出が非常に速いと岩の孔をふさぎ、移流経路を閉塞させる恐れがある。また、閉塞には至らないような析出速度の場合は、移流と拡散で広がった  $\text{CO}_2$  が固体として計画域に沈殿する形となり、上記のような生活圏への移動の懸念が低くなることや、そもそも飽和濃度に達する可能性が低くなるために、同じ計画域でも貯留量は格段に大きくなると考えられる。

#### 4.2 想定より導かれる解析に求められる機能

これまでにまとめたケースに基づく解析に求められる機能を、マクロ領域の  $\text{CO}_2$  の挙動と、ミクロ領域での  $\text{CO}_2$  の挙動に分けてまとめる。

##### (1) マクロ領域での $\text{CO}_2$ の挙動に関する求められる機能

貯留計画域における貯留層のモデルを入力値とした、移流・拡散を扱えることが必要となる。広域地下水流動が扱え、 $\text{CO}_2$  の濃度分布を求めたのちに積分を行うことで、貯留量の算出が可能になる。さらに、岩盤破壊が懸念されるような圧力を考慮した場合、周辺地盤への影響を求められる機能があることが望ましい。さらに、 $\text{CO}_2$  が溶解状態を保てずガス化した場合、液相と気相の2相の連成解析が可能であることが望ましい。

また圧力・温度・地下水のイオン種によって、 $\text{CO}_2$  の飽和濃度は異なると考えられる。これを求めるには地球化学的な解析による予測が必要となる。

##### (2) ミクロ領域での $\text{CO}_2$ の挙動に求められる機能

岩盤中の地下水および  $\text{CO}_2$  の移流・拡散を解くことが必要となるために、多孔質場体中の移流・拡散を解くことができる機能が求められる。さらに、中途の孔部分に気泡が存在するような2相の連成解析の機能が求められる。また、 $\text{CO}_2$  の析出といった化学的な変化に対応するような非線形の効果を織り込むことのできる機能を有することが望ましい。



### 4.3 評価において有効と考えられる解析ツール

#### (1) Tough2

Tough2 は、ローレンスバークレー国立研究所で開発された多孔質媒体や破砕性媒質の中の多相流れの数値シミュレーションソフトである。主たる解析対象は、地熱貯留層工学、放射性廃棄物の単離研究、環境影響評価および飽和媒質や帯水層での輸送問題である。

1991年に Tough2 は、5種類の異なる流体の物性モジュールを含む形で公表された。モジュールは EOS(Equation-Of-State)と呼ばれ、EOS1～EOS5 で構成されている。EOS1 は、水及びトレーサーを含む水、EOS2 は水と CO<sub>2</sub>、EOS3 は水と空気、EOS4 は水、空気および蒸気、EOS5 は水と酸素である。その後、水、塩水、空気を含む EOS 7、これに放射性核種を含めた EOS7R、水、油、非凝集性の気体を含めた EOS8 などのモジュールが追加されている。Tough2 は、Fortran で記述され、すべてのコードが公開されている。このため、様々な研究者からの改良や検証がなされている。

Tough2 では、流体と熱を質量とエネルギーの保存則より解いている。移流はダルシー則に則っており、これに物質拡散が加わっている。熱の流れは伝達に則っている。これらは局所平衡を満たすように求められる。Tough2 の数値解法は有限差分法を用いている。Tough2 の起源は、1980年代にローレンスバークレー国立研究所で開発された MULKOM と呼ばれるプログラムにあり、数値解法などは MULKOM の手法を引き継いでいる。

#### (2) Code\_Bright

Code\_Bright は、カタルーニャ工科大学地盤工学研究室によって開発された、地盤や岩盤などの多孔質媒体の流れおよび物質拡散及びそれに伴う応力や変形状態に関する数値シミュレーションソフトである。数値解析法は FEM を用いている。機能としては、Tough2 に近いと考えられるが、応力による解析対象の変形を考慮できることが特筆される。Code\_Bright は、塩水環境における解析として始まり、様々な構成則を加えることで発展した。Code\_Bright も Tough2 同様に Fortran で記述されている。

Code\_Bright では、物性などの初期情報を詳しく記述すると自動でメッシュを生成する機能を有している。このため、結果のメッシュ依存性などの問題を回避できる。また CAD データなど、外部ファイルからモデルを導入することができる。可視化の機能は GiD と呼ばれるモジュールを有しており、これによって解析結果の出力が可能になる。

Code Bright では、岩盤および岩盤中のガス、間隙水を解析対象とする。ガスおよび間隙水はたがいに相変化を織り込んであるため、温度や圧力に応じて変化する。さらにこれらの分布による周辺岩盤への応力状態の伝播さらにそれに伴う変形へと構成則を連成させることで求める。解析例を図 2-2 および図 2-3 に示す。

Code\_Bright では不飽和地盤も対象とすることができる。このため、ベントナイト圧密などの地盤自体が大きく変形する事象や、地盤中に空気を多く含む場合の水の挙動を解析対象とすることができると考えられる。

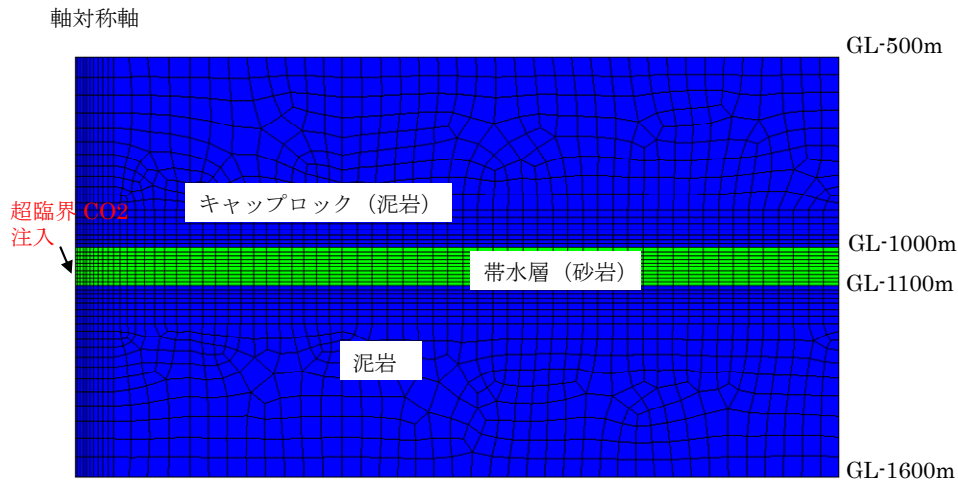


図 2-2 解析メッシュ (軸対称 2 次元)

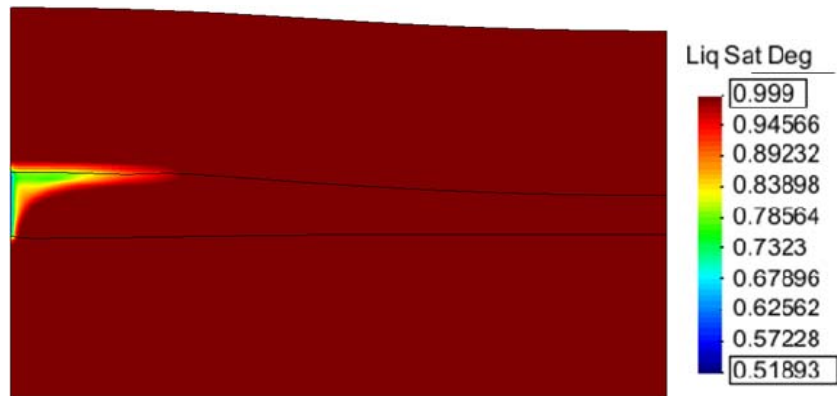


図 2-3 超臨界 CO<sub>2</sub> 注入の場合 (200 日後の飽和度の分布) と変形モード

### (3) Lattice Boltzmann Method

Lattice Boltzmann Method(以下、LBM と略記)は、セルオートマトンに起源をもつ、流体および物質拡散の数値解析法である。上記二つのソフト(Tough2、Code\_Bright)のように、地盤や岩盤の有効モデルを用いた解析、特に変形には現状で対応していない。LBM の特徴は、以下の 3 点にまとめられる。1)解析のアルゴリズムがきわめて単純である。2)流体および拡散ともほぼ等しい計算式を用いる。3)複雑形状の境界条件に対し計算負荷を上げることなく、解析の実行が可能である。

前者の二項目には、LBM では、空間を区切った格子点に代表させ、流体や拡散の情報を、隣接する格子点に向かって伝播させるという構成則に基づき、流体や拡散でその構成則がほとんど変わらないところに由来する。構成則は移動する流れや物質の濃度を表す分布関数と流れや移動の無い平衡状態を表す平衡関数の二種類で構成される。隣接する格子点へは、これら関数の線形結合で、伝えられる。二つの式の比率は緩和定数という値で定められ、分布関数が少なく、平衡関数の比率が多い状態の関数が作られ、隣接する格子点への

伝達が行われると、それは変化がゆっくり伝わることになる。すなわち緩和定数が、流体の粘性係数であり、物質の拡散係数に対応する。また、解析対象が流体か拡散かの区別は平衡関数の取り方に依る。言い換えると、平衡関数を変えるだけで、流体計算と拡散計算が同じプログラムで解析できることになり、移流場における拡散体の挙動といった、流体と拡散の連成解析も容易に実行可能であることを示している。

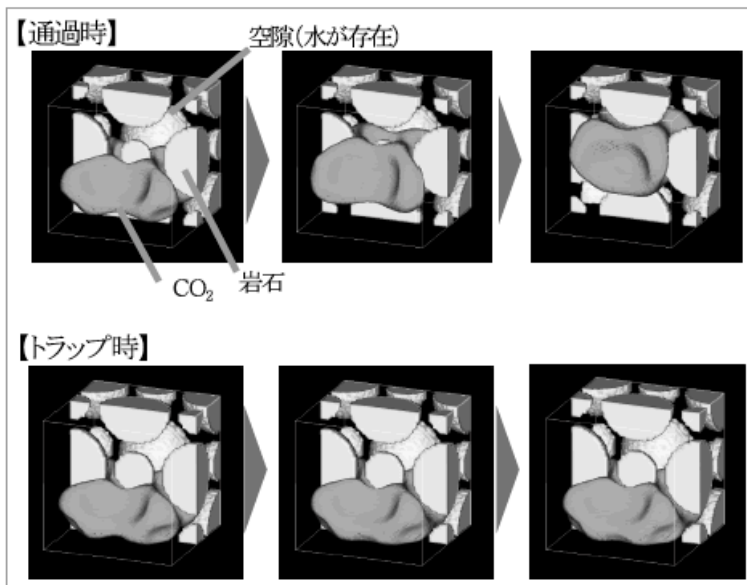
この単純な LBM の構成則は流体の支配方程式であるナビエ=ストークス方程式と二次のオーダーで等価であることが示されている。同様に拡散方程式とも等価であることも示されている。ただし、レイノルズ数が 10000 以上の高速の流れには対応しないことが明らかになっており、これを回避した特殊な LBM が提案されている。

LBM では、境界条件の設定が単純である。境界(岩盤)と指定した格子点には流れや拡散の無い条件の分布関数を定義し、境界ではそれぞれ物理条件にあった反射の境界条件を与えるだけでよい。このため、多孔質媒体など複雑形状の媒質での流れや拡散の解析に適すると判断されることも多い。

LBM 自体に、解析対象の大きさの制限は無い(マルチスケール性を有する)ため、様々なオーダーの解析に対応する。が、多孔質媒体の解析に適すると判断されるために、マイクロ～メゾスケールでの解析が多く用いられる。また、近年明瞭な境界を有する気体-二相流の解析に関し、CO<sub>2</sub> の貯蔵分野においても植村ら<sup>11)</sup>の解析例に見られるようにメゾスケールでの多孔質砂岩の中の CO<sub>2</sub> の移動解析に適用されている。

LBM は、解析対象を空間格子に区切り、格子点が周囲を代表とみなし、隣接する格子点の間で分布関数と呼ばれる値のやり取りを行うことで、決定論的に現象を再現する解析手法である。このため、解の収束のための繰り返し計算を必要としないことや、FEM などの全ての要素の結合を示す‘剛性マトリックス’を必要としないため、本法で扱う複雑境界を含む媒質の拡散解析に適している。

図表 2 帯水層岩石中の CO<sub>2</sub> 挙動の計算結果



図表 1、2 提供：東京工業大学 末包哲也助教授

(4) 解析法の特徴のまとめ

それぞれの解析法の特徴を以下にまとめる。

表 2-1 解析手法の特徴のまとめ<sup>4)</sup>

	Tough2	Code_Bright	LBM
最大相	2相(液、気)	3相(液・気・固)	2相(液・気)
最大次元	3次元	3次元	3次元
相変化	○	○	△
ガス溶解・ガス化	○	○	△
移流(気体)	○	○	○
移流(液体)	○	○	○
拡散(イオン)	○	○	○
力学変形	×	○	×
熱伝播	○	○	○
媒質	均質・不均質、等方・非等方の多孔質、および、二重間隙による亀裂系	均質・不均質、等方・非等方の多孔質、および、二重間隙による亀裂系	均質・多孔質

#### 参考文献

- 1) IEA: Carbon Capture and Storage Model Regulatory Framework, Information paper, 2010, Nov.
- 2) 財団法人 地球環境産業技術研究機構：平成 19 年度 二酸化炭素固定化・有効利用技術等対策事業 二酸化炭素地中貯留技術研究開発成果報告書 第 3 章 地中挙動予測手法の高精度化 平成 20 年 3 月、p.503
- 3) IPCC : Special Report on Carbon dioxide Capture and Storage 2005
- 4) 一般財団法人 エンジニアリング協会 地下開発利用研究センター：平成 23 年度 CO<sub>2</sub> マイクロバブル地中貯留の成立性に関する調査研究 報告書

### 3. 沖縄調査

#### 3.1 島尻層の試料採取

沖縄本島中南部、宮古島などで琉球石灰岩の下位に基盤をつくって分布しているもので、主として半固結～固結泥岩からなり、間に砂岩、凝灰岩をはさんでいる。ローカルネームで“くちや”、“じゃあがる”と呼ばれており、最大層厚 3,000m にも達する。一般に琉球列島の方向で延びており、東または東南側へ 10～20° でゆるく傾斜している。この地層はさらに下位から上位へ豊見城層、与那原層、新里層とに細分されており、豊見城層は砂岩・泥岩の互層で、このなかの厚い砂岩は小祿砂岩と呼ばれており、石灰質の部分は再結晶作用によって固く固結されている。与那原層は厚い泥岩からなっており、間にうすい砂岩と凝灰岩をはさんでいる。最上部の新里層は、沖縄本島南部知念半島や勝連半島などに分布し、砂岩と泥岩との互層であり、凝灰岩もはさまれる。

これらはいずれも亜熱帯を示す二枚貝・巻貝・有孔虫・腕足貝・さんごなどの動物化石を含み、有孔虫化石からこの地層の堆積時代は第三紀中新世から第四紀更新世の初めまでの期間に連続して堆積したものであることがわかる。堆積深度が数百mから千m以上にも達する深い静かな海であり、このころには、琉球石灰岩を堆積させた広大な琉球さんご海の姿は存在しなかったことがわかる。この島尻層群は、下位から上位へ向かってしだいに深い海から浅い海へと堆積環境が変化し、ついには、琉球列島の背骨にあたる部分で、陸上に隆起し、最後には広い範囲にわたって陸上に姿をあらわした。この時期が第四紀の初めの約 100 万年前に相当する。



泡瀬の砂岩露頭

層準的には島尻層群下部層（豊見城層）の砂岩である。比較的厚い砂岩層が露出する丘陵

斜面は、墓地として利用されていることが多い。



上記露頭の近接撮影

ハンマーのピックで容易に崩すことができる、固結度の低い細粒砂岩。

### 3.2 ビーチロック調査

壇上らりによると、ビーチロックが 10MPa 程度の一軸圧縮強さを持つための形成期間はおおよそ 1000~2000 年で、一般の堆積岩が数百万年以上の期間を要することに比べて非常に短期間で珊瑚と砂層が固結してロックとなる。そこでその性質を研究することで、C C S のキャップロックとなる、自然に優しい固結のメカニズムとして位置づけられるものである。

沖縄県においてビーチロックが観察できる地点は図のようである。このうち、調査は読谷村海岸で行った。







日航アリビラ北隣のビーチ  
ロックの浜

[http://beaches.at.webry.info/200712/article\\_23.html](http://beaches.at.webry.info/200712/article_23.html)



参考文献

- 1) 檀上堯・川崎了・畠俊郎：ビーチロックの物理・力学特性、第 41 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集、pp 89-94, 2012

#### 4. パネルディスカッションの開催

第41回岩盤力学に関するシンポジウムにおいてパネルディスカッションを以下のよう  
に実施した。

(1月12日 13:20~14:40/会場:第1会場(講堂))

テーマ	CCSにおける物理探査、モニタリング技術の現状と課題
担当	「CCS実現のための岩盤の調査モニタリング技術および関連技術の現状と課題 に関する調査研究」ワーキング
座長	大隅多加志(電中研)
パネラー	下島公紀(九州大)「海底でのCO <sub>2</sub> 検出法」 東 宏幸(応用地質)「CCSにおける物理探査の現状と課題」
内容	<p>二酸化炭素の地中貯留プロジェクトでは、二酸化炭素がどの程度の領域に貯留され、またその漏洩がないかを長期にわたり監視していく必要がある。二酸化炭素の貯留層内における長期挙動を評価するためには、溶出や固定化といった室内実験で得られる物理化学的な知見とともに、各種モニタリングによってその挙動を追跡していく必要がある。また漏洩をサイトで確認するための手法も必要不可欠となる。</p> <p>パネルディスカッションでは、CCSへの物理探査手法の適用と二酸化炭素の監視技術についての話題を提供いただき、その現状と課題を議論する。</p>

## 5. おわりに

3.11 以来、「起こり得るということは、どんなに確率が低くても起こる」ということが認識されつつあり、CO<sub>2</sub> の地中貯留においても長期的に 100%漏洩しない保証はない。しかし、幸いにも CO<sub>2</sub> は人間が呼吸により排出するもので、多量の噴出に対しては、IEA でもリスクとして捉えているが、少量の漏洩により命の危険に晒されることはない。生態系にどの程度の影響を与えるかは明確ではない。そのため、モニタリングを確実に行うことは重要なことである。CO<sub>2</sub> も漏らさぬ監視体制をより確実にするために予測が必要であり、予測のツールの一つにシミュレータによる挙動予測がある。

今年度は、「CCS の実現」を羅針盤的キーワードとして、岩盤の調査モニタリング技術および関連技術、CO<sub>2</sub> 圧入（超臨界、相変化など）と貯留に関するシミュレーターについて、現状と課題整理を実施した。

近年の気候変動が CO<sub>2</sub> 排出の影響であることも確実ではないが何割かは寄与していることと思われる。人類が直面している何重苦の一つを緩和する一つ的手段として緊急に実施していく必要があることは確かである。CCS の技術は岩盤力学の延長と考えられ、今後とも実現にむけて貢献していく所存である。