

地層処分に関わる広域地下水流動研究及び数値シミュレーションの動向

中尾信典¹・菊地恒夫¹・石戸経士¹

Shinsuke Nakao, Tsuneo Kikuchi and Tsuneo Ishido (2004) Current status of regional hydrogeological studies and numerical simulations on geological disposal. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 55(11/12), p.409 - 415, 1 fig., 1 table.

Abstract: Current status of regional hydrogeological studies on geological disposal including hydrogeological modeling using numerical simulators is reviewed in this report. A regional scale and boundary conditions of numerical models are summarized mainly from the results of the RHS (regional hydrogeological study) project conducted by Japan Nuclear Cycle Development Institute (JNC) in the Tono area. We also refer to the current conceptual models of hydrology and numerical models of unsaturated zone flow at Yucca Mountain, Nevada, which is the arid site proposed for consideration as the United States' first underground high-level radioactive waste repository. Understanding behavior of a freshwater-saltwater transition zone seems to play a key role in the hydrogeological modeling in a coastal region. Technical features of a numerical simulator as a tool for geothermal reservoir modeling is also briefly described.

Keywords: regional, groundwater flow, simulation, geological disposal

要 旨

地層処分に関する広域地下水流動系の研究動向を、数値シミュレータを用いた地下水流動モデリングの動向を含めて調べた。日本の研究動向については主に、東濃地域において核燃料サイクル開発機構(JNC)により実施されている広域地下水流動研究プロジェクトの結果から、数値モデル構築に必要なモデル域の規模、物性分布、境界条件等を考察した。また、淡水と塩水の遷移帯の挙動を解明することは、沿岸地域の広域流動系モデリングにおいて重要な研究事項であり、近年の研究動向を述べるとともに、地熱の貯留層モデリング用ツールとして使われている数値シミュレータの技術的特徴を述べた。

1. はじめに

原子力発電環境整備機構 (NUMO) からの委託研究テーマ「熱・熱水の影響評価手法に関する検討」の一環として、本研究では、広域地下水流動系の数値シミュレーションに関する国内外の文献調査から数値モデル構築に必要なモデル域の規模、物性分布、境界条件等の最適パラメータの範囲を明らかにするとともに、地熱用の多成分多相流体流動シミュレータにおける状態方程式の低温領域への拡張・高精度化等の技術開発を行うことを目的としている。更に、本研究テーマ全体で得られる地質、地化学、及び物理探査等のデータを参考にしてモデル地域概念モデルを構築して広域流

動シミュレーションを実施し、非火山地域における熱異常、及び熱異常に起因する流体流動の将来予測手法、すなわち化学種の移行速度を予測する手法を検討することを目的とする。平成 15 年度は、広域流動シミュレーションに関する国内外の文献レビューによる動向調査を実施するとともに、地熱用の多成分多相流体流動シミュレータについて既存技術のレビューを行った。本報告では、その概要を述べる。

2. 広域地下水流動モデリングの動向

2.1 日本の動向

高レベル放射性廃棄物の地層処分ににかかわる深部地質環境、特に地下水流動特性に関する研究は、日本では核燃料サイクル開発機構が先行して詳細な調査・研究を実施している。その中で、核燃料サイクル開発機構 (2002) は、地質環境モデル化のスケールを、リージョナル、ローカル、サイト、ブロックの 4 つに細分化している。それによると、リージョナルスケール (広域スケール) とは数 10 km 四方以上の広範な領域を対象に大局的な地下水流動を理解しつつ、地層処分システム全体の安全評価を考える上で重要となる 1 つの地下水流動系、すなわち涵養域から流出域までを包含した領域 (ローカルスケール) を抽出するために設けられている。リージョナルスケールの研究では、地下水の流動系の涵養域から流出域を系として推定し、ローカルスケールの領域化やそれらの境界条件を設定することが課題であり、文献情報を基に地質環境のモデル

¹地圏資源環境研究部門 (Institute for Geo-Resources and Environment, GSJ)

化などが行われている。本研究における「広域流動系」のスケールも、リージョンナルからローカルをカバーする程度のスケールを対象としている。

東濃地科学センターでは、広域地下水流動研究として、平成4年から東濃鉱山周辺の10 km四方程度を対象に、地質・地質構造、地下水の流動特性、及び地球化学特性などを解明するために、種々の研究・調査がなされている(小出・前田, 2001)。これまでの成果を見ると、表層水理調査では、水収支解析から地下水の浸透・流出域の分布を推定している(宮原ほか, 2002)。上部境界条件として重要な地下水涵養量は平均198 mm/年(降水量の13%)と解析されている(山内ほか, 2000)。また、自由地下水面の分布状況の推定や、坑井試験により各地層の透水係数が得られている。更に、文献による情報を用いて、20 kmから115 km四方のスケールにおいてモデル化及び解析が実施されている(稲葉ほか, 2002)。その結果、研究所用地周辺35 km四方に囲まれる地形の影響を受けていること、標高-2 km付近に流動系境界があることからその深度に不透水境界を設定可能であると結論されている。また、ローカルスケールの領域モデル化に際して側方境界条件が圧力一定でも閉境界でも変化がほぼないことが判明している。これらの結果はモデリングを行う際、上方、側方、下方の境界条件を設定するための情報となりうる有益な情報と考えられる。

また、三枝ほか(2003)では、モデル化・解析の不確実性がモデル化・解析結果に与える影響を評価するために、同一データセットを用いて、複数の解析チームによるデータの取捨選択を含むデータの解釈、概念モデルの構築、解析コードの選択、モデル化・解析を実施している。これらの結果、特に地下水の移行経路と移行時間の分布を比較することにより、モデル化・解析結果に対する不確実性要因の抽出が試みられており、1) モデル化する不連続構造(断層やリニアメント)の幾何学的情報や水理学的特性、2) 断層の透水異方性、3) 境界条件、4) 有効空隙率、が主な不確実性要素として抽出されている。このような研究はスウェーデンのSwedish Nuclear Fuel Waste Management Company (略称SKB)がAMP (Alternative Models Project)として実施している(Selroos *et al.*, 2002)。この研究は、フラクチャー岩体中の流体流動概念モデルの違いに起因する不確実性を評価するもので、解析対象領域(2 km×2 km×1 km)における地下水移動時間等の指標がどの程度モデルによって異なるかを検討している。フラクチャー岩体のモデル化手法として、確率論的なネットワーク、離散化フラクチャーネットワーク、チャンネルネットワークの3つが用いられている。その結果、性能評価に与える概念モデルの違いによる不確実性の程度は小さかった。その理由

として、境界条件や全体的な水理地質構造等の問題仕様が程度流体流動モデルを規制したためと結論している。

日本において地層処分地を想定した場合、内陸域、または沿岸域に大別されるが、それぞれ一長一短があると考えられる。沿岸域の地下水流動系に関してもその実態を解明すべく、塩淡境界の形状、性状に関するモデリングの研究が最近精力的になされている。長谷川ほか(2001)は急峻及び遠浅の2地形について海水準変動を考慮した数値計算を実施し、各モデルにおける塩淡境界の位置・形状、地下水流速について考察している。このシミュレーションでは、過去の海水準変動に関する研究(例えばChappell and Shackleton, 1986)を参考にして海水準変動が10万年で海退、2万年で海進となる1サイクルの動的境界条件が用いられている。その結果、遠浅モデルでは地形勾配が小さいため淡水の海側への張り出しが小さく、地下水流速も遅いが、海退・海進により海岸線が大きく移動するため汽水となる領域が広がるなどの影響があること、急峻モデルでは地形勾配が大きいため塩淡境界の張り出しが大きく、地下水流速も大きい、海退・海進による海岸線の移動が小さいこと、及び塩淡境界の移動により淡水化する領域では流向が上昇流となり流速が速くなるため塩淡境界の予測が非常に重要となると結論している。

登坂(2002a,b)も同様に数値シミュレータGETFLOWS(登坂ほか, 1996)を用いて沿岸域の塩淡境界のシミュレーションを行っており、初期状態が塩水飽和状態か塩淡完全分離状態か、降雨涵養量の違い、地層の透水性の違い、地形効果、断層の存在等の静的境界条件、更には、陸域隆起による相対的海水準変動1周期、人工的な空洞掘削及び埋め戻し等の動的境界条件により、塩淡境界の形成過程と形態変化を考察し、今後のサイト選定上の検討課題を提示している。それによると、沿岸域の地下水流動を解析する際には、全領域を塩水飽和状態として降雨による淡水化過程、地殻隆起、海水準変動などを与えて検討することが必要と結論づけている。

核燃料サイクル開発機構の幌延地域においても水理地質モデルの作成・更新がなされており、塩濃度の高い地下水の起源を検討するため、海岸から海水が浸入する場合(海水進入条件)と、堆積時に取り込まれた海水が地表からの淡水により洗い出される場合(洗い出し条件)を2次元断面モデルで解析が実施されている(核燃料サイクル開発機構, 2003)。

さて、上述の地下水流動解析に用いられている数値計算シミュレータを整理してみる。東濃地科学センターでは、差分法によるシミュレータ「Frac-Affinity」を開発・使用している。その特徴は、ハイブリッド媒体が取り扱えることである(稲葉・三枝, 2003)。また、前

述の東濃のローカルスケールモデリングでは, Frac-Affinity 以外に, 積分差分法 (Integral Finite Difference Method, IFDM) を用いた TOUGH2 (Pruess, 1991), 有限要素法 (Finite Element Method, FEM) を用いた EQUIV_FLO (下茂・山本, 1996), 差分法 (Finite Difference Method, FDM) を用いた Don-Chan (田中ほか, 1994), MODFLOW (McDonald and Harbaugh, 1988) が使用されている。幌延センターでは, 差分法コード GETFLOWS (登坂ほか, 1996) が使用されている。

2.2 米国の動向

米国に目を転じると, 1983年に DOE (Department of Energy, エネルギー省) による候補サイトの選定がはじまり, 2002年に正式にネバダ州の Yucca Mountain が高レベル放射性廃棄物の処分場として選定された (経済産業省資源エネルギー庁, 2003)。Yucca Mountain サイトにおける不飽和ゾーンの概念モデル化は 1970年代から研究され, その変遷を追うことは, 技術的に興味深いことである。過去 20年の Yucca Mountain における不飽和ゾーンの水理的概念モデルの変遷は Flint *et al.* (2001) に詳しくレビューされている。不飽和ゾーンは 500 m の層厚で, 処分場候補点は地表から 300 m の深さに位置する。年間降水量は標高が低い南部で 130 mm/年以下, 標高が高い北部で 280 mm/年以上, 該当エリアで平均 170 mm/年である。Yucca Mountain の地質は, 1 km から 3 km の厚さの第三紀の火山岩からなり, 不飽和ゾーンは前述のように処分場候補点で 500 m の厚さ, 研究エリア内北部で 750 m もの厚さになる。層序は溶結凝灰岩と非溶結凝灰岩の互層から成っており, 年代はおおむね 11.6 から 13.5 Ma (百万年) である。

Flint *et al.* (2001) による現時点での水理的概念モデルの骨子は以下の通りである。比較的高い雨水浸透率 (平均 5~10 mm/年, 一部で 80 mm/年程度まで), 地層上部から下部に向かって, TCw (Tiva Canyon 溶結凝灰岩) 中のフラクチャー卓越型流動, PTn (Paintbrush 層群中の非溶結凝灰岩) 中の岩石マトリクス卓越型の垂直流動 (側方流動は非常に小さい), Calico Hills 及び Prow Pass ガラス質凝灰岩中の岩石マトリクス卓越型垂直流動, 及びこれらユニット中のゼオライト系境界上の大規模な側方流動, そして, これらすべてがシステム全体を通じた比較的高い地中浸透を生じさせている。不飽和ゾーンの断層は水みちとして透水性があり, 核実験による同位体は PTn 中のフラクチャー通路を通して移行する。ただし, PTn 中の流れはフラクチャー通路以外はマトリクス卓越型のため流動が遅い。ひとたび PTn を通過した水は, フラクチャーゾーンまたは TSw (Topopah Spring 溶結凝灰

岩) 中のフラクチャー卓越型流動場を移行する。宙水は, ゼオライト系接触部に沿った側方流が断層によりオフセットを有した難透水層に達した場合に形成される。断層は宙水から水を抜くための通路としての役割を果たしている。このような水理概念モデルに基づいて東西 5 km, 南北 9 km, 地下水面までの 500 m~700 m 層厚をカバーした 3 次元数値モデルが作成され, TOUGH2 シミュレータを用いた不飽和ゾーンの挙動解析が実施されている (例えば, Wu *et al.*, 1999)。

3. 地熱用の多成分多相流体流動シミュレータ

地熱用の多成分多相流体流動シミュレータ (地熱貯留層汎用シミュレータ) は, 地熱貯留層のモデル化・数値シミュレーションをするのに用いられている。地熱用の汎用シミュレータでは流体, 化学種, 及び熱の輸送現象をあわせて取り扱うことができるため, 非等温状態の広域地下水流動研究に適用が可能である。本章では, 地熱用の汎用シミュレータの基礎となる支配方程式とその離散化について最初に概説した後, 非等温状態の広域地下水流動の計算例, 広域地下水流動研究に使用する際の課題を述べる。

3.1 支配方程式

地下の流体, 熱の輸送現象を記述する支配方程式は, 運動量・質量・エネルギーの保存則であり, これに加えて流体の諸物性についての構成関係や岩石-流体系についての種々の構成則を用いることで問題を完全に解くことができる。

運動量の保存則 (運動方程式) は, ダルシー則として, 次のように表せる。

$$\bar{M}_j = \frac{KR_j}{\nu_j} (\rho_j \bar{g} - \nabla P_j) \quad (1)$$

ここで,

添え字 j : 空隙流体の各相 (気相 V , 液相 L) を示す

M_j : 相 j の質量流束 ($\text{kg/s}\cdot\text{m}^2$)

P_j : 圧力 (Pa)

r_j : 密度 (kg/m^3)

g : 重力加速度 (m/s^2)

ν_j : 動粘度 (m^2/s)

K : (絶対) 浸透率テンソル (m^2)

R_j : 相対浸透率

質量保存則は成分 k について,

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left[\phi \sum_j (S_j \rho_j C_{kj}) \right] + \sum_j \nabla \cdot (\bar{M}_j C_{kj} - L | \bar{M}_j | \nabla C_{kj}) \\ = \dot{m}_{in} C_k^{in} - \dot{m}_{out} C_k^{flow} \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、

ϕ : 空隙率

S_j : 相 j の飽和度 (体積分率, $S_L + S_V + S_S = 1$, S_S : 固相)

C_{kj} : 相 j 中の成分 k の質量分率

L : 分散のスケール (m)

\dot{m}_{in} : 流体ソースのレート (kg/s-m³)

\dot{m}_{out} : 流体シンクのレート (kg/s-m³)

C_k^{in} : 流体ソース中の成分 k の質量分率

$C_k^{flow} = \sum (R_j C_{kj} / \nu_j) / \sum (R_j / \nu_j)$: 成分 k の流動質量分率

成分 k について足しあわせた全体の質量保存は、

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\phi \sum_j (S_j \rho_j) \right] + \sum_j \nabla \cdot \bar{M}_j = \dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} \quad (3)$$

となる。

エネルギー保存則は、

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \left[(1-\phi) \rho_R C_{VR} T + \phi \sum_j (S_j \rho_j E_j) \right] \\ & + \sum_j \nabla \cdot (\bar{M}_j H_j - L |\bar{M}_j| \nabla H_j) \\ & = \nabla \cdot (\kappa \nabla T) + \sum_j \bar{M}_j \cdot \vec{g} \\ & + \dot{m}_{in} H^{in} - \dot{m}_{out} H^{flow} + \dot{e} \end{aligned} \quad (4)$$

と与えられる。ここで、

T : 温度

ρ_R : 岩石密度 (kg/m³)

C_{VR} : 岩石粒子の比熱 (J/kg-°C)

E_j : 相 j の内部エネルギー (J/kg)

H_j : エンタルピー (J/kg)

κ : 流体を含んだ岩石バルクの熱伝導率 (W/m-°C)

H^{in} : 流体ソースのエンタルピー

$H^{flow} = \sum (R_j H_j / \nu_j) / \sum (R_j / \nu_j)$: 流動エンタルピー

\dot{e} : エネルギーソース (W/m³)

なお、平均した流体密度、エンタルピーは、

$$\rho = S_L \rho_L + S_V \rho_V$$

$$H = (S_L \rho_L H_L + S_V \rho_V H_V) / \rho$$

と与えられる。

質量及びエネルギーの保存則には流束の項があるが、これにダルシー則を代入して、成分数が N の場合、方程式の数は $N+1$ となる。空間、時間の関数である $N+1$ 個の未知変数についての $N+1$ 個の偏微分方程式として解くことが可能である。

流体が純水 (H₂O の 1 成分のみ) である場合、未知変数の数は 2 となる。液単相の場合は、主未知変数として温度、圧力をとることが多いが、二相を扱う場合、これらを変数としたのでは、系の状態を同定できない。したがって、種々の方法があるが、例えば圧力と内部エネルギーを主未知変数とすればよい。成分数が N の場合、

圧力 : P

内部エネルギー : $E = \sum (S_j \rho_j E_j) / \sum (S_j \rho_j)$

成分 k の質量分率 : $C_k = \sum (S_j \rho_j C_{kj}) / \sum (S_j \rho_j)$

$k=2, \dots, N$

が主未知変数であり、他の熱力学的性質

$\rho_j, E_j, C_{kj}, S_j, \nu_j, \kappa_j$ そして P_j, T

については、主未知変数による偏微分を含め、蒸気表のデータから主未知変数の従属変数として導くことが必要になる (構成関係の構築)。

3.2 支配方程式の離散化

上に示した保存則 (2), (3), (4) は、 $N+1$ 個の未知数 (P, E, C_k) に対して、以下のような共通な形をもつ $N+1$ 個の偏微分方程式群となっている (ただし分散項は省略)。

$$\begin{aligned} \frac{\partial A}{\partial t} + \sum_j \nabla \cdot (F_j \vec{V}_j) &= \nabla \cdot (D \nabla T) + \sum_j (W_j \vec{V}_j \cdot \vec{g}) \\ &+ \text{source terms} \end{aligned} \quad (5)$$

偏微分方程式を数値的に解析するためには、まず時間・空間についての離散化を行い、代数方程式に変換することが必要になる。離散化の方法として差分法が用いられることが多いが、保存則として積分形式のものをベースとする積分差分法も用いられる。

時間については、完全陰解法の場合、保存則の共通形 (5) 式は例えば次のように離散化される。

$$\begin{aligned} & \frac{A^{n+1} - A^n}{\Delta t} + \sum_j \nabla \cdot (F_j^{n+1} \vec{V}_j^{n+1}) \\ & = \nabla \cdot (D^n \nabla T^{n+1}) + \sum_j \nabla \cdot (W_j^{n+1} \vec{V}_j^{n+1} \cdot \vec{g}) + \text{s.t.} \end{aligned} \quad (6)$$

ここで

$$\vec{V}_j^{n+1} = k^n (\rho_j^{n+1} \vec{g} - \nabla P_j^{n+1})$$

地熱用の汎用シミュレータでは (完全) 陰解法を採用することが多いが、陰解法では、(6) 式の左辺第 1 項の時間差分の項だけでなく他のすべての項に時間ステップ $n+1$ の未知の値が現れる。

空間の離散化については、地熱貯留層汎用シミュレータの大多数は差分法を採用している。保存則の共通形 (5) 式は例えば次のように離散化される (簡単のため、1次元の例で示す)。

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\partial A}{\partial t} \right)_i + \sum_j \left(\frac{F_{j,i+1/2} V_{j,i+1/2} - F_{j,i-1/2} V_{j,i-1/2}}{\Delta x_i} \right) \\ & = \frac{2}{\Delta x_i} \left(D_{i+1/2} \frac{T_{i+1} - T_i}{\Delta x_i + \Delta x_{i+1}} + D_{i-1/2} \frac{T_{i-1} - T_i}{\Delta x_i + \Delta x_{i-1}} \right) \\ & + \frac{1}{2} \sum_j (W_{j,i+1/2} V_{j,i+1/2} g_{i+1/2} + W_{j,i-1/2} V_{j,i-1/2} g_{i-1/2}) \\ & + \text{source terms} \end{aligned} \quad (7)$$

第1表 広域地下水流動系シミュレータの概要
Table 1 List of numerical simulators for regional hydrogeological modeling

シミュレータ名	開発目的	解法	適用例	参考文献
Don-Chan	亀裂岩盤	FDM	瑞浪URL (underground research lab) サイト	田中ほか(1994)
EQUIV_FLO	亀裂岩盤	FEM	瑞浪URLサイト	下茂・山本(1996)
Frac-Affinity	地層処分	FDM	瑞浪URLサイト	稲葉ほか(2002)
GETFLOWS	地下水	FDM	塩淡境界の一般モデル	登坂ほか(1996)
MODFLOW	地下水	FDM	瑞浪URLサイト	McDonald and Harbaugh (1988)
STAR	地熱	FDM	—	Pritchett (1989)
TOUGH2	地熱	IFDM	瑞浪URLサイト	Pruess (1991)

添え字 $i+1/2$ のついている項は、 i 番目と $i+1$ 番目のブロックの界面での値であることを示す。流速については

$$V_{ji+1/2} = \left(\frac{k_i k_{i+1} (\Delta x_i + \Delta x_{i+1})}{k_i \Delta x_{i+1} + k_{i+1} \Delta x_i} \right) \times \left[\left(\frac{\rho_{ji} S_{ji} \Delta x_{i+1} + \rho_{j,i+1} S_{j,i+1} \Delta x_i}{S_{ji} \Delta x_{i+1} + S_{j,i+1} \Delta x_i} \right) g_{i+1/2} - 2 \left(\frac{P_{j,i+1} - P_{ji}}{\Delta x_i + \Delta x_{i+1}} \right) \right] \quad (8)$$

のようになる。ここで、 Δx_i は i 番目ブロックのサイズであり、浸透率については調和平均、密度については $S_{ji} / \Delta x_i$ で重み付けした平均値となっている。また、移流項における F_j , W_j の界面 $i+1/2$ での値には上流側ブロックでの値が採用される(風上法)。

$$\text{If } V_{ji+1/2} \geq 0 \Rightarrow F_{ji+1/2} = F_{ji} \quad W_{ji+1/2} = W_{ji}$$

$$\text{If } V_{ji+1/2} \leq 0 \Rightarrow F_{ji+1/2} = F_{j,i+1} \quad W_{ji+1/2} = W_{j,i+1}$$

空間的に多次元の場合の離散化方程式も1次元の方程式(8)を単純に拡張して得ることができる。ただし、2次元あるいは3次元問題から派生する代数方程式を直接法で解くのは困難であるので、反復法が用いられる。差分法で離散化した場合にはADI(Alternating Direction Implicit)法、LSR(Line Successive Relaxation)法等の線順法が用いられる。また、一般に保存則は非線形の偏微分方程式であるので、ニュートンラフソン法を用いた線形化が必要になる。

3.3 代表的な汎用シミュレータ

地熱における貯留層シミュレータの開発は1970年代に米国で行われ、複数のグループによって独自に開発されたシミュレータについて、DOE主催の相互比較も行われ

た。この時点から更に機能拡張、改良が進められ現在も使われている汎用シミュレータとしては、TOUGH2、及びSTAR (Pritchett, 1989) などがあげられる。

最近の地熱用シミュレータの開発トピックスとしては、貯留層の状態変化に対応する地球物理学的観測量(比抵抗、重力、自然電位など)の変化を計算するためのポストプロセッサ開発がある。また、汎用シミュレータの地熱以外の分野への適用にあたって、多成分流体用の状態方程式の開発などが進められている。多成分流体を扱う場合、各成分の移動を正確に扱う上で、シミュレータには数値分散を抑える工夫が求められる。上述のSTARでは、単純な風上法に代えて2次の風上法(2次のドナーセルスキーム)を用いることでこの問題に対処している。以上、汎用シミュレータのより詳しい説明は、石戸(2002)を参照されたい。

第1表は本報告で紹介したシミュレータに関して、開発目的、解法、地層処分研究での適用例、及び参考文献を総括した表である。熱の輸送の取り扱いについては、TOUGH2は地熱用に開発されたため当然ながら熱の輸送を扱える。また、GETFLOWも熱の輸送現象を取り扱える。第2章「広域地下水流動モデリングの動向」の中で紹介したその他の地下水関係のシミュレータについては、当該文献においてはすべて等温状態を仮定しているため、熱の輸送現象を取り扱うことができるかどうかは不明である。

なお、地層処分研究の分野で広域流動モデリングに用いられているシミュレータでも支配方程式はほぼ同じと考えられる。ただし、地熱用の汎用シミュレータでは気液二相の扱いに優れており、不飽和状態の地層を取り扱うのに威力を発揮するであろう。例えば地熱用に開発されたTOUGH2が、Yucca Mountainの不飽

和ゾーンの挙動解析に活用されていることは2.2節に述べたとおりである。

3.4 汎用シミュレータによる計算例と課題

第1図に、多成分 (H₂O, NaCl, Air) 多相 (空隙中の液相, 気相, 固相 (NaCl)) の流体流動シミュレーションの例を示す。中心軸に沿って熱源を設定した結果, 熱対流が発生し, 塩分濃度を示すコンターが上方のG-Hレンズの中へプリューム状に食い込んでいることが観察される。流体の駆動力として, 降雨の(一部の)地下への浸透とその結果の地下水位面の起伏, 及び熱による浮力, 溶存塩分による負の浮力の3つが関与している。

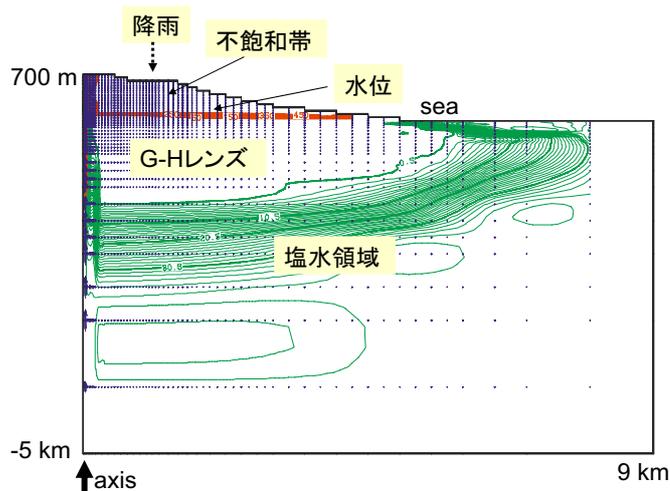
地熱の汎用シミュレータは, 地下の流体流動に係わる広範囲の現象を取り扱えるが, 多成分の状態方程式などは地熱貯留層の代表的温度範囲でのみ精度が補償されている。したがって, 広域流動シミュレーションに適用するためには, 低温領域 (< 100℃) での状態方程式の高精度化を図ってゆく必要があり, 今後「熱・熱水の影響評価手法に関する検討」の研究の中で実施していく予定である。

4. おわりに

広域地下水流動研究, 及びそれらのシミュレーションに関する国内外の文献レビューによる動向調査を実施するとともに, 地熱用の多成分多相流体流動シミュレータについて既存技術のレビューを行い, 広域流動シミュレーションにおけるスケール (規模), 境界条件 (モデルの境界条件, 塩淡領域の挙動) 等に関する研究動向を整理した。今後の課題として, 平成16年度は平成15年度に引き続き国内外の広域流動シミュレーションに関する動向調査を実施し, 流体流動の駆動力と場の性質 (浸透率), 及びその時間変化の評価手法に関してどのような研究がなされているかを調査する予定である。また, シミュレータに関しては, 地熱の多成分多相流体流動シミュレータの適用性評価, 特に低温領域 (< 100℃) での状態方程式の高精度化を図るとともに, 広域流動系を規制する岩石パラメータ, 境界条件等の既存データを収集し, それら既存データに基づいた広域流動シミュレーションと感度解析に着手する予定である。

文 献

- Chappell, J. and Shackleton, N. J. (1986) Oxygen isotopes and sea level, *Nature*, 324, 137-140.
 Flint, A. L., Flint, L. E., Bodvarsson, G. S., Kwicklis, E. M. and Febryka-Martin, J. (2001) Evolution of the



第1図 火山島を模して円柱軸対称領域を設定し, 汎用シミュレータ STAR を用いて定常状態を計算した結果。

Fig. 1 Result of a numerical simulation of a steady-state fluid flow using general-purpose simulator STAR: a geometry of the numerical model is set up as an axisymmetrical cylinder to model a volcanic island.

conceptual model of unsaturated zone hydrology at Yucca Mountain, Nevada, *Journal of Hydrology*, 247, 1-30.

- 長谷川琢磨・五十嵐敏文・田中靖治・土宏之・小野文彦 (2001) 沿岸海底下の地下水流動に関する数値解析的検討, 地下水学会誌, **43**, 4, 289-300.
 稲葉 薫・三枝博光・中野勝志・小出 馨 (2002) 深部地下水の流動系を把握するためのモデル化領域とその境界条件設定に関する検討, 第32回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, 359-364.
 稲葉 薫・三枝博光 (2003) 地下水流動の予測解析統合システム (GEOMASSシステム) の概要と東濃地域への適用事例, サイクル機構技報, **18**, 71-82.
 石戸経士 (2002) 地熱貯留層工学, 日本地熱調査会, 176p.
 核燃料サイクル開発機構 (2002) 東濃地域における地質環境特性に関する調査研究—地表からの調査研究の考え方と進め方, サイクル機構技術資料, JNC TN7410 2002-008.
 核燃料サイクル開発機構 (2003) 高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発—平成14年度報告—, JNC TN1400 2003-004.
 経済産業省資源エネルギー庁 (2003) 諸外国における高レベル放射性廃棄物の処分について, 原子力環境整備促進・資金管理センター, 176p.
 小出 馨・前田勝彦 (2001) 東濃地域を対象とした広域地下水流動研究の現状 (その2), サイクル機構技報, **12**, 107-122.

- McDonald, M. G and Harbaugh, A. W. (1988) A Modular Three-dimensional finite-difference ground-water flow model, Book6, Modeling Techniques, Scientific Software Group, Washington D.C.
- 宮原智哉・稲葉 薫・三枝博光・竹内真司 (2002) 広域地下水流動研究実施領域における水収支観測結果と地下水流動スケールの検討, サイクル機構技報, **16**, 137-148.
- Pritchett, J. W. (1989) STAR User's Manual. Report SSS-TR-89-10242/R1, S-Cubed.
- Pruess, K. (1991) TOUGH2 -A general purpose numerical simulator for multiphase fluid and heat flow, Lawrence Berkeley Lab Report, LBL-29400.
- 三枝博光・澤田 淳・稲葉 薫・竹内真司・中野勝志 (2003) 複数のモデル化手法を用いた地質環境特性調査における地下水流動特性評価の不確実性の検討, サイクル機構技報, **20**, 75-89.
- Selroos, J., Walker, D. D., Strom, A., Gylling, B. and Follin, S. (2002) Comparison of alternative modeling approaches for groundwater flow in fractured rock, *Journal of Hydrology*, **257**, 174-188.
- 下茂道人・山本 肇 (1996) 等価不均質連続体モデルによる亀裂性岩盤の浸透流解析手法, 大成建設技術研究所報, 257-262.
- 田中達也・渡辺邦夫・前川恵輔・中村直昭 (1994) 地質構造と基礎としたフラクチャーネットワークモデルの開発 その1 -解析の考え方-, 応用地質, **35**, 22-33.
- 登坂博行・伊藤一誠・蛭原雅之・稲葉 薫・伊藤 彰・小島圭二 (1996) 多成分多相移流拡散モデルによる包括的な地下水汚染解析, 地下水学会誌, **38**, 3, 167-180.
- 登坂博行 (2002a) 地質時間にわたる淡塩遷移帯の形成過程と形態変化に関する数値解析の検討 (その1) -静的境界条件下における検討-, 応用地質, **43**, 5, 293-305.
- 登坂博行 (2002b) 地質時間にわたる淡塩遷移帯の形成過程と形態変化に関する数値解析の検討 (その2) -動的境界条件下における検討-, 応用地質, **43**, 5, 306-315.
- 山内大祐・宮原智哉・竹内真司・小田川信哉 (2000) 超深地層研究所計画用地周辺の水収支観測結果, サイクル機構技報, **9**, 103-114.
- Wu, Y. S., Hinds, J., Ahlers, C. F., Liu, H. H., Pan, L., Ritcey, A. C., Cushey, m., Haukwa, C., Sonnenthal, E. and Bodvarsson, G. S. (1999) Continual development of the UZ model for Yucca Mountain, Nevada. *ESD Annual Report 1998-1999*, LBNL-43816, 71-72.

(受付: 2004年10月1日; 受理: 2004年12月16日)