

複数のモデル化手法を用いた地下水流動評価の不確実性について

A study of uncertainties for evaluating groundwater flow by multiple modeling approaches

澤田淳*・三枝博光**・中野勝志**・大澤英昭**

Atsushi SAWADA, Hiromitsu SAEGUSA, Katsushi NAKANO and Hideaki OSAWA

In this paper, we examined uncertainties in the ground water modeling by using five different conceptual models and/or experts, under the condition of same major geological features and same boundary conditions, with using groundwater travel length and time as the performance measures, in order to contribute the iterative approach to reducing uncertainty of the site investigation of Mizunami Underground Research Laboratory. Travel time calculated by darcy flux was distributed in wider range, although ground water travel time converged to certain range. The differences of adopting hydraulic conductivity for each model might be a primary factor for the travel time. In each modeling step, different methods for deriving modeled hydraulic properties were proposed. In order to avoid this kind of uncertainty, it would be important to clarify the strategy for the hydraulic investigations with considering conceptual model, for the next step of the investigations.

Key Words: uncertainty, hydrological model, groundwater flow, migration path

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分研究開発の第2次取りまとめでは、地質環境や処分場のレイアウトを幅広く考慮し、簡略かつ保守的な視点から核種移行評価が試みられた¹⁾。第2次取りまとめ以後の地層処分に関わる研究開発においては、実際のデータに基づいた地質環境モデルを構築して地下水流動特性や地下水移行経路を評価するとともに、その結果に基づく安全評価の一連の流れを体系化することが重要となる²⁾。今後の処分地の選定プロセスは概要調査地区、精密調査地区、さらに最終処分施設建設地の選定と段階的に進められる計画であり³⁾、各調査手法の対象スケールも地表における数10kmから数kmのスケールおよび坑道周辺の数10mから数mのスケールへと段階的に変化する。核燃料サイクル開発機構は地層処分研究開発の基盤となる深部地質環境の科学的研究の一環として「超深地層研究所計画」⁴⁾ならびに「広域地下水流動研究」⁵⁾を継続して実施しており、超深地層研究所計画は地表からの調査予測研究段階、坑道の掘削を伴う研究段階、及び坑道を利用した研究段階の3段階のうちの、試錐孔等を利用した地表からの調査予測研究段階を実施中である。同計画においては、調査と評価の体系化に資することを目的に統合化データフローを活用した繰返しアプローチを活用した検討が進められている⁶⁾。著者らは、このような調査研究の一環として、超深地層研究所計画用地(正馬様用地)を包含する数キロメートル四方を対象に、これまでに取得されているデータを用いて構築した水理地質構造モデルの不確実性を検討してきた^{7), 8)}。その際、数キロメートルスケールの領域の地下水流動に影響を及ぼすと考えられる大規模な断層や不整合面などの主要な地質構造の取扱いに着目し、複数の解析者が取得されたデータと矛盾しない範囲で複数の概念モデル化手法によるモデル化を行い、地下水流動解析結果に影響を与える因子を検討した。また、解析者の経験を踏まえた判断に基づく境界条件や主要な地質構造の概念モデル化、パラメータ値推定など、データと矛盾しない範囲で様々なバリエーション

* 核燃料サイクル開発機構 東海事業所

** 核燃料サイクル開発機構 東濃地科学センター

ョンを含むものとした。このような包括的なアプローチを採用したのは、既存の調査データの再評価を行うとともに、地下水流動評価上重要な因子の抽出と、その結果の次期調査計画へ反映といった繰り返しアプローチによる調査と評価の体系化に資することを目的としているためである。

1 順目の解析検討の結果、同じ領域を対象に同じデータセットを用いても一つとして同じモデルが構築されることはなく、その主な要因として①リニアメントデータの取り扱いの違い、②実効的な空隙率の設定の違い、③境界条件設定の違い等を指摘するとともに、次期調査計画に必要な項目を抽出した^{7),8)}。

本稿では、上記①～③以外の不確実性を検討するために実施した追加解析結果について報告する。1 順目の検討においては、上記①～③の不確実性の影響が大きく、それら以外の要因について検討できなかった。本検討では、地質構造モデルとして月吉断層以外のリニアメント構造をモデルから取り除くとともに、境界条件を絞り込むことで、上記の①と③の不確実性要因を排除した。また、②については、1 順目の検討と同様に実効空隙率を必要としないダルシー流速による移行時間の評価を試みた。

2. 解析条件

解析対象領域は、超深地層研究所計画用地（正馬様用地）を中心に尾根線と河川に囲まれた南北約6km、東西約4kmの領域である（図-1 参照）。鉛直方向については標高-3km までとした。地質構造モデルの構築にあたっては、主要な地質構造（図-2 参照）をモデル化することとした。前述の①に対しては、リニアメント構造等をモデルから排除した。ただし、各構造の透水特性については各試錐調査などの情報に基づき、各解析者が任意に設定することになる。地下水流動解析においては、等温状態、定常状態を仮定した。境界条件は前述の③に対応して、一定の値を採用した（図-3 参照）。図-4 に示す 24 点から下流側境界へ至る最短移行経路をパーティクルトラッキング法により抽出し、水理地質構造モデル化手法の違いが移行経路長、移行時間（ダルシー流速に基づく）に与える影響について検討した。パーティクルトラッキングの移行経路の出発点は、東西方向性の月吉断層で解析対象領域を南北の領域に分け、それぞれ領域全体の移行経路特性の検討ができるよう東西方向に3点、深度方向に4点（EL.-250m, EL.-500m, EL.-750m, EL.-1000m）配置した。

3. 解析モデル

1 順目の検討と同様の5つのモデル（解析者）を採用した（表-1 参照）。以下では、それぞれのモデルにおいて

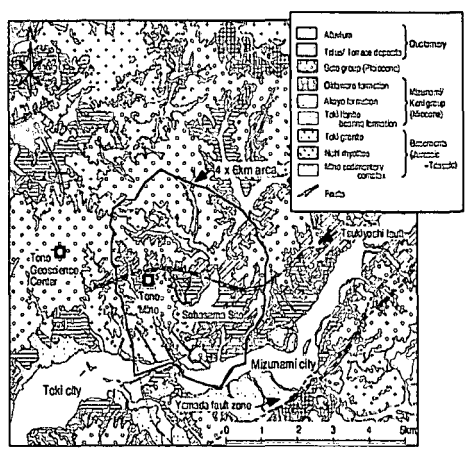


図-1 解析対象領域（4km×6km エリア）

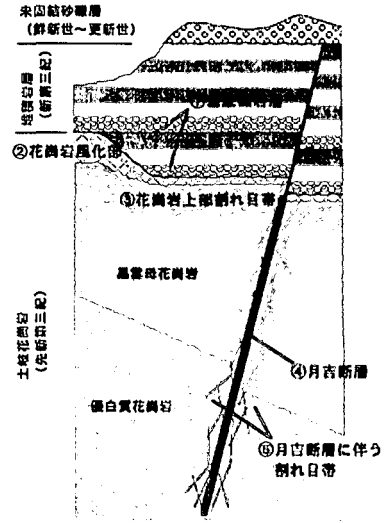


図-2 地質構造概念図

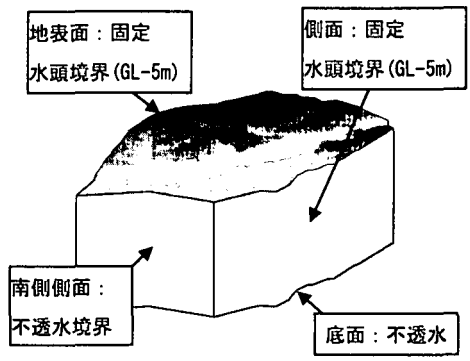
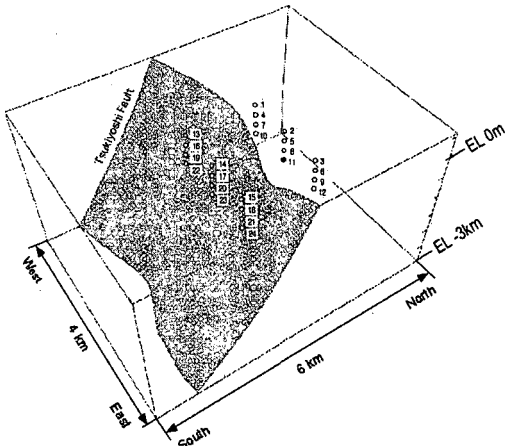


図-3 境界条件

花崗岩健岩部の透水係数や月吉断層のモデル化等について、その概略を記す。

(1) TOUGH2⁹⁾

1 辺が約 100m の直方体で分割した体積差分を用いて、地表地形、堆積岩、不整合面、月吉断層、土岐花崗岩中の岩相区分（黒雲母花崗岩、優白質花崗岩）を決定論的に表現するとともに、それぞれの岩相の透水係数については統計的な不均質性を考慮したモデル化がなされている。すなわち、各試錐孔で実施された揚水試験から求められた透水係数データを構造／岩相毎に整理し、対数平均値と標準偏差からリサンプリングした。統計的なリサンプリングは構造／岩相毎に実施し、空間的相関性は無視した。月吉断層については、100m スケールの体積差分要素に対応して、低透水性の断層コア部の厚さを 100m、透水係数を 7.1×10^{-9} m/s でモデル化し、断層コア部の上下にそれぞれ 100m の厚さで断層に伴う割れ目帯の透水係数として 7.2×10^{-7} m/s を設定している。



図－４ 移行経路の出発点（24 点）

(2) Don-Chan¹⁰⁾

Don-Chan モデルは、亀裂中の特定の水みちと亀裂交差部に沿った水みちを管路網（チャンネルネットワーク）によりモデル化するもので、本解析においては試錐孔で観察された割れ目データから主要な割れ目として、6 パターンの割れ目を抽出し、それぞれの亀裂方向に対して一定の間隔でチャンネルを作成して重ね合わせることで、土岐花崗岩をモデル化している。6 つの主要な方向に対してそれぞれ異なる透水係数を設定することで透水異方性を表現している。地表堆積岩については、チャンネル要素を等間隔に配置することで差分的にモデル化し、一定の透水係数（ 6.0×10^{-7} m/s）を設定している。月吉断層については、低透水性の断層コア部の厚さを 9m、透水係数を 1.0×10^{-10} m/s で、断層に伴う割れ目帯を断層コア部上下部にそれぞれ厚さ 34.2m でモデル化している。断層に伴う割れ目帯の透水係数は上部、下部それぞれ 7.0×10^{-9} m/s、 1.0×10^{-6} m/s である。

(3) EQUIV_FLO¹¹⁾

EQUIV_FLO は等価不均質連続体モデル化手法を用いており、観測された亀裂データに基づき解析対象領域の亀裂ネットワークモデルを作成するとともに、同じ領域で任意に作成した連続体要素の各要素に分布する亀裂の性状からクラックテンソル理論により透水テンソルを求め、連続体有限要素法により解を求めるものである。本モデル

表－１ 各モデルの概念モデルと透水係数設定値

コード名		TOUGH2	Don-Chan	EQUIV_FLO	FracAffinity	MODFLOW
概念モデル		不均質連続体	チャンネルネットワーク	不均質連続体	均質連続体＋割れ目モデル	均質連続体
花崗岩健岩部の透水係数		8.5×10^{-8} m/s (対数平均値) *1	3.2×10^{-8} m/s *2	4.5×10^{-9} m/s (対数平均値) *3	5.0×10^{-8} m/s	4.9×10^{-6} m/s
月吉断層	断層コア部の透水係数（層厚）	7.1×10^{-9} m/s (100 m)	1.0×10^{-10} m/s (9 m)	1.0×10^{-10} m/s (50 m)	1.0×10^{-12} m/s (1 m)	4.9×10^{-10} m/s (74.4 m)
	断層に沿った割れ目帯の透水係数（層厚）	7.2×10^{-7} m/s (片側 100 m)	上盤： 7.0×10^{-9} m/s (34.2 m) 下盤： 1.0×10^{-6} m/s (34.2 m)	3.0×10^{-8} m/s (片側 100 m)	2.0×10^{-7} m/s (上盤：78.9 m、 下盤：52.7 m)	なし

*1：透水係数データを岩相毎に整理してその統計値からランダムサンプリングによりモデル化

*2：6 パターンの主要割れ目群の個々の透水係数から算出

*3：透水係数データを岩相毎に整理してその統計値に対してキャリブレーションした値

では、地表地形、堆積岩（瀬戸層群： 1.0×10^{-7} m/s、瑞浪層群： 1.0×10^{-9} m/s）と月吉断層コア部（透水係数： 1.0×10^{-10} m/s）を決定論的にモデル化するとともに、主に割れ目密度の観点から、土岐花崗岩上部割れ目帯、土岐花崗岩健岩部、月吉断層に沿った割れ目帯の3つの領域に分割し、それぞれの領域毎に亀裂データの統計特性を求めて等価不均質連続体モデル化手法を適用している。透水特性については、透水試験データを岩相毎に整理した統計的データへのキャリブレーションを実施している。

(4) FracAffinity¹²⁾

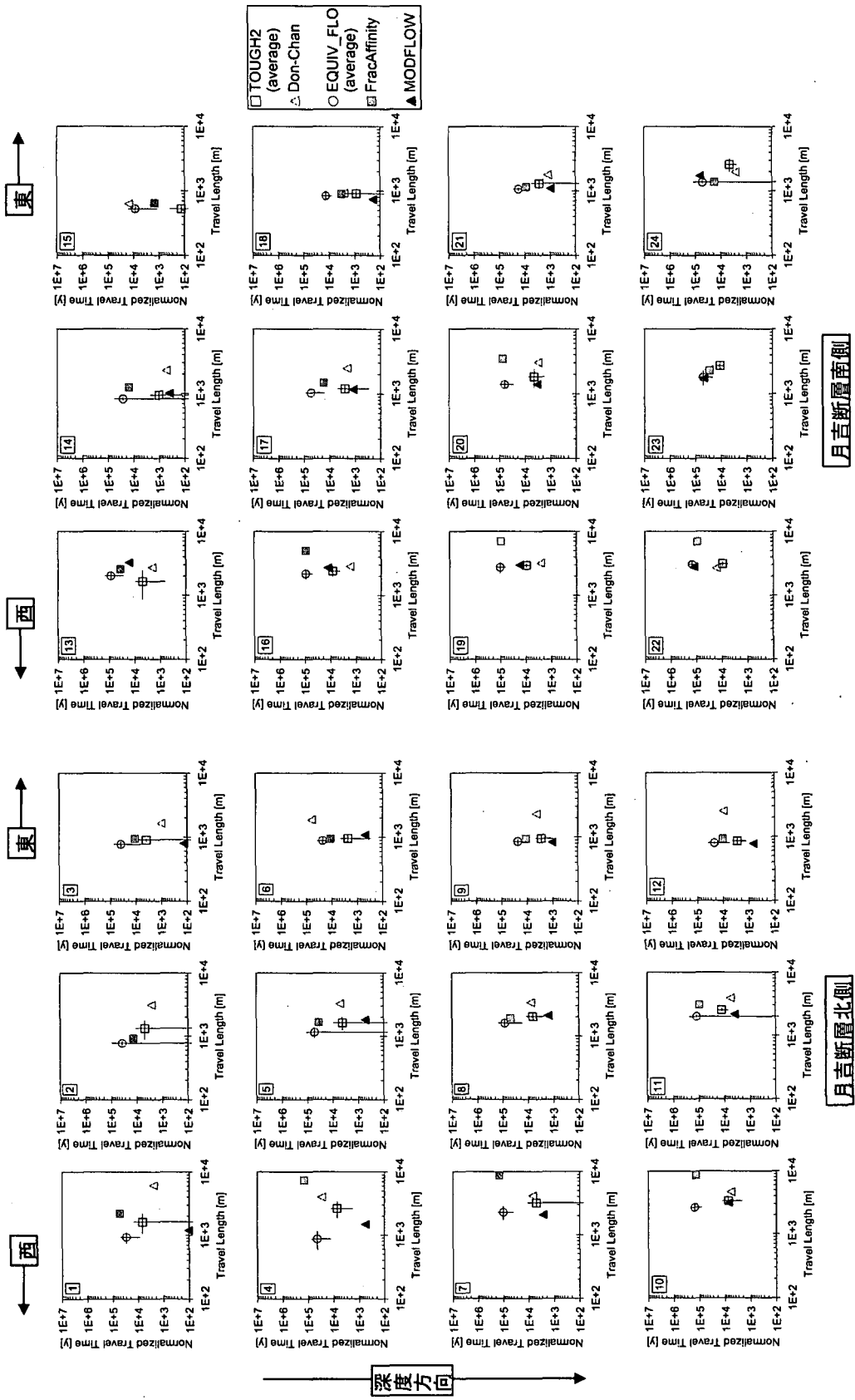
FracAffinity は亀裂ネットワークモデルと連続体モデルの両方の機能を備えたハイブリッドモデルに分類されるもので、本研究においては月吉断層を決定論的に亀裂モデルで表現し、堆積岩（瀬戸層群： 1.0×10^{-6} m/s、瑞浪層群： 8.0×10^{-8} m/s）、不整合面を決定論的にモデル化した。また、土岐花崗岩を上部風化帯＋上部割れ目帯（透水係数： 2.5×10^{-7} m/s）、健岩部（透水係数： 5.0×10^{-8} m/s）、月吉断層に沿った割れ目帯（透水係数： 2.0×10^{-7} m/s）の3つの領域に分割してモデル化した。月吉断層コア部については面構造に対して垂直方向の透水係数を 1.0×10^{-12} m/s に設定した。

(5) MODFLOW¹³⁾

MODFLOW は有限差分法を用いた地下水浸透解析コードで、本コードを用いたモデル化においては、他に比べて単純化されたモデルを構築している。岩相区分として、地表堆積岩（ 4.9×10^{-4} m/s、上部割れ目帯を含む）と花崗岩健岩部（ 4.9×10^{-6} m/s）、月吉断層コア部（ 4.9×10^{-10} m/s）の3種類に分類してモデル化し、地表堆積岩と花崗岩健岩部の境界を標高-120m の水平面に設定している。月吉断層コア部の層厚については差分メッシュの大きさに依存するが、平均値として 74.4m をモデル化している。なお、本モデルでは断層に伴う割れ目帯はモデル化の対象外としている。

4. 解析結果

解析の結果得られた各出発点からの地下水移行距離と移行時間（ダルシー流速に基づく）の分布が、それぞれのモデルによってどのように異なるかについて検討した（図－5 参照）。全体的には移行経路長さの推定値幅が1順目の検討^{7), 8)}より狭まった一方で、ダルシー流速に基づく移行時間はモデル間の推定値幅が大きい結果となった。前者については、境界条件や主要断層を月吉断層に限定するなどの解析条件に制限を設けることにより、大局的な流動方向がほぼ同様の結果となったためと考えられる。図－6 は出発点 11 からの移行経路の様子を示したものであるが、月吉断層の北側で地表方向に移行するとともに、川（日吉川）に沿った谷地形方向へ湧出していることがわかる。Don-Chan については月吉断層に沿って地表付近に移行した後、地表付近で月吉断層を越えて谷地形に沿って下流側へ移行しているため、他のモデルに比べて移行距離が長いと考えられる（図－5 参照）。移行時間の違いについては、ダルシー流速が異なるためと考えられる。図－6 には移行経路に沿ったダルシー流速を濃淡で示しているが、MODFLOW や Don-Chan は他に比べてダルシー流速が大きく、TOUGH2 も部分的にダルシー流速の大きな部分が見られる。このようなダルシー流速の違いが、移行時間の違いとして現れていると考えられる。岩盤中のダルシー流速が異った要因としては、岩盤中の透水特性の設定値の違いが挙げられる。表－1 には各モデルの花崗岩健岩部の透水係数、月吉断層コア部と月吉断層に沿った割れ目帯の透水係数と厚さを示しているが、透水係数設定に関しては、10 以上の試験孔で実施された透水試験結果から算定された透水係数から、それぞれのモデルにおいて異なる解釈がなされた。モデルの岩相毎に整理してそれぞれの対数平均値を均質モデルへ適用したものや（FracAffinity、MODFLOW）、確率密度関数を求めてその分布をモデルに適用（TOUGH2、EQUIV_FLO）したものである。透水試験が実施された区間長さの違いによりデータを選別している場合など、モデル毎に異なっている。今後は、概念モデル化手法に応じて「どこの透水特性を把握するためにどのような試験を実施していくか」というモデル化と調査



図一5 全出发点からの地下水移行距離と移行時間（ダルシー流速に基づく）

□内の数字：図-4の出发点番号を示す
+線：模数のリアライゼーションの解析結果から求めた2σの範囲

のストラテジーを明確にすることが、上記のようなモデル化に必要なデータ整理の過程で生じる不確実性の低減に有効であると考えられる。月吉断層においても、要素スケールの制約により層厚が異なる場合が生じるためモデル化する層厚を考慮した透水係数の設定が必要であり、そのためには1順目の検討結果で示した主要な断層の水理学的特性の定量的評価に加えて、断層の層厚などの幾何学的性状の定量的評価が求められる。

5. おわりに

主要な地質構造モデルと境界条件を拘束した条件下で、5つの概念モデル化手法を用いて地下水流動解析結果に与える影響因子を検討した。その結果、ダルシー流速に基づく地下水移行時間に顕著な違いが生じ、その要因として岩盤の透水係数設定値の違いが挙げられた。

透水試験データの整理や解釈等に伴う不確実性を避けるには、透水試験の実施において概念モデルに対応した調査のストラテジーを明確にするとともに、それに基づく調査の実施・データの処理が肝要であり、超深地層研究所計画における次ステップの調査計画に反映してゆく予定である。

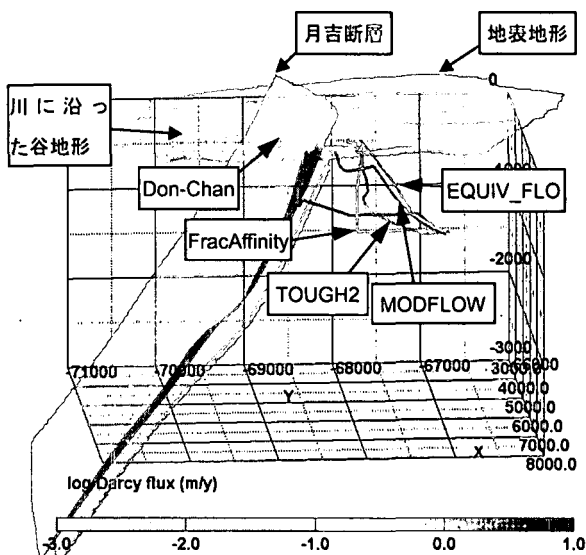


図-6 出発点11からの移行経路の様子

(各経路の濃淡はダルシー流速の対数を示す、統計的モデルである)

TOUGH2とEQUIV_FLOについては任意のリアライゼーションを抽出)

謝辞

本研究の実施にあたり、それぞれのモデル化／解析は以下の諸氏により実施されました。EQUIV_FLO：下茂道人、山本肇、文村賢一（大成建設株式会社）、Don-Chan：森田豊（Package-D）、渡辺邦夫（埼玉大学）、TOUGH2：Christine Doughty, Kenzi Karasaki（Lawrence Berkeley National Laboratory）、MODFLOW：Sean A. McKenna, Mehdi Eliassi（Sandia National Laboratories）。また、解析結果の取りまとめには大成建設の井尻裕二、鈴木俊一の両氏にご協力いただきました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 核燃料サイクル開発機構：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性、一地層処分研究開発第2次取りまとめ 総論レポート、JNC TN1400 99-020, 1999.
- 核燃料サイクル開発機構：高レベル放射性廃棄物の地層処分にに関する研究報告 一平成13年度報告一、JNC TN1400 2002-003, 2002.
- 官報：特定放射性廃棄物の最終処分にに関する法律, 2000.
- 核燃料サイクル開発機構：超深地層研究所地層科学研究基本計画, JNC TN 7400 2001-005, 2001.
- 動燃事業団：広域地下水流動研究基本計画書, 動燃事業団計画資料, PNC TN7020 98-001, 1997.
- 大澤英昭, 中野勝志, 澤田淳：不確実性を考慮した地質環境特性評価の基本的考え方について, 木本学会第57回年次学術講演会論文集, CS10-002, pp. 385-386, 2002.
- 澤田淳, 三枝博光, 竹内真司, 中野勝志, 井尻裕二：水理地質構造モデル化概念の違いによる深部地下水流動への影響評価（その1）－複数の概念モデル化手法による不確実性の検討－, 亀裂性岩盤における浸透問題に関するシンポジウム論文集, pp. 249-258, 2001.
- 澤田淳, 地表からの調査段階における地下水流動評価について, 第19回岩盤システム工学セミナー「放射性廃棄物の地層処分特集（その2）」, システム総合研究所, pp.131-150, 2002.
- Pruess, K.: TOUGH2 - A general-purpose numerical simulator for multiphase fluid and heat flow, Rep. LBL-29400, Lawrence Berkeley Laboratory, Berkeley, CA, 1991.
- 田中達也, 渡辺邦夫, 前川恵輔, 中村直昭：地質構造を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巻, 3号, pp.22-33, 1994.
- 下茂道人, 山本肇：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, pp.257-262, 1996.
- Impey, M., J. Humm, P. Grindrod and P. Robinson: Frac-Affinity version 1.0: Theoretical background, QuantiSci Report MC-5041A-15, 1998.
- McDonald, M. G. and A. W. Harbaugh: A Modular Three-dimensional finite-difference ground-water flow model, Book 6, Modeling Techniques, Scientific Software Group, Washington, D.C., 1988.