



研究報告

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

稲葉 薫 三枝 博光

東濃地科学センター

Outline of the Integrated Simulation System (GEOMASS System) to
Evaluate Groundwater Flow and Application to Groundwater Simulation in the Tono Area

Kaoru INABA Hiromitsu SAEGUSA

Tono Geoscience Center

東濃地科学センターでは1997年度より岩盤中の地下水流動を評価するために「GEOMASS」システムを開発している。本システムは地質構造のモデル化から数値解析までが統合された環境となっており、作業の労力と時間を大幅に節減でき、情報量の増加などに伴うモデルの更新へも迅速に対応可能である。また、岩盤の連続構造と不連続構造を同時に扱う手法を取り入れることにより、より現実的な地下水流動の表現を可能としている。

GEOMASSシステムの有効性や機能の妥当性を確認するため、岐阜県東濃地域を例に地下水流動解析を実施した。

その結果、複雑な地質構造をモデル化、解析する場合や複数のモデルを作成するような場合に、本システムが非常に有用であることが確認された。

The Tono Geoscience Center (TGC) has been developing the GEOMASS system since 1997 to evaluate the groundwater flow at depth in a rock mass. The system provides an integrated simulation system environment for both model development and groundwater flow simulations. The integrated simulation system allows users to use resources efficiently. The system also allows users to make rapid improvement of their models as data increases. Also, it is possible to perform more realistic groundwater flow simulations due to the capability of modeling the rock mass as a continuum with discrete hydro-structural features in the rock.

TGC tested the operation and usefulness of the GEOMASS system by applying to groundwater flow simulations in the Tono area, Gifu Prefecture.

TGC confirmed that the system is very useful for complex geological models and multiple modeling.

キーワード

地下水流動、地質構造モデル、水理地質構造モデル、ハイブリッド媒体、数値解析、統合予測解析システム、可視化、水頭分布

Groundwater Flow, Geological Model, Hydrogeological Model, Hybrid Medium, Numerical Simulation, Integrated Simulation System, Visualization, Head Distribution



稲葉 薫

瑞浪超深地層研究所 研究
グループ所属
超深地層研究所計画及び広
域地下水流動研究の地質環
境のモデル化・予測解析業
務に従事



三枝 博光

瑞浪超深地層研究所 研究
グループ所属
副主任研究員
超深地層研究所計画及び広
域地下水流動研究の地質環
境のモデル化・予測解析業
務に従事

1. はじめに

深部岩盤を対象とした地下施設の建設や、昨今大きな課題となっている地下水汚染問題などに関しては、岩盤中の地下水流動を把握することが極めて重要となり、多種多様なデータを基に流動を支配すると考えられる地質構造に着目し、地下水流動場をモデル化すると共に数値解析を行う手法

が用いられる。

特に地下深部の岩盤を対象に現実的な地下水流動場を表現するためには、岩盤中の地下水流動場の主要な規定要素である、断層や割れ目などの不連続構造と、岩盤の基質部（岩盤マトリクス）を同時にモデル化し、数値解析を行うことが重要となる¹⁾。しかし、このモデル化・数値解析は地質構造が複雑になるほど多大な労力と時間を必要とする。

我々は、これらの課題を解決するためのモデル化・解析の統合システムとして、GEOMASS (GEOLOGICAL MODELLING ANALYSIS AND SIMULATION SOFTWARE) システムを1997年度から開発している。このシステムは各種地質データの解析を支援するLandmark社製ソフトウェア群、地質構造モデルの構築及び可視化を支援するEarthVision、水理地質構造モデルの作成と数値解析を行うFrac-Affinity から構成される。

Landmark社製のソフトウェア群は、地質データの統合管理、地質データの可視化、物理探査データの解析、衛星画像処理等を行うことができる。

EarthVisionはDynamic Graphics, Inc. によって開発された、地質構造の複雑な幾何学形状のモデル化などを行うソフトである²⁾。

Frac-Affinityはサイクル機構東濃地科学センター（以下、TGCという）及びQuantisci社の共同で開発された地下水流動解析コードである³⁾。

本論においては、これらのシステムのうち、地下水流動の評価に直接的に関与するEarthVisionとFrac-Affinityについての概要と、このシステムを用いて著者が実施した東濃地域を例とした地質構造のモデル化及び地下水流動解析結果について報告する。

2. システムの概要

本システムにおけるモデル化・数値解析作業は以下のような手順で進められる。

- ① 様々な調査情報から地質構造モデルを作成するための情報群（データセット）を作成する。
- ② EarthVisionを用いて地質構造モデルを作成する。
- ③ EarthVisionの「Frac-Affinity Export」機能を用いてFrac-Affinity Interfaceプログラム用のファイル群を作成する。
- ④ Frac-Affinity Interfaceプログラムを起動さ

せ、水理に関するパラメータを指定し、前項のファイル群を用いて水理地質構造モデルを構築する。同時にFrac-Affinityにより数値解析が行われる。

- ⑤ Frac-Affinityの解析結果からFrac-Affinity Interfaceプログラムを用いてEarthVisionで可視化させるためのファイルを作成する。
- ⑥ 作成したファイルを用いてEarthVisionで解析結果の可視化を行う。

図1にこれらの作業手順を示す。

本システムの特徴は、以下の点にある。

- ① モデル化作業と数値解析作業が一体化されている。
- ② 不連続構造と岩盤マトリクスを同時に表現できる。

①の特徴により労力の節減を図ると同時に、情報量の増加等に伴うモデルの修正、解析の再実行を短期間で行うことができる。また②の特徴により、岩盤中の地下水流動をより現実的に表現することが可能となる。

以下にEarthVisionとFrac-Affinityについて詳細を述べる。Frac-Affinityは、EarthVisionとのデータ相互変換を行うFrac-Affinity Interface（以下Interfaceと呼ぶ）と地下水流動の数値解析を行うFrac-Affinity本体とに区別できる。

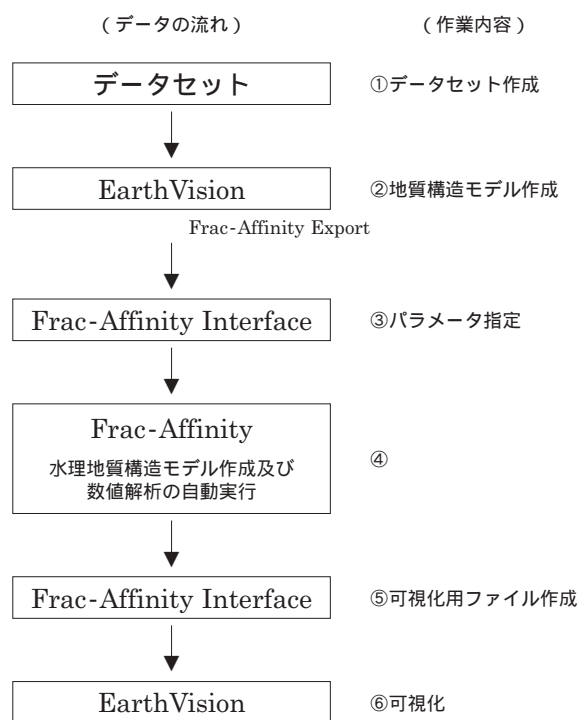


図1 GEOMASS作業手順

2.1 EarthVision

EarthVisionは地質構造の複雑な幾何学形状のモデル化、石油・天然ガスの調査及び開発に関する問題、水理学的問題（地下水流動問題）、などに適用できる。

具体的に以下のような機能を有している。

- ① 複数の正／逆断層、褶曲、侵食などを有する複雑な地質構造のモデル作成
- ② 3次元空間内への物性値の割り当て
- ③ 種々のデータ編集
- ④ 2次元／3次元離散データからの2次元／3次元グラフィックデータの作成
- ⑤ 2次元／3次元グラフィックデータの画像処理

上記の機能に加えて地下水流動の数値シミュレータFrac-Affinity用のデータ出力機能（Frac-Affinity Export）を付加させ、EarthVisionからFrac-Affinityへのデータの受け渡しを容易に行うことを可能としている。

2.2 Frac-Affinity Interface

InterfaceはEarthVisionで取り扱うためのデータとFrac-Affinityで取り扱うためのデータの相互変換を行うモジュールであり、TGC及びQuantisci社の共同で開発された。

以下にInterfaceが行う相互変換についての概要を述べる。

(1) EarthVision データの変換

一般に数値解析を用いる場合はモデルを差分格子あるいは有限の要素に分割する手法が多くとられるが、地質構造が複雑な場合や解析領域が不定形の場合はこの分割作業に多大な労力を必要とする。InterfaceはEarthVisionで作成した地質構造モデルからFrac-Affinityで数値解析を行うための差分格子を自動的に発生させる。ユーザーは格子分割のためのいくつかの制御パラメータ（セルの大きさの下限など）を指定する。また、必要に応じて解析結果をモニターする点、線及び面を指定することができ、特定のポイントにおける解析結果の変化などを簡単に出力することが可能である。

(2) Frac-Affinityによる解析結果データの変換

Frac-Affinityで計算した解析結果からEarthVisionで可視化するためのファイルを出力する。以下の項目についての可視化データの作成が可能である。

- ① 特性（透水係数、間隙率、比貯留係数）分布
- ② 水頭分布
- ③ 流速分布（実流速）
- ④ モニターポイントにおける水頭、流速そのほかの分布
- ⑤ フラックス分布
- ⑥ 流路及び滞留時間
- ⑦ Frac-Affinity ネットワーク

なお、Frac-Affinity ネットワークについては2.3章で後述する。

2.3 Frac-Affinity 本体

Frac-Affinity 本体（以下、FA本体という）は差分法による数値シミュレータであり、次のような特徴をもつ。

- ① 多孔質媒体と亀裂性媒体を同時に表現が可能なハイブリッド媒体を使用する。
- ② ネットワークを構築することにより、断層等の湾曲した構造のモデル化が容易である。
- ③ 亀裂性媒体として、決定論的割れ目と確率論的割れ目の両者の考慮が可能である。
- ④ 多孔質媒体及び決定論的割れ目の物性値について、フラクタル則を用いた地球統計学的手法により不均質に設定することが可能である。
- ⑤ 確率論的割れ目の発生条件として、ランダムあるいは位置固定を設定できる。また物性値設定方法については、均質な場合と正規分布を用い確率論的に設定する場合が選択可能である。
- ⑥ 決定論的割れ目及び確率論的割れ目に対して透水異方性を設定できる。
- ⑦ 坑道掘削を表現する機能（モデル中に坑道壁面の境界条件を付与する機能）を有する。

以下にハイブリッド媒体、Frac-Affinity ネットワーク、及びFA本体の数値解析手法について述べる。

(1) ハイブリッド媒体

FA本体は、岩盤中の地下水流動場の主要な規定要素である「割れ目や断層などの不連続構造」と「連続体（岩盤マトリクス）」を同時に扱うことができる。この二つの主要成分の和として表現された透水媒体をここでは「ハイブリッド媒体」と称している（図2）。

FA本体では、これらの不連続構造はさらに「決定論的な構造」と「確率論的な構造」に区別されている。「決定論的な構造」とは、各種調査によっ

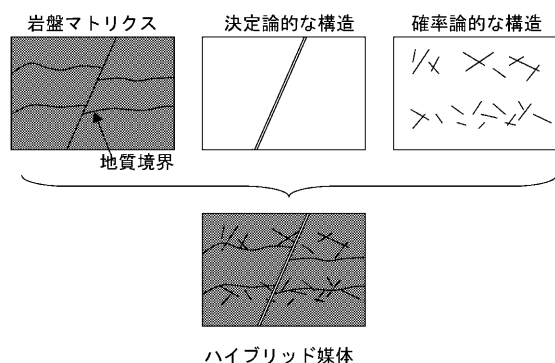


図2 ハイブリッド媒体の概念図

て走向，傾斜，透水性などの情報がある程度得られる比較的大規模な断層などの不連続構造を指す。「確率論的な構造」とは，岩盤中の割れ目などの比較的小規模な構造が対象となる。FA本体ではこれらの構造を同時に表現できる。

岩盤マトリクスとは，割れ目などが存在しないか，考慮しているスケールに比べて無視できる微小割れ目のみが存在している部分であり，多孔質媒体として取り扱うことができる領域である。

ハイブリッド媒体として岩盤を取り扱うことは，以下のような長所がある。

- ① 多孔質媒体近似では扱うことが困難な，透水係数のコントラストが大きいと考えられる不連続構造を取り扱うことができる。
- ② 不連続構造間の流れを岩盤マトリクス内の流動により表現できる。

また，FA本体では，岩盤マトリクスの局所的な不均質性や小規模な割れ目の確率論的な特性を，フラクタルスケールリング則を用いた地質統計学的手法⁴⁾によってそれぞれ与えることができ，3次元的不均質性を表現することが可能である。

このように，FA本体は多孔質媒体，決定論的に表現される大規模な不連続構造，確率論的に表現される小規模な不連続構造が含まれる場を，空間的な不均質性を考慮して解析でき，より現実的な場の表現が可能である。

(2) Frac-Affinity ネットワーク

1) ネットワーク特性

上記のハイブリッド媒体の考え方を基に Interface がネットワーク（節点と連結部の集合）を構築する。これを Frac-Affinity ネットワークと称する。ネットワーク構築にあたって，以下のような作業が自動的に行われる。

- ① 岩盤マトリクス，不連続構造それぞれについてグリッド（格子）を作成する。
- ② それぞれのグリッドのセル（要素）の中心に節点を配置し，隣接節点間に連結部を配置する。
- ③ 岩盤マトリクス及び不連続構造のネットワークを統合する。

図3にこれらの特性と連結部及び節点について概念をまとめて示す。

各連結部は境界節点との連結部を除き，連結部の中心で二つの部分に分けられる（半連結部と呼ぶ）。Frac-Affinity ネットワークモデルは岩盤マトリクス，不連続構造それぞれについて作成され，最終的に統合される。

半連結部はさらに，節点に近い部分（near-section）とそうでない部分（far-section）に分割される。これは岩盤マトリクス及び不連続構造を統合する際に，それぞれの特性を維持するために必要な措置である。これらの連結部，節点について，ネットワーク生成時に種々の特性が割り当てられる。

連結部に割り当てられる特性を以下に示す。

- ① 長さ
- ② 面積
- ③ 開口幅（割れ目に対してのみ設定される）
- ④ 物理特性を参照する節点の情報

節点に割り当てられる特性を以下に示す。

- ① 容積
- ② 透水係数，間隙率，比貯留係数

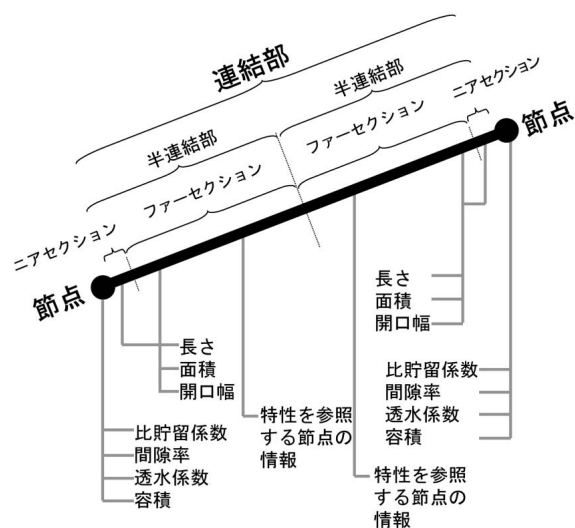


図3 Frac-Affinity ネットワーク節点及び連結部に割り当てられた特性

2) Frac-Affinity ネットワークの作成

岩盤マトリクスネットワーク、不連続構造ネットワークを生成し、それらのネットワークを統合することで最終的なネットワークを構築する。それぞれのネットワークの構築方法と統合方法について触れる。

a) 岩盤マトリクスネットワーク

岩盤マトリクスネットワークは以下の3つの段階からなる。

- ① セルを作成するための地層のグリッド化
- ② セルへの物理特性の割り当て
- ③ ネットワークへの変換

Interface が最初に作成する岩盤マトリクスグリッドは直線的で、各セルは直方体形状である。地質境界やユーザーが指定したパラメータに応じてセルの大きさは定義される。

岩盤マトリクスグリッドが作成された後、EarthVision で作成した地質構造モデルより得られる地質情報から特性がセルに設定される。物理特性の設定方法にはほかに、フラクタルスケーリング則を用いた手法を用いることも可能である。

グリッドを作成し、セルに物理特性を割り当てた後、グリッドセルの重心に節点を定義し、隣接セルと連結部を設けることによりネットワークを構築する。モデル領域境界と接するセルには、境界と接するセルの面の中心に境界節点が置かれ、セルの重心の節点と連結される。

b) 不連続構造ネットワーク

ここでは「決定論的な構造」について説明する。「決定論的な構造」は例えば断層などを表すが、岩脈などの2次元で図示できる構造のモデル化にも用いることができる。EarthVision ではこれらは面として表される。

不連続構造ネットワークの構築は岩盤マトリクスネットワークの構築と同様に行われる。

c) ネットワークの統合

ネットワークの統合化は岩盤マトリクスネットワークに一つずつ不連続構造ネットワークを統合していくことにより行う。この処理の演算手順は次の通りである。

- ① 岩盤マトリクスネットワークと、不連続構造ネットワーク面との交差点を求める。
- ② 前項の交差した岩盤マトリクスネットワーク中の連結部について、その交点に最も近い不連続構造ネットワーク上の節点を選択する。

- ③ 岩盤マトリクスネットワークが前項で選択した節点を通るように岩盤マトリクスネットワークの節点、連結部を変更する。

- ④ 変更点を反映するように連結部データを改訂する。

図4に統合化の概念図を示す。3次元的に概念を示すことが困難なため、図中では2次元の面ネットワークに1次元の線ネットワークが統合される場合を概念的に示している。

連結部データは以下のように改訂される。

- ① 面積及び開口幅は該当する部分の前の連結部から与えられる。
- ② 長さについては新たに算出される。
- ③ 物理特性を参照する節点の情報は以下のように設定される。

ア) near-section : 最も近い節点を参照

イ) far-section : 改訂される前に設定されていた節点を参照

d) 境界節点の付加

連結部がモデル領域境界と交差するところでは、境界節点を作成し、連結部を境界節点への半連結部に置き換える措置がなされる。モデル領域の外側にある節点は削除される。

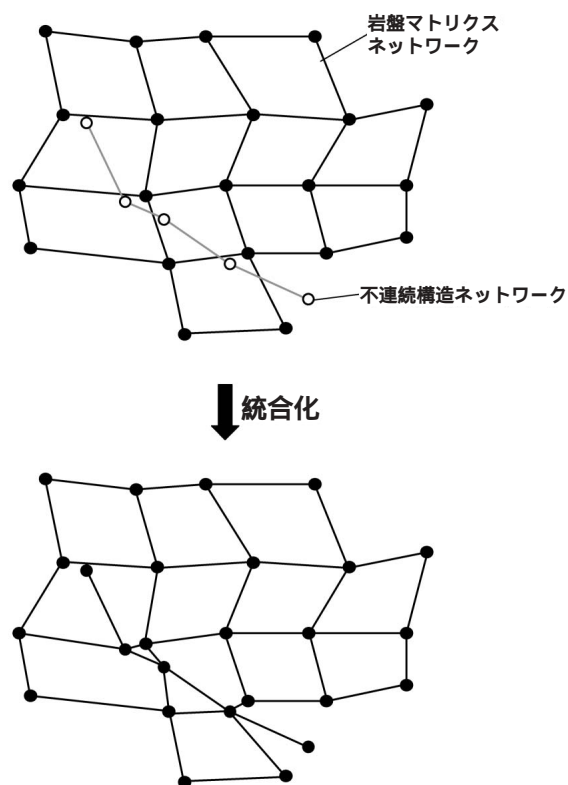


図4 ネットワーク統合の概念

境界条件（固定水頭条件など）は境界節点に設定され、境界節点に接続する半連結部の物理特性は境界節点の物理特性が割り当てられる。

（3）数値解析手法

FA本体では、地下水流動の質量保存則を基に差分法を用いて解く。ここでは地下水流動を支配する方程式の概要と、FA本体で用いている解析手法の概要について触れる。

1）飽和地下水流動支配方程式

飽和地下水流動の単位体積あたりの質量保存則は次式で表される。

$$s \frac{\partial h}{\partial t} = \nabla(k \nabla h) + q \quad \dots (1)$$

s は比貯留係数 [L^{-1}]、 k は透水係数 [LT^{-1}]、 h は水頭 [L]、 q はある場所での単位体積、単位時間あたりの圧入量あるいは生産量 [T^{-1}] を表す。 t は時間 [T] である。

節点 i における微小時間 Δt における水頭変化量を Δh_i とし、 $q = 0$ のとき、上記の式を差分展開すると

$$s \frac{\Delta h_i}{\Delta t} = \frac{1}{V_i} \sum_j A_{i,j} k_{i,j} (h_i - h_j) / d_{i,j} \quad \dots (2)$$

となる。 V_i は節点 i が持つ体積、 $A_{i,j}$ は節点 i と節点 j の間の断面積、 $k_{i,j}$ は節点 i と節点 j の透水係数の調和平均、 $d_{i,j}$ は連結部の長さである。節点 j は節点 i と連結する節点である。

2）不飽和地下水流動支配方程式

不飽和領域ではRichardの方程式を用いて解く。Richardの方程式には様々な表現形態が存在するが、FA本体においては次式で表される複合表現を用いた。

$$\phi \frac{\partial S_w}{\partial t} = \nabla[K(h) \nabla(h+z)] \quad \dots (3)$$

ϕ は間隙率、 S_w は水の飽和度、 h は圧力水頭、 $K(h)$ は h に依存した透水係数、 z は鉛直方向の座標を示す。

透水係数と圧力水頭の非線形な関係は、圧力水頭と飽和度（または含水率）の関係及び飽和度と透水係数の関係によって決まる。FA本体は、これらの関係をユーザーが線形連続曲線として関数を設定する、または、van Genuchtenのモデル⁵⁾を使用する方法により設定する機能を有している。

3）反復計算及び行列式の解法

FA本体では、上記の非線形な支配方程式をNewton法を用いた反復計算で解く。行列式の解法は共役勾配法を用いる。

3．東濃地域をモデルとした適用事例

TGCでは、岐阜県東濃地域において、広域における地表から地下深部までの地質・地質構造、地下水の水理、地球化学的特性を明らかにするために必要な調査、解析技術の開発、及びその結果の妥当性の評価手法の開発を目的として、「広域地下水流動研究」⁶⁾を実施している。ここでは、「広域地下水流動研究」において、EarthVisionとFrac-Affinityを用いてモデル作成、解析を行った例を報告する。

3.1 解析実施領域

広域地下水流動研究の解析実施領域及び主要な試錐孔の位置を図5に示す。この領域は東濃地域の主要な断層系などに囲まれた約30km四方を対象にした地下水流動解析⁷⁾の結果から設定されたものであり、東濃鉱山周辺の地下水の涵養域から流出域までを含む領域である。

解析領域の北側は涵養域である尾根部、南側は流出域である土岐川に位置する。南北最大約10km、東西最大約10kmである。鉛直方向については、下部境界条件による地下水流動解析結果への影響を避けるため、地表から標高 - 3 kmまでの範囲とした。

解析実施領域の地質は、先新第三紀花崗岩の基盤を新第三紀中新世に堆積した瑞浪層群が不整合に覆い、さらに礫を含む固結度の低い新第三紀鮮新世の瀬戸層群が不整合に覆っている。瑞浪層群は下位より、泥岩・砂岩・礫岩からなり垂炭を挟む土岐夾炭累層、凝灰質砂岩を主体とする明世累層、泥岩を主体とする生俵累層に区分される⁸⁾。解析領域中央部には花崗岩及び瑞浪層群を切る月吉断層が存在しており、その走向はほぼ東西方向で、南に傾斜（70°～80°）している⁹⁾。図6に解析領域の地質図を示す。なお、濃飛流紋岩及び美濃帯の堆積岩類は、解析領域での分布範囲が限られていることから、隣接する地質である花崗岩とみなしてモデル化を行った。

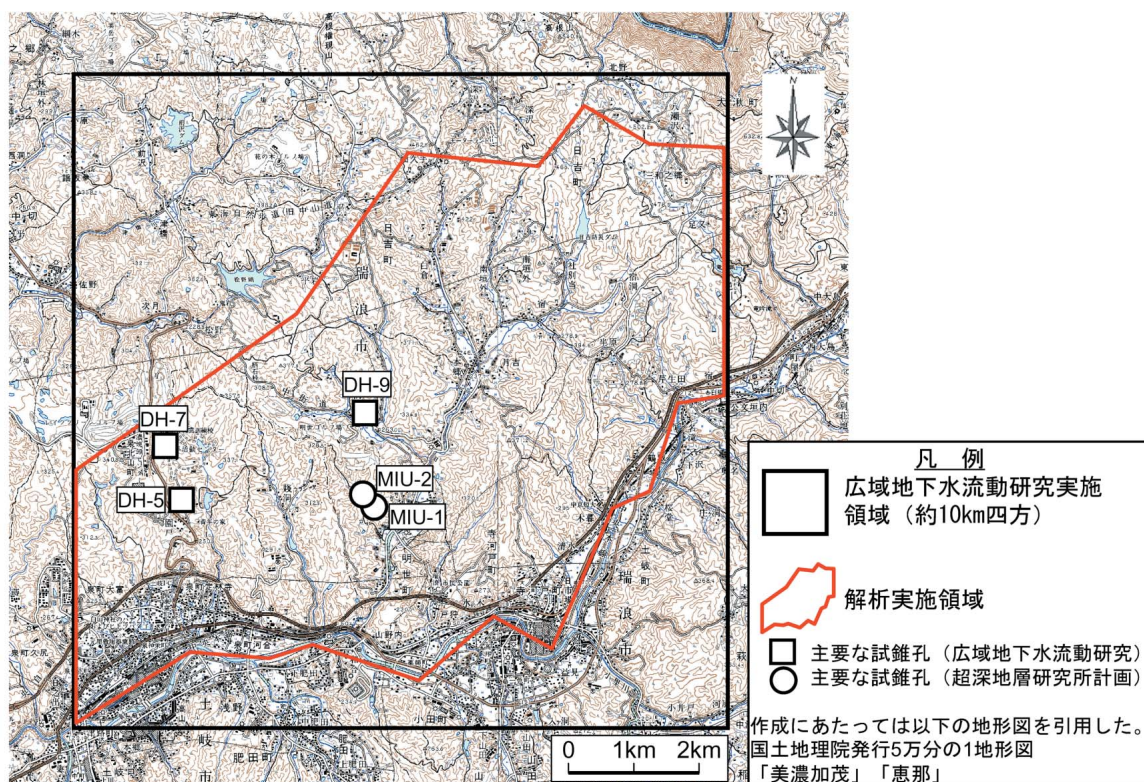


図5 広域地下水流動研究の解析実施領域及び主要な試錐孔位置図

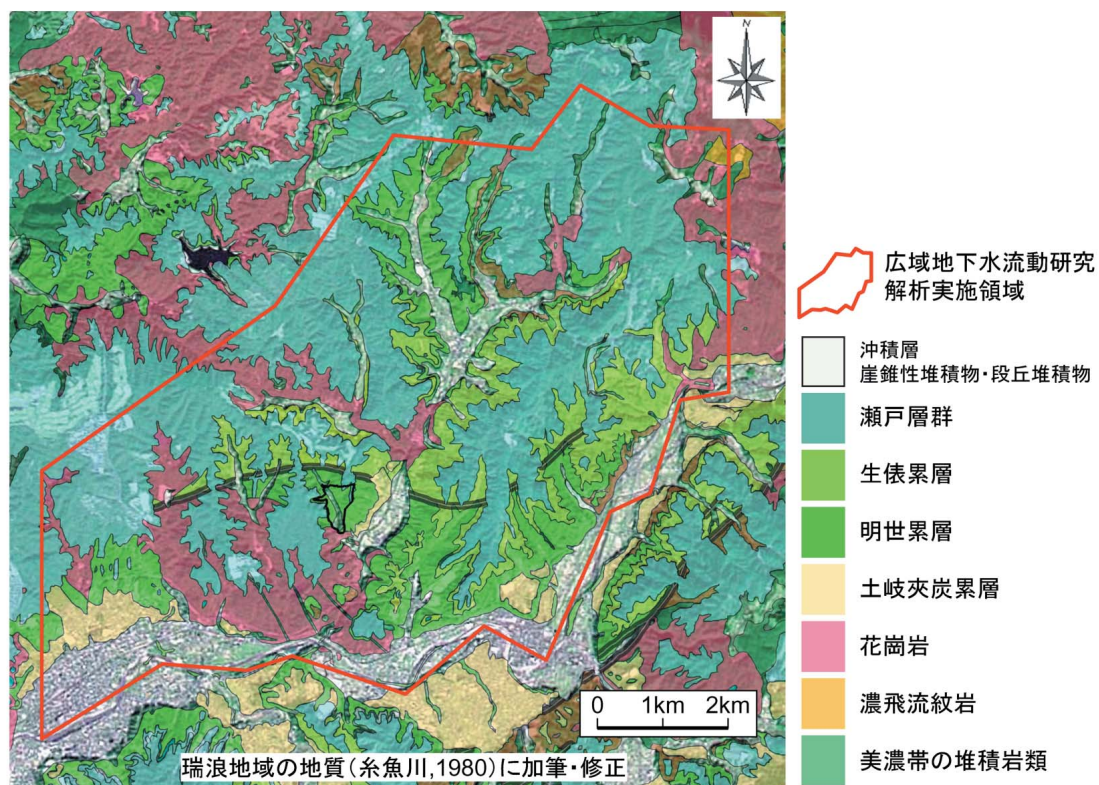


図6 解析実施領域の地質図

3.2 使用データ

本検討で使用したデータは次の通りである。

- ① 地質図⁸⁾(糸魚川, 1980)
- ② 東濃地域基盤等高線図^{10), 11)}
- ③ 試錐孔調査データ^{6), 11), 12)}

①は文献情報, ②は過去にTGCが調査したウラン探鉱時の情報, ③は広域地下水流動研究における調査情報と超深地層研究所計画¹³⁾における調査情報のうち, 1999年6月までに取得されたものである。

なお, 本研究では図5に示した試錐孔の水頭実測値を地下水流動解析の検証に用いた。

3.3 EarthVisionを用いた地質構造モデルの構築

地質構造モデルは, モデル領域の地下水流動や水質形成に影響を及ぼす可能性のある地質構造を適切に表現するものであり, 地下水流動解析に用いる水理地質構造モデル(地質構造モデルに水理学的特性を付加したもの)の基盤として位置付けられる。

(1) 地質構造モデルの要素

これまでに得られた知見¹⁴⁾から, 地質構造モデルで表現すべき要素(地質構造要素)は, 地形の起伏, 地質の分布, 地下深部から表層に達するような大規模な地質学的不連続構造が挙げられる。

今回の解析実施領域におけるこれらの要素のう

ち, 調査により3次元的な分布が確認されており¹⁴⁾, またモデル化に必要な透水性に関する情報が確認された以下の要素を抽出した。

- ① 地形の起伏
- ② 地層の分布: 瀬戸層群, 瑞浪層群(生俵累層, 明世累層, 土岐夾炭累層), 土岐花崗岩(健岩部, 風化部)
- ③ 不連続構造: 月吉断層

(2) 地質構造モデルの構築

EarthVisionによる地質構造モデルの構築においては, 以下のような手順を踏んだ。

- ① 調査から得られた地質構造要素の3次元分布位置座標を用い, 各地質構造要素の境界面データを作成する。面データの作成にあたっては, 数学的手法のうち, スプライン補間に基づくミニマムテンション理論¹⁵⁾を適用した。
- ② 各面データの重ね合わせにより地質構造モデル(地質構造の3次元分布)を作成する。

なお, 地質構造要素の3次元分布情報は解析実施領域の広がり比べて十分ではないため, 地質学的な判断や解釈などによるデータの補間を加えている。作成された地質構造モデルを図7に示す。

3.4 Frac-Affinityネットワークの構築

EarthVisionを用いて作成した地質構造モデルからInterfaceを用いてFrac-Affinityネットワーク

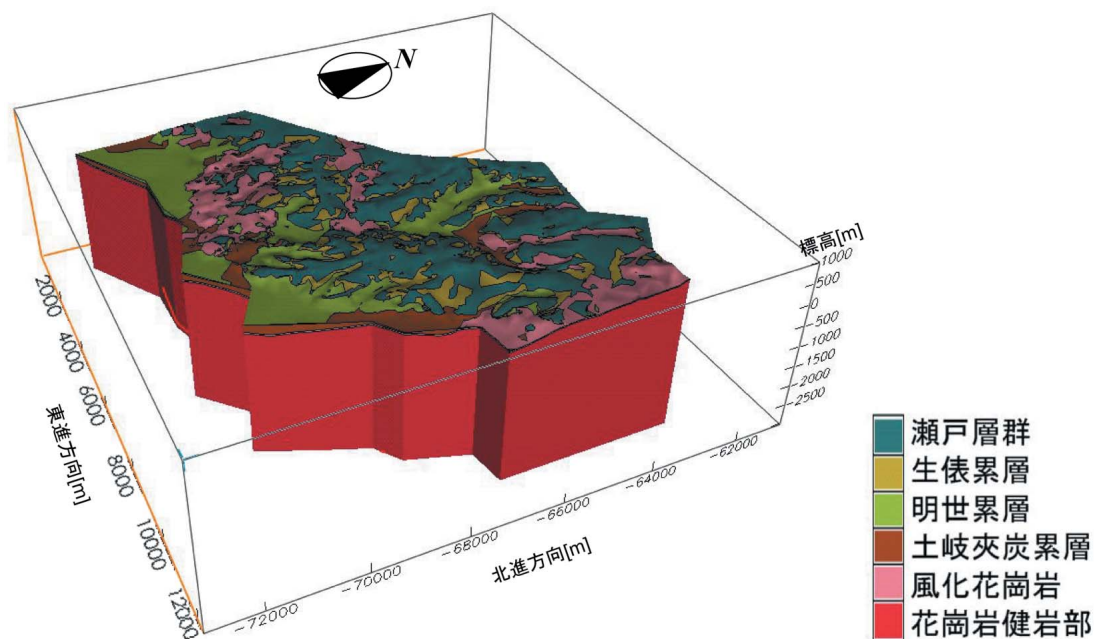


図7 地質構造モデル

を構築する。

図8に作成されたFrac-Affinityネットワークを示す。ここで示されているのは各格子の中心（節点）とその点における透水係数の分布であり、連結部は示されていない。なお、総節点数は49,093個であり、連結部の総数は154,921個である。

3.5 FA本体による地下水流動の数値解析と解析結果の可視化

本検討では飽和解析を実施した。

上部境界条件は固定水頭境界（自由地下水面）とし、地表面は自由漫出面とした。下部境界条件は不透水境界とした。

約30km四方を対象にした地下水流動解析結果⁷⁾から、南側と北側は分水界（不透水境界）とみなすことができる。

地下水流動方向は同解析結果から基本的に北から南方向であり、東西方向の地下水流動は小さく不透水境界とみなすことができるが、僅かながら東から西への流れも確認されている。以上のことから、南側、北側の側部境界は不透水境界とし、東側、西側の側部境界は不透水境界と固定水頭境界の2ケースを考慮した。

また、堆積岩のうち瑞浪層群については、調査¹⁶⁾により透水特性にややコントラストが見られる3区分（生俵累層、明世累層、土岐夾炭累層）に分

割する場合と、一つの層にみなす場合の2ケースを考慮した。モデル化する地質構造要素に与える透水係数は、各地質・地質構造ごとに均質と仮定し、原位置調査結果^{6),12)}に基づき表1に示すように設定した。

境界条件の設定方法の違いや瑞浪層群の区分方法の違いが地下水流動解析結果に与える影響を検討するために表2に示す4ケースの解析を実施した。解析結果を図9、図10に示す。

図9は試錐孔位置での解析による全水頭分布と実際の調査^{6),12)}で得られた試錐孔の全水頭分布の比較である。図10は全水頭分布である。なお、図10の赤線は月吉断層を示す。

表1 各地質構造要素の透水係数

要 素			透水係数 (m/s)
瀬戸層群			1×10^{-7}
瑞浪層群	1 つの層の場合		5×10^{-9}
	3 つの層の場合	生俵累層	1×10^{-9}
		明世累層	1×10^{-8}
		土岐夾炭累層	5×10^{-9}
土岐花崗岩（風化部）			1×10^{-7}
土岐花崗岩（健岩部）			1×10^{-9}
月吉断層			1×10^{-10}

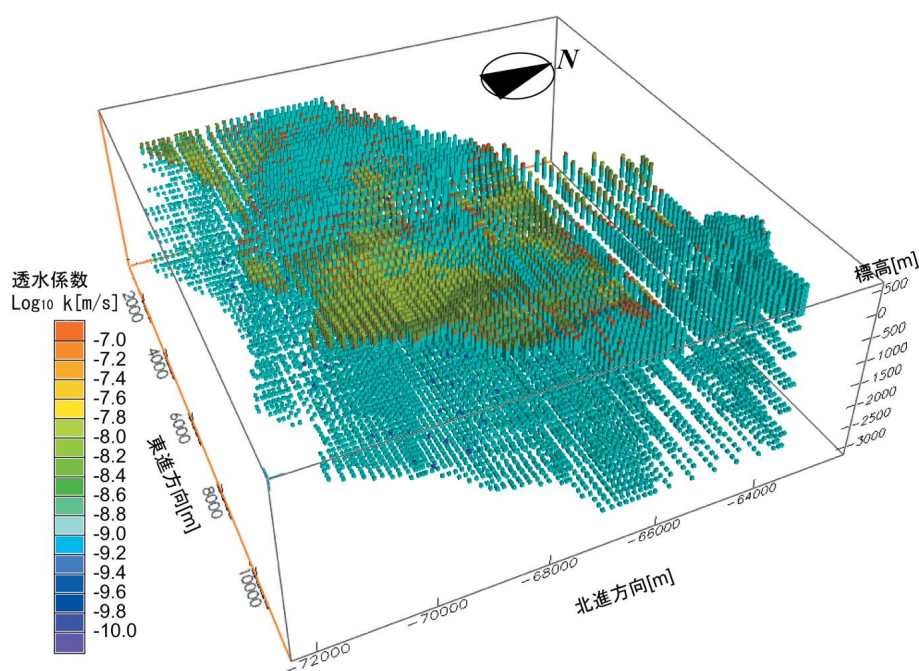


図8 Frac-Affinity ネットワークモデル

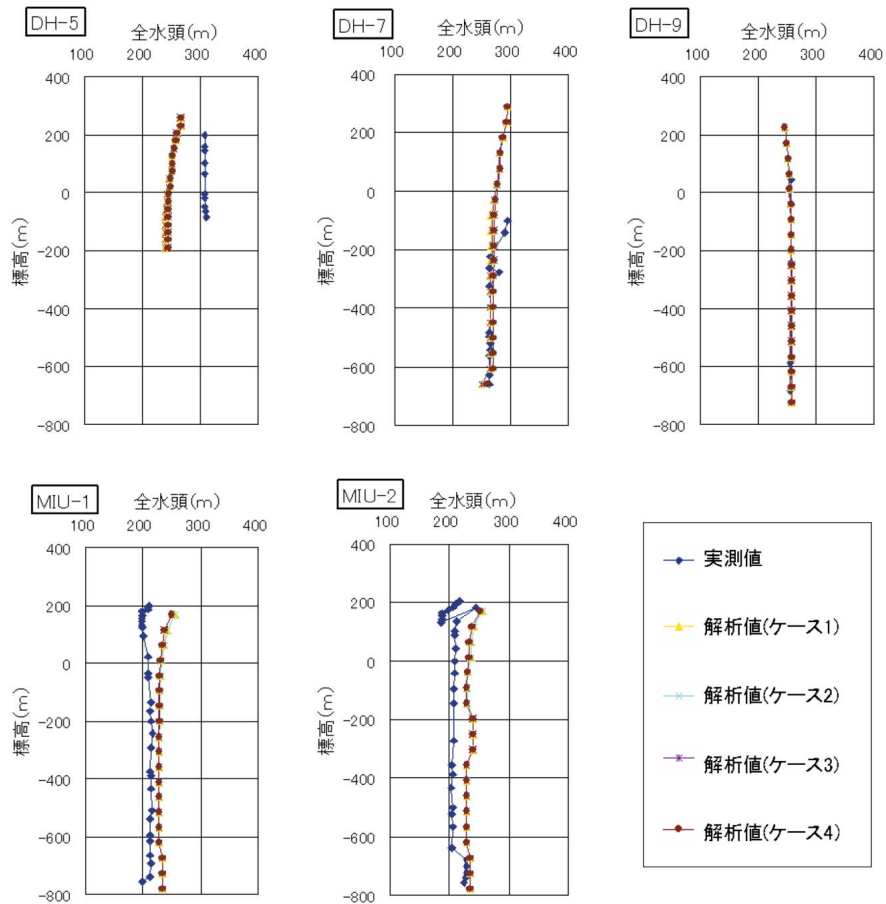


図9 実測値と解析結果との比較（各試錐孔における全水頭分布）

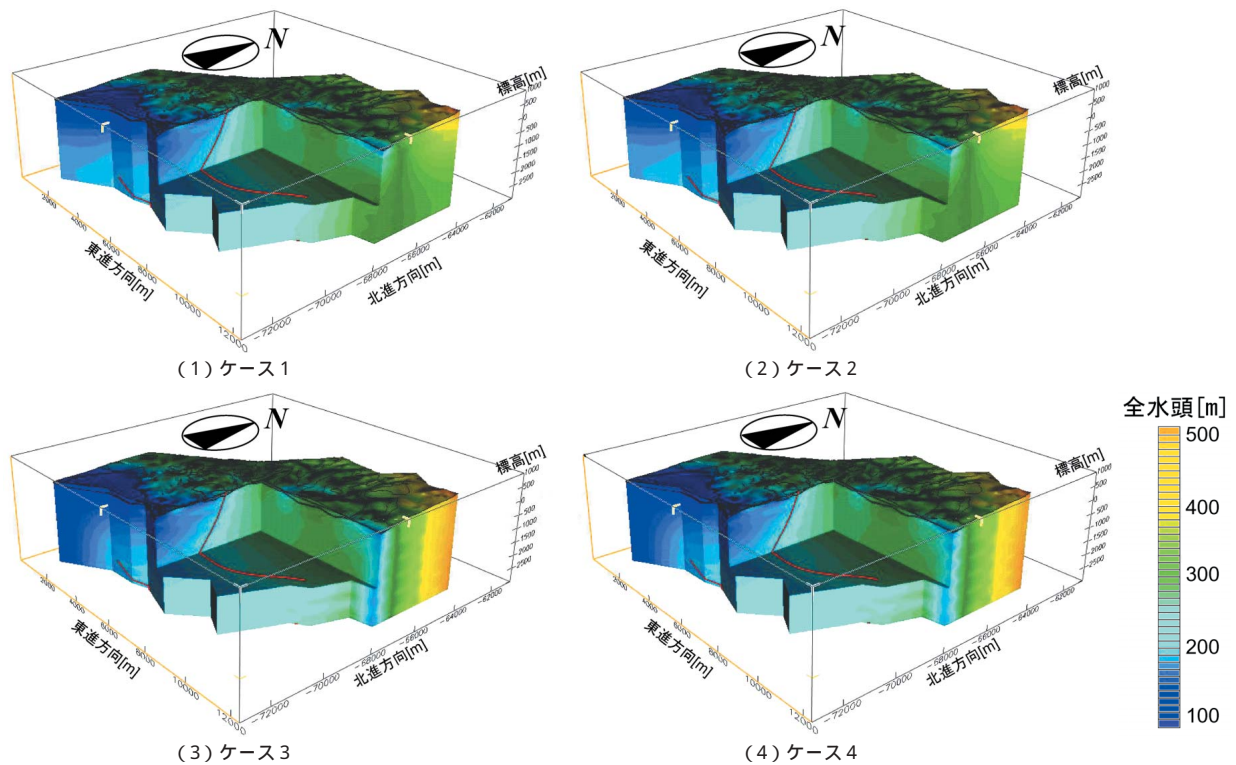


図10 解析結果（全水頭分布）

表2 解析ケース

	側 部 境 界 条 件	瑞浪層群の分割
ケース 1	不透水境界	3 層に分割
ケース 2	不透水境界	1 つの層として表現
ケース 3	北側及び南側：固定水頭境界 東側及び西側：不透水境界	3 層に分割
ケース 4	北側及び南側：固定水頭境界 東側及び西側：不透水境界	1 つの層として表現

3.6 考察

(1) 地下水の水頭分布の実測データと解析値の比較

図9の各試錐孔における実測の全水頭分布と解析結果を比較してみると、実測値はMIU-2号孔の標高-700m以深と、DH-7号孔の標高-100~-200mを除いてほぼ静水圧分布を示しており、解析結果はその傾向に整合している。絶対値については、月吉断層の下盤に位置するDH-7号孔、DH-9号孔及びMIU-2号孔の標高-680m以深の解析値と実測値がほぼ一致しているが、月吉断層上盤側に位置するMIU-1号孔及びMIU-2号孔の解析値は実測値と比較して約30m程度の差が認められる。これは遮水的性質を有している月吉断層¹⁷⁾により、断層を境に自由地下水面の高さに違いが生じている可能性が考えられる。

さらにDH-5号孔の解析値は大幅に実測値と異なる値を示している。この理由として、DH-5号孔の標高-66m以深に見掛け破碎幅約100mの断層が確認されており、この断層を境に自由地下水面の高さに違いが生じている可能性が考えられる。なお、この断層より下部の実測値は取得されていない。

図10より、解析では地下水流動は北側の尾根部から南側の土岐川へ流れる系となった。これは約30km四方を対象とした解析結果と整合している。また、東西境界条件の違いによる影響は東西境界付近で認められるものの、境界から離れた地点では顕著な差は認められなかった。瑞浪層群を1層にみなした場合と3層に分割した場合による差もほとんど認められない。これは、瑞浪層群の層厚がモデルのスケールに比して薄い（モデルの鉛直方向の厚さが3,100~3,600mであるのに対し、瑞浪層群の層厚は最大300m程度）ためと考えられる。

今回の解析では各ケースの差異は顕著には現れ

なかった。すなわち、境界条件や瑞浪層群のモデル化方法による解析結果への影響は小さい。解析結果と実測値との差は自由地下水面の設定方法に影響されたと考えられ、今後この点に関して検討する必要がある。

(2) GEOMASSシステムの適用と妥当性について

GEOMASSシステムを用いて東濃地域を例とした地下水流動解析を行った結果、水頭について解析値と実測値の間に差が認められるものの水頭分布の傾向は一致し、これまでに行われた地下水流動解析結果と整合する結果が得られた。

また、複数の岩相（花崗岩、堆積岩）や断層が複雑に分布する地域の地質構造モデルを、可視化画像で確認しながら視覚的に構築することができた。また、地質構造モデルから数値解析を行うための要素分割をしたモデル（離散モデル）が自動的に作成されることにより、煩雑な要素分割作業がなくなり大幅に労力を削減できた。さらに、瑞浪層群（生俵累層、明世累層、土岐夾炭累層）を分割する場合と一つの層とみなす場合といった複数の地質構造モデルを作成した場合、離散モデルの自動構築機能は労力の削減に特に威力を発揮すると言える。

以上のことから、複雑な地質構造をモデル化・解析する場合や、複数のモデルを作成するような場合（感度解析等）に、本システムは非常に有用である。

4. まとめ

東濃地域を例とした地下水流動解析を通して、本システムが有効に機能し、これまでに行われた地下水流動解析と整合する結果を得られること、地下水流動を把握するためのモデル化・解析作業を効率的に進めることが可能であること、複数のモデルを作成する場合や情報量の増加に伴うモデルの更新を迅速に行う場合などにも有用であることを確認することができた。この特長を活かし、東濃地域を例とした地下水流動に関する研究におけるモデルの更新及び解析を進め、地下水流動のモデル化技術の構築に向けた検討を行う予定である。

謝 辞

本研究を進めるに当たり、M・White氏（Galson Science Ltd.）及びP・Robinson氏（Quintessa Ltd.）

には多大な協力と助言を頂いた。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) M. P. Anderson, W. W. Woessner: "Applied Groundwater Modeling", Academic Press, Inc. (1992)
- 2) T. Beims: "3-D Structural Modeling Mitigates Risk", The American Oil & Gas Reporter (1997)
- 3) M.J. White, J.P. Humm, et al.: "GEOMASS: Geological Modelling Analysis And Simulation Software For The Characterization Of Fractured Hard Rock Environments", SKB Technical Report, TR-98-10, 233-242 (1998)
- 4) Cacas M. C., E. Ledoux, et al.: "Modelling fracture flow with stochastic discrete fracture network: Calibration and validation 2. The transport model", Water Resource Research, 26(3), pp.491-500 (1990)
- 5) M. van Genuchten: "A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils", Soil Science Society of America Journal, 44, 892-898 (1980)
- 6) サイクル機構: "広域地下水流動研究の現状 - 平成4年度～平成10年度 - ", JNC TN7400 2000-014 (2000)
- 7) 三枝博光, 稲葉秀雄, ほか: "東濃地域を対象とした広域地下水流動解析", 日本応用地質学会中部支部平成9年度研究発表会講演予稿集, 1-4 (1997)
- 8) 糸魚川淳二: "瑞浪地域の地質", 瑞浪化石博専報 1 (1980)
- 9) 稲葉秀雄, 竹内真司, ほか: "東濃鉱山周辺領域を対象とした地下水流動解析", 動燃技術報告書PNC TN7410 98-001 (1998)
- 10) 動燃事業団: "日本のウラン資源 ()" (1988)
- 11) 動燃事業団: "日本のウラン資源" (1994)
- 12) 核燃料サイクル開発機構: "超深地層研究所計画の現状 - 平成8年度～平成11年度 - ", JNC TN7400 2001-001 (2001)
- 13) 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 TN7410 2001-009 (2001)
- 14) 太田久仁雄, 天野健治, ほか: "広域地下水流動研究における三次元地質構造モデルの構築", サイクル機構技報 No.4, JNC TN 1340 99-003 (1999)
- 15) I.C. Briggs: "Machine Contouring Using Minimum Curvature", Geophysics, 39, p.39-48 (1974)
- 16) 柳澤孝一, 今井 久, ほか: "立坑掘削に伴う地下水流動影響調査研究 - 東濃ウラン鉱山試験立坑を例として - ", 応用地質, Vol.33, p.276-293 (1992)
- 17) 山根正樹, 中野勝志, ほか: "立坑掘削に伴う間隙水圧の長期観測", 土と基礎, Vol.44-No.11, p.24-26 (1996)