

地質環境特性評価の不確実性解析手法に関する検討 variability と ignorance を考慮した不確実性解析の方法論の構築および東濃地域への適用

柳澤孝一^{*1} 大澤英昭^{*1} 武田精悦^{*1} 高瀬博康^{*2} 青山裕司^{*2} 古市光昭^{*3} 戸井田克^{*3} 須山泰宏^{*3}
若松尚則^{*4} 西垣誠^{*5}

地層処分の長期的安全性の評価は、不確実性存在下での意思決定問題として捉える必要があり、性能評価はそのための判断材料を提供することが目標となる。したがって性能評価に至る各プロセスにおいて不確実性を低減するための合理的な方策が採られていることが重要であり、地質環境調査においても各段階の不確実性を明確に把握する手法が不可欠である。しかしながら、従来行われていたように、調査の各段階で最良と考えられる単一のモデルやデータセットのみを想定するというアプローチでは、これに付随する不確実性を把握することは難しい。本研究では、想定し得る（あるいは否定できない）モデルやデータセットの全体集合を考えることによって調査の各段階における不確実性を明示しつつ、さらに不確実性を低減するために次段階の調査計画を立案するという新たなアプローチを提案した。本報文では、不均一な水理場における不確実性解析の基本的な方法論についてまとめ、さらに、この方法を東濃地域における例題に適用した結果を紹介する。

Keywords: 空間的不均一性, 不確実性解析, ファジー理論, 地球統計学

Assessment of the long-term safety of geological disposal needs to be based on a clear understanding of uncertainty and the role of performance assessment is to support this understanding. For this purpose, it is important to identify and evaluate uncertainties associated with understanding the geological environment, which often exhibits significant heterogeneity at various scales. This evaluation must be done at every stage of the site characterization so that insights, thus gained, can be used to guide designing effective measures to reduce the uncertainty. In many applications, however, only a limited number of most plausible model options and data-sets are sought after and this prevents one from recognizing uncertainty explicitly. In the current study we propose an alternative approach where all the possible options in the models and data-sets that cannot be excluded in the light of the evidence available is identified. This approach enables uncertainties associated with the understanding at a given stage of the site characterization to be made explicitly. This, in turn, supports the design of the following stage to reduce the uncertainties efficiently. In this paper a methodology for analyzing the uncertainty in a heterogeneous geological environment is discussed. The methodology has also been tested in Tono area, to demonstrate its applicability.

Keywords: spatial variability, uncertainty analysis, fuzzy set theory, geostatistics

1 不確実性解析の必要性

高レベル放射性廃棄物地層処分の性能評価においては、シナリオに関する不確実性や各現象に対応した数学モデルに関する不確実性、解析コードに含まれる不確実性、そしてパラメータ値に含まれる不確実性といった様々な不確実性が存在する[1]。これらの不確実性が発生する原因としては、

地層処分の安全性を示すために実施する 10 万年、100 万年オーダーの長期予測

地層・岩体の区分や、断層・亀裂の存在等による地質環境特性（例えば、透水係数分布）の空間的不均一性の二つが考えられる。このうち、により発生する不確実性は、例えば、人工バリアシステムの長期的変遷を、個別現象についての短期的な試験結果の重ね合わせや外挿に

Uncertainty analysis techniques for modeling of heterogeneous geological environment: Methodology for treating uncertainties associated with variability and ignorance by Koichi Yanagizawa, Hideaki Osawa, Seietsu Takeda, Hiroyasu Takase, Yuji Aoyama, Mitsuaki Furuichi, Masaru Toida, Yasuhiro Suyama (y-suyama@kajima.com), Naonori Wakamatsu, Makoto Nishigaki

*1 核燃料サイクル開発機構 東濃地科学センター Japan Nuclear Cycle Development Institute, Tono Geoscience Center
〒509 5102 岐阜県土岐市定林寺 959 31

*2 株式会社クインテッサジャパン Quintessa co., ltd.
〒220-6007 横浜市西区みなとみらい 2-3-1 クイーンズタワー A7 階 707

*3 鹿島建設株式会社 技術研究所 Kajima co., ltd., Technical Research Institute
〒182-0036 調布市飛田給 2-19-1

*4 アジア航測株式会社 Asia Air Survey co., ltd.
〒215-0004 川崎市麻生区万福寺 1-2-2 新百合 21 ビル

*5 岡山大学 環境理工学部環境デザイン工学科 Okayama University, Department of Environmental and Civil Design, Faculty of Environmental Science and Technology
〒700-8530 岡山市津島中 3-1-1

よって予想することにより生じる。この長期的時間の予測に関する不確実性の低減については、短期的な試験結果の積み重ねとの比較に加え、ウラン鉱床等を利用したナチュラルアナログの成果との比較による研究評価が試みられている[2]。他方、の空間的不均一性に関する不確実性は、地質環境特性の空間分布が複雑なパターンを有する場合やこれを理解するための十分な情報が地下深部において取得することが困難な場合に問題となる。当然、地質環境特性自体が時間的に変化するような地質学的な時間スケールにおいては、上記の二つの不確実性要因が互いに密接に関連し、より複雑な不確実性をもたらす可能性も考えられる。

ICRP (International Commission on Radiological Protection) は、地層処分の性能評価において、上記に示したような不確実性を完全に取り除けないということを理解した上で、平成 12 年に Publication 81 [3]を公表し、「将来生じるかもしれない潜在的被ばくが、ある定量的な安全基準を満足することを厳密に証明することは極めて困難である。このことは、処分に対する放射線防護原則の適用が、厳密な意味での科学的証明ではなく、むしろ実践的な意思決定の問題であることを意味し、この中で、安全評価によって提示される定量的な影響の程度は、意思決定のための情報提供として位置づけられるべきである。」としている。また、このような ICRP の新しい考え方に基づく具体的な防護指針として、予想される潜在的被ばくあるいは対応するリスクが一定の拘束値以下であるという条件の下に、「潜在的被ばくを低減するために、合理的に達成可能な方策を尽く

す」ことが求められている。地層処分における合理的に達成可能な方策としては、(1)安全性に影響を及ぼす天然事象等が生じる可能性の低い好ましい処分サイトを選ぶことや、(2)不確実性の影響が顕在化しづらい安全率の高い人工バリアシステムの設計を行うことに加え、(3)地質環境特性の不均一性についての理解に含まれる不確実性を把握し、効率的な調査・試験を行うことにより不確実性を低減することも含まれると考えられる。本論文では、性能評価に含まれる不確実性のうち、地質環境特性、特に透水係数の空間的不均一性に焦点をあて、地質環境特性の不均一性についての理解に含まれる不確実性を定量的に把握し、効率的な調査・試験を行うことにより不確実性を低減するための方法論の基本的な考え方を明らかにすると共に、東濃地域における具体的な例題への適用を試みる。

2 不均一な透水係数分布の理解に含まれる不確実性

一般に、あるシステムの挙動が一通りに決定できない原因としては、以下の二つが考えられている。

システムの挙動自体がランダムな性質を含んでいるため、同様の試行を何回繰り返しても結果はその度に異なる。

システムの挙動は本来一通りに定まるはずであるが、予測を行う者の知識が限られているために、予測結果をひとつに決定できない。

これら二つの不確実性要因を区分して考える必要があることは、原子力発電所等に対する確率論的安全評価においても既に指摘されている[4]。また、地層処分の性能評価においては、この点は早くから注目されており、この分野における初の国際会議[5]では前者をタイプ1、後者をタイプ2の不確実性と呼び、欧州連合による国際共同研究[6]では、前者を variability (頻度に基づく確率に起因する不確実性)、後者を ignorance (知識の不足に起因する不確実性) と分類することが提案されている。このような分類が重要となる理由は、「variability が事象自体の属性であり、本来の「頻度に基づく確率」の概念に基づき、この要素を確率論的に取り扱うことに異論がないのに対して、ignorance は予測を行う側の属性(知識の不足)にあり、頻度に基づく確率の概念をそのまま適用する場合には、不確実性の存在が見かけ上のリスクを過小評価することにながる(リスク希釈)。」ことにある。本論文では、上記に示した既往の研究成果を参考に、頻度に基づく確率に起因する不確実性を variability、知識の不足に起因する不確実性を ignorance と定義する。

具体的に、地質環境特性の一つである透水係数分布の不均一性を表現する手法は、決定論的なものと地球統計学的なものとに大別されると考えられる。決定論的手法の目標は、不均一性を地質学的に「解釈」すること、つまり、対象となる地質を理解し、地質学的な観点から区分すること

であるのに対して、地球統計学的手法の目標は、不均一性を客観的に「記述」すること、つまり、統計的手法に基づき未計測部分の特性を内外挿することにより、既に取得しているデータと整合的な空間的分布を作成することである[7]。地球統計学的手法は、一般に、対象とする領域が同様な地質学的プロセスによって形成されていることを前提としているため、前段階として決定論的な地質学的区分を必要とする。他方、決定論的手法は、地質学的観点からはほぼ同一とみなせる領域の中にある統計的なばらつきとしての不均一性を表現するという用途に対し適していない。つまり、ある透水係数分布の空間的な不均一性をモデル化するためには、これら二つの手法を用い、相互補完することが必要である。決定論的な手法では、各地点での特性(例えば、ある地点が特定の地質学的区分に含まれるか否か)はひとつに決定可能であるという考え方が用いられている。このため、決定論的な手法における不確実性は、各地点での特性は既にひとつに決定されているものの、我々がそれを知らないために生じているもの、つまり ignorance によるものであると考えができる。決定論的手法において ignorance から生じる不確実性として典型的な例としては、

地質学的な解釈の背後にある概念が複数存在するために、地質構造モデルに複数のオプションが派生すること

ひとつの地質構造モデルにおける層境界の位置等がひとつには決定されないこと

等が挙げられる。Fig.1 に例を示す。図中の点はボーリング



Fig.1 Example of ignorance concerning data obtained using a deterministic method from the same data set

グの位置を示し、点に付随する数字はそのボーリングで観測されたある層の厚さを表す。図の(a)～(d)はこれらのボーリングデータセットから導いた層の厚さ分布を表す等高線であり、同一の模擬的なボーリングセットから様々な内挿に関する解釈や地質構造モデルを導き得る可能性を示したものである[7]。

他方、地球統計学的手法においては、不均一な透水係数場における各地点での透水係数を決定することになった過去の地質学的プロセスに着目し、このプロセスのランダムさのために場所によってばらつき、つまり不均一性が生じていると考えている。すなわち、この場合には、主として variability が原因となって不確実性が生じているということになる。しかしながら、ここでも ignorance を考慮する必要があり、例えば、地球統計学的手法において、variability のみを不確実性要因として考えるのであれば、不均一な分布を示す統計的な特性値の母分布のパラメータ（例えば、平均値や標準偏差等の各次モーメント）自体はひとつに決定されるはずであるが、実際には、地質環境調査によって得られる地下深部のデータ数は限られており、これらをひとつに決定できるだけの情報が入手できない場合が多い。このことは、variability と ignorance とが複合的な要因となって不確実性が生じていることを意味しており、具体的には、以下のような状況が生じていることとなる。

分布形や統計的パラメータに関するそれぞれのオプションを仮定した場合の不均一場の内容は統計的にしか表現されず、多数の不均一場の形成における不均一分布は個々に異なる（variability）

着目する不均一な地質環境特性の母分布に関する分布形や統計的パラメータをひとつに決定することができず複数のオプションが競合する（ignorance）

よって、variability と ignorance の両方の不確実性を考慮した上で、定量的に把握する方法を検討する必要がある。

3 不均一な透水係数分布に関する不確実性解析の手法

不均一な透水係数分布に関する不確実性解析の目標は、

透水係数の空間分布の推定に含まれる不確実性を抽出し、その大きさを定量化することにある。このためには、透水係数分布に関するモデルの候補として考慮すべきオプション（あるいは否定できないもの）を網羅的に抽出し、そして、それぞれのオプションが正しいことの確からしさの程度を表現することが必要となる。また、対象とするモデルの種類は、決定論的な手法を探るか地球統計学的な手法を探るかによって異なり、他方、確からしさの程度に関する指標は、対象とする不確実性の起源が variability であるか ignorance であるかによって異なるものとなる。以下に、本論文において適用した不均一な透水係数分布に関する不確実性解析手法を示す。

3.1 決定論的なモデルに含まれる ignorance に関する不確実性解析手法

決定論的モデルに含まれる ignorance に関する不確実性の評価では、複数のモデルの候補について「確信の程度」に基づき確からしさを付与することが適切であると考えられる。しかしながら、確信の程度という主観的な尺度を定量化する方法は確立されていない。実際、頻度に基づく確率の場合と同様に、「確信の程度」に対して四則演算を定義したとしても、それが何を意味するのかは非常に曖昧である[6]。そこで、ignorance を表現する方法として[6]では、確信の程度をファジーメンバーシップと呼ばれる指標で表現し、四則演算の代わりに Min-Max ルールと呼ばれる演算規則を適用することを推奨している。

ファジーメンバーシップは、古典的な集合論における帰属関係を一般化して、ある要素 x が特定の集合 A に帰属する程度 $\mu_A(x)$ を $[0,1]$ の実数として表現するものである。つまり、古典的な集合論で $x \in A$ あるいは $x \notin A$ と表される状態は、ファジー集合論では、それぞれ $\mu_A(x)=1$ および $\mu_A(x)=0$ として表現され、さらに、これら二つの間の任意の程度の「帰属性」を表現することが可能である[8]。この考え方を、以下のような方法で、決定論的な地質区分に適用することができる。

例として、ある地点における A 層と B 層の間の境界の深度を考える（Fig.2 参照）。この地点においてコア観察等

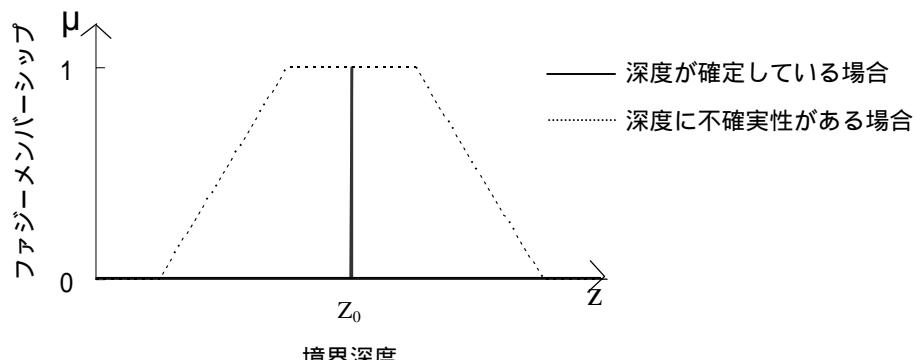


Fig.2 Fuzzy membership function according to the uncertainty in the depth of a layer boundary.

によって層境界の深度 ($=z$) が明らかにされており, 深度に関する誤差が無視できる場合, 深度 Z_0 の位置が層境界に該当(帰属)することの確信の程度つまりファジーメンバーシップは, Fig.2 の実線で示すように, $z=Z_0$ においてのみ $\mu=1.0$ であり, 他の深度では $\mu=0.0$ となる. これに対して, この地点には未だボーリング孔が無く, 物理探査等により層境界が推定されているが, 推定に顕著な誤差が含まれているような場合には, 例えば Fig.2 の点線で示したように, Z_0 を含むある範囲で $\mu=1.0$ であり, さらに広い範囲で μ が 0.0 ではない範囲となる.

Fig.2 に示した境界深度の不確実性に関するファジーメンバーシップは, Fig.3 a), b) に示すように, 横軸を深度にとり, A, B それぞれの層の存在する範囲のメンバーシップを定義することと同じである. さらに, このような層区分自体に不確実性があり, A 層と B 層の間に, 第三の地層 C の存在する可能性も考えられる場合には, 不確実性の全

体像は Fig.3 c) に示すようなものとなる.

Fig.3 は, 決定論的な地質区分(およびこれに対応する古典的な集合論)では, 単一の層境界が, 情報の欠如や基礎となる地質学的解釈の不確実性という ignorance を考慮することによってファジー化されることを例示している. なお, ここでは簡単のため, 特定地点における例を示したが, 後節で例示するように, 同様の方法は二次元そして三次元についても容易に一般化することが可能である.

3.2 地球統計学的モデルに含まれる variability および ignorance に対する不確実性解析の手法

地球統計学的手法においては, 不均一性の空間的パターン(すなわち当該特性値の自己相関構造)をバリオグラム γ_h (ある距離 h 離れた二点 (x_i および x_j , 該当する組の数が $N(h)$ 個あるものとする) 間の特性値 Z の差の二乗の期待値, 式(1)参照) によって表現し, これを用いて多数の統計的モデルを作成することにより, variability に起因する不確実性が表現される[7].

$$\gamma_h = \frac{1}{2N(h)} \sum_{|x_i-x_j|=h} |z(x_i) - z(x_j)|^2 \quad (1)$$

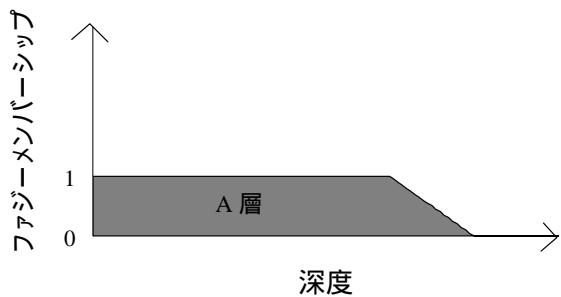
しかしながら, 一般には, 実測データに基づき作成される実験的なバリオグラムに一定程度フィットするような関数形は複数考えられ, また, データ点数が少ないほど, そして, 測定誤差が大きいほど, 候補となる関数形の範囲も広いものとなることが予想される. つまり, 実測データに対応する理論的なバリオグラムモデルはひとつには決定されない. そして, データの量あるいは質的な制約が大きい場合には, このような ignorance の影響はより顕著となる.

このような状況において, 地球統計学的手法をファジー理論的な観点から拡張し, ignorance と variability に起因する複合的な不確実性を評価することを可能とした手法が, Bardossy 等によるファジークリッギング[8]である. この手法は, ある特性値についての直接的な測定データ(ハードデータと呼ばれる)や, 間接的なデータに基づく推定結果(ソフトデータ)といった信頼性の異なる種々のデータをファジー数として表現した上で, その空間的分布に基づき, 通常は 1 つの曲線として表現されるバリオグラムをファジー化するものである.

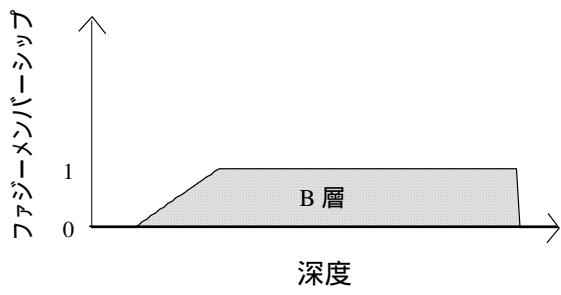
(1) 実験的バリオグラムのファジー化

ここでは, まず, 以下の方法で実験的バリオグラムをファジー化する.

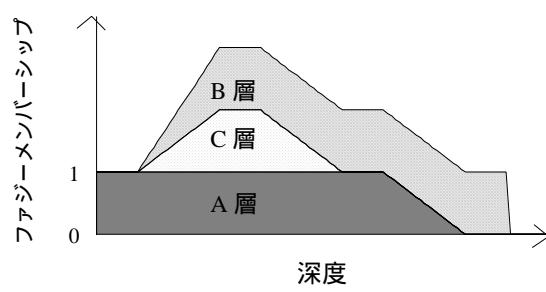
- 各地点での(種々の方法によって測定あるいは推定された)データをファジー化し, 位置 x での特性値が $z(x)$ であることのファジーメンバーシップ関数 $\mu(x, z(x))$ として表す.
- 有限個の測定地点 x_i における当該特性の値を, ファジーメンバーシップ関数 $\mu(x_i, z(x_i))$ が非零で



(a) Fuzzy membership function of layer A



(b) Fuzzy membership function of layer B



(c) Sum of the fuzzy membership functions

Fig.3 Fuzzy membership function describing the depth range of each layer's existence

ある範囲からランダムにサンプリングすることにより多数のデータセットを作成する。

- (iii) 作成された各データセットのファジーメンバーシップは、含まれるデータ点の中で最もファジーメンバーシップの低いものによって規定されると考え、

$$\mu_k = \min_i [\mu(x_i, z^k(x_i))] \text{ と定義する。}$$

- (iv) 離間距離 h においてバリオグラムが となることのファジーメンバーシップは、これに該当するデータセットが複数ある場合、その中で最大の値によって代表されると考え、

$$\mu(\gamma(h)) = \max_k [\mu_k] \text{ と定義する。}$$

以上によって、ファジー数として与えられる実測データセットに対応する実験的バリオグラムのファジーメンバーシップ関数は次の Min-Max ルールにより表現されることとなる。

$$\mu(\gamma(h)) = \max_k \left\{ \min_i [\mu(x_i, z^k(x_i))] \right\} \quad (2)$$

ただし、 k は、 $\gamma(h) = \frac{1}{2N^k(h)} \sum_{|x_i - x_j|=h} |z^k(x_i) - z^k(x_j)|^2$ を満足するすべてのリアライゼーションに対応する。

(2)式は、ある離間距離 h における実験的バリオグラムの値がひとつには決まらず、 $\mu(\gamma(h))$ というメンバーシップ関数によって示される分布 (Fig.4 参照) を有することを意味している。

なお、実際の解析においては、(2)式をそのまま用いるのではなく、以下の手順で、注目するメンバーシップレベルにおけるバリオグラムの変動範囲 (Fig.4 参照、図中の上下の等高線ではさまれた領域) を算出する。バリオグラムの変動範囲を算出するにあたり、東濃鉱山周辺での不均一な透水係数分布に関して用いた具体的な算出方法を以下に示す (Fig.5 参照)。

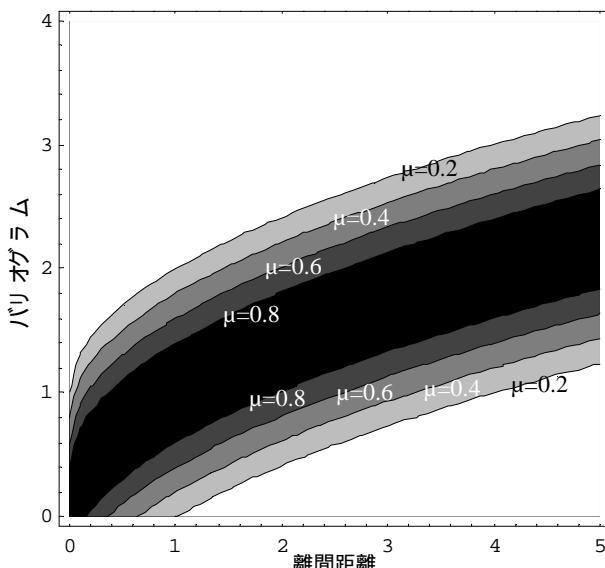


Fig.4 An example of a fuzzy variogram.

- (i) 各地点での透水係数測定結果を、測定誤差を考慮してファジーメンバーシップ関数として設定する (Fig.5(a)参照)。具体的にファジーメンバーシップ関数は、確からしさ (例えば、確からしさを 3段階に区分した場合, $\mu = 1.0$:最も確からしく、考慮しなければならない, $\mu = 0.5$:考慮したほうが良い, $\mu = 0.0$:可能性が低いが否定できない) に応じてインタビューにより設定する。

- (ii) 次に、各測定地点における透水係数値を着目するメンバーシップレベルにおける数値の範囲 (Fig.5(a)参照) からランダムにサンプリングし、多数のデータセットを作成する。

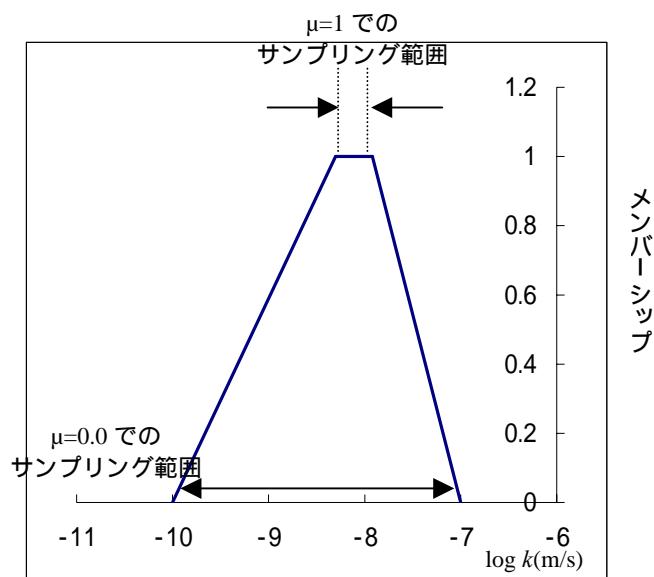
- (iii) 作成した各データセットにおいて、離間距離が $h+dh$ と $h-dh$ の間にあるすべての点組からバリオグラムを(1)式によって算出する。

- (iv) すべてのデータセットにおける離間距離 ($h+dh$, $h-dh$) のバリオグラムの最大値と最小値を算出することによって、当該メンバーシップレベルにおけるバリオグラムの変動範囲を求める (Fig.5(b) および(c) 参照)。

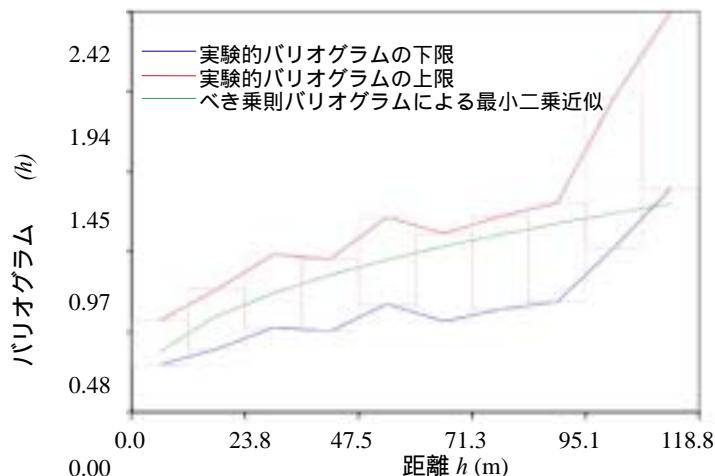
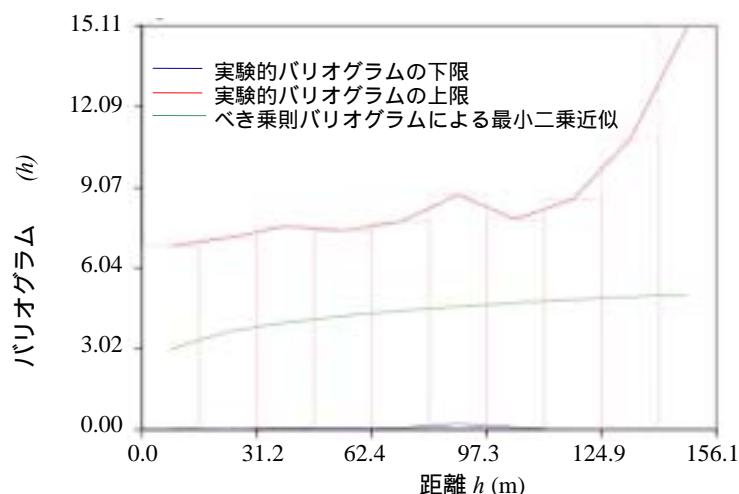
(2) 各メンバーシップレベルでのクリッギング

ファジークリッギングでは、実験的バリオグラムがこのようにメンバーシップレベルによって異なることから、対応する理論的バリオグラムもひとつには決定されない [8]。によるファジークリッギングでは、上記手順のうち iii) で算出される (あるメンバーシップレベルでの) 全リアライゼーションについての実験的バリオグラムに対して、理論的なバリオグラムモデルを最小二乗フィッティングすることにより、当該メンバーシップレベルでのクリッギングに用いるバリオグラムを設定する。バリオグラムのフィッティングの際には、想定される複数の理論的バリオグラムモデルも考慮することも可能である。そして次に、注目するメンバーシップレベルにおける各測定地点での特性値の変動範囲の上限から成るデータセットと下限から成るデータセットを作成し、それぞれについて上記で求めたバリオグラムモデルを用いてクリッギングを行うことによって、ignorance による不確実性の影響の両端を把握する。

東濃鉱山周辺の透水係数データから算出されたファジー実験バリオグラムに対してべき乗則モデルを最小二乗フィッティングして求めたバリオグラムモデルを Fig.5(b) および(c) に示す。また、このバリオグラムモデルを用いて行ったファジークリッギング結果の例を Fig.6(a) に示す。ファジークリッギングにおいては、各メンバーシップレベルにおいて、通常のクリッギングと同様、クリッギング標準偏差の空間分布として variability に対する内挿の不確実性が表現される (Fig.6(b) 右側参照) のに加えて、クリッギングに用いるデータセットを上限値とした場合と下限値



(a) An example of the fuzzy membership distribution of permeability considering errors in permeability obtained from hydraulic tests.

(b) Variation in the range of the experimental variogram in the case where $\mu = 1.0$.(c) Variation in the range of the experimental variogram in the case where $\mu = 0.0$.**Fig.5 Fuzzy data set and corresponding variogram of rock permeability around the Tono mine area.**

地質環境特性評価の不確実性解析手法に関する検討 variability と ignorance を考慮した不確実性解析の方法論の構築および東濃地域への適用

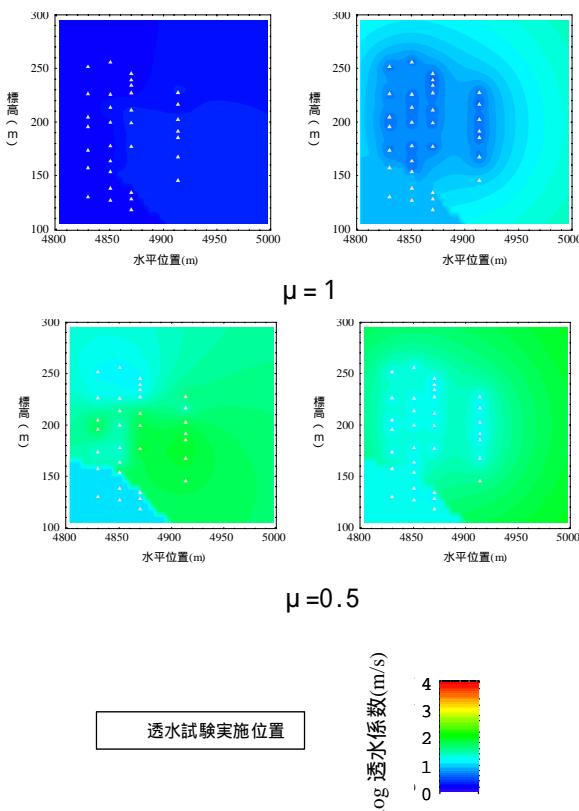
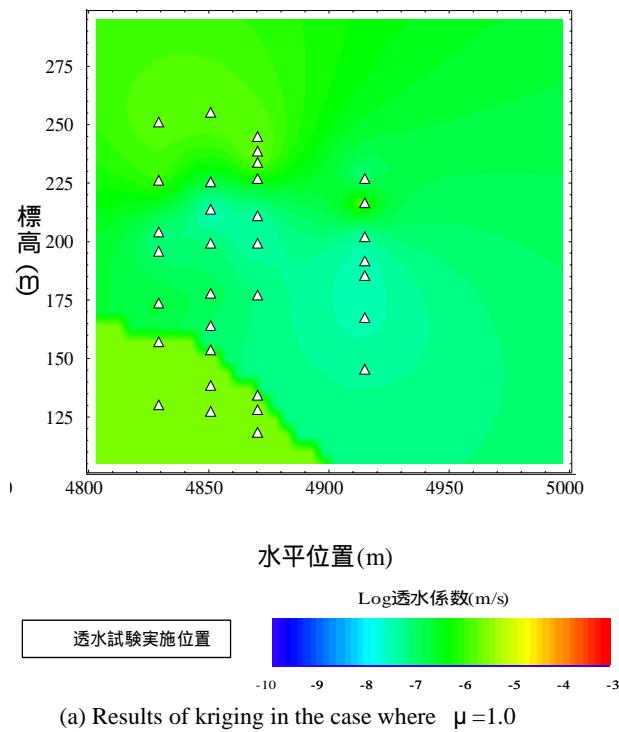


Fig.6 An example of fuzzy kriging of heterogeneous rock permeability in the Tono mine area.

とした場合の差(ファジー変動幅 , Fig.6(b)左側参照)によってもともとのデータセット自体の不確実性やバリオグラムの不確実性といった ignorance が表現されることとなる . また , 同様に , 各メンバーシップレベルでのバリオグラムモデルおよびデータセットの変動範囲を用いて地球統計学的シミュレーションを行うことも可能であり , この場合には , データセットに関する多数のリアライゼーションについて , それぞれ , 多数のコンディショニング (variogram の特性を変化させることなく実測地点での値を整合させる手法)された透水係数場を作成し , これらの全体を比較することによって , variability および ignorance に起因する不確実性を併せて把握することが可能となる (一例として , Fig.7 参照).

4 不均一な地質環境特性に含まれる不確実性低減のための方法論

地層処分研究開発および事業の各段階において性能評価に含まれる不確実性を低減するためには , 1 章で示したように不均一な透水係数分布等の地質環境特性についての理解に含まれる不確実性を把握し , 効率的な調査・試験を行うことにより不確実性を低減することが重要な課題の一つとして求められている . この具体的な方策として , 各調査段階での調査データを用いて最も確からしいと考えられる概念モデルやパラメータ値等のみを想定する方

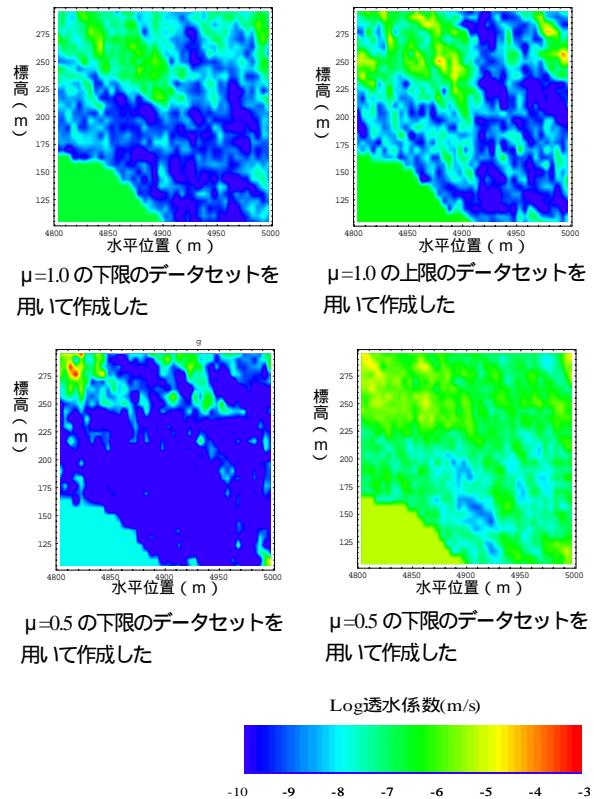


Fig.7 Examples of fuzzy simulations of heterogeneous rock permeability in the Tono mine area.

法では, ignorance に関する不確実性を考慮できず, 不確実性の大きさの過小評価をすることに繋がるため, 本報文では, 初期の段階において対象地点で可能性のある概念モデルやパラメータ値等の範囲を幅広く想定しておき, 調査の進捗に応じた新たな知見に基づき否定できる選択肢をスクリーニングしていくという消去法的な進め方が適切と考えている. よって, この考えに基づき東濃地域において適用した事例を示す. ただし, 注意すべきことは, 地質環境調査の目的を不確実性を無くすことと考えた場合, 当然のことながら不確実性を完全に無くすることは不可能なため, 地質環境調査が終わりのないものとなってしまう可能性があるということである. このような状況を回避するためには, 不確実性低減のために, 例えば人工バリア設計との関係も含め, 「合理的に達成可能な方策」の範囲を具体的に示すことが必要となる.

5 東濃地域における不均一な透水係数分布への不確実性解析手法の適用

以下に述べる東濃地域における例題は, 例題を通じて手法の具体化を図るとともにその適用性について検討を加えることを目的とするものである. 東濃地域においては, 地層科学研究が多年にわたって実施されてきており, このような基盤的研究の成果として極めて広範かつ多様なデータや情報が得られている. このため, 例えば, 透水係数の空間的不均一性の把握という特定の目的を想定した場合に, 既存の調査結果を時系列的に種々に並べ替えてみると, 「どのようなデータをどのような順序で取得することが合理的なのか」という問い合わせに答えるためのケーススタディーを行うことが可能である. ここで, 各段階でのデータや情報の価値を測る尺度が, 地質環境調査の成果に含まれる不確実性である. 具体的には, 性能評価を見据え, これらのデータや情報に基づき構築される水理地質構造モデルから出力される評価指標(例えば, 地下水移行時間等)の不確実性の大きさである. つまり, 上述した不確実性解析の手法を, 時系列的に並べ替えた過去の各段階での調査結果に基づく水理地質構造モデルに適用することによって, 新たに取得されるデータや情報の価値を, これらが「どの程度不確実性を低減させるか」という観点から評価することが可能となる.

(1) 解析の手順

今回の東濃地域を例とした解析において対象とした領域は, 東濃地域の約 $6\text{km} \times 4\text{km}$ の領域(以下, 中域と呼ぶ)およびその内部にあって東濃鉱山近傍約 300m の領域(小域)である(Fig.8 参照). 解析に際しては, 簡略化のため, 主流動方向に沿った鉛直二次元断面を考えることとし, また, 不確実性解析の対象とする性能評価関連の出力としては,



国土地理院発行 20万分の1地勢図 豊橋・飯田に加筆

Fig.8 Schematic view of the simulation area.

・小域内の算術平均流速
 ・小域内の基準点を通過する地下水の流出方向
 ・小域内の基準点から境界までの地下水移行時間

を考えることとした. 中域における地下水流动解析の境界条件の設定や地質学的層区分といった前提条件に関しては, 中域を含む約 30km 四方の広域を視野に入れて検討を行った. 調査段階としては, 中域に関して 4 段階, 小域に関して 1 段階の合計 5 段階を想定し, 調査の進捗に応じて徐々にデータの質および量が向上するという時系列的な調査シナリオを想定した (Fig.9 参照).

まず, 中域に関しては, 着目する鉛直二次元断面において, 各調査段階において入手可能な情報のみに基づいて推

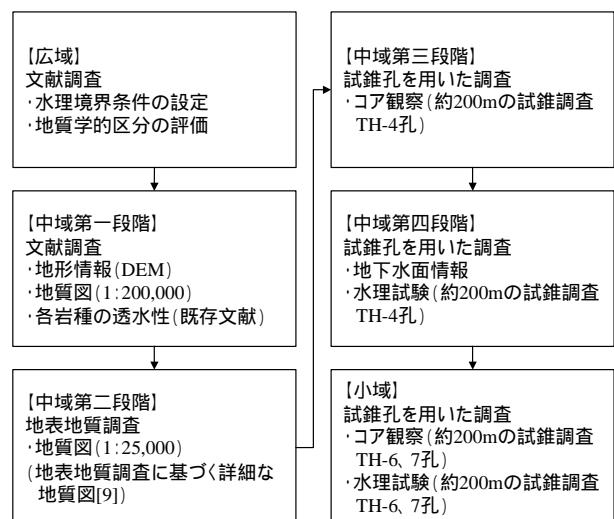


Fig.9 Progressive stepwise focusing of investigations and the data obtained from each step.

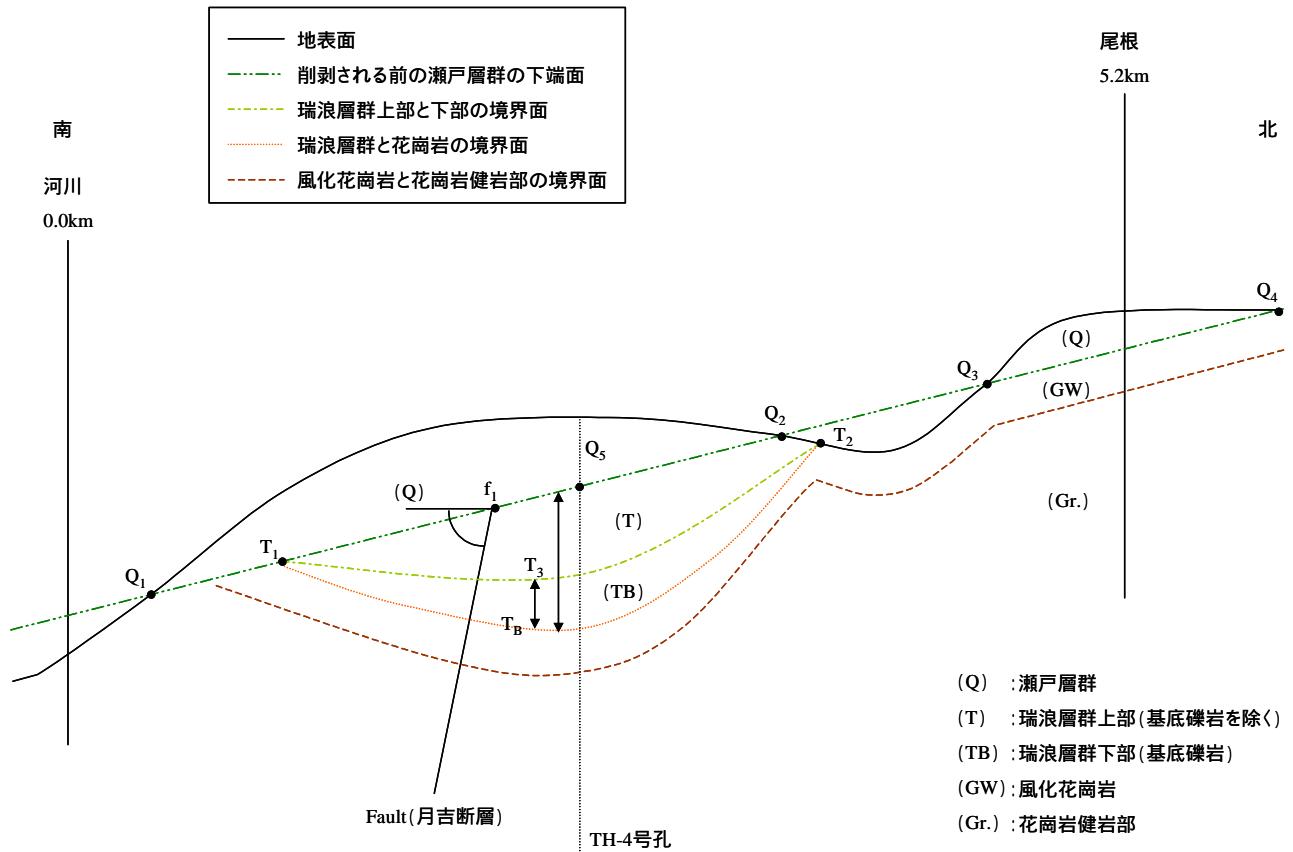


Fig.10 Schematic view of the assumed hydrogeological model in the central area.

定可能な水理地質構造の範囲を想定することとした。なお、このスケールでは透水係数の詳細な不均一性が問題になるとは考えにくいことから、各水理地質構造区分における透水性は均一と仮定した。各段階で考慮した水理地質構造区分を Fig.10 にまとめる。このうち、瀬戸層群(新第三系鮮新統:主に礫岩)、瑞浪層群上部(基底礫岩を除く部分)、新第三系中新統:主に砂岩・泥岩)、および花崗岩は第一段階から既にその存在が知られているが、瑞浪層群下部(基底礫岩、新第三紀系中新統)および風化花崗岩については第一段階の情報からは推定されず、第二段階において取得されるものとした。次に、Table 1 にまとめた各パラメータについて、可能性があると考えられる数値の範囲を、各調査段階において入手可能な情報 Fig.9 を参照しつつ該当するエリアの地質調査に携わった専門家にインタビューすることによって設定した。なお、この際、それぞれの数値を考慮すべきことに関する確信の程度を併せてインタビューすることにより、Fig.11 に示すように、各段階におけるパラメータのファジーメンバーシップ関数を定義した。なお、Fig.11 に示した例のうち各水理地質構造区分における透水係数は、中域調査の段階においては、各岩種について文献調査で把握されたわが国全体の分布範囲を適用しているために、非常に大きな不確実性を有するものとなっている。

インタビュー結果に基づき Table 1 に示した各入力パラメータのファジーメンバーシップ関数を定義した後、不確実な入力パラメータ値の範囲からランダムサンプリングを行い、これらを組み合わせることによって多数(約 1,000 ケース)の水理地質構造モデルを作成した。さらに、それぞれの作成された水理地質構造モデルについて飽和定常地下水流动解析および基準点からのパーティクルトラッ

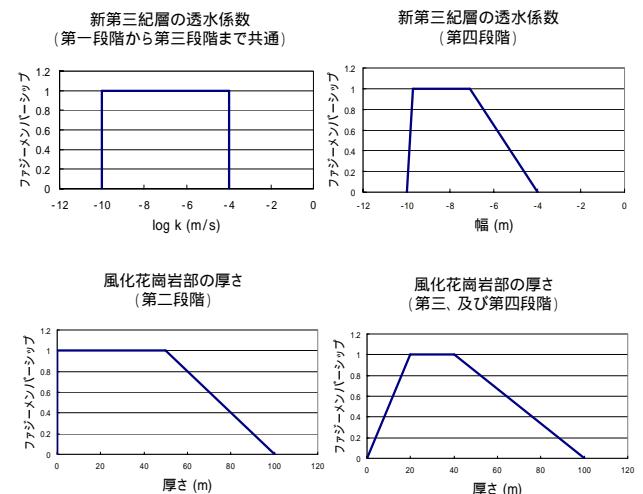


Fig.11 Examples of fuzzy membership functions of the input parameters based on interviews.

Table1 Input parameters connected with the hydrogeological model for the central area.

| | | | |
|----------------|-------------|----------------|----------|
| Q ₁ | 南側瀬戸層群南端座標 | T ₁ | 瑞浪層群上部南端 |
| Q ₂ | 南側瀬戸層群北端座標 | T ₂ | 瑞浪層群上部北端 |
| Q ₃ | 北側瀬戸層群南端座標 | T ₃ | 瑞浪層群上部厚さ |
| Q ₄ | 北側瀬戸層群北端座標 | T _B | 瑞浪層群下部厚さ |
| Q ₅ | 瑞浪層群上部最深部標高 | f ₄ | 断層位置 |
| | | | 断層角度 |

キングを実施することにより、中域の水理地質構造に関する不確実性が小域内での前出の3つの性能評価関連の出力にどのような影響を与えるかを把握するとともに、引き続いて行う小域における水理解析の境界条件を設定した。なお、地下水水流動解析には、水頭および流束の両者に関して同時に精度の高い求解法である Mixed Finite Element 法に基づく解析コード MaTADoR[10]を用いた。

中域スケールでの地下水水流動解析では、小域内の透水係数の不均一性は考慮されていないが、実際にはこれが小域内での地下水流向や地下水移行時間に影響を与える可能性が考えられる。そこで、小域の解析においては、中域の個々に生成した透水係数場に関する地下水水流動解析結果から小域に該当する部分の領域の境界条件（水頭分布）を抽出し、小域内の瑞浪層群の透水係数の不均一性を考慮した解析を行った。小域内の不均一な透水係数分布の設定にあたっては、TH-4, -6, -7 の3本の試錐孔に沿って行われた透水試験結果からファジーバリオグラムを推定し、これを用いてファジーシミュレーションにより多数の統計的に等しい不均一な透水係数分布を作成した。さらに、中域の場合と同じく、それぞれ作成された不均一な透水係数分布について飽和定常地下水水流動解析および基準点からのパーティクルトラッキングを行った。この結果として、水理地質構造として決定論的に表現される比較的大きなスケールの不均一性、地球統計学的なシミュレーションによって表現されるより小規模の variability、そしてこれらの表現に必要な情報が必ずしも十分ではないことに対応する ignorance という主要な不確実性要因に起因して、先に述べた3つの性能評価関連の出力にどの程度の不確実性が含まれるかを算出することとした。なお、東濃地域の瑞浪層群の透水係数の不均一性は、べき乗則のバリオグラム（自己アファインフラクタルモデル）によって近似し得るという既往の研究例[2]を参考として、ここでも同じタイプのバリオグラムを用いることとした。また、関連するパラメータとして、瑞浪層群の透水係数の異方性を縦横比として表現することとし、さらに、一旦作成した瑞浪層群の不均一な透水係数分布を、小域内に存在する月吉断層に沿って変位を生じさせることにより、同断層による地層のずれを表現することとした。なお、これらのパラメータ（透水

係数相関長の縦横比、および月吉断層の変位量）についても、同地域における種々の地質学的情報および類似した地質環境での情報を参考としてインタビューによりファジーメンバーシップ分布を設定することとした。

(2) 中域についての解析結果

各調査段階での ignorance に関する不確実性を反映して、中域の水理地質構造モデルはひとつに決定されず、幅広い選択肢が残されることとなる。ここでは、前項で述べた専門家へのインタビューによって設定された水理地質構造モデルに関連する各パラメータのファジーメンバーシップ関数からランダムに数値をサンプリングし、これらを組み合わせて描画することによって多数の水理地質構造モデルの候補を作成した。Fig.12 に、各調査段階での水理地質構造モデルの多様性を、候補となるモデルを例示することによって示す。また、Fig.13 は、各調査段階における水理地質構造モデルの候補を個別に表示するのではなく、複



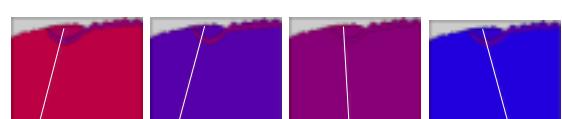
第一段階（全体が低透水性、全体が高透水性、堆積層が低透水性+花崗岩が高透水性、堆積層が高透水性+花崗岩が低透水性であることを特徴とする概念モデル）



第二段階（堆積層が厚い+瀬戸層が低透水性、堆積層が厚い+瀬戸層が高透水性、堆積層が薄い+瀬戸層が低透水性、堆積層が薄い+瀬戸層が高透水性であることを特徴とする概念モデル）



第三段階（堆積層が高透水性+断層が南に傾斜、堆積層が低透水性+断層が南に傾斜、堆積層が高透水性+断層が北に傾斜、堆積層が低透水性+断層が北に傾斜であることを特徴とする概念モデル）



第四段階（堆積層が高透水性+断層が南に傾斜、堆積層が低透水性+断層が南に傾斜、堆積層が高透水性+断層が北に傾斜、堆積層が低透水性+断層が北に傾斜であることを特徴とする概念モデル）



Fig12 The variation in the hydraulic model at each stage of the investigation.

地質環境特性評価の不確実性解析手法に関する検討
variability と ignorance を考慮した不確実性解析の方法論の構築および東濃地域への適用

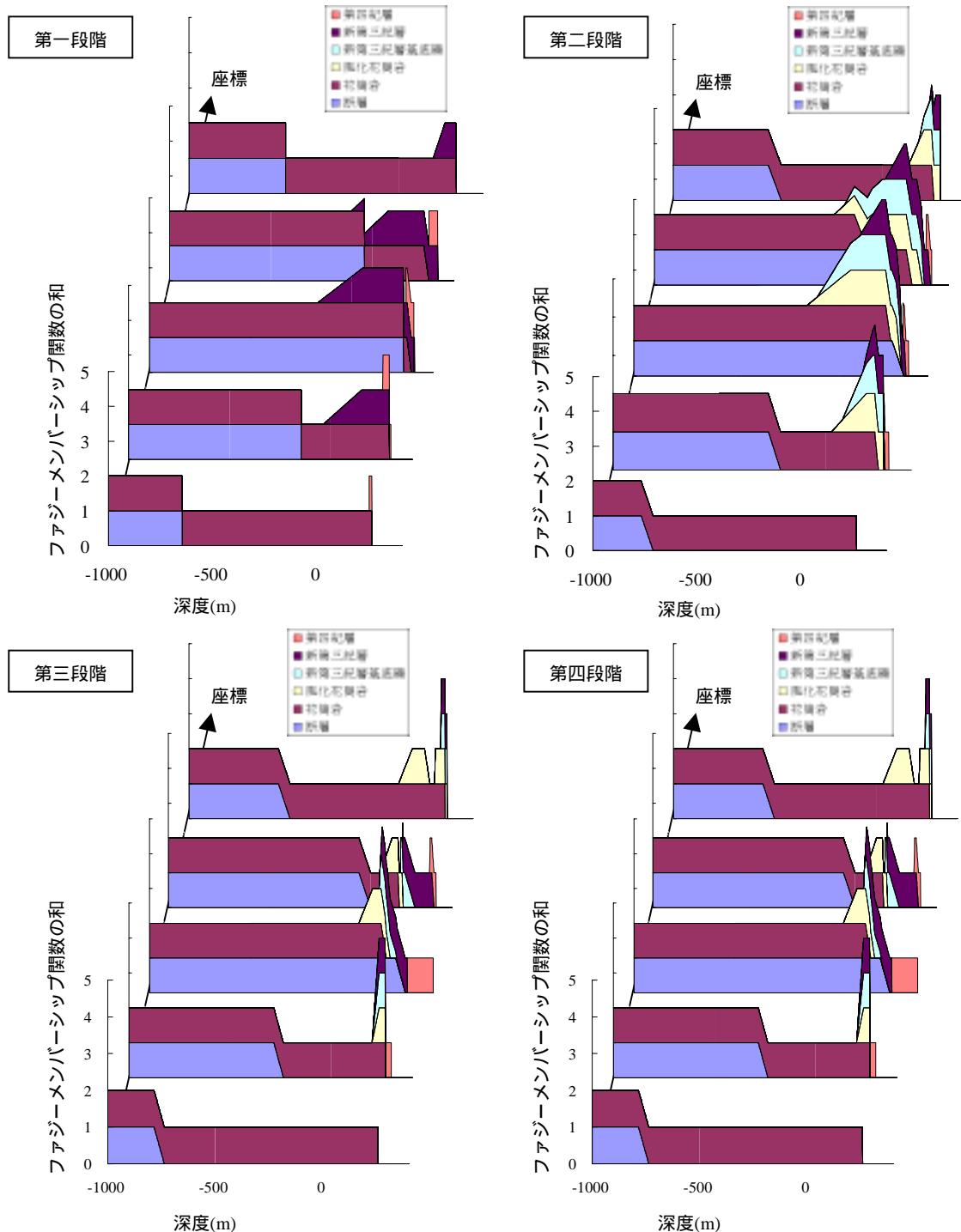


Fig13 The uncertainty in the hydraulic model expressed by fuzzy membership.

数の層の存在可能性や層境界位置の曖昧さをファジーメンバーシップによって表現したものである。この図では、ある地点(深度)がどの層に属するかをひとつに決定できない箇所においてそれぞれの候補のメンバーシップが累積されるために、その合計が1を超えるものとして表示されている。また、このような箇所において、断面に見られる複数の色は、当該位置において否定できない地層の種類に対応している。Fig.14に示す調査の各段階における花崗岩と堆積岩との間の不整合面の深度に関する不確実性のように、一般に、調査の進捗に伴い情報量が増すことによ

って ignorance は減少し、考慮すべき(あるいは否定できない)モデルの範囲は絞り込まれることとなる。しかしながら、風化花崗岩や瑞浪層群下部の基底礫岩のように調査の途中段階で初めてその存在が認識されるものもあり、必ずしも、不確実性の影響は時系列的に単調に減少するとは限らないことに注意を要する。

統計的に多数作成された中域の水理地質構造モデルのそれぞれについて地下水流动解析を行った結果(小域内の平均地下水流速および流向)を第四段階を例として Fig.15 に示す。各水理地質構造区分についての透水係数値が顕著

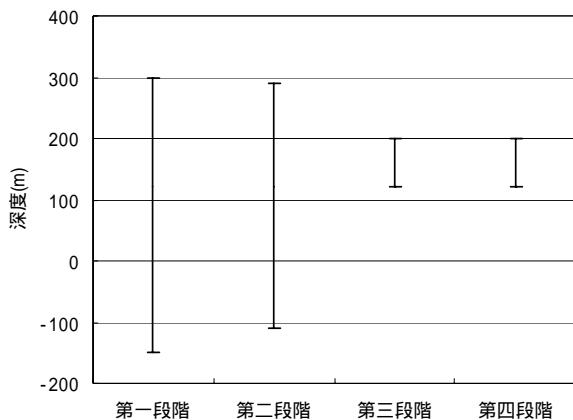


Fig.14 The change in uncertainty of the depth of the granite surface with respect to the progress of the investigations.

な不確実性を有しているために、各メンバーシップレベルにおいて平均透水係数はほぼ同様に幅広い範囲にわたって変動している。また、小域内の地下水流向としては、南向き (Fig.16においては左向き) および下向きとなるものが支配的となっている。そこで、小域の南側の端 (左側の端) から流出するグループを南向き流れのグループ、小域の下側の端から流出するグループを下向き流れのグループとして、それぞれのグループについて、各入力パラメータ値のグループ内平均値を算出し、これらと全体集合の平均値とを比較してその差異に関する二乗検定を行って、流向を規定する支配的な要因を抽出した。その結果は、次のようにまとめることができる。

南向きの流れが卓越する水理地質構造モデルのグループは、

- ・瀬戸層群の透水性が小さい
- ・花崗岩の透水性が大きい

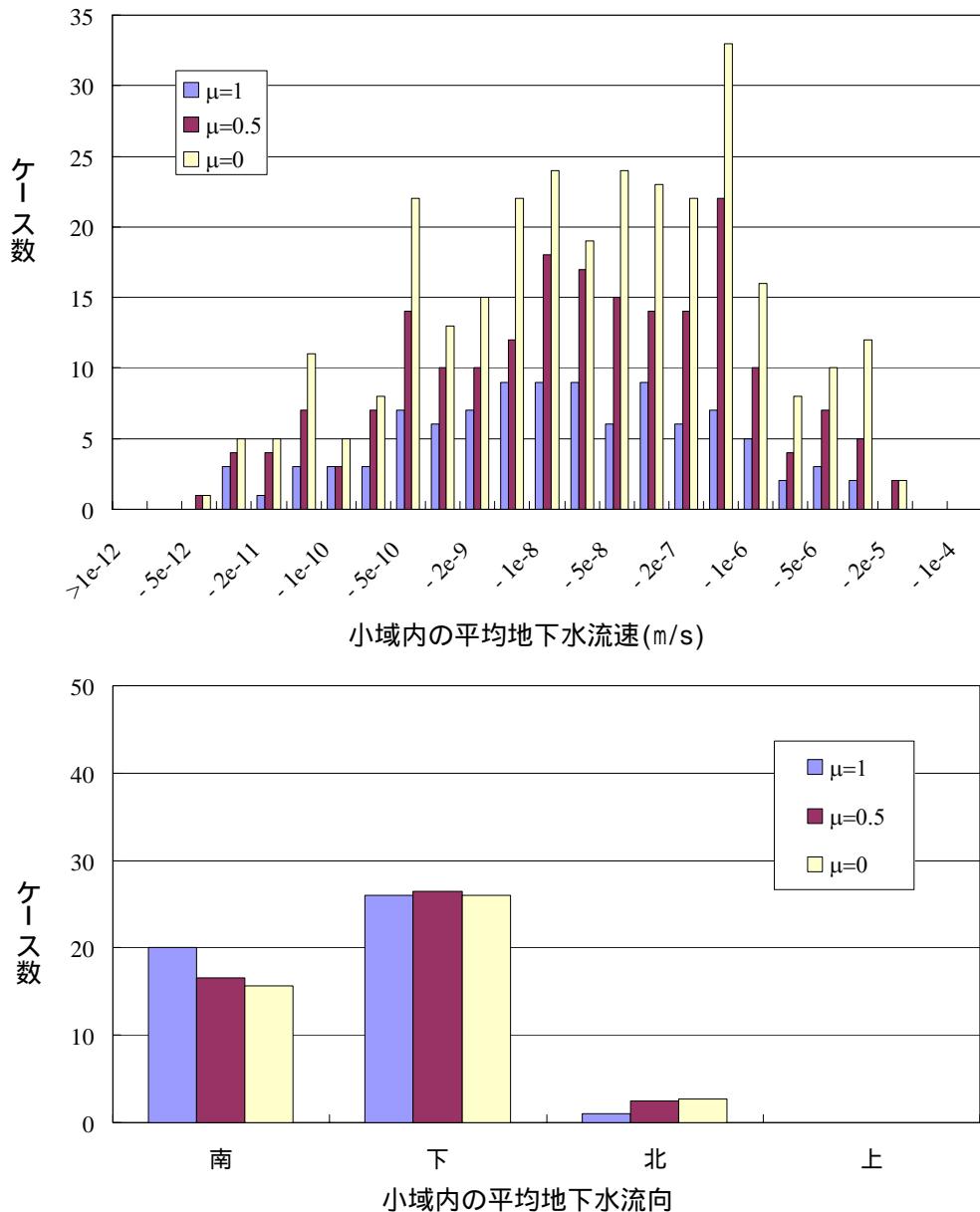
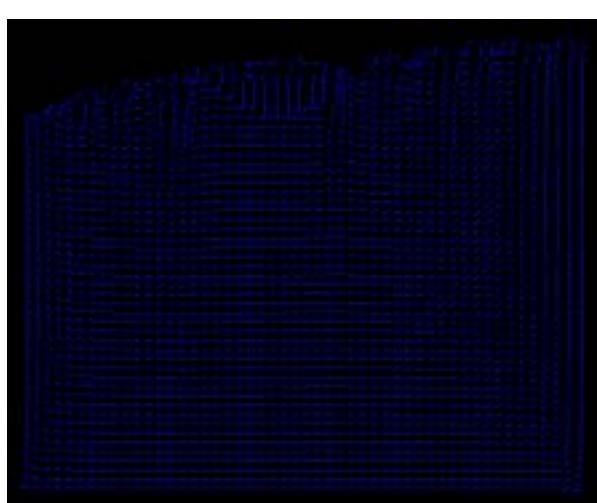
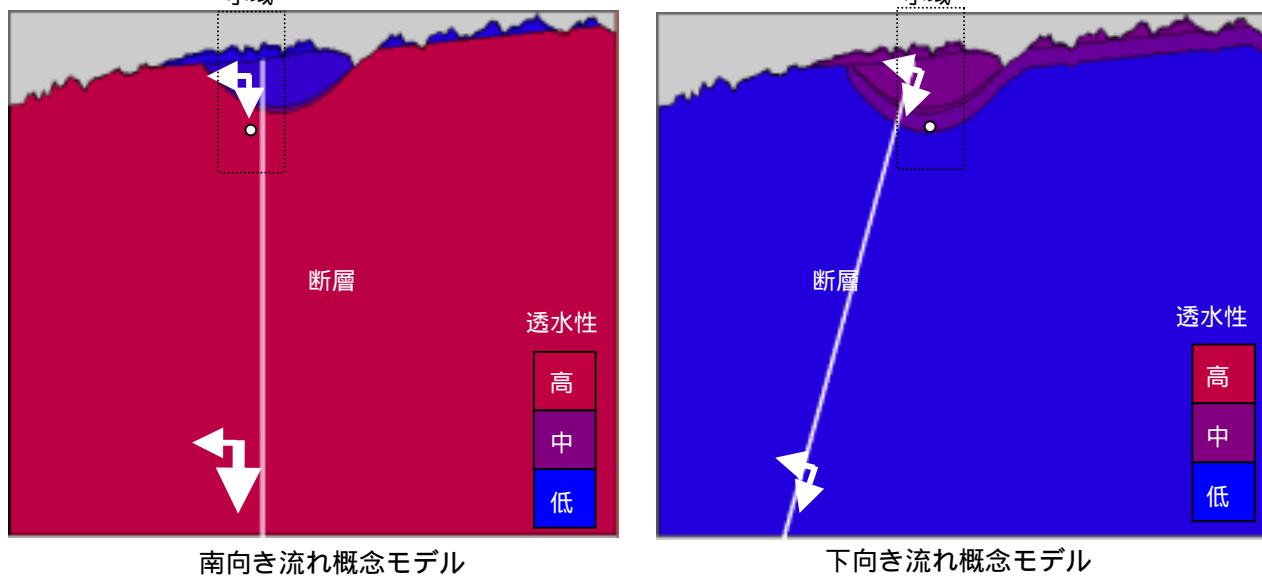
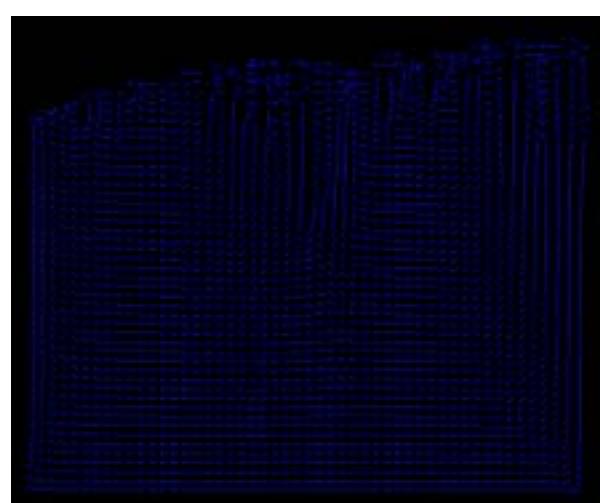


Fig.15 Examples of results from the hydraulic analysis of the central area.



南向き流れ流速図



下向き流れ流速図

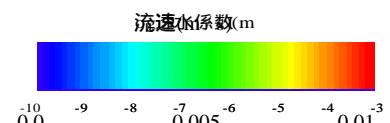


Fig.16 Typical hydraulic models of southward and downward flow.

- ・断層の幅が小さい

という共通の特徴を有しており、このため、緩やかに南に傾斜した大域的な地形に支配された水平に近い南向きの流れが小域を横断している。

下向きの流れが卓越する水理地質構造モデルのグループは、逆に、

- ・瀬戸層群および瑞浪層群の透水性が大きい
- ・花崗岩の透水性が小さい
- ・断層の幅が大きい

という共通の特徴を有しており、このため小域の北側にある丘陵から涵養された流れが深部におよび、かつまた、規

模の大きい断層によってせき止められ小域近傍において下方に潜り込んでいる。

以上の共通の特徴に関連したパラメータの各グループ内平均値を用いて作成した南向きおよび下向き流れそれぞれのグループの平均的な水理地質構造モデルを Fig.16 に示す。

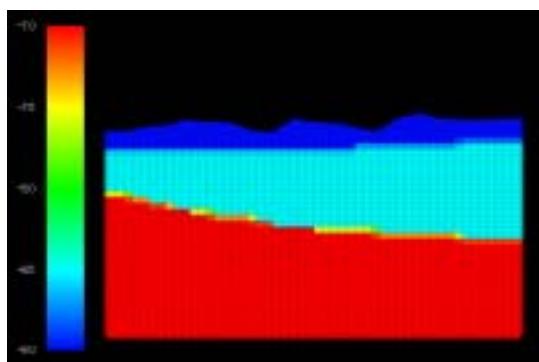
(3) 小域についての解析結果

既に述べたように、小域についての解析の主眼は、中域における解析では考慮されていなかったより詳細なスケールでの透水係数分布の不均一性が、性能評価に関連する

出力, とくに小域における地下水流向および地下水移行時間に与える影響を把握することにある. この目的のために, 中域についての地下水流动解析ケースのうちいくつかの例について, 多数の不均一な透水係数分布を作成した. 中域の解析に用いた透水係数分布(水理地質構造内が均一場)および上述した相関長の縦横比および断層に沿った変位量を種々に変化させて作成した小域瑞浪層群内の不均一な透水係数分布の例を Fig.17 に示す.

各透水係数分布に対応する地下水流动場において行ったパーティクルトラッキングの結果を Fig.18 にまとめる. 中域解析における均一場ではひとつに確定していた粒跡線が, 小域の不均一性を考慮した解析においては, この附加的な不確実性のためにばらつきを有していることがわかる. なお, ここで, 各不均一場ケース(Fig.18 の(b)~(e))

内の流跡線のばらつきは不均一場の variability に関する不確実性に, また, ケース間の差異は, 不均一場の特徴を規定する相関長の縦横比および断層に沿った変位量といった, 本来は決定論的に定まるべきパラメータ値に関する ignorance に関する不確実性にそれぞれ対応している. もう一つの関連する指標である小域内の地下水移行時間に関する解析結果は Fig.19 に示す通りである. ここでは, 小域の不均一性に関連した不確実性(variability および ignorance)の影響はより顕著である. なお, ここでも, 各不均一性ケース内のばらつき(Fig.19 中の同色のヒストグラムの分布)は variability に関する不確実性を, また, 異なる不均一性ケース間のばらつき(Fig.19 中の異なる色のヒストグラム間の差異)は ignorance による不確実性を表現している. このような観点からは, 相関長の縦横比 1:10



(a) 中域解析に用いた均一場(瑞浪層群内)

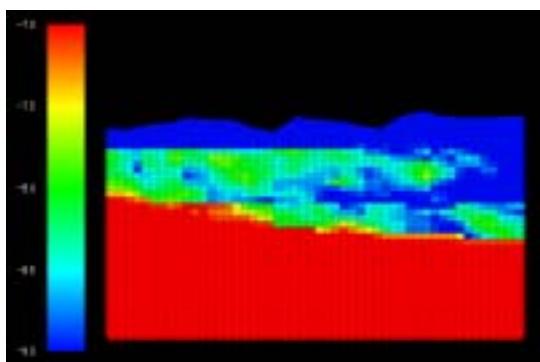
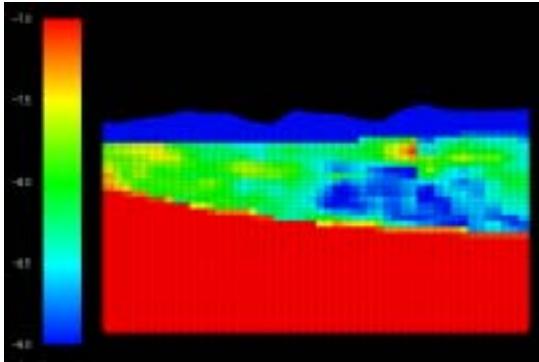
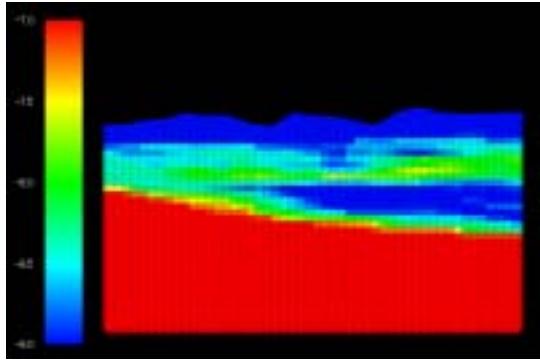
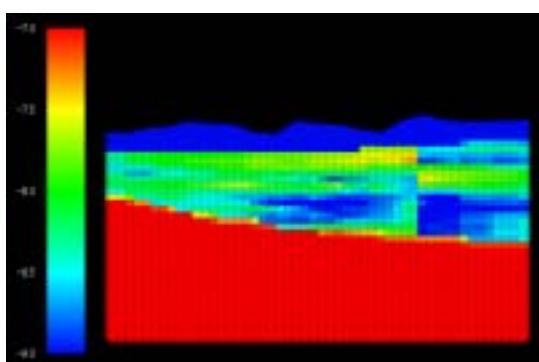
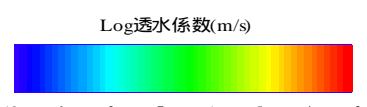
(b) 不均一場
(瑞浪層群内、相関長縦横比 1:2, 断層変位量 0m)(c) 不均一場
(瑞浪層群内、相関長縦横比 1:2, 断層変位量 30m)(d) 不均一場
(瑞浪層群内、相関長縦横比 1:10, 断層変位量 0m)(e) 不均一場
(瑞浪層群内、相関長縦横比 1:10, 断層変位量 30m)

Fig.17 Examples of heterogeneous permeability in the sub-area.

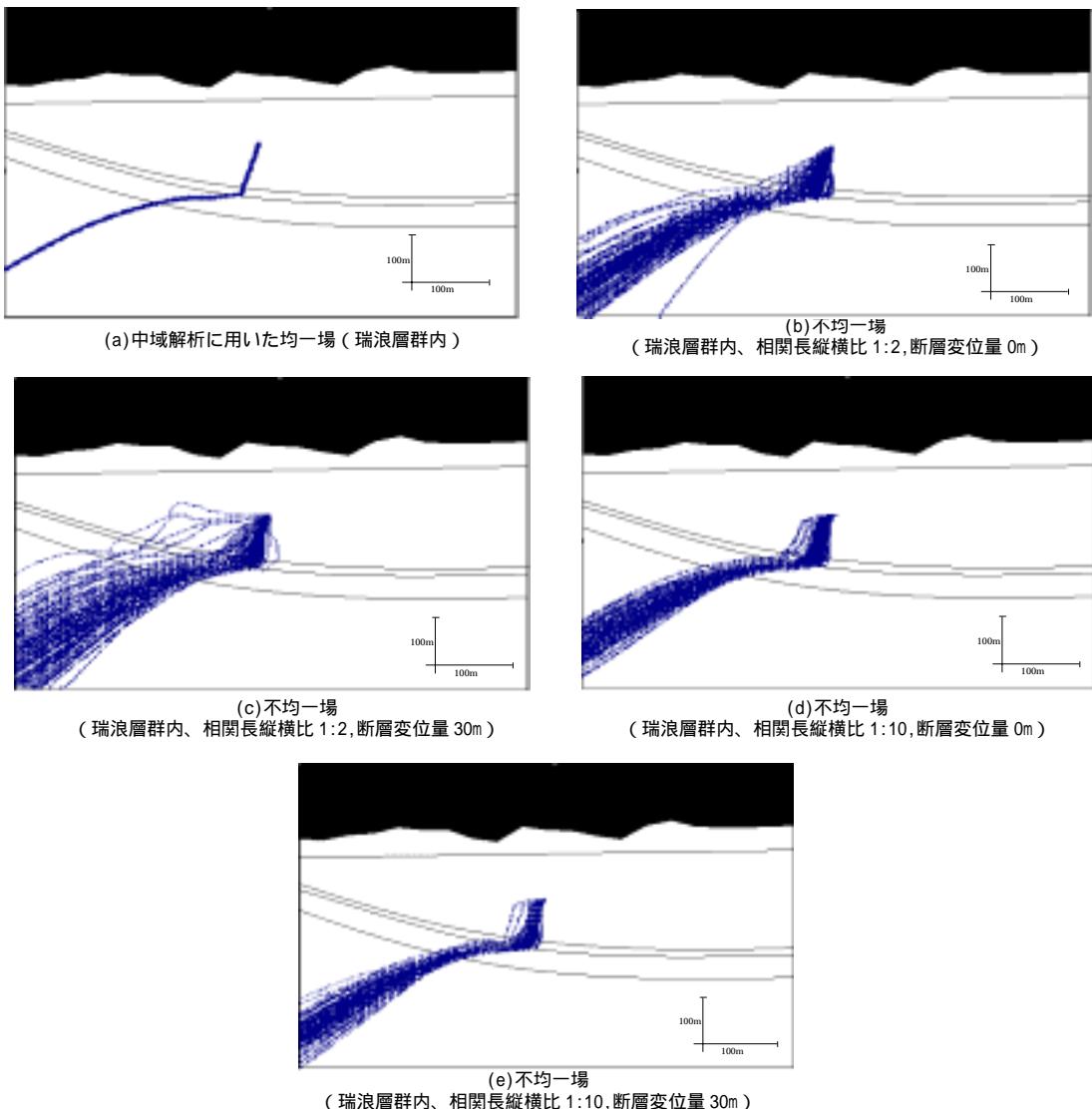


Fig.18 Results of particle tracking.

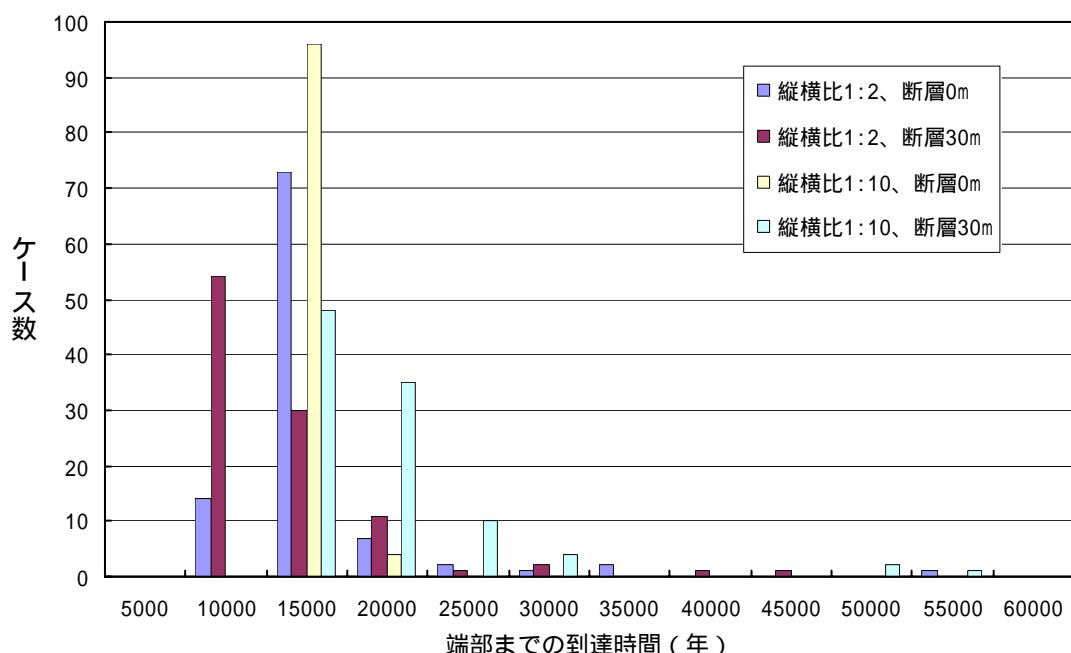


Fig.19 Transit times for underground water in the sub-area.

で断層変位量 0m のケースでは variability が小さく、小域内の地下水移行時間（ダルシー流速に基づき算出したもの、実際の移行時間はこれに実効空隙率を乗じたものとなる）は 15,000 年～20,000 年程度に限定されているのに対して、他のケースでは variability の影響はより顕著であり、相関長の縦横比が 1:2 の場合には移行時間が相対的に短く、相関長の縦横比が 1:10 で断層変位量が 30m の場合には移行時間が増大するという傾向を呈することに留意する必要がある。このように、ignorance に関する不確実性が、選定された指標に対してシステムティックな影響を有することは、引き続く段階においてこれらを低減するための調査を計画することの重要性を示すものと考えることができる。

6 まとめおよび今後の課題

想定し得る（あるいは否定できない）モデルやデータセットの全体集合を考えることによって調査の各段階における不確実性を明らかにしつつ、これをさらに絞り込むために次段階の調査計画を立案するという新たな方法論を、東濃地域を例として適用した。この結果、調査の各段階において残される不確実性が、地下水流動解析においてどの様に伝播し、性能評価に関連する指標として選定した小域内の地下水平均流速、流向、および移行時間に関する不確実性をもたらすかを、不均一場を規定する地質学的プロセス自体のランダムさである variability と我々の知り得た情報に限界があることに起因する ignorance のそれぞれに区分して定量的に表現可能であることが分かった。また、不確実性を表現するために行った多数の統計的な解析結果に対して感度解析や標本検定の手法を用いた分析を行うことによって、不確実性に支配的となる入力条件を同定することが可能であり、性能評価における重要な地質要因の指標が明確となることが分かった。また、各段階での性能評価に含まれる不確実性を効率的に減らしていくためには、このような知見を次段階の調査計画立案に反映することが重要であると考えられる。また、本研究に関する今後の課題としては、以下が挙げられる。

将来の処分場サイトへの適用を考慮して本研究で提案した方法論をより体系的なものとすること。とくに、本報文では簡略化していた性能評価との連携や、直接的には検討を加えていなかった処分システム設計や地点選定との連携のあり方をより明確なものとすること。

解析対象をより現実的に取り扱うために、本報文で述べた不確実性解析の手法を、三次元水理地質構造モデルおよび対応する地下水流動解析に適用可能なように拡張すること

一つの現象（例えば地下水流動）に関する不確実性解析の結果に対して、他の独立した証拠（例えば地

下水水質、年代測定結果、等）との比較を行うことにより不確実な選択肢の絞込みを行う方法の開発、現在進行中の調査・試験を例として本手法を用いることによる計画立案支援（フォワードプランニング）への適用性の確認

なお、本研究で提案した消去法的な方法論自体は、各サイトにおいて最も確からしい地質構造モデルやデータセットのみを想定しこれを改良していくという個別的な方法とは異なり、各サイトの個別的な特徴にあまり依存せずある程度汎用的に構築可能なものと考えられる。このことから、上記のにおいては、わが国において地層処分サイトの候補となり得る地質環境を幅広く考え、必要に応じて体系化を行い、一般的な方法論を明らかにしていくことが重要と考えられる。また、現在計画されている深地層の研究施設は、このような方法論の試用と適用性の確認の場として用いることが可能と考えられる。

参考文献

- [1] OECD/NEA : Disposal of Radioactive Waste : Review of Safety Assessment Methods . OECD Publications, Paris(1991).
- [2] Clark, K., Takase H., Impey M., Humm, J., Maekawa K. and Yanagizawa K. : A Natural analogue study of uranium migration in the Tono mine . Proceedings of Material Research Society Symposium on the Scientific Basis for Nuclear Waste Management XIX 767-773 (1997).
- [3] International Commission on Radiological Protection : Radiation Protection Recommendations as applied to the Disposal of Long-lived Solid Radioactive Waste . ICRP Publication • 81, ICRP (2000).
- [4] Vesely, W.E., Rasmussen, D.M. : Uncertainties in Nuclear Probabilistic Risk Analysis . Risk Analysis 4 issue 4 (1984).
- [5] OECD/NEA : Uncertainty Analysis for Performance Assessments of Radioactive Waste Disposal Systems . Proceedings of an NEA Workshop (1987).
- [6] European Commision : Review on development of methodologies for modeling with uncertainty and variability: Munvar project . EUR16174EN (1995).
- [7] Chiles, J.P., Delfiner, P. : Geostatistics Modeling Spatial Uncertainty . John Wiley and Sons Inc. , New York (1999).
- [8] Bárdossy, A., Duckstein, L. : Fuzzy Rule-Based Modeling with Applications to Geophysical, Biological and Engineering Systems . CRC Press, Boca Raton (1995).
- [9] 糸魚川淳二 : 瑞浪地域の地質 . 瑞浪市化学博物館専報 1 , 1-50 (1980).
- [10] Benbow, 稲垣学 : MaTADoR ユーザーズマニュアル . クインテックサテクニカルレポート (2001).