8. 昨年度までのモデルに基づくモデルの更新と不確実性評価

8.1. 概念モデルの検討

8.1.1 不確実性評価の考え方

(1) 不確実性の抽出

不均一な地質環境のモデル化において，不確実性の存在は，概念モデルや数学モデルあるいはパラメータ値についての選択肢が一意に絞り込めないことを意味する。従って，不均一場のモデルについての不確実性の抽出とは，否定できない複数の選択肢とこれらの組み合わせを何らかの方法で網羅的に示すことである。ここで，一般にモデルの選択肢は離散的であり，パラメータの選択肢は連続的に分布する。ただし，パラメータの範囲を区分することで離散化することは可能である。

(2) 確からしさの表現

確からしさの表現とは，不確実性の存在によって派生する複数の選択肢が成立する可能性を相対的に比較することであり，ここで言う「確からしさ」は，頻度に基づく統計的記述，あるいは選択肢の派生に関係する現象についての理解（解釈）に基づく推論によって判断されることとなる。そして，この表現の信頼性は，統計的記述のベースとなる確率論的知識・情報の質あるいは解釈に基づく推論のベースとなる決定論的知識・情報の精緻さに帰結するものとなる。

(3) 統計的記述と決定論的推論

個々の不確実性要因に対して，統計的記述あるいは解釈に基づく推論という二つのアプローチのいずれを選ぶかは，結果として得られる表現の信頼性の観点から決定されることとなる。

乱流堆積物等のカオティックな現象を除いて，ある不均一な分布を示す地質環境特性は厳密な意味でのランダムプロセスではなく，異なる位置（同じ地層内の二点，同じサイトの別の地層での二点，類似した環境での二点）でのデータが同一の母集団に属するとは必ずしも言えない。つまり，多くの場合，不均一性を統計的に記述することは，現象の解釈に必要な情報が不足している際の便宜的な措置である。ただし，不均一性の要因を全て解釈することもまた一般には不可能であり，入手可能な情報量に応じた適切なレベルで解釈に基づく推論と統計的記述とが共存することが必要となる。

8.1.2 不均一地質環境の概念モデル構築手法の体系化

(1) 不均一地質環境モデル構築手法体系化の目標

不均一地質環境モデルの構築手法を体系化することは，モデルに付随する不確実性を的確に把握し，その低減のための方策を最適化することにより，基盤情報としての信頼性を向上することを主眼としたものであり，また，具体的には，以下のような目標を有するものである。

- モデル構築のために必要な情報および各調査段階で入手された情報の差異を明確にした上で，不確実性に対応するモデルやパラメータ値の複数の選択肢を網羅的に抽出する。
- 各調査段階での現象理解の程度に応じて，解釈に基づく推論あるいは統計的記述の適用範囲を定め，それぞれの手法によって選択肢の確からしさを表現する。
- 各調査段階での不確実性の種類と量とを把握し，これを低減するために最適な調査を次段階で行うことによりリスクマネージメントの観点から調査計画の合理化を図る。

(2) 不均一地質環境モデル構築の手順

上記の目標を達成するためには，モデル構築の手順を体系的に組み立てることが必要であり，以下に示す手順に従い，恣意性を極力排除するとともに，論理的な明確さを確保することが求められるこ

ととなる。

① 評価目的の設定；物質移行解析などの評価目的によって，何をどの程度の精度でモデル化する必要があるかは異なり，このため，モデル構築にあたって，まず，目的を明確にすることが必要となる。

② 評価対象の特定；上記の評価目的に対応して，ある領域での地下水流動等の現象を評価対象とし，このため，地下水流量，移行時間などの指標に着目することが必要であり，これがモデル構築の重要な前提条件となる。

③ 評価対象に対する影響因子の抽出；評価対象領域の地質環境は多様な構成要素や特性を有し，また，要素を区分する考え方も一意には定まらない。そこで，上記の評価目的に応じて，評価対象とする地下水流量や移行時間などに影響を及ぼすと考えられる亀裂透水量係数，頻度などの因子を特定することがモデル構築の準備段階として重要である。なお，このような影響因子の抽出は，対象とする現象についての一般的な（サイトジェネリックな）理解に基づき実施することが可能と考えられる。

④ 各影響因子に関する地質環境の差別化（概念モデル構成要素の抽出）；③で抽出した影響因子の観点から他とは異なる部分として，断層，健岩部の亀裂などを差別化し，概念モデルの構成要素として具体化する。この段階では，対象とする地質環境のサイトスペシフィックな情報を考慮することが必要である。

⑤ 上記の概念要素を記載する際の選択肢の抽出；概念モデルの構成要素が決まっても，それを表現する方法は必ずしも一意には決まらず，従って，例えば，風化花崗岩を多孔質媒体としてモデル化する，亀裂性媒体としてモデル化する，あるいは複合（ハイブリッド）媒体としてモデル化するといった記載上の選択肢を選ぶことが必要となる。

⑥ 概念モデルオプション派生機構の体系化；個々の概念モデル構成要素についてのモデル化上の選択肢を明らかにした後，全体としての地質環境モデルを構築するためには，これらを組み合わせることが必要となる。ここでは，排他的な選択肢の組み合わせ等を考慮して，概念モデルの派生機構を論理的に整理することが必要となり，具体的には，ロジックツリー等を作成することとなる。

⑦ 概念モデルオプションの確からしさの評価；概念モデルオプションの確からしさを評価するためには，個別の選択肢に関する確からしさを評価し，さらに，これらの全体像を考慮することが必要である。評価の手法としては，例えば，前出の ESL 等を用いることができる。

⑧ 頻度情報に基づくパラメータの統計的記述；概念モデルにおけるオプションとして離散的に取り扱う範囲以外の不確実性は，連続的なパラメータの確率密度関数のような統計的な手法によって記述することとなる。

8.1.3 研究所領域における水理地質概念モデルの構築

ここでは，上記の手順に従い，研究所領域の水理地質モデル構築の各段階の概要を以下にまとめることとする。

(1) 評価目的および評価対象

評価対象として研究所領域基盤岩深部の低透水部に於ける地下水流動を選択し，地層科学研究の一環として不均一場における流動特性の基盤的な知見を確立することを目標とする。また，具体的な指標としては，ダルシー流速およびダルシー流速に基づく地下水移行時間に着目することとする。

(2) 評価対象に対する影響因子の抽出

上述した，評価対象とする現象に関して着目する指標（地下水流量および地下水移行時間）についての評価を，目的（物質移行解析など）に照らして十分な精度で行うためには，考慮すべき影響因子をトップダウン的に抽出することが必要である。ここでは，地下水流動に対する支配方程式の構成に着目しつつ，また，不均一場においては，大小様々の局所的な支配的移行経路（近傍の他の移行経路に比して顕著に大きな地下水流速の生ずる部分）が図 8.1 に例示するようなマルチスケールの階層構造を示すことが一般的であることを考慮して，因子間の相関関係の体系化を行った。結果を図 8.2 にまとめる。

領域内の地下水流動は，当該領域における平均的な動水勾配（あるいは各境界上での水頭の分布）と領域内の透水係数分布によって決定される。そして，図 8.1 に例示するようなマルチスケールの階層構造を有する移行経路網の存在を前提とすれば，各位置におけるダルシー流速は，その点の直近にどの程度のスケールの移行経路が分布しているかによって（例えば，大規模で高透水性の断層上の A 点と，周囲の高透水部から離れた B 点とでは）大きく異なることとなる。また，例えば，B 点を通過した地下水は，その後，近傍の高透水性の経路に進入し，次に，より大きなスケールの高透水性経路に進入する，というように徐々に大きなスケールのより高透水性の経路に乗り換えながら領域の境界に達することとなり，全体としての移行時間は，各スケールの支配的移行経路を通じて次のより高透水性の経路にいたるまでの時間の総和として与えられる。

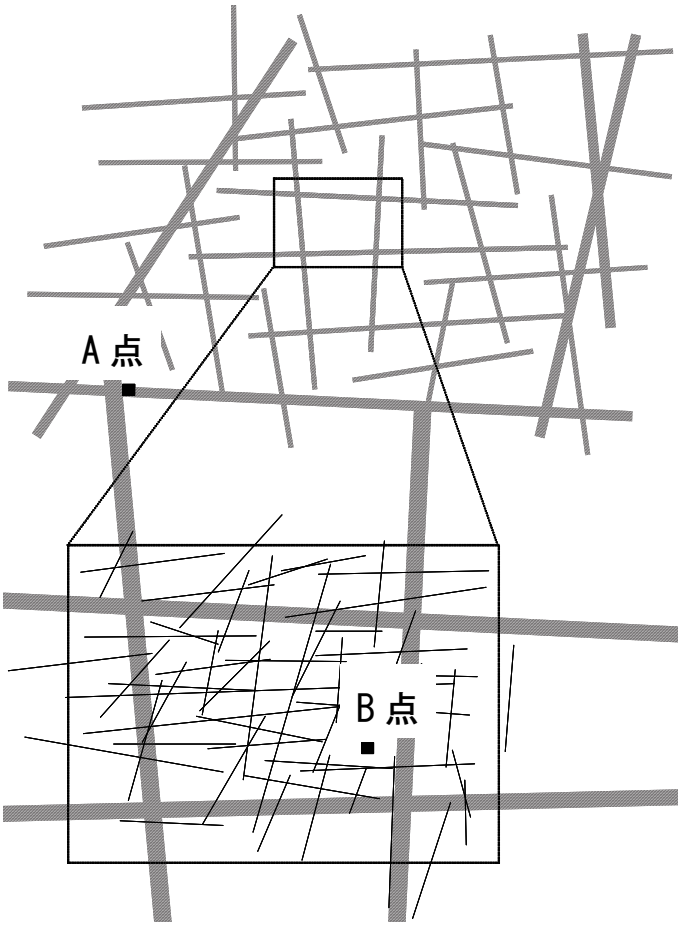


図 8.1　局所的な支配的移行経路のマルチスケールな階層構造の概念

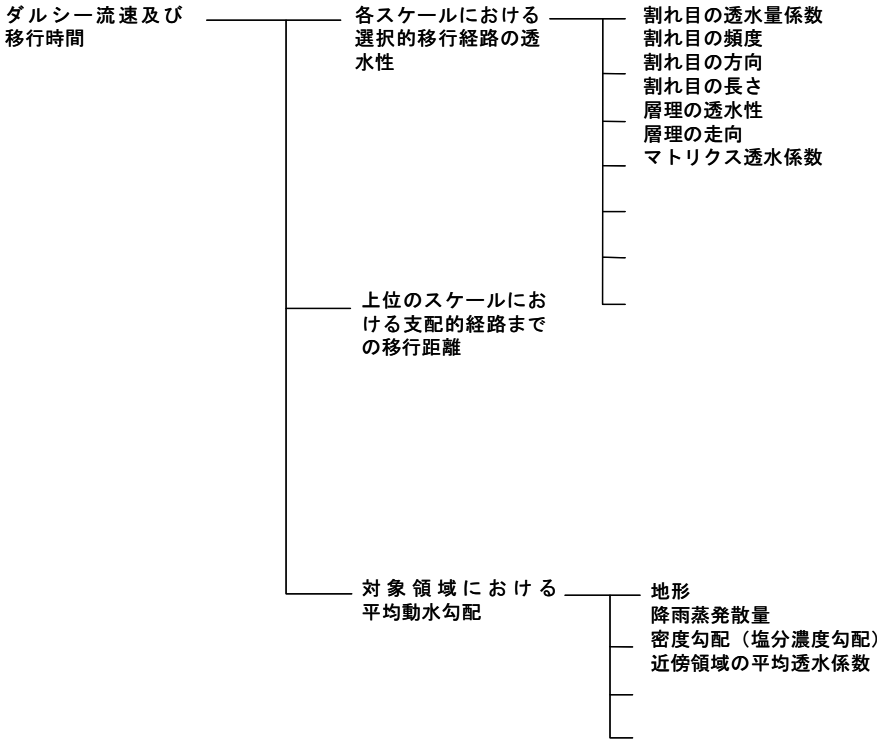


図 8.2　ダルシー流速およびダルシー流速に基づく地下水移行時間に対する影響因子

(3) 各影響因子に関する地質環境の差別化

次に，研究所領域における地質環境を各影響因子に関して顕著な（説明可能な）差異を有する複数の要素に区分することにより，概念モデルの構成要素を抽出する。抽出された概念モデル構成要素を表 8.1 に示す。

当該領域の基盤岩上部は風化によるマサ化のため，マトリクス部分も顕著な透水性を有する。他方，それより深い部分におけるマトリクスは事実上不透水性である。このため，基盤岩は，まず，マトリクスの透水性の観点から，風化部とそれ以深の部分とに区分されることとなる。また，当該領域における基盤岩は，過去の削剥に伴う除荷のために低角の割れ目が高頻度で存在する上部（上部割れ目帯）とその下の健岩部とに区分される。そこで，基盤岩内の低透水部における地下水流動の理解という目標の下に，以下の解析ではこの花崗岩健岩部に着目することとする。

5 章に述べたように，DH-15 号孔における亀裂方向分布情報に基づき，花崗岩健岩部の割れ目は 4 つの系統に区分される。そして，水理試験によって測定された透水量係数と各区間に含まれるそれぞれの系統の割れ目数についての相関分析から，高角で北北西～南南東の系統 4 が透水性を支配するものであると推定されている。また，DH-15 号孔の割れ目頻度分布についての box counting およびバリオグラムについての構造分析の結果，割れ目配置が自己相似性を有するものであると考えることができる。即ち，地下水の移行経路となる割れ目は，図 8.1 に示すようなマルチスケールの階層構造を示すことが示唆されている。さらに，割れ目頻度分布についての極値統計解析の結果（図 8.3 に再掲），割れ目頻度の局所的な最大値（極値）はスケールに応じて顕著に異なり，6 条/m以上の頻度で割れ目の集中する部分はおよそ 40m毎に，また，8 条/m以上の頻度の割れ目集中部はおよそ 100m毎に出現するものと予想される。また，透水量係数は割れ目本数に対して超線形の依存性を有することから，割れ目帯の透水性は高いものと考えられる。

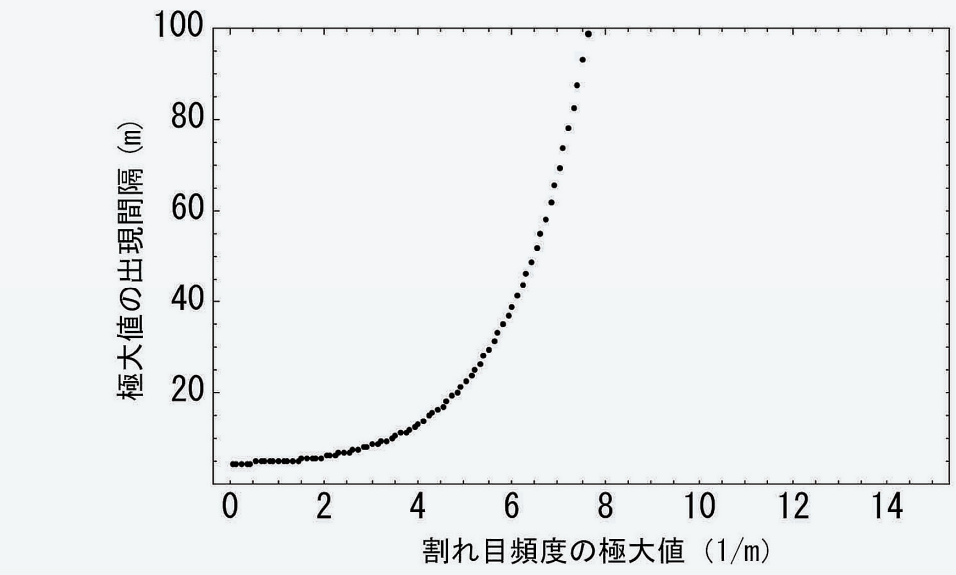


図 8.3　DH-15 号孔における系統 4 割れ目頻度の極値の累積分布

表 8.1　各影響因子に着目した研究所領域の基盤岩における概念モデル構成要素の抽出

			亀裂				層理		マトリクス透水性	上位のスケールの支配的経路までの移行距離	地形	降雨蒸発散量	密度（塩分）勾配
			透水量係数	頻度	方向	長さ	透水性	方向					
花崗岩風化部									高				
上部割れ目帯			大	高	低角				低				
花崗岩健岩部	割れ目帯		大										
	個別（透水性）割れ目	系統1	小	高	低角								
		系統2	小	高	高角 東北東～西南西								
		系統3	小	中	高角 東～西								
		系統4	大	低	高角 北北西～南南西								
	マトリクス								低				

(4) 各構成要素に対するモデルオプションの抽出

前節で抽出した各概念モデル構成要素に対して，ここでは，モデルオプションを具体化する。

① 花崗岩風化部に関するモデルオプション

花崗岩風化部の特徴は，風化に伴いマトリクスの透水性が増大しているため，割れ目に加えてマトリクス部を通過する流れが有意なものとなることである。このような場での飽和定常地下水流動モデルとしては，

・連続体モデル

・割れ目とマトリクスから成る複合（ハイブリッド）モデル

が考えられ，それぞれについて，

・均一モデル

・不均一モデル

が候補となる。ここで，花崗岩風化部の中での物質移動解析のために流動場を詳細に理解することを目的とするのであれば，恐らくは，不均一なハイブリッドモデルが適切と考えられる。しかしながら，本検討における花崗岩風化部の解析の目標は，深部に位置する花崗岩健岩部における境界条件を設定することであるため，平均的な透水性が等価な連続体として設定されれば良い。この意味からは，均一な連続体モデルを用いることが適切と考えられる。ただし，平均透水係数の設定には顕著な不確実性が含まれる可能性があることに注意する必要がある。

②上部割れ目帯に関するモデルオプション

上部割れ目帯では，過去の削剥時の除荷による低角の割れ目が高頻度で存在していることが特徴である。ただし，風化は生じていないため，マトリクスは不透水性である。このような場での飽和定常地下水流動モデルとしては，

・連続体モデル

・亀裂ネットワークモデル

が考えられるが，風化部の場合と同様，本検討における上部割れ目帯の解析の目標は，深部に位置する花崗岩健岩部における境界条件を設定することであるため，平均的な透水性が等価な連続体として設定されれば良い。この意味からは，均一な連続体モデルを用いることが適切と考えられる。但し，ここでは，低角の割れ目頻度が高いことから，これらの寄与が支配的となる場合には連続体モデルにおける透水性テンソルの設定に際して，

・等方的モデル

・異方的モデル

を選択肢として考えることが必要と考えられる。

③花崗岩健岩部に関するモデルオプション

a)流動場のモデル

花崗岩健岩部は不透水性のマトリクスと割れ目および割れ目帯から成るものであり，地下水の流動はほぼ完全に割れ目によって支配されるものと考えられる。また，ここでは，物質移行解析を目的とした詳細な流れ場の理解が必要であることから，連続体モデルの適用は不適切であると考えられる。そこで，候補となる流動場のモデルとしては，

・亀裂ネットワークモデル

・複合モデル

が考えられる。ただし，ここで言う複合モデルは，風化部の場合のようにマトリクスと割れ目の複合ではなく，高頻度で存在する個別割れ目と比較的稀な割れ目帯の複合であることに注意を要する。

b)個別割れ目

ⅰ.透水性割れ目

5 章に述べた割れ目方向性の分類と各系統の割れ目本数と水理試験結果との相関分析から，系統 4（高角で北北西～南南東）の割れ目のうちボアホールテレビ（BTV）での観察により開口割れ目あるいは明瞭割れ目に区分されたものが透水性に最も寄与しているものと考えられる。ただし，相関分析の結果は，全系統が透水性に寄与すると考えることもできることを示している。このため，透水性割れ目としては，

・系統 4（高角で北北西～南南東）の割れ目のみ

・全系統の割れ目

という二つの可能性が考えられる。

ⅱ.割れ目の方向分布

割れ目方向の分布に関しては，正規分布の単位球面への射影に対応する Fisher 分布あるいは Bingham 分布が用いられる場合が多い[34]。しかしながら，標本数の限られている状況では，分布の両端に相当する低確率のテールに関してこの分布系の妥当性を保証することが困難である。そこで，このような場合には，実際に観察された割れ目の走行と傾斜を繰り返しランダムにサンプリングする Boot strapping モデルも用いられることがある。

・Fisher 分布

・Bingham 分布

・Boot strapping モデル

ⅲ.割れ目の形状

割れ目の 3 次元的形状についての情報は極めて限られており，単純化された面要素として取り扱われることが多い。候補となる面要素の例としては，

・円板

・長方形

が挙げられる。

ⅳ.割れ目の長さ分布

割れ目の長さについては，一定のスケール（例えば，露頭あるいは坑壁面）での観察結果は対数正規分布として整理され，また，複数のスケールでの観察データを集積した結果は，べき乗型の累積確率分布（フラクタルモデル）として整理されることが多い[29]。そこで，これらがモデルの候補として考えられる。

・フラクタルモデル

・対数正規分布

ⅴ.割れ目の透水量係数分布

割れ目の透水量係数分布としては，ほぼ例外なく対数正規分布が用いられており，今回のデータもこれを否定する材料はないことから，対数正規分布のみを候補として考えることとする。

c）割れ目帯

ⅰ.割れ目帯の有無

5 章に述べたように，DH-15 号孔の割れ目頻度は連続的に分布しており，割れ目の密集部とそれ以外の部分とを明瞭に区分することは難しい。このため，割れ目帯に関してはそもそも，

・割れ目帯あり

・割れ目帯なし（全てが個別割れ目）

という二つのオプションが考えられる。

ⅱ.割れ目帯の方向分布

割れ目帯全体としての方向についての情報は限られているが，割れ目の形成過程を考えれば，

・個別割れ目と整合的な方向

・個別割れ目と共役な方向

の二つのオプションが考えられる。

ⅲ.割れ目帯の形状

割れ目帯の形状についても個別割れ目と同様に情報が限られており，また，これに加えて，割れ目帯の幅という新たな不確実性要因が含まれる。そこで，現状の知見に基づけば，

・厚さ一定の円板

・厚さ一定の長方形

という二つのオプションが挙げられる。

ⅳ.割れ目帯の長さ分布

割れ目帯の長さ分布に関する情報もほとんど得られていない。そこで，これに関するオプションとしては，

・研究所領域の大きさに比して十分長い

・厚さと長さの相関に従う

という二つが考えることにより結果への影響を把握することが適切と考えられる。

ⅴ.割れ目帯の透水量係数分布

割れ目帯の透水量については，そこに含まれる割れ目本数への依存性を表現することのできるモデルを用いることが適切と考えられるため，具体例として，

・相関モデル：割れ目帯に含まれる系統 4 の割れ目本数と透水量係数の相関回帰式に基づくモデル

・ランダムサンプリングモデル：割れ目帯に含まれる本数の個別割れ目の透水量係数を対数正規分布からランダムにサンプリングするモデル

という二つのオプションが考えられる。

(5) 概念モデルオプション派生機構の体系化

個別の概念モデル構成要素についてのオプションを組み合わせることにより，全体としての概念モデルが構築される。花崗岩健岩部の個別割れ目および割れ目帯についてのモデルオプションの組み合わせを図 8.4 および図 8.5 にまとめる。ここで，各項目についてのオプションは組み合わせることが可能であり（ただし，割れ目帯なしのオプションについては下流側の項目は関係しない），割れ目帯について 16 通り，個別割れ目について 24 通りの概念モデルが派生することとなるが，煩雑となるため，ここでは，一つの組み合わせを中心として表示した。

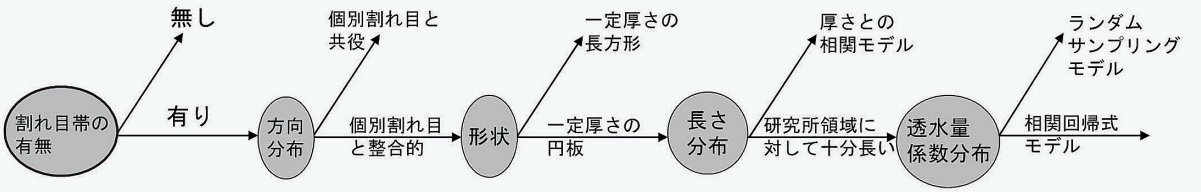


図 8.4　研究所領域花崗岩健岩部中の割れ目帯に関する概念モデルオプションの派生

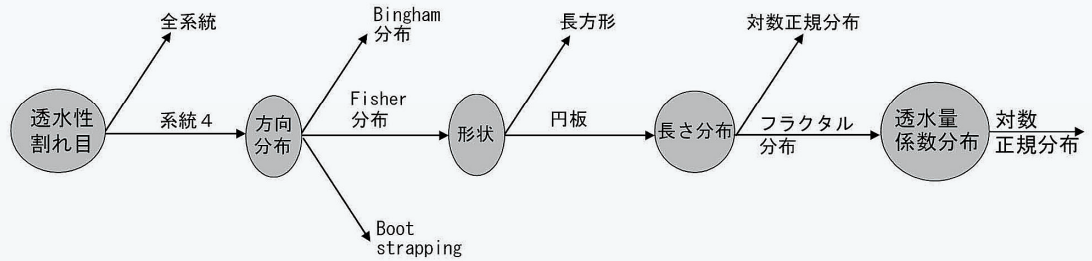


図 8.5　研究所領域花崗岩健岩部中の個別割れ目に関する概念モデルオプションの派生

(6) 概念モデルオプションの確からしさの評価

ここでは,前項で抽出した,個別割れ目および割れ目帯についての概念モデルオプションについて,それぞれ,入手可能な情報に基づき,ESL を用いて確からしさを評価する。なお,確からしさや十分性の評価にあたっては,次のスケールを用いることとした。

極めて高い・・・1.0
高い・・・・・・0.75
中程度・・・・・0.5
低い・・・・・・0.25
極めて低い・・・0

①個別割れ目についての概念モデルオプション

a) 透水性割れ目

系統 4 の割れ目が透水性を支配しているということを主命題とした ESL の階層プロセスモデルを図 8.6 に示す。この命題が確からしいと主張できるためには,研究所領域における既得データにおいて系統 4 の割れ目が支配的な透水性を有することと,研究所領域の近傍の地点で得られた他のデータにおいても同様の傾向が認められることが必要である。このうち,研究所領域内の既得データである DH-15 号孔の情報は,5 章に示したように,

ⅰ 水理試験結果と各区間における系統 4 の割れ目本数とが整合的である
ⅱ 割れ目本数と透水量係数相関式のパラメータは別途行った亀裂ネットワークモデルにおける超線形な挙動と符合する
ⅲ 系統 4 の方向は現在の圧縮応力の主方向と一致しており,開口により透水性が増大しているものと理解できる

ことを示している。ただし,このうち,ⅰについては,他の可能性(例えば,ⅰに関しては後述する全系統の割れ目が透水性に寄与するという仮定の下でも相関を説明可能である)も否定できないことから,支持の程度は中とした。また,ⅱとⅲについては,排他的な適合性がある程度主張できるため,支持の程度を高としている。なお,上位命題(既得データが系統 4 の割れ目が透水性であることを示す)に対する証拠としての十分性は,ⅰが最も高く,ⅱについては両対数回帰式の指数について確立した知見がないことから低いものとした。また,現在の応力方向との整合性については,中程度の十分性を有するとした。また,これらの上位にある(既得データが系統 4 の割れ目が透水性であることを示す)の主命題に対する十分性は,中程度と判断した。この理由は,既得データが DH-15 号孔に限られており,また,その位置が同領域の周縁部分に位置していること,そして,後述するように,近傍の他のボーリング孔における傾向と整合的ではないことから,研究所領域全体に対する代表性が必ずしも高くないと考えたためである。

次に,研究所領域近傍にある MIU-1 号孔および MIU-2 号孔のデータについては,系統 4 に該当する高角で北北西～南南東の割れ目が分布しておらず,DH-15 号孔と同様の水理試験結果に対する相関分析によって,それぞれ,月吉断層と平行の東西方向の割れ目や上部割れ帯と同様の低角の割れ目が透水性を支配するという結果を示している。これらの割れ目は,DH-15 号孔においても観察されていることから,系統 4 の割れ目のみが卓越した透水性を有するというこの概念モデルオプションの主張とは矛盾すると考えた。なお,この命題の主命題に対する十分性は,MIU-1 号孔および MIU-2 号孔が研究所領域の外に位置することから,低いと判断した。

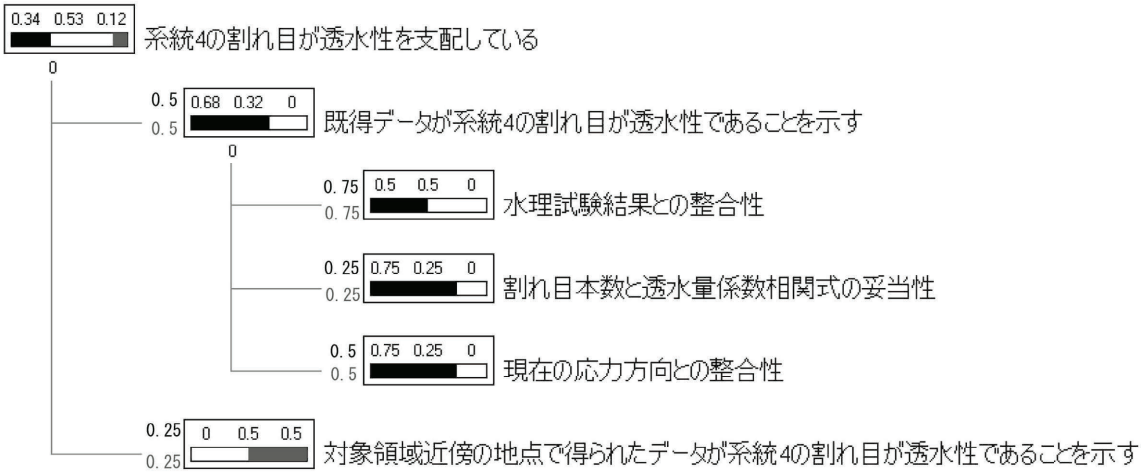


図 8.6　「系統 4 の割れ目が透水性を支配している」という概念モデルの確からしさについての ESL による評価結果

もう一つの概念モデルオプションである，「全系統の割れ目が透水性に寄与している」についての ESL による評価結果を図 8.7 に示す。階層構造プロセスモデルは，上述したものと同一であり，また，各命題の十分性も同じである。ここで，既得データに関しては，水理試験結果との整合性は前出のように系統 4 のみの場合と同程度の相関係数を持つ回帰式が得られることから同じように高いものと考えた。他方，相関式については，指数が極端に大きく，また，それにも関らず水理試験データは割れ目頻度の高い極値に支配されてはいないという自己矛盾（5 章参照）を有するため，中程度の否定と判断した。また，現在の応力方向と比較すれば，全系統の割れ目が同様に透水性に寄与することは説明しにくいことから中程度の否定と考えた。逆に，近傍のデータ（MIU-1 号孔および MIU-2 号孔）において低角の割れ目や東西方向の高角の割れ目の透水性が高いことは DH-15 号孔において系統 4 以外の割れ目が透水性に寄与していることと整合的であると考え，中程度の支持を与えた。

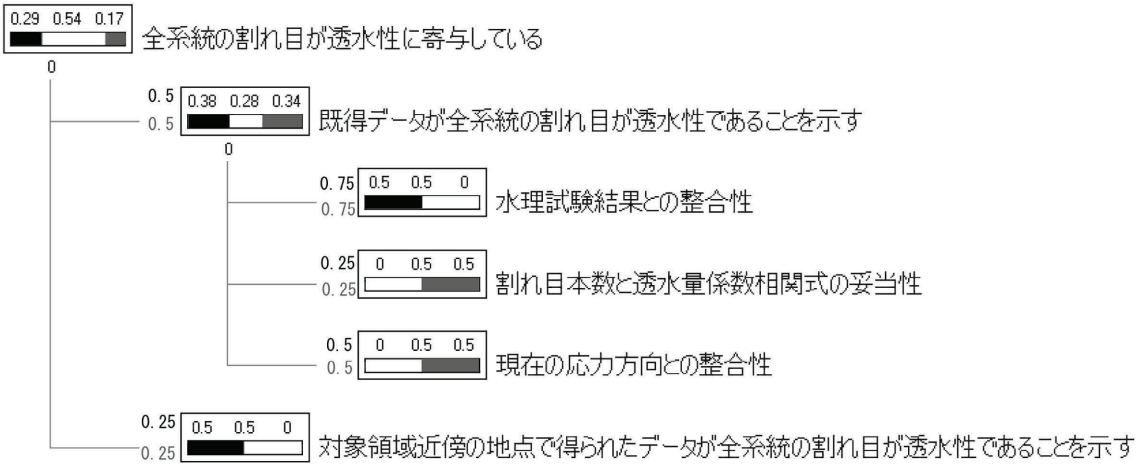


図 8.7　「全系統の割れ目が透水性に寄与している」という概念モデルの確からしさについての ESL による評価結果

b）個別割れ目の方向分布

個別割れ目の方向分布が Fisher 分布に従うという概念モデルの確からしさを判断するための ESL の階層プロセスモデルを図 8.8 に示す。ここでは，証拠として，

ⅰ当該領域の既得データ（DH-15 号孔）が Fisher 分布に従うこと
ⅱ近傍の地点のデータ（MIU-1 号孔および MIU-2 号孔）が Fisher 分布に従うこと
ⅲ他の類似した地質環境において Fisher 分布が適合した事例がある
という 3 種類を考えた。また，十分性については，ⅰが最も直接的であるが，既得データは DH-15 号孔に限られていることから，前項の場合と同様に中程度とした。ⅱおよびⅲは，間接的な傍証であることから，十分性は低いものと判断した。

5 章に示したように，Fisher 分布によって系統 4 の割れ目の方向性が近似できること，ただし，後述するように他の分布で説明することも可能であることから，ⅰの証拠による支持は中程度とした。ⅱの証拠については，MIU-2 号孔は Fisher 分布による近似が良好であるのに対して，MIU-1 号孔では偏角の大きな部分での適合性が Bingham 分布の法が勝っていることから，中程度の支持と低い否定とが混在するものと考えた。また，他の事例としては，第 2 次取りまとめにおいて釜石のデータを Fisher 分布で近似していること[29]等から中程度の支持があるものと判断した。

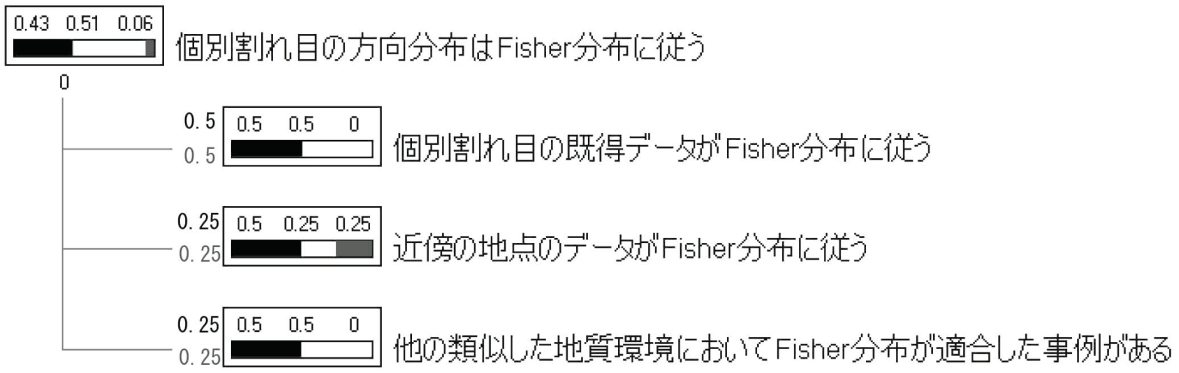


図 8.8　「個別割れ目の方向分布が Fisher 分布に従う」という概念モデルの確からしさについての ESL による評価結果

また，Bingham 分布について同じ階層プロセスモデルによる評価を行った結果が図 8.9 である。ここでは，DH-15 号孔における近似の精度は Fisher 分布に比較して劣るものの，MIU-1 号孔における低頻度部分の近似精度はむしろこちらのほうが良好であったことを考慮して証拠の支持の程度を決定している。なお，Bingham 分布は幌延の割れ目の方向分布の表現等に用いられているものの，花崗岩への適用例は今回の調査では見つからなかった（ただし，事例の不在が明らかになったわけではない）ことから，ここでは，証拠が不在であるとした。

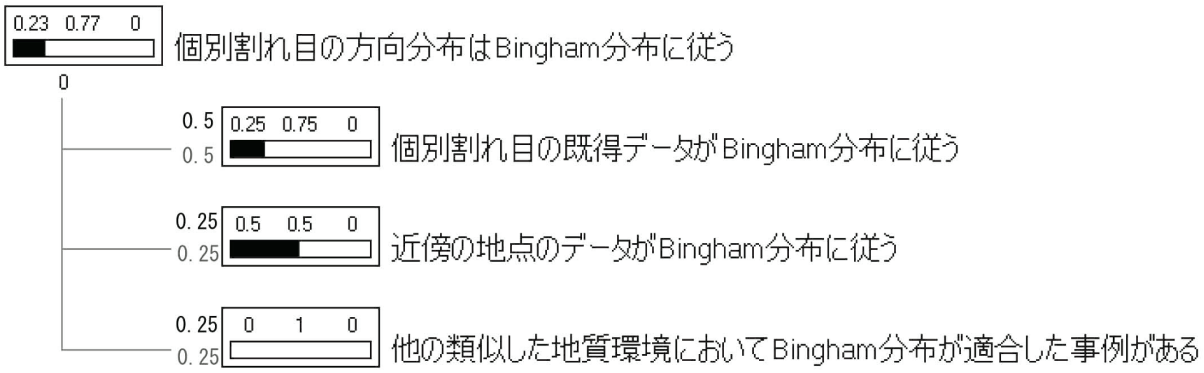


図 8.9　「個別割れ目の方向分布が Bingham 分布に従う」という概念モデルの確からしさについての ESL による評価結果

Boot strapping は，既得データにおける割れ目の方向性を繰り返しランダムにサンプリングする分布形を前提としない手法であり，対照とするデータの特徴に対しては完全に整合的であるという特徴を有することから，「個別割れ目の既得データが Boot strapping で表現できる」は極めて高い程度で支持されるものと考えた（図 8.10）。ただし，データ数の制限から，低頻度のものは含まれず，この点が問題となるため，「個別割れ目の既得データが Boot strapping で表現できる」の主命題に対する十分性は中程度とし，「低頻度のテールが表現できる」をもう一つの命題として考えることとした。また，DH-15 号孔における割れ目数を考慮して，低頻度のテールが表現できることについては，中程度の否定とした。なお，低頻度のテールに位置する割れ目が亀裂ネットワーク全体の特性に与える影響は低いと考えられることから，この命題の主命題に対する十分性の程度は低いものとした。

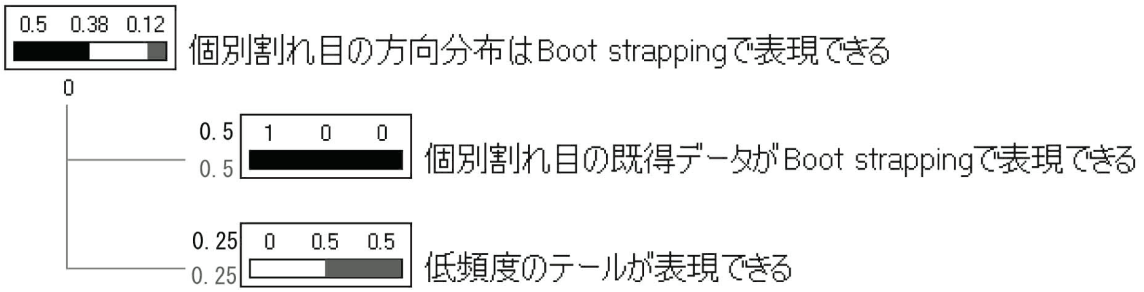


図 8.10　「個別割れ目の方向分布が Boot strapping によって表現できる」という概念モデルの確からしさについての ESL による評価結果

c）個別割れ目の形状

個別割れ目の形状について判断することのできるような情報は極めて限られているため，円板および長方形のいずれについても確からしさを判断することは難しい。今後，仮に確からしさを評価することを試みる場合の階層構造を参考までに，図 8.11 に示す。しかし，個別割れ目の形状は現実の描写ではなく，むしろ，解析上の簡単化であることから，亀裂ネットワーク全体としての主要な特徴が形状のオプションによってどの程度変化し得るかをまず把握し，もし影響が小さければ形状の詳細には立ち入る必要がないものと考えられる。

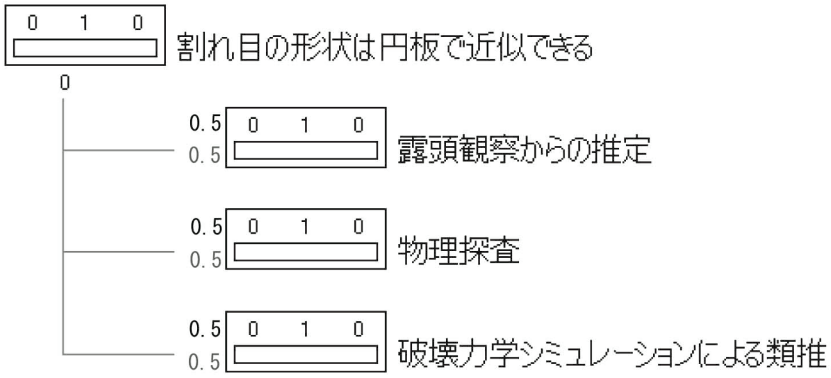


図 8.11　個別割れ目の形状に関す階層プロセスモデル

d）個別割れ目の長さ分布

「個別割れ目の長さ分布がフラクタル則に従う」という概念モデルの確からしさを判断するための ESL 階層プロセスモデルを図 8.12 に示す。ここで，最も直接的な証拠は当該サイトにおける既得データがフラクタル則を満足することであり，その十分性は高いと考えられるが，多くの事例と同様，研

究所領域において割れ目の大きさを示すような情報は得られていない。そこで，他の事例を参照することとなるが，その十分性は低いものと考えられる。具体的には，種々のサイトにおける坑壁観察や露頭観察あるいは航空写真判読等のマルチスケールの情報を整理した結果はべき乗の累積確率分布つまりフラクタル則に従うこと[29]が知られており，各データでのスケールに対応した割れ目長さの上限近傍でべき乗則からのずれが顕著になることを考慮して，中程度の支持であると考えた。なお，この証拠の十分性は中程度であると判断した。また，個別の観察においては，対数正規分布が成立するという報告があることから，中程度の否定があるものとした。ただし，これらの個別事例の研究所領域における証拠としての十分性は低いものと考えた。

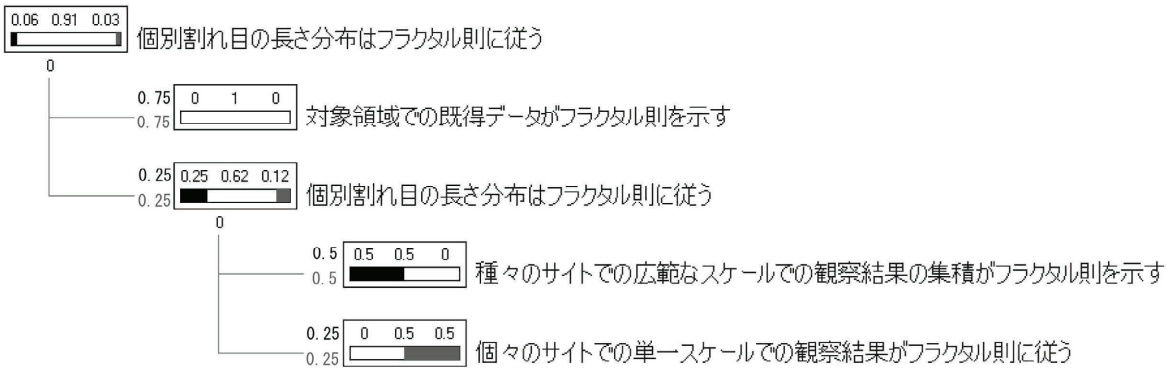


図 8.12　「個別割れ目の長さ分布はフラクタル分布に従う」という概念モデルの確からしさについての ESL による評価結果

同様に，「個別割れ目の長さ分布は対数正規分布に従う」について ESL による評価を行った結果を図 8.13 に示す。ここでは，フラクタル分布の場合とは逆に，種々のサイトにおける坑壁観察や露頭観察あるいは航空写真判読等のマルチスケールの情報を整理した結果はべき乗の累積確率分布つまりフラクタル則に従うことが知られていることから，中程度の否定であると考えた。また，個別の観察においては，対数正規分布が成立するという報告があることから，中程度の支持があるものとした。

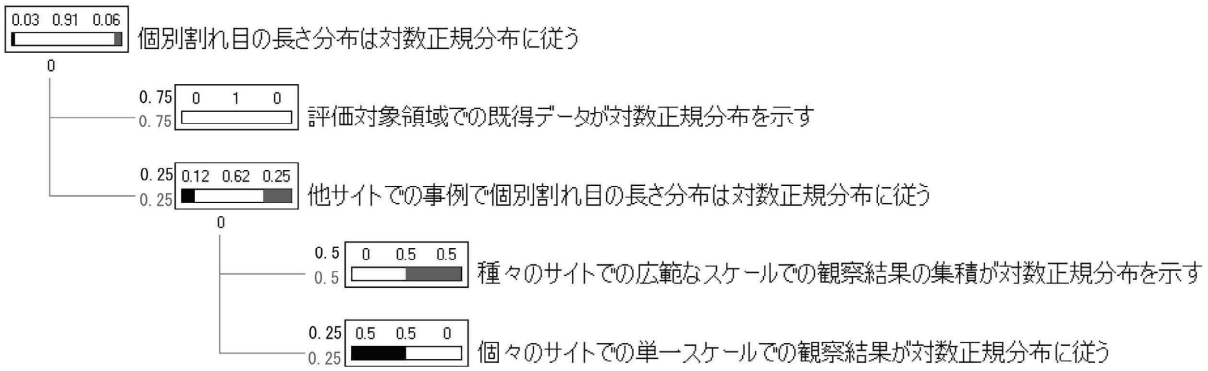


図 8.13　「個別割れ目の長さ分布は対数正規分布に従う」という概念モデルの確からしさについての ESL による評価結果

e）個別割れ目の透水量係数分布

「個別割れ目の透水量係数は対数正規分布に従う」という概念モデルの確からしさについての ESL による評価結果を図 8.14 に示す。ここでも，当該領域の既得データ，近傍の地点のデータおよび他の類似した地点のデータを判断の論拠として参照することとし，命題への関連性の深さに応じて，十分性がそれぞれ，高い，中程度，そして低いというレベルにあるものと判断した。また，それぞれの論拠における具体的な証拠として，

ⅰ単一割れ目についての水理試験結果が対数正規分布に従う
ⅱ複数割れ目を含む水理試験結果が対数正規分布の仮定と矛盾を生じない
を考慮することとした。単一の割れ目に着目して十分な点数実施された水理試験結果は高い十分性を有するものと考えられるが，これは当該領域やその近傍およびわが国の他の事例でも見つけることができなかった。他方，複数の割れ目を含む長区間の水理試験結果が対数正規分布の仮定に矛盾を生じないことは，それぞれ上位の命題に対して中程度の十分性を有するものと考えられる。そして，5 章に述べた DH-15 号孔，MIU-1 号孔および MIU-2 号孔データに対する分散分析結果は適切な対数標準偏差を選ぶことによって標本の分散が矛盾無しに説明できることから中程度の支持があると判断した。また，第 2 次取りまとめにおける釜石鉱山のデータは，複数の割れ目を含む長区間の水理試験結果が対数正規分布に従うことを示しており[29]，やはり，中程度の支持であると考えた。

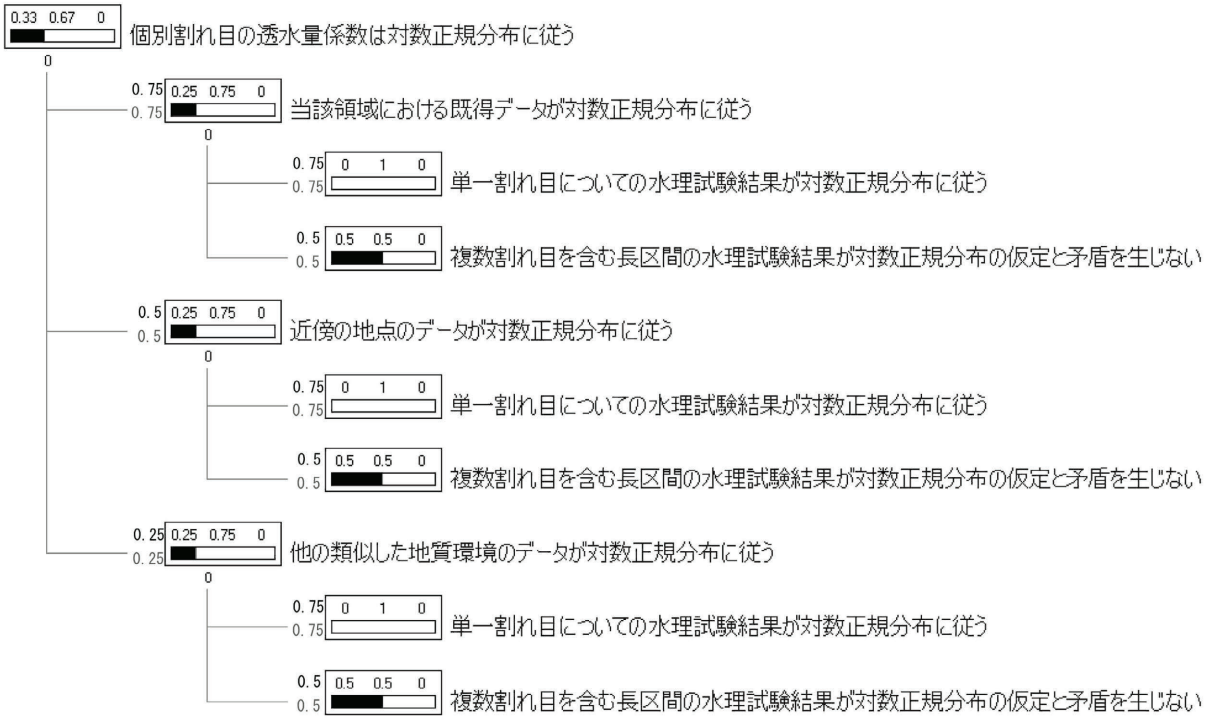


図 8.14　「個別割れ目の透水量係数は対数正規分布に従う」という概念モデルの確からしさについての ESL による評価結果

②割れ目帯についての概念モデルオプション
a）割れ目帯の有無
割れ目帯の存在を支持する論拠としては，
ⅰ連続性の高い構造（IMF 等）が見られる
ⅱ割れ目分布が自己相似性を示し割れ目の集中部が周期的に現れる
ⅲポアソン分布では説明できない高頻度の部位がある
を抽出した。

それぞれの論拠が支持される程度としては，いずれも肯定的な証拠が得られているものの，他の可能性を排除できるほど高いものではないことから，中程度であるものと考えた。なお，ⅲについては，割れ目頻度の分布が連続的であり，極端に頻度の高い部分とそれ以外とが明瞭に区分されてはいないという考え方もできることから，低い程度の支持と否定が混在するものと考えた。

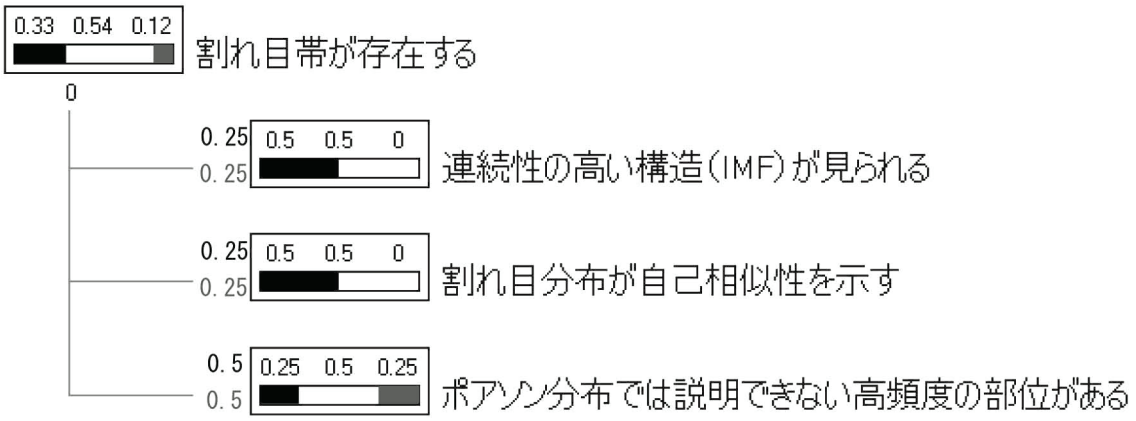


図 8.15　「割れ目帯が存在する」という概念モデルの確からしさについての ESL による評価結果

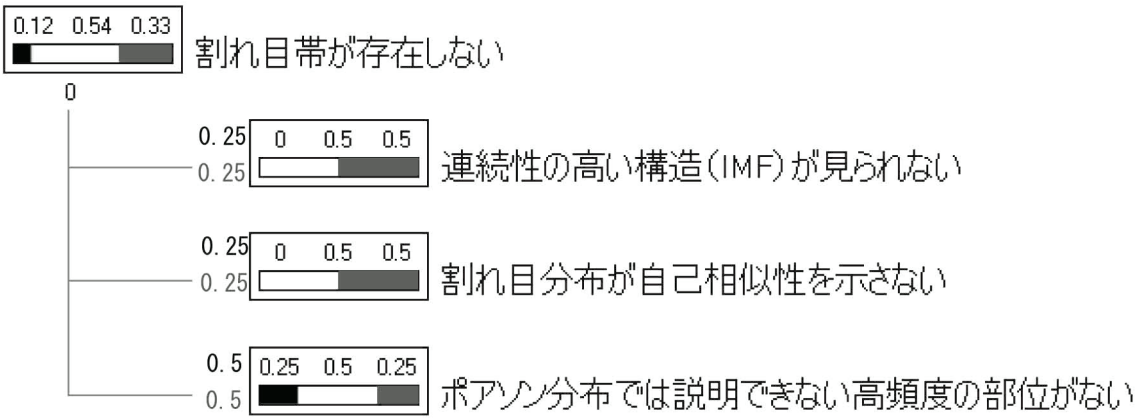


図 8.16　「割れ目帯が存在しない」という概念モデルの確からしさについての ESL による評価結果

b) 割れ目帯の方向分布

DH-15 号孔における割れ目集中部つまり割れ目帯の大きなスケールでの広がりについての情報は現時点では取得されていないことから確からしさを判断することは難しい。そこで，今後，この点についての検討を行う際の考え方として，図 8.17 に示す階層プロセスモデルを作成した。ここでは，論拠として，割れ目帯の成因に基づく推察と割れ目帯と個別割れ目の方向性に関する観察結果というより直接的なものを考えることとしている。

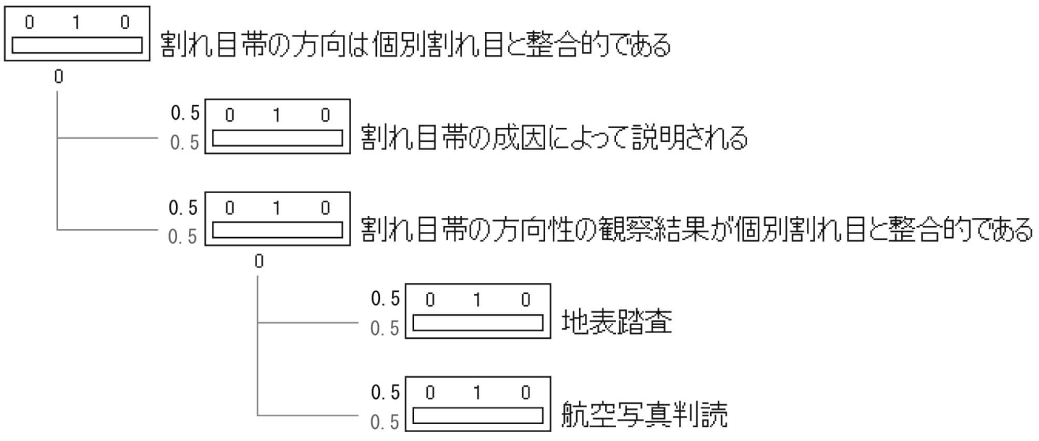


図 8.17　割れ目帯の方向についての階層プロセスモデル

c）割れ目帯の形状

前項と同様の理由で割れ目帯の形状についての情報は未入手である。また，個別割れ目についても前出のように形状についての情報はほとんど存在しておらず，極めて不確実性が大きいことから，割れ目帯の形状によって領域全体の地下水流動特性に変化が生じるか否かを把握することがまず行われる必要があると考えられる。今後の検討のために，階層プロセスモデルを図 8.18 に例示する。

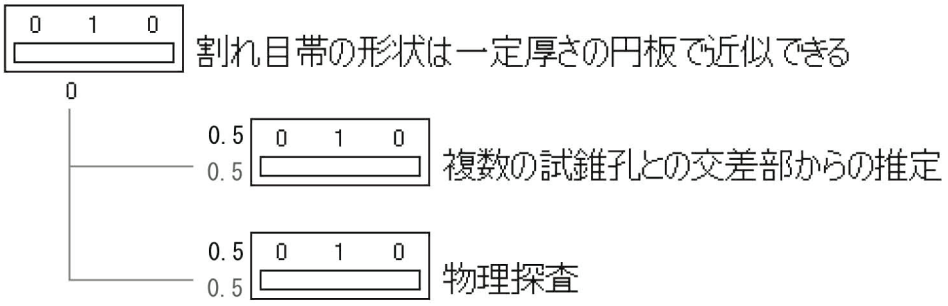


図 8.18　割れ目帯の形状に関する階層プロセスモデル

d）割れ目帯の長さ

割れ目帯の長さに関しては，IMF と割れ目帯とを同一視した場合には，研究所領域の大きさ（1km×1km）を上回るような長さのものが多く含まれることとなることから，中程度の支持があるものとしたが，IMF の中には数 100m程度の長さのものも含まれていることから，低い否定を同時に含むものとした。なお，この論拠の主命題に対する十分性は，割れ目帯と IMF との間の対応付けが必ずしも明確ではないことから，中程度であるものと考えた。また，航空写真判読の結果も同様の支持と否定の混在するものであるが，その十分性の程度は地表踏査に比較して低いものと判断した。

他方，断層の幅と長さの相関式に基づくと，幅 1m程度以下である割れ目帯の長さは 100mオーダーであることから，中程度の否定であると考えた。ただし，ここでの割れ目帯の厚さは，割れ目頻度情報のみに基づくものであり，上記の相関式に用いるべき断層のプロセスゾーンの幅と一致することは保証できないため，十分性の程度は低いと判断した。

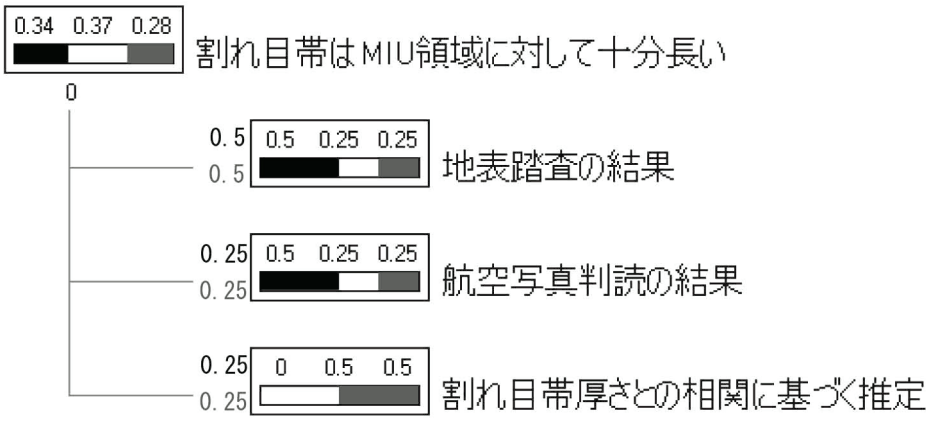


図 8.19　「割れ目帯は研究所領域に対して十分長い」という概念モデルの確からしさについての ESL による評価結果

もう一つのモデルオプションである，「割れ目帯の長さは厚さとの相関式に従う」についての ESL 評価結果が図 8.20 である。既に述べたように，割れ目頻度の特に高い部分に着目して厚さを設定すると，対応する長さは 100mのオーダーであり，IMF についての地表踏査や航空写真判読結果とは整合的ではないこと，ただし，IMF と割れ目帯の同一性については疑問があることから，低い否定であると判断した。

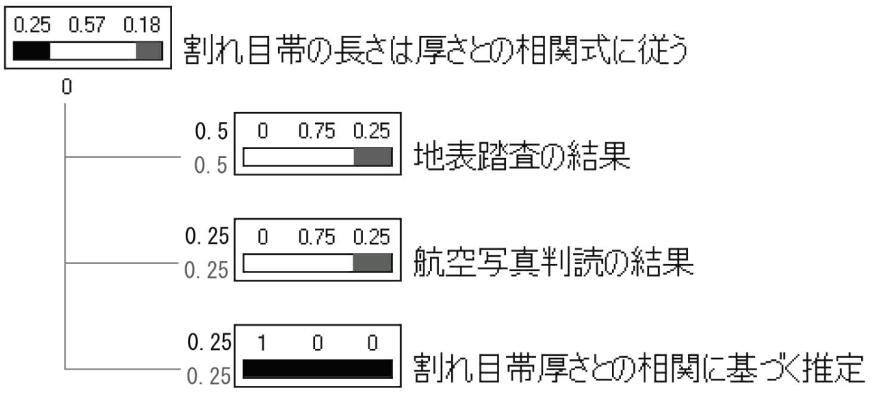


図 8.20　「割れ目帯の長さは厚さとの相関式に従う」という概念モデルの確からしさについての ESL による評価結果

e）割れ目帯の透水量係数

「割れ目帯の透水量係数は相関回帰モデルで近似できる」という概念モデルの確からしさについての ESL による評価のために，当該領域の既得データおよび近傍の地点のデータが相関回帰モデルで近似できることを証拠として考えることとした。そして，これらの十分性は，対象領域との関連性を考慮して，それぞれ，高いおよび中程度とした。また，5 章に述べた相関分析および分散分析の結果から明らかな通り，この相関モデルは割れ目帯の平均的な透水性に対して整合的であるが，そのばらつきについては過小評価することから，図 8.21 に示したように，それぞれの観点について中程度の支持および否定であると判断した。

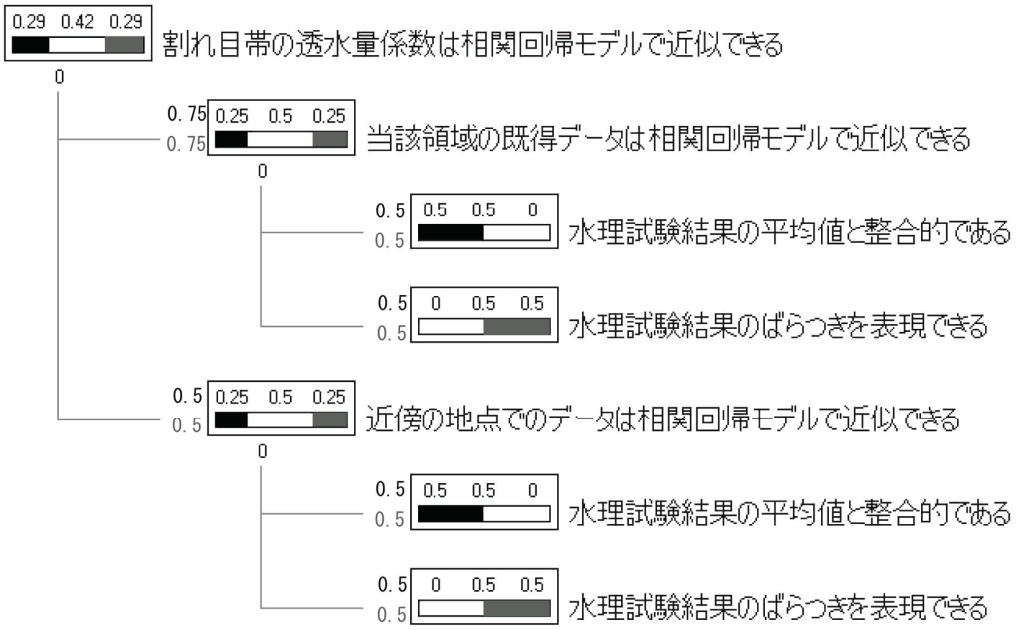


図 8.21　「割れ目帯の透水量係数は相関回帰モデルで近似できる」という概念モデルの確からしさについての ESL による評価結果

他方，割れ目帯中に含まれる割れ目本数に応じて，個別割れ目の透水量係数分布からランダムにサンプリングしてその総和を採るというランダムサンプリングモデルの場合は，これが DH-15 号孔および MIU-1 号孔と MIU-2 号孔の水理試験結果のばらつきを表現できることは 5 章に述べた分散分析の結果から明らかである。他方，前出の平均透水係数についての相関回帰モデルは超線形のものであり，

線形性を基本としたランダムサンプリングモデルは水理試験結果の平均値と整合的ではないことからDH-15 号孔については中程度の否定であると考えた。また，MIU-1 号孔およびMIU-2 号孔では超線形性はさらに顕著であることから，高い否定と判断した。

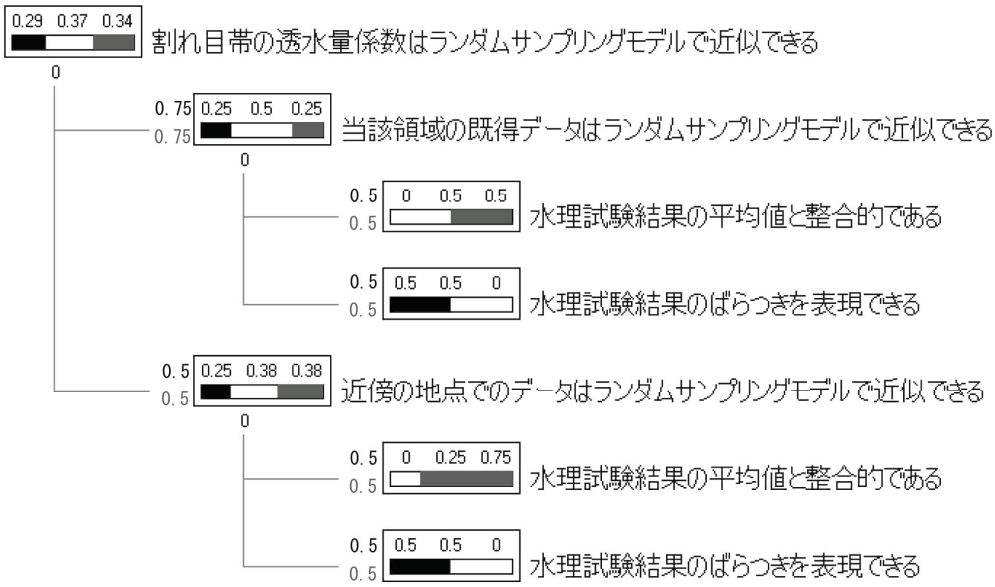


図 8.22　「割れ目帯の透水量係数はランダムサンプリングモデルで近似できる」という概念モデルの確からしさについてのESL による評価結果

8.2 地質構造モデルおよび水理地質構造モデルの更新

8.2.1 水理地質構造モデル

前出の各概念モデル構成要素についての選択肢のうち，ESL による評価結果の確からしさの相対的に高いものを中心として，水理地質構造モデルを構築した。なお，ここでは，割れ目帯と個別割れ目をそれぞれ面要素として統計的に作成し，これらの透水量係数をクラックテンソル法によって足しこむことにより不均質透水係数場を作成することとした。

(1) 割れ目帯のモデル

前出の概念モデル構成要素の選択肢に対応して,5 章に述べたConditioned Boolean Simulation（CBS）により，DH-15 号孔における割れ目帯交差部の位置でコンディショニングした透水係数場として，表 8.2 に示す 4 つのモデルオプションを作成した。なお，解析対象領域は，研究所領域の花崗岩健岩部とし，図 8.23 に示す 1km×1km×0.5kmの範囲を選定した。割れ目帯の厚さとの相関式としては以下のもの[45]を用い，透水量係数と割れ目本数の相関式は，5 章に述べた系統 4 の割れ目に対する両対数のものを用いる。

$$\log L = 0.68 \pm 0.32 + 0.87 \log W$$

ただし，L（m）；花崗岩類地域の断層の長さ，W（cm）；破砕帯の幅

また，ランダムサンプリングでは，5 章の相関分析に基づき，対数標準偏差 1 の対数正規分布を仮定した。作成された透水係数場を図 8.24～図 8.27 に示す。いずれのモデルにおいても，20m×20m×20mの解析メッシュのほとんどにおいて少なくとも一つの割れ目帯が含まれることとなっている。

ここで，透水量係数分布を相関モデルで設定しているもの（モデル 1～3）がランダムサンプリングモデル（モデル 4）に比してばらつきを小さく評価していることが図からもわかる。また，割れ目帯の長さを厚さと相関させたモデル 3 では，DH-15 号孔におけるコンディショニングの条件を満足するために短いオブジェクトを多数必要としていることがわかる（モデル 1 および 4 ではオブジェクト数が 300 程度であるのに対して，モデル 3 では 800 以上のオブジェクトが含まれている）。

表 8.2　割れ目帯についての水理地質モデルオプション

	割れ目帯の有無	方向性	形状	長さ	透水量係数
モデル 1	有り	系統 4 と同じ Fisher 分布	一定厚さの円板	十分大きい	相関モデル
モデル 2	無し	—	—	—	—
モデル 3	有り	系統 4 と同じ Fisher 分布	一定厚さの円板	厚さと相関	相関モデル
モデル 4	有り	系統 4 と同じ Fisher 分布	一定厚さの円板	十分大きい	ランダムサンプリングモデル

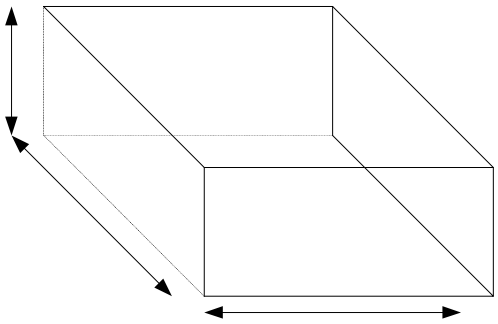


図 8.23　解析対象領域の範囲

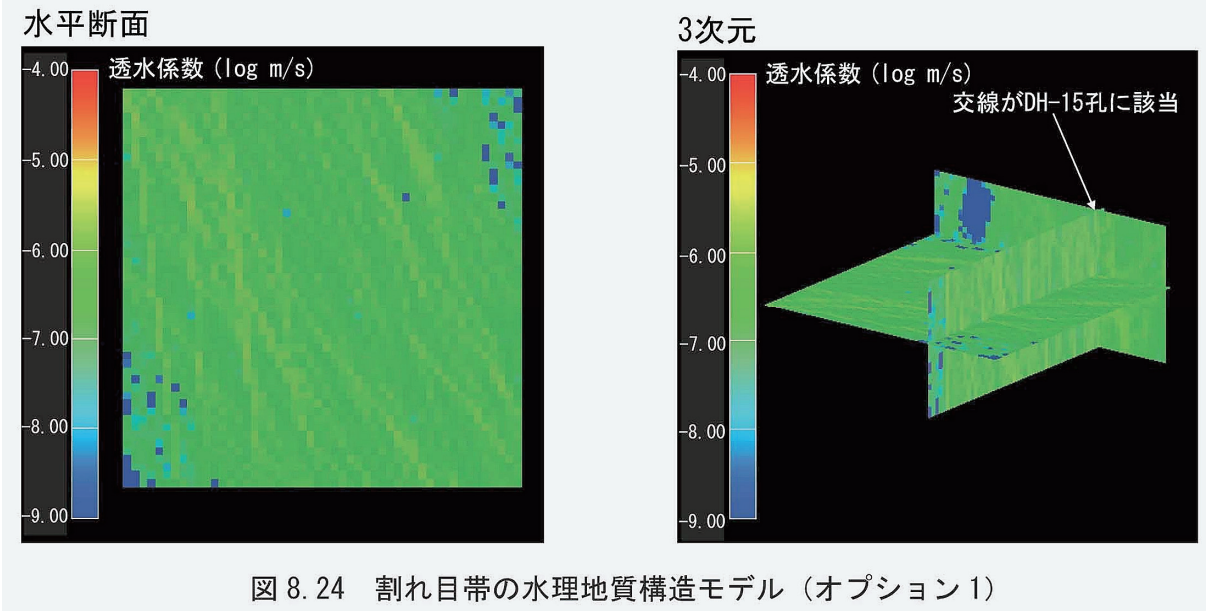


図 8.24　割れ目帯の水理地質構造モデル（オプション 1）

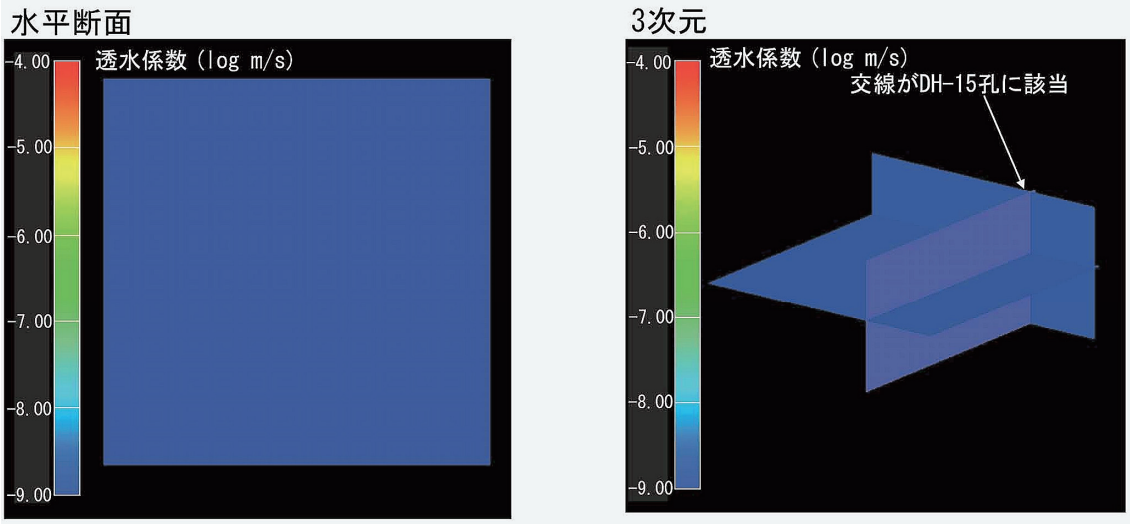


図 8.25　割れ目帯の水理地質構造モデル（オプション 2）

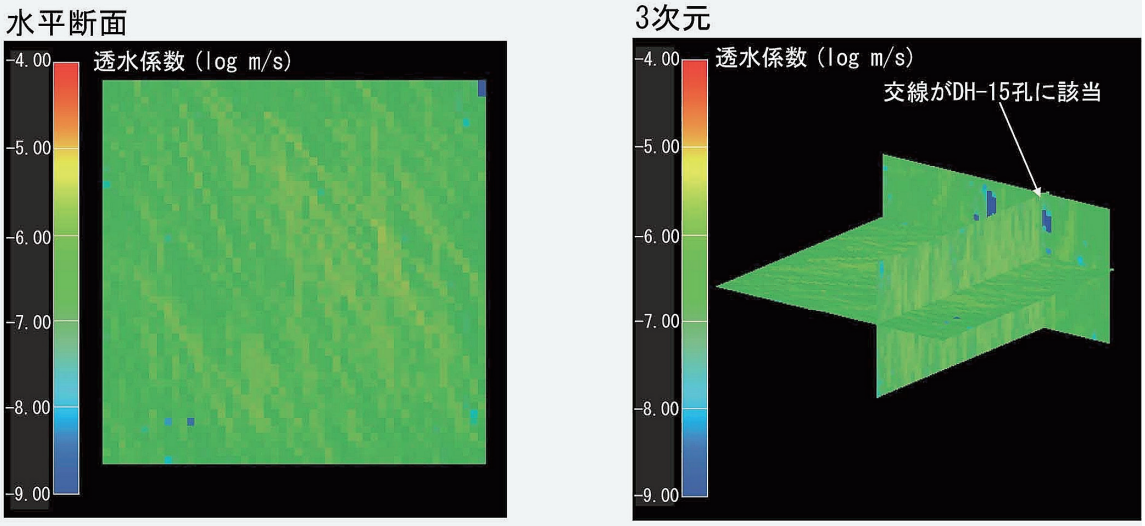


図 8.26　割れ目帯の水理地質構造モデル（オプション 3）

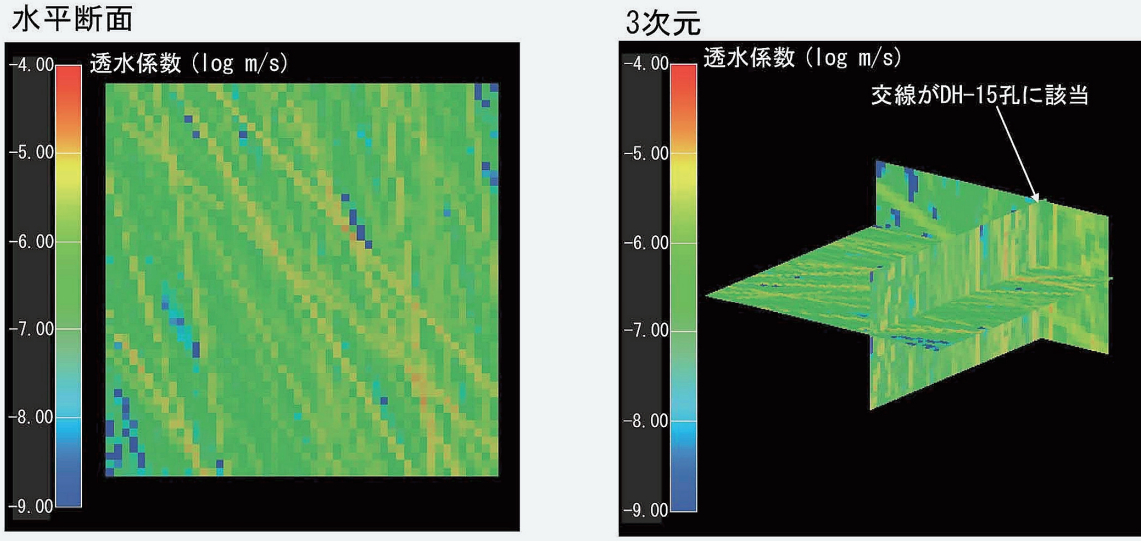


図 8.27　割れ目帯の水理地質構造モデル（オプション 4）

(2) 個別割れ目のモデル

前出の概念モデル構成要素の選択肢に対応して，円板として表現された個別割れ目を中心がポアソン分布することを仮定した亀裂ネットワークモデルによって，表 8.3 に示すような 7 つのモデルオプションを作成した。ここで，割れ目帯を考慮した場合には，これを除いた 1.67 条/mを，割れ目帯を考慮しない場合には全体の平均である 1.93 条/mを仮定している。ここで，長さの累積分布の指数については，昨年度の検討成果におけるμ=1.0 の範囲である-1.2～-2.0 を考え，その中央値である-1.6 を基本とした。また，対数標準偏差については，5 章における DH-15 号孔についての分散分析の結果最も蓋然性の高かった 1.0 を基本として，比較的適合性の高かった 0.5 と 1.5 とを併せて考えることとした。

作成した亀裂ネットワークに対してクラックテンソル法で求めた等価な透水係数テンソル分布を図 8.28～図 8.34 に示す。不均一場の全体的特徴として最も顕著な相違は，対数標準偏差によるものであり，対数標準偏差を 0.5 と仮定したモデル 6 の透水係数場は，その他のモデルと比較して均一性が高い（1e-5 m/s 以上のような極端に透水性の高い部分が見られない）のに対して，対数標準偏差を 1.5 と仮定したモデル 7 の透水係数場は，その他のモデルに比してより極端な高透水部とともに比較的透水性の低い（1e-8m/s 程度）部位が分布している。また，割れ目長さの累積分布についての指数を-2 と仮定したモデル 3 と-1.2 と比較したモデル 4 は，それぞれ，その他のモデルと比較して短い割れ目と長い割れ目がそれぞれ顕著に多くなっていることを示しており，これらは高透水部の連続性に影響を及ぼしているものと推察される。さらに，割れ目方向を Boot strapping によって設定したモデル 5 では，割れ目方向のバリエーションが限定されており，低確率の偏角の大きなものが出現していないことから，水平方向の成分間の異方性が強調されるものと考えられる。

表 8.3　個別割れ目についての水理地質モデルオプション

	透水割れ目	頻度	方向性	形状	長さ累積分布の指数	対数標準偏差
モデル 1	系統 4	割れ目帯を除いた平均	Fisher 分布	円板	-1.6	1.0
モデル 2	系統 4	割れ目帯を含む平均	Fisher 分布	円板	-1.6	1.0
モデル 3	系統 4	割れ目帯を除いた平均	Fisher 分布	円板	-2.0	1.0
モデル 4	系統 4	割れ目帯を除いた平均	Fisher 分布	円板	-1.2	1.0
モデル 5	系統 4	割れ目帯を除いた平均	Boot strapping	円板	-1.6	1.0
モデル 6	系統 4	割れ目帯を除いた平均	Fisher 分布	円板	-1.6	0.5
モデル 7	系統 4	割れ目帯を除いた平均	Fisher 分布	円板	-1.6	1.5

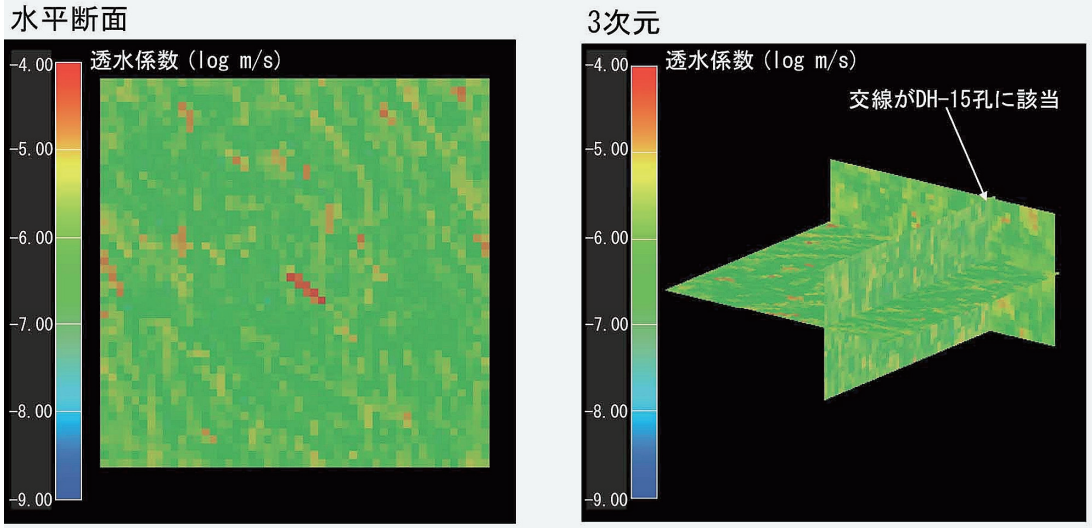


図 8.28　個別割れ目の水理地質構造モデル（モデル 1）

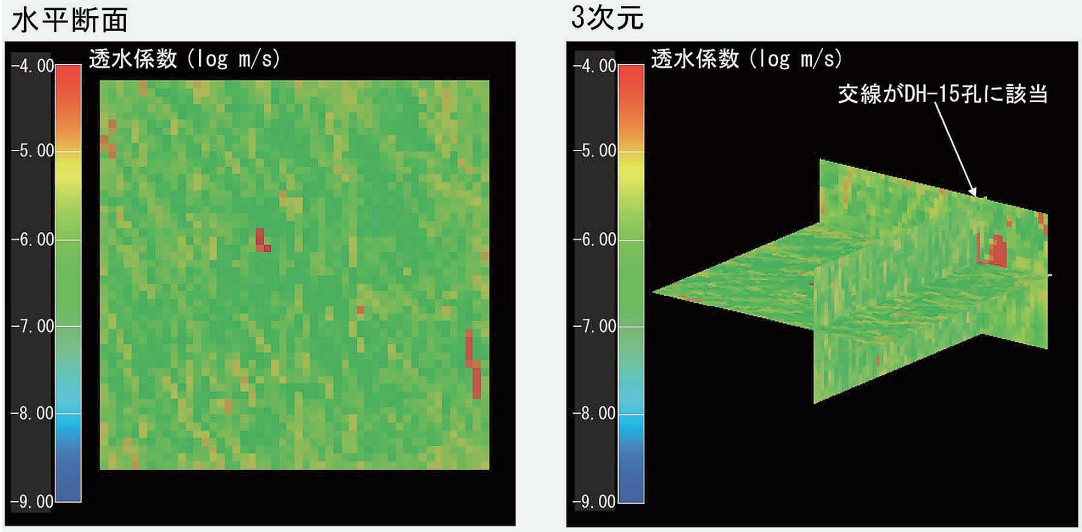


図 8.29　個別割れ目の水理地質構造モデル（モデル 2）

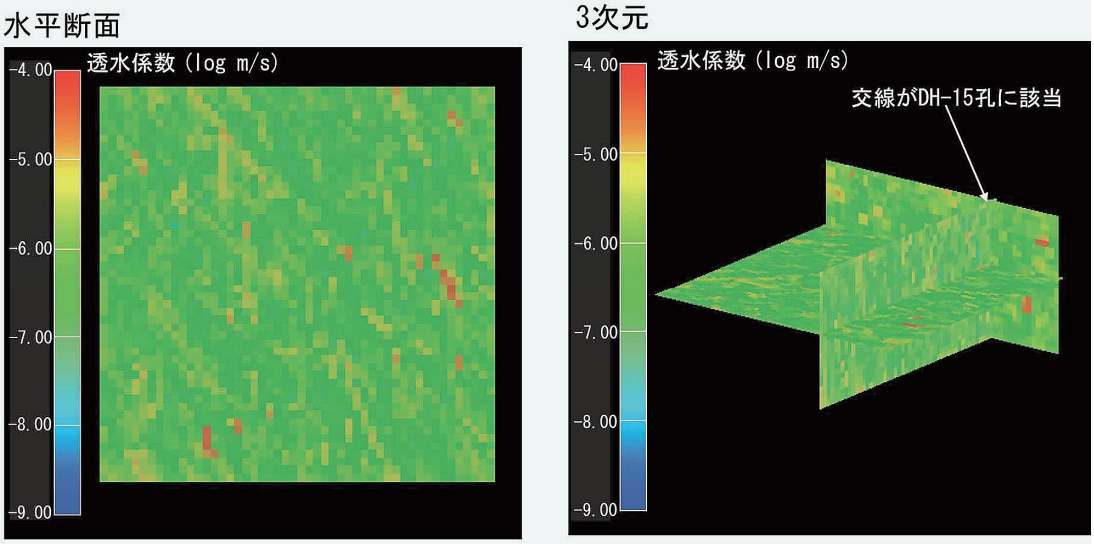


図 8.30　個別割れ目の水理地質構造モデル（モデル 3）

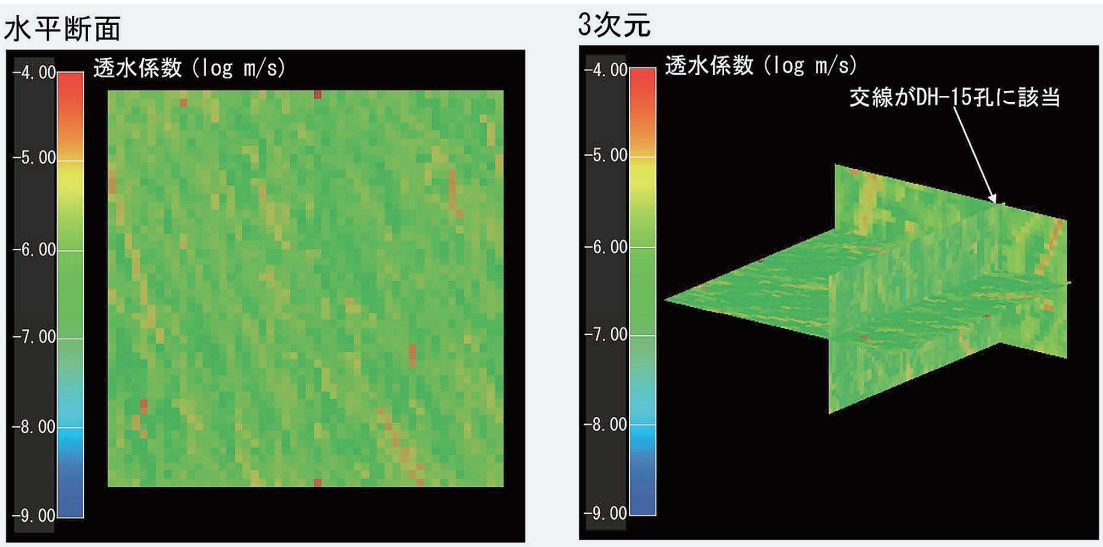


図 8.31　個別割れ目の水理地質構造モデル（モデル 4）

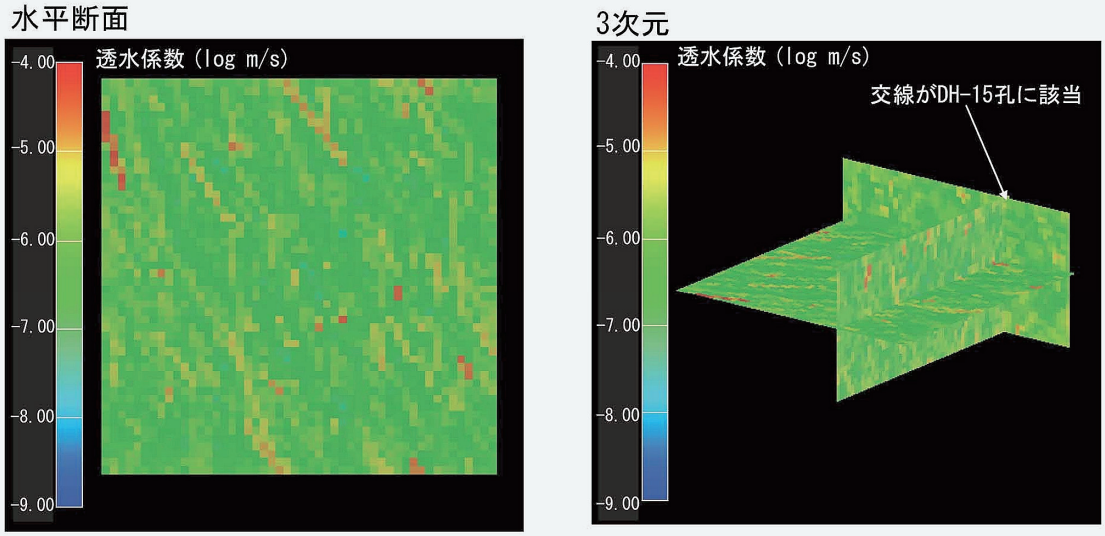


図 8.32　個別割れ目の水理地質構造モデル（モデル 5）

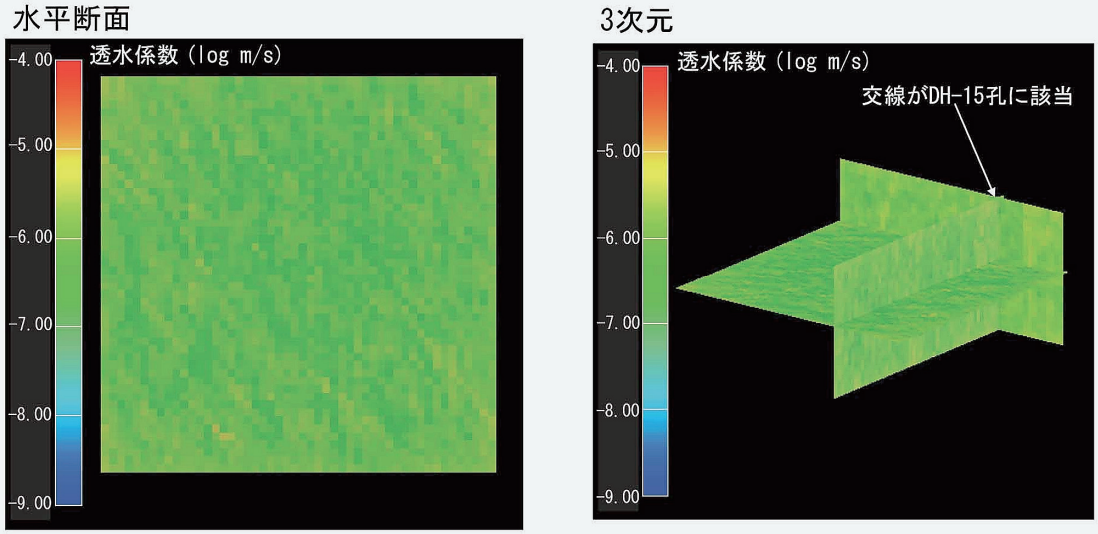


図 8.33　個別割れ目の水理地質構造モデル（モデル 6）

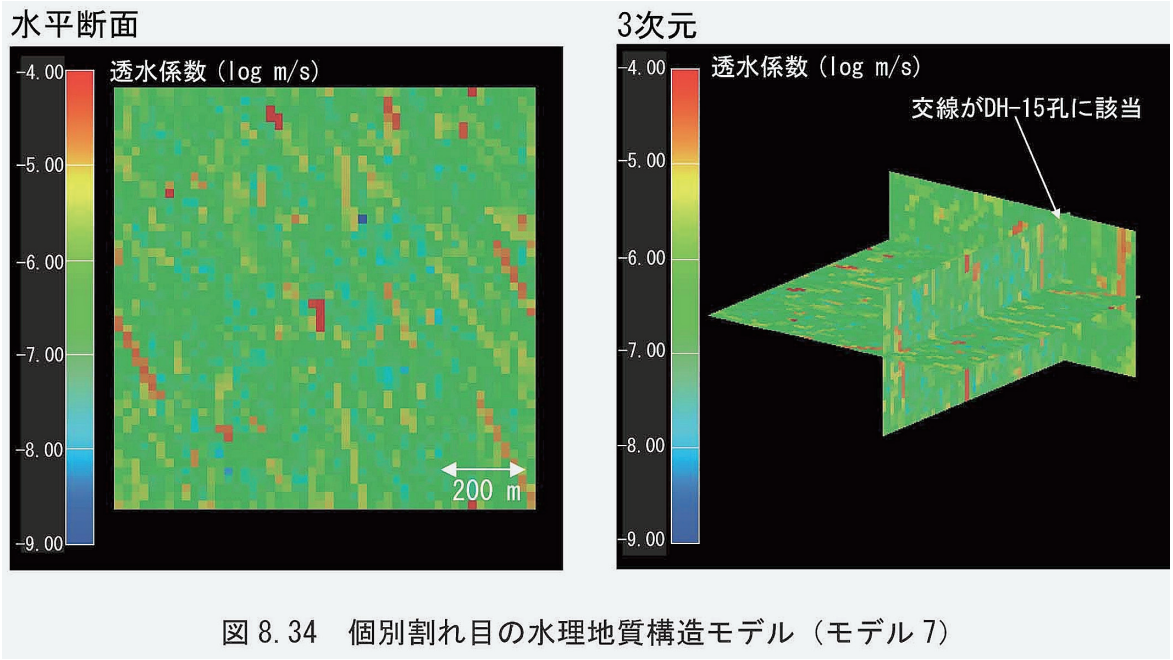


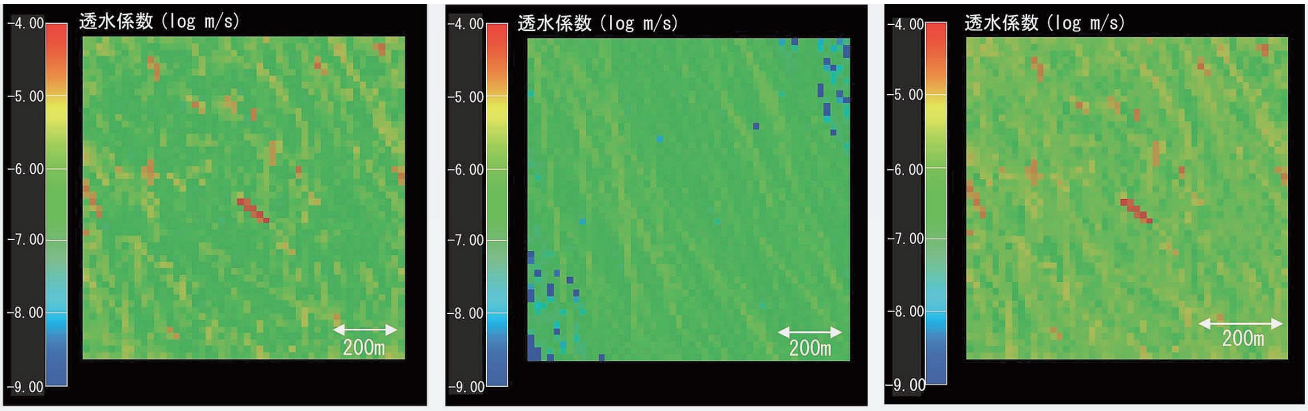
図 8.34　個別割れ目の水理地質構造モデル（モデル 7）

(3) 割れ目帯と個別割れ目を統合した不均一透水係数場の作成

前項までに述べた割れ目帯についてのモデルオプションと個別割れ目のモデルオプションを組み合わせることにより，研究所領域の花崗岩健岩部全体の不均一透水係数場を作成することができる。ここでは，例として，表 8.4 に示す 10 個のケースについて，不均一透水係数場のモデルを作成した。作成した不均一透水係数場を図 8.35～図 8.54 に示す。

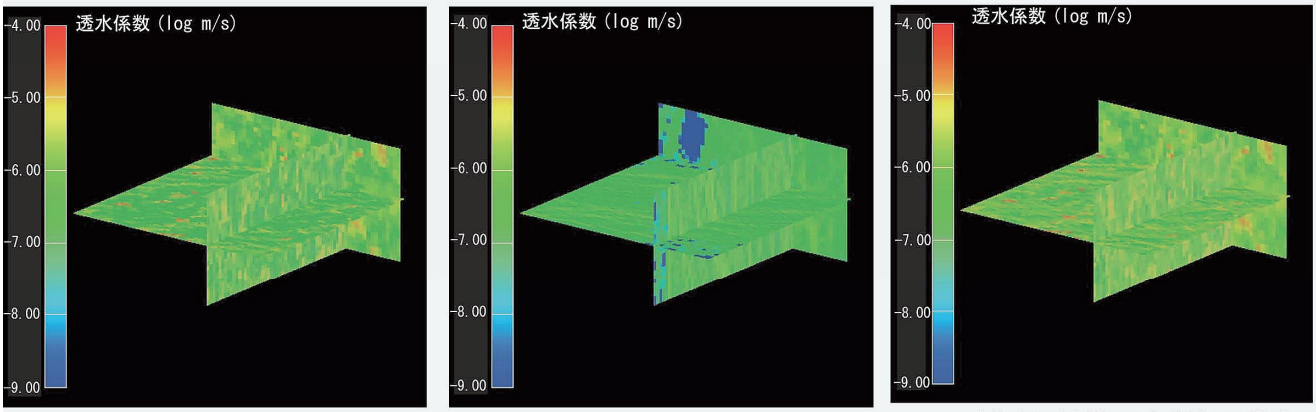
表 8.4　割れ目帯モデルと個別割れ目モデルの組み合わせによる
不均一透水係数場のケース設定

ケース番号	割れ目帯のモデル	個別割れ目のモデル
ケース 1	モデル 1	モデル 1
ケース 2	モデル 2	モデル 2
ケース 3	モデル 3	モデル 1
ケース 4	モデル 4	モデル 1
ケース 5	モデル 1	モデル 3
ケース 6	モデル 1	モデル 4
ケース 7	モデル 1	モデル 5
ケース 8	モデル 1	モデル 6
ケース 9	モデル 1	モデル 7
ケース 10	モデル 2	モデル 7



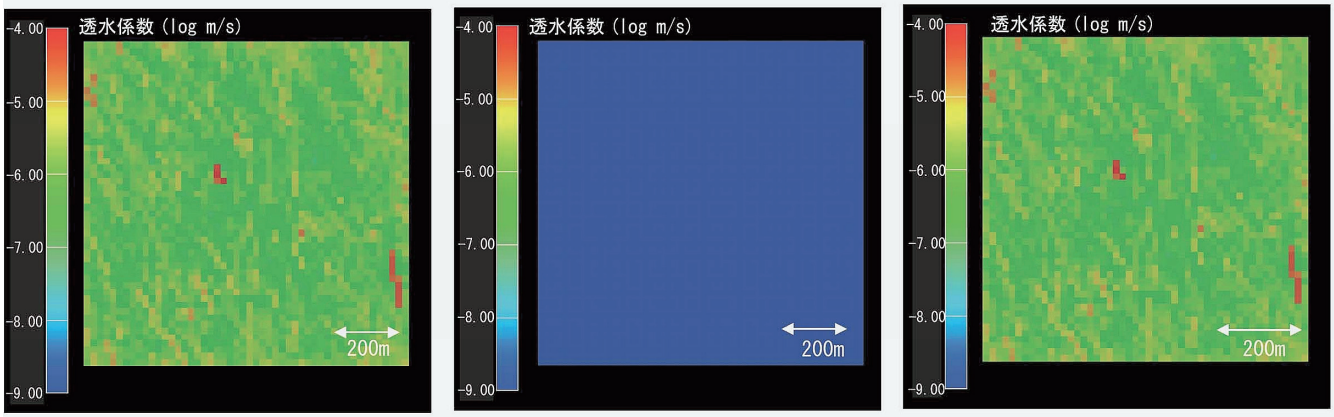
(a) 個別割れ目による透水係数分布　(b) 割れ目帯による透水係数分布　(c) 個別割れ目と割れ目帯を足し合わせた透水係数分布

図 8.35　割れ目帯と個別割れ目を統合した不均一透水係数場
（中間深度の水平断面；ケース 1）



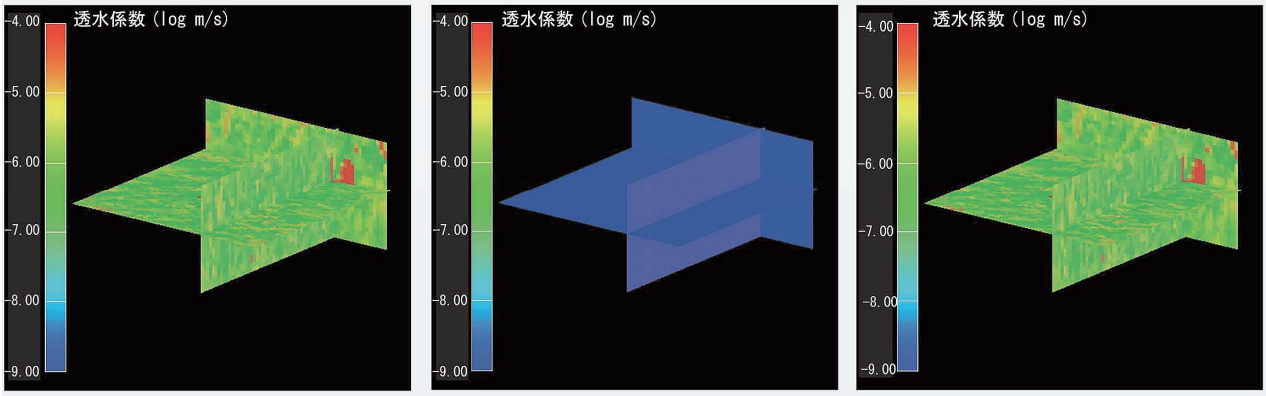
(a) 個別割れ目による透水係数分布　(b) 割れ目帯による透水係数分布　(c) 個別割れ目と割れ目帯を足し合わせた透水係数分布

図 8.36　割れ目帯と個別割れ目を統合した不均一透水係数場
（3 次元；ケース 1）



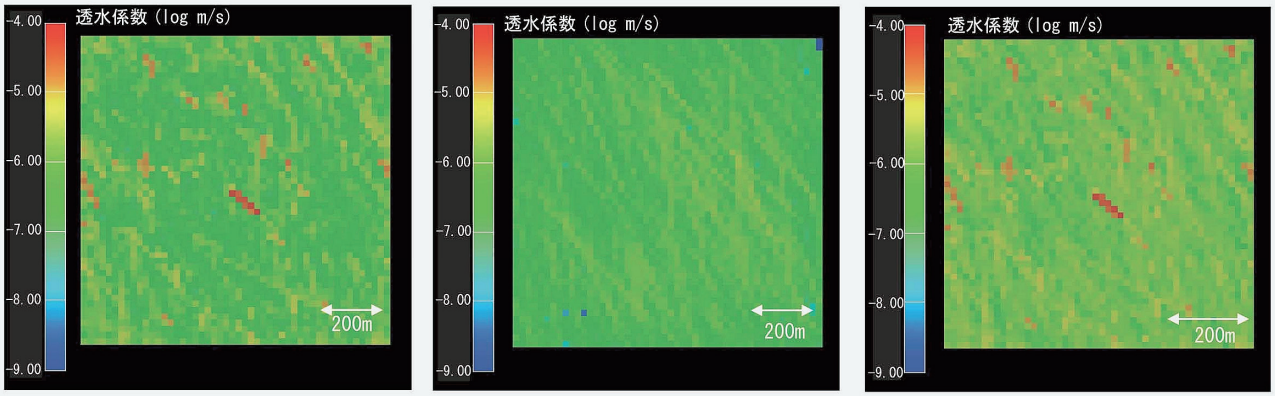
(a) 個別割れ目による透水係数分布　(b) 割れ目帯による透水係数分布　(c) 個別割れ目と割れ目帯を足し合わせた透水係数分布

図 8.37　割れ目帯と個別割れ目を統合した不均一透水係数場
（中間深度の水平断面；ケース 2）



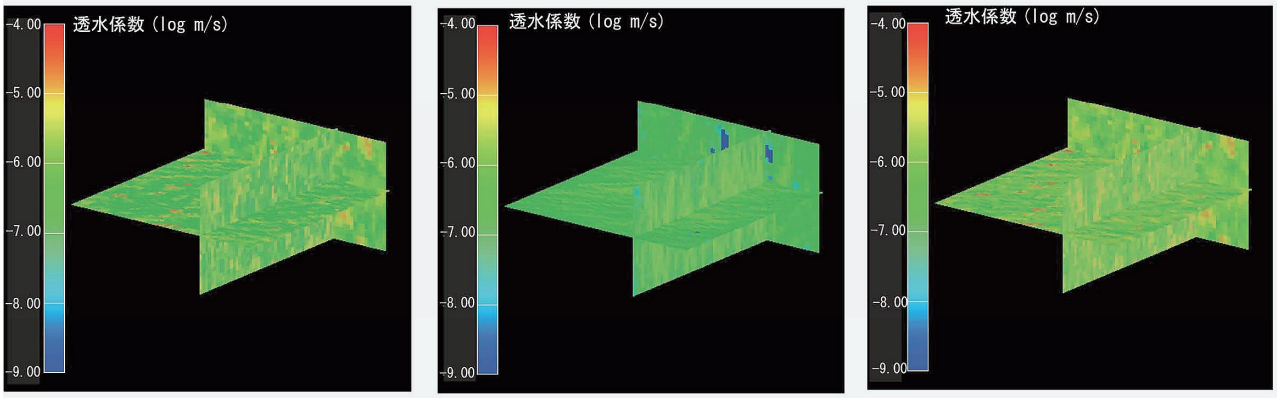
(a) 個別割れ目による透水係数分布　(b) 割れ目帯による透水係数分布　(c) 個別割れ目と割れ目帯を足し合わせた透水係数分布

図 8.38　割れ目帯と個別割れ目を統合した不均一透水係数場
(3 次元；ケース 2)



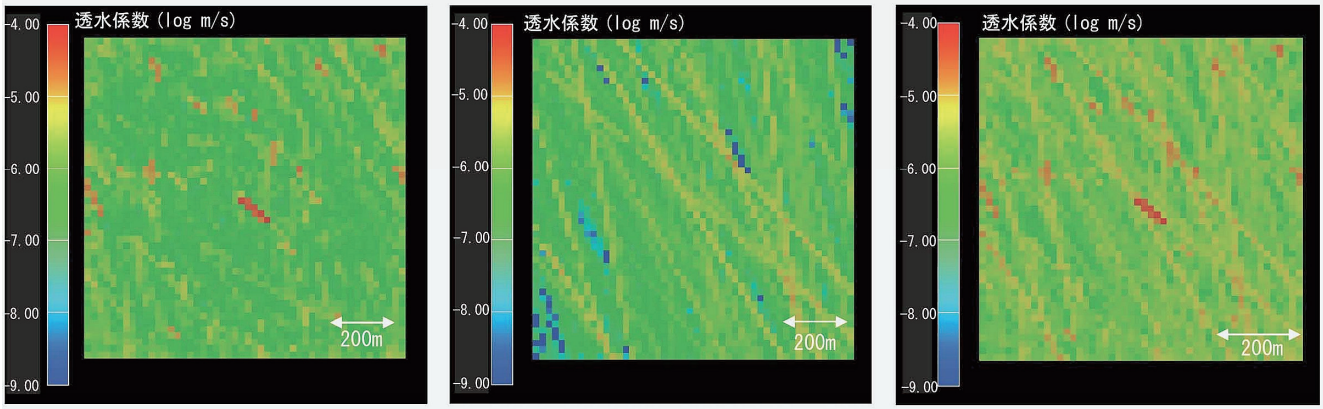
(a) 個別割れ目による透水係数分布　(b) 割れ目帯による透水係数分布　(c) 個別割れ目と割れ目帯を足し合わせた透水係数分布

図 8.39　割れ目帯と個別割れ目を統合した不均一透水係数場
(中間深度の水平断面；ケース 3)



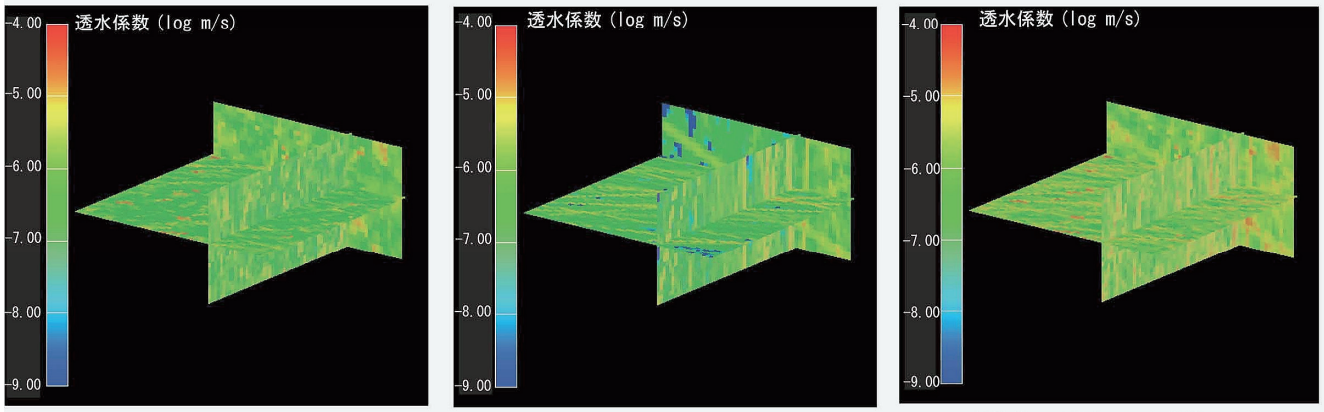
(a) 個別割れ目による透水係数分布　(b) 割れ目帯による透水係数分布　(c) 個別割れ目と割れ目帯を足し合わせた透水係数分布

図 8.40　割れ目帯と個別割れ目を統合した不均一透水係数場
(3 次元；ケース 3)



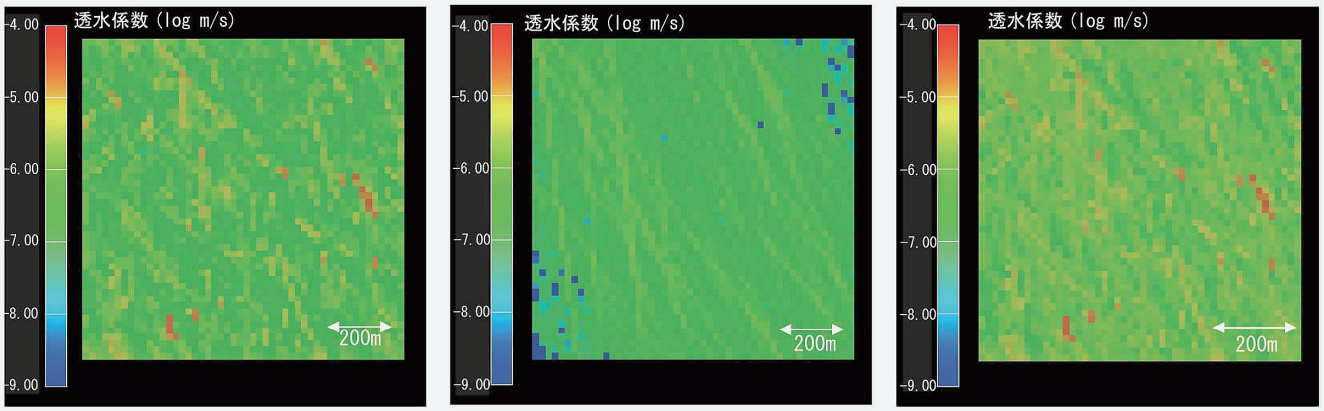
(a) 個別割れ目による透水係数分布　(b) 割れ目帯による透水係数分布　(c) 個別割れ目と割れ目帯を足し合わせた透水係数分布

図 8.41　割れ目帯と個別割れ目を統合した不均一透水係数場
（中間深度の水平断面；ケース 4）



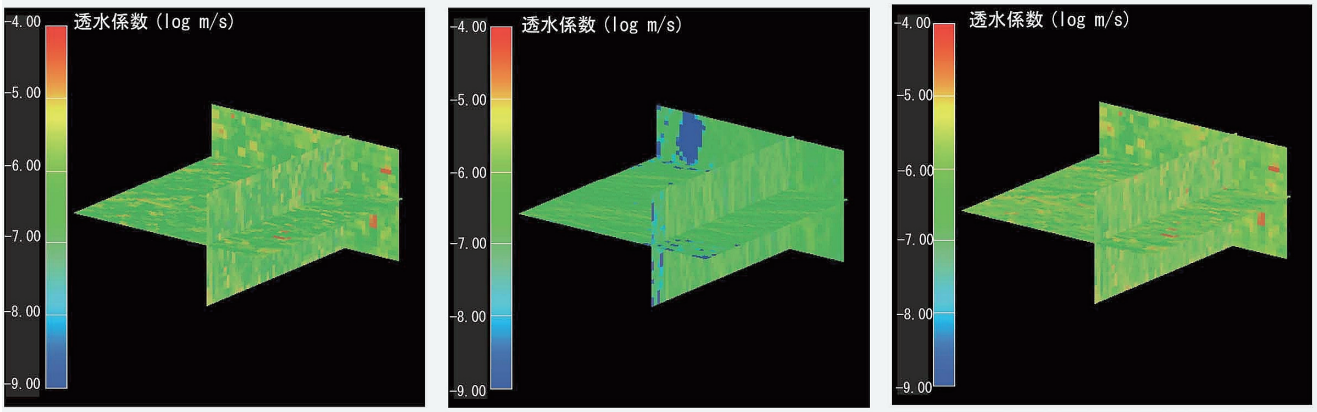
(a) 個別割れ目による透水係数分布　(b) 割れ目帯による透水係数分布　(c) 個別割れ目と割れ目帯を足し合わせた透水係数分布

図 8.42　割れ目帯と個別割れ目を統合した不均一透水係数場
（3 次元；ケース 4）



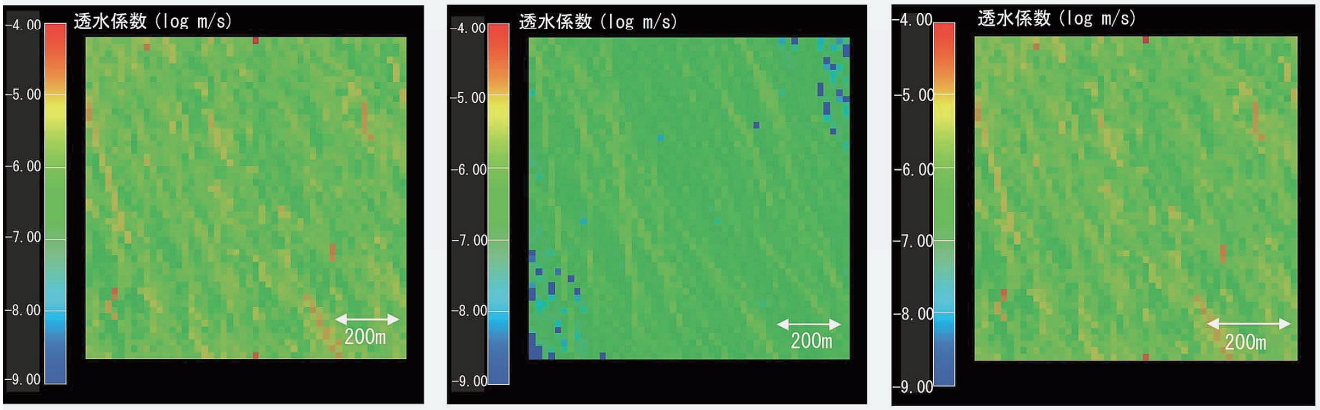
(a) 個別割れ目による透水係数分布　(b) 割れ目帯による透水係数分布　(c) 個別割れ目と割れ目帯を足し合わせた透水係数分布

図 8.43　割れ目帯と個別割れ目を統合した不均一透水係数場
（中間深度の水平断面；ケース 5）



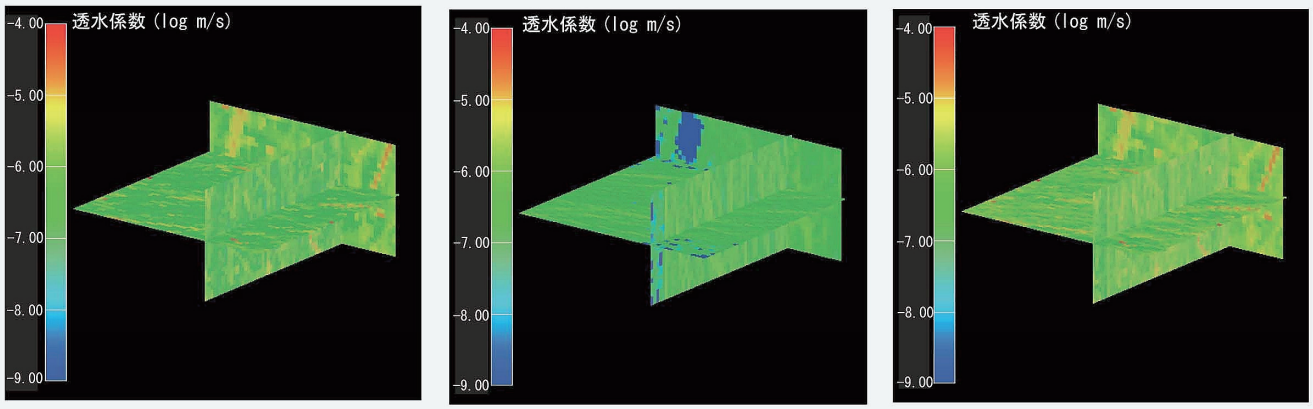
(a) 個別割れ目による透水係数分布　(b) 割れ目帯による透水係数分布　(c) 個別割れ目と割れ目帯を足し合わせた透水係数分布

図 8.44　割れ目帯と個別割れ目を統合した不均一透水係数場
（3 次元；ケース 5）



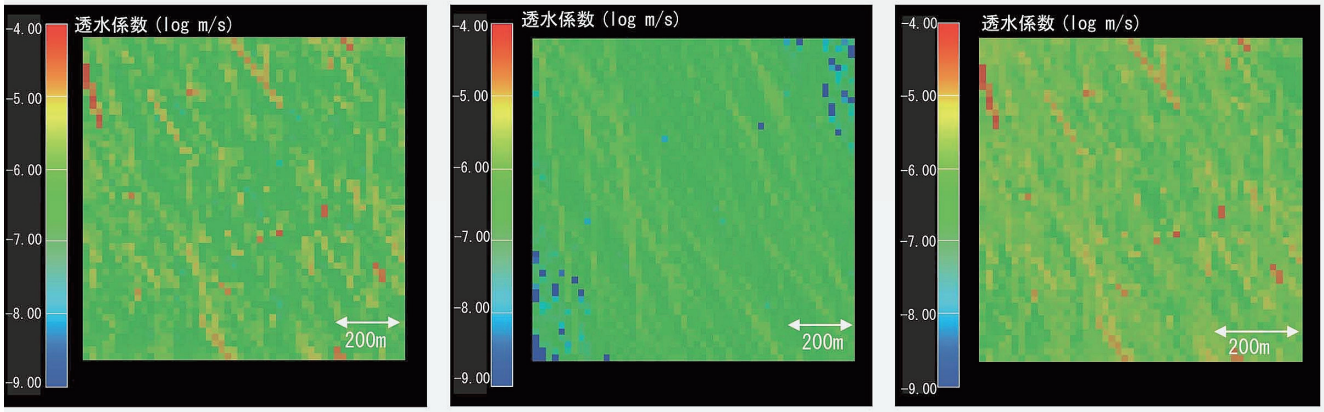
(a) 個別割れ目による透水係数分布　(b) 割れ目帯による透水係数分布　(c) 個別割れ目と割れ目帯を足し合わせた透水係数分布

図 8.45　割れ目帯と個別割れ目を統合した不均一透水係数場
（中間深度の水平断面；ケース 6）



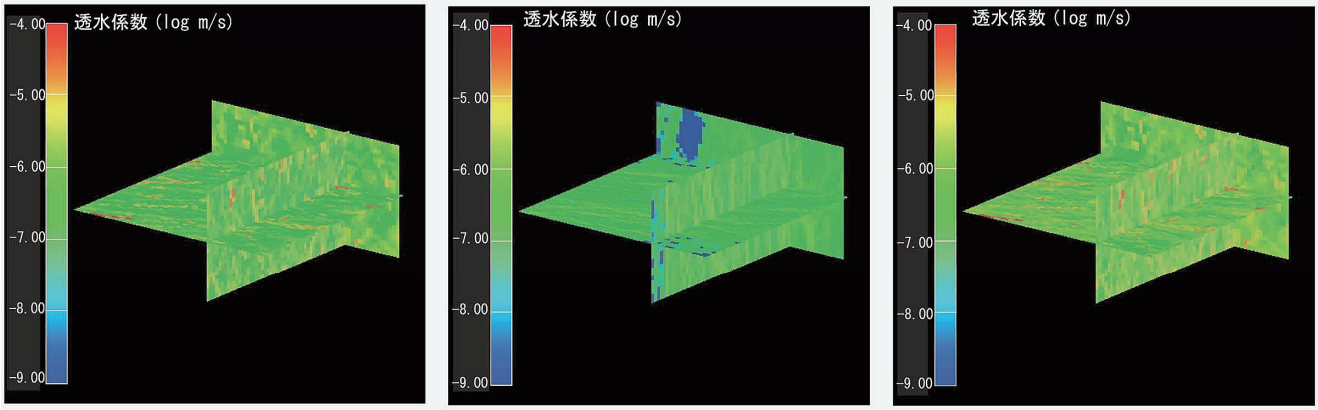
(a) 個別割れ目による透水係数分布　(b) 割れ目帯による透水係数分布　(c) 個別割れ目と割れ目帯を足し合わせた透水係数分布

図 8.46　割れ目帯と個別割れ目を統合した不均一透水係数場
（3 次元；ケース 6）



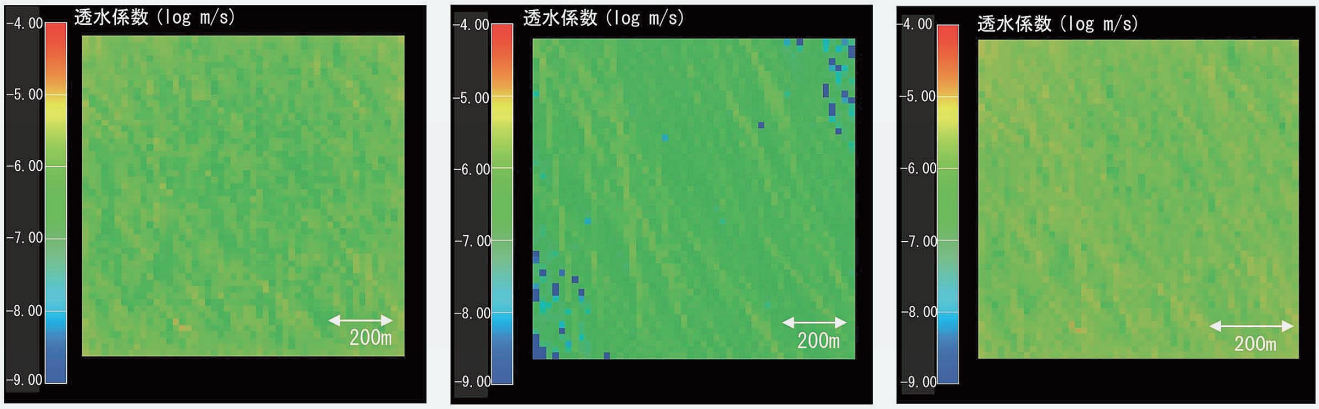
(a) 個別割れ目による透水係数分布　(b) 割れ目帯による透水係数分布　(c) 個別割れ目と割れ目帯を足し合わせた透水係数分布

図 8.47　割れ目帯と個別割れ目を統合した不均一透水係数場
（中間深度の水平断面；ケース 7）



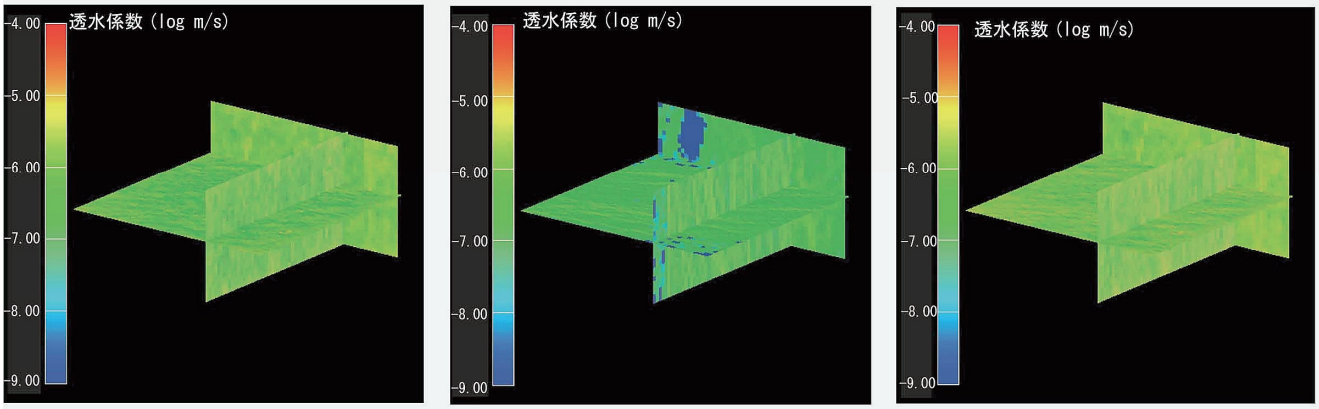
(a) 個別割れ目による透水係数分布　(b) 割れ目帯による透水係数分布　(c) 個別割れ目と割れ目帯を足し合わせた透水係数分布

図 8.48　割れ目帯と個別割れ目を統合した不均一透水係数場
（3 次元；ケース 7）



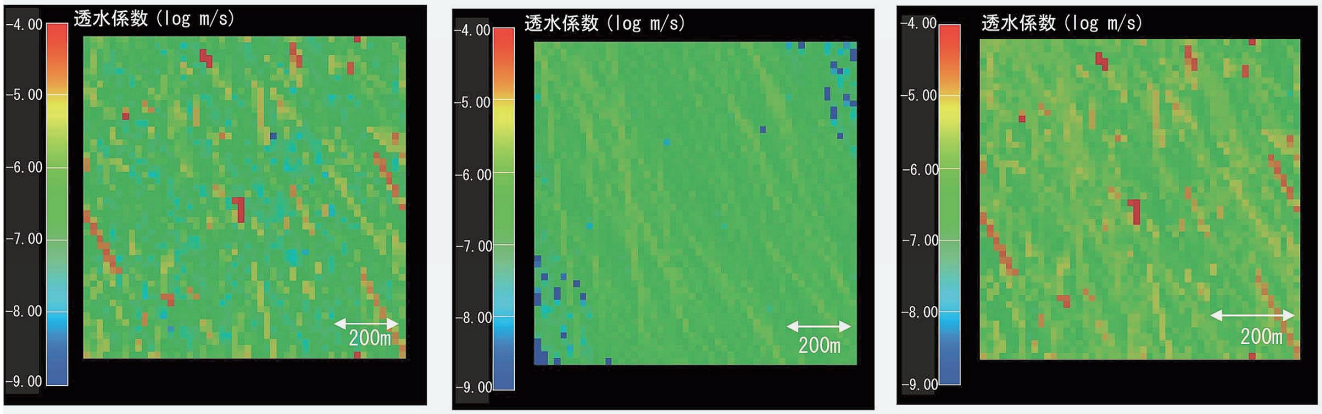
(a) 個別割れ目による透水係数分布　(b) 割れ目帯による透水係数分布　(c) 個別割れ目と割れ目帯を足し合わせた透水係数分布

図 8.49　割れ目帯と個別割れ目を統合した不均一透水係数場
（中間深度の水平断面；ケース 8）



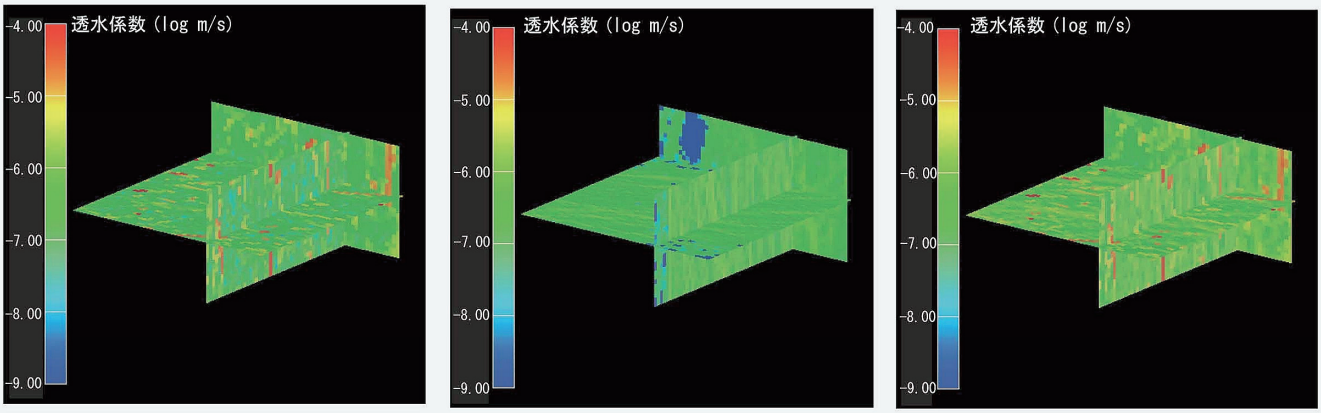
(a) 個別割れ目による透水係数分布　(b) 割れ目帯による透水係数分布　(c) 個別割れ目と割れ目帯を足し合わせた透水係数分布

図 8.50　割れ目帯と個別割れ目を統合した不均一透水係数場
（3 次元；ケース 8）



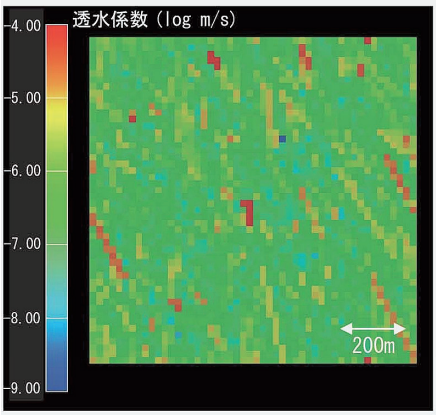
(a) 個別割れ目による透水係数分布　(b) 割れ目帯による透水係数分布　(c) 個別割れ目と割れ目帯を足し合わせた透水係数分布

図 8.51　割れ目帯と個別割れ目を統合した不均一透水係数場
（中間深度の水平断面；ケース 9）

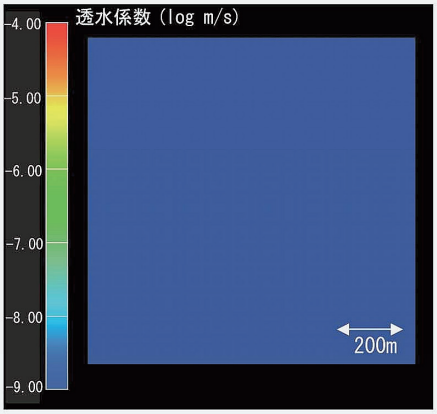


(a) 個別割れ目による透水係数分布　(b) 割れ目帯による透水係数分布　(c) 個別割れ目と割れ目帯を足し合わせた透水係数分布

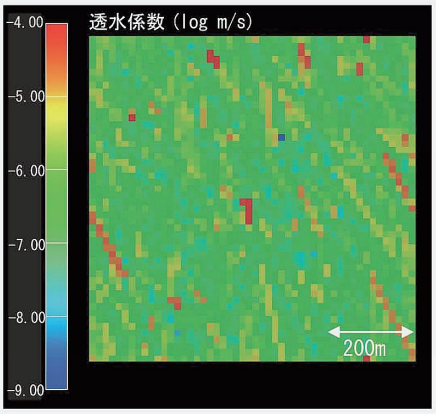
図 8.52　割れ目帯と個別割れ目を統合した不均一透水係数場
（3 次元；ケース 9）



(a) 個別割れ目による透水係数分布

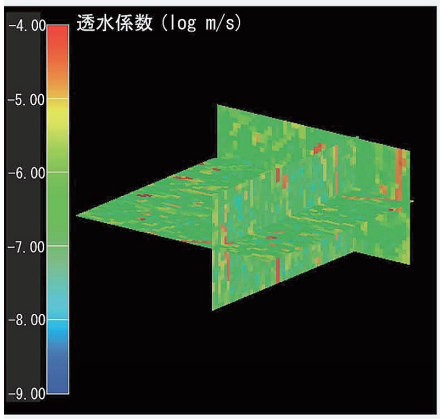


(b) 割れ目帯による透水係数分布

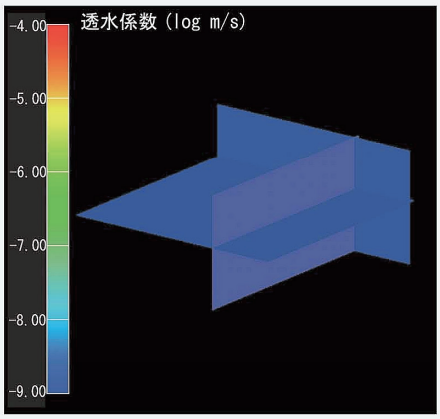


(c) 個別割れ目と割れ目帯を
足し合わせた透水係数分布

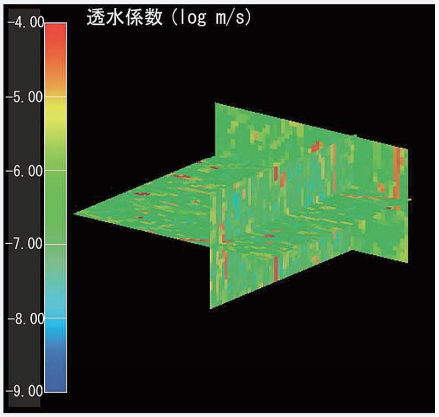
図 8.53　割れ目帯と個別割れ目を統合した不均一透水係数場
（中間深度の水平断面；ケース 10）



(a) 個別割れ目による透水係数分布



(b) 割れ目帯による透水係数分布



(c) 個別割れ目と割れ目帯を
足し合わせた透水係数分布

図 8.54　割れ目帯と個別割れ目を統合した不均一透水係数場
（3 次元；ケース 10）

8.2.2 水理解析結果

昨年度実施した中域の解析結果から，不確実性に対応した幅広いケースのいずれにおいても，研究所領域では上向きの流れが支配的であり，動水勾配は 0.01 のオーダーであることが示されている。そこで，ここでは，図 8.55 に示すように，解析対象とする研究所領域花崗岩健岩部の 1km×1km×0.5km の領域に対して上向きに 0.01 の動水勾配を仮定して飽和定常地下水流動解析を行った。昨年度の解析と同様，解析には汎用の有限要素法 3 次元地下水流動解析コードである FEMWATER を用いた。

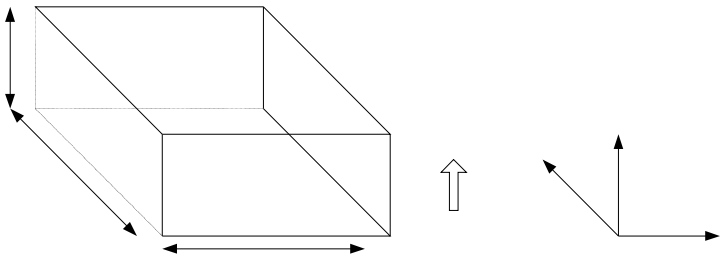
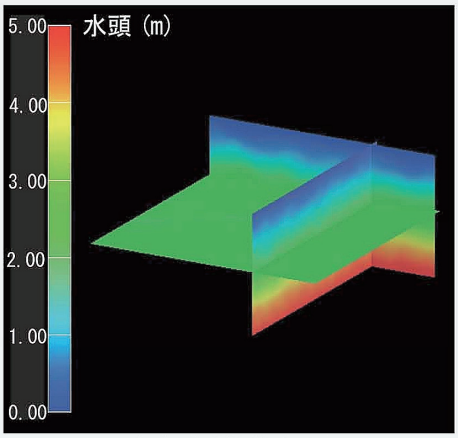
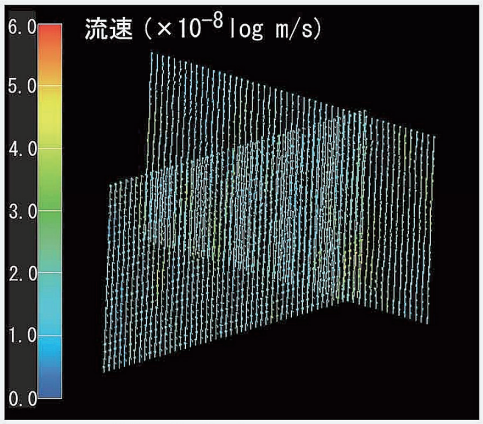


図 8.55　解析対象領域と境界条件

前節で述べた 10 ケースについての解析結果を図 8.56～図 8.65 に示す。

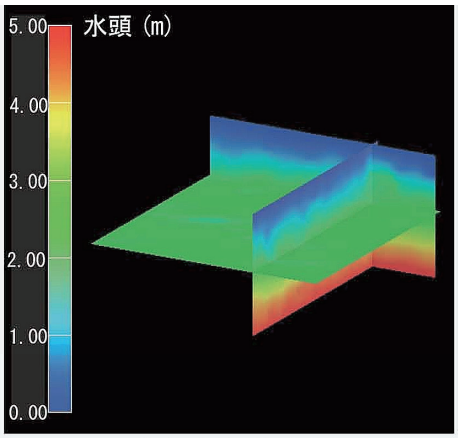


(a) 水頭分布図

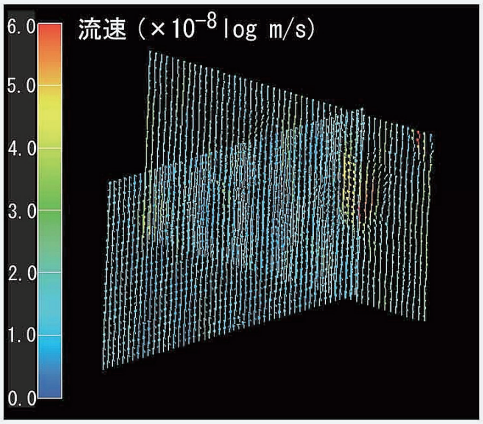


(b) 流速ベクトル図

図 8.56　地下水流動解析結果（ケース 1）

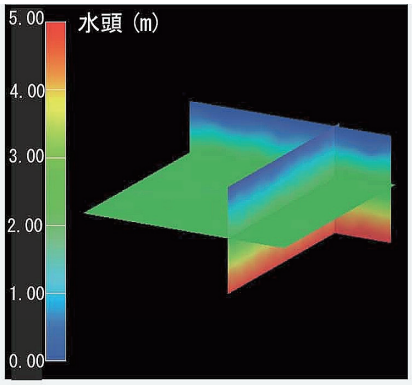


(a) 水頭分布図

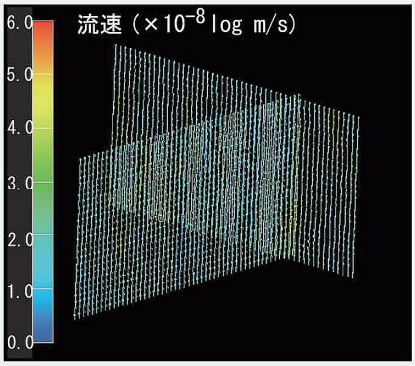


(b) 流速ベクトル図

図 8.57　地下水流動解析結果（ケース 2）

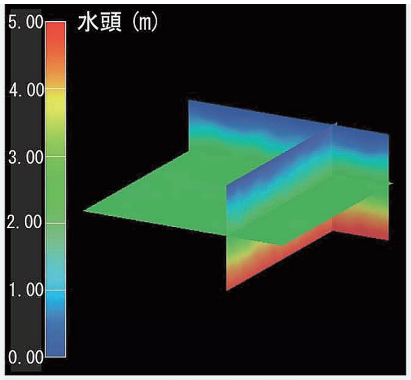


(a) 水頭分布図

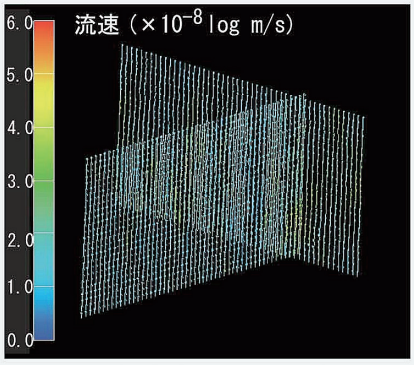


(b) 流速ベクトル図

図 8.58　地下水流動解析結果（ケース 3）

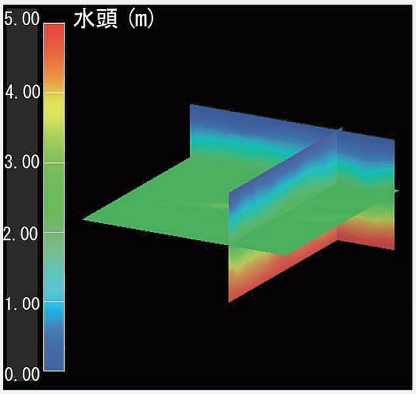


(a) 水頭分布図

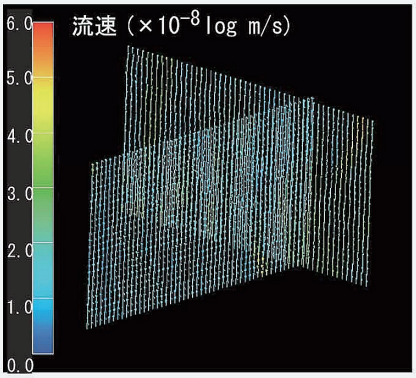


(b) 流速ベクトル図

図 8.59　地下水流動解析結果（ケース 4）

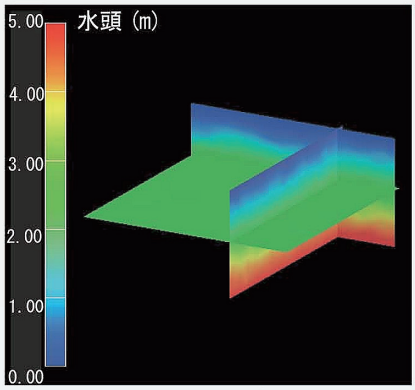


(a) 水頭分布図

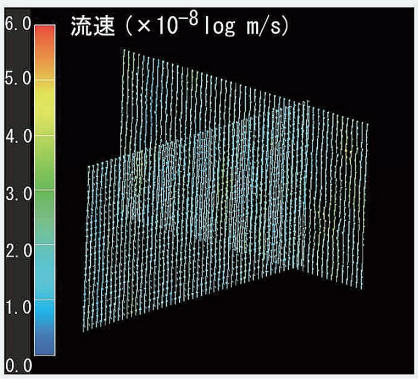


(b) 流速ベクトル図

図 8.60　地下水流動解析結果（ケース 5）

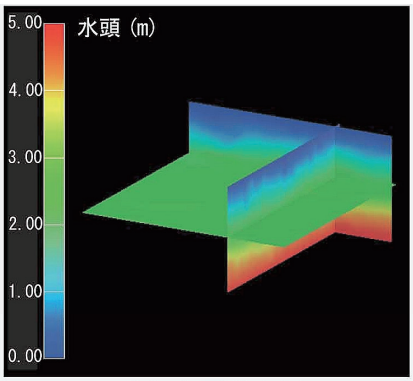


(a) 水頭分布図

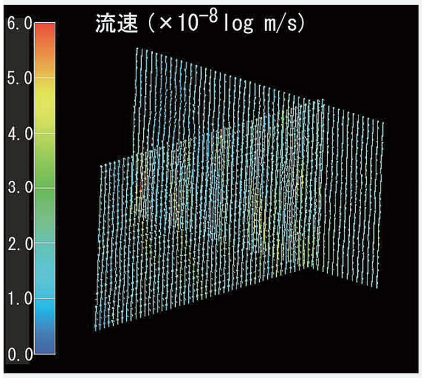


(b) 流速ベクトル図

図 8.61　地下水流動解析結果（ケース 6）

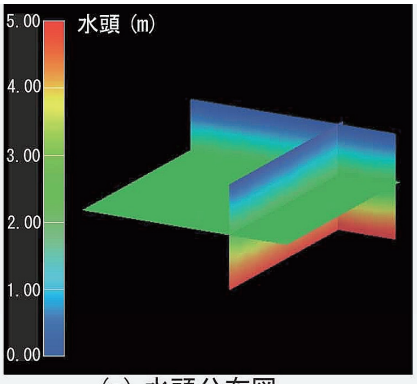


(a) 水頭分布図

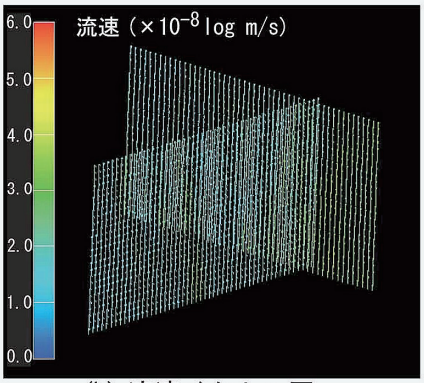


(b) 流速ベクトル図

図 8.62　地下水流動解析結果（ケース 7）

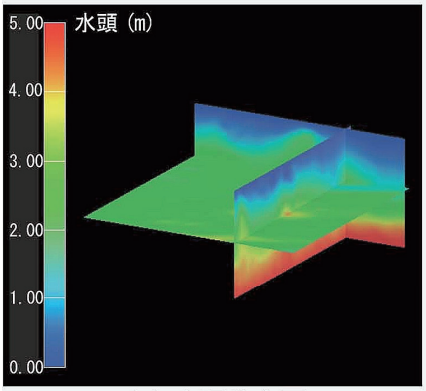


(a) 水頭分布図

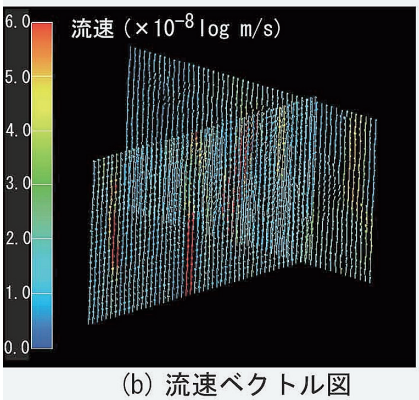


(b) 流速ベクトル図

図 8.63　地下水流動解析結果（ケース 8）

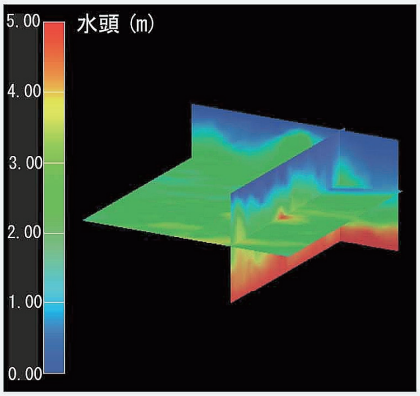


(a) 水頭分布図

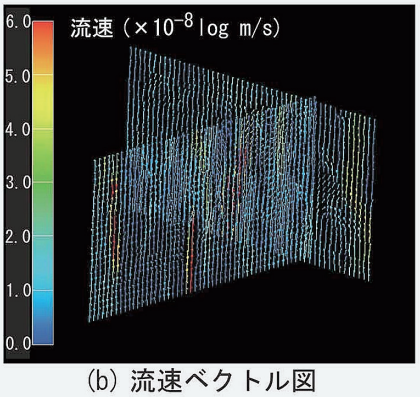


(b) 流速ベクトル図

図 8.64　地下水流動解析結果（ケース 9）



(a) 水頭分布図



(b) 流速ベクトル図

図 8.65　地下水流動解析結果（ケース 10）

8.3 水理地質構造モデルにおける不確実性の評価

ここでは，前節で作成した種々の水理地質構造モデルに対して，他の情報と比較することによって不確実性の評価を行う。ただし，これまでのところ，研究所領域において入手されている情報はDH-15号孔の割れ目情報と水理試験結果に限られており，これらの一部は前節までのモデル構築に用いているために，完全に独立な情報として検証に用いることはできない。そこで，本年度の研究においては，統計的な手法で作成した不均一透水係数場が，本来の水理試験結果の傾向を適切に反映するものであるか否かに焦点を当てて比較検討を行うこととした。

8.3.1 DH-15号孔位置における水理解析結果

各解析ケースにつ (a)水頭分布図 号孔に該当するメッシュ位置での透水係数分布，水頭および流速を抽出した結果を (a)水頭分布図 68に示す。

(a)水頭分布図

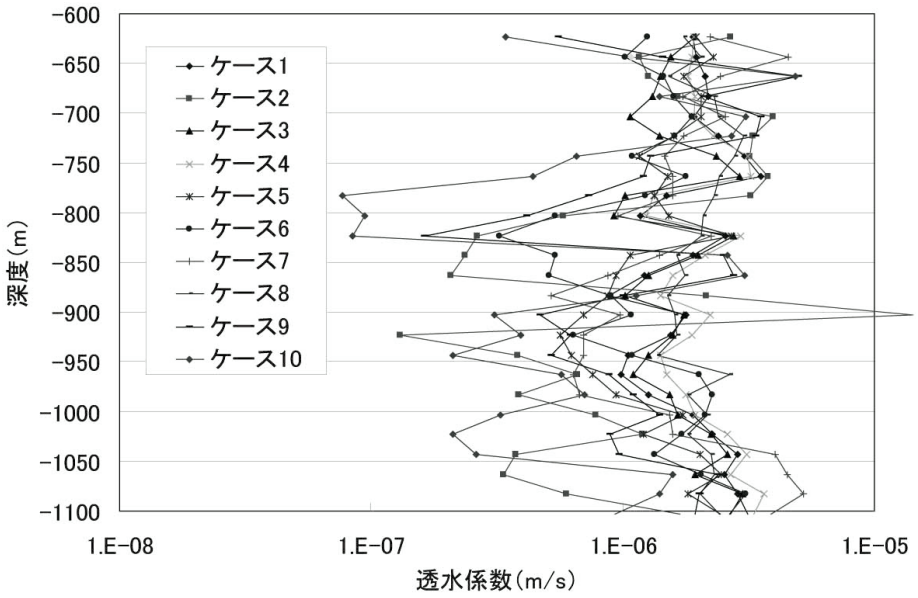


図 8.66　DH-15号孔位置での透水係数推定値の深度依存性

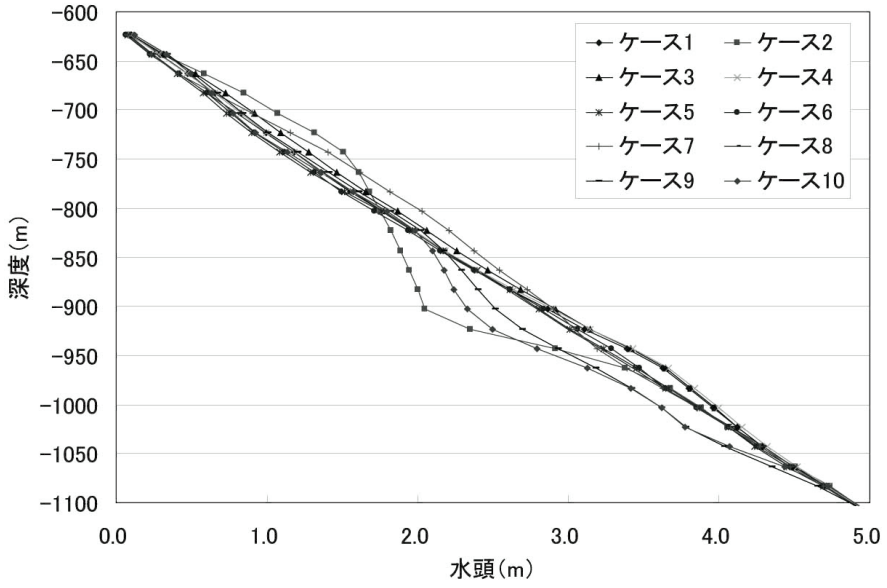


図 8.67　DH-15号孔位置での水頭算出結果の深度依存性

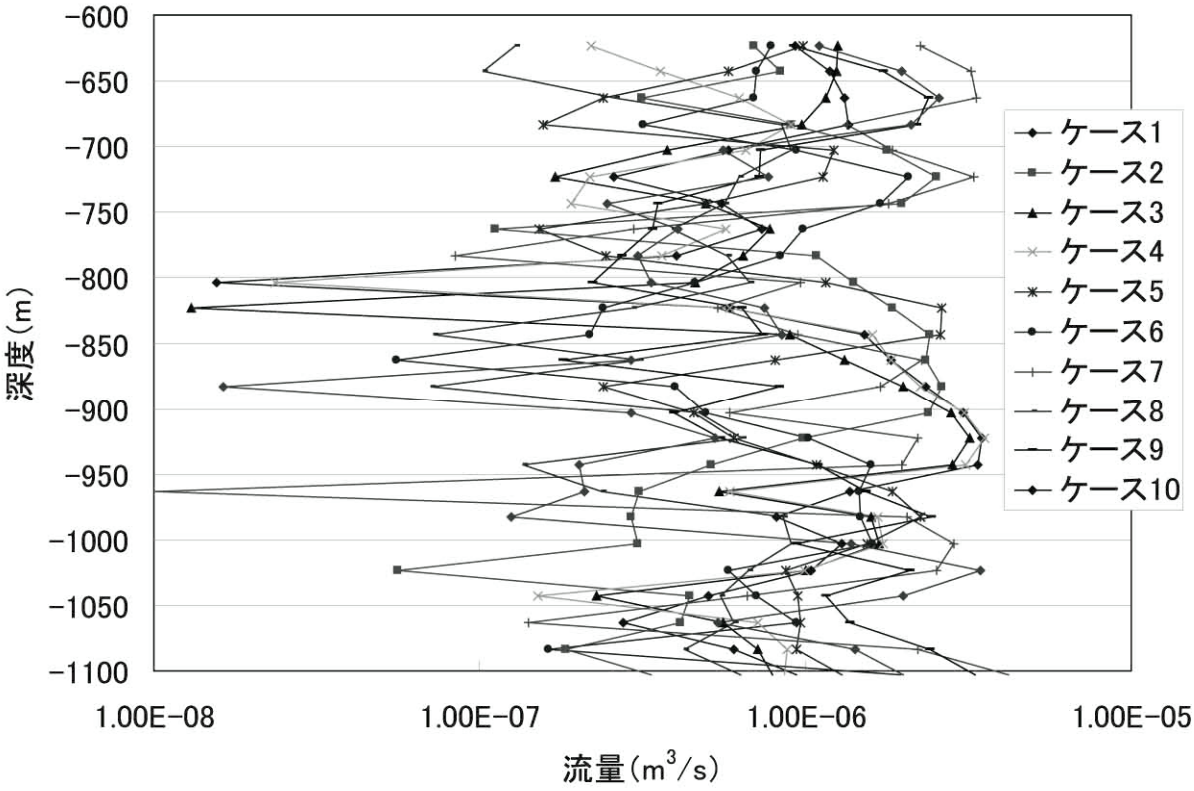


図 8.68　DH-15 号孔位置での流量算出結果の深度依存性

8.3.2 実測値との比較

DH-15 号孔における水理試験から推定された透水係数の分布と各ケースの不均一透水係数分布とを図 8.69 に比較する。図から明らかな通り，各ケースにおいて推定された透水係数分布は，実測値に対しておよそ 0.5 桁程度高いという傾向を示している。

この原因としては,

① 割れ目帯と個別割れ目の峻別が不十分であり透水量係数対数標準偏差を過小評価している

② 割れ目帯と個別割れ目の峻別が不十分であり個別割れ目の透水量係数算術平均を過大評価している

③ 個別割れ目の相互連続性を過大評価している

といったものが考えられる。この点を明確にするためには，割れ目帯を含まない短区間の水理試験（可能であれば単一割れ目を含む区間）を実施することにより，個別割れ目のみの透水性に関する信頼できる統計データを得ることが必要と考えられる。

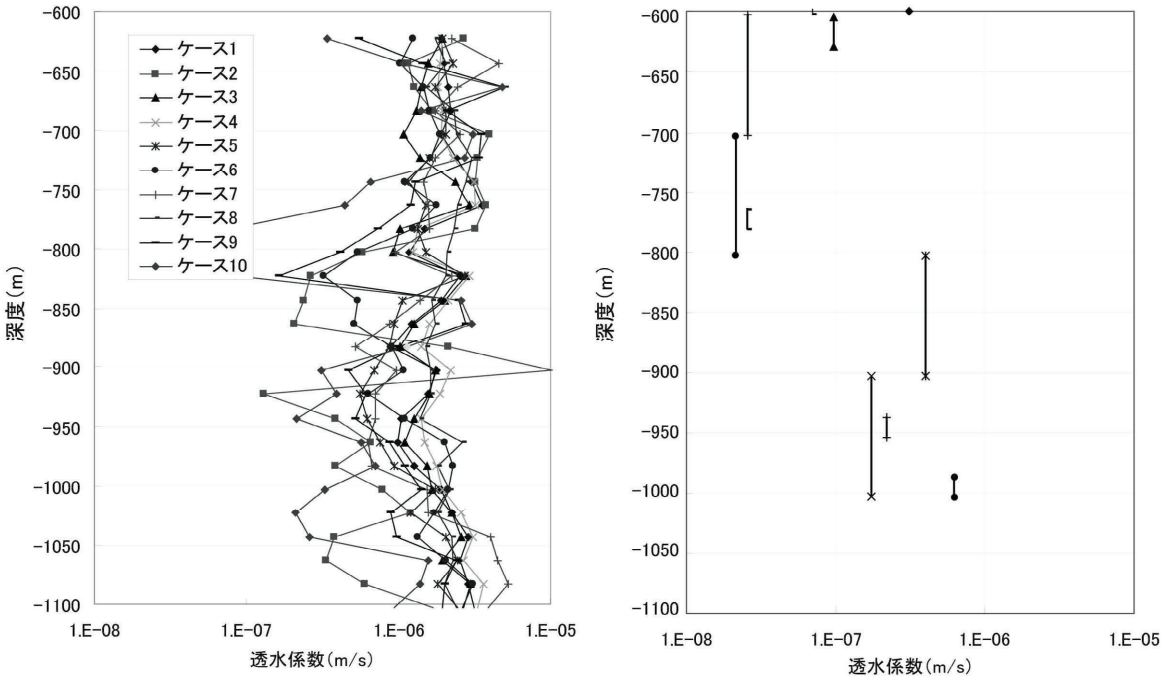


図 8.69　DH-15 号孔位置における透水係数分布の推定値（左）と実測値（右）の比較

8.4 地下水流速と地下水移行時間に基づく不確実性の評価

8.4.1 地下水流速および地下水移行時間分布の算出

前節で述べた水理解析の結果に基づいてダルシー流速分布を整理するとともに，パーティクルトラッキングを実施してダルシー流速に基づく地下水移行時間の分布を算出した。着目する水平断面は，下底から 30mの位置にあり，パーティクルの出発点はこの水平断面の各メッシュ（合計 2,500 個）とした（図 8.70）。

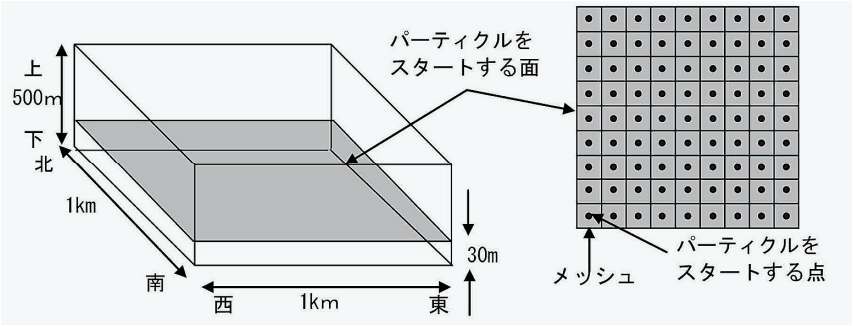
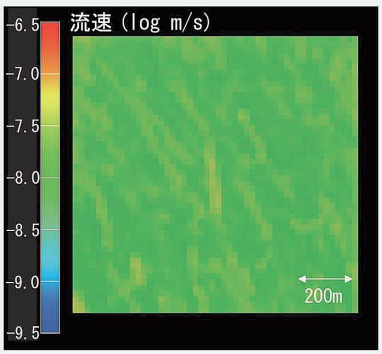
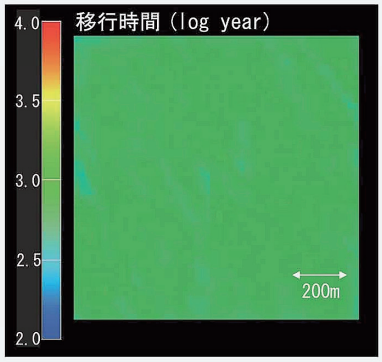


図 8.70　パーティクルをスタートする点の概念図

各ケースについての解析結果を図 8.71～図 8.80 に示す。各ケースの特徴は，むしろ高透水性領域の連続性や分布に関してのものであり，相対的な低透水部においては，ケース 10 以外のいずれのケースにおいてもダルシー流速に基づく地下水移行時間が 1,000 程度というほぼ同一の値を示す。ケース 10 については，割れ目帯が分布せず，かつ，個別割れ目の透水量係数分布の対数標準偏差が 1.5 であると仮定していることから，1E-8m/s 程度の低透水部が存在していることから，ダルシー流速に基づく地下水移行時間が 1,000 年を顕著に上回る部分が見られる。そこで，このケースについて，地下水移行時間のしきい値を 1,000 年，3,000 年，5,000 年，7,500 年および 10,000 年とした場合にこれらを上回るような移行時間を確保できる部分の分布を詳細に調べた。結果を図 8.81～図 8.83 に示す。同図から明らかなように，ほとんど全域において，ダルシー流速に基づく地下水移行時間が 1,000 年を上回るが，3,000 年以上の部分は限定的となり，5,000 年以上の部分はほとんどない。

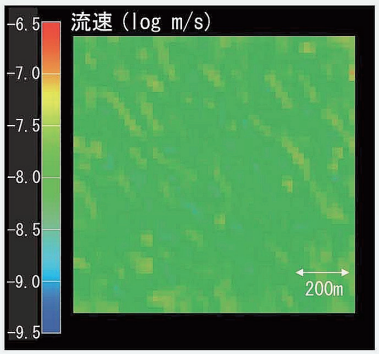


(a) 流速の分布

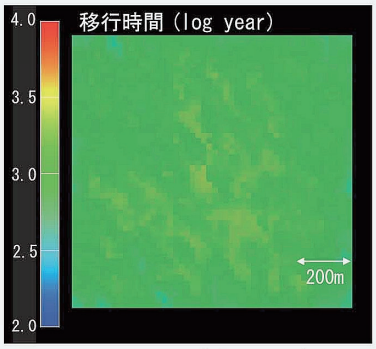


(b) 移行時間の分布

図 8.71　地下水流速と地下水移行時間の分布（ケース 1）

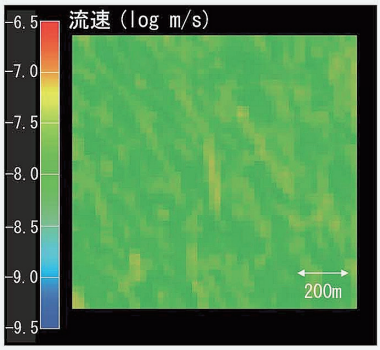


(a) 流速の分布

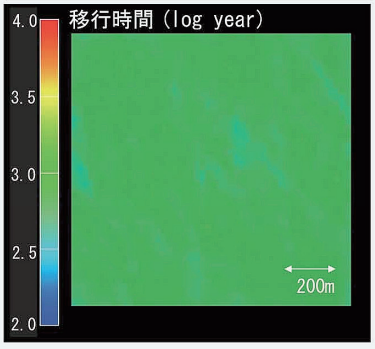


(b) 移行時間の分布

図 8.72　地下水流速と地下水移行時間の分布（ケース 2）

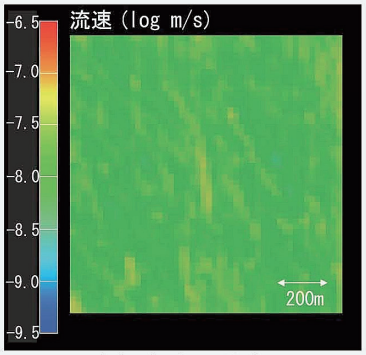


(a) 流速の分布

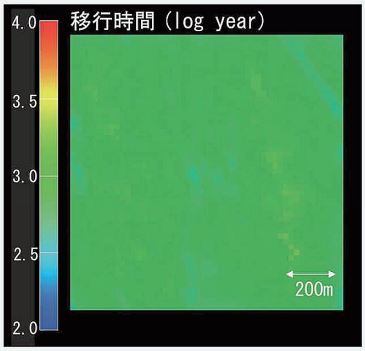


(b) 移行時間の分布

図 8.73　地下水流速と地下水移行時間の分布（ケース 3）

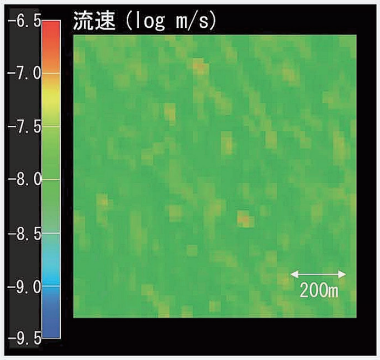


(a) 流速の分布

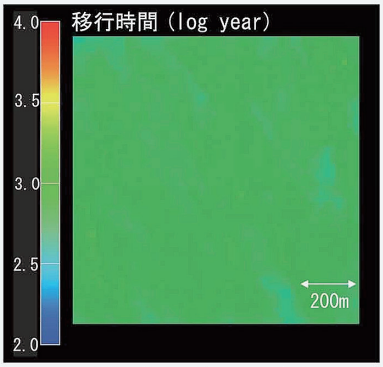


(b) 移行時間の分布

図 8.74　地下水流速と地下水移行時間の分布（ケース 4）

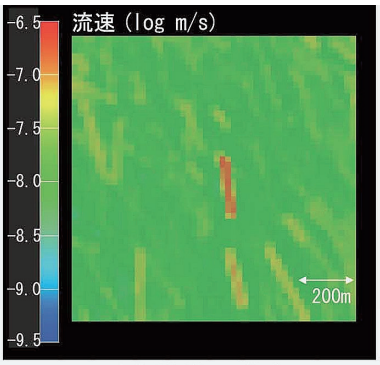


(a) 流速の分布

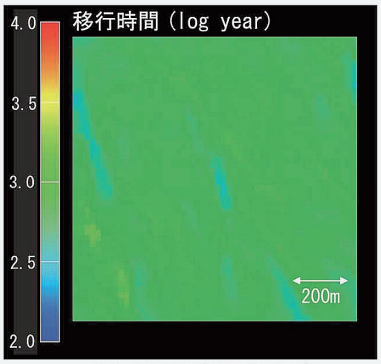


(b) 移行時間の分布

図 8.75　地下水流速と地下水移行時間の分布（ケース 5）

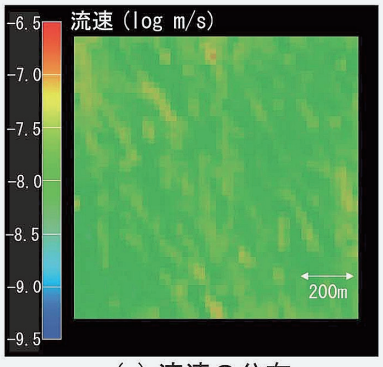


(a) 流速の分布

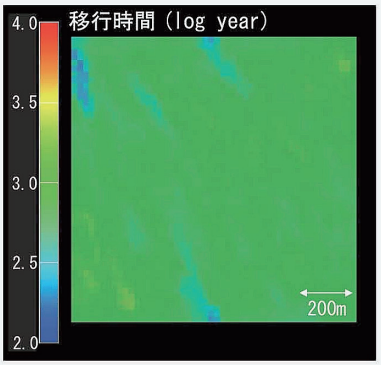


(b) 移行時間の分布

図 8.76　地下水流速と地下水移行時間の分布（ケース 6）

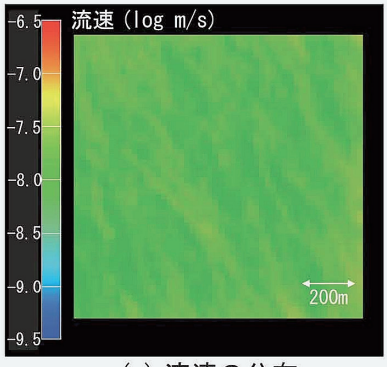


(a) 流速の分布

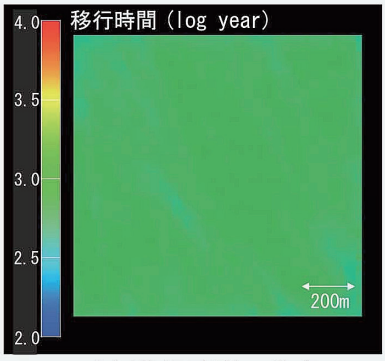


(b) 移行時間の分布

図 8.77　地下水流速と地下水移行時間の分布（ケース 7）

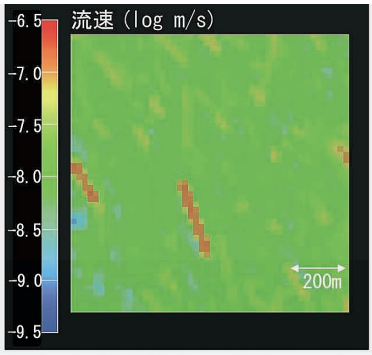


(a) 流速の分布

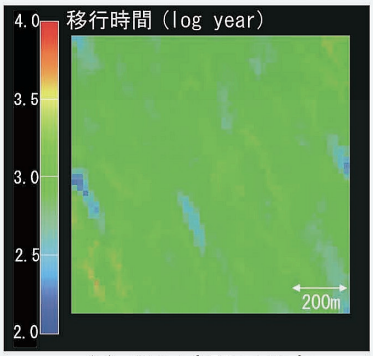


(b) 移行時間の分布

図 8.78　地下水流速と地下水移行時間の分布（ケース 8）

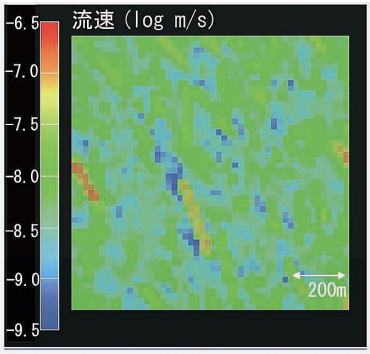


（a）流速の分布

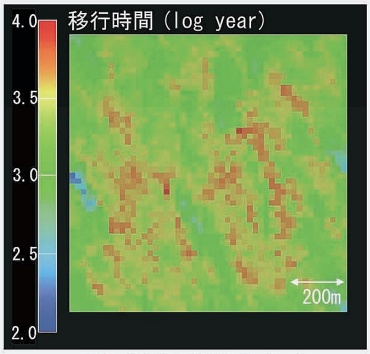


（b）移行時間の分布

図 8.79　地下水流速と地下水移行時間の分布（ケース 9）

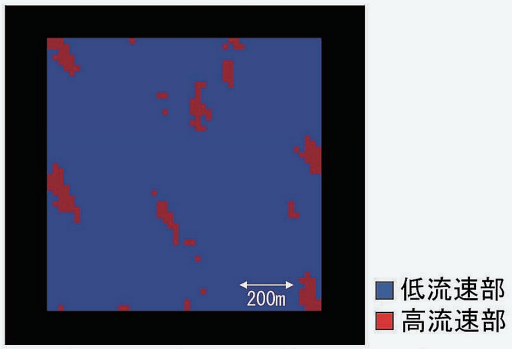


（a）流速の分布

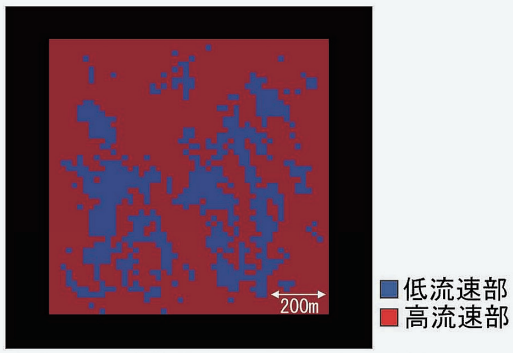


（b）移行時間の分布

図 8.80　地下水流速と地下水移行時間の分布（ケース 10）

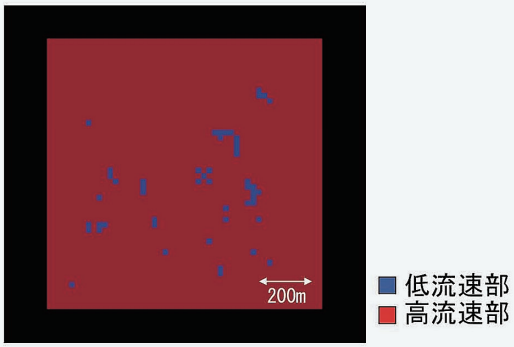


（a）移行時間 1000 年を下限値とした場合

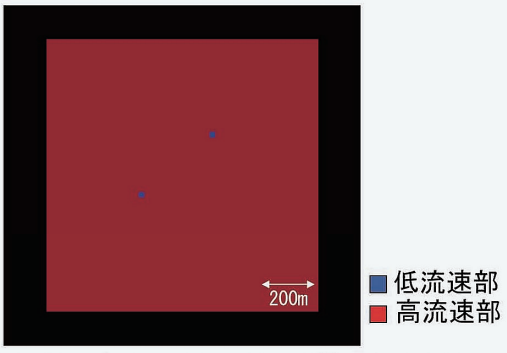


（b）移行時間 3000 年を下限値とした場合

図 8.81　ケース 10 における地下水移行時間の長い部位の分布（1）

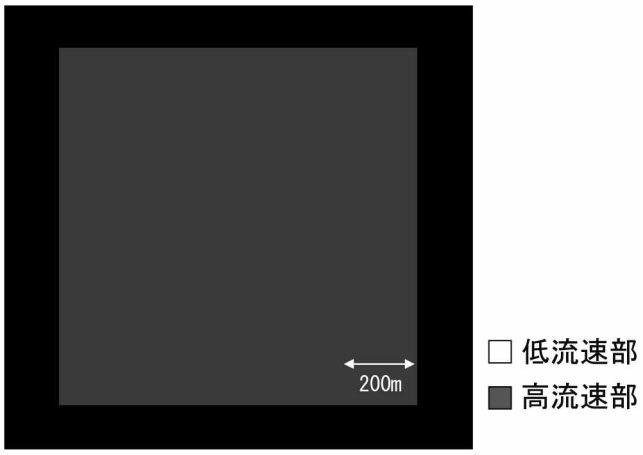


（a）移行時間 5000 年を下限値とした場合



（b）移行時間 7500 年を下限値とした場合

図 8.82　ケース 10 における地下水移行時間の長い部位の分布（2）



(a) 移行時間 10000 年を下限値とした場合

図 8.83　ケース 10 における地下水移行時間の
長い部位の分布 (3)

8.4.2 地下水流速と地下水移行時間に関する不確実性

(1) 不確実性の評価

DH-15 号孔における割れ目情報および水理試験結果に基づき行った一連の解析結果から明らかなように，本研究で考慮した様々な概念モデルオプションのうち，ダルシー流速が小さく地下水移行時間の長い部分の分布について有意な影響を及ぼす要素は，

①割れ目帯の有無

②個別割れ目の透水量係数分布の対数標準偏差

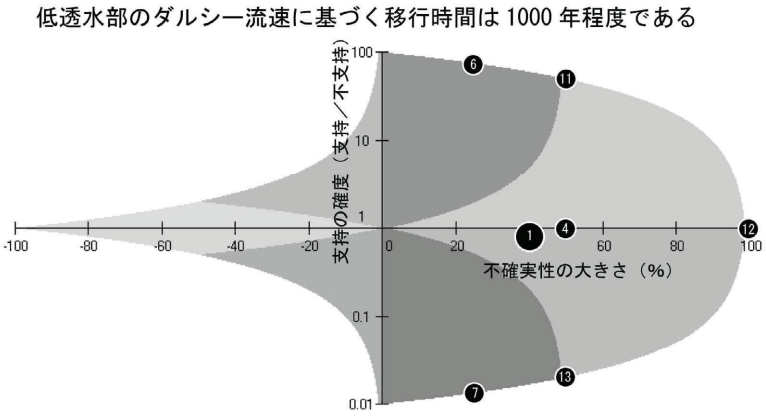
の二つに限られることがわかった。このうち，割れ目帯の有無については，概念モデルオプションとして確からしさを評価しているため，ここでは，透水量係数分布の対数標準偏差について ESL による評価を行い，これと割れ目帯の有無に関する評価結果を統合することによって全体としての確からしさを評価した。ここで，透水量係数分布の対数標準偏差についての階層プロセスモデルは，透水量係数分布についての概念モデルの確からしさの評価に用いたものと同様の考え方で設定した。また，前節で述べたように，各ケースにおいて推定された DH-15 号孔位置での透水係数分布は，実測値に比して 0.5 桁程度大きいことも，ここでの評価において考慮することとした。

低透水部におけるダルシー流速に基づく地下水移行時間が 1,000 年程度であることの確からしさについての ESL 評価結果を図 8.84 および図 8.85 に示す。前節で述べた解析結果から分かるとおり，この命題は，ケース 10 以外の全てのケースについて成立しており，このことは，割れ目帯が存在するか，あるいは個別割れ目の透水量係数分布の対数標準偏差が 1.0 程度以下であれば主命題が成立することを意味している。また，各ケースにおいて推定された DH-15 号孔位置での透水係数分布は，実測値に比して 0.5 桁程度大きいことも，ここでの評価において考慮した。評価結果は，主命題の確からしさが，0＜（否定）－（支持）＜（不確実性）であり，どちらかといえば偽であるが大きな不確実性が含まれる（μ=0.0+）に相当することがわかる。

他方，低透水部におけるダルシー流速に基づく地下水移行時間が 3,000 年程度以上であることの確からしさについての ESL 評価結果を図 8.86 および図 8.87 に示す。前節で述べた解析結果から分かるとおり，この命題は，ケース 10 のみについて成立しており，このことは，割れ目帯が存在せず，かつ個別割れ目の透水量係数分布の対数標準偏差が 1.5 程度以上でなければ主命題が成立しないことを意味している。ただし，前述した DH-15 号孔における透水係数分布に対する若干の過大評価を考え合わせる必要がある。評価結果は，主命題の確からしさが，0＜（支持）－（否定）＜（不確実性）であり，どちらかといえば真であるが大きな不確実性が含まれる（μ=0.5）に相当することがわかる。



図 8.84 「低流速部のダルシー流速に基づく地下水移行時間が 1,000 年程度である」に関する ESL 評価結果



1：低透水部のダルシー流速に基づく移行時間は 1000 年程度である
2：連続性の高い構造（IMF）が見られる
3：割れ目分布が自己相似性を示す
4：ポアソン分布では説明できない高頻度の部位がある
5：単一割れ目についての水理試験結果の対数標準偏差が 1.0 程度である
6：長区間の水理試験結果の分散分析結果が対数標準偏差が 1.0 程度であることを示す
7：亀裂ネットワークモデルによる推定値が実測値を再現する
8：単一割れ目についての水理試験結果の対数標準偏差が 1.0 程度である
9：長区間の水理試験結果の分散分析結果が対数標準偏差が 1.0 程度であることを示す
10：単一割れ目についての水理試験結果の対数標準偏差が 1.0 程度である
11：長区間の水理試験結果の分散分析家かが対数標準偏差が 1.0 程度であることを示す
12：単一割れ目についての水理試験結果の算術平均が 1e-6 m/s 程度である
13：算術平均 1e-6 m/s 程度を仮定した亀裂ネットワークモデルの透水性が実測値と整合的である

図 8.85 「低流速部のダルシー流速に基づく地下水移行時間が 1,000 年程度である」に関する Ratio plot

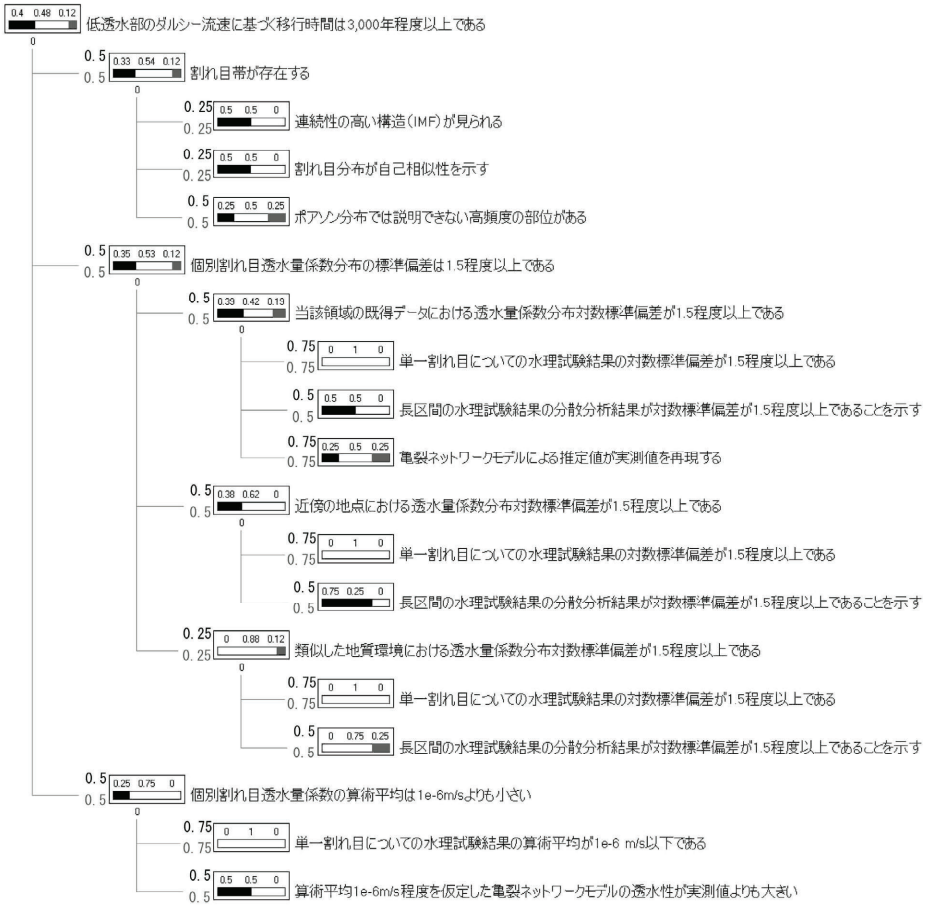
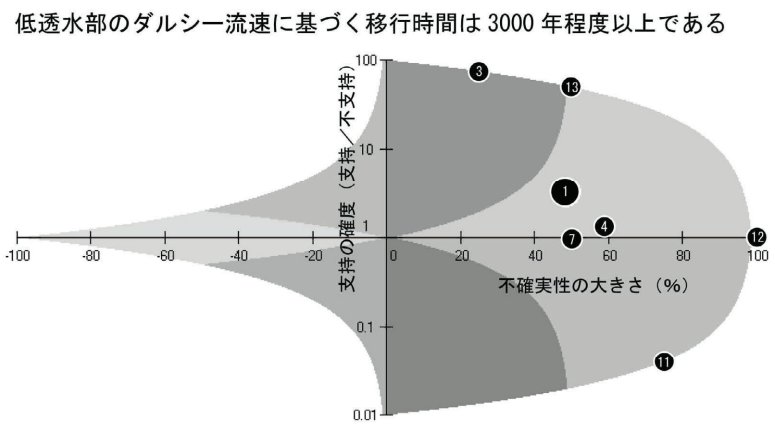


図 8.86　「低流速部のダルシー流速に基づく地下水移行時間が 3,000 年程度以上である」に関する ESL 評価結果



1：低透水部のダルシー流速に基づく移行時間は 3000 年程度以上である
2：連続性の高い構造（IMF）が見られる
3：割れ目分布が自己相似性を示す
4：ポアソン分布では説明できない高頻度の部位がある
5：単一割れ目についての水理試験結果の対数標準偏差が 1.5 程度以上である
6：長区間の水理試験結果の分散分析結果が対数標準偏差が 1.5 程度以上であることを示す
7：亀裂ネットワークモデルによる推定値が実測値を再現する
8：単一割れ目についての水理試験結果の対数標準偏差が 1.5 程度以上である
9：長区間の水理試験結果の分散分析結果が対数標準偏差が 1.5 程度以上であることを示す
10：単一割れ目についての水理試験結果の対数標準偏差が 1.5 程度以上である
11：長区間の水理試験結果の分散分析家かが対数標準偏差が 1.5 程度以上であることを示す
12：単一割れ目についての水理試験結果の算術平均が 1e-6 m/s 以下である
13：算術平均 1e-6 m/s 程度を仮定した亀裂ネットワークモデルの透水性が実測値よりも大きい

図 8.87　「低流速部のダルシー流速に基づく地下水移行時間が 3,000 年程度以上である」に関する Ratio plot

(2) 次段階の調査における課題の優先順位

それぞれの命題について Tornado plot による感度解析を行った結果を示す。いずれの命題についても，割れ目帯の存在を支持する論拠として，

①ポアソン分布では表現できない高頻度の部位がある

②連続性の高い構造（IMF）がある（IMF と割れ目帯の同一性の検証を含む）

③割れ目分布が自己相似性を示す

といった項目の不確実性を低減することが主命題の不確実性を低減する上で効果的であることを示している。また，これに加えて，個別割れ目の透水量係数に関して，単一割れ目に着目した水理試験の実施等の重要性が高いことがわかる。また，この Tornado plot には直接的には現れていないものの，当該領域の既得データの十分性が必ずしも高くないのは，DH-15 号孔のみにおいて取得されたデータの研究所領域全体に対する代表性に限界があると認識されているためであり，当該領域内のボーリング孔数を増大させるとともに，それぞれにおいて短区間の水理試験を実施することが重要と考えられる。

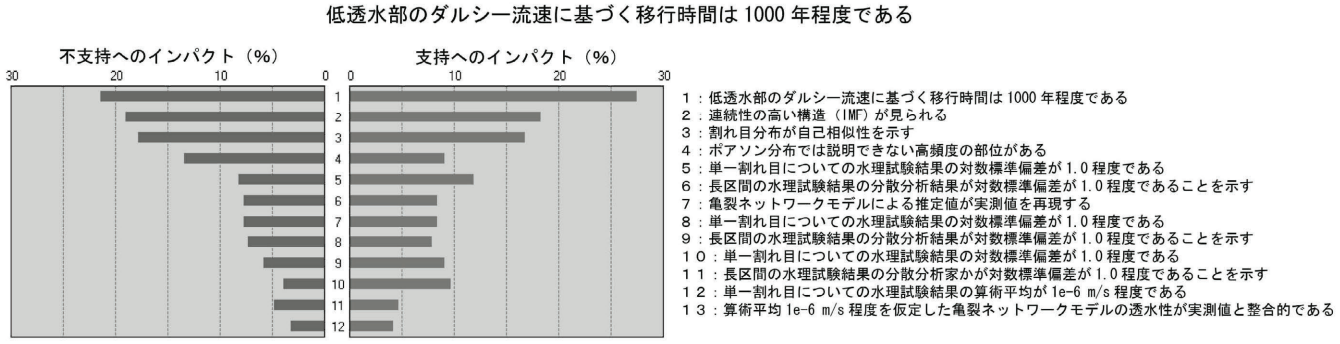


図 8.88 「低流速部のダルシー流速に基づく地下水移行時間が 1,000 年程度である」に関する Tornado plot

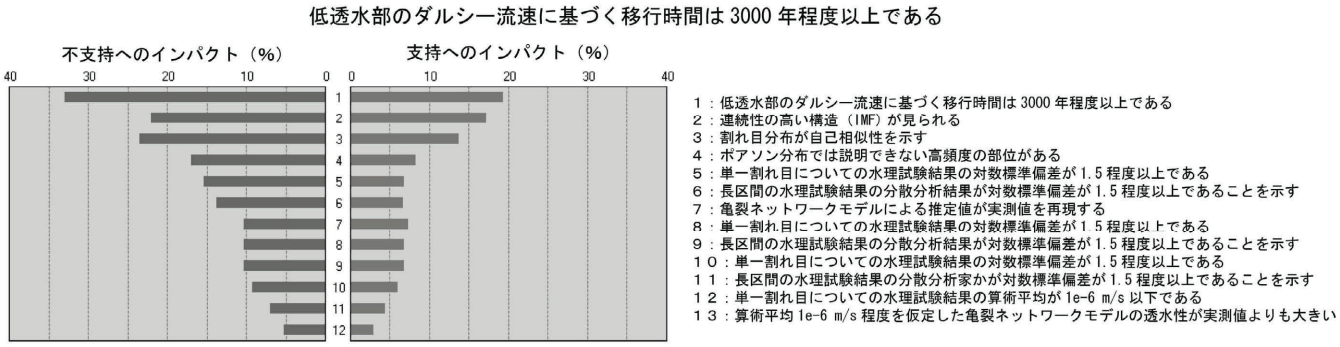


図 8.89 「低流速部のダルシー流速に基づく地下水移行時間が 3,000 年程度以上である」に関する Tornado plot

8.5 昨年度の研究成果との比較

8.5.1 適用した地質構造モデルの検証

昨年度に適用した地質構造モデルを図に示す。同モデルの構築には，下記に示すボーリング孔を用いている。

① MIU シリーズ（計 4 孔） DH シリーズ（DH-13 号孔まで，計 13 孔）
TH シリーズ（計 12 孔）

② MSB シリーズ（計 4 孔）

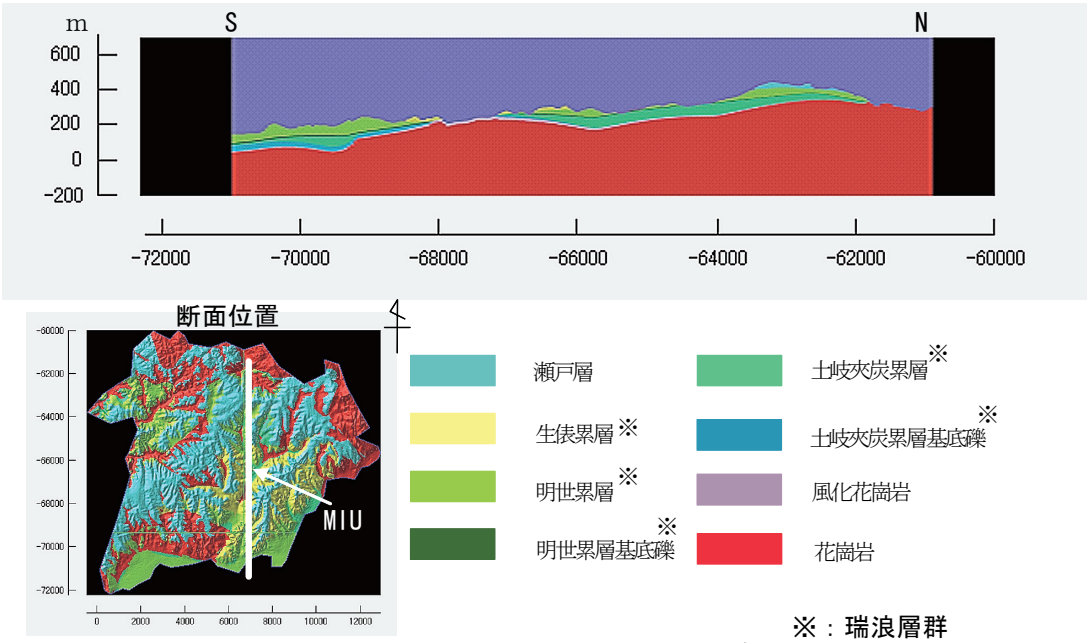


図 8.90　昨年度に適用した地質構造モデル

本項では研究所領域にて新たに取得された DH-15 号孔のデータを用いて，図 8.90 に示した地質構造モデルとの比較を行った。両者を比較したものを図 8.91 に示す。同図より，明世累層の下端はほぼ一致しているが，土岐夾炭累層の下端（不整合面）は少し誤算が生じている。その関連で，花崗岩中の上部割れ目帯の下端深度も誤差が生じている。

モデル化における推定値では花崗岩健岩部の上端位置が実測値より浅くなっており，この結果は地質構造モデルの幾何学形状のみを考えた場合，楽観的な状況（好ましい母岩である花崗岩健岩部がより広く存在するとの解釈）を意味していると考えられる。このことから，地下施設レイアウトなどの詳細な設計を進めて行くためには原位置調査による確認が不可欠であると言える。

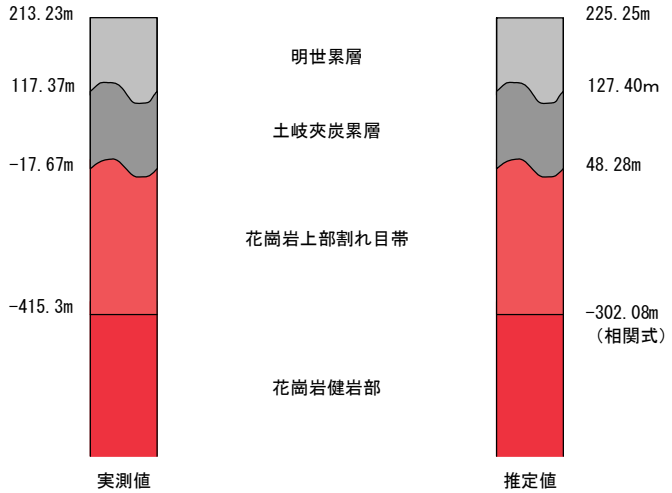


図 8.91　DH-15 号孔の位置における実測値とモデル化における推定値

8.5.2 水理地質構造モデルおよび地下水流動解析結果の不確実性評価

本項では水理地質構造モデルおよび地下水流動解析結果の不確実性評価として，最終的なアウトプットである地下水流速と地下水移行時間の平成 16 年度と平成 15 年度の結果の比較を実施した。平成 15 年度には，図 8.92 に示す度数分布調査地点にて，地下水流動解析結果による地下水流速（研究所領域の標高-560mでのダルシー流速）と，パーティクルトラッキングによる地下水移行時間（ダルシ

一流速による研究所領域の標高-550mの地点から流出域に達するまでの時間）が求められている。以下に，地下水流速の度数分布（確信の程度，高：図 8.93，中：図 8.94，低：図 8.95）と地下水移行時間の度数分布（確信の程度，高：図 8.96，中：図 8.97，低：図 8.98）を示す。

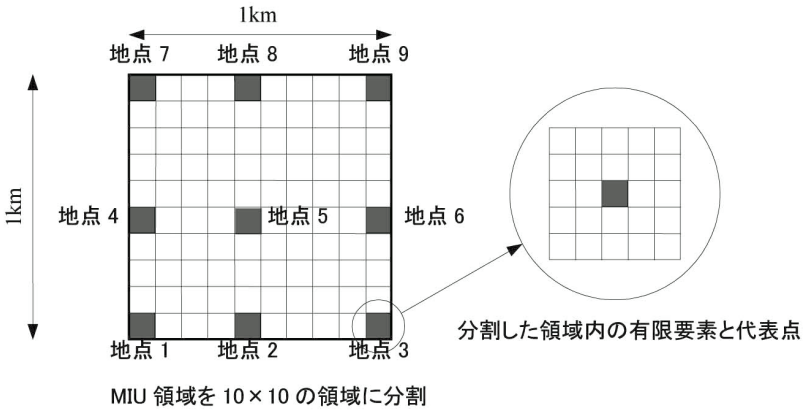


図 8.92　度数分布調査地点

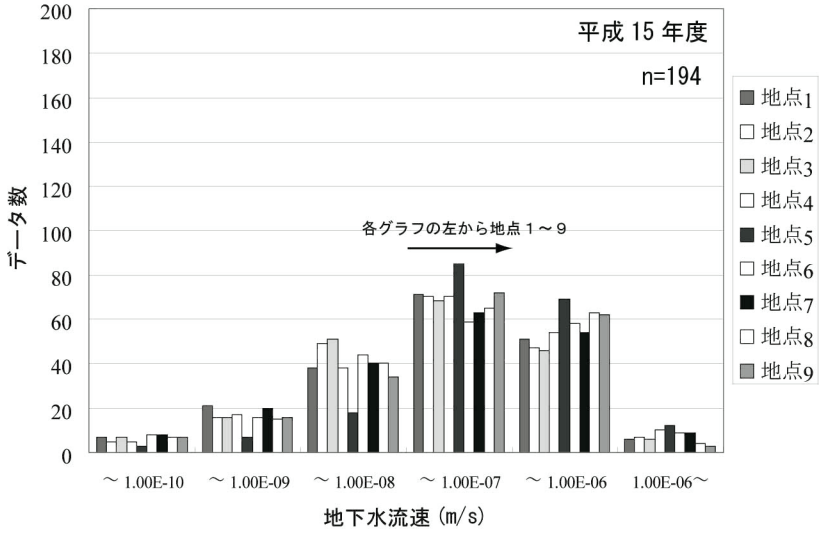


図 8.93　地下水流速の度数分布（高）

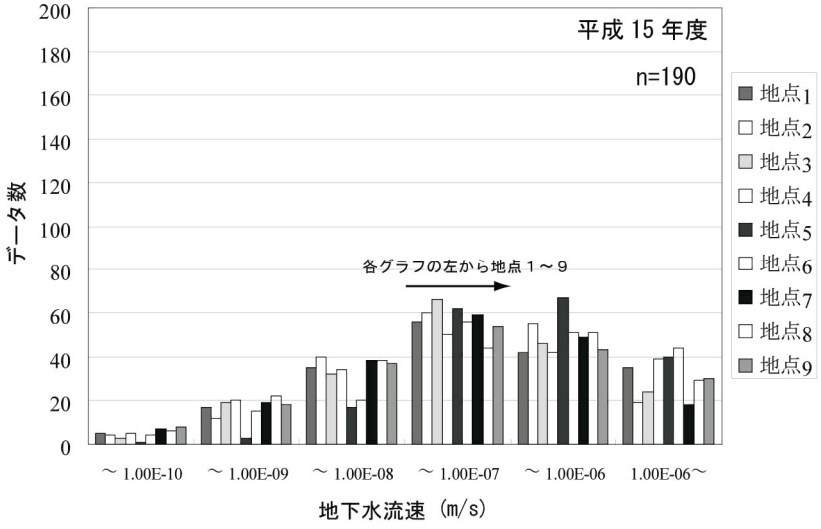


図 8.94　地下水流速の度数分布（中）

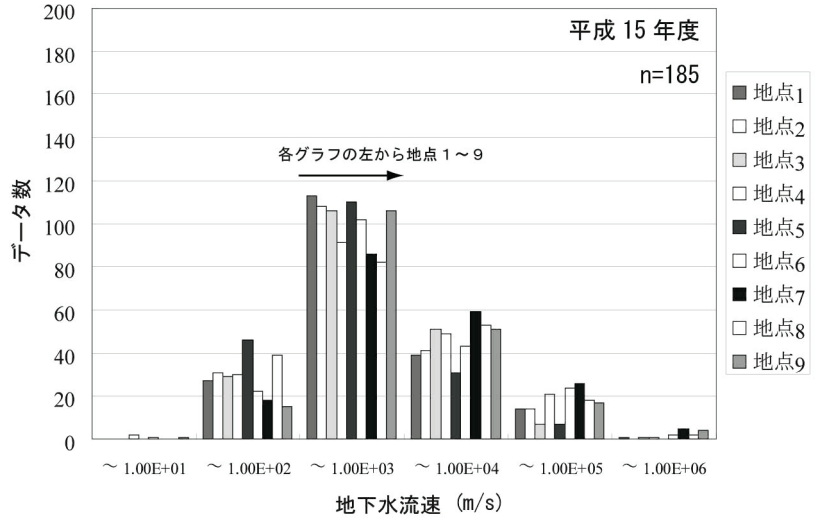


図 8.95　地下水流速の度数分布（低）

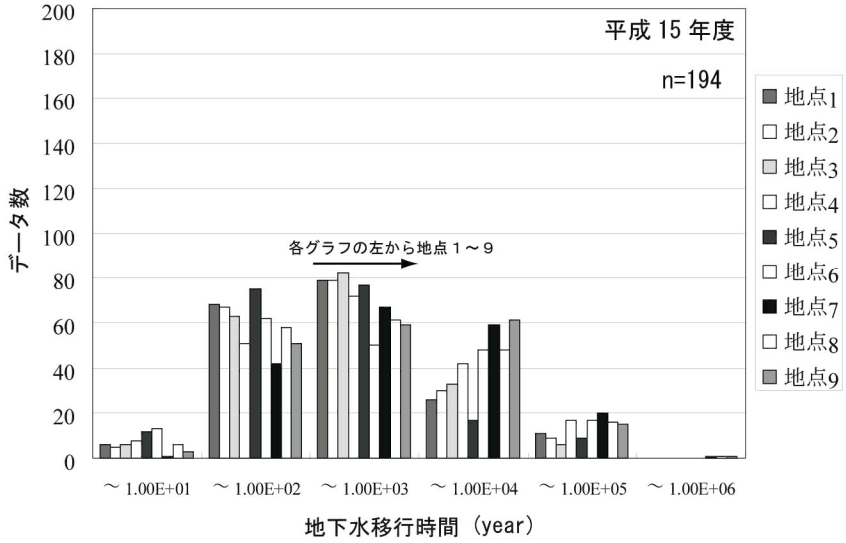


図 8.96　地下水移行時間の度数分布（高）

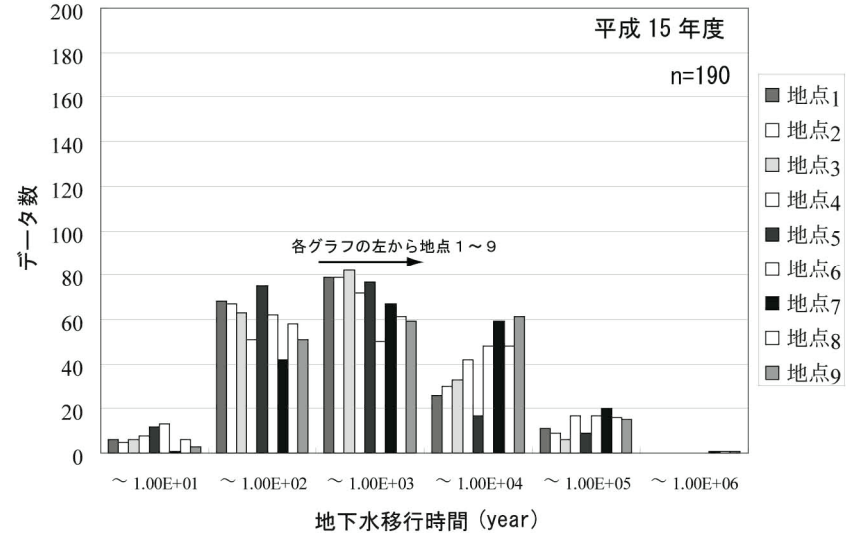


図 8.97　地下水移行時間の度数分布（中）

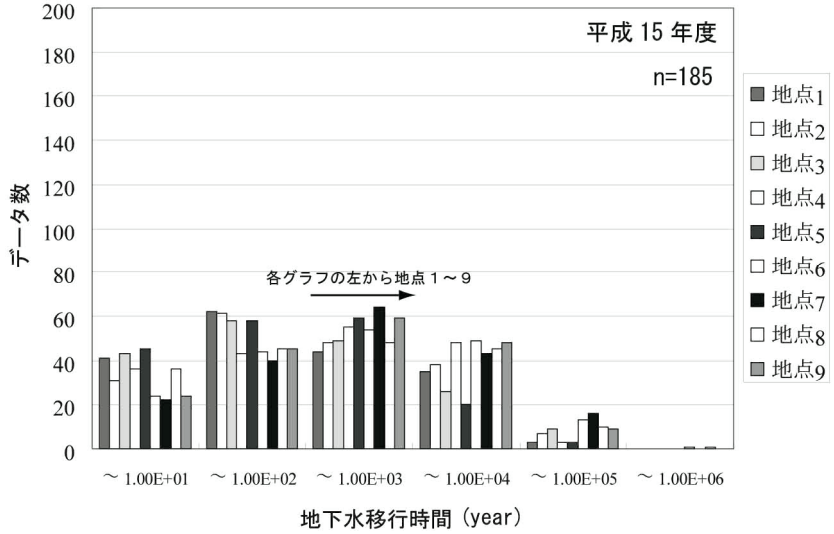


図 8.98　地下水移行時間の度数分布（低）

平成 16 年度には，表 8.5 に示す割れ目帯についての水理地質構造モデルオプションと表 8.6 に示す個別割れ目帯についての水理地質構造モデルオプションを組み合わせた不均一透水係数場のケース（表 8.7 参照）を対象に地下水流動解析を実施している。これらのケースの確信の程度は表 8.7 に示すように高と中となっており，ケース 1 からケース 10 における地下水流動解析結果（表 8.8，表 8.9 参照）の差（不確実性）は小さくなっている。

具体的に，平成 16 年度の検討において，地下水流速は平成 15 年度と同様に研究所領域の標高-560ｍでのダルシー流速が求められているため，上記した図 8.93～図 8.95 に平成 16 年度の結果（表 8.8 参照）を重ねたものを図 8.99～図 8.101 に示す。地下水移行時間に関しては解析領域が異なるためあくまでも参考であるが，上記した平成15年度の結果である図8.96～図8.98に標高-870ｍから標高-400ｍまでの到達時間の結果（表 8.9 参照）を重ねたものを図 8.102～図 8.104 に示す。平成 15 年度の結果と平成 16 年度の結果を比較してみると，スクリーニングにより確信の程度が高と中のみを対象としているため，地下水流速についてはかなり不確実性が低減している。地下水移行時間については，470ｍ区間（標高-870ｍ～標高-400ｍ）での結果のため判断が難しいが，最小値については不確実性がかなり低減していると判断することができる。

表 8.5　割れ目帯についての水理地質モデルオプションの確信の程度

モデルの確信の程度	決定論的知識・情報		確率論的知識・情報
	割れ目帯の有無	割れ目帯の長さ	透水量係数
モデル 1「高」	有り「高」	十分に大きい「高」	相関モデル「高」
モデル 2「中」	無し「中」	－	－
モデル 3「高」	有り「高」	厚さと相関「高」	相関モデル「高」
モデル 4「中」	有り「高」	十分に大きい「高」	ランダムモデル「中」

・確信の程度は ESL による評価結果を適用。
・確信の程度の最高が「中」の場合，Possibility 理論の公理系に基づき「高」に変更。

表 8.6　個別割れ目についての水理地質モデルオプションの確信の程度

モデルの確信の程度	決定論的知識・情報		確率論的知識・情報	
	透水割れ目	方向性	長さ累積分布の指数	対数標準偏差
モデル 1「中」	系統 4「高」	Fisher 分布「中」	-1.6「高」	1.0「高」
モデル 2「中」	系統 4「高」	Fisher 分布「中」	-1.6「高」	1.0「高」
モデル 3「中」	系統 4「高」	Fisher 分布「中」	-2.0「高」	1.0「高」
モデル 4「中」	系統 4「高」	Fisher 分布「中」	-1.2「高」	1.0「高」
モデル 5「高」	系統 4「高」	BootStrapping「高」	-1.6「高」	1.0「高」
モデル 6「中」	系統 4「高」	Fisher 分布「中」	-1.6「高」	0.5「中」
モデル 7「中」	系統 4「高」	Fisher 分布「中」	-1.6「高」	1.5「中」

・決定論的知識・情報の確信の程度は ESL による評価結果を適用。
・確率論的知識・情報の確信の程度は平成 15 年度業務成果[11]を適用。
・確信の程度の最高が「中」の場合，Possibility 理論の公理系に基づき「高」に変更。

表 8.7　割れ目帯モデルと個別割れ目モデルの組み合わせによる不均一透水係数場ケースの確信の程度

ケース番号	割れ目帯モデル	個別割れ目モデル
ケース 1「中」	モデル 1「高」	モデル 1「中」
ケース 2「中」	モデル 2「中」	モデル 2「中」
ケース 3「中」	モデル 3「高」	モデル 1「中」
ケース 4「中」	モデル 4「中」	モデル 1「中」
ケース 5「中」	モデル 1「高」	モデル 3「中」
ケース 6「中」	モデル 1「高」	モデル 4「中」
ケース 7「高」	モデル 1「高」	モデル 5「高」
ケース 8「中」	モデル 1「高」	モデル 6「中」
ケース 9「中」	モデル 1「高」	モデル 7「中」
ケース 10「中」	モデル 2「中」	モデル 7「中」

表 8.8　各ケースにおける地下水流速

	地下水流速(m/s)									
	ケース 1	ケース 2	ケース 3	ケース 4	ケース 5	ケース 6	ケース 7	ケース 8	ケース 9	ケース 10
地点 1	1.35E-08	2.98E-08	1.82E-08	1.41E-08	1.61E-08	2.15E-08	1.51E-08	1.95E-08	1.16E-08	1.24E-08
地点 2	5.43E-08	1.31E-08	5.59E-08	4.90E-08	1.45E-08	1.61E-08	1.44E-08	2.22E-08	4.18E-08	3.55E-08
地点 3	2.32E-08	1.78E-08	1.29E-08	1.11E-08	2.60E-08	2.40E-08	1.87E-08	2.69E-08	3.60E-08	2.51E-08
地点 4	2.64E-08	1.00E-08	2.42E-08	2.70E-08	1.30E-08	1.85E-08	5.18E-08	2.00E-08	1.01E-08	3.36E-09
地点 5	2.90E-08	8.88E-09	2.88E-08	2.87E-08	1.15E-08	2.65E-08	1.27E-08	2.09E-08	1.09E-08	4.83E-09
地点 6	2.03E-08	1.08E-08	2.00E-08	2.22E-08	1.94E-08	1.38E-08	2.18E-08	2.20E-08	1.14E-08	5.74E-09
地点 7	1.75E-08	2.00E-08	1.71E-08	2.03E-08	3.04E-08	1.56E-08	1.72E-08	2.57E-08	9.88E-09	4.49E-09
地点 8	1.08E-08	2.30E-08	9.22E-09	1.48E-08	3.13E-08	1.06E-08	2.33E-08	1.67E-08	7.14E-09	4.20E-09
地点 9	2.94E-08	1.46E-08	3.13E-08	3.52E-08	1.11E-08	1.32E-08	1.36E-08	2.17E-08	4.12E-09	3.96E-09
最小値	1.08E-08	8.88E-09	9.22E-09	1.11E-08	1.11E-08	1.06E-08	1.27E-08	1.67E-08	4.12E-09	3.36E-09
最大値	5.43E-08	2.98E-08	5.59E-08	4.90E-08	3.13E-08	2.65E-08	5.18E-08	2.69E-08	4.18E-08	3.55E-08

表 8.9　各ケースにおける地下水移行時間

	地下水移行時間(year)									
	ケース 1	ケース 2	ケース 3	ケース 4	ケース 5	ケース 6	ケース 7	ケース 8	ケース 9	ケース 10
地点 1	7.90E+02	8.80E+02	6.25E+02	7.58E+02	9.78E+02	9.16E+02	1.10E+03	7.89E+02	1.14E+03	1.08E+03
地点 2	4.59E+02	1.10E+03	4.30E+02	5.86E+02	9.20E+02	8.60E+02	9.76E+02	7.36E+02	2.88E+02	3.34E+02
地点 3	5.94E+02	7.37E+02	7.27E+02	9.09E+02	5.66E+02	6.23E+02	5.55E+02	5.30E+02	5.04E+02	8.01E+02
地点 4	5.53E+02	1.45E+03	5.65E+02	5.04E+02	1.05E+03	8.62E+02	3.82E+02	7.28E+02	1.08E+03	2.83E+03
地点 5	6.70E+02	2.02E+03	7.50E+02	6.31E+02	7.39E+02	8.80E+02	9.02E+02	7.78E+02	1.02E+03	2.77E+03
地点 6	8.23E+02	1.03E+03	8.23E+02	8.60E+02	9.86E+02	8.69E+02	7.50E+02	7.03E+02	1.10E+03	3.06E+03
地点 7	8.46E+02	6.99E+02	9.37E+02	7.74E+02	7.05E+02	7.43E+02	8.77E+02	5.35E+02	4.99E+02	5.19E+02
地点 8	1.12E+03	8.21E+02	1.04E+03	9.09E+02	8.31E+02	1.22E+03	6.25E+02	7.22E+02	1.22E+03	2.89E+03
地点 9	1.08E+03	7.27E+02	7.89E+02	6.84E+02	1.02E+03	7.96E+02	1.34E+03	7.51E+02	1.48E+03	1.65E+03
最小値	4.59E+02	6.99E+02	4.30E+02	5.04E+02	5.66E+02	6.23E+02	3.82E+02	5.30E+02	2.88E+02	3.34E+02
最大値	1.12E+03	2.02E+03	1.04E+03	9.09E+02	1.05E+03	1.22E+03	1.34E+03	7.89E+02	1.48E+03	3.06E+03

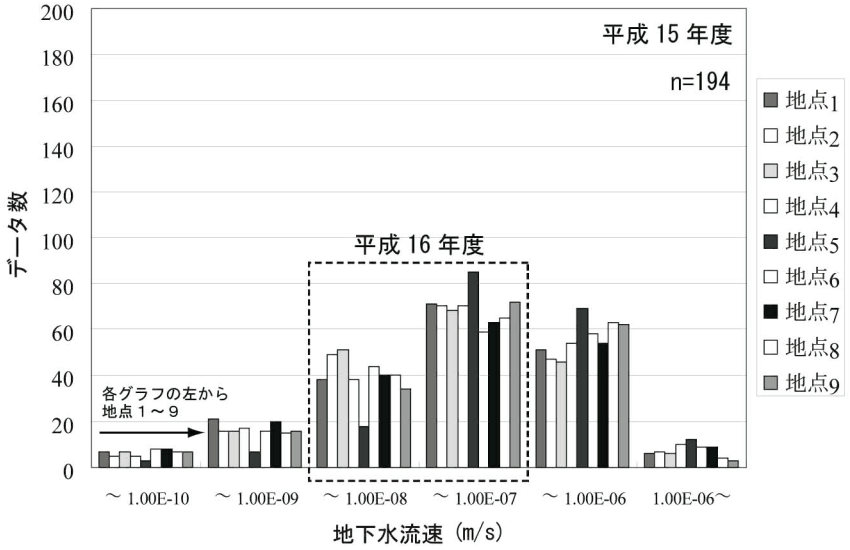


図 8.99　地下水流速の度数分布（高）

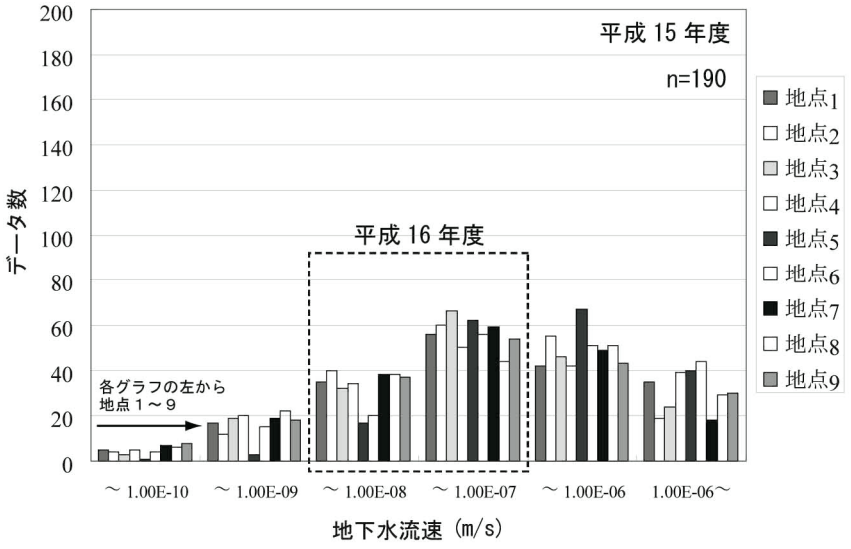


図 8.100　地下水流速の度数分布（中）

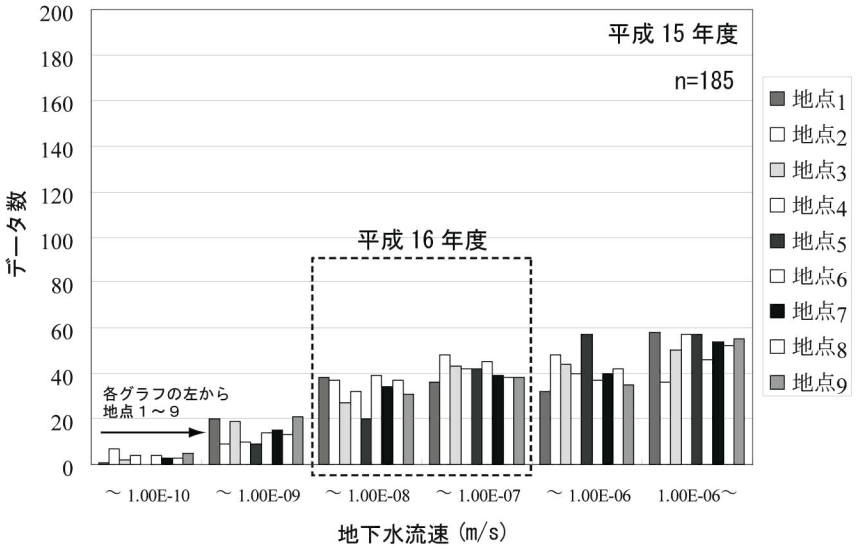


図 8.101　地下水流速の度数分布（低）

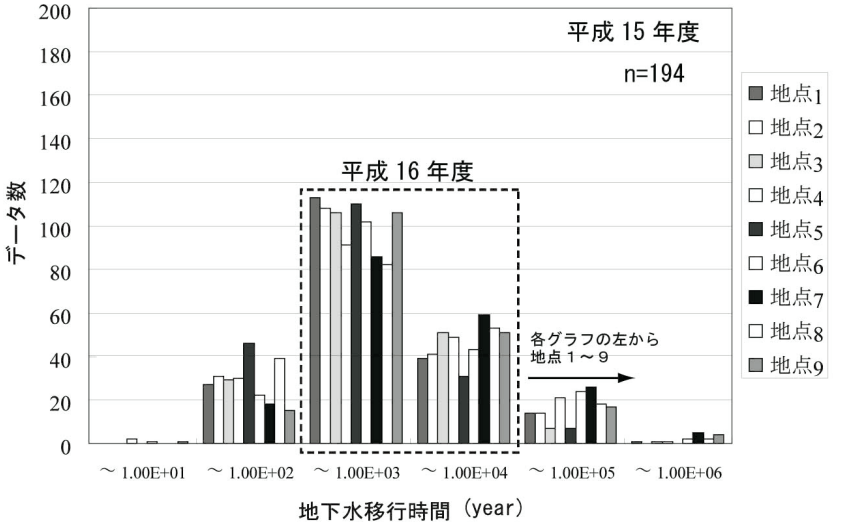


図 8.102　地下水移行時間の度数分布（高）

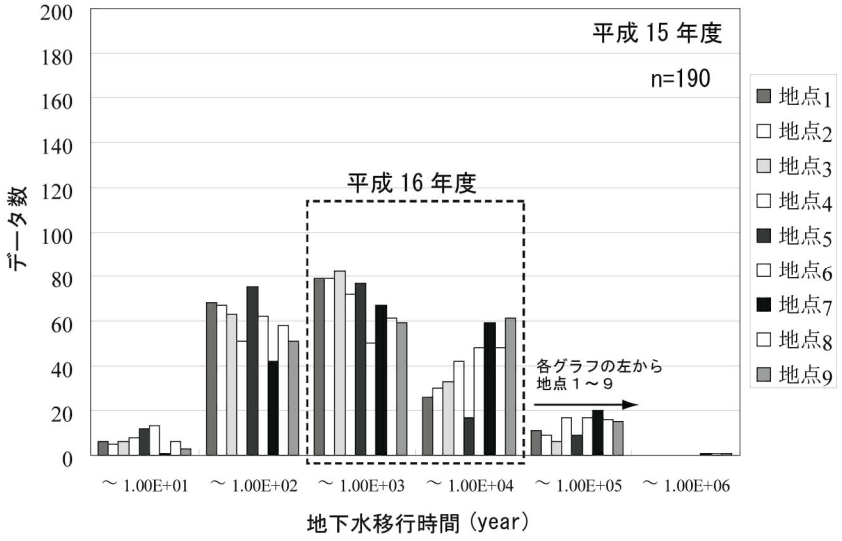


図 8.103　地下水移行時間の度数分布（中）

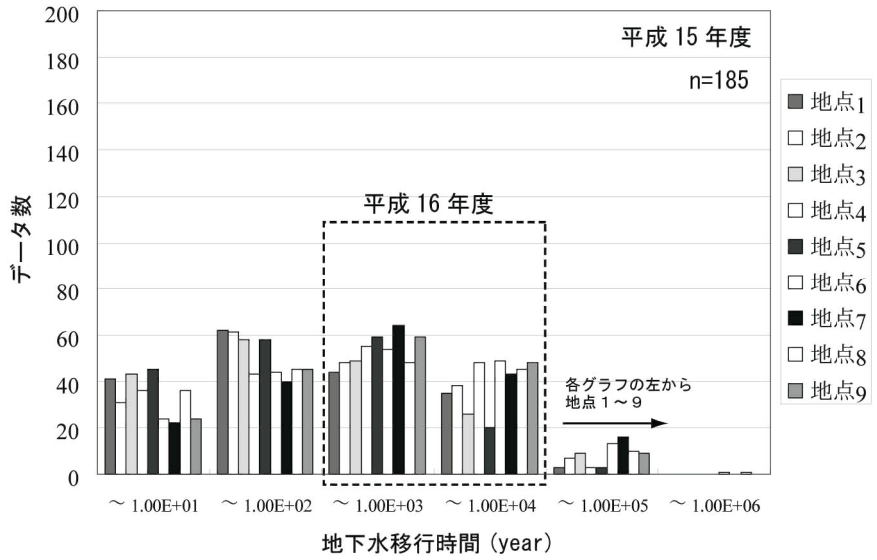


図 8.104　地下水移行時間の度数分布（低）

9. まとめ

ここで示す確率論的手法とは 3 章で示した不確実性解析手法を，決定論的手法とは三枝他 [9] で示す手法とし，統合化方法に関する検討を実施した。

9.1 本研究で用いた確率論的手法と決定論的手法の統合方法に関する検討

ここでは両手法の概略的特徴を整理した。

確率論的手法の特徴は下記に示すようなものが挙げられる。

① 設定した概念やパラメータなどの範囲で様々な組合せを考慮できる。
② 限られた情報に基づき内外挿が可能である。
③ 一つ一つの地質構造要素に対し，詳細なモデル化が実施しづらい。
④ 確率論的手法を適用するには事前に決定論的手法による検討が不可欠である。
⑤ 当初から複数の概念や広めのパラメータの範囲を対象としているため，新たな知見が出てきても対応し易い。

決定論的手法の特徴は下記に示すようなものが挙げられる。

⑥ 考慮できる範囲が限定される。
⑦ 情報が存在しない部分までの外挿が困難である。
⑧ 一つ一つの地質構造要素に対し，詳細なモデル化が可能である。
⑨ 確率論的手法とは独立して決定論的手法の適用が可能である。
⑩ 当初から概念やパラメータの範囲を確からしいものに限定しているため，新たな知見が出てくると対応しづらい。

9.2 両手法の相違点・類似点および利点・欠点

確率論的手法は決定論的手法の欠点を補う方策として考案された手法であるため，両手法の相違点は 9.1 に示した利点と欠点を表す全ての特徴となる。確率論的手法は決定論的手法を基礎として適用される手法であるため，類似点は決定論的手法に基づく地質環境特性の理解の仕方である。

確率論的手法の利点は①②⑤で，欠点は③④である。決定論的手法の利点は⑧⑨で，欠点は⑥⑦⑩

である。これらからも分かるように確率論的手法と決定論的手法ともに一長一短であるため，両者の利点・欠点を把握したうえで両手法を効果的に活用していくべきである。

9.3 両者の統合化方法

確率論的手法である本不確実性解析手法は，決定論的手法を基礎として確信の程度を区分し，不確実性の表現を行うものである。そのため決定論的手法は既に本手法に含まれていると考えることができる。本手法では図 9.1 の Possibility 理論に基づく確信の程度の定義に示すように確信の程度を高・中・低の 3 種類に区分している。決定論的手法に基づき推定される概念やパラメータの範囲は“従来のモデル化で考えている範囲”のため，本手法における「確信の程度が高」であると考えることができる。

具体的な両者の統合方法の考え方としては決定論的手法を中心に確率論的手法でその不確実性を網羅するような位置付けにすべきである。今後はこの観点で本手法の高度化を進めていく予定である。

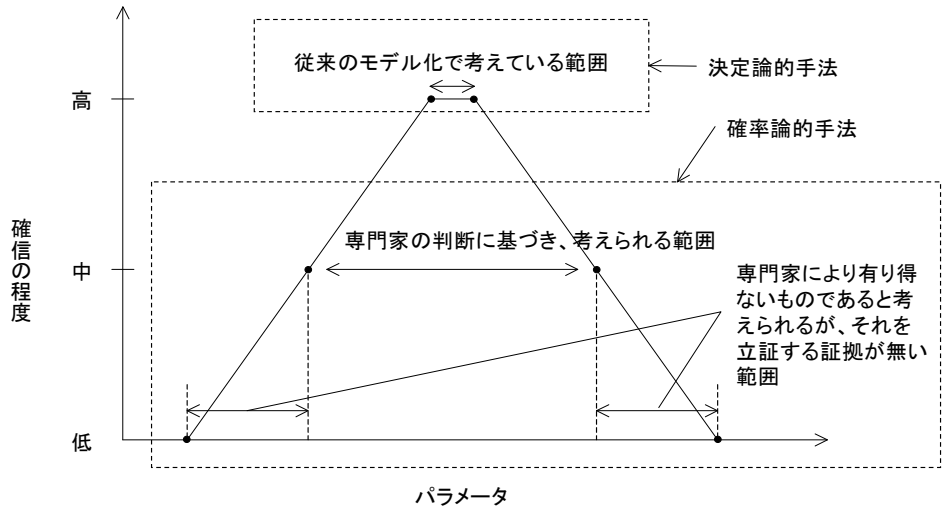


図 9.1　Possibility 理論に基づく確信の程度の定義

参考文献

1) 鹿島技術研究所：“Evidential Support Logic を基礎とする地質環境調査を対象とした意思決定用評価ツール”，KaTRI リーフレット 2002-27 (2002)
2) OECD/NEA：Disposal of Radioactive Waste, Review of Safety Assessment Methods (1991)
3) 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 (1997)
4) International Commission on Radiological Protection :”Publication 81 Radiation Protection Recommendations as applied to the Disposal of Long-lived Solid Radioactive Waste”, Annals of the ICRP (2000)
5) 柳澤孝一，武田精悦，大澤英昭，須山泰宏，古市光昭，戸井田　克，高瀬博康，青山裕司，若松尚則，西垣　誠：“空間的に不均一な地質環境特性の評価方法に関する基礎的検討”，地下水学会誌，第 47 巻 4 号，pp. 451-470 (2005)
6) 核燃料サイクル開発機構 東濃地科学センター：平成 15 年度地層科学研究情報・意見交換会－要旨

集－, JNC TN7410 2003-002 (2003)
7) 大久保秀一, 吉村公孝, 須山泰宏, 安藤賢一, 吉村実義, 堀尾 淳：”地質環境調査支援ツールの概念モデルへの適用性検討”, 物理探査学会第 110 回(平成 16 年度春季)学術講演会講演論文集, No.41, pp.155-158 (2004)
8) Ross, T.J., Booker, J.M., and Parkinson, W.J. : Fuzzy logic and probability applications; Bridging the gap, Society for industrial and applied mathematics, Philadelhia (2002)
9) 三枝博光, 前田勝彦, 稲葉　薫:”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 6）－不連続構造の水理特性及び水理学的境界条件に着目した水理地質構造のモデル化及び地下水流動解析－”, 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.299-308 (2001)
10) 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技術に関する研究開発－平成 14 年度報告－, JNC TN 1400 2003-004 (2003)
11) 核燃料サイクル開発機構：東濃地域における地質環境の不均一性評価, JNC TJ7400 2004-017 (2004)
12) 核燃料サイクル開発機構：地表地質および水圧調査, JNC TJ7440 2000-001 (2000)
13) 糸魚川淳二：瑞浪地域の地質, 瑞浪市化石博物館専報, No.1 縮尺 1/25,000 (1980)
14) 動力炉・核燃料開発事業団　東濃地科学センター:東濃地域を対象とした表層水理調査(その 2), JNC TJ7440 2001-004 (1995)
15) 動力炉・核燃料開発事業団　中部探鉱事務所：東濃地域地質鉱床図 (1984)
16) 核燃料サイクル開発機構：広域地下水流動に関する研究（その 5）, PNC TJ7361 93-001 (1993)
17) 核燃料サイクル開発機構：東濃地域を対象とした表層水理調査（その 2）, JNC TJ7440 2001-004 (2001)
18) 核燃料サイクル開発機構：概査領域を対象とした地質構造調査, JNC TJ7440 2000-027 (2000)
19) 核燃料サイクル開発機構：表層水理現地調査に基づく水理地質構造の解析, JNC TJ7440 2000-029 (2000)
20) 核燃料サイクル開発機構 東濃地科学センター：広域地下水流動研究年度計画書（平成 15 年度）（技術報告）, JNC TN7410 2003-004 (2003)
21) 地学団体研究会　新版地学事典編集委員会：新版地学事典, (株) 平凡社 (1996)
22) 柳澤孝一, 古屋和夫, 大澤英昭, 若松尚則, 梅田浩二:“我が国における地盤の透水性に関する調査・研究（その 1）－各岩種における透水係数の収集・解析－, 動力炉・核燃料開発事業団　中部事業所, PNC TN7410 92-015 (1992)
23) 彌榮英樹, 岩月輝希, 古江良治, 水野　崇:“岐阜県東濃地域における地下水の地球化学特性に関する調査例について”, 日本地下水学会 2003 年秋季講演会講演要旨, pp.22-25 (2003)
24) 中野勝志, 齋藤　章, 西垣　誠:“難透水性岩石を対象とした室内透水試験”, 土質工学会論文報告集, Vol.31, No.3, pp.164-174 (1991)
25) 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技術に関する研究開発－平成 13 年度報告－, JNC TN1400 2002-003 (2002)
26) 核燃料サイクル開発機構 東濃地科学センター：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)
27) 核燃料サイクル開発機構：広域地下水流動研究における試錐調査（DH-15 孔）, 契約業務報告書 (2005)
28) 核燃料サイクル開発機構：立坑掘削予定地点における試錐調査（MIU-1 号孔）, JNC TJ7440 98-001 (1998)

29) 核燃料サイクル開発機構：正馬様洞用地における試錐調査（MIU-2 号孔），JNC TJ7420 99-016（1999a）
30) 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―地層処分研究開発第 2 次取りまとめ― 分冊 3：地層処分システムの安全評価，JNC TN1400 99-023（1999b）
31) D. L. Turcotte：Fractals and Chaos in Geology and Geophysics; Second Edition, Cambridge University Press（1997）
32) R. D. Reiss and M. Thomas：Statistical Analysis of Extreme Values, With Applications to Insurance, Finance, Hydrology, and Other Fields, Birkhäuser（2001）
33) R. D. Reiss and M. Thomas：Statistical Analysis of Extreme Values, Birkhäuser（2000）
34) J. Bear, C-F. Tsang, and G. de Marsily：Flow and Contaminant Transport in Fractured Rock, Academic Press（1993）
35) J-P. Chilès and P. Delfiner：Geostatistics; Modelling Spatial Uncertainty, John Wiley & Sons（1999）
36) P. C. Robinson and N. S. Cooper：“MUNVAR Project”，nuclear science and technology, European Commission, EUR 16174EN（1995）
37) T. L. Saaty：The Analytic Hierarchy Process, Mc GRAW-HILL INTERNATIONAL BOOK COMPANY（1980）
38) 須山泰宏，戸井田 克，高瀬博康：“不完全な情報に基づく判断の不確実性を考慮した意思決定用評価ツールの開発”，2002 年（第 40 回）春の年会 要旨集，兵庫県神戸市，2002.3.27-29，第Ⅲ分冊，M4，日本原子力学会，p.666（2002）
39) Hiroyuki Tsuchi, Toshihiro Seo, Richard Metcalfe, Kenji Kawano, Hiroyasu Takase, Andrew Bowden, Yasuhiro Suyama, Masaru Toida, Mitsuaki Furuichi, Atsushi Matsumura, and Miyoshi Yoshimura：“Study on a Decision Making Methodology With Uncertantities in the Selection Process of Preliminary Investigation Areas”，Materials Research Society Symposium Proceedings, Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXVⅡ，Kalmar Sweden, 2003.6.15-19, Vol.807, pp.21-26（2004）
40) 吉村公孝，石橋勝彦，須山泰宏，戸井田 克：“モデリングにおける不確実性評価技術の開発”，第 107 回(平成 14 年度秋季)学術講演会 講演論文集，静岡県清水市，2002.10.22-24, No.29，物理探査学会，pp.110-112（2002）
41) 吉村公孝，大久保秀一，須山泰宏，戸井田 克，河野健二，吉村実義，堀尾 淳：“地質環境調査支援ツールの開発”，第 108 回（平成 15 年度春季）学術講演会 講演論文集，東京都新宿区，2003.5.28-30，No.59，物理探査学会，pp.219-222（2003）
42) 高瀬博康，山田和公，加藤和之，斎藤典之，関根裕治，田畑信之，柳澤孝一：”多変量情報に基づく合理的地質環境モデル構築手法の検討”，原子力学会バックエンド部会夏期セミナー（投稿中）
43) 動力炉・核燃料開発事業団：立坑掘削影響試験のための水理事前調査(II)，動力炉・核燃料開発事業団 委託研究成果報告書，PNC TJ7449 90-002（1990）
44) J. W. Hall, D. I. Blockley and J. P. Davis：Uncertain inference using interval probability theory. International Journal of Approximate Reasoning, 19, pp.247-264（1998）
45) 緒方正虔，本荘静光：“電力施設の耐震設計における断層活動性の評価”，応用地質，22，pp.67-87（1981）

国際単位系（SI）

表１．SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表２．基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m^2
体積	立法メートル	m^3
速さ，速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s^2
波数	毎メートル	m^{-1}
密度（質量密度）	キログラム毎立法メートル	kg/m^3
質量体積（比体積）	立法メートル毎キログラム	m^3/kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m^2
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
（物質量の）濃度	モル毎立方メートル	mol/m^3
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m^2
屈折率	（数の） 1	1

表５．SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10^{24}	ヨタ	Y	10^{-1}	デシ	d
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	c
10^{18}	エクサ	E	10^{-3}	ミリ	m
10^{15}	ペタ	P	10^{-6}	マイクロ	μ
10^{12}	テラ	T	10^{-9}	ナノ	n
10^{9}	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	p
10^{6}	メガ	M	10^{-15}	フェムト	f
10^{3}	キロ	k	10^{-18}	アト	a
10^{2}	ヘクト	h	10^{-21}	ゼプト	z
10^{1}	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	y

表３．固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン(a)	rad		$m \cdot m^{-1}=1$(b)
立体角	ステラジアン(a)	sr(c)		$m^2 \cdot m^{-2}=1$(b)
周波数	ヘルツ	Hz		s^{-1}
力	ニュートン	N		$m \cdot kg \cdot s^{-2}$
圧力，応力	パスカル	Pa	N/m^2	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
エネルギー，仕事，熱量	ジュール	J	N・m	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
工率，放射束	ワット	W	J/s	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
電荷，電気量	クーロン	C		s・A
電位差（電圧），起電力	ボルト	V	W/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^3 \cdot A^2$
磁束	ウエーバ	Wb	V・s	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
磁束密度	テスラ	T	Wb/m^2	$kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
セルシウス温度	セルシウス度(d)	℃		K
光束	ルーメン	lm	cd・sr(c)	$m^2 \cdot m^{-2} \cdot cd=cd$
照度	ルクス	lx	lm/m^2	$m^2 \cdot m^{-4} \cdot cd=m^{-2} \cdot cd$
（放射性核種の）放射能	ベクレル	Bq		s^{-1}
吸収線量，質量エネルギー分与，カーマ	グレイ	Gy	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2}$
線量当量，周辺線量当量，方向性線量当量，個人線量当量，組織線量当	シーベルト	Sv	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2}$

(a)ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なった性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときのいくつかの用例は表４に示されている。
(b)実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号“１”は明示されない。
(c)測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。
(d)この単位は、例としてミリセルシウス度m℃のようにSI接頭語を伴って用いても良い。

表４．単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘度	パスカル秒	Pa・s	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-1}$
力のモーメント	ニュートンメートル	N・m	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	$kg \cdot s^{-2}$
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}=s^{-1}$
角加速度	ラジアン毎平方秒	rad/s^2	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-2}=s^{-2}$
熱流密度，放射照度	ワット毎平方メートル	W/m^2	$kg \cdot s^{-3}$
熱容量，エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量熱容量（比熱容量），質量エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg・K)	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量エネルギー（比エネルギー）	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m・K)	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot K^{-1}$
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m^3	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
体積電荷	クーロン毎立方メートル	C/m^3	$m^{-3} \cdot s \cdot A$
電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m^2	$m^{-2} \cdot s \cdot A$
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	$m^{-3} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	$m \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot mol^{-1}$
モルエントロピー，モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol・K)	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$
照射線量（X線及びγ線）	クーロン毎キログラム	C/kg	$kg^{-1} \cdot s \cdot A$
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	$m^2 \cdot s^{-3}$
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3}=m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2 \cdot sr)$	$m^2 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3}=kg \cdot s^{-3}$

表６．国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h =60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	’	1’=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	”	1”=(1/60)’=(π/648000) rad
リットル	l、L	1l=1 $dm^3=10^{-3}m^3$
トン	t	$1t=10^3$ kg
ネーパ	Np	1Np=1
ベル	B	1B=(1/2)ln10(Np)

表７．国際単位系と併用されこれに属さない単位でSI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	$1eV=1.60217733(49) \times 10^{-19}J$
統一原子質量単位	u	$1u=1.6605402(10) \times 10^{-27}kg$
天文単位	ua	$1ua=1.49597870691(30) \times 10^{11}m$

表８．国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里		1海里=1852m
ノット		1ノット=1海里毎時=(1852/3600)m/s
アール	a	$1a=1\ dam^2=10^2m^2$
ヘクタール	ha	$1ha=1\ hm^2=10^4m^2$
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=1000hPa=10^5Pa
オングストローム	Å	$1\ Å=0.1nm=10^{-10}m$
バーン	b	$1b=100fm^2=10^{-28}m^2$

表９．固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エルグ	erg	$1\ erg=10^{-7}$ J
ダイン	dyn	$1\ dyn=10^{-5}$N
ポアズ	P	$1\ P=1\ dyn \cdot s/cm^2=0.1Pa \cdot s$
ストークス	St	$1\ St=1cm^2/s=10^{-4}m^2/s$
ガウス	G	$1\ G \hat{}\ 10^{-4}T$
エルステッド	Oe	$1\ Oe \hat{}\ (1000/4\pi)A/m$
マクスウェル	Mx	$1\ Mx \hat{}\ 10^{-8}Wb$
スチルブ	sb	$1\ sb=1cd/cm^2=10^4cd/m^2$
ホト	ph	$1\ ph=10^4lx$
ガル	Gal	$1\ Gal=1cm/s^2=10^{-2}m/s^2$

表10．国際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリー	Ci	$1\ Ci=3.7 \times 10^{10}Bq$
レントゲン	R	$1\ R=2.58 \times 10^{-4}C/kg$
ラド	rad	$1\ rad=1cGy=10^{-2}Gy$
レム	rem	$1\ rem=1\ cSv=10^{-2}Sv$
X線単位		$1X\ unit=1.002 \times 10^{-4}nm$
ガンマ	γ	$1\gamma=1\ nT=10^{-9}T$
ジャンスキー	Jy	$1\ Jy=10^{-26}W \cdot m^{-2} \cdot Hz^{-1}$
フェルミ		$1\ fermi=1\ fm=10^{-15}m$
メートル系カラット		$1\ metric\ carat=200\ mg=2 \times 10^{-4}kg$
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリー	cal	
ミクロン	μ	$1\ \mu=1\mu m=10^{-6}m$

（第７版，1998年改訂）

R100
古紙配合率100%
白色度70%再生紙を使用しています