JAEA-Research
2007-065

東濃地域における地質環境の不均一性評価
－平成16年度－
（委託研究）

Assessment of Heterogeneous Geological Environment at Tono
- Japanese Fiscal Year 2004 - ;
(Contract Research)

戸井田 克*　須山 泰宏*　森 孝之*　稲葉 武史*
笹倉 剛*　渥美 博行*　升本 一彦*　小林 一三*
岩野 圭太*　古市 光昭*　尾方 伸久

Masaru TOIDA*, Yasuhiro SUYAMA*, Takayuki MORI*, Takeshi INABA*
Takeshi SASAKURA*, Hiroyuki ATSUMI*, Kazuhiko MASUMOTO*, Ichizo KOBAYASHI*
Keita IWANO*, Mitsuaki FURUICHI* and Nobuhisa OGATA

地層処分研究開発部門
結晶質岩工学技術開発グループ

Crystalline Environment Engineering Group
Geological Isolation Research and Development Directorate

September 2007

Japan Atomic Energy Agency　日本原子力研究開発機構

JAEA-Research

東濃地域における地質環境の不均一性評価－平成 16 年度－
（委託研究）

日本原子力研究開発機構
地層処分研究開発部門 東濃地科学研究ユニット
戸井田　克*，須山　泰宏*，森　孝之*，稲葉　武史*，笹倉　剛*，渥美　博行*，
升本　一彦*，小林　一三*，岩野　圭太*，古市　光昭*，尾方　伸久

（2007 年 6 月 27 日受理）

東濃地科学センターにおける地層科学研究では，地質環境特性を明らかにするために必要な調査・解析技術並びにその妥当性を評価する手法の開発を進めている。この研究では，岩盤の不均一性推定に伴う不確実性を定量的に把握するための手法を明らかにし，その不確実性を低減するための合理的な地質環境調査手法の確立を一つの大きな目標としている。本研究においては，これまでにファジー地球統計を基本とした不確実性解析手法を用い，調査の各段階で想定し得る（あるいは否定できない）モデルやパラメータの全体集合を考えることにより不確実性を定量化でき，調査結果に基づき蓋然性が低いと考えられる選択肢を絞り込むことによってその不確実性を低減できるという新たなアプローチを考案している。

平成 16 年度は，平成 17 年度に行う研究成果の取りまとめに向け，これまで東濃地域で行われた調査結果に基づき，本手法の実用化に向けた評価・検討を行った。本研究成果を取りまとめると以下のようになる。

1) 東濃地域の事例を対象とした統合化データフローを活用し，本手法を適用するための知識・情報を整理した。
2) これまでの課題であったパラメータの設定方法とスクリーニング方法を整備した。
3) 適用事例を用いて評価・検討を行い，本手法の実用化の目処を得た。
4) 本手法（確率的手法）とこれまでに適用されてきた決定論的手法との統合方法を整備した。

本報告書は鹿島建設株式会社が，旧；核燃料サイクル開発機構（現；独立行政法人　日本原子力研究開発機構）との契約により実施した業務成果に関するものである。
東濃地科学センター（駐在）：〒509-6132　岐阜県瑞浪市明世町山野内 1-64
*鹿島建設（株）

Assessment of Heterogeneous Geological Environment at Tono - Japanese Fiscal Year 2004 -; (Contract Research)

Masaru TOIDA*, Yasuhiro SUYAMA*, Takayuki MORI*, Takeshi INABA*, Takeshi SASAKURA*, Hiroyuki ATSUMI*, Kazuhiko MASUMOTO*, Ichizo KOBAYASHI*, Keita IWANO*, Mitsuaki FURUICHI* and Nobuhisa OGATA

Tono Geoscientific Research Unit

Geological Isolation Research and Development Directorate

Japan Atomic Energy Agency

Akeyo-cho, Mizunami-shi, Gifu-ken

(Received June 27, 2007)

"Geoscientific research" at the Tono Area is developing site investigation, characterization and assessment techniques for understanding of geological environment. Their important goals are to establish a methodology for analyzing uncertainties in heterogeneous geological environment and to develop investigation techniques for efficiently reducing the uncertainties.

The current study proposes a new approach where all the possible options in the models and data-sets, which cannot be excluded in the light of the evidences available, are identified. This approach enables uncertainties associated with the understanding at a given stage of the site characterization to be made explicitly using an uncertainty analysis technique based on Fuzzy geostatistics. This approach supports the design of the following investigation stage and reduces the uncertainties efficiently.

In FY H16 the technique has been tested through geological modelling and groundwater analyses with Tono Area case based on current knowledge, to demonstrate its applicability and to compile the knowledge / information required to describe the H17 report. This report can be summarized as follows:

1) The knowledge / information required to describe the heterogeneous characteristics was compiled and connected to uncertainties associated with the characterization of a geological environment using a synthesis diagram.
2) Methodologies for assignment and screening of parameters were developed by using Evidential Support Logic (ESL).
3) Applicability of the techniques could be confirmed with Tono Area case.
4) This report proposed a new methodology that integrates the technique into JAEA ordinary technique to good advantage in the geoscientific research project.

Keywords: Tono Area, Geoscientific Research, Fuzzy Geostatistics, Evidential Support Logic (ESL)

This work was performed by Kajima Corporation under contract with Japan Nuclear Cycle Development Institute (Japan Atomic Energy Agency).

* Kajima Corporation

目　次

Contents

表　目　次

図　目　次

1. はじめに

東濃地科学センターにおける地層科学研究では，土岐花崗岩および，それを覆う瑞浪層群を対象に，地表から地下深部までの水理特性や地下水の地球化学特性を規制する地質構造を把握するために，各種の調査・検討を行っている。これらの研究では，調査の各段階における岩盤の不均一性（不確実性）を定量的に把握するための手法を明らかにし，岩盤の不均一性（不確実性）を低減するための合理的な目標を設定するための地質環境調査のあり方について，合理的な手法を確立することを一つの大きな目標としている。一般に，岩盤のような不均一な媒体を動く地下水の挙動評価においては，それに伴う不確実性が均質な媒体と比べて大きくなるため，ボーリング孔の数などの調査量と調査結果に含まれる不確実性との関係を評価することが極めて重要である。この両者の関係を数学的に解析する一つの方法に統計解析手法があり，これは地下に埋蔵する資源量の評価など他の分野において用いられてきている実績がある。

本研究については，ファジー理論と地球統計学を応用し，これまでに，調査の各段階で想定し得る（あるいは否定できない）モデルやパラメータの全体集合を考えることにより不確実性を定量化でき，調査結果に基づき蓋然性が低いと考えられる選択肢を絞り込むことによってその不確実性を低減できるという新たなアプローチを考案した。平成 14 年度からは，本手法の実用化の第 1 段階として，瑞浪超深地層研究所用地（以下，「研究所領域」という）を対象とした 3 次元の地質構造モデル化を試みてきている。

平成 16 年度は，研究成果の取りまとめに向けて，これまで東濃地域を対象として行われてきた調査結果に基づき，本手法の実用化に向けた評価・検討を実施した。

2. 研究内容

2.1 技術的要求事項

本研究に要求される技術的事項は，以下の通りである。

①情報の整理および分析
②統計学的手法を用いた割れ目の分類とモデル化手法の構築
③入力パラメータの設定方法の検討
④リアライゼーションのスクリーニングの方法の検討
⑤昨年度までの情報に基づくモデルの更新と不確実性評価
⑥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
⑦成果の取りまとめおよび報告書の作成

2.2 情報の整理および分析

4 章では，東濃地域周辺の既存文献（地質図，地形図など）および，これまで東濃地域を対象として核燃料サイクル開発機構（現；日本原子力研究開発機構）が実施した調査結果（リモートセンシング判読，空中写真判読，空中・地上物理探査，地表地質踏査，水文調査，ボーリング調査）に基づき，以下の事項を実施した。

(1) 評価対象の設定と基本情報の整備

評価対象を明確にした上で，東濃地域の地質と花崗岩の特徴に関し基本情報を整備した。

(2) 評価領域・解析領域に含まれる地質構造要素の定義

これまでに得られた情報を基に，評価領域・解析領域に含まれる地質構造要素を明らかにすると共に，地質学・水理地質学的にその特性を整理した。

(3) 地質構造要素の特性把握に必要な知識・情報の整理

統合化データフローを用い，不均一な地質環境特性の表現に必要な知識・情報を 2 種類（決定論的・確率論的）に区分した上で，知識・情報に含まれる不確実性の内容を整理した。

2.3 統計学的手法を用いた割れ目の分類とモデル化手法の構築

5 章では，これまでに掘削されたボーリング孔の情報（DH-15 号孔，MIU-1 号孔および MIU-2 号孔）に基づき，極値統計学や割れ目の自己相似性を踏まえて，割れ目や割れ目帯の分類と分類結果に基づくモデル化手法の構築を試みた。

(1) 割れ目・割れ目帯の分類

DH-15 号孔のボーリング調査から取得した割れ目情報について，その特徴（形状，方向性，開口程度）に基づいた分類を実施するとともに，それぞれの透水性との関連性について検討した。そして NW 走向の高角（系統 4）の開口および明瞭割れ目等が透水性に影響を与えている可能性があることを示唆した。

(2) 1 本のボーリングデータを用いた極値統計学的な検討

NW 走向の高角（系統 4）の開口および明瞭割れ目に着目し，割れ目分布の自己相似性評価を行い，ボーリング孔内での自己相似性の特徴を整理した。また，極値統計学を用いて割れ目の規模とその出現間隔の関係を検討し，数十m程度の離間距離で出現する頻度 6 条/m以上の割れ目が分布する部分を本研究における割れ目帯として定義した。

そして，割れ目帯以外の領域での亀裂ネットワークをポアソン分布に従う手法によって作成し，割れ目帯の分布を Conditioned Boolean Simulation (CBS)によって推定することにより，全体のマルチスケールの割れ目分布モデルを 1 本のボーリングデータから予測できることを示した。

(3) 複数本のボーリングデータを用いた極値統計学的な検討

本検討では，研究所領域の比較的近傍にあり，花崗岩健岩部に達する大深度のボーリング孔である MIU-1 号孔および MIU-2 号孔の二つのデータセットを用いて,DH-15 号孔の場合と同様の解析を行うことにより複数本のボーリングデータを用いることによる知見の拡充を行った。その結果，各孔における透水性割れ目の特性や高頻度の割れ目帯の出現のしやすさに違いがあることが分かった。これらのことから，極値統計学的な検討のみでは，対象領域に分布する地質構造を対象とした調査レイアウトとその調査数量の決定が困難であると考えられる。

(4) 検討手順の提示

上記(1)から(4)で検討した手順を体系化し，「割れ目の分類とモデル化の手順」としてフローを取りまとめた。

2.4 入力パラメータの設定方法の検討

6 章では，入力パラメータのファジーメンバーシップの設定方法の妥当性を論理的に説明する手順を明らかにすると共に，ファジーメンバーシップの「最も確からしい（μ＝1.0）」の部分を狭くするための方策を検討した。

(1) 各入力パラメータのファジーメンバーシップ設定方法の整理

これまでのファジーメンバーシップの区分の定義では専門家により解釈が異なることが想定されるため，ファジーメンバーシップの設定方法の変更を実施すると共に，それぞれの考え方を整理した。

(2) ファジーメンバーシップの設定方法の妥当性の検討

各入力パラメータのファジーメンバーシップ設定方法については，結果の確からしさの評価

手法である Evidential Support Logic (ESL) [1]を活用し，「最も確からしい（μ＝1.0)」，「考慮したほうがよい（μ＝0.5)」および「可能性は低いが否定できない（μ＝0.0+)」の設定の妥当性を論理的に説明する手順を示した。

(3) 「最も確からしい」部分などを狭くする方策の検討

(2)で示したように ESL を活用することにより，「最も確からしい」部分を狭くし，各入力パラメータのファジーメンバーシップ分布を向上させることが可能であることを示した。また，入力パラメータの設定方法を体系化するため，「入力パラメータの設定の手順」をフローとして取りまとめた。

2.5 リアライゼーションのスクリーニング方法の検討

スクリーニングの具体的な手順は，評価対象や用途そして入手可能な情報の種類や量に応じて多種多彩であり，その具体的な内容を一般化することは難しい。そこで，7 章では，まず，スクリーニングの一般的な方法や考え方をまとめた後，具体的な事例を参照しつつ事前段階と事後段階におけるスクリーニングの方法を詳述した。そして，最後に，特に事後のスクリーニングに関してその妥当性を論理的に説明する手順について検討を加えた。

(1) スクリーニングの基本的な考え方

スクリーニングは，単一の現象の固定的な視点のみではなく，多面的な知識体系に基づいて行われる必要があることから，ここでは，まず，スクリーニングにおいて考慮すべき多様な情報について整理を行うとともに，スクリーニングの基本的な考え方について取りまとめた。

(2) スクリーニングの具体的な方法

ここでは，本研究の対象である不均一場での地下水流動解析に焦点を当てることとし，(1)で示した地質情報および水頭を用いたコンディショニングの事例として，東濃鉱山周辺における研究を用い，入力段階および出力段階でのスクリーニングの具体的な方法を整理した。

(3) スクリーニングの妥当性を理論的に説明する手順の検討

(2)で示したスクリーニングの事例では，境界条件として使用しなかった二つのボーリング孔における間隙水圧分布のデータをスクリーニングのための情報として用いている。しかしながら，一般には，スクリーニングに用いられる情報は単一のものであるとは限らず，また，定量的なデータのみではなく，専門家の主観的判断等も含まれることとなる。そこで，このような一般的な情報を取り扱う手法として，ここでは，まず ESL の適用を検討し，次にこれを踏まえて「スクリーニングの全体的な手順」をフローとして取りまとめた。

2.6 昨年度までの情報に基づくモデルの更新と不確実性評価

8 章では，4 章から 7 章までの検討結果に基づき，概念モデル，地質構造モデルおよび水理地質構造モデルを更新し，代表的なリアライゼーションについて地下水流動解析を行い，地下水流速および地下水移行時間の分布と，その結果に含まれる不確実性の大きさについて整理した。また，昨年度の検討結果と比較を行い，不確実性の低減の程度を確認した。

(1) 概念モデルの検討

先ず，不均一地質環境の概念モデル構築手順について体系的に取りまとめた。そして，その手順に沿って，概念モデル構築の構成要素を抽出すると共に，そのモデルオプションを具体化した。

(2) 地質構造モデルおよび水理地質構造モデルの更新

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，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解析することにより不均質透水係数場を作成した。

(3) 水理地質構造モデルにおける不確実性の評価

(2)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った。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（2）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，今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った。

(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

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。そして，ダルシー流速分布とダルシー流速に基づく地下水移行時間分布の不確実性を取りまとめた。また，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，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として「割れ目帯の有無」と「個別割れ目の透水量係数分布の対数標準偏差」を取り上げると共に，その確からしさについて ESL を用いた評価を行った。

(5) 昨年度の研究成果との比較

適用した地質構造モデルと研究所領域にて新たに取得された DH-15 孔のデータとを比較し，適用したモデルの妥当性を確認した。そして，水理地質構造モデルと地下水流動解析の不確実性評価として，最終的なアウトプットであるダルシー流速分布とダルシー流速に基づく地下水移行時間分布の今年度と昨年度の結果を比較した。その結果，今年度検討したスクリーニング方法を適用することにより，不確実性がかなり低減していることが分かった。

2.7 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

9 章では，確率論的手法として 3 章で示した不確実性解析手法と，核燃料サイクル開発機構の既往研究成果である決定論的手法との統合化方法に関する検討を実施した。本検討では両手法の特徴を整理すると共に，両手法の相違点・類似点および利点・欠点を整理した上で，両者の統合化方法を取りまとめた。

3. 地質環境特性の不確実性解析手法の開発－東濃地域を対象とした適用性検討－

本章ではこれまでに開発した「地質環境特性の不確実性解析手法」の開発の概要を示す。

3.1 不確実性解析の必要性

地層処分における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，そしてモデルに必要なパラメータに関する不確実性といった様々な不確実性が存在する[2)]。これらの不確実性が発生する起源としては，以下の二つが考えられる。

① 現状の地質環境の理解に関するもの，つまり，地層・岩体の区分，断層・亀裂の存在などによる岩盤内の空間的不均一性*

*不均一性と不確実性：岩盤内が推定すべきパラメータについて完全に均一で，測定誤差を無いものとすれば，その推定結果に不確実性は存在しない（例えば，岩盤が純金でできていれば 1 点の情報で全体が把握可能）。しかし，実際岩盤内には，

地層・岩体の区分や，断層・亀裂の存在などにより不均一性が存在するため，その推定結果には不確実性が伴う。

② 地層処分の安全性を示すために実施する材料特性や地質環境などの 10 万年，100 万年オーダーの長期予測

このうち，①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を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。一方，②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の予想に対する，個別現象についての短期的な試験結果の単純な重ね合わせによる推定結果などに生じる。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，ウラン鉱床など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[3)]。当然のことながら，地質環境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の起源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。

このように，地層処分の性能評価では，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うえで ICRP（International Commission on Radiological Protection）は，平成 12 年に Publication 81[4)] 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としている。そして，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[4)] 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。このような基本的考え方が，性能評価と地質環境調査における不確実性の取り扱いに与える影響としては，以下のことが考えられる。

第一に考えられることは，不確実性の存在あるいはその結果生じる長期的安全性に対する「信頼性」の欠如（厳密な証明が極めて困難）が，直ちに地層処分の実現可能性を否定するものではないという点である。むしろ重要なことは，性能評価の結果を，10 万年～100 万年オーダーの長期予測や岩盤内の空間的不均一性に起因する不確実性の大きさとともに整理したうえで，その時間的変遷を提示することである。そして，不確実性と安全性の関係を把握することにより，リスク評価としての判断を可能にすることである。当然，この目的のためには，様々な要因による不確実性の程度を，それぞれ適切な方法で把握することが必要となる。

そして第二に考えられることは，地層処分研究開発および事業の各段階において「合理的に達成可能な方策を尽くす」ために，性能評価に含まれる不確実性を低減し，多重バリアシステムの総合的性能をできるだけ高める必要があるという点である。これらの具体的な方策には，下記の 3 項目があると考えている

① 不均一な地質環境特性についての理解や長期予測に含まれる不確実性を逐次評価し，引き続く段階において，これを低減するために効果的な地質環境調査を行うこと。

② 天然バリア機能を最適化する処分場設計（適切な処分サイト・位置・深度の選定や岩盤改良の実施など）を行うこと。

③ 不確実性の影響に対して頑健な人工バリアシステムの設計を行うこと。

本章では，「合理的に達成可能な方策を尽くす」のうち，①の不均一な地質環境特性に関係するものに焦点をあて，開発した「地質環境特性の不確実性解析手法」を示すと共に，実際のデータを用いて実施した適用性検討結果を取りまとめた。

3.2 地質環境特性の不確実性解析手法

「地質環境特性の不確実性解析手法」の開発にあたり主に考慮したことは，下記の 3 項目である。

① 不均一な地質環境特性の表現に必要な知識・情報とそれらに含まれる不確実性の内容との対応付けができていること。

② 知識・情報に含まれる不確実性の内容に基づき，不確実性を定量化できること。

③ 引き続く段階において，地質環境特性の不確実性を低減するために効果的な地質環境調査を提案できること。

そこで本章では，上記の各項目に従い，本手法の概要を示す。本手法は，「概念モデルの不確実性」の取り扱いも考慮し，柳澤他[5]で示した不確実性解析の方法論を高度化したものである。

3.2.1 不均一な地質環境特性の表現に必要な知識・情報とそれらに含まれる不確実性の内容との対応付け

不均一な地質環境特性を表現する地質環境特性モデルは，一般に次の手順で構築される。

① 地質学的解釈に基づき，目的に応じた地質環境特性を表現する「概念モデル」の構築（記載・表現される要素を地質構造要素と称す）

② 表現すべき地質構造要素に基づくゾーン区分の境界位置や，ゾーン区分内の物性値分布を表現する「3 次元モデル」の構築

地質環境特性の不均一性に関して，概念モデルの構築では地質学的知見に基づき場を「解釈」することにより決定論的に表現している。また，3 次元モデルの構築では，地質環境特性の不均一性を客観的に「記述」するために，ボーリング調査などに基づく決定論的情報を軸に，確率論的手法を用いて未計測部分の特性を内外挿し，既に取得しているデータと整合的な空間分布を作成している。

不均一性を表現する地質環境特性モデルの構築に必要な知識・情報は，核燃料サイクル開発機構が深地層の科学的研究で作成した「統合化データフロー」（調査からデータ解釈，地質環境特性のモデル化を通して評価に至るまでのデータの流れと成果の反映項目との関係を系統的に整理したもの，図3.1 参照[6] において示されている）。また，地質環境特性モデルの信頼性評価の一環として，ESL を適用することにより，モデルに至るまでの判断過程を示したうえで，モデル構築に必要な知識・情報が確認されている[7]。

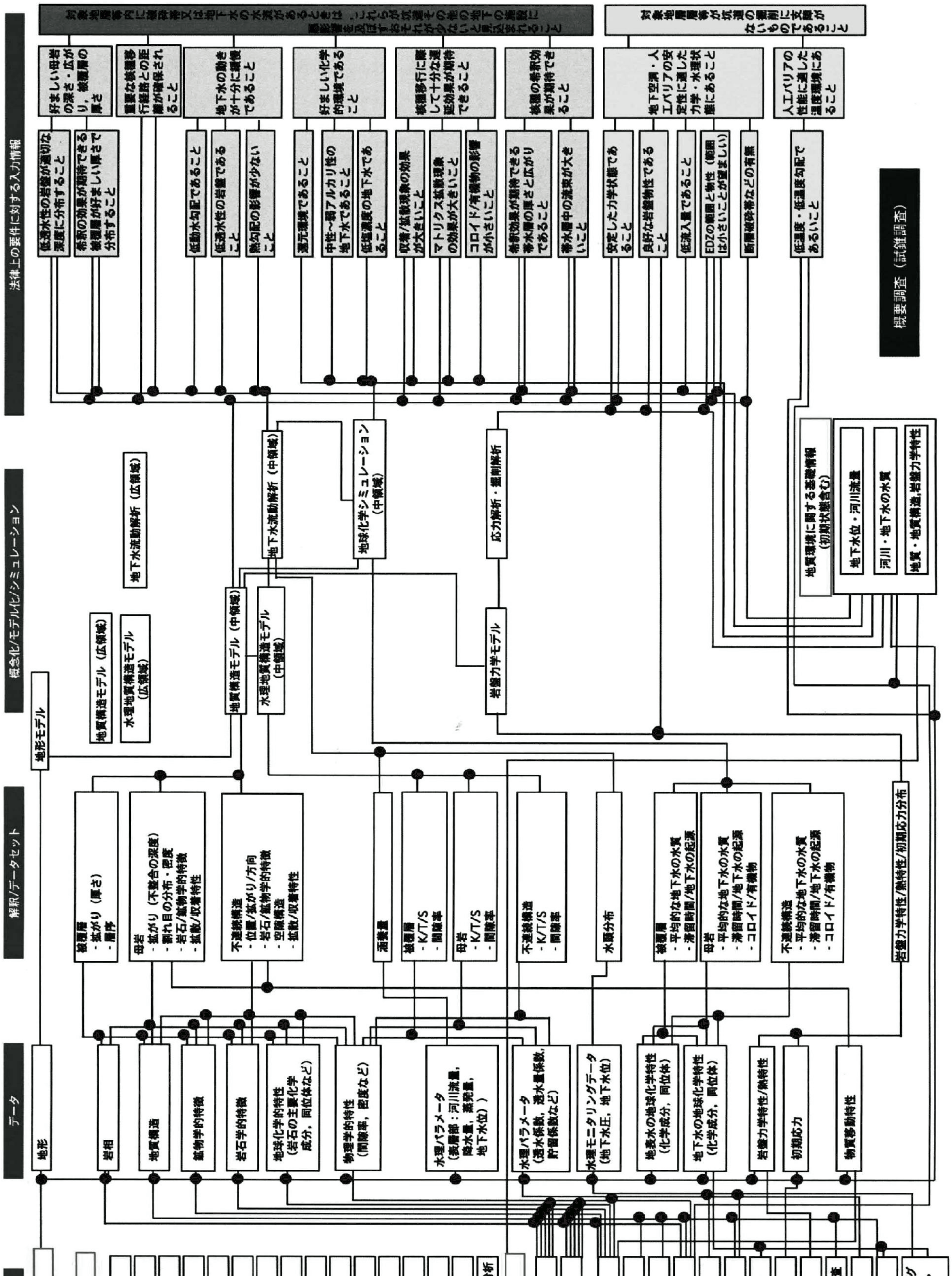


図 3.1　統合化データフローの一例 6)

（試錐調査を想定した統合化データフロー）

これらの整理結果より，地質環境特性モデルの構築に必要な知識・情報には，統合化データフローを例に取ると，下記に示すようなものがある。

- 地形
- 岩相
- 地質構造
- 鉱物学的特性
- 岩石的特性
- 岩石の地球化学特性
- 物理学的特性
- 水理パラメータ
- 水理学的モニタリングデータ
- 地下水の地球化学特性
- 岩盤力学特性
- 初期応力

これらの知識・情報には，不均一性を表現する地質環境特性モデルを構築する際，決定論的に表現されるもの（岩相における地層累重の法則など地質学的知見やボーリング調査におけるコア観察に基づく地層境界深度など。以下，決定論的知識・情報と称す。）と頻度データに基づき確率論的に表現されるもの（水理パラメータの透水係数分布など。以下，確率論的知識・情報と称す。）に区分することができる。

これらの知識・情報に含まれる不確実性については，決定論的知識・情報を対象とした場合，次のように整理される。

- サイトの情報が不足しているため，例えば，地層累重の法則に基づき対象領域全てにおいて整合な地層を形成しているかどうかが判断できない（地質学的な解釈に複数のオプションが生じえるため，概念モデル自体に不確実性が含まれる）。
- 例えば，物理探査結果に基づく解釈のため，コア観察結果などと比較し層理面の深度に不確実性が含まれていることを否定できない（地質構造要素に基づくゾーン区分において境界面の位置などに不確実性が含まれる）。

また，確率論的知識・情報については，次のように整理される。

- 地層の形成プロセスのランダムさにより場所によってばらつきが生じていると考えられるため，例えば，ある特定の場所の透水係数を一意に決定できない（同じ確率密度分布を用いても，統計的リアライゼーションにおける不均一分布は個々に異なる）。
- サイトの情報が不足しているため，例えば，透水係数のランダムさを表現する確率密度分布の平均値・標準偏差などに不確実性が含まれていることを否定できない（確率密度分布に複数のオプションが生じえる）。

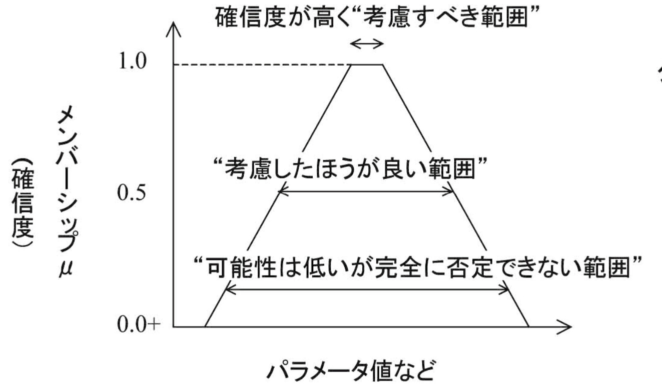
以上のような考えに基づき，本手法では，不均一な地質環境特性の表現に必要な知識・情報とそれらに含まれる不確実性の内容との対応付けを行っている。

3.2.2 知識・情報に含まれる不確実性の内容に基づいた不確実性の定量化

不確実性の定量化については，人工知能分野において早くから試みられており，表 3.1 に示すように不確実性の内容に応じて対応する算法が明らかになっている [8)]。

表 3.1　人工知能分野における不確実性の内容と対応する算法

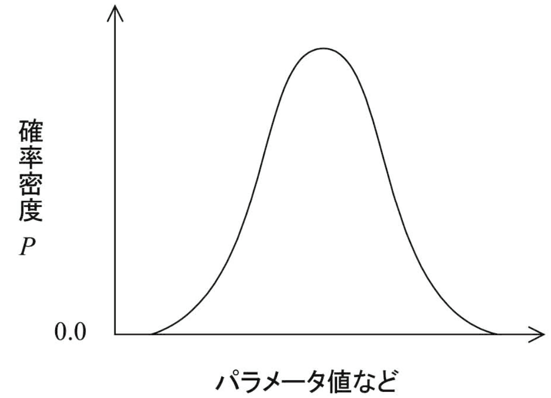
呼称	不確実性の内容	対応する算法
Vagueness	①判断基準があいまいであるために既知の要素のある集合への帰属性が決定できない（身長 170cmの人は背が高いか？背が高いとは何 cm以上か？）	ファジー理論
Ambiguity	②ある要素についての情報が不足しているために明確な判断基準を持つ集合への帰属性が決定できない（既に亡くなっている祖父の身長が 170cm以上であったかどうか？）	Possibility 理論（図 3.2） あるいはベイズ統計
Chance	③ある要素の特性がランダムに決まるものであるために明確な判断基準を持つ集合への帰属性が決定できない（サイコロの出目が 1 になるかどうか？）	確率論（図 3.3）



公理系

$$\mu(A \cap B) = \min[\mu(A), \mu(B)]$$
$$\mu(A \cup B) = \max[\mu(A), \mu(B)]$$
$$\max_{x \in X} \mu(x) = 1$$

図 3.2　Possibility 理論



公理系

$$P(A \cap B) = P(A|B)P(B) = P(B|A)P(A)$$
$$P(A \cup B) = P(A) + P(B) - P(A \cap B)$$
$$\int_{x \in X} P(x) = 1$$

図 3.3　確率論

前節で示したように，不均一な地質環境特性を表現する決定論的知識・情報に含まれる不確実性に関し，a. と b. は，どちらも「②ある要素についての情報が不足しているために明確な判断基準を持つ集合への帰属性が決定できない」に当てはまるため，表 3.1 より，それに対応する算法としては Possibility 理論あるいはベイズ統計が適していることが分かる。また，確率論的知識・情報に含まれる不確実性 c. は「③ある要素の特性がランダムに決まるものであるために明確な判断基準を持つ集合への帰属性が決定できない」に当てはまるため，それに対応する算法としては確率論が，不確実性 d. は決定論的知識・情報と同様に Possibility 理論あるいはベイズ統計が適していることが分かる。よって，これらの算法を適切に用いれば，知識・情報に含まれる不確実性を定量化することが可能となる。特に，Possibility 理論は，図 3.2 に示すように，確信度が高く通常モデル化・解析の対象となる「考慮すべき範囲」の概念やパラメータに加え，確信度が低い「考慮したほうが良い範囲」，更に「可能性は低いが完全に否定できない範囲」の概念やパラメータまでを考慮できるため，地質環境特性モデルの構築に必要な知識・情報に含まれる不確実性を評価するのに適していると考えられる。そ

のため，本手法の説明では②に対して Possibility 理論を代表として用いている。

　そこで本手法では，地質環境特性モデルの構築に必要な知識・情報に含まれる不確実性の内容に応じて Possibility 理論と確率論を併用すると共に，これらの算法により評価される不確実性を網羅的に統合する方法として Possibility 理論で表現されるものと確率論で表現されるものをそれぞれ個別に統計的サンプリングを行う二段階モンテカルロシミュレーションを適用することとした。本手法の概念を図 3.4 に示す。本手法は，調査の各段階で得られた知識・情報に基づき，考慮すべき（および完全に否定できない）概念やパラメータの全体集合を考えることにより，不確実性を「網羅」することができ，定量化が可能となるものである。

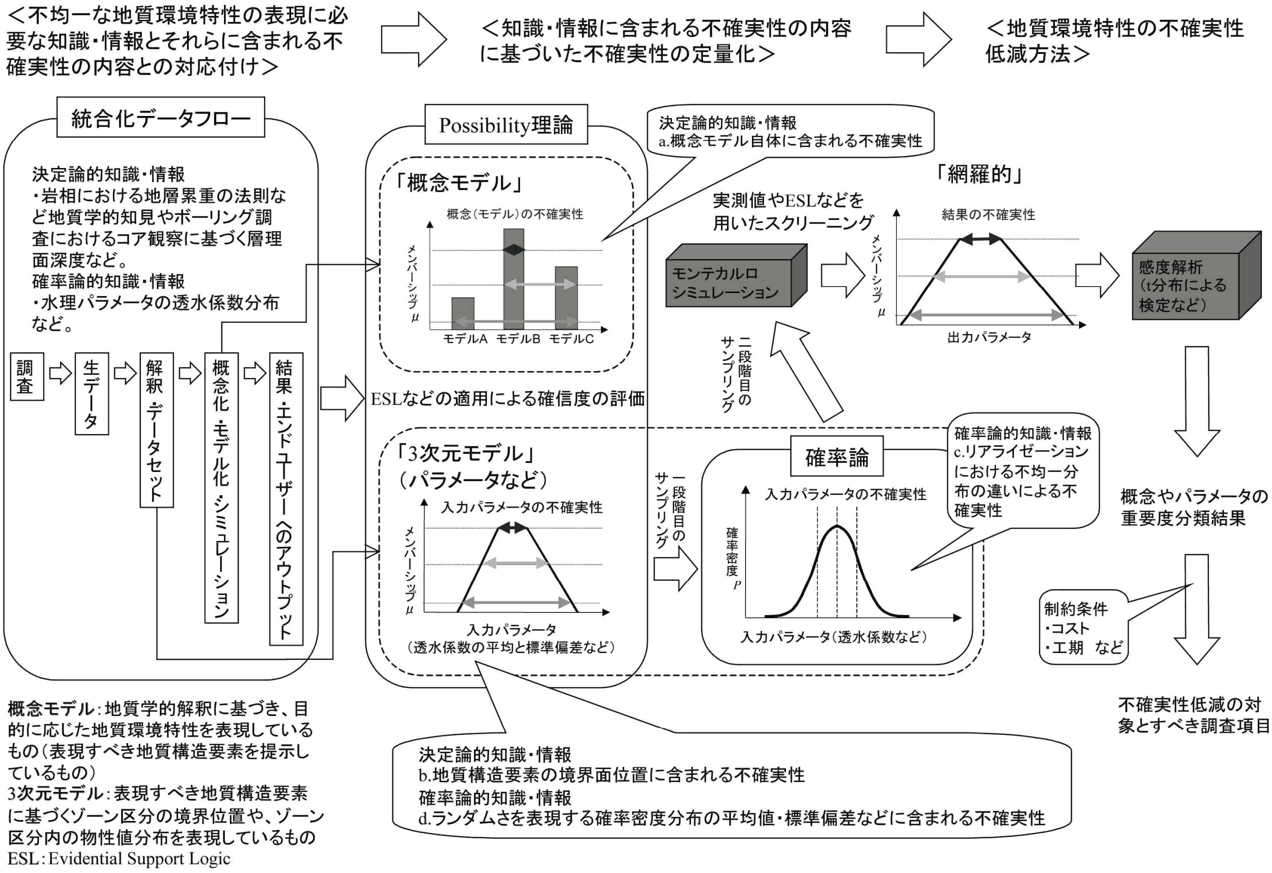


図 3.4　地質環境特性の不確実性解析手法の概念

3.2.3 地質環境特性の不確実性低減方法

　地質環境特性の不確実性低減方法を構築するにあたり注意すべきことは，不確実性を定量化する算法により，その方法が異なる点である。サイコロの出目のように確率論で表現できる場合は，確率の総和が 1.0 になるため，1 つの事象が生じる確率を高めることにより，他の事象が生じる確率を下げ，推定結果に対する不確実性の低減を図ることができる。このことは，最良の選択枠の信頼性を向上させることにより，不確実性を低減できることを意味している。しかし，Possibility 理論なども含めて不確実性を表現する場合は，メンバーシップ μ で表現される確信の程度の総和は 1.0 にならないため，1 つの確信の程度を高めても他の確信の程度は変化しない。そのため，不確実性の低減を図るためには，選択枠に対して消去法が必要となる。

　このことから，本手法では，地質環境特性の不確実性低減方法として，調査結果に基づき，信頼性が低いと判断される選択枠を棄却し，図 3.5 に示すように考慮すべき（および完全に否定できない）

範囲を狭める方法を採用している。

不確実性低減の対象とすべき概念やパラメータの具体的な選定は，モンテカルロシミュレーションの出力結果に対し，概念やパラメータの感度解析（t 分布による検定など）を行い，概念やパラメータの重要度分類を実施したうえで，コストや工費などの観点から実現可能性を踏まえ実施する方法を用いている。

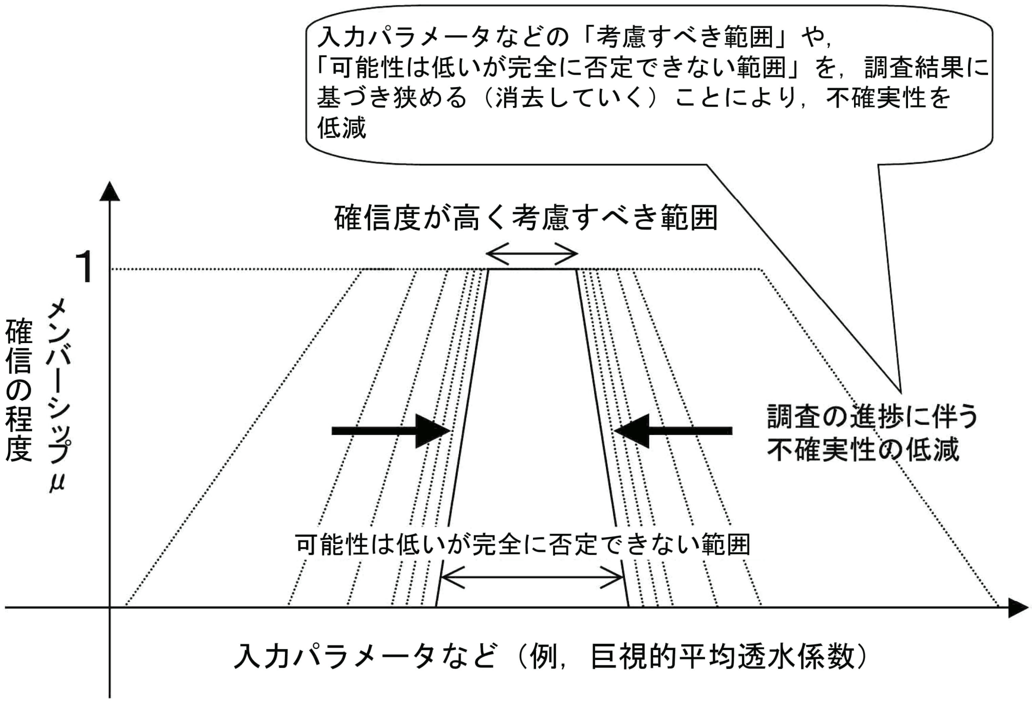


図 3.5　地質環境特性の不確実性低減方法

3.3 東濃地域を対象とした適用性検討

開発した「地質環境特性の不確実性解析手法」の適用性検討は，実際の地質環境を対象に，これまで適用実績が少ない Possibility 理論におけるモンテカルロシミュレーションに対して実施する必要がある。そこで，本節では，適用性検討として「統合化データフロー」構築の対象となった東濃地域において，主に決定論的知識・情報によって表現される地質構造要素を対象に，図 3.4 で示した流れに基づき「実際に Possibility 理論におけるモンテカルロシミュレーションを適用したモデル化・解析は可能か？」を確認すると共に，不確実性の定量化結果を用いて「具体的な不確実性低減方法等の提案は可能か？」を確認した。

3.3.1 東濃地域の地質

東濃地域周辺は，中生層（美濃堆積岩類）とそれを貫く後期白亜紀花崗岩体（土岐花崗岩；82～68Ma）により基盤岩が形成され，その基盤が地表に直接露出，あるいは上位の新第三紀の堆積岩類により不整合に覆われる地質構造を示している（図 3.6）。土岐花崗岩は，解析対象領域に分布する基盤岩類の大部分を占め，東西約 12km，南北約 14km のほぼ円形の岩体として分布する。本花崗岩は主に細～粗粒の黒雲母花崗岩からなり，岩体中には北北西方向の石英斑岩質，アプライト質などの岩脈が幾つか貫入する。新第三紀の堆積岩類は中新世の瑞浪層群と鮮新世の瀬戸層群からなり，上位の瀬戸層群は下位の瑞浪層群を不整合に覆う。主要な断層として東濃地域のほぼ中央に東西系の走向を示す月吉断層，南東部に北東系の山田断層帯が分布する。

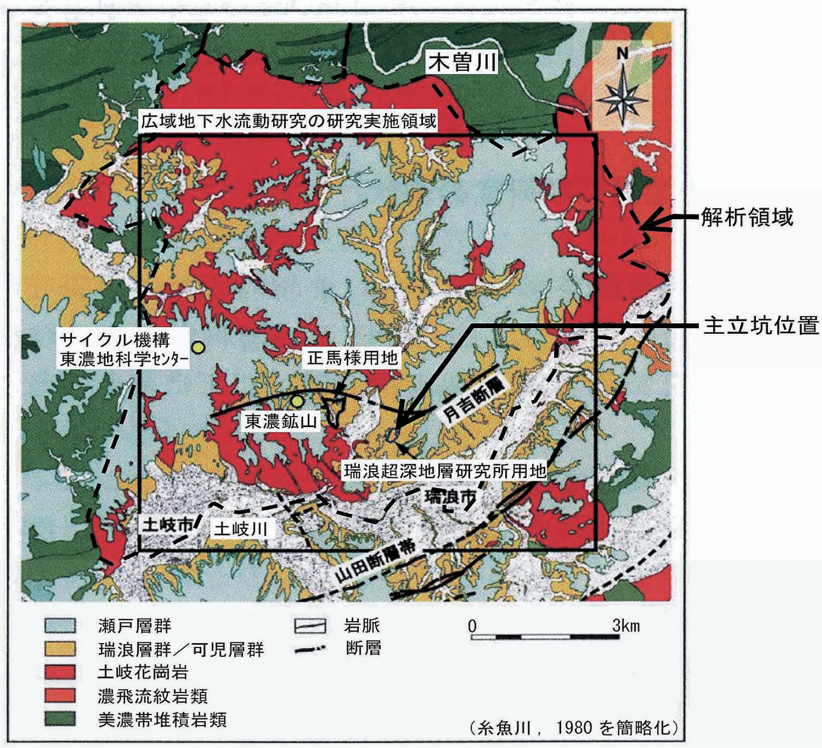


図 3.6　東濃地域の地質概要と評価位置・解析領域[5]

3.3.2 評価項目・位置およびモデル化・解析領域

「地質環境特性の不確実性解析手法」の適用性を確認するにあたり，不確実性評価の対象とした項目は，地層処分の性能評価において重要となる地下水移行経路・時間（涵養点から評価位置まで・評価位置から流出点までの経路とそれらの時間）と評価位置での地下水流速とした。評価位置は図 3.6 に示すように瑞浪超深地層研究所主立坑位置深部とした。

モデル化・解析領域は，評価位置での地下水移行経路・時間と地下水流速を評価するため，水理学的な観点から，図 3.6 に示すように尾根および河川等を含む領域（約 12km四方，部分的に東濃地域における花崗岩風化部露出地域等からの地表水の浸透も考慮し広めに設定）とした。モデル化・解析深度はEL−2,300mまでとした。

3.3.3 地質環境特性の不確実性解析手法の適用

(1) 概念モデルの構築（モデル化する地質構造要素の抽出）と検討対象とした決定論的知識・情報

地質環境特性のモデル化においては，地下水流動に影響を及ぼすと考えられる地形の起伏や不均一性を有する地質（岩相の違い等）・地質構造（断層等）の空間的分布を表現する必要がある。そこで，モデル化する地質構造要素は，これまでの研究成果[9]を踏まえ，地形面（地下水面）に加え，涵養域～評価位置～流出域までの大局的な地下水流動と評価位置での地下水流速に影響を与えると考えられる以下の要素を抽出した。

① 地質

- 瀬戸層群
- 瑞浪層群：生俵累層，明世累層（主部），明世累層基底礫，土岐夾累層（主部），土岐夾累層基底礫
- 土岐花崗岩：風化花崗岩，花崗岩健岩部

② 地質構造

- 月吉断層

これらの地質構造要素の中で特に断層は，様々な調査技術によって得られる情報に基づき，その存在と位置が認知されることになる。しかしながら，個々の調査技術は，断層の探査に関しての能力に限界があるうえ，同じ技術においても地質環境条件や調査条件によって得られる結果が異なってくる。そのため，従来の地質図にて断層が記載されていない箇所においては「断層が存在しないという証拠がある」ことよりも，むしろ「断層が存在するか否かが分からない」という意味合いが強い場合がある。また，断層が記載されている箇所においても「少なくとも 1 箇所断層が存在する証拠がある」ことだけを意味している場合がある。これらのことから，断層の存在やその位置に関しては，常に不確実性が存在していると考えられる。そこで本章で検討対象とする決定論的知識・情報としては，断層の存在とその位置を取り上げた。

通常断層の探査は，地表地質踏査結果や物理探査結果に基づく地質学的解釈により断層の存在の可能性を判断し，トレンチ調査やボーリング調査によってその存在および位置の確認を行うものである。しかし，トレンチ調査やボーリング調査で断層を探査できた場合でも，3 次元的な位置情報については大きな不確実性が残存することになる。

実際，東濃地域を見てみると，図 3.6 に示すように解析領域内においてその存在が確認されているのは月吉断層のみとなる（山田断層帯は解析領域外）。この月吉断層においても先ほど示したように不確実性が残存しており，その位置（地表面での投影長さや深部での形状）については厳密に分かっていないのが現状である。また，図 3.6 には他の断層が記載されていないが，このことは他の断層が全く存在しないことを意味している訳ではない。

そこで本モデル化では地質構造要素として「存在する可能性がある（あるいは否定できない）未知の断層」も考慮することとし，未知の断層については Possibility 理論を用いその確信度に応じて 2 段階に区分して取り込むこととした。これら未知の断層の存在については異なる概念モデルとして取り扱った。また，地質図に記載されている月吉断層の位置の不確実性については 3 次元モデルのパラメータなどの不確実性として取り込んだ。

最終的に地質構造要素として考慮した地質構造は下記のようになる。

③ 地質構造

- 月吉断層（考慮すべき範囲，以下 μ ＝1.0 と称す）
- 存在する可能性がある未知の断層（考慮したほうが良い範囲，以下 μ ＝0.5 と称す）
- 存在する可能性が低いが完全に否定できない未知の断層（可能性が低いが完全に否定できない範囲，以下 μ ＝0.0+と称す）

(2) 3 次元モデルの構築（地質構造要素のモデル化）

① 月吉断層

月吉断層の存在とその位置は，統合化データフローに示すように地表地質分布に基づく地質学的解釈に加え，地表露頭・東濃鉱山壁面観察・ボーリング調査でのコア観察において存在とその概略の 3 次元的位置が確認されている。ただし，前項に示したように例えば詳細な東西方向への広がりについては，十分な理解がされていない。そこで本モデル化では Possibility 理論を適用し，縮尺 2 万 5 千分の 1 の地質図やリニアメント，既存のボーリング調査結果を基に，図 3.7 のように月吉断層の東西方向での分布範囲を設定した。μ=1.0（存在を考慮すべき範囲）としたのは断層が直接観察された坑道・ボーリング孔の調査範囲および地層の上下方向のずれ（断層分布の推定位置を境に地層分布が急激に変わること）が認められる範囲であり，この範囲は月吉断層が確実に分布している範囲といえる。μ=0.5 とした範囲には，μ=1.0 の範囲に加えて，西側はボーリング調査で月

吉断層に相当する可能性のある破砕帯が認められた DH-1 孔の位置まで，また，東側は東方延長部に認められるリニアメントの分布位置までを含む。μ=0.0+の範囲では東側の部分において更に延長部を考慮している。この範囲は，地層分布のずれがほとんど示されていないにもかかわらず，地質図において月吉断層が記載されており，可能性は低いが完全に否定できない範囲と考えることができる。

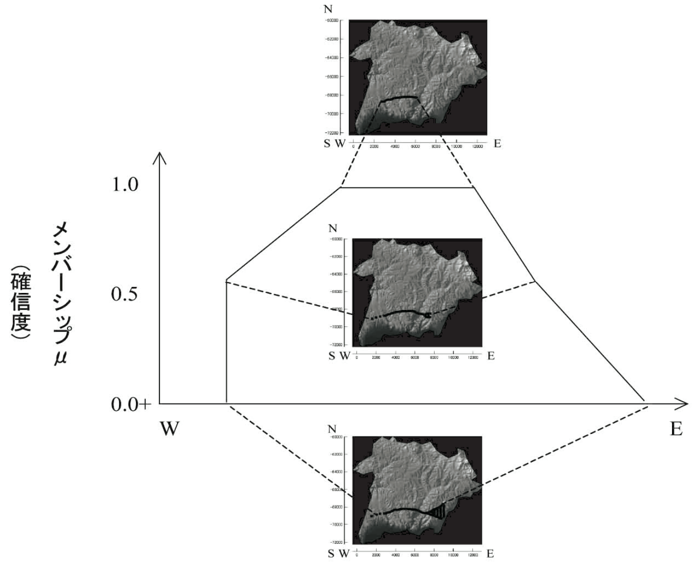
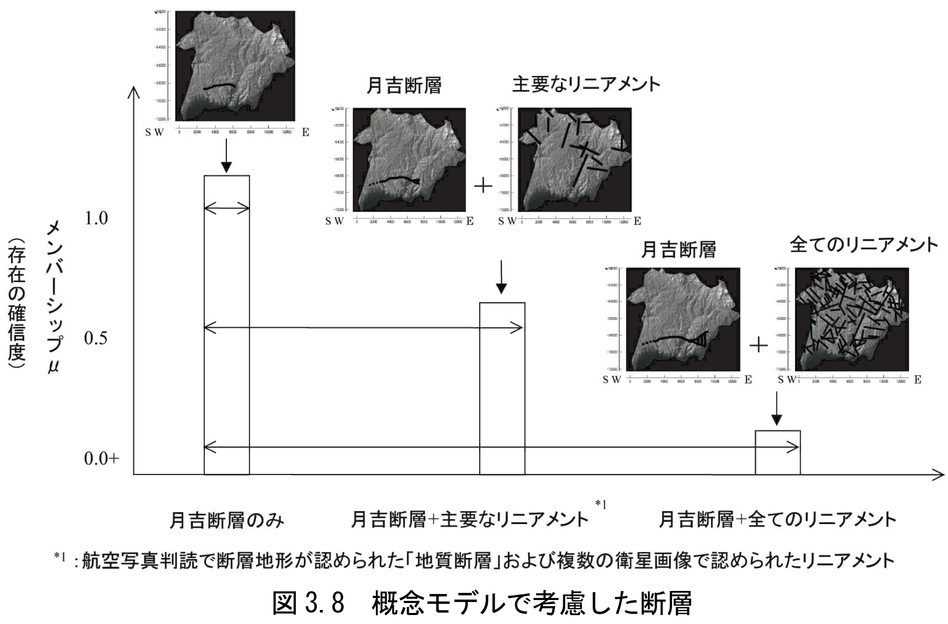


図 3.7　月吉断層の東西方向での分布範囲

② 存在する可能性がある未知の断層と完全に否定できない未知の断層

月吉断層以外の未知の断層については，統合化データフローに示す航空写真（縮尺 4 万分の 1，ステレオペア），SPOT 衛星画像（10 万分の 1，ステレオペア）および LANDSAT 衛星画像（20 万分の 1，単画像）の 3 種の判読結果に基づいて設定した。μ＝0.5（存在する可能性がある未知の断層）は，航空写真判読において断層地形（鞍部の連続など）が認められたリニアメントと，複数の画像で共通して認められたリニアメントとした。μ＝0.0+（存在する可能性が低いが完全に否定できない未知の断層）では，いずれかの画像判読で抽出された全てのリニアメントを対象とした（図 3.8 参照）。



*1：航空写真判読で断層地形が認められた「地質断層」および複数の衛星画像で認められたリニアメント

図 3.8　概念モデルで考慮した断層

③ 断層の透水性

断層については，破砕帯自体が地下水の流動経路となる場合や，断層粘土を境に遮水的な性質を有する場合などが考えられる。そのため，断層の透水係数は透水性と遮水性の両ケースを考慮できるように，ここでは，Possibility 理論を用い，図 3.9 に示すように母岩の透水係数に対する相対値（±1 log m/s）として透水係数とその不確実性を設定した。例えば，母岩の透水係数が-8.0（log m/s）の場合，対象となる断層の透水係数は-9.0～-7.0（log m/s）の範囲となる。月吉断層は断層粘土を有するため地下水流動に対し遮水的な役割を有するとの知見もあるが，この特性は月吉断層全長において確認されたわけではないため，ここでは未知の断層と同様の扱いとした。

母岩となる地質の分布は地質図と複数のボーリング調査結果に基づき図 3.10 のように設定し，その透水係数分布は東濃地域の水理試験結果に基づき表 3.2，図 3.11 のように設定した。地下水面については複数のボーリング調査結果と河川の位置を考慮し地形面近傍に設定した。

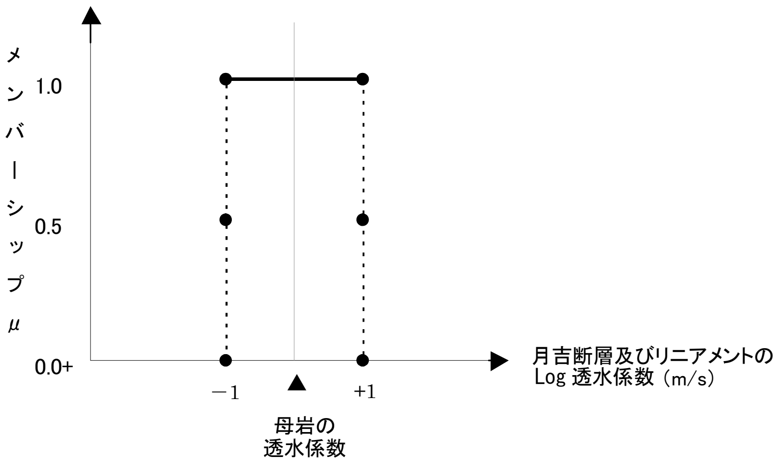


図 3.9　月吉断層および未知の断層の透水係数とその不確実性

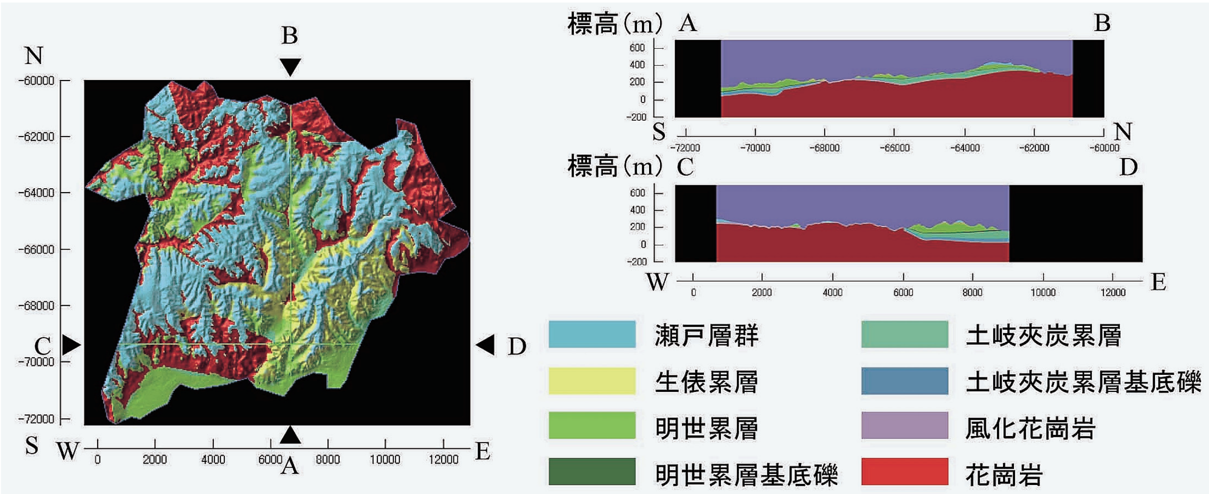


図 3.10　地質分布に関する 3 次元モデル

表 3.2　地質分布の透水係数

地層	透水係数平均値 (log m/s)	透水係数標準偏差 (log m/s)
瀬戸層群	-7.0	2.0
生俵累層	-8.2	1.1
明世累層	-8.0	1.0
明世累層基底礫岩	-8.0	1.0
土岐夾炭累層	-7.8	1.3
土岐夾炭累層基底礫岩	-7.8	1.3
花崗岩	-7.8	1.6
花崗岩風化部	-7.8	1.6

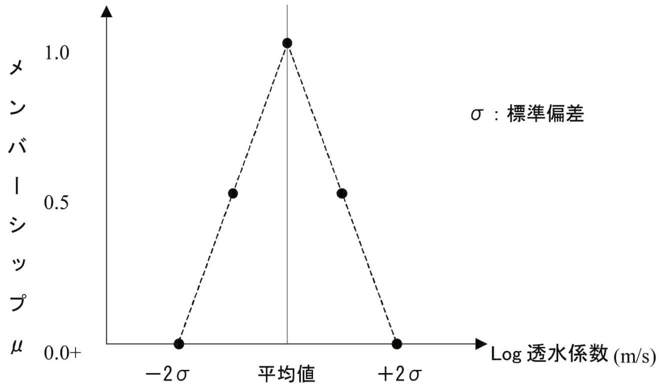


図 3.11　地質分布の透水係数の不確実性

(3) 飽和定常の地下水流動解析に関するモンテカルロシミュレーションの実施

飽和定常の地下水流動解析に関するモンテカルロシミュレーションは，概念モデル・3 次元モデルにおいて Possibility 理論で表現されるものから一段目のサンプリングを，確率論で表現されるものから二段目のサンプリングを実施して行った。一段目のサンプリングでは，Possibility 理論で表現される下記のものを対象に，メンバーシップμ毎に実施した。

① 概念モデル（図 3.8 参照）
② 月吉断層の東西方向への分布範囲（図 3.7 参照）
③ 地質分布の透水係数（表 3.2 参照）
④ 月吉断層および未知の断層の透水係数（図 3.9 参照）

二段目のサンプリングでは，確率論で表現される下記のものを対象に実施した。

⑤ 月吉断層の東西方向への分布範囲（図 3.7 参照，各メンバーシップμ内でランダム）
⑥ 地質分布の透水係数（表 3.2 参照，各分布範囲内でランダム）
⑦ 月吉断層および未知の断層の透水係数（図 3.9 参照，各分布範囲内でランダム，各断層の透水係数は独立にサンプリング）

地下水流動解析に用いたコードは 3 次元の有限要素地下水流動解析コード FEMWATER である。解析モデルは，二段階サンプリング後，各地質に該当する構造格子のメッシュ（50×50×50 個）にその地質の透水係数を設定して構築した。月吉断層および未知の断層のモデル化については構造格子のメッシュにて断層が有する透水性と該当する母岩部分の透水性とを入れ替えてモデル化した。モデル化された透水係数分布の一例を図 3.12～図 3.14 に示す。図 3.13，図 3.14 の青色部分に示すように未知の断層が分布する範囲のメッシュでは透水係数の不均一性が表現されている。飽和定常の地下水流動解析の境界条件は下記のように設定した。

⑧ 上部境界条件
- 飽和解析のため地下水面に応じた透水境界（固定水頭境界）

⑨ 下部境界条件（モデル底面）
- 水の流入出のない不透水境界

⑩ 側方境界条件
- 地下水の分水嶺と見なし不透水境界
- 地下水の流入出があるとし，地下水面に応じた透水境界（固定水頭境界）

以上より，実施した飽和定常の地下水流動解析は，3 種類のメンバーシップμ×100 パターンのランダムサンプリング×2 種類の境界条件の計 600 ケースである。

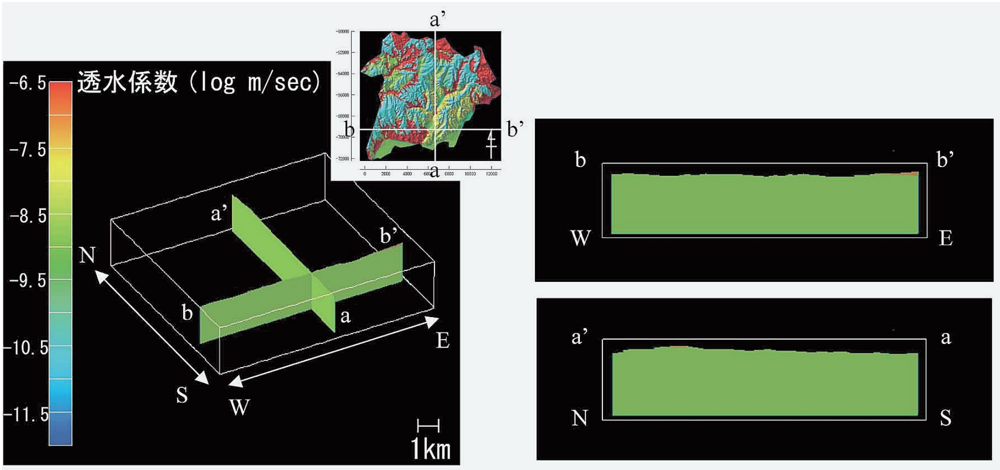


図 3.12　透水係数分布の一例（μ =1.0，主立坑断面）

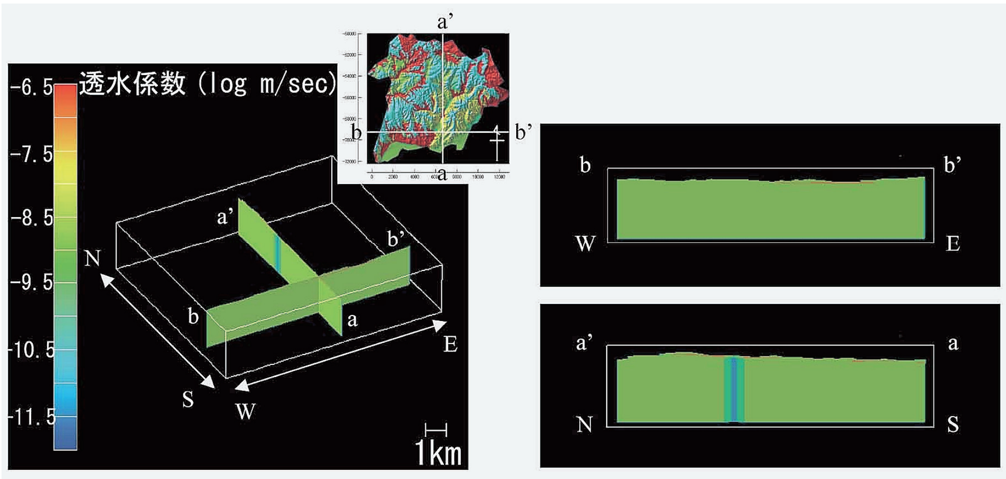


図 3.13　透水係数分布の一例（μ =0.5，主立坑断面）

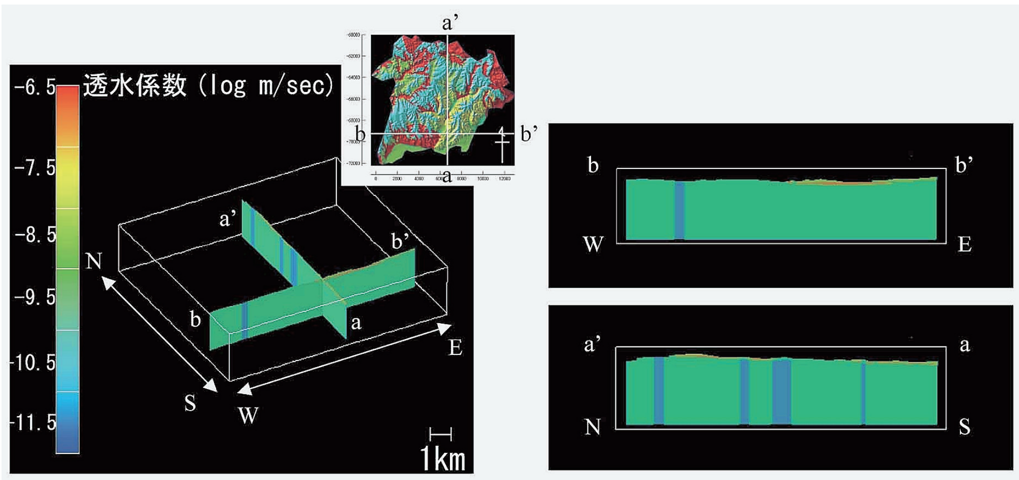


図 3.14　透水係数分布の一例（μ =0.0+，主立坑断面）

(4) 不確実性の定量化

定量化の一例として，評価位置を主立坑位置 EL-1,414m（GL-1,629m），側方境界条件を不透水境界とした場合の，各メンバーシップ μ での地下水移行経路の不確実性を図 3.15～図 3.17 に示す。図 3.15 に示すように確信度が高い μ =1.0 の考慮すべきモデルでは地下水の移行経路の不確実性（ふれ幅）がほとんど生じていない。しかし，図 3.16，図 3.17 に示すように確信度が低い μ =0.5 の考慮し

たほうが良いモデルとμ＝0.0＋の可能性は低いが否定できないモデルでは，地下水移行経路や，涵養点・流出点の不確実性（ばらつき）が大きくなっている。特に，評価位置が流出点近傍であるため，涵養点の不確実性が流出点と比較して大きい。

各メンバーシップμでの地下水移行時間の頻度分布の例を図 3.18～図 3.20 に示す。また，同様に地下水流速の頻度分布の例を図 3.21～図 3.23 に示す。図 3.18～図 3.23 に示すように，確信度であるメンバーシップμの違いにより，不確実性の程度が明らかに異なることが分かる。

これらが示すように，今回実際に得られている知識・情報を基に，Possibility 理論を活用して概念モデル・3 次元モデルの構築を行い，二段階モンテカルロシミュレーションによる飽和定常の地下水流動解析を実施し，評価項目に対して不確実性の定量化を試みることが出来た。

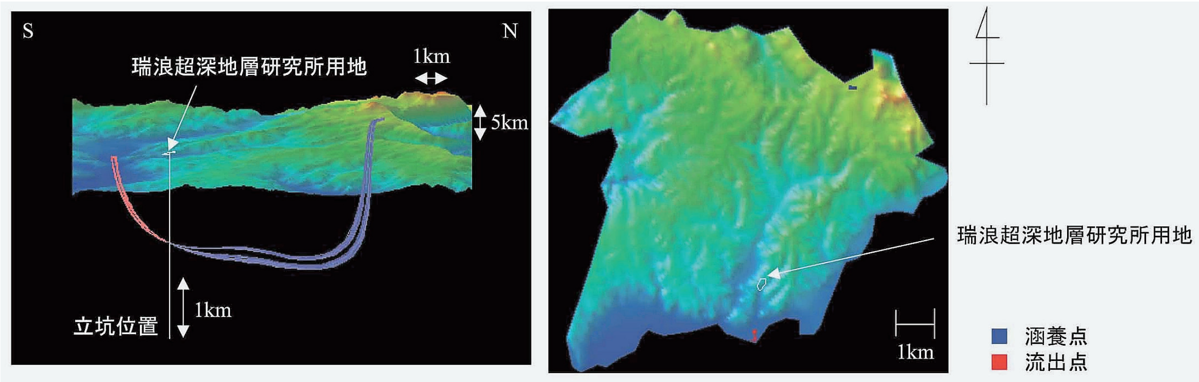


図 3.15　地下水移行経路の不確実性（評価位置 EL-1,414m，μ＝1.0，不透水境界）

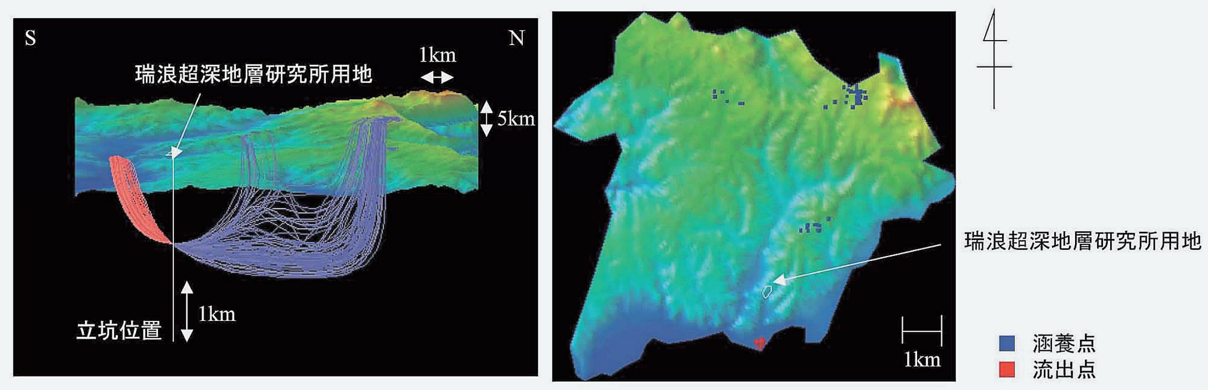


図 3.16　地下水移行経路の不確実性（評価位置 EL-1,414m，μ＝0.5，不透水境界）

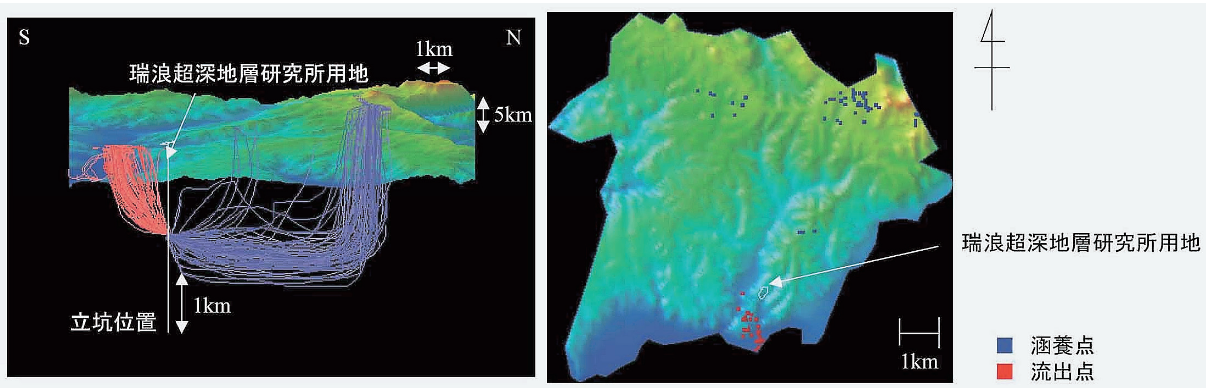


図 3.17　地下水移行経路の不確実性（評価位置 EL-1,414m，μ＝0.0+，不透水境界）

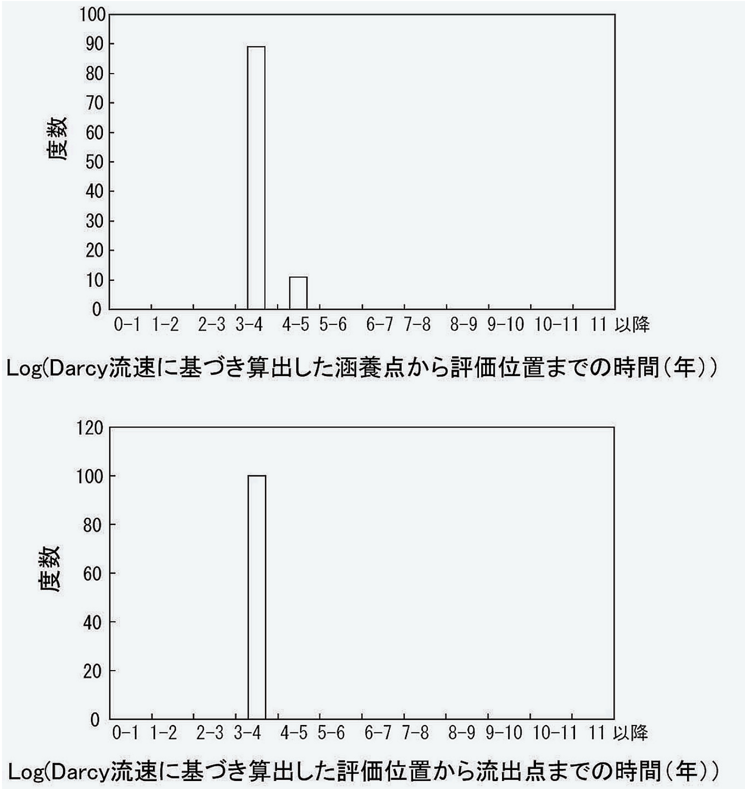


図 3.18　地下水移行時間の不確実性（評価位置 EL-1,414m，μ＝1.0，不透水境界）

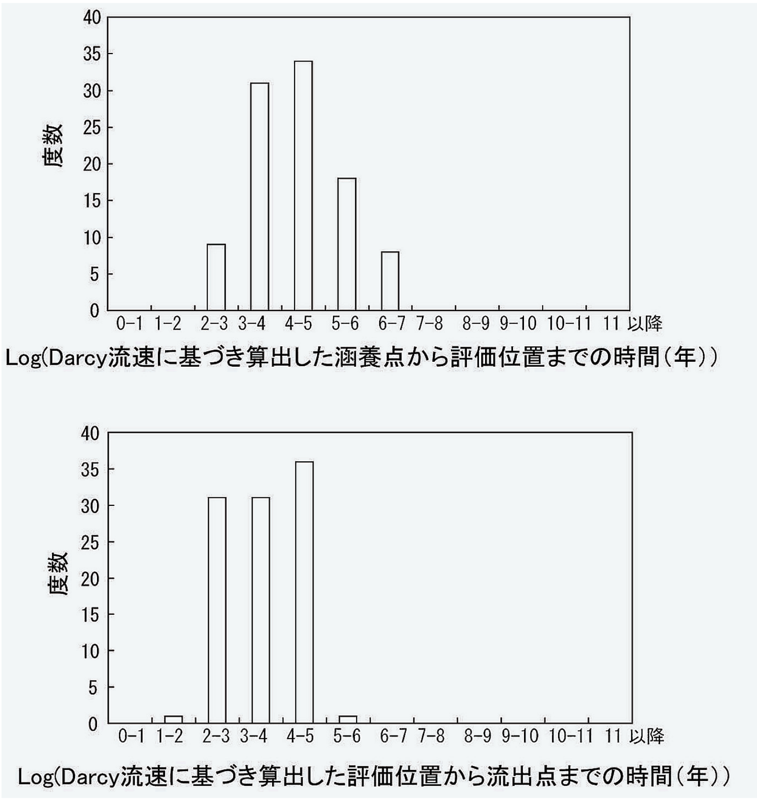


図 3.19　地下水移行時間の不確実性（評価位置 EL-1,414m，μ＝0.5，不透水境界）

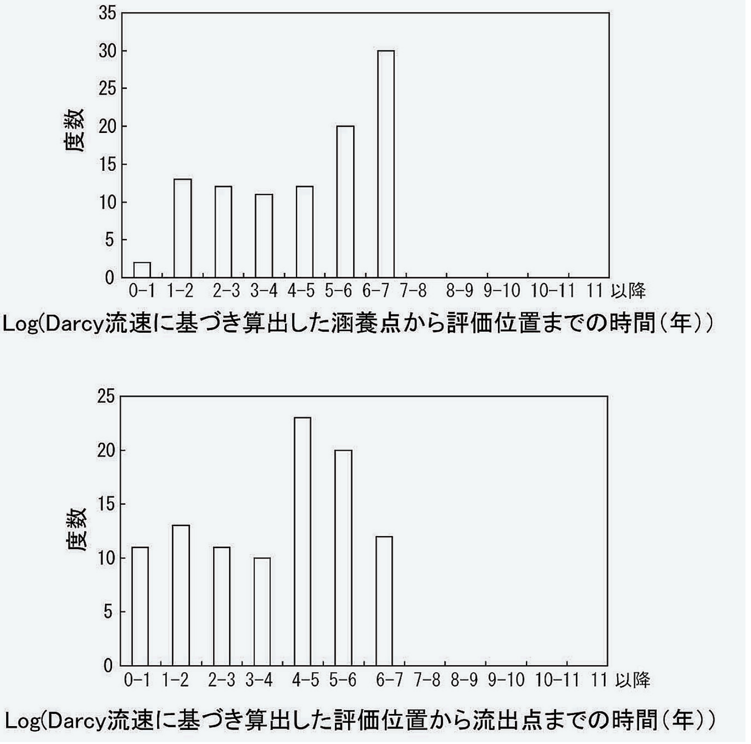


図 3.20　地下水移行時間の不確実性（評価位置 EL-1,414m, μ =0.0+, 不透水境界）

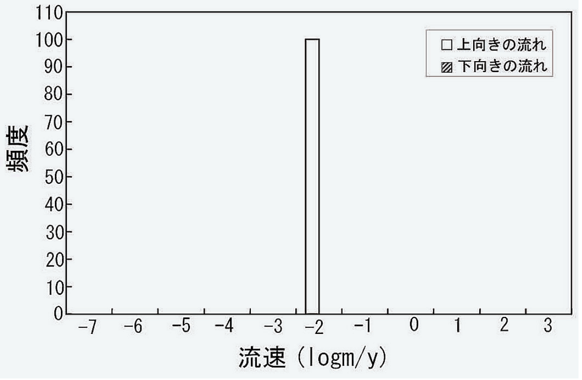


図 3.21　地下水流速の不確実性（評価位置 EL-1,414m, μ =1.0, 不透水境界）

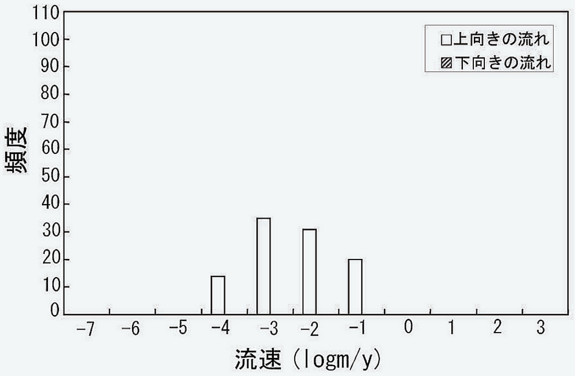


図 3.22　地下水流速の不確実性（評価位置 EL-1,414m, μ =0.5, 不透水境界）

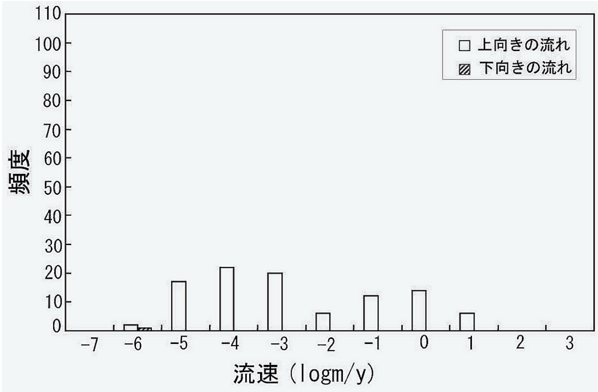


図 3.23　地下水流速の不確実性（評価位置 EL-1,414m，μ＝0.0+，不透水境界）

(5) 地質環境特性の不確実性低減方法の検討

不確実性低減の対象とすべき概念やパラメータの具体的な選定は，モンテカルロシミュレーションの出力結果に対し，概念やパラメータの感度解析（t 分布による検定など）を行い，概念やパラメータの重要度分類を実施したうえで，コストや工費などの観点から実現可能性を踏まえ実施する方法を考えている。ここでは，感度解析の一例として t 分布による検定を試みた。

t 分布による検定方法とは, 2 つの母集団の平均値に差があるかどうかを統計学的に確認する手法である。2 つの母集団の標本数をそれぞれ n_1，n_2，平均値を $\overline{\chi_1}$，$\overline{\chi_2}$，全標本の標準偏差をσとした場合,

$$t = \frac{\overline{x_1} - \overline{x_2}}{\sigma\sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \tag{3.1}$$

で求められる t により, ふたつの母集団の平均値に有意な差があるか否かが判定できる。標本数を 100 とすると，$|t| > 1.66$，$|t| > 1.99$，$|t| > 2.64$ でそれぞれ危険率 10%，5%，1%で 2 つの母集団に有意に差があると判定される。

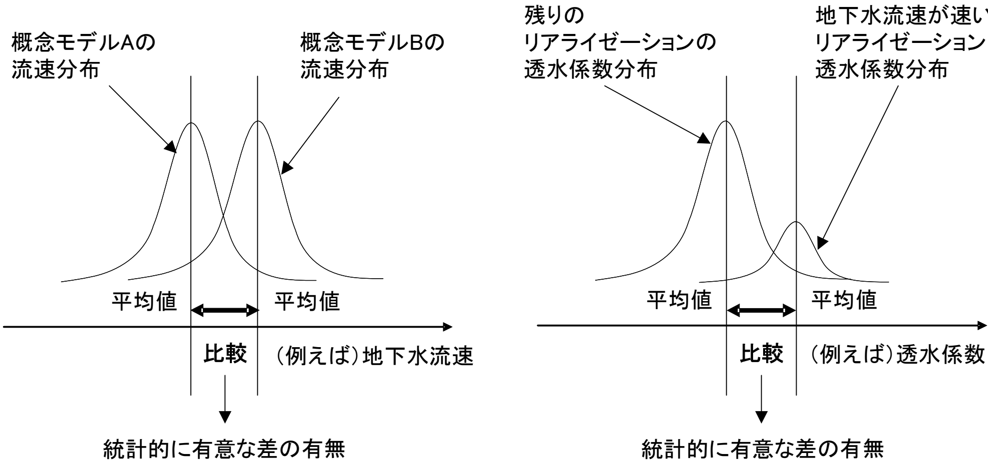


図 3.24　感度解析における 2 つの母集団の比較概念

今回感度解析の対象としたのは，評価位置を主立坑位置 EL-1,414m，メンバーシップ μ＝0.5 とし

た場合の，涵養点の違いである。比較対象の母集団は図 3.25 に示す北東近傍山間部が涵養点のグループ 2 とそれ以外のエリアが涵養点のグループ 1 である。この両母集団に対し最も優位に差があるパラメータは図 3.25 に示す断層⑰の透水係数（t＝4.37）となり，二番目に差があるパラメータは断層⑮の透水係数（t＝3.46），三番目に差があるパラメータは断層⑫の透水係数（t＝3.37）となった。t の値が＋の場合，(1)式に示すように比較対象としたグループ 2 の断層の平均透水係数がその他のグループ 1 より低いことを意味している。遮水性の断層⑰，断層⑮と断層⑫が存在した場合，図 3.25 を見て明らかなように，北東近傍山間部と評価位置を含む領域の流入エリア（北部および西部）は遮水壁に囲まれることになる。つまり，感度解析結果が示すように，このような条件においては北東近傍山間部が評価位置の主要な涵養域となることが分かる。

これらの感度解析の結果から，評価位置を主立坑位置 EL-1,414m とした場合，涵養域に関する不確実性を低減するためには，ボーリング調査などにより，例えば，断層⑰，断層⑮と断層⑫が存在しないことを確認するか，存在した場合でもそれらの透水性が高いことを確認することにより，北東近傍山間部が評価位置の主要な涵養域で無いことを明らかにする必要がある。本手法を用いれば，このような提案が可能となる。

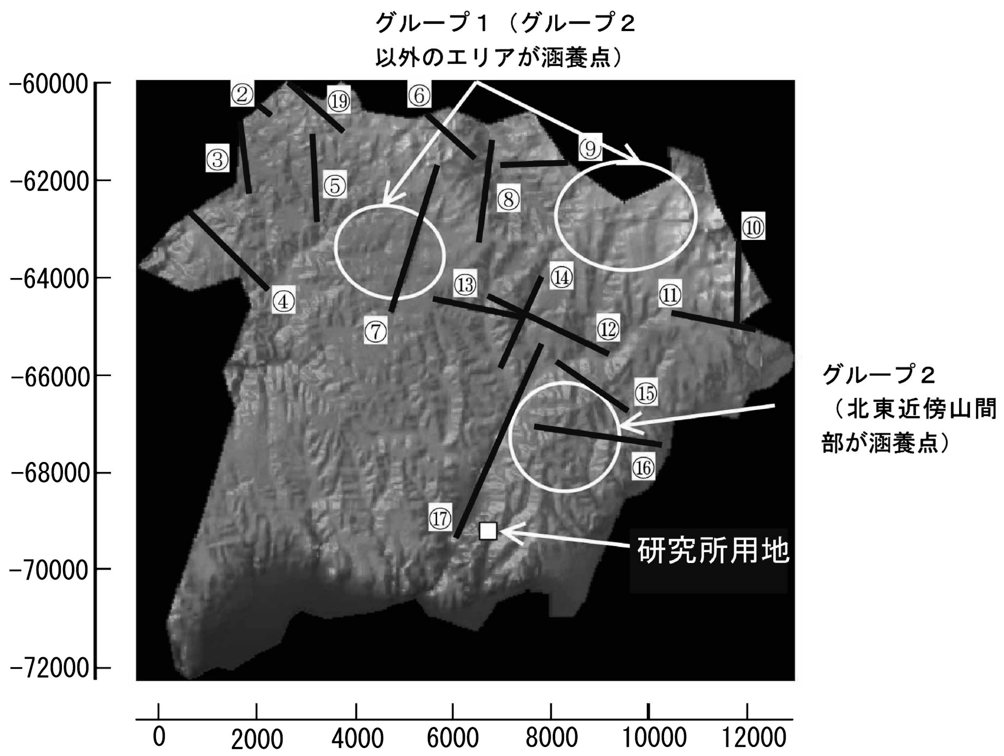


図 3.25　μ＝0.5 における流出域のグループと未知の断層

(6) 地質環境特性の不確実性解析手法の適用性検討

今回開発した「地質環境特性の不確実性解析手法」の適用性を確認するために，本章では，「統合化データフロー」構築の対象となった東濃地域を対象領域として，主に決定論的知識・情報によって表現される断層を対象に，図 3.4 で示した流れに沿って「実際に Possibility 理論におけるモンテカルロシミュレーションを適用したモデル化・解析が可能である」ことを確認すると共に，不確実性の定量化結果を用いて「具体的な不確実性低減方法などの提案が可能である」ことを確認できた。これらの適用性検討結果を取りまとめると下記のようになる。

① Possibility 理論を適用することにより，通常のモデル化・解析の対象である「考慮すべ

き範囲（μ＝1.0)」の概念やパラメータなどに加え，存在する可能性を認識しているが確信をもって地質図などに記載できなかった断層のように「考慮したほうが良い範囲（μ＝0.5)」と，断層とは関係ないリニアメントであると判断できるが，その物証が得られていないような「可能性は低いが完全に否定できない範囲（0.0+)」の概念やパラメータなどを取り込むことにより，地質環境特性モデルに含まれる不確実性を網羅したうえで定量化することができた。

② 「統合化データフロー」を利用することにより，地質環境特性モデルの構築において必要な知識・情報を整理できると共に，通常のモデル化・解析の対象外であった確信度が低い（μ＝0.5，0.0+）概念やパラメータなどを検討するための情報も整理できた。

③ 不確実性を定量化したうえで感度解析を行うことにより，不確実性を低減するためには，何の情報を取得し，何を示せれば良いかを明らかにすることができた。

上記の検討結果より，今回開発した「地質環境特性の不確実性解析手法」は，地質環境特性モデルの不確実性評価およびその低減のための情報提供手法として適用性があることを確認できた。

3.4 これまでのまとめ

地層処分の性能評価においては，不確実性が完全に取り除けないことを理解したうえで，「合理的に達成可能な方策を尽くす」ために，「不均一な地質環境特性についての理解や長期予測に含まれる不確実性を逐次評価し，引き続く段階において，これを低減するために効果的な地質環境調査を行うこと。」が不可欠である。本論では，不均一な地質環境特性を対象とした場合，今回開発した「地質環境特性の不確実性解析手法」を適用すれば，不確実性を定量化できると共に，効果的な不確実性低減方法を提案することができることを示せた。

この手法は，通常のモデル化・解析対象である確信度の高い「考慮すべき範囲」の概念やパラメータなどだけでは無く，確信度が低い「考慮したほうが良い範囲」や，更に「可能性は低いが完全に否定できない範囲」の概念やパラメータまでを考慮できるため，高レベル放射性廃棄物地層処分プロジェクトに参画する様々な研究分野での専門家間の不確実性に関するコミュニケーションにも役立つと共に，地域住民の方々に性能評価に含まれる不確実性を理解してもらうためにも有用な手法であると考えられる。

本手法は，地層処分研究開発および事業の各段階のプロジェクト管理のマネージメントツールとして活用できると共に，様々な意思決定に向けた合意形成のための知識のマネージメントツールとしても活用できると考えている。そのため，今後の技術開発においては，この点も念頭に置いて高度化を継続していく予定である。

4. 情報の整理および分析

本章では，東濃地域周辺の既存文献（地質図，地形図など）および，これまで東濃地域を対象として核燃料サイクル開発機構（現；日本原子力研究開発機構）が実施した調査結果（リモートセンシング判読，空中写真判読，空中・地上物理探査，地表地質踏査，水文調査，ボーリング調査）に基づき，以下の事項を実施した。

① 評価対象の設定と基本情報の整備
② 評価領域・解析領域に含まれる地質構造要素の定義
③ 地質構造要素の特性把握に必要な知識・情報の整理（統合化データフローの活用）

4.1 評価対象の設定と基本情報の整備

本節では，評価対象を明確にした上で，東濃地域の地質と花崗岩の特徴に関し基本情報を整備した。

4.1.1 評価領域および評価対象岩種

本研究における評価領域は瑞浪超深地層研究所領域（以下，研究所領域），つまり図 4.1 に示すように瑞浪超深地層研究所用地（以下，研究所用地）を含む 1km四方の領域とした。また，主な評価対象岩種は，研究所領域の母岩である土岐花崗岩健岩部とした。ただし，深度方向については，立坑の掘削深度を考慮し，GL-1km程度までを対象とした。

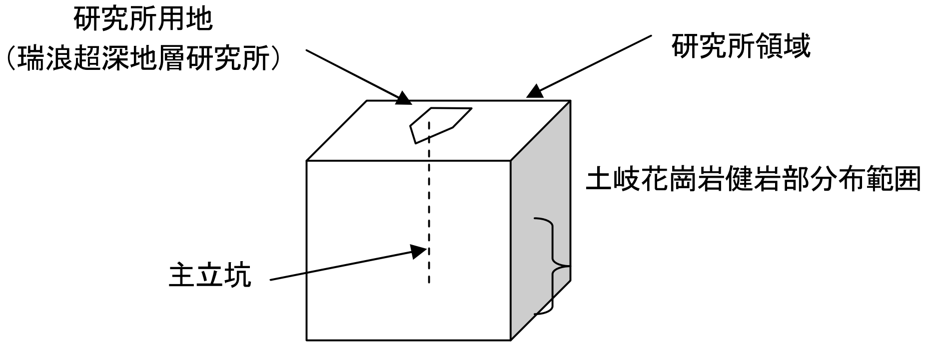


図 4.1　評価領域（研究所領域，1km×1km×1km）

4.1.2 解析領域の設定

本研究における解析領域の設定の基本は，図 4.2 に示すように，基本的に研究所領域を通過する地下水の涵養域と流出域を含む範囲である。

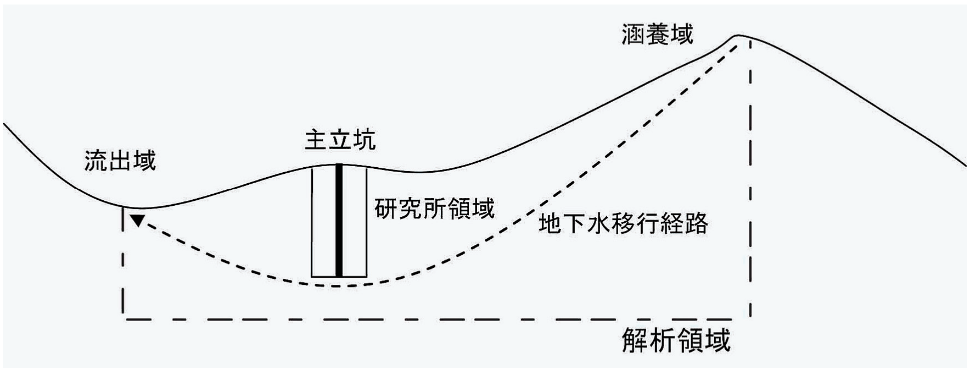


図 4.2　涵養域と流出域を含む範囲のイメージ図（鉛直断面図）

昨年度の研究では図 4.3 に示す解析領域を用いた。本領域は，涵養域と流出域を含む領域を考えるにあたり，考慮すべきものである，

①地形

②地表地質踏査やボーリング調査結果に基づき抽出される地質（例えば，風化花崗岩など）と地質構造（領域を通過する断層など）

の内，①地形（東濃地域の後背地形を考慮した解析[10]）を参考に設定したものである。

平成 15 年度の研究成果[11]（図 4.3 参照）より，研究所領域を追加する地下水の流れはほぼ深部から浅部への上昇流であることが分かっており，この結果は研究所領域を解析領域として考えた場合（図 4.4），側方を不透水境界に設定したうえで，深部から浅部への動水勾配の設定が可能であることを示唆している。

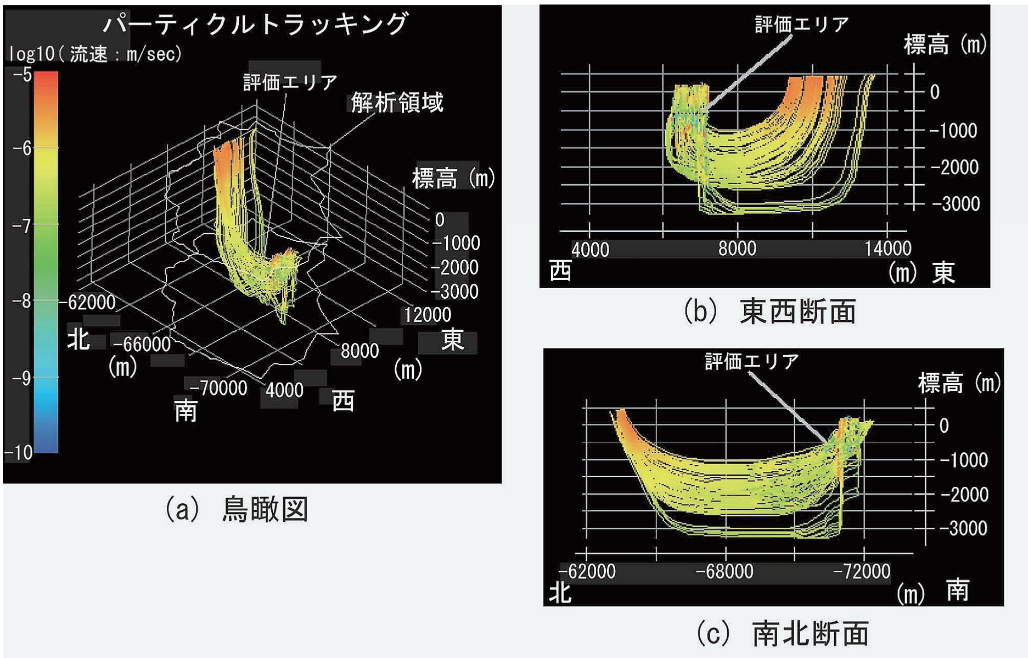


図 4.3　平成 15 年度の研究成果 [11)]

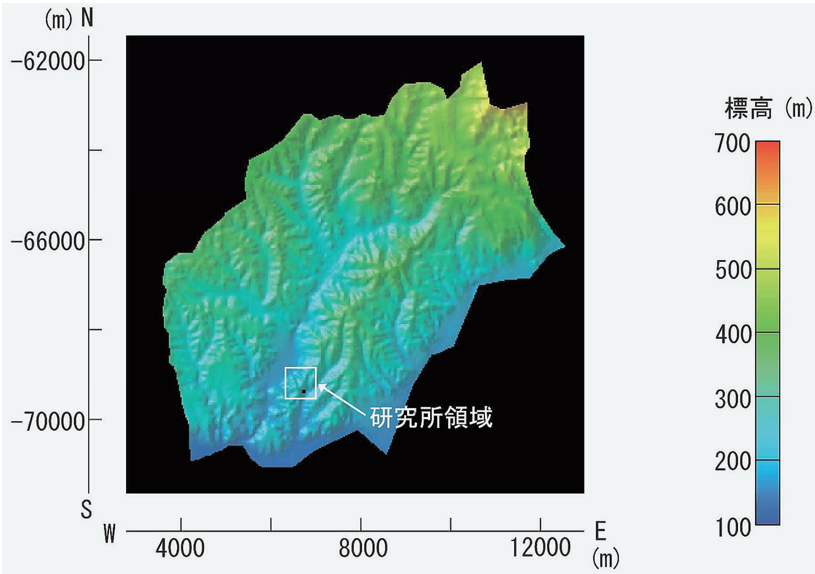


図 4.4　後背地形を考慮した研究所領域での涵養域と流出域を含む範囲（解析領域）

4.1.3 評価対象項目

性能評価においては，クリティカルパスにおける地下水移行時間や地下水の流速などが重要な入力情報となる。そのため，評価対象項目としては，研究所領域における評価対象岩種（土岐花崗岩）での以下の 3 項目が考えられる（図 4.5）。

① 地下水年代：地下水が地表面上の涵養点あるいは解析領域境界から研究所領域地下に到達するまでの時間。ダルシー流速に基づき算出。地下水の酸化・還元状態に関連しうる指標。

② 地下水移行時間： 研究所領域の地下から地表面上の流出点に到達するまでの時間。ダルシー流速に基づき算出。物質が地表に到達するまでの時間を表す指標。

③ 地下水流速：研究所領域の地下での地下水のダルシー流速。施設を通過する地下水量を表す指標。

本研究では特に②地下水移行時間，③地下水流速に着目した。

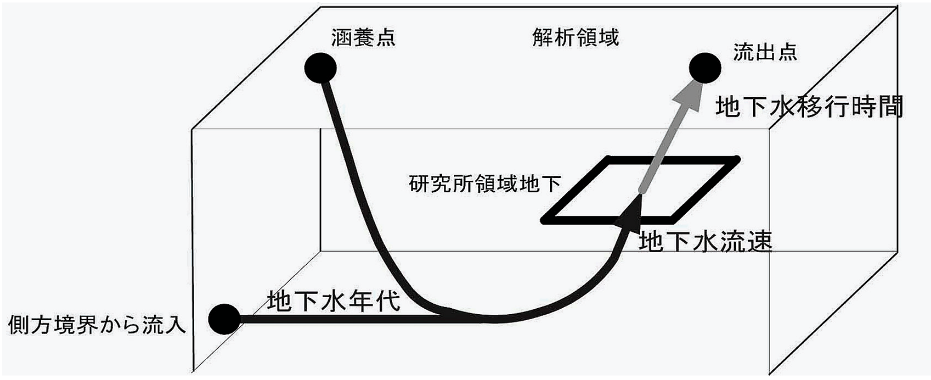


図 4.5　評価対象項目

4.1.4 評価領域に関連する基本情報

(1)　東濃地域の地質 [12)]

東濃地域の地質は，大別して，美濃帯の堆積岩類（中生代三畳紀～ジュラ紀），花崗岩・流紋岩類（中生代白亜紀～古第三紀），新第三紀中新統，鮮新統，それ以降の堆積物に区分される。

美濃帯の堆積岩は，砂岩・泥岩・チャートを主とし，ほぼ東北東－西南西方向の走向をもつ地質構造であり，三畳紀からジュラ紀後期の地層が断層により繰り返し現れるものである。

花崗岩類は，主に南部の美濃三河高原にいわゆる領家帯花崗岩類が分布している。土岐・瑞浪盆地内にも直径が約 10kmの土岐花崗岩の岩体があり，美濃帯の堆積岩の構造に非調和に貫入している。土岐花崗岩は東方の苗木・上松花崗岩の一部と考えられており，土岐市付近の花崗岩中には北北西方向の石英斑岩の岩脈が見られる。

濃飛流紋岩は，研究実施領域の北東部に位置する瑞浪市釜戸町以東に分布しており，均質な岩相を示す溶結凝灰岩からなる。また，瑞浪地域の濃飛流紋岩は土岐花崗岩に貫入されている。

これらの基盤岩類の上に，中新統（瑞浪層群，可児層群）の堆積盆が土岐・瑞浪盆地と可児盆地を中心に広がる。瑞浪層群は下位より，土岐夾炭累層，本郷累層，明世累層，生俵累層に分けられる。全体の傾向として上位ほど細粒化するとともに分布が広がり，海進を示す地層である。瑞浪層群は土岐・瑞浪盆地南部では 300m以上の層厚となる。鮮新統の瀬戸層群は主としてチャート・濃飛流紋岩の礫よりなる砂礫層（土岐砂礫層）であり，下部には粘土層（土岐口陶土層）が分布する。

本地域は，鮮新世末から更新世にかけて活動したといわれる断層運動・傾動運動によってブロック状に区切られている。地形的に重要な構造線は，中津川から多治見にかけての北東－南西方向の屏風山断層・笠原断層，その南側をほぼ平行して走る恵那山断層，猿投山の東縁を限る猿投山断層であり，いずれの断層崖も急崖をなしている。屏風山断層・笠原断層以北では，それにほぼ直交する赤河断層，華立断層がある。また，瑞浪盆地内には，東西に走る月吉断層および北東－南西ないし西南西に走る山田断層帯が存在する。

以下，概念モデルの構築に先立ち，花崗岩中の断層・破砕帯，亀裂および花崗岩の透水性に関して個別に整理した。

(2)　花崗岩中の断層・破砕帯

本研究の解析領域中の花崗岩に存在する断層は，既存の地質図 [13)] に書かれたものとしては東西方向の月吉断層のほか NNW 方向の断層があるが，これ以外には地質図レベルで大きな断層は書かれていない。動力炉・核燃料開発事業団（現；日本原子力研究開発機構）東濃地科学センター[14)] で書かれている解析領域付近の断層には以下のものがある。

① 糸魚川[13]に書かれた断層：

月吉断層，山田断層帯，屏風山断層，河合-肥田に分布するNNW方向の断層（推定）

② 動力炉・核燃料開発事業団東濃地科学センター[14]に書かれた断層：

（上記（糸魚川[13]）に示された断層のほかに,）和合付近を通るNNW方向の断層，月吉南方と柄石のENE方向の短い断層，次月のNNW方向の断層および謡坂付近のENE方向の断層

このほか，リニアメント調査により断層地形を示す判読要素が認められた「地質断層と推定されるリニアメント」がある。

核燃料サイクル開発機構による研究所用地周辺の最新のモデルでは，2km×2km×深さ2kmの範囲内でも，ボーリング孔・地表露頭で認められた断層のほかに，リニアメントや弾性波探査で推定された断層を含めて，数十本の推定主要断層（Inferred Major Fault (IMF)）がモデル化されている。また，本研究所用地近傍に位置するDH-2孔では，8本のIMFが識別されている。

NE～ENE は東濃地域の地質構造の全体的な方向であり，美濃帯の中古生層の一般走向や瑞浪盆地南東縁の断層（屏風山断層・恵那山断層など）もほぼこの方向である。屏風山断層や阿寺断層などの活断層がNE～ENE方向とWNW方向であることは，現在のテクトニクスを反映した構造方向であることを示すが，それらと異なる方向（NEE方向やNWW方向など）の断層も多数あることから，過去に異なる方向の構造運動を受けた結果が重なり合って現在の断層が現れているものと考えられる。

表4.1 当地区の断層･亀裂についての文献・調査結果など

区 分	名 称	主な記載内容
地質図	･瑞浪地域地質図[13] ･東濃地域地質鉱床図[15] ･1/20万地質図幅「飯田」(地質調査所)	地質･断層分布1:25,000 地質･断層分布1:20,000 地質･断層分布1:200,000
調査結果など	･花崗岩亀裂調査結果[12),16),17),18),19] ･リニアメント判読調査 ･DH･AN･MIU･MSB孔の亀裂記載(コア･BTV) ･超深地層研究所周辺の断層分布調査結果[20]	花崗岩露頭の詳細亀裂記録 リニアメント判読結果 個別の亀裂分布･記載 地表･地下壕での断層分布
モデル	･地質構造STEP2モデル[20] （セッションA 繰り返しアプローチに基づく地質構造および地下水流動のモデル化） ･DH2孔IMF解釈図	2×2kmの地質構造モデル DH2孔でのIMF識別結果

(3) 花崗岩中の割れ目

花崗岩中の亀裂（小規模な亀裂）のデータとしては，ボーリング孔での記録（コア柱状図，BTV観察結果）と，地表露頭での亀裂調査結果がある。

① ボーリング孔での記録

BTV観察結果に基づいて亀裂1本1本を記載した情報が，DH-2孔以降のすべてのボーリング孔で記録されている。

② 露頭調査結果

25ヶ所の花崗岩露頭（数m四方以下の広さ）において詳細な亀裂調査が行われている。

東濃地域全体の露頭での調査結果（動力炉・核燃料開発事業団による花崗岩露頭での詳細亀裂調査[15]）によると，同一地点でも亀裂は数方向に発達することがわかっており，その卓越方向は露頭を含む地区で認められるリニアメントの方向と調和的であることが多く，様々なスケールにおいて共通し

た構造的な成因によって亀裂が生じていることが示唆される。

せん断変位が無いか，あってもごくわずかな開口性の亀裂（節理：joint）は，一般に一定角度で交わる 2 方向の節理群が認められることが多い。玄武岩の柱状節理のように岩体の冷却時の収縮に伴い冷却面に垂直な特定の方向に発達する亀裂もある[21]。しかし，土岐花崗岩体中にはさまざまな方向の亀裂が観察されていることから，小規模な亀裂もその多くは構造的（テクトニック）な要因により形成されたものと予想される。

(4) 花崗岩の透水性

東濃地域の花崗岩での透水試験結果は，核燃料サイクル開発機構（および動力炉・核燃料開発事業団）によって得られたもののみである。主として AN・MIU・DH シリーズの 500～1000m級の花崗岩を対象としたボーリング孔における約 260 点での水理試験結果がある。このほか風化花崗岩についてはMSB 孔（研究所用地の 100m級ボーリング調査）や TH 孔（東濃鉱山）での測定値がある。また，当地域以外の日本全国の透水係数に関する既存の文献情報をとりまとめたものとして，柳澤ほか[22]による全国の透水係数の整理結果がある。

原位置試験結果の資料には，透水試験は花崗岩の亀裂密集部を対象としたものと，健岩部を対象としたもののいずれもある（健岩部とはいえ，全く亀裂のない部分での試験結果はなく，破砕帯や亀裂密集部を含まないという意味での健岩部である）。健岩部で 10^{-12}～10^{-4}m/s，断層付近で 10^{-11}～10^{-3}m/s の透水係数が得られている（詳細は 6 章に示す）。花崗岩では透水性の異方性は通常は考えないが，破砕帯・亀裂密集部では変形構造からみて透水性に異方性があると考えられ，原位置試験で得られている値は水や圧力の伝播しやすい方向の透水性，すなわち透水性の大きい方向の透水係数を示しているといえる。

花崗岩中に存在する上部割れ目帯は，一部で開口性の亀裂を伴う健岩部に比べて透水係数が数桁高い高透水性ゾーンとして扱われており（三枝他など[9]），地下水流動への影響を考慮する場合にモデルに考慮することが重要とされている。

4.2 評価領域・解析領域に含まれる地質構造要素の定義

本節では，これまでに得られた情報を基に，評価領域・解析領域に含まれる地質構造要素を明らかにすると共に，地質学・水理地質学的にその特性を整理した。

4.2.1 評価領域・解析領域に含まれる地質構造要素

評価領域・解析領域に含まれる地質構造要素は，対象となる指標（地下水流量，地下水移行時間・年代）を評価するために必要な影響因子に関連する地質・地質構造・水理地質構造的特徴を整理することにより抽出されるものである。

ここでは評価指標の中で重要な地下水流量を対象に，「評価領域におけるダルシー流速の算出に係わる影響因子」をトップ項目として，関連図を整理した（図 4.6 参照）。ダルシー流速は透水係数と動水勾配の積で表現されるため，関連図も同様な形状となっている。図 4.6 から分かるように，評価領域の透水特性は，結晶質岩の場合を考慮し割れ目が影響因子として取り上げられている。評価領域における動水勾配は，地形などの境界条件的な要素と解析領域の透水特性が取り上げられている。

次に図 4.6 に示す影響因子に関係する地質・地質構造・水理地質構造的特徴を大区分・小区分，そしてサイトスペシフィック（地質構造要素）の各段階において，各影響因子と関連するもの表 4.2 のように整理した。大区分は地形（地下水面）・地質・地質構造とし，小区分は地形（地下水面）として川・湖，山・丘・尾根と海岸線，地質として対象岩と対象岩以外の区分に加え，風化部，基底礫，粘

土層と低間隙率部，地質構造として貫入，不整合（被覆層），褶曲，割れ目帯，割れ目と断層とした。表 4.2 に示した地質構造要素の特徴を特に地質学的な観点で表 4.3 のように整理した。そして地質構造要素と影響因子との関係，特に他の要素との顕著な違いを表 4.4 のように整理した。

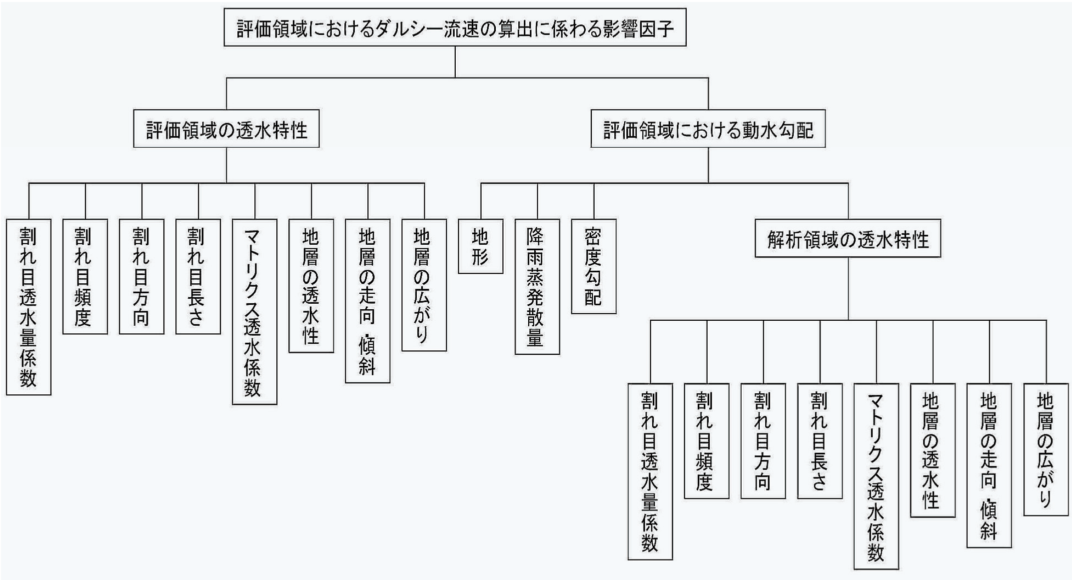


図 4.6　評価領域におけるダルシー流速の算出に係わる影響因子の関連図

表 4.2　各影響因子を踏まえて抽出した評価領域・モデル化領域に含まれる地質構造要素

地質構造要素				評価領域におけるダルシー流速の算出に係わる影響因子																		
				評価領域の透水特性								評価領域における動水勾配										
															解析領域の透水特性								
大区分	小区分	サイトスペシフィック	No.	亀裂透水量係数	亀裂頻度	亀裂方向	亀裂長さ	マトリクス透水係数	地層の透水性	地層の走向・傾斜	地層の広がり	地形	降雨蒸発散量	密度勾配	亀裂透水量係数	亀裂頻度	亀裂方向	亀裂長さ	マトリクス透水係数	地層の透水性	地層の走向・傾斜	地層の広がり
地形（地下水面）	川・湖	土岐川	1									1										
		日吉川	2									1										
	山・丘・尾根	土岐川と木曽川の流域境界の尾根	3									1										
	海岸線	－	4																			
地質	対象岩	土岐花崗岩健岩部	5																			
	対象岩以外	土岐花崗岩健岩部以外	6																			
	風化部	風化花崗岩	7																1			
	基底礫	土岐夾炭累層基底部	8																	1	2	3
		明世･本郷累層基底部	9																	1	2	3
		生俵累層基底部	10																	1	2	3
	粘土層	本郷累層中の凝灰質部	11																	1	2	3
	低間隙率部	土岐花崗岩健岩部のマトリックス部	12																1			
地質構造	貫入	石英斑岩岩脈	13												1	2	3	4				
	不整合（被覆層）	土岐夾炭累層	14																	1	2	3
		明世・本郷累層	15																	1	2	3
		生俵累層	16																	1	2	3
		瀬戸層群	17																	1	2	3
	褶曲	－	18																			
	割れ目帯	土岐花崗岩上部割れ目帯	19												1	2	3	4				
	割れ目	花崗岩健岩部透水性割れ目（地下水の流出入箇所）	20	1	2	3	4								1	2	3	4				
	断層	月吉断層	21												1	2	3	4				
		推定断層（IMF）	22	1	2	3	4								1	2	3	4				

注）
・ダルシー流速、透水係数、動水勾配はある任意の大きさでの平均値が対象。
・影響因子に関連する地質環境の要素を緑色で表示。関連の程度が大きいものはナンバリングを行い、その理由を別途記載。

表 4.3　地質構造要素の特徴（特に地質学的観点）

地質構造要素 大区分	小区分	サイトスペシフィック	No.	特徴（特に地質学的観点）	参考資料
地形（地下水面）	川・湖	土岐川	1	MIU 領域の南側に位置し、北東から南西方向に流れている。標高が低く、地形的分水界における流出域。解析領域の南側境界。	
		日吉川	2	MIU 領域の西側に位置し、解析領域のほぼ中央を北北東から南南西へ流れている。土岐川に合流。谷部を形成しており、周辺部の流出域。	
	山・丘・尾根	土岐川と木曽川の流域境界の尾根	3	MIU 領域の北側に位置し、標高が高く、地形的分水界における涵養域。解析領域の北側境界。	
	海岸線	-	4	対象物無し。	
地質	対象岩	土岐花崗岩健岩部	5	土岐花崗岩健岩部には低間隙率部と割れ目が含まれる。	
	対象岩以外	土岐花崗岩健岩部以外	6	土岐花崗岩健岩部以外には、不整合（被覆層）や風化部、上部割れ目帯、断層などが含まれる。	
	風化部	風化花崗岩	7	花崗岩の表層部が露出した時期に表面からの物理的･化学的風化により形成される。表層部ほど強風化。領域北部の尾根部では最大厚さ 80m だが、MIU 領域付近では薄く MIZ-1 孔で厚さ約 1m。侵食に弱く削剥を受けるので、厚さは場所により変化が大きいと考えられる（チャネルの斜面部では薄い）。弱風化部は母岩組織が壊れて透水性は高くなるが、粘土化した強風化部は母岩よりも透水性が低くなると考えられる。透水係数の実測値は K=1E-10～-5m/s オーダーとばらつく。	MIZ-1 孔、DH-2 孔、MSB-1～4 孔柱状図、透水試験結果
	基底礫	土岐夾炭累層基底部	8	瑞浪層群堆積の初期に形成された、礫（花崗岩巨礫も含む）と泥質やマサ質の基質よりなる部分。最下部が最も粗粒とは限らない。チャネル構造を形成する起伏に富んだ花崗岩表面（不整合面）を埋積した堆積物であるため、礫岩を含む部分の厚さは場所により 0～20m 程度と変化。礫岩層の側方への連続性も乏しいと考えられる。透水係数（1 データのみ）は、土岐夾炭累層（主部）と同じで 1E-7m/s オーダー。これは基質が泥質であるためと考えられる。	地表踏査結果、MIZ-1 孔、DH-2 孔、MSB-1～4 孔柱状図、透水試験結果
		明世･本郷累層基底部	9	土岐夾炭累層堆積後の一時的な非堆積期の後、明世累層（当時の海域）と本郷累層（当時の湖の部分）の堆積初期に形成された礫岩層で、主に石英斑岩（濃飛流紋岩）の礫と砂質の基質よりなる。DH-2 孔、MIZ-1 孔、MSB-1～4 孔で観察された厚さは数 m～20m で、MIZ-1 孔では礫岩層中での固結度の不均質も確認されている。透水係数（1 データのみ）は 1E-7m/s オーダーで、明世・本郷累層の主部より大きい。	糸魚川 [13]、MIZ-1 孔速報、DH-2 孔、MSB-1～4 孔柱状図
		生俵累層基底部	10	生俵累層堆積初期（明世累層との堆積間隙後）に形成された礫層。厚さは DH-11 孔で約 7m で、他の累層の基底礫岩に比べ薄い。透水試験結果はないが、マトリクスが細～粗粒砂であることから、明世･本郷累層基底部と同様の透水性が予想される。	糸魚川 [13]、DH-11 孔柱状図
	粘土層	本郷累層中の凝灰質部	11	明世･本郷累層の中～下部にある軽石質凝灰岩に富む部分で、東濃鉱山付近では続成変質による粘土化が認められ、それにより低透水性となったと推定されている。MIU サイトの MSB-2、4 孔でも、これにほぼ相当する明世累層下部を境に、明世累層と土岐夾炭累層の間に Cl の含有量のギャップが認められ、水理的境界の存在が示唆される。	彌栄他など [23]
	低間隙率部	土岐花崗岩健岩部のマトリックス部	12	土岐花崗岩健岩部から（透水性）割れ目を除いた部分。原位置試験では試験対象区間に割れ目が含まれるため、完全なマトリックス部の結果が得られない。そのため真のマトリックス部の透水係数を示すためにはコアサンプルを用いた室内透水試験結果が適していると判断される。それにより求めた値は 1E-12m/s オーダーである。	中野他 [24]
地質構造	貫入	石英斑岩岩脈	13	花崗岩中に貫入した岩脈。NNW 走向でほぼ鉛直。幅は 20m 以下。岩質は緻密で非開口の節理が見られる。花崗岩との境界付近の性状についての詳細は不明。	糸魚川 [13]、地表踏査結果
	不整合（被覆層）	土岐夾炭累層	14	瑞浪層群の最も下の累層。主に泥質砂岩・砂岩・礫岩からなり、亜炭層を含む。泥質の部分が多く、透水試験結果においても透水性は高くない（K=1E-7m/s オーダー）。	MIZ-1 孔、地表踏査結果、透水試験結果
		明世・本郷累層	15	凝灰質砂岩･泥質砂岩を主とし軽石を含む。MIU サイト付近では地層分布･層理面は概ね水平。透水係数は土岐夾炭累層より小さくほぼ 1E-8m/s。	MIZ-1 孔、地表踏査結果、透水試験結果
		生俵累層	16	ほぼ均質･無層理の凝灰質泥岩よりなる地層で、MIU サイト付近では標高約 240m 以上に分布。地層分布はほぼ水平。透水性は低く、K=1E-9m/s オーダー（1 データのみ）。	MIZ-1 孔、地表踏査結果、透水試験結果
		瀬戸層群	17	未固結の砂礫からなる地層で、緩く南へ傾く不整合面（それより下の地質構造とほとんど関係なく）により下位の花崗岩や瑞浪層群を覆う。MIU 領域付近では標高 260～270m より高い部分に分布。礫種はチャートや濃飛流紋岩で、基質は砂～粘土質。透水係数の測定値は少ないが、1E-6m/s オーダー。	地表踏査結果
	褶曲	-	18	対象物無し。	
	割れ目帯	土岐花崗岩上部割れ目帯	19	低角度の割れ目が発達した領域。割れ目頻度は 3～5 本/m であり、健岩部の割れ目頻度 1～3 本/m より多い。透水性は健岩部と比較し 1 オーダー程度高い（MIU-1～3 孔）。土岐花崗岩が貫入後、削剥に伴う応力開放が原因で形成されたと地質学的には考えられている。	核燃料サイクル開発機構 [25]
	割れ目	花崗岩健岩部透水性割れ目（地下水の流出入箇所）	20	岩芯観察およびボアホールテレビューアー観察の結果に基づき流体検層（電気伝導度検層）により抽出。19 箇所のうち 16 箇所は上部割れ目帯中の割れ目帯に集中。地下水の流出入箇所に観察される割れ目の多くは東西走向もしくは東北東走向を示している（DH-2 孔）。	核燃料サイクル開発機構 [10]
	断層	月吉断層	21	月吉断層は走向 N80°W、傾斜 70°の逆断層で、東濃鉱山坑道内での垂直変位量は約 30m と推定されている。東濃鉱山の坑道（堆積岩）において観察された月吉断層は、幅数十 cm の断層粘土からなり、不透水層と推測される特徴を有する。花崗岩中では約 10～20m 幅のカタクレーサイト帯からなり、その周囲には割れ目帯（幅約 100m）が分布する。月吉断層に伴う割れ目帯では健岩部と比較し高い透水性を示す。月吉断層の下盤側は上盤側に比べ約 30m 水位が高いことから、花崗岩中においても同断層は遮水壁として機能している可能性が高い（MIU-2、3 孔）。	核燃料サイクル開発機構 東濃地科学センター [26]、核燃料サイクル開発機構 [25]
		推定断層（IMF）	22	IMF（Inferred major faults）とは、水みちとなりうる比較的規模の大きい断層（長さ 200m 以上）とし、直接確認された断層と直接確認されていない断層（反射法弾性波探査による推定など）も含める。	核燃料サイクル開発機構 [11]

表 4.4　地質構造要素と影響因子との関係（他の要素との顕著な違い）

No.		地質構造要素と影響因子との関係（他の要素との顕著な違い）
1	1	標高が低く，地形的分水界における流出域。
2	1	谷部を形成しており，周辺部の流出域。
3	1	標高が高く，地形的分水界における涵養域。
7	1	風化作用による砕片化に伴う間隙率の増加。透水係数は K=1E-10～-5m/s オーダーとばらつくが，これは風化の程度の違いによるものと考えられる。
8	1	透水係数（1 データのみ）は土岐夾炭累層主部と同程度の 1E-7m/s オーダーだが，これは基質が泥質であるためと考えられる。基質が砂質の部分ではより高透水性の部分もあると考えられる。
	2	地層は大局的には水平（起伏に富む花崗岩表面を埋積した地層であるため，厚さは変化する）。
	3	花崗岩表面の起伏（チャネル構造）のため側方への連続性が乏しい部分もある。
9	1	透水係数（1 データのみ）は 1E-7m/s オーダー。基底部は礫岩であるため，明世･本郷累層の本体よりも高透水。
	2	地層は概ね水平。
	3	地層の分布から見て，ある程度の広がりをもって水平方向に連続。
10	1	基底部の礫岩であり，生俵累層の本体よりも高透水（明世･本郷累層基底部と同程度の透水性とすれば透水係数は 1E-7m/s オーダーか）。
	2	地層は概ね水平。
	3	地層の分布から見て，ある程度の広がりをもって水平方向に連続。
11	1	粘土質となっていることや上下層の水質の違いから，この部分が明世･本郷累層の他の部分や土岐夾炭累層より低透水と考えられる。
	2	地層（明世･本郷累層）が概ね水平であるため，この部分もほぼ水平。
	3	地層（明世･本郷累層）の側方の連続性がよいため，この部分もある程度の広がりをもって水平方向に連続する。
12	1	原位置試験では試験対象区間に割れ目が含まれるため，完全なマトリックス部の結果が得られない。そのため真のマトリックス部の透水係数を示すためにはコアサンプルを用いた室内透水試験結果が適していると判断される。それにより求めた値は 1E-12m/s オーダーである。
13	1	花崗岩との境界部の性状不明（岩脈内部の割れ目は密着し流動経路となりにくい？）。
	2	亀裂頻度が花崗岩中より高い部分もある。
	3	亀裂方向に関する詳細なデータなし。一般には岩脈方向に直交する方向の亀裂が多い。
	4	岩脈の幅が 20m以下であるため岩脈に直交する方向の亀裂のサイズはそれ以下といえる。岩脈に沿う方向の亀裂は不明。
14～17	1	下位層を不整合に覆うため，下位層の透水性の連続性に影響を与える。いずれの層でも各累層の基底部（礫質）よりは透水性は低い。
	2	下位層を不整合に覆うため，下位層の連続性を遮断。下位層ほど起伏に富む面により下位層を不整合に覆うが，大局的にはいずれの層の分布もほぼ水平。
	3	ある程度の広がりをもって，水平方向に連続して存在。
19	1	上部割れ目帯の透水係数は 3.0E-08m/s 程度である（MIU-1～3 孔）。
	2	割れ目頻度は 3～5 本/mである（MIU-1～3 孔）。
	3	上部割れ目帯は低角度の割れ目が発達した領域である。
	4	上部割れ目帯はチャネルの分布領域にのみ形成されていると考えられている。
20	1	19 箇所の総和の透水量係数は 5E-4m^2/s 程度である（DH-2 孔）。
	2	-
	3	走向は東西もしくは東北東である。
	4	-
21	1	月吉断層に伴う割れ目帯は健岩部の透水係数より 1 オーダー程度高い。月吉断層本体は遮水壁としての機能を有している（MIU-2，3 孔）。
	2	月吉断層に伴う割れ目帯の亀裂頻度は 3～6 本/mである（MIU-2，3 孔）。
	3	月吉断層の延長は約 6km程度である。
	4	月吉断層は走向 N80° W，傾斜 70° の逆断層である。
22	1	例えば DH-2 孔では，花崗岩中で 8 本の IMF が確認されており，そのうち 7 本において水理試験が行われている。その透水量係数の最小値は 9.12E-07m^2/s であり，最大値は 3.77E-03m^2/s である。
	2	DH-2 孔では約 330mの範囲に 8 本の IMF が確認さえている。
	3	IMF の主な走向は北北西-南南東と東西方向である。
	4	IMF の長さは 200m以上である。

4.3 地質構造要素の特性把握に必要な知識・情報の整理（統合化データフローの活用）

調査研究の全体のストラテジーとゴールを明確にしつつ全体の体系化を図るために，先行事例を参考にして，調査開始からデータ解釈，地質環境のモデル化を通して評価に至るまでのデータの流れと成果の反映項目（評価項目）を統合的に整理した「統合化データフロー[20]」を作成し，研究を進めている（図 4.7 参照）。また，地質環境特性モデルの信頼性評価の一環で，Evidential Support Logic[1] を適用することにより，モデルに至るまでの判断過程を示したうえで，モデル構築に必要な知識・情報が確認されている（図 4.8 参照[7]）。

そのため，地質構造要素の特性把握に必要な知識・情報は図 4.7 と図 4.8 により明らかとなっている。

そこで，ここでは，統合化データフローを用い，知識・情報に含まれる不確実性の内容を整理した。不確実性の内容は，3 章に示したように，不均一な地質環境特性の表現に必要な知識・情報を 2 種類（決定論的・確率論的）に区分した上で整理している。決定論的知識・情報には下記①と②に示す不確実性が，確率論的知識・情報には③と④に示す不確実性が含まれていると考えている。

① サイトの情報が不足しているため，例えば，地層累重の法則に基づき対象領域全てにおいて整合な地層を形成しているかどうかが判断できない（地質学的な解釈に複数のオプションが生じえるため，概念モデル自体に不確実性が含まれる）。

② 例えば，物理探査結果に基づく解釈のため，コア観察結果などと比較し層理面の深度に不確実性が含まれていることを否定できない（地質構造要素に基づくゾーン区分において境界面の位置などに不確実性が含まれる）。

③ 地層の形成プロセスのランダムさにより場所によってばらつきが生じていると考えられるため，例えば，ある特定の場所の透水係数を一意に決定できない（同じ確率密度分布を用いても，統計的リアライゼーションにおける不均一分布は個々に異なる）。

④ サイトの情報が不足しているため，例えば，透水係数のランダムさを表現する確率密度分布の平均値・標準偏差などに不確実性が含まれていることを否定できない（確率密度分布に複数のオプションが生じえる）。

統合化データフローは，ある考えに基づき，情報が調査からデータ，解釈／データセット，概念化／モデル化／シミュレーションを経由して法律上の要件に対する入力情報に到達している。この情報の流れ自体が決定論的知識・情報であり，この統合化データフローの考えに即して行うか否かが「①概念モデル自体に含まれる不確実性」に当てはまると考えられる。

解釈／データセットの上部から記載されている被覆層，母岩および不連続構造は，ある概念に基づき既に分類（地質構造要素の定義）がされており，これらの情報は，概念化／モデル化／シミュレーションの地質構造モデル（中領域）に伝達している。これらの解釈／データセットも決定論的知識・情報であり，「②地質構造要素の境界面位置に含まれる不確実性」であると考えられる。

解釈／データセットに記載されている残りの情報（9 つのボックス）は，パラメータに関連するものであり，確率論的知識・情報と考えられる。そのため，これらには，「③リアライゼーションにおける不均一性分布の違いによる不確実性」と「④ランダムさを表現する確率密度分布の平均値・標準偏差などに含まれる不確実性」が共存していると考えられる。

今後，3 章で示した「地質環境の不確実性解析手法」を適用していくためには，上記した知識・情報と不確実性の内容の関係を十分に踏まえて実施していくべきである。

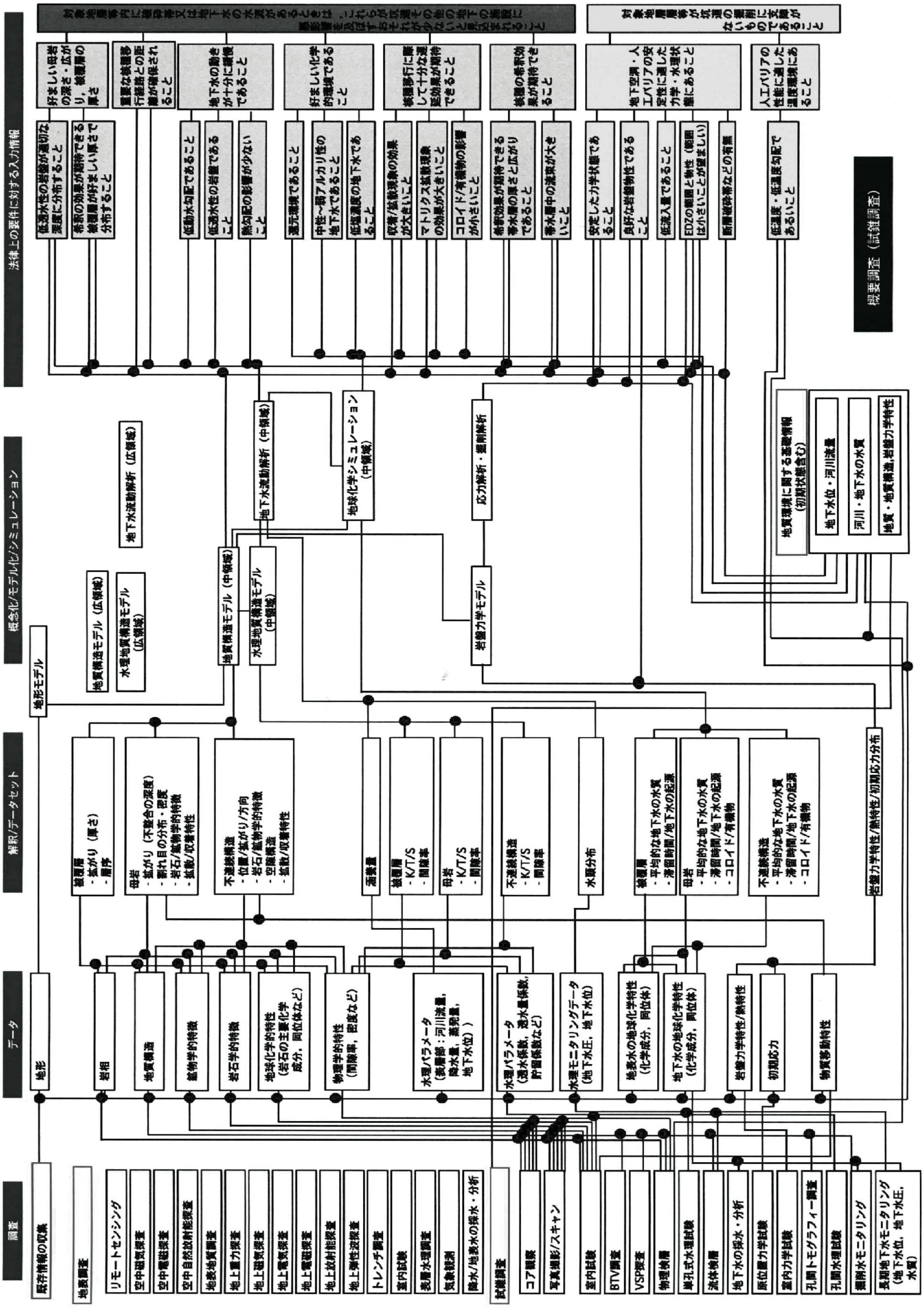


図 4.7　統合化データフローの一例[6)]

（試錐調査を想定した統合化データフロー）

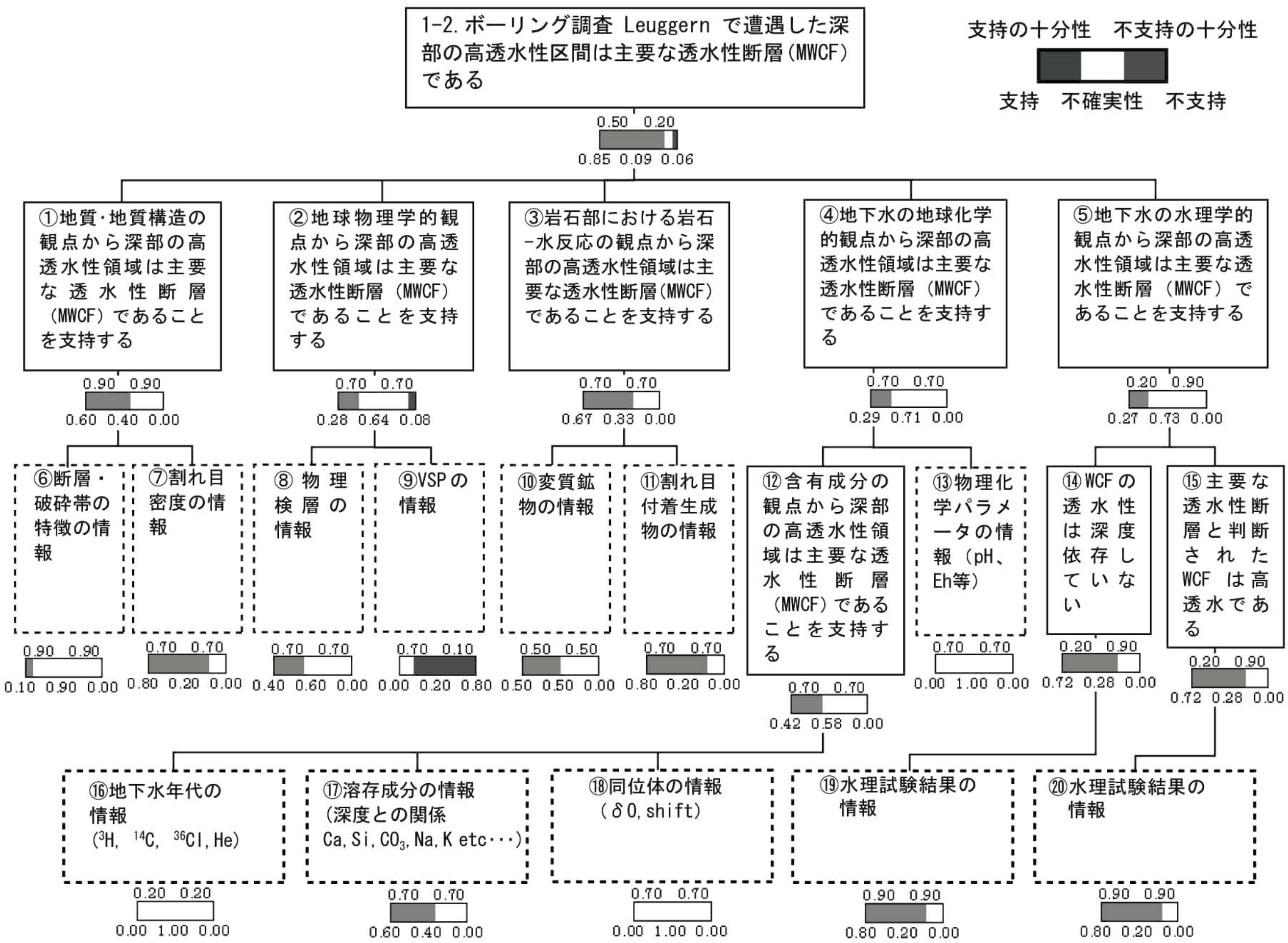


図 4.8　透水性断層（MWCF）を対象とした ESL による階層プロセスモデル [7]