



**東濃地域における地質環境の不確実性評価
—平成18年度—
(委託研究)**

Assessment of Uncertainties Associated with Characterization of Geological
Environment in the Tono Area-Japanese Fiscal Year, 2006-
(Contract Research)

戸井田 克* 須山 泰宏* 瀬尾 昭治* 渥美 博行* 尾方 伸久
Masaru TOIDA*, Yasuhiro SUYAMA*, Shoji SENO*, Hiroyuki ATSUMI* 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

March 2008

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Research

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail: ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail: ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2008

東濃地域における地質環境の不確実性評価－平成 18 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*, 瀬尾 昭治*, 渥美 博行*, 尾方 伸久

(2008 年 1 月 30 日受理)

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・検討をおこなっている。これらの研究では、調査の各段階において構築される各種モデルの不確実性をできるだけ定量的に記述し、それを効率よく低減する調査の進め方を明らかにすることが重要な課題である。

一般に岩盤のような不均一な媒体中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に比較して大きいため、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性を評価することが極めて重要となる。この両者の関係を数学的に解析する手法の一つとして地球統計学的手法があり、これは地下に埋蔵する資源量の評価など他分野において用いられてきた実績がある。

本研究では、地球統計学とファジー理論を応用し、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し、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す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を対象とした、3 次元の地質構造のモデル化を試みている。

平成 18 年度は、これまでに実施した 2 次元と 3 次元の地質構造のモデル化および地下水流動解析結果を踏まえ、不確実性評価手法の体系化を行った。そして、体系化した手順に沿って一連の評価事例を整理した。

また、本手法を効果的に活用できるように適用すべき原位置調査手法を提案するとともに、地質環境の不確実性の観点から地下施設設計時に考慮すべき事項を整理した。

本報告書は鹿島建設株式会社が、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）技術研究所

Assessment of Uncertainties Associated with Characterization of Geological
Environment in the Tono Area - Japanese Fiscal Year, 2006 -
(Contract Research)

Masaru TOIDA*, Yasuhiro SUYAMA*, Shoji SENO*, Hiroyuki ATSUMI* and Nobuhisa OGATA

Tono Geoscientific Research Unit
Geological Isolation Research and Development Directorate
Japan Atomic Energy Agency
Akeyo-cho, Mizunami-shi, Gifu-ken

(Received January 30, 2008)

“Geoscientific research” performed at the Tono Geoscience Center is developing site investigation, characterization and assessment techniques for understanding of geological environment. Their important themes are to establish a methodology for analyzing uncertainties in heterogeneous geological environment, and to develop investigation techniques for reducing the uncertainties efficiently.

This study proposes a new approach where all the possible options in the models and data-sets that cannot be excluded in the light of the evidence 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, in turn, supports the design of the following investigation stage to reduce the uncertainties efficiently. In the study, current knowledge had been compiled, and the technique had been advanced through geological modeling and groundwater analyses in the Tono area.

This report systematized the uncertainty analysis methodology associated with the characterization of the geological environment, and organized the procedure of the methodology with the application examples in the study. This report also dealt with investigation techniques for reducing the uncertainties efficiently, and underground facility design options for handling geological uncertainties based on the characterization of the geological environment.

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

This work was performed by Kajima Corporation under contract with Japan Atomic Energy Agency.

*: Kajima Technical Research Institute, Kajima Corporation

目 次

1. はじめに	1
1.1 背景	1
1.2 技術的要求事項	1
2. 研究内容	1
2.1 不確実性評価手法の体系化	1
2.2 体系化した不確実性評価手法に基づく評価事例の整理	1
2.3 適用すべき原位置調査手法の整理・検討	2
2.4 地下施設設計時に考慮すべき事項の整理・検討	2
2.5 地層処分システムの合理的な保証を行うための課題の抽出	2
3. 地質環境に関する不確実性解析手法の体系化	2
3.1 知識と不確実性	2
3.2 地質環境モデル構築	3
3.2.1 知識としての地質環境モデル	3
3.2.2 地質構造モデル構築における知識形成スパイラル	4
3.3 不確実性評価	5
3.3.1 不確実性の種類とその尺度	5
3.3.2 不確実性の取り扱いに関する 3 原則	5
3.3.3 現実的評価のあり方	8
3.3.4 諸外国のリスク論的評価における不確実性取り扱い戦略との整合性	8
3.4 不確実性の存在を前提とした地質環境モデル構築の手順	10
3.4.1 地質環境モデルに関するバリエーションの網羅的抽出	10
3.4.2 異なる地質環境モデルバリエーションの評価上の取り扱い	19
3.5 参考文献	32
4. 体系化した不確実性評価手法に基づく評価事例の整理	33
4.1 評価事例の整理方法	33
4.2 評価目的の設定 (①) と評価対象の特定 (②)	34
4.2.1 評価目的の設定 (①)	35
4.2.2 評価対象の特定 (②)	35
4.3 評価対象に対する影響因子の抽出 (⑥) から ESL 評価結果に対する感度解析 (⑫) .	36
4.3.1 評価目的および前提条件となる評価対象	36
4.3.2 評価対象に対する影響因子の抽出 (⑥)	36
4.3.3 影響因子に対応する概念モデル構成要素の具体化 (⑦)	38
4.3.4 概念要素を記述する際の選択肢の抽出 (⑧)	39
4.3.5 概念モデルバリエーションの体系化 (ロジックツリー) (⑨)	42
4.3.6 各概念モデルバリエーションについての地下水流動解析・ 物質移行解析の実施 (⑩)	44
4.3.7 多様な証拠に基づく各モデルバリエーションの確からしさの評価 (ESL) (⑪) と	

ESL 評価結果に対する感度解析 (⑫)	49
4.4 参考文献	64
5. 適用すべき原位置調査手法の整理・検討	65
5.1 整理・検討内容	65
5.2 地下水流動評価において適用すべき原位置調査手法	65
5.3 孔内流向流速測定	66
5.3.1 孔内流向流速測定方法の概要	66
5.3.2 超音波反射・追尾方式 流向・流速計測システム	67
5.3.3 超音波反射・追尾方式 流向・流速計測システムの適用方法	68
5.4 参考文献	69
6. 地下施設設計時に考慮すべき事項の整理・検討	69
6.1 施設設計の方法論	69
6.1.1 地質環境の不確実性を踏まえた天然バリア機能の最適化設計手法	69
6.1.2 本方法論における概念設計と詳細設計の位置付け	74
6.2 本方法論を踏まえ瑞浪超深地層研究所で実施すべき設計	76
6.2.1 修正設計としての施設レイアウトの変更	76
6.2.2 施設レイアウトの変更の具体的なイメージ	76
6.2.3 施設レイアウトの変更の具体的な検討例	78
6.3 海外の施設レイアウトの変更事例	79
6.4 まとめ	81
6.5 参考文献	81
7. 地層処分システムの長期的性能に関する合理的な保証を行うための課題の抽出	82
7.1 地層処分システムの長期的性能の保証に関する合理性の視点	82
7.2 地質環境調査の点数と不確実性低減効果の間の費用便益論	83
7.2.1 Randomness の場合	83
7.2.2 Ignorance の場合	84
7.3 複数の独立な証拠と不確実性低減効果の間の費用便益論	85
7.4 論証における対話による合理性の枠組みの設定	86
7.5 まとめ	87
8. おわりに	87
8.1 7 章, 8 章参考文献	89

Contents

1. Introduction	1
1.1 Background.....	1
1.2 Requirements	1
2. Outline of this study	1
2.1 Systematization of the uncertainty analysis methodology.....	1
2.2 Arrangement of the application examples based on a procedure of the methodology.....	1
2.3 Proposal of an investigation technique that should be applied in-situ	2
2.4 The matter that should be taken into consideration for designing underground facilities.....	2
2.5 Future development for acquiring reasonable assurance in the geological disposal system.....	2
3. Systematization of the uncertainty analysis methodology.....	2
3.1 Knowledge and uncertainty	2
3.2 Description of the geological environment model	3
3.2.1 The geological environment model as knowledge.....	3
3.2.2 Spirals of the knowledge formation in the geological structure model	4
3.3 Uncertainty assessment	5
3.3.1 Types of uncertainties and their criteria	5
3.3.2 Three principles for handling uncertainties	5
3.3.3 The state of realistic assessment.....	8
3.3.4 Compatibility with uncertainty assessment strategy of risk theory evaluation in foreign countries ..	8
3.4 Procedure for describing the geological environment model with the uncertainty.....	10
3.4.1 Comprehensive evaluation of geological environment model variations.....	10
3.4.2 Handling of geological environment model variation in the uncertainty analysis methodology.....	19
3.5 References.....	32
4. Arrangement of the application examples based on a procedure of the methodology.....	33
4.1 Arrangement method of the application examples	33
4.2 Assignment of evaluation purposes (①) and specification of object (②)	34
4.2.1 Assignment of evaluation purpose (①).....	35
4.2.2 Specification of object (②).....	35
4.3 Extraction of the influence factors to the object (⑥) to sensitivity analysis by ESL (⑫)	36
4.3.1 Assignment of evaluation purpose and specification of object.....	36
4.3.2 Extraction of the influence factors to the objects (⑥).....	36
4.3.3 Specification of conceptual model components to the influence factors (⑦)	38
4.3.4 Extraction of options for describing conceptual model components (⑧)	39
4.3.5 Systematization of conceptual model variations (logic tree) (⑨)	42
4.3.6 Groundwater simulations and transport simulations for each conceptual model variation (⑩).....	44
4.3.7 ESL evaluation of certainty based on various evidence (⑪) and sensitivity analysis by ESL (⑫). 49	
4.4 References.....	64

5. Proposal of an investigation technique that should be applied in-situ	65
5.1 Study procedure	65
5.2 In-situ investigation methods for groundwater evaluation.....	65
5.3 Flow velocity measurement in a borehole.....	66
5.3.1 Outline of flow velocity measurement.....	66
5.3.2 A new technique for the tree-dimensional flow measurement by using the ultrasonic echo reflected from solid particle tracers suspended in groundwater.....	67
5.3.3 Application method for the technique for the tree-dimensional flow measurement by using the ultrasonic echo reflected from solid particle tracers suspended in groundwater.....	68
5.4 References.....	69
6. The matter that should be taken into consideration for designing underground facilities.....	69
6.1 Methodology for designing underground facilities	69
6.1.1 Optimization approach for designing a natural barrier function associated with uncertainty.....	69
6.1.2 Positioning of conceptual design and detailed design in the methodology	74
6.2 Design that should be applied in the Mizunami URL based on the methodology.....	76
6.2.1 Facility layout modification in modification of design	76
6.2.2 Image of facility layout modification.....	76
6.2.3 Study of facility layout modification.....	78
6.3 An example of facility layout modification in a foreign country	79
6.4 Summary	81
6.5 References.....	81
7. Future development for acquiring reasonable assurance in the geological disposal system.....	82
7.1 Viewpoints of reasonable assurance in the geological disposal system.....	82
7.2 The cost benefit theory between points of geological environment investigation and an uncertainty reduction effect	83
7.2.1 Case of randomness uncertainty.....	83
7.2.2 Case of ignorance uncertainty	84
7.3 The cost benefit theory between two or more independent evidence and an uncertainty reduction effect	85
7.4 A setup of the framework for acquiring reasonable assurance by communication with logic theory	86
7.5 Summary	87
8. Conclusions.....	87
8.1 References in Chapter 7 and 8.....	89

表 目 次

表 3.1	Possibility および対応する確率の例	6
表 3.2	不確実性最大の原則を満足するような確率分布の制約	7
表 4.1	各影響因子に着目したモデル化領域の基盤岩における概念モデル構成要素の具体化	39
表 4.2	第二階層から第一階層への十分性.....	54
表 4.3	第三階層から第二階層への十分性 (1/2)	55
表 4.3	第三階層から第二階層への十分性 (2/2)	55
表 4.4	第四階層から第三階層への十分性.....	56
表 4.5	第五階層から第四階層への十分性.....	56
表 4.6	末端の証拠の支持・不支持の設定.....	57
表 4.7	末端の証拠の支持・不支持の設定根拠 (1/3)	57
表 4.7	末端の証拠の支持・不支持の設定根拠 (2/3)	58
表 4.7	末端の証拠の支持・不支持の設定根拠 (3/3)	58

図 目 次

図 3.1	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	12
図 3.2	一次元フラクタルモデルと模擬ボーリング孔データの亀裂配置の類似性.....	13
図 3.3	Box Counting によるボーリング孔内亀裂配置の自己相似性の評価結果.....	14
図 3.4	孔内の亀裂頻度分布と自己アファインフラクタルモデル	14
図 3.5	亀裂頻度分布の Variogram が示す自己アファイン性とそのゆらぎ	15
図 3.6	亀裂頻度極大値の累積確率分布.....	17
図 3.7	極値分布関数の導出	17
図 3.8	極値データの確率分布と Gumbel 確率分布関数の比較	17
図 3.9	亀裂頻度極大値の出現間隔	18
図 3.10	概念モデル構築における不連続構造スケールの階層化の考え方の例	19
図 3.11	SI 法による感度解析の例.....	20
図 3.12	確率および Possibility の公理系の比較.....	22
図 3.13	確率論的によるリスク論的解析の方法.....	22
図 3.14	Possibility 理論によるリスク論的解析の方法	23
図 3.15	花崗岩健岩部における個別割れ目の透水性に関するロジックツリーの例.....	24
図 3.16	不確実性を有する主命題の信頼性の判断に関する階層プロセスモデルの例.....	25
図 3.17	各証拠に基づく末端の補助命題の確信の程度（主観確率）の入力例	25
図 3.18	下位の補助命題あるいは証拠の上位命題の信頼性への寄与についての 十分性および重複性を入力例	25
図 3.19	主命題の信頼性の評価例	25
図 3.20	古典的な確率論（左）と区間確率理論（右）の比較	26
図 3.21	古典的な確率論（左）と区間確率理論（右）の比較（続き）	26
図 3.22	ESL 演算規則の図形的表現.....	28

図 3.23	各命題の信頼性の Ratio Plot による表示例	29
図 3.24	Possibility 理論と確率論を組み合わせた二段階の不確実性解析の手法	30
図 3.25	Tornado Plot による感度解析結果の例	31
図 3.26	地質環境モデルに付随する不確実性評価の手順	32
図 4.1	地質環境モデルに付随する不確実性評価の手順	34
図 4.2	地下研究施設 ONKALO	35
図 4.3	ONKALO の湧水量予測に用いた理論解	35
図 4.4	SI 法による感度解析の例	36
図 4.5	モデル化領域基盤岩深部 (1km×1km×1km)	36
図 4.6	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	37
図 4.7	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	38
図 4.8	割れ目の方向による系統分けの例 (シュミットネット下半球投影)	39
図 4.9	二段階モンテカルロシミュレーションの概要	40
図 4.10	MIZ-1 号孔と DH-15 号孔における割れ目グループの組合せによる割れ目本数と 透水量係数の関係	42
図 4.11	モデル化領域花崗岩健岩部中の個別割れ目に関するモデルバリエーション	43
図 4.12	等価透水係数テンソル場 (例)	45
図 4.13	水頭分布についての解析結果 (例)	45
図 4.14	ダルシー流速分布についての解析結果 (例)	45
図 4.15	解析対象領域下底から 30m の位置から上部境界に達するまでの ダルシー流速に基づく移行時間分布 (例)	45
図 4.16	ダルシー流速に基づく移行時間が 1 万年以上の領域 (青) の分布 (例 1)	46
図 4.17	ダルシー流速に基づく移行時間が 1 万年以上の領域 (青) の分布 (例 2)	46
図 4.18	度数分布調査地点	46
図 4.19	地下水移行時間の度数分布 (確信の程度; 高)	47
図 4.20	地下水移行時間の度数分布 (確信の程度; 中)	47
図 4.21	地下水移行時間の度数分布 (確信の程度; 低)	47
図 4.22	感度解析における 2 つの母集団の比較概念	48
図 4.23	「系統 A および B の開口割れ目が透水性である」についての ESL による評価結果	50
図 4.24	「系統 L および B の全割れ目が透水性である」についての ESL による評価結果	51
図 4.25	花崗岩基盤面の深さと上部割れ目帯の厚さとの関係	52
図 4.26	上部割れ目帯の概念モデル「花崗岩基盤面の深さ (または被覆堆積岩との厚さ) と上部割れ目帯の厚さに相関がある」	52
図 4.27	上部割れ目帯の概念モデル樹形図	53
図 4.28	上部割れ目帯の概念モデルの樹形図における十分性の値	54
図 4.29	花崗岩基盤面の深さと上部割れ目帯の厚さの関係 (チャネル内およびチャネル外)	58
図 4.30	新生代の気候変動	59
図 4.31	花崗岩地区でのボーリング孔での応力と地形・亀裂間隔	59
図 4.32	破壊試験による亀裂の形成	59
図 4.33	土岐夾炭累層上面の深さと上部割れ目帯の厚さの関係	60
図 4.34	ESL 演算結果	61
図 4.35	Ratio Plot	61

図 4.36	感度解析結果	62
図 4.37	ESL で求めたモデルバリエーションの確からしさの Possibility 理論区分への 変換方法	63
図 4.38	Possibility 理論に基づく確信の程度 の定義.....	64
図 5.1	調査研究の繰り返しアプローチと本手順の関係.....	65
図 5.2	Transverse Flow Measurement.....	66
図 5.3	単孔式流向流速測定器の分類.....	66
図 5.4	本システムによる評価対象	67
図 5.5	流向・流速計測装置の概要	67
図 5.6	地質環境モデルに付随する不確実性評価の手順における超音波反射・追尾方式 流向・流速計測システムの位置付け	68
図 5.7	超音波反射・追尾方式 流向・流速計測システムが各スケールでの 信頼性向上に寄与する事項	68
図 6.1	地質環境に含まれる不確実性を考慮した多重バリアシステムの全体像 (性能評価の観点)	70
図 6.2	地質環境の不確実性を指標とした意思決定概念図	71
図 6.3	地質環境に含まれる不確実性に対する天然バリアでの対処	71
図 6.4	低流速部のイメージ図 (地下水移行時間を対象とした場合)	72
図 6.5	不確実性が大きい場合の低流速部.....	73
図 6.6	地質環境調査前半 (不確実性大) での設計オプションの具体化イメージ.....	74
図 6.7	地質環境調査後半 (不確実性小) での設計オプションの具体化イメージ.....	74
図 6.8	瑞浪超深地層研究所研究坑道の基本レイアウト (イメージ図)	74
図 6.9	JH におけるトンネル設計の手順	75
図 6.10	地質構造モデル (左: GL-300m 断面図, 右 GL-400m 断面図) の例.....	77
図 6.11	地質構造モデル (左: GL-500m 断面図, 右 GL-600m 断面図) の例.....	77
図 6.12	地質構造モデル (左: GL-700m 断面図, 右 GL-800m 断面図) の例.....	77
図 6.13	地質構造モデル (左: GL-900m 断面図, 右 GL-1000m 断面図) の例.....	78
図 6.14	換気立坑予備ステージ GL-200m 付近のプレグラウトの概念	78
図 6.15	エスポ岩盤研究所の位置	79
図 6.16	エスポ岩盤研究所のスパイラル状の斜坑の鳥瞰図.....	79
図 6.17	エスポ岩盤研究所における計画時と施工後のレイアウトの違い (その 1)	80
図 6.18	エスポ岩盤研究所における計画時と施工後のレイアウトの違い (その 2)	80
図 6.19	エスポ岩盤研究所とボーリング孔 KBH02 の位置関係	81
図 7.1	不均一場における透水係数データの点数と標本対数平均の関係	83
図 7.2	不均一場における透水係数データの点数と標本対数平均の標準偏差の関係.....	84
図 7.3	不確実性低減のために必要なコストとデータ点数の関係	84
図 7.4	長さや走向・傾斜が既知な断層の検出可能性.....	85
図 7.5	ESL における感度解析の概念 (新たな証拠を入手した場合の不確実性の低減効果)	86

This is a blank page.

1. はじめに

1.1 背景

日本原子力研究開発機構 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・検討をおこなっている。これらの研究では、調査の各段階において構築される各種モデルの不確実性をできるだけ定量的に記述し、それを効率よく低減する調査の進め方を明らかにすることが重要な課題である。一般に岩盤のような不均一な媒体中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に比較して大きいため、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の評価することが極めて重要となる。この両者の関係を数学的に解析する手法の一つとして地球統計学的手法があり、これは地下に埋蔵する資源量の評価など他分野において用いられてきた実績がある。

本研究では、地球統計学とファジー理論を応用し、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し、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す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を対象とした、3 次元の地質構造のモデル化を試みてきている。平成 18 年度は、これまでに実施した 2 次元と 3 次元の地質構造のモデル化および地下水流動解析結果を踏まえ、不確実性評価手法の体系化を行った。そして、体系化した手順に沿って一連の評価事例を整理した。

また、本手法を効果的に活用できるように適用すべき原位置調査手法を提案するとともに、地質環境の不確実性の観点から地下施設設計時に考慮すべき事項を整理した。

1.2 技術的要求事項

本業務に要求される技術的要求事項は、以下のとおりである。

- ① 不確実性評価手法の体系化
- ② 体系化した不確実性評価手法に基づく評価事例の整理
- ③ 適用すべき原位置調査手法の整理・検討
- ④ 地下施設設計時に考慮すべき事項の整理・検討
- ⑤ 地層処分システムの合理的な保証を行うための課題の抽出

2. 研究内容

2.1 不確実性評価手法の体系化

これまでに実施した地質構造のモデル化および地下水流動解析結果を踏まえ、不確実性評価手法の体系化を行った。本体系化においては知識と不確実性の関係、地質環境モデルの構築と知識形成および不確実性評価手法を踏まえ、「地質環境モデルに付随する不確実性評価の手順」として取りまとめた。本体系化においては、空間的不均質性のスケールの取り扱いについても考慮した。

2.2 体系化した不確実性評価手法に基づく評価事例の整理

2.1 で体系化した不確実性評価手法の手順に沿って、これまでに実施した地質構造のモデル化および地下水流動解析結果から該当する評価事例を選定し整理した。なお、整理においては、各手順に沿って具体的に考慮すべき内容を明示した。

2.3 適用すべき原位置調査手法の整理・検討

不確実性評価手法を用いて評価した場合に明らかとなる「地下水流動に含まれる不確実性」を効率よく低減させるために、地下水流動解析結果のスクリーニングに有効であると考えられる地下水の流向・流速に着目した。そして、適用すべき原位置調査手法として、流向・流速計測システムの提案を行った。また、提案したシステムを2.1で体系化した不確実性評価手法のどの段階で適用すべきかを整理した。

2.4 地下施設設計時に考慮すべき事項の整理・検討

地質環境の不確実性および不均質性の観点から、施設設計の方法論を整理した。そして、実際の地層処分において、設計は必須のものと考えられることから、本方法論における概念設計、詳細設計の位置付けを明らかにした。また、本方法論を踏まえ、瑞浪超深地層研究所で実施すべき設計を提案した。

2.5 地層処分システムの合理的な保証を行うための課題の抽出

地層処分システムの受容性は、遵守事項の絶対的な証明よりむしろ合理的な保証に基づくべきであると言われていることから、ここでは地層処分システムの長期的性能の観点から、地層処分システムの合理的な保証を行うための課題の抽出を行った。

3. 地質環境に関する不確実性解析手法の体系化

3.1 知識と不確実性

地質環境に関する我々の知識は、当該地域における調査や研究の進展および全般的な科学知識の進化によって改善され続けるものと考えられる。このような前提の下に、現在の我々の知識は以下のように類別することができる¹⁾。

- ① 我々が既に知っているもの。
- ② 我々が既に知っていると思っているが実は誤っているもの。
- ③ 我々が知らないということを知っているもの。
- ④ 我々が知らないということすら気づいていないもの。

このうち①は一般に知識あるいは情報と呼ばれているものであり、②～④は不確実性に区分されている。そして、②～④のそれぞれの形態の不確実性を何らかの形で知識や情報に変換することが調査および研究の目的となるが、この行為は、知識・情報の増大という立場からは地質環境モデル構築に結びつくものであり、他方、不確実性の低減という立場からは不確実性の評価・管理を必要とするものとなる。つまり、知識・情報と不確実性との間には二重性 (Duality) が存在しており、地質環境モデル構築と不確実性の評価・管理とは表裏一体の関係にあるということが出来る。

放射性廃棄物処分などの地下環境の利用においては、前述した不確実性の存在のために厳密な意味での最適化を行うことは困難であると考えられるが、そのような場合においてもいわゆる BAT (Best Available Technique) の適用が求められる場合が多い。そして、BAT の適用すべき対象は工学的対策のような「もの」には限られず、評価そしてその基盤としての知識も含まれるものと考えられる。地質環境に関する知識が「最良のもの」であるとは、

- ① 現時点の知識 (我々が知っているもの) のうち誤っているものを峻別するための合理的な範

囲の努力が尽くされていること。

② 現時点の知識には含まれていないが「知らないことを知っているもの」についての情報を得るための合理的な範囲の努力が尽くされていること。

③ 「知らないことさえ気づいていないもの」を認識するための情報を得るための合理的な範囲の努力が尽くされていること。

を前提とした上で、

- ・ 「現時点の知識のうち将来も不変のもの（既に知っているもの）」の認識
- ・ 「知らないことを知っているもの」および「知っているはずだが誤っているもの」について、類似した分野での経験等に基づき最尤と考えられるものを推論する能力

のことを指すものと考えられる。

ここで、最良の知識に関する前提条件のうち、①は解析モデルやデータ等あるいは評価上の仮定の妥当性を検証するために、複数のモデルや情報の相互比較を行うこと、②は調査や試験によって不足しているデータを取得すること、そして③は現象観察を目的とした（原位置）試験、ナチュラルアナログあるいは古水理学等の独立した情報についての注意深い考察を行い、検討対象としている地下環境の利用への含意を明らかにすること、等にそれぞれ対応するものと考えられる。

本項では、体系化すべき手法を、まず、知識を創出するものとしての地質環境モデル構築、そして不確実性の所在を明確にして、さらにその低減を図るものとしての不確実性評価・管理に区分して整理し、最後にこれら二つを統合する立場から総合的な手法を明らかにすることとする。

3.2 地質環境モデル構築

3.2.1 知識としての地質環境モデル

知識に関する定義としては歴史的に様々なものが提案されている²⁾が、ここでは、知識管理における定義にならい、「知識＝行動や判断を起こすための特別な情報（規範）」という立場を採るものとする。この定義では、情報と知識との間の差異が強調されており、現代の社会において氾濫している情報の中で、ある人が行動を起こしたり判断を下したりする際の根拠として用いるもののみが知識として認められることとなる。このことは、知識というものがそれを所有し使用する人と密接な関連を持つものであることを意味しており、その人がどのような目的の下にその知識を用いようとしているのかということやその人の価値観といった属人的な要因と切り離すことが難しい。このことは、知識が、人と切り離して流通することの可能な情報とは明確に異なるものであることを示している。このような観点から見ると、本研究で想定しているように、地下環境の利用という特定の目的の下に地質環境を記述するものである地質環境モデルは、それに基づき地下施設の設計や評価という行動や判断をするというものであり、情報ではなく知識として捉えるべきものであると考えられる。知識の中には、言語や図あるいは数式や値などを用いて明示的に表現することの可能な「形式知」と呼ばれるものと、これらの背後にあって経験的あるいは感覚的に認識されている「暗黙知」と呼ばれるものがあり、Nonaka and Takeuchi³⁾は、経験的あるいは感覚的に得られた個人的な暗黙知が目的を同じくするメンバーからなるコミュニティによって共有され、さらに、その共有された知識を何らかの方法で表現することによって形式知へと変換し、さらに、その形式知を認識した上でさらに経験を蓄積することで暗黙知をより豊かにしていくというように暗黙知と形式知を行き来するスパイラルが知識形成過程で重要な役割を果たすものであることを述べている。地質環境モデルの構築においても、Nonaka and Takeuchi³⁾の言う知識形成スパイラルは、次節で述べるような形で存在するものと考えられる。

3.2.2 地質構造モデル構築における知識形成スパイラル

地質構造モデル構築という知識形成過程において新たな「知識」の生ずる可能性は、

- ・当該地質環境において新たに得られたデータや観察事実の集合を整合的に説明することの可能な仮説を提案すること（解釈）。
- ・上記の仮説に基づき、数値解析を実施可能な数学モデルを作成すること（定式化）。
- ・上記の数学モデルによる計算結果が実際の現象を適切に表現しているか否かを確認すること（検証）。

において存在するものと考えられる。そして、また、

- ・地質環境特性についての「仮説（解釈）」という主に地球科学系の研究領域における知識表現と「数学モデル（方程式系）」という数学系の研究領域における知識表現の間を仲介し、いずれの領域の専門家にも理解することのできる共通の知識表現としての概念モデルを作成することも新たな知識形成の過程である。

そこで、以上を踏まえれば、地質構造モデル構築における知識形成スパイラルとしては、以下のようものが行われているものと推察される。

- ① 地表踏査やボーリング孔を用いた調査・試験あるいは物理探査といった現場での作業を経験することによって、その作業に携わった地質学や水理学あるいは地球化学といった地球科学分野の専門家が当該地質環境についての暗黙知をそれぞれ獲得するとともに地質環境特性についてのデータが取得される。
- ② 上記の個人的な経験をそれぞれ有する個々の専門家が話し合うことによって経験や「暗黙知」を共有する。
- ③ 各専門家は、共有された経験や暗黙知を背景としつつ、取得された個々のデータやデータ間の関係を説明することの可能な仮説を立てる。このような仮説は、言語や図あるいは数式などによって記述される形式知である。
- ④ 「形式知」として表出された当該地質環境特性についての「仮説」は、水理や地下水水質形成といった現象を数学的に定式化し数値解析手法を用いてシミュレーションするための知識を有する数学モデラーや数値解析者あるいはコンピューター科学者といった数学系の専門家に手渡されることとなり、「地質環境特性についての地球科学的仮説」と「数学モデル（方程式や境界条件等の集合）」のインターフェイスとしての「概念モデル」という共通の知識表現として再定義される。
- ⑤ 概念モデルは地球科学分野での専門家と数学系の専門家との間の共通の知識表現であり、このため、それぞれの専門家によって、概念モデルが妥当なものであるか否かが以下の観点から検証されることとなる。
 - ・当該地質環境の特性についての現場での経験やそれに付随する暗黙知そしてそれに基づき地球科学系の専門家間の合意として形成された仮説と整合的なものであるか？
 - ・概念モデルに基づき対応する方程式系および境界条件等の制約を一義的に決定することができるか、そして、それらの数学モデルは既知の数値解析手法によって合理的な計算時間内で演算可能なものであるか？
 - ・上記の数学モデルを用いたシミュレーションを行うために必要となる入力データを原位置での調査や試験あるいは類似した地質環境での情報などに基づき設定することが可能か？
- ⑥ 作成された概念モデルを念頭に置きつつ、地球科学系の専門家は再度現場へと立ち回り、彼

らの経験や暗黙知をより豊かなものにするとともに、概念モデルの基盤となっている「仮説」の妥当性を検証するための新たな試験や調査を実施する。

「知識」としての地質環境モデルの構築について上記の記述においては、簡単のため、当該地域での十分なデータや情報が入手され、かつ、関連する研究分野での専門家間のコンセンサスが得られているために、検討対象とする特性や条件についての仮説および対応する概念モデルが一義的に決定されるような状況を想定しているが、実際にはこのような理想的な状況が生じることは極めてまれであり、種々の要因により不確実性即ち仮説が一意に決定できないことが一般的である。そこで、次節では、地質環境構築を不確実性解析の観点から見直すものとする。

3.3 不確実性評価

3.3.1 不確実性の種類とその尺度

前述した意味での「最良の知識」のうち、「現時点の知識のうち将来も不変のもの（既に知っているもの）」に関する範囲においても、評価の内容を一意に決定することは困難と考えられる。これは、知識に含まれる情報やデータをモデル等によって表現する際の複数のモデルオプションの存在や近似誤差等が存在するためである。また、これに加えて、対象とする地質環境の特性を包括的に示すためには、その一環として、

- ・知っているはずだが誤っている（かも知れない）もの。
- ・知らないことを知っているもの。

といった不完全な知識に基づき何らかの評価を行うことが避けられない。そこで、現実的評価における「最良推定」を具体化するためには、これらの不完全な知識に起因する不確実性についてもどのような対処をするべきかという実務的なガイドラインを用意することが必要となる。そして、このようなガイドラインは、想定する不確実性の種類によって異なるものとなることが予想される。

前出の Ayyub and Klir ¹⁾においては、具体的な検討対象としての不確実性を以下のように分類している。

- ・任意性 (Ignorance あるいは Ambiguity) : 本来一意に決定できるはずのものが知識や情報の不足のために特定できない。
- ・確率的性質 (Randomness) : 現象の帰結がランダムさのために決定できない。
- ・近似誤差 (Approximation) : 現象を（モデル等により）記述する際の単純化や曖昧さあるいは精度（解像度）の不足
- ・不整合 (Inconsistency) : 複数の情報や知識の間の矛盾や混乱

本項では、以下、上記の不確実性の分類に従い、これらの不確実性因子が存在することを前提とした場合の「最良の推定」をどのような方策で導くべきかについて検討を加える。

3.3.2 不確実性の取り扱いに関する3原則

近年の情報理論においては、情報と不確実性（あるいは知識と無知）の間の二重性 (Duality) の存在が認識されており、特に、情報価値の最も実務的な定義は、「その情報が付加されたことによって、どの程度の不確実性が低減されるか」というものであると考えられている ⁴⁾。ここでは、以下に、このような情報と不確実性（あるいは知識と無知）の間の二重性を前提とした上で、「最良の知識」を基盤として「最良の推定」を行う際の不確実性の取り扱い上の原則をまとめることとする。

(1) 不確実性不変の原則

前項で述べた種々の不確実性因子については、それぞれ一定の互換性のある理論が付随しており（確率論、Possibility 理論あるいはファジー理論等）、それぞれに対応する不確実性の指標が存在している。ここで、不確実性不変の原則とは、ある不確実性因子についてのある理論（例えば確率論）における不確実性の表現を、別の理論（例えば Possibility 理論）に変換した際に、不確実性の総量が不変であることを要請するものである。この原則は、上述した情報と不確実性の二重性に基づけば、「不確実性を表現する理論の変更によって、情報が消滅し、あるいは新たに生成されることはない」という制約を主張しているということもできる。

重要な例として、不確実性不変の原則を満足するような確率から Possibility への変換は以下のものに限られるという結果⁵⁾がある。

ある集合の要素に対して定義された確率(マス) $P = (p_1, p_2, \dots, p_n)$, $p_1 \geq p_2 \geq \dots \geq p_n$ が、以下のような関係を有する場合、

$$p_1 = p_2 = \dots = p_{s_1} > p_{s_1+1} = p_{s_1+2} = \dots = p_{s_2} > \dots > p_{s_{k-1}+1} = p_{s_{k-1}+2} = \dots = p_{s_k} \quad (3.1)$$

不確実性不変の原則を満足するような Possibility, $R = (r_1, r_2, \dots, r_n)$, $r_1 \geq r_2 \geq \dots \geq r_n$ は、以下のものに限られる。

$$r_1 = r_2 = \dots = r_{s_1} > r_{s_1+1} = r_{s_1+2} = \dots = r_{s_2} > \dots > r_{s_{k-1}+1} = r_{s_{k-1}+2} = \dots = r_{s_k} \quad (3.2)$$

ただし、

$$r_{s_j} = \sum_{i=s_{j-1}+1}^n p_i \quad (3.3)$$

以上の変換規則を用いると、例えば、下表に示すように、確率と Possibility の間の換算が定義されることとなる。

表 3.1 Possibility および対応する確率の例

	i=1	2	3	4	5	6	7	8
p_i	0.3	0.2	0.2	0.1	0.08	0.04	0.04	0.04
r_i	1	0.7	0.7	0.3	0.2	0.12	0.12	0.12

以上のことは、客観的な（頻度）データに基づき確率として表現される不確実性（確率的性質や近似誤差）と主として専門家による主観的判断により Possibility として表現される不確実性（任意性や不整合性）との間を、不確実性（情報）不変の原則を満足しつつ変換することが可能であることを意味している。そして、地質環境についての最良の知識に介在する各種の不確実性因子をそれぞれ適切な指標として定量的に表現することが有効となり得る可能性を示すものと考えられる。勿論、このような定量的な不確実性の取り扱いは、学際的な研究に参加する全ての専門家に理解そして許容されることは難しいかも知れない。しかしながら、定性的にではあっても、不確実性の存在を前提として、「ほぼ確実に生じると考えられる」、「かなり確からしい」、あるいは「可能性は低いが否定することは

難しい」といった表現を用いるのであれば、その背後にあつて、これらの感覚的な議論を補足するものとしての定量的な不確実性の取り扱い（広義のリスク評価）が必要と考えられる（例えば、上記の定性的な確からしさのレベルと Possibility あるいは確率のレベルを対応付けるなど）。

(2) 不確実性最小の原則

不確実性最小の原則は、対応する現象やシステムの（一部分の）挙動について過去の経験に基づくデータや情報が存在する場合に適用されるものであり、データを複数のモデルオプションによって表現する際に、単純化や解像度の低下等により、モデルによって表現される情報量が低下する（即ち不確実性が増大する）場合に、情報量の低下あるいは不確実性の増大を最小とするようなオプションの採用のみが正当化できることを主張するものである。この原則は、例えば、ばらつきのあるデータを線形モデルで近似する際に、不確実性の総量を自乗誤差で表現することとした場合、最小自乗法によって求めた最良近似を用いることのみが正当化できることを意味する。

ここで、注意すべき点は、不確実性最小の原則が、モデルの精緻化を常に求めるとは限らないという点である。これは、ある現象の特定の側面についての知識が限られている場合にそのような側面を陽にモデルに取り込むオプションとその側面自体は単純化してしまい効果（の上限）のみを陰に取り込むオプションとでは、後者のほうが不確実性の増大が抑制される場合があり得るためである。従って、現状の最良の知識に基づきモデル化の戦略を立てる際には、知識の限界を考慮しつつ不確実性最小の原則に則ることが必要と考えられる。

(3) 不確実性最大の原則

この原則は、ある現象についての既存の部分的な知識や短期的な経験あるいは類似した現象についての知識に基づき、評価対象とする現象全体についてのより長期的な予測や類推を行う際に、既存の知識を過大評価しないこと、換言すれば、既存の知識と矛盾しない範囲で予測結果に最大の不確実性を付与することを求めるものである。

不確実性最大の原則の適用例としては、以下のように、確率分布を指定するだけの十分な情報がない場合に、既存の部分的な知識に基づき、それと矛盾しない範囲で不確実性を最大とするような分布形を選択する問題が有名である⁶⁾。また、同様に、複数の専門家による確からしさの推定結果（Possibility 分布）が異なる場合に、不確実性を最大とするようにこれらを統合する手法等にも適用されている例がある。不確実性最大の原則は、既存の知識に基づき、その適用範囲を超えて予測や推測を行う際の確からしさ（不確実性）の見積もりに関するものと考えられる。

表 3.2 不確実性最大の原則を満足するような確率分布の制約

既知の知識による制約条件	不確実性最大となる分布系
・ 変数の最小値と最大値が既知の有限値	均一分布
・ 変数の最小値 = 0, 最大値は ∞ ・ 期待値が既知	指数分布
・ 変数の最小値 $-\infty$, 最大値 ∞ ・ 期待値および分散既知	正規分布
・ 変数の最小値と最大値が既知の有限値 ・ 期待値および分散既知	ベータ分布

3.3.3 現実的評価のあり方

上述した原則を適用すれば、前述した「最良の知識」を基盤として行う現実的評価の満たすべき要件として以下を挙げることができる。

- ① 現実的評価の要件 1 (既存の情報やデータを最小限の不確実性で再現すること) ; 地質環境の特性や変動に関する部分的あるいは短期的なデータさらには類似した現象についての観察事実の総体に対して、不確実性を最小とするようなモデルを用いてこれらを表現すること。ここで注意すべき点は、この原則が厳密な意味で適用されるべきものではなく、深部地下における測定データや物理探査のような間接的な情報の有する曖昧さやばらつきあるいは誤差といった現実的な制約条件の存在を考慮すれば、むしろ、これらを再現する際の不確実性（自乗残差等）が一定以下となるような一群の仮設やモデルオプションを「不確実性最小」の候補として引き続いて行われる検討の対象に保留することが必要と考えられる。
- ② 現実的評価の要件 2 (情報やデータの範囲を超えて予想や外挿を行う際に不確実性を過小評価しないこと) ; データや情報の得られている範囲を超えて、外挿や予測を行う場合には、結果に含まれる不確実性を、既存のデータや情報と矛盾しない範囲で最大限に見積もること（不確実性最大の原則）。このことは、深部地質環境に関して入手可能なデータや情報の質と量とを考慮して、これらを再現する際の「不確実性最小の原則」を満足すると考えるべき仮設やモデルの候補が複数存在する場合には、これらの全てを用いて外挿や予測を行うことを求めるものと考えられる。
- ③ 現実的評価の要件 3 (現実的な意思決定において考慮すべき一定以上の確からしさを持つ仮定に対応していること) ; 不確実性即ち複数の選択肢（シナリオ、モデル、データとして）の存在を前提とすれば、これらの中には、確からしさの高いものから低いものが含まれることとなる。そして、現実的な意思決定の支援を目的とする以上、確からしさの低い評価結果に基づき工学的対策や設計オプション間の比較を行うことは明らかに適切ではない。このため、「最良推定」は、一定以上の確からしさをもつ評価結果の範囲に限るべきと考えられる。そして、前出のように確率と Possibility との間で不確実性不変の原則を満足するような等価な対応付けが可能であることは、前述した様々な種類の不確実性因子（任意性、統計的性質、近似誤差および不整合）について、共通の「裾切り」レベルを設定することが可能であることを意味している。

3.3.4 諸外国のリスク論的評価における不確実性取り扱い戦略との整合性

(1) 考慮すべき不確実性の種類と不確実性不変の原則

調査対象としたフィンランド、スウェーデン、米国 WIPP、米国 YMP およびフランスのいずれの事例においても、リスク論的評価において考慮すべき不確実性の種類として、

- ・ 確率的に発生する事象に起因する不確実性
- ・ パラメータの不確実性

という少なくとも二種類のものが認識されており、また、特に米国の事例⁷⁾では、前者が現象自体のランダムさに起因した Aleatory Uncertainty であるのに対して、後者は知識の不足に起因する Epistemic Uncertainty であることが述べられている。これらの複数の種類の不確実性の存在は、対応する不確実性の指標もまた複数のものとなる(統計的な意味での不確実性を表現するための頻度に基づく確率に対して知識の不足に起因する不確実性を表現するための主観確率あるいは

Possibility)ことを意味している。そして、米国のダブルサム的手法⁷⁾の場合は勿論、その他の国の事例のようにパラメータ不確実性を表現するために専門家への意見聴取に基づき確率分布を設定するような、これらの異なる起源の不確実性を統一的な指標（この場合には確率）として表現する操作が正当化される前提としての不確実性不変の原則が必要と考えられる。

また、以上の観察は、評価対象とする現象自体の発生確率と我々の入手可能な（不完全な）知識に基づく評価の確からしさを互換性のあるものとして取り扱うことに一定の合意があることを示唆するものと考えられる。

(2) 不確実性最小の原則および不確実性最大の原則

通常の科学技術的検討と同様、各国の研究プロジェクトで行われている既存のデータに対するモデルの選定等においては、最小自乗法などが用いられており、不確実性最小の原則が適用されているものと推察される。ただし、この点に関する陽な記述は見当たらず、また、測定誤差や近似精度等の存在を前提とした上で、ベストフィット（自乗残差の最小値を示すもの）の近傍にある候補のうちどの程度の範囲を「不確実性最小の原則」を遵守するものとして選定すべきかについて体系的な戦略を述べている例は見られない。また、既知の事実やこれらに対する近似としてのモデルの本来の適用範囲を超えて、外挿や予測を行う際の「不確実性最大の原則」の適用に関しては、米国の事例⁷⁾において、情報の限られた状況で確率分布を推定する際に情報エントロピーを最大とするような一様分布を選定するといった局面に散見する程度である。

前項において述べた通り、既知の事実の近似（説明）を試みる際の不確実性最小の原則と、この条件を満足するという意味で候補となる複数のモデルオプションを外挿や予測に用いる際の不確実性最大の原則とは対として適用されるべきものであり、これらの体系的な利用に関する戦略が明示されることが必要と考えられる。

(3) 現実的意思決定において考慮すべき事象の発生確率および確からしさの裾切り

現実的な意思決定のひとつとして Best Available Technique (BAT) の適用を明示的に謳っているスウェーデン⁸⁾においては、これに付随する評価は現実的なものであるべきことが述べられている。また、米国の 40CFR197⁹⁾においては、現実的な評価では、大影響低確率の極端な事象の影響を受けやすい算術平均値の代わりに、いわゆる Robust Estimator である中央値を用いるべきであることが述べられている。このような措置の眼目は、もしも発生したとしたら大きな影響をもたらすものの確率の低い事象の影響を排除することであり、中央値を選定するという戦略は、実効的には現実的な評価において考慮すべき確率に裾切り値を設けることと等価であると考えられる。そして、このことは、前出の考察と組み合わせれば、次のようなことを示唆するものと考えられる。「BAT の選定を目的とした現実的な評価においては、稀頻度の事象の発生確率および（現時点において最良な）知識の不足に呼応した評価の確からしさの低下のいずれについても、（不確実性不変の原則を遵守しつつ互換性のある形式で）考慮すべき範囲の制限を設けるべきである。」

米国等の事例⁷⁾において懸念されているように、いわゆるリスク希釈のために、「不確実性の増大によって平均値としてのリスクが低下する」ことは許容されない。しかしながら、BAT の選定を目的とした現実的な評価の範囲の設定においては、むしろ、このようなリスク希釈の発生は、現実的な意思決定の基盤とすべき「一定以上の確からしさをもって予測可能な現象」を特定する際の指標として用いることができるかも知れない。

3.4 不確実性の存在を前提とした地質環境モデル構築の手順

3.4.1 地質環境モデルに関するバリエーションの網羅的抽出

(1) バリエーション抽出の手順

既に述べたように、深部の地質環境は一般に空間的不均質性を呈するのに対して、実際に入手することのできる情報は、限られた地点における直接的なデータやあるいは広範囲を網羅しながらも間接的な物理探査データ等に基づくものとならざるを得ない。このため、これらの情報に基づいて構築される地質環境モデルには不確実性が含まれざるを得ず、このような状況において、特に地質環境モデルの観点から、評価手法の信頼性向上を図るためには、まず、「不確実性最小の原則」に基づき上述した調査データを整合的に説明することの可能な地質環境モデルとして最も不確実性の小さいものを選定するという過程が必要となるが、入手可能なデータや情報の質および量に関する制約のために複数のモデルの候補が否定されずにバリエーションとして残されるという状況が一般的である。そして、このような各調査段階で否定することのできない地質環境モデルのバリエーションのそれぞれについて評価を行い、結果を比較することによって、初めて、地質環境モデルの不確実性が評価結果にどのような影響を及ぼすのかを定量的に把握することが可能となる。ここで注意すべき点は、「不確実性最大の原則」に従い、各段階で入手されている情報に基づき否定できないモデルバリエーションを網羅的に抽出することであり、このようなアプローチは、専門家が最尤と考える選択肢に集中して調査や評価を行う決定論的な手法とは大きく異なるものと考えられる。

否定できないモデルバリエーションを網羅的に抽出するという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、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、ある地層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。

核燃料サイクル開発機構（現；日本原子力研究開発機構）¹⁰⁾では，合理的なサイト特性調査を行う上では，初めに重要な項目を主観的に選択するが，この選択が合理的であるかどうかを示す必要があることが述べられている。このような合理性を確保するためにも，ここで示すような論理的な明確さをもったモデル構築の手順は重要となる。

(2) 空間的不均質性のスケールの取り扱い

① 概念モデル構築における不均質性スケールの重要性

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，不均質場においては様々な支配的移行経路（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 3.1 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。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 3.1 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，周囲の高透水路から離れた 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出し，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。

以上は，水理および物質移動に着目した地質環境モデル構築における不均質性のスケール，特に，支配的な移行経路となり得る亀裂や断層・破碎帯等の不連続な構造の取り扱いの重要性を示唆するものと考えられる。また，わが国においてはこれらのような不連続構造は多かれ少なかれ存在することが一般的であり，また，どのようなスケールにおいてどのような性状の不連続構造がどの程度の頻度で分布しているかは個々の地質環境によって異なることから，地質環境モデルについてのバリエーションの派生を考える上では，スケールに着目した不連続構造の類型化が重要となる。

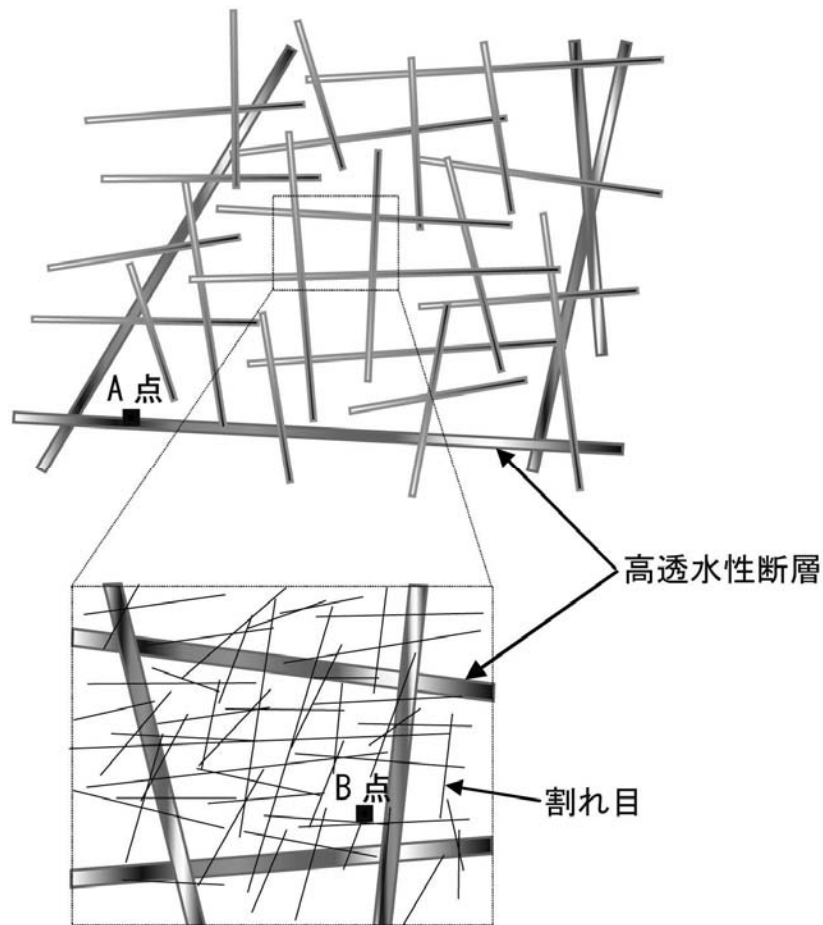


図 3.1 局所的な支配的移行経路のマルチスケールな階層構造の概念

② 亀裂、破碎帯のスケール特性

a) 自己相似性

岩盤のマトリクス部の透水性は、岩種によって大きく異なるものの、わが国の場合には、いずれの岩種においても、亀裂や破碎帯あるいは断層といった不連続面が卓越した地下水流路となると考えられている¹¹⁾。亀裂、破碎帯あるいは断層といった岩盤の不連続面は、断層活動や地震等に伴い生じた歪みが解放される際に生じるものであり、歪みのエネルギーを散逸させるために自己相似的な Fragmentation を生じると考えられている。例えば、Yucca Mountain における露頭で観察されたひび割れの分布パターンはフラクタルモデルと定性的に類似している¹²⁾。このような Fragmentation の分布パターンを実際の地質環境で観察できる場合は稀であり、多くの場合はボーリング孔に沿った亀裂の分布のみが観察できるに過ぎない。しかしながら、このような場合においても、図 3.2 の b) に示したような特徴的な亀裂配置がしばしば観察され、これは、ランダムなシェルピンスキーカーペット¹³⁾ (図 3.2 の a)) に見られるような自己相似的な構造を明瞭に示している。

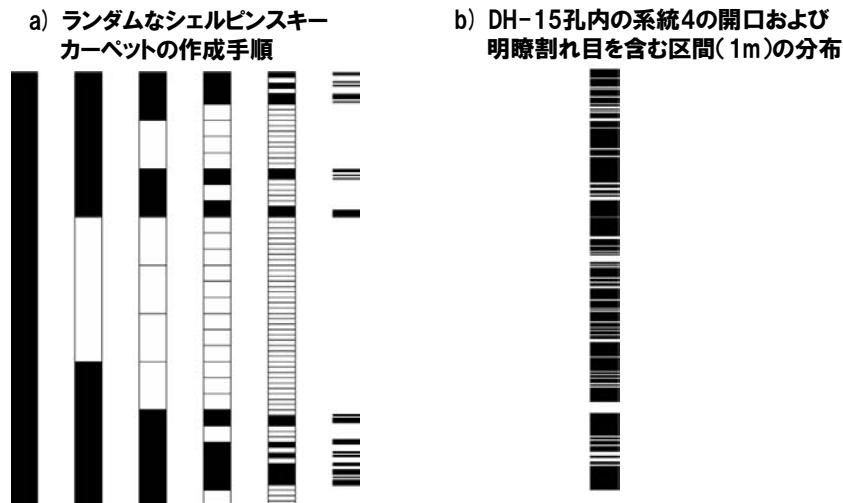


図 3.2 一次元フラクタルモデルと模擬ボーリング孔データの亀裂配置の類似性

以上のような見かけ上の類似にとどまらず，亀裂分布の自己相似性はより定量的な方法で確認することができる。このような方法として最も一般的なものは Box Counting と呼ばれる方法であり，この方法は，

- ・対象領域を同じ大きさの Box に分割する。
- ・亀裂を含有する Box の数をカウントする。

という手順を Box の大きさを種々に変えて実行することにより，亀裂を含む Box の数と Box の大きさの相関を調べるというものである。そして，この相関が以下のべき乗のものである場合，

$$N \propto r^{-D} \quad (3.4)$$

N : 亀裂を含む区間の数

r : 上記区間の大きさ

D : フラクタル次元

つまり，両対数グラフにおいて直線性を有するものである場合には，この亀裂分布が自己相似性を有するものといえる¹²⁾。図 3.3 には，あるサイトの孔内で観察された亀裂配置について行った Box Counting の結果を示す。これは，明瞭なべき乗タイプのスケーリング則を呈し，亀裂の配置に自己相似性が存在することを示している。

亀裂配置の自己相似性と関連した特徴として，亀裂頻度分布の自己アファイン性を挙げるることができる。これは，バリオグラム γ が，

$$r(h) = \left[\frac{\sum_i \{p(i+h) - p(i)\}^2}{n(h)} \right]^{1/2} \quad (3.5)$$

γ : バリオグラム

p : 亀裂頻度

h : 二点間の距離

$$r \propto h^{\alpha} \quad (3.6)$$

というべき乗のスケーリング特性を示すこととして定義される¹²⁾。上と同一の孔内亀裂分布データの例についてバリオグラムを分析した結果が図 3.4 である。結果は、亀裂頻度分布の自己アファイン性を示すものと考えられるが、 h の大きい部分では、ゆらぎも顕著である。

亀裂の自己相似的な構造では、大規模な不連続面が低頻度で含まれることとなり、一般にこれは断層や破碎帯などの亀裂頻度の高いものに対応している。このことは、ある比較的大きな間隔をもって亀裂頻度の高い部位（大規模な構造）が出現することを意味し、この場合、 h がこの間隔と同程度となった場合に、2 点間で同様の特徴を拾い上げることによってバリオグラムが極小値を示すことを示唆する。図 3.5 に見られるバリオグラムの「ゆらぎ」は、このような稀頻度の大規模な構造に起因するものと考えられる。

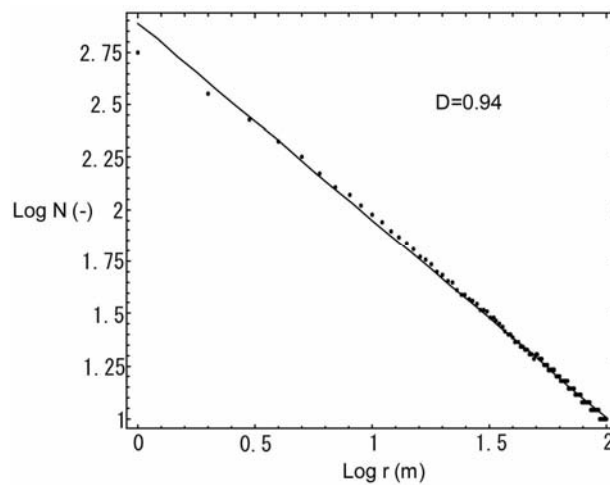


図 3.3 Box Counting によるボーリング孔内亀裂配置の自己相似性の評価結果

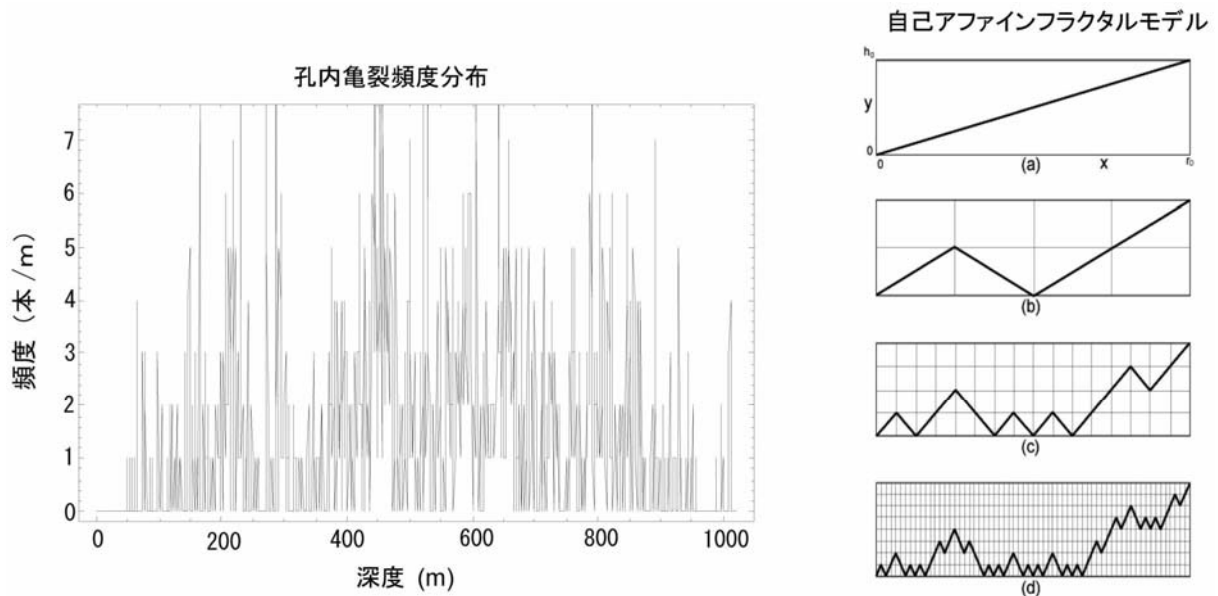


図 3.4 孔内の亀裂頻度分布と自己アファインフラクタルモデル

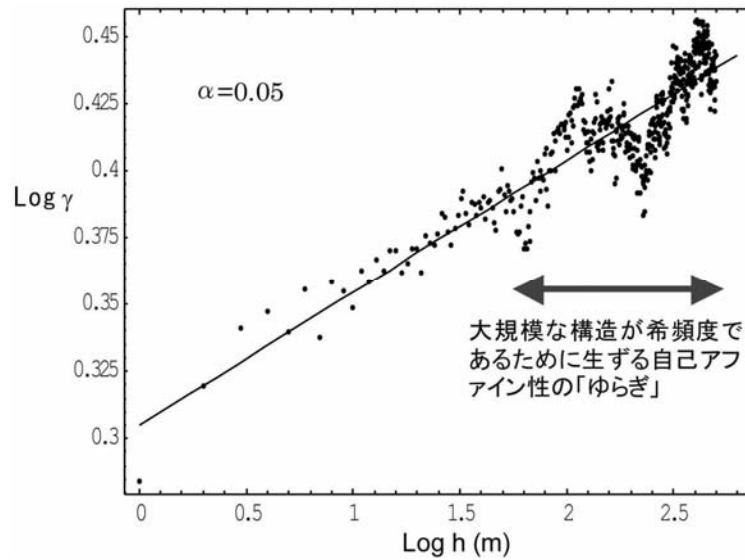


図 3.5 亀裂頻度分布の Variogram が示す自己アファイン性とそのゆらぎ

b) 破砕帯等の不連続構造の極値統計的特徴

亀裂分布の中に含まれる断層や破砕帯のような稀頻度の大規模な特徴は、通常の統計的手法によって表現することが困難である。そこで、極値統計学的手法を適用して、これらの大規模な特徴の出現確率をモデル化することが有効となる。

極値統計学は、与えられたデータの最頻値近傍に着目する通常の統計的手法と異なり、稀頻度で出現する極値の分布形を導出し、その統計的特徴を分析することにより、低確率ながら巨大な影響を及ぼす事象の評価を行う手法である。極値統計学は、これまで、

- ・気候（洪水，豪雨，等）
- ・地震
- ・経済（大恐慌，インフレ，等）

などの分野において適用されてきている。

確率分布関数 F に従う互いに独立な m 個のデータの最大値の確率分布関数が F_m であることは容易に確認できる。ここで、極値統計学の基本的な定理は、次のことを主張するものである¹⁴⁾。

定理 (Fisher-Tippett)¹⁴⁾

$F^m(b_m + a_m x)$ が $n \rightarrow \infty$ の極限において、有意な分布関数に収束するのであれば、その分布関数は、元の分布関数 F によらず、一般極値分布関数

$$G_r\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right) = \exp\left[-\left(1+r\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^{-\frac{1}{r}}\right], \quad 1+r\frac{x-\mu}{\sigma} > 0, r \neq 0 \quad (3.7)$$

に従う。即ち、

$$\left| F^m(x) - G_r\left(\frac{x-\mu_m}{\sigma_m}\right) \right| \rightarrow 0, \quad m \rightarrow \infty \quad (3.8)$$

なお、 μ は分布の中央の位置に対応するパラメータであり、正規分布の平均値に類似したものである (Gumbel 分布の場合には平均値とはならないが、正規分布の場合との類似性から、「位置のパラメータ」と呼ばれる)。 μ を変動することによって、分布関数は左右にシフトすることとなる。また、 σ は同じく、正規分布の標準偏差に類似したものであり、これを変動することによって分布関数の横軸のスケールが変動することとなる。

孔内の亀裂頻度分布データ (各 1m 区間の亀裂数の分布。上記の定理に対応して言えば、各单位区間の亀裂数データはそれぞれが分布 F に従う確率変数とみなすことができる) から各 10m 区間の最大値 (上記の定理では、 F_m ($m=10$) に対応する。即ち、もとの亀裂データから 10 回づつサンプリングを行い、それぞれの最大値を記録した結果を表す) 抽出し、その累積確率分布をまとめたものが図 3.6 である。これに対して、極値分布関数として最も一般的な Gumbel 分布 (式 3.4) において $\gamma \rightarrow \infty$ に相当する) を選択した場合、以下の式を解くことによって Gumbel 分布の位置のパラメータ μ およびスケールのパラメータ σ を決定することができる¹⁴⁾。

$$\sigma - \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} + \frac{\sum_{i=1}^n x_i \exp\left(\frac{-x_i}{\sigma}\right)}{\sum_{i=1}^n \exp\left(\frac{-x_i}{\sigma}\right)} = 0 \quad (3.9)$$

$$\mu = -\sigma \log \left[\frac{\sum_{i=1}^n \exp\left(\frac{-x_i}{\sigma}\right)}{n} \right] = 0$$

ただし、 x_i ($i=1,2,\dots,n$) は各区間での亀裂頻度の最大値

(式 3.9) を Newton-Raphson 法により数値的に解くことにより求めた位置のパラメータ μ およびスケールのパラメータ σ に対応する Gumbel 分布を図 3.7 に示す。図 3.8 に比較するように、こうして求めた Gumbel 分布は各区間における亀裂頻度最大値の分布を良く近似するものとなっている。一旦、図 3.7 のような極値分布関数が得られると、これを外挿することにより、さらに稀頻度の (大規模な) 破砕帯の出現確率 (あるいは出現間隔) を予測することができる。具体的には、種々の規模 (亀裂頻度) の破砕帯の出現間隔を、(上記の過程でデータ整理を行った区間の長さ) $\times$ (対応する出現確率の逆数) によって算出することができる。計算結果を図 3.9 に示す。同図から明らかな通り、亀裂頻度 5/m 以上の極値の出現間隔は、極値の増大に伴って指数関数的に増大することがわかる。

以上の手順をまとめると次のようになる。

- ・ 亀裂頻度データを単位長さの区間における亀裂数 (亀裂頻度の区間平均) として整理する。
- ・ 複数の区間におけるデータをグループとして統合し、各グループにおける最大値を算出することによって極値の分布データを整理する。
- ・ 最大値のデータに対して (式 3.9) を解くことによって、対応する極値データを Gumbel 分布として表現する場合の最適なパラメータ値を決定する。
- ・ 推定された Gumbel 分布が②で導出した極値分布データを再現することを確認する。

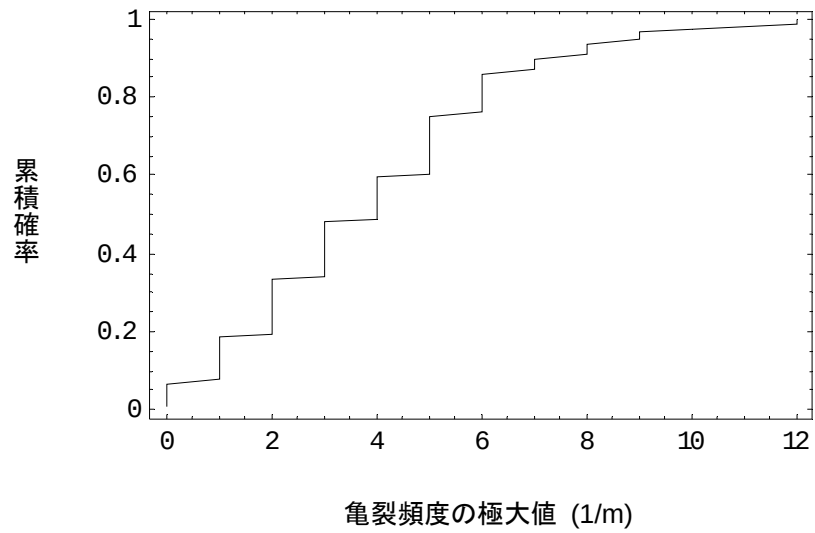


図 3.6 亀裂頻度極大値の累積確率分布

(各 10m 区間 ($m=10$) における亀裂頻度の極大値に着目し累積確率分布を定義したもの)

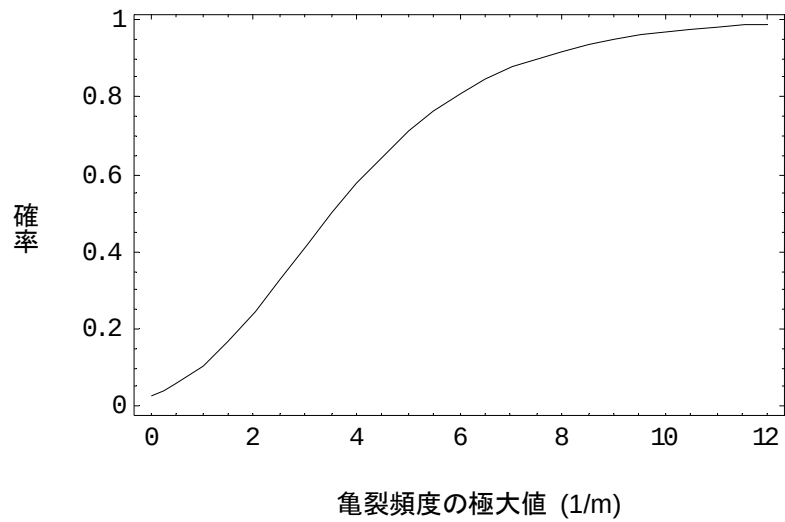


図 3.7 極値分布関数の導出

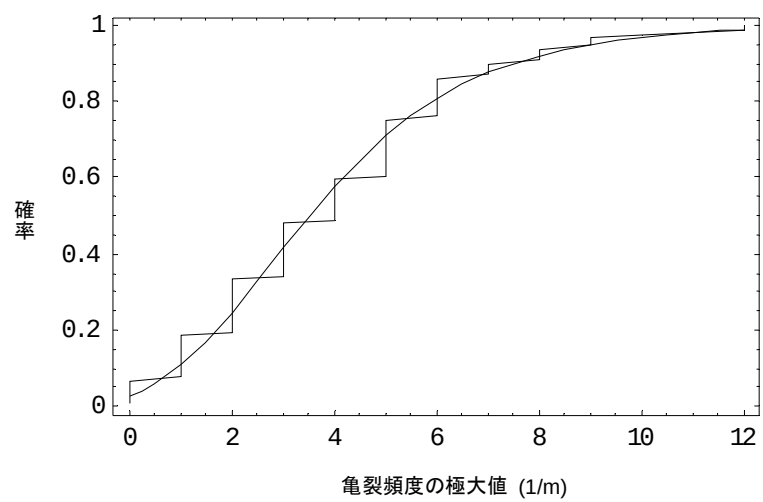


図 3.8 極値データの確率分布と Gumbel 確率分布関数の比較

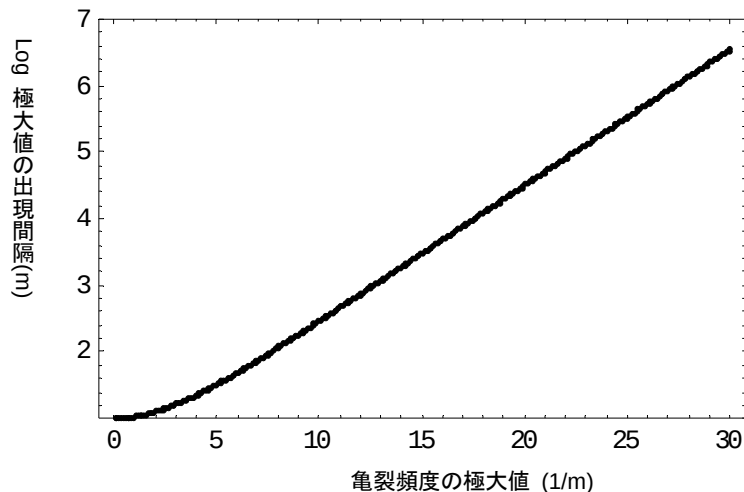


図 3.9 亀裂頻度極大値の出現間隔

c) 概念モデルのバリエーションの抽出への含意

上述したように、亀裂や断層および破碎帯といった不連続構造は自己相似的なスケール則に従い幅広いスケールに存在している。スケールの異なる構造に関する地質学的知見に基づきスケールの階層を明瞭に区分することが可能な場合には、これらの各スケールにおいてそれぞれ当該地質環境で考慮すべき各不連続構造のタイプについて成因や特性に着目して概念モデルのバリエーションを抽出することが適切と考えられる。他方、このような明瞭な決定論的な階層が存在しない場合には、極値統計的分析の結果に基づき、むしろ地質環境モデリングの用途に合わせて区分する（例えば地下施設の設計のためのモデル化において、施設のスケールとの対比によってスケールの階層を区分する等）ことが有効となる。

自己相似性を前提とした場合のスケールの取り扱いに関するもう一つの重要な観点は、モデル化における不連続構造の取り扱い上の区分（連続体/不連続モデル、決定論的/確率論的）である。評価対象とする岩盤に透水性の比較的一様な亀裂が多数分布しているような場合には、地下水流動は勿論物質移動の観点からもこのような場を連続体として取り扱うことは妥当と考えられる。しかしながら、支配的な透水性を有する亀裂等の頻度が一定以下となれば、少なくとも物質移動の観点からは、連続体モデルは不適切であり不連続なモデルを採用することが必要となる。そしてこの場合、比較的小数の大規模な不連続構造は決定論的にモデル化し、多数存在する小規模の不連続面は確率論的なモデル化を行うという方策を採ることが必要となる。そして、自己相似的なスケール構造の中で、決定論的に取り扱うべき不連続性と確率論的にモデル化すべき不連続性との境界を設定する際にも、上記の極値統計的分析の結果を用いることが可能と考えられる。なお、このように決定論および確率論的にモデル化される不連続性が存在することは、後述するような Possibility 理論と確率論を組み合わせた二段階の不確実性解析が必要となる要因の一つとなっているものと考えられる。実際の不均質地質環境モデルを構築する際には、図 3.9 に例示したような連続的なスケールの推移をそのまま表現することは困難であり、多くの場合は、図 3.10 に模式的に示したようにサイトや施設のスケールとの対比、決定論あるいは統計的モデル化に際しての、取り扱い上の区分により、いくつかの代表的なスケールの階層に離散化することが行われる。そしてこのような不連続構造についてのスケールの階層化が、不均質地質環境の概念モデル構築において、最初に行うべき極めて重要な課題であると考えられる。

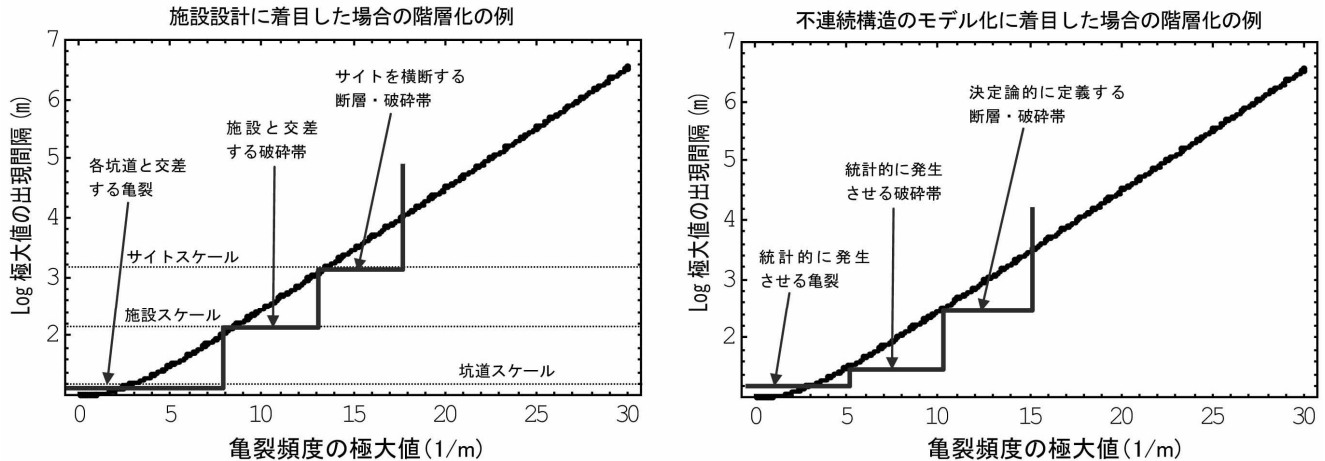


図 3.10 概念モデル構築における不連続構造スケールの階層化の考え方の例

3.4.2 異なる地質環境モデルバリエーションの評価上の取り扱い

考慮すべきあるいは否定できない地質環境モデルバリエーションを抽出した後にこれらに基づき評価を行う際には、以下の二点に留意することが必要と考えられる。

① 地質環境モデルバリエーションの評価結果への感度

異なる地質環境モデルバリエーションに基づく評価の結果が必ずしも顕著に異なるとは限らない。このことは、着目する地質環境特性や想定するバリエーションの種類によって、評価結果への感度が異なり得ることを示唆している。このような状況においては、評価への影響の大きい地質環境モデルバリエーション間の差異に着目し、これらの高いものに優先順位を与えることが適切である。

② 地質環境モデルバリエーションの確からしさ

複数想定される地質環境モデルバリエーションの全てが同じように確からしいものであるとは限らず、これらの中には、関連する分野の専門家のほとんどが該当すると考えているような蓋然性の高いものから、否定はできないものの可能性は低いというようなものまでが含まれることとなる。そして、確からしさの異なる地質環境モデルバリエーションに基づく評価結果が顕著に異なる場合、その結果の確からしさも前提となる地質環境モデルバリエーションの確からしさを反映して異なるものと考えられる。このことは、評価結果を広義のリスクとして解釈するためにも、基盤情報である地質環境モデルバリエーションの確からしさを把握することが必要であることを示唆するものである。また、「不確実性最小の原則」に照らせば、当該地質環境について既に入手されているデータや情報を一定以上の精度を以て再現することの可能な、つまり、一定以上の確からしさを持つオプションを用いることが求められるものと考えられる。

(1) 感度解析の方法

上記のうち①について本手法では、統計的解析により予め考慮すべき地質環境特性の感度を把握しておくことを提案している。統計的解析は、一次元等の比較的簡単なモデルを用いて想定する地質環境条件や特性を幅広く変動させて多数の解析を行いこれに対応する評価結果の変動範囲を求めるとともに、感度解析によって各地質環境特性についての不確実性がどの程度影響されるかを定量的に把握するものである。ここで、解析結果が多成分の非線形な感度構造を有しており、かつ、着目すべきは

所謂全体的な感度ではなく、安全基準のような目安となる影響レベル周辺での詳細な感度構造の把握であることから、本研究では感度解析の方法として SI 法¹⁵⁾を用いている。各入力パラメータの変動範囲について、ある制約条件を課した場合、このことによって評価結果が目標を満足する可能性が変化することとなる。特に、性能が向上する方向の条件を設定した場合には、目標を満足する可能性が向上することとなる。このような「目標を満足する可能性」は、当該条件の十分性を示すものであり、具体的には、多数の統計的シミュレーションケースのうち条件1を満足するものが $N1$ 個あったとして、このうち、目標を満足するものが $n1$ 個あるとすると、 $n1/N1$ として定義される。統計的核種移行において各パラメータ値の変動範囲のみを指定して確率分布を定義していない場合には、 $n1/N1$ は厳密な意味で確率と呼べるものではない。そこで、これは、SI (Sufficiency Index: 十分条件としての強さ) と呼ばれる。勿論、各パラメータの入力値に関して確率密度関数が定義できる場合には、SI は確率と一致することとなる。SI を用いた感度解析は、あるパラメータに着目して、そのパラメータの変動範囲を変えた場合に、安全目標を満足する可能性 (即ち SI) がどの程度変化するかを計算するものである。

図 3.11 は、SI 法による感度分析の例を示したものである。同図は、着目するパラメータ (この例では亀裂を含む透水係数の対数) を p^* 以上にした場合に SI (縦軸) がどのように変化するか (青線)、そして同様に、 p^* 以下にした場合に SI (縦軸) がどのように変化するか (赤線) を同時に表示しており、(青線) および (赤線) がいずれも水平である場合には、当該パラメータの感度は無視でき、いずれかあるいは両方の線の傾きが顕著であればそれぞれの方向での感度が大きいということになる。この例では、亀裂を含む透水係数の対数を好ましいもの (-8.5 近傍) とすることができた場合には SI は 55%程度から 85%程度にまで上昇し、逆に好ましくないもの (たとえば -5.0 近傍) とせざるを得なくなった場合には 30%程度にまで低下することとなり、大きな感度を有するものと判断される。

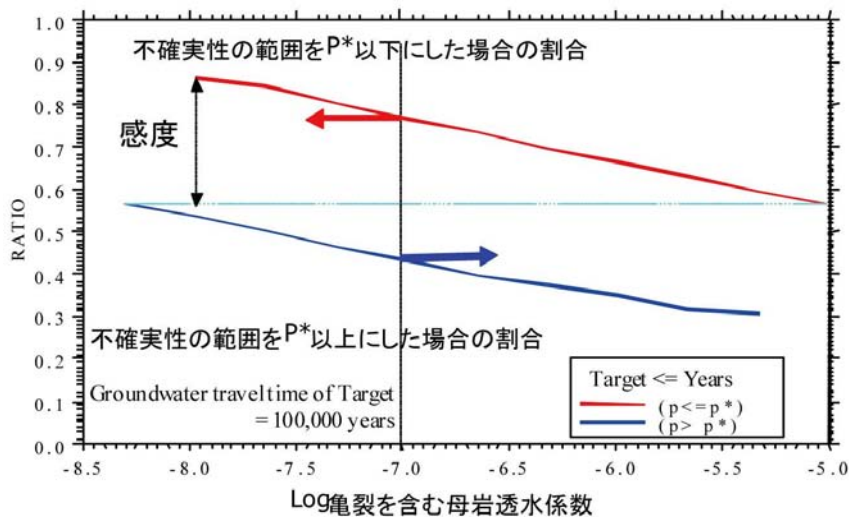


図 3.11 SI 法による感度解析の例

(2) Possibility 理論と確率論の組み合わせによる不確実性解析手法

(地質環境モデルバリエーションの確からしさの評価)

① 考慮すべき不確実性の種類

ここでは、前出の種々の不確実性要因のうち、地質環境に関連するものとして最も本質的と考えられる、

- ・ 確率的性質 (Randomness) : 評価対象とする現象がランダムなものであること。
 - ・ 任意性 (Ignorance あるいは Ambiguity) : 評価対象に対する情報や知識が不足していること。
- に着目する。これら二つの原因から生じる不確実性は、種々の判断に対して異なる含意を持つ。即ち、前者については、確率と影響の積である狭義のリスクを指標としてその影響を適切に表現することが可能であり、また、このタイプの不確実性は過去の頻度情報に基づく確率分布として客観的に表現することも可能であるのに対して、後者については不確かさの表現が主観的な判断に拠らざるを得ず、また、本来は一意に定まる現象の生起する時期や程度を情報や知識の不足のために統計的に分散させてしまう場合には、所謂リスク希釈（不確実性のために見かけ上リスクが過小評価される効果）という問題を生じる危険性を含んでいる。多くの場合にこれら二つのタイプの不確実性は共存することとなるが、地質環境モデリングの場合には、
- ・ 評価期間に対して我々の経験し得る期間が限られていること。
 - ・ 不均質な深部地下環境に対してデータを入手することの可能な地点が限られていること。
- という構造的な要因のために、情報や知識の不足に起因する不確実性が顕著に存在することとなる。さらに、情報や知識の不足に起因する不確実性の存在は、評価対象とする現象が真にランダムなものであるか否かを検定することを困難とする。

② 不確実性の取り扱い方法

評価対象とする現象がランダムなものであるとみなせるような場合には、不確実性を期待値として表現するというリスク論的な評価によって重篤度を決定できること、そして、その結果は科学的正当性に拠って説得力を持つものであることは、原子炉等における確率論的評価の事例に見られる通りである¹⁶⁾。他方、情報や知識の不足に伴う不確実性については、その起源に照らして科学・技術的知見の充足性や専門家の責任能力が問われることとなり、対応するリスク論的評価結果の妥当性に関する議論は科学・技術領域で閉じたものではなく、非専門家を含んだ公共の場にも及ぶことが必要と考えられる。

地質環境のモデル化には、

- ・ 長期性（実験等の我々が経験可能な期間に比して）
- ・ 地質環境の不均質性（要求される情報量を増大させる複雑性）
- ・ 環境変遷に関する連成現象の非線形性（要求される情報量を増大させる複雑性）

に起因する不確実性が顕著に含まれること、そして、これらの不確実性要因はいずれも、「知るべきこと」に比して「知り得ること」が不足する状況をもたらすことにより、情報と知識の不足に起因する不確実性つまり Ignorance が支配的不確実性要因になると考えられている。また、Ignorance に対して通常の PSA と同様の古典的な確率を適用することは、リスク希釈につながるものが指摘されている。リスク希釈とは、不確実性が大きいことが見かけ上リスクの低下をもたらす現象であり、例えば、ある地域の隆起・侵食速度の不確実性が低下し毒性を有する物質の露出時期の幅が1桁小さくなることによって年当たりのリスクは1桁上昇することとなる。このように、リスク希釈は、根源的には、確率の積分値が1となるように規格化されることが原因であり、不確実性（つまり積分範囲）が増大することによって、全体としてのリスクを支配するような高影響の事象の確率密度が相対的に低下することによって生じる。

以上のような考察に基づき、地質環境モデリングに付随する不確実性解析の取り組みにおいては、

- ・ リスク希釈を回避することのできるような Ignorance の表現
- ・ Ignorance と Randomness の共存するシステムの表現

といった手法上の課題が重要と考えられてきた。

Ignorance を表現するための公理系としては、図 3.12 に示す確率と Possibility の二つが考えられる。ここで、既に述べたように、リスク希釈は確率の公理系における規格化の方法に起因するものであることから、最大値による規格化を行う Possibility の公理系ではこれは生じないことが明らかである。そこで、多くの研究例では、Possibility による Ignorance の表現が行われている。

確率の公理系	Possibilityの公理系
$P(A \cap B) = P(A B)P(B) = P(B A)P(A)$	$\Pi(A \cap B) = \min[\Pi(A), \Pi(B)]$
$P(A \cup B) = P(A) + P(B) - P(A \cap B)$	$\Pi(A \cup B) = \max[\Pi(A), \Pi(B)]$
$\int_{x \in X} P(x) = 1$	$\max_{x \in X} \pi(x) = 1$

図 3.12 確率および Possibility の公理系の比較

確率論に基づくリスク論的解析の方法は、図 3.13 に模式的に示す通りである。これに対して、確率論の和演算を論理和 (Max 演算子) により、また、積演算を論理積 (Min 演算子) によって置き換えることによって図 3.14 に示す Possibility 理論に基づくリスク論的解析の方法が導出される。なお、ここで、図 3.13 に示すリスク論的解析の結果は、確率と影響の積をとることによって狭義のリスクとして表示することも可能である (統合アプローチ)。ただし、このような操作は必須のものではなく、影響の程度とその発生確率とをそれぞれ個別に表示することも可能であり、このような方法は分解アプローチと呼ばれる¹⁷⁾。

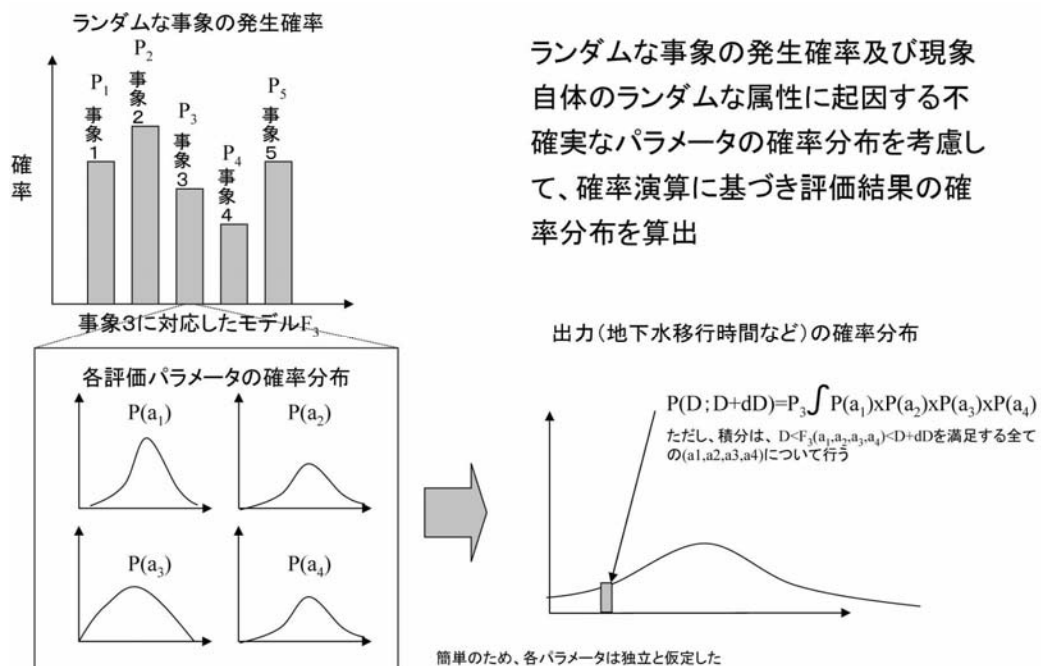


図 3.13 確率論的によるリスク論的解析の方法

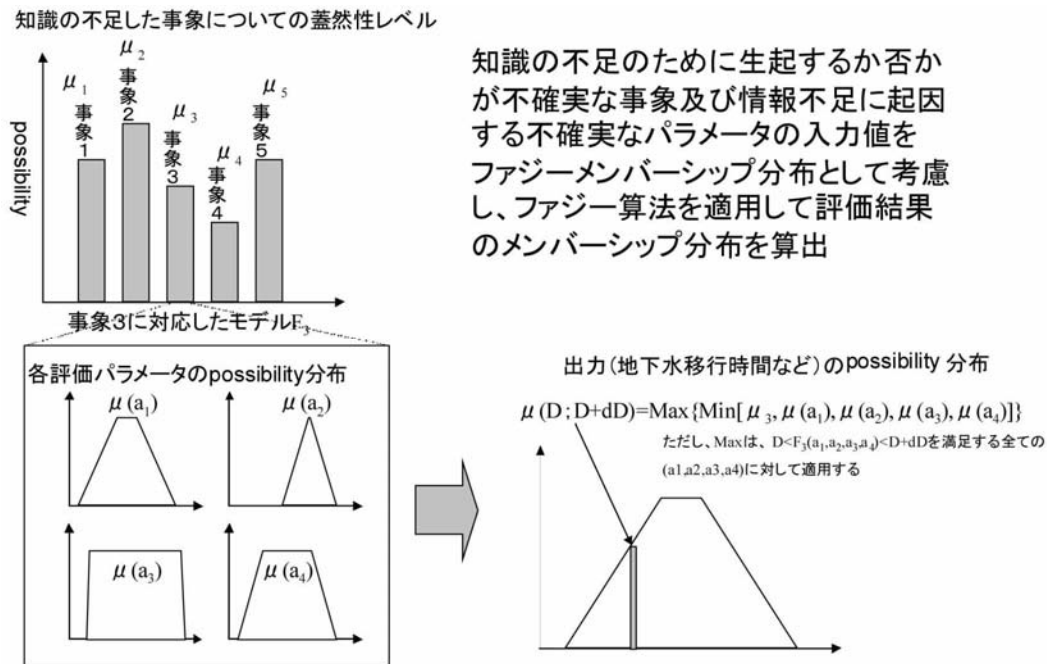


図 3.14 Possibility 理論によるリスク論的解析の方法

③ 情報と知識の不足に起因する不確実性の構造化

Ignorance は情報や知識の不足に起因する不確実性であり、これが存在する場合、専門家は入手できている部分的情報を解釈し、それを演繹することによって欠けている情報を補完しシナリオや概念モデルを作ろうと試みる。この際、複数の「解釈」の余地が残される場合には、複数の補完方法（シナリオ、概念モデル）が共存することとなるが、その過程は、Randomness のように乱数によって機械的に表現できるものではない。このような補完過程は、選択枝の派生するプロセスであるが、その過程は完全に論理的に形式化可能なものではなく、どのような因子に着目するか、そして個々の選択枝にどの程度の相対的な確からしさを付与するか、には専門家としての経験や知識に加えて、より一般的な意味での価値観が反映される場合がある。

a) ロジックツリーによる複数の選択枝の表現

前述したように、地質環境モデル構築において、情報と知識の不足に起因する不確実性のために想定するシナリオやモデルあるいはパラメータ値についての複数の選択枝が派生する過程を表現する手法として、ロジックツリーを用いることとする。ロジックツリーの例を図 3.15 に示す。ここでは、花崗岩健岩部における個別割れ目の透水性に関する前提条件やモデルあるいはパラメータ値についての選択枝の派生が構造化されており、複数存在するツリーの端末は、それぞれ、ある特定の前提条件の下でのモデルあるいはパラメータを組み合わせた解析ケースに対応するものとなっている。また、それぞれの分岐においては、対応する選択枝の相対的な確からしさが主観確率として表現されており、解析ケース（ツリーの端末）の確からしさは、対応する選択枝の確率の積によって表現されることとなる。

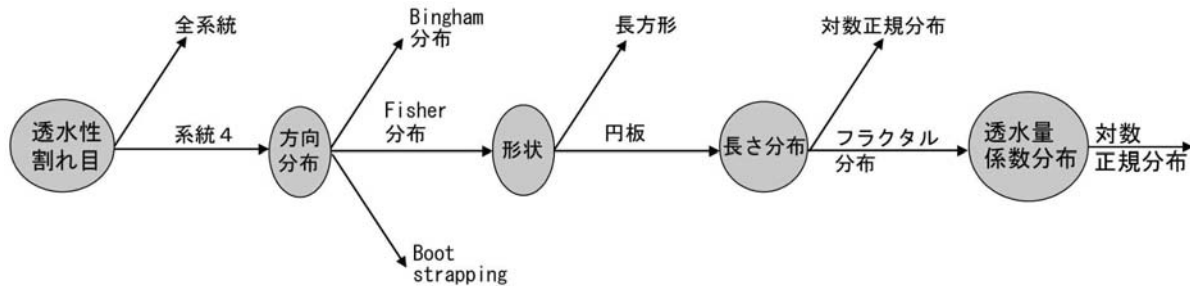


図 3.15 花崗岩健岩部における個別割れ目の透水性に関するロジックツリーの例

b) ESL による各選択枝の確からしさの評価

一般に、調査によって得られる地質環境データや情報は多面的なものであり、これらの中には誤差を顕著に含むものや相互に矛盾するものなどが介在する。そして、このような誤差の範囲や矛盾するデータに基づき構成される競合する仮説の存在が、地質環境モデルバリエーションが派生する原因と考えられる。ここで、各モデルバリエーションの確からしさを評価するためには、それぞれのバリエーションを導出する際に着目した情報（これらは当該モデルバリエーションを支持する証拠となる）のみならず、他のバリエーションを支持するような情報（これらは当該モデルバリエーションを否定する証拠となる）にも注目し、また、併せてこれらの証拠自体に含まれる不確実性も適切に考慮することが必要である。本手法では、このような要件を満足する評価方法として、Evidential Support Logic (ESL)^{18), 19)}を用いることを提案する。

ESL は次のような手順で適用される。

- i) 検討対象とする不確実な命題を、その真偽に影響を及ぼすような複数の補助命題に逐次細分化し、それぞれの補助命題の成立性についての確信の程度を判断するに参照する証拠 (Evidence) と対応付けられるレベルまで継続する。この作業によって、命題の真偽についての信頼性を判断するプロセスが樹形図として整理されることとなる (図 3.16)。
- ii) 樹形図の末端に位置する補助命題が真であることの確信の程度を、主観確率として、それぞれに対応する証拠に基づき入力する (図 3.17 参照)。
- iii) 樹形図の中の全ての分岐点において、個々の下位命題あるいは証拠についての確信の程度が上位の命題の信頼性に与える寄与の程度を、「十分性」、「重複性」および「必要性」の三つの指標 (後述) に基づき設定する (図 3.18 参照)。
- iv) ii および iii の入力に基づき、条件付き区間確率についての演算規則 (後述) を適用することにより、上位の命題についての確信の程度を順次算出していく (図 3.19 参照)。

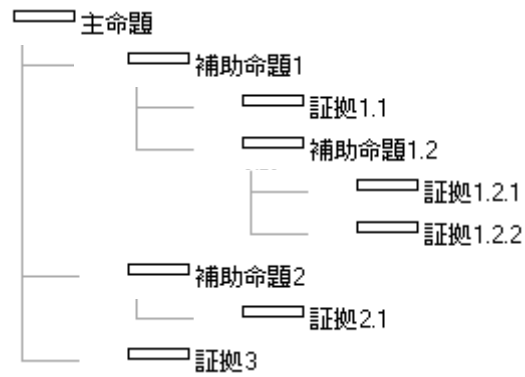


図 3.16 不確実性を有する主命題の信頼性の判断に関する階層プロセスモデルの例

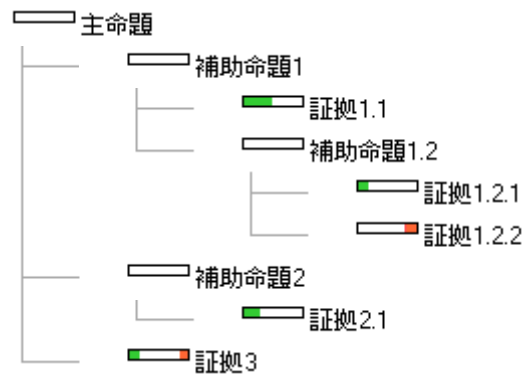


図 3.17 各証拠に基づく末端の補助命題の確信の程度（主観確率）の入力例

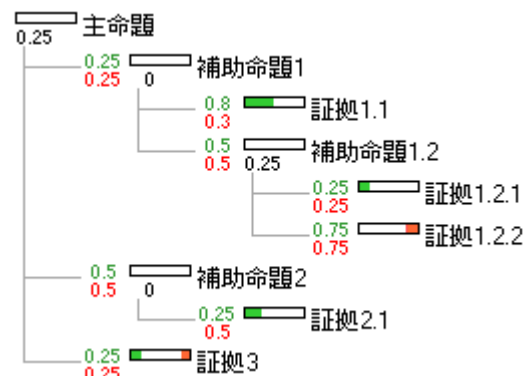


図 3.18 下位の補助命題あるいは証拠の上位命題の信頼性への寄与についての十分性および重複性を入力例

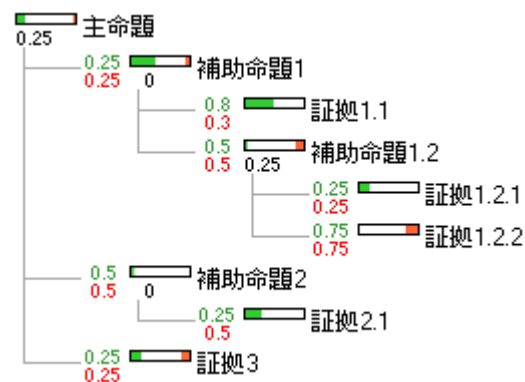


図 3.19 主命題の信頼性の評価例

図 3.19 における主観確率は、区間確率として定義される。区間確率理論は、古典的な確率論とは異なり、主観確率を区間推定として与えるために、その和が 1 となることを要請しない。例えば、ある命題の真偽に関する主観確率を古典的な確率論と区間確率理論のそれぞれで定義した場合、例えば図 3.20 のような結果が得られることとなる。

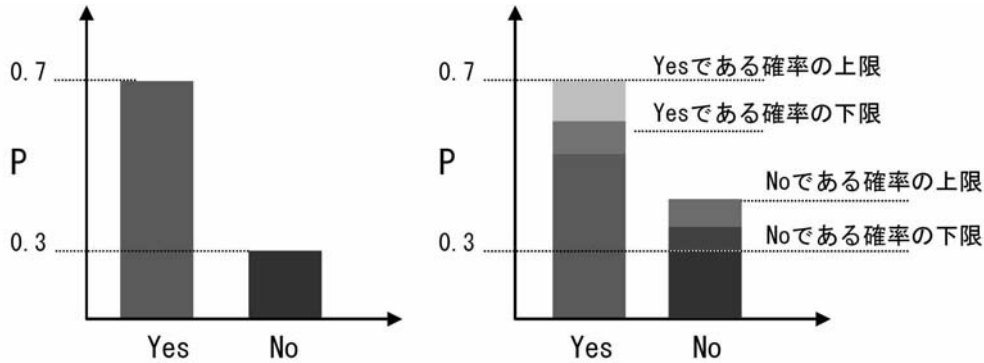


図 3.20 古典的な確率論（左）と区間確率理論（右）の比較

古典的な確率理論では、支持 (yes) と否定 (no) の和が 1 でなくてはならないのに対して、区間確率では、「どちらとも言えない」という不確実な領域が残ることとなる (図 3.21 参照)。

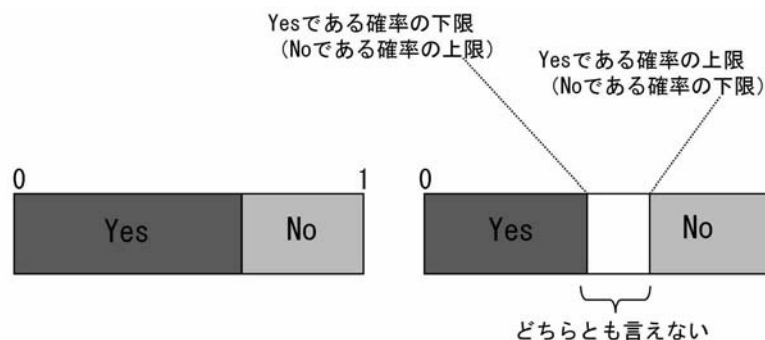


図 3.21 古典的な確率論（左）と区間確率理論（右）の比較（続き）

区間確率において、支持とも否定とも断定することのできない領域が残されることは、ファジー理論におけるメンバーシップ関数や Possibility 理論とも共通した性質であり、これは、人間の主観的判断に含まれる曖昧さを表現するための自由度であるとみなすことができる²⁰⁾。実際、検討の初期において関連する情報が少ない状況では、各補助命題に対して「どちらとも言えない」局面が多く、このような状況で敢えて支持あるいは否定に意見を振り分けることは恣意的な検討結果につながる可能性が否定できない。

前述の手順のうち、ii～ivにおける区間確率に対する演算の内容は以下の通りである。

簡単のため、上位の命題が二つの証拠（あるいは補助命題。以下の例では証拠として説明を進めるが、補助命題についても全く同じ演算規則が適用される）に対応付けられた状況を考え、証拠 1 が命題を支持する程度（主観確率）を $P(y_1)$ 、証拠 2 が支持する程度の主観確率を $P(y_2)$ 。この時、上位の命題が真である確率 $P(y)$ の下限は次式によって算出される。

$$P(Y) \geq P(Y|y_1)P(y_1) + P(Y|y_2)P(y_2) - P(Y|y_1 \cap y_2) \quad (3.10)$$

ここで、 $P(Y|y_1)$ 及び $P(Y|y_2)$ は、それぞれ証拠1および2が上位命題を100%支持している場合に上位の命題が真であることの条件付き確率である。ESLでは、この条件付確率をこれらの証拠の「上位命題が真であること」に対する十分性を示すものとみなす。実際、ある証拠が上位の命題に対して極めて直接的な関連を有している場合には、その証拠が支持している場合に実際に上位命題が真であることの確率は極めて高いものとなり、関連が間接的であったり曖昧であったりする場合にはその条件付確率は低いものと推定される。また、(式3.10)は、模式的にはベン図によって表現することができる(図3.22参照)。求める確率 $P(Y)$ は、同図における0の面積で表されるが、その面積を見積もるために証拠1および証拠2によって支持される領域を用いるということがESLの図形的な理解である。この図からもわかる通り、互いにあまり重複しないような多くの証拠で $P(Y)$ を覆うことがその確信の程度を向上するためには求められることとなる。また、 $P(y_1)$ および $P(y_2)$ はそれぞれ①および③の面積に対応しており、これに対して、条件付確率 $P(Y|y_1)$ 及び $P(Y|y_2)$ は、それぞれ、②の面積の①に対する割合および④の面積の③に対する割合であり、従って、右辺の $P(Y|y_1)P(y_1) + P(Y|y_2)P(y_2)$ は、②と④の面積の和を示すものと言することができる。この時、明らかに、②と④の面積の和は、⑤の面積を二重に足し合わせていることとなる。そこで、(式3.10)の右辺第三項にあるように $P(Y|y_1 \cap y_2)$ つまり⑤の面積を除すことが必要となる。

さて、右辺第三項である $P(Y|y_1 \cap y_2)$ は、二つの証拠が独立なものであっても存在し、その値は、積 $P(Y|y_1)P(y_1)P(Y|y_2)P(y_2)$ となり最小値をとる。他方、これは、二つの証拠が完全に従属の場合に最大となり、この場合には証拠1あるいは2のどちらか一方が他を包含することとなるため、 $\text{Min}[P(Y|y_1)P(y_1), P(Y|y_2)P(y_2)]$ となる。つまり、 $P(Y|y_1 \cap y_2)$ の大きさは二つの証拠の包含関係によって変動することとなり、以下の不等式が成立する。

$$P(Y|y_1)P(y_1)P(Y|y_2)P(y_2) \leq P(Y|y_1 \cap y_2) \leq \text{Min}[P(Y|y_1)P(y_1), P(Y|y_2)P(y_2)] \quad (3.11)$$

そこで、 $P(Y|y_1 \cap y_2)$ を次のように書き換えることとする。

$$\begin{aligned} P(Y|y_1 \cap y_2) &= \rho \text{Min}[P(Y|y_1)P(y_1), P(Y|y_2)P(y_2)] \\ \rho &\equiv \frac{P(Y|y_1 \cap y_2)}{\text{Min}[P(Y|y_1)P(y_1), P(Y|y_2)P(y_2)]} \end{aligned} \quad (3.12)$$

すると、明らかに $\text{Max}[P(Y|y_1)P(y_1), P(Y|y_2)P(y_2)] \leq \rho \leq 1$ が成立するため、さらに、

$$\rho = \lambda_{12} + \text{Max}[P(Y|y_1)P(y_1), P(Y|y_2)P(y_2)](1 - \lambda_{12}) \quad (3.13)$$

と書き換えることができる。つまり λ_{12} は証拠 1 および 2 の重複の程度をあらわすパラメータ（以下、重複性と呼ぶ）であり、完全に独立な場合に 0、完全に従属な場合に 1 をとる。

以上から、前出の式は次のように書き換えることができる。

$$P(Y) = \mu_1 P(y_1) + \mu_2 P(y_2) - \{\lambda_{12} + \text{Max}[\mu_1 P(y_1), \mu_2 P(y_2)](1 - \lambda_{12})\} \text{Min}[\mu_1 P(y_1), \mu_2 P(y_2)] \quad (3.14)$$

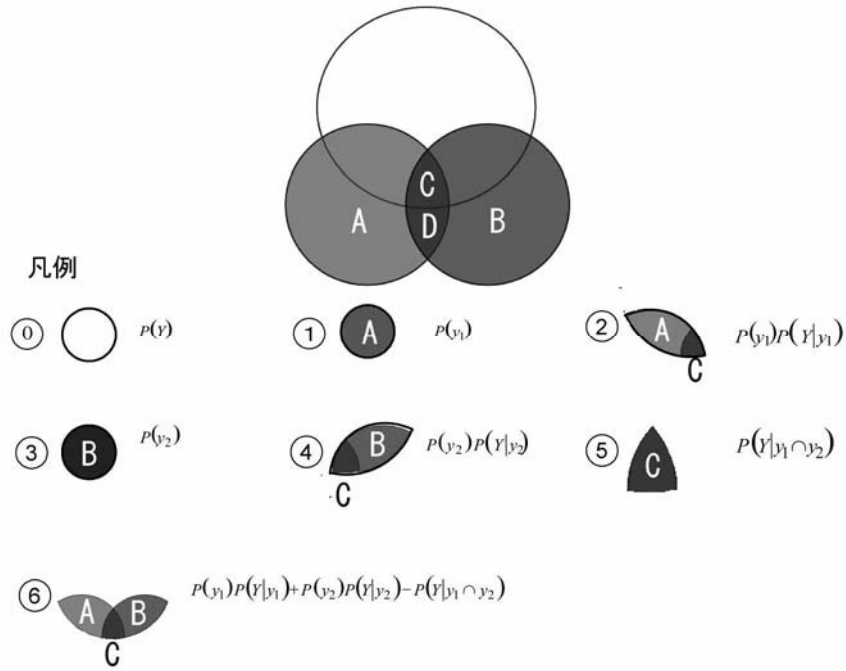


図 3.22 ESL 演算規則の図形的表現

但し、 μ_i , $i = 1, 2$ は証拠 i の上位の命題に対する十分性であり、 λ_{12} は二つの証拠の重複性を示す。上式を、補助命題 i が真である確率の下限 $P(\underline{y}_i)$ 、および上限 $P(\bar{y}_i)$ にそれぞれ適用することによって、上位命題が真であることの確率の上下限 $P(\underline{Y})$ 及び $P(\bar{Y})$ は以下のように算出される。

$$P(\underline{Y}) = \mu_1 P(\underline{y}_1) + \mu_2 P(\underline{y}_2) - \{\lambda_{12} + \text{Max}[\mu_1 P(\underline{y}_1), \mu_2 P(\underline{y}_2)](1 - \lambda_{12})\} \text{Min}[\mu_1 P(\underline{y}_1), \mu_2 P(\underline{y}_2)]$$

$$P(\bar{Y}) = 1 - \{\mu_1 (1 - P(\bar{y}_1)) + \mu_2 (1 - P(\bar{y}_2)) - \{\lambda_{12} + \text{Max}[\mu_1 (1 - P(\bar{y}_1)), \mu_2 (1 - P(\bar{y}_2))](1 - \lambda_{12})\} \text{Min}[\mu_1 (1 - P(\bar{y}_1)), \mu_2 (1 - P(\bar{y}_2))]\}$$

(3.15)

なお、この式は補助命題が3つ以上存在する場合に対しても容易に拡張することができる。また、必要性は、証拠あるいは補助命題のうちのいくつか、それが真でなければ上位命題が真ではあり得ない、つまり必要条件となっている場合の特例に対する措置である。この規則は、必要条件となっている証拠あるいは補助命題が真であることの確率の上下限が、算出された上位命題が真であることの上下限を下回る場合、必要条件となっている補助命題が真であることの確率の上下限によって置き換えることを要請するものである。

ESLの解析を通じて算出される各命題（特に主命題）の信頼性は、図3.23に示すRatio Plot¹⁹⁾として表現することができる。Ratio Plotは、「支持」、「否定」および「不確実」の主観確率の値に基づき、各命題についての評価結果を、（支持の確率）/（否定の確率）を縦軸（一般にログスケールが用いられる）の座標に、また、（不確実性の程度）を横軸の座標とした二次元座標上の点として表現したものである。Ratio Plotにおいて横軸よりも上の領域は各命題が対応する証拠によってどちらかといえば支持されていることを、また、逆に、横軸よりも下の領域は各命題が対応する証拠によってどちらかといえば否定されていることをそれぞれ表す。また、縦軸よりも右の領域は不確実性が存在していることを表し、左の領域は支持と否定の和が1を上回っており評価結果に自己矛盾が発生していることを表す。このような自己矛盾が生じている場合には、階層構造や諸パラメータの入力値を見直す必要がある。

Ratio Plotの右側の領域は4つの小領域に区分されている。例えば、AとA'の領域の境界線は、（支持の確率）－（否定の確率）＝（不確実性の程度）となる部分であり、Aの領域では（支持の確率）－（否定の確率）＞（不確実性の程度）が成立しており、この領域に含まれる命題は不確実性と比較して顕著に証拠によって支持されているものと考えられる。他方、A'の領域では（支持の確率）－（否定の確率）＜（不確実性の程度）であり、どちらかといえば支持されているがその判断には大きな不確実性が含まれることを意味する。同様に、BおよびB'の領域についても、それぞれ、そこに含まれる命題は、「不確実性と比較して顕著に証拠によって否定されている」および「どちらかといえば否定されているがその判断には大きな不確実性が含まれる」ものと考えられる。

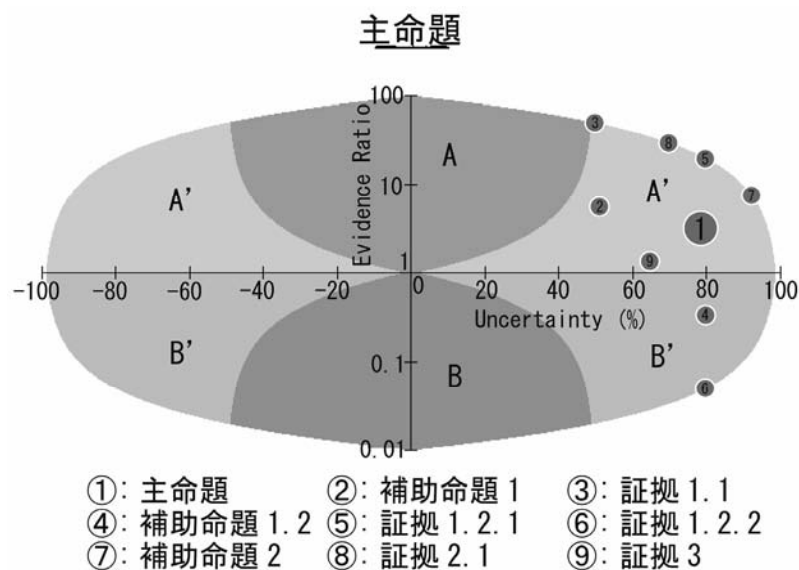


図 3.23 各命題の信頼性の Ratio Plot による表示例

④ Possibility 理論と確率論を組み合わせた二段階の不確実性解析

数学的には、Possibility もまた確率と同様に統計的サンプリングによって表現することができるが、このことは、このような操作が適切なものであることを意味するものではない。実際、情報や知識の不足に起因する不確実性である Ignorance が存在する場合、評価者は、不足している情報や知識を補って、可能性のあるいくつかの可能性を提示することとなり、この際、情報の不足によって複数存在する選択肢の派生はロジックツリーとして表現されることとなる。また、ロジックツリーの作成において可能性のある因果関係が全て網羅される場合には、情報と知識の不足に起因する不確実性は複数の選択肢の共存とこれらの間の相対的な確からしさとして表現され、ロジックツリーのそれぞれの端末に対応する解析ケースには現象のランダムさに起因する不確実性のみが残されることとなる。このような理想的な状況においては、各解析ケースに関してランダムさに対応した確率論的な解析を行い、これらの結果を情報と知識の不足に起因する不確実性を考慮して主観確率あるいは Possibility によって重み付けして表現することによって不確実性の全体像が表現されることとなる（図 3.24 参照）。ただし、実際には、情報と知識の不足に起因する不確実性を全てロジックツリーによって表現することが困難な場合もあり、この場合には、各解析ケースにおける主としてパラメータの因果関係の特定されていない（ただし全てがランダムであるとは保証できないような）不確実性においても二種類の不確実性が混在することとなる。このような場合には、各解析ケースにおけるパラメータの不確実性も頻度に基づく確率によって記述されるとは限らず、解析の用途に応じて主観確率や Possibility による表現を採用する必要がある場合がある。

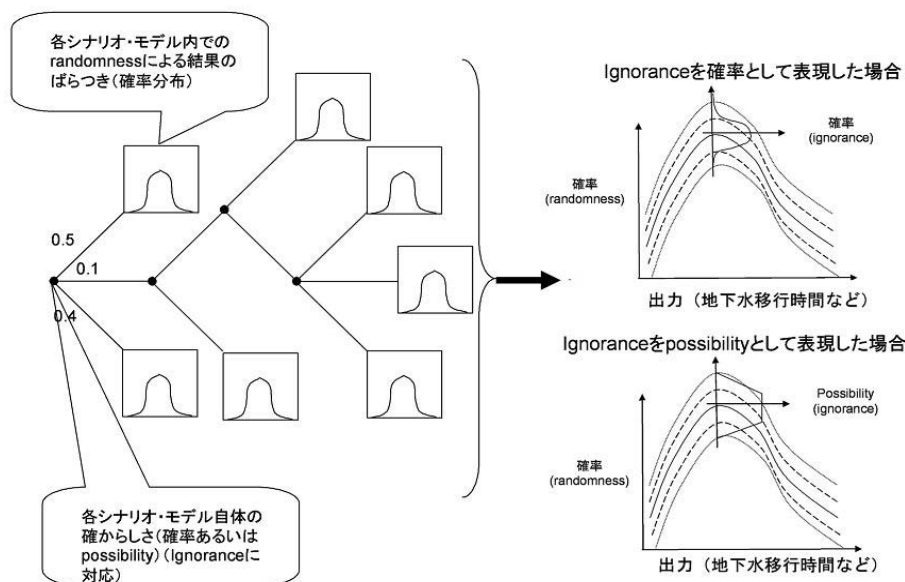


図 3.24 Possibility 理論と確率論を組み合わせた二段階の不確実性解析の手法

(3) 次段階の調査・研究計画立案の支援

評価は、地質環境調査の進展に伴い、反復的に実施すべきものであり、このような反復の各段階に

において評価結果に影響を及ぼすような地質環境モデルバリエーションの範囲を絞り込む（不確実性を低減する）ことが、評価の信頼性向上を図る上で極めて重要である。前述した ESL を用いて各モデルバリエーションの確からしさの評価を行う場合、それぞれの評価結果に含まれる不確実性の大きさは、主命題についての評価結果の区間確率に含まれる不確実性（図中の白い区間）として表現されることとなる。従って、前述したモデルバリエーションの絞り込みとは、評価結果への感度と言う観点から重要なモデルバリエーションの中で、より確からしい選択肢についての ESL 評価結果に含まれる不確実性が多様な証拠による支持という形で解消され、他方、より確からしくない選択肢についての ESL 評価結果に含まれる不確実性が多様な証拠による否定という形で解消されることにより、評価がいずれの選択肢に立脚すべきかについての曖昧さが低減されることを意味する。

以上のような観点から、次段階における調査・研究計画立案の支援としては、現段階での不確実性をより効果的に低減することの可能な新たな証拠を入手できる可能性のある調査・研究項目に優先順位を与えることが必要となる。この目的のためには、図 3.25 に例示する Tornado Plot¹⁹⁾を用いることができる。Tornado Plot は、末端に位置する各証拠についての判断結果に含まれる不確実性（特に、未入手の証拠については 100%不確実なものとみなされる）を単位量（例えば 1%）減らすことができたとなると、最上位の主命題の評価結果に含まれる不確実性がどの程度低減されるかを比として表したものである。検討の初期段階では多くの証拠は未入手であり、ESL の評価結果もほとんど不確実性が支配するような場合が多い。しかしながら、そのような状況でも、十分性や必要性といった（未入手の）証拠の本来の特徴が把握できれば Tornado Plot による感度解析を行うことは可能であり、この結果に基づき、次段階の調査・研究計画の優先順位付けをすることができる。ここで注意すべき点は、Tornado Plot は、各証拠の不確実性が低減できた場合の効果を評価するものであり、不確実性低減そのものの難易度や可能性については何ら考慮されていないことである。このため、調査・研究計画の優先順位付けを行うためには、Tornado Plot によって表現される不確実性低減への感度（効果）と、各調査・研究項目の実施上の難易度や経費等を併せて考慮に含めることが重要となる。

以上に基づき本研究で提案する不確実性を考慮した評価の手順は、図 3.26 に示すものとなる。

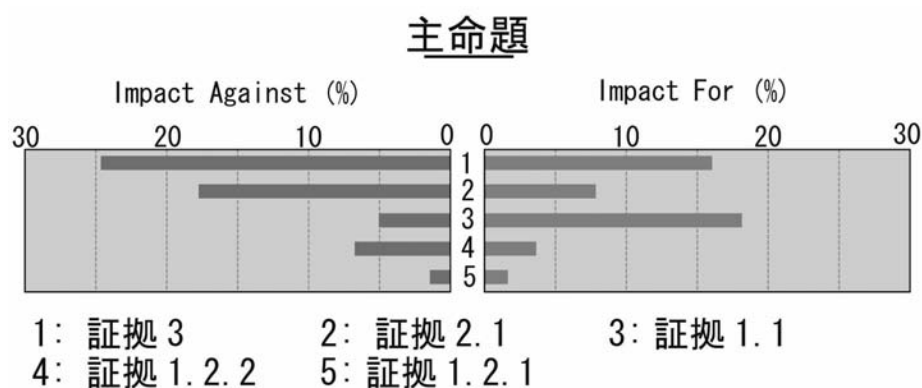


図 3.25 Tornado Plot による感度解析結果の例

（主命題の支持の確率増大のためには証拠 3 と証拠 1.1 を、
また、主命題の否定の確率増大のためには証拠 3 と証拠 2.1 を入手することが有効であることを示す）

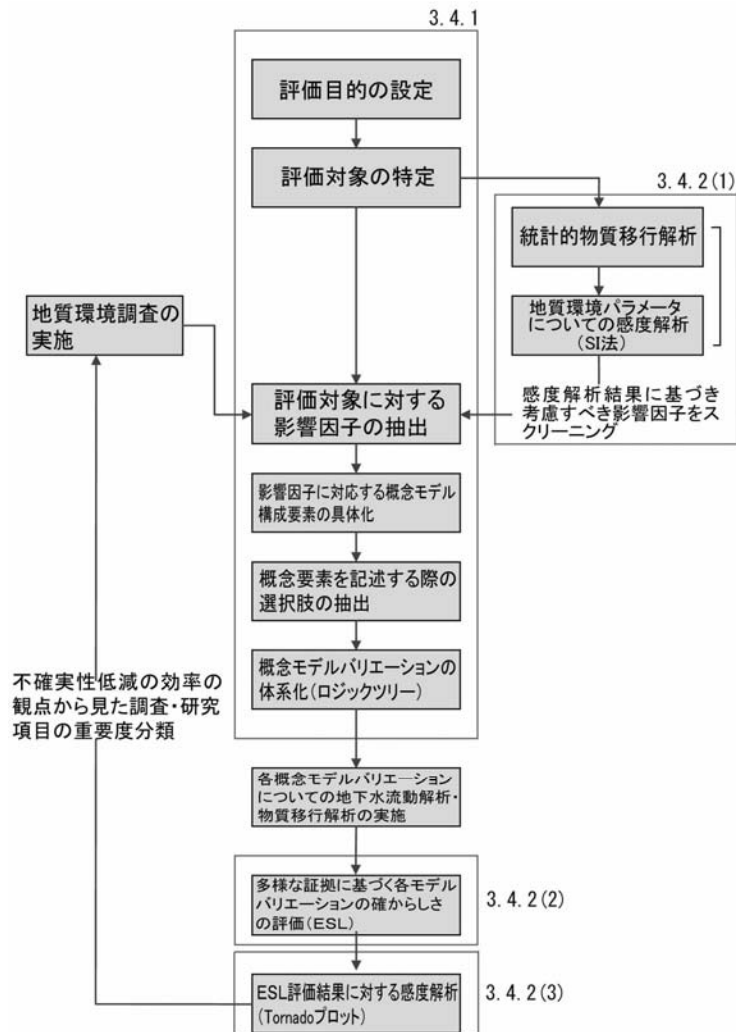


図 3.26 地質環境モデルに付随する不確実性評価の手順

3.5 参考文献

- 1) Ayyub, B. M., and Klir, G. J. : Uncertainty Modeling and Analysis for Engineers and Scientists. Chapman & Hall/CRC, Press Boca Raton, FL, 2006.
- 2) 下嶋 篤 : 情報と知識, ナレッジサイエンス, 紀伊國屋書店, pp. 72-75, 2001.
- 3) Nonaka, I. and Takeuchi, H. : The Knowledge Creating Company, Oxford University Press, p. 56, 1995.
- 4) Klir, G. : Developments in Uncertainty Based Information, Advanced in Computers, Academic Press, pp. 255-322, 1993.
- 5) Ayyub, B. M., and Klir, G. J. : Uncertainty Modeling and Analysis for Engineers and Scientists, Chapman & Hall/CRC, Press Boca Raton, FL, pp. 246-248, 2006.
- 6) Ayyub, B. M., and Klir, G. J. : Uncertainty Modeling and Analysis for Engineers and Scientists, Chapman & Hall/CRC, Press Boca Raton, FL, p. 238, 2006.
- 7) G. E. Apostolakis, C. Guedes Soares, S. Kondo, J. C. Helton, M. G. Marietta: Reliability Engineering & System Safety (Special Issue-The 1996 performance assessment for the Waste Isolation Pilot Plant), ISSN:0951-8320, Vol. 69, No. 1-3, 2000.
- 8) SKI: The Swedish Nuclear Power Inspectorate's Regulations concerning Safety in connection

- with the Disposal of Nuclear Material and Nuclear waste, SKIFS 2002:1, p.10, 2001.
- 9) US EPA:Public Health And Environmental Radiation Protection Standards For Yucca Mountain, Nevada, USA, The Environmental Protection Agency, 40CFR197, Supplementary Information, p.32091, 2001.
- 10) 核燃料サイクル開発機構：地質環境の不確実性評価技術の基礎研究, JNC TJ-8400 2001-010, 2001.
- 11) 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1 わが国の地質環境, JNC TN1400 99-021, 1999.
- 12) Turcotte, D.L.: Fractals and Chaos in Geology and Geophysics Second Edition, Cambridge University Press, pp.28-55, 1997.
- 13) 何森仁：「パソコン数学博物館-Word と Excel で三角形から動く微積分まで」, 東京図書株式会社
- 14) Reiss, R. D. and Thomas, M.: Statistical Analysis of Extreme Values, Birkhäuser, pp.14-23, 2001.
- 15) 三木崇史, 小山田潔, 池田孝夫：包括的感度解析ツールの体系化・高度化, JNC TJ8400 2003-053, 2003.
- 16) Ferson S., and Ginzburg L. R. : Different methods are needed to propagate ignorance and uncertainty, Reliability Engineering and System Safety, Vol. 54, pp.133-144, 1996.
- 17) Hofer E. : When to separate uncertainties and when not to separate, Reliability Engineering and System Safety, Vol. 54, pp.113-118, 1996.
- 18) 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.
- 19) 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志決定用評価ツール」, KaTRI リーフレット 2002-27, 2002.
- 20) Ayyub, B. M., and Klir, G. J. : Uncertainty Modeling and Analysis for Engineers and Scientists. Chapman & Hall/CRC, Press Boca Raton, FL, p.211, 2006.

4. 体系化した不確実性評価手法に基づく評価事例の整理

4.1 評価事例の整理方法

4章では、3章で体系化した「地質環境モデルに付随する不確実性評価の手順（図4.1参照）」に沿って、評価事例を選定し、整理を行った。評価事例については、これまでに実施した地質構造のモデル化および地下水流動解析結果、もしくは関連する文献から該当する部分を、個別に抽出している。

図4.1の手順には、以下の12項目が含まれている。実施計画書に示す「(1)具体的な不均質地質環境モデル構築の手順」は下記の⑥～⑫に、「(2)Possibility 理論と確率論を併用した二段階モンテカルロシミュレーション」は下記の⑩に該当している。ここで、③、④と⑤の評価事例に関しては、不確実性評価の手順の主要検討項目ではないため、対象外とした。ただし、⑤に関連する原位置調査手法については、5章において一部検討している。

① 評価目的の設定

☐ : 本整理の対象外

② 評価対象の特定

③ 統計的物質移行解析

④ 地質環境パラメータについての感度解析 (SI)

⑤ 地質環境調査の実施

- ⑥ 評価対象に対する影響因子の抽出
- ⑦ 影響因子に対応する概念モデル構成要素の具体化
- ⑧ 概念要素を記述する際の選択枝の抽出
- ⑨ 概念モデルバリエーションの体系化（ロジックツリー）
- ⑩ 各概念モデルバリエーションについての地下水流動解析・物質移行解析の実施
- ⑪ 多様な証拠に基づく各モデルバリエーションの確からしさの評価（ESL）
- ⑫ ESL 評価結果に対する感度解析（Tornado Plot）

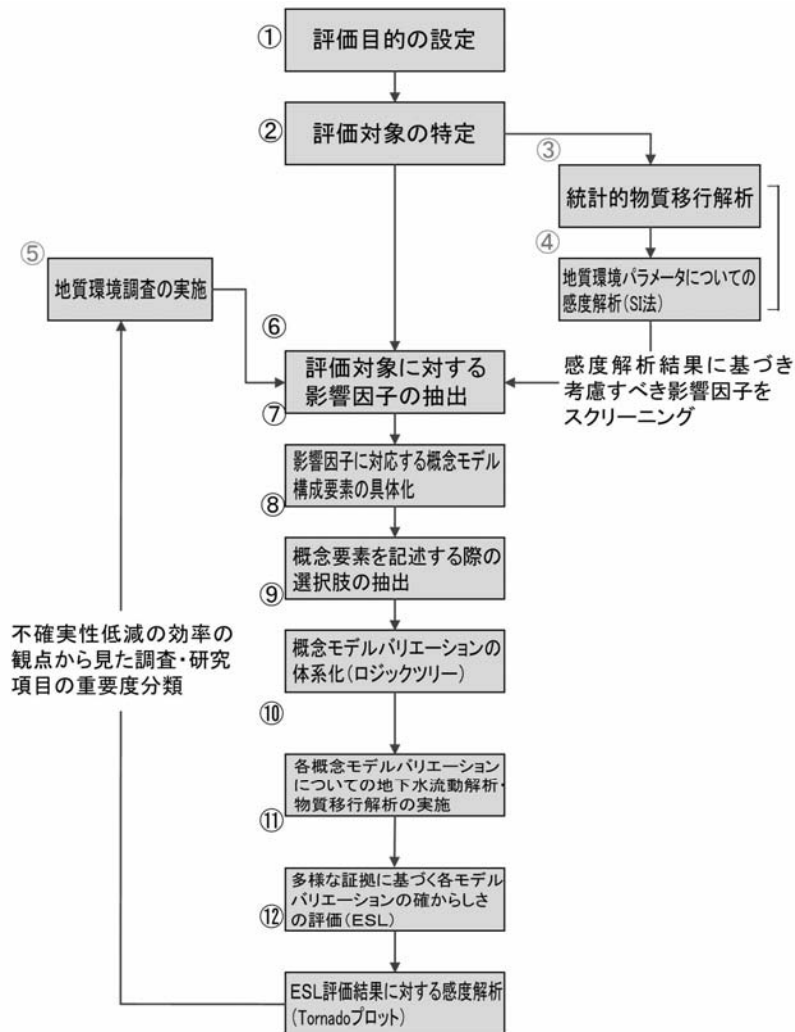


図 4.1 地質環境モデルに付随する不確実性評価の手順

4.2 評価目的の設定（①）と評価対象の特定（②）

地質環境モデルは、一般に次の手順で構築される¹⁾。

- 地質学的・水理学的・地化学的・岩盤力学的解釈などに基づき、目的を満足するために表現すべき要素の抽出
- 表現すべき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などのパラメータの設定

この手順に示す通り、地質環境モデルを構築するためには、先ず目的の設定が不可欠である。この目的には、この地質環境モデルを何のために構築するのか？（評価目的の設定）と、具体的に何を指標とするのか？（評価対象の特定）が含まれることになる。

評価目的の設定と評価対象の特定はプロジェクト毎に決めるべきものであるため、ここでは評価事例ではなく、設定に向けた注意事項を取りまとめた。

4.2.1 評価目的の設定（①）

地下水流動特性に関する評価の目的には、立坑や水平坑道掘削時の総湧水量の評価や、坑道周辺の物質移行特性評価などがある。しかし、その目的によっては、地下水流動に関する評価方法も異なり、当然の事ながら表現すべき要素なども異なってくる。

例えば、フィンランドの高レベル放射性廃棄物地層処分の実施主体である POSIVA は、図 4.2 に示す地下研究施設掘削による水理学的影響評価（周辺領域での地下水位の低下、地下研究施設への湧水量、および塩水分布の評価）を行うため、3次元の有限要素法を用いた数値解析²⁾を行っていたが、その後、新しく得られた情報を用いて実施した施工管理の一環となる地下研究施設への湧水量の算定は、図 4.3 に示す理論解を用いて実施している³⁾。

このように目的によって適用すべき手法も異なってくるため、明確な評価目的の設定は不可欠である。

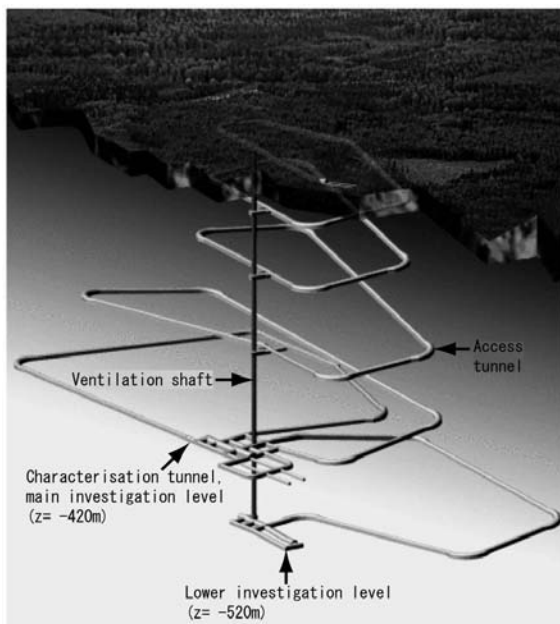


図 4.2 地下研究施設 ONKALO²⁾

The water inflow into tunnel/shaft without grouting was calculated as follows:

$$Q = \frac{2\pi K L H}{\ln\left(\frac{R_0}{R_i}\right)} = \frac{2\pi T H}{\ln\left(\frac{R_0}{R_i}\right)}$$

And the water inflow into tunnel/shaft after grouting was calculated as follows:

$$Q = \frac{2\pi K_i L H}{\ln\left(\frac{R_i+t}{R_i}\right) + \frac{K_i}{K} \ln\left(\frac{R_0}{R_i+t}\right) + \xi} = \frac{2\pi T_i H}{\ln\left(\frac{R_i+t}{R_i}\right) + \frac{T_i}{T} \ln\left(\frac{R_0}{R_i+t}\right) + \xi}$$

Here it is assumed that the shaft forms the inner well and the grouted zone forms an outer well.

In the equations Q = inflow (m^3/s), K = hydraulic conductivity (m/s), K_i = hydraulic conductivity after grouting (m/s), L = length of the leaking section (m), $T (=KL)$ = transmissivity (m^2/s), $T_i (=K_i L)$ = transmissivity after grouting (m^2/s), H = groundwater pressure expressed as the height of the water column (m), R_i = radius of the tunnel/shaft (m), R_0 = influence radius of the flow (m), t = thickness of the grouted zone (m), ξ = skin-effect.

図 4.3 ONKALO の湧水量予測に用いた理論解³⁾

4.2.2 評価対象の特定（②）

具体的な評価対象（指標）の設定は、前述した評価目的に対応して地質環境モデル構築の前提条件となる。この評価指標は、図 4.4 に示すように地質環境パラメータについての感度解析（SI）にも活用され、考慮すべき影響因子のスクリーニングにも不可欠なものである。同図においての指標は地下水の移行時間となっている。このように評価指標は、数値解析の出力であることが望まれる。

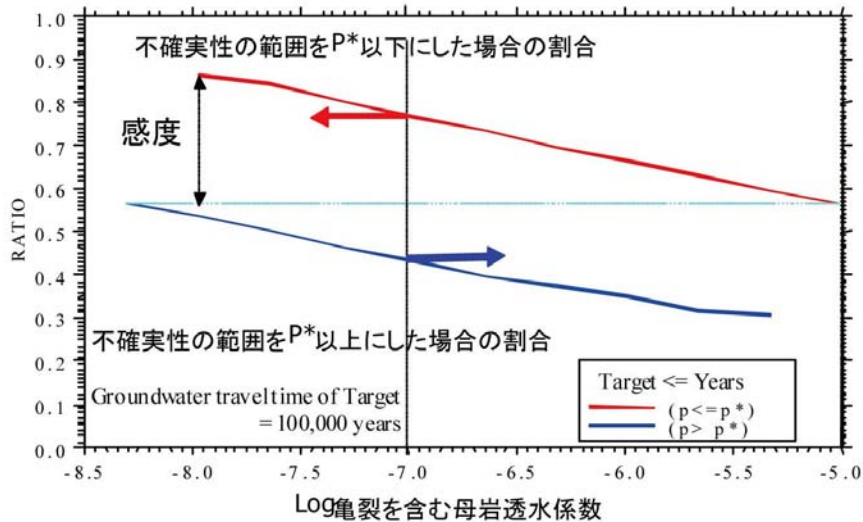


図 4.4 SI 法による感度解析の例

4.3 評価対象に対する影響因子の抽出 (⑥) から ESL 評価結果に対する感度解析 (⑫)

⑥～⑫の評価事例に関しては瑞浪超深地層研究所を含む周辺領域（以下、モデル化領域）で実施した水理地質構造モデル構築の各段階での研究成果を用いて、整理を行った。整理においては、各段階での考慮すべき内容に留意し、一事例ずつ個別に取りまとめている。

4.3.1 評価目的および前提条件となる評価対象

各段階での評価事例を整理するにあたり、一連の検討の評価目的と前提条件となる評価対象（指標）を以下のように設定した。評価目的はモデル化領域基盤岩深部（土岐花崗岩健岩部分布範囲，図 4.5 参照）の低透水部における物質移行特性評価の基礎資料となる地下水流動特性である。そのため、具体的な評価指標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となる。

図 4.1 で示した地質環境モデルに付随する不確実性評価の手順を実際に用いる場合は、統計的物質移行解析結果に基づく地質環境パラメータについての感度解析（SI 法）の結果を用いて、考慮すべき影響因子のスクリーニングに関する情報を事前に整理しておくことが望ましい。

この評価目的および前提条件となる評価対象は、全評価事例において共通のものである。

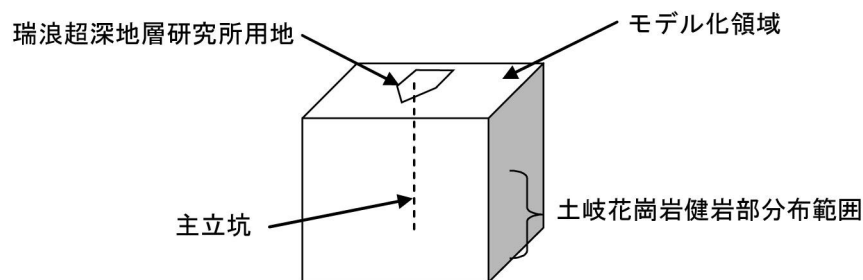


図 4.5 モデル化領域基盤岩深部 (1km×1km×1km)

4.3.2 評価対象に対する影響因子の抽出 (⑥)

上述した、評価対象とする現象に関して着目する指標（ダルシー流速および地下水移行時間）についての評価を、目的（物質移行特性評価）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、不均質場においては、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 4.6 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ている。以下に、評価事例を示す。

(1) 評価事例

モデル化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 4.6 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、周囲の高透水性部から離れた 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。このような考えに基づき、評価指標を主命題としてトップダウン的に階層構造を構築し、影響因子を抽出した結果の例が図 4.7 である。

実際の適用において評価目的と評価対象が前述したものと異なる場合は、上記した内容と同様の手順にて、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となる。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である。

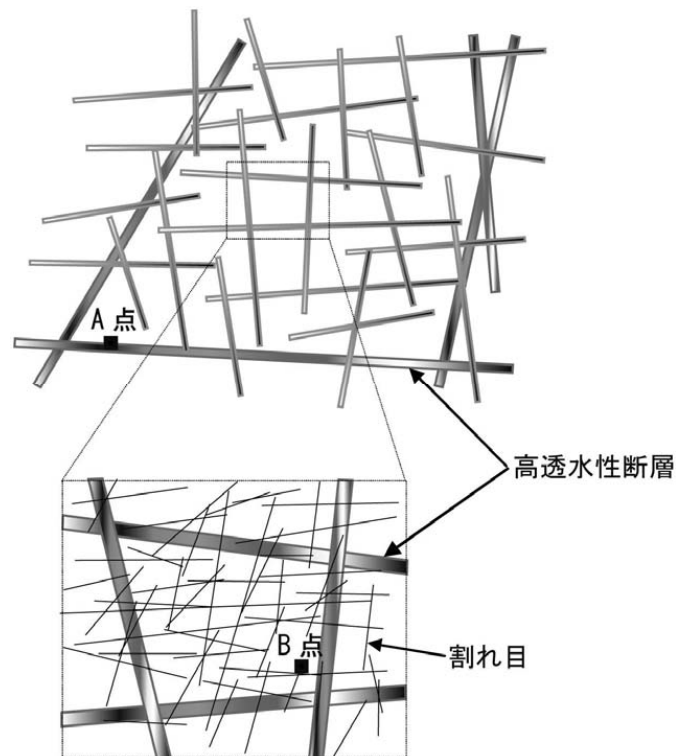


図 4.6 局所的な支配的移行経路のマルチスケールな階層構造の概念

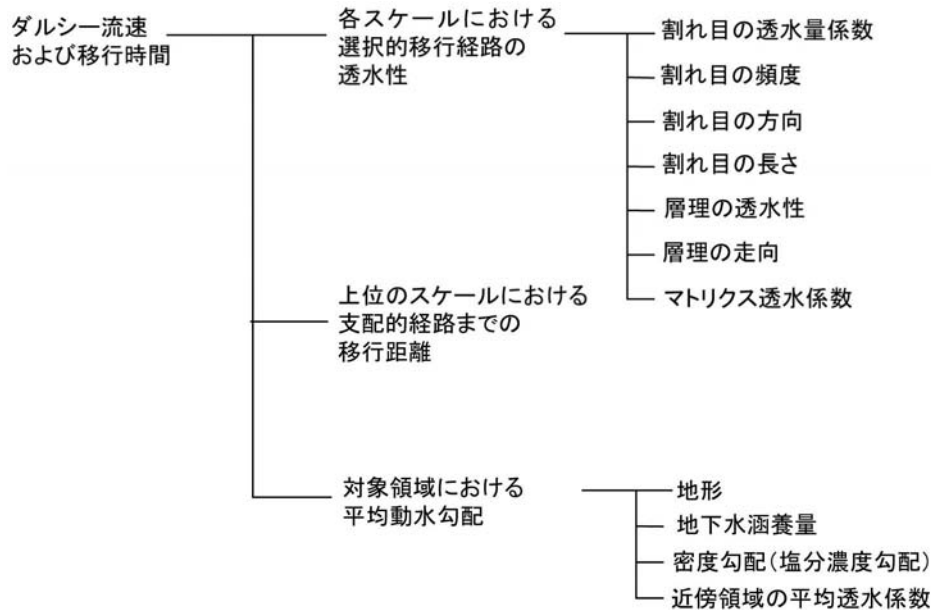


図 4.7 ダルシー流速およびダルシー流速に基づく地下水移行時間に対する影響因子

4.3.3 影響因子に対応する概念モデル構成要素の具体化 (⑦)

次に、モデル化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具体化する必要がある。具体化された概念モデル構成要素の例を表 4.1 に示す。同表は横軸に図 4.7 で整理したサイトジェネリックな影響因子を、縦軸には対象領域におけるサイトスペシフィックな地質環境の要素を示す。以下に、地質環境の要素の抽出と、その重要度の評価過程の例を示す。

(1) 評価事例

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、モデル化領域基盤岩深部の低透水性部における地下水流動の理解という目標の下に、ここでの評価事例では、先ずこの花崗岩健岩部に着目している。

各ボーリング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 5 つの系統（低角割れ目（系統 L）、および 4 方向の高角割れ目（系統 A～D））に区分される（図 4.8 参照）。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本数についての相関分析から、MIZ-1 号孔においては系統 A および B の割れ目が、また、DH-15 号孔においては系統 L（低角）および B（高角）の割れ目がそれぞれ透水性を支配するものであると推定されている⁴⁾。また、各ボーリング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 4.6 に示すようなマルチスケールの階層構造を示すことが唆されている。

上記の検討に基づき、地質環境の要素の抽出と、影響因子に基づきその重要度を評価した事例が表 4.1 である。同表の太字（ゴシック）が、影響因子の観点で重要度が高い地質環境の要素（具体化された概念モデルの構成要素）である。

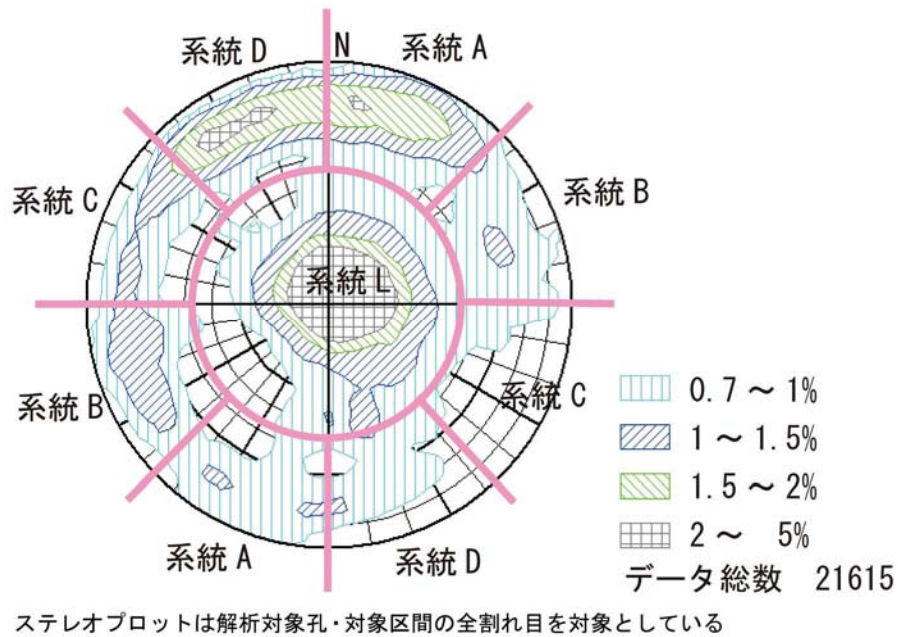


図 4.8 割れ目の方向による系統分けの例
(シュミットネット下半球投影)

表 4.1 各影響因子に着目したモデル化領域の基盤岩における概念モデル構成要素の具体化

地質環境の要素			影響因子	割れ目				マトリクス透水性
				透水量係数	頻度	方向	長さ	
花崗岩 健岩部	個別 割れ目	系統L	中	低と高	低角	—	—	
		系統A	中	中	高角 WNW	—	—	
		系統B	大	中と高	高角 NNW	—	—	
		系統C	小	低と高	高角 NNE	—	—	
		系統D	小	低と高	高角 ENE	—	—	
	マトリクス		—	—	—	—	小	

このように、本手順では地質環境調査結果の解釈に基づき概念モデルの構成要素を具体化する。実際は考慮すべき全ての影響因子に対し、具体化を実施することとなる。ここでは、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。次ステップの「概念要素を記述する際の選択肢の抽出 (⑧)」は、この結果を用いて実施する。

4.3.4 概念要素を記述する際の選択肢の抽出 (⑧)

次に、本手順では前項で具体化された各構成要素に対して、概念要素を記述する際の選択肢の抽出、つまりモデルオプションを具体化する必要がある。以下に、花崗岩健岩部中の個別割れ目としてモデル化する「透水性割れ目のモデルオプション」と「その割れ目の透水量係数分布のモデルオプション」に関する評価事例を示す。特に、「割れ目の透水量係数分布のモデルオプション (透水量係数分布の算

術平均値算定)」に関する評価事例は、今後割れ目の透水量係数分布の算術平均値算定において常に考慮すべきオプションになると考えられる。

ここで抽出される「概念要素を記述する際の選択肢（モデルオプション）」が複数存在し得ることは、3章で示した Possibility 理論で表現すべき不確実性が残存していることを示している。4.3.6項で後述される二段階モンテカルロシミュレーション（図 4.9 参照）では、4.2項で前述した地質環境モデルの構築手順と関連し、Possibility 理論の不確実性として表現すべき要素（概念モデル）と入力パラメータ、および確率論の不確実性として表現すべき入力パラメータに分類している。Possibility 理論の不確実性として表現される各選択肢の確からしさの評価は、「多様な証拠に基づく各モデルバリエーションの確からしさの評価（ESL）（Ⅺ）」で実施される。

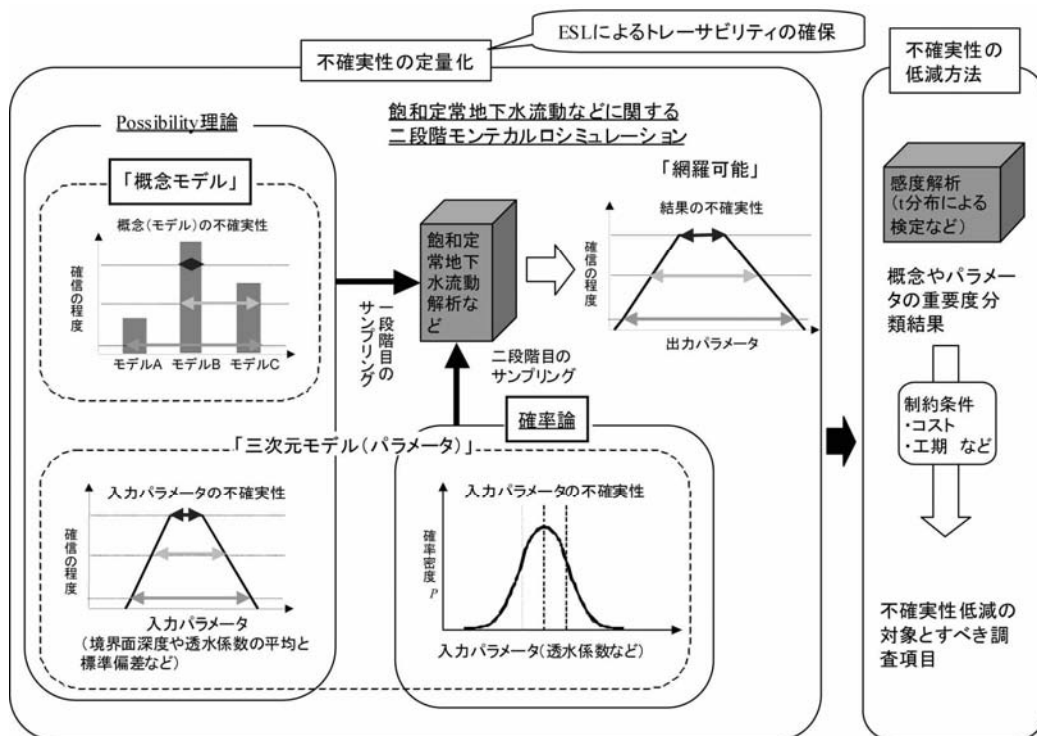


図 4.9 二段階モンテカルロシミュレーションの概要⁵⁾（一部加筆）

(1) 評価事例

① 個別割れ目

a) 透水性割れ目のモデルオプション

すでに述べた割れ目方向性の分類・各系統の割れ目本数と水理試験結果との相関分析から、MIZ-1 号孔においては系統 A および B の割れ目が、また、DH-15 号孔においては系統 L および B の割れ目がそれぞれ透水性を支配するものであると推定されている⁴⁾。このため、透水性割れ目としては、

- ・系統 A および B の高角割れ目（開口）
- ・系統 L の低角割れ目および B の高角割れ目（開口、明瞭、ヘアークラック）

という二つの可能性が考えられる。そのため、これら二つがモデルオプションとなり、これらは Possibility 理論の不確実性として表現すべき概念モデルに分類される。

b) 割れ目の透水量係数分布のモデルオプション

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モデル候補として考えることとする。なお、この際、透水量係数分布の形状（ある特定の割れ目の透水量係数を一意に決定できない；確率論で表現すべき不確実性）を規定するものとして、以下の2項目についてそれぞれモデルオプションを考えることとする。

ここで割れ目透水量係数分布の算術平均値と対数標準偏差のモデルオプションは、Possibility 理論の不確実性として表現すべき入力パラメータに分類される。割れ目の透水量係数分布のモデルオプションにより表現される対数正規分布からのサンプリングによるリアライゼーションの違いは、確率論の不確実性として表現すべき入力パラメータに分類されることになる。

i) 割れ目透水量係数の算術平均値

既に述べたように、MIZ-1 号孔および DH-15 号孔における水理試験結果と当該区間に含まれる透水性割れ目の本数についての回帰分析（図 4.10 参照）から、水理試験結果として得られた透水量係数 T は、割れ目の本数 N によって、

$$T = a N^b \quad (4.1)$$

の形式で近似することができる。この式から、個々の割れ目の透水量係数の算術平均を導出する際の考え方としては、以下の2つのものがある。

- ・ $N=1$ の場合の推定値を用いる方法；(4.1)式で $N=1$ を代入すると、単一の割れ目のみを有する区間での透水量係数が得られることから、これを当該割れ目の透水量係数とみなすことによって算術平均値 $\bar{T}$ が得られる。なお、このような推定値は、MIZ-1 号孔および DH-15 号孔についてそれぞれ算出されることからこれらが具体的な候補となる。

$$\bar{T} = a \quad (4.2)$$

- ・十分に大きな N についての推定値を用いる方法；(4.1)式による回帰結果では、MIZ-1 号孔においても DH-15 号孔においても b が 1 よりも大きな数値となっており、このことの一つの解釈としては、 N が小さい即ち割れ目頻度の低いネットワークでは相互の連絡性が悪いのに対して割れ目頻度が増大すると連絡性が向上するために、割れ目頻度に対して超線形に透水量係数が増加するという傾向が生じていると考えることも出来る。そして、このように考えた場合には、上記の $N=1$ の場合の推定値は、低頻度の割れ目ネットワークの連絡不足まで含めた実効的な透水量係数を意味することとなる。そして、この仮説においては、むしろ(4.3)の式によって十分に大きな割れ目本数 N^* に基づき算術平均値 $\bar{T}$ を算出することが適切と考えられる。なお、ここで、

MIZ-1 号孔と DH-15 号孔においてそれぞれ想定される開口割れ目の頻度が大きく異なることから、MIZ-1 号孔の場合には $N^*=10$ 、DH-15 号孔の場合には $N^*=100$ とそれぞれ想定することとした。

$$\bar{T} = \frac{a(N^*)^b}{N^*} \quad (4.3)$$

ii) 割れ目透水量係数の対数標準偏差

MIZ-1 号孔については開口割れ目の本数が少ないために分散分析により対数標準偏差を推定することはできていない。しかし、DH-15 号孔については解析的検討により、対数標準偏差として 1~1.5 程度を考えることの蓋然性が高いものと考えられることから、これらの数値を候補として想定することとする。このように、本手順では概念要素を記述する際の選択肢の抽出、つまりモデルオプションを具体化する。モデル化すべき概念要素が明らかになっていても、それを表現する方法は必ずしも一意に決定しないため、本手順が示すようにモデルオプションが複数存在することとなる。具体化されたモデルオプションは、次ステップの「概念モデルバリエーションの体系化（ロジックツリー）(⑨)」において、組み合わせを踏まえ、実施すべき地下水流動解析・物質移行解析のモデルバリエーションとなる。

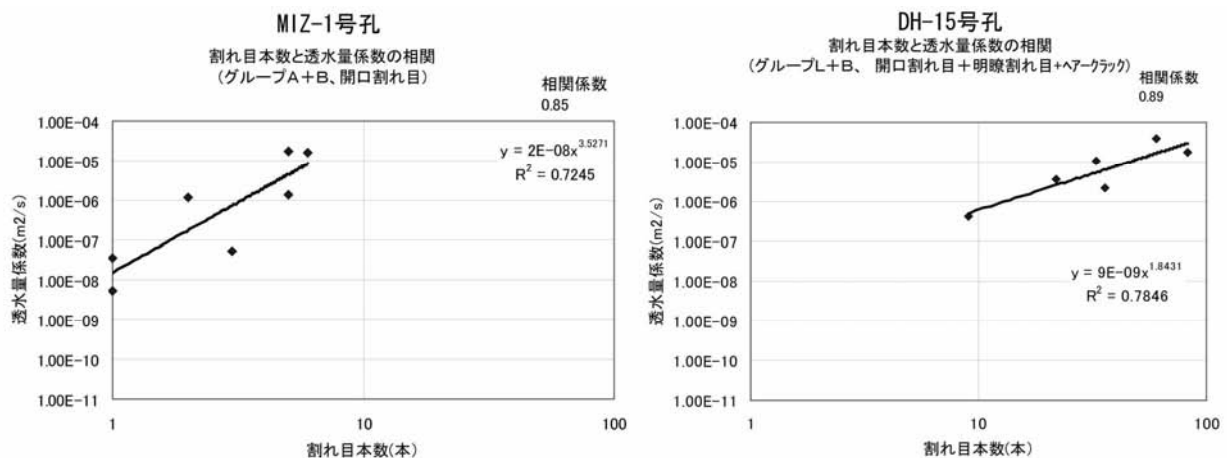


図 4.10 MIZ-1 号孔と DH-15 号孔における割れ目グループの組合せによる割れ目本数と透水量係数の関係

4.3.5 概念モデルバリエーションの体系化（ロジックツリー）(⑨)

次に、本手順では前項で具体化した概念モデル構成要素としての各モデルオプションに対して、そのオプションを組み合わせることにより、Possibility 理論の不確実性を表現するモデルバリエーションを体系化する。以下に、評価事例として前項で抽出した花崗岩健岩部の個別割れ目についてのモデルオプションに対して、ロジックツリーを用いモデルバリエーションを体系化した例を示す。

(1) 評価事例

花崗岩健岩部の個別割れ目に対するモデルバリエーションを体系化するためには、「透水性割れ

目」と「その割れ目の透水量係数分布（対数正規分布であることを前提とし、その透水量係数分布の算術平均値と対数標準偏差）」のモデルオプションの組み合わせを考慮する必要がある。モデルオプションの組み合わせは、ロジックツリーの分岐により整理できる。図 4.11 にロジックツリーを用いたモデルバリエーションを示す。同図では、最初に「透水性割れ目」としてのモデルオプションの分岐があり、次に「割れ目の透水量係数分布」に関するモデルオプションの分岐が続き、最終的には Possibility 理論の不確実性を表現する 16 個のモデルバリエーションを構築している。

このように、本手順では概念モデルバリエーションの体系化（ロジックツリー）を行う。体系化されたモデルバリエーションは、次ステップの「各概念モデルバリエーションについての地下水流動解析・物質移行解析の実施（⑩）」に用いられると共に、「多様な証拠に基づく各モデルバリエーションの確からしさの評価（⑪）」と「ESL 評価結果に対する感度解析（⑫）」に活用されるものである。

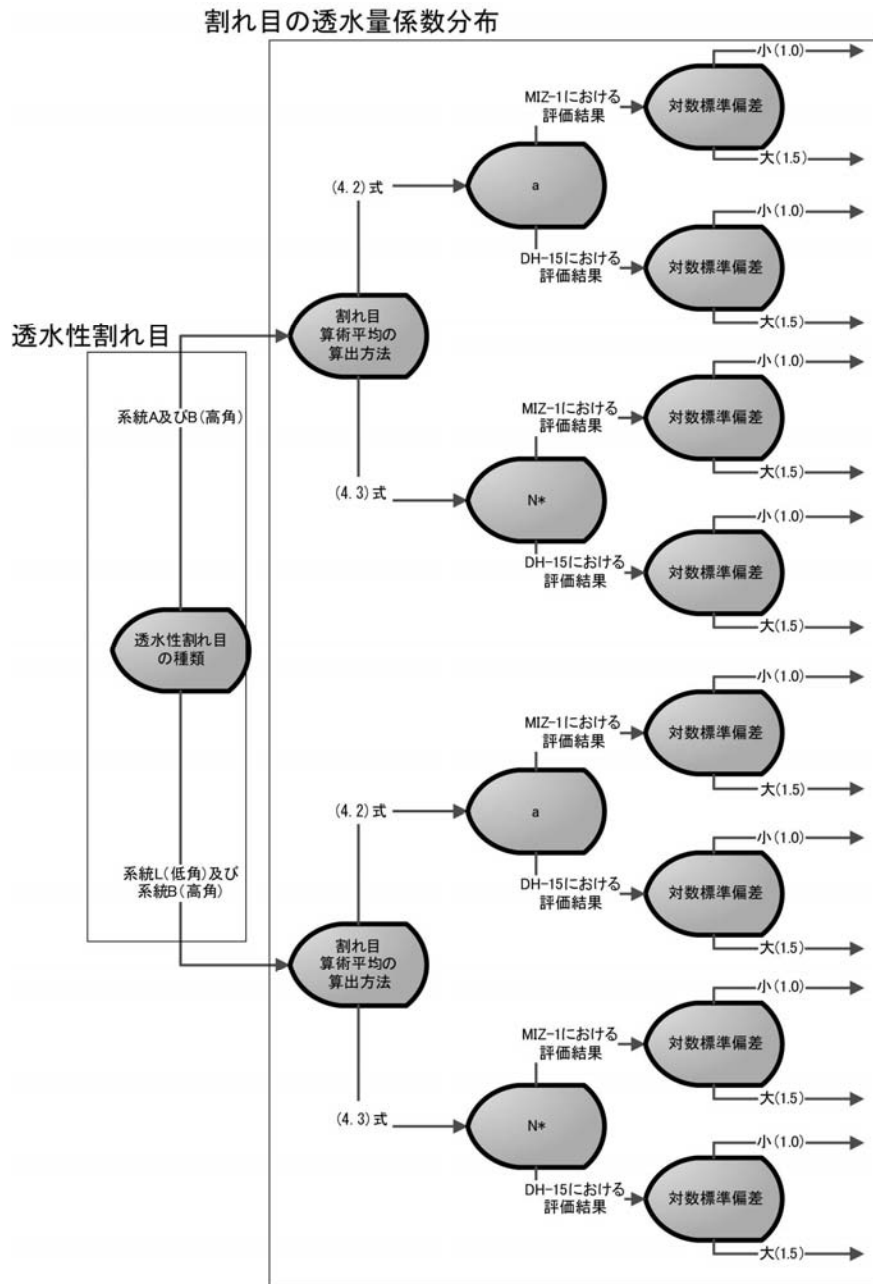


図 4.11 モデル化領域花崗岩健岩部中の個別割れ目に関するモデルバリエーション

4.3.6 各概念モデルバリエーションについての地下水流動解析・物質移行解析の実施 (⑩)

次に、本手順では体系化されたモデルバリエーションに対して、地下水流動解析・物質移行解析を実施する。本解析は、「Possibility 理論と確率論を併用した二段階モンテカルロシミュレーション」に基づき実施される (図 4.9 参照)。二段階モンテカルロシミュレーションとは、同図に示すように Possibility 理論のモデルオプションから一段目のサンプリングを行い、その後、確率論で表現される入力パラメータから二段目のサンプリングを行うことを意味している。以下に、これまでの評価事例で示した割れ目の透水量係数分布に着目し、その実施方法を示す。

(1) 評価事例

① 二段階モンテカルロシミュレーションのサンプリング事例

モデル化領域基盤岩深部における地下水流動は、「影響因子に対応する概念モデル構成要素の具体化 (⑦)」の評価事例で割れ目を選択的に流れることが示されたため、本評価事例では、この割れ目の透水性のモデル化と地下水流動解析に関し、二段階モンテカルロシミュレーションを適用した。

「概念要素を記述する際の選択肢の抽出 (⑧)」結果に基づき、「概念モデルバリエーションの体系化 (ロジックツリー) (⑨)」で整理されたモデルバリエーションが、割れ目の透水性に関して Possibility 理論の不確実性を表現する。そして、その結果定義される割れ目の透水量係数分布 (対数正規分布) からのサンプリングにより構築されるリアライゼーション間の透水性の違いが確率論の不確実性を表現する。

② 地下水流動解析の事例

a) 亀裂ネットワークおよび等価透水係数テンソル

本評価事例では、モデル化領域基盤岩深部 (鉛直方向に 500m, 水平方向に 1000m×1000m の直方体) におけるモデルバリエーションに対応して、それぞれについて亀裂ネットワークを作成した後に、これをクラックテンソル法によって等価な透水係数テンソル場に変換した (等価透水係数テンソル手法も、モデルオプションの一つである)。透過透水係数テンソル場の例を図 4.12 に示す。なお、本評価事例では、割れ目頻度 0.6 本/m のケースで割れ目の総数 60 万本程度、割れ目頻度 0.06 本/m のケースでは割れ目の総数 20 万本程度考慮している。

b) 地下水流動解析およびダルシー流速分布の把握

前述した等価透水係数テンソル場に基づき実施した地下水流動解析結果の例 (水頭分布) を図 4.13 に、また、本評価事例の評価指標の 1 つであるダルシー流速分布の例を図 4.14 に示す。なお、ここで、動水勾配は鉛直上向きに 0.01 であるものと仮定し、これと対応して、4 側面では 0 フラックス、上下底では固定水頭条件を適用している (解析領域の境界条件は、より大きいスケールの解析結果を参照している)⁶⁾。

c) 地下水移行時間の分布の把握

本評価事例ではダルシー流速に加え、もう一つの評価指標であるダルシー流速に基づく地下水の移行時間の把握を実施した。本評価事例において地下水移行時間は、前述した地下水流動解析によって得られたダルシー流速ベクトル場において、解析対象領域の下底近傍 (端部の影響を避けるために 30 m 上方) を起点としてパーティクルトラッキングを行うことにより求めた。下底近傍の各メッシュから上底までのダルシー流速に基づく地下水移行時間の算出結果の例を

図 4. 15 に示す。

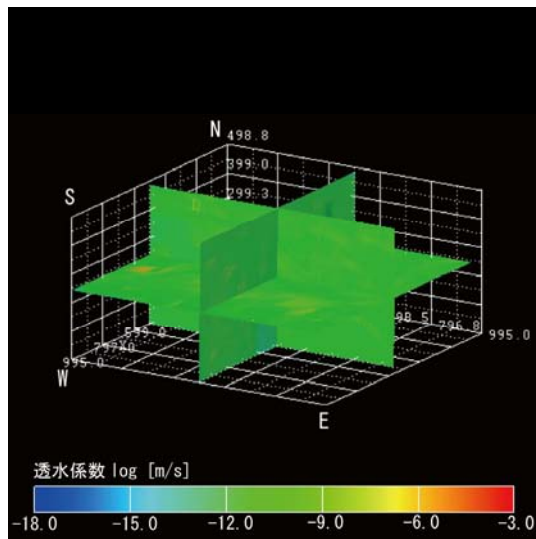


図 4. 12 等価透水性係数テンソル場 (例)

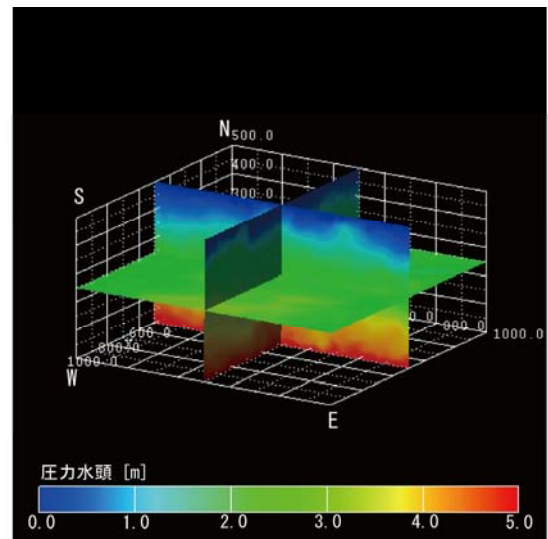


図 4. 13 水頭分布についての解析結果 (例)

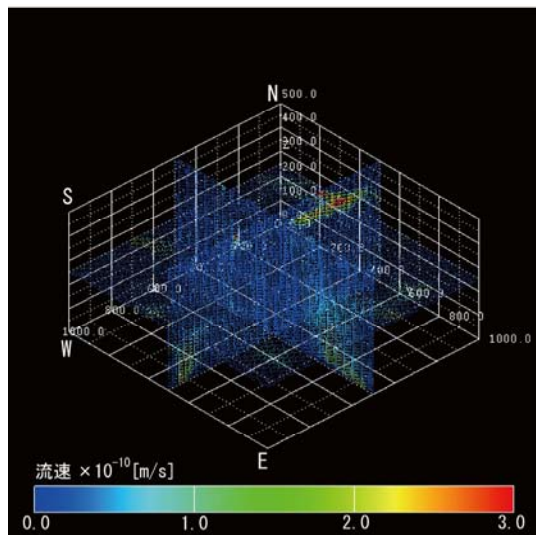


図 4. 14 ダルシー流速分布についての解析結果 (例)

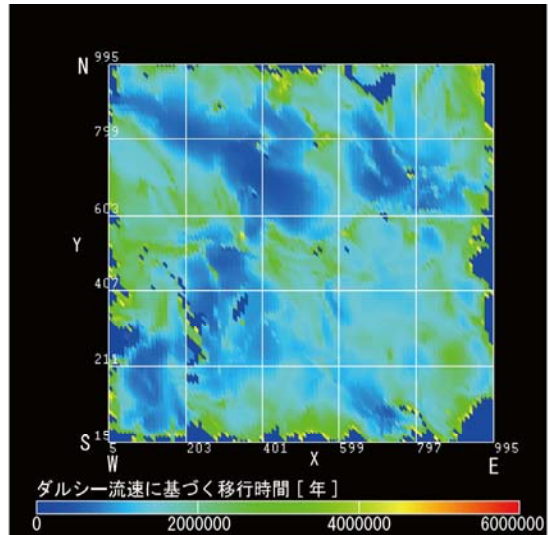


図 4. 15 解析対象領域下底から 30m の位置から上部境界に達するまでのダルシー流速に基づく移行時間分布 (例)

本評価事例では、更にダルシー流速に基づく地下水移行時間に関してあるしきい値を設けた整理を実施している。しきい値を1万年とした場合、割れ目透水量係数の対数標準偏差の違いにより図4. 16と図4. 17に示すようにダルシー流速に基づく移行時間の分布が異なる。このような整理は、水理学的な観点から地下水流動が遅い領域と必ずしも遅くない領域を区分するのに役立つと考える。

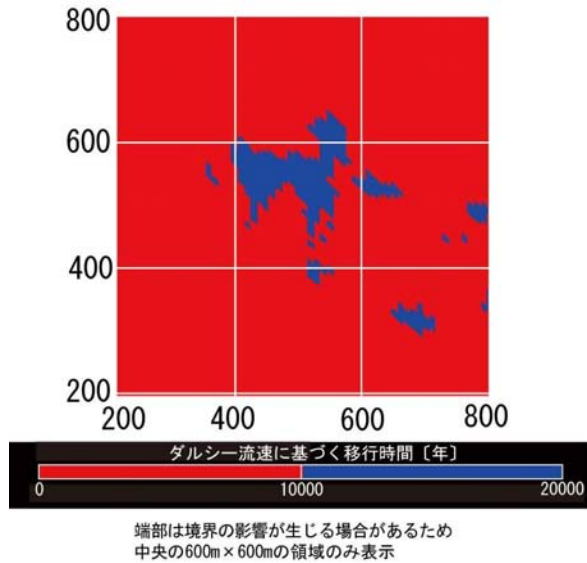


図 4.16 ダルシー流速に基づく移行時間が1万年以上の領域（青）の分布（例1）

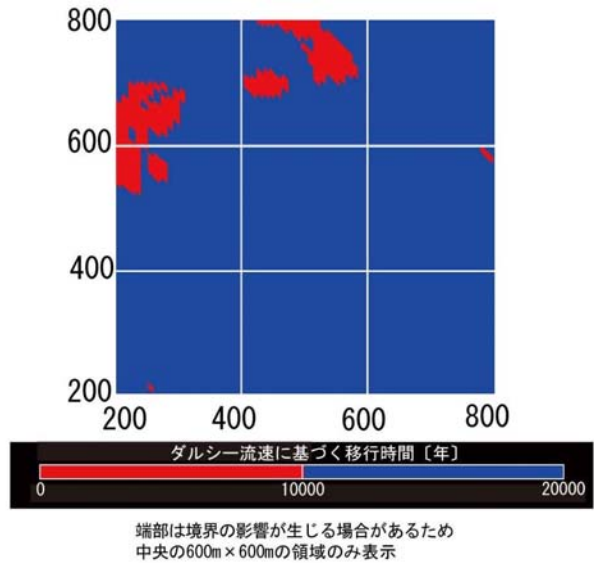


図 4.17 ダルシー流速に基づく移行時間が1万年以上の領域（青）の分布（例2）

d) 地下水移行時間の不確実性

本評価事例において地下水移行時間の不確実性を整理した例を以下に示す。

本評価事例においては、図 4.18 に示す度数分布調査地点にて、パーティクルトラッキングによる地下水移行時間を求めており、その結果（地下水移行時間の度数分布）を確信の程度で区分し、確信の程度；高の結果を図 4.19 に、中の結果を図 4.20 に、低の結果を図 4.21 に示す。本手順において地下水移行時間の不確実性には、モデルバリエーションで表現される Possibility 理論の不確実性と、構築されたリアライゼーション間の透水性の違いで表現される確率論の不確実性がある。上記した確信の程度間の違いは主にモデルバリエーションによるばらつき（不確実性）を、ある確信の程度での度数分布は主にリアライゼーション間の透水性の違いによるばらつき（不確実性）を表現している。

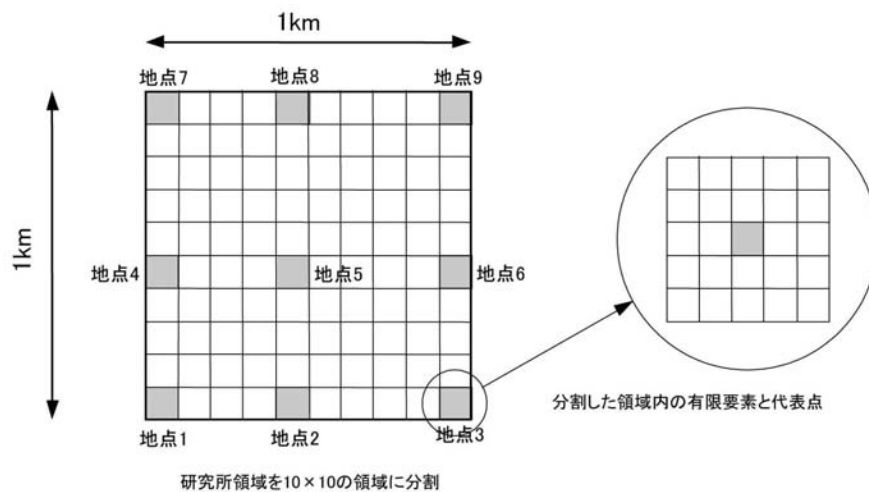


図 4.18 度数分布調査地点

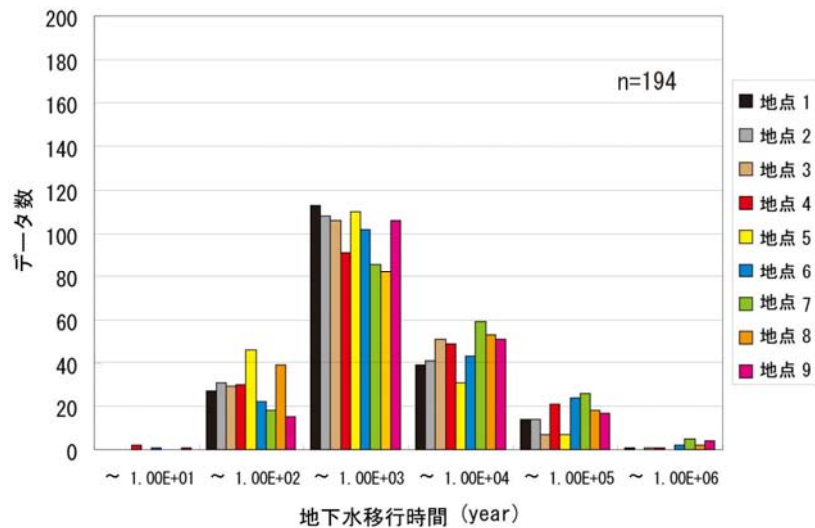


図 4.19 地下水移行時間の度数分布（確信の程度；高）

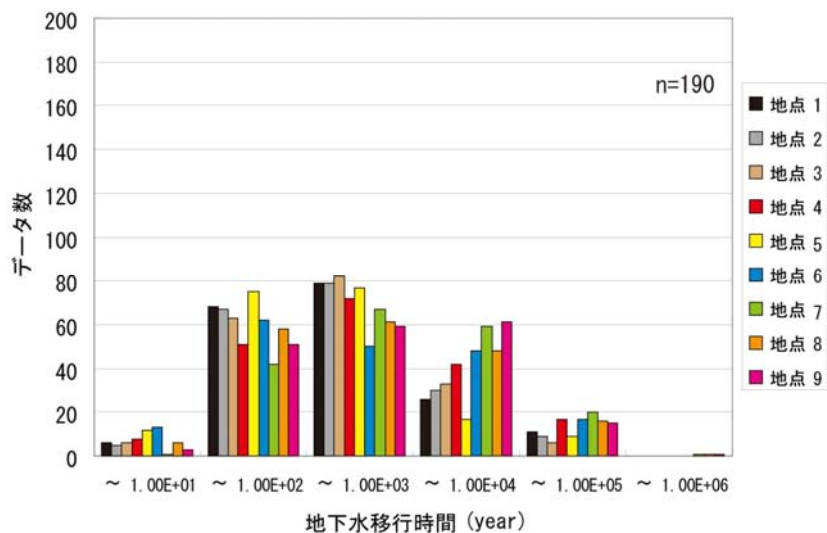


図 4.20 地下水移行時間の度数分布（確信の程度；中）

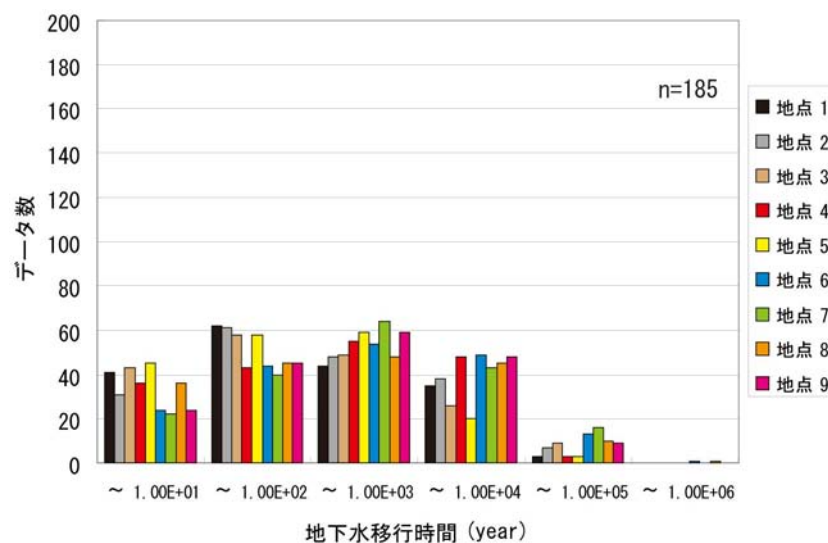


図 4.21 地下水移行時間の度数分布（確信の程度；低）

③ 地下水流動解析結果に関する感度解析の方法

不確実性低減のための調査対象とすべき概念やパラメータの具体的な選定は、地質環境特性評価に関する二段階モンテカルロシミュレーションの出力結果（例えば、地下水移行時間など）に対し、各概念や各パラメータの重要度を分類（感度解析（ t 分布による検定など））したうえで、実施することができる。また、具体的な調査手法は、重要度分類された概念などに対し、4.3.7項で示す ESL の感度解析を実施し、その結果に基づき、コストや工期などの観点からの実現可能性を踏まえ選定することができる。ここでは、以下に二段階モンテカルロシミュレーションの出力結果に対する感度解析の一例として、 t 分布による検定方法を示す。

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 $\bar{x}_1$, $\bar{x}_2$, 全標本の標準偏差を σ とした場合、

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sigma \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \quad (4.4)$$

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（図 4.22 参照）。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。

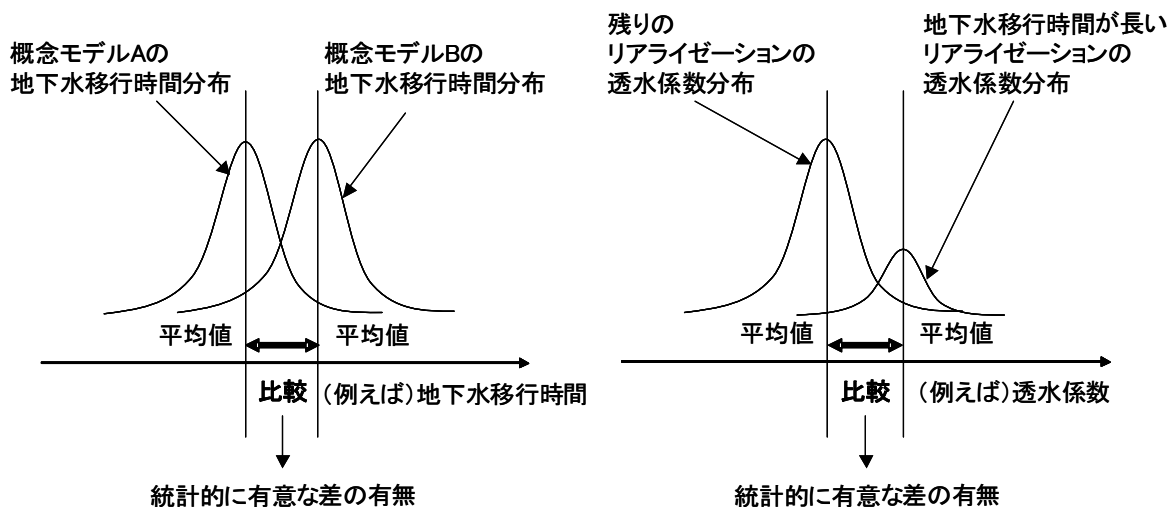


図 4.22 感度解析における 2 つの母集団の比較概念

このように、本手順では二段階モンテカルロシミュレーションを用い、各モデルバリエーションについての地下水流動解析・物質移行解析を実施する。本手順を用いることにより、地質環境モデルに付随する不確実性を定量的に評価することが可能となる。各モデルバリエーションの確からしさは次ステップの「多様な証拠に基づく各モデルバリエーションの確からしさの評価 (⑪)」で実施することとなる。

4.3.7 多様な証拠に基づく各モデルバリエーションの確からしさの評価 (ESL) (⑪) と ESL 評価結果に対する感度解析 (⑫)

本項では、体系化されたモデルバリエーションについて、それぞれ現状で入手可能な情報に基づき、ESL を用いて確からしさを評価した事例を示す。ESL の評価は、先ずモデルバリエーションの基となるモデルオプション毎に実施する。そして、確からしさを統合化することにより、モデルバリエーション毎の確からしさを評価する。ここで示す評価事例は、前述までに示した個別割れ目のモデルオプションである透水性の種類と、土岐花崗岩健岩部の上部境界面となる上部割れ目帯に対する適用である。

「透水性割れ目の種類」は割れ目単体の特性のため、ESL の樹形図は二階層の簡易なものとなっているが、「上部割れ目帯」は東濃地域の地質形成に係わる内容であるため、ESL の樹形図は五階層に渡る複雑なものとなっている。そのため、「上部割れ目帯」に関しては分かりやすさを考慮し、パラメータの設定や用いた証拠なども併せて記載している。また、ここでは、確からしさの統合化方法も併せて示している。

更に、本項では ESL で求めたモデルバリエーションの確からしさの、Possibility 理論区分（確信の程度；高・中・低）への変換方法を示すと共に、現在、瑞浪超深地層研究所で実施している決定論的なモデル化手法との関連を示す。

(1) 評価事例

① 個別割れ目のモデルオプションである透水性の種類

a) 系統 A および B の開口割れ目が透水性

系統 A および B の開口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 4.23 に示す。この命題が確からしいと主張できるためには、モデル化領域における既得データにおいて系統 A および B の開口割れ目が支配的な透水性を有することと、モデル化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、モデル化領域内の既得データである MIZ-1 号孔の情報は、すでに述べたように、

- i) MIZ-1 号孔における水理試験結果と各区間における系統 A および B の開口割れ目本数とが整合的である。
- ii) DH-15 号孔における水理試験結果と各区間における系統 A および B の開口割れ目本数とが整合的ではない。
- iii) 系統 A および B 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。
- iv) BTV による観察で開口割れ目と判断されたものが高透水性と考えられており整合的である。

ことを示している。ここで、i) については該当するデータ数が少なく、また、掘削時の泥水やセメンチングの影響も否定できないこと、また、iv) については、BTV によって観察可能な開口幅は局所的なものであることから、いずれも十分性は非常に低い (0.1) とした。他方、データ数の多い DH-15 号孔の水理試験結果に対する回帰分析結果は、中程度の十分性 (0.5) を有するものと考え、また、割れ目の開口に直接的な影響を及ぼすと考えられる現在の主応力方向との整合性は低い (0.3) と考えた。入手可能な証拠の支持および否定の程度について

は、iii) およびiv) は高い支持 (0.7) であると判断したが、i) については、回帰式自体の誤差は少なく、支持する程度が高いと考えられるものの、両対数での回帰式の傾きが 3 を上回る大きなものとなっており、これまで実施した割れ目頻度を種々に変えた亀裂ネットワークモデルによる解析結果に対する同様の回帰分析の結果とは不整合であることから、支持の程度を低減した。

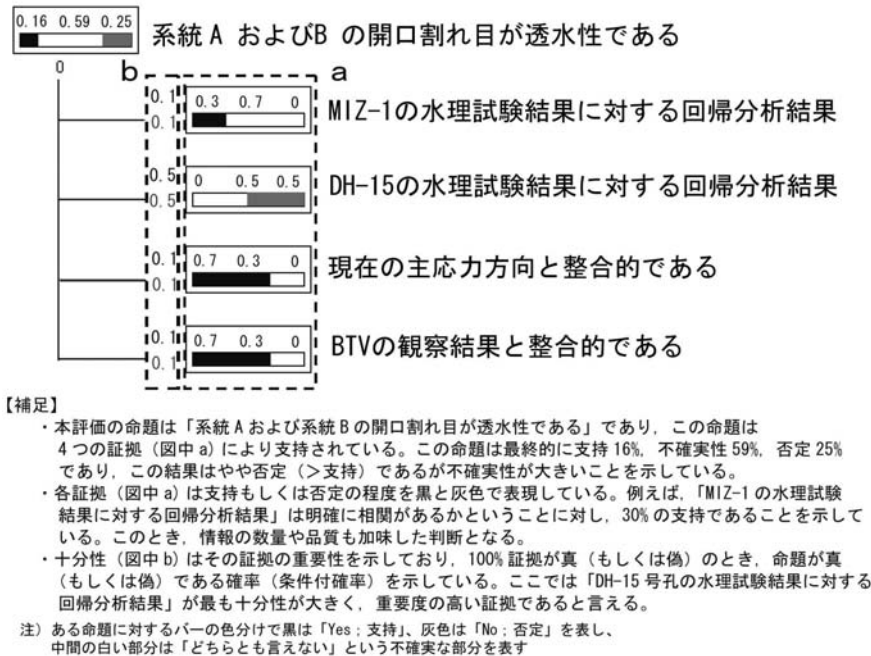


図 4.23 「系統 A および B の開口割れ目が透水性である」についての ESL による評価結果

b) 系統 L および B の全割れ目が透水性

他方、DH-15 号孔の情報は、

- MIZ-1 号孔における水理試験結果と各区間における系統 L および B の全割れ目本数とが整合的ではない。
- DH-15 号孔における水理試験結果と各区間における系統 L および B の全割れ目本数とが整合的である。
- 系統 B 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。また、低角の系統 L についても、堆積岩の削剥による除荷を考慮すれば開口しているものと考えることができる。
- BTV による観察で開口割れ目と判断されたもの以外も透水性と考えられており整合的ではない。

ことを示している。上記の場合と同様、①における証拠による否定および②の証拠による支持の程度は中程度であるとみなし、また、③に関しては同じく現在の主応力方向と整合的な系統 A が透水性とは考えられていないために、上記の場合よりも支持の程度を低下させてやはり中程度であるとした。なお、BTV に関しては、開口割れ目および明瞭割れ目が透水性と判断されており整合性がある反面、ヘアークラックも透水性と考えられている点の不整合

であることから、低い程度の支持と否定が混在するものと考えた。以上に基づく ESL 評価結果を図 4. 24 に示す。

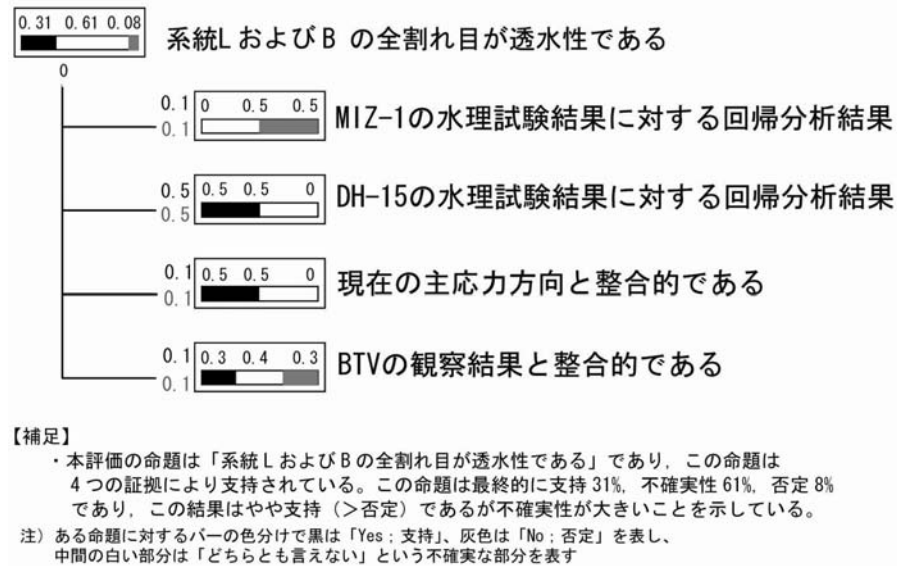


図 4. 24 「系統L および B の全割れ目が透水性である」についての ESL による評価結果

② 上部割れ目帯のモデルオプション

上部割れ目帯の底面位置については、これまでの研究により「花崗岩基盤面の深さ（又は、被覆堆積岩との厚さ）と上部割れ目帯の厚さに相関がある」や、離間距離と上部割れ目帯の底面位置（深度）に関係があるとし、「地球統計学手法である Kriging により補間可能である」⁷⁾などのモデルオプションが構築されている。ここでは、上部割れ目帯の底面位置のモデルオプションとして、「花崗岩基盤面の深さと上部割れ目帯の厚さに相関がある」を対象に、ESL の適用を行った評価事例を示す。

a) モデルオプション構築ロジック

「花崗岩基盤面の深さと上部割れ目帯の厚さに相関がある」という概念は、基本的に花崗岩基盤面の深さと上部割れ目帯の厚さに相関を示す実測データがあることを基本としている（図 4. 25 参照）⁶⁾。この概念の対象となる東濃地域における土岐花崗岩中の上部割れ目帯は、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。そのため、その厚さは、基盤花崗岩深度や、その後に堆積された瑞浪層群の厚さと相関があると解釈されている（図 4. 26 参照）。

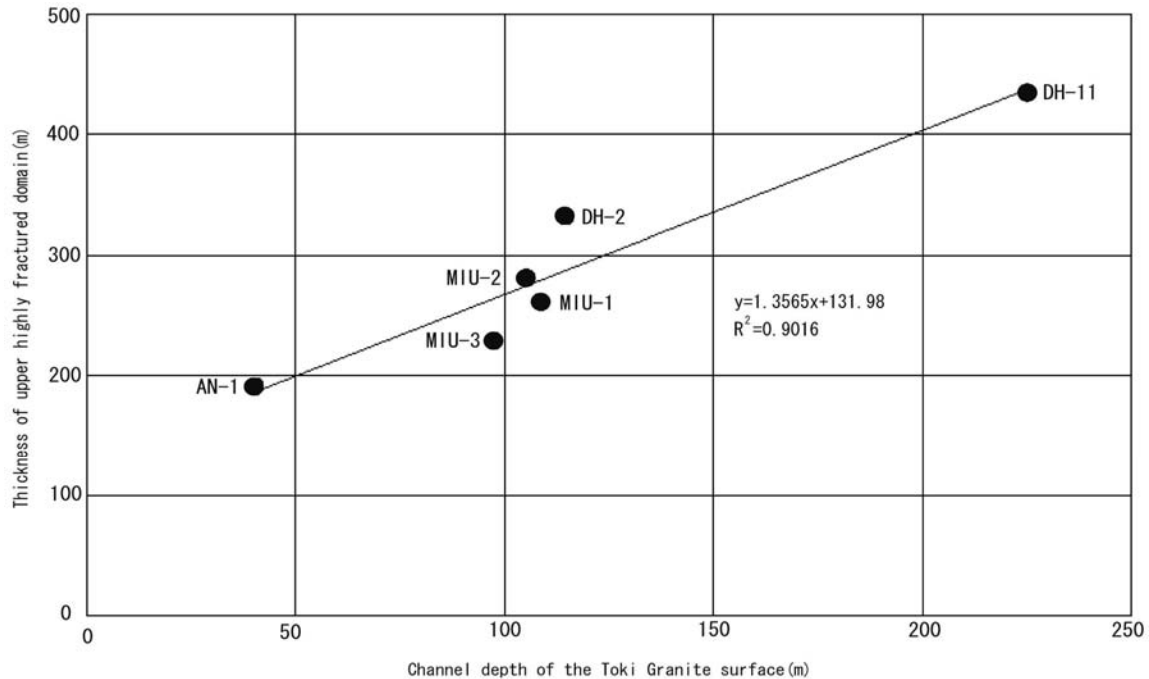


図 4.25 花崗岩基盤面の深さと上部割れ目帯の厚さとの関係⁶⁾

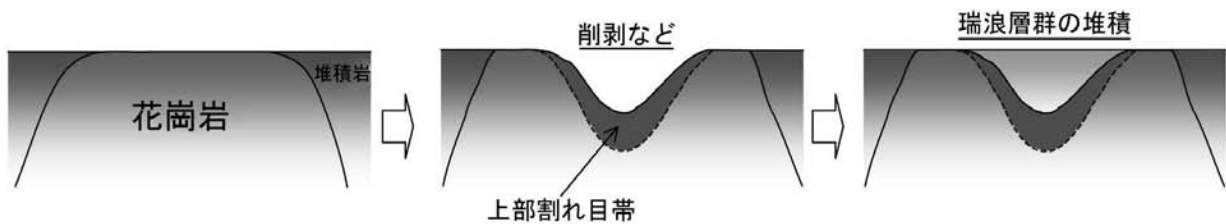


図 4.26 上部割れ目帯の概念モデル「花崗岩基盤面の深さ

(または、被覆堆積岩との厚さ)と上部割れ目帯の厚さに相関がある」

原子力機構の専門家にヒアリングなどを実施し、概念モデルの構築ロジックを整理した。この概念の確からしさは、基本的に、実測データと地質学的な観点により支持されている。地質学的な観点においては、i) 削剥に伴う応力開放によりこの相関(図 4.26 参照)が生じうることを説明するために、「地質学的に相関を生じるメカニズムを説明できる」、ii) 瑞浪層群が堆積後に生じた削剥、つまり花崗岩の削剥より後の時代の削剥が原因でないことを示すために、「他の不整合面もしくは地層境界面で同様な傾向が見られないことを説明できる」、およびiii) 他のサイトでも同様なことが生じていることを示すために、「他の事例でも同様の傾向が認められる」という項目で支持されている。

b) 樹形図の構築

a) で示したモデルオプション構築ロジックに従い、樹形図を構築すると図 4.27 のようになる。第二階層において、左側の 1 項目が「実測データ」を表現しており、残りの 3 項目が「地質学的な観点」を表現している。

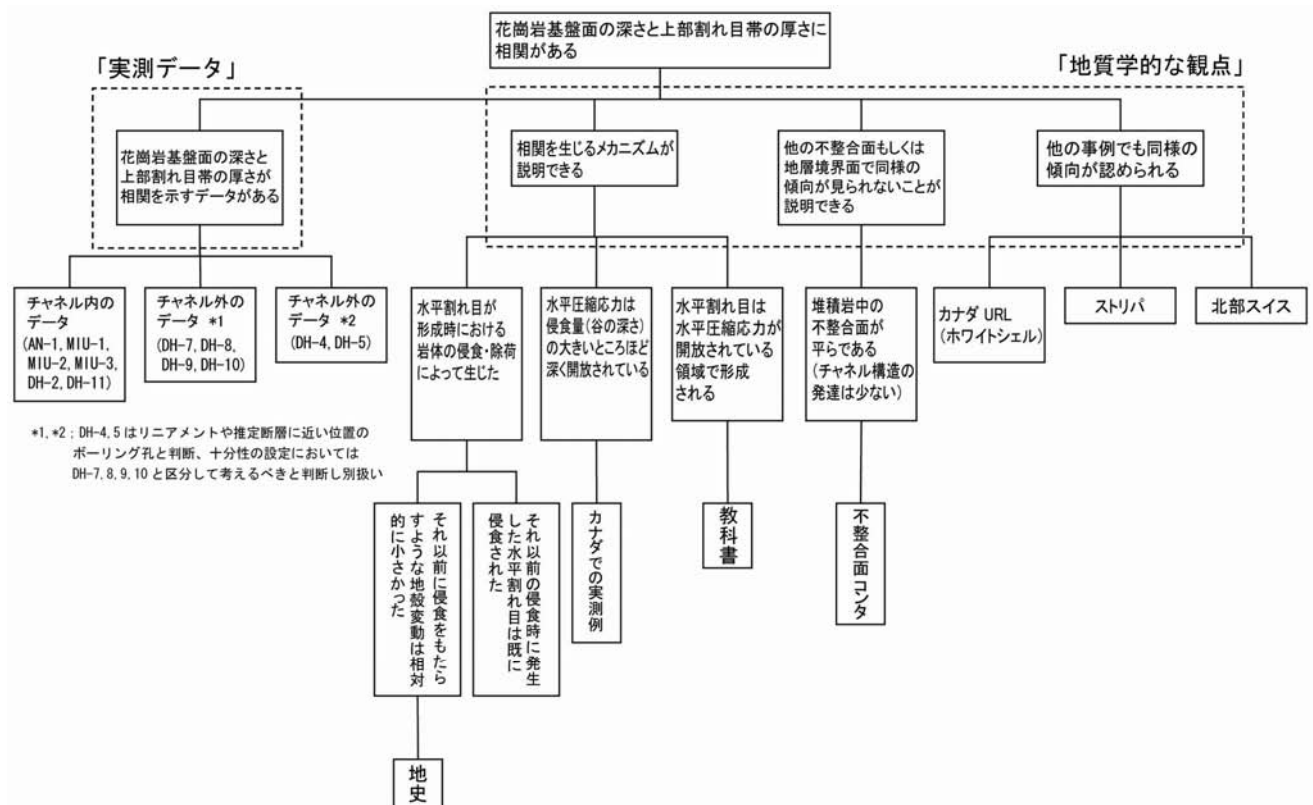


図 4.27 上部割れ目帯の概念モデル樹形図

c) パラメータの設定

b) で構築した樹形図に伴い、原子力機構の専門家にヒアリングを実施し、エキスパートジャジメントに基づき、ESL のパラメータである十分性の設定を行った。その結果を図 4.28 に示す。その設定根拠を、表 4.2～表 4.5 に示す。十分性は条件付確率であるため、本来は客観的な情報に基づき設定することが望ましい*。しかし多くの場合では客観的な情報が得られないため、主観的な判断（エキスパートジャジメント）を用い上位命題への貢献度に応じて 0.0～1.0 で表現している**。ESL のもう一つ重要なパラメータである重複性に関しては、各命題間や各証拠間に情報の重複がないことを確認している。

* ここで示す客観的な情報とは、第二階層「相関を生じるメカニズムが説明できる。」から第一階層への十分性を例にとると次のようになる。

「東濃地域と類似した地質環境条件（花崗岩内に上部割れ目帯が存在）で、かつ花崗岩基盤面の深さと上部割れ目帯の厚さに相関が生じるメカニズムを完全に説明できるサイトが多数存在したうえで、本当に相関が生じているサイトの数（割合）を記載している論文など」。

** 実際の専門家へのヒアリングにおいては「貢献度が高い、中くらい、低い」など言語スケールを用い解答してもらい、その後解答結果を数値に変換し入力パラメータとしている。

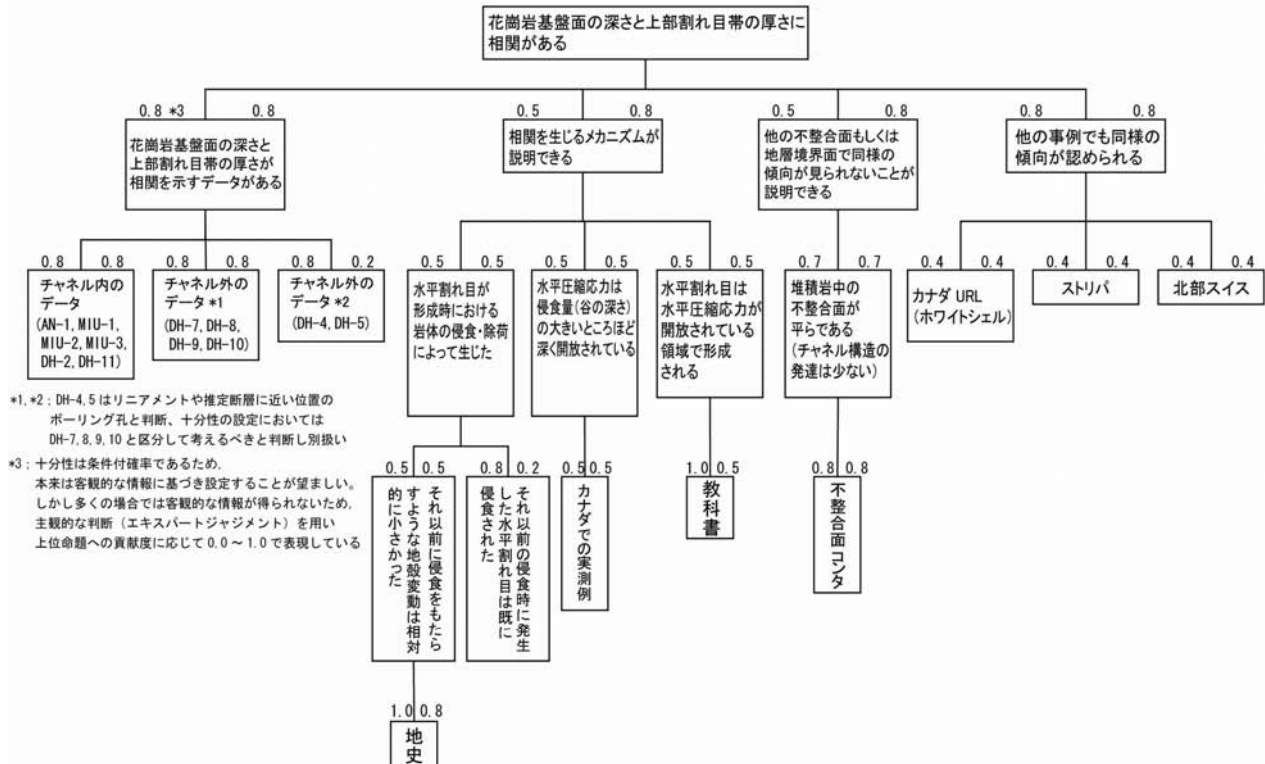


図 4.28 上部割れ目帯の概念モデルの樹形図における十分性の値

表 4.2 第二階層から第一階層への十分性

(上位命題：花崗岩基盤面の深さと上部割れ目帯の厚さに相関がある)

命題	十分性の段階		考慮すべき事項
花崗岩基盤面の深さと上部割れ目帯の厚さに相関があることを示すデータがある	支持	0.8	・ 相関を示す直接的な証拠が、対象エリアにおいて存在することを表す。数字上偶然に相関が見られるケースもありうるため、1.0 にはならない。
	不支持	0.8	
相関を生じるメカニズムが説明できる	支持	0.5	・ 上記の命題を補い、論理的に相関があることを示す命題で、上位命題に対する必要条件としての性格の強い命題 (→不支持の値が高くなる)。
	不支持	0.8	
他の不整合面もしくは地層境界面で同様の傾向が認められないことが説明できる	支持	0.5	・ 上部割れ目帯の発達が花崗岩上面の形に関係し、それ以後(それより上の地質条件)によるものではないことを示すための、必要条件としての性格が強い命題 (→不支持の値が高くなる)。
	不支持	0.8	
他の事例でも同様の傾向が認められる	支持	0.8	・ 主命題に示す関係の一般性を示す命題。 ・ 他事例でも有限の事例であり、個々の地質条件があるため、1.0 にはならない。
	不支持	0.8	

表 4.3 第三階層から第二階層への十分性 (1/2)

(上位命題：花崗岩基盤面の深さと上部割れ目帯の厚さが相関を示すデータがある)

証拠	十分性の段階		考慮すべき事項
チャンネル内 (AN-1, MIU-1, 2, 3, DH-2, DH-11) のデータで相関がある	支持	0.8	・特に地質構造的に特殊でないエリアのデータ。
	不支持	0.8	
チャンネル外 (DH-7, 8, 9, 10) のデータで相関がある	支持	0.8	・特に地質構造的に特殊でないエリアのデータ。
	不支持	0.8	
チャンネル外 (DH-4, 5) のデータで相関がある	支持	0.8	・リニアメントや推定断層に近い位置のボーリング孔のデータ。元々亀裂の多い地質構造が予想される地点であるため、ここで相関が認められないからといってそれ以外の場所での相関がないことを示すものではない(→不支持の確率は低くなる)。このような場でも相関が認められれば、上位命題を支持する(→支持の十分性は高い)。
	不支持	0.2	

(上位命題：相関を生じるメカニズムが説明できる)

命題	十分性の段階		考慮すべき事項
水平亀裂がチャンネル形成時における岩体の侵食・除荷によって生じた	支持	0.5	・チャンネル部で水平亀裂が生じうるメカニズムの1つ。侵食・除荷以外にもメカニズムはありうる(→不支持は1.0にはならない)。 ・侵食・除荷が原因であっても、チャンネル外で発達しない理由までは説明しきれない(→支持は1.0にはならない)。
	不支持	0.5	
水平圧縮応力は侵食量(谷の深さ)の大きいところほど深く開放されている。	支持	0.5	・侵食量の大きいところ以外でも水平応力の開放はありうる。 ・水平応力だけで説明できるかどうかは不明。
	不支持	0.5	
水平亀裂は水平圧縮応力が開放されている領域で形成される。	支持	0.5	・水平圧縮応力が開放されていなくても(鉛直方向の引張応力や、応力に斜交する亀裂の形成など)水平亀裂は生じうる。
	不支持	0.5	

表 4.3 第三階層から第二階層への十分性 (2/2)

(上位命題：他の不整合面もしくは地層境界面で同様の傾向が認められないことが説明できる)

命題	十分性の段階		考慮すべき事項
堆積岩中の不整合面が平らである(チャンネル構造の発達が少ない)	支持	0.8	・地質記録として残っているのはすべての不整合面とは限らない(侵食等により不整合面は一般に一部が欠如している)。
	不支持	0.8	

(上位命題：他の事例でも同様の傾向が認められる)

命題	十分性の段階		考慮すべき事項
カナダ URL (ホワイトシエル)	支持	0.4	・地域固有の地質条件があり、同様の事例といいきれんかどうかは不確定部分が残る。
	不支持	0.4	
ストリパ	支持	0.4	同上
	不支持	0.4	
北部スイス	支持	0.4	同上
	不支持	0.4	

表 4.4 第四階層から第三階層への十分性

(上位命題：水平亀裂がチャネル形成時における岩体の侵食・除荷によって生じた)

命題	十分性の段階		考慮すべき事項
それ以前に侵食をもたらすような地殻変動は相対的に小さかった	支持	0.5	・ 以前の地殻変動が小さいことが、チャネル形成時の侵食・除荷による水平亀裂生成の十分条件ではない。
	不支持	0.5	
それ以前の侵食時に発生した水平亀裂はすでに侵食された	支持	0.8	・ それ以前の水平亀裂がすでに侵食でなくなっているとすれば、水平亀裂生成の原因がチャネル形成時の侵食・除荷である確率が高い。 ・ 不支持の場合は、水平亀裂生成の原因がチャネル形成時の侵食・除荷でないとはいきれない(異なる時代の亀裂が重なっている可能性がある)。
	不支持	0.2	

(上位命題：水平圧縮応力は侵食量(谷の深さ)の大きいところほど深く開放されている)

命題	十分性の段階		考慮すべき事項
カナダでの実測例	支持	0.8	・ 概ね事実がそのまま上位命題を支持するが、侵食量以外の地質条件が主要因であることを完全に否定はできない。
	不支持	0.8	

(上位命題：水平亀裂は水平圧縮応力が開放されている領域で形成される)

命題	十分性の段階		考慮すべき事項
教科書	支持	0.8	・ 応力方向に平行に開口亀裂ができることは、実験的な条件下での経験則。
	不支持	0.8	

(上位命題：堆積岩中の不整合面が平らである(チャネル構造の発達は少ない))

命題	十分性の段階		考慮すべき事項
不整合面コンター	支持	0.8	・ コンターを描くための観察点は限られているが、起伏(チャネルの有無)は概ね判断できる。
	不支持	0.8	

表 4.5 第五階層から第四階層への十分性

(上位命題：それ以前に侵食をもたらすような地殻変動は相対的に小さかった)

命題	十分性の段階		考慮すべき事項
地史の証拠	支持	0.7	・ 地史的知見は、地質事象の断片的な点から考えて、対象地域の地史に不確実性を残す。
	不支持	0.7	

d) 末端の証拠の支持・不支持の設定

b) に示す各証拠に基づき、原子力機構の専門家にヒアリングを実施しエキスパートジャジメントにより、末端の証拠の支持・不支持の設定を行った。それぞれの値を表 4.6 に示す。その具体的な設定根拠と証拠の図を表 4.7 と図 4.29～図 4.33 に示す。支持と不支持のそれぞれの値は、確率のため 0.0～1.0 の範囲で表現される***。ESL では区間確率理論を適用しているため、2つの和が 1.0 であることを強制しないものである。

*** 末端の証拠の支持・不支持は確信度であるため、専門家の主観的判断(エキスパートジャジメント)に基づき設定されるものである。ここで重要なことは、信頼性確保の観点から判断基準を明らかにし、記載することである。実際の専門家へのヒアリングにおいては、十分性と同様、支持・不支持に対する「確信度が高い、中くらい、低い」など言語スケールを用い解答してもらい、その後解答結果を数値に変換し、区間確率としている。

表 4.6 末端の証拠の支持・不支持の設定

証拠	支持	不支持
チャンネル内のデータ (AN-1, MIU-1, 2, 3, DH-2, 11)	0.8	0.1
チャンネル外のデータ (DH-7, 8, 9, 10)	1.0	0.0
チャンネル外のデータ (DH-4, 5)	0.0	0.5
地史	0.5	0.0
それ以前の侵食時発生した水平亀裂は既に侵食された	0.0	0.0
カナダでの実測例	1.0	0.0
教科書	0.9	0.0
不整合面コンター	0.8	0.1
カナダ URL (ホワイトシエル)	0.0	0.0
ストリパ	0.0	0.0
北部スイス	0.0	0.0

表 4.7 末端の証拠の支持・不支持の設定根拠 (1/3)

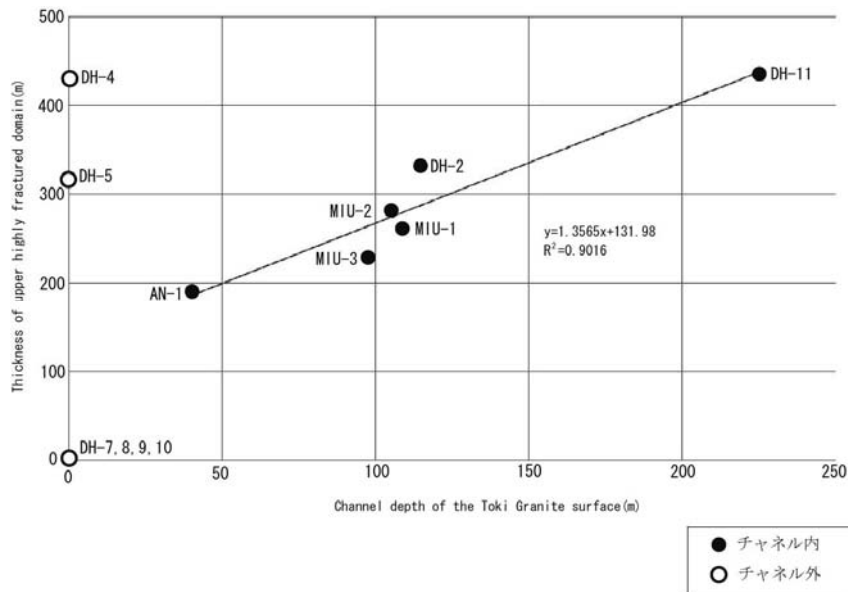
命題	入力値			考慮事項
チャンネル内のデータ (AN-1, MIU-1, 2, 3, DH-2, DH-11)	具体的な証拠			- AN-1, MIU-1, 2, 3, DH-2, DH-11 の柱状図に基づく相関グラフ (図 4.29 参照) - 花崗岩基盤面の深さと上部割れ目帯の厚さの間に相関が認められる。
	確率	支持	0.9	
		不支持	0.1	
チャンネル外 (DH-7, 8, 9, 10) のデータ	具体的な証拠			- DH-7, 8, 9, 10 の柱状図に基づく相関グラフ (図 4.29 参照) - 花崗岩基盤面の深さと上部割れ目帯の厚さの間に相関が認められる (チャンネル外の DH-7, 8, 9, 10 では上部割れ目帯の厚さは 0)。
	確率	支持	1.0	
		不支持	0.0	
チャンネル外 (DH-4, 5) のデータにおいて相関がある	具体的な証拠			- DH-4, 5 の柱状図に基づく相関グラフ (図 4.29 参照) - 相関がない。 - DH-4 : 亀裂密度の高さから見て 440m まで上部割れ目帯とみなせる。亀裂は断層沿い以外の部分にも多い。 - DH-5 : 断層沿いだけでなく、亀裂密度は岩相に左右されている (粗粒花崗岩で高密度)。粗粒花崗岩部分は上部割れ目帯とみなせる。
	確率	支持	0.0	
		不支持	0.5	
地史	具体的な証拠			- 例えば新生代の気候変動図⁸⁾ (図 4.30 参照) - 世界的な古気候について「古第三紀は初めは温暖で、第四紀に向かい次第に寒冷化したこと」が知られており、現在よりも温暖で侵食基準面が低く侵食速度は比較的小さかったと推定される。
	確率	支持	0.5	
		不支持	0.0	
それ以前の侵食時発生した水平亀裂は既に侵食された	具体的な証拠			(該当する証拠がない)
	確率	支持	0.0	(該当する証拠がない)
		不支持	0.0	

表 4.7 末端の証拠の支持・不支持の設定根拠 (2/3)

命題	入力値			考慮事項
カナダでの実測例	具体的な証拠			・ Engelder (1993) ⁹⁾ の Fig. 7-13 にある花崗岩地区でのボーリング孔での応力と地形・亀裂間隔 (図 4. 31 参照)
	確率	支持	1. 0	・ 図では、谷部ほど深部まで水平応力の小さい部分 (水平応力の開放された部分) があることが示されている (谷部では水平亀裂も多い)。
		不支持	0. 0	
教科書	具体的な証拠			・ 土質工学会「岩の調査と試験」 ¹⁰⁾ の図 (図 4. 32 参照)
	確率	支持	0. 9	・ 破壊の模式図として、最小主応力に平行に亀裂ができることが示されている。最大主応力が水平の場合、水平亀裂ができることとなる。
		不支持	0. 0	
不整合面コンター	具体的な証拠			・ 土岐夾炭累層上面の深さと上部割れ目帯の厚さの関係 (図 4. 33 参照)
	確率	支持	0. 8	・ コンターで起伏は見られない。 ・ 土岐夾炭累層の深さと上部割れ目帯の厚さには関係がない。
		不支持	0. 1	
カナダ URL (ホワイトシェル)	具体的な証拠			(該当する証拠がない)
	確率	支持	0. 0	(該当する証拠がない)
		不支持	0. 0	
ストリパ	具体的な証拠			(該当する証拠がない)
	確率	支持	0. 0	(該当する証拠がない)
		不支持	0. 0	

表 4.7 末端の証拠の支持・不支持の設定根拠 (3/3)

命題	入力値			考慮事項
北部スイス	具体的な証拠			(該当する証拠がない)
	確率	支持	0. 0	(該当する証拠がない)
		不支持	0. 0	

図 4.29 花崗岩基盤面の深さと上部割れ目帯の厚さの関係 ⁶⁾
(チャンネル内およびチャンネル外)

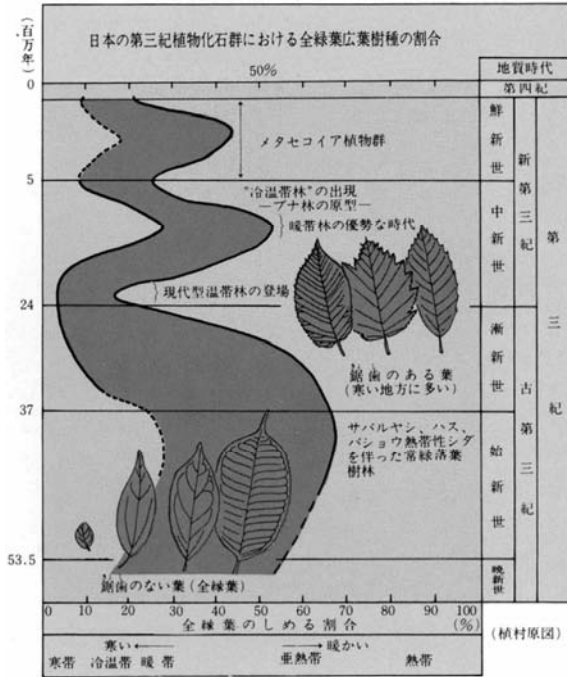


図 4.30 新生代の気候変動⁸⁾

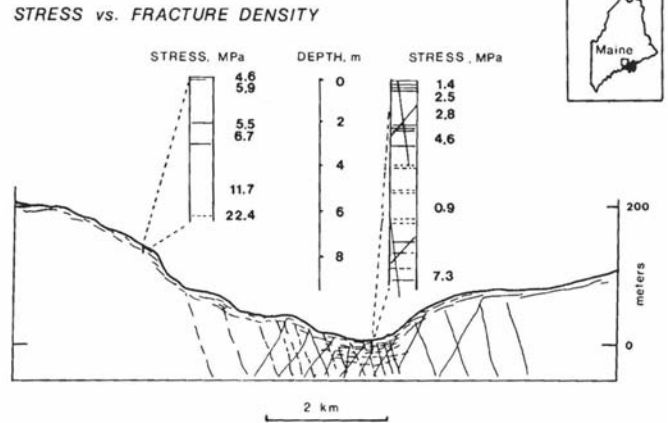
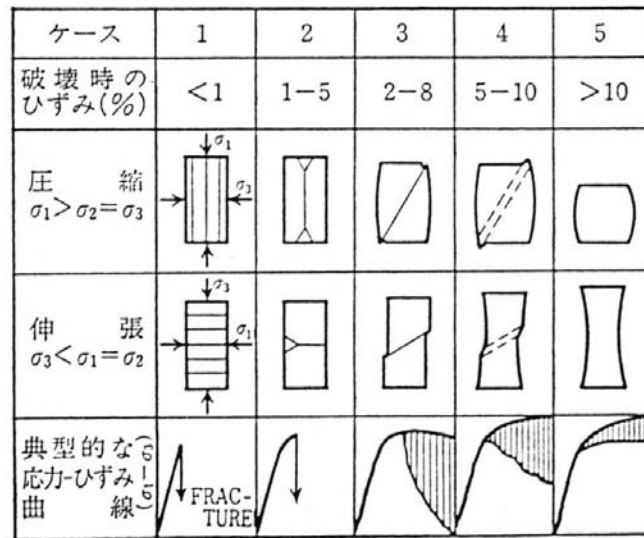


Fig. 7-13. Stress as a function of fracture spacing in the Mount Waldo granite (adapted from Lee et al., 1979). The profile shows the generalized relation of drill sites in the Mount Waldo granite to topography, vertical and sheeting joints, and horizontal stresses. Logs of cores from the two drill sites indicate fractures (solid lines) and incipient sheeting (dashed lines). Vertical scale of profile exaggerated by a factor of twelve.

図 4.31 花崗岩地区でのボーリング孔での応力と地形・亀裂間隔⁹⁾



$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ はそれぞれ最大, 中間, 最小主応力を表す。

図-57.3 脆性破壊から延性破壊への移行を示した模式図 (三軸圧縮および伸張条件下での応力-ひずみ曲線と破壊時のひずみ) (Griggs and Handin²⁾, 1960 より引用)

図 4.32 破壊試験による亀裂の形成¹⁰⁾

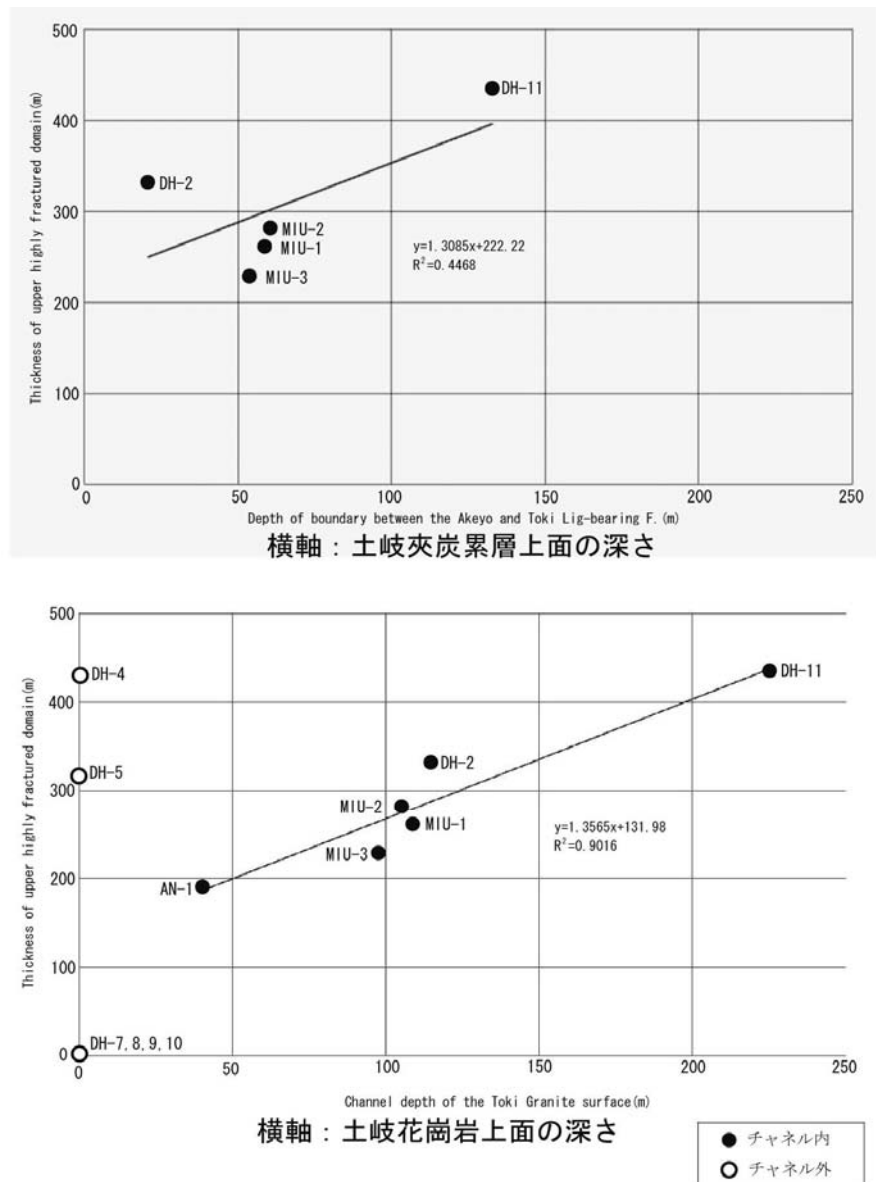


図 4.33 土岐夾炭累層上面の深さと上部割れ目帯の厚さの関係⁶⁾

(左下 (土岐夾炭累層上面の深さ) は右下 (花崗岩上面) に比較して明らかに相関がない)

e) 解析結果

c) のパラメータの設定値と d) の末端の証拠の支持・不支持の設定値を用い、ESL の演算ルールに基づき解析した結果を図 4.34 に示す。本解析結果には、僅かであるがコンフリクト (図 4.34 の黄色部分) が生じている。コンフリクトとは、概念に矛盾が生じている可能性や設定間違い (十分性の値や証拠の支持・不支持の程度の値など) を示唆するものである。コンフリクトが大きいケースの対処方法としては、概念の見直しや設定の見直しがある。

また、図 4.34 に示した ESL 演算結果を、Ratio Plot に記載したものを図 4.35 に示す。

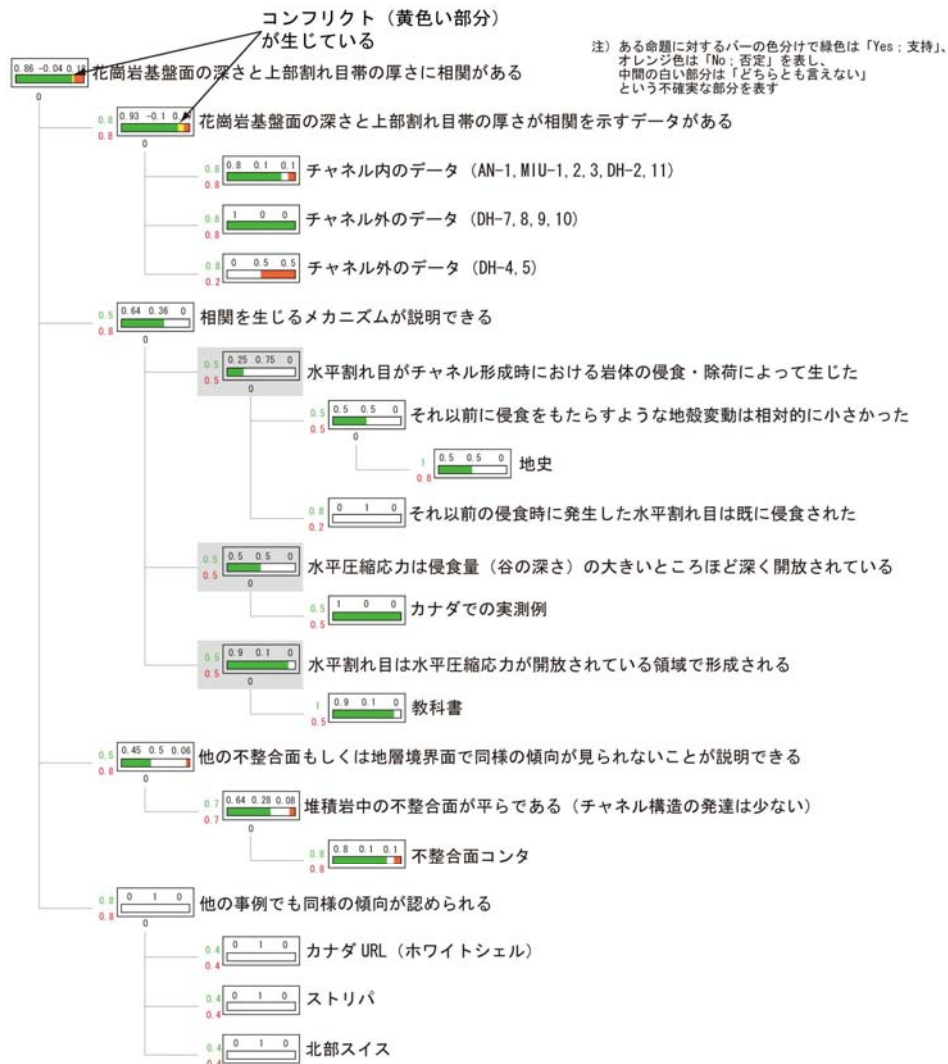


図 4.34 ESL 演算結果

花崗岩基盤面の深さと上部割れ目帯の厚さに相関がある

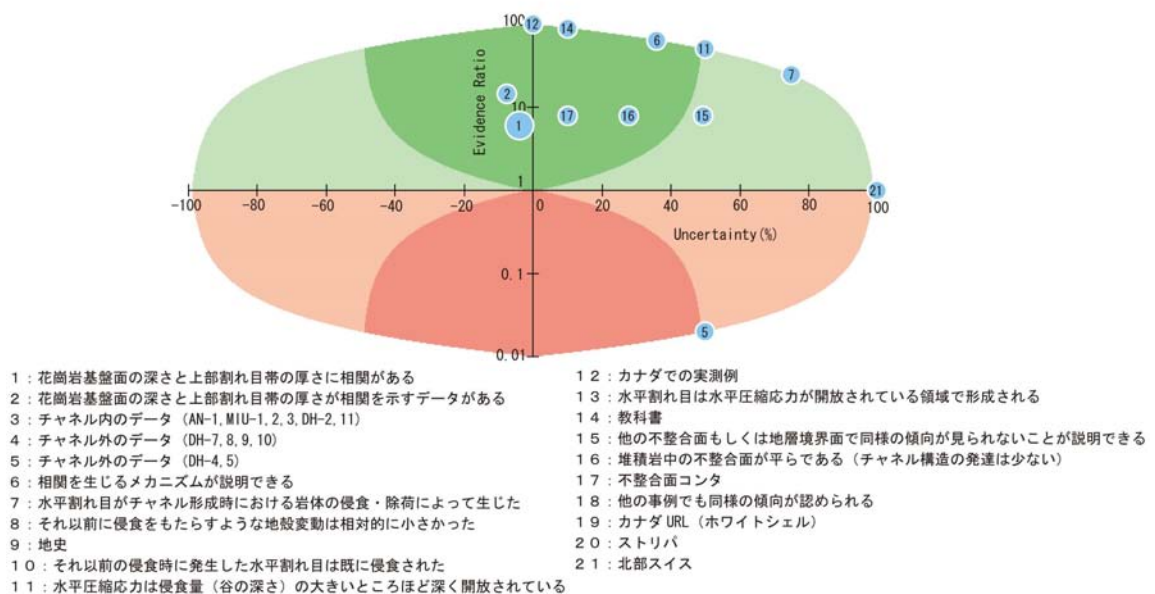


図 4.35 Ratio Plot

図 4.35 より、命題である「花崗岩基盤面の深さと上部割れ目帯の厚さに相関がある」は、支持の証拠を十分に有しており、濃い緑（支持である確度が高い）の位置にプロットされているため信頼性が高いことが分る。ただし、今回の検討結果は、原子力機構において概念モデルを構築した専門家の考えを整理した結果であるため、より信頼性を高めるためには、第三者の専門家を交えたワークショップなどを開催し、評価結果の確認を図る必要があると考える。

f) ESL の感度解析（現状の地質環境の理解度に対する課題の整理）

e) で示した解析結果に基づき、ESL の感度解析を実施した結果を図 4.36 に示す。図 4.36 より、支持の程度を上げるためには、チャンネル外のデータ（DH-7, 8, 9, 10 号孔）に関する証拠の支持の程度を上げる必要があることが分る。この感度解析は、主命題の不確実性が大きいときに、その不確実性を低減するための、情報提供を実施するための機能である。そのため、本評価事例の解析結果においては、不確実性がかなり少ないため、参考としての内容である。

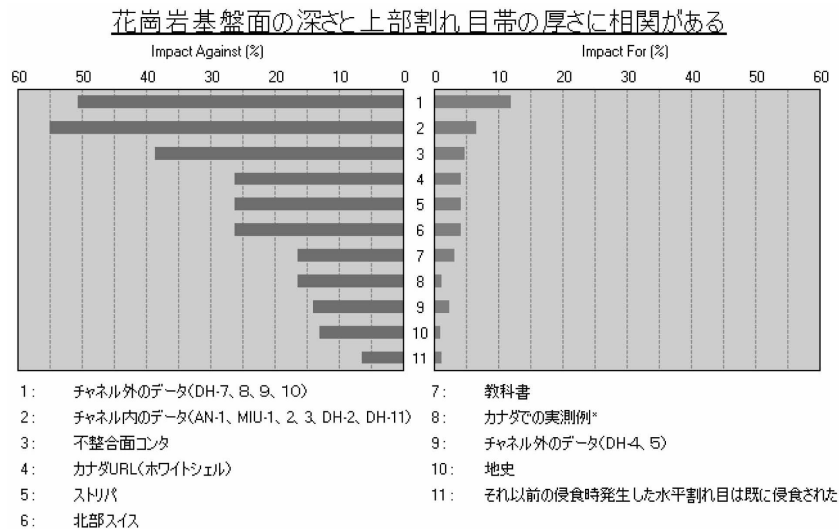


図 4.36 感度解析結果

③ 確からしさの統合化

ESL の評価は、前述したように先ずモデルバリエーションの基となるモデルオプション毎に実施する。そして、確からしさの統合化は、下記の規則に従い実施し、モデルバリエーション毎の確からしさを評価可能とする。

「各ケースが正しいことの確からしさ」

＝Min（各モデルオプションが正しいことの確からしさ）

「各ケースが正しくないことの確からしさ」

＝Max（各モデルオプションが正しくないことの確からしさ）

この式は、あるケースが「正しい」ためには該当するモデルオプションが全て正しいことが必要であるのに対して、「正しくない」ためには、モデルオプションのいずれか一つでも正しくなければ良いことから導出されている。

④ ESL で求めたモデルバリエーションの確からしさの Possibility 理論区分への変換方法

②, e)で示したように ESL の評価結果は Ratio Plot (図 4.35) を用いて可視化することが可能である。Ratio Plot の濃い緑の部分(1)は支持である確度が高いことを、薄い緑の部分(2)は支持であるが不確実性が高いことを、薄い赤の部分(3)は不支持であるが不確実性が高いことを、濃い赤の部分(4)は不支持である確度が高いことを意味している。Possibility 理論で示している確信の程度(5)の意味と比べてみると、「確信の程度が高」の従来のモデル化で考えている範囲は Ratio Plot の濃い緑の部分(1)に、「確信の程度が中」の専門家の判断に基づき考えられる範囲は薄い緑の部分(2)に、「確信の程度が低」の有り得ないものであると考えられるがそれを立証する証拠が無い、つまり否定できない範囲は薄い赤の部分(3)に対応すると考えられる。

そこで、ESL で求めたモデルバリエーションの確からしさの Possibility 理論区分への変換方法としては、ESL の評価結果を用い下記に示すような手順で行える(図 4.37 参照)。

- i) 対象が概念の場合は「概念モデルは確かである」、パラメータの場合は「パラメータは○～○の範囲に含まれる」を主命題として、判断プロセスを階層プロセスモデルとして表現する。
 - ii) ESL の解析を実施し、主命題の確からしさを評価する。
 - iii) 評価結果を Ratio Plot を用いて整理し、確信の程度の区分を行う。
- ここで濃い赤の部分(4)に属するものは明らかに否定できるため、確信の程度の区分においては除外できるものである。

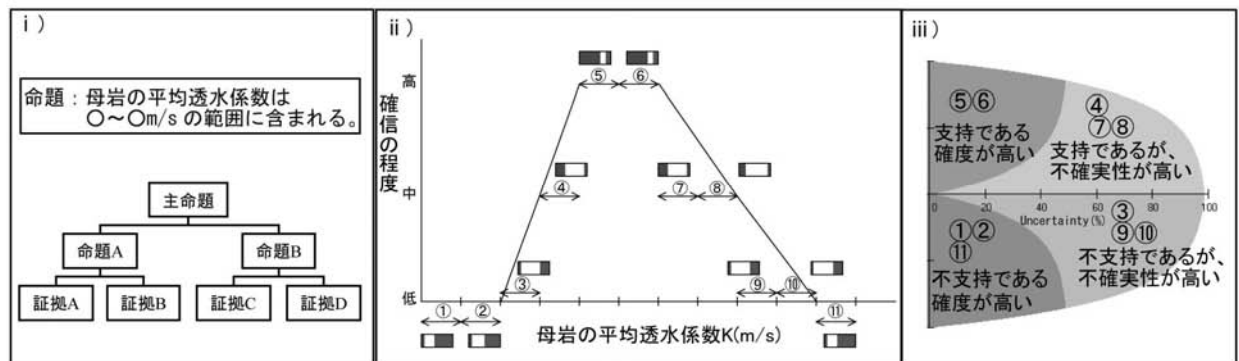


図 4.37 ESL で求めたモデルバリエーションの確からしさの Possibility 理論区分への変換方法

⑤ 現状の決定論的手法によるモデル化との関係

本手順で用いている Possibility 理論は、図 4.38 に示すように専門家の解釈に基づき、以下の 3 区分に分けることが可能である。

- ・「確信の程度が高」は、概念やパラメータについて従来のモデル化で考えている範囲とした。ここでは複数の専門家間での合意の範囲をイメージしている。
- ・「確信の程度が中」は「高」に加え、専門家の判断に基づき考えられるものを含んでいる範囲とした。ここでは複数の専門家間での意見の相違の範囲をイメージしている。
- ・「確信の程度が低」は「高」と「中」に加え、有り得ないものであると考えられるがそれを立証する証拠が無い、つまり否定できないものを含んでいる範囲とした。ここでは専門外の人々の意見も取り込むことをイメージしている。

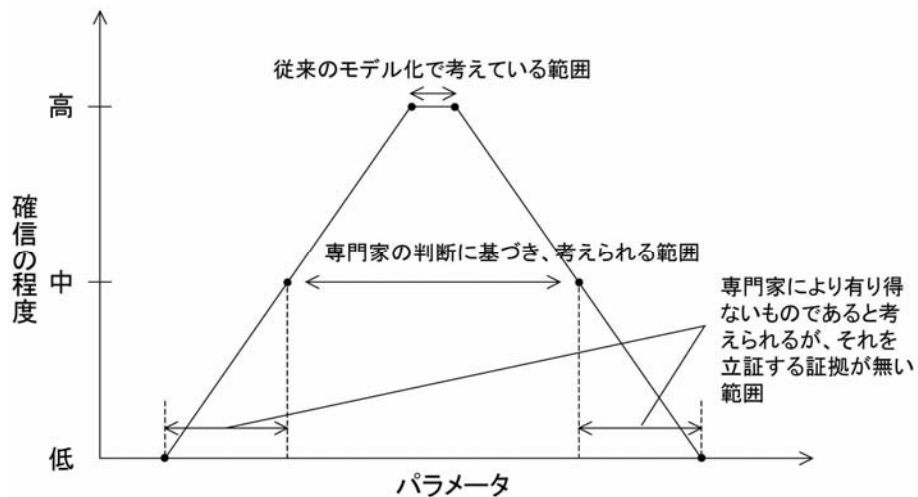


図 4.38 Possibility 理論に基づく確信の程度の定義

3 章で体系化した「地質環境モデルに付随する不確実性評価の手順」は、これまでに示した評価事例のように実施することにより、適用することが可能となる。この結果、地質環境モデルに付随する不確実性は、現有の知識に基づき定量化できる。この定量化された不確実性の程度は現有の知識の程度を表現するものであり、本手順にも示すように、基本的には引き続き地質環境調査を行い、不確実性の低減、つまり知識の増大を目指す必要がある。

4.4 参考文献

- 1) 柳澤孝一, 武田精悦, 茂田直孝, 仙波 毅, 須山泰宏, 戸井田 克, 高瀬博康, 西垣 誠:「地質環境特性を対象とした不確実性解析の方法論 - 東濃地域を対象とした適用性検討 -」, 日本地下水学会誌, 第 48 巻第 3 号, pp.149-167, 2006.
- 2) POSIVA: Simulation of Hydraulic Disturbances Caused by the Underground Rock Characterisation Facility in Olkiluoto, 2005-8, 2005.
- 3) POSIVA: Updated Hydrogeological Statistics in ONKALO Area and Revised Estimation of Leakage Water Inflow into ONKALO Tunnels, Working Report 2006-29, 2006.
- 4) 戸井田 克, 須山泰宏, 森 孝之, 稲葉武史, 渥美博行, 田中俊行, 小林一三, 中寫誠門, 尾方伸久: 東濃地域における地質環境の不確実性評価 - 平成 17 年度 -, JAEA-Research 2007-071, 2007.
- 5) 柳澤孝一, 須山泰宏, 高瀬博康:「地質処分における地質環境特性調査の進め方 - 不確実性 -」, ISOTOPE NEWS, 2006 年 12 月号, 2006.
- 6) 戸井田 克, 須山泰宏, 稲葉武史, 笹倉 剛, 渥美博行, 田中俊行, 小林一三: 東濃地域における地質環境の不均質性評価, JNC TJ7400 2004-017, 2004.
- 7) Clark, Isobel: Practical Geostatistics, ISBN 0-85334-843-X, 1979.
- 8) 福井県立博物館: 日本海のおいたち, 1986.
- 9) T.Engelder: Stress Regimes in the Lithosphere, Princeton University Press, New Jersey, p. 221, 1993.
- 10) 岩の調査と試験編集委員会: 岩の調査と試験, 土質工学会, 1989.

5. 適用すべき原位置調査手法の整理・検討

5.1 整理・検討内容

地質環境モデルに付随する不確実性は、本報告書で体系化した「地質環境モデルに付随する不確実性評価の手順」を用い、現有の知識に基づき定量化されることになる。この定量化された不確実性の程度は現有の知識の程度を表現するものであり、本手順にも示すように、基本的には引き続き地質環境調査を行い、不確実性の低減、つまり知識の増大を目指す必要がある。

本手順では地質環境モデルの評価対象として「地下水流動」に着目しているため、本章では地下水流動評価の観点から適用すべき原位置調査手法の整理・検討を行なった。

5.2 地下水流動評価において適用すべき原位置調査手法

現在、日本原子力研究開発機構では図 5.1 に示す繰り返しアプローチ¹⁾を用い、調査研究を進めている。「地質環境モデルに付随する不確実性評価の手順」は、同図の左側において「不確実性評価」に着目したものである。

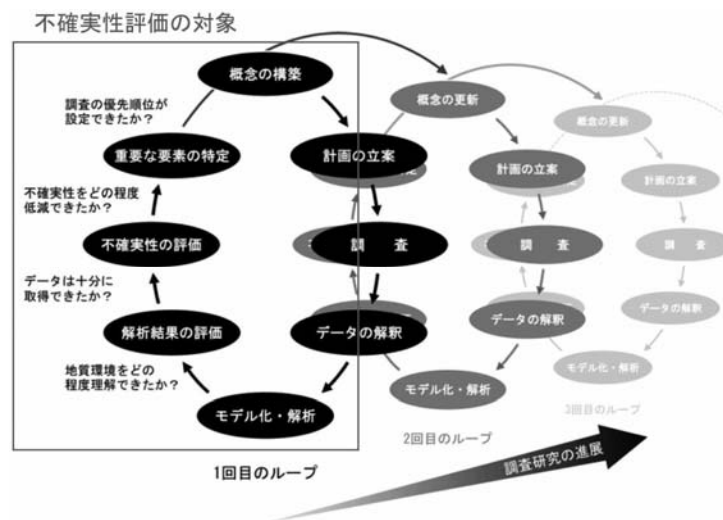


図 5.1 調査研究の繰り返しアプローチ¹⁾と本手順の関係

図 5.1 の調査研究の繰り返しアプローチや「地質環境モデルに付随する不確実性評価の手順」で示されている「調査」において、地下水流動評価の観点から適用すべき原位置調査手法の選定は、以下に示す考えに基づき実施した。

地下水流動評価において、例えば地下深部におけるダルシー流速とダルシー流速に基づく地下水移行時間を取り上げた場合、考慮すべき事項としては以下の項目が考えられる。

- 基本的な地下水流動場の理解：拡散場 or 移流場，流動方向，境界条件
- 地下水流動解析結果の検証用データの取得：原位置での流向，流速，移行時間
- 空間スケールの絞込みのための条件の提示：例えば，リージョナルスケールからローカルスケールやサイトスケールへの整合性確保（境界条件の信頼性）

これら考慮すべき事項を考えた場合、原位置で適用すべき調査手法は、必要な情報を直接取得できる手法として孔内流向流速測定と孔間トレーサー試験が考えられる。しかし、本手順が対象とする空間スケール（例えば、リージョナルスケールからローカルスケールやサイトスケール）は、孔間トレーサー試験が対象とするスケール（ブロックスケール）と異なるため、以下、本検討では孔内流向流

速測定に限定して取りまとめた。

5.3 孔内流向流速測定

孔内流向流速測定は、開削工事やシールド工事による帯水層の遮断に伴う地下水の影響評価や廃棄物による土壌・地下水汚染などの地下水環境評価の一環としてのニーズの高まりにより、様々な研究開発が進められていると共に、実用化されている²⁾。しかし、これらの調査技術は研究段階のものも多く、これまでは定性的な適用が多いのが現状であった。

本節では孔内流向流速測定の概要を示した上で、「地質環境モデルに付随する不確実性評価の手順」に有用と考えられる具体的な手法を提案する。

5.3.1 孔内流向流速測定方法の概要

単孔式流向流速は、単一の測定孔を用いて水平方向の地下水の流れの流速と流向を求めるものである。一般に、測定孔周辺の極めて狭い領域の流れを反映するため、等方均質な多孔質媒体と見なされる砂や砂礫などの未固結堆積物からなる飽和帯水層を対象としている。しかし、最近フィンランドなどでは岩盤中の亀裂水を対象とした研究も行われている（図 5.2 参照）³⁾。

単孔式流向流速測定の測定原理にはいくつかの種類があり、図 5.3 のように整理されている。基本的な分類としては、ある特定の浮遊粒子に着目し、その軌跡を追う固体粒子追跡型と、溶液の移動を追跡する溶液濃度追跡型の二つに大別される²⁾。

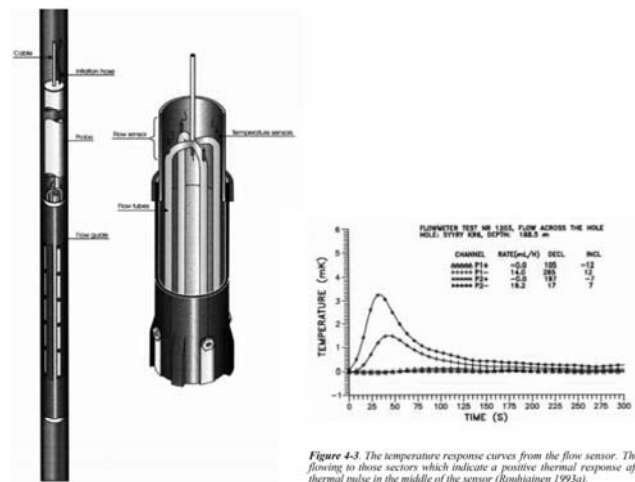


Figure 4-2. Transverse flow measuring probe.

Figure 4-3. The temperature response curves from the flow sensor. The groundwater is flowing to those sectors which indicate a positive thermal response after generation of thermal pulse in the middle of the sensor (Rondhainen 1993a).

図 5.2 Transverse Flow Measurement³⁾

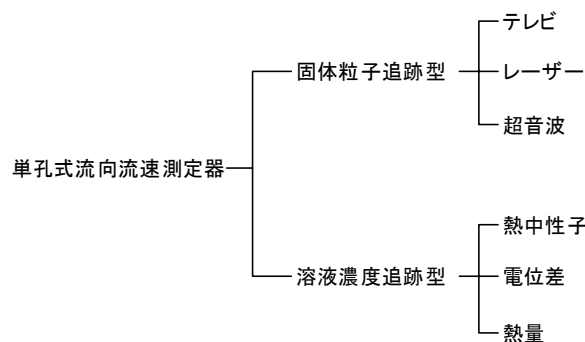


図 5.3 単孔式流向流速測定器の分類²⁾

これらの測定方法の中で、地下深部における極低流速場 ($10^{-10} \sim 10^{-8} \text{ m/s}$)、かつ3次元を対象としているものは、戸井田他⁴⁾が開発を進めている手法(超音波反射・追尾方式 流向・流速計測システム)のみである。つまり、「地質環境モデルに付随する不確実性評価の手順」に最も有用であると考えられる手法は、超音波反射・追尾方式 流向・流速計測システムであると考えられる。

5.3.2 超音波反射・追尾方式 流向・流速計測システム

本システムは、図5.4に示す自然な状態の岩盤中地下水流れを推定することを目標に、密度可変固体トレーサの水中での動きを、超音波を用いて追跡する手法である。図5.5に示す流向・流速計測装置は、地下1,000m程度の環境下(水圧10MPa, 水温50℃)でも性能が発揮できることを想定し、 $10^{-10} \sim 10^{-5} \text{ m/s}$ での流速、3次元空間での流向を計測目標としているものである。

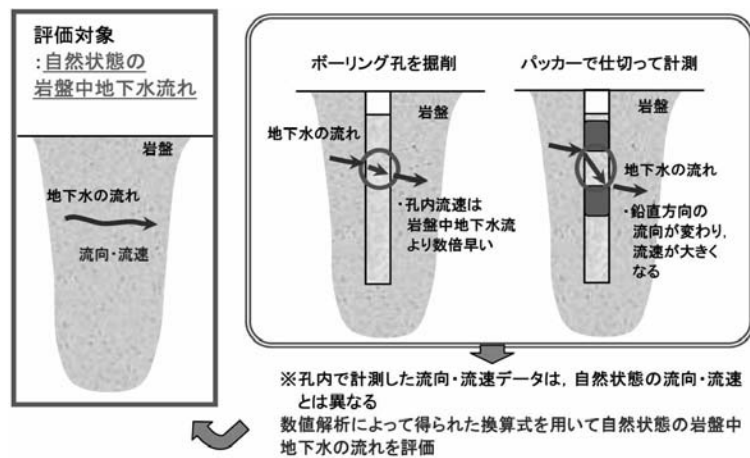


図5.4 本システムによる評価対象⁴⁾

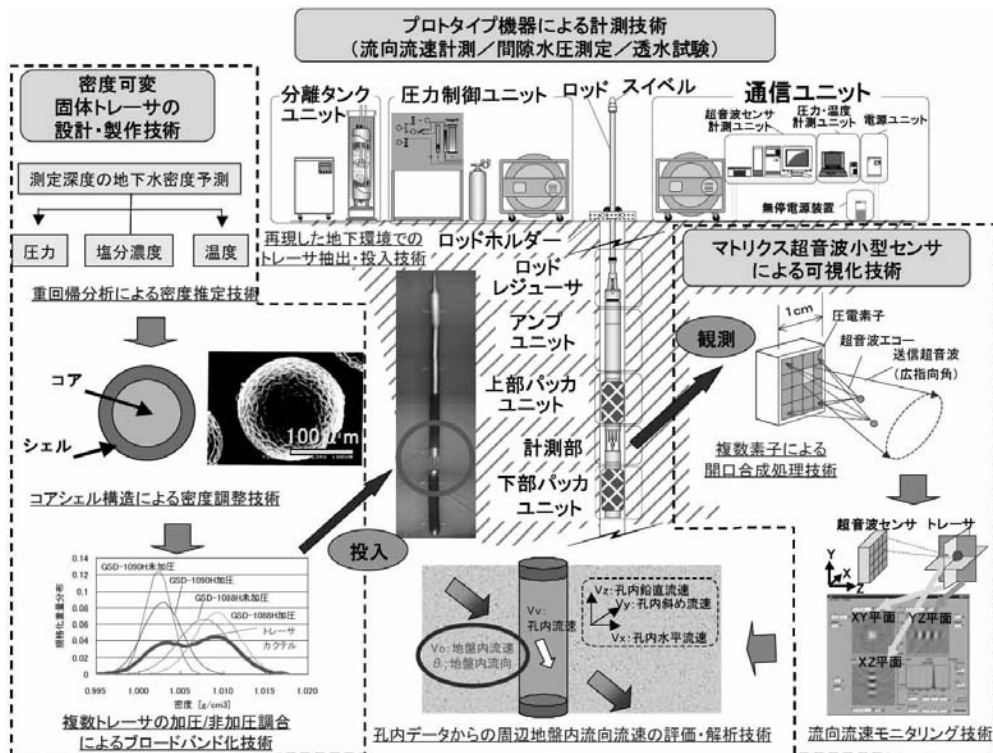


図5.5 流向・流速計測装置の概要⁴⁾

5.3.3 超音波反射・追尾方式 流向・流速計測システムの適用方法

地質環境モデルに付随する不確実性評価の手順においては、超音波反射・追尾方式 流向・流速計測システムから得られた結果が、図 5.6 に示すように概念モデル構成要素の具体化や、選択肢の抽出、確からしさの評価などモデルオプションに係わる事項に情報提供が可能であると共に、地下水流動解析に係わる事項に情報提供することが可能となる。また、図 5.7 にはスケールの観点で、信頼性向上に寄与する事項を示す。特に、拡散場 or 移流場などモデルオプションの選定や、流向・流速など結果の検証などに適用できる情報は、地質環境モデルに付随する不確実性の低減に多大に寄与するものである。

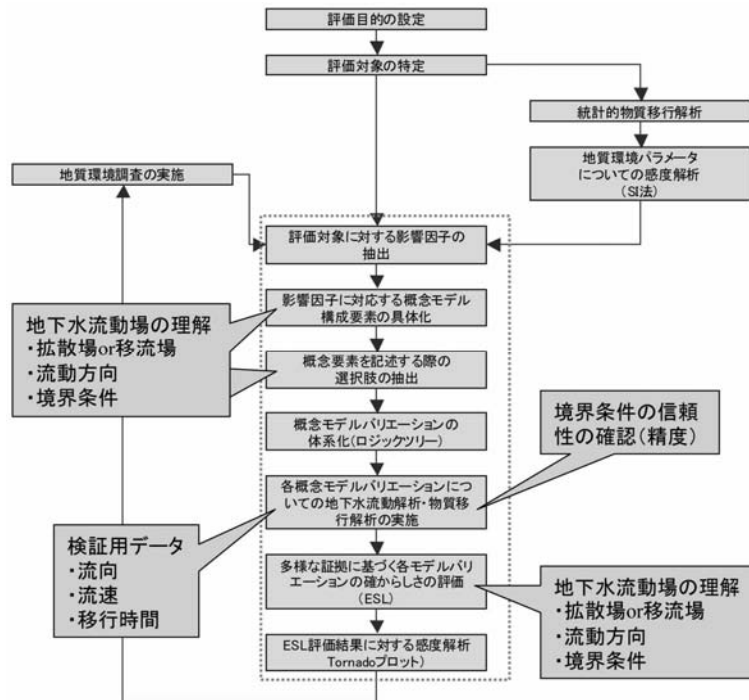


図 5.6 地質環境モデルに付随する不確実性評価の手順における超音波反射・追尾方式 流向・流速計測システムの位置付け

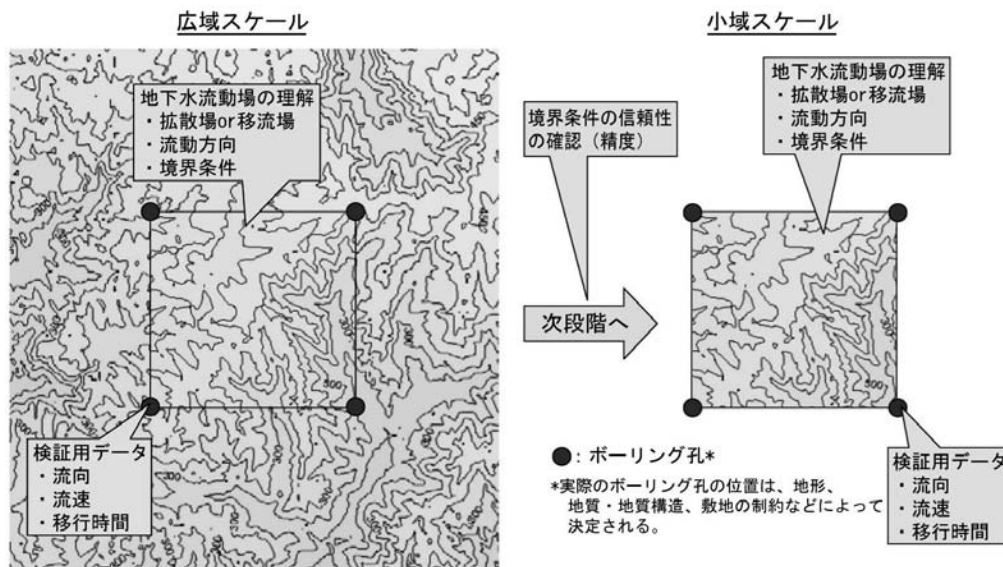


図 5.7 超音波反射・追尾方式 流向・流速計測システムが各スケールでの信頼性向上に寄与する事項

5.4 参考文献

- 1) 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15年度報告—, JNC TN1400 2004-007, 2004.
- 2) (社)地盤工学会：地盤調査の方法と解説, 2004.
- 3) POSIVA: Posiva groundwater flow measuring techniques, 2000-12, 2000.
- 4) 戸井田 克, 田中真弓, 岩野圭太, 中嶋誠門, 渥美博行, 古市光昭, 塚本正彰, 佐藤光吉, 鈴木健彦, 長井 敏, 小舞正文, 大江俊昭, 西垣 誠：「高レベル放射性廃棄物処分場の性能検証用計測システムの開発（平成17年度）」, (財)エネルギー総合工学研究所, 2005.
<http://www.iae.or.jp/KOUBO/innovation/theme/pdf/h13-8-17.pdf>

6. 地下施設設計時に考慮すべき事項の整理・検討

6.1 施設設計の方法論

本節では施設設計の方法論として「地質環境の不確実性を踏まえた天然バリア機能の最適化設計手法」の概要を取りまとめた。そして、本方法論における概念設計と詳細設計の位置付けを整理した。

6.1.1 地質環境の不確実性を踏まえた天然バリア機能の最適化設計手法

(1) 前提

高レベル放射性廃棄物地層処分の性能評価においては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、Publication 81¹⁾では、新しい考え方に基づく具体的な防護指針として、予想される潜在的被ばくあるいは対応するリスクが一定の拘束値以下であるという条件の下に、「潜在的被ばくを低減するために、合理的に達成可能な方策を尽くす」ことが求められている。

地層処分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」ためには、性能評価に含まれる不確実性を低減しつつ、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考えられる。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、引き続き段階において、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施設設計（適切なサイト・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。

本節では、「合理的に達成可能な方策を尽くす」のうち、②の天然バリア機能を最適化する施設設計に焦点をあて、不確実性の大きさを考慮した施設設計の方法論を取りまとめた。ここで示す設計は「性能評価の観点（地下水流動や物質移行）」を対象とし、「空洞の安定性など力学的観点」は対象外としている。

(2) 不確実性の大きさを考慮した施設設計の必要性

①地質環境に含まれる不確実性を考慮した多重バリアシステムの全体像

わが国の地層処分の概念は、閉鎖後長期間にわたってガラス固化体を人間の生活環境から安全に隔離できるよう、天然の地質環境（天然バリア）と工学的な防護系（人工バリア）を組み合わせた多重バリアシステムの考え方に基づいている²⁾。したがって、地質環境に含まれる不

確実性に対する対処は、地層処分における多重バリアシステム全体を考慮して実施する必要がある。そこで本節では、図 6.1 に示す地質環境に含まれる不確実性を考慮した多重バリアシステムの全体像（性能評価の観点）を基本として、検討を行った。

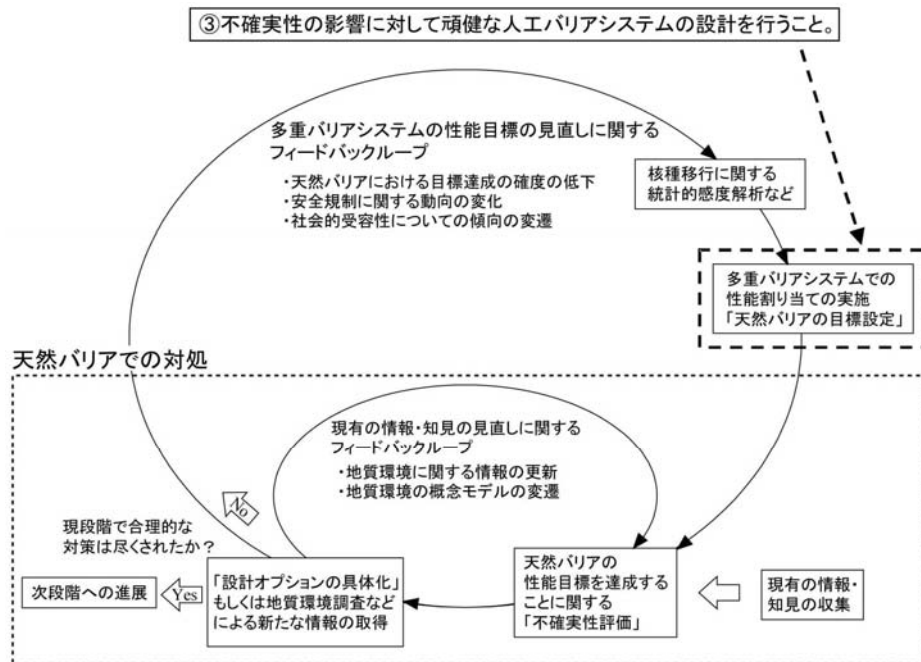


図 6.1 地質環境に含まれる不確実性を考慮した多重バリアシステムの全体像
(性能評価の観点)

性能評価の観点から見た場合、地質環境に含まれる不確実性に対する対処としては、多重バリアシステム全体として「天然バリアと人工バリアとの性能割り当てでの対処（図 6.1 での大きなループ）」と「天然バリアのみでの対処（小さなループ）」の二重ループで表現することができる。大きなループで表現される多重バリアシステムでの性能割り当て、つまり「天然バリアの目標設定」は、安全規制や社会的受容性を踏まえ核種移行に関する統計的感度解析などを行うことにより設定することができる。その結果、小さなループでは、現有的情報・知見に基づき天然バリアの性能目標を達成することに関する「不確実性評価」や「設計オプションの具体化」などを実施し、「現段階で合理的な対策が尽くされたか？」という観点で次段階への進展に関し意思決定を行うことになる。この意思決定において更なる対策が必要と判断された場合は、小さなループにおいて不確実性低減に向けた地質環境調査を行い、新たな情報の取得による現有的情報・知見の見直しに関するフィードバックを行うか、天然バリアのみでの対処が困難な場合には大きなループによる「天然バリアの目標設定」の見直しに関するフィードバックを行うことなどが考えられる。ここで示す天然バリアの目標設定の見直しは、前述の「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」を意味する。

ここで示す「現段階で合理的な対策が尽くされたか？」とは定性的な判断であるが重要な意思決定基準である。この考え方の一例としては、図 6.2 に示すように地質環境の不確実性を指標に、横軸にコストや工期を考え、不確実性が十分に収束しているか否かという判断を行うことである。その結果、「現段階で合理的な対策は尽くされたか？」という問いに対し、意思決定が可能になると考えられる。

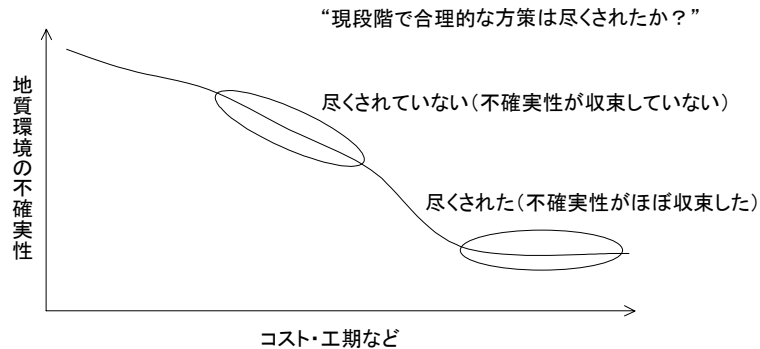


図 6.2 地質環境の不確実性を指標とした意思決定概念図

② 地質環境に含まれる不確実性に対する天然バリアでの対処

図 6.1 の細点線で示した「天然バリアでの対処」をより具体的に示したものを図 6.3 に示す。

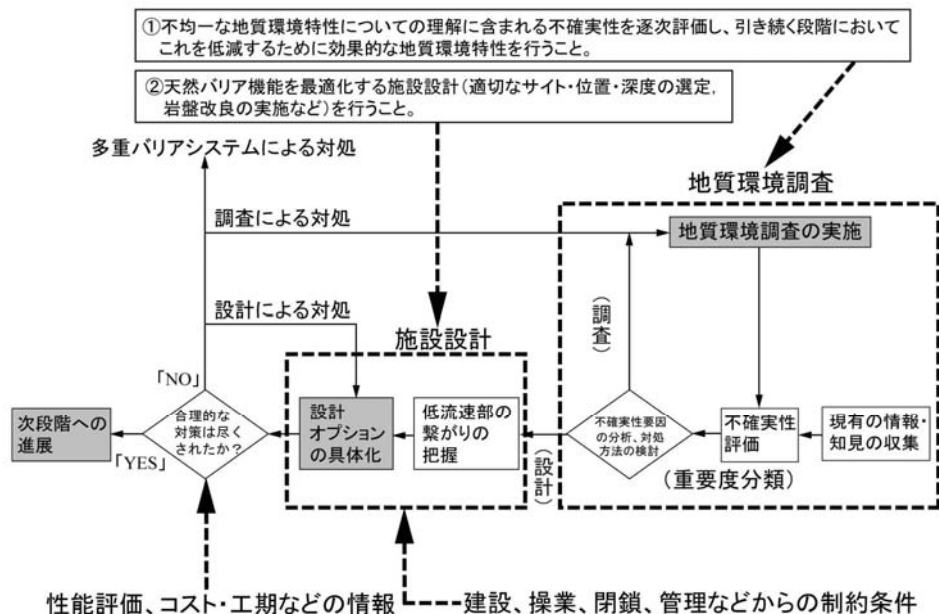


図 6.3 地質環境に含まれる不確実性に対する天然バリアでの対処

図 6.3 は、地質環境に含まれる不確実性に対する天然バリアでの「地質環境調査」と「施設の設計」における対処を示している。具体的に「地質環境調査」では、現有的情報・知見の収集結果を基に、前述した「天然バリアの目標設定」に対し不確実性評価を行い不確実性要因の分析と対処方法の検討を行う。調査で十分に低減可能な不確実性の場合は地質環境調査を実施するループを周り、不確実性が十分に低減するまで同じ手順を繰り返す。調査で低減が困難な場合や他の制約（例えば、工期）がある場合は、設計で対処するため次のステップ「施設の設計」に進む。「施設の設計」では低流速部（水理学上の任意の基準、例えば地下水移行時間がある年数以上などを満たす場所）の繋がり把握を行ったうえで、設計オプションの具体化を図る。その後、性能評価やコスト・工期の情報を踏まえ「现阶段で合理的な対策が尽くされたか？」という判断基準にて意思決定を行い、問題がないと判断されれば次段階に進むことができる。この意思決定において更なる対策が必要な場合、設計による対処が必要であれば「施設の設計」に、調査による対処が必要であれば「地質環境調査」に、多重バリアシステムによる対処が必

要であれば図 6.1 に示した大きなループに戻ることになる。

ここで示した地質環境調査の実施は前述の「①不均一な地質環境特性についての理解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」を、設計オプションの実施は「②天然バリア機能を最適化する施設設計（適切なサイト・位置・深度の選定や岩盤改良の実施など）を行うこと」を意味している。

これまでに示したように、「現段階で合理的な対策は尽くされたか？」という判断基準にて意思決定を行うためには、「多重バリアシステムにおける天然バリアの目標設定の見直し」と「地質環境調査の実施」に加え、不確実性を考慮した「設計オプションの具体化」が必要であるといえる。

(3) 地層処分事業における地質環境に含まれる不確実性に対する施設設計での対処方法

①不確実性を考慮した低流速部の整理方法

(2) で示したように、不確実性を考慮した設計オプションの具体化を行うためには「適切な場所」を選ぶ指標として事前に図 6.4 に示すような低流速部の整理が不可欠である。

例えば対象領域のある断面における任意の地点から流出域までの地下水移行時間に着目した場合、地下水移行時間は天然バリア中の核種移行遅延による減衰効果に関係するため、図 6.4 に示すように、地下水移行時間に関する低流速部は基準よりも長ければ低流速部であり、短ければ高流速部となる。地下水移行時間に不確実性が存在する場合、下限値が基準より長ければ不確実性が存在しても低流速部であるといえ、逆に上限値が基準より短ければ不確実性が存在しても高流速部であるといえる。また、不確実性により地下水移行時間の分布範囲が基準をまたいだ場合は現段階では低流速部であるか否かの判断が出来ないことを意味している。ここでの基準は、多重バリアシステムの性能割り当てにより当然変わるものである。これらのことから、図 6.5 に示すように調査初期の段階で不確実性が大きい場合は、例えば保守的に各地点での最短時間で基準を満足しているか否かを評価すると、全ての領域が高流速部になる可能性があることが分かる。つまり、不確実性が大きい段階では低流速部・高流速部の明確な判断が出来ず、絶対位置としての低流速部の選定が困難であると考えられる。

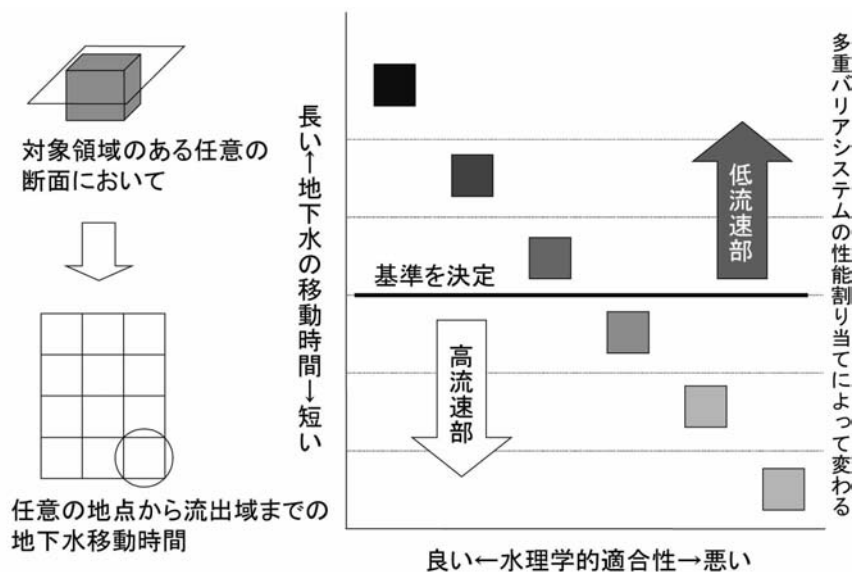


図 6.4 低流速部のイメージ図（地下水移行時間を対象とした場合）

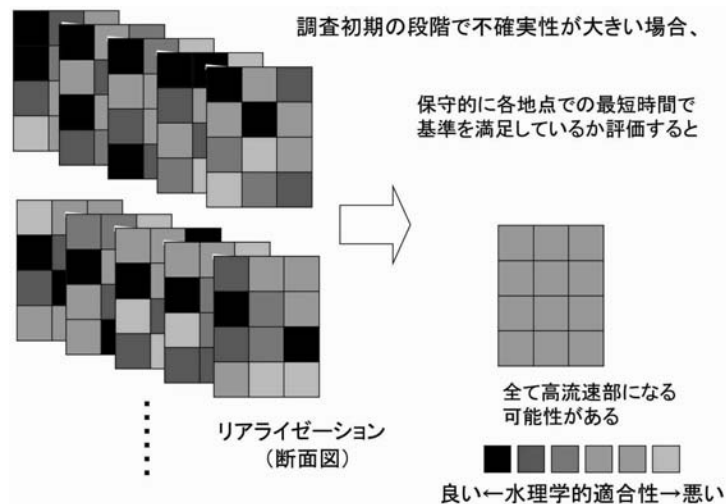


図 6.5 不確実性が大きい場合の低流速部

② 不確実性の大きさを考慮した施設設計の方法論

地質環境に含まれる不確実性に対する天然バリアでの対処の中で、設計オプションの具体化の位置付けは前述したように図 6.3 に整理されている。このとき、低流速部に含まれる不確実性を考えると、「設計オプションの具体化」において実施できる内容はその不確実性の程度により異なると考えられる。

具体的に考えると、地質環境調査の前半時期においては当然現有の情報・知見が少なく、地下水移行時間などの推定結果に含まれる不確実性は大きいと判断される。この段階では、地下水移行時間を例にとると、前述したように対象領域全てにおいて高流速部になる可能性がある。そのため、絶対位置を特定した通常的设计は困難であると考えられる。そこで「設計オプションの具体化」として提案する内容を以下に示す。調査前半の不確実性が大きい段階では不確実性評価に用いた個々のリアライゼーションでの地下水流動解析結果に戻り、低流速部の繋がり具合を把握し、その不均一性に応じた設計を行う。このとき不確実性が大きければ大きいほど対象とすべきリアライゼーションの数が増加するため、詳細な検討を行うのではなく、例えば「処分パネル (H12 レポート²⁾ で検討されている処分施設の基本概念)」が設置できる空間を確保することができるかなど施設概念のレベルでの検討を行うことである (図 6.6 参照)。施設概念の検討のイメージとしては、「処分パネル」や「大深度鉛直孔処分」³⁾ などからの選択や、「処分パネル」においても分散配置や多層配置などの選択が考えられる。当然不確実性が大きい段階では施設概念のレベルでも複数の設計オプションを保有することとなる。

地質環境調査の後半時期においては、複数のボーリング調査や地下施設を用いた調査を行うため、地下水移行時間などの推定結果に含まれる不確実性は前半時期と比較し小さくなると判断される。この段階では、地下水移行時間を例にとると、対象領域において不確実性はあるもののその幅は低減されているため、明確に低流速部と判断される場所が存在すると考えられる。そこで「設計オプションの具体化」として提案する内容は、例えば「処分パネル」を考えた場合、既に判明している低流速部を対象に、最適な坑道レイアウトを行うことである (図 6.7 参照)。最適な坑道レイアウトなどのイメージとしては、「処分パネル」の場合、パネル形状や、坑道間隔、地質環境特性の復元のためのプラグ設置位置などの検討が考えられる。当然この提案内容には不確実性の程度に応じて最適と考えられる坑道レイアウトを複数保有することも含

まれている。以上が「不確実性の大きさを考慮した施設設計の方法論」の基本的な考え方である。

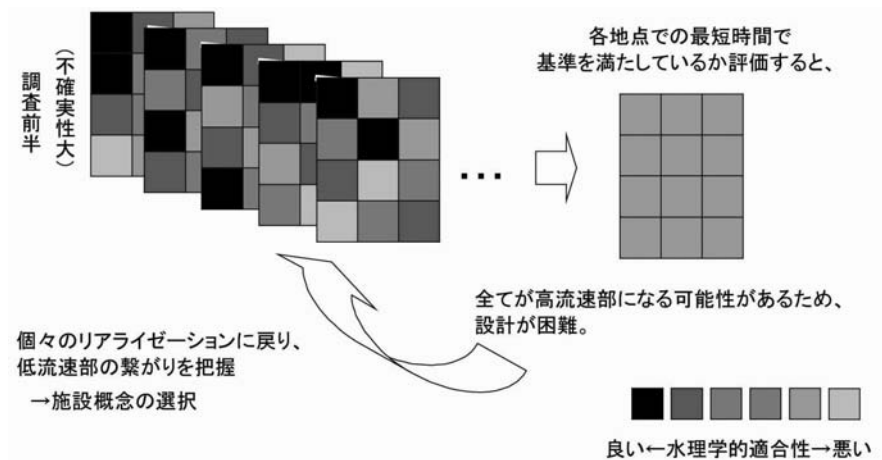


図 6.6 地質環境調査前半（不確実性大）での設計オプションの具体化イメージ

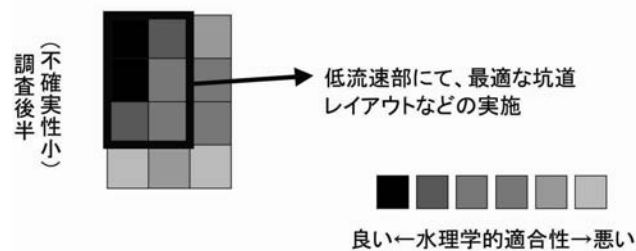


図 6.7 地質環境調査後半（不確実性小）での設計オプションの具体化イメージ

6.1.2 本方法論における概念設計と詳細設計の位置付け

(1) 対象とする地下施設

本検討で対象となる地下施設は、高レベル放射性廃棄物地層処分の基盤的研究である深地層の科学的研究の一環として建設されている瑞浪超深地層研究所である（図 6.8 参照）。

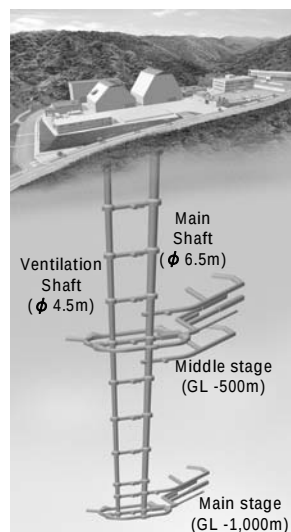


図 6.8 瑞浪超深地層研究所研究坑道の基本レイアウト（イメージ図）⁴⁾

(2) 本方法論における概念設計と詳細設計

本方法論では調査の進展の過程で、不確実性が大きい地質環境調査前半（地上からの限られた調査）段階と不確実性が小さい地質環境調査後半（複数のボーリング調査や地下施設を用いた調査）段階に区分している。概念設計は概略仕様の決定を目的としているため、地質環境調査前半の段階で、詳細設計は詳細仕様の決定を目的としているため、地質環境調査後半の段階で適用されるべきものである。また、本検討の対象が瑞浪超深地層研究所であることを考えると、本方法論の概念設計として実施すべきことはアクセスとして立坑を用いるのか、斜坑を用いるのかという施設概念の検討、詳細設計として実施すべきことは排水などの設備計画を踏まえた詳細仕様の決定であると言える。

(3) 山岳トンネルの設計を踏まえた瑞浪超深地層研究所での設計のあり方

山岳トンネルの設計では、事前調査において全線にわたり調査精度を保持することの困難さや岩盤の不均質性に伴う不確実性が存在するため、トンネル掘削時の観察結果や計測結果に基づき当初設計の修正が可能な方法を採用している（図 6.9 参照）。

本方法論における概念設計および詳細設計は主に図 6.9 で言う当初設計にあたり、本方法論の詳細設計において保有した複数の施設レイアウトからの絞込みなどが図 6.9 で言う修正設計にあたると考えられる。しかし、立坑掘削工事が既に進行している瑞浪超深地層研究所での設計のように、通常の設計では複数の施設レイアウトを保有しつづけることは困難であるため、修正設計で実施すべきことは山岳トンネルと同様に、原位置で得られた情報に基づく施設レイアウトの変更であると言える。NATM によるトンネル工法における主な設計変更内容は支保パターンの変更や補助工法の適用などである。例えば、高圧・大量の地下水をもった断層破碎帯が存在する場合、山岳トンネルにおいてはルートが設定され、変更が難しいため、補助工法などを駆使し掘削することになる。

しかし、瑞浪超深地層研究所の建設は研究が目的であるため、山岳トンネルにおけるルート変更的なことも十分可能であると考えられる。

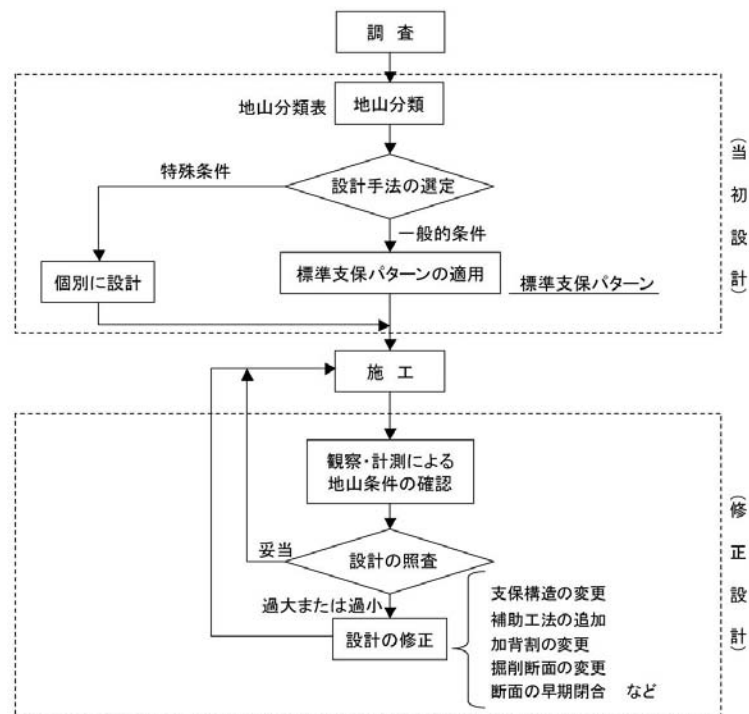


図 6.9 JHにおけるトンネル設計の手順⁵⁾

6.2 本方法論を踏まえ瑞浪超深地層研究所で実施すべき設計

6.2.1 修正設計としての施設レイアウトの変更

瑞浪超深地層研究所には、図 6.8 に示すように、主立坑、換気立坑、中間ステージおよび最深ステージが含まれている。

現在実施している立坑掘削においては多量の湧水が発生しており、化学処理や濁度低減と言った排水処理が必要となっている。そのため、コスト低減を図るためには湧水抑制対策が必要であると言われている⁶⁾。具体的な湧水抑制対策としてはグラウトが考えられているが、地下水の地球化学に関する地質環境調査においてはグラウトによる地下水の汚染が問題として挙げられており、グラウトとは異なる湧水抑制対策が求められている。

例えば、高圧・大量の地下水をもった断層破碎帯が存在することがボーリング調査などで分かっている場合、水平坑道（予備ステージ、中間ステージ、および最深ステージ）の施工において、最も有効な湧水抑制対策はグラウトよりも、断層破碎帯との遭遇自体を避けることであると考えられる。つまり、本方法論を踏まえ瑞浪超深地層研究所で新たに実施すべき修正設計は、施設レイアウトの変更（各ステージの掘削深度を変えることや、中間および最深ステージの展開方向を変えることなど）であると言える。

6.2.2 施設レイアウトの変更の具体的なイメージ

実際の施設レイアウトは、決定論的手法により構築された瑞浪超深地層研究所周辺の地質構造モデルを用いて構築される。図 6.8 に示す基本レイアウトは調査初期の段階の情報（調査対象の花崗岩はほぼ均質）に基づいて構築されたものである。

現在、日本原子力研究開発機構が構築している地質構造モデルは、図 6.10～図 6.13 に示すように破碎帯（割れ目帯）などがモデル化されているため、前項で示した考えに基づいて基本レイアウトを変更する場合には、これらのモデルを活用し、実施することが必要である。具体的には、中間ステージや最深ステージを、高圧・大量の地下水を保有している可能性がある破碎帯などから避けて、低透水性領域であると想定される土岐花崗岩の下部割れ目低密度帯に展開することである。

また、調査の観点から、湧水抑制対策において好ましく無い破碎帯に、水平坑道があえて遭遇する必要がある場合には、破碎帯に遭遇するように施設レイアウトを変更することも可能である。更に、これらの地質構造モデルは調査の進展（知識の増大）に伴い変遷することが考えられるため、実際の施設レイアウトの変更は、地質構造モデルの変遷に対応させることが必要である。例えば、施設レイアウトを可変型施設レイアウトとし、日々得られる施工情報や調査情報を基に施設レイアウトを調査目的などを踏まえ最適化することである。このような考えは坑道レイアウトを対象に既に検討事例⁷⁾があるので、それを参考に施設レイアウト版に改良していくことが可能である。

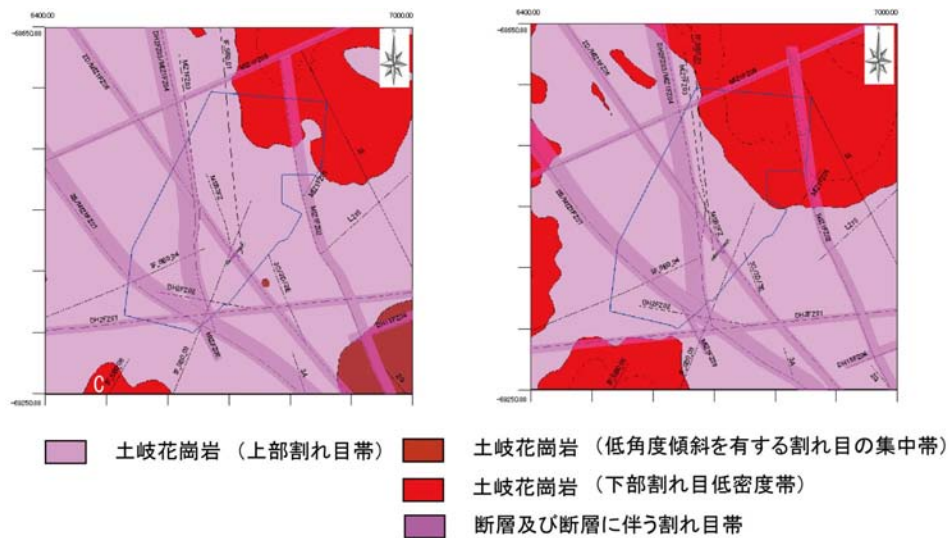


図 6.10 地質構造モデル（左：GL-300m 断面図，右 GL-400m 断面図）の例

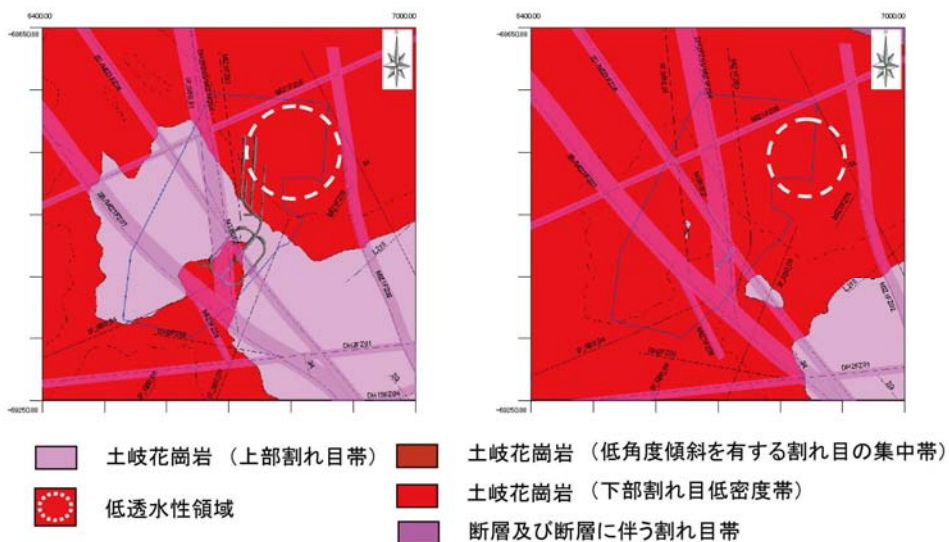


図 6.11 地質構造モデル（左：GL-500m 断面図，右 GL-600m 断面図）の例

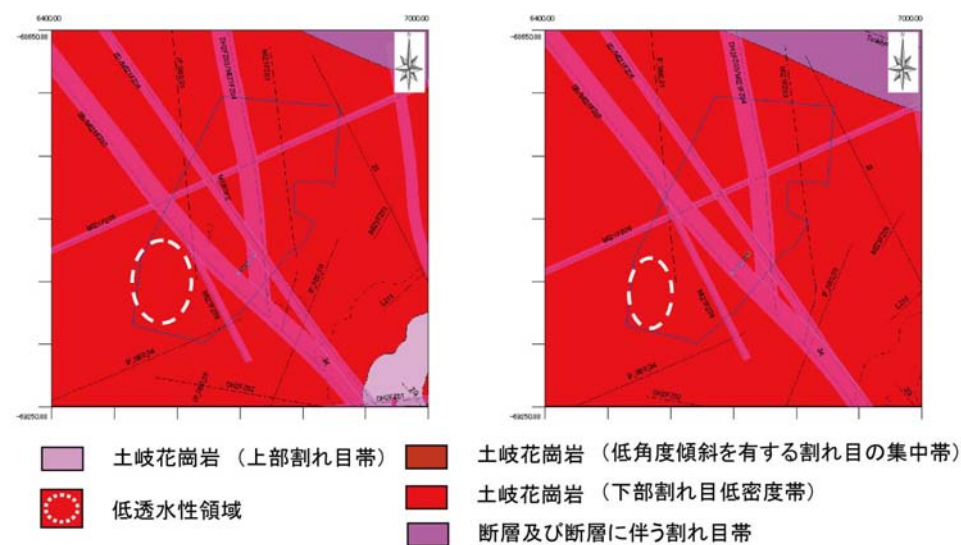


図 6.12 地質構造モデル（左：GL-700m 断面図，右 GL-800m 断面図）の例

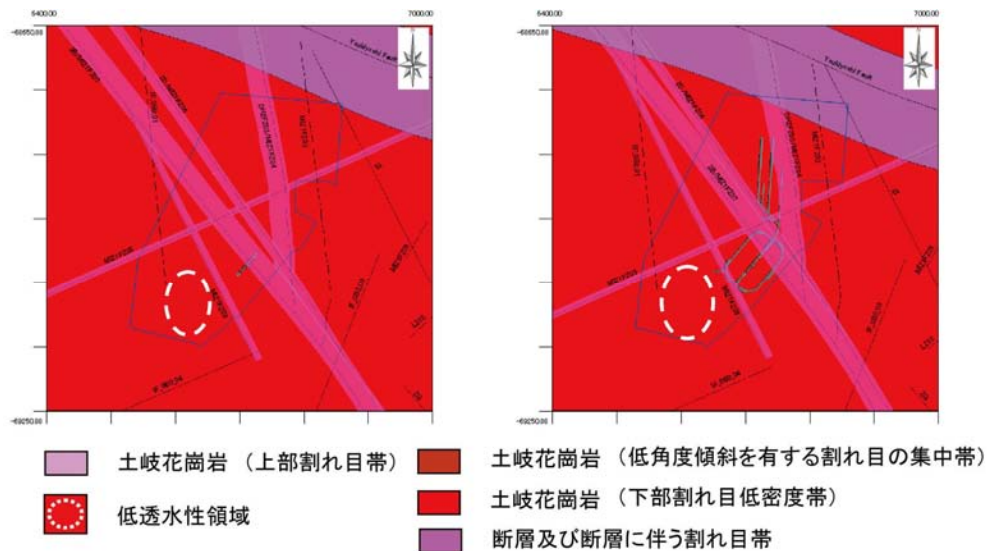


図 6.13 地質構造モデル（左：GL-900m 断面図，右 GL-1000m 断面図）の例

6.2.3 施設レイアウトの変更の具体的な検討例

現在，瑞浪超深地層研究所の立坑掘削では，図 6.14 に示すように換気立坑予備ステージ GL. -200m 付近にてプレグラウトが計画されている。このプレグラウトは，大量の湧水が生じると考えられる土岐花崗岩の低角度傾斜を有する割れ目の集中帯を対象としている。プレグラウトは大きく 2 種類考えられており，1 つは換気立坑沿いに行うものと，もう 1 つは探りボーリングなどを実施するために必要なボーリング横坑沿いに行うものである。この換気立坑沿いのプレグラウトは湧水抑制を行うために不可欠なものであるが，ボーリング横坑方向へのプレグラウトについては，当初の研究（地下水の地球化学の研究では，グラウトによる地下水の汚染をできるだけ低減したい）の観点を考慮すると，予備ステージ自体の掘削深度を浅くすることにより，グラウトを行わないで済む，もしくはグラウト量を低減できる可能性があったと考えられる。

瑞浪超深地層研究所においては施工の観点から湧水を抑制することが望まれていると共に，研究の観点からグラウトの実施量を低減することが望まれている。修正設計としての施設レイアウトの変更は，これらの矛盾する要望を満足させる一つのアイデアであると言える。

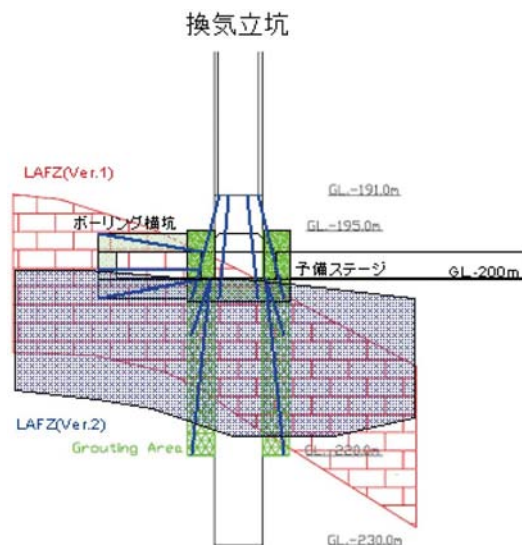


図 6.14 換気立坑予備ステージ GL. -200m 付近のプレグラウトの概念

6.3 海外の施設レイアウトの変更事例

国外における既往の施設レイアウトの変更事例として、スウェーデン核燃料・廃棄物管理会社（SKB）が地層処分場の設計および適切なサイト選定を目的として、科学的な研究を行うために建設した、エスポ岩盤研究所での事例を示す⁸⁾。

エスポ岩盤研究所はオスカーシャム自治体のエスポ島に建設され、その地下部分は、スパイラル状の斜坑が深さ約 460m まで達しており、坑道の総延長は約 3,600m、地下約 220m と約 420m に主な実験場がある（図 6.15、図 6.16 参照）。

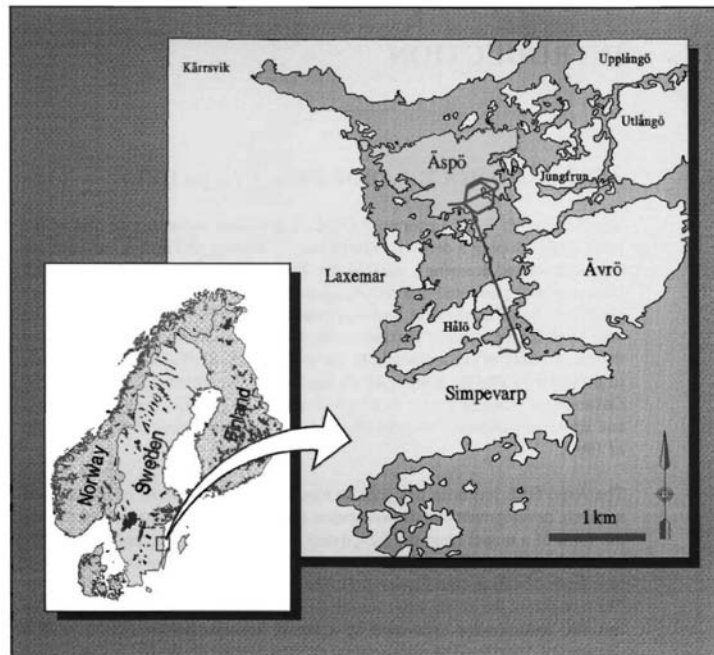
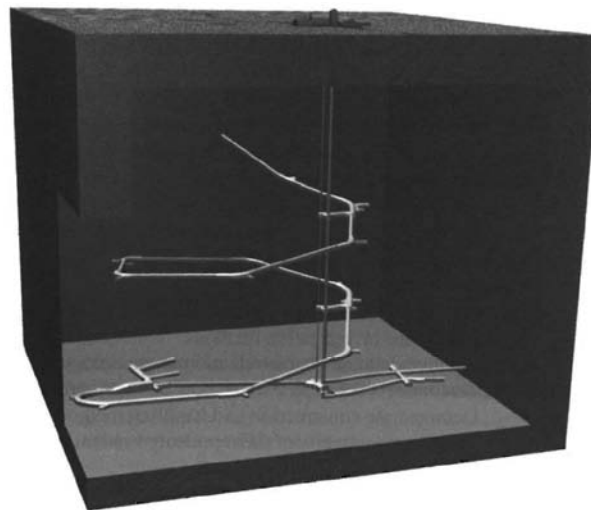


図 6.15 エスポ岩盤研究所の位置⁸⁾



General layout of the Äspö HRL. The total length of the tunnel is 3600 m. The first part of the tunnel was excavated using the drill-and-blast technique. The last 400 metres were excavated by a Tunnel Boring Machine (TBM) with a diameter of 5 metres. The underground excavations are connected to the Äspö Research Village, containing offices, stores, hoist and ventilation building, by a hoist shaft and two ventilation shafts.

図 6.16 エスポ岩盤研究所のスパイラル状の斜坑の鳥瞰図⁸⁾

エスポ岩盤研究所は 1991 年の 9 月に建設の途中で図 6.17 と図 6.18 に示すように施設レイアウトを変更している。このような変更が生じた理由はトンネルがボーリング孔 KBH02（図 6.19 参照）に当たったためである。

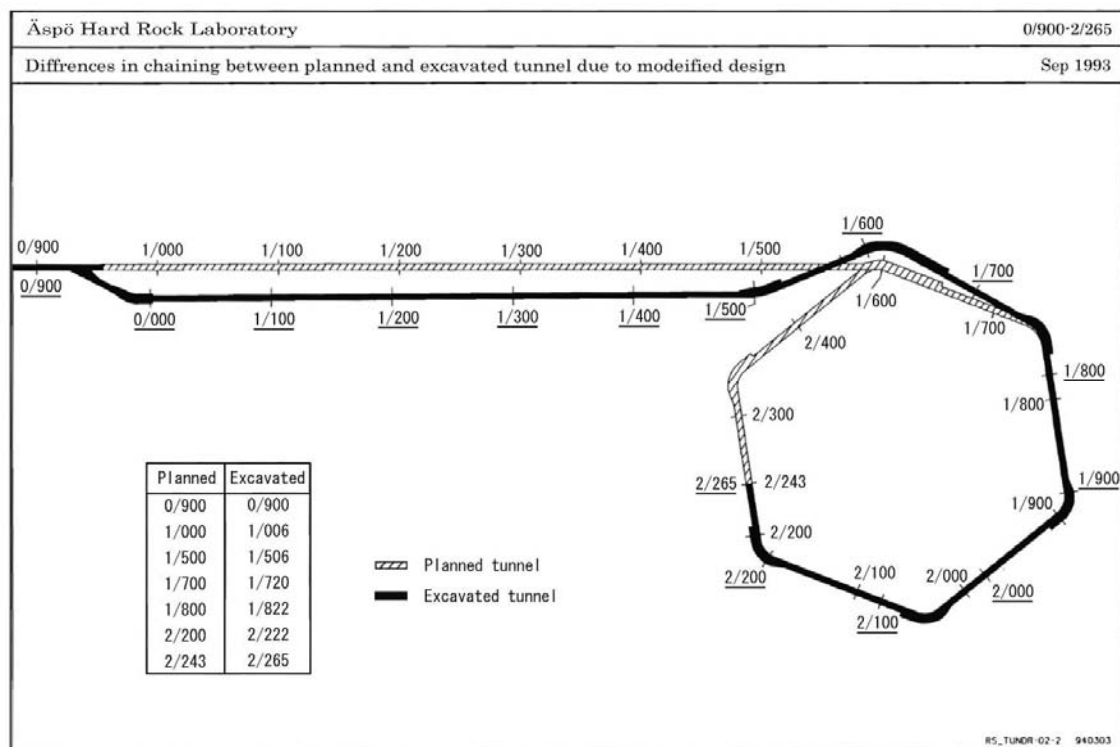


図 6.17 エスポ岩盤研究所における計画時と施工後のレイアウトの違い（その 1）⁸⁾

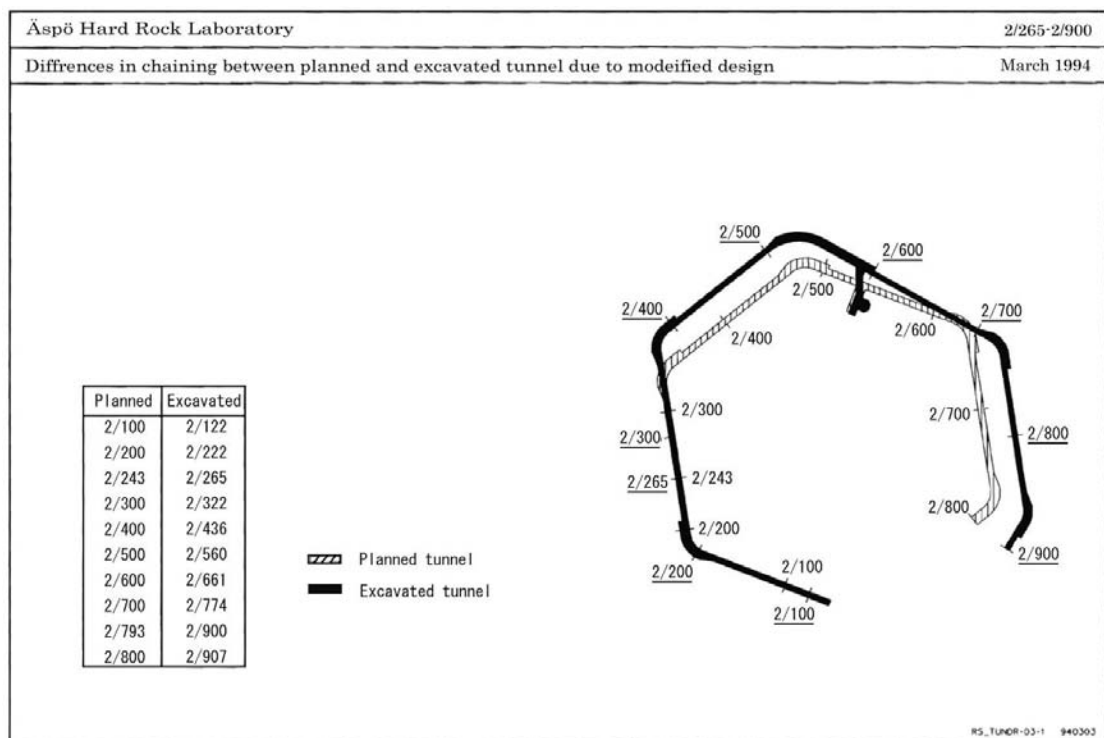


図 6.18 エスポ岩盤研究所における計画時と施工後のレイアウトの違い（その 2）⁸⁾

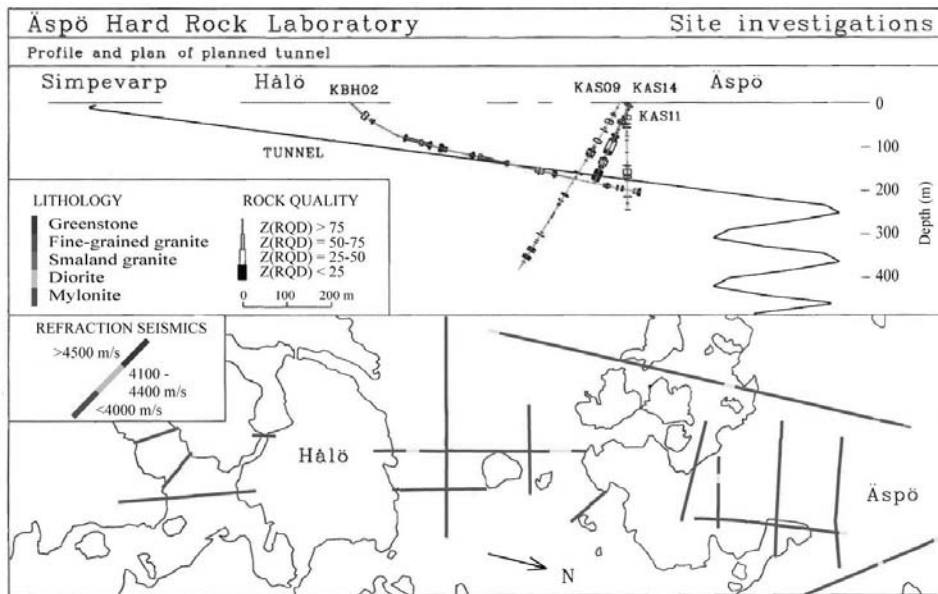


図 6.19 エスポ岩盤研究所とボーリング孔 KBH02 の位置関係⁹⁾

エスポ岩盤研究所の例が示すように、変更理由が明確であれば建設中に施設レイアウトを変更すること自体は十分に可能なことである。

6.4 まとめ

本章では、地質環境モデルに付随する不確実性評価の手順を前提とし、地下施設設計時に考慮すべき事項の整理・検討を行った。先ず、地下施設設計の方法論として、地質環境の不確実性を踏まえた天然バリア機能の最適化設計手法を提示した。ここでは、不確実性が大きい地質環境調査前半においては、複数の設計オプションを保有することが重要であり、不確実性が小さい地質環境調査後半においては、設計オプションを盛り込んだ上で、具体化することが重要であることを示した。そして、瑞浪超深地層研究所での施設設計では調査後半に該当するため、湧水抑制を念頭に置いた場合、実施すべき設計オプションの具体化としては、山岳トンネルにおける修正設計の考え方を踏まえ、施設レイアウトを変更することであるとした。

6.5 参考文献

- 1) 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.
- 2) 核燃料サイクル開発機構：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性，一地層処分研究開発第2次取りまとめ－，分冊3，地層処分システムの安全評価，JNC TN1400 99-023, 1999.
- 3) NUMO: Development of Repository Concepts for Volunteer Sitting Environments, TR-04-03, 2004.
- 4) 三枝博光，下茂道人，文村賢一，竹内真司，尾上博則：「地下研究坑道掘削に伴う地下水流動状態の変化を予測するための地下水流動解析とそれに基づく調査研究計画の策定」，日本地下水学会 2006 年秋季講演会 講演要旨，58，pp. 258-263，2006.
- 5) 日本道路公団：設計要領第三集トンネル，1997.
- 6) 久慈雅栄，佐藤稔紀，原雅人，南出賢司：「大深度立坑における湧水抑制対策としてのポストグラ

- ウト試験施工」, トンネル工学報告集, 第 16 巻, pp. 469-476, 2006.
- 7) 須山泰宏, 戸井田克:「地質環境の不均質性を踏まえた処分坑道レイアウトの最適化に関する検討」, 日本原子力学会「2006 秋の大会」, B62, p. 129, 2006.
- 8) Roy Stanfors, Pär Olsson, Håkan Stille: ÄSPÖ HRL-Geoscientific evaluation 1997/3, Results from pre-investigations and detailed site characterization, SKB TR97-04, 1997.
- 9) Roy Stanfors, Mikael Erlström, Ingemar Markström: ÄSPÖ HRL-Geoscientific evaluation 1997/1, Overview of site characterization 1986-1995, SKB TR97-02, 1997.

7. 地層処分システムの長期的性能に関する合理的な保証を行うための課題の抽出

7.1 地層処分システムの長期的性能の保証に関する合理性の視点

放射性廃棄物地層処分の性能評価に含まれる種々の不確実性のうち空間的不均一性に起因するものについては, 地質環境特性の空間分布がランダムな特徴を呈することおよびその複雑なパターンを読み解くために十分なだけの情報を地下深部において得ることが困難な場合に問題となる。他方, 不確実性の存在を前提としつつ, ICRP Publication 81¹⁾では, 「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きわめて困難である。このことは, 処分に対する放射線防護原則の適用を, 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として捉えるべきことを意味し, また, 安全評価によって提示される定量的な影響の程度は, 合意形成のための情報提供として位置づけるべきである。」としている。このような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」(Constrained Optimization)を行うことを求めている。このような方策としては, 安全性に影響を及ぼす天然事象等の生起する可能性の小さい適切なサイトを選ぶことや, 不確実性の影響が顕在化しにくい頑健な人工バリアシステムの設計を行うことに加え, 不均一な地質環境特性についての理解に含まれる不確実性を逐次評価し, 引き続き段階において, 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も含まれるものと考えられる。ここでは, このような意味で, 地層処分システムの長期的性能を保証することを目的とした合理的な範囲での地質環境調査による不均一な地質環境特性の理解について検討を加えることとする。

合理性とは, 一般に, 広い意味での費用と便益を伴う複数の選択肢の中で現実的な観点から許容可能とみなすことのできる範囲と考えることができる。また, このような意思決定問題には, 多くの場合, 評価者の価値観や主観が多かれ少なかれ介入するために, 評価者に依らない「合理性」のあり方を一義的に決定することは極めて困難である。また, このために, 合理性を導出する際の視点も複数存在し得るものと考えられる。ここでは, 以下に, 次の 3 つの視点から地層処分システムの長期的性能の保証を目的とした地質環境調査の合理性について検討を加えるものとする。

- ・地質環境調査の点数を費用の尺度としその結果期待できる不確実性の低減効果を便益として捉えた場合の費用便益論的な視点
- ・複数の異なる調査あるいは解析による独立した証拠の取得を費用の尺度としその結果期待できる不確実性の低減効果を便益として捉えた場合の費用便益論的な視点
- ・論証における対話による合理性の枠組みの設定という視点

7.2 地質環境調査の点数と不確実性低減効果の間の費用便益論

既に述べたように、地質環境に関連する不確実性としては、現象のランダムな特徴としての不均一性に起因するもの（Randomness）および情報の不足に起因するもの（Ignorance）が存在する。ここでは、それぞれの不確実性要因について、地質環境調査の点数との間の費用便益論的観点から検討を行う。

7.2.1 Randomness の場合

不均一な地質環境において取得されるデータはある有限の点数の標本とみなすことができる。そしてこの標本が小さい場合には母集団の代表性が乏しく、標本の平均等は母集団とは顕著に異なったものとなる可能性がある。しかし、標本の点数を増すにつれて、平均等の標本統計量は次第に安定し、母集団のものに収束していくという挙動をとる。図 7.1 は、不均一な地質環境において取得された仮想的な透水係数データの点数を徐々に増していった場合の標本対数平均の変化を示したものである。データ点数が小さい場合（例えば $n < 100$ ）には標本平均の変動は顕著であり母集団からの解離が予想されるが、より大きな n については標本対数平均は母集団の対数平均（ -7.98 ）に収束する挙動を示している。

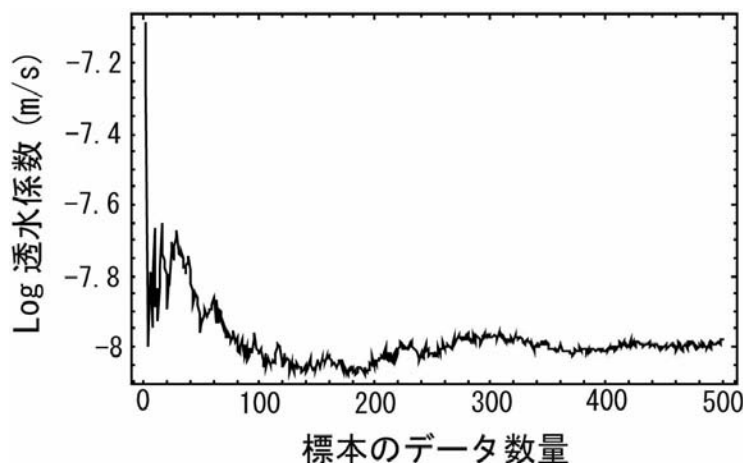


図 7.1 不均一場における透水係数データの点数と標本対数平均の関係

また、標本の有限性に起因する対数平均値の誤差（標準偏差）をブートストラッピング法（ n 個のデータから重複を許して n 個をサンプリングすることによって模擬データセットを作成し、その平均を取るという（独立な）行為を多数回繰り返すこと。この場合は、各模擬データセットについて算出される標本対数平均の標準偏差を算出することによって誤差を推定することができる）によって算出した結果が図 7.2 である。この図においても、データ点数が増大するとともに、標本から推定される統計量（この場合は対数平均）の精度が向上することが明らかである。

Randomness としての不均一性を含む地質環境特性データについての費用便益論的視点とは、例えば図 7.2 における標準偏差の低減（便益）とデータ点数（費用）を比較した場合に合理的となる範囲を設定することとして定義することができる。そこで、誤差（標本対数平均の標準偏差）を単位量低減するためにデータをどの程度増やせば良いか（具体的には、各標本サイズにおいて、データを一点増した場合にどの程度標準偏差が低減されるかを計算して、その逆数をとった。なお、ノイズを平坦化するため、 $n=50$ の移動平均を施している）を算出した結果が図 7.3 である。この図においても、一定

の便益（標準偏差の低減効果）を得るためのコスト（データ点数の増大）はデータ数の増大とともに増大しており、費用対効果が低下していることがわかる。そして、この場合の費用便益論としてはこのような費用の増大あるいは費用対効果の低下をどこまで許容するかが「合理性」を設定する上での着目点となる。

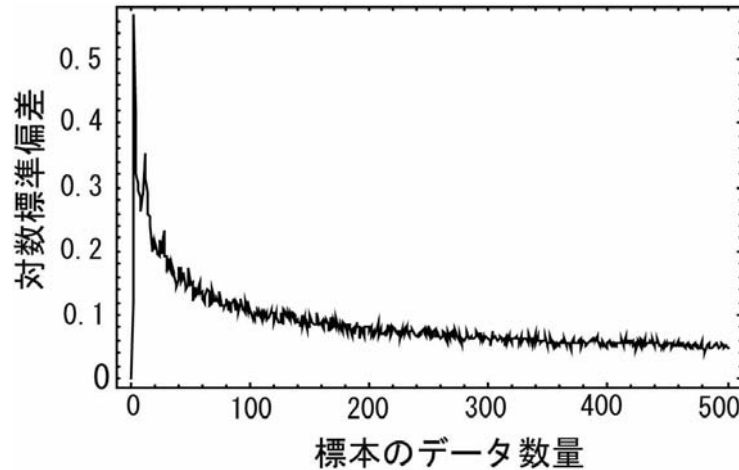


図 7.2 不均一場における透水係数データの点数と標本対数平均の標準偏差の関係

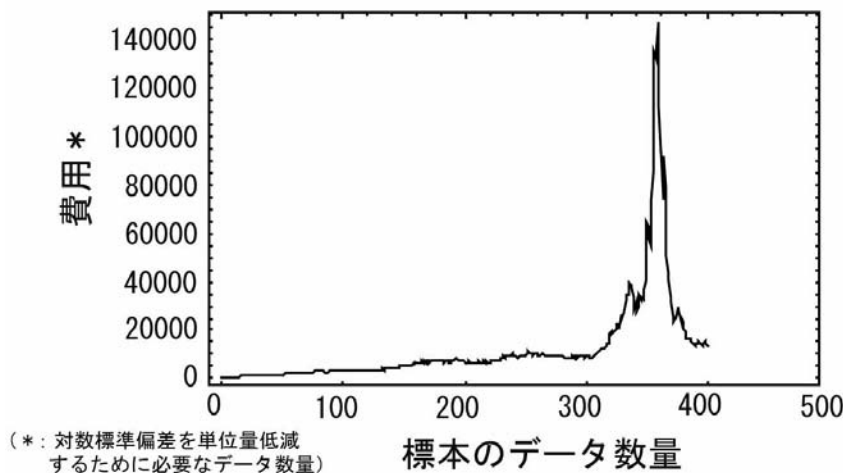


図 7.3 不確実性低減のために必要なコストとデータ点数の関係

7.2.2 Ignorance の場合

情報の不足、つまり Ignorance に起因する不確実性の典型的な例として、あるサイトにおいて未検出の高透水性の断層の存在可能性を考えることとする。この場合、当該サイトにおけるボーリング孔の数を増やすことによって、もしこのような断層があるとすればそれを検出することの確率が増すこととなり、逆に多くのボーリング孔において調査を行ったにも係らずこのような断層が見出されない場合には、断層が不在であるという仮説の信頼性が増すこととなる。例えば、このような未検出の断層の長さが調査対象領域に比べて十分に長いものであり、かつ、走向・傾斜についての事前の知識がかなり正確に得られている場合には、図 7.4 に示した配置のボーリング孔において断層が検出されないことは断層の不在を示す確度の高い証拠とみなすことができる。そして、このような場合には、断層の存在可能な領域（あるいは体積）が個々のボーリング孔一本によってどの程度低減するかを指標

とすることによって前項と同様に費用対効果を算出することができる。

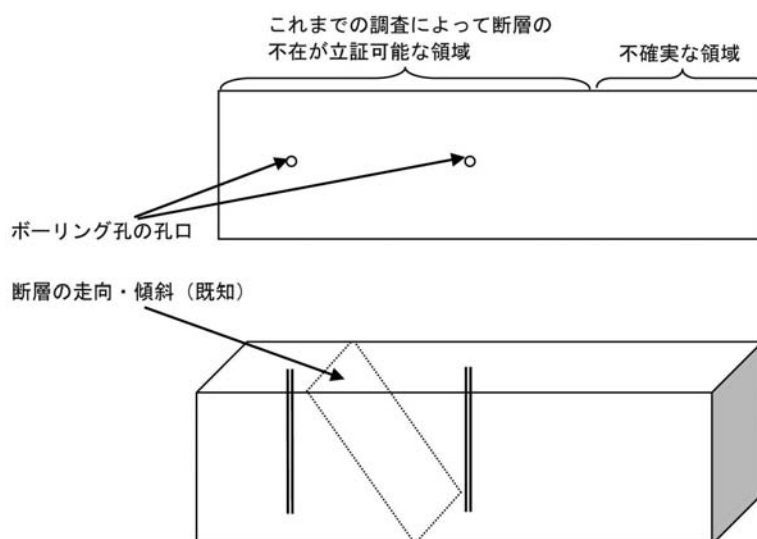


図 7.4 長さや走向・傾斜が既知な断層の検出可能性

しかしながら、未検出の断層について、長さや走向・傾斜が既知という前提条件は常に成立するとは限らない。そして、このような場合には、比較的稠密にボーリング孔を配置した場合においても、特に高角な断層の存在を否定できない場合には、断層の不在が立証可能な領域は大きくならず、さらに、断層の長さや走向についての情報も全く得られていないという状況では、少なくとも数学的には、断層の不在が立証可能な領域はボーリング孔の通過する部分のみに限られることとなる。そして、このような場合には、データ点数を尺度として費用便益論的検討は必ずしも有効とはならない。

7.3 複数の独立な証拠と不確実性低減効果の間の費用便益論

前節において述べたように、Ignoranceに起因する不確実性が主であり、かつ、事前の知識が限られている場合には、記述統計等の客観的な手法のみを適用して費用便益論を展開することは困難であると考えられる。そして、このような場合には、本報告書の前半において既に述べたように、複数の独立した証拠を取得することによって不確実性を低減する（信頼性を向上する）という方策が有効となることから、証拠を増す際の費用と便益を比較するという観点が重要になるものと考えられる。費用と便益を比較する具体的な手法の例としては、本報告書の前半において説明したESLが挙げられる。具体的には、例えば、前出の未検出の高透水性の断層の存在に関しては、以下のような手順が考えられる。

- ① 入手可能な証拠（ボーリング孔の孔壁およびコア観察、孔間透水試験、各種のトモグラフィ等）を引用しつつ階層プロセスモデルを構築する。
- ② 当該時点で入手可能な証拠に基づき最上位の命題（未検出の高透水性断層は存在しない）の信頼性を評価する。
- ③ 感度解析を行うことにより、現時点では未入手の証拠を取得した場合に最上位命題に含まれる不確実性（区間確率図において白として表現される割合）をどの程度の割合で低減することが可能かをそれぞれの証拠について予想する（図 7.5 参照）。図中の Impact Against および Impact For の棒グラフはそれぞれ結果として得られた証拠が命題を支持あるいは否定するものであ

た場合の最上位の命題の支持あるいは否定の程度の増加（従って不確実性の低減）の割合を示す。

- ④ 各証拠の入手に要する費用を、入手した場合に可能性のある不確実性の低減程度（各証拠について③で求めた感度（各証拠において単位量不確実性が低減した場合の最上位命題の不確実性の低減割合）にそれぞれの証拠に期待される不確実性低減効果（支持と否定の和）を乗じたもの）で除すことによって費用対効果を定量化する。

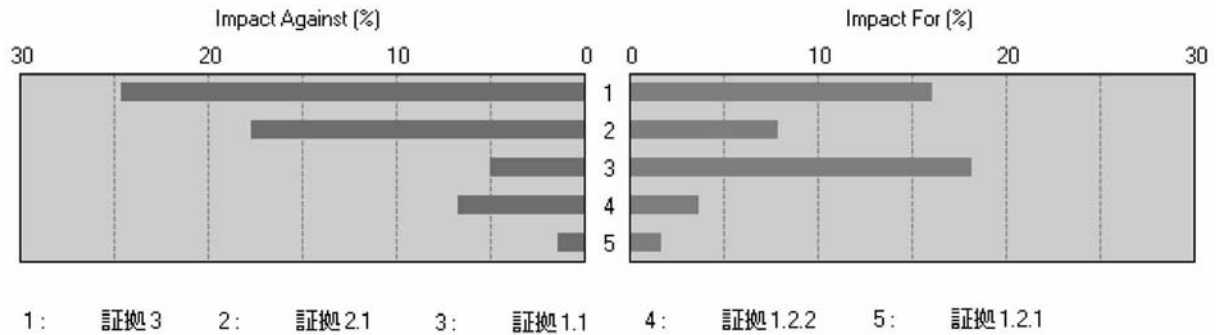


図 7.5 ESL における感度解析の概念（新たな証拠を入手した場合の不確実性の低減効果）

7.4 論証における対話による合理性の枠組みの設定

前項までに述べた方法により、不均一な地質環境に関連する Randomness および Ignorance のそれぞれに起因した不確実性について費用対効果を定量的に予想することは少なくとも原理的には可能と考えられる。そして、さらに、費用（地質環境調査の点数あるいは独立した証拠の種類）と便益（不確実性の低減程度）との間にトレードオフを設定することが可能であれば、合理性の設定は（便益）－（費用）を最大とするような数学的最適化問題を解くことに置き換えることができる。しかしながら、一般には、このようなトレードオフの設定は地層処分に関連する多様なステークホルダーの価値観等の主観的な要因によって種々に異なるものと考えられる。そして、このような一般的な状況においては、合理性の枠組みの設定は科学技術の領域において閉じた問題ではなく、利害関係者間の異なる価値観の間で妥協点を探る対話によって解決すべき問題となる²⁾。

対話としての論証については、法学の分野で研究が進められており、対話モデルと呼ばれるものが開発されている³⁾。例えば、ここで参照される典型的な論証の手続き（論証スキームと呼ばれる）には、Argument from Ignorance と呼ばれるものがあり、これは、ある命題を示唆する肯定的な証拠が見出されていない場合にその命題を「偽」と判断するという論証パターンである。明らかに、前出の未検出の高透水性断層に関する議論は、Argument from Ignorance の一例である。この論証スキームに対する決定的質疑（Critical Question：反証を試みる者が当該論証スキームの論理的脆弱性や矛盾を指摘するために有効な質問）は、該当する証拠を探すために行われた調査がどの程度徹底したものであるかに関することであり、法学の分野では、その範囲（Epistemic Closure と呼ばれる）を判事の調整のもとで原告側と被告側との対話により予め設定しておくことが必要と考えられている。このような対話を前提とした「合理性」の導出において、前項までに述べた費用対効果についての情報、即ち、調査に要するリソースとその効果として期待される不確実性低減の割合とは、科学技術領域からの重要な入力情報になるものと考えられる。

7.5 まとめ

地層処分システムの長期的性能の保証が厳密な意味での科学的証拠とはならないことから、近年の規制動向においては、実務的な観点から合理的と考えられる範囲の対策を尽くすことが求められている。本章では、地質環境の不均質性に起因する不確実性への対策に関して合理的な範囲を今後定義して行く際の方向性として、

- ① 合理的な調査点数の範囲＝費用対効果（調査費用とそれによる不確実性低減効果の比）が妥当と考えられる範囲の調査点数。例えば、一定以上の点数で効果が鈍化する場合にはそれ以下とする、等
- ② 多角的な調査に関する合理性の範囲＝費用対効果（調査や解析費用とそれによる不確実性低減効果の比）が妥当と考えられる範囲。例えば、個々には不完全な独立した証拠を蓄積することによって、相互補完的に信頼性が高まるが、ある程度のところで、それ以上の証拠の蓄積が更なる信頼性の向上につながらない場合にはそこで止める、等

という二つについて検討を加えた。更に、上記のような費用対効果を客観的かつ定量的に定義することが困難な場合も予想されることから、

- ③ 地層処分システムの安全性について種々のステークホルダーが納得できるためには何が必要かを対話によって具体的に明らかにしていくというアプローチ、の必要性についても言及した。

8. おわりに

本研究では、地球統計学とファジー理論を応用し、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し、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す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を対象とした、3 次元の地質構造のモデル化を試みてきている。

平成 18 年度は、これまでに実施した地質構造のモデル化および地下水流動解析結果を踏まえ、不確実性評価手法の体系化を行った。そして、体系化した手順に沿って一連の評価事例を整理した。また、本手法を効果的に活用できるように適用すべき原位置調査手法を提案するとともに、地質環境の不確実性の観点から地下施設設計時に考慮すべき事項を整理した。以下、その概要を示す。

(1) 地質環境モデルに付随する不確実性の評価方法

地質環境モデルに関連するものとして、考慮すべき不確実性には下記に示すものがある。

- ・確率的性質（Randomness）：評価対象とする現象がランダムなものであること。
- ・任意性（Ignorance あるいは Ambiguity）：評価対象に対する情報や知識が不足していること。

これらの不確実性は、それぞれ確率論と Possibility 理論により取り扱うことが可能であるため、本研究では地質環境モデルに付随する不確実性の評価方法として、Possibility 理論に確率論を組み合わせた二段階の不確実性解析手法を提案した。

(2) 地質環境モデルに付随する不確実性評価の手順

本研究では、二段階の不確実性解析手法を適用するための手順を、下記のように取りまとめた。

- ① 評価目的の設定
- ② 評価対象の特定
- ③ 統計的物質移行解析
- ④ 地質環境パラメータについての感度解析 (SI)
- ⑤ 地質環境調査の実施
- ⑥ 評価対象に対する影響因子の抽出
- ⑦ 影響因子に対応する概念モデル構成要素の具体化
- ⑧ 概念要素を記述する際の選択肢の抽出
- ⑨ 概念モデルバリエーションの体系化 (ロジックツリー)
- ⑩ 各概念モデルバリエーションについての地下水流動解析・物質移行解析の実施
- ⑪ 多様な証拠に基づく各モデルバリエーションの確からしさの評価 (ESL)
- ⑫ ESL 評価結果に対する感度解析 (Tornado Plot)

地質環境モデルに付随する不確実性は、上記の「地質環境モデルに付随する不確実性評価の手順」を用い、現有の知識に基づき定量化することが可能となる。この定量化された不確実性は現有の知識の程度を表現するものであり、本手順にも示すように、基本的には引き続き地質環境調査を行い、不確実性の低減、つまり知識の増大を目指す必要がある。

(3) 地質環境の不確実性を踏まえた設計手法

高レベル放射性廃棄物地層処分の性能評価においては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、Publication 81¹⁾では、新しい考え方に基づく具体的な防護指針として、予想される潜在的被ばくあるいは対応するリスクが一定の拘束値以下であるという条件の下に、「潜在的被ばくを低減するために、合理的に達成可能な方策を尽くす」ことが求められている。

地層処分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」ためには、性能評価に含まれる不確実性を低減しつつ、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考えられる。

本研究では、これらの具体的な方策として、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、引き続き段階において、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施設設計 (適切なサイト・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。

本研究では、②の天然バリア機能を最適化する施設設計に関する対処方法として、「複数のオプションを持ちつづけること」に加え、「原位置の情報を用いて設計 (施設レイアウト) を見直すこと」を提案した。

(4) 今後の課題

地質環境調査に関する合理性を設定する問題は、

- ① 科学技術的課題: Randomness および Ignorance のそれぞれについて、適切な方法で、費用 (種々の地質環境調査に要するリソース) と便益 (調査の実施によって期待できる不確実性低減効果) のそれぞれを定量化し、比較可能とすること。

- ② 科学技術社会論的課題:地層処分に関連する種々のステークホルダー間の対話によってそれぞれ異なる価値観の間で調整を行いつつ、許容されるべき合理性（費用と便益の範囲）について合意を得ることの可能な社会的な枠組みを構築すること。

という二つの課題に分解して考えるべきものと言うことができる。そして、このような文脈から言えば、本研究で述べた不確実性解析の手法は、特に前者の範疇において後者の課題におけるより広範な議論のために求められる情報を科学技術の立場から提供するための基盤として位置づけることができる。そして、今後の課題としては、こうして得られる不確実性に関する費用対効果の情報を、社会的合意形成に向けての議論に活用していくための科学技術社会論的な取り組みが必要と考えられる。

8.1 7章, 8章参考文献

- 1) 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.
- 2) 藤垣裕子: 科学技術社会論の技法, 東京大学出版会, 2005.
- 3) Walton, D.: Argumentation Methods for Artificial Intelligence in Law, Springer, 2005.

This is a blank page.

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	立方メートル	m ³
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）	キログラム毎立方メートル	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		他のSI単位による 表し方	SI基本単位による 表し方
	名称	記号		
平面角	ラジアン ^(a)	rad		m・m ⁻¹ =1 ^(b)
立体角	ステラジアン ^(a)	sr ^(c)		m ² ・m ⁻² =1 ^(b)
周波数	ヘルツ	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m・kg・s ⁻²
圧力，応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ¹ ・kg・s ⁻²
エネルギー，仕事，熱量	ジュール	J	N・m	m ² ・kg・s ⁻²
工率，放射束	ワット	W	J/s	m ² ・kg・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 ・kg・s ⁻³ ・A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ⁴ ・A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² ・kg・s ⁻³ ・A ⁻²
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V	m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ³ ・A ²
磁束	ウェーバ	Wb	V・s	m ² ・kg・s ⁻² ・A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg・s ⁻² ・A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² ・kg・s ⁻² ・A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(d)	°C		K
光照度	ルーメン	lm	cd・sr ^(c)	m ² ・m ⁻² ・cd=cd
（放射性核種の）放射線量	グレイ	Gy	lm/m ²	m ² ・m ⁻⁴ ・cd=m ² ・cd
吸収線量，質量エネルギー分与，カーマ線量当量，周辺線量当量，方向性線量当量，個人線量当量，組織線量当量	シーベルト	Sv	J/kg	s ⁻¹

- (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°C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		SI 基本単位による表し方
	名称	記号	
粘着力のモーメント	パスカル秒	Pa・s	m ¹ ・kg・s ⁻¹
表面張力	ニュートンメートル	N・m	m ² ・kg・s ⁻²
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg・s ⁻²
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m・m ⁻¹ ・s ⁻¹ =s ⁻¹
熱流密度，放射照度	ラジアン毎平方秒	rad/s ²	m・m ⁻¹ ・s ⁻² =s ⁻²
熱容量，エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg・s ⁻³
質量熱容量（比熱容量），質量エントロピー（比エネルギー）	ジュール毎平方メートル	J/K	m ² ・kg・s ⁻² ・K ⁻¹
熱伝導率	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg・K)	m ² ・s ⁻² ・K ⁻¹
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m・K)	m・kg・s ⁻³ ・K ⁻¹
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ ・kg・s ⁻²
体積電荷	ボルト毎メートル	V/m	m・kg・s ⁻³ ・A ⁻¹
電気変位	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ ・s・A
誘電率	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² ・s・A
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m ⁻³ ・kg ⁻¹ ・s ⁴ ・A ²
モルエンタルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m・kg・s ⁻² ・A ⁻²
モルエントロピー	ジュール毎モル	J/mol	m ² ・kg・s ⁻² ・mol ⁻¹
モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol・K)	m ² ・kg・s ⁻² ・K ⁻¹ ・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 ・s・A
吸収線量	グレイ毎秒	Gy/s	m ² ・s ⁻³
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ ・m ⁻² ・kg・s ⁻³ =m ² ・kg・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 ・sr)	m ² ・m ⁻² ・kg・s ⁻³ =kg・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)×10 ⁻¹⁹ J
統一原子質量単位	u	1u=1.6605402(10)×10 ⁻²⁷ kg
天文単位	ua	1ua=1.49597870691(30)×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	1 a=1 dam ² =10 ² m ²
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=1000hPa=10 ⁵ Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=10 ⁻¹⁰ m
バーン	b	1 b=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
ボアズ	P	1 P=1 dyn・s/cm ² =0.1Pa・s
ストークス	St	1 St =1cm ² /s=10 ⁻⁴ m ² /s
ガウス	G	1 G ≒10 ⁴ T
エルステッド	Oe	1 Oe ≒(1000/4π) A/m
マクスウェル	Mx	1 Mx ≒10 ⁻⁸ Wb
スチルブ	sb	1 sb =1cd/cm ² =10 ⁴ cd/m ²
ホト	ph	1 ph=10 ⁴ lx
ガリ	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=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R = 2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGv=10 ⁻² Gv
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
X線単位	IX unit	1X unit=1.002×10 ⁻⁴ nm
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
ジャンスキー	Jy	1 Jy=10 ⁻²⁶ W・m ⁻² ・Hz ⁻¹
フェルミ	f	1 fermi=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1 metric carat = 200 mg = 2×10 ⁻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	cal	
マイクロン	μ	1 μ=1 μm=10 ⁻⁶ m

