

決定木分析を用いた核種移行解析結果の
感度分析の検討
(研究報告)

2005 年 3 月

核燃料サイクル開発機構
東海事業所

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松 4 番地 49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

電話：029-282-1122(代表)
ファックス：029-282-7980
電子メール：jserv@jnc.go.jp

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184, Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2005

決定木分析を用いた核種移行解析結果の感度分析の検討

(研究報告)

仲島 邦彦*, 牧野 仁史

要 旨

地層処分システムの核種移行解析で用いるパラメータには不確実性が存在し、それにより解析結果のばらつきやその支配核種の違い等の特徴が生じる。この特徴の発生に寄与するパラメータとその役割を明らかにすることは、研究開発の効率的実施や評価結果の詳細解釈において必要である。これまでも核種移行解析結果のばらつきに対し、多変量解析手法などを用いた様々な感度分析がなされている。しかし、従来の感度分析では、ばらつきの発生に寄与するパラメータの重要度の把握に重点をおいており、どのような定量的条件（パラメータの値あるいはその範囲）でその特徴が発生しているかまでを詳細に検討した例はあまりない。

そこで、本研究では、従来の感度分析を後者の観点から補うための1つの手法として決定木分析を導入し、その適用性の検討を行った。

その結果、データ不確実性を考慮したモンテカルロシミュレーションの結果のばらつきに対してカテゴリ分けを行い、決定木分析を適用することにより、特定のカテゴリに属するか否かを判別するための重要パラメータの抽出、およびその定量的条件を把握することができた。また、その結果の表記を工夫することで、パラメータの定量的条件と判別結果の関係を分かり易い形で示すことができた。さらに、判別に特化した手法である判別分析との比較を行うことにより決定木分析の妥当性を確認した。このような決定木分析の結果は、①パラメータ条件を与えられた時に、その解析結果がどのカテゴリに属するかを予測すること、②データの不確実性が低減された場合に、期待される効果を見積もること、などにも活用していくことができる。

以上のことから、重要パラメータの抽出に加え、パラメータの定量的な条件を把握することに関する、決定木分析の有効性について見通しを得ることができた。

Application of Decision Tree Technique to Sensitivity Analysis for Results of Radionuclide Migration Calculations

(Research Document)

Kunihiko NAKAJIMA *, Hitoshi MAKINO

Abstract

Uncertainties are always present in the parameters used for the nuclide migration analysis in the geological disposal system. These uncertainties affect the result of such analyses, e.g., and the identification of dominant nuclides.

It is very important to identify the parameters causing the significant impact on the results, and to investigate the influence of identified parameters in order to recognize R&D items with respect to the development of geological disposal system and understanding of the system performance.

In our study, the decision tree analysis technique was examined in the sensitivity analysis as a method for investigation of the influences of the parameters and for complement existing sensitivity analysis.

As a result, results obtained from Monte Carlo simulation with parameter uncertainties could be distinguished with not only important parameters but also with their quantitative conditions (e.g., ranges of parameter values).

Furthermore, information obtained from the decision tree analysis could be used 1) to categorize the results obtained from the nuclide migration analysis for a given parameter set, 2) to show prospective effect of reduction to parameter uncertainties on the results.

Repository System Analysis Group, Waste Isolation Research Division, Waste Management and Fuel Cycle Research Center, Tokai Works

* NESI Inc.

目 次

1	はじめに	1
2	決定木分析の概要	1
3	決定木分析による感度分析の対象	6
4	分析の目的およびケース設定	7
5	決定木分析による感度分析の結果	10
5.1	ケース 1：総線量の最大値を 3 桁ずつカテゴリー化したケース	10
5.2	ケース 2：第 2 次とりまとめのレファレンスケースにおける総線量の最大値を基準として高い結果と低い結果で 2 つにカテゴリー化したケース	13
6	決定木分析結果の妥当性の確認	15
6.1	ほかの手法との比較	15
6.2	判別精度が低くなる場合の検討	16
7	おわりに	17
8	参考文献	18
	付録 1	付-1(1)
	付録 2	付-2(1)

目 次

図 1	決定木分析の概念図	2
図 2	「あやめのデータ」に対する決定木分析結果：決定木	5
図 3	データ不確実性を考慮したモンテカルロシミュレーションの結果 (総線量の最大値, 500 リアライゼーション)	6
図 4.1	ケース 1 で設定したカテゴリーとその範囲	8
図 4.2	ケース 2 で設定したカテゴリーとその範囲	9
図 5.1.1	決定木 (ケース 1 : 総線量の最大値を 3 桁ずつカテゴリー化)	12
図 5.1.2	重要パラメータの定量的条件と判別結果の関係図 (ケース 1)	12
図 5.2.1	決定木 (ケース 2 : 第 2 次とりまとめを基準として高い結果と低い結果で 2 つにカテゴリー化)	14
図 5.2.2	重要パラメータの定量的条件と判別結果の関係図 (ケース 2)	14
付図 2.1	決定木 (第 2 次とりまとめを基準として高い結果と低い結果で 2 つにカテゴリー化)	付-2(2)
付図 2.2	重要パラメータの定量的条件と判別結果の関係図	付-2(2)

目 次

表 1	あやめのデータ	4
表 3	モンテカルロシミュレーションで使用した不確実性パラメータの一覧	7
表 5.1.1	カテゴリー別の判別結果	10
表 5.2.1	カテゴリー別の判別結果	13
表 6.1	判別分析によるカテゴリー別の判別結果	16
表 6.2	決定木分析によるカテゴリー別の判別結果	16
付表 1.1	終端ノード別の判別結果例	付-1(1)
付表 1.2	Gr1 のカテゴリーに属することを特徴付ける 終端ノード別のパラメータ条件	付-1(2)
付表 1.3	Gr2 のカテゴリーに属することを特徴付ける 終端ノード別のパラメータ条件	付-1(2)
付表 1.4	Gr3 のカテゴリーに属することを特徴付ける 終端ノード別のパラメータ条件	付-1(3)
付表 1.5	終端ノード別の判別結果例	付-1(4)
付表 1.6	OverH12 のカテゴリーに属することを特徴付ける 終端ノード別のパラメータ条件	付-1(4)
付表 1.7	UnderH12 のカテゴリーに属することを特徴付ける 終端ノード別のパラメータ条件	付-1(5)
付表 2.1	カテゴリー別の判別結果	付-2(1)

1. はじめに

地層処分システム中での核種移行についての解析に用いるパラメータには不確実性が存在し、それにより解析結果のばらつきが生じる。この解析結果のばらつきに寄与するパラメータとその役割を明らかにすることは、核種移行解析結果の詳細解釈および地層処分研究開発の効率的実施において重要となる。このための方法として感度分析が行なわれる。

感度分析には様々な方法があり、これまでも核種移行解析においてパラメータの不確実性を考慮したモンテカルロシミュレーションの結果に対し、多変量解析などの手法を用いた様々な感度分析がなされている（例えば、若杉ほか（2002）；牧野ほか（2003））。しかしながら、従来の感度分析では核種移行解析結果のばらつきに対して、そのばらつきの発生に寄与するパラメータの重要度の把握に重点をおいており、どのような定量的条件（パラメータの値あるいはその範囲）でその特徴が発生しているかまでを詳細に検討した例はあまりない。

そこで、本研究の目的として、パラメータの重要度の把握に加え、その定量的条件の把握が可能である「決定木分析」（例えば、ベリー・リノフ（1999））について、核種移行解析結果に対する感度分析への適用を検討することとした。これは、狭義には従来の感度分析では得られなかった情報を得るための新しい手法を整備するものであるが、広義には複数の感度分析手法を整備し分析結果の妥当性の多角的な検討を行なえる環境の整備を目指す取り組みの一部となる。

2. 決定木分析の概要

決定木分析とは、分析の対象（事例群）がいくつかの共通の特徴を持つまとまり（以下、カテゴリーと呼ぶ）に分類できる（されている）時に、ある事例がどのカテゴリーに属するかの最も効率的な判別を行うためのパターンや規則性を体系的な質問群により自動的かつ段階的に探索するものである。

より具体的には、決定木分析では、図1に示すように分析を行なう対象となる事例群（目的変数）を、分析の目的に応じて任意または自動で幾つかのカテゴリーに分ける。そして目的変数に関係を持つ複数の変数（説明変数）の中から、ある事例がどのカテゴリーに属するかの最も効率的な判別を行うための重要度の高い説明変数を自動的に選択し、かつ、その定量的な条件（分岐条件）を見出す。これを順次実行することにより、全事例を枝分かれ状に階層的に細分化し、最終的にはある説明変数とその定量的な条件の組み合わせにより特定のカテゴリーに属すると判別された事例の小グループに分ける。この小グループは決定木分析においてノードと呼ばれる。これにより核種移行解析結果のばらつき（決定木分析では複数のカテゴリーとして表現する）に対して、そのばらつきの発生に寄与するパラメータとその定量的条件を把握することができることになる。

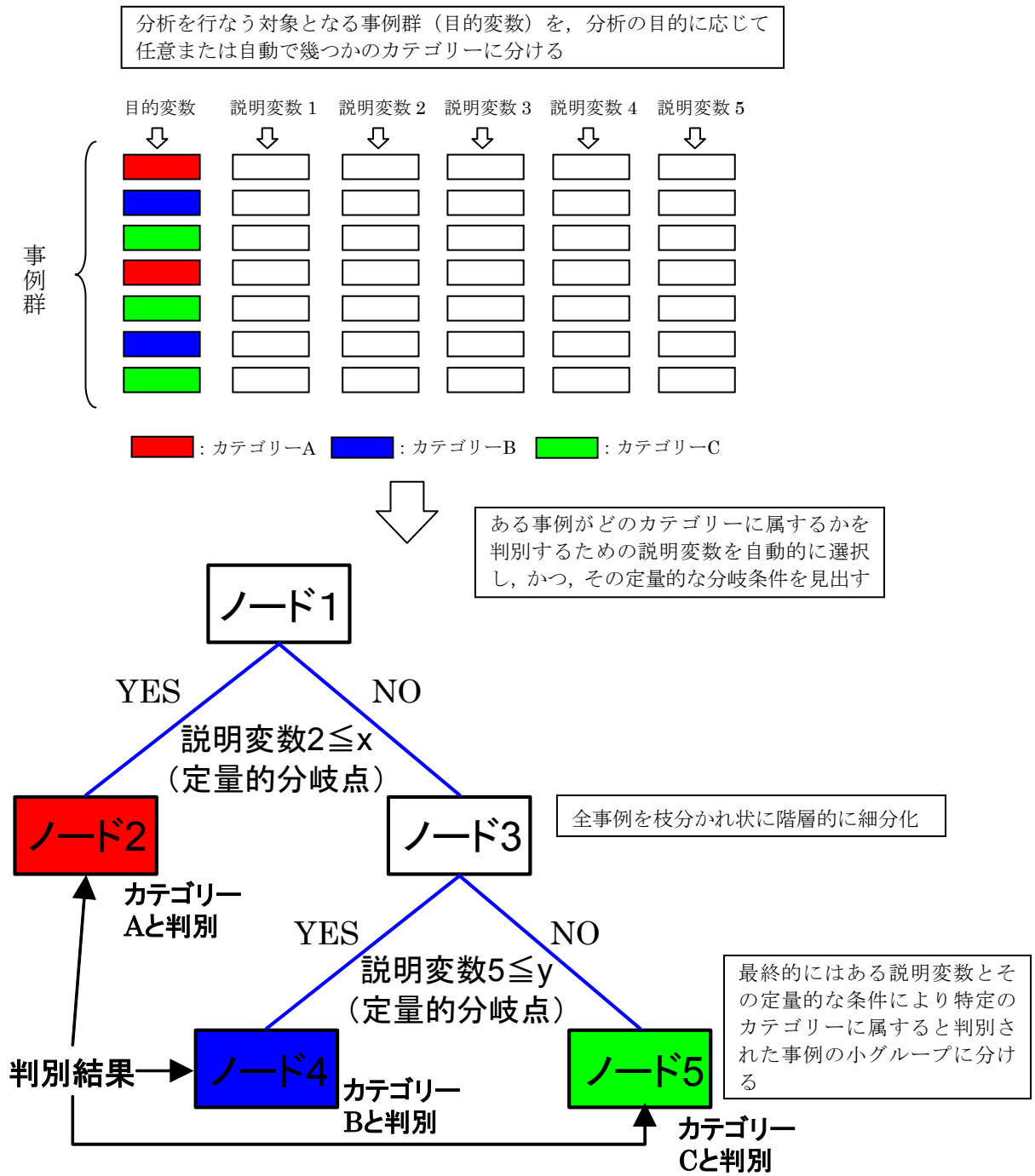


図 1 決定木分析の概念図

上記説明を補足するために表 1 の「あやめのデータ」(Fisher, 1936) を例題として決定木分析の内容を具体的に説明する。表 1 は 3 種類のあやめ(セトナ, バージニック, バーシクル)について, その形のデータであるがく片(長さ), がく片幅, 花びら(長さ), 花びら幅について調査した結果である。3 種類のあやめはそれぞれ 50 事例ずつあり, 実際には 150 の事例がある(表 1 は途中で省略している)。本例題では, あやめの形のデータ(がく片, がく片幅, 花びら, 花びら幅)に基づいてあやめの種類を判別する。この場合, 判別を行なう対象となる変数である目的変数を「あやめの種類」とし, あやめの種類であるセトナ, バージニック, バーシクルをカテゴリーとして指定する。これに対して, 目的変数であるあやめの種類と関係を持つ説明変数として「がく片」, 「がく片幅」, 「花びら」, 「花びら幅」をそれぞれ指定する。

以上について決定木分析を実施すると, 図 2 の決定木が得られる(決定木の見方や得られる情報の詳細については, 図 2 の下の補足を参照)。四角の枠で示されているものがツリー構造の節となるノードであり, ある分岐条件(ある説明変数の定量的条件)により下位の 2 つのノードに分岐される。赤枠はこれ以上分岐ができない「終端ノード」であり, 最終的なカテゴリーの判別結果となる。ここで, 複数の終端ノードが同じカテゴリーに属すると判別されることもあり得る。

図 2 の決定木が表す分析結果は以下のとおりである。

- ・ 1 回目の条件分岐は「花びら(の長さ)が 2.0958cm 以下」であり, この場合はセトナとして判別。それ以外はバーシクルと判別されるが, 実際にはバージニックとバーシクルが混在している。
- ・ 2 回目の条件分岐は「花びら(の長さ)が 2.0958cm より大きい」, かつ「花びら幅が 1.6442cm 以下」であり, この場合はバーシクルとして判別。
- ・ 最後に「花びら(の長さ)が 2.0958cm より大きい」, かつ「花びら幅が 1.6442cm より大きい」の場合はバージニックとして判別。

以上, 決定木分析により, あやめの形のデータ(がく片, がく片幅, 花びら, 花びら幅: 説明変数)から, あやめの種類の 3 つのカテゴリーを判別するための規則として, 上記の「花びら長さ」と「花びら幅」の 2 つの変数およびそれらの定量的な分岐条件を見出すことができた。あやめの形のデータとこれら規則を用いることにより判別されるあやめの種類は, セトナが 50 個, バーシクルが 52 個, バージニックが 48 個であり, 若干の誤判別をともなってはいるが, もとものの 50 ずつの事例を適切に判別することができている。

また, 本研究では決定木分析のソフトウェアとして米国 StatSoft Inc. の STATISTICA の デシジョンツリーモジュール(スタットソフトジャパン, 2000)を利用した。

表 1 あやめのデータ (途中省略, 単位: cm)

あやめの種類	あやめの形				
	がく片	がく片幅	花びら	花びら幅	
カテゴリー「セトナ」 として指定 (50 事例)	セトナ	5.0	3.3	1.4	0.2
	セトナ	4.6	3.4	1.4	0.3
	セトナ	4.6	3.6	1.0	0.2
	・	・	・	・	・
カテゴリー「バーシクル」 として指定 (50 事例)	バーシクル	6.5	2.8	4.6	1.5
	バーシクル	6.2	2.2	4.5	1.5
	バーシクル	5.9	3.2	4.8	1.8
	バーシクル	6.1	3.0	4.6	1.4
	バーシクル	6.0	2.7	5.1	1.6
	バーシクル	5.6	2.5	3.9	1.1
	・	・	・	・	・
カテゴリー「バージニック」 として指定 (50 事例)	バージニック	6.4	2.8	5.6	2.2
	バージニック	6.7	3.1	5.6	2.4
	バージニック	6.3	2.8	5.1	1.5
	バージニック	6.9	3.1	5.1	2.3
	バージニック	6.5	3.0	5.2	2.0
	・	・	・	・	・

目的変数
説明変数

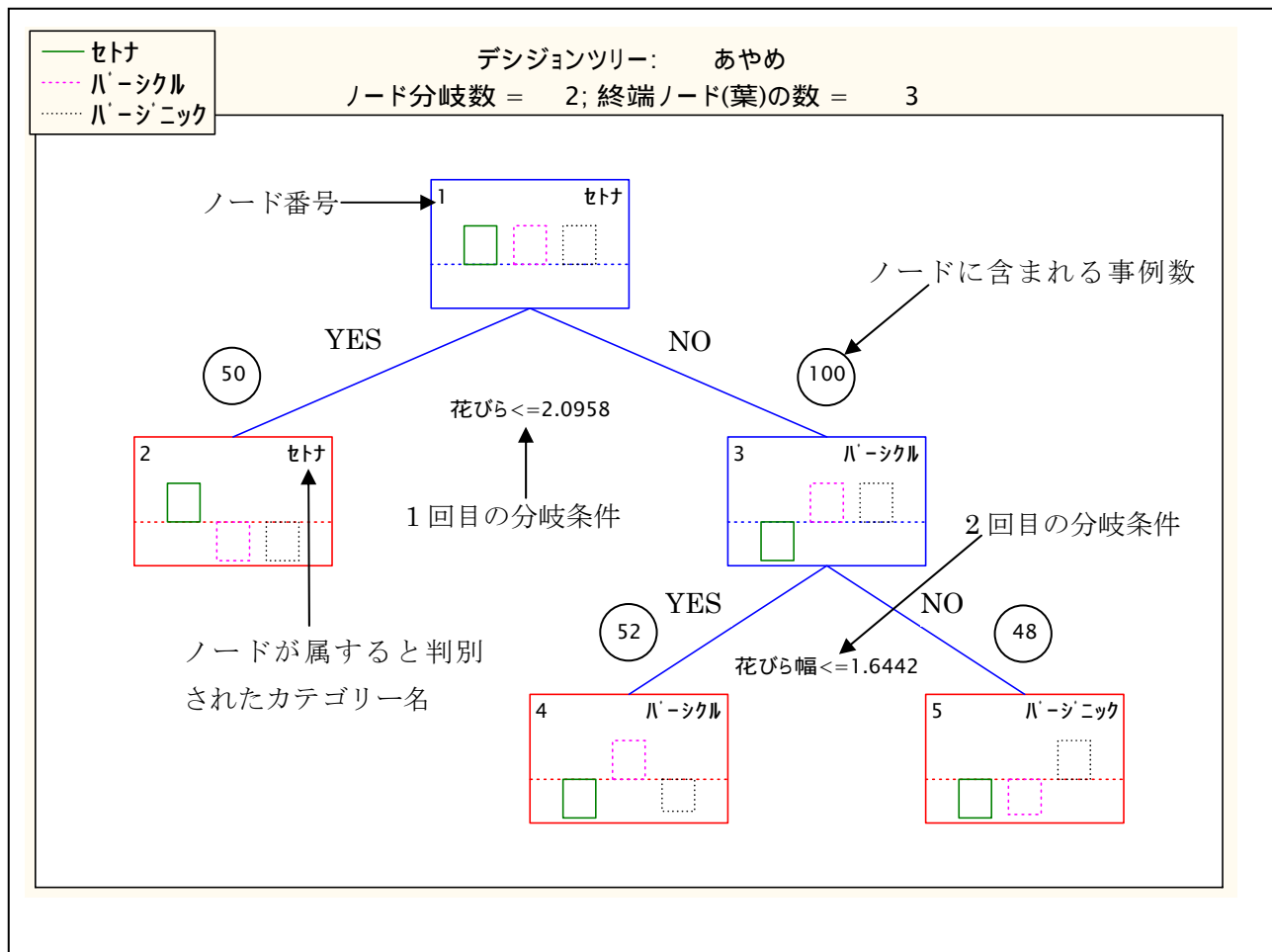


図2 「あやめのデータ」に対する決定木分析結果：決定木

<上図の補足>

上図の四角の枠で示されているものがツリー構造の節となるノードであり、ノードはある分岐条件（ある説明変数の定量的条件）により下位の2つのノードに分岐される（この2つのノードは異なるカテゴリーに属すると判別される）。このとき、各ノードに関する情報として、ノードの分岐条件（不等式で表された条件）、そのノードに含まれる事例数（丸で囲んだ数字）、およびそのノードが属すると判別されたカテゴリー名（四角枠内の右上）が分析結果として与えられる。

ここで、各ノードに含まれる事例は、特に分岐の初期では、その事例が実際に属するカテゴリー・zと・1ノードが属すると判別されたカテゴリーとが異なる場合も多い。ノードのカテゴリーは、ノードに含まれる事例に対して、それら事例が実際に属するカテゴリーの数を比較し、その数が最も多いカテゴリーと同じになる。このような、実際に属するカテゴリーが異なる事例が各ノードに混在している状況を明示するために、その内訳が分析結果として与えられる（四角枠内の偏差グラフ）。なお、分岐が進むに連れて、このような混在の程度は徐々に低下する。

赤枠は、これ以上分岐ができない「終端ノード」（決定木では「葉」ともいう）であり、最終的なカテゴリーの判別結果となる。ここで、複数の終端ノードが同じカテゴリーに属すると判別されることもありえる。

ここで、上記の説明は、STATISTICA から得られる分析結果の種類やその表示の仕方に基づいている。他のツールでは、分析結果の種類やその表示の仕方などが異なる可能性があることには注意が必要である。

3. 決定木分析による感度分析の対象

本研究において決定木分析の適用を検討する対象は、高レベル放射性廃棄物の地層処分システム中での核種移行に関して、パラメータの不確実性を網羅的に考慮したモンテカルロシミュレーション(若杉ほか,2002)の結果である(図3)。図3は、横軸が処分後の時間、縦軸が総線量の最大値の散布図である。ここでは55のパラメータの不確実性を考慮し、500リアライゼーションの解析を実施している。不確実性を考慮した55パラメータの一覧を表3に示す。

この解析結果から、総線量の最大値のばらつきは十数オーダー範囲で分布していることがわかる。この総線量の最大値のばらつきは、様々なパラメータの不確実性の影響を含んだものである。

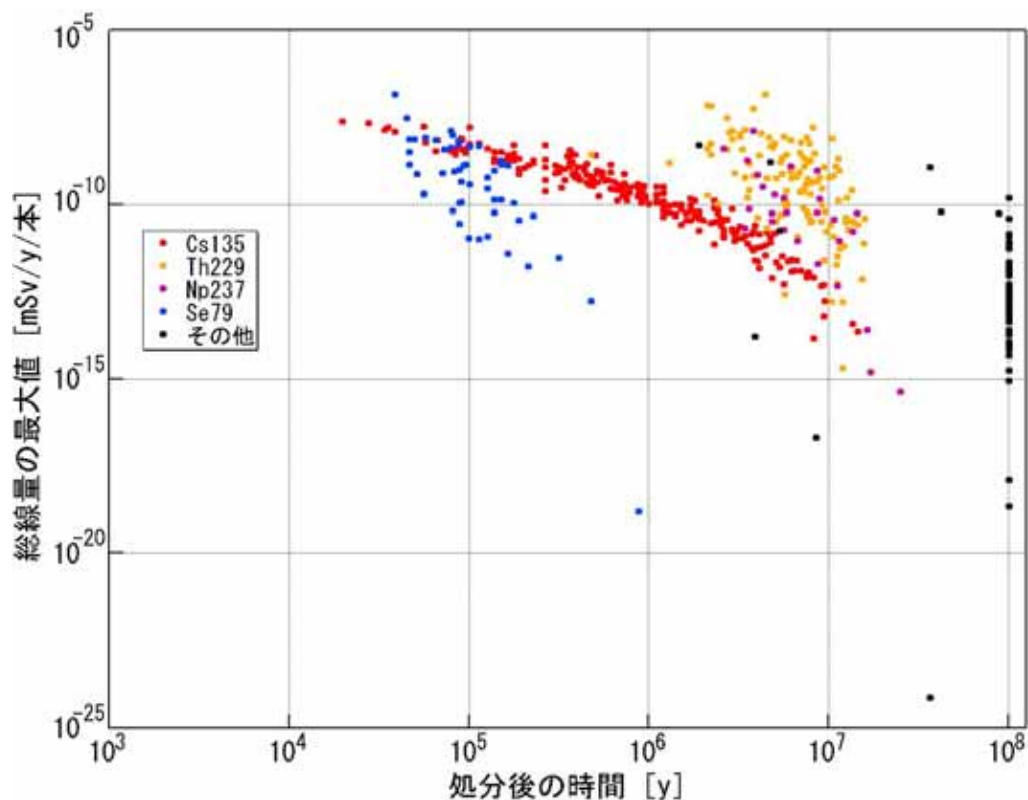


図3 データ不確実性を考慮したモンテカルロシミュレーションの結果
(総線量の最大値, 500 リアライゼーション)

表 3 モンテカルロシミュレーションで考慮したパラメータ不確実性の一覧

核種	溶解度 [mol l ⁻¹]	分配係数 (緩衝材) [m ³ kg ⁻¹]	分配係数 (岩盤) [m ³ kg ⁻¹]
Se	U _L [10 ⁻¹⁰ , 10 ⁻⁶]	U[0, 0.0001]	U[0, 0.1]
Zr	U _L [10 ⁻⁸ , 10 ⁻⁶]	U[10, 15]	U _L [10 ⁻² , 10 ¹]
Tc	U _L [10 ⁻⁸ , 10 ⁻⁶]	U _L [0.1, 20]	U _L [0.05, 100]
Pd	U _L [10 ⁻⁹ , 10 ⁻⁷]	U[0.1, 0.5]	U _L [0.05, 1]
Sn	U _L [10 ⁻⁸ , 10 ⁻⁵]	U _L [1, 2 × 10 ¹]	U _L [10 ⁻¹ , 10 ²]
Cs	可溶性	U[0.01, 0.05]	U _L [10 ⁻³ , 10 ¹]
Pb	U[10 ⁻⁶ , 10 ⁻⁵]	U[0.1, 0.5]	U _L [0.1, 10]
Ra	U _L [10 ⁻¹⁴ , 10 ⁻¹¹]	U[0.01, 0.02]	U[0.05, 0.5]
Ac	Amのアナログ	U[1, 5]	U _L [0.05, 50]
Th	U _L [10 ⁻⁹ , 10 ⁻⁵]	Uのアナログ	U _L [10 ⁻¹ , 10 ¹]
Pa	U _L [10 ⁻⁸ , 10 ⁻⁷]	Snのアナログ	U _L [10 ⁻¹ , 10 ¹]
U	U _L [10 ⁻⁹ , 10 ⁻⁷]	U _L [1, 5 × 10 ¹]	U _L [10 ⁻¹ , 10 ¹]
Np	U _L [10 ⁻⁹ , 10 ⁻⁷]	Uのアナログ	U _L [10 ⁻¹ , 10 ¹]
Pu	U _L [10 ⁻¹⁰ , 10 ⁻³]	U _L [10 ¹ , 10 ²]	U _L [10 ⁻¹ , 10 ¹]
Am	U _L [10 ⁻⁸ , 10 ⁻⁶]	U _L [10, 50]	U _L [5 × 10 ⁻² , 5 × 10 ¹]
Cm	Amのアナログ	Amのアナログ	U _L [5 × 10 ⁻² , 5 × 10 ¹]
Nb	U _L [10 ⁻⁸ , 10 ⁻⁴]	U[1, 10]	U _L [10 ⁻² , 10 ¹]
Sm	Amのアナログ	Acのアナログ	U _L [0.05, 50]
その他のパラメータ			レンジ
ガラス溶解速度 [g m ⁻² d ⁻¹]			U _L [10 ⁻⁴ , 10 ⁻²]
拡散係数 (Cs、Seを除く) [m ² y ⁻¹]			U[6 × 10 ⁻³ , 7 × 10 ⁻²]
Csの拡散係数 [m ² y ⁻¹]			U[2 × 10 ⁻² , 2 × 10 ⁻¹]
Seの拡散係数 [m ² y ⁻¹]			U[7 × 10 ⁻³ , 2 × 10 ⁻²]
透水量係数分布の平均値 [m ² s ⁻¹]			U _L [10 ⁻¹¹ , 10 ⁻⁹]
縦方向分散長 [m]			U _L [1, 10 ²]
マトリクス拡散深さ [m]			U _L [3 × 10 ⁻² , 1]
マトリクス拡散寄与面積率 [%]			U[10, 10 ²]
岩盤の空隙率 [-]			U[10 ⁻² , 3 × 10 ⁻²]
経験則の係数 [-]			U _L [10 ⁻¹ , 10 ¹]
母岩の評価距離 [m]			U[10, 100]
断層の評価距離 [m]			U[100, 1000]

U：一様分布（確率密度関数が最大値と最小値の間で1。それ以外で0。）

U_L：対数一様分布（確率密度関数が最大値の対数値と最小値の対数値の間で1。それ以外で0。）

本研究では、図 3 のパラメータ不確実性を考慮したモンテカルロシミュレーションから得られる総線量の最大値を感度分析の対象とし、決定木分析を適用することにより、十数オーダーにわたる全体的なばらつきに寄与するパラメータとその定量的条件を把握する。これにより、決定木分析の感度分析への適用性を検討する。

4. 分析の目的およびケース設定

決定木分析を用いて、図 3 で示した総線量の最大値のばらつきに対して感度分析を実施するにあたり、以下の2つの分析の目的を設定した。

- 1) 総線量の最大値を幾つかの小グループに分け、その小グループをカテゴリーとして設定し、それぞれのカテゴリーに属することを特徴付けるパラメータとその定量的条件を把握する。
- 2) ある基準（閾値）を設けて、その基準よりも高い結果と低い結果のそれぞれをカテゴリーとして設定し、それらカテゴリーに属することを特徴付けるパラメータとその定量的条件を把握する。

上記2つの目的に応じた分析の例として、以下の2ケースを設定した。

【ケース1】総線量の最大値を3桁ずつカテゴリー化したケース

目的変数として「総線量の最大値」を、説明変数として「モンテカルロシミュレーションに用いたパラメータ」をそれぞれ指定し、更に、目的変数である総線量の最大値を3桁ずつカテゴリー化する。図4.1に総線量の最大値を3桁ずつカテゴリー化した場合のそれぞれのカテゴリーの範囲を示す。ピンクの領域がカテゴリーGr1(事例数:135)、黄色の領域がカテゴリーGr2(事例数:301)、水色の領域がカテゴリーGr3(事例数:57)、そして 10^{-15} より低い領域をカテゴリーLOW(事例数:7)と指定した。

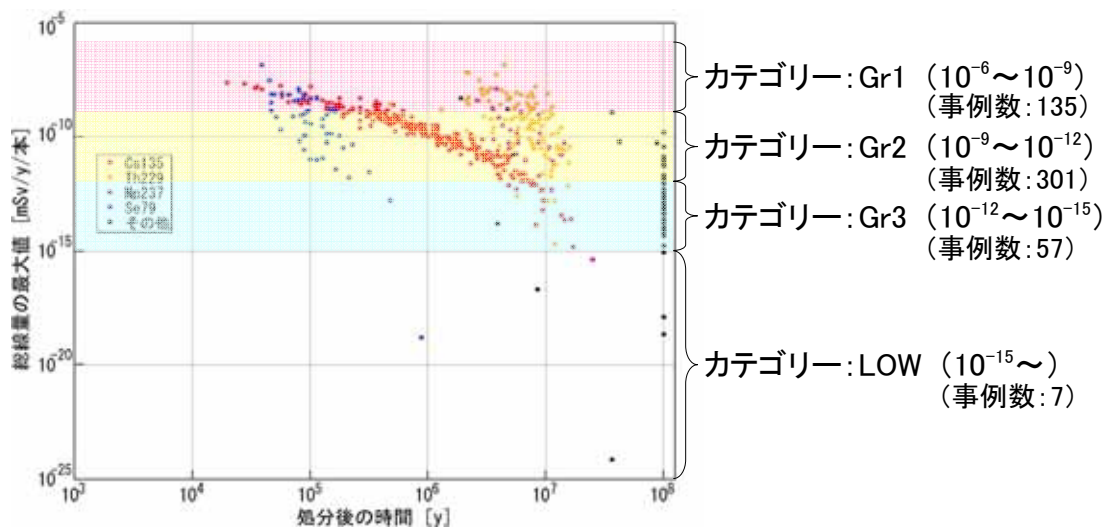


図 4.1 ケース1で設定したカテゴリーとその範囲

【ケース2】第2次とりまとめのレファレンスケースにおける総線量の最大値を基準として、それよりも高い結果と低い結果で2つにカテゴリー化したケース

目的変数として「総線量の最大値」を、説明変数として「モンテカルロシミュレーションに用いたパラメータ」をそれぞれ指定し、更に、目的変数である総線量の最大値を第2次とりまとめ（サイクル機構，1999）のレファレンスケース（R.C.）における総線量の最大

値 (1.2×10^{-10} [mSv/y/本]) を基準として、それよりも高い結果と低い結果で2つにカテゴリー化する。図 4.2 に総線量の最大値が基準より高い/低いでカテゴリー化した場合のそれぞれのカテゴリーの範囲を示す。

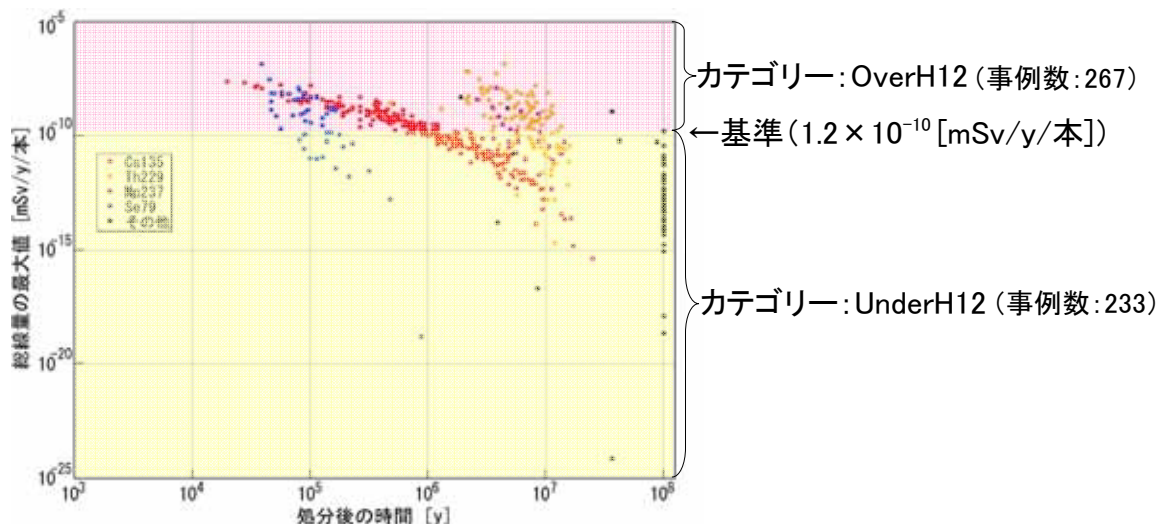


図 4.2 ケース 2 で設定したカテゴリーとその範囲

以上の 2 ケースは、上記の 2 つの分析の目的に対する例示的ケースとして位置付けられる。

ここで、決定木分析では、パラメータの定量的条件を得ることを目的にしているため、単位や値の範囲が異なるパラメータ間の比較を容易にしておく必要がある。そこで、表 3 に示したモンテカルロシミュレーションで用いたパラメータの値 (x) を、以下の式を用いて 0 から 1 の値 (x') に規格化した：

(一様分布の場合)

$$x' = \frac{(x - x_{\min})}{(x_{\max} - x_{\min})} \quad (式 1)$$

(対数一様分布の場合)

$$x' = \frac{(\log x - \log x_{\min})}{(\log x_{\max} - \log x_{\min})} \quad (式 2)$$

ここで x : 表 3 に示した範囲からサンプリングされた各パラメータの値
 x_{\max} : 表 3 に示した範囲での各パラメータの最大値
 x_{\min} : 表 3 に示した範囲での各パラメータの最小値

5. 決定木分析による感度分析の結果

5.1 ケース 1：総線量の最大値を 3 桁ずつカテゴリー化したケース

図 5.1.1 に決定木を、表 5.1.1 にカテゴリー別判別割合（実際のカテゴリーに属する事例数に対する、決定木分析によってそのカテゴリーに正しく判別された事例数の割合）を示す。この場合、Gr1, Gr2, Gr3, Low の 4 つのカテゴリーに判別されている。列が実際のカテゴリー、行が決定木分析により判別されたカテゴリーである。なお、各列を縦方向に見ていくことにより、実際の各カテゴリーの事例のうちいくつかは、決定木分析によりどのカテゴリーに判別されたかが分かるようになっている。Gr1 について見てみると、Gr1 は実際には 135 事例（表の最終行第 2 列参照）あるのに対して、決定木分析により Gr1 に判別された事例数は黄色で強調されている 123 事例（表の第 2 行第 2 列参照）である。よって、Gr1 が正しく判別された割合は 91%である（=123/135：表の第 2 行最終列参照）。また、本来 Gr1 であるはずの 12 事例が決定木分析によって Gr2 に誤判別されている（表の第 3 行第 2 列参照）。なお、終端ノード別の判別結果およびパラメータ条件等の詳細な結果は付録 1 に示す。

表 5.1.1 カテゴリー別の判別結果

実際の カテゴリー 判別された カテゴリー	Gr1	Gr2	Gr3	LOW	カテゴリー別 判別割合(%)
Gr1	123	29	0	0	91%
Gr2	12	261	25	1	87%
Gr3	0	11	32	6	56%
LOW	0	0	0	0	0%
実際の 事例数	135	301	57	7	

図 5.1.1 および付録 1 より、4 つのカテゴリーは、透水量係数分布の平均値、Cs の岩盤での分配係数、マトリクス拡散深さ、U の溶解度という 4 つのパラメータのみで判別されている。また、例えばカテゴリーGr1 は、赤線の 3 つの経路に沿ったパラメータの定量的な条件の組み合わせにより 3 つの終端ノードとして判別されており、全体として表 5.1.1 にあるように実際の 135 事例のうち 123 事例、確率で言うと 91%の割合で判別できている。

決定木分析の結果として得られる各カテゴリーの違いを特徴付けるパラメータとその定量的条件は、付録 1 に示す終端ノード別の判別結果およびパラメータの定量的条件によりそれぞれ確認することが可能である。しかしながら、パラメータとその定量的条件が終端ノード毎に得られるため、1 つのカテゴリーに対して重複を含む幾つかのパラメータとその定量的条件の組合せが存在し、分析結果の全体像を把握することは必ずしも容易でない。そのため、判別に用いられた 4 つの重要パラメータの定量的条件と判別結果の関係を分か

り易くするために工夫して表現したものを図 5.1.2 に示す。この図では、まず横軸を透水量係数分布の平均値、縦軸を Cs の岩盤での分配係数として、パラメータの定量的条件と判別結果の関係を整理したものである。図中のプロットが実際の事例を表しており、赤丸が Gr1、青三角が Gr2、黄緑四角が Gr3、プラスが LOW である。また、色のエリアが各カテゴリーへの判別に用いられたパラメータの定量的条件を表しており、ピンクの領域が Gr1、黄色の領域が Gr2、水色の領域が Gr3 と判別された。この図から、判別条件の各領域に、実際の事例がそれぞれ集中していることが分かる。また、点線で囲まれている白い領域は、Gr1 と Gr2 が混在しているが、図 5.1.2 中の右下に示すように、他の 2 つの重要パラメータである U の溶解度、マトリクス拡散深さで同様に整理することにより、カテゴリーの違いをより正しく説明できるようになった。

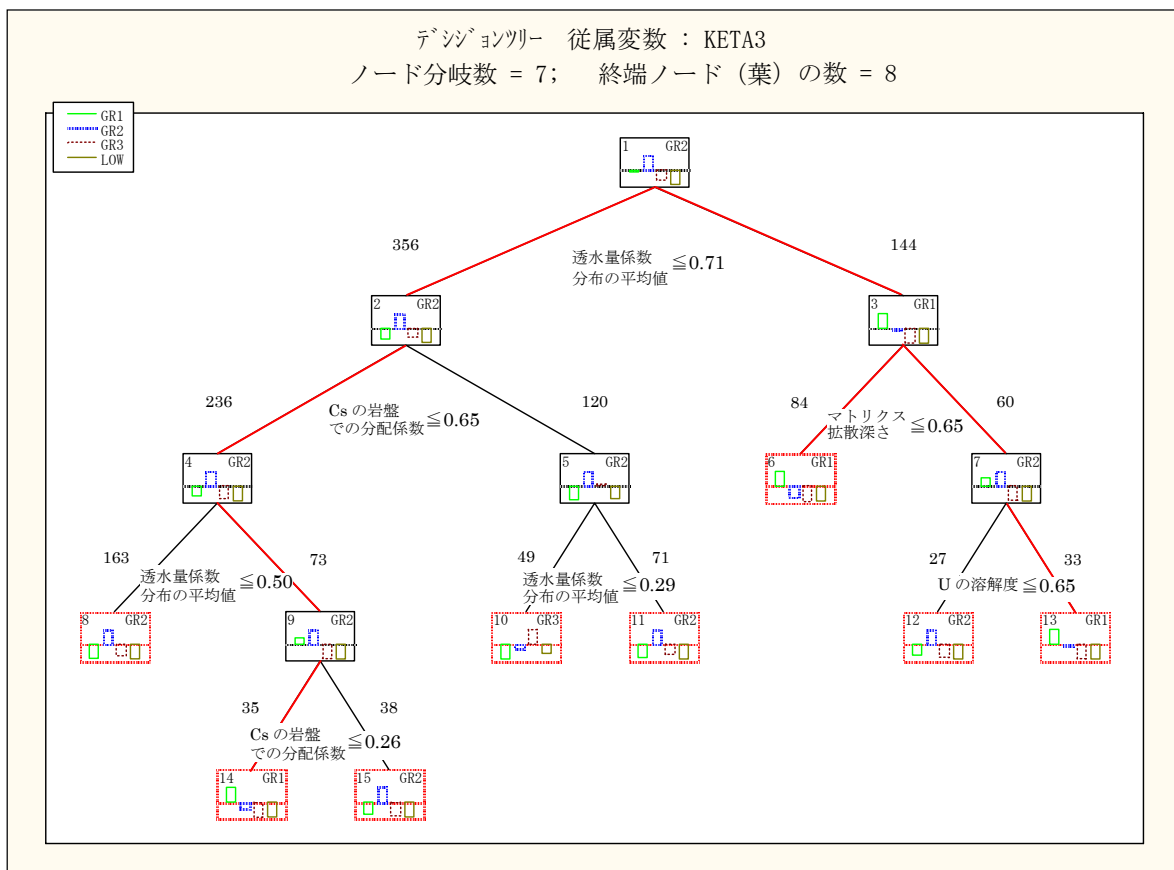


図 5.1.1 決定木 (ケース 1: 総線量の最大値を 3 桁ずつカテゴリー化)

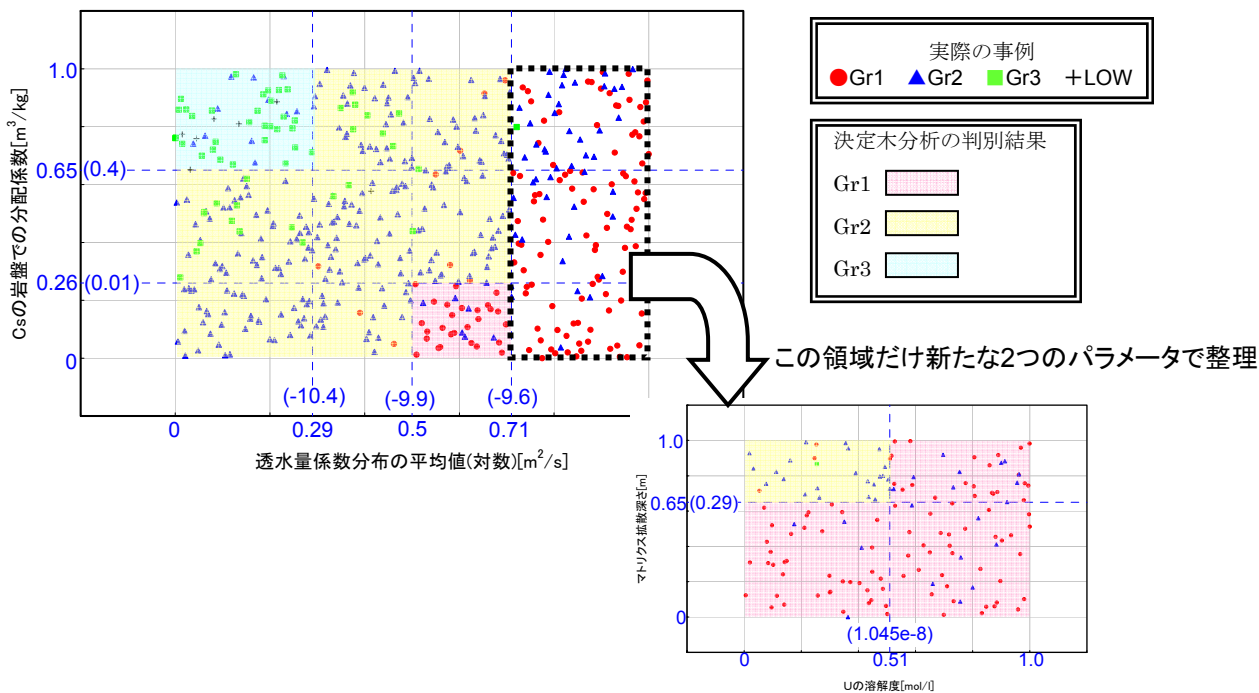


図 5.1.2 重要パラメータの定量的条件と判別結果の関係図 (ケース 1)
 (軸の目盛は 0~1 で規格化した値 (式 1 と 2 参照)。一方、カッコ内の数値は 0~1 で規格化した値 (4 章参照) を実際のモンテカルロシミュレーションで用いた値に直したもの。)

5.2 ケース 2：第 2 次とりまとめのレファレンスケースにおける総線量の最大値を基準として高い結果と低い結果で 2 つにカテゴリー化したケース

図 5.2.1 に決定木を、表 5.2.1 にカテゴリー別判別割合を示す。また、終端ノード別の判別結果およびパラメータ条件に関する詳細は付録 1 に示す。

表 5.2.1 カテゴリー別の判別結果

実際の 判別された カテゴリー	OverH12	UnderH12	カテゴリー別 判別割合(%)
OverH12	242	60	91%
UnderH12	25	173	74%
実際の 事例数	267	233	

図 5.2.1 より、2 つのカテゴリーは、透水量係数分布の平均値、 C_s の岩盤での分配係数、マトリクス拡散深さという 3 つのパラメータのみで判別されている。また、表 5.2.1 にあるように、カテゴリー OverH12 を 91%、カテゴリー UnderH12 を 74% の割合で判別している。また、ケース 1 と同様に、判別に用いられた 3 つの重要パラメータの定量的条件と判別結果の関係を整理したものを図 5.2.2 に示す。ここで、点線で囲まれている白い領域については、図 5.2.2 中の右下に示すように、縦軸は C_s の岩盤での分配係数のままとし、横軸をもう 1 つの重要パラメータであるマトリクス拡散深さに代えて整理している。この場合も、カテゴリーの違いをわかりやすく表記できている。

ここで、図 5.2.2 の透水量係数分布の平均値と C_s の岩盤での分配係数の定量的条件と判別結果の関係図に着目すると、決定木分析によってカテゴリー OverH12 と判別される条件の領域に、カテゴリー UnderH12 の実際の事例が存在する部分（誤判別）が比較的多く見られる。これらについては、分析処理のやり方の工夫により判別精度を改善できる可能性がある（付録 2 参照）。

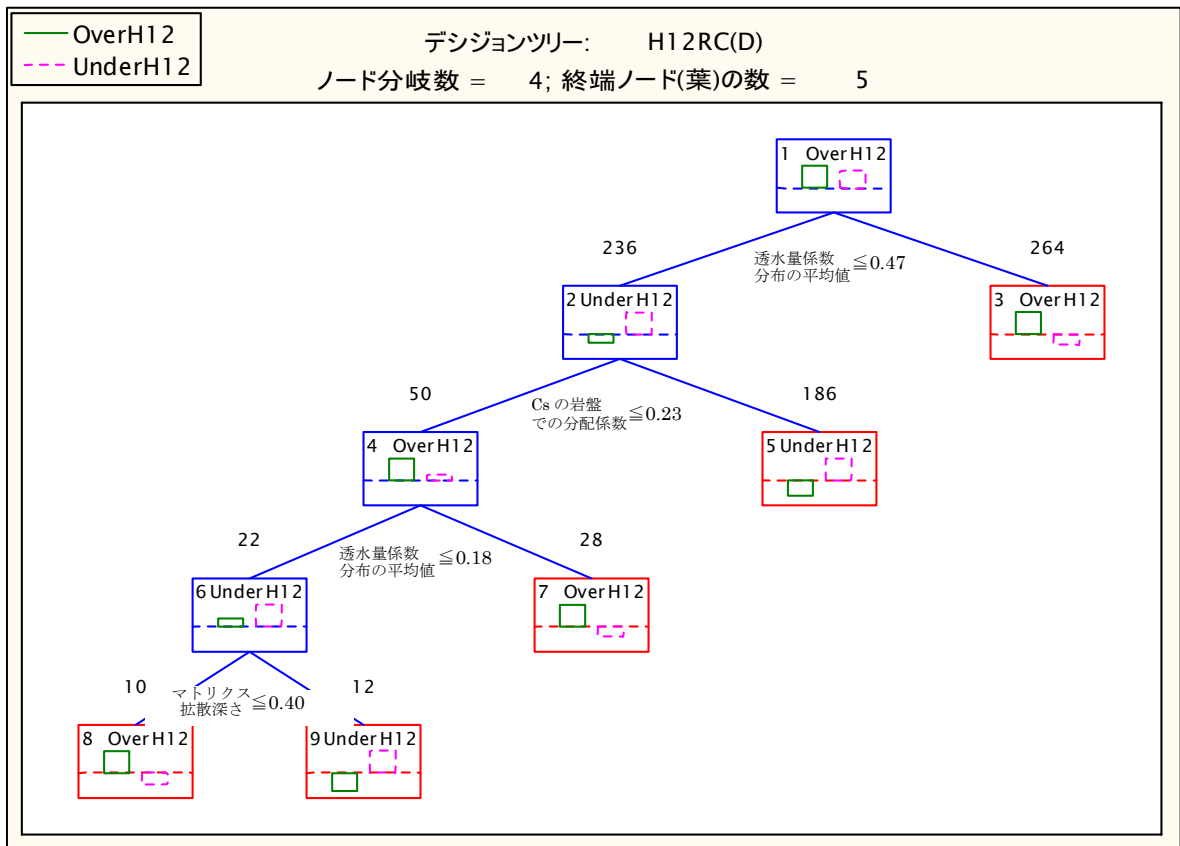


図 5.2.1 決定木 (ケース 2: 第 2 次とりまとめを基準として高い結果と低い結果で 2 つにカテゴリー化)

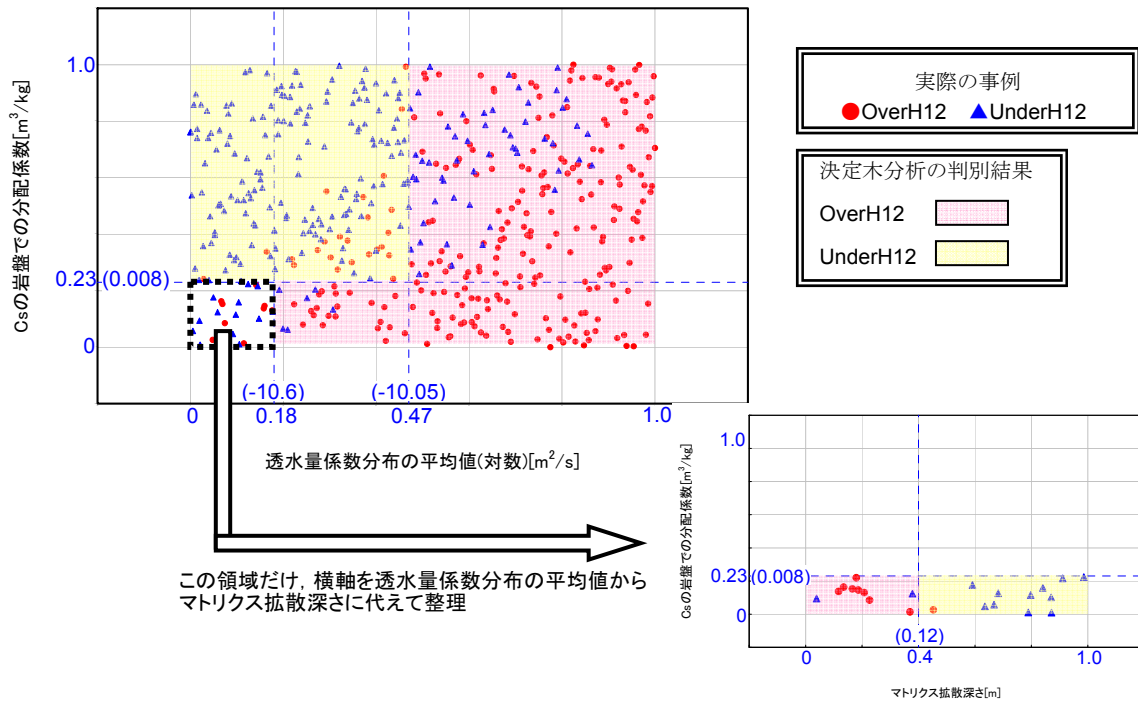


図 5.2.2 重要パラメータの定量的条件と判別結果の関係図 (ケース 2)
(軸の目盛は 0~1 で規格化した値 (式 1 と 2 参照)。一方、カッコ内の数値は 0~1 で規格化した値 (4 章参照) を実際のモンテカルロシミュレーションで用いた値に直したものを。)

6. 決定木分析結果の妥当性の確認

6.1 ほかの手法との比較

本節では、決定木分析結果の妥当性を確認するために、ほかの手法との比較を試みた結果を示す。ここでは、ケース1の総線量の最大値を3桁ずつカテゴリー化した場合について、判別に特化した手法である判別分析(例えば、室・石村, 1999)との比較を実施した。ケース1に対して判別分析により抽出された重要パラメータは以下に示す11パラメータであり、決定木分析により抽出された4つの重要パラメータが含まれていることがわかる。

- ・透水量係数分布の平均値 ※
- ・Csの岩盤での分配係数 ※
- ・マトリクス拡散深さ ※
- ・Uの溶解度 ※
- ・マトリクス拡散寄与面積率
- ・縦方向分散長と移行距離の比
- ・Npの溶解度
- ・母岩の評価距離
- ・Csの緩衝材での分配係数
- ・Seの岩盤での分配係数
- ・Thの岩盤での分配係数

※：決定木分析でも抽出されたパラメータ

表6.1に判別分析によるカテゴリー別の判別結果を、表6.2に決定木分析によるカテゴリー別の判別結果を示す。ここで各カテゴリーが正しく判別された割合(カテゴリー別判別割合)を比較すると、Gr1~Gr3でのカテゴリーの判別能力は殆ど同じであることが確認できた。一方、LOWのカテゴリーについての判別割合に差が生じているが、これは決定木分析の適用においてカテゴリー内の事例数が少ない場合に誤判別が多くなることを示していると考えられる。この点については6.2でさらに検討する。

表 6.1 判別分析によるカテゴリー別の判別結果

実際の 判別された カテゴリー	Gr1	Gr2	Gr3	LOW	カテゴリー別 判別割合(%)
Gr1	122	21	0	0	90%
Gr2	13	272	17	0	90%
Gr3	0	8	40	1	70%
LOW	0	0	0	6	86%
実際の 事例数	135	301	57	7	

表 6.2 決定木分析によるカテゴリー別の判別結果

実際の 判別された カテゴリー	Gr1	Gr2	Gr3	LOW	カテゴリー別 判別割合(%)
Gr1	123	29	0	0	91%
Gr2	12	261	25	1	87%
Gr3	0	11	32	6	56%
LOW	0	0	0	0	0%
実際の 事例数	135	301	57	7	

以上から、決定木分析は判別分析に比べて抽出された重要パラメータが 4 つと少ないにもかかわらず、同等の判別能力を有することが確認できた。さらに、決定木分析ではパラメータの定量的条件の把握が可能であることは、先に述べた少ないパラメータで同等の判別ができることに加えて、判別分析に対する決定木分析の大きな強みとなる。

また、このような手法間での比較により、分析結果の信頼性を確認することができるとともに、同じ目的、対象に対して複数の手法を用いることができるようにすることで、それぞれの手法の長所を活かし、欠点を補い合うことが可能になる。このような取り組みを進めることは、感度分析の適用範囲と分析能力の向上という観点から有用であると考えられる。

6.2 判別精度が低くなる場合の検討

ケース 1 や 2 以外の場合についても条件を変えた分析を試みた結果、総線量の最大値を 2 桁ずつカテゴリー化するなど、カテゴリー分けを細かく設定した時には判別の精度が低くなる場合があることもわかった。この判別精度が低くなる場合の原因としては以下の 3 つが推定される。

- ①カテゴリー間における事例数の差が生じたことが原因の 1 つとして考えられる。例えばケース 1 の場合でも、カテゴリー Gr3 の事例数が 57 に対して、カテゴリー Gr2 の事例数が 301 と 5 倍以上もあり、分析処理される際に Gr3 の 25 事例が Gr2 に包括された。この誤判別された 25 事例は Gr3 にとっては半分に近い割合を占めているが、Gr2 にし

てみれば 1 割にも満たないというように、誤判別された事例数が各カテゴリーに与える影響の度合いに差が生じる。これにより、事例数が相対的に少ないカテゴリーでの誤判別が多くなり判別精度が低くなった可能性がある。カテゴリー分けを細かく設定した時には、このような影響が顕著化し判別精度に影響することが考えられる。

- ②総線量の最大値の結果例から、総線量の最大値が発生する時間が $10^4 \sim 10^8$ 年の間に分布している。このため総線量の最大値として同じカテゴリーに属しているものの、発生時間の違いを生ずる原因となるパラメータが異なることにより、適切に判別するためのパラメータやその条件を見出せなくなったことが判別精度に影響することが考えられる。
- ③総線量の最大値のばらつきには、決定木分析で抽出されるような影響度の大きな重要パラメータによる比較的大きなばらつき以外にも、影響度の小さな複数のパラメータが相互に影響し合うことに起因する局所的なばらつきが含まれていると考えられる。このような局所的なばらつきに対する、総線量の最大値のカテゴリー分けの幅の兼合いが適当ではないことが判別精度に影響することが考えられる。

上記のような原因の候補に対する対処としては、カテゴリー分けを行う際に、例えばクラスター分析などの統計的手法を用いた分類を実施し、カテゴリー分けするなどの対応が考えられる。このような対処については、今後さらに検討していく予定である。

7. おわりに

以上のことから、ケース 1 およびケース 2 について決定木分析を実施し、核種移行解析で考慮する多数のパラメータの中から重要度の高いパラメータを効率的に抽出することに加え、パラメータの定量的な条件を把握することに関する、決定木分析の有効性について見通しを得ることができたと考える。

以下に決定木分析の特徴をまとめる。

- ・ 目的変数のカテゴリー（本検討では総線量の最大値のばらつきをカテゴリー化）を容易かつ効率的に判別できる。
- ・ 多数の入力パラメータから判別に必要な少数の重要パラメータを抽出し、かつその定量的な条件および組み合わせを提示できる。

また、決定木分析により直接得られる終端ノード毎の重要パラメータとその定量的条件の情報に対して、それらを重要パラメータの定量的条件と判別結果の関係図として一元的にまとめることにより、分析結果の全体像の把握が容易になったことに加えて、以下の 2 つの観点から、決定木分析の結果の利用性が大きく向上すると考える。

- ・ あるパラメータ条件が与えられた時に、その条件に対する解析結果がどのカテゴリー

に属するかを容易に予測することが可能。

- ・データの不確実性が低減された場合に期待される効果を概略見積もることが可能。例えば、透水量係数分布の平均値（対数）が-9.9より低いという知見が得られれば、カテゴリーGr1に属する総線量の最大値は生じないことを概略見積もることが可能である。

今後の課題としては、まず、核種移行解析により得られる総線量の最大値以外の様々な結果（総線量の最大値の発生時刻、支配核種など）を対象とした決定木分析の適用範囲の拡大、および誤判別への対処の検討を進め、決定木分析の有効性の把握と向上を進める。また、他の多変量解析手法との連携により分析結果の信頼性を高めるとともに、それぞれの特徴を活かしつつ不足点を相互に補足し合うといった感度分析手法の多角化、さらには体系化について検討していく予定である。

8. 参考文献

若杉圭一郎, 小尾 繁, 牧野仁史: “モンテカルロシミュレーションによる高レベル放射性廃棄物地層処分の安全評価に対するデータ不確実性解析”, サイクル機構技報, No14, pp.149-160 (2002).

牧野仁史, 若杉圭一郎, 小尾 繁: “核種移行解析結果に対する感度分析の方法論の検討”, 日本原子力学会 2003 年春の年会要旨集, p.942 (2003).

マイケル J.A.ベリー, ゴードン・リノフ 著, 江原淳, 佐藤栄作 共訳: データマイニング手法, SAS インスティテュート ジャパン, 海文堂, pp.157-210 (1999).

Fisher, R. A.: “The Use of Multiple Measurements in Taxonomic Problems. Annals of Eugenics 7”, pp.179-188 (1936).

stattソフト ジャパン株式会社: STATISTICA デシジョンツリー操作ガイド (2000).

核燃料サイクル開発機構: “わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 - 地層処分研究開発第2次取りまとめ - 分冊 3 地層処分システムの安全評価”, サイクル機構技術資料, JNC TN1400 99-023 (1999).

室淳子, 石村貞夫: Excelでやさしく学ぶ多変量解析, 東京図書, pp.124-170 (1999).

付録1 終端ノード別の判別結果およびパラメータ条件

ここでは、決定木分析の結果として5章で示したカテゴリ別の判別結果とは別に得られるより詳しいアウトプットとして、終端ノード別の判別結果と終端ノード別のパラメータ条件をケース1および2について示す。

【ケース1】総線量の最大値を3桁ずつカテゴリ化したケース

付表1.1にケース1における終端ノード別の判別結果を示す。これは、あるカテゴリに属すると判別された各終端ノードに含まれる事例数に対する、その終端ノードに含まれる実際にそのカテゴリに属する事例数との割合を示している（以下「終端ノード別判別割合」）。列方向の合計が実際のカテゴリの事例数、行方向の合計が各終端ノードに含まれる事例数である。また、表では各行を横に見ていくことにより、各ノードに実際のどのカテゴリに属する事例がいくつ含まれているかが分かるようになっている。例えばノード6（表の第2行参照）には、実際にGr1に属する73事例（色分けで強調）、Gr2に属する11事例、Gr3及びLOWに属する0事例が含まれており、このノード6のカテゴリは最も事例数が多いGr1と判別されている。この時、ノード6の全事例数84（73+11+0+0）に対して実際にGr1に属する事例が含まれている割合が終端ノード別判別割合であり87%（=73/84：表の第2行最終列参照）となる。

付表1.1 終端ノード別の判別結果例

実際のカテゴリ 決定木分析の結果		カテゴリ Gr1	カテゴリ Gr2	カテゴリ Gr3	カテゴリ LOW	ノード 事例数	終端ノード別 判別割合(%)
ノード番号	判別された カテゴリ						
6	Gr1	73	11	0	0	84	87%
8	Gr2	3	145	14	1	163	89%
10	Gr3	0	11	32	6	49	65%
11	Gr2	3	59	9	0	71	83%
12	Gr2	3	23	1	0	27	85%
13	Gr1	23	10	0	0	33	70%
14	Gr1	27	8	0	0	35	77%
15	Gr2	3	34	1	0	38	89%

また、付表1.2にGr1、付表1.3にGr2、付表1.4にGr3における終端ノード別のパラメータ条件を示す。これは付表1.1の各終端ノードを判別した時のパラメータ条件を整理したものである。各終端ノードのパラメータ条件は全てANDである。例えば付表1.2はGr1に属すると判別された終端ノード6、13、14のパラメータ条件であり、パラメータ欄のパラメータがそれぞれの条件をANDで満たす事例は、最終列に示した割合で実際にGr1に属する事例であることが期待できる（付表1.1の最終列の終端ノード別判別割合と同じ）。

この時、ひとつの終端ノードの条件として同じパラメータが複数回出現することもある。これは分岐を2分木で行うことから生じるものと考えられ、決定木分析の判別順序の問題であり、パラメータとしては1つにまとめることが可能である。

この結果から、Gr1 が支配的と判別された3つの終端ノードでの3つのパラメータ条件群により152事例(付表1.2の最終行第8列参照)がGr1として判別され、そのうちの81%である123事例(付表1.2の最終行第9列参照)が実際にGr1に属する事例であることがわかる。さらに、この123事例は実際にGr1に属する全事例数135(5章、表5.1.1の最終行第2列参照)のうち91%を含むというようにカテゴリー別の判別結果と結びつけることができる。

これらの条件群は4つのパラメータにより表現されていることから比較的複雑であるといえる。しかしこの中で、ノード6と13の条件は比較的簡単で、かつ、正しく判別された事例数が全体の約8割を占めているという特徴がある。

付表 1.2 Gr1 のカテゴリーに属することを特徴付ける終端ノード別のパラメータ条件

ノード 番号	パラメータ*						ノード 事例数	正しく判別 された事例数	終端ノード別 判別割合(%)
	透水量係数 分布の平均値	マトリクス 拡散深さ	Uの 溶解度	Csの岩盤で の分配係数	透水量係数 分布の平均値	Csの岩盤で の分配係数			
6	>0.71	≤0.65	—	—	—	—	84	73	87%
13		>0.65	>0.51	—			33	23	70%
14	≤0.71	—	—	≤0.65	>0.5	≤0.26	35	27	77%
総数：							152	123	81%

*；各ノードにおいてパラメータ条件は全て AND である

同様に Gr2 のカテゴリーに属することを特徴付けるパラメータ条件を付表 1.3 に示す。

付表 1.3 Gr2 のカテゴリーに属することを特徴付ける終端ノード別のパラメータ条件

ノード 番号	パラメータ*						ノード 事例数	正しく判別 された事例数	終端ノード別 判別割合(%)
	透水量係数 分布の平均値	マトリクス 拡散深さ	Uの 溶解度	Csの岩盤で の分配係数	透水量係数 分布の平均値	Csの岩盤で の分配係数			
8	≤0.71	—	—	≤0.65	≤0.5	—	163	145	89%
11				>0.65	>0.29		72	59	83%
12	>0.71	>0.65	≤0.51	—	—	27	23	85%	
15	≤0.71	—	—	≤0.65	>0.5	>0.26	38	34	89%
総数：							300	261	87%

*；各ノードにおいてパラメータ条件は全て AND である

この結果から、上記4つの条件群より300事例がGr2として判別される。そのうちの87%である261事例が実際にGr2に属しており、さらに、この261事例は実際にGr2に属する全事例数301のうち87%に相当する。

これらの条件群は4つのパラメータにより表現されていることから比較的複雑であるといえる。この中でノード8と11の条件は比較的簡単で、正しく判別された事例数の約8割を占めているという特徴がある。

同様にGr3のカテゴリに属することを特徴付けるパラメータ条件を付表1.4に示す。

付表 1.4 Gr3 のカテゴリに属することを特徴付ける終端ノード別のパラメータ条件

ノード 番号	パラメータ*			ノード 事例数	正しく判別 された事例数	終端ノード別 判別割合(%)
	透水量係数 分布の平均値	Csの岩盤で の分配係数	透水量係数 分布の平均値			
10	≤0.71	>0.65	≤0.29	49	32	65%
	総数：			49	32	65%

*；各ノードにおいてパラメータ条件は全てANDである

この結果から、上記の条件より49事例がGr3として判別される。そのうちの65%である32事例が実際にGr3に属しており、さらに、この32事例は実際にGr3に属する全事例数57のうち56%に相当する。

これは2つのパラメータにより表現される比較的簡単な条件のみで判別が可能であるという特徴がある。

【ケース 2】 第 2 次とりまとめのレファレンスケースにおける総線量の最大値を基準として高い結果と低い結果で 2 つにカテゴリー化したケース

付表 1.5 にケース 2 における終端ノード別の判別結果を示す。この結果は、例えばノード 3（表の第 2 行参照）には、実際に OverH12 に属する 212 事例、UnderH12 に属する 52 事例が含まれているが、このノード 3 のカテゴリーは最も事例数が多い OverH12 と判別されている。この時、ノード 3 の全事例数 264（212+52）に対して実際に OverH12 に属する事例が含まれている割合が 80%（=212/264：表の第 2 行最終列参照）となる。

付表 1.5 終端ノード別の判別結果例

決定木分析の結果		実際のカテゴリー		ノード事例数	終端ノード別判別割合(%)
ノード番号	判別されたカテゴリー	カテゴリー OverH12	カテゴリー UnderH12		
3	OverH12	212	52	267	80%
5	UnderH12	24	162	186	87%
7	OverH12	22	6	28	79%
8	OverH12	8	2	10	80%
9	UnderH12	1	11	12	92%

また、付表 1.6 に OverH12、付表 1.7 に UnderH12 における終端ノード別のパラメータ条件をそれぞれ示す。

付表 1.6 OverH12 のカテゴリーに属することを特徴付ける終端ノード別のパラメータ条件

ノード番号	*パラメータ				ノード事例数	正しく判別された事例数	終端ノード別判別割合(%)
	透水量係数分布の平均値	Cs の岩盤での分配係数	透水量係数分布の平均値	マトリクス拡散深さ			
3	>0.47	—	—	—	264	212	80%
7	≤0.47	≤0.23	>0.18	≤0.40	28	22	79%
8			≤0.18		10	8	80%
総数：					302	242	80%

*；各ノードにおいてパラメータ条件は全て AND である

付表 1.6 の結果から、決定木分析による感度分析により、上記 3 つの条件群から 302 事例が OverH12 として判別される。そのうちの 80%である 242 事例が実際に OverH12 に属しており、さらに、この 242 事例は実際に OverH12 に属する全事例数 267 のうち 91%に相当

する。

これらの条件群は3つのパラメータにより表現されていることから比較的複雑であることがいえる。この中でノード3の条件は簡単で、正しく判別された事例数の約9割を占めているという特徴がある。

付表 1.7 UnderH12 のカテゴリーに属することを特徴付ける終端ノード別のパラメータ条件

ノード 番号	*パラメータ				ノード 事例数	正しく判別 された事例数	終端ノード別 判別割合 (%)
	透水量係数 分布の平均値	Cs の岩盤で の分配係数	透水量係数 分布の平均値	マトリクス 拡散深さ			
5	≤0.47	>0.23	—	—	186	162	87%
9		≤0.23	≤0.18	>0.40	12	11	92%
総数 :					198	173	87%

* ; 各ノードにおいてパラメータ条件は全て AND である

付表 1.7 の結果から、決定木分析による感度分析により、上記3つの条件群から198事例が UnderH12 として判別される。そのうちの87%である173事例が実際に UnderH12 に属しており、さらに、この173事例は実際に UnderH12 に属する全事例数233のうち74%に相当する。

これらの条件群は3つのパラメータにより表現されていることから比較的複雑であることがいえる。この中でノード5の条件は比較的簡単で、正しく判別された事例数の約9割を占めているという特徴がある。

付録2 より詳細な分析処理を行うことによる判別精度向上に関する検討

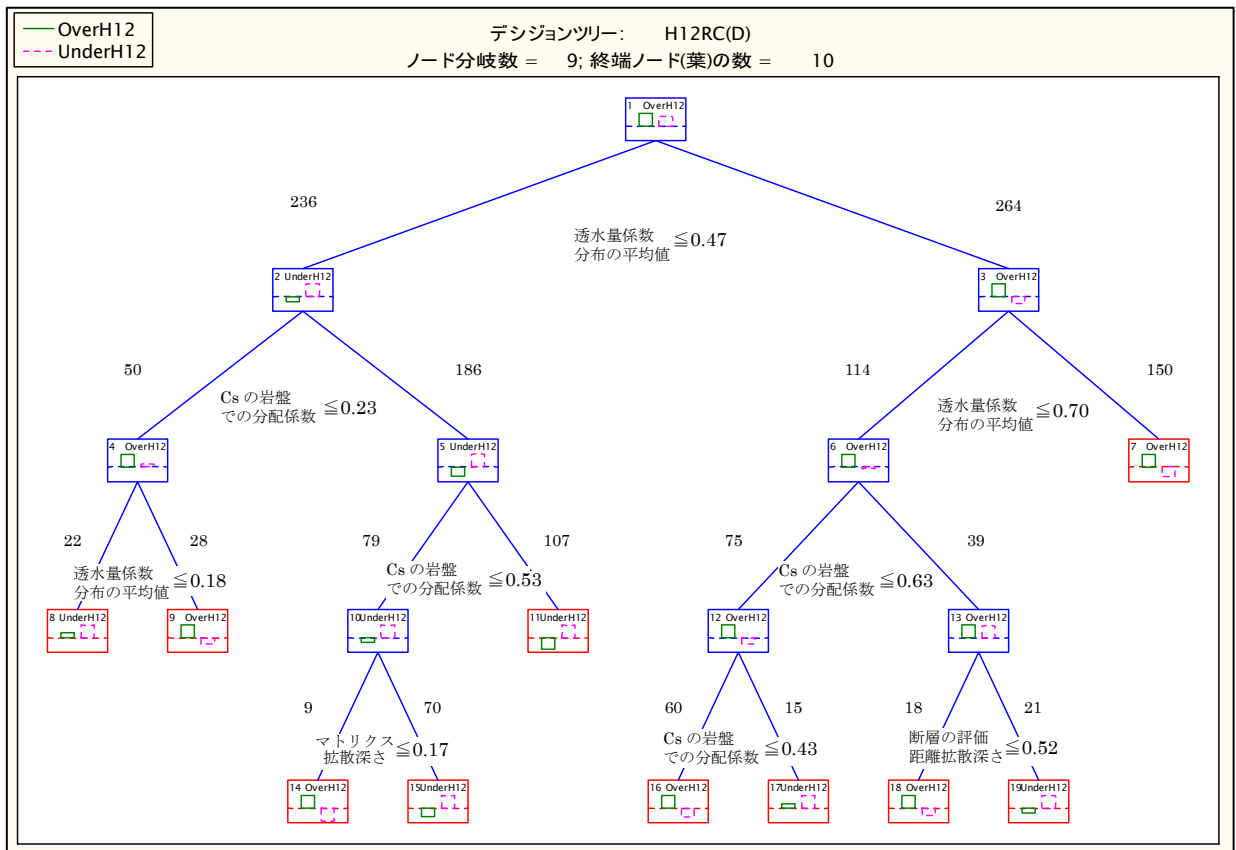
ケース2（第2次とりまとめのレファレンスケースにおける総線量の最大値を基準として高い結果と低い結果で2つにカテゴリー化したケース）の分析結果である図5.2.2の透水量係数分布の平均値とCsの岩盤での分配係数の定量的条件と判別結果の関係図に着目すると、決定木分析によってあるカテゴリーと判別された条件の領域と、実際の事例が一致していない部分（誤判別）が見られる。よって、ここではケース2について、決定木のツリー構造の細分化が判別精度の向上にどの程度寄与するかを検討する。具体的には、STATISTICAのデシジョンツリーモジュールの分岐停止パラメータの設定を変更し、終端ノードが多くなるように設定した。

付図2.1に決定木を、付表2.1にカテゴリー別判別割合を示す。

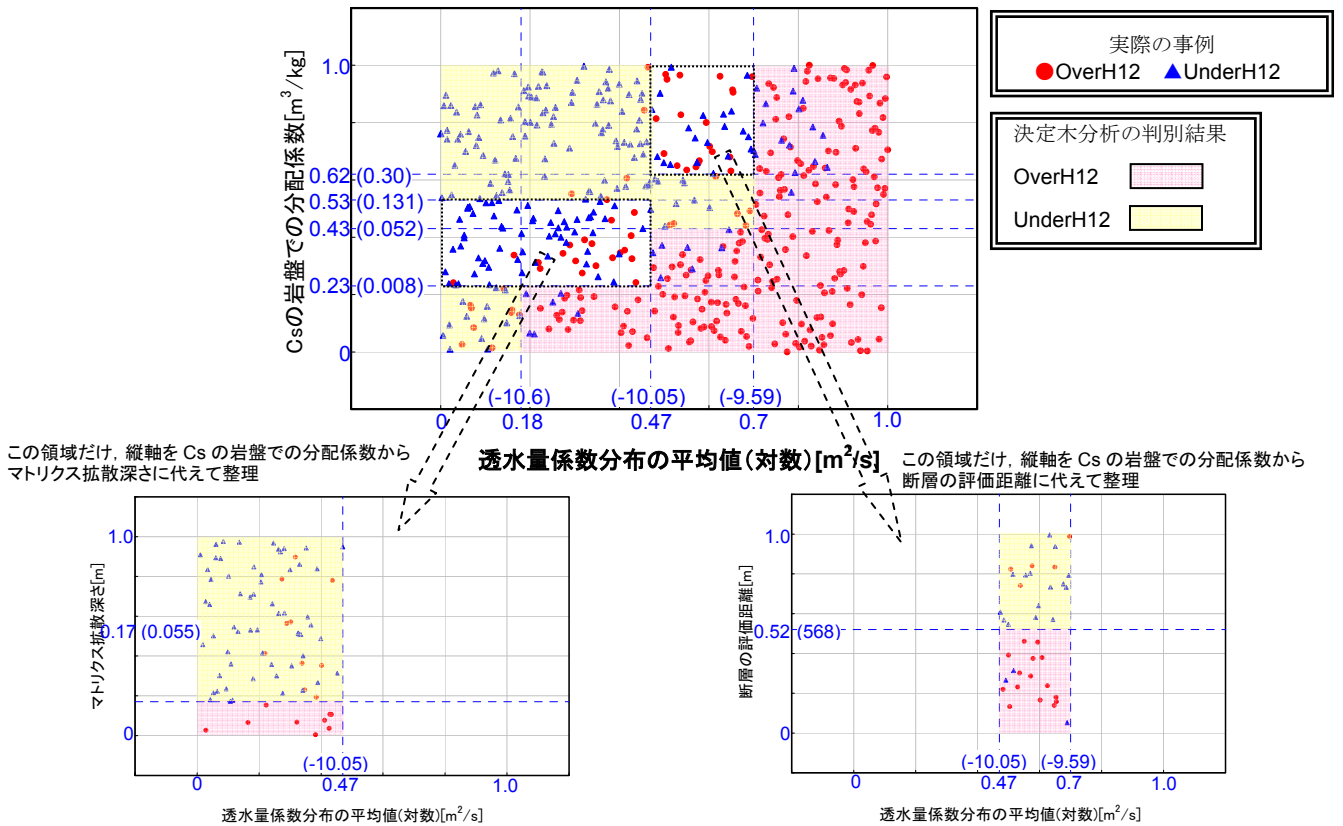
付表2.1 カテゴリー別の判別結果

実際の判別されたカテゴリー \ 実際のカテゴリー	OverH12	UnderH12	カテゴリー別判別割合(%)
OverH12	232	33	87%
UnderH12	35	200	86%
実際の事例数	267	233	

5章のケース2の結果（表5.2.1）に比べて、付表2.1では、カテゴリーOverH12の判別割合が91%から87%と僅かに低くなったものの、カテゴリーUnderH12の判別割合は74%から86%と高くなり、全体で見ると判別精度が向上していた。また、決定木の終端ノード数が図5.2.1での5から付図2.1では10と2倍になったものの、図5.2.1で抽出された3つのパラメータ以外に付図2.1で新たに抽出された重要パラメータは断層の評価距離のみであった。この結果をもとに判別に用いられた4つの重要パラメータの定量的条件と判別結果の関係を示したものを付図2.2に示す。これにより、図5.2.2に比べてより詳細にそれぞれのカテゴリーを判別するための条件が得られ、かつ、判別精度を上げる効果があるという知見が得られた。



付図 2.1 決定木 (ケース 2: 第 2 次とりまとめを基準として高い結果と低い結果で 2 つにカテゴリー化: 分岐停止パラメータの設定を変更し, 終端ノードが多くなるように設定した場合)



付図 2.2 重要パラメータの定量的条件と判別結果の関係図 (軸の目盛は 0~1 で規格化した値 (式 1 と 2 参照)。一方, カッコ内の数値は 0~1 で規格化した値 (4 章参照) を実際のモンテカルロシミュレーションで用いた値に直したもの。)