



# 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

若杉圭一郎 小尾 繁\* 牧野 仁史

東海事業所 環境保全・研究開発センター 処分研究部  
\*原子力システム株式会社

Data Uncertainty Analysis for Safety Assessment of HLW Disposal by the Monte Carlo Simulation

Keiichiro WAKASUGI Shigeru KOO\* Hitoshi MAKINO

Waste Isolation Research Division, Waste Management and Fuel Cycle Research Center, Tokai Works  
\* Nuclear Energy System Inc.

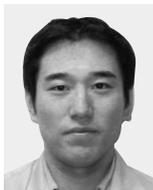
本研究では、第2次取りまとめの安全評価において複数の解析ケースの基準として設定したレファレンスケースの概念モデルに基づき、データの不確実性を取り扱うことができる確率論的評価コードを構築した。このコードを用いてレファレンスケースにおけるデータの不確実性を網羅的に考慮したモンテカルロシミュレーションを実施し、決定論的に実施された第2次取りまとめの安全評価結果の保守性と十分性を確率論的なアプローチで確認した。また、重要なパラメータを定量的に把握するために、既存の多変量解析手法であるクラスタ分析と重回帰分析とを組み合わせた手法を適用しパラメータの感度分析を実施した。この結果、透水量係数が結果の不確実性に対して最も影響の高いパラメータであることが示され、さらに局所的に高い影響を生ずる非線形的な感度構造も明らかになった。

*Based on the conceptual model of the Reference Case, which is defined as the baseline for various cases in the safety assessment of the H12 report, a new probabilistic simulation code that allowed rapid evaluation of the effect of data uncertainty has been developed. Using this code, probabilistic simulation was performed by the Monte Carlo method and conservativeness and sufficiency of the safety assessment in the H12 report was confirmed, which was performed deterministically. In order to examine the important parameter, this study includes the analysis of sensitivity structure among the input and the output. Cluster analysis and multiple regression analysis for each cluster were applied in this analysis. As a result, the transmissivity had a strong influence on the uncertainty of the system performance. Furthermore, this approach was confirmed to evaluate the global sensitive parameters and local sensitive parameters that strongly influence the space of the partial simulation results.*

## キーワード

高レベル放射性廃棄物，地層処分，安全評価，第2次取りまとめ，モンテカルロシミュレーション，データ不確実性，感度構造，クラスタ分析，重回帰分析

*High Level Waste, Geological Disposal, Safety Assessment, Second Progress Report, Monte Carlo Simulation, Data Uncertainty, Sensitivity Structure, Cluster Analysis, Multiple Regression Analysis*



若杉圭一郎

システム解析グループ システム性能研究チーム所属  
副主任研究員  
高レベル放射性廃棄物地層処分の安全評価解析及びその不確実性の評価に従事



小尾 繁

システム解析グループ システム性能研究チーム所属  
高レベル放射性廃棄物地層処分の安全評価解析に従事



牧野 仁史

システム解析グループ システム性能研究チームリーダー  
副主任研究員  
高レベル放射性廃棄物地層処分の安全評価解析及びその不確実性の評価に従事

## 1. はじめに

1999年11月、サイクル機構は原子力委員会の方針<sup>1)</sup>に従い、高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性に関する研究開発の成果を、地層処分研究開発第2次取りまとめ<sup>2)</sup>(以下、第2次取りまとめ)としてまとめ、原子力委員会に提出した。第2次取りまとめにおける安全評価では、処分概念に基づく安全確保の考え方の妥当性を検討するために、シナリオ解析から導かれる多数の解析ケースと比較するための基準となるケース(以下、レファレンスケース)を定義し、概念モデル、数学モデル及び必要なデータを明らかにして安全評価を行った。さらに、システムの多様性やモデル・データの不確実性について個別に検討し、これらを合理的に組み合わせることにより、処分システムの性能を把握する解析(以下、システム性能の総合的解析)を決定論的に実施し、それぞれの結果をレファレンスケースの結果と比較することで、不確実性の影響を検討した(図1参照)。このような決定論的解析では、①個々の不確実性の取扱いと解析結果との対応が分かりやすいこと、②考慮する不確実性の結果に対するレスポンスを把握することが容易であること等の利点が挙げられるが、一方で、③安全評価において考慮すべき不確実性の組み合わせが適切であるか、あるいは安全評価を網羅的に実施したかの確認が困難であること、④複数の不確実性を同時に考慮した場合に影響度の高い不確実性を定量的に示すことが困難であること等の課題も挙げられる。また、第2次取りまとめにおいては、不確実性を網羅的に取り

込んだ評価や不確実性の重要度に関する定量的な検討までは実施していないとともに、第2次取りまとめに対する国の評価においても不確実性の評価の重要性が指摘されている<sup>3)</sup>。

本研究では、安全評価で考慮すべき不確実性のうち特にデータの不確実性に着目し、これらを網羅的に考慮することが可能な解析コードを構築し、上記③の課題を補足するための評価を行うことにより、第2次取りまとめの安全評価結果の保守性について検証する。さらに、上記④の課題を補足するため、不確実性を有するパラメータの安全評価結果の不確実性に対する重要度について、定量的な検討を試みた内容について報告する。

## 2. モデル及び解析コード

第2次取りまとめにおいて構築したレファレンスケースの概念モデルを図2に示す。本研究における解析は、すべてこのレファレンスケースについて構築したモデルを対象とする。以下に各バリアにおける核種移行モデルについて説明する。

### 2.1 人工バリア中核種移行モデル

人工バリア中核種移行の概念モデルでは、以下のことを考慮した。

- ① 処分後1,000年時点において、すべてのオーバーバックが核種閉じ込め機能を喪失すると仮定する。
- ② オーバーバック破損後、直ちに緩衝材間隙水がガラス固化体と接触し、長期的なガラス溶解速度に従ってガラスマトリクスの溶解が進む。核種はガラス固化体中で均質に混合されており、ガラス固化体中での存在比に応じてガラスから溶出する(調和溶解)。なお、ガラス固化体の溶解にともなうガラスの表面積の時間的な減少は考慮せず、ガラス固化体は一定の速度で溶解すると仮定する。
- ③ ガラス固化体近傍あるいは緩衝材中での核種濃度は、同位体の存在比に応じて分配された溶解度により制限される。沈澱/溶解反応は瞬時/可逆と仮定する。なお、溶解度の分配においては、ガラス固化体にインベントリとして含まれている同位体のみ考慮する。
- ④ 核種は緩衝材中を拡散により移行し、緩衝材に収着することにより遅延される。この際、収着反応としては瞬時/線形/可逆を仮定する。

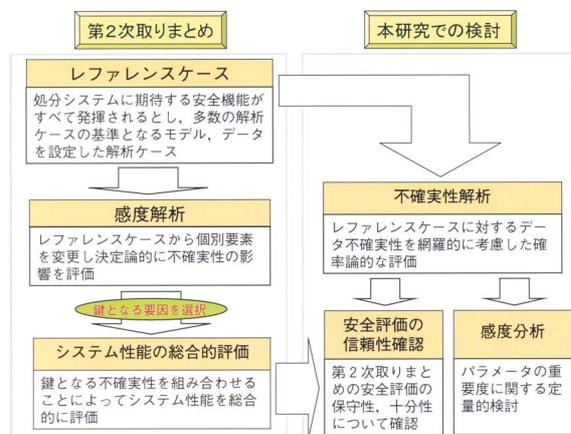


図1 第2次取りまとめにおける安全評価の手順と研究の流れ

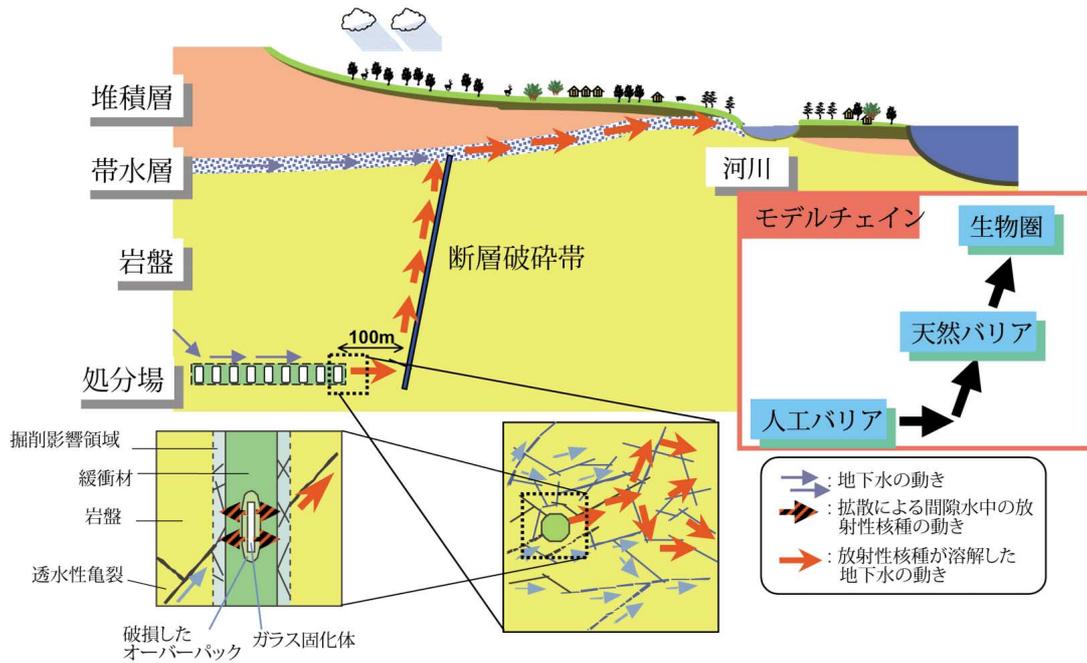


図2 レファレンスケースの概念モデル<sup>2)</sup>

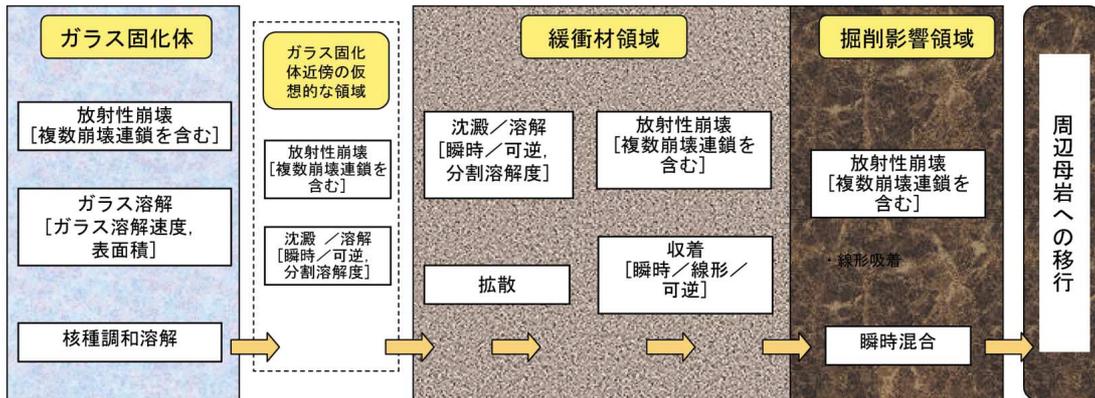


図3 人工バリア中核種移行モデルの概念図<sup>2)</sup>

⑤ 緩衝材の外側に到達した核種は、掘削影響領域を通過する地下水と瞬時に混合し、その全量が母岩中の亀裂に流入するものと仮定する。なお、掘削影響領域中での収着などによる核種移行遅延効果は保守的に考慮しない。

以上の仮定に基づき構築した人工バリア中核種移行モデルの概念図を図3に示す。

2.2 天然バリア中核種移行モデル

天然バリア中の核種移行評価では、人工バリア外側に到達した核種が周辺岩盤（母岩）を経て下流側の断層破碎帯に至り、その後核種が断層破碎帯中を移行して帯水層に達するまでのプロセスを

対象とする。岩種は花崗岩とし、人工バリアから放出された核種は亀裂媒体中を移行すると想定する。母岩及び断層中の核種移行についての概念モデルでは以下のことを考慮する。

- ① 核種は母岩及び断層中を溶質として移流・分散で移行する。
- ② 亀裂中の核種は、拡散により岩石基質部へ移行し、岩石基質内の鉱物表面への収着により遅延される。収着は瞬時/線形/可逆と仮定する。なお、亀裂表面への収着による遅延効果については考慮しない。

母岩中の核種移行モデルについては、亀裂の透水性の不均質性を考慮するため、透水性の異なる



まとめのレファレンスケースに用いたデータ<sup>2)</sup>及び表1に示す核種を用いて、ベンチマーク計算を実施した。このうちCs-135及びNp-237について各バリアからの核種移行率の結果を図5に示す。Cs-

135及びNp-237共に核種移行率が一致していることから、本コードが第2次取りまとめで用いたコード群と整合的にモデル化されていることが確認できる。

表1 核種移行解析において考慮する放射性核種

放射化生成物 / 核分裂生成物	Sm-151, Cs-135, Sn-126, Pd-107, Tc-99, Nb-94, Zr-93 Nb-93m, Se-79
4N系列	Pu-240 U-236 Th-232
4N+1系列	Cm-245 Pu-241 Am-241 Np-237 U-233 Th-239
4N+2系列	Cm-246 Pu-242 U-238 U-234 Th-230 Ra-226 Pd-210
4N+3系列	Am-243 Pu-239 U-235 Pa-231 Ac-227

### 3. モンテカルロシミュレーション

第2次取りまとめのレファレンスケースに設定したデータに対して想定される不確実性の影響を網羅的に考慮するために、本研究ではモンテカルロシミュレーション<sup>6)</sup>と呼ばれる確率論的な評価を行う。以下に、解析の手法、解析に用いた不確実性パラメータ、及び解析結果について述べる。

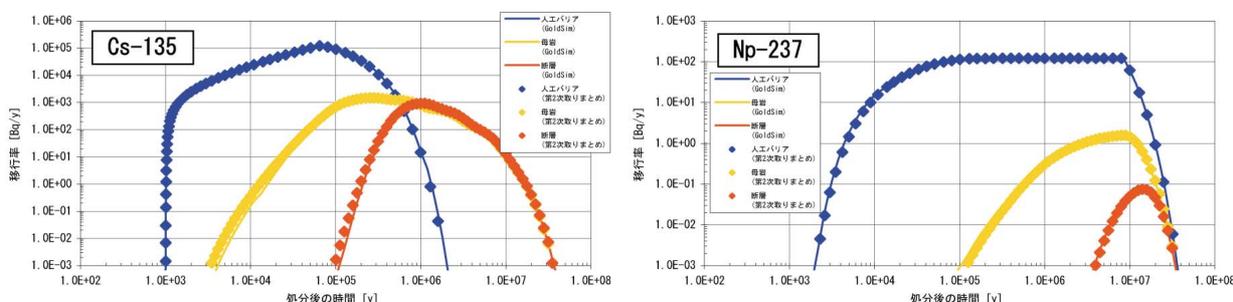


図5 ベンチマーク計算の結果

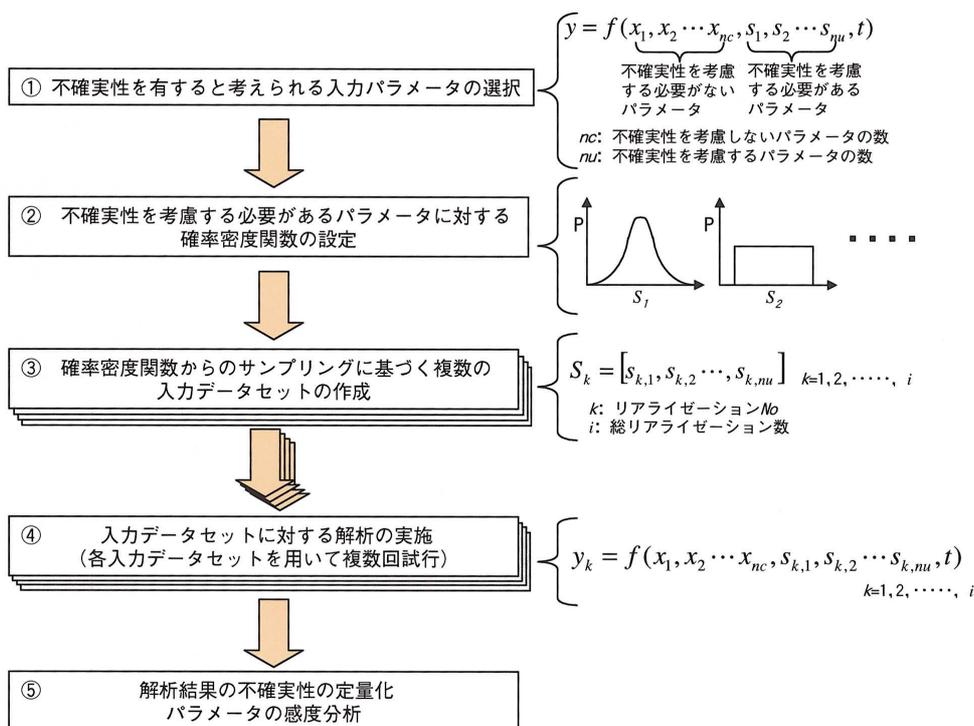


図6 モンテカルロシミュレーションのフロー

### 3.1 モンテカルロシミュレーションの流れ

本研究では、データの不確実性を網羅的に考慮するために、モンテカルロシミュレーションによる評価を行った。モンテカルロシミュレーションを用いた評価の流れを図6に示す。モンテカルロシミュレーションでは、まず①解析モデルに用いられているパラメータのうち不確実性を有すると考えられるパラメータを抽出し、②不確実性を定量的に表現するために必要なデータや情報を整理することによりパラメータに確率密度関数を設定する。次に、③不確実性を網羅的に考慮することを目的に、確率密度関数に従いパラメータ値をサンプリングすることで入力データセットを複数作成し、④各入力データセットを用いて解析を複数回実施する（これをリアライゼーションという）。最後に、⑤得られたリアライゼーションの解析結果を整理することにより、パラメータの不確実性に起因する解析結果の不確実性を定量化し、さらには入力パラメータセット群とそれに対応する解析結果群について既存の多変量解析を適用することにより、解析結果に対するパラメータの感度を明らかにしていく。

### 3.2 不確実性パラメータ

モンテカルロシミュレーションに用いた不確実性パラメータとその分布の一覧を表2に示す。モンテカルロシミュレーションでは、解析結果が不確実性パラメータに与えた分布に依存するため、これらの設定には注意を要する。本研究では、第2次取りまとめにおいて各パラメータについてまとめられた情報を基に、不確実性パラメータのレンジを設定した。なお、分布型については、不確実性パラメータの多くについて、特定の分布を設定するために必要となる十分な情報が現段階では整備されていない。このため、本研究では、不確実性パラメータの概括的感度を把握することを目的として、一様分布あるいは対数一様分布を設定した。これらの設定の考え方は、Saltelliらによって支持されている<sup>6)</sup>。

### 3.3 サンプリング方法(LHS法)

モンテカルロシミュレーションにおいては、不確実性パラメータに起因する解析結果の不確実性について統計的に有効な結果を導き出すために、不確実性パラメータに設定した分布から各パラ

メータ値を網羅的にサンプリングし、入力データセットを作成することが必要である。このため本解析では、分布からパラメータ値をサンプリングする手法として、ランダムサンプリング法より少ないサンプリング回数で、ランダムサンプリング法と同等の網羅的な不確実性の組み合わせを表現することが可能なLatin Hypercube Sampling (LHS)法<sup>10)</sup>を用いた。ランダムサンプリング法では、パラメータ数 $n$ 、サンプリング回数 $N$ の場合に $N$ 個の一樣乱数列を $n$ セット発生させ、一つの乱数値からあるパラメータの1回のリアライゼーションに使用する値を生成する。一方LHS法では、まず $n$ 個のパラメータについて、それぞれの分布の範囲を等確率に $N$ 個の区間に分割し、この $N$ 個の区間を重複なくランダムに組み合わせた後、各区間から1回のリアライゼーションで使用するパラメータ値をランダムに生成する。これにより、

表2 不確実性パラメータのデータ一覧

元素	溶解度 <sup>7)</sup> [ mol l <sup>-1</sup> ]	分配係数(緩衝材) <sup>8)</sup> [ m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> ]	分配係数(岩盤) <sup>9)</sup> [ m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> ]
Se	U <sub>L</sub> [ 10 <sup>-10</sup> , 10 <sup>-6</sup> ]	U [ 0, 10 <sup>-4</sup> ]	U [ 0, 10 <sup>-1</sup> ]
Zr	U <sub>L</sub> [ 10 <sup>-8</sup> , 10 <sup>-6</sup> ]	U[ 10 <sup>-1</sup> , 1.5 × 10 <sup>1</sup> ]	U <sub>L</sub> [ 10 <sup>-2</sup> , 10 <sup>1</sup> ]
Tc	U <sub>L</sub> [ 10 <sup>-8</sup> , 10 <sup>-6</sup> ]	U <sub>L</sub> [ 10 <sup>-1</sup> , 2 × 10 <sup>1</sup> ]	U <sub>L</sub> [ 5 × 10 <sup>-2</sup> , 10 <sup>2</sup> ]
Pd	U <sub>L</sub> [ 10 <sup>-9</sup> , 10 <sup>-7</sup> ]	U <sub>L</sub> [ 10 <sup>-1</sup> , 5 × 10 <sup>1</sup> ]	U <sub>L</sub> [ 5 × 10 <sup>-2</sup> , 1 ]
Sn	U <sub>L</sub> [ 10 <sup>-8</sup> , 10 <sup>-5</sup> ]	U <sub>L</sub> [ 1, 2 × 10 <sup>1</sup> ]	U <sub>L</sub> [ 10 <sup>-1</sup> , 10 <sup>2</sup> ]
Cs	可溶性	U[ 10 <sup>-2</sup> , 5 × 10 <sup>-2</sup> ]	U <sub>L</sub> [ 10 <sup>-3</sup> , 10 <sup>1</sup> ]
Pb	U [ 10 <sup>-6</sup> , 10 <sup>-5</sup> ]	U <sub>L</sub> [ 10 <sup>-1</sup> , 5 × 10 <sup>1</sup> ]	U <sub>L</sub> [ 10 <sup>-1</sup> , 10 <sup>1</sup> ]
Ra	U <sub>L</sub> [ 10 <sup>-14</sup> , 10 <sup>-11</sup> ]	U[ 10 <sup>-2</sup> , 2 × 10 <sup>-2</sup> ]	U[ 5 × 10 <sup>-2</sup> , 5 × 10 <sup>1</sup> ]
Ac	Amのアナログ	U [ 1, 5 ]	U[ 5 × 10 <sup>-2</sup> , 5 × 10 <sup>1</sup> ]
Th	U <sub>L</sub> [ 10 <sup>-9</sup> , 10 <sup>-5</sup> ]	Uのアナログ	U <sub>L</sub> [ 10 <sup>-1</sup> , 10 <sup>1</sup> ]
Pa	U [ 10 <sup>-8</sup> , 10 <sup>-7</sup> ]	Snのアナログ	U <sub>L</sub> [ 10 <sup>-1</sup> , 10 <sup>1</sup> ]
U	U <sub>L</sub> [ 10 <sup>-9</sup> , 10 <sup>-7</sup> ]	U <sub>L</sub> [ 1, 5 × 10 <sup>1</sup> ]	U <sub>L</sub> [ 10 <sup>-1</sup> , 10 <sup>1</sup> ]
Np	U <sub>L</sub> [ 10 <sup>-9</sup> , 10 <sup>-7</sup> ]	Uのアナログ	U <sub>L</sub> [ 10 <sup>-1</sup> , 10 <sup>1</sup> ]
Pu	U <sub>L</sub> [ 10 <sup>-10</sup> , 10 <sup>-5</sup> ]	U [ 10 <sup>1</sup> , 10 <sup>2</sup> ]	U <sub>L</sub> [ 10 <sup>-1</sup> , 10 <sup>1</sup> ]
Am	U <sub>L</sub> [ 10 <sup>-8</sup> , 10 <sup>-6</sup> ]	U [ 10 <sup>-1</sup> , 5 × 10 <sup>1</sup> ]	U[ 5 × 10 <sup>-2</sup> , 5 × 10 <sup>1</sup> ]
Cm	Amのアナログ	Amのアナログ	U[ 5 × 10 <sup>-2</sup> , 5 × 10 <sup>1</sup> ]
Nb	U <sub>L</sub> [ 10 <sup>-8</sup> , 10 <sup>-4</sup> ]	U [ 1, 10 <sup>1</sup> ]	U <sub>L</sub> [ 10 <sup>-2</sup> , 10 <sup>1</sup> ]
Sm	Amのアナログ	Acのアナログ	U[ 5 × 10 <sup>-2</sup> , 5 × 10 <sup>1</sup> ]
パラメータ		分布	
ガラス溶解速度 [ gm <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> ]		U <sub>L</sub> [ 10 <sup>-4</sup> , 10 <sup>-2</sup> ] <sup>1)</sup>	
拡散係数 (Cs, Seを除く) [ m <sup>2</sup> y <sup>-1</sup> ]		U[ 6 × 10 <sup>-3</sup> , 7 × 10 <sup>-2</sup> ] <sup>1)</sup>	
Csの拡散係数 [ m <sup>2</sup> y <sup>-1</sup> ]		U[ 2 × 10 <sup>-2</sup> , 2 × 10 <sup>-1</sup> ] <sup>1)</sup>	
Seの拡散係数 [ m <sup>2</sup> y <sup>-1</sup> ]		U[ 7 × 10 <sup>-3</sup> , 2 × 10 <sup>-2</sup> ] <sup>1)</sup>	
透水量係数分布の平均値 [ m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> ]		U <sub>L</sub> [ 10 <sup>-11</sup> , 10 <sup>-9</sup> ] <sup>1)</sup>	
縦方向分散長と移行距離の比 [ - ]		U <sub>L</sub> [ 10 <sup>-2</sup> , 1 ] <sup>1)</sup>	
マトリクス拡散深さ [ m ]		U[ 3 × 10 <sup>-2</sup> , 1 ] <sup>1)</sup>	
マトリクス拡散寄与面積率 [ % ]		U [ 10 <sup>-1</sup> , 10 <sup>2</sup> ] <sup>1)</sup>	
岩盤の空隙率 [ - ]		U[ 10 <sup>-2</sup> , 3 × 10 <sup>-2</sup> ] <sup>1)</sup>	
経験則の係数 [ - ]		U <sub>L</sub> [ 10 <sup>-1</sup> , 10 <sup>1</sup> ] <sup>1)</sup>	

U : 一様分布, U<sub>L</sub> : 対数一様分布

ランダムサンプリングより少ないサンプル数でも分布からまんべんなくサンプリングを行い、不確実性を網羅的に考慮した入力データセットを作成することができる。

### 3.4 モンテカルロシミュレーションの結果

2章で述べた核種移行モデル、解析コード及び評価対象核種、さらに3.2章で述べた不確実性パラメータを用いて、第2次取りまとめレファレンスケースに対するデ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を行った。解析結果は、2.3章で述べた方法で線量に換算して整理した。全リアライゼーションにおける各核種の線量の和（以下、総線量）の経時変化及びそれらの平均値、中央値、5パーセンタイル、95パーセンタイルを図7に示す。

総線量の値は、本解析で設定したデータの不確実性に起因して、オーバーバックが破損する処分後1,000年直後から非常に大きな範囲でばらついている。しかしながら、そのばらつきは時間の経過と共に小さくなる傾向が確認できる。

次に、図7に示した各リアライゼーションの総線量の経時変化において、安全評価上重要と考えられる総線量の最大値に着目し、総線量が最大になる時間とその値のみを散布図として図8に示した。

複数のリアライゼーションから得られた総線量の最大値は広範囲にわたって分布しているが、総線量の最大値の支配核種に着目した場合には、例えば「総線量の最大値がCs-135に支配されるケースの集団」といったように、結果をいくつかの集団に分割することができる。これは、結果がランダムに分布しているのではなく、類似した特徴を有する集団として類型化できる可能性を示唆している（4章にて詳しく検討）。

一方、決定論的に実施した第2次取りまとめの結果と比較すると、データ不確実性を考慮したシステム性能の総合的解析（1ケース）における総線量の最大値は、十数オーダにわたって分布している55パラメータの不確実性を同時に考慮したモンテカルロシミュレーションの上限値とほぼ等しい（図8参照）。このことから、第2次取りまとめにおけるシステム性能の総合的解析では、影響の高いデータの不確実性が効率的に解析へ取り込まれており、レファレンスケースについて想定されるデータ不確実性の範囲であれば、総線量の最大値を適切に評価していることが確認できた。

## 4. 感度分析

地層処分の安全評価では、評価の各段階で種々の選択肢の可能性が複数存在しているため、いずれの選択肢を採ることが適切かを判断する際に、

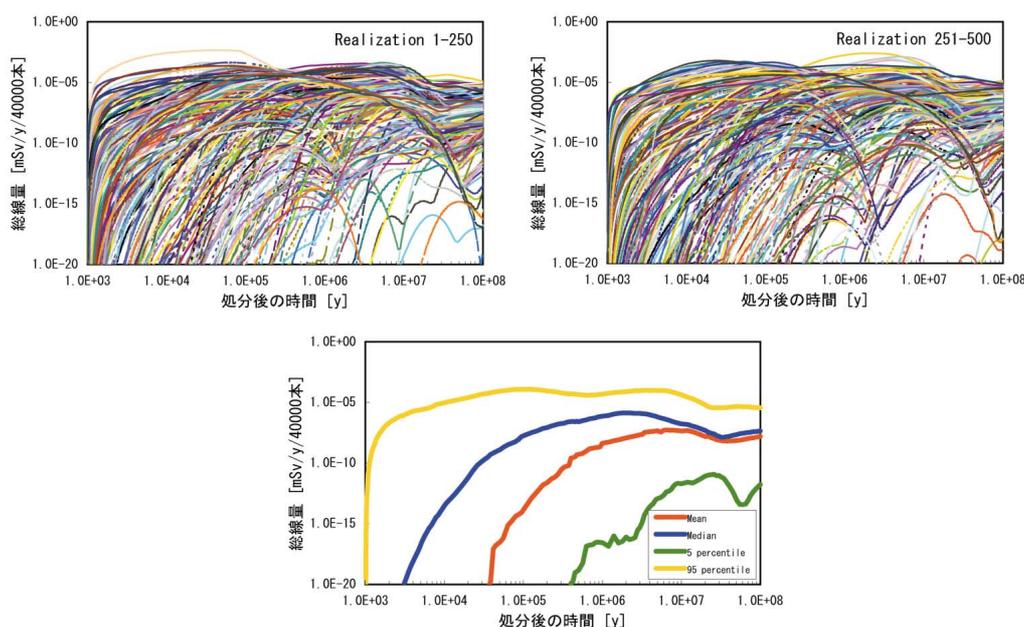


図7 モンテカルロシミュレーションの結果

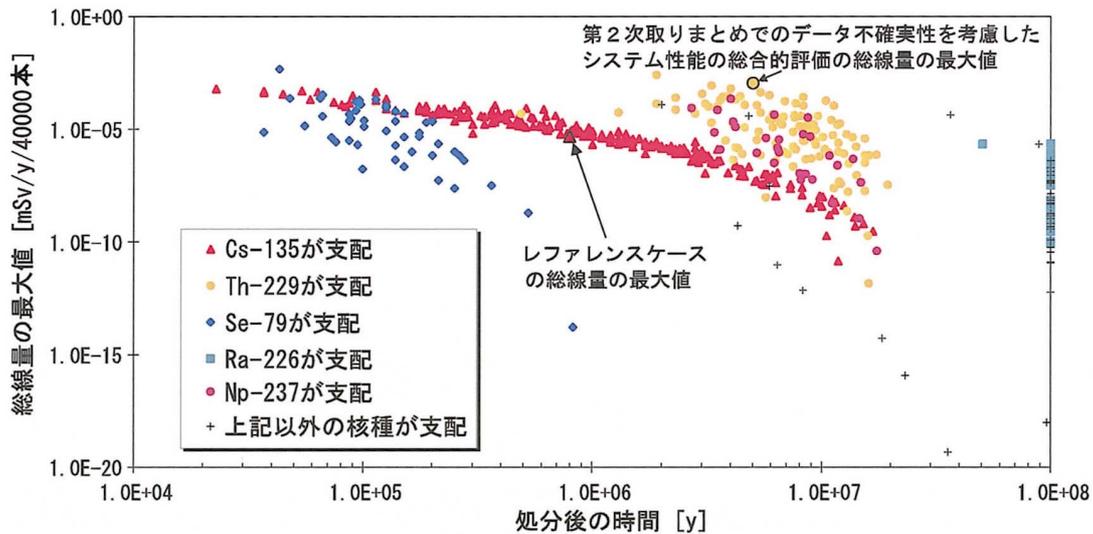


図8 全リアライゼーションの総線量の最大値についての散布図  
(各プロットのシンボルは総線量が最大値となる時に最も支配的な核種を示す)

主観的な要素の介入を完全に排除することは困難である。本研究で対象としているデータ不確実性についても、可能性のあるデータの組み合わせは無数にあり、安全評価に不確実性の影響が含まれることは回避できずと考えなければならない。このため、パラメータの感度分析を行い、結果の不確実性に大きく寄与する不確実性パラメータの重要度を定量的に分析することは、安全評価に内在する不確実性を効率的に減少させるために必要不可欠であるとともに、多くの研究分野にまたがる地層処分研究の収束性を保つ上でも重要である。

ここでは、安全評価上重要と考えられる総線量の最大値に着目し、モンテカルロシミュレーションから得られた総線量の最大値の不確実性に対して多変量解析手法を適用することにより、影響の高い重要パラメータを抽出するとともに、その感度を定量的に検討した感度分析について述べる。

#### 4.1 感度分析の概要

地層処分の安全評価で考慮するパラメータの感度分析の特徴として入出力の関係が非線形であることが指摘されている<sup>11)</sup>。これは、複数のパラメータがある一つの解析結果へ対応付けられるためであり、数学的には数十次元の入力空間と1次元の出力空間との間に大きな差が存在することに起因して、複数のパラメータをわずか1次元の出力次元に折り込ませているためである。このため、総

線量の最大値とパラメータの関係に対して通常の全域的な線形回帰モデルが適合しにくいという問題を生ずる。

上記問題に対して本研究では、既存の多変量解析手法であるクラスタ分析<sup>12)</sup>と重回帰分析<sup>13)</sup>を組み合わせた感度分析手法を適用した(図9参照)。クラスタ分析は、リアライゼーションから得られた結果について類似性を有するいくつかの集団としてグルーピングを行うことを目的として実施する。一方、重回帰分析は、クラスタ分析によって分割された各グループについてどのパラメータが結果の不確実性に対して局所的な感度を有するかを定量的かつ直接的に算出することを目的として実施する。以上の感度分析手法を用いることにより、総線量の最大値の不確実性に対して影響の大きいパラメータを明らかにしていく。

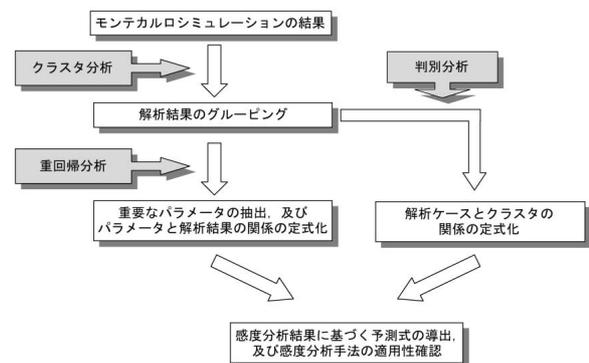


図9 感度解析フロー

ここで、本研究で用いた感度分析手法がどの程度実際の解析結果を表現できるかを調べるために、感度分析に基づく予測式から得られた結果とモンテカルロシミュレーションで得られた結果を比較する。具体的には、クラスタ分析から得られた解析ケースと各クラスタとの関係について判別分析<sup>13)</sup>を適用することにより、それらの関係を判別関数として定式化する。次に、各クラスタごとに得られている偏回帰係数から重回帰式を求め、入力パラメータセットと総線量の最大値の関係を定式化することにより予測式を求める。以上の判別式及び予測式にある入力パラメータセットを与えることにより得られた総線量の最大値と、モンテカルロシミュレーションにおける同じ入力パラメータセットでの総線量の最大値とを比較することにより、本研究で用いた感度分析手法の適用性を確認する。なお、モンテカルロシミュレーションにおいて実施した500リアライゼーションの入出力データのうち480リアライゼーションをパラメータの感度分析に、残りの20リアライゼーションを感度分析手法の適用性確認に用いる。以下、各感度分析について述べる。

#### 4.2 クラスタ分析

クラスタ分析とは、各個体がもつ属性値の類似性を基にグルーピングする手法であり、全体をいくつかの集団（以下、クラスタ）に分類するため

に利用される。ここでは、図8に示したモンテカルロシミュレーションから得られた総線量の最大値について、全リアライゼーションに対する各リアライゼーションの位置関係を基にグルーピングを行うことを目的として、クラスタ分析を実施する。具体的には、階層型のクラスタ分析法を適用し、モンテカルロシミュレーションから得られる全リアライゼーションについての総線量の最大値とその最大値が生ずる時間についてユークリッド平方距離を求め、類似度が高いもの（すなわち距離が近いもの）から逐次クラスタに統合していくことにより、複数のクラスタにグルーピングする。クラスタの構成手法としては、グルーピングの過程においてクラスタ内の個体数をウエイトとして考慮し、バランスのとれたクラスタ化を行うことができるウォード法<sup>14)</sup>を用いた。

クラスタ分析の結果を図10に示す。クラスタ1はおよそ $2 \times 10^6$ 年までに総線量が最大値を生ずるケースの集団であり、処分後早い時期に総線量が最大値となるケースも含まれている。クラスタ2はクラスタ1の後に総線量が最大値を生ずる比較的高い線量のケースの集団であり、クラスタ3は総線量の最大値が生ずる時間が遅く、線量も比較的低いケースの集団であることが示されている。

#### 4.3 重回帰分析

全リアライゼーション及びクラスタ分析により

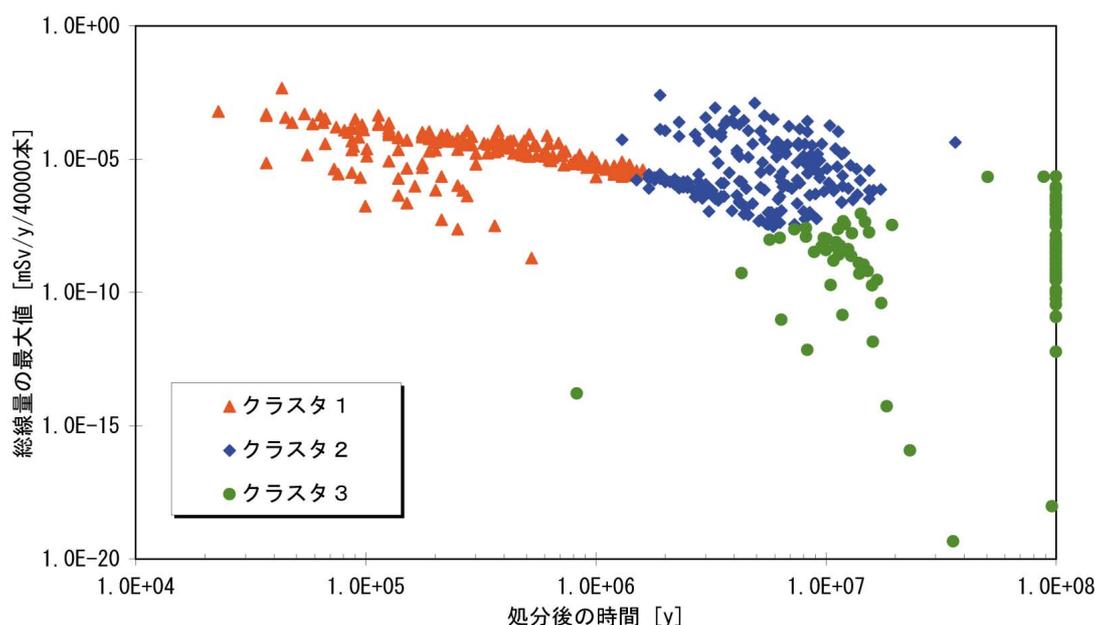


図10 総線量の最大値に対するクラスタ分析の結果

グルーピングされた三つのクラスタに含まれるリアライゼーションについて、総線量の最大値の変動に顕著な影響を持つパラメータを定量的に把握することを目的として重回帰分析を行う。分析においては単位やレンジの違いの影響を取り除くために、入力パラメータセット及び総線量の最大値に対して平均が0で分散が1となるように標準化を行う。総線量の最大値の変動に対する各パラメータの影響度は偏回帰係数で表現され、この値の絶対値が大きいほど総線量の最大値の変動に対して支配的なパラメータであると言える。

全リアライゼーションと各クラスタごとのリアライゼーションについて入力パラメータセット及び解析結果に対して実施した重回帰分析の結果のうち、顕著な感度を有するパラメータを表3にまとめる。

透水量係数の平均値は、全リアライゼーションを対象にした分析結果でも、各クラスタを対象にした分析結果でも影響が最も大きいパラメータであることが示されている。このことから、透水量係数の平均値は解析結果の全域について影響が高いパラメータであると考えられる。

一方、クラスタ2における $N_p$ の溶解度やクラスタ3における $U$ や $Th$ の岩盤中の分配係数が総線量の最大値に影響を持つパラメータとして挙げられたが、全リアライゼーションを対象とした重回帰分析にはこれらの影響は示されていない。これは、全リアライゼーションを対象として重回帰分析を実施した場合には、透水量係数やマトリクス拡散深さなど全域的に影響の高いパラメータのみが抽出されるが、クラスタ分析を適用し各リアライゼーションを類型化することにより、全域的に

影響の大きいパラメータの感度に覆い隠されることなく、局所的に影響の高いパラメータとその感度を把握できたことを示している。

以上の検討から、クラスタ分析により類似性を有する結果をグルーピングした上で、クラスタごとに重回帰分析を行うことにより、複雑なパラメータの感度構造を解きほぐし、全域的な重回帰分析による感度分析では抽出できない局所的なパラメータの感度を把握できると考えられる。

#### 4.4 感度分析手法の適用性の確認

感度分析で得られたパラメータの感度構造に関する知見に基づき、どの程度実際の解析結果を説明できるか調べることを目的として、20リアライゼーションの入力パラメータセット群に対して、クラスタ分析の結果に基づき導出した判別関数及び4.3章で導出した重回帰式を用いて総線量の最大値を予測し、モンテカルロシミュレーションから得られた実際の総線量の最大値と比較した。結果を図11に示す。多少ばらつきはあるものの、予測値と解析結果に大きな違いはない。このことから、本感度分析から得られた判別関数及び重回帰式を用いることにより安全評価上重要な指標である総線量の最大値を表現することが可能であると考えられる。

#### 5. おわりに

本研究では、第2次取りまとめレファレンスケースについて構築された概念モデルに基づき、データの不確実性を取り扱うことができる確率論的評価コードを構築した。さらに、このコードを用いてレファレンスケースに設定したデータにつ

表3 重回帰分析において顕著な感度を有するパラメータ\*

順位	全リアライゼーション**	クラスター1	クラスター2	クラスター3
1	透水量係数の平均値 (正)	透水量係数の平均値 (正)	透水量係数の平均値 (正)	透水量係数の平均値 (正)
2	岩盤に対するCsの分配係数 (負)	岩盤に対するCsの分配係数 (負)	マトリクス拡散深さ (負)	マトリクス拡散深さ (負)
3	マトリクス拡散深さ (負)	マトリクス拡散深さ (負)	岩盤に対するCsの分配係数 (負)	岩盤に対するUの分配係数 (負)
4	マトリクス拡散寄与面積率 (負)	マトリクス拡散寄与面積率 (負)	マトリクス拡散寄与面積率 (負)	岩盤に対するThの分配係数 (負)
5	-	ガラスの溶解速度 (正)	$N_p$ の溶解度 (正)	岩盤に対するCsの分配係数 (負)

\* : 正の相関は当該パラメータの増加により総線量の最大値が増加し、負の相関は当該パラメータの増加により総線量の最大値が減少することを示す。

\*\* : 5番目以降のパラメータの感度は無視できるほど小さい。

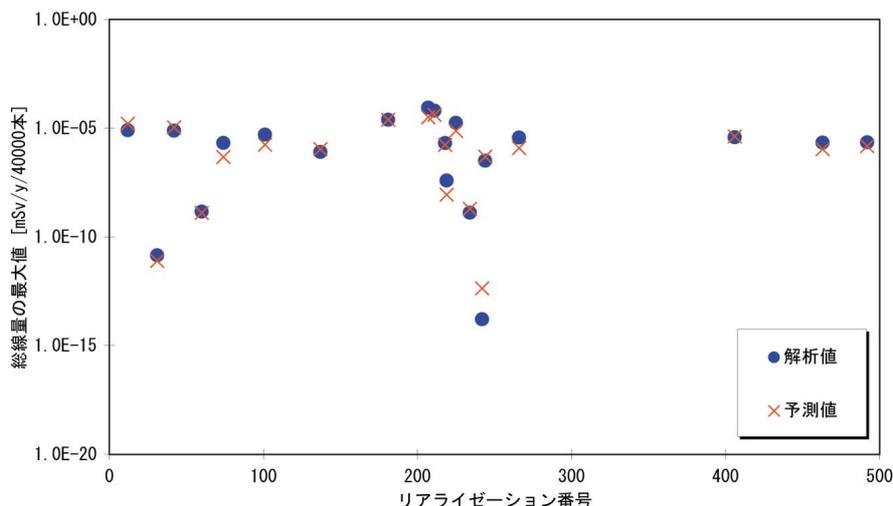


図11 予測値と解析値の比較

いて考えられる不確実性を網羅的に取り込んだモンテカルロシミュレーションを実施し、第2次取りまとめの安全評価結果と比較することにより、その保守性と十分性について確認した。

また、安全評価結果の不確実性に寄与する重要な不確実性パラメータの抽出とその重要度の定量的な分析を目的として、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に対するパラメータの感度分析を実施した。この結果、透水量係数が総線量の最大値の不確実性に対して最も高い影響を示した。また、マトリクス拡散深さや岩盤に対するCsの分配係数等のパラメータも総線量の最大値に対して高い影響を示したが、その大きさはクラスごとに異なることが確認できた。このことから、本感度分析手法を用いることにより、局所的なパラメータの感度構造を定量的に把握できると考えられる。さらに、感度分析から得られるパラメータの感度構造に関する情報を用いて予測した総線量の最大値は、実際の解析から得られる総線量の最大値を良く表現しており、影響の高いパラメータを用いて総線量の最大値を説明できることを確認した。

今後は、より詳細な現象を考慮したモデルを構築し安全評価モデルの高度化を目指すとともに、モンテカルロシミュレーションから得られる入出力情報に対して様々な感度分析手法を適用することによりパラメータの感度分析に関するノウハウを蓄積し、より効率的にデータの不確実性の影響を把握するための手法を構築していく予定である。

#### 参考文献

- 1) 原子力委員会原子力バックエンド対策専門部会：“高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発等の今後の進め方について”(1997)
- 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 - 地層処分研究開発第2次取りまとめ - ”, サイクル機構技術資料, JNC TN1400 99-020 (1999)。
- 3) 原子力委員会原子力バックエンド対策専門部会：“我が国における高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術的信頼性の評価”(2000)
- 4) 澤田淳, 井尻祐二, 他：“亀裂性岩盤を対象とした天然バリア中の核種移行解析”, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 99-093 (1999)
- 5) Golder Associates: “GoldSim Contaminant Transport Module, User's Guide”, Golder Associates Inc (2001)
- 6) A. Saltelli, K. Chan et al. : “Sensitivity Analysis”, WILEY, p.20-28 (2000)
- 7) 東侍郎, 柴田雅博, 他：“地層処分研究開発第2次取りまとめにおける放射性元素の溶解度評価”, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 99-071 (1999)
- 8) 柴田雅博, 佐藤治夫, 他：“地層処分研究開発第2次取りまとめにおける緩衝材への放射性元素の分配係数の設定”, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 99-072 (1999)
- 9) 澁谷朝紀, 陶山忠宏, 他：“性能評価で用いる岩石に対する核種の分配係数”, サイクル機構技術資料, JNC TN8410 99-051 (1999)
- 10) M. D. McKay, R. J. Beckman : “A comparison of three methods of selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code”, Technometrics, 21, p.239-245 (1979)
- 11) 核燃料サイクル開発機構：“地層処分システム性能評価のための概括的感度解析手法の高度化(II)”, 研究委託内容報告書, PNC TJ1281 98-005 (1998)
- 12) 河口至商：“多変量解析入門II”, 森北出版 (1978)

- 13) 河口至商：“多変量解析入門Ⅰ”，森北出版（1973）  
14) J. H. Ward：“Hierarchical Grouping to Optimize an

Objective Function”，Journal of the American Statistical Association, 58, p. 236-244（1963）