

ニアフィールド水理／核種移行評価モデル
の信頼性評価に関する研究
(概要版)

(核燃料サイクル開発機構 研究委託内容報告書)

2000年2月

株式会社 三菱総合研究所

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下さい。

〒319-1194 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

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:

Technical Cooperation Section,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49 Muramatsu, Naka-gun, Ibaraki 319-1194,

Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute), 2000

ニアフィールド水理／核種移行評価モデルの信頼性評価に関する研究

(核燃料サイクル開発機構 研究委託内容報告書)

長坂和佳^{*}，丸山健太郎^{*}，松本昌昭^{*}，野邊潤^{*}

要 旨

本研究では、昨年度までに構築した連続体モデルによるニアフィールド多孔質岩盤中の水理／核種移行評価手法を用いて、地下水流動を特徴付けるパラメータを変化させた場合の解析を行うと共に、手法の拡張性を考慮した信頼性評価を行った。

具体的には下記の項目を行った。

- 三次元飽和・不飽和浸透流解析から一次元核種移行解析までの一連の解析手法を用いて、第二次取りまとめに即したパラメータ設定による解析，および入力フラックスの変化に伴う影響評価を行った。
- 一次元核種移行解析コード「MATRICS」における，逆ラプラス変換手法の違いによる適用性把握を行った。
- 多要素版 MATRICS(以下 m-MATRICS とする)を用いて核種移行解析を行い，従来の MATRICS による解析結果と比較し，不均質場における核種移行計算への m-MATRICS の適用性の検討を行った。
- 三次元飽和・不飽和浸透流解析から一次元核種移行解析までの一連の解析手順を統合化した環境の整備を行った。

本報告書は株式会社三菱総合研究所が核燃料サイクル開発機構の委託により実施した研究成果に関するものである。

機構担当部課室：東海事業所環境保全センター 処分研究部 システム解析グループ

※ 株式会社 三菱総合研究所 原子力システム研究部

Reliability Evaluation of Simulation Models for Nearfield Groundwater Flow
and Radionuclide Transport Computation

Kazuyoshi NAGASAKA[※], Kentaro MARUYAMA[※],
Masaaki MATSUMOTO[※] and Jun NOBE[※]

Abstract

In this research, simulations with some parameters which characterize ground water flow and the reliability evaluation for the expansion of the calculation method of groundwater flow were carried out by using the radionuclide transport computations in nearfield heterogeneous porous media .

Concretely contents are follows:

- With the series of calculation method for three-dimensional saturated/unsaturated groundwater flow and one-dimensional radionuclide transport, the computational analyses with the parameters used in JNC report in 2000 was carried out and the influence of the different input flux was evaluated.
- The examination of the application for the different ways of inverse laplace transformation which is used in one-dimensional radionuclide transport analysis code "MATRICS" was carried out.
- The examination of the application of multi-element "MATRICS" (m-MATRICS) for radionuclide transport computations in nearfield heterogeneous porous media was carried out.
- The series of calculation methods from three-dimensional saturated/unsaturated ground water flow simulation code to one-dimensional radionuclide transport simulation code was integrated.

This work was performed by Mitsubishi Research Institute, Inc. under contract with Japan Nuclear Cycle Development Institute.

JNC Liaison : Waste Isolation Research Division, Tokai Works.

※ Mitsubishi Research Institute, Inc.

目次

要旨

Abstract

1. はじめに	1
1.1 本研究の目的	1
1.2 本研究の範囲	2
1.3 本研究の内容	3
1.3.1 パラメータの変化が核種移行評価に与える影響解析	3
1.3.2 核種移行評価モデルの信頼性解析	3
1.3.3 ニアフィールド水理/核種移行計算の整備	3
2. パラメータの変化が核種移行評価に与える影響解析	4
2.1 概要	4
2.2 解析体系	5
2.2.1 解析フロー	5
2.2.2 解析コード	6
2.2.3 解析モデル	7
2.2.4 統計的処理法	9
2.3 解析条件	11
2.3.1 三次元水理解析(S_SURF3D)	11
2.3.2 核種移行経路抽出コード(TR3D/Info)	13
2.3.3 一次元核種移行計算(MATRICES)	14
2.4 解析結果	18
2.4.1 水理解析	18
2.4.2 核種移行計算	20
2.5 まとめ	25
3. 核種移行評価モデルの信頼性解析	26
3.1 逆ラプラス変換手法の比較	26
3.1.1 目的及び概要	26
3.1.2 逆ラプラス変換手法を用いた解析手法の概要	26
3.1.3 タルボット法	28
3.1.4 クランプ法	28
3.1.5 細野法	29
3.1.6 検証解析	29
3.1.7 まとめ	30
3.2 多要素版 MATRICES による不均質場における核種移行解析	37
3.2.1 目的及び概要	37

3.2.2	多要素版 MATRICS の改修	37
3.2.3	検証解析	38
3.2.4	不均質場における核種移行解析	45
3.2.5	まとめ	49
4.	ニアフィールド水理／核種移行計算の整備	50
4.1	概要	50
4.2	使用法	51
4.2.1	コントロールファイル・フォーマット	52
4.2.2	核種物性ファイルのフォーマット	56
4.2.3	実行方法	58
4.3	入出力サンプル	59
4.3.1	コントロールファイルサンプル	59
4.3.2	核種物性ファイル	61
4.3.3	出力ファイル	62
5.	まとめ	64
	参考文献	65

1 はじめに

1.1 本研究の目的

人工バリアおよびその周辺岩盤を含めたニアフィールドにおける地下水流れや核種移行の現象を記述するモデルは計算機上でコード化され、解析的／数値的手法によって解かれる。これまで、ニアフィールドにおける水理／核種移行解析を行う解析プログラムがいくつか開発／改良されてきた。それぞれの解析プログラムは、モデルの考え方、モデルの前提条件、解法等により、特有の性質を有するためにプログラムの性質の把握および解の信頼性の把握は重要である。

昨年度までに高レベル核廃棄物の地層処分における天然バリアの性能評価を行うため、不均質場をモデル化した核種移行計算手法の開発を行い、信頼度のある解を得るに至った。但し、実際の処分場の地盤を想定した場合、場の支配パラメータや設定条件が数多く考えられる。

そこで今年度は、地下水流動を特徴付けるパラメータを変化させた場合の解析を行うと共に、より拡張性を考慮した手法を用いた場合の手法の適用性や解析条件の変化による傾向を把握する目的のために、昨年度までに確立した手法に則り、本計算手法のパラメータ変化の与える影響について検討を行った。

さらに、より拡張性の高い解析手法を選択できるためにコードの改良を行い、併せてコードの整備／統合化を行った。

1.2 本研究の範囲

本研究において行った、主な3項目を以下に示す。

1. パラメータの変化が核種移行評価に与える影響解析
2. 核種移行評価モデルの信頼性解析
3. ニアフィールド水理／核種移行計算の整備

1.3 本研究の内容

1.3.1 パラメータの変化が核種移行評価に与える影響解析

第二次とりまとめに即したパラメータ設定による解析の実施，および地下水流動を特徴付けるパラメータを変化させた場合の結果の把握を目的とする。

解析の概要は下記の通りである。また，解析手順は昨年度構築した手法に則るものとする。

- ① 30 ケースの透水係数場において，動水勾配を 1%にした場合の性能評価解析
- ② 処分坑道から 40 本の流線への核種配分を流量に依存させて配分した場合と等配分した場合の解析

上記の解析を 1 億年までの核種移行率および線量当量率の比較結果としてまとめた。

1.3.2 核種移行評価モデルの信頼性解析

昨年度確立した核種移行解析手法に対して，その拡張性を考慮した場合の手法の適用性や解析条件を変化させた場合の傾向を把握する事を目的とする。

(1) 逆ラプラス変換手法の比較

一次元核種移行計算に用いる MATRICS では，逆ラプラス変換の手法としてタルボット法を用いている。しかし，逆ラプラス変換手法としてはタルボット法の他にも，クランプ法，細野法が挙げられ，解かれる場においてはこれらの手法が有効に作用する場合も考えられる。そこで，逆ラプラス変換の三手法の特徴をまとめると共に，実際の核種移行解析に適用し，解析結果の比較検討を行う。

これにより，不均質場に対する三手法の適用特性を把握する。

(2) 多要素版 MATRICS による不均質場における核種移行解析

不均質場の核種移行解析において，より柔軟に対応することを目的として，昨年度開発した多要素版 MATRICS(以下，m-MATRICES とする)を用いた核種移行解析を行い，その適用性および従来手法の妥当性を検討した。

1.3.3 ニアフィールド水理／核種移行計算の整備

一連のニアフィールド水理／核種移行計算を効率的に行うため，シェル・スクリプトを用い，核種移行計算の環境を整備した。

2 パラメータの変化が核種移行評価に与える影響解析

2.1 概要

昨年度までに高レベル核廃棄物の地層処分における天然バリアの性能評価を行うため、不均質場連続体モデルを用いた核種移行計算手法を開発を行った。

今年度は、本計算手法のパラメータ変化の与える影響について検討を行った。

天然バリアとしての地層を多孔質岩盤として取り扱い、検討を行うパラメータとしては多孔質岩盤内の透水係数分布とした。

不均質透水係数場はSGSIM (Sequential Gaussian Simulation) アルゴリズムにより生成した。

生成する不均質透水係数場は30 ケースとし、それぞれリアライゼーション No.1 からリアライゼーション No.30 と呼ぶ。

2.2 解析体系

2.2.1 解析フロー

本計算は、地層内に取められた高レベル核廃棄物であるガラス固化体より流出した核種が地下水を媒体として断層へ至る経路を求め、核種の崩壊系列を考慮し断層での放射線量を予測することによって評価を行った。

天然バリアとしての岩盤の透水係数場は **SGSIM** アルゴリズムにより生成した。

ここでは、天然バリアとしての地層を多孔質岩盤として取り扱いをした。

多孔質岩盤中の性能評価計算フローを Fig 2.2.1-1 に示す。

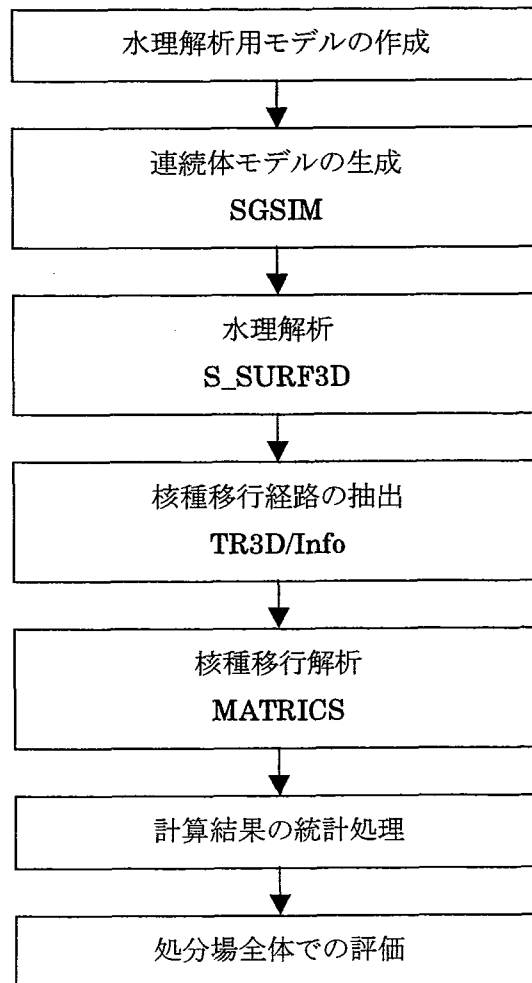


Fig 2.2.1-1 多孔質岩盤を対象とした核種移行解析フロー

2.2.2 解析コード

(1)不均質透水係数場の生成(SGSIM)

不均質透水係数場生成コードSGSIM(Deutsch and Journel,1992)は、透水係数が対数正規分布にしたがうと仮定したガウス法の中で最も適応性の高いシーケンシャルガウシアンシミュレーション(Sequential Gaussian SIMulation)法を用いて(Koltermann and Gorelick,1996)地質統計学的に透水係数場を生成するコードであり、アメリカケーブコット試験場の砂礫地盤への適応例(Eggleston et al.,1996)などがある。実際の原位置における透水係数の分布が不連続な分布に従う場合にはガウス法より非ガウス法の方が適応性の高いことが知られている。

(2) 三次元水理解析(S_SURF3D)

三次元水理解析コード(S_SURF3D)は、有限要素法によるポテンシャル流れを解くためのコードである。連立一次方程式の解法には反復法であるCG(Conjugate Gradient)法を使用する。砂礫などの多孔質岩盤中の水の流れは、見かけの流速が水頭または動水勾配に比例する(Darcy 則)ことが知られている。岩盤中の流れは、すべての間隙が水で満たされている飽和状態と水と空気が混在する不飽和状態に分けられるが、ここでは飽和状態を仮定する。

(3)移行経路抽出コード(TR3D/Info)

移行経路抽出コード(TR3D/Info)は、三次元水理解析によって求めた流れ場を用いて追跡粒子を処分坑道の表面に配置しパーティクルトラッキング法により地下水の流路を確定するコードである。追跡粒子が断層を仮定した面へ至る移行経路長および移行時間から流線の平均流速を算出する。

(4)一次元核種移行計算(MATRICES)

核種移行解析コード(MATRICES)は、第一次取りまとめにおいて一次元多孔質媒体および一次元亀裂性媒体を対象とした天然バリア中の核種移行計算に用いられ、その妥当性が検証されている(動力炉・核燃料事業団, 1992)。

2.2.3 解析モデル

解析の対象として、200m 立法の領域を仮定した。

領域の中央部には処分坑道および掘削影響領域を模擬した領域を仮定した。

処分坑道、掘削影響領域は以下の様に設定した：

- ・ 処分坑道を模擬した領域では地層領域に比べ、透水係数を低く設定する(領域内で最も低い透水係数に対し 10^{-10} 倍の値)。
- ・ 掘削影響領域では地層領域に比べ透水係数を高く設定する(雰囲気の 10 倍の値)。
- ・ 処分坑道および緩み域は、領域中央部に仮定する。
- ・ 処分坑道の伸びる方向(Y 方向)に 0~200m までを考慮する。

水理解析に使用する計算体系を Fig 2.2.3-1 に、水理解析の境界条件を Fig 2.2.3-2 に示す。

処分坑道モデル化の模式図を Fig 2.2.3-3 に示す。

移行経路の抽出では、断層はモデル末端と仮定し処分坑道表面から断層を仮定した面までに至る時間と距離を算出する。

処分坑道から断層を仮定した面までの距離は、およそ 100m となる。

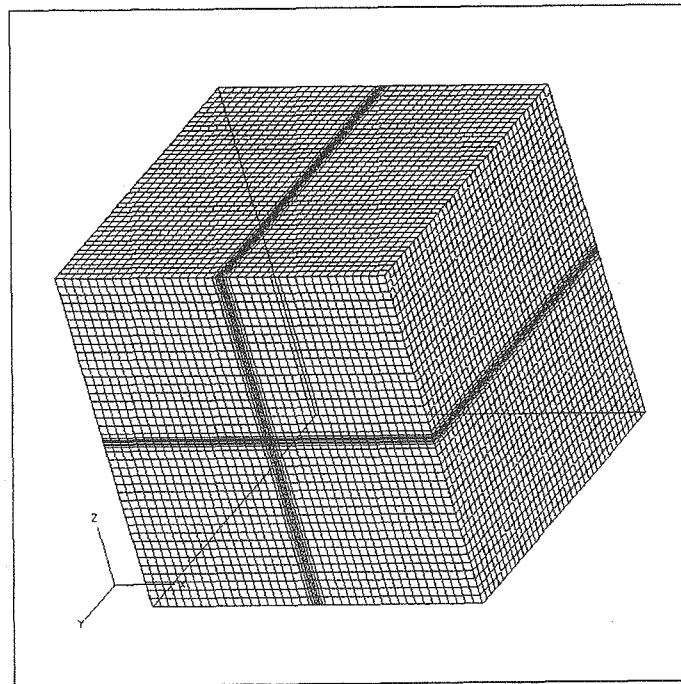


Fig 2.2.3-1 水理に使用する計算体系

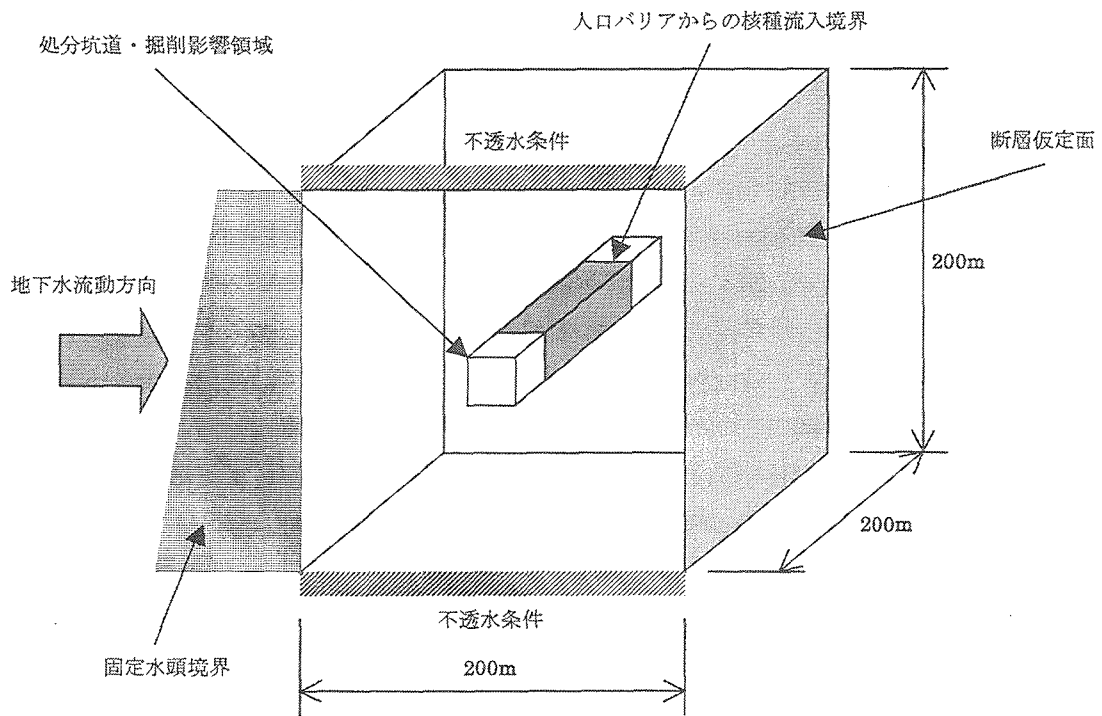


Fig 2.2.3-2 水理解析における境界条件

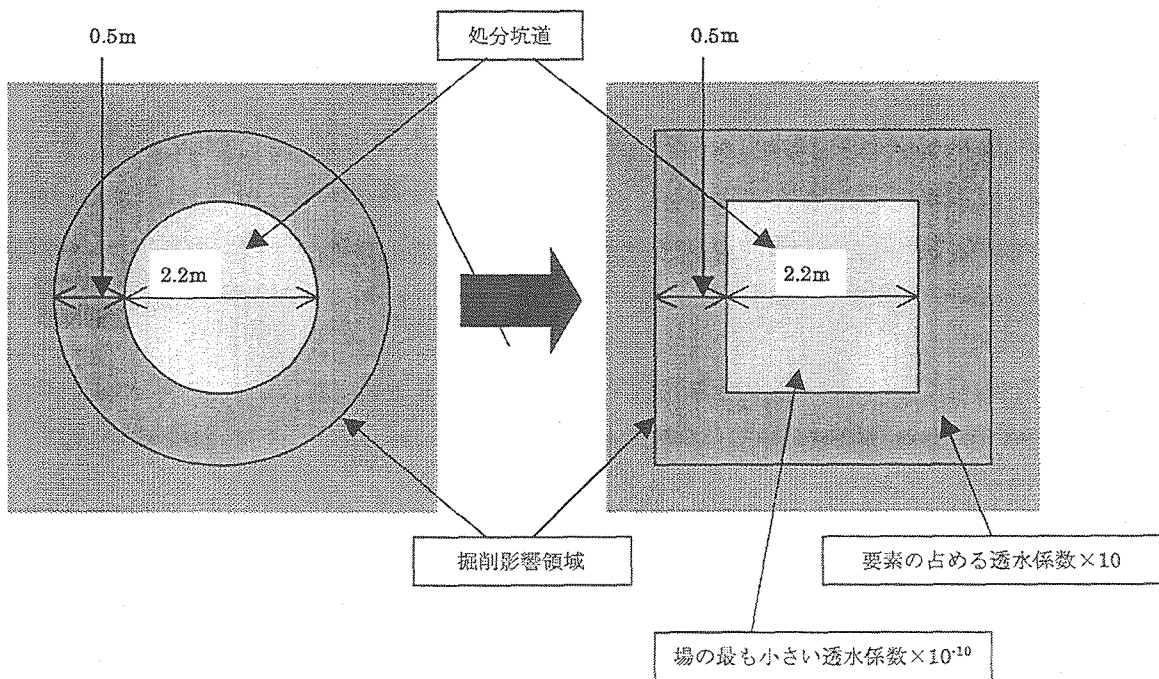


Fig 2.2.3-3 処分坑道モデル化模式図

2.2.4 統計的処理法

核種移行計算は、処分坑道から発生させた流線ごとに行うため一次元核種移行計算コード MATRICS により求めた解を重ね合わせることで、断層を仮定した下流断面での核種移行率および線量当量率を算出する必要がある。

多孔質岩盤のモデルフローを Fig 2.2.4-1 に示す。

各流線はガラス固化体一本分について計算を行い解を重ね合わせ、流線の本数で割ることによってガラス固化体一本分の核種移行率および線量当量率を算出する。

流線を重ね合わせる際に、各流線の流量によってソースタームを配分する手法と各流線についてソースタームを等配分する二通りの処理法について検討を行う。

前者は、流量の多い流線が支配的になると仮定したモデル化であり、後者は各流線が場を支配すると仮定したモデル化である。

各処理法の配分法を以下に示す。

- ・等配分によるモデル化

$$F^j = \frac{1}{n} \sum_i (flux_i^j)$$

ここで、

- F : 総フラックス
- n : 流線の本数
- $flux$: 核種 j の各流線ごとの出口フラックス

- ・流量配分によるモデル化

$$F^j = \frac{1}{n} \sum_i (flux_i^j \times D_i)$$

ここで、

- F : 総フラックス
- n : 流線の本数
- $flux$: 核種 j の各流線ごとの出口フラックス
- D : 各流線ごと流量比

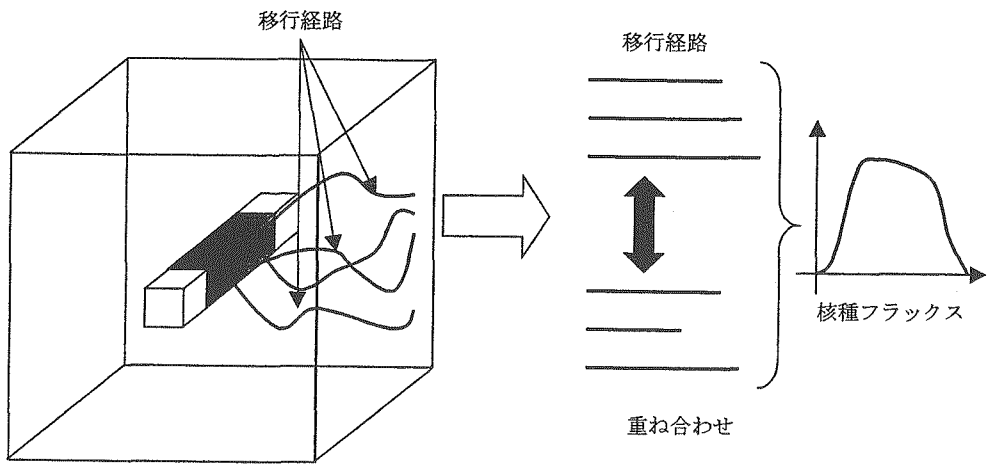


Fig 2.2.4-1 多孔質岩盤モデルフロー

2.3 解析条件

2.3.1 三次元水理解析(S_SURF3D)

解析は、SGSIMアルゴリズムによって生成された透水係数場30ケース(リアライゼーションNo.1~リアライゼーションNo.30)に関して計算を実施した。

解析に使用した不均質透水係数場として、リアライゼーション No.1 の透水係数の断面を Fig 2.3.1-1 に示す。

モデル中央部には、処分坑道および掘削影響領域をモデル化した。

解析条件を Table 2.3.1-1 に示す。

Table 2.3.1-1 水理解析条件

名称	設定値
不均質透水係数分布	SGSIM により生成 対数平均： - 8.58, 対数標準偏差： 1.21
動水勾配	0.01
有効空隙率	透水係数との相関： $\log K = 7.54 \log \theta - 3.73$ ここで、 K および θ はそれぞれ透水係数(m/sec), 空隙率を示す。 最大値 50%, 最小値 5%
掘削影響領域	処分坑道周辺の幅 0.5m 内の母岩透水係数を 10 倍
処分坑道	場の最小透水係数の 1.0×10^{-10} 倍

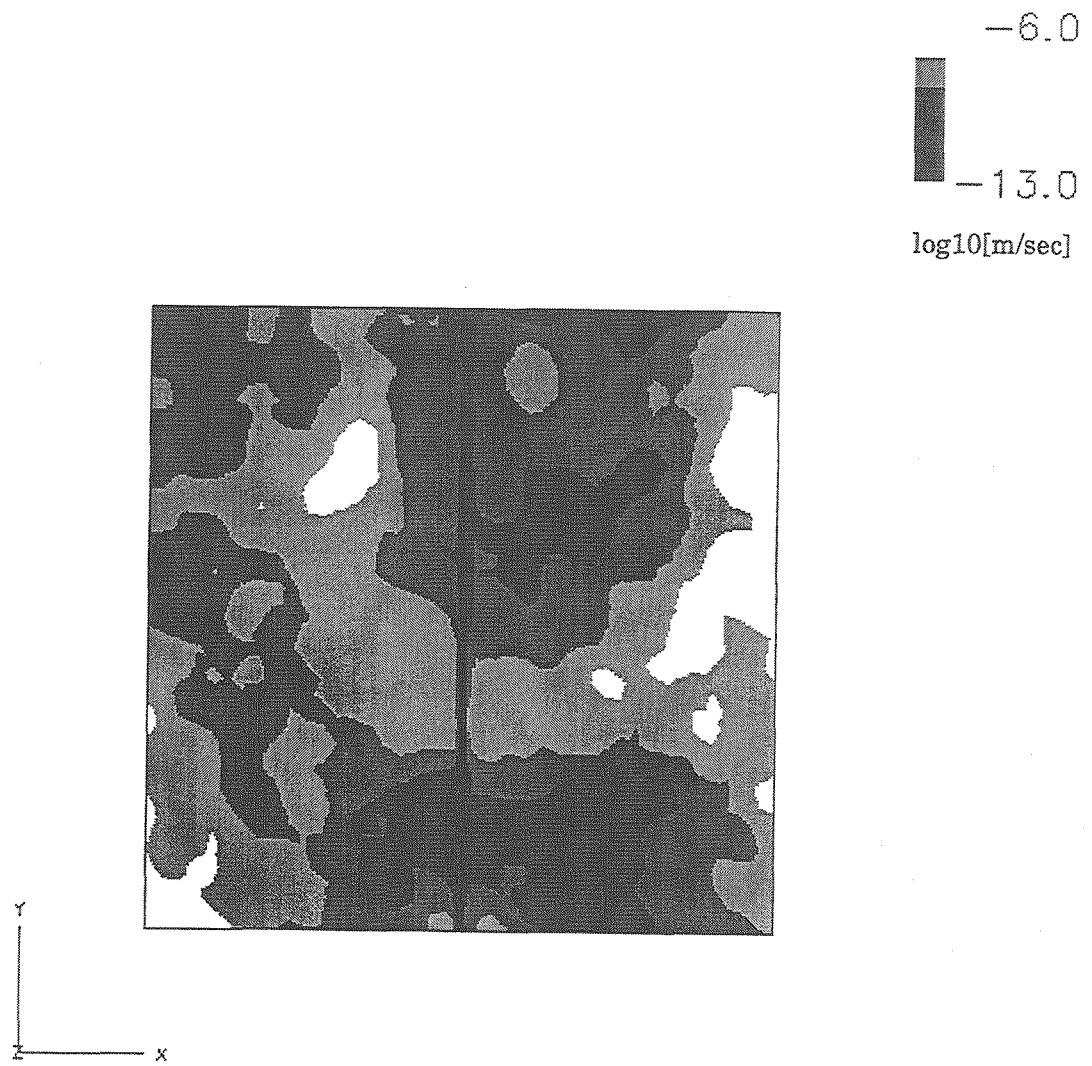


Fig 2.3.1-1 リアライゼーション No.1 における不均質透水係数場の中央部断面

2.3.2 核種移行経路抽出コード(TR3D/Info)

流線の情報は、処分坑道表面の 50m~150m の位置に 40 個の追跡粒子を等間隔に配置し、断層を仮定した面である領域出口まで、パーティクルトラッキング法を用いて移行経路長さおよび移行時間を求める。

追跡粒子の射出位置を Fig 2.3.2-1 に示す。追跡粒子の数は 1 ケース当たり 40 本とした。

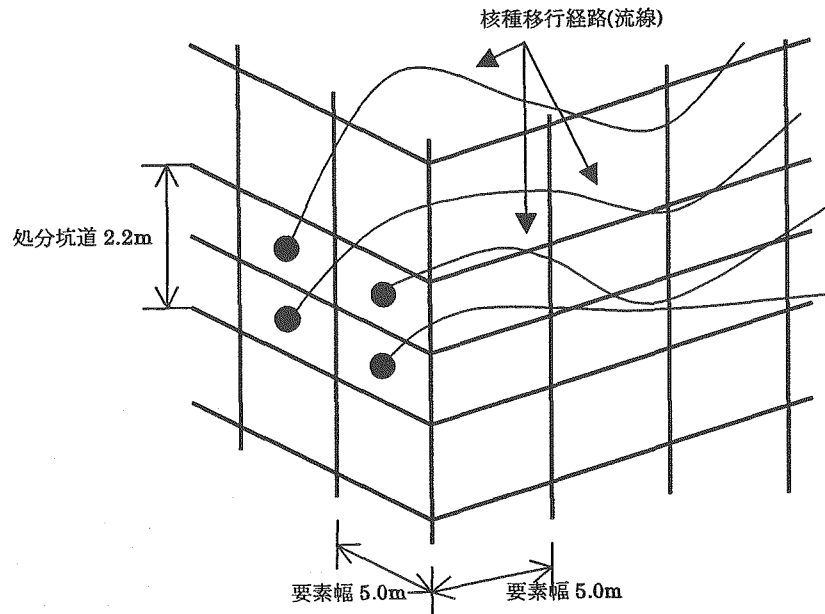


Fig 2.3.2-1 処分坑道からの追跡粒子射出位置

2.3.3 一次元核種移行計算(MATRICES)

一次元核種移行計算は、TR3D/Infoによって算出された流線毎について計算を行う。

考慮する核種および崩壊系列は Table 2.3.3-1 に示すとおり 12 種とした。

本計算に使用する各核種の物性値および計算条件を Table 2.3.3-2 に示す。

また、一次元核種移行計算コード MATRICES によって出力される結果は[Bq/year]で算出される。

[Bq/year]で算出される核種移行率は最終的には線量当量率[mSv/year]に変換する必要がある。

これらの変換係数を Table 2.3.3-5 に示す。

各核種の人口バリアからの核種放量(Bq/yaer)を Fig 2.3.3-1 に示す。

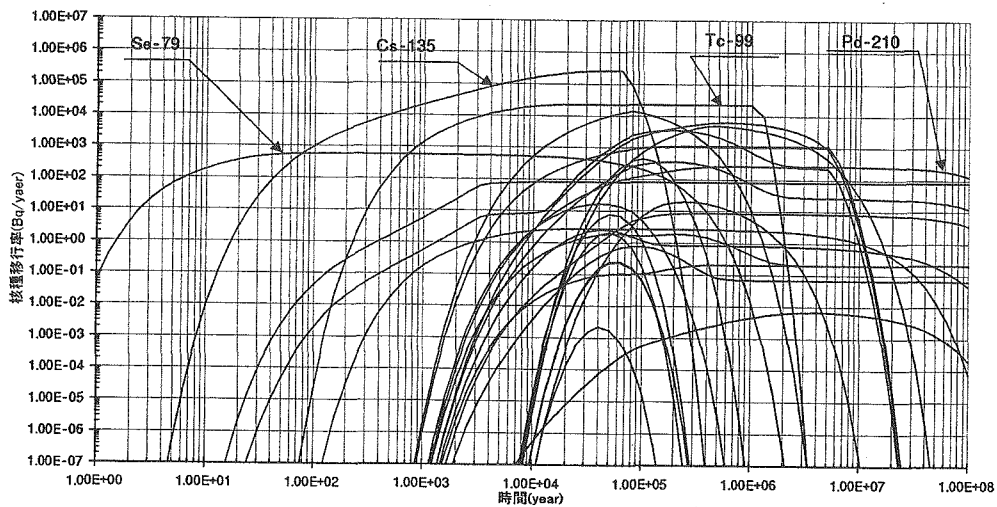


Fig 2.3.3-1 人口バリアからの核種放出量

Table 2.3.3-1 崩壊系列

名称	元素
	TC-99
	Sn-126
	Se-79
	Zr-93
	Cs-135
	Sm-151
	Nb-94
	Pd-197
4N0 系列	Pu-240 → U -239 → Th-232
4N1 系列	Cm-245 → Pu-241 → Am-241 → Np-237 → U -233 → Th-229
4N2 系列	Cm-246 → Pu-242 → U -238 → Th-230 → Ra-226 → Pb-210
4N3 系列	Am-243 → Pu-239 → U -235 → Pa-231 → Ac-227

Table 2.3.3-2 核種移行計算パラメータ

名称	設定値
分散長	縦方向分散長は各意向経路長の 1/10 倍 横方向分散長は考慮しない
有効空隙率	20%
乾燥密度	2,160kg/m ³
遅延係数	$= 1 + \frac{\text{乾燥密度} \times \text{分配係数}}{\text{有効空隙率}}$ 分配係数は Table 2.3.3-3 参照
半減期	Table 2.3.3-4 参照
亀裂開口幅	処分坑道に幅：2.2m

Table 2.3.3-3 砂質岩に対する分配係数

元素	砂質岩(m ³ /kg)
Se	0.001
Zr	0.100
Nb	0.100
Tc	1.000
Pd	0.100
Sn	1.000
Cs	0.050
Sm	5.000
Pb	0.100
Ra	0.500
Ac	5.000
Th	1.000
Pa	1.000
U	1.000
Np	1.000
Pu	1.000
Ac	5.000
Cm	5.000

Table 2.3.3-4 核種半減期

元素	半減期(Year)
Se-79	65,000
Zr-93	1,530,000
Nb-94	20,300
Tc-99	213,000
Pd-107	6,500,000
Sn-126	100,000
Cs-135	2,300,000
Sm-151	90
Pu-240	6,540
U-236	23,400,000
Th-236	14,100,000,000
Cm-245	8,500
Pu-241	14.4
Am-241	432
Np-237	2,140,000
U-233	159,000
Th-229	7,340
Cm-246	4,730
Pu-242	387,000
U-238	4,470,000,000
U-234	245,000
Th-230	77,000
Ra-226	1,600
Pb-210	22.3
Am-243	7,380
Pu-239	24,100
U-235	704,000,000
Pa-231	32,800
Ac-227	21.8

Table 2.3.3-5 核種の換算係数

元素	換算係数(mSv/ Bq)
Se-79	2.68319×10^{-12}
Zr-93	1.56123×10^{-14}
Nb-94	7.08203×10^{-13}
Tc-99	1.12953×10^{-14}
Pd-107	1.44427×10^{-15}
Sn-126	9.84000×10^{-13}
Cs-135	1.14188×10^{-13}
Sm-151	1.59096×10^{-15}
Pu-240	1.48618×10^{-11}
U-236	1.35020×10^{-12}
Th-236	1.53971×10^{-10}
Cm-245	4.85327×10^{-11}
Pu-241	3.65860×10^{-13}
Am-241	1.62586×10^{-11}
Np-237	1.29937×10^{-11}
U-233	1.70817×10^{-12}
Th-229	7.90073×10^{-11}
Cm-246	3.52915×10^{-11}
Pu-242	1.42063×10^{-11}
U-238	1.32840×10^{-12}
U-234	1.43505×10^{-13}
Th-230	3.59980×10^{-11}
Ra-226	3.80354×10^{-11}
Pb-210	3.03639×10^{-11}
Am-243	2.43707×10^{-11}
Pu-239	1.50178×10^{-11}
U-235	1.52070×10^{-12}
Pa-231	2.44490×10^{-10}
Ac-227	8.54417×10^{-11}

2.4 解析結果

2.4.1 水理解析

SGSIM によって生成された不均質透水係数場(掘削影響領域をモデル化する前)のリアライゼーション毎の巨視的な透水係数の分布を Fig 2.4.1-1 に示す。

各リアライゼーションの透水係数の平均値は、 $1.668 \times 10^{-8} \text{m/sec}$ となっている。

Fig 2.4.1-2 に示すとおり、各リアライゼーションの透水係数は平均値に近づくことが判かる。このことは、SGSIM による不均質透水係数場が統計的手法に基づくことから明らかであり、妥当な水理解析を行っていると判断できる。

水理解析によって求めた速度場から、処分坑道から断層を仮定した下流断面に至る 40 本の流線をリアライゼーション No.1 について Fig 2.4.1-3 に示す。

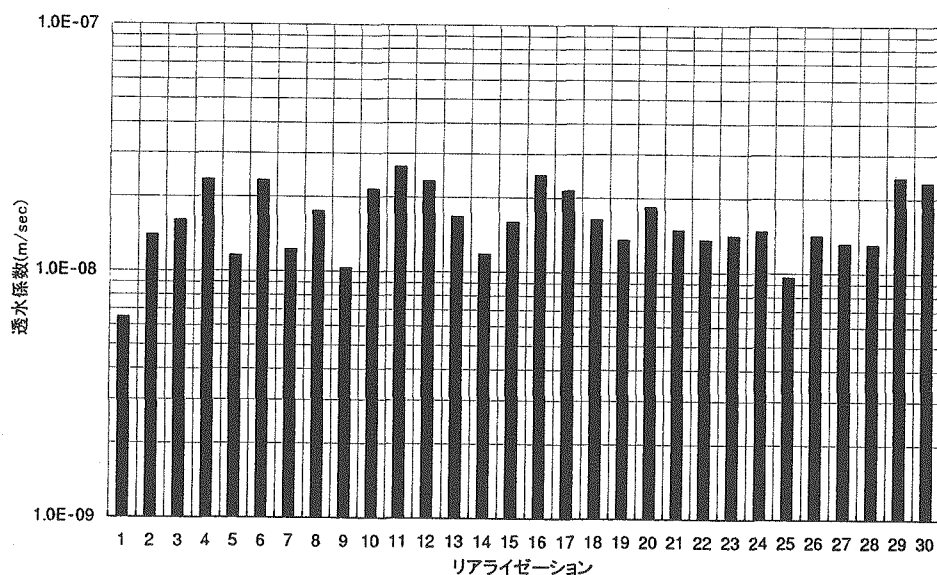


Fig 2.4.1-1 各リアライゼーションにおける透水係数の分布

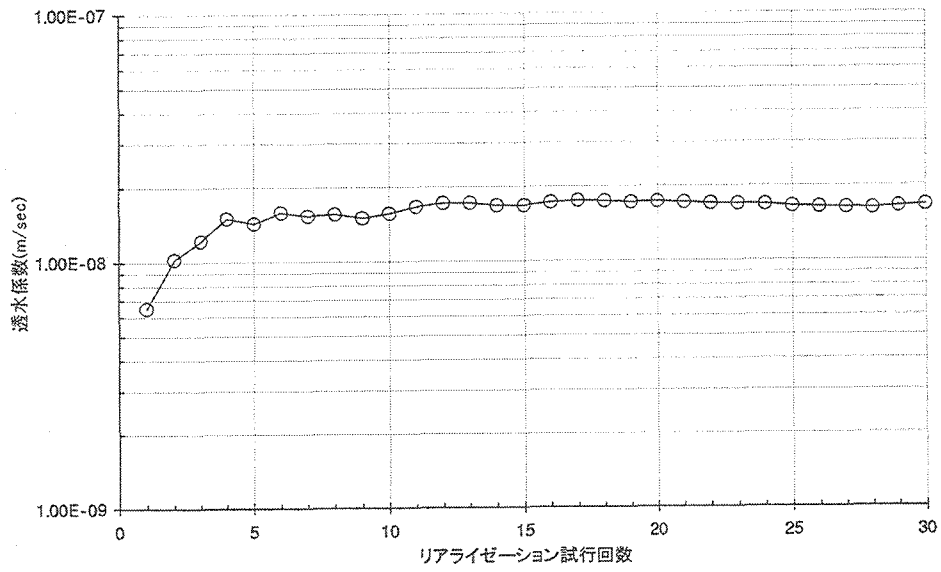


Fig 2.4.1-2 リアライゼーション試行回数による透水係数の分布

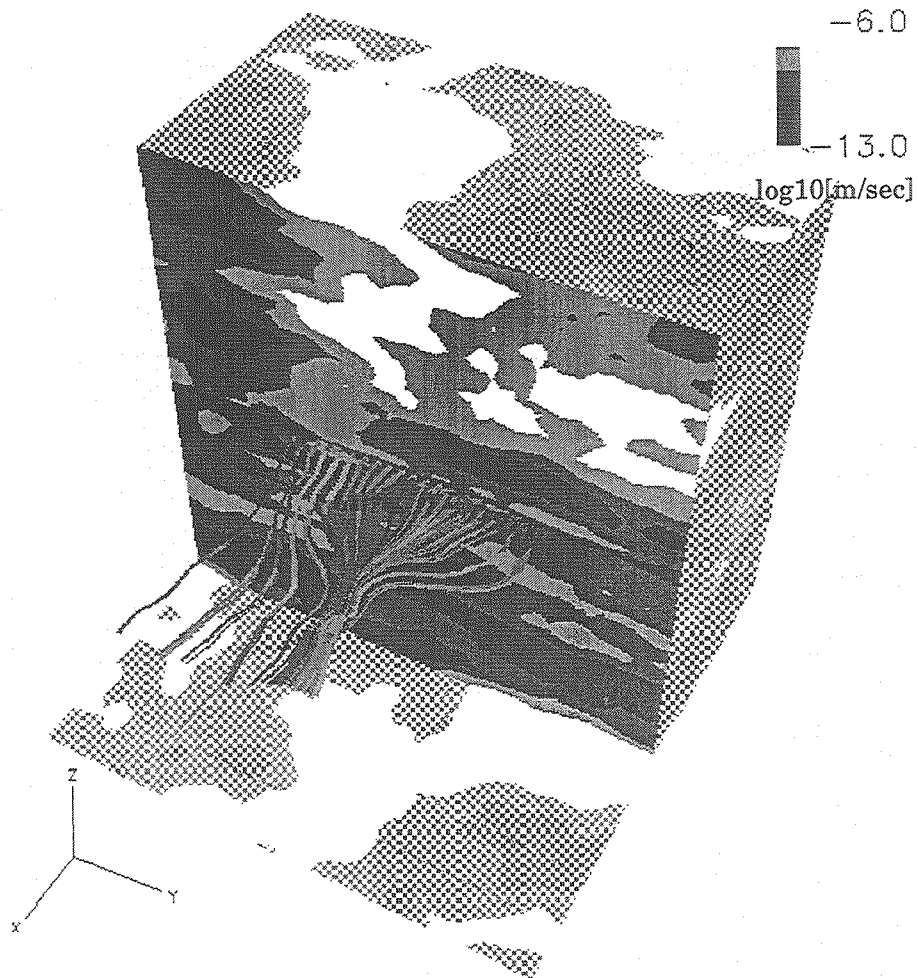


Fig 2.4.1-3 リアライゼーション No1 による移行経路鳥瞰図

2.4.2 核種移行計算

核種移行計算の結果として、リアライゼーション No. 1 における各統計手法による核種移行率を Fig 2.4.2-1 に示す。

流量による核種放出量の配分の有無にかかわらず核種の出現時間は同じとなる。ただし、各核種の最大値は移行経路長さおよび移行経路長のばらつきにより各ケースで異なる。

流線ごとに流量配分を行わない手法について、リアライゼーションの試行回数と代表的核種(Se-79, Cs-135, Th-229)の最大移行率の平均値との関係を Fig 2.4.2-2 に示す。

Se-79, Cs-135 および Th-229 はそれぞれ、線量当量率に換算したさい、他の元素に比べ値が大きく支配核種となっている元素である。特に、Se-79 および Cs-135 は人口バリアからの放出量も多く分配係数も小さいため比較的早期に断層に至る元素である。また、Th-229 は崩壊系列の最後の元素にあたり比較的遅い年代に支配核種となる。

Fig 2.4.2-2 から、各リアライゼーションの核種移行率はある平均値に近づくことが判る。このことは、SGSIM による不均質透水係数場が統計的手法に基づくことから明らかである。

リアライゼーション 30 ケースの結果の平均より算出した処分坑道全体の核種移行率(ガラス固化体一本分)を Fig 2.4.2-3 に示す。

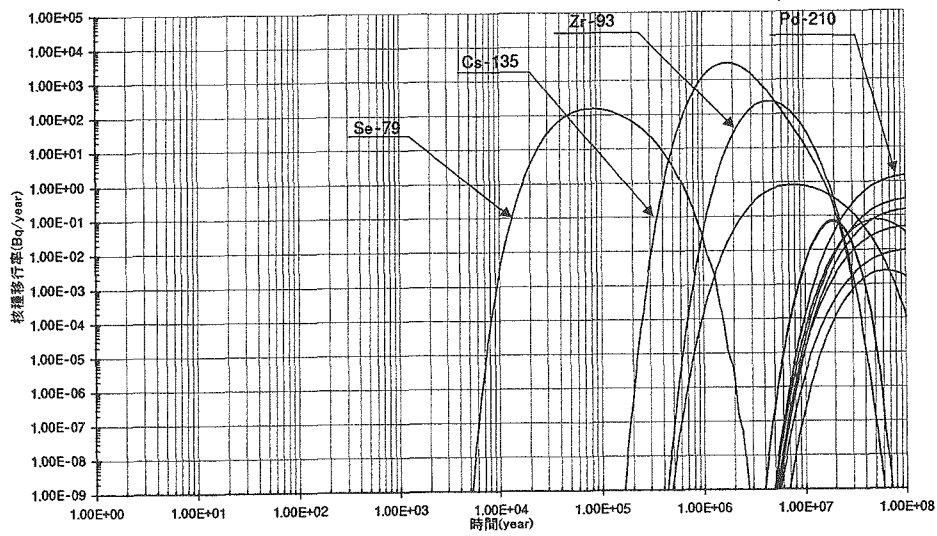
流線ごとに流量配分を行わない手法で算出した結果を Fig 2.4.2-3(a)に示す。

流線ごとに流量によって配分する手法で算出した結果を Fig 2.4.2-3(b)に示す。

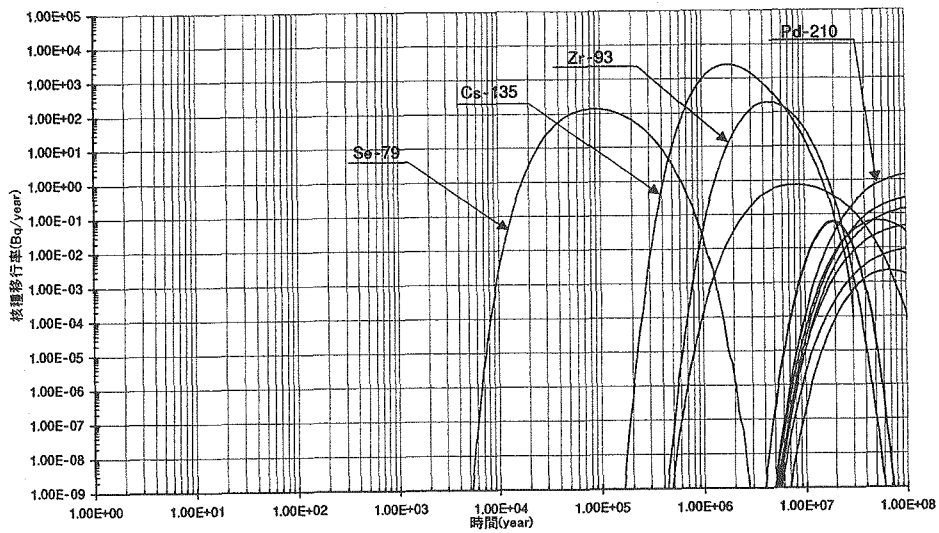
リアライゼーション No.1 についての線量当量率歴を Fig 2.4.2-4 に、リアライゼーションによる平均した線量当量率歴を Fig 2.4.2-5 に示す。

ガラス固化体一本当たりの各核種の移行率はリアライゼーションごとに異なり場の透水係数分布の依存することがわかるが、リアライゼーション数を増やすことによってある平均値に近づくことが判る。

以上のことは、処分坑道付近の地質学的統計量から場の平均的な核種移行率を予測することが可能なことを示している。しかし、流線の振る舞いは場の不均質性によって変化するので統計量的な値から推測することは難しい。



(a) 流線ごとに流量配分を行わない手法



(b) 流線ごとに流量によって配分する手法

Fig 2.4.2-1 リアライゼーション No 1 における核種移行率

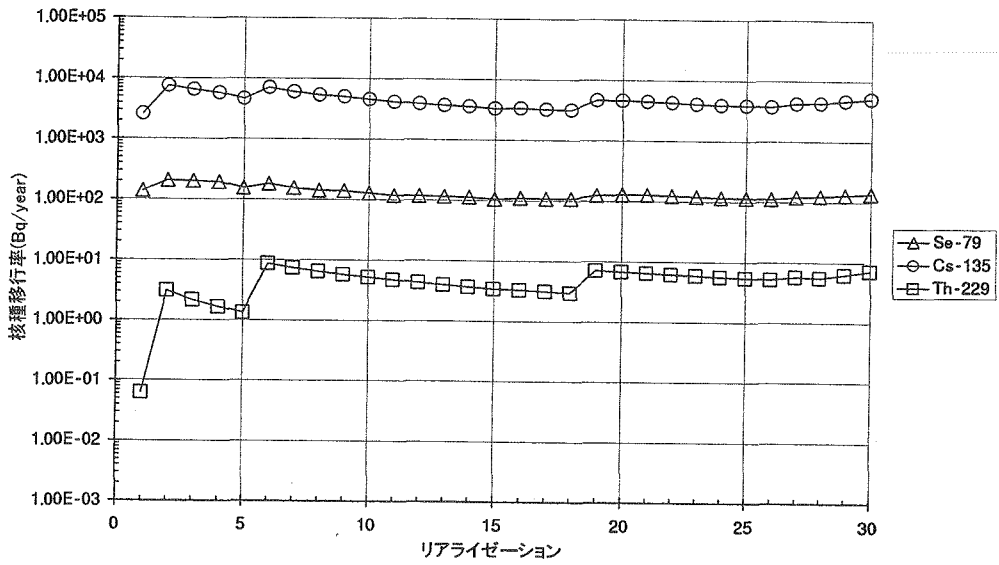
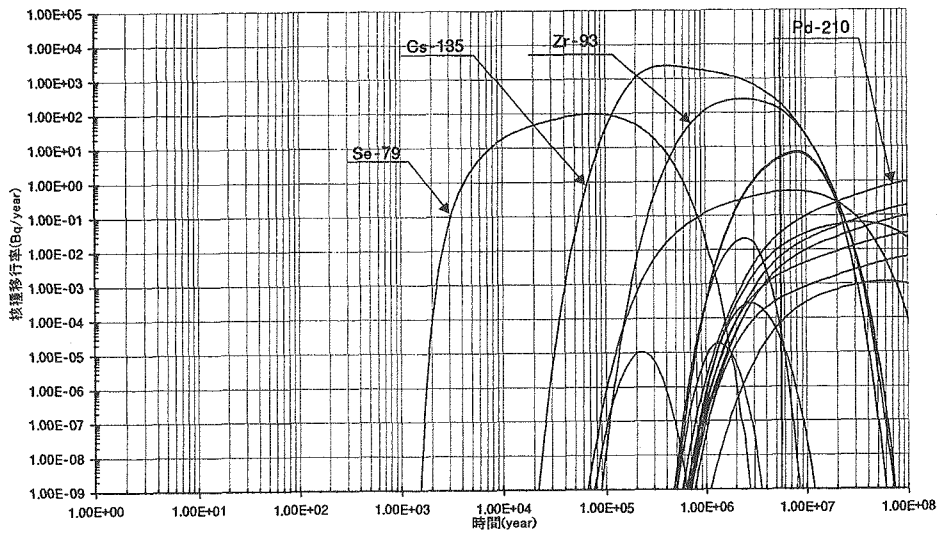
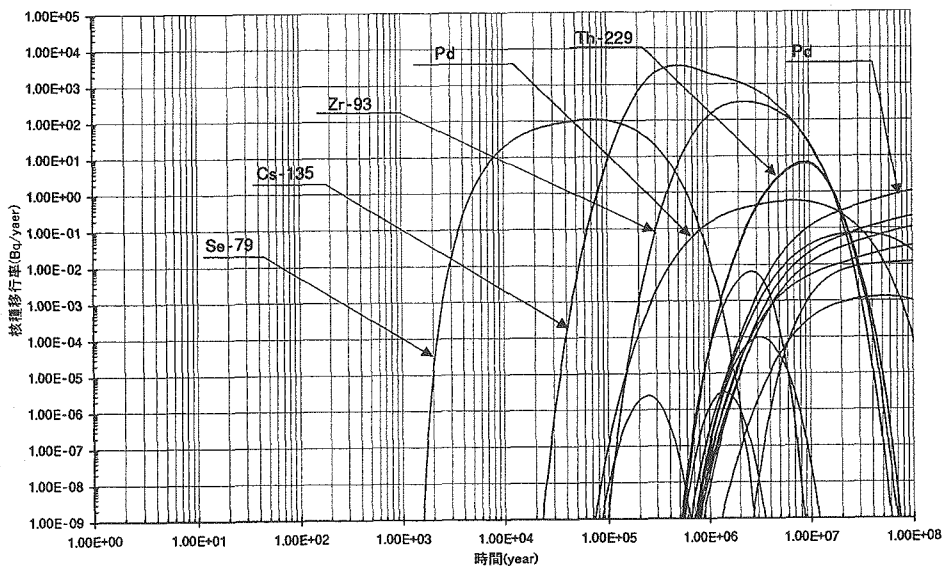


Fig 2.4.2-2 リアライゼーションの試行回数と最大移行率の平均値との関係
(流線ごとに流量によって配分する手法)



(a) 流線ごとに流量配分を行わない手法



(b) 流線ごとに流量によって配分する手法

Fig 2.4.2-3 リアライゼーション 30 ケースによる平均核種移行率

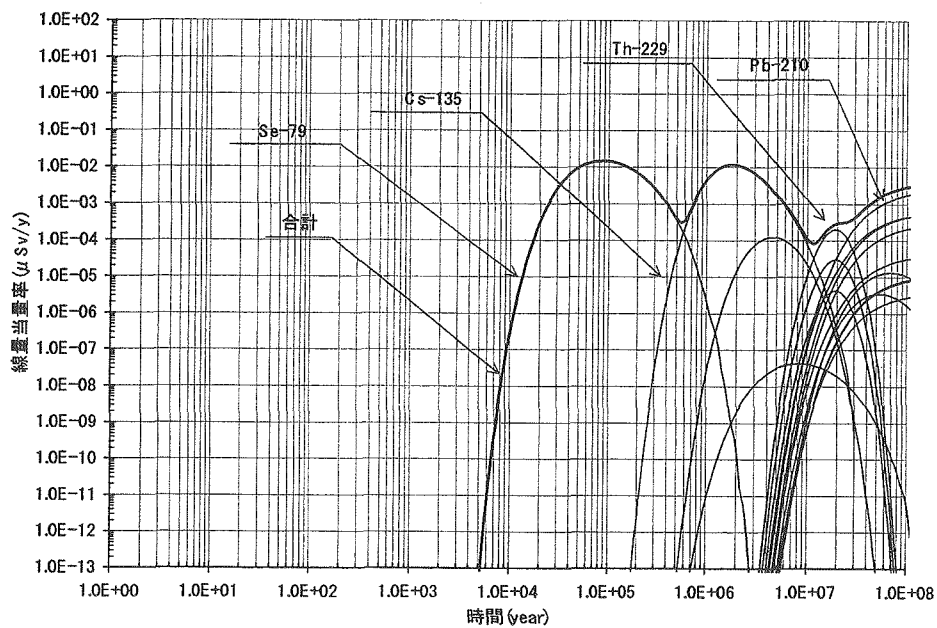


Fig 2.4.2-4 リアライゼーション No1 による線量当量率歴
(流線ごとに流量によって配分する手法)

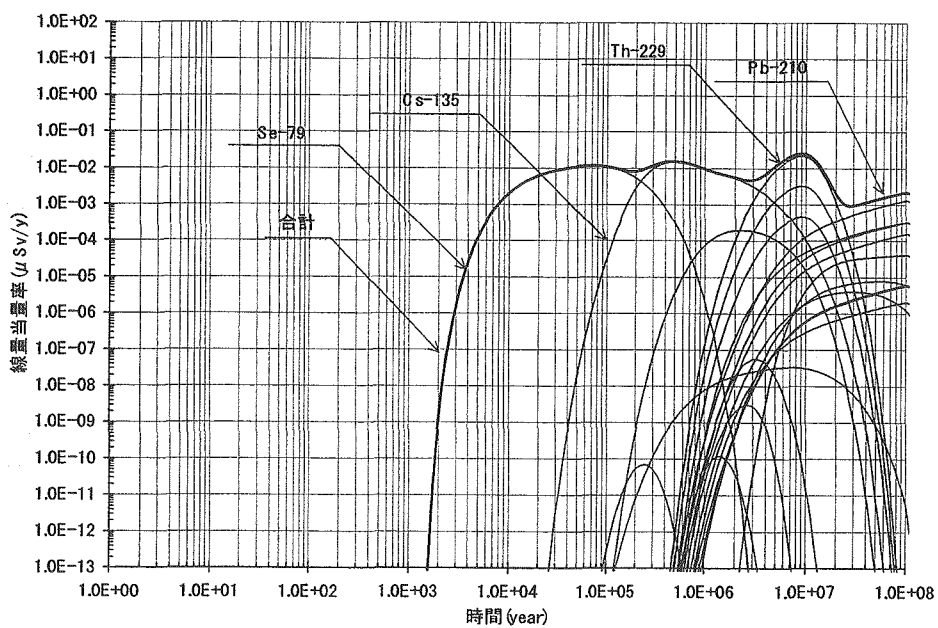


Fig 2.4.2-5 リアライゼーションによる平均した線量当量率歴
(流線ごとに流量によって配分する手法)

2.5 まとめ

本計算手法のパラメータ変化の与える影響について検討を行った。

天然バリアとしての地層は多孔質岩盤として取り扱い、検討を行うパラメータとしては、多孔質岩盤内の透水係数分布とした。

計算結果は、各リアライゼーションごとに異なり、核種移行率も5桁以上のオーダーで開きがあることから場の不均質性が計算手法に与える影響が大きいことを明らかにした。

また、リアライゼーション数を増やすことによってある平均値の近づくことも明らかになった。

このことは、場を生成する地質学的パラメータから平均的な解を予測可能であることを示唆している。

しかし、本報告書では不均質場の生成に統計処理法を採用しているため、不均質場の生成に統計的手法以外の手法を用いた場合違った見解を得る可能性がある。

地盤の不均質性は統計的に分布しているとは限らず、他の不均質透水係数場の生成についても検討を行う必要がある。

3 核種移行評価モデルの信頼性解析

3.1 逆ラプラス変換手法の比較

3.1.1 目的及び概要

逆ラプラス変換手法としてタルボット法，クランプ法，細野法が挙げられる。ここではまず逆ラプラス変換手法を用いた解析に関する概要を述べる。次にタルボット法，クランプ法，細野法の詳細な解説を行う。最後に実際の核種移行解析に適用し，解析結果の比較検討を行う。

これにより，不均質場に対する三手法の適用特性を把握する事を目的とする。

3.1.2 逆ラプラス変換手法を用いた解析手法の概要

逆ラプラス変換手法を用いた解析手法は以下の3ステップとして記述できる。

- ① 与えられた支配方程式に対してラプラス変換を実施する。
- ② ラプラス空間内における解を解析的に求める。
- ③ ラプラス空間内での解を逆ラプラス変換により実空間へ逆変換する。

3つのプロセスのうち，最初の与えられた支配方程式に対してラプラス変換を実施することと二番目のラプラス変換における解を解析的に求める方法は容易であるが三番目のプロセスのラプラス空間内での解を逆ラプラス変換手法を利用して実空間へ逆変換することは大変難しい。解析的に求める方法は存在するが，ごく狭い範囲でしか適用できず，一般に用いられる偏微分方程式に対する逆ラプラス変換手法としては数値的に解を求める手法を利用せざるを得ないのが現状である。

数値的に逆ラプラス変換を求める手法としてタルボット法，クランプ法，細野法の3種類が挙げられる。ここではラプラス空間内における支配方程式のラプラス空間内での解法を述べる。

(1) 実空間における支配方程式

Dual Porosity モデルを用いた亀裂媒体中の核種移行は，以下の二つの支配方程式で記述される。

【亀裂内】

$$\varepsilon^f R_n^f \frac{\partial C_n^f}{\partial t} = -q \varepsilon^f \frac{\partial C_n^f}{\partial x} + D \varepsilon^f \frac{\partial^2 C_n^f}{\partial x^2} + \varepsilon^f R_{n-1}^f \lambda_{n-1} C_{n-1}^f - \varepsilon^f R_n^f \lambda_n C_n^f + A \varepsilon^m D^m \frac{\partial C_n^m}{\partial w} \Big|_{w=0} \quad (3.1.2-1)$$

【マトリクス内】

$$R_n^m \frac{\partial C_n^m}{\partial t} = D^m \nabla^2 C_n^m - R_n^m \lambda_n C_n^m + R_{n-1}^m \lambda_{n-1} C_{n-1}^m \quad (3.1.2-2)$$

ここで、添え字の f は亀裂内を、 m はマトリクス内を、 (i) は i 番目の核種を示しており、その他の記号は以下の通りである。

- R : 遅延係数
- $C(x,t)$: 核種の濃度[mol/m³]
- t : 時間[year]
- q : 亀裂内地下水流速[m/year]
- x : 亀裂方向の距離[m]
- D : 亀裂内拡散係数[m²/year]
- D^m : マトリクス内拡散係数[m²/year]
- ε : 空隙率
- A : 岩体体積に対する亀裂表面積[m⁻¹]
- w : 亀裂表面からマトリクス内への垂直な距離[m]
- λ : 崩壊定数[year⁻¹]

初期条件および境界条件を用いると、 $x=l$ における Flux は以下のように示される。

$$F_n^{fo}(t) = A_s \left[e_1 C_n^f - e_2 \frac{\partial C_n^f}{\partial x} \right]_{x=l} \quad (3.1.2-3)$$

(2) 基礎方程式のラプラス変換

前節の関係式を解析的な取り扱いが可能となるように、時間についてのラプラス変換を施すと、式(3.1.2-1)、(3.1.2-2)は、複素数 s を用いることにより、下記の式で表現される。

$$[\varepsilon^f R_n^f (s + \lambda_n)] \bar{C}_n^f = -q \varepsilon^f \frac{\partial \bar{C}_n^f}{\partial x} + D \varepsilon^f \frac{\partial^2 \bar{C}_n^f}{\partial x^2} + A \varepsilon^m D^m \frac{\partial \bar{C}_n^m}{\partial w} \Big|_{w=0} + \varepsilon^f R_{n-1}^f \lambda_{n-1} \bar{C}_{n-1}^f \quad (3.1.2-4)$$

$$R_n^m (s + \lambda_n) \bar{C}_n^m = D^m \nabla^2 \bar{C}_n^m + R_{n-1}^m \lambda_{n-1} \bar{C}_{n-1}^m \quad (3.1.2-5)$$

初期条件および境界条件を用いて、出力 Flux は以下のように書ける。

$$\bar{F}_n^{fo} = A_s \left[e_1 \bar{C}_n^f - e_2 \frac{\partial \bar{C}_n^f}{\partial x} \right]_{x=l} \quad (3.1.2-6)$$

(3)ラプラス空間内における解

前節で示した、ラプラス空間における出力 Flux を解析的に求めると以下の式が得られる。

$$\bar{F}(s) = \bar{F}_n^0 = \sum_{m=1}^n U_{nm} [a_m^+ (e_1 + e_2 b_m^+) \exp(-b_m^+ l) + a_m^- (e_1 + e_2 b_m^-) \exp(-b_m^- l)] \quad (3.1.2-7)$$

3.1.3 タルボット法

タルボット法は逆ラプラス変換法の一手法としてその適用範囲の広さおよび精度の高さから大変よく用いられている手法である。

タルボット法の変換の要点は以下の式で表される。

$$f(t) = \frac{\lambda}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \text{Re}[(v + i\beta_k) e^{s_k t} F(s_k)] \quad (3.1.3-1)$$

ここで、

$$s_k = \lambda \alpha_k + \sigma + i\lambda v \theta_k \quad (3.1.3-2)$$

$$\beta_k = \theta_k + \frac{\alpha_k (\alpha_k - 1)}{\theta_k} \quad (3.1.3-3)$$

$$\theta_k = \frac{k\pi}{N} \quad (3.1.3-4)$$

$$\alpha_k = \theta_k \cot \theta_k \quad (3.1.3-5)$$

また、上式中にある λ , v , σ , N はタルボットパラメータであるが、一般にこれらのパラメータは時間依存のパラメータである。

3.1.4 クランプ法

クランプ法によるラプラス逆変換手法の特徴は、①ラプラス変換の求め方としてフーリエ級数展開を用いて、②イブシロンアルゴリズムを用いてフーリエ級数の和の収束を加速させることである。

フーリエ級数を用いた逆ラプラス変換法の離散化式は以下に示す 3 種類の記述方法がある。

$$f_1(t) = \frac{2}{T} \exp(at) \left[\frac{F(a)}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} \text{Re} \left\{ F \left(a + \frac{ik\pi}{T} \right) \right\} \cos \left(\frac{k\pi}{T} \right) \right] \quad (3.1.4-1)$$

$$f_2(t) = -\frac{2}{T} \exp(at) \sum_{k=1}^{\infty} \text{Im} \left\{ F \left(a + \frac{ik\pi}{T} \right) \right\} \sin \left(\frac{k\pi}{T} \right) \quad (3.1.4-2)$$

$$f_3(t) = \frac{1}{T} \exp(at) \left[\frac{F(a)}{2} + \sum_{k=0}^{\infty} \text{Re} \left\{ F \left(a + \frac{ik\pi}{T} \right) \exp \left(\frac{ik\pi}{T} \right) \right\} \right] \quad (3.1.4-3)$$

また、係数 a および T は解析する問題により適切な値を選択する必要がある。

3.1.5 細野法

細野法はラプラス逆変換の複素積分が容易に実行できるように指数関数部 e^{st} を近似する方法のひとつである。細野によって提案される逆ラプラス変換式は、

$$f(t) = \frac{e^{\sigma_0}}{2t} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \operatorname{Im} F\left(\frac{\sigma_0 + i(n-0.5)\pi}{t}\right) \quad (3.1.5-1)$$

と記述される。ここで、利用者によって決定されるパラメータは σ_0 および式中では無限大表示される和の項数である。細野によると σ_0 は 3 から 6 の正数である。

3.1.6 検証解析

(1) 目的

3 つの逆ラプラス変換法を用いて同一条件での核種移行解析を行い、タルボット法による核種移行解析の信頼性を評価する。

(2) 解析条件

解析条件は以下のように設定した。

- ① 積分点数 257 点に固定
- ② タルボット法を用いて、透水係数 $1.0 \times 10^{-5} \sim 1.00 \times 10^{-10}$ まで 10 倍ずつ変化させた 6 ケースをベースケースとする
- ③ それぞれのケースに対してクランプ法、細野法によるパラメータスタディを行った
- ④ クランプ法はパラメータ T を、細野法はパラメータ σ_0 を変化させた
- ⑤ 解析対象として、Cs135 の解析を行った（核種崩壊なし、遅延あり、空隙あり）
- ⑥ Pe 数は、10 となる

(3) 解析結果

タルボット法、クランプ法、細野法による結果を Fig.3.1.6-1 から Fig.3.1.6-6 に示す。代表的な解析結果である、透水係数が 1.0×10^{-5} 、 1.0×10^{-8} 、 1.0×10^{-10} の 3 ケースの結果を示す。

また、それぞれの手法において、タルボット法を真値としたときに、クランプ法および細野法の誤差を算出し、それぞれの透水係数パラメータでまとめたグラフを Fig.3.1.6-7 から Fig.3.1.6-10 に示す。ここで、Fig.3.1.6-7 および Fig.3.1.6-8 における誤差は L2 ノルムによって定義されたものであり、Fig.3.1.6-9 および Fig.3.1.6-10 における誤差は最大値によって定義されたものである。

(4) 検討

解析により得られた結果から、どの手法においても透水係数のあらゆる範囲においてクランプ法、細野法ともにタルボット法と同等な解析が可能であることがわかった。透水係数が小さくなるにつれ、L2 ノルムによる方法においても最大誤差による方法においても解析誤差が小さくなるようなパラメ

ータが存在することがわかった。

L2 ノルムによる誤差を比較したFig.3.1.6-7およびFig.3.1.6-8から、クランプ法においては透水係数が小さくなるにつれて誤差が小さくなるようなパラメータが存在することがわかる。最小の誤差を与えるパラメータは透水係数の違いにより指数的に分布している。一方、細野法においては、クランプ法と同様に透水係数が小さくなるにつれて誤差が小さくなるようなパラメータが存在する。クランプ法と比較して、細野法はパラメータの分布範囲は狭いことがわかる。

最大値誤差を比較したFig.3.1.6-9およびFig.3.1.6-10に示されるように、クランプ法による誤差においても細野法による誤差においても、透水係数が 1.0×10^{-6} 以上の場合ではすべてのパラメータにおいて誤差の値がほぼ一定値となっている。

その一方で透水係数が 1.0×10^{-7} 以下の場合、誤差の値が局所的に小さくなるようなパラメータが存在することがわかる。クランプ法の場合、透水係数が 1.0×10^{-8} または 1.0×10^{-10} においてグラフ上では記述されていないがタルボット法と厳密に一致した解が存在している。一方、細野法では透水係数が 1.0×10^{-8} 以下でグラフには示されていないがタルボット法と厳密に一致した解が得られている。

クランプ法を利用する場合には、パラメータの分布範囲が指数的な範囲にありパラメータを推定するのが困難であるので、利用する場合には注意が必要である。細野法を利用する場合には、透水係数が大きい場合には最適なパラメータを探索する必要があるが、透水係数が小さい場合には5~8程度の大きいパラメータを利用すれば、問題なく解析が可能である。しかし、いずれの手法を利用する場合においても慎重にパラメータを選択する必要がある。

タルボット法の信頼性を評価するにあたり、タルボット法に対するクランプ法および細野法の誤差評価を実施した。タルボット法の信頼性を評価するにあたり、以下の傾向があることがわかった。

- ① ランプ法および細野法を用いてタルボット法を評価するにはパラメータ調整が必要である。
- ② 透水係数が小さい方がタルボット法および他の二手法の誤差が小さくなる傾向がある。
- ③ L2 ノルムあるいは最大値による誤差評価では両者とも誤差の傾向は一致する。

3.1.7 まとめ

逆ラプラス変換手法として従来から MATRICS コードで使用されているタルボット法に加え、クランプ法および細野法を用いた手法の説明を行った。

さらに、Cs135 における解析を行い、三手法の透水係数に関する比較解析を実施し、以下の傾向を把握することによりタルボット法の信頼性を評価した。

クランプ法、細野法ともにパラメータを調整する必要があるものの、タルボット法と同等の解析が可能であることを確認した。透水係数が小さくなるにつれて、細野法、クランプ法ともにタルボット法の解と一致する傾向があることがわかった。L2 ノルムでの誤差評価および最大値での誤差評価を実施し、二手法での誤差の傾向が一致していることがわかった。

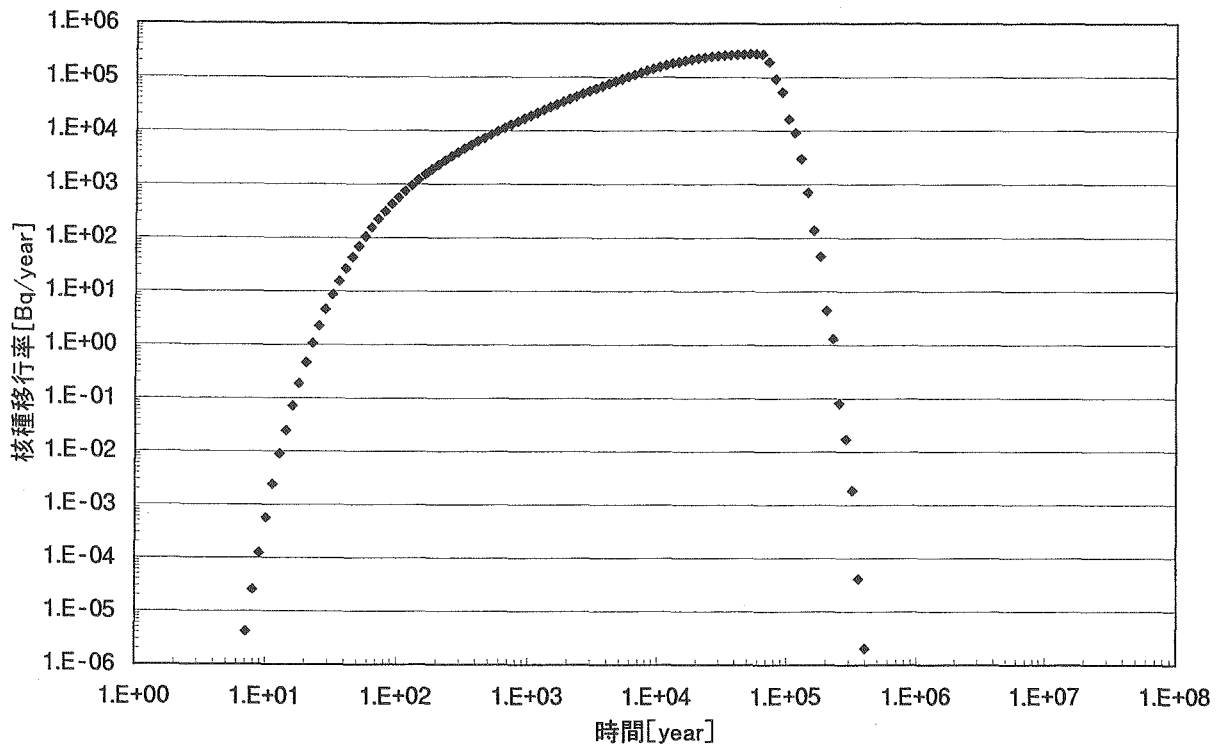


Fig.3.1.6-1 タルボット法による Cs135 の解析結果 (透水係数 1.0e-5)

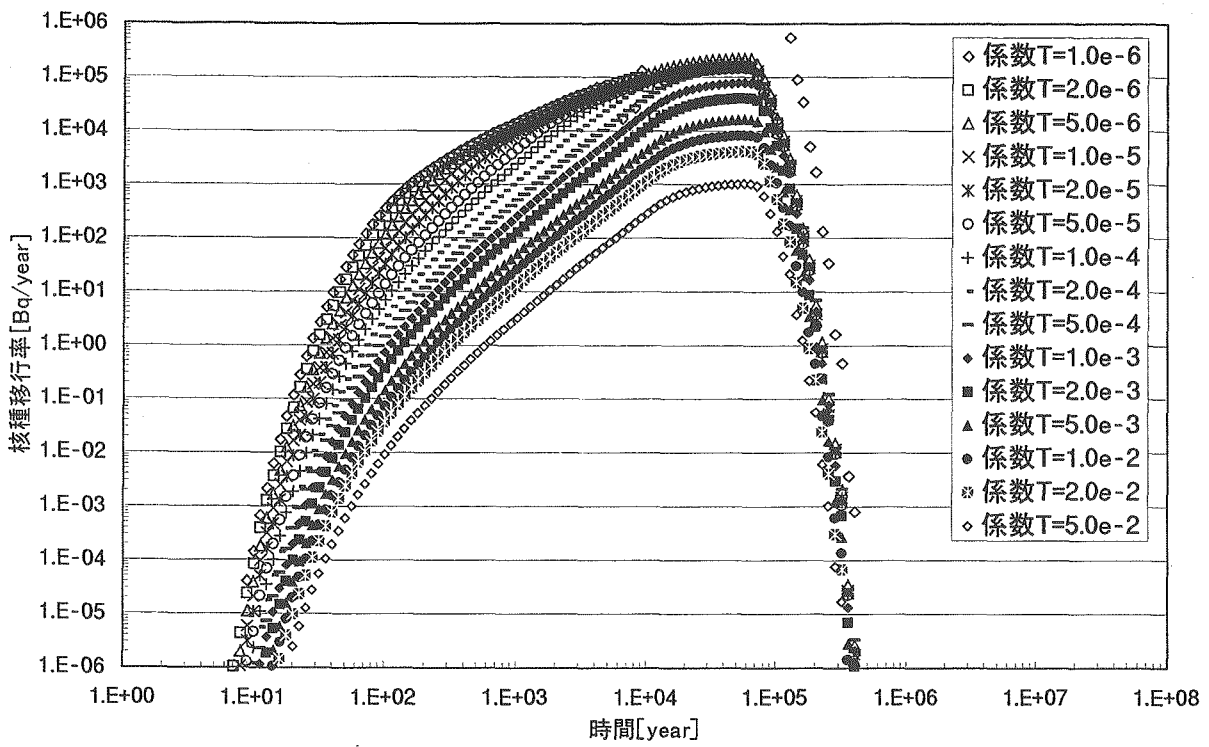


Fig.3.1.6-2 クランプ法による Cs135 の解析結果 (透水係数 1.0e-5)

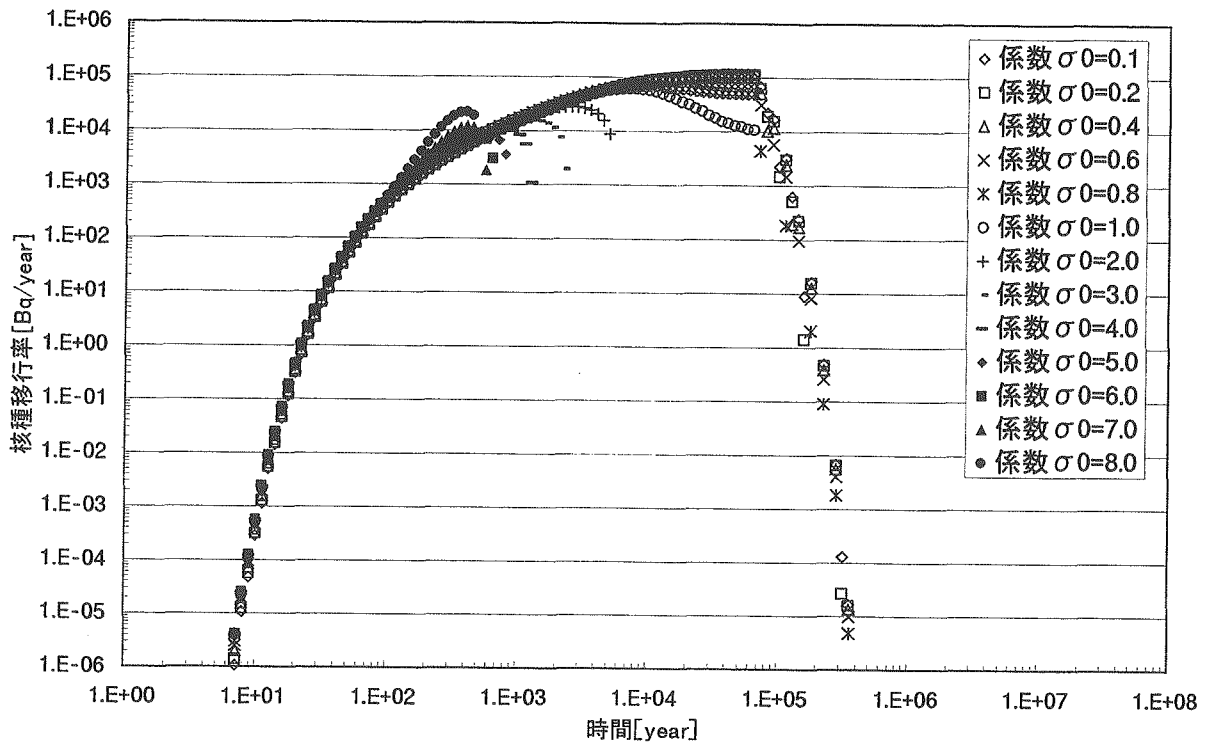


Fig.3.1.6-3 細野法による Cs135 の解析結果 (透水係数 $1.0e-5$)

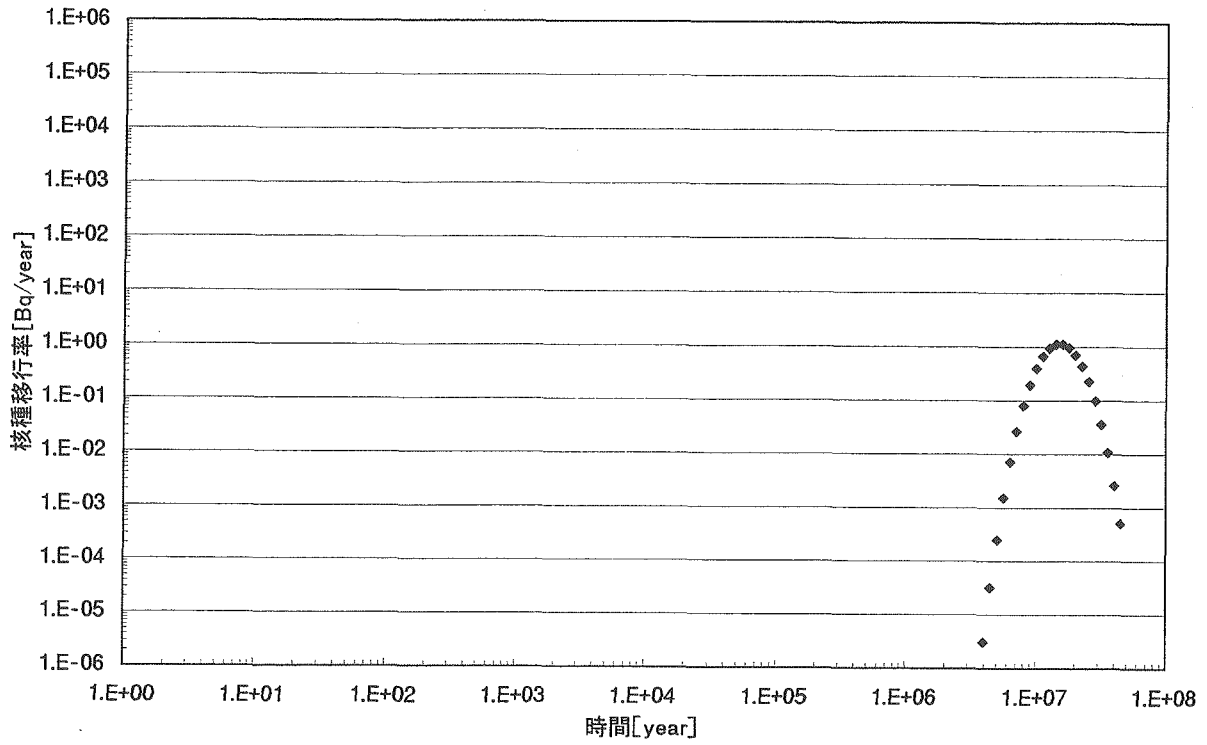


Fig.3.1.6-4 タルボット法による Cs135 の解析結果 (透水係数 1.0e-10)

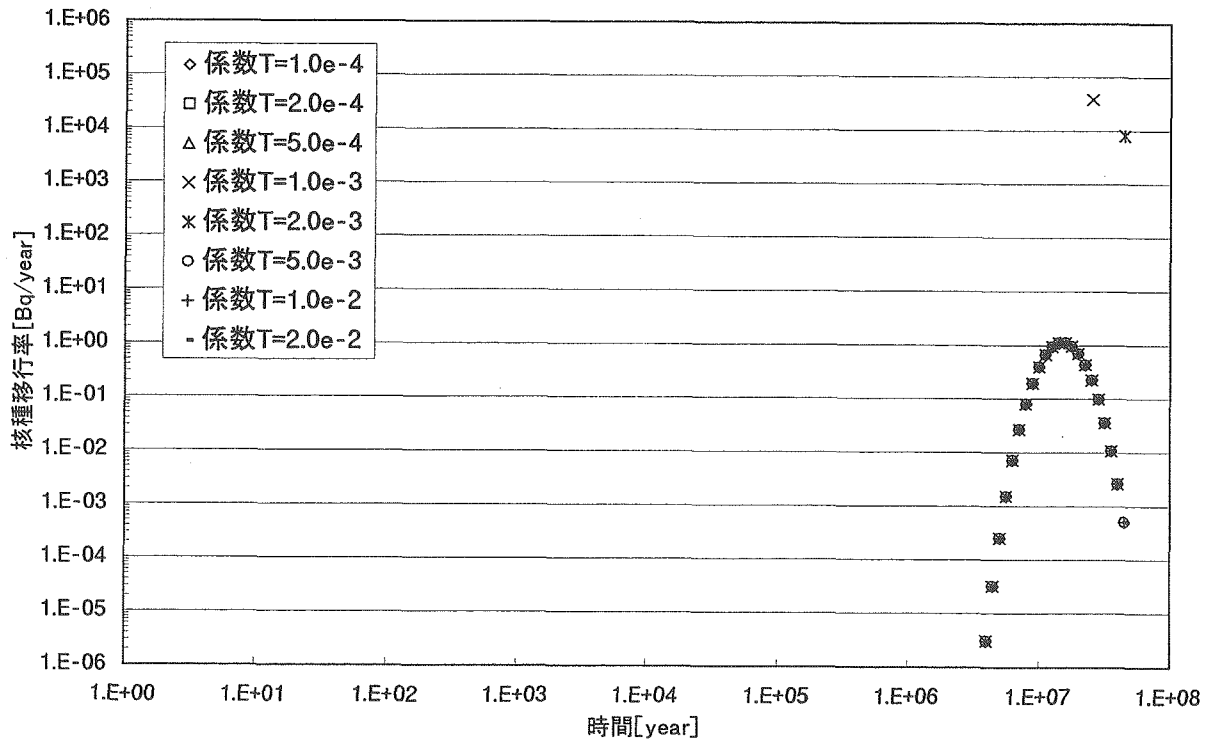


Fig.3.1.6-5 クランプ法による Cs135 の解析結果 (透水係数 1.0e-10)

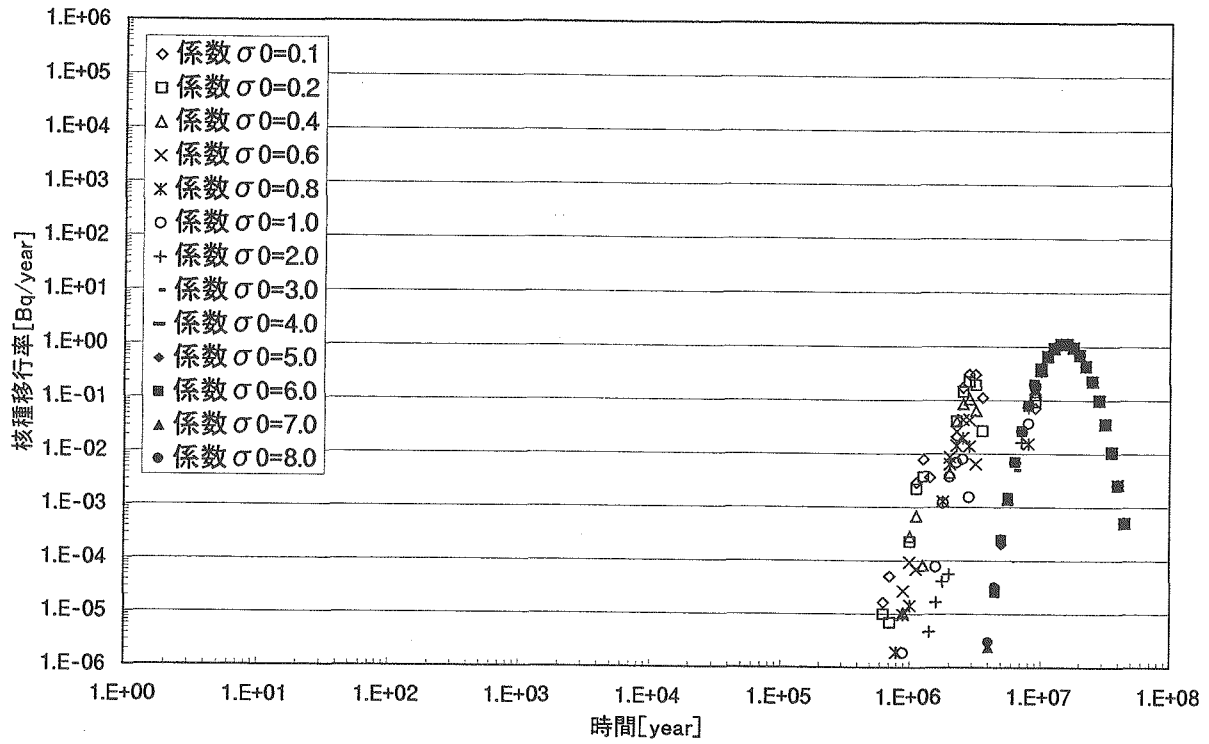


Fig.3.1.6-6 細野法による Cs135 の解析結果 (透水係数 1.0e-10)

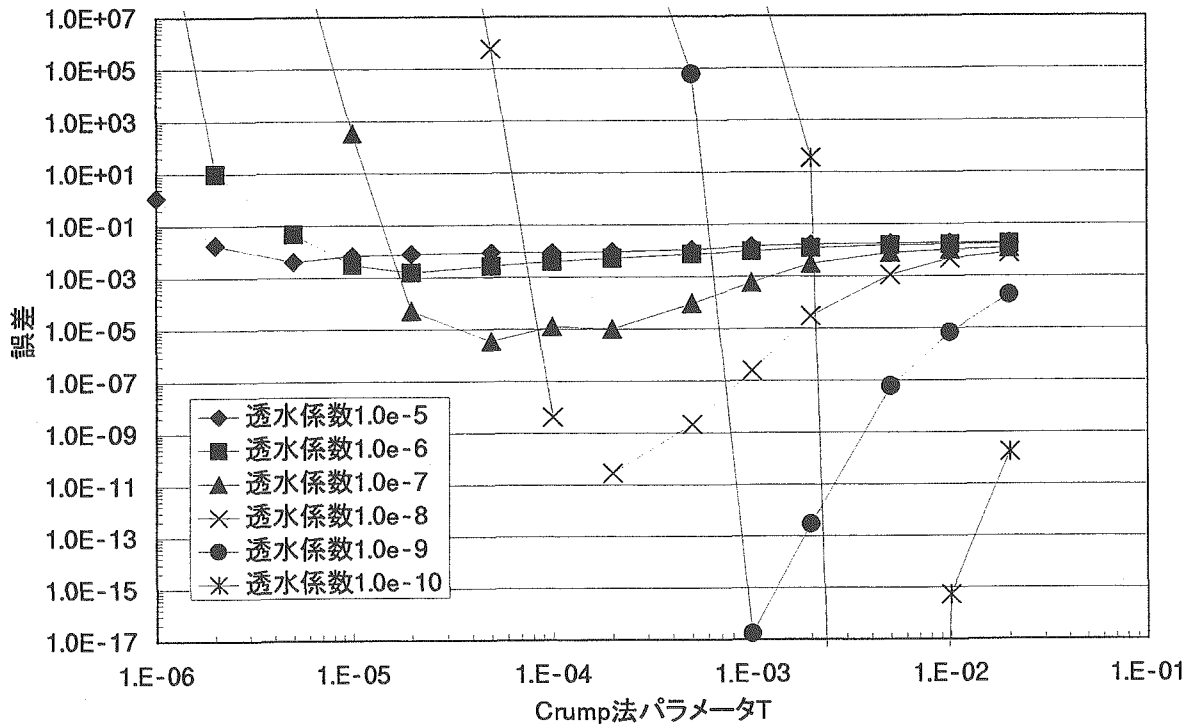


Fig.3.1.6-7 クランプ法とタルボット法の L2 ノルムによる誤差の関係

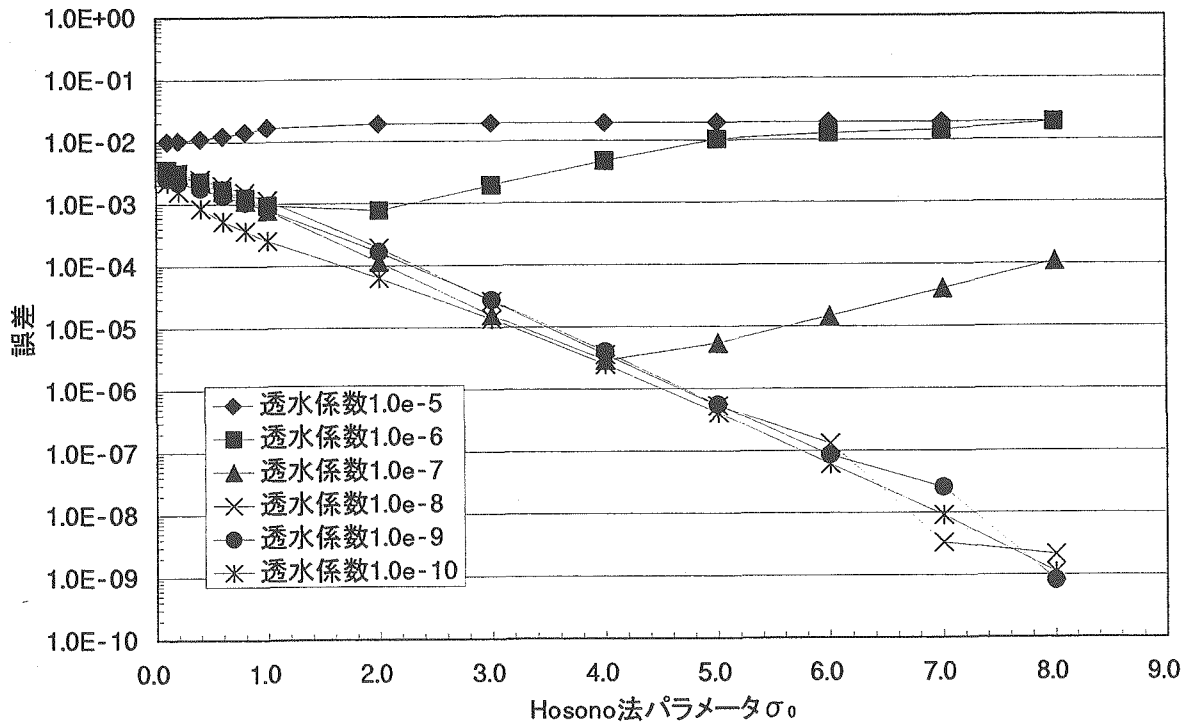


Fig.3.1.6-8 細野法とタルボット法の L2 ノルムによる誤差の関係

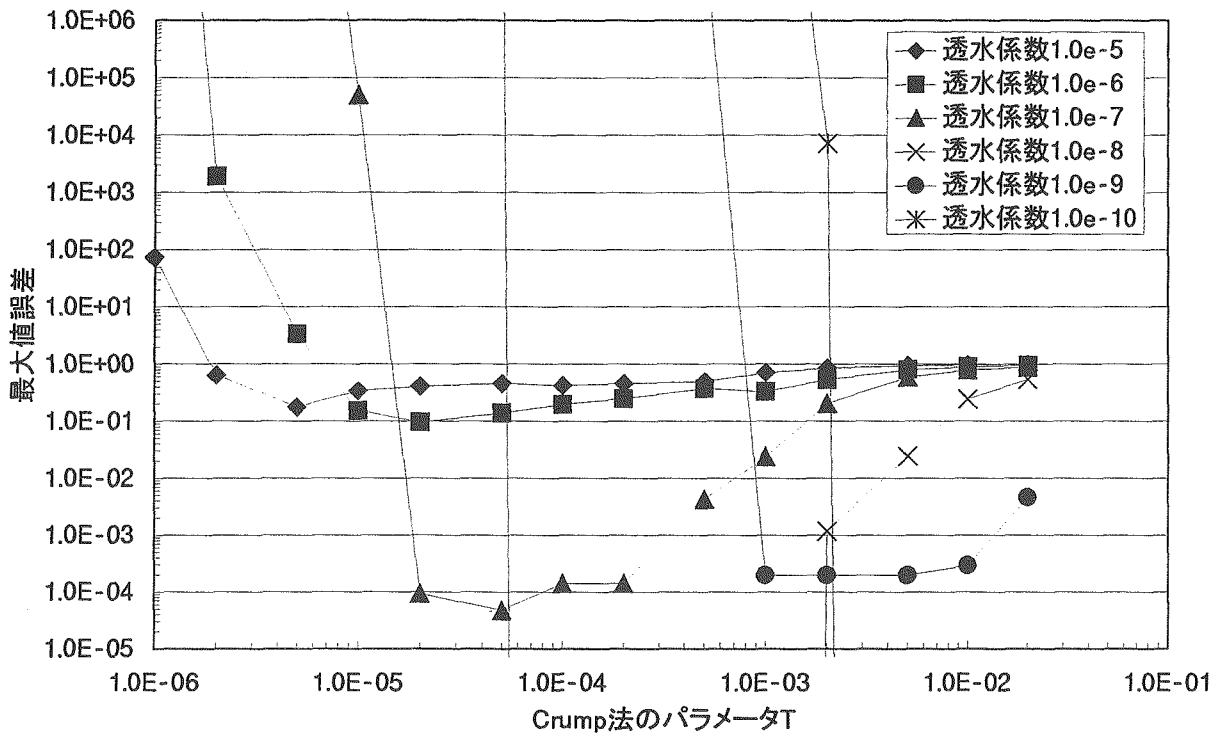


Fig.3.1.6-9 クランプ法とタルボット法の最大値誤差の関係

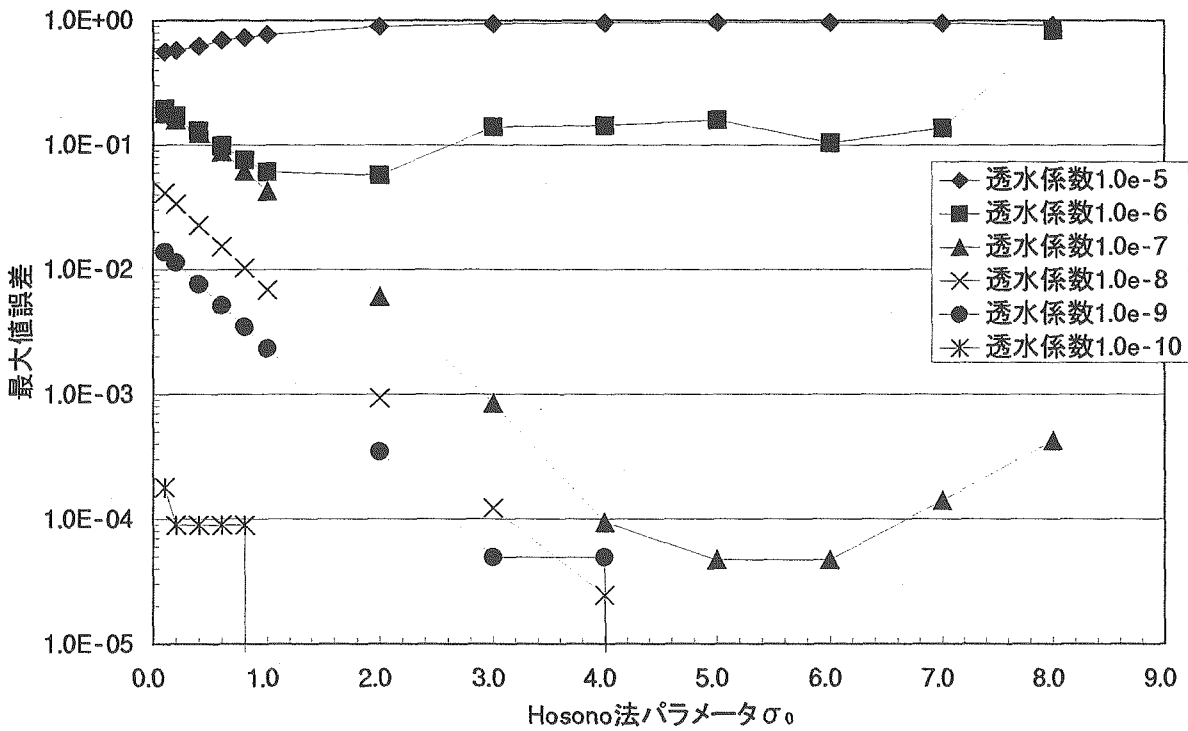


Fig.3.1.6-10 細野法とタルボット法の最大値誤差の関係

3.2 多要素版 MATRICS による不均質場における核種移行解析

3.2.1 目的及び概要

不均質場における核種移行解析を、より柔軟に対応する目的で、昨年度開発した多要素版 MATRICS(以下、m-MATRICES とする)を用いて核種移行解析を行った。

従来の MATRICS による解析結果と比較し、不均質場における核種移行計算への m-MATRICES の適用を検討した。また、各パラメータの平均を用いた、従来の MATRICS による計算の妥当性を確認した。

3.2.2 多要素版 MATRICS の改修

昨年度開発した m-MATRICES の改修を行った。昨年までの m-MATRICES においては、以下のパラメータを要素ごとに設定することができた。

- ・要素長
- ・分散係数
- ・遅延係数 (核種ごと)

これらのパラメータに追加して、要素ごとに流速を変えられるように改修を行った。ただし、要素間で流量を一定に保つため、流速の変化に伴い空隙率を自動的に変化させるようにした。つまり、すべての要素について以下の式が成り立つ。

$$\varepsilon_i = \frac{\overline{\varepsilon u}}{u_i}$$

- ε_i : i番目の要素の空隙率
 u_i : i番目の要素内の地下水実流速
 $\overline{\varepsilon u}$: 系全体の平均流量

3.2.3 検証解析

改修を行った m-MATRICS を用いて検証解析を実施した。

(1) 解析モデル

解析モデル概念図を Fig.3.2.3-1 に示す。1 要素の均質場と、4 要素の不均質場を仮定した解析を行い結果を比較した。ただし 4 要素のケースでは、各要素の流速を調整し、1 要素の場合と核種のトラベルタイムを等しくした。また、Pe 数は各要素において等しくした。不均質場 A、不均質場 B とともに、要素 1 と要素 4 の流速及び分散係数は均質場のものと同じ値であり、不均質場 A と不均質場 B とでは、要素 2 と要素 3 の値を入れ替えた。

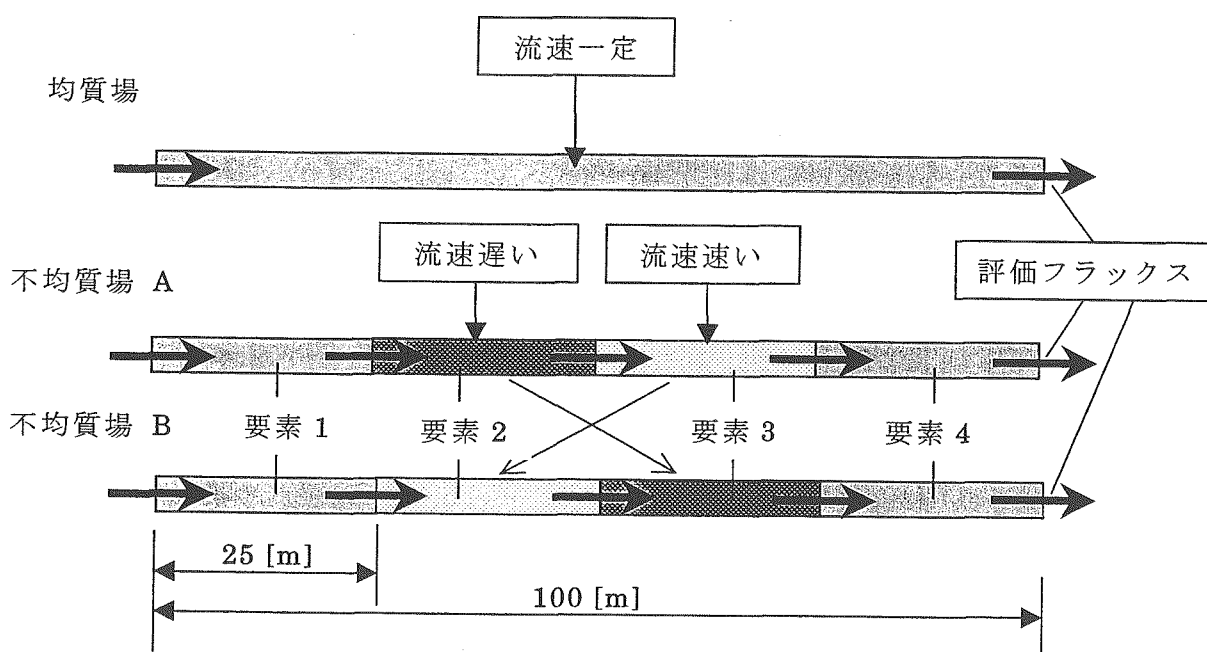


Fig.3.2.3-1 解析モデル概念図

(2) 解析条件

検証解析に用いたパラメータを以下に示す。簡単のため核種の崩壊は無視した。

- 平均流速： $1.0 \times 10^{-1} \sim 1.0 \times 10^{-4}$ [m/year]
- 平均分散係数： $1.0 \times 10^{-1} \sim 1.0 \times 10^{-4}$ [m²/year]
- Pe 数：1.0～1000
- 空隙率：0.2（不均質場では流量を保つように調整）
- 遅延係数： 1.0×10^4
- 核種半減期： 1.0×10^{99} [year]（核種の崩壊は無視）
- マトリックス部分散係数： 1.0×10^{99} [m²/year]（マトリックスへの分散は無視）
- マトリックス部遅延係数： 1.0×10^4

解析条件の一覧を Table 3.2.3-1 に示す。

Table 3.2.3-1 解析条件一覧

ケース名	場	流速 [m/year]				分散係数 [m ² /year]				Pe数
		要素1	要素2	要素3	要素4	要素1	要素2	要素3	要素4	
case4	均質場	1.0×10^{-1}				1.0×10^{-1}				100
	不均質場 A	1.0×10^{-1}	0.625×10^{-1}	2.5×10^{-1}	1.0×10^{-1}	1.0×10^{-1}	0.625×10^{-1}	2.5×10^{-1}	1.0×10^{-1}	
	不均質場 B	1.0×10^{-1}	2.5×10^{-1}	0.625×10^{-1}	1.0×10^{-1}	1.0×10^{-1}	2.5×10^{-1}	0.625×10^{-1}	1.0×10^{-1}	
case7	均質場	1.0×10^{-4}				1.0×10^{-4}				100
	不均質場 A	1.0×10^{-4}	0.625×10^{-4}	2.5×10^{-4}	1.0×10^{-4}	1.0×10^{-4}	0.625×10^{-4}	2.5×10^{-4}	1.0×10^{-4}	
	不均質場 B	1.0×10^{-4}	2.5×10^{-4}	0.625×10^{-4}	1.0×10^{-4}	1.0×10^{-4}	2.5×10^{-4}	0.625×10^{-4}	1.0×10^{-4}	
case13	均質場	1.0×10^{-4}				1.0×10^{-1}				0.1
	不均質場 A	1.0×10^{-4}	0.625×10^{-4}	2.5×10^{-4}	1.0×10^{-4}	1.0×10^{-1}	0.625×10^{-1}	2.5×10^{-1}	1.0×10^{-1}	
	不均質場 B	1.0×10^{-4}	2.5×10^{-4}	0.625×10^{-4}	1.0×10^{-4}	1.0×10^{-1}	2.5×10^{-1}	0.625×10^{-1}	1.0×10^{-1}	

(3) 解析結果

case4, case7, case13 の解析結果を Fig.3.2.3-2~Fig.3.2.3-4 に示す。

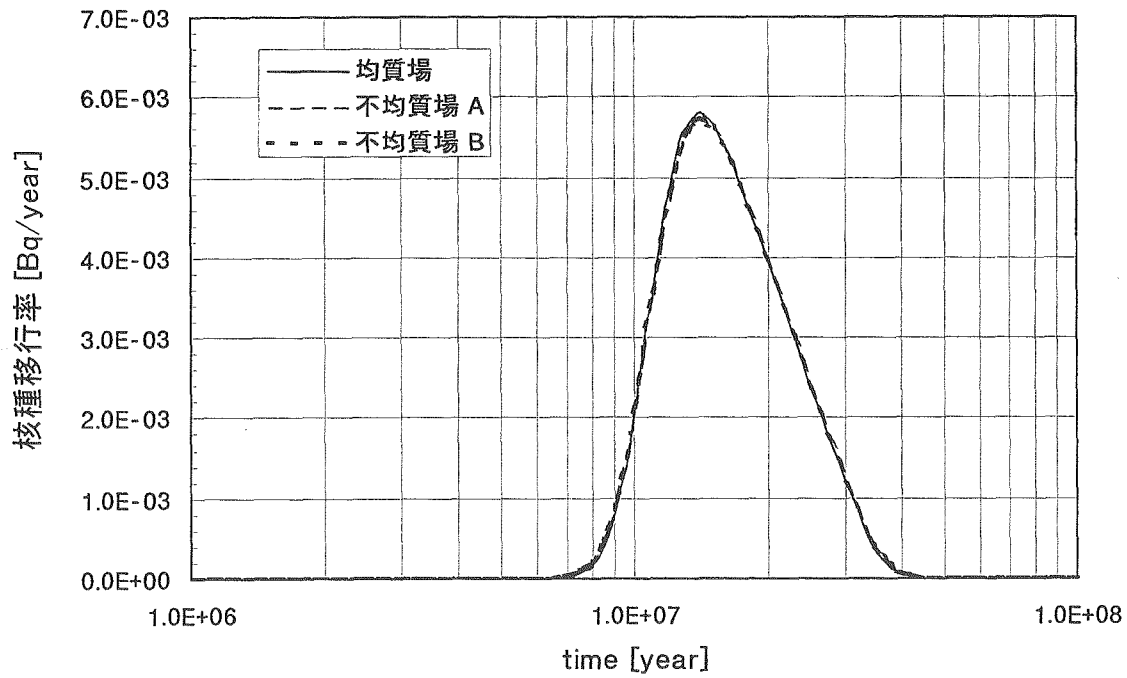
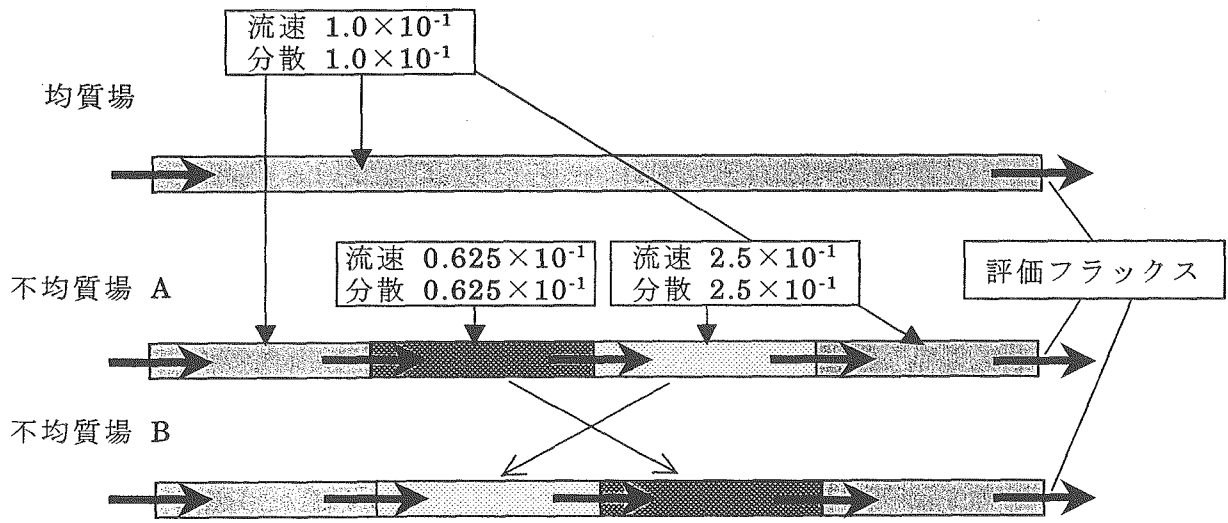


Fig. 3.2.3-2 case4 解析結果

平均流速 = 1.0×10^{-1}
 平均分散係数 = 1.0×10^{-1}
 Pe = 100

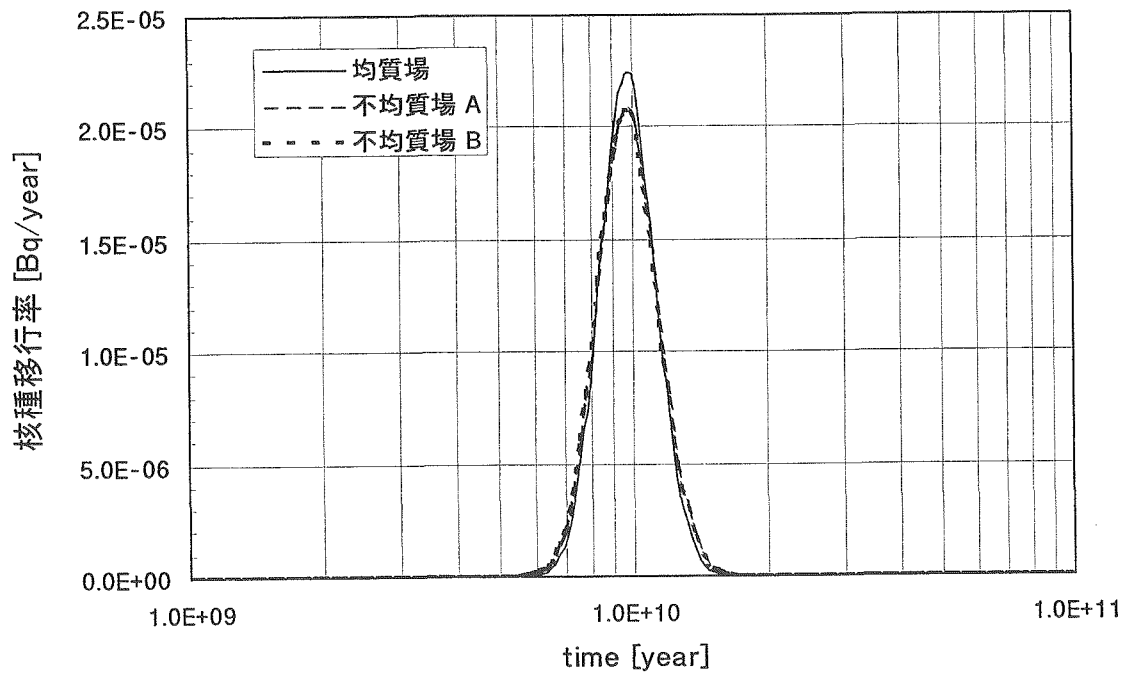
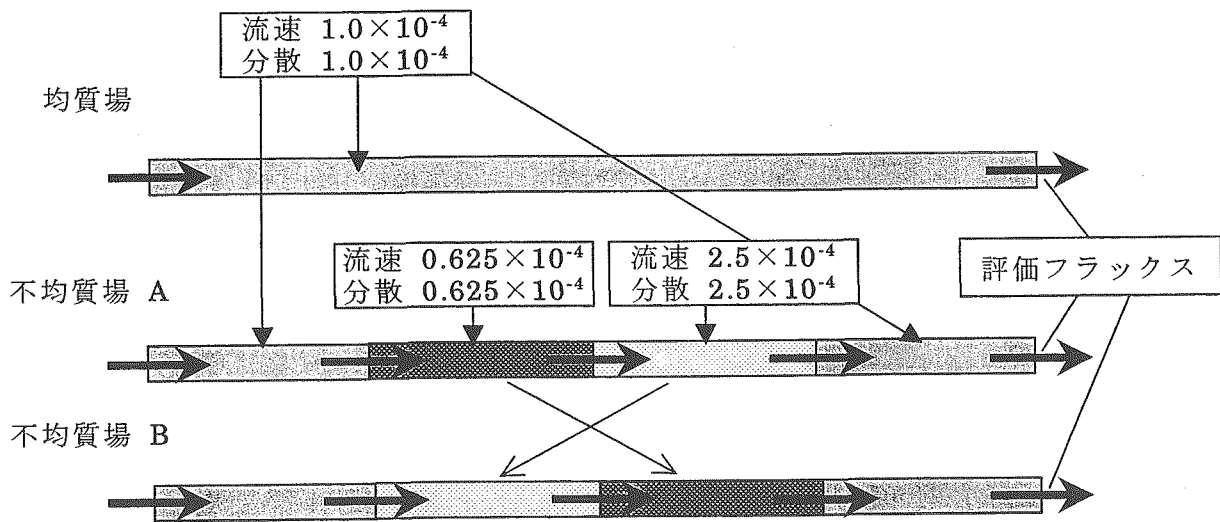


Fig. 3.2.3-3 case7 解析結果

平均流速 = 1.0×10^{-4}

平均分散係数 = 1.0×10^{-4}

Pe = 100

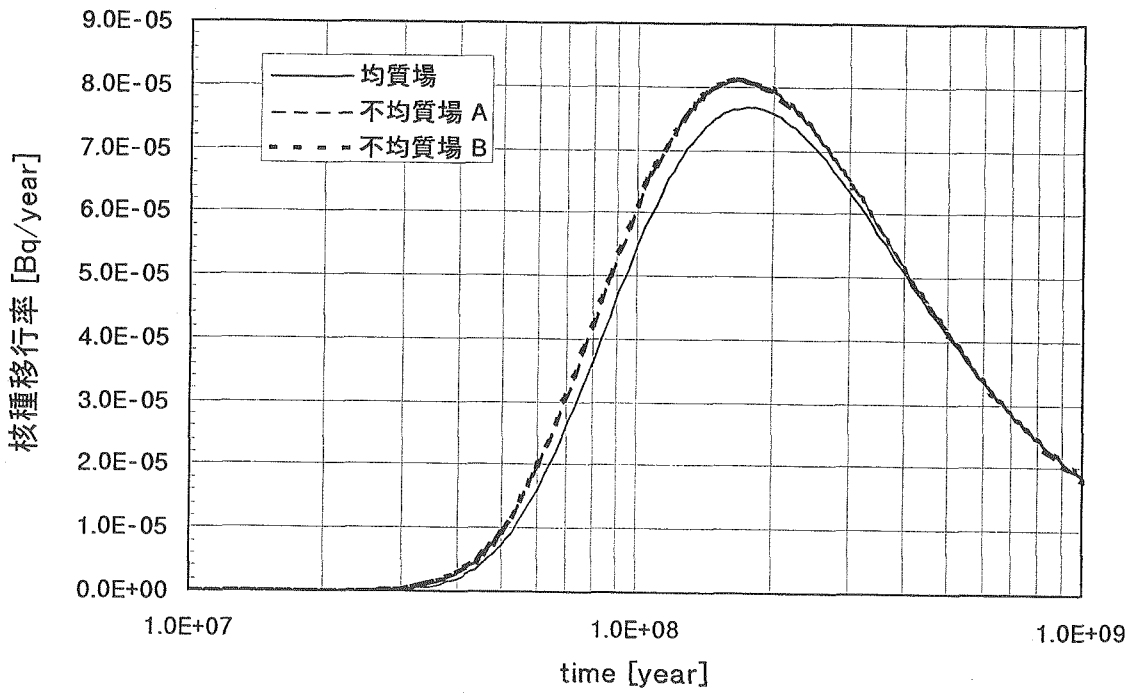
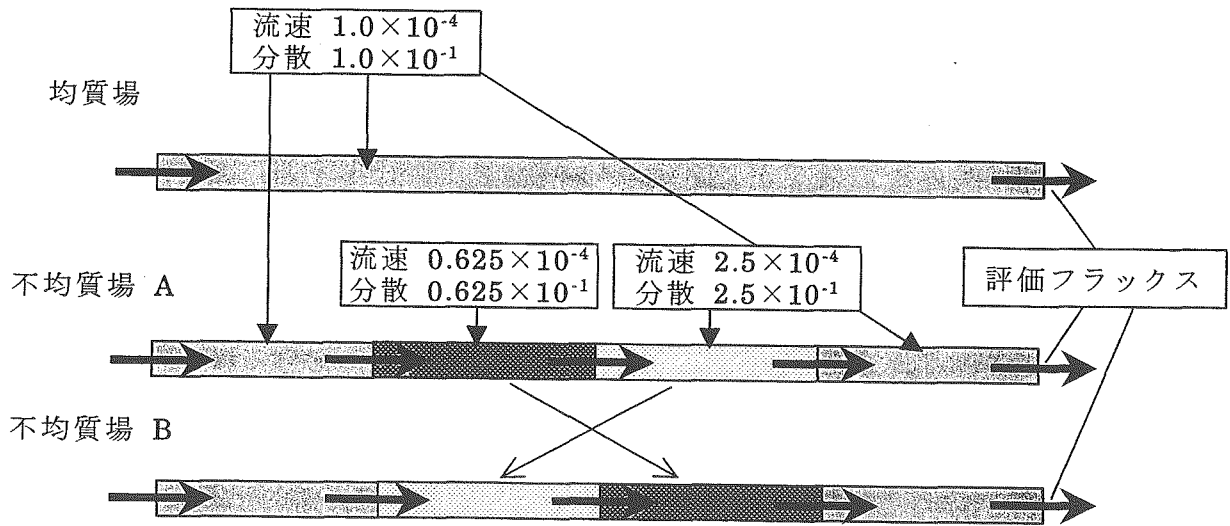


Fig. 3.2.3-4 case13 解析結果

平均流速 = 1.0×10^{-4}

平均分散係数 = 1.0×10^{-1}

Pe = 0.1

(4)考察

全ケースを通じて、不均質場 A と不均質場 B の計算結果は一致した。つまり、出力フラックスは、通過してきた場の順番には影響を受けない事が分かる。

今回行った計算の流れを Fig. 3.2.3-5 に示す。まず、Pe 数を各要素ごとに合わせた結果、均質場と不均質場と答えが一致する事が確認できた (Fig. 3.2.3-5 ①参照)。しかし、Pe 数を変化させて計算を行ったところ、Pe 数を小さくすると均質場と不均質場の答えが一致しない傾向が現れた (Fig. 3.2.3-5 ②参照)。更に Pe 数を保ち流速を変化させた計算を行った結果、流速を大きくすると均質場と不均質場と答えが一致した (Fig. 3.2.3-5 ③参照)。

以上のことより、流速が速いときには Pe 数によらず、解析結果は一致することが分かる。また Pe=10 を境に、Pe 数が大きな時には均質場の結果は保守的なものになり、Pe 数が小さいときにはその逆になる事が分かる。

これらの誤差が生じる原因としては、

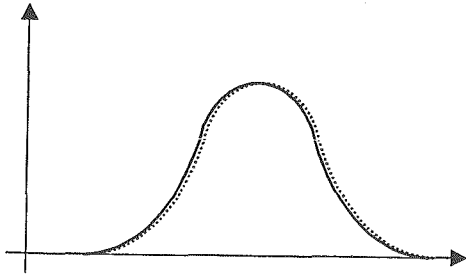
- ・タイムステップ幅
- ・フラックスの値の大きさ

が考えられる。

MATRICES においては、内部的なタイムステップは対数的に取られているため、フラックスの出力時刻が遅くなるほどタイムステップは大きくなり、誤差を生む可能性が大きくなる。

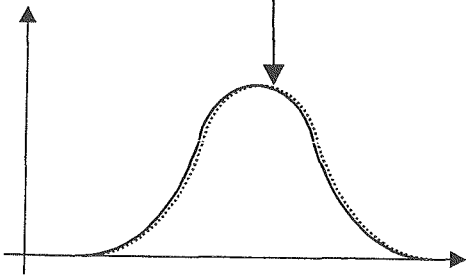
また、フラックスの出力時刻が遅くなると、フラックスのピークの値が小さくなり、これにより誤差が生じ易くなる。

① Pe 数を要素毎に合わせる → フラックス一致

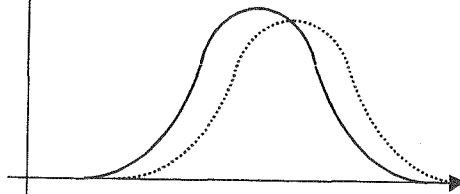


② Pe 数を変化させる

大きくする → フラックス一致

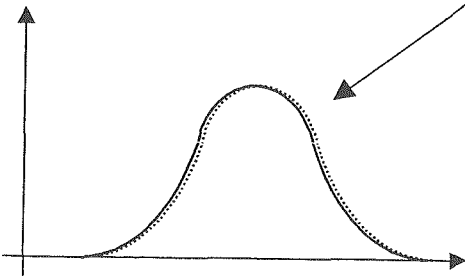


小さくする → フラックス不一致



③ 流速を変化させる

大きくする → フラックス一致



小さくする → フラックス不一致

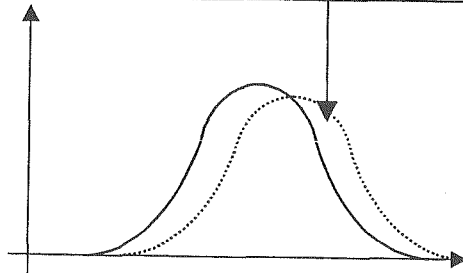


Fig. 3.2.3-5 計算の流れ

3.2.4 不均質場における核種移行解析

m-MATRICS を用いて、不均質場における核種移行解析を実施し、従来の MATRICS の計算結果との比較を行った。

(1)解析条件

リアライゼーション No.1 で用いた不均質透水係数場から流線を一本抽出し、核種移行解析を実施した。抽出した流線の概略図を Fig. 3.2.4-1 に示す。この流線においては、流速は比較的遅い。解析に用いた地下水実流速、分散係数及び要素長を Table 3.2.4-1 及び Table 3.2.4-2 に示す。

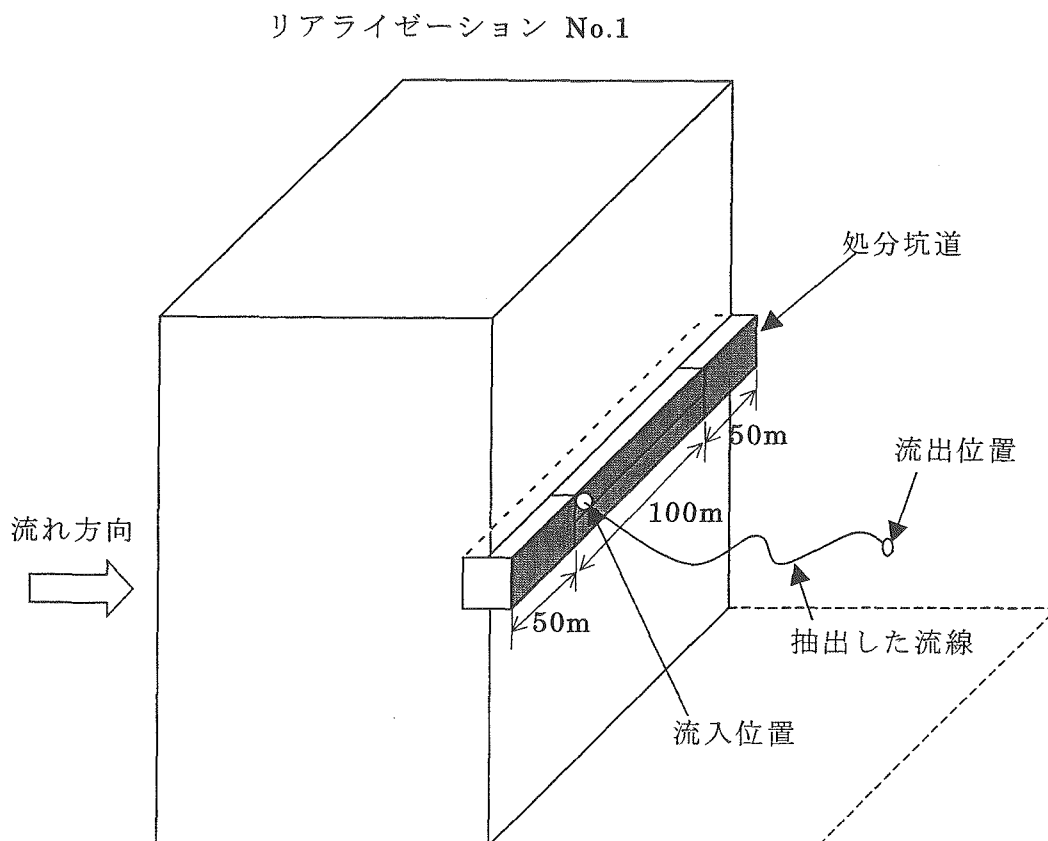


Fig. 3.2.4-1 不均質透水係数場から抽出した流線の概略

Table 3.2.4-1 m-MATRICES 解析条件

要素番号	要素長 [m]	透水係数 [m/sec]	地下水実流 速 [m/year]	分散係数 [m ² /year]
1	4.607	3.564×10^{-10}	1.171×10^{-3}	1.215×10^{-2}
2	5.039	2.147×10^{-9}	1.562×10^{-3}	1.621×10^{-2}
3	5.227	8.821×10^{-10}	2.142×10^{-3}	2.222×10^{-2}
4	5.211	4.269×10^{-10}	2.743×10^{-3}	2.846×10^{-2}
5	2.616	1.788×10^{-9}	2.527×10^{-3}	2.622×10^{-2}
6	2.653	1.862×10^{-9}	2.268×10^{-3}	2.353×10^{-2}
7	5.178	8.408×10^{-10}	1.984×10^{-3}	2.059×10^{-2}
8	1.546	3.612×10^{-9}	1.819×10^{-3}	1.887×10^{-2}
9	3.510	5.982×10^{-11}	1.908×10^{-3}	1.979×10^{-2}
10	5.424	1.194×10^{-10}	1.965×10^{-3}	2.039×10^{-2}
11	4.463	3.084×10^{-10}	2.043×10^{-3}	2.119×10^{-2}
12	0.952	6.615×10^{-10}	2.411×10^{-3}	2.501×10^{-2}
13	0.792	7.515×10^{-10}	2.554×10^{-3}	2.650×10^{-2}
14	5.445	8.759×10^{-9}	2.736×10^{-3}	2.839×10^{-2}
15	5.174	1.456×10^{-8}	3.349×10^{-3}	3.474×10^{-2}
16	5.216	2.721×10^{-8}	3.952×10^{-3}	4.100×10^{-2}
17	1.943	1.106×10^{-8}	4.090×10^{-3}	4.244×10^{-2}
18	3.241	1.469×10^{-7}	3.813×10^{-3}	3.956×10^{-2}
19	5.053	2.751×10^{-8}	3.414×10^{-3}	3.542×10^{-2}
20	5.019	7.930×10^{-9}	2.828×10^{-3}	2.934×10^{-2}
21	5.126	3.428×10^{-9}	2.299×10^{-3}	2.385×10^{-2}
22	5.270	6.556×10^{-9}	2.071×10^{-3}	2.148×10^{-2}
23	5.029	1.357×10^{-7}	2.733×10^{-3}	2.836×10^{-2}
24	5.025	3.456×10^{-7}	4.369×10^{-3}	4.533×10^{-2}
25	4.995	1.375×10^{-7}	5.560×10^{-3}	5.769×10^{-2}

Table 3.2.4-2 MATRICES 解析条件

要素番号	要素長 [m]	透水係数 [m/sec]	地下水実流 速 [m/year]	分散係数 [m ² /year]
1	1.0376×10^2	9.994×10^{-10}	2.426×10^{-3}	2.517×10^{-2}

(2)解析結果

従来の MATRICS 及び m-MATRICS を用いた解析結果から核種移行率の履歴を Fig. 3.2.4-2, Fig. 3.2.4-3 に示す。

また、MATRICS 及び m-MATRICS の解析結果における主要核種の移行率の比較を以下の Table 3.2.4-3 に示す。

Table 3.2.4-3 m-MATRICS と MATRICS の解析結果の比較

核種	m-MATRICS		MATRICS	
	最大値 [Bq/year]	時間 [year]	最大値 [Bq/year]	時間 [year]
Se-79	5.83	2.88×10^5	5.01	3.02×10^5
Cs-135	6.27×10^1	1.00×10^7	5.22×10^1	1.05×10^7
Zr-93	9.13×10^{-2}	1.45×10^7	5.45×10^{-2}	1.51×10^7
Pd-107	3.87×10^{-2}	2.75×10^7	3.34×10^{-2}	2.88×10^7
Pd-210	4.88×10^{-1}	3.47×10^8	5.02×10^{-1}	3.63×10^8

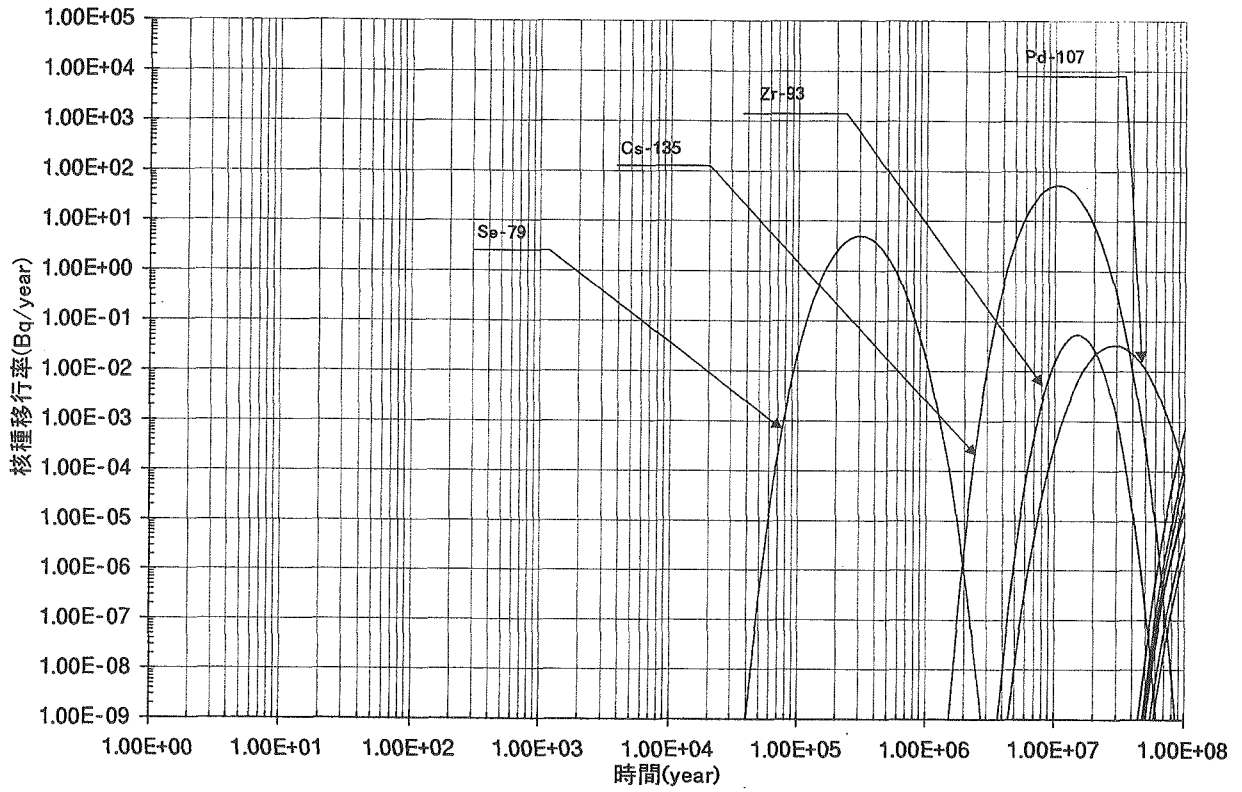


Fig. 3.2.4-2 MATRICS 解析結果

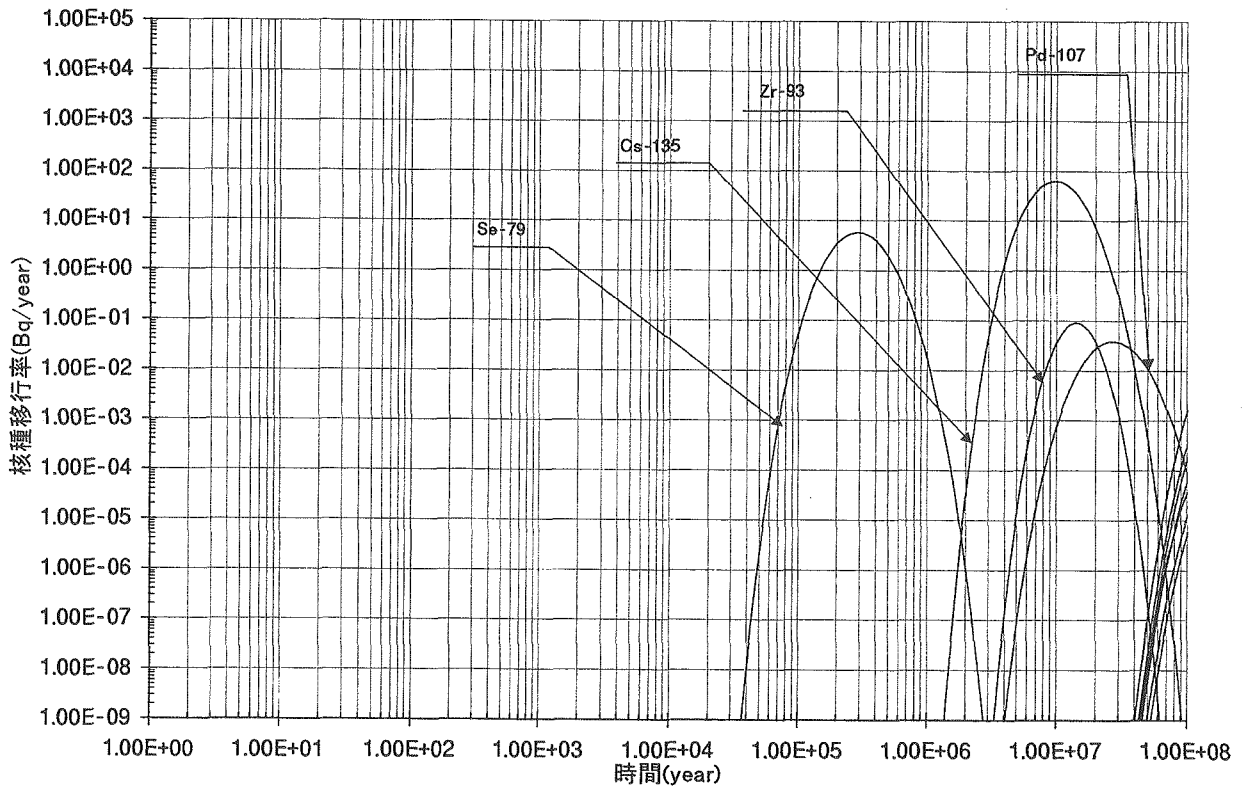


Fig. 3.2.4-3 m-MATRICES 解析結果

(3)考察

MATRICES の解析結果と m-MATRICES の解析結果は、ほぼ一致した。今回実施した解析ケースにおいては、m-MATRICES の方が遅延の効果が若干小さく出ていると考えられる。そのため、単核種の核種移行率は MATRICES の解析結果よりも大きくなっており、そのピークも早い時間に出ている。

しかし、崩壊系列の最後の核種である Pd-210 等では逆の傾向もみられる。崩壊系列のある核種については、崩壊により核種の性質が変わるため、その挙動は、核種の性質と場の性質との組み合わせに依存することになり、単核種よりも不均質場の影響を受けやすい。例えば、遅延係数の大きな核種が流れの遅い場に長く留まれば、その娘核種が下流に出現する時刻はより遅くなる。その分 MATRICES の解析結果とのずれが大きくなり、単核種の解析結果と傾向が異なるケースが現れる。

3.2.5 まとめ

m-MATRICES 及び MATRICES を用いて核種移行解析を実施した。

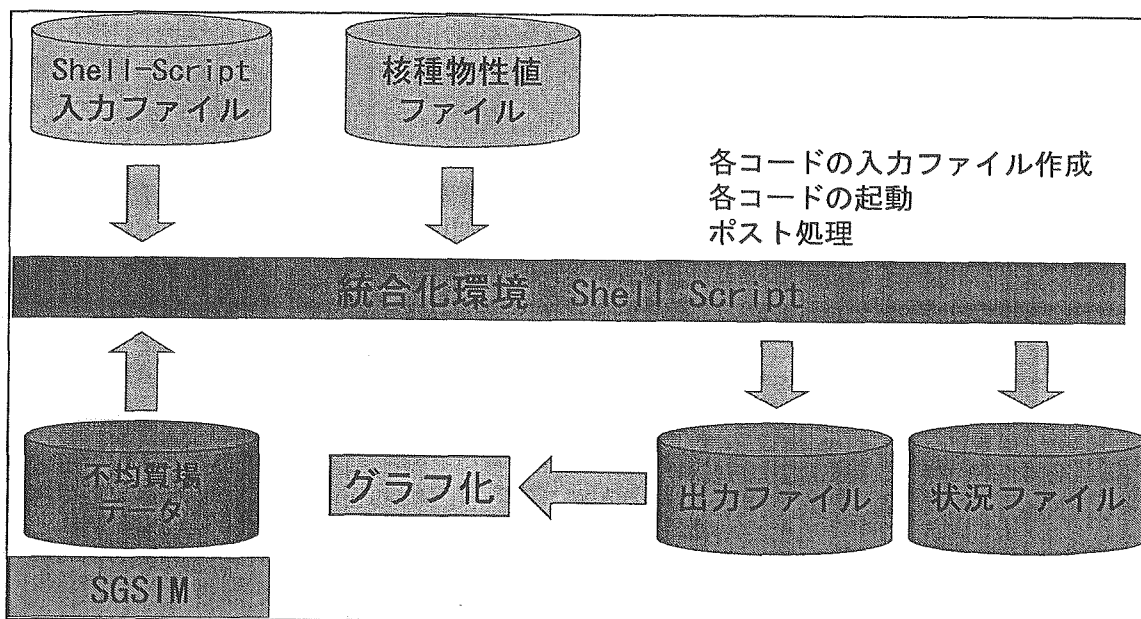
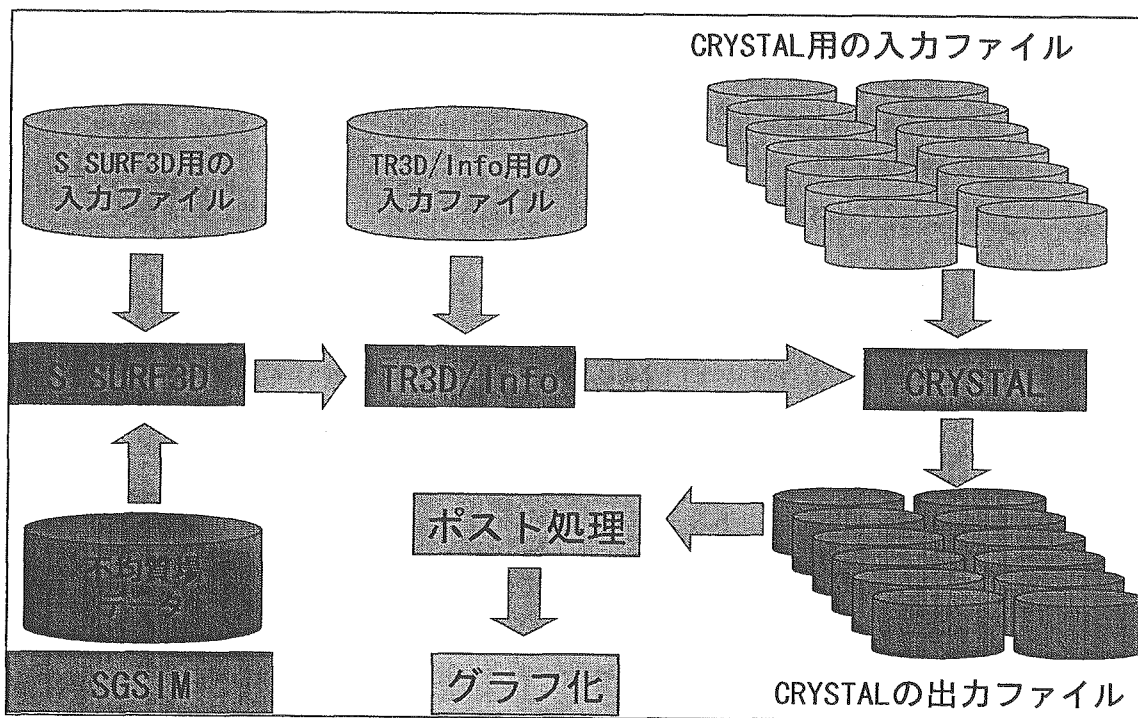
m-MATRICES を用いた解析は、局所的に流速、分散定数、透水係数等が異なる不均質場を模擬しているため、実現象に近く、各パラメータの平均値を用いている従来の MATRICES の解析よりも信頼性は高いと思われる。しかし、今回の解析ケース程度の不均質場においては両者の差はあまりないため、従来の MATRICES の解析結果も十分妥当なものであるといえる。

4 ニアフィールド水理／核種移行計算の整備

4.1 概要

昨年度は、核種移行計算の統合化の環境を整備した。

本年度作業は、核種移行解析コード MATRICES の機能追加に適應するため環境の再整備を行った。



4.2 使用法

ユーザーは以下の手順でシェルを起動する。

- ①シェルをコントロールするための「コントロール・ファイル」を作成する。
- ②計算に必要なファイル、「核種物性ファイル」などを準備する。
- ③シェルの起動を行う。(4.2.3 実行方法を参照)

「シェル・スクリプト」は、ユーザーの作成した「コントロール・ファイル」の文法のチェックを行い必要な計算コードの入力ファイルを作成し、計算コードを起動させる。この「シェル・スクリプト」には以下の機能が実装されている。

- ①計算条件やエラー出力などの情報を「ステイタス・ファイル」に格納する。
- ②計算状況を確認するための「ログ・ファイル」の作成も行う。
- ③各計算コードの結果は、ケース名と同名のディレクトリを作成し、その中に保存をする。
- ④計算の終了したケースについては、ディレクトリごと圧縮をし保存することも可能である。

4.2.1 コントロールファイル・フォーマット

コントロールファイルの基本仕様を以下に記す。

ユーザーの作成する「コントロールファイル」はテキスト形式とする。

「コントロールファイル」には、ケース名や計算コードの起動制御、計算条件を入力する。

「コントロールファイル」は"*"から始まるコマンドと、コマンドに続くオプションより構成される。

また、各コマンドは、一部例外を覗き*BEGIN から始まり、*END で終わる。

コマンドは以下の通りである：

(1)コマンド

*CASE

文法：***CASE** OPTION

用途：ケース名の指定。

ケース名はユーザーが任意に設定できる。

*SSURF3D

文法：***SSURF3D** OPTION[0/1]

用途：ポテンシャル解析コード **S_SURF3D** の起動制御を行う。

OPTION に 1 を指定するとコードを起動し、0 を指定すると起動しない。

*TR3D

文法：***TR3D** OPTION[0/1]

用途：流線情報抽出コード **TR3D/Info** の起動制御を行う。

OPTION に 1 を指定するとコードを起動し、0 を指定すると起動しない。

*CRYSTAL

文法：***CRYSTAL** OPTION[0/1]

用途：一次元核種移行解析コード **CRYSTAL** の起動制御を行う。

OPTION に 1 を指定するとコードを起動し、0 を指定すると起動しない。

*BEGIN

文法：***BEGIN** OPTION[SSURF3D/TR3D/CRYSTAL]

用途：各計算コードの計算条件の入力開始宣言。

OPTION に **SSURF3D** を指定すると **S_SURF3D** の入力フィールドと判断する。

OPTION に **TR3D** を指定すると **TR3D/Info** の入力フィールドと判断する。

OPTION に **CRYSTAL** を指定すると **CRYSTAL** の入力フィールドと判断する。

*END

文法：***END** OPTION[SSURF3D/TR3D/CRYSTAL]

用途：各計算コードの計算条件の入力終了宣言。

OPTION に **SSURF3D** を指定すると **S_SURF3D** の入力フィールドと判断する。

OPTION に **TR3D** を指定すると **TR3D/Info** の入力フィールドと判断する。

OPTION に **CRYSTAL** を指定すると **CRYSTAL** の入力フィールドと判断する。

(2)カード

各計算コードの入力は、*BEGIN～*END に挟まれた、領域に"!"から始まるカードを用

いて指定する。

コマンドは以下の通りである：

(A)三次元水理解析(*SSURF)

!GRID

文法：!GRID OPTION

用途：グリッドデータの指定。

!MATERIAL

文法：!MATERIAL OPTION

用途：透水係数データの指定。

!OUTPUT

文法：!OUTPUT OPTION

用途：出力ファイルの指定。

!SIGMA

文法：!SIGMA OPTION

用途：ソルバーパラメータの設定。

!EPS

文法：!EPS OPTION

用途：打ち切り誤差の設定の設定。

!ITERMAX

文法：!ITERMAX OPTION

用途：反復回数の設定。

!PARAM

文法：!PARAM OPTION

用途：ソルバーパラメータの設定。

!SOLVER

文法：!SOLVER OPTION

用途：ソルバーフラグ

(B)流線情報の抽出(*TR3D)

!GRID

文法：!GRID OPTION

用途：グリッドデータの指定

!FLOWFIL

文法：!FLOWFIL OPTION

用途：速度ベクトルファイル(S_SURFの結果)の指定。

!OUTPUT

文法：!OUTPUT OPTION

用途：出力ファイルの指定。

!DISPLACE

文法：!DISPLACE OPTION

用途：評価断面までの距離を指定。

!SPOINT

文法：!SPOINT OPTION1 OPTION2 OPTION3

用途：追跡粒子初期座標の始点の指定。

!EPOINT

文法：!EPOINT OPTION1 OPTION2 OPTION3

用途：追跡粒子初期座標の終点の指定。

!ICUT

文法：!ICUT OPTION1 OPTION2 OPTION3

用途：追跡粒子の X 方向、Y 方向、Z 方向の切り取り数の指定。

!MINTIME

文法：!MINTIME OPTION

用途：最小刻み時間の設定。

!MAXTIME

文法：!MAXTIME OPTION

用途：最大刻み時間の設定

!CFL

文法：!CFL OPTION

用途：クーラン条件の設定。

!SOLVER

文法：!SOLVER OPTION

用途：ソルバーの指定。

OPTION=1：時間前進

OPTION=2：時間後退

OPTION=3：時間前進および時間後退

(C)一次元核種移行計算(*CRYSTAL)

!VELOCITY

文法：!VELOCITY OPTION

用途：速度データ(TR3Dによって生成されたファイル)の指定。

!STREAM

文法：!STREAM OPTION

用途：流線の数の指定。

!MINTIME

文法：!MINTIME OPTION

用途：計算最小時間の設定。

!MAXTIME

文法：**!MAXTIME OPTION**

用途：計算最大時間の設定。

!TIMESTEP

文法：**!TIMESTEP OPTION**

用途：出力時間の設定。

!DISPLACE

文法：**!DISPLACE OPTION**

用途：評価距離の指定。

!CRYFILE

文法：**!CRYFILE OPTION**

用途：計算を行う核種物性ファイルの指定。

核種物性ファイルは別途作成する必要があります。

!SOLVAER

文法：**!SOLVER OPTION**

用途：計算手法の選択を行う。

OPTION=1：タルボット法

OPTION=2：クランプ法

OPTION=3：細濃法

!INTERG

文法：**!INTERG OPTION**

用途：積分点数の指定。

4.2.2 核種物性ファイルのフォーマット

核種物性ファイルの使用を以下に示す。

ユーザーの作成する「核種物性ファイル」はテキスト形式とする。

「核種物性ファイル」には、ソースタームのファイル名や崩壊系列など計算条件を入力する。

「核種物性ファイル」は"*"から始まるコマンドと、コマンドに続くオプションより構成される。

また、各コマンドは、一部例外を覗き***BEGIN** から始まり、***END** で終わる。

コマンドは以下の通りである：

(1)コマンド

*LINE

文法：***CASE** OPTION[:OPTIN:OPTIN...]

用途：計算を行う核種および崩壊系列の名前を指定する。

*BEGIN

文法：***BEGIN** OPTION

用途：核種および崩壊系列の計算条件の入力開始宣言。

*END

文法：***END** OPTION

用途：核種および崩壊系列の計算条件の入力終了宣言。

(2)カード

各計算コードの入力は、*BEGIN~*END に挟まれた、領域に"!"から始まるカードを用いて指定する。

コマンドは以下の通りである：

!NAME

文法：!NAME OPTION

用途：核種および崩壊系列の名前の指定。

複数の核種・系列を計算する場合は、":"で区切る。

!TIME

文法：!TIME OPTION

用途：半減期の指定。

複数の核種・系列を計算する場合は、":"で区切る。

!RATI

文法：!RATI OPTION

用途：遅延係数の指定。

複数の核種・系列を計算する場合は、":"で区切る。

!INPUT

文法：!INPUT OPTION

用途：ソースタームの指定。

!OUTPUT

文法：!OUTPUT OPTION

用途：出力ファイルの指定。

4.2.3 実行方法

SHELL は、プロンプト上から以下のコマンドを実行することによって起動する。

```
%jnc.sh -i コントロールファイル
```

SHELL には以下のオプションがある。

- i: コントロールファイルの指定
ユーザーの作成した「コントロール・ファイル」を指定する。
- g: デバッグモード
ユーザーの作成した「コントロール・ファイル」の文法をチェックする。
このモードでは、文法のみをチェックするため、「コントロール・ファイル」で指定している他のファイルのチェックは行わない。
- h: ヘルプファイルの表示
簡単なヘルプを表示する。
- v: バージョン情報の表示
バージョンのチェックを行う。
シェル・スクリプトをユーザーが書き直したときなど、スクリプト内のバージョン番号を変えておくと有効に利用できる。

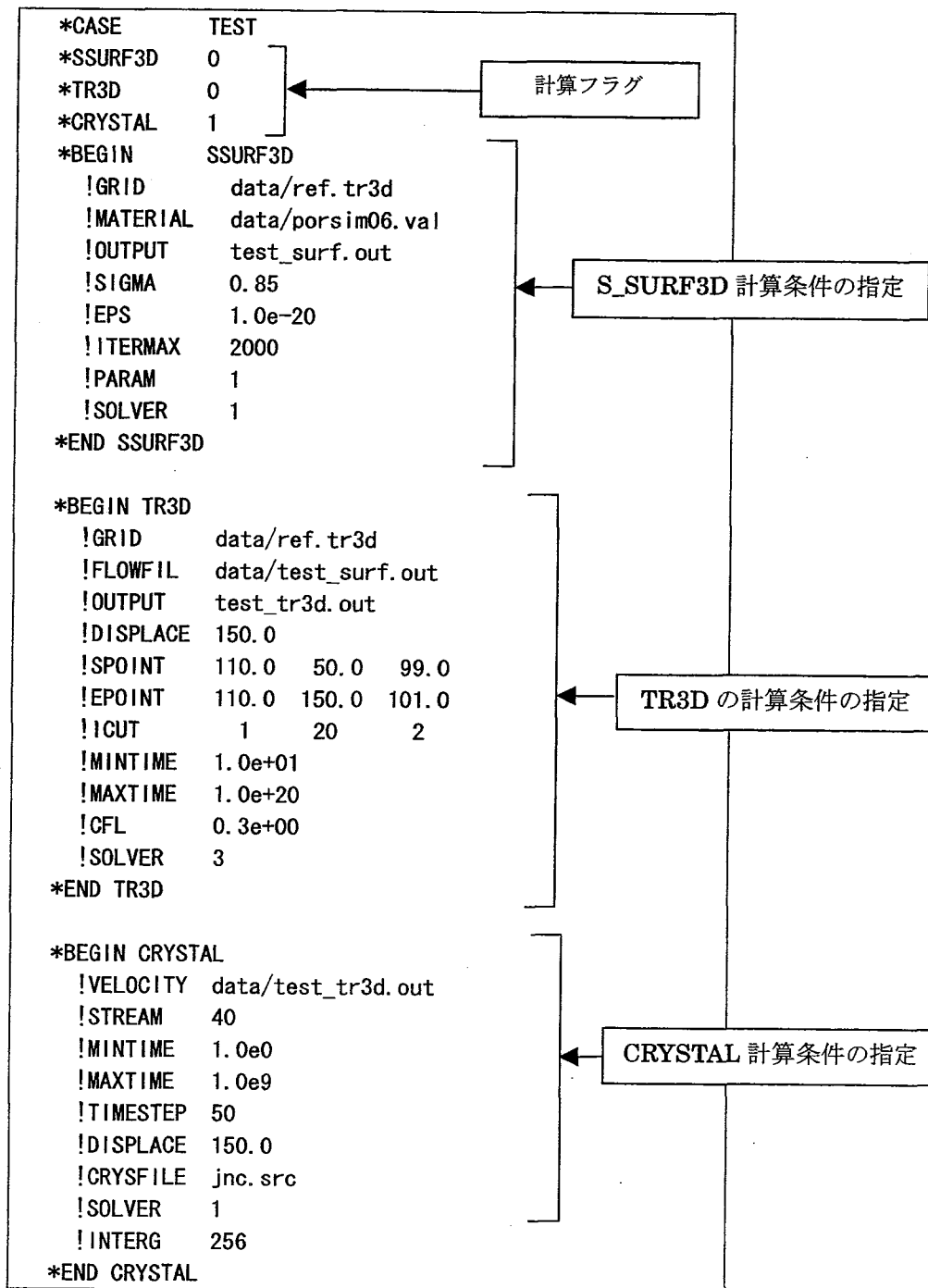
4.3 入出力サンプル

4.3.1 コントロールファイルサンプル

入力ファイルのサンプルとして、以下の条件での計算を行う「コントロール・ファイル」を示す。

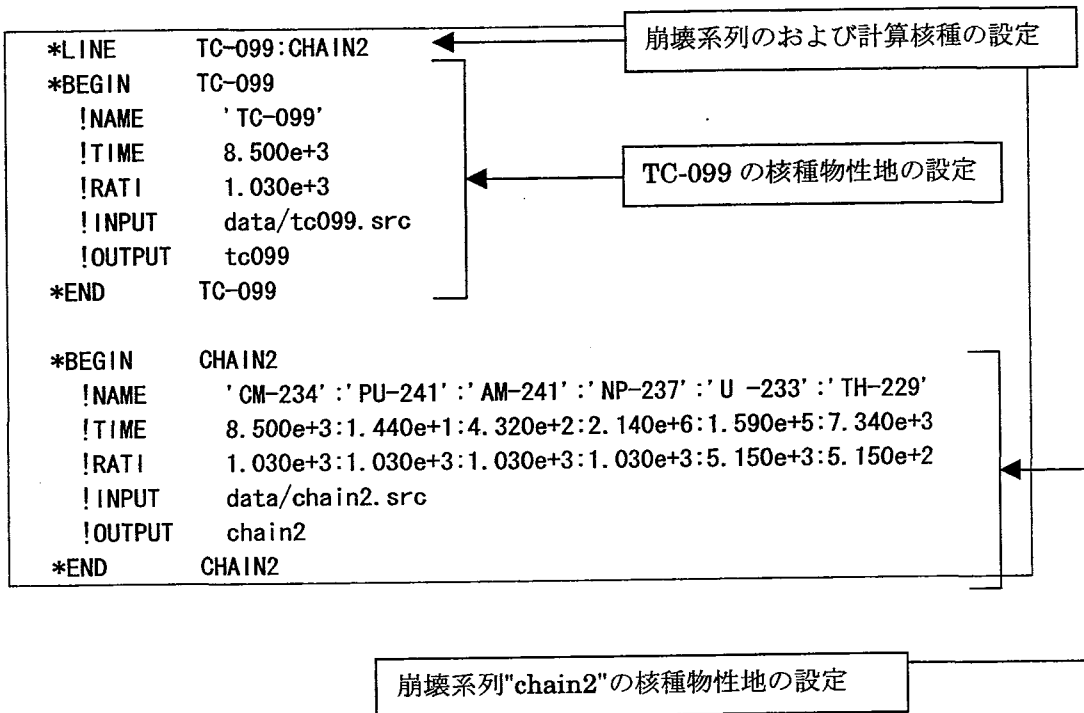
例に示すコントロール・ファイルは、三次元の水理解析および流線情報の抽出はすでに終了しているものとして、一次元核種移行計算コードである **MATRICS** のみの計算を実施するためのものである。

以下にコントロールファイルのサンプルを示す。



4.3.2 核種物性ファイル

以下に核種物性ファイルのサンプルを示す。



4.3.3 出力ファイル

出力ファイルとして、各計算コードによる出力ファイルの他、計算の実行条件を示す、ステイタス・ファイルと計算の実行状態を示すログファイルを出力する。
以下に出力ファイルのサンプルを示す。

(ステイタス・ファイル)

```
Tue Jan 20 21:13:40 JST 2000
TEST

----- ECHO USER INPUT -----
*CASE          TEST

*SSURF3D       0
*TR3D          0
*CRYSTAL       1

*BEGIN         SSURF3D
!GRID          data/ref.tr3d
!MATERIAL      data/porsim06.val
!OUTPUT        test_surf.out
!SIGMA         0.85
!EPS           1.0e-20
!ITERMAX       2000
!PARAM         1
!SOLVER        1
*END SSURF3D

*BEGIN TR3D
!GRID          data/ref.tr3d
!FLOWFIL       data/test_surf.out
!OUTPUT        test_tr3d.out
!DISPLACE      150.0
!SPOINT        110.0  50.0  99.0
!EPOINT        110.0  150.0  101.0
!ICUT          1    20    2
!MINTIME       1.0e+01
!MAXTIME       1.0e+20
!CFL           0.3e+00
!SOLVER        3
*END TR3D

*BEGIN CRYSTAL
!VELOCITY      data/test_tr3d.out
!STREAM        40
!MINTIME       1.0e0
!MAXTIME       1.0e9
!TIMESTEP      50
!DISPLACE      150.0
!CRYSTFILE     jnc.src
!SOLVER        1
!INTERG        256
```

入力ファイルのエコー

*END CRYSTAL

— WORK DIRECTORY —

DIRECTRY NAME : jnc.TEST.3411
S_SURF3D jnc.TEST.3411/SURF
TR3D/info jnc.TEST.3411/TR3D
CRYSTAL jnc.TEST.3411/CRTSTAL

— SOLVER FLAG —

S_SURF3D NOT CALC
TR3D/info NOT CALC
CRYSTAL CALC

— SOLVER PARAMETER —

* CRYSTAL

CARD	TYPE	INPUT
VELOCITY	(C)	data/test_tr3d.out
STREAM	(I)	40
MINTIME	(F)	1.0e0
MAXTIME	(F)	1.0e9
TIMESTEP	(I)	50
DISPLACE	(F)	150.0
CRYSFILE	(C)	jnc.src

結果保存の
ディレクト
リー

5 まとめ

昨年度までに確立した不均質場における核種移行計算手法において、場の地下水流動を特徴付けるパラメータを変化させた場合の解析を 30 ケースの透水係数場について行い、その影響について検討を行った。

その結果、核種移行率及び線量当量率は各リアライゼーションで異なり、核種移行率も 5 桁以上のオーダーで開きがあることが明らかになった。この事は場の不均質性の計算手法に与える影響が決して小さく無いことを示している。

しかし、リアライゼーション数を増やすことによってある平均値の近づくことも明らかになった。

また、処分坑道から 40 本の流線への核種配分を流量に依存させた場合と等配分にした場合の核種移行率の解析結果を見る限り、流量配分を行った場合の方が若干大きなピーク値を示していることが多かった。ただし、移行率の大きな変化や傾向の違いは見られなかった。

また、一次元核種移行解析コード **MATRICS** の拡張性を追求すると共に、その信頼性を評価するために以下の二つの検討を行った。

- ① **MATRICS** で用いられる逆ラプラス変換手法の拡張として、**MATRICS** コードで使用されているタルボット法に加え、クランプ法および細野法を用いた解析
- ② **MATRICS** コードの入出力フラックスを調整することによる多要素版 **MATRICS** (**m-MATRICS**) による各種移行解析

逆ラプラス変換手法の比較評価の結果から、クランプ法、細野法ともにパラメータを調整する必要があるものの、タルボット法と同等の解析を実施可能であることが確認された。透水係数が小さくなるにつれて、細野法、クランプ法ともにタルボット法の解と一致する傾向があることがわかった。また L2 ノルムでの誤差評価および最大値での誤差評価を実施し、二手法での誤差の傾向が一致していることがわかった。

m-MATRICS を用いた解析では、局所的に流速、分散定数、透水係数等が異なる不均質場を模擬しているため、実現象に近く、各パラメータの平均値を用いている従来の **MATRICS** の解析よりも信頼性は高いと思われる。しかし、今回の解析ケース程度の不均質場においては両者の差はあまりないため、従来の **MATRICS** の解析結果も十分妥当なものであるといえる。

さらに、多孔質媒体を想定した水理解析／核種移行解析の作業を効率的に行うためにコード整備及び統合化を実施した。

参考文献

- [1] 動力炉・核燃料事業団：高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術報告書－平成 3 年度－，PNC TN1410 92-081, 1992
- [2] Deutch, C.V. and Journal, A.G. : GSLIB Geostatistical Software Library and User's Guide, Second Edition, Applied Geostatistics, Oxford University Press Inc., 1992
- [3] 長坂和佳, 中島研吾：ニアフィールド水理/核種移行評価モデルの信頼性に関する研究, 株式会社三菱総合研究所, 核燃料サイクル開発機構研究委託報告書, JNC TJ1400 99-015, 1999
- [4] K. Crump, Numerical Inversion of Laplace Transform Using a Fourier Series Approximation, Journal of the Association for Computing Machinery, Vol. 23, No. 1, pp. 89-96, 1976
- [5] A. Talbot, The Accurate Numerical Inversion of Laplace Transform, Journal of the Institute of Mathematics and its Applications 23, 97-120, 1979
- [6] R. Hoog, An Improvement for Numerical Inversion of Laplace Transform, SIAM J. Sci. Stat. Comput., Vol3, No. 3, pp357-366, 1982
- [7] B. Davies, Numerical Inversion of the Laplace Transform: a Survey and Comparison of Methods, Journal of Computational Physics, Vol.33, pp1-32, 1979
- [8] 細野, 数値ラプラス変換, 電気学会論文誌 A , 99 巻, 10 号, pp494-500
- [9] K.Worgan and P.Robinson, "CRYSTAL: A Model of Contaminant Transport in a Densely Fissured Geosphere 9105-1 Version 1", Intera Environmental Division, 1992.