

不均質多孔質媒体中の 物質移動解析手法に関する研究 (Ⅲ)

(動力炉・核燃料開発事業団 委託研究概要)

技術資料		
開示区分	レポート No.	受領日
Z	J1281 95-001	1995.7.17
この資料は技術管理室保存資料です 閲覧には技術資料閲覧票が必要です 動力炉・核燃料開発事業団 技術協力部技術管理室		

1995年2月

この資料は、動燃事業団の開発業務を進めるため、特に限られた関係者だけに開示するものです。ついては、複製、転載、引用等を行わないよう、また第三者への開示又は内容漏洩がないよう管理してください。また今回の開示目的以外のことには使用しないよう特に注意して下さい。

本資料についての問い合わせは下記に願います。注)

〒107 東京都港区赤坂1-9-13

動力炉・核燃料開発事業団

技術協力部 技術管理部

不均質多孔質媒体中の 物質移動解析手法に関する研究（Ⅲ）

（動力炉・核燃料開発事業団 委託研究概要）

1995年2月

要旨

高瀬 博康*、深谷 友紀子*

地層処分場からの核種放出のcritical pathを同定し、かつその移動特性を明らかにする上で特に重要性の高い不均質媒体中の水理・物質移動問題について、地層の持つ不均質性をフラクタルモデル（統計的自己アファインモデル）により表現し、更に場のモデルに対して高解像度の水理解析及び物質移動解析モデルを適用することにより現実的かつ詳細な解析を行う手法の開発を行った。

本年度は、昨年度開発したMACRO-AFFINITYコードに対してさらに改良を施し、以下の点で機能の拡張を行った。

- ・堆積岩等の異方的な（フラクタル特性が方向によって異なる）不均質媒体の模擬
- ・放射性核種の崩壊、及び線形・非線形の吸着による移行遅延を考慮したパーティクルトラッキング
- ・複数の異なるフラクタル特性を持つ岩体、あるいは母岩と人工バリアから成るニアフィールドといった複合的な不均質媒体の模擬

これらの拡張により、今年度作成したMACRO-AFFINITY Version2.0は、天然バリアについての性能評価及び不均質多孔質媒体中物質移動試験の解析、といういずれの側面においてもより実用性の高いものとなった。

また、改良されたコードを用いて、今年度動燃事業団殿の実施した第二回不均質多孔質媒体中物質移動試験の供試体設計と条件設定を行うとともに、解析結果と試験結果の比較を行い、実際の実験条件の設定値とのずれを考慮することによって解析結果が試験結果と整合的なものとなることを確認した。さらに、今年度の改良点のうち特に異方的なフラクタル場の作成機能を用いて、主流動方向に卓越した相関構造を持つような異方的な供試体の設計と対応する予察解析を行った。

最後に、MACRO-AFFINITYを天然バリアについての性能評価に用いる場合には、パーティクルトラッキングにより数桁に及ぶ濃度領域を精度良く効率的に計算することが極めて難しいことから、これに代わるものとして、移流・分散方程式を高解像度の不均質流場において高速で解法することのできる数値的なラプラス変換ソーパーによる解析手法を開発し、これを例題に用いることを通じてその適用性を確認した。

今後の本研究の方向性としては、

- (1) 室内試験である不均質多孔質媒体中物質移動試験に加えて、原位置での試験にMACRO-AFFINITYを適用し、さらに本手法の信頼性を高めること
- (2) ラプラス変換ソーパーによる不均質場での移流・分散方程式の解析手法を確立し、天然バリアの性能評価において従来の一次元均質モデルを支持する詳細かつ現実的な解析を行うこと

が考えられる。このために、それぞれ以下の点を今後の研究課題として考慮する必要がある。

- ・マトリクス拡散を考慮したパーティクルトラッキングアルゴリズムの開発
- ・マトリクス拡散を考慮したラプラス変換ソーパーの開発
- ・マトリクス拡散項を調節することにより水理に加えて物質移動についても等価となるような連続媒体近似の手法開発

* 日揮株式会社 原子力・環境・エネルギー事業本部

SUMMARY

Hiroyasu Takase*, Yukiko Fukaya*

Characterization of the critical path for the radioactive nuclides migrating from the repository requires a realistic and detailed understanding of the heterogeneous transmissivity field in a given site. In this study, an approach utilizing the stochastically self-affine fractal model was developed and applied to variety of problems.

In this financial year, MACRO-AFFINITY Version 1.0 developed in the previous year was extended to incorporate the following functionality;

- generation of anisotropic fractal fields,
- calculation of solute transport via particle tracking including radioactive decay and linear/nonlinear sorption ,
- simulation of composite fractal field such as a site with two or more regions of different fractal properties and the near field which consists of (homogeneous) EBS and a (heterogeneous) host rock.

MACRO-AFFINITY Version 2.0 developed in this financial year possesses the functionality described above and, thus, provides more practical means for the performance assessment and also for the analysis of the MACRO experiments.

Design of a heterogeneous flow cell and relevant experimental conditions for Phase II MACRO experiment was carried out using the modified code, and a comparison of the experimental result with the calculation was attempted. The results of a calculational case where realistic fluctuation of the experimental condition was considered was consistent with the experimental result. Furthermore, an anisotropic flow cell was designed and a set of scoping calculations for the flow and the transport through this flow cell was provided.

Major difficulty in applying MACRO-AFFINITY code to the mainline performance assessment is the fact that a particle tracking algorithm is incapable of handling wide range of solute concentration accurately and, at the same time, efficiently. To tackle this difficulty, we applied a continuum solver of the advection - dispersion equation to a highly heterogeneous transmissivity field. A solver which couples a numerical Inverse Laplace transform method with an FEM scheme in the Laplace domain proved that it can be a powerful tool for the given problem.

- (1) confidence building through applying MACRO-AFFINITY not only to the MACRO experiment but also to the In-situ experiments,
- (2) to establish the methodology of applying the Laplace solver to the advection - dispersion equation on a highly heterogeneous transmissivity field and provide means to support simple and "conservative" one dimensional assessment models.

Along these directions, following issues should be focused in the future R&D;

- development of a new particle tracking algorithm which can treat matrix-diffusion of the solute,
- development of a new Laplace solver which can treat matrix-diffusion of the solute,
- development of the procedure to find a continuum approximation of porous (possibly fractured) media which is equivalent from hydrological and also transport point of view.

As for the direction of the future R&D, two possibilities were identified;

*Nuclear & Advanced Technology Division, JGC Corporation

1. フラクタルスケーリング則に基づく不均質透水係数場の理論

ここでは、本研究で開発し様々な問題への適用を図っているMACRO-AFFINITY コードの背景となるフラクタルスケーリング則に基づく不均質透水係数場の理論についてまとめる。

天然バリアの性能評価においては、核種が速やかに移行するチャンネル等のcritical pathを同定し、これらの存在を含めた分散的な核種挙動を明らかにすることが極めて重要な意味を持つ[1][2]。そして、この目的のためには、この様な分散的な挙動の原因となっている媒体中の流速分布、さらにそれを規定する媒体自体の不均質性を現実的に表現することが必要である。

連続体モデルである多孔質媒体近似においては、この様な表現は媒体中の透水係数の空間分布を定量化することによってもたらされる。この際、核種挙動を規定する不均質性は、微視的なレベルから巨視的なレベルまで広範囲なスケールにおいて階層的に存在しており、かつこれらのうちいずれのスケールでの不均質性が核種移行にとって真にcriticalなものとなるかをa-prioriに知ることは極めて難しいことから、各スケールを横断的に表現することが可能な場のモデルが求められることとなる。フラクタル理論に基づく不均質場の表現は、この様な背景から始められたものである。フラクタル理論の基本となるものは大きいスケールでの不均質性のパターンがより小さいスケールのパターンにも自己相似的に埋め込まれているという仮説であり、この仮説（フラクタルスケーリング則と呼ばれる）を採ることにより、前出の階層構造的な不均質性の問題は非常に明瞭な形で表現されることとなる。

しかしながら、ほとんど全ての地層は不均質であると同時に不規則でもあり、このため良く知られたコッホ曲線やシャルピンスキーカーベットの様な厳密に規則的な自己相似パターン（決定論的なフラクタルとも呼ばれる）によって透水係数の分布を表現することは不可能である。そこで、この様な決定論的なフラクタルの制約をある意味で弱めた統計的なフラクタルスケーリング則が用いられることとなる。これは、統計的自己アフィンモデルと呼ばれるものであり、ここでは、透水係数という物理量自体の分布の代わりにバリオグラム γ という統計量を採り、この量が統計的な意味でフラクタルスケール則に従う物と仮定する。即ち、

$$\gamma_{(h)} = \left\langle \left\{ \varphi_{(x)} - \varphi_{(x+h)} \right\}^2 \right\rangle \quad (1)$$

但し、

$\varphi_{(x)}$; 位置 x における物理量（例えば透水係数）

h ; 二点間の距離

$\langle \cdot \rangle$; 該当する距離(h)離れた二点の組を多数考えてその平均を採る操作を表す

で定義されるバリオグラムが、べき乗則として表現されるフラクタルスケーリング、

$$\gamma_{(h)} = \alpha h^{2p} \quad (2)$$

但し、

α , p ; 定数

に従うものと仮定する。ここで、定数 p ($0 < p < 1$)が小さいほど隣接した2点での物理量がかけ離れたもの即ちroughな不均質性が表現され、また逆に、大きいほど隣接した2点間の相関性が良い滑らかな不均質性が表現されることとなる。この様な曲線(2次元分布を考える場合には曲面)の滑らかさの程度は、フラクタルを類別する際の基本的な尺度であり、通常の意味での次元 n (直線なら1、平面なら2、空間なら3)に対して $n+1-p$ をフラクタル次元と呼ぶ。フラクタル次元は、定義から明らかな通り、通常次元よりも大きな値を採り、非常にroughになり平面を埋めるような曲線から通常の滑らかな曲線までが一つの物差しで分類されることとなる。

この統計的自己アファインフラクタルモデルは、あくまで上記の仮説に基づく物であり、これが実際の地層の不均質性を適切に表現し得るか否かについては実測データとの比較による検証が必要である。この様な検証はアメリカを中心とした諸外国において進められ、本モデルが幅広い地層に対して適合することが次第に明らかとなりつつある[3][4][5][6][7][8][9]。また、昨年度本研究で実施した東濃鉱山周辺でのボーリングデータとの比較では、10cm程度から100mという幅広いスケールにわたって実測データがフラクタルスケール則に良く合致するという結果が得られている(詳細は平成5年度報告書参照)。この様な幅広い適合性は偶然の一致ではなく、数学的に統計的自己アファインモデルが通常のfittingに用いられる曲線群とは比較にならないほど高い自由度を持つためであると考えることができる。

幅広い適合性に加えて、統計的自己アファインモデルのもう一つの実用的な長所は、いわゆる地質統計的な意味でのInverse Problemに用いることができるという点である。サイト特性調査においては、広範囲にわたるサイトの中で限られた数の地点で測定が行われるのみであり、サイトの全体像を知るためには何らかの形で調査地点間を内挿することが必要となる(Inverse Problem)。ここでは、未知数の数(全地点での物理量)に対して入手できる情報が限られており、このため、Inverse Problemの解は決して一意的には定まらない。統計的自己アファインモデルでは、調査地点での測定値に対して(2)式をfittingすることによってバリオグラムの関数形(具体的には定数 α 、 p)を推定し、調査地点間の全ての点での値をバリオグラムを満足する様に統計的に割り当てることが可能である。ここで、調査地点数が少なければ統計的試行(realizationと呼ばれる)により内挿される値は、試行の度毎に異なるものとなり、地点数が増すにつれて各realizationは一定のパターン(恐らくは真のサイト特性)に収束していくこととなる。この様なアプローチは、前出の根本的な情報不足に起因する不確実性がブラックボックスとして取り扱われ、従って最終的な評価の変動幅を定量化することができない従来の決定論的な手法と異なり、調査地点数に応じた不確実性が常に顕在化し定量化できるという利点を持っている。また、これをさらに進めれば、限られた調査地点数で不確実性を最小化する様な調査地点配置の明確化、といった問題にも応用することが可能である。

2. AFFINITY-2Dコードの改良

2.1 MACRO-AFFINITYコードの基本機能

昨年度の研究に於いて開発し、今年度更に改良を加えたMACRO-AFFINITYコード(MACRO version 2.0)は、フラクタル透水係数場作成、流動解析及び物質移動解析を行うための各モジュールがそれぞれ独立しており一連の計算にはかなり複雑な出入力管理を必要としていた旧AFFINITY-2Dコードを改良し、各モジュールを共通のグラフィカルユーザーインターフェースの下に統合化することによってユーザーフレンドリーな環境で解析を行うことを可能としたものである。

ソフトウェアとしてのMACRO-AFFINITYコードの主要な機能は以下にまとめる通りである。

- (a)モデル化する空間領域を定義し、そこでの差分グリッドを作成する。
- (b)調査地点もしくは指定位置での透水量係数値を、
 - (i) テキストファイルからの読み込み
 - (ii) グラフィックス編集モードに於いて個々に入力
 - (iii) (i)及び(ii)の組み合わせ、
のいずれかの方法によって入力する。
- (c)(b)で入力されたデータセットに対するフラクタルスケーリング則を求める。
- (d)(b)の各位置でコンディショニングされた、所定の(データセットに対応した)平均値、分散、及びフラクタルスケーリング特性を有する等方的あるいは異方的なフラクタル透水係数場を作成する。(データセットの点数が少ない場合には、フラクタルスケーリング特性を外部指定することが必要である。)
- (e)試験に用いられるガラスビーズの粒径に合わせて、必要に応じて透水係数値の離散化を行う。(ユーザー指定の数値として10段階まで)
- (f)グラフィックスの編集モードに於いて境界上の水頭を指定する。
- (g)ユーザー指定のグリッド((a)の透水係数場に対応したものよりも細かくする事が可能である)上で、モデル化領域のダルシー流速分布、圧力分布を算出する。
- (h)モデル化領域中のトレーサ濃度測定点(モニター位置)を指定する。
- (i)モデル化領域中のトレーサ注入位置を指定する。
- (j)トレーサ注入のモードを指定する(パルス状、ステップ状あるいは連続)。
- (k)パーティクルトラッキングに於ける粒子挙動の画像(動画)表示。
- (l)全てのモニター位置でのトレーサ濃度の表示。
- (m)破過曲線の算出とその表示。
- (n)パーティクルトラッキングの結果の録画。
- (o)録画された粒子挙動の再生。

なお、本年度の改良により、透水係数値、水頭、ダルシー流速、及びパーティクル濃度といった全ての主要計算結果の空間分布(パーティクルについてはその時間分布も含めて)を従来のバイナリファイルに加えてアスキーファイルとして記録・出力することが可能となった。

2.2 本年度の改良点

(1) モニター位置の設定

MACRO-V 2.0に付け加えられた特徴として、パーティクルトラッキング中のトレーサ濃度の変化を観測できるモニター位置の設定が可能であるということがあげられる。モニター位置は、トレーサの注入位置の指定と同じ方法で行われる。つまり、Particle Inputモジュールを使って、画面上でモニター位置に当たるブロックをクリックする。そして、Add Monitor Pointボタンをクリックすると、指定したブロック上に色のついた球が現れる。モニター位置は白い半球で表されるトレーサ注入位置よりもわずかに大きな球で、各点毎に色分けされる。時間の関数で濃度をプロットした際に、この色によって各モニター位置を識別することになる。モニター位置と注入位置が一致した時は、モニター位置を表す球の上に注入位置を表す白い球が重なる(図2.2-1)。注入位置及びモニター位置の入力点は、後日の使用のために、Read / Write Mon & Inj Pointsモジュールにより保存される。

各モニター位置での濃度は、Monitor Points Curvesモジュールによりファイルを選択し、Write Monitor Fileトグルボタンをクリックすることによって、ASCIIフォーマットファイルによるアウトプットが得られる。(破過曲線データと同じ)さらに、Monitor Viewトグルボタンをクリックすることによって、パーティクルトラッキング中の濃度変化を動画できる。Monitor View画面では、パーティクルトラッカーウィンドウで設定した、色分けされた各モニター位置毎に、時間に対する濃度変化を示す(図2.2-2)。Monitor View画面は、マウスを使って回転、拡大することができる。Reset Viewボタンを押せば、画面は初期状態に戻る。

Monitor View画面を表示させると、メイン画面でのパーティクルトラッキングは遅くなってしまいます。一度パーティクルトラッキングが始まると、パーティクルトラッキングモジュールが全てのタイムステップを終了するまで、Monitor View画面を開いたり、閉じたりすることはできない。

(2) 濃度データの出力

指定したモニター位置でのトレーサ濃度のモニタリングの他に、各タイムステップ毎に、各セルでの濃度データを出力することができる。Concentration Fieldモジュールでアウトプットファイルを指定し、Write Conc. Fileトグルボタンをクリックする。

アウトプットファイルはASCIIフォーマットで表され、各タイムステップ毎に各グリッド上の濃度データを表示する。

(3) フラクタル透水係数場及び流動解析結果のテキスト入力

MACRO-AFFINITYコードは、本来一連のモジュールを用いて解析を行う様に設計されているが、個々のモジュールを単独に用いることもできる。

例えば、既に作成されている透水係数場について流動解析のみをやり直したい場合、コードを起動後すぐにFlow Solverパネルを画面に引き出し、Read Fractal Inputボタンをクリックし、ブラウザを用いて既存のフラクタル透水係数場を検索してそのファイル名(例えばtest 1 frac. ucd)をクリックした後、READ FILEボタンを押す。この操作によって、対応する透水係数場が画面に現れ、これに対応する流動解析が可能となる。

同様に、Particle TrackingパネルのRead Flow Inputモジュールを用いて既存の流動解析



図2.2-1 モニター位置の指定

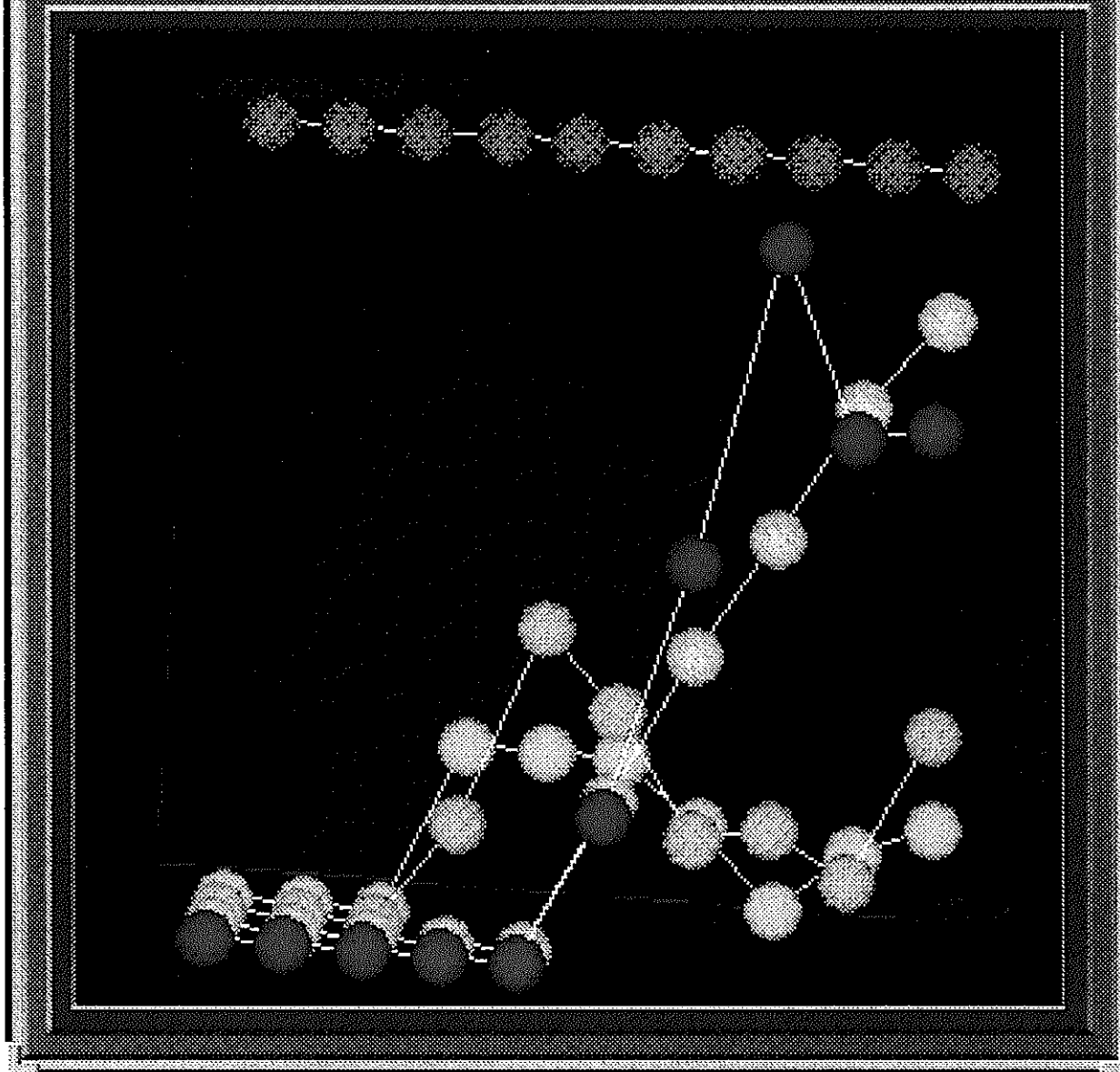


図2.2-2 各モニター点での濃度変化

結果ファイル（圧力分布、ダルシー流速場;例えばtest1_flow.ucd）を呼び出すことによって、これに対する物質移動解析をやり直すことができる。

(4)複数のフラクタル透水係数場から成る領域の作成

MACRO AFFINITYコードを実際の性能評価に適用する際には、対象領域の全体が一定のフラクタルスケーリング則に従うことはむしろまれで、サイト自体が地質学的に異なる複数の地層から成る場合、あるいはこれに加えて人工バリアやその周囲のゆるみ域が含まれる場合が多い。この様な必要性に答えるために、今年度改良を加えたMACRO AFFINITY version 2.0では、複数のフラクタル小領域(Sub-Regions)から成る場を作成することが可能である。

フラクタル小領域を作成するためには、まずバックグラウンドとなる大領域を前述の方法により作成した後、Generate Sub-Regionsメニューを選択する。このメニューの例を図2.2-3に示す。このメニューでは、まず作成する小領域の名前をタイプし、次にその形状を円、楕円、あるいは長方形の中から選択する。図2.2-3は、例として、東濃サイトの3a層のデータによってコンディショニングした不均質場をバックグラウンドとして、右下を斜めに横切る第二の領域を実際の4a層の位置及びデータと合わせて作成してある。この領域の作成は、小領域形状として長方形を選択し、これを回転させて元の領域との共通部分をとるようにして行った。また、4a層内の上方には、ゆるみ域と人工バリアとがそれぞれ楕円と円のオプションを用いて作成されている。これらの作成にあたっては、オプション選択後新たに現れるウインドウに適切な属性を与えることが必要となる。例えば、図2.2-3は円のオプションを使って人工バリアを定義しているところであり、円の属性として中心のx,y座標と半径とがタイプ入力されている。

この様にして作成された複数フラクタル場を図2.2-4に示す。

(5)溶質の崩壊を考慮したパーティクルトラッキング

MACRO AFFINITY version 2.0では、放射性核種の移行問題を解析するために、溶質の崩壊を考慮したパーティクルトラッキングを行うことが可能となっている。具体的な操作としては、Particle Inputメニューに於いて、

- ・ no decay (安定同位体)
- ・ decay (移行途中でのみ崩壊)
- ・ source decay (ソース及び移行途中のいずれでも崩壊)

のうちの一つを選択し、後二者については、対応する崩壊定数を入力することが求められる。上記のうち、decayとsource decayのオプションは、それぞれ物理的には溶解度限界放出と固化体浸出率律速放出に対応するものである。

これらの三つのオプションを用いて、(4)に述べた複合的フラクタル場(図2.2-4)の人工バリア中心からソースのパーティクル数100で 10^{10} 秒間連続放出した時点でのパーティクル分布をそれぞれ図2.2-5(no decay),図2.2-6(decay),及び図2.2-7(source decay)に示す。

(6)溶質の吸着を考慮したパーティクルトラッキング

MACRO AFFINITY version 2.0では、次のLangmuir型の吸着等温線に従う溶質の吸着・移行遅延を考慮することが可能である。

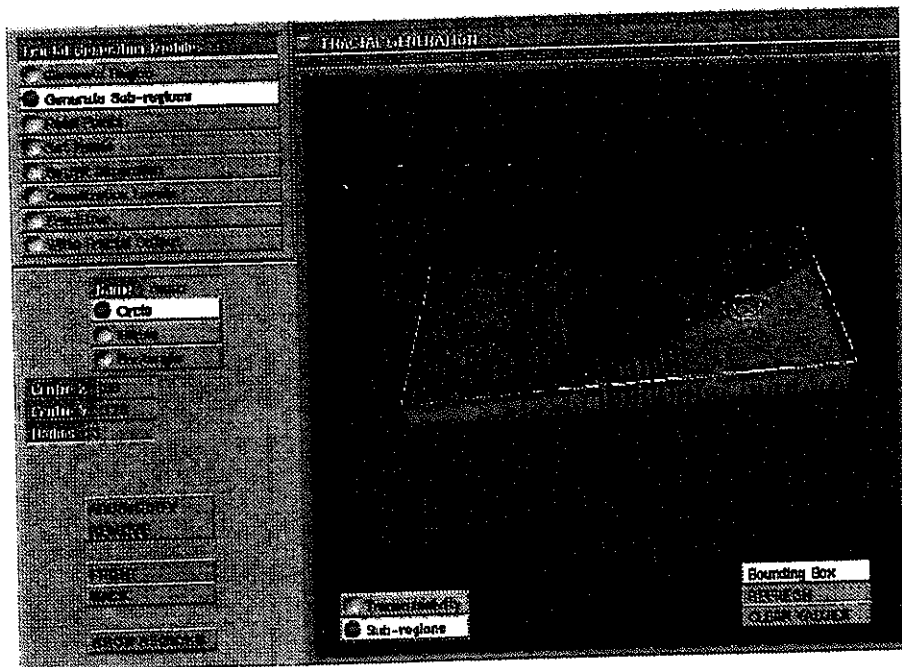


図2.2-3 Generate Sub-Regionsメニューの例

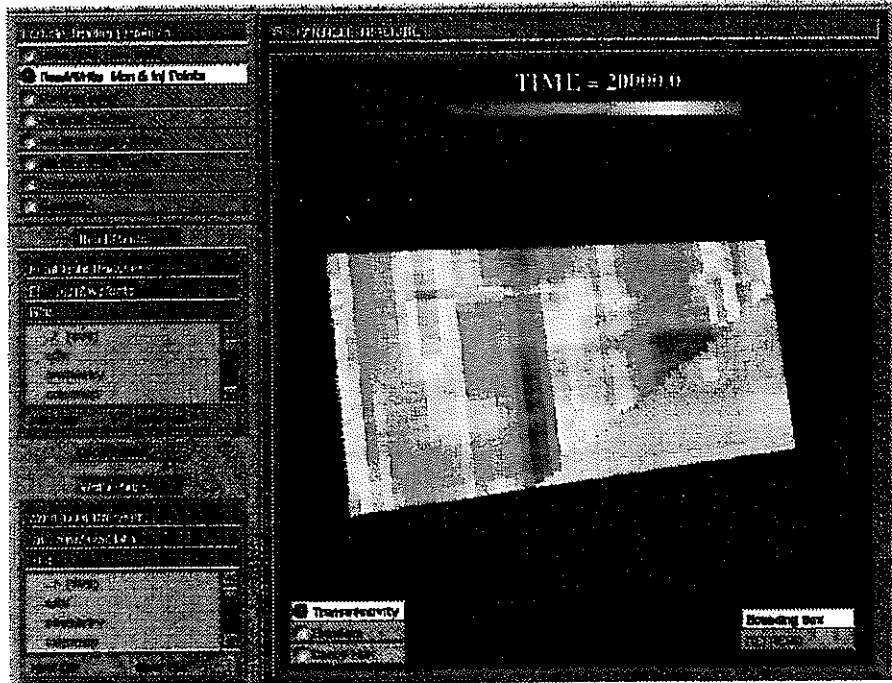


図2.2-4 複数フラクタル場の例

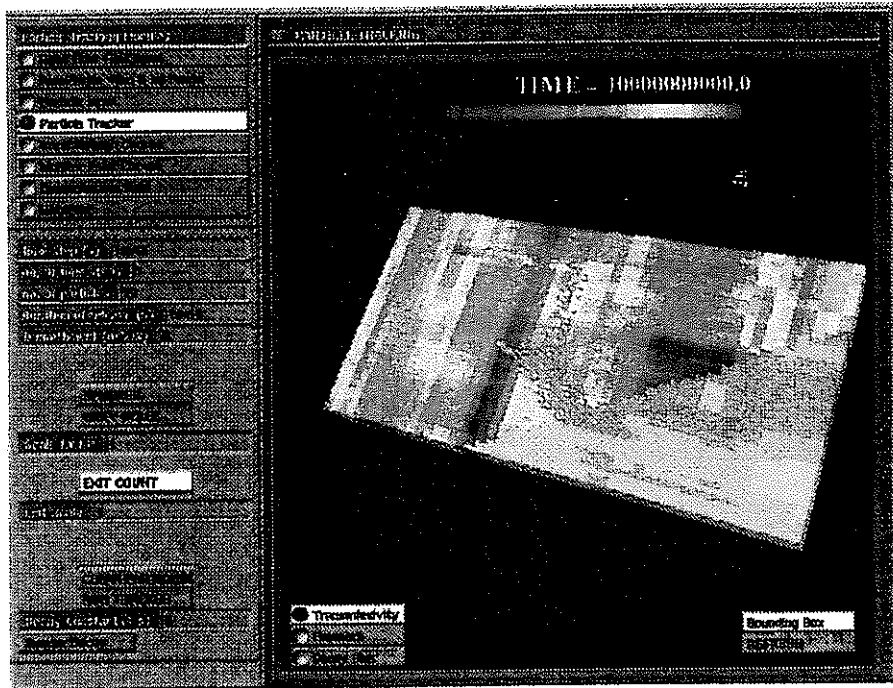


図2.2-5 複合的フラクタル場におけるパーティクル分布 (no decay)

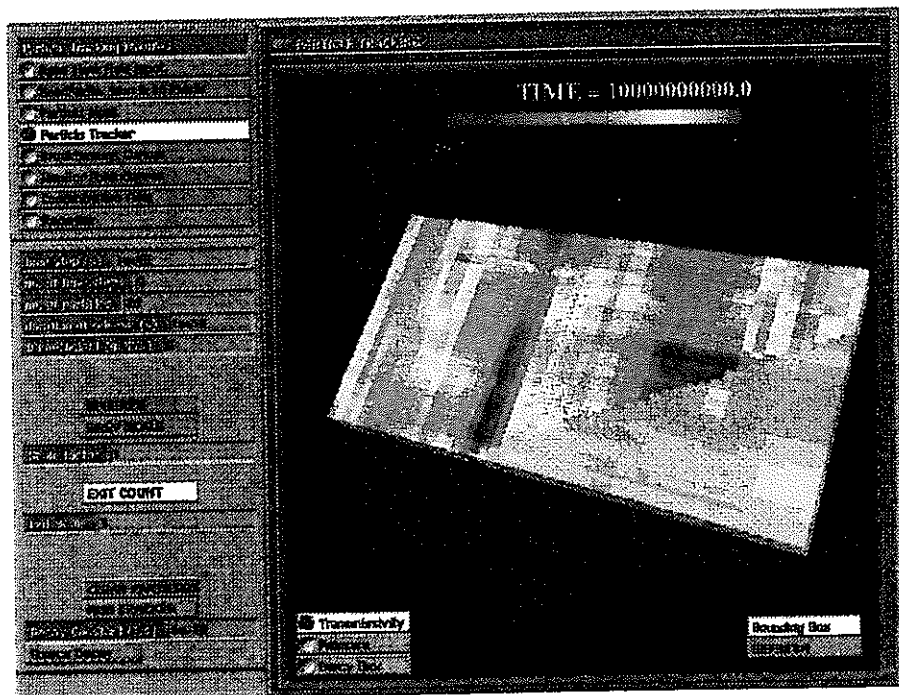


図2.2-6 複合的フラクタル場におけるパーティクル分布 (decay)



図2.2-7 複合的フラクタル場におけるパーティクル分布 (source decay)

$$S = \frac{aC}{1+bc}$$

但し、
S;吸着した溶質濃度
C;溶質の液相中濃度
a,b;定数

ここで、定数bは非線型性の程度に関するパラメータであり、b=0の場合、上式は線型吸着(Henry型)に帰着し、もう一つの定数aは線型吸着におけるKdと等価なものとなる。逆に、b>>1の場合には、液相濃度の上昇に従い、Sが飽和吸着量a/bに漸近する挙動を示すものとなる。

上式によって表現される吸着によるトレーサ移行の遅延は、パーティクルトラッキング上では見かけの流速、及び拡散係数をそれぞれ遅延係数で除することによって表現される。この設定の下に前出のパーティクルトラッキングアルゴリズムを用いることにより、当該セルに於けるパーティクルの滞留確率は遅延係数倍されることとなる。

さて、非線型吸着の効果を含んで遅延係数Rdを定義するために、線型の場合とのアナロジーから、

$$Rd = \frac{S}{C} = \frac{a}{1+bc}$$

と表現する。この式によって、Cの増加と共に吸着量が飽和に近づくことに伴い、遅延効果が減少することが表現される。ここで、Rdの表現がCを含んでいることから、これはCの関数であり、新たなパーティクルトラッキングアルゴリズムは、各時刻、各位置でのパーティクル数を記録し、これに対応して各セルでのRdを算出するという手続きを必要とすることとなる。

吸着を考慮したパーティクルトラッキングを行うための具体的手順としては、Particle InputのメニューにおいてSorptionウインドウを開き、定数a,b及びConversion Factorを入力することが必要である。Conversion Factorは、上述した様に吸着特性(広義の遅延係数)がCに依存するため、パーティクル密度を濃度に換算する際に必要となるデータである。

3. 不均質多孔質媒体中物質移動試験についての解析

昨年度の研究においては、不均質多孔質媒体中物質移動試験装置を用いた予備試験に対応して、主としてトレーサ（染料）の全体的な分散挙動がMACRO-AFFINITYコードを用いて整合的に説明し得るか否かという観点から解析を行った。この結果、実験とは独立して行った計算のパーティクル挙動と試験における染料の振る舞いとが巨視的にかなり良い一致を示す物であることが確かめられた。

以上の成果を踏まえ、今年度は、予備試験結果を踏まえて改良された計画（特に、藻の発生による透水性低下の影響を軽減すること）に基づき行う本試験に関して同様の解析を実施するとともに、今年度のMACRO-AFFINITYコードの改良点であるモニタリングポイントの濃度経時変化出力機能を用いて、試験装置内の各電導率測定点での濃度変化についても解析を行う物とする。

今年度解析対象とした不均質系は、等方的でチャンネルの分岐と合流とを含むもの、及び水平方向により強い相関構造をもつ（即ちより小さいフラクタル次元をもつ）異方的なもの、の二つである。それぞれの系についての供試体設計、流動解析、パーティクルトラッキングによる物質移動挙動の解析結果について以下にまとめる。

3.1 等方的不均質場についての解析

3.1.1 供試体設計

今年度作成した供試体の不均質部分（壁効果を抑制するために設けられた外周部の難透水性層及び入口部の流れが一様になるように設置した上流側難透水性層（トレーサ注入点を含む）を除いた本体部分）の透水係数分布を図3.1.1-1に示す。

既に述べた様に、今回の試験の主眼は、一旦分岐してから再び合流するようなチャンネルの存在についてMACRO-AFFINITYコードが試験結果を十分再現できるか否かを明らかにすることである。このために、図3.1.1-1に示した不均質場には中央付近に比較的透水性の低い領域が設けられ、この部分を上下に迂回するチャンネルが形成される様に設計されている。

不均質場の作成にあたっては、昨年度の予備試験と同じくフラクタル次元を等方的に2.7とし、不均質性の構成単位となるガラスビーズブロックの大きさを5cm×5cmとした。また、不均質性を表現するために用いた粒径の異なるガラスビーズの種類は6種類である。各ガラスビーズ単独での透水係数値を表3.1.1-1にまとめる。また、いずれのガラスビーズについても空隙率はほぼ同等であるため、0.4という共通の値を解析に用いている。

3.1.2 流動解析

前節で述べた不均質場は、1m×2mのフローセル内に6種類のガラスビーズを5cm×5cmのブロック状（20×40=80ブロック）に充填することによって作成される。そして、壁効果と入口・出口部の流れの偏りを抑止するために設けられた難透水性層と焼結金属板、及びトレーサ注入部を含めて試験装置が構成されることとなる。

水理的な境界条件としては、上下端をno flux、左右端間に0.3mの水頭差を設け、トレーサ注入部の注入圧力は0.6mに設定するという前回の予備試験と同じものを採用した。試験系の構成及び境界条件を図3.1.2-1に示す。

既に述べた様に、溶質の分散挙動を支配するものは、微視的な流速分布であり、従って

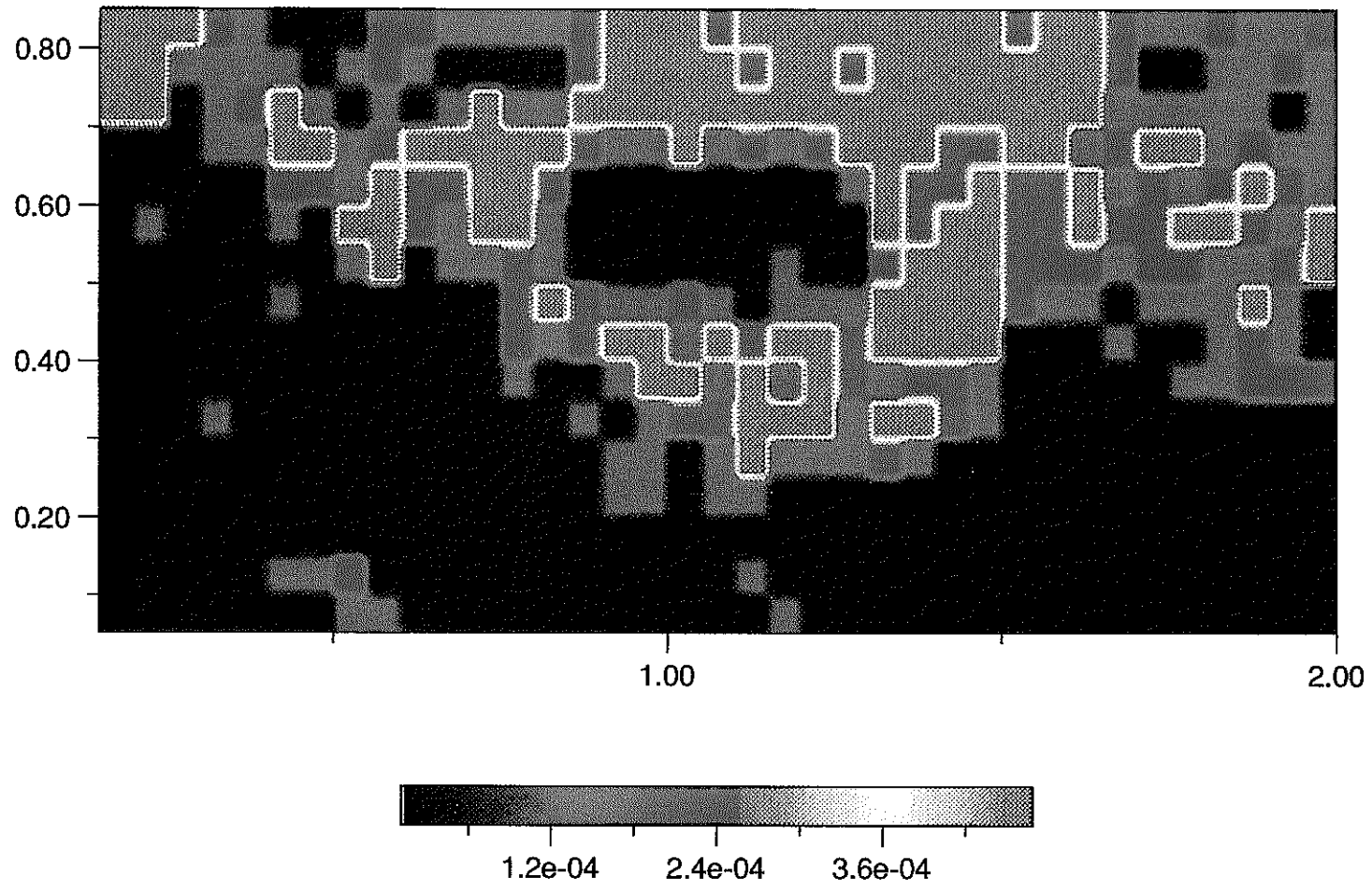


圖3.1.1-1 透水係數 (等方的不均質場)

表3.1.1-1 各ガラスビーズの透水係数値

1	1.16×10^{-4}
2	2.26×10^{-4}
3	3.68×10^{-4}
4	1.30×10^{-3}
5	2.54×10^{-3}
6	4.72×10^{-3}

*単位は [m/s]

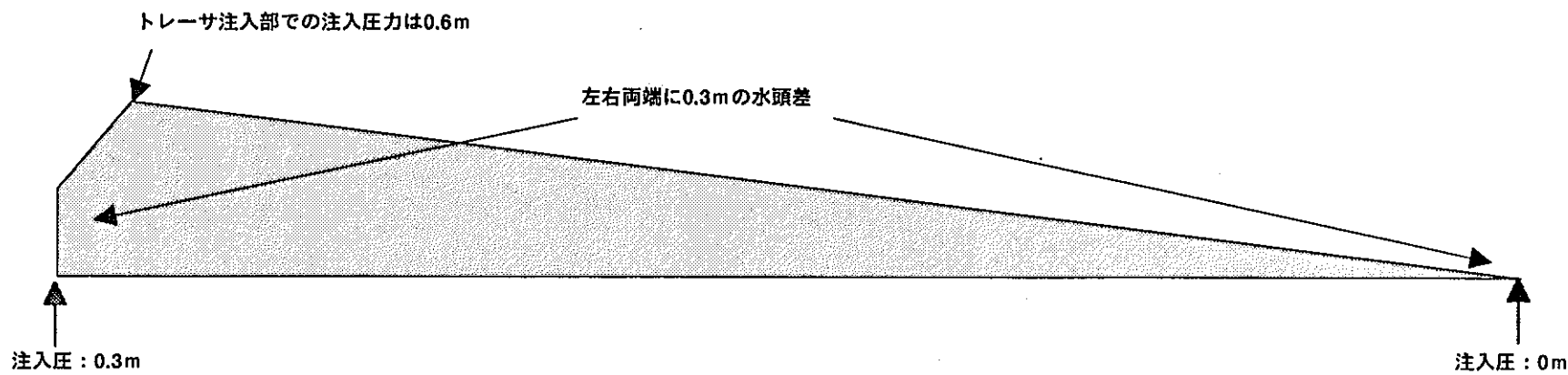
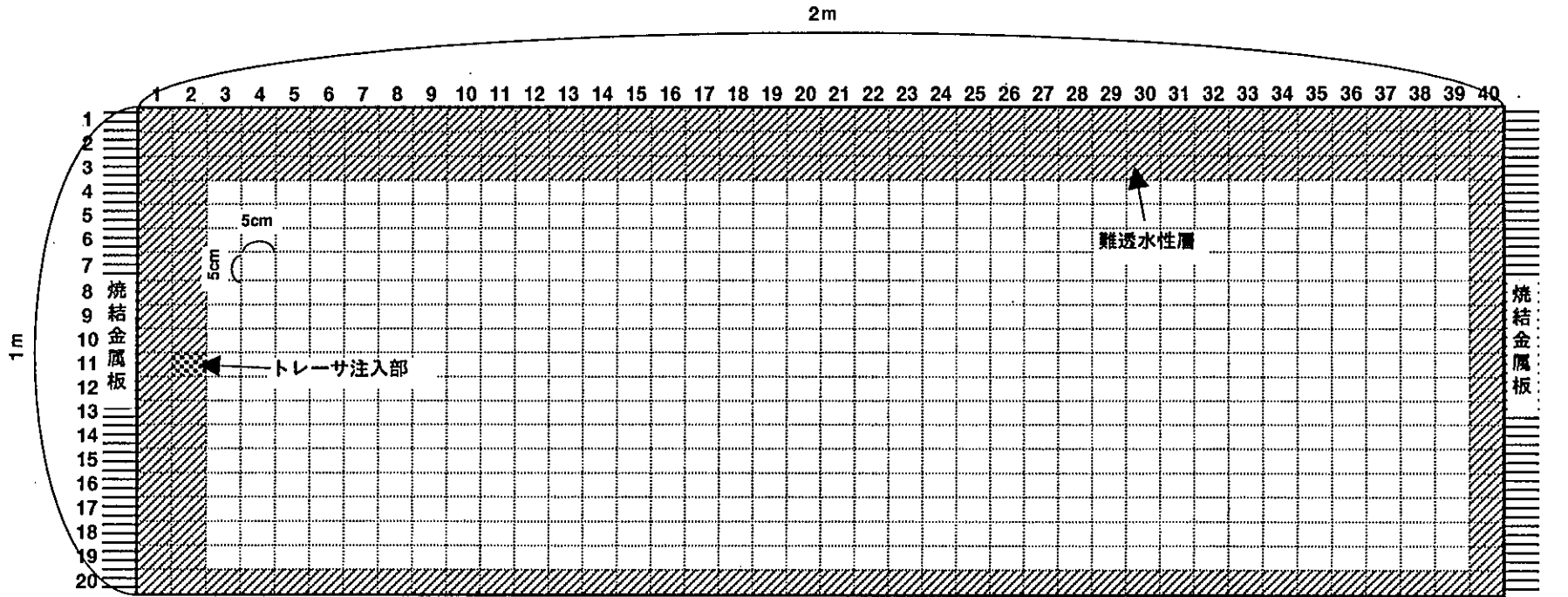


図3.1.2-1 試験系の構成及び境界条件

パーティクルトラッキングに先立ち行う流動解析では十分な精度と解像度とを以て流速分布を解析する事が必要となる。そこで、解析上のグリッドの大きさとしては、5cm角のガラスビーズブロックを $3 \times 3 = 9$ 等分した1.67cm角のものを用いることとした。つまり、解析上のグリッド数は、全体で7,200個となる。また、トレーサ入口部の詳細については、トレーサ注入部がチューブの下流側にスリットをあけることによって設けられていることから、注入部の上下及び上流側に位置する3つのブロックを事実上非透水性 (10^{-10} m/s) と設定した (図3.1.2-1 参照)。

以上の設定の下に行った流動解析の結果を、図3.1.2-2 (ダルシー流速分布) 及び図3.1.2-3 (圧力分布) に示す。設計時の意図通り、二つのチャンネルの分岐と合流とが生じていることはこれらの図からも明らかである。

3.1.3 物質移動解析

3.1.2にまとめた流動解析結果に基づき、この流速場の上でのトレーサの移行挙動をパーティクルトラッキングによって解析した。解析にあたっては、トレーサ注入部のパーティクル数を100とし (これは注入液のトレーサ濃度には該当しない。この点については後述する。)、タイムステップ900秒、合計10タイムステップ (解析期間; 9,000秒 = 150分) の設定で解析を行った (表3.1.3-1参照)。また、トレーサ注入は解析終了まで連続的に行う (連続注入モード) ものとした。

系全体でのトレーサの移行挙動を、各タイムステップでのパーティクル分布 (図3.1.3-2) に示す。パーティクルは、二つのチャンネルを有する流動場に従い中央付近の難透水性領域を迂回して二つの経路をたどるが、チャンネル合流部以降は一つの経路に集中することがわかる。

下流側境界での破過曲線を図3.1.3-3に示す。比較的早い時間における立ち上がりは、速いチャンネルによる寄与と考えることができる。

次に、各電導率測定個所における濃度測定値と比較するために、解析領域内で該当する位置にモニタリングポイントを指定し、ここでのパーティクル密度の変化からトレーサ濃度情報を推定するための解析を行った。指定した測定点の番号と位置とを図3.1.3-4に示す。パーティクルトラッキングにおいては、事実上フラックス指定入力となされるために、設定値の100という数値は上述したように濃度と対応づけられる量ではない。トレーサ原液の濃度を解析上のパーティクル密度に対応づけるために、以下の計算を行った。

まず、流動解析の結果から単位時間 (1秒間) のトレーサ液注入量は 4.28×10^{-7} m³/s である。これに対して、パーティクルの注入速度は、38.2 particles/s である。つまり、このことから注入時点での (原液としての) トレーサ濃度に対応するパーティクル密度は 8.93×10^7 particles/m³ となる。また、各グリッド内の水の体積は 1.11×10^{-5} m³ であることから、この濃度は換算すると 991 particles/grid となる。以下、このパーティクル密度を基準として規格化したパーティクル密度を規格化濃度として解析結果をまとめる。

既に述べた様にガラスビーズブロックはそれぞれ9つの解析上のグリッドから成っているため、計算されるパーティクル密度はブロック内でも異なる可能性がある。そこで、一つのブロック内の5つの点 (測定点39~43) について規格化濃度の比較を行った結果を図3.1.3-5(1)に示す。各点でのばらつきは100%を上回るものとなっているが、これはこの特定のブロックが丁度プリュームの境界上に位置しているためである。これに対して、プリューム内部に位置するブロックにおいては、各点でのばらつき (相対値) は約10%にあ

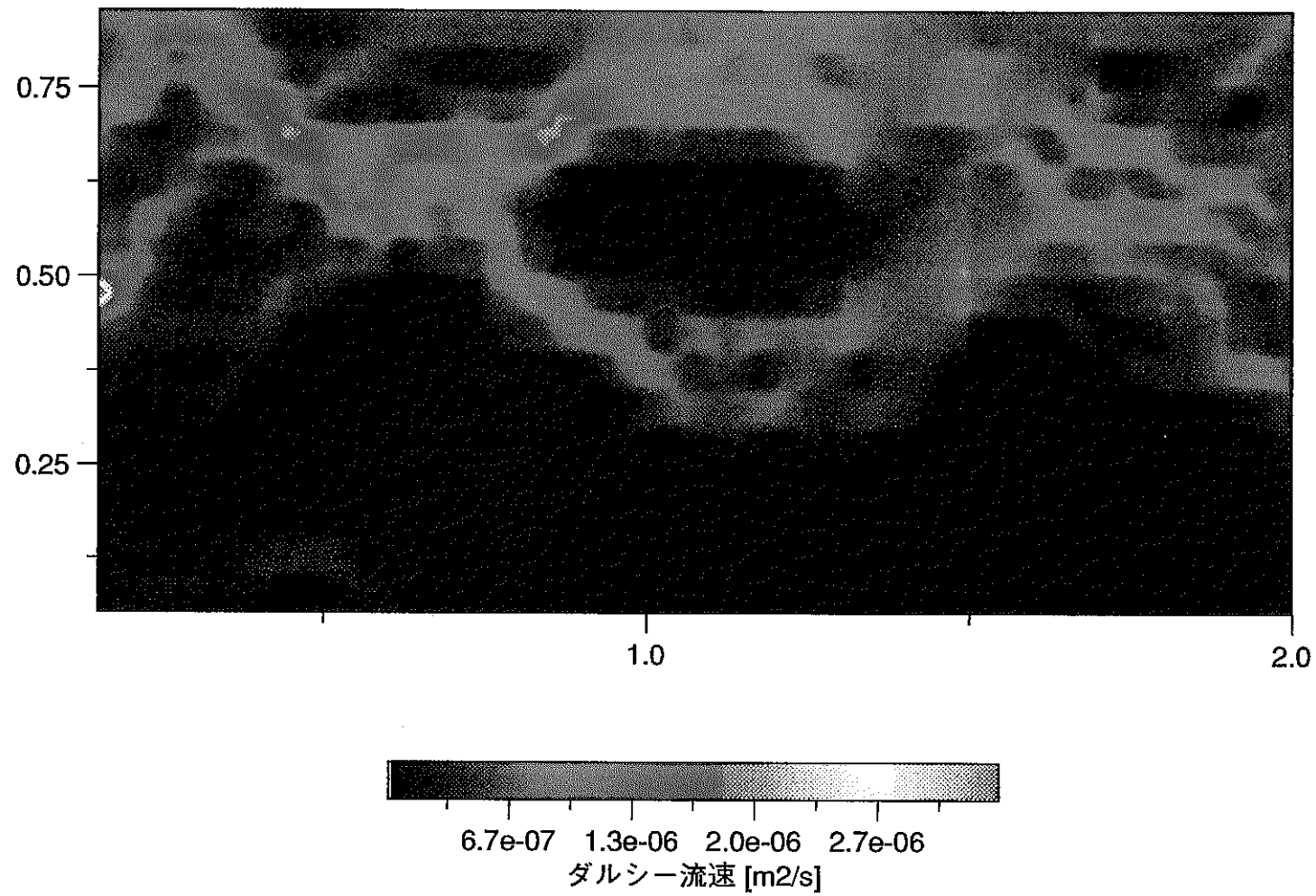


図3.1.2-2 等方的不均質場における流動解析結果（ダルシー流速分布）

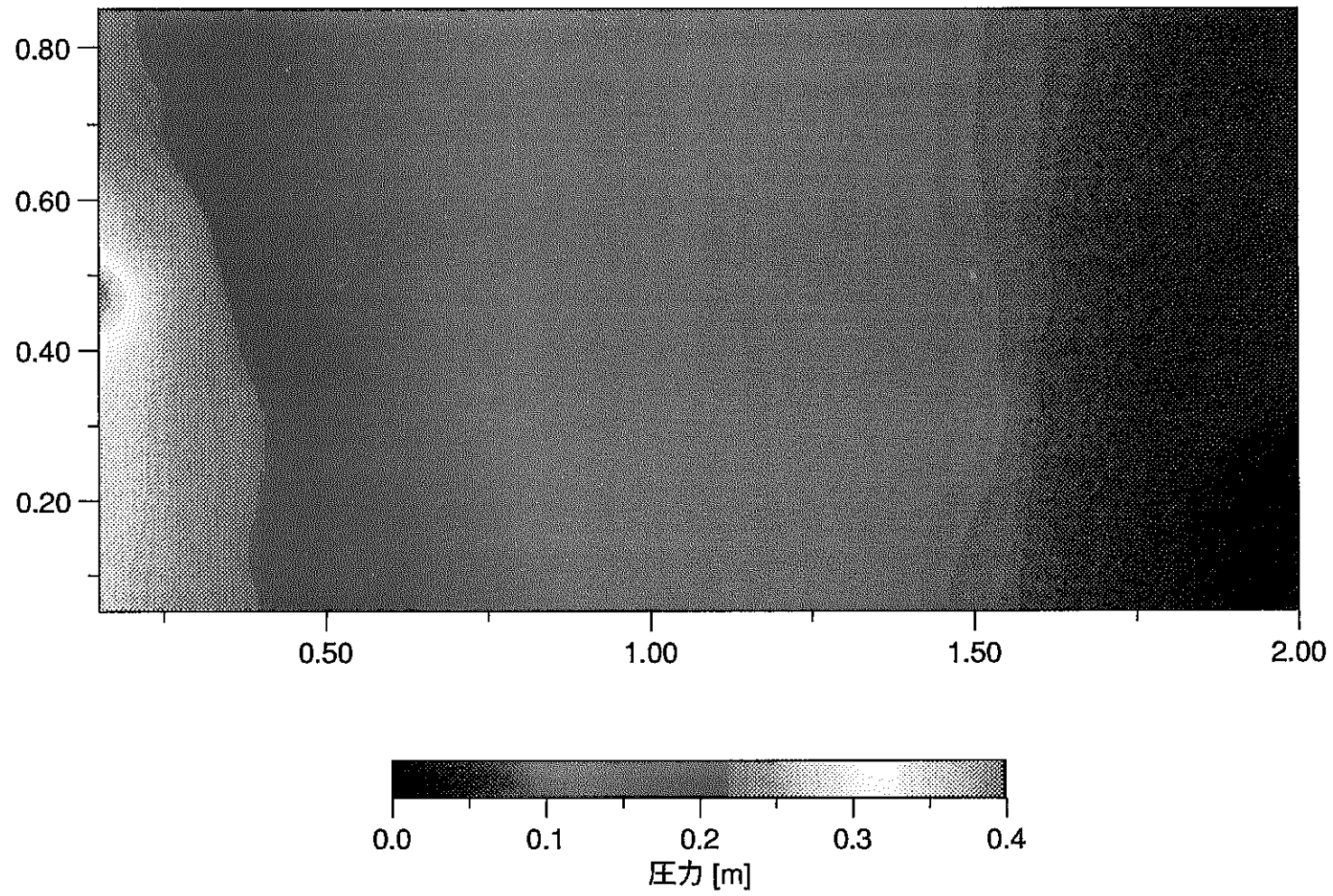


図3.1.2-3 等方的不均質場における流動解析結果（圧力分布）

表3.1.3-1 解析条件

タイムステップ	900秒
タイムステップ数	10
初期にトレーサ注入部に置かれるパーティクル数	100
トレーサ注入の継続期間	連続注入
分子拡散係数	0 [m ² /s]

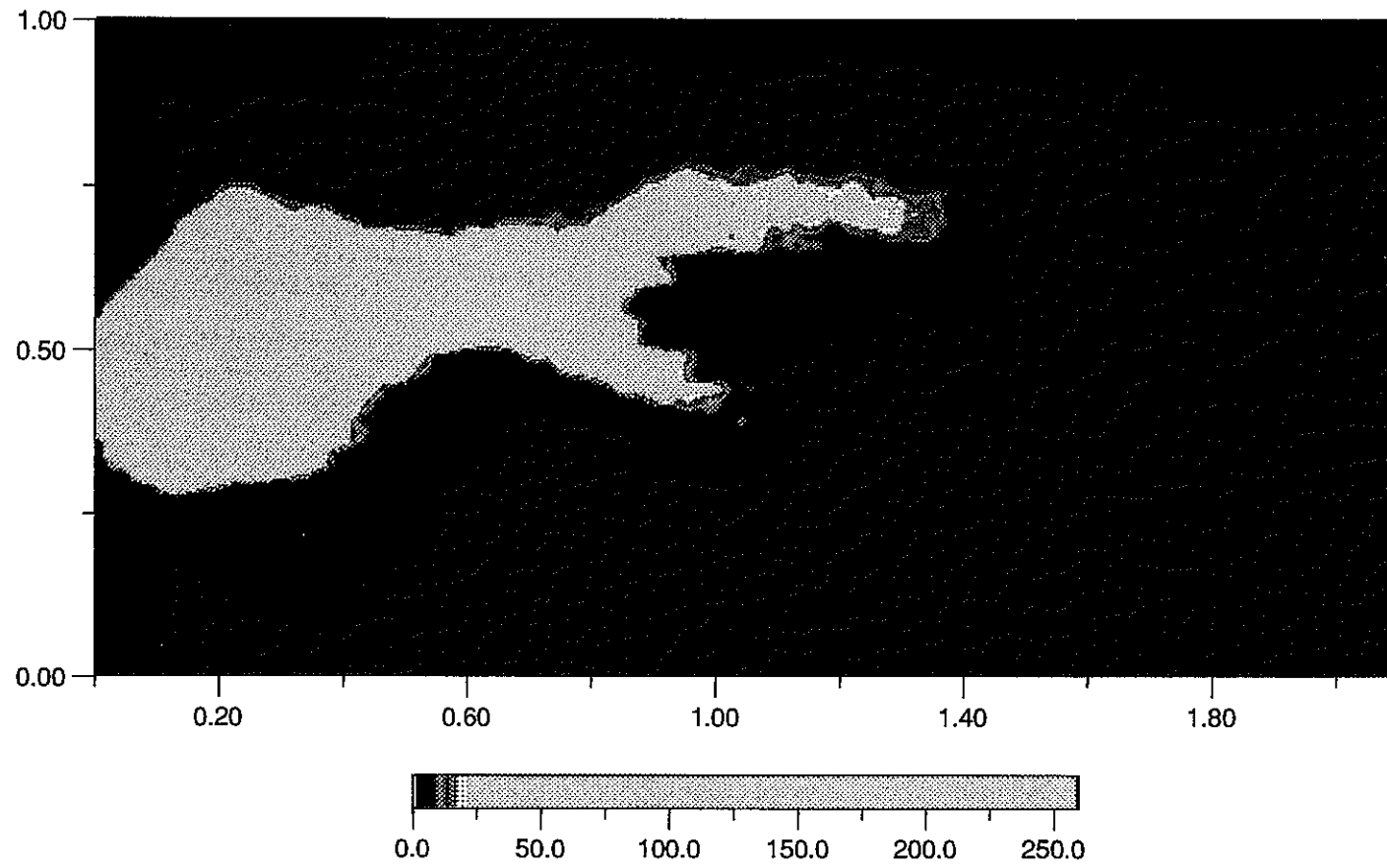


図3.1.3-2 各タイムステップでのパーティクル分布 (60分後)

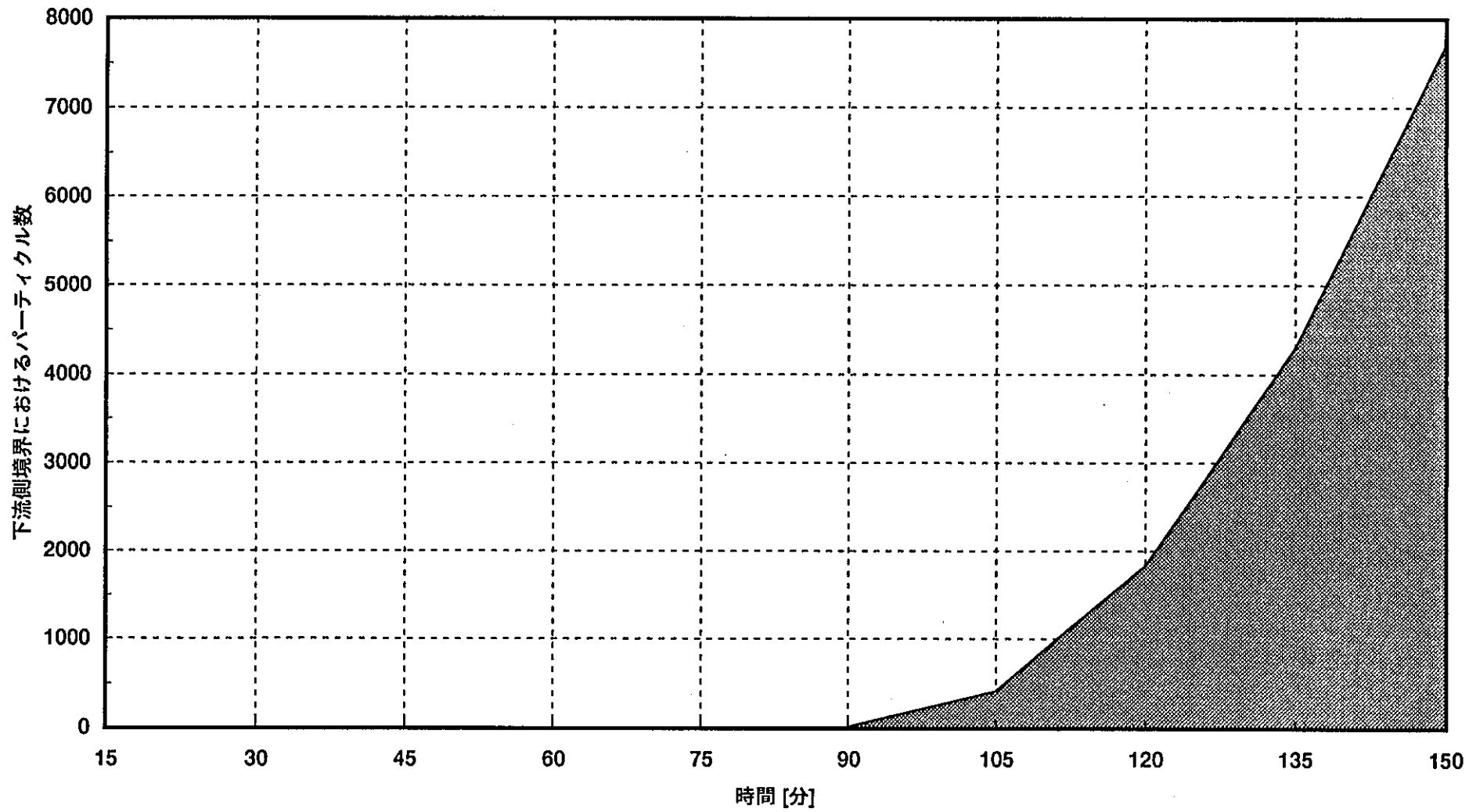
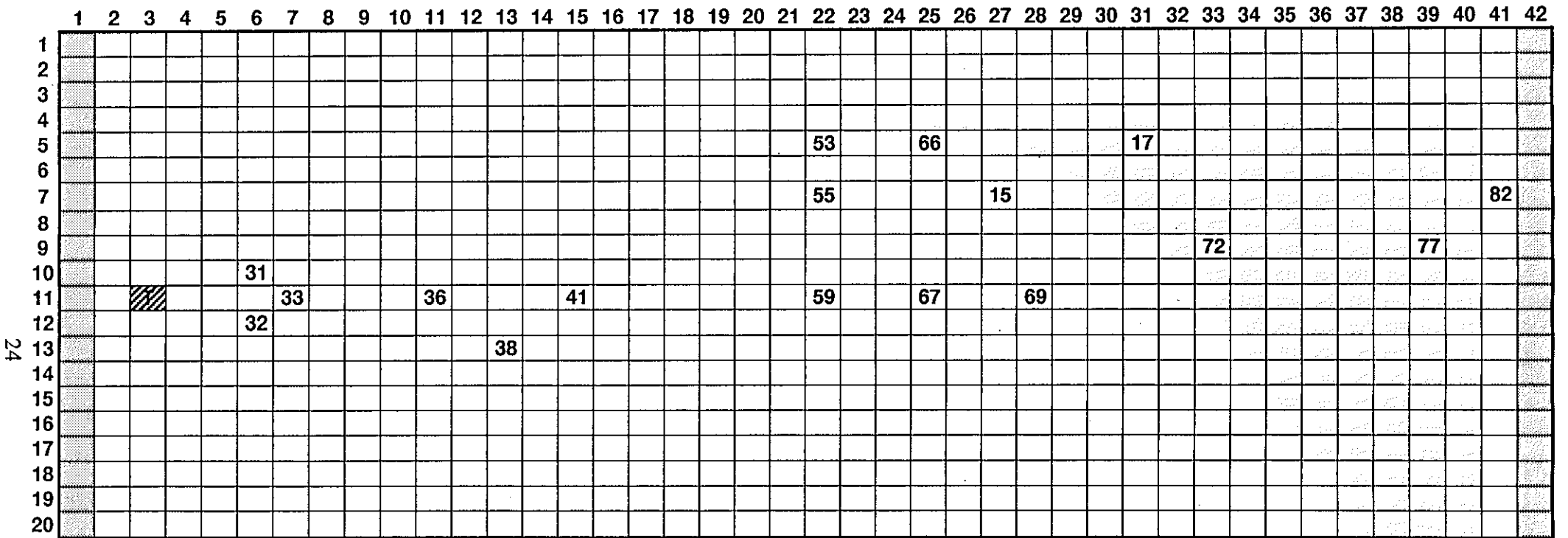


図3.1.3-3 下流側境界での破過曲線





 ...トレーサ注入点
 ...焼結金属板

図3.1.3-4 指定した測定点の番号及びその位置

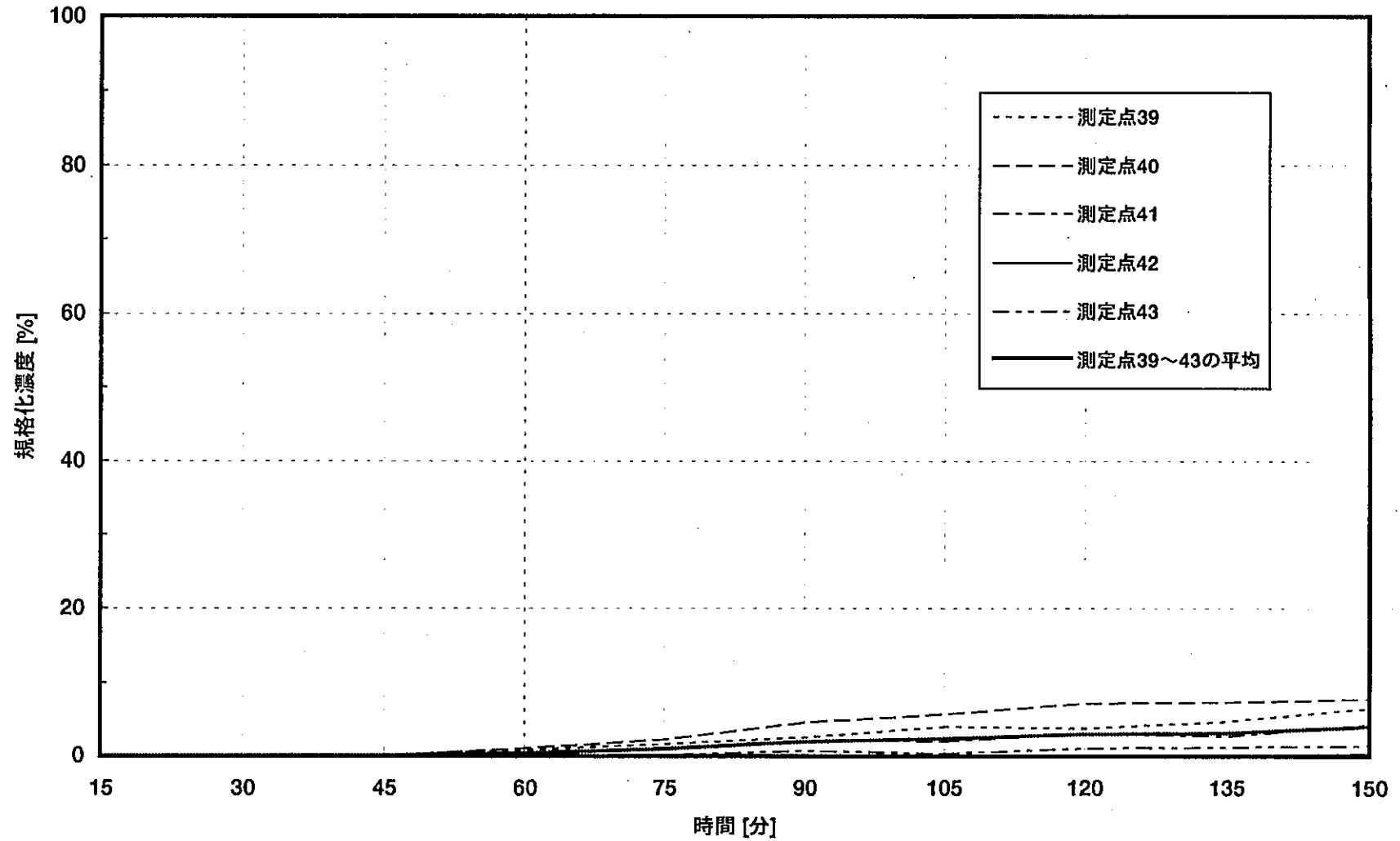


図3.1.3-5(1) 規格化濃度の比較 (測定点39~43)
(等方的不均質場)

ることがわかる (図3.1.3-5(2))。この相対誤差は、プリュームの境界上にある様な限られた点を除いて、解析と試験の比較において考えるべき誤差を代表する物と考えることができる。

以上の準備に基づき計算した各測定点での規格化濃度の時間変化の例を、図3.1.3-6にまとめる。図中のエラーバーは上記の検討に基づく10%の相対誤差に対応している。

3.2 異方的不均質場についての解析

3.2.1 供試体設計

異方的なフラクタル場 (接線管理の手法による) によって作成した供試体不均質部の透水係数分布を図3.2.1-1に示す。ここでは、水平方向のフラクタル次元を1.4、垂直方向のフラクタル次元を1.9とすることによって水平方向により相関性の強い異方性が表現されている。また、ガラスビーズ特性については、3.1.1に述べた物 (表3.1.1-1参照) と同様に設定した。

この不均質場においては、水平方向に卓越した流路が形成され、ここでの速い移動と近傍の比較的遅い流動領域への浸入 (マトリクス分散) の効果を考慮して解析と試験の比較を行うことが主眼である。

3.2.2 流動解析

3.2.1に述べた不均質場について、3.1.2と同じ試験系の構成及び水理上の境界条件 (図3.1.2-1) を用いて流動解析を行った。結果を図3.2.2-1 (ダルシー流速分布)、及び図3.2.2-2 (圧力分布) に示す。これらの図から、水平方向に卓越した流路が形成されていることが明らかである。

3.2.3 物質移動解析

3.2.2に示した流速場において等方的な場と同様にパーティクルトラッキングによる物質移動解析を行った。パーティクルトラッキングの設定は、表3.1.3-1と同じである。なお、トレーサ注入期間としては、3.1.3と同じ連続注入モードとパルス (1タイムステップ=15分間) の二つを考えた。

(1) 連続注入モード

系全体でのトレーサの移行挙動を、各タイムステップでのパーティクル分布 (図3.2.3-1) に示す。パーティクルは主として水平方向の卓越した流路を経由するが、同時に周囲の比較的 low 透水の領域に分散により浸入しそこで停留する形になるものも含まれることが特徴である。

また、3.1.3に述べたものと同じ方法に基準パーティクル密度を計算した結果、トレーサ液注入速度 $5.84 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ とパーティクル注入速度 51.2 particles/s とから、 $973 \text{ particles/grid}$ と等方的な場の場合とほぼ同様の結果が得られた。次に、一つのブロック内の各グリッドにおけるパーティクル密度のばらつきを見たところ (図3.2.3-2)、3.1.3と同じ測定点 (39~43) がここではプリュームの境界線上にはないために、ブロック内の密度のばらつきは相対的に10%程度であることがわかる。

以上の基準濃度と誤差範囲とを踏まえて、各測定点での規格化濃度の時間変化をまとめた結果の例が図3.2.3-3である。

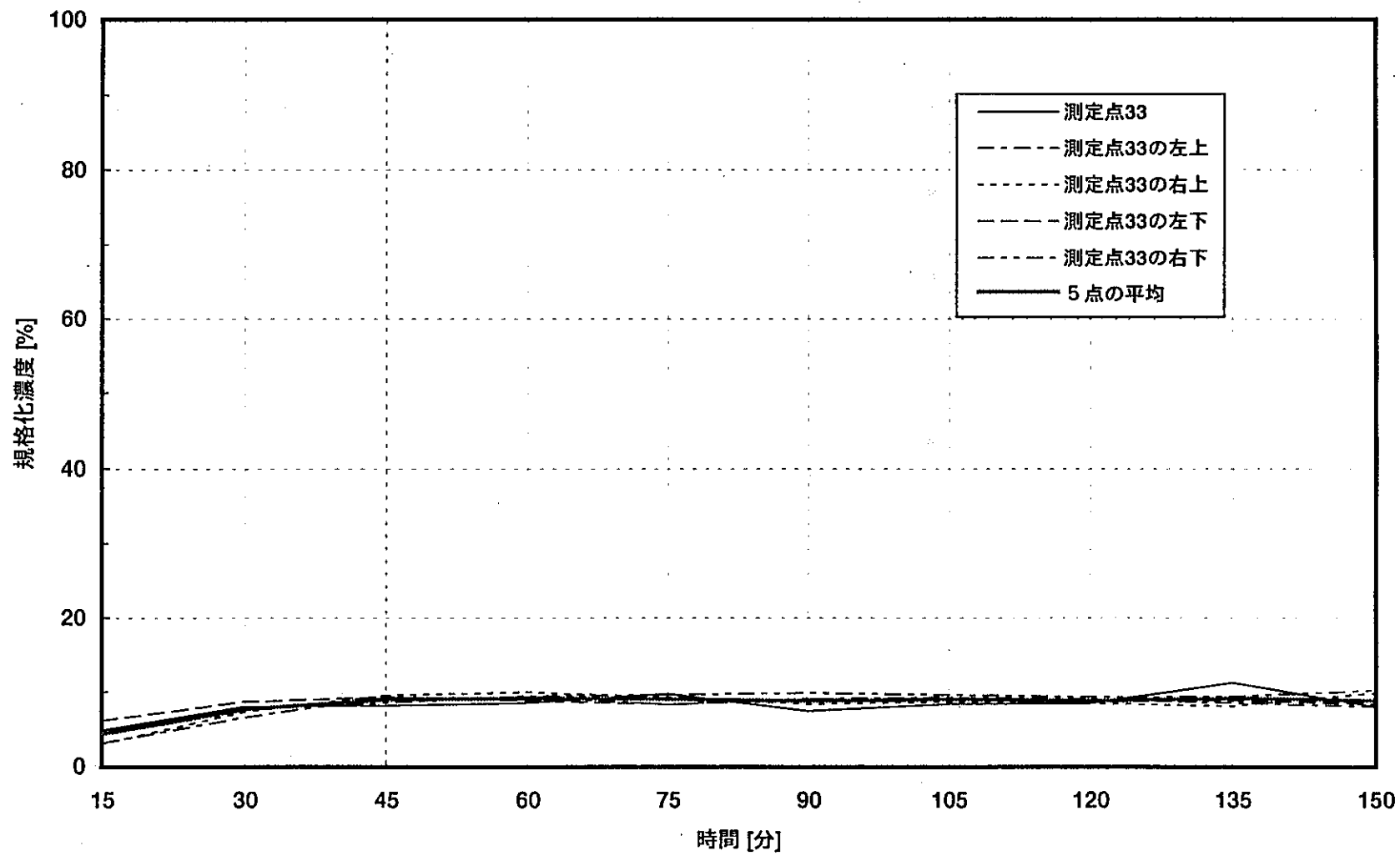
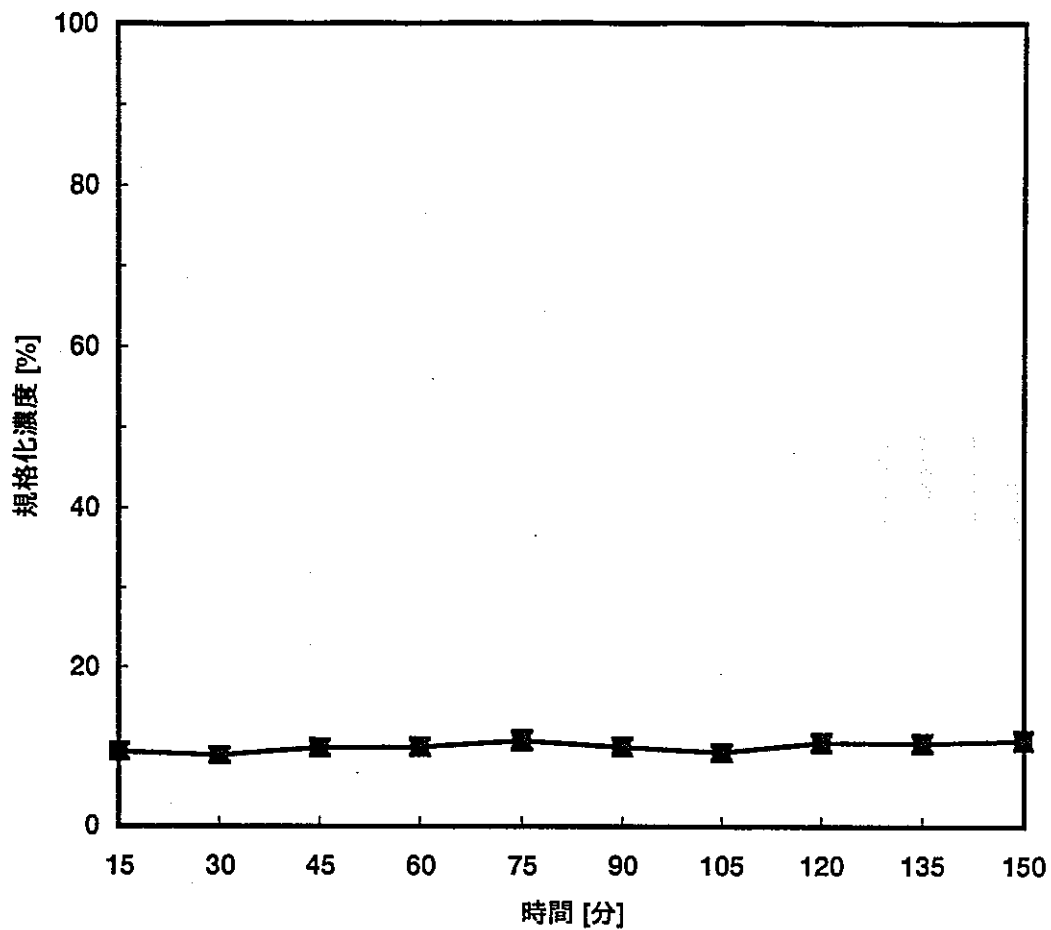
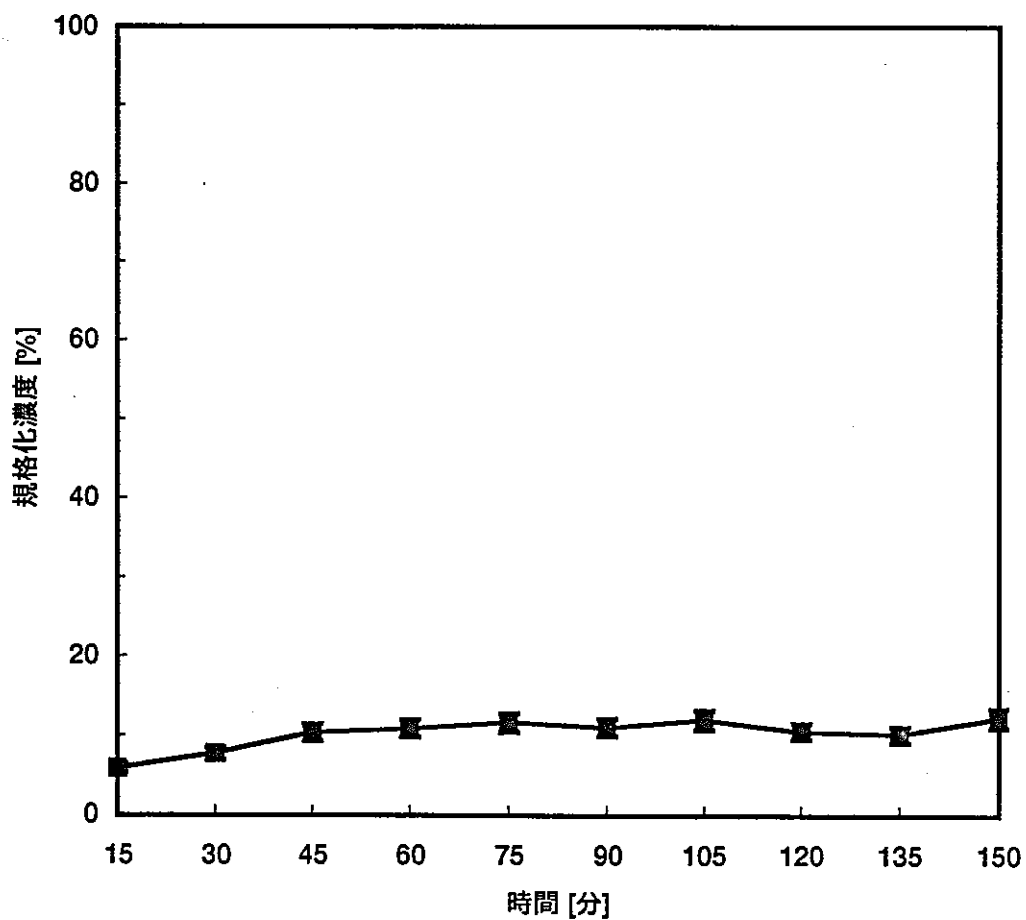


図3.1.3-5(2) 規格化濃度の比較 (測定点33の周囲)
(等方的不均質場)



No.31



No.32

図3.1.3-6 各測定点での規格化濃度の時間変化
(等方的不均質場)

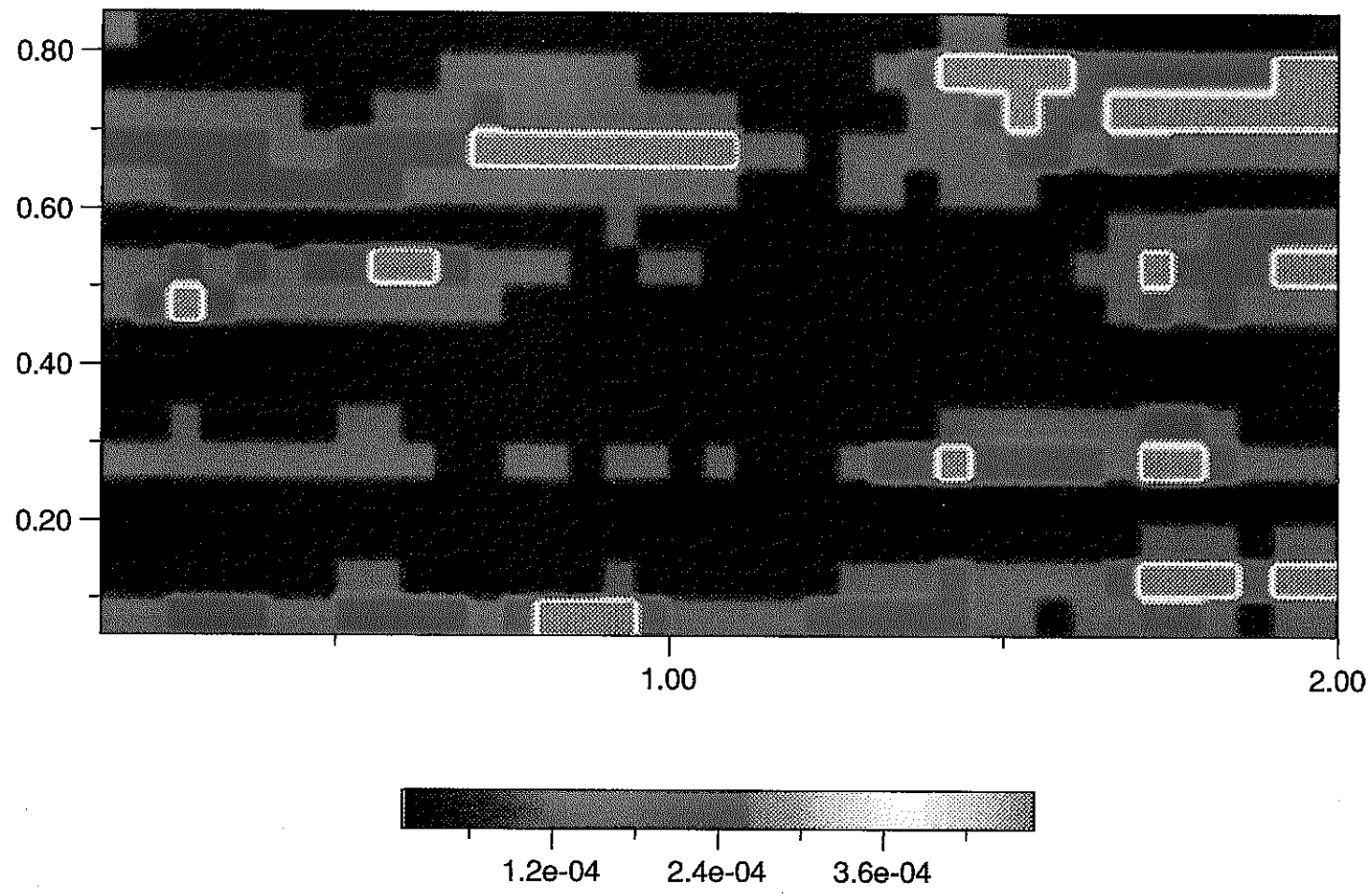


图3.2.1-1 透水系数 (異方の不均質場)

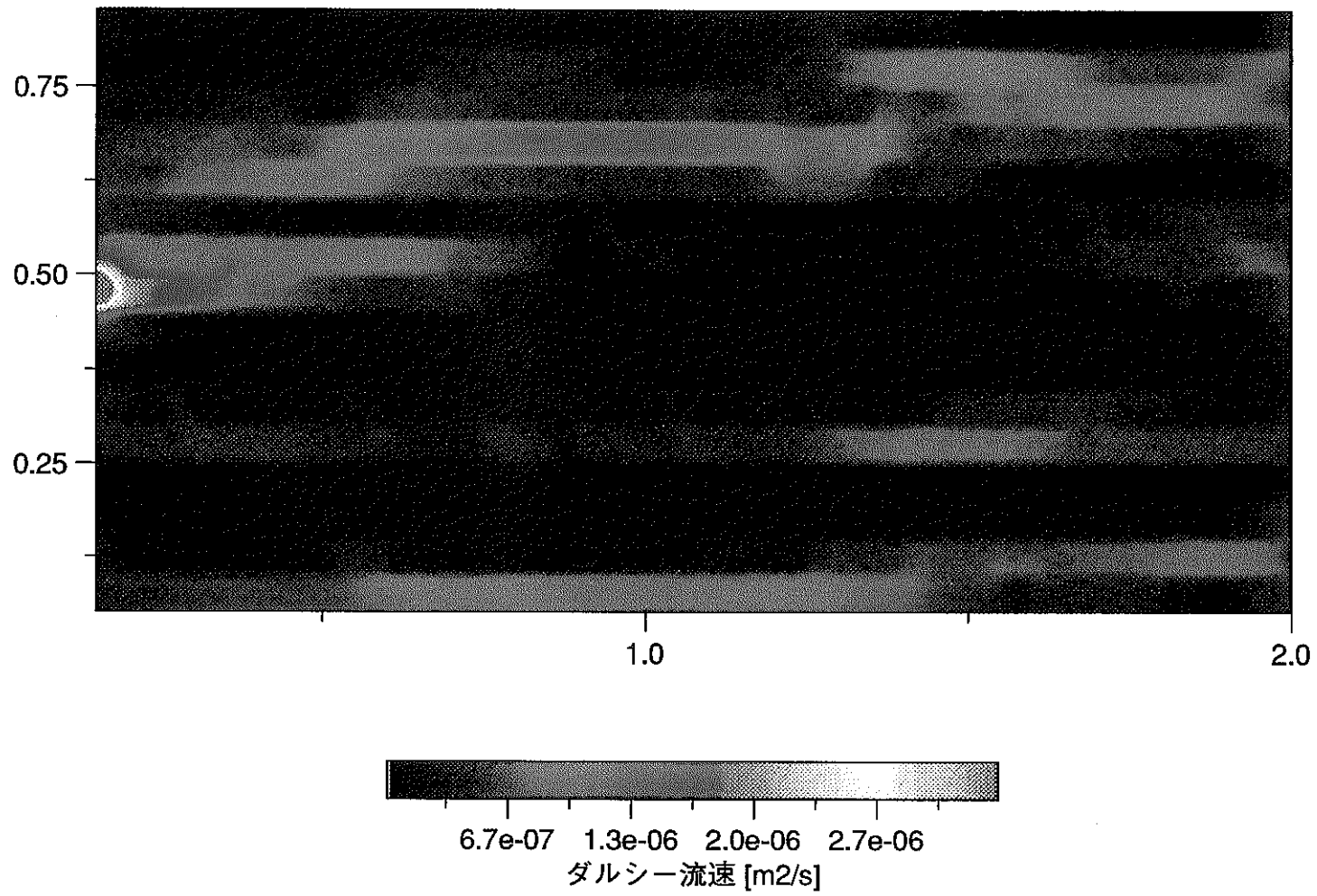


図3.2.2-1 異方的不均質場における流動解析結果（ダルシー流速分布）

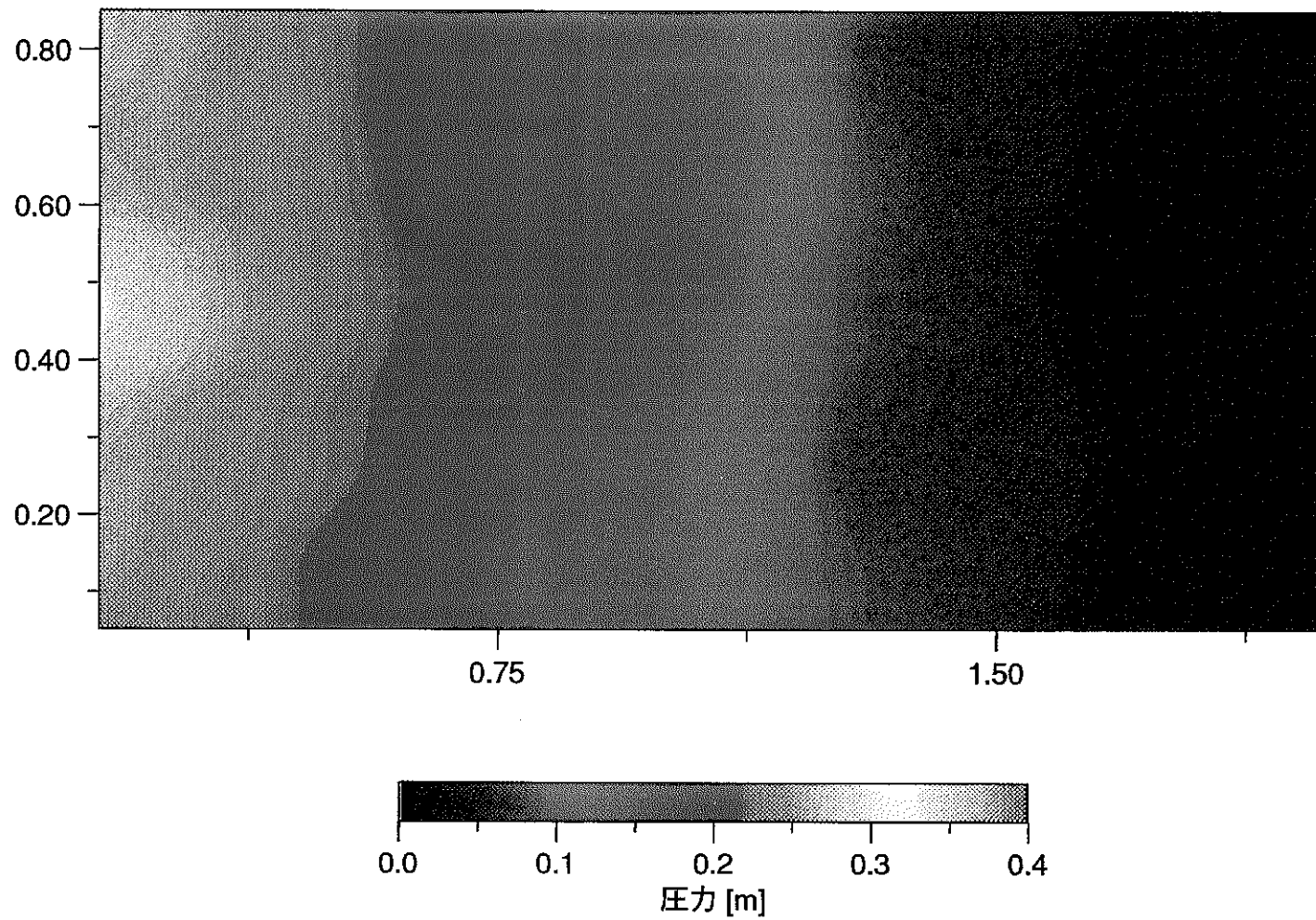


図3.2.2-2 異方的不均質場における流動解析結果（圧力分布）

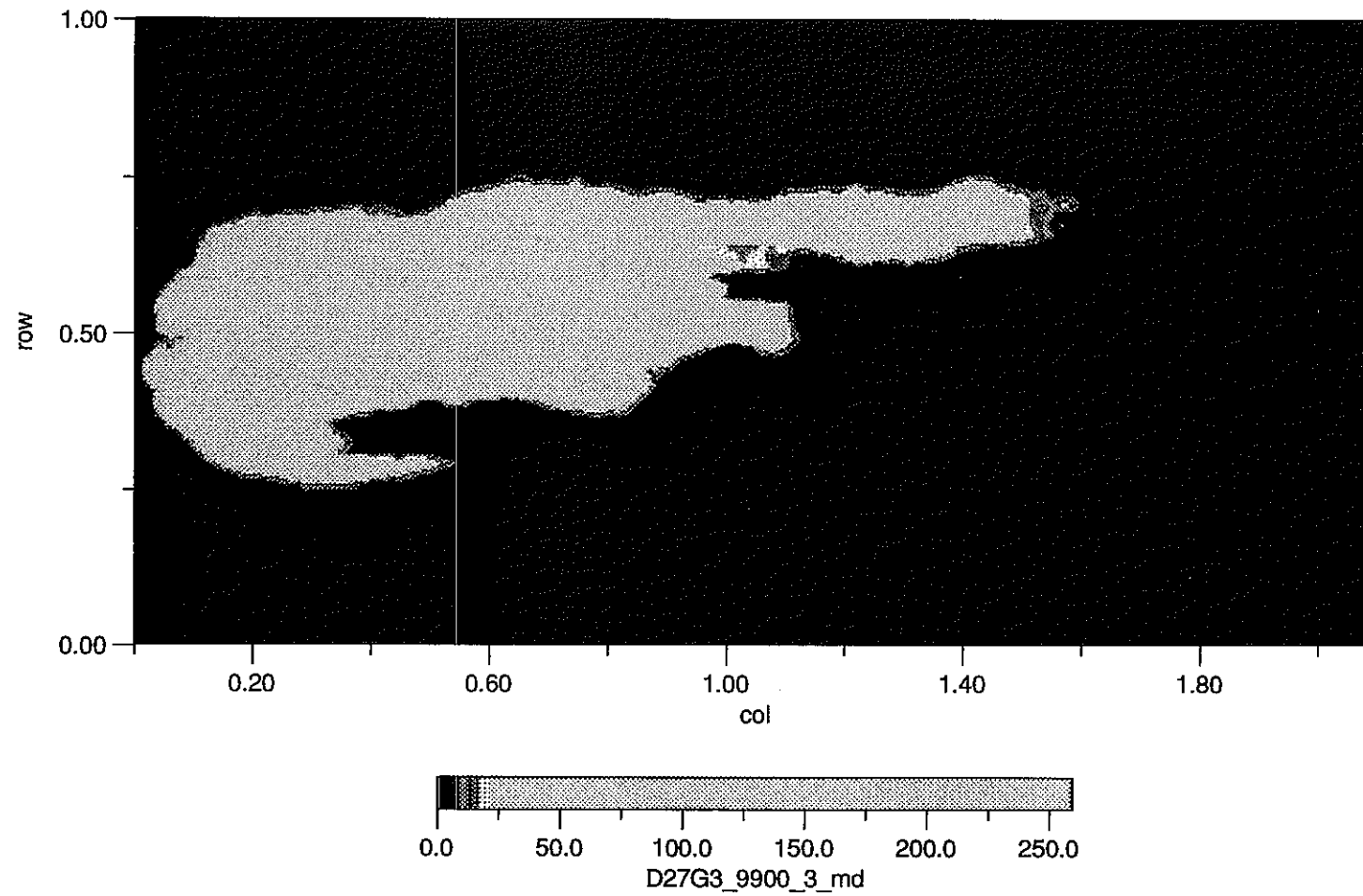


図3.2.3-1 各タイムステップでのパーティクル分布 (60分後)

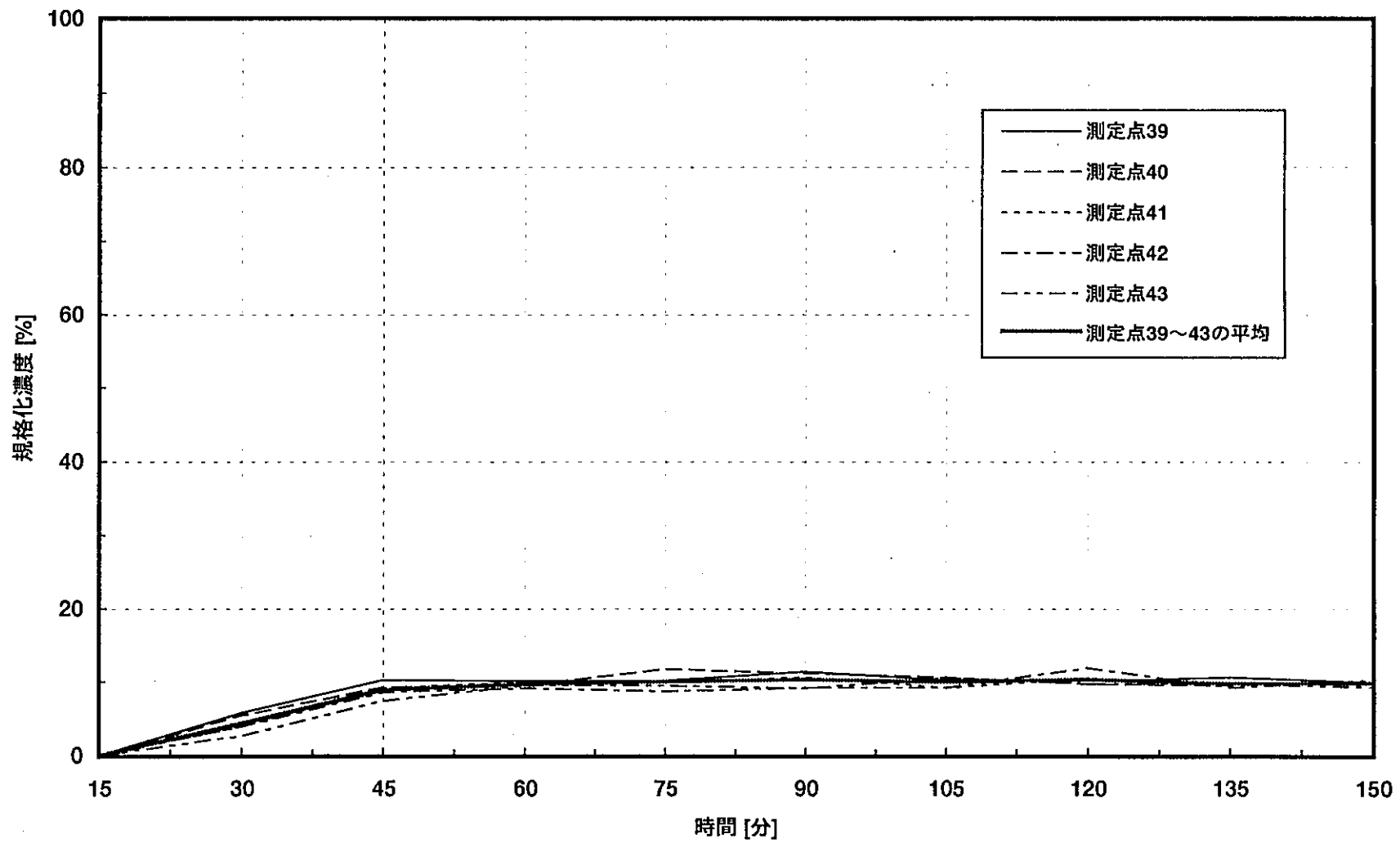
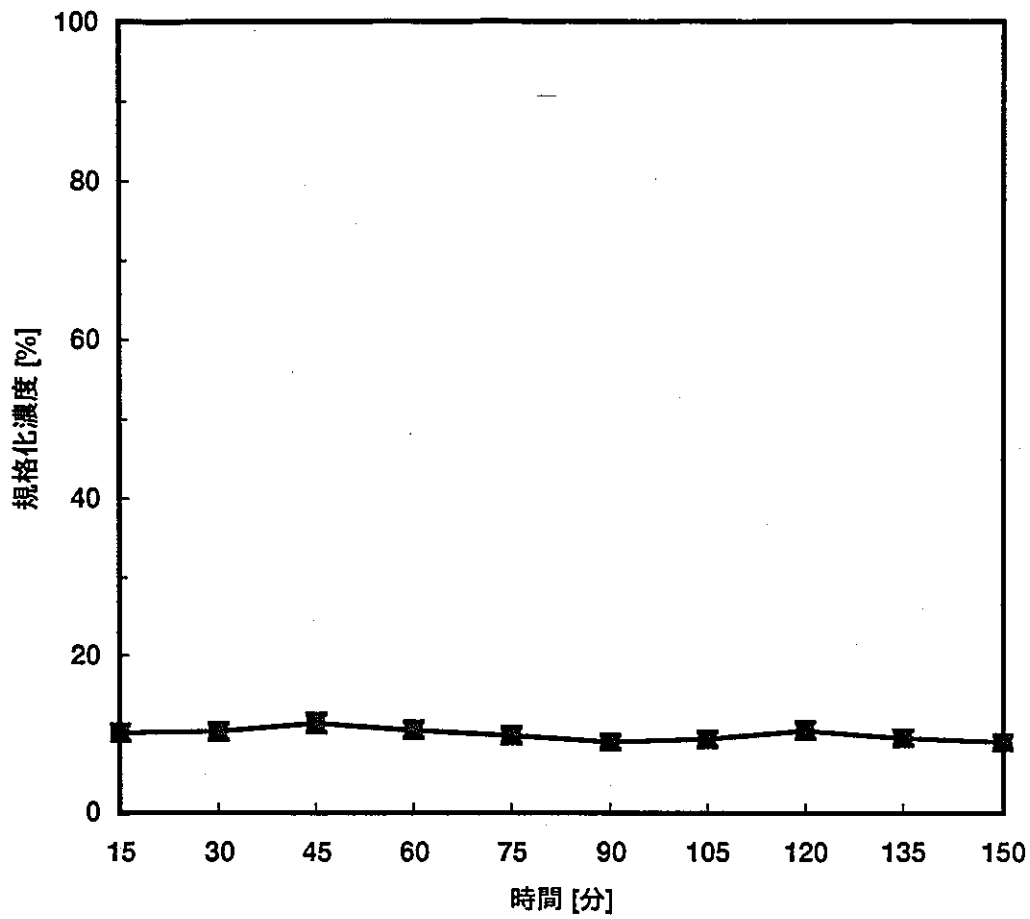
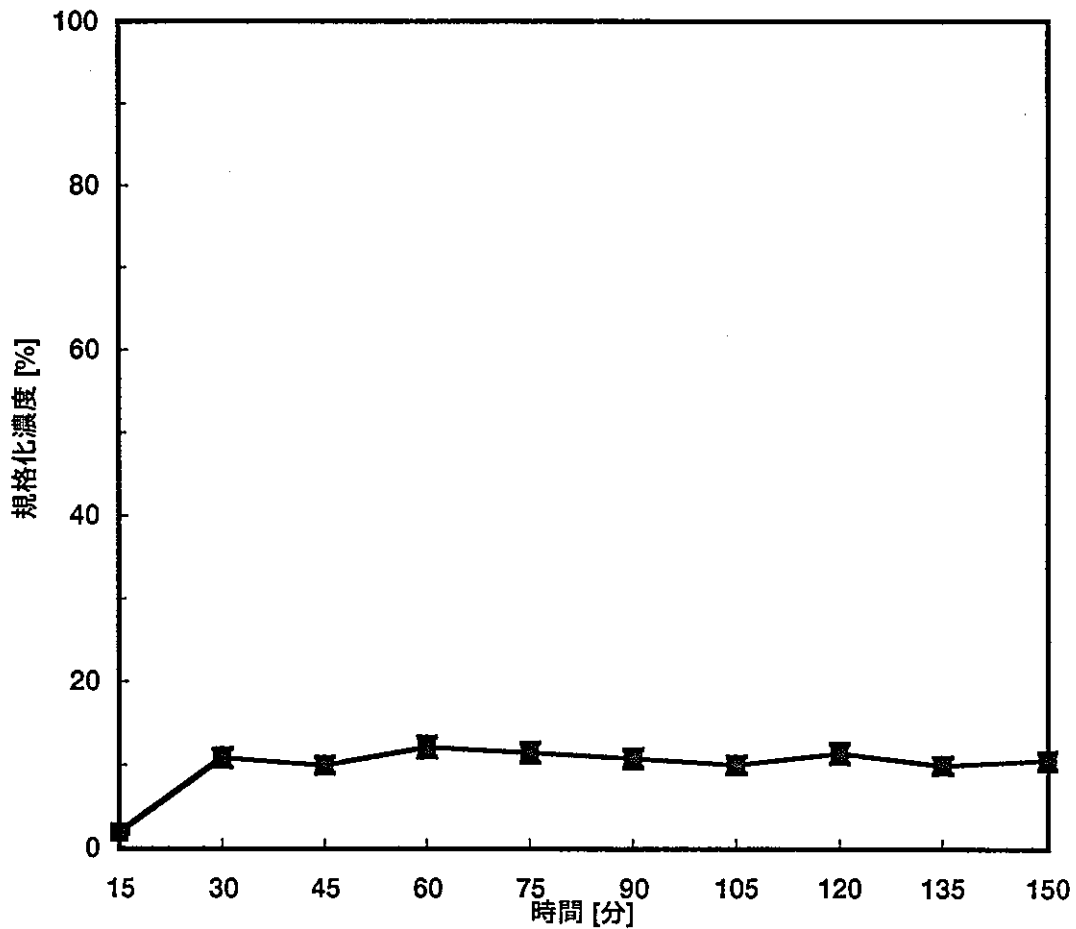


図3.2.3-2 規格化濃度の比較 (測定点39~43)
(異方的不均質場)



No.31



No.32

図3.2.3-3 各測定点での規格化濃度の時間変化
(異方的不均質場)

(2) パルス注入モード

系全体でのトレーサの移行挙動を、各タイムステップでのパーティクル分布(図3.2.3-4)に示す。ここでは、注入終了後に、卓越流路へむしろ周囲の低透水性領域から流入するパーティクル挙動が見られることが特徴である。

この特徴は、下流側境界における破過曲線(図3.2.3-5)にも現れている。ここでは、卓越流路に対応した速い立ち上がり後に長いテールが継続する形が見られる。この長いテールは、一旦低透水性領域に浸入して滞留したトレーサが、トレーサの注入が停止されてから比較的速やかにチャンネル部の濃度低下以降にゆっくりと境界を通過することに対応したものと考えられる。

3.3 不均質多孔質媒体中物質移動試験結果との比較

今回の試験は、3.1に述べた等方的な不均質場を模擬した供試体を用いて行ったものである。ここでの流量は、全体流量約185 ml/min、トレーサ流量約128 ml/minであるのに対して、3.1に述べた流動解析の結果は全体流量約110 ml/min、トレーサ流量約50 ml/minであり、かなり大きな相異を示している。

この原因として最も可能性が高いのは、トレーサ注入チューブとその周囲のガラスビーズとの間に微小な間隙が生じ、この間隙を介してトレーサ液が全周に向けて注入されていることである。実際、本試験に先だって行われた予備試験ではトレーサ流量は50 ml/min程度であり、本試験の直前にトレーサ注入チューブとその周辺を次亜塩素酸で洗浄した後、に上述した様な急激なトレーサ流量の増加が生じている。また、トレーサプリュームの初期の発達、トレーサ注入位置を中心として等方的(上流側も含めて)でありこのことからトレーサ注入チューブ外壁とそのまわりのガラスビーズとの間に微小間隙が生じたことを裏付けている。

そこで、ここでは、上記の要因を含めた追加的な解析を実施することとした。解析条件はトレーサ注入位置近傍を除いて3.1に述べたものと全く同じである。トレーサ注入位置の周囲については、3.1では難透水性のブロックを配置していたが、ここではチューブ外壁に沿ったチャンネルングの効果を再現するためにこの難透水性ブロックを除いて解析を行っている。

追加解析における流動解析結果を図3.3-1(ダルシー流速分布)、及び図3.3-2(圧力分布)に示す。これらの図と3.1に示した結果とを比較すると、追加解析においてトレーサ注入の流れがより等方的に生じていることが明らかである。また、この条件での流量は、総流量214 ml/min、及びトレーサ流量127 ml/minと試験結果にかなり近い数値となっている。ここで、トレーサ以外の水の流量が実際の試験系で若干少ないのは、上流側焼結金属及び難透水性第一層の目詰まりの効果と考えられる。

引き続き、上記の流動解析結果に基づいてパーティクルトラッキングによる物質移動解析を行った。解析結果と試験結果との比較を図3.3-3にまとめる。解析結果は、試験で見られたトレーサプリュームの発達を巨視的に良く再現するものとなっている。最上流側、及び後期の最下流側において解析結果の方が若干プリュームが大きく発達して見えるのは、試験において染料濃度がある程度以上低い部位ではトレーサの存在を肉眼で見ることが難しくなるためと考えられる。また、最上流側については、トレーサチューブ外周のチャンネルングが完全に等方的ではないことも一つの可能性として考えられる。

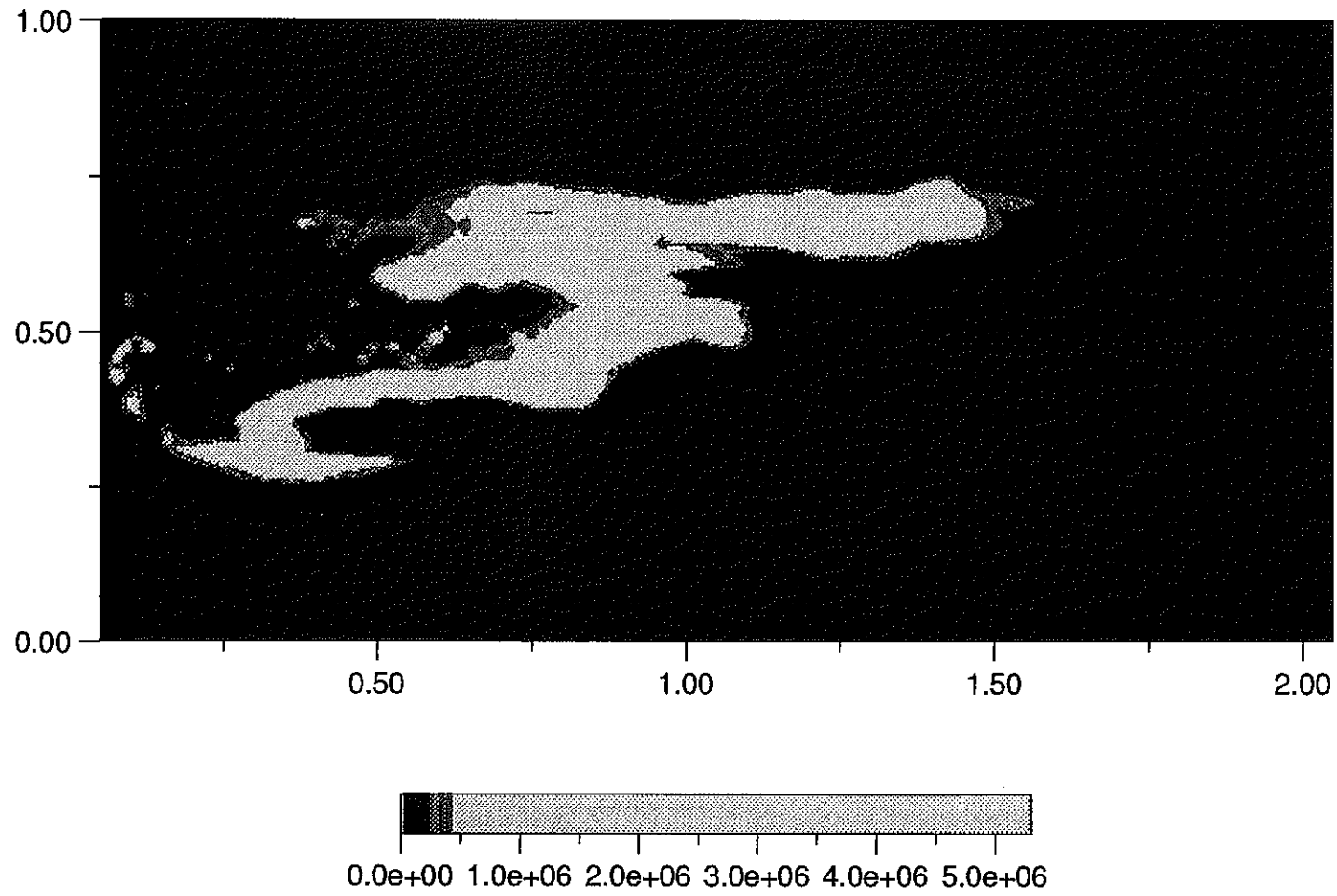


図3.2.3-4 各タイムステップでのパーティクル分布 (60分後)

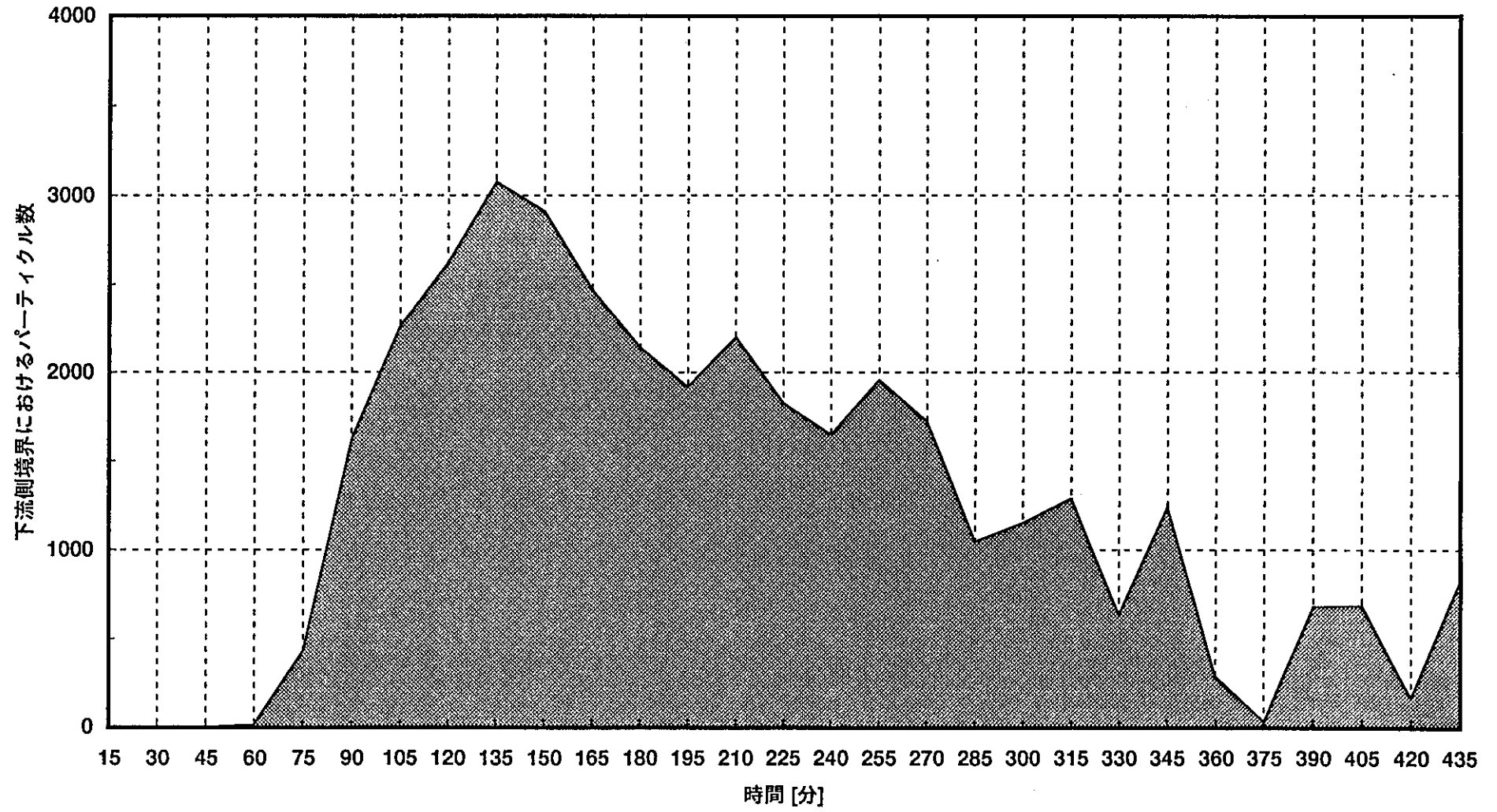


図3.2.3-5 下流側境界での破過曲線

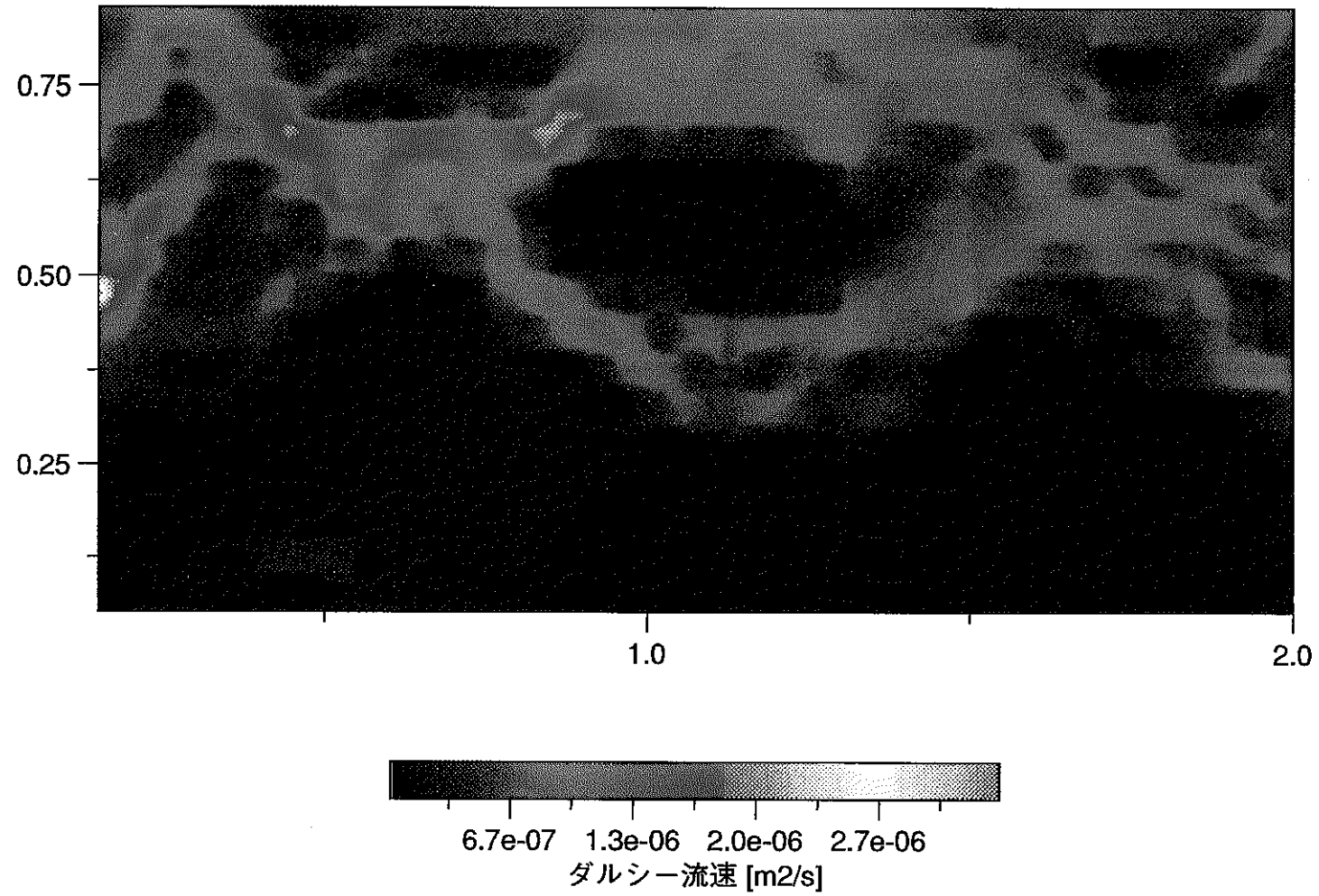


図3.3-1 追加解析における流動解析結果（ダルシー流速分布）

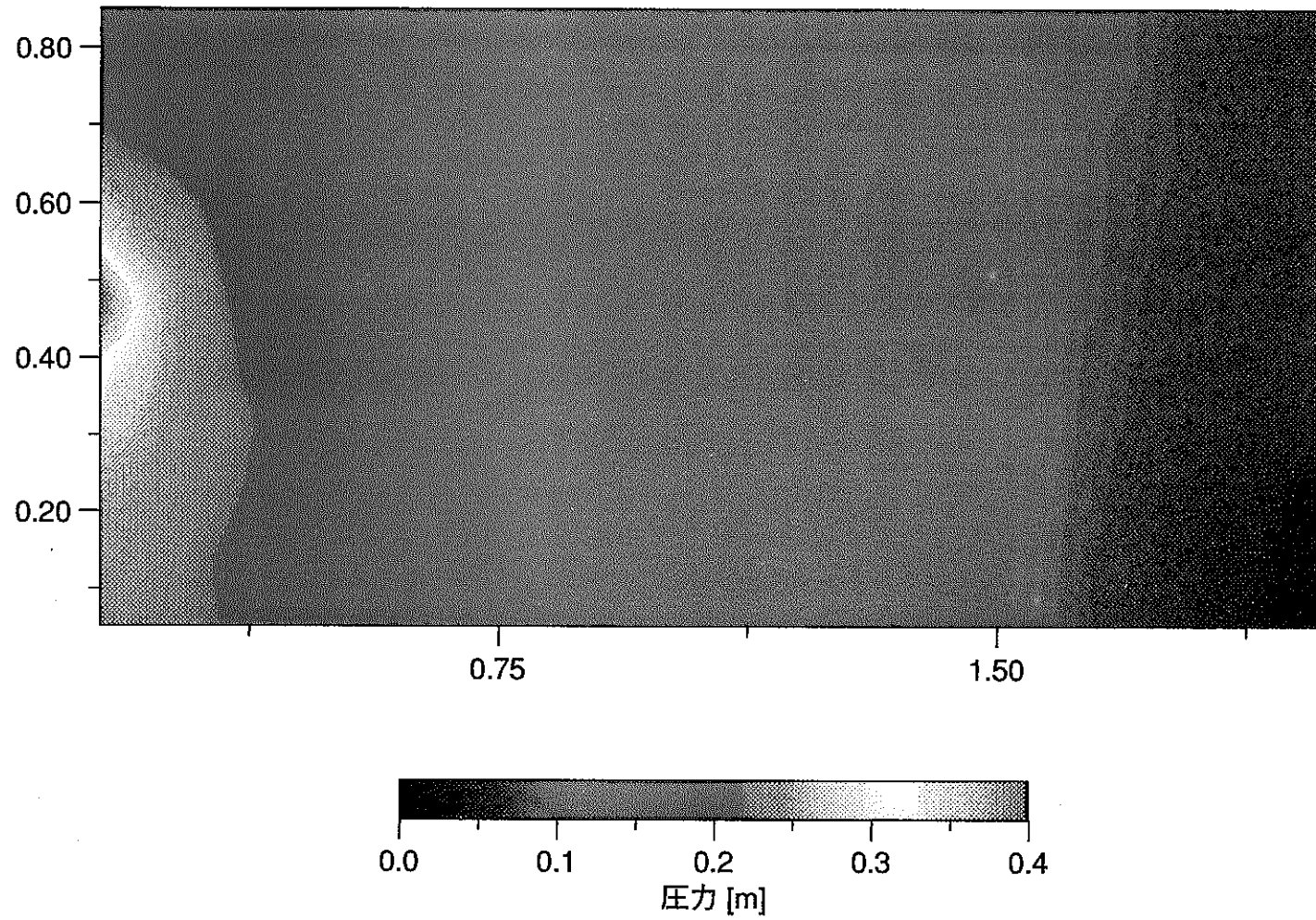


図3.3-2 追加解析における流動解析結果（圧力分布）

10分後

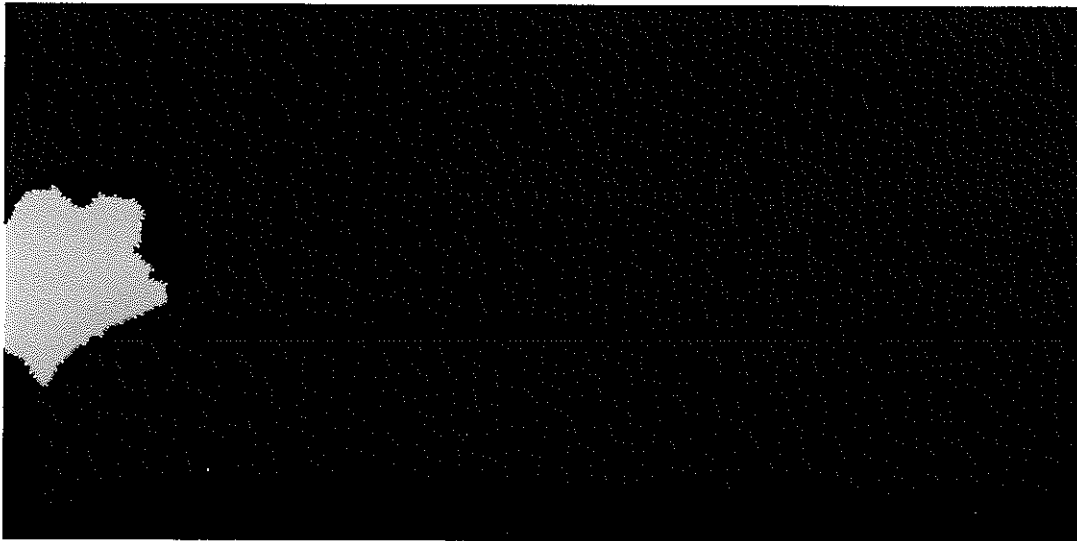
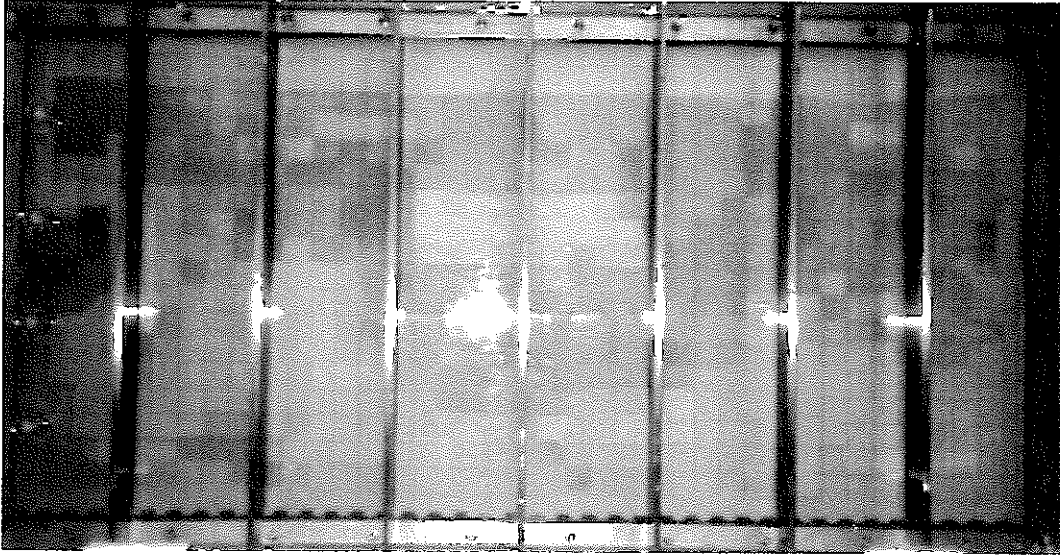


図 3.3-3 解析結果と試験結果の比較 (1/6)

50 分後



図 3.3-3 解析結果と試験結果の比較 (2/6)

90分後

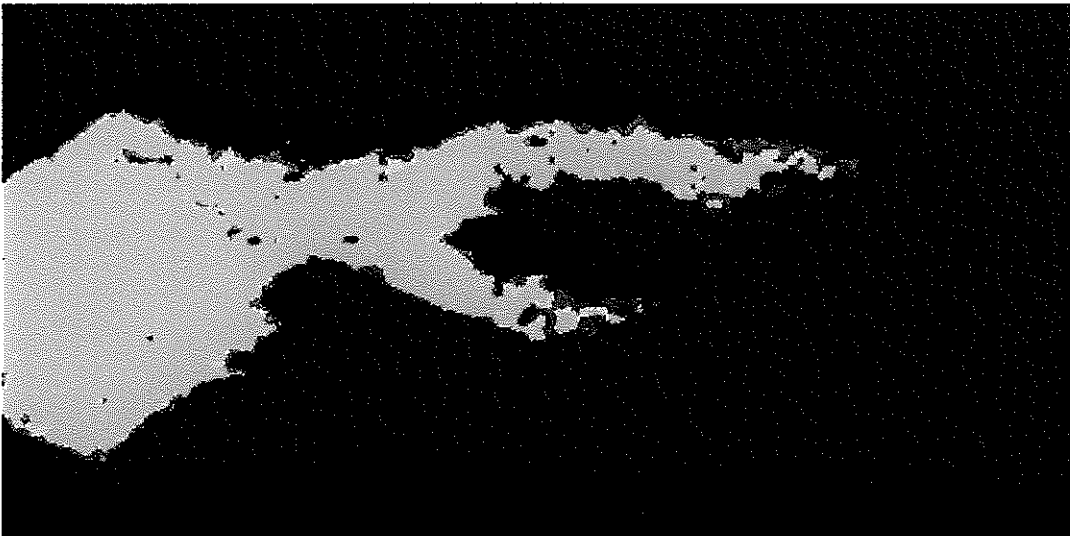


図 3.3-3 解析結果と試験結果の比較 (3/6)

130 分後

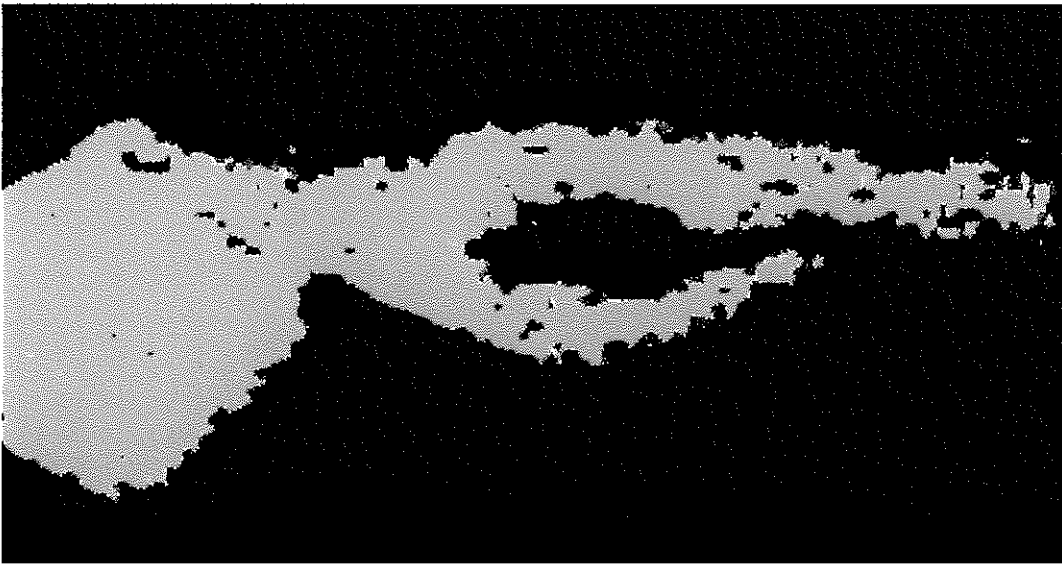


図 3.3-3 解析結果と試験結果の比較 (4/6)

170 分後

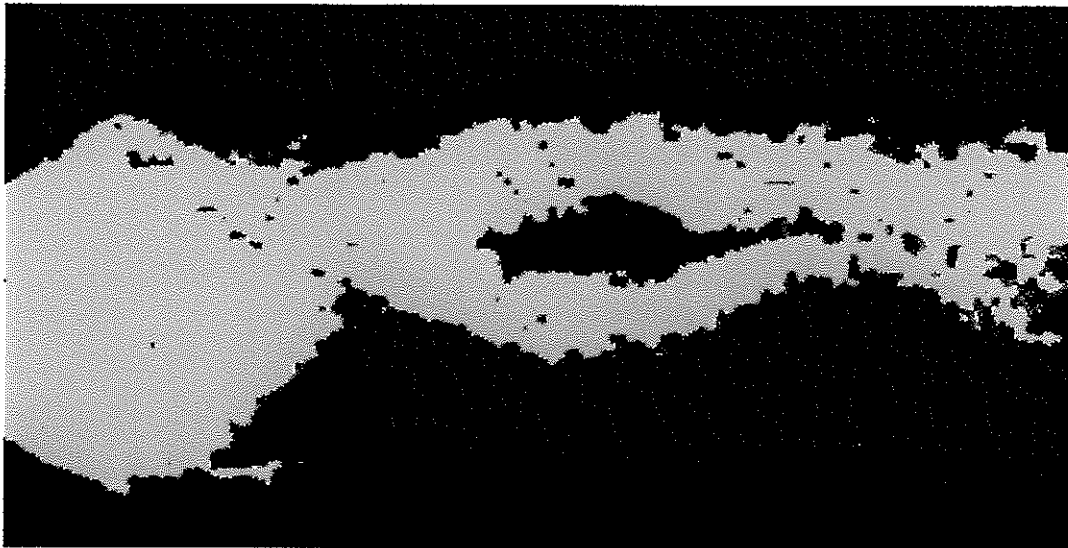
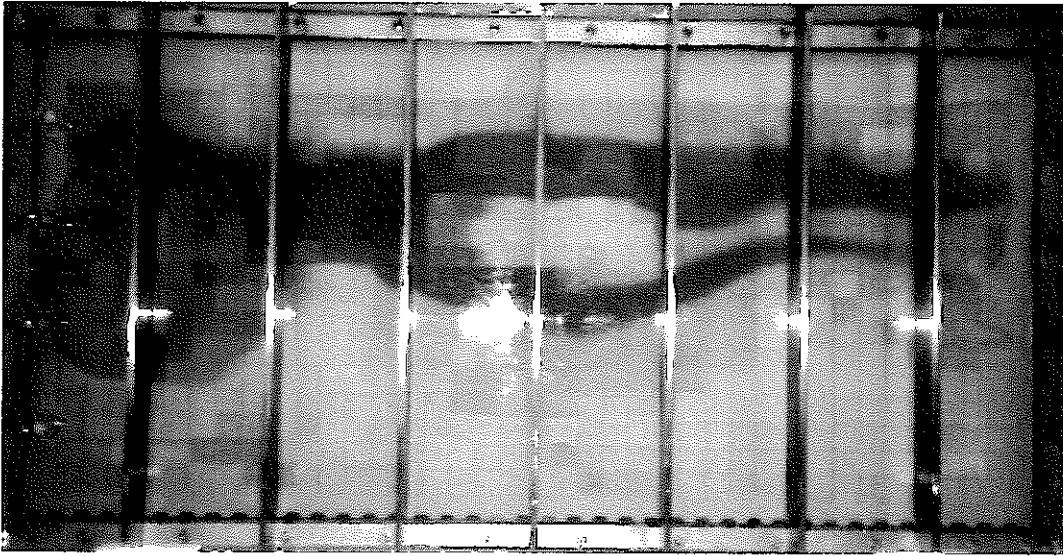


図 3.3-3 解析結果と試験結果の比較 (5/6)

210分後

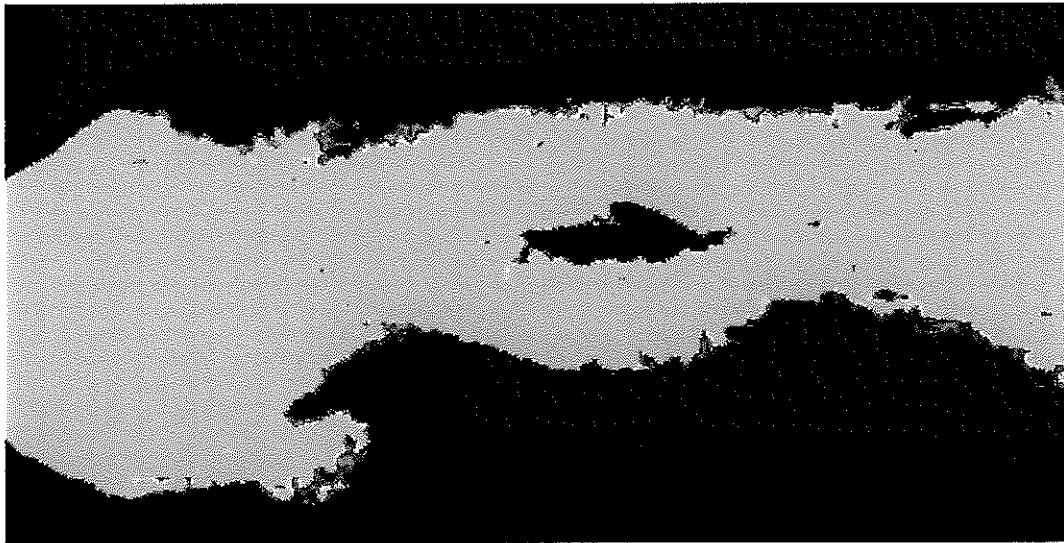


図 3.3-3 解析結果と試験結果の比較 (6/6)

4. ラプラス変換ソーパーを用いた物質移動解析手法の開発

2.に述べた現状のMACRO-AFFINITY コード及び3.に述べたこれを用いた解析は、物質移動についていずれもパーティクルトラッキングの手法により行ったものである。しかし、この手法は濃度値が位置によってあるいは経時的に数値異なる問題の場合、必要となる粒子数が非現実的に大きな物になってしまうという欠点を有している。つまり、核種移行問題を、低濃度領域まで精度良く解くという性能評価の目的のためには必ずしも最適なものではない。そこで、今年度は、将来の性能評価においてパーティクルトラッキングに代わって物質移動解析の主要な手法となり得るラプラス変換ソーパーを用いた手法開発を行い、例題に用いることによってその適用性につき検討を加えた。

4.1 ラプラス変換による分散・移流方程式の解法

分散・移流方程式が線形であり、かつ、パラメータが時間変化しない場合には、偏微分方程式であるこの方程式をラプラス変換することによってラプラス領域での常微分方程式とすることができる。例えば、分散・移流方程式、

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - v \frac{\partial c}{\partial x} \quad (1)$$

但し、
c; 溶質濃度
D; 分散係数
v; 地下水流速

を解く場合、これをラプラス変換することによって、ラプラス領域での常微分方程式、

$$s\tilde{c} - c_0 = D \frac{\partial^2 \tilde{c}}{\partial x^2} - v \frac{\partial \tilde{c}}{\partial x} \quad (2)$$

但し、
s; ラプラス変数
c₀; 濃度初期値

と書き直される。通常の均質な場で、簡単な境界条件を仮定した場合には(2)式の解析解が存在し、これを逆ラプラス変換することによってもとの時間領域での解を得るというのが通常のラプラス変換法による解法である。しかし、この場合にも境界条件等によってはラプラス領域での方程式(2)は解析的に解くことが可能ではあるが、その解の形式が複雑であるために逆ラプラス変換を複素積分として解析的に実行することが困難な場合がある。この弱点に対しては、上記の複素数値積分を数値的に実施する手法が開発されており、この場合にはラプラス変換法によって解法することが可能な問題の種類は飛躍的に増大することとなる。この様な数値的な逆ラプラス変換の手法はいくつか知られており、例えば平成3年度成果報告書に用いたCRYSTALコード[16]では、Talbot法[17]という複素平面上の放物型の曲線上で数値線積分を行う手法により次元の二重空隙問題が解かれている。また、Bromwich法では、この放物型の曲線(カントール)の代わりに、虚軸に平行な直線に沿って線積分を行うことによって逆ラプラス積分が行われる。これらの複素数値積分の収束性は、解くべき支配方程式と境界条件の形式によって種々に異なることが知られている。

上記の手法では、ラプラス領域における常微分方程式(2)を解析的に解くことが前提となっていたため、不均質媒体は勿論、一般の二次元問題へも適用することが困難であった。しかし、上記のラプラス変換による手法は、数学的にはラプラス領域での解が解析的に与えられることを前提とするものではなく、原理的には、二次元・不均質問題において(2)式に対応する常微分方程式を任意の境界条件の下に適当な数値解法により解き、その結果に基づきさらに数値複素積分によって逆ラプラス変換を行うことが可能である。

今期開発する手法は、MACRO-AFFINITYによって作成される二次元のフラクタル不均質透水係数場上での分散・移流方程式をラプラス変換し、ラプラス領域での常微分方程式を有限要素法によって数値的に解き、この結果をBromwich法によって逆ラプラス変換することによって時間領域での解を得る物である。この手法を用いることによる最大の利点は、解析解と数値解の長所である、

- (1) 解析解と同様、途中のタイムステップを計算することなく出力が必要な時刻のみでラプラス領域での解を得、これを逆変換することにより計算効率が高まる、
- (2) ラプラス領域での常微分方程式を有限要素法により解くことにより、多次元の複雑な問題にも適用可能となる、

という二つの点が同時に達成されることである。

4.2 連続体物質移動モデル

今年度の手法開発としては、上記の数値的なラプラス変換ソーパーを有するコードであるLAPLACE2Dを用いて、MACRO-AFFINITYで作成したフラクタル透水係数場を読み込み、LAPLACE2D上で水理、及び物質移動を解くという方法を試みた。この際、LAPLACE2Dは有限要素法により領域分割を行っているのに対して、MACRO-AFFINITYでは有限差分により領域分割が行われていることから、差分グリッドから有限要素グリッドへの変換についても必要な操作を作成した。

4.2.1 方程式系

4.2.1.1 流動解析モデル

LAPLACE2Dの流動解析モデルは、MACRO-AFFINITYと同様の定常・ダルシー則の流動方程式として表現される。相違点は、透水係数がMACRO-AFFINITYの場合の様にスカラーではなくテンソルとして扱われるという点と、上述した様に差分法の代わりに有限要素法が用いられるという点のみである。また、境界条件についても、MACRO-AFFINITYと同様に、定水頭と0フラックスの二つのタイプが選択できるようになっている。

4.2.1.2 物質移動解析モデル

既に述べた様に、LAPLACE2Dではパーティクルトラッキングの代わりに分散・移流方程式をラプラス変換ソーパーを用いて数値的に解くことが行われる。ここで、支配方程式としては、

$$R \frac{\partial C}{\partial t} = -\mathbf{v} \cdot \nabla C + \nabla \cdot \underline{\underline{D}} \nabla C - \lambda R c + Q \quad (3)$$

但し、D は分散係数テンソルであり、

$$\underline{\underline{D}} = (D_{\text{mol}} + \alpha_T |\mathbf{v}|) \underline{\underline{I}} + (\alpha_L - \alpha_T) \frac{\mathbf{v}\mathbf{v}^T}{|\mathbf{v}|}$$

で与えられる(D_{mol} は分子拡散係数, α_T , 及び α_L はそれぞれ流れと平行及び垂直な分散係数であり, $\underline{\underline{I}}$ は単位行列を表す)。

また, Q は単位体積当たりのソース強度を, R は遅延係数を示す。

を解くこととなる。境界条件としては, 0分散フラックス ($(\underline{\underline{D}} \nabla C) \cdot \mathbf{n} = 0$) がデフォルトであり, 他にある境界上において一定濃度を仮定することが可能である。

4.2.1.3 フラクタル透水係数場の読み込み

既に述べた通り, MACRO-AFFINITYにより作成されるフラクタル透水係数場は有限差分グリッド上でのものであり, この問題をLAPLACE2Dで解法するためには, この透水係数場を有限要素グリッド上に割り付けることが必要となる。このために, LAPLACE2Dの*i*番目の要素における透水係数テンソルの対角成分 k_{xx} , 及び k_{yy} を次の様に設定する。

$$k_{xx} = k_{yy} = \frac{1}{d} 10^{T_i^*} \quad (4)$$

ただし, T_i^* は要素*i*に含まれる元の差分ノード全てにおける透水量係数値の算術平均であり, d はMACRO-AFFINITYの解析領域の厚さである。差分ノードでの数値の算術平均をとることは, 多くの場合, 合理的であることが示されている[18]。また, 有限要素が差分ノードを一つも含まない場合には, 最寄りのノードの値が代わりに用いられることとなる。なお, LAPLACE2Dにおける透水係数テンソルの非対角成分は, MACRO-AFFINITYと整合的となるように全て0と置かれる。

上記の操作により解析を行う際には, 以下の注意を要する点が存在する。

(1) 有限要素の大きさ

与えられた差分グリッドに対して, どの程度の有限要素を用いれば良いかについてこれまでに得られた知見は限られている。但し, 今回の例題への適用を通じては, 有限要素と差分グリッドの大きさをほぼ同じにした場合が最も整合性の高い結果が得られる傾向がある。

(2) 分散長

MACRO-AFFINITYの様な詳細な不均質場モデルにおいては, 巨視的な分散の効果は透水係数のばらつきによる微視的な流速場として表現することが眼目であり, 従って分散長は要素以下のスケールでの微視的な分散に抑えることが望ましい。これに対して, 上述した分散・移流方程式の解法においては, 要素サイズを下回るような分散長を設定した場合には, 真の分散よりも数値分散の効果が卓越することが知られている。そこで, 今回の例題解析においては, 分散長を要素サイズと同じに採ることとした。

以上の二点については, 今後, 更に検討と試解析とを通じて問題点の究明を図ることが必要である。

4.3 例題についての解析

4.2に述べた手法を用いて、MACRO-AFFINITYによるパーティクルトラッキング、及びLAPLACE2Dによる分散・移流方程式の数値解法のそれぞれによる物質移動の例題解析を行った。ここでの結果の比較は、二つの手法の詳細なcross-benchmarkingを意図した物ではなく、むしろ今期新たに検討したラプラス変換ソーパーの適用性を明らかにすることを目的としたものである。

4.3.1 解析条件

例題としては、等方的フラクタル場（ケース1、2）、及び異方的フラクタル場（ケース3、4）の合計4ケースを考えた。解析条件を下表にまとめる。

表 4.3.1-1

	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4
フラクタル次元	2.5	2.5	Hx=1.1 Hy=1.9	Hx=1.1 Hy=1.9
log平均透水量係数	-2.5	-2.5	-2.5	-2.5
log透水量係数の分散	1.0	0.25	0.25	0.25

領域	200m×100m
境界条件	y=0.0においてh=10.0m（定水頭） y=200.0においてh=0.0m（定水頭） 他の境界は全て0フラックス
差分グリッドサイズ	5m
有限要素サイズ	5m
LAPLACE2Dでの分散長の設定値	5m

また、この条件のもとに作成したLAPLACE2D用の有限要素グリッドを、図4.3.1-1に示す。

4.3.2 解析結果

4.3.2.1 ケース1

図4.3.2.1-1にMACRO-AFFINITYコードによって作成した不均質透水係数場、及び流動解析の結果（圧力分布）を示す。また、対応するダルシー流速分布を背景としたパーティクル分布（ 5×10^5 秒後、及び 1×10^6 秒後）を、図4.3.2.1-2に示す。ダルシー流速分布は、底部右から出発したチャンネルが中央右の低透水性領域を迂回して上方へ到る様子を示している。パーティクルの挙動も、この流速分布と対応したものとなっている。

図4.3.2.1-3は、前出の手法により差分グリッド上で表現された透水係数場（図4.3.2.1-1右）を有限要素上に読みとって行った流動解析の結果（流速分布）である。また、この透水係数場に対応してラプラス変換ソーパーにより実施した物質移動解析の結果を図4.3.2.1-4に示す。これら二つの異なる手法による物質移動の解析結果は、全体としてほぼ

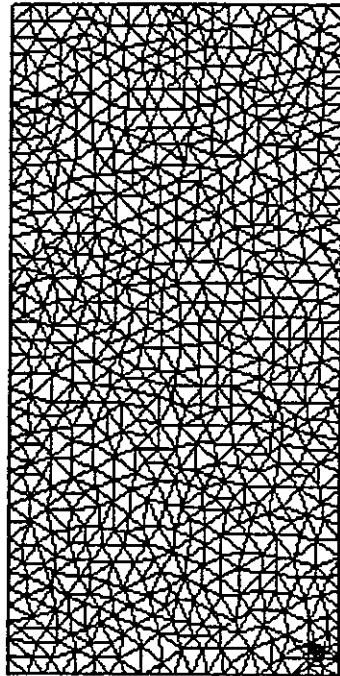


図 4.3.1-1 LAPLACE 2D 用の有限要素グリッド

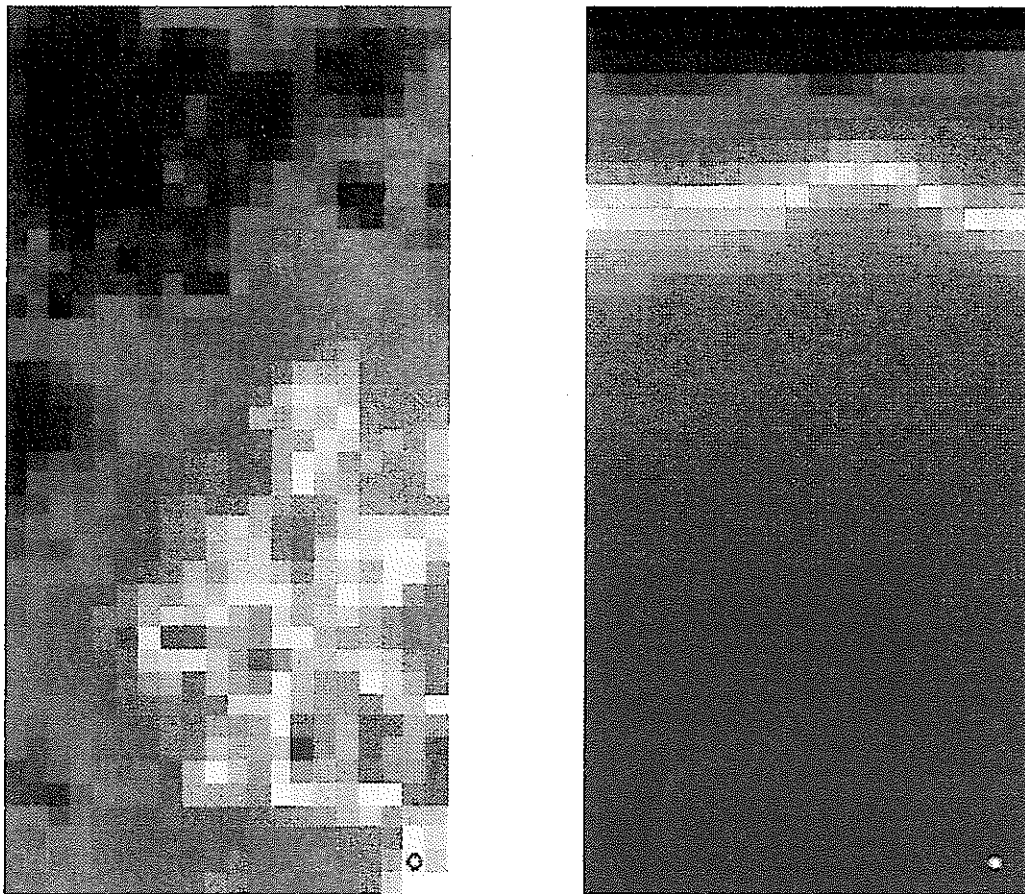


図4.3.2.1-1 MACRO-AFFINITYコードによって作成した
不均質透水係数場及び流動解析結果（圧力分布）

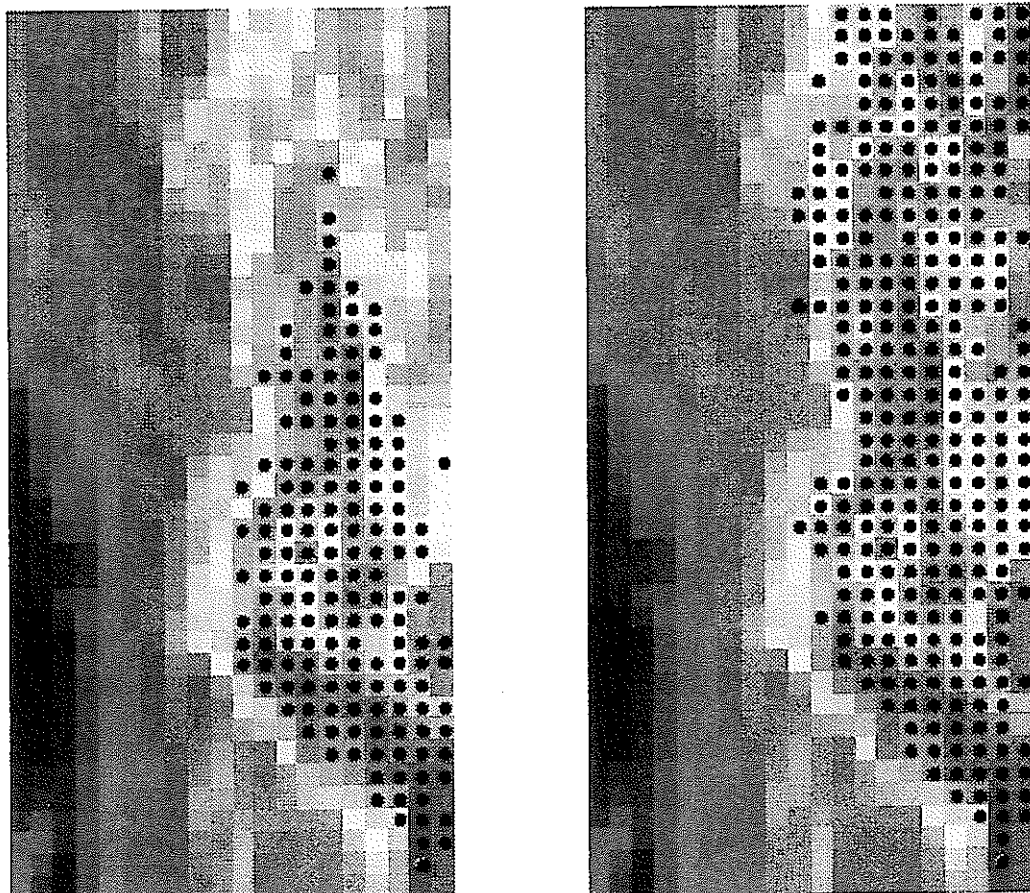


図4.3.2.1-2 パーティクル分布 (5×10^5 秒後、及び 1×10^6 秒後)

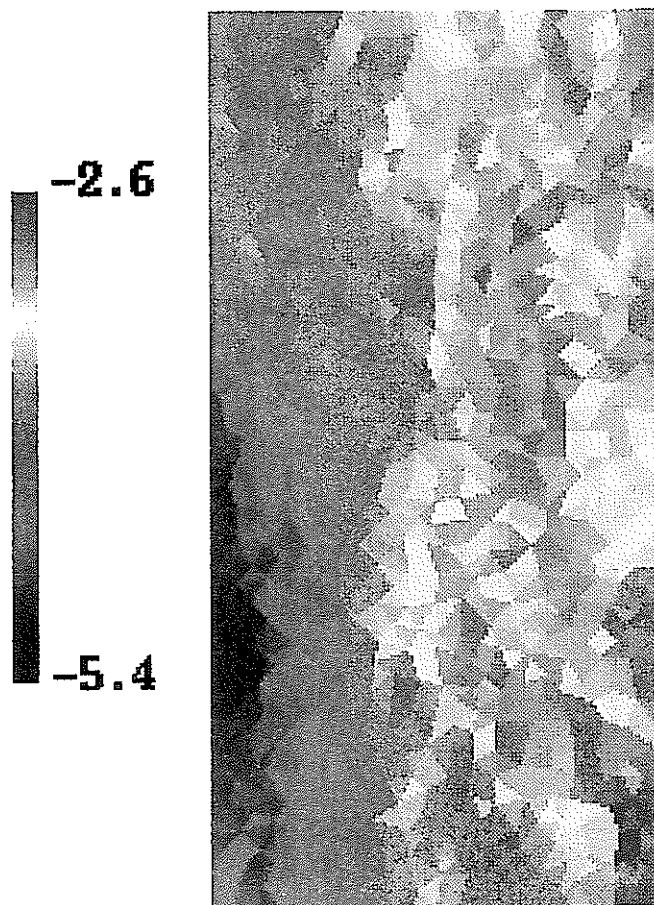


図4.3.2.1-3 有限要素法により表現されたダルシー流速場

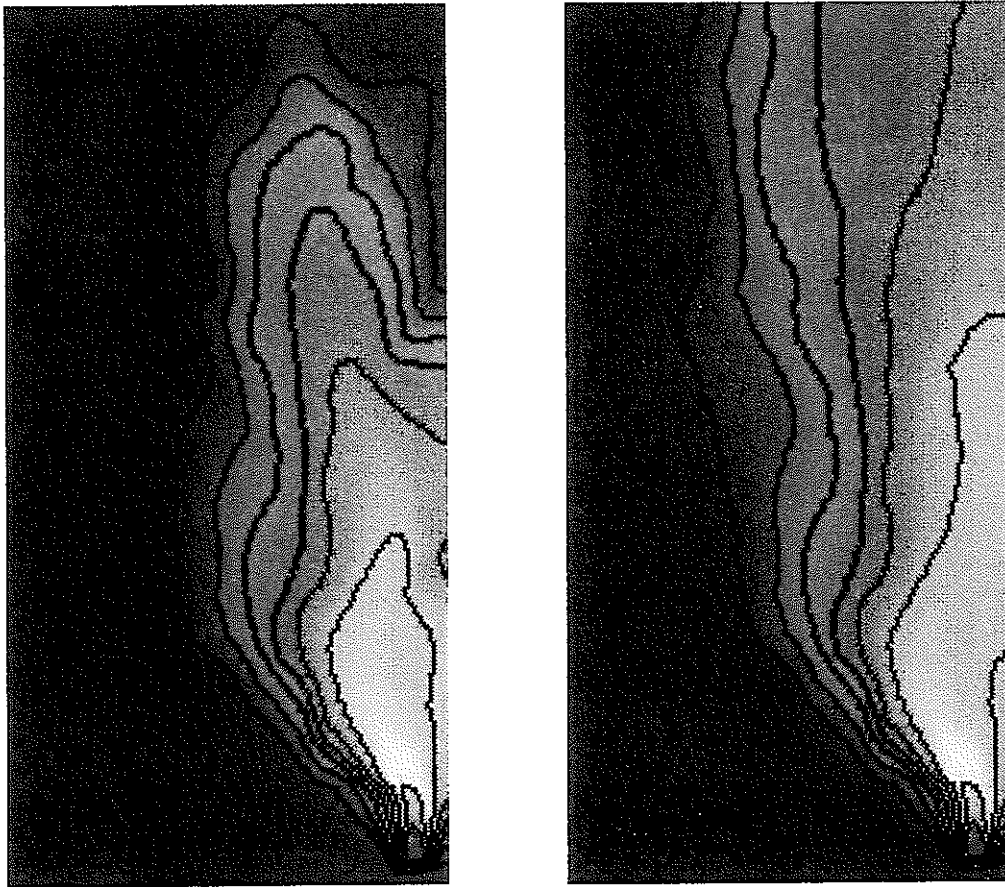


図4.3.2.1-4 ラプラス変換ソーパーにより実施した物質移動解析結果

整合的なものとなっていると言える。特に、LAPLACE2Dの解析結果における3番目の等高線は、注入トレーサ濃度の1/10となっており、パーティクルトラッキングにおけるブリュームの外側境界が注入濃度の約8%に当たることから、これら二つの輪郭がほぼ一致していることはこれら二つの手法の整合性を示すものと考えることができる。

4.3.2.2 ケース2

このケースでは、透水量係数の分散が小さいために、全体としてケース1よりもチャンネルの影響が小さくなっていることが特徴である。このケースにおけるMACRO-AFFINITY及びLAPLACE2Dの解析結果を、それぞれ図4.3.2.2-1及び図4.3.2.2-2に示す。ここでも、二つの手法による物質移動解析の結果は互いに整合的な物である。

4.3.2.3 ケース3及び4

ケース3及び4では、異方的なフラクタル透水係数場について上と同様の解析を行った。結果を、図4.3.2.3-1～4にまとめる。流動方向に対して平行、あるいは垂直な相関構造のいずれに対しても、パーティクルトラッキングによる物質移動解析の結果とラプラス変換ソーバーによる解析結果とは整合的な物であるということが出来る。

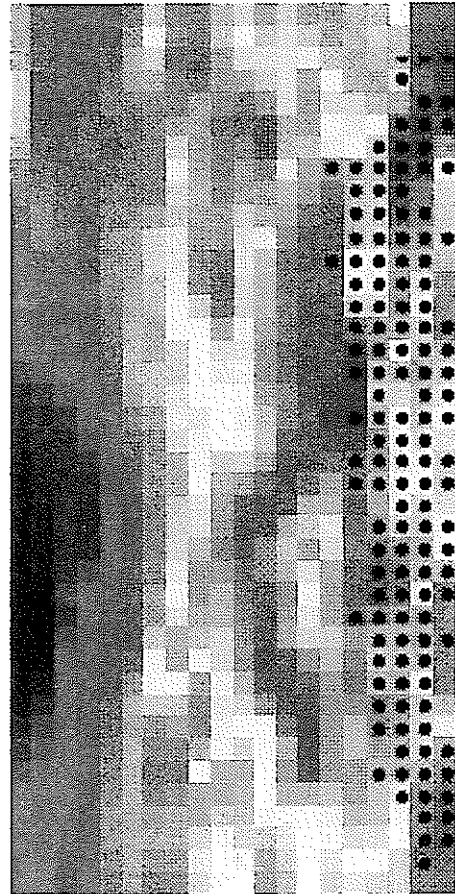
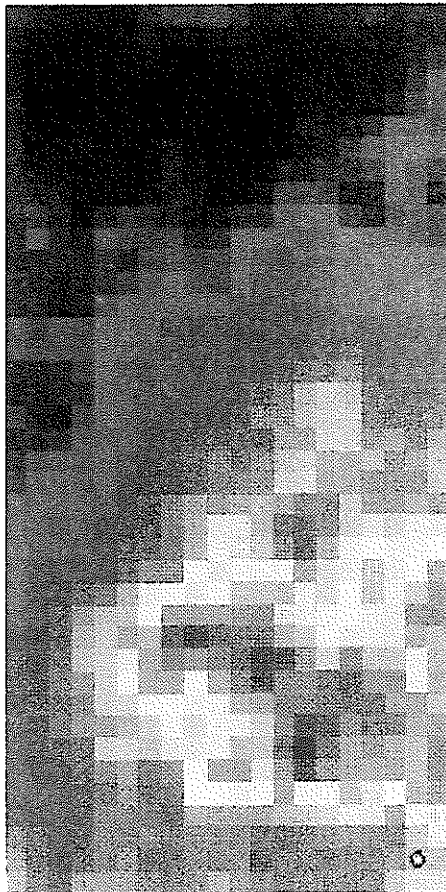


図4.3.2.2-1 MACRO-AFFINITYによる解析結果（ケース2）

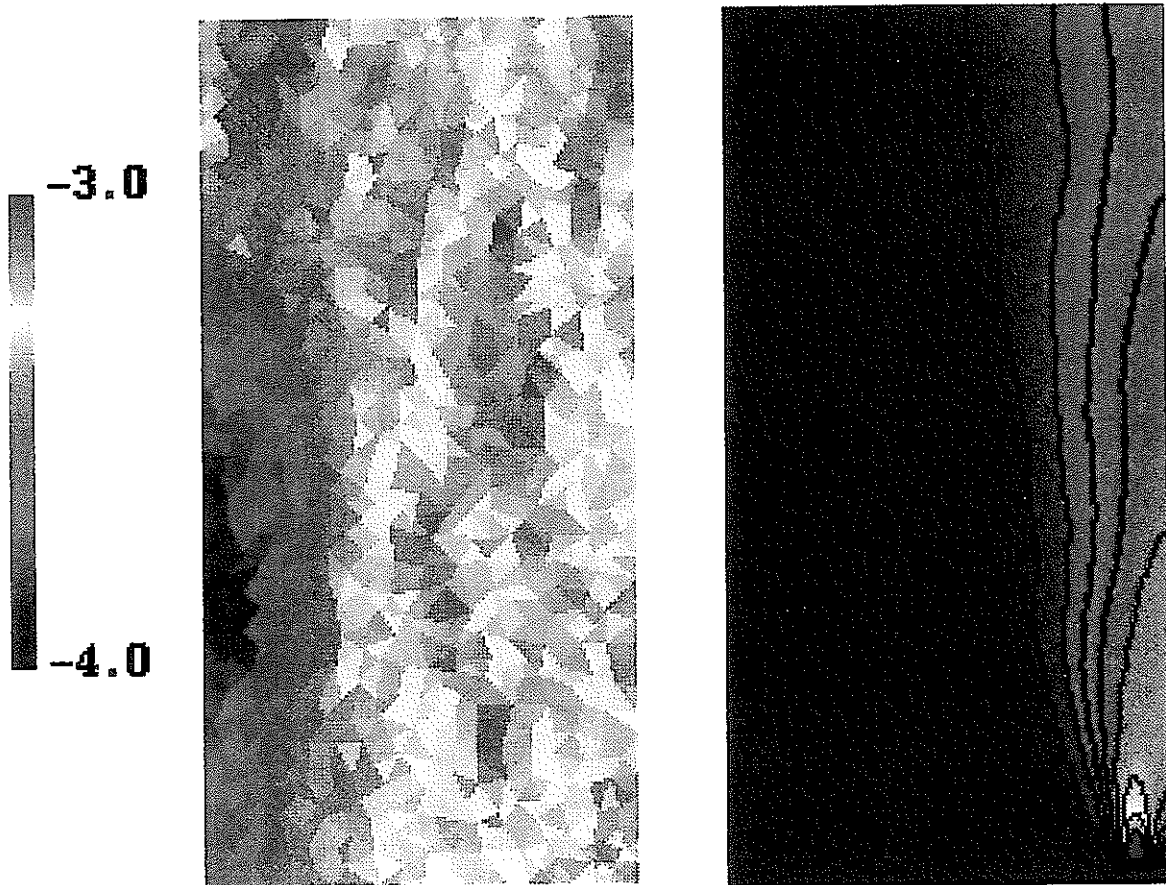


図4.3.2.2-2 LAPLACE2Dによる解析結果（ケース2）

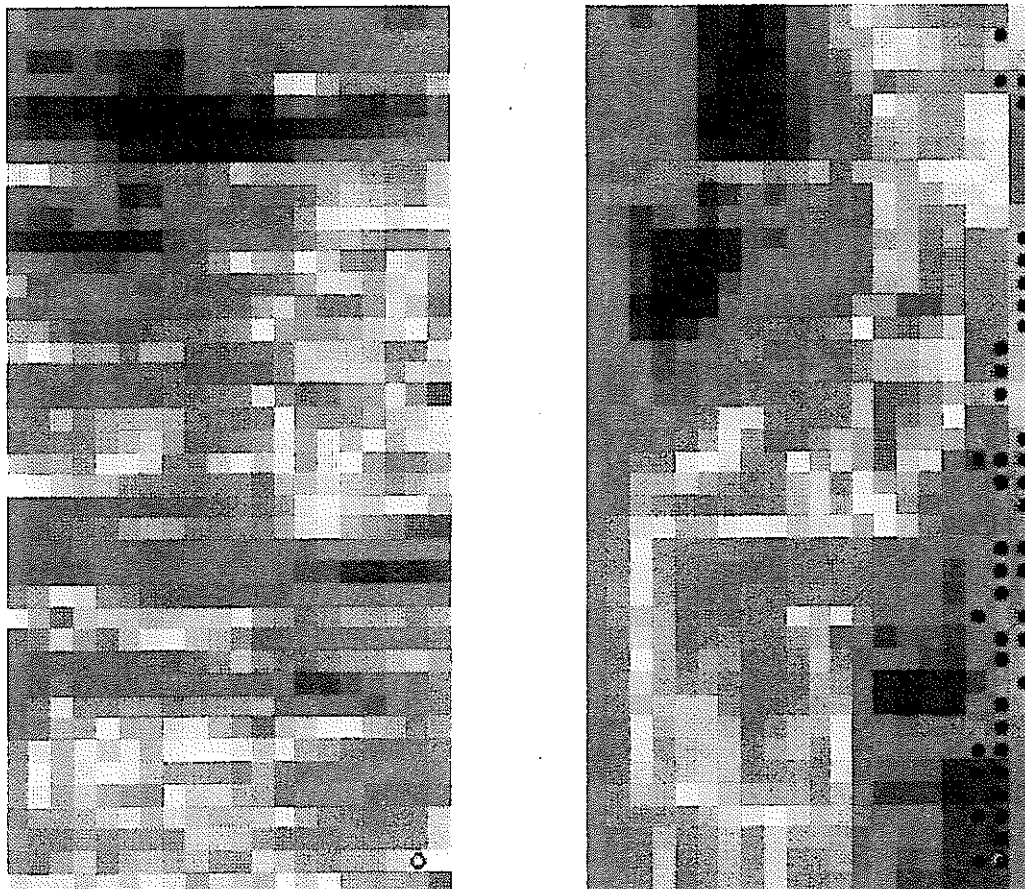


図4.3.2.3-1 MACRO-AFFINITYによる解析結果（ケース3）

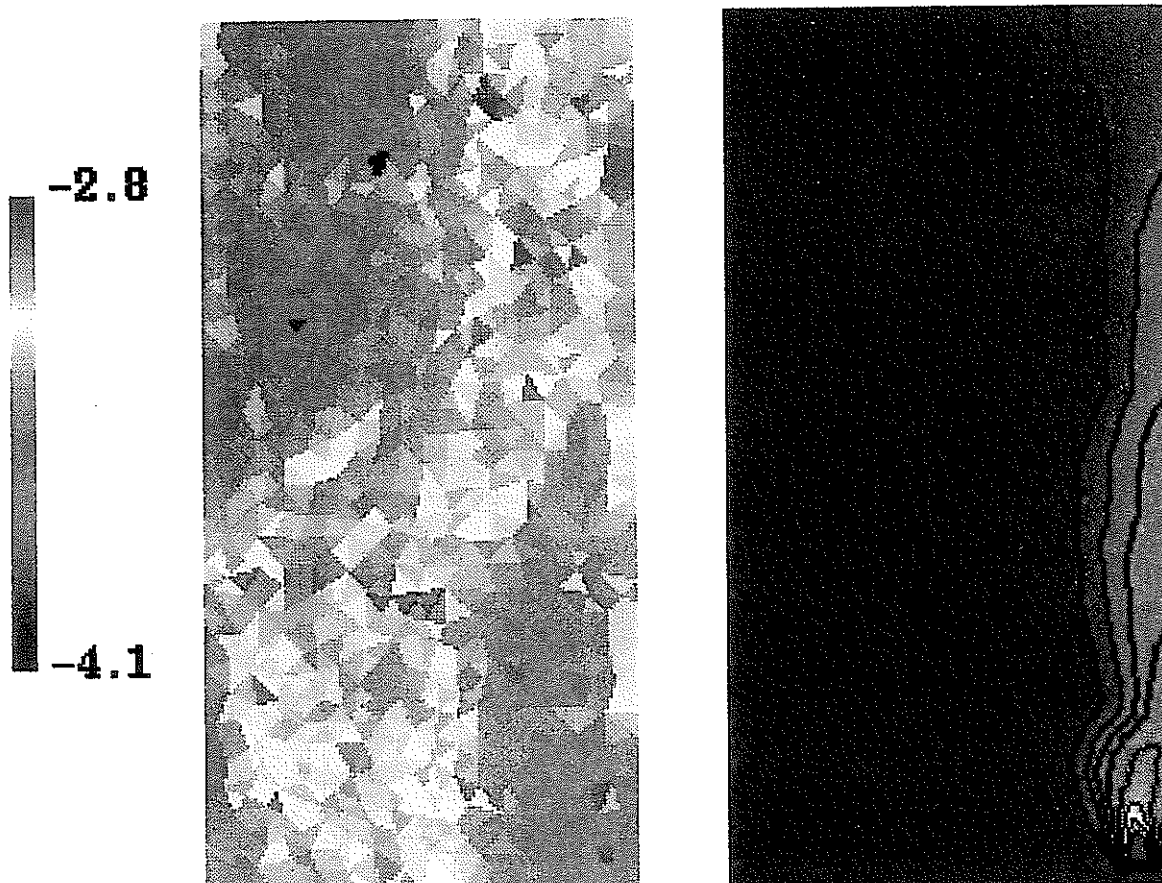


図4.3.2.3-2 LAPLACE2Dによる解析結果（ケース3）

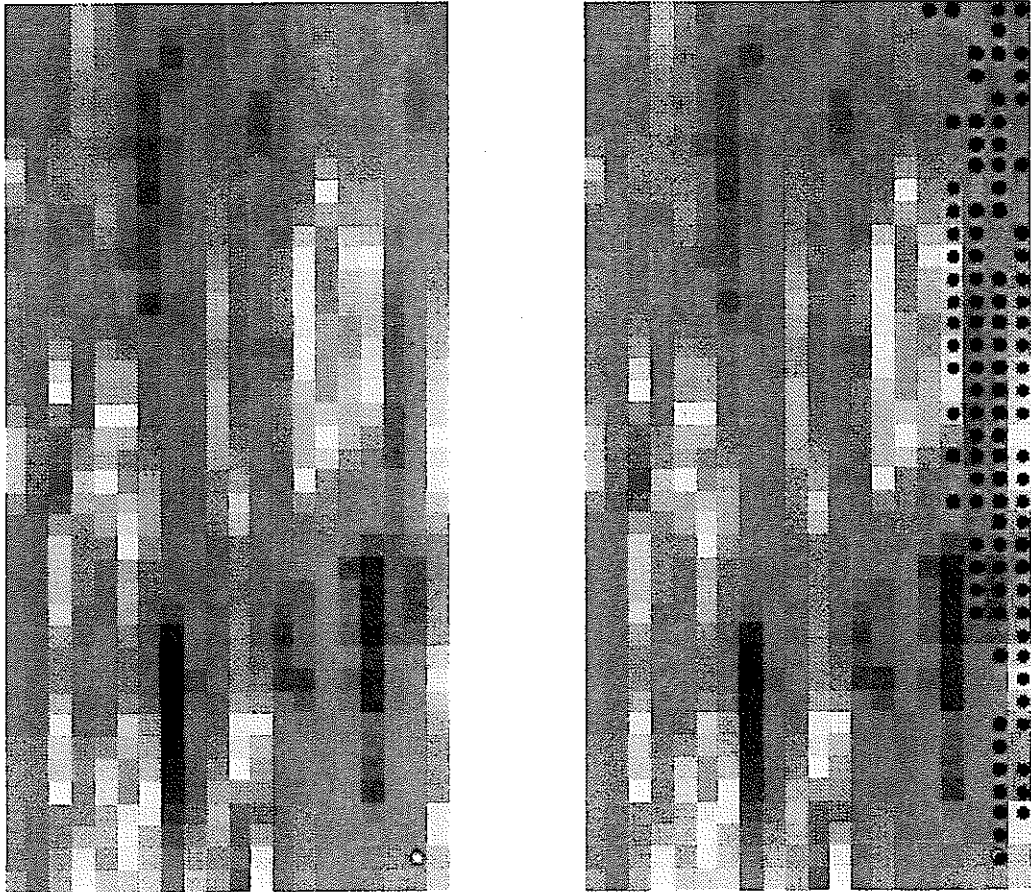


図4.3.2.3-3 MACRO-AFFINITYによる解析結果（ケース4）

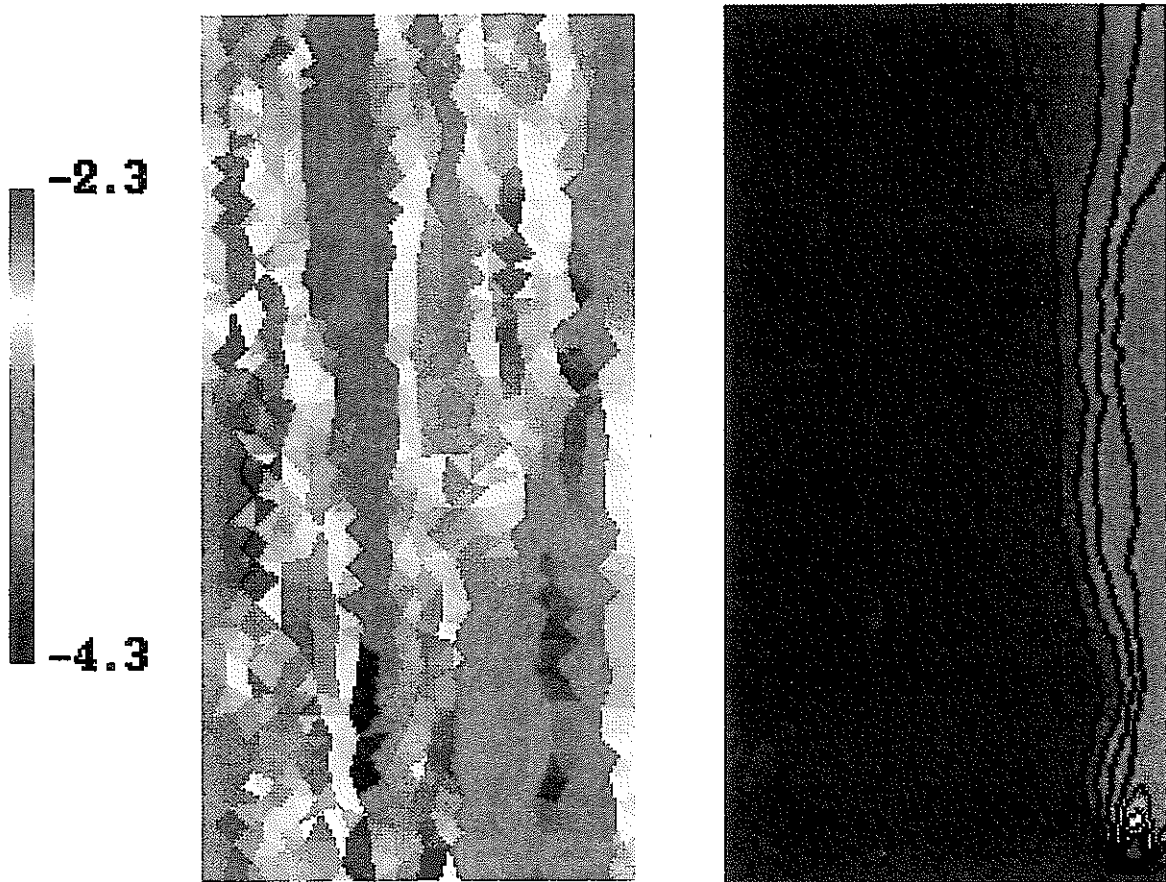


図4.3.2.3-4 LAPLACE2Dによる解析結果（ケース4）

参考文献

- [1] 高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術報告書、動力炉・核燃料開発事業団、PNC TN 1410 92-081, 平成四年九月
- [2] PSACoin LEVEL E INTERCOMPARISON, Probabilistic System Assessment Code (PSAC) User Group, OECD Nuclear Energy Agency, Paris, 1989.
- [3] T. A. Hewitt, Fractal distribution of reservoir Heterogeneity and their influence on fluid transport, 61st Annual Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers, New Orleans, 1988.
- [4] P. Grindrod, M. D. Impey, Fractal field Simulations of Tracer Migration within the WIPP Culebra Dolomite IM2856-1, Version 2, 1992.
- [5] M. D. Impey, P. Grindrod, Cross Well Fractal Interpolation of Permeability Data, IHEN/20-1, Version 1, 1992.
- [6] M. D. Impey, P. Grindrod, Channelling and Fickian Dispersion in a Fractal Simulated Porous Media, WRR/1, Version 1, 1991.
- [7] P. M. Alder, A. Henriette And C. J. Jacquin, The effective permeability of heterogeneous porous medas, physico Chemical Hydrodynamics, 11 No. 1, 63-80, 1989.
- [8] M. D. Impey and P. Grindrod, Application of fractal geometry to geological site characterization. Proc. British Computer Society Conference "Applications of Fractals and Chaos", London, February 1992.
- [9] P. Grindrod and M. D. Impey. Fractal field simulations of tracer migration within the WIPP Culebra Dolomite. Intera Report IM2856-1 Versiob 2, March 1992.
- [10] M. D. Impey and P. Grindrod and H. Takase. A fractal methodology for the MACRO-2D experiments. Intera Report ID3249-1 Version 1, September 1992.
- [11] P. C. Robinson and C. P. Jackson. A numerical study of various algorithms related to the preconditioned conjugate gradient method. Int. J. Num. Meth. Eng., 21, 1315, 1985.
- [12] M. D. Impey and P. Grindrod and K. Worgan. Analysis of the WIPP Geostatistical Test Problems using self-affine fractal simulations. Intera Report ID3406-1 Version 1, November 1992.
- [13] W. H. Press, B. P. Flannery, S. A. Teukolsky and W. T. Vetterling. Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing, Cambridge Uni. Press, 1986.
- [14] 中塚利直、時系列解析の数学的基礎、教育出版、1978.
- [15] D. C. Boes, F. A. Grayhill and A. M. Mood, Introduction to the Theory of Statistics, McGraw-Hill, London 1988.
- [16] Hodgkinson, D. P., Lever, D. A., and England, T. H., (1984), "Mathematical Modelling of Radionuclide Transport though Fractured Rock Using Numerical Inversion of Laplace Transforms: Application to INTRACOIN LEVEL 3., Ann. Nucl. Energy, vol. 11, pp. 111-122
- [17] Talbot, A., (1979), "The Acculate Numerical Inversion of Laplace Transforms, J. Inst. Maths. Applics., vol. 23, pp. 97-120
- [18] de Marsiley, G., (1986), "Quantitative Hydrogeology", Academic Press, San Diego