

不均質多孔質媒体中の 物質移動解析手法に関する研究 (II)

(動力炉・核燃料開発事業団 委託研究成果概要)

技術資料		
開示区分	レポート No.	受領日
Σ	J1281 94-003	1995.2.3
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		

1994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 技術管理室

不均質多孔質媒体中の
物質移動解析手法に関する研究 (II)

(動力炉・核燃料開発事業団 委託研究成果概要)

1994年 2月

要 旨

高瀬 博康*

不均質多孔質媒体中の核種移行は、しばしば、チャンネルングやフィックの法則に従わない分散挙動といった複雑なふるまいをみせる。これは、この様な系では微視的な流速分布が決して均一あるいは正規分布の様な理想的なものとはならないためである。これらの挙動は、核種移行についての最も速い経路を規定し、このため当該領域の周辺への核種放出率を支配するものとなり得る。つまり、性能評価研究の観点からは、これらの「平均からずれた」核種挙動を定量的に取り扱うことが極めて重要となる。

本研究では、昨年度に引き続き、統計的に自己アフィンなフラクタル理論に基づき岩体中の不均質性とこれが核種移行挙動に及ぼす影響についての検討を行った。今年度は、まず、既存のAFFINITY-2D コードに対して幾つかの改良を施したMACRO-AFFINITYコードを作成した。MACRO-AFFINITYコードでは、AFFINITY-2D コードで個々に独立した形で用いられていた各モジュールを統合化することによって、プログラムの詳細に係る技巧的な部分に煩わされることなく一連の解析が効率的に実行可能となった。また、AVS(Advanced Visualisation System) の利用により、計算経過をリアルタイムで見ることのできるグラフィカルユーザーインターフェイスが整備された。

更に、作成されたMACRO-AFFINITYコードを用いて次の様な検討を行った。

- (i) 非等方的なフラクタル透水係数場の作成方法
- (ii) 不均質多孔質媒体中物質移動試験の結果との比較
- (iii) 東濃サイトの透水係数データとの比較によるフラクタルスケール則の検証
- (iv) 線型あるいは非線型の吸着、及びコロイド移行を考慮することのできるパーティクルトラッキングアルゴリズム
- (V) ニアフィールド母岩中の核種移行挙動のシミュレーション

*日揮株式会社 原子力・環境・エネルギー事業本部

SUMMARY

Hiroyasu Takase *

Nuclide transport through the heterogeneous media often indicates a number of exotic behaviour such as channelling, non-Fickian dispersion etc., reflecting the fact that the microscopic velocity field is never uniform nor an ideal Gaussian distribution. From the Performance Assessment point of view, Quantitative expression of these behaviour becomes important since these can lead to formation of the fastest paths and, thus, dominate the release rate to the surrounding regions.

In this study, heterogeneity of the rock and its effect on the nuclide transport was addressed based upon the theory of self-affine fractal. A prototype numerical code MACRO-AFFINITY was developed with a number of modifications from the original AFFINITY-2D code. Integration of the individual modules, which were included in the AFFINITY-2D but in a rather separated fashion, enables the user to run the code efficiently, without detailed knowledge of the programme. Also use of AVS (Advanced Visualisation System) provides a graphical user interface in which the user can see the real time monitoring of the calculation in progress.

With MACRO-AFFINITY code, a number of further discussions and calculations were made on;

- (i) the methodology to construct an anisotropic fractal field,
- (ii) comparison with the experimental results of the MACRO preliminary test,
- (iii) verification of the fractal scaling law by comparison with Tono site data,

* Nuclear and Advanced Technology Division, JGC Corporation

1. AFFINITYコードの改良

昨年度の委託研究で調査及び数値実験を行った不均質多孔質媒体中の物質移動解析コードAFFINITY2Dは、フラクタルスケーリング則の適用、統計的自己アファインな不均質場の作成、同不均質透水係数場での水理解析、及びこの結果得られる流速場での物質移動会せという各解析ステージが独立したソフトウェアとなっているため、使用に当たっては煩雑な入出力管理が必要であり、また各ソフトウェアの利用には解析ステップ全てについての詳細な知識が要求される。そこで、本年度の研究としてはまず、同コードを実用的な解析ツールとするために以下の4つのパッケージをグラフィカルユーザーインターフェイスであるAVS上で統合するという改良を行った。

- ・フラクタルスケール特性推定用パッケージ
- ・フラクタル不均質透水係数場作成パッケージ
- ・高解像度水理解析パッケージ
- ・パーティクルトラッキングによる物質移動解析パッケージ

改良後のコード(MACRO AFFINITY)は、サイトデータの入力から物質移動解析までの一連の作業を一つのインターフェイスで効率的に実施でき、かつ、各ステップでの出力をリアルタイムで画像処理することが可能となった。

AVSシステムの操作パネルと、MACRO AFFINITYコードの解析結果のグラフィック例を図1に示す。

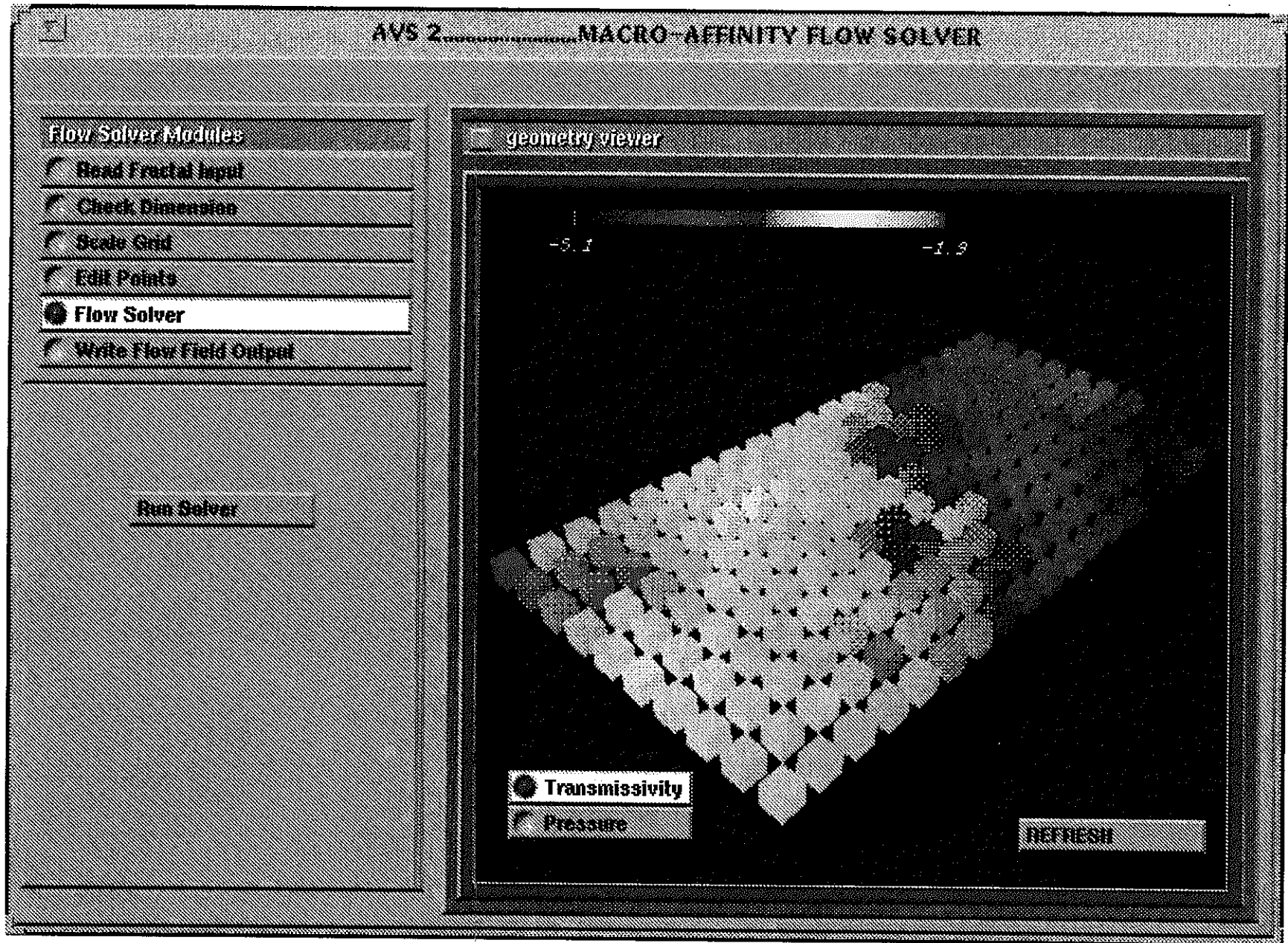


図1 基本テストケースについての透水係数場

2. 非等方性媒体の模擬

従来の自己アファインフラクタルモデルによる不均質性表現の適用は、等方的な媒体に限られていた。しかし、実際の地層、特に堆積岩系岩盤においては形成過程を反映して異方性が見られることが多い。そこで、バリオグラムの算出において通常スカラーとして考えられる二点間の距離 h をベクトルとして定義し、不均質性の自己相関構造が方向に依存するようなフラクタルモデルを作成するための数学的な手法の開発を行った。この結果、

- ・分散の異方化
- ・スペクトル挙動の異方化
- ・接線のフラクタル特性管理

という三つの候補となる手法が得られた。さらに手法間の比較を行った結果、不均質性を表現する主要パラメータである分散とフラクタル次元の両者が成分毎にコントロールできるという点から接線のフラクタル特性管理法が最も有効と考えられることが明らかとなった。この手法では、実際のサイトにおいてボーリング孔及び水平坑道からそれぞれ得られる各成分のデータのみから異方的なフラクタル場を作成することが可能である。

接線のフラクタル特性管理によって作成した異方的な不均質透水係数場の例を図2に示す(垂直及び水平成分のフラクタル次元は、それぞれ1.7及び1.3)。

また、この手法を用いて次段階の不均質媒体中物質移動試験のための、異方的な不均質供試体の設計も実施した。

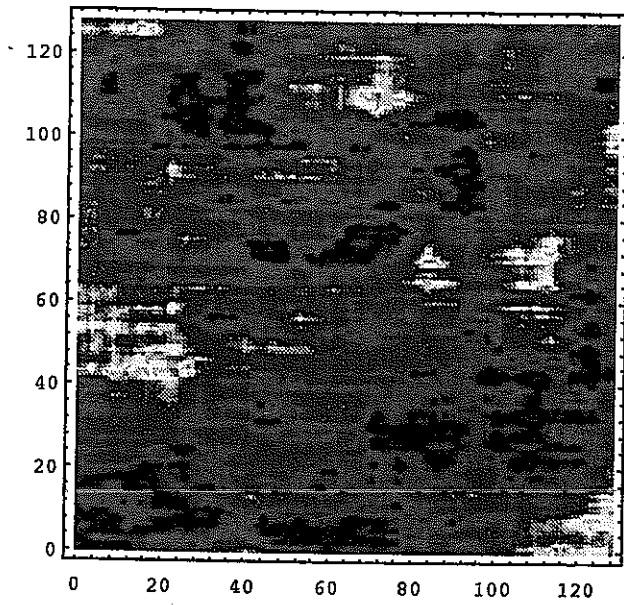


図2 接線のフラクタル特性管理による非等方透水係数場の例

3. 実際のサイトデータへのフラクタルスケーリング則の適用性の確認

昨年の委託研究に継続して、東濃サイトの実測データセットに対してフラクタルスケール則を適用することによって本モデルの検証を試みた。個々に8つの地層を貫く7本のボーリング孔から得られた合計56個のデータグループに対してそれぞれカイ二乗フィッティングを行った結果、いずれのグループについても比較的高い信頼性を以てフラクタルスケーリング則が成立していることが明らかとなった。

フィッティングの一例(TH-5 孔 3a1層)を、図3に示す。

また、これらのデータは、比電気抵抗測定によるもので、電極間隔の10cmから各層の厚さである数10mという幅広い範囲をカバーするものであることから、検証としての有効性も高いものと考えられる。

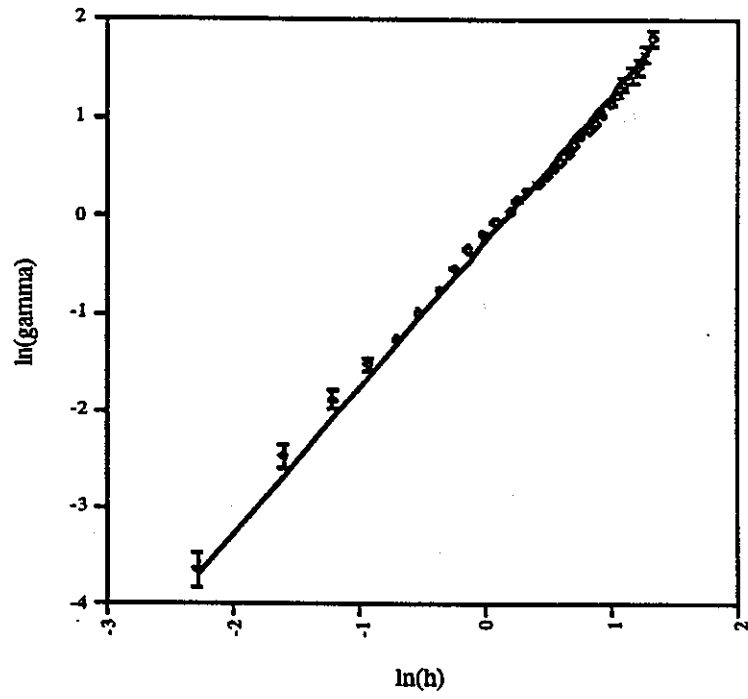


図 3

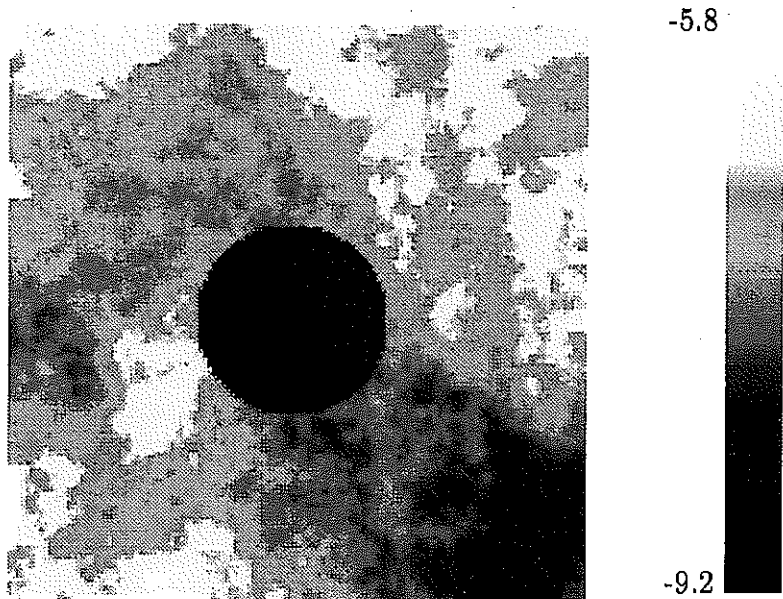
TH-5孔3 a 1層についてのフィッティング結果

4. ニアフィールド核種移行問題への適用

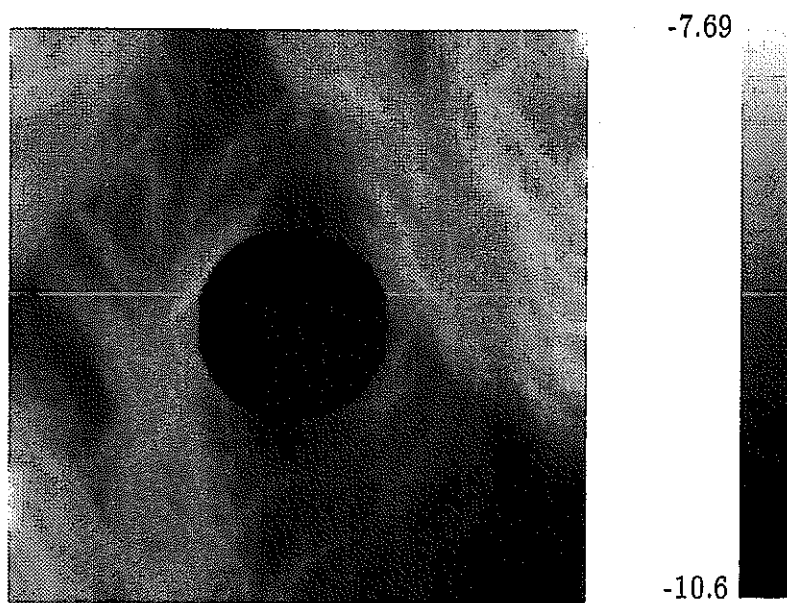
ニアフィールドは、比較的均質性の高い人工材料と不均質性の顕著に現れる自然の岩体とからなる複合的な場であり、この様な系を一つのフラクタルスケール則で取り扱うことは合理的ではない。そこで、個々に異なるフラクタル特性を有する二つの不均質場を「はりあわせる」ことによってこの様な複合的な不均質場を表現する手法を開発した。人工バリアに相当する円筒系の領域を完全な均質媒体とした標準ケースについて、透水係数場及びこれと対応する流動解析の結果を図4に示す。ここでは、母岩中の不均質性に起因するチャンネル構造が形成されていること、及びより低透水性の均質場である緩衝材によってこれらのチャンネルが影響を受けていることが読み取れる。

上の例では一方の媒体は完全な均質場であったが、この領域に別のフラクタル特性を与えて二つの異なる不均質媒体から成る複合領域を作成することも可能である。この様な例として、施工時の混合不良あるいはブロック間の隙間の充填不良等の理由により緩衝材の透水係数分布も不均質となった場合のニアフィールド条件の模擬を行った。この様な場合には、母岩中深層の高透水性部分と緩衝材中深層のそれとが一致した箇所において人工バリアを横断するようなチャンネルが形成される場合がある。

また、ファーフィールドにおいても、複数の岩種から構成されるサイトを評価対象とする場合には上記の手法により二つの不均質性の組合せを考える必要が生じるものと考えられる。



Log(Permeability/ ms^{-1})



Log(Flow Velocity/ ms^{-1})

Repository permeability is 1/100 of mean host permeability

図4 標準ケースについての流動解析結果

5. 不均質多孔質媒体中物質移動試験結果の解析

昨年度の委託研究においては、AFFINITYコードを用いて統計的に作成した不均質透水係数場を標記試験装置において粒径の異なる200個のガラスビーズブロック(10cm X 10cm)を用いて再現した場合の水理及びトレーサ移動の事前解析を行った。本年度は、この事前解析の結果を踏まえ製作、実施されている同試験について実験条件の詳細を設定するための解析的なサポートと、条件設定後の本試験について実験系のより現実的かつ詳細な条件をも考慮した解析とを実施した。

(1)実験条件設定のためのサポート

注入されたトレーサのフローセル内での分散挙動はトレーサ注入圧と周囲の流体圧力とのバランスを鋭敏に反映したものとなることから、トレーサの挙動がブルーム成長の経時変化を観察する上で最適となる様な注入圧を見出すことに焦点をあてて数10ケースの解析を実施した。また、時間の経過に伴い流入部の焼結金属板やガラスビーズ自体の目詰まりによって透水係数が若干変化することについても解析を行った。この結果、トレーサ注入槽の位置変更を含め、実験条件の詳細が設定された。

(2)本試験についての解析

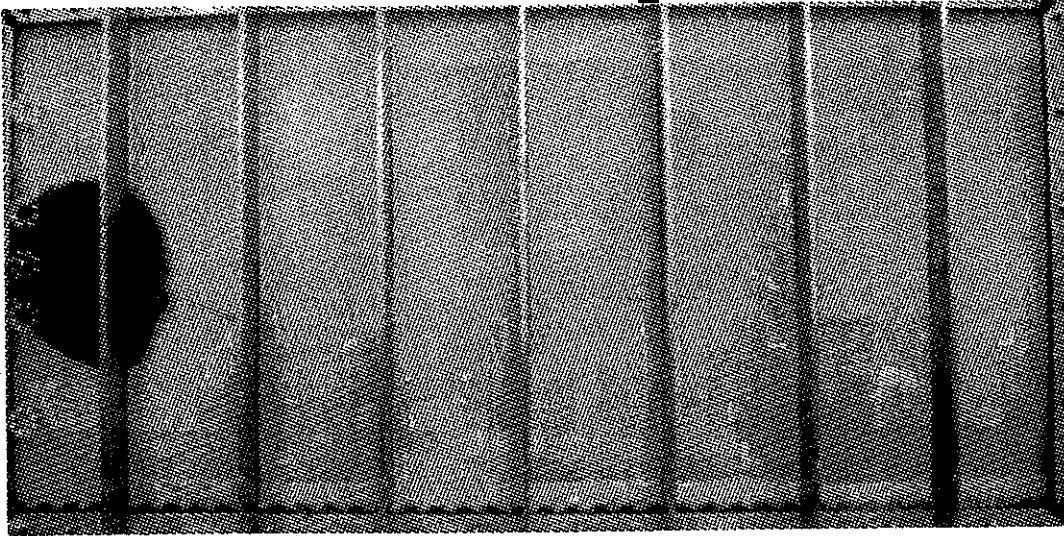
(1)の結果に基づき実施した本試験に対して、上記のトレーサ注入圧、目詰まりの効果、wall effect を避けるため四つの境界に沿って配置された難透水性ブロックの効果等の現実的な諸条件を考慮した解析を行い、各時刻でのトレーサの拡がりについて実験と解析との比較を行った。結果を図5に示す。

同図から明らかな様に、実験と解析の結果は以下の点で極めて良い一致を示している。

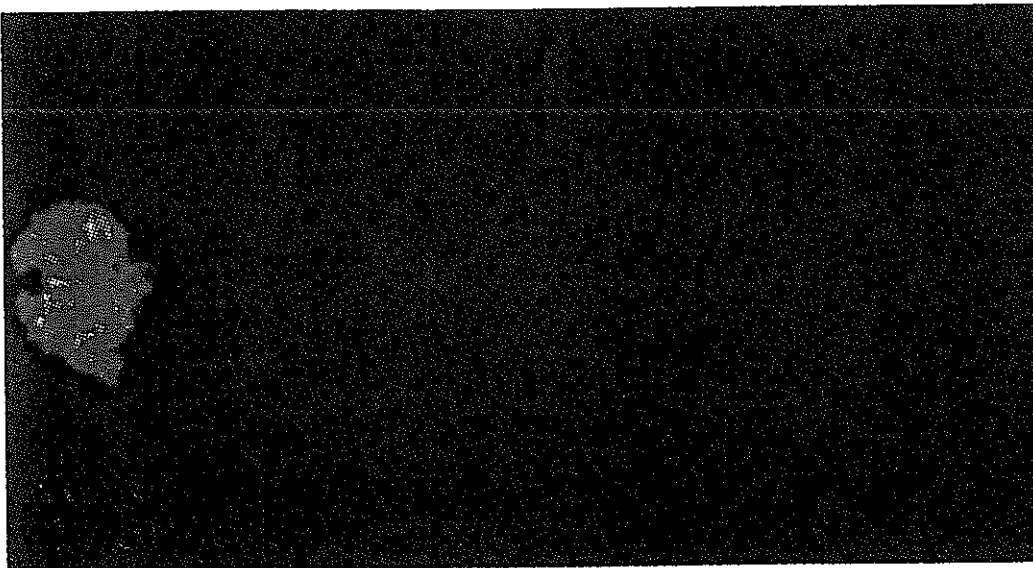
- ・各時刻でのブルーム形状、特に難透水性部分を回避したトレーサの移行挙動(後半に見られるフィンの成長と下流部での分岐)

- ・ブルーム最外側において非常に急激な濃度変化が見られ、輪郭が非常に鮮明であること
- ・トレーサ注入部と周囲との間の圧力勾配に依存した上流部の円形ブルームの形成

MACRO-2D Experiment



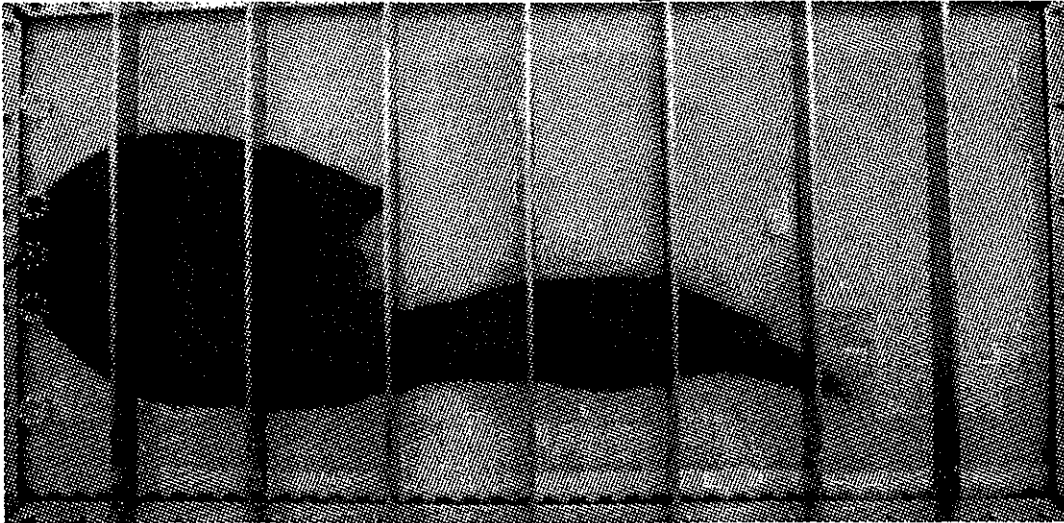
MACRO-AFFINITY Simulation



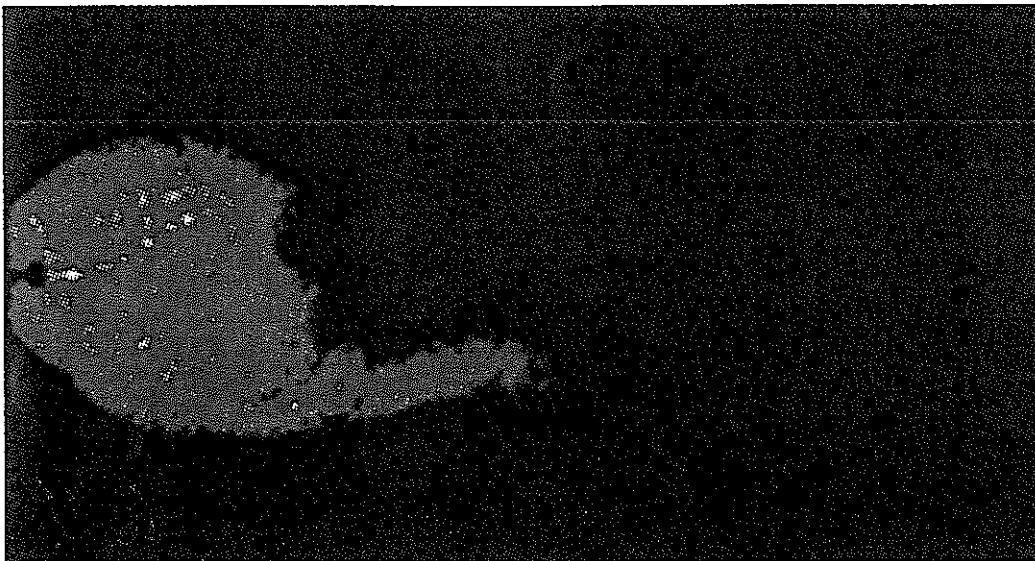
Time = 0.5 h

図5 試験結果と解析結果との比較 (1/4)

MACRO-2D Experiment



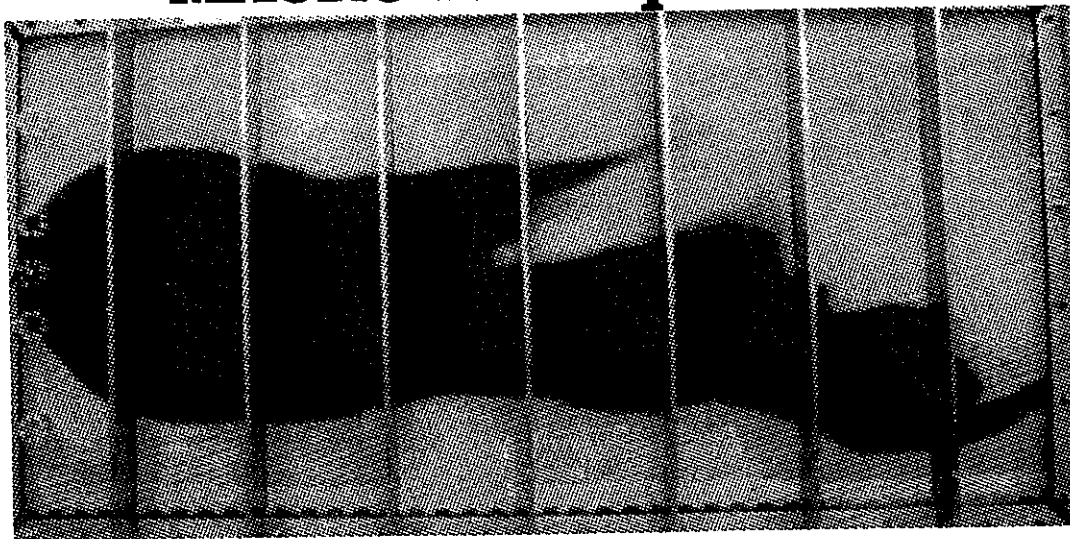
MACRO-AFFINITY Simulation



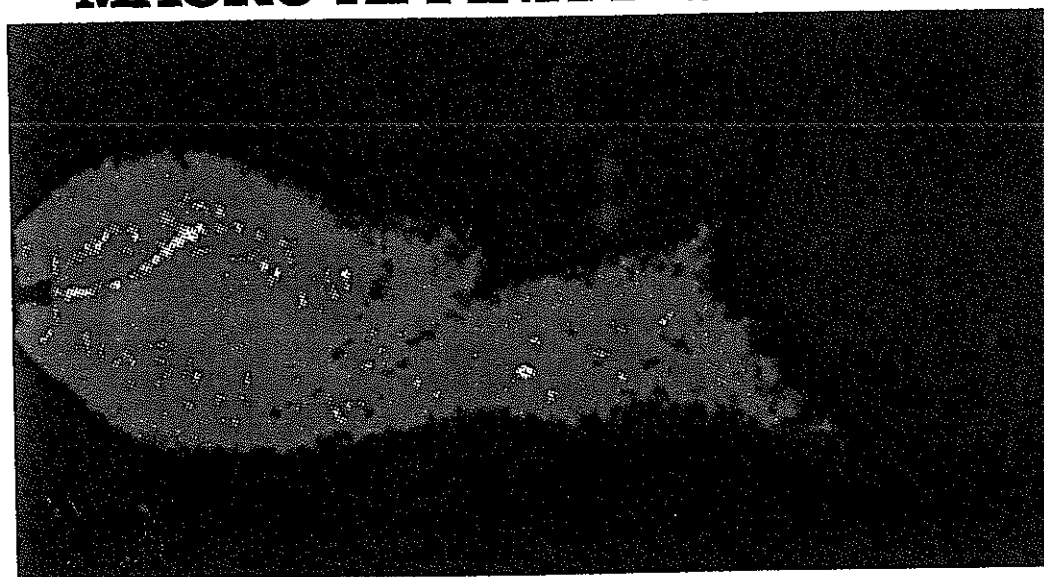
Time = 4.5 h

図5 試験結果と解析結果との比較 (2/4)

MACRO-2D Experiment



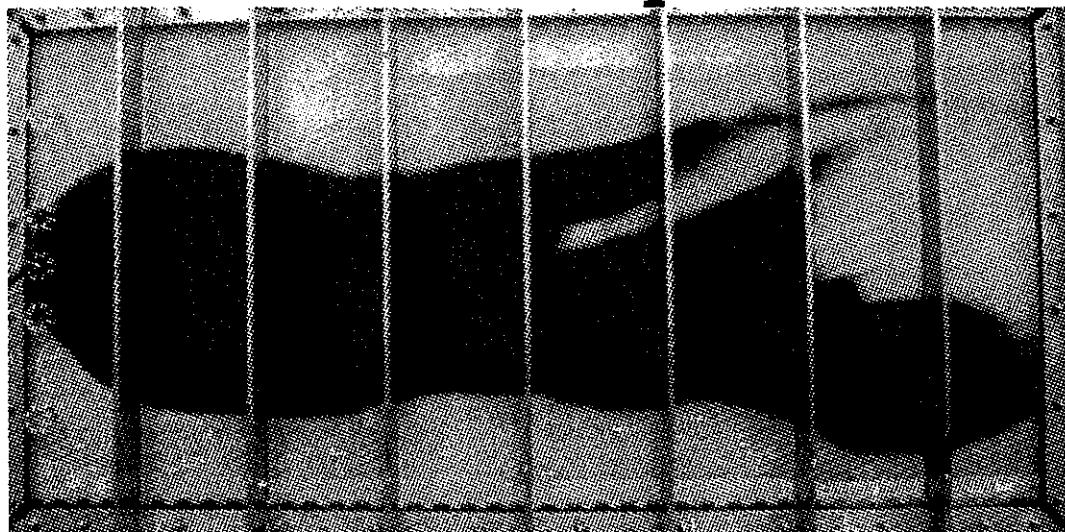
MACRO-AFFINITY Simulation



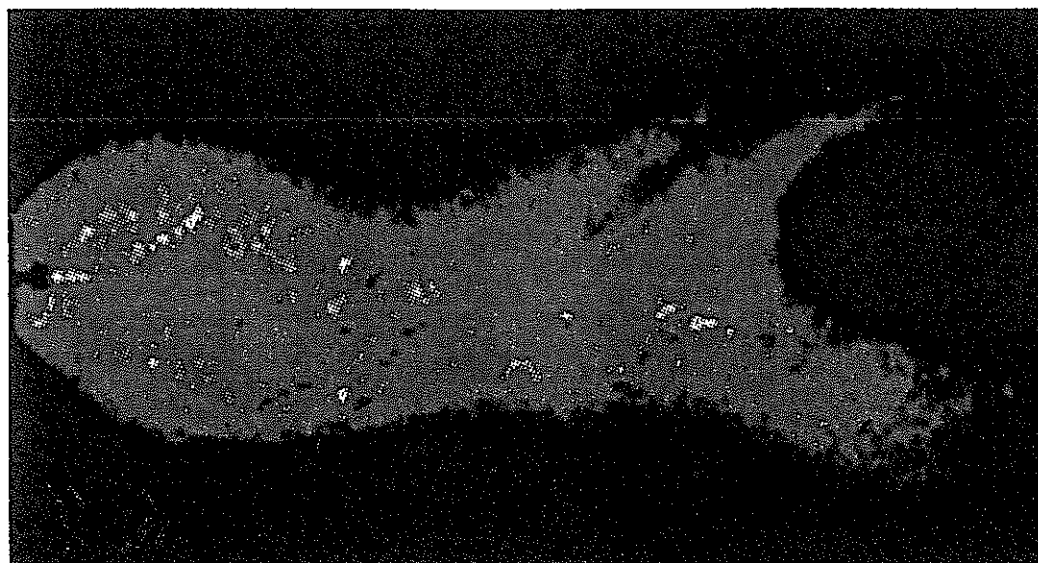
Time = 8.5 h

図5 試験結果と解析結果との比較 (3/4)

MACRO-2D Experiment



MACRO-AFFINITY Simulation



Time = 12.5 h

図5 試験結果と解析結果との比較 (4/4)

6. 今後の課題

- (1)異方的フラクタルモデルによる東濃サイト鉛直断面の透水係数場の推定
- (2)次段階の不均質媒体中物質移動試験のための異方的供試体の詳細設計と事前解析
- (3)パーティクルトラッキングよりも精度の高い濃度分布の算出を可能とする高速、高解像度の分散・移流方程式ソルバの開発
- (4)(3)のソルバを用いたニアフィールド領域の予備的性能評価