

限定資料

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 委託研究成果報告書)

(平成5年度)

平成6年2月

| 技術資料 | | |
|---|--------------|-----------|
| 開示区分 | レポート No. | 受領日 |
| Σ | J1281 94-004 | 1995.1.31 |
| 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 | | |

日揮株式会社

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・核燃料開発事業団殿 委託研究成果報告書）

（平成5年度）

平成6年2月

日揮株式会社

不均質多孔質媒体中の核種移行は、しばしば、チャンネルリ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、統計的に自己アファイ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

また、上述した検討や解析の結果として、自己アファインなフラクタル理論に基づく解析手法は、岩体のもつ不均質性を現実的に考慮してその核種移行への影響を定量化することが可能であり、さらに、フラクタル場のモデルとこれを対象とした流動・物質移動モデルとはそれぞれ、今後の不均質多孔質媒体物質移動試験結果及び実際のサイトにおける透水係数データセットとの比較を行っていくことにより、適用性を明確にしていくことが可能である。

最後に、ニアフィールド問題への適用に重点を置きつつ、AFFINITYモデルを天然バリア性能評価の中核的存在として用いていくための今後の研究開発課題をまとめた。

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

- (iv) possible incorporation of linear/non-linear sorption and colloid transport in the DIVINITY particle tracking algorithm,
- (v) simulation of nuclide transport through the near field host rock.

Based upon the discussions and calculations mentioned above, it was concluded that the self-affine fractal approach is capable to simulate the dispersive effects on the nuclide transport due to realistic spatial heterogeneity and that the validity of the fractal field model and of the flow/transport model on it can be demonstrated by further comparison with the MACRO experimental results and the in-situ transmissivity data set.

Finally several R&D items, which are required for the future use of MACRO-AFFINITY as a core of the Performance Assessment on the natural barriers, were identified focusing on its application to the near field problems.

目次

| | |
|---|-----|
| 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 | 1 |
| 1.1 自己アファイン性とフラクタルスケーリング則 | 1 |
| 1.2 フラクタル透水係数場モデル | 6 |
| 1.3 流動解析モデル | 12 |
| 1.4 物質移行解析モデル | 18 |
| 2. AFFINITY-2Dコードの改良 | 35 |
| 2.1 MACRO-AFFINITYコードの機能 | 35 |
| 2.2 改良の基本方針 | 37 |
| 2.3 コードのレイアウトと基本操作 | 38 |
| 2.4 テストケースについての解析 | 44 |
| 2.4.1 基本ケース | 44 |
| 2.4.2 代替ケース | 67 |
| 3. 非等方媒体の模擬と不均質多孔質媒体中物質移動試験結果の解析 | 78 |
| 3.1 非等方性媒体の模擬 | 78 |
| 3.1.1 フラクタルスケール則の数学的表現 | 78 |
| 3.1.2 異方的なフラクタル場の作成方法と作成例 | 81 |
| 3.2 不均質多孔質媒体中物質移動試験結果の解析 | 90 |
| 3.2.1 試験条件の詳細 | 91 |
| 3.2.2 現実的試験条件を考慮した再解析 | 97 |
| 4. 天然バリア中核種移行解析のための解析手法としてのAFFINITYについての検討... | 111 |
| 4.1 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 | 112 |
| 4.1.1 東濃サイトの透水係数データについての解析 | 112 |
| 4.2 パーティクルトラッキングアルゴリズムの改良 | 123 |
| 4.3 MACRO-AFFINITYの詳細解析結果の簡単化及び人工バリアモデルとの連成 ... | 139 |
| 4.3.1 解析条件の設定 | 129 |

| | |
|--------------------------------|-----|
| 4.3.2 解析結果 | 131 |
| 5. まとめ及び今後の課題 | 138 |
| 参考文献 | 140 |
| 付録1 AVS License Administration | 143 |
| 付録2 Using AVS with Licenses | 160 |

表リスト

表3.2.1-1 標準ケースの設定条件

表3.2.1-2 透水係数実測値

表3.2.2-1 焼結金属板の目づまりを仮定した、流動解析の結果

表3.2.2-2 一様な空隙径減少を考慮した場合のガラスビーズブロック透水係数変化

表3.2.2-3 一様空隙減少を仮定した場合の流動解析結果

表4.3.1-1 コンディショニングに用いた透水係数値

図リスト

- 図 1.2-1 フラクタル透水係数場の例
- 図 1.3-1 隣接したセルの境界におけるフラックス
- 図 1.3-2 プレコンディションされた共役勾配法による流動解析の結果（流速場）
- 図 1.4-1 現行手法による平行流についての粒子軌道
- 図 1.4-2 斜行平行流における疑似分散効果
- 図 1.4-3 疑似分散効果を低減するためのトラッキングスキーム
- 図 1.4-4 単一セルについての境界条件の場合分け及び対応する圧力分布パターン
- 図 1.4-5 ケース(b)についてのより詳しい場合分け
- 図 1.4-6 改良後の手法による粒子群のふるまい
- 図 1.4-7 DIVINITYによるパーティクルトラッキング結果の例

- 図 2.3-1 MACRO-AFFINITYの操作パネルの例
- 図 2.4.1-1 解析対象領域の設定
- 図 2.4.1-2 透水係数データの入力例
- 図 2.4.1-3 基本テストケースについての透水係数場
- 図 2.4.1-4 流動解析境界条件（水頭）の設定例
- 図 2.4.1-5 基本テストケースにおける流動解析結果（圧力分布）
- 図 2.4.1-6 基本テストケースにおける流動解析結果（ダルシー流速場）
- 図 2.4.1-7 トレーサ注入位置の指定
- 図 2.4.1-8 基本テストケースにおけるパーティクルトラッキングの結果
- 図 2.4.1-9 基本テストケースにおける破過曲線の算出例
- 図 2.4.1-10 基本テストケースにおける累積破過曲線の算出例
- 図 2.4.2-1 代替ケースにおける離散化された透水係数場
- 図 2.4.2-2 代替ケースにおける流動解析結果（ダルシー流速分布）
- 図 2.4.2-3 代替ケースにおけるパーティクルトラッキング結果の例
- 図 2.4.2-4 バリオグラムについてのフラクタルスケーリング則のフィッティング
- 図 2.4.2-5 フィットさせたフラクタル次元の感度
- 図 2.4.2-6 変更後のグリッドサイズ

- 図2.4.2-7 変更後の（高解像度の）流動解析結果

- 図3.1.2-1 分散の異方化による非等方透水係数場の例
- 図3.1.2-2 スペクトル挙動の異方化による非等方透水係数場の例
- 図3.1.2-3 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
- 図3.2.1-1 前回予備解析の結果（標準ケース）
- 図3.2.2-1 現実的な実験条件を考慮して改訂された解析結果
- 図3.2.2-2 焼結金属板の目づまりを考慮した場合のパーティクル挙動
- 図3.2.2-3 ガラスビーズの目づまりを考慮した場合のパーティクル挙動
- 図3.2.2-4(1) トレーサ注入圧変更後の試験結果と解析結果との比較
- 図3.2.2-4(2) トレーサ注入圧変更後の試験結果と解析結果との比較
- 図3.2.2-4(3) トレーサ注入圧変更後の試験結果と解析結果との比較
- 図3.2.2-4(4) トレーサ注入圧変更後の試験結果と解析結果との比較

- 図4.1.1-1 東農鉦山地域の模式柱状図
- 図4.1.1-2 電気検層による透水係数値推定結果と原位置透水係数試験結果の比較
- 図4.1.1-3 各ボーリング孔についての層序の模式図
- 図4.1.1-4 断面線位置図
- 図4.1.1-5 TH-5孔3 a 1層についてのフィッティング結果
- 図4.1.1-6 TH-7孔3 a 1層についてのフィッティング結果
- 図4.1.1-7 TH-8孔5層についてのフィッティング結果
- 図4.2-1 非吸着 ($a = b = 0$) の場合のトレーサ分布
- 図4.2-2 線型吸着 ($a = 1, b = 0$) の場合のトレーサ分布
- 図4.2-3 非線型吸着 ($a = 1, b = 0.24$) の場合のトレーサ分布
- 図4.2-4 種々の (a, b) についての累積破過曲線
- 図4.3.1-1 モデル化領域
- 図4.3.2-1 標準ケースについての流動解析結果
- 図4.3.2-2 代替ケース1についての流動解析結果
- 図4.3.2-3 代替ケース3についての流動解析結果
- 図4.3.2-4 標準ケースについての累積破過曲線

図4.3.2-5 標準ケースについてのパーティクル挙動

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

本章では、今年度開発したMACRO-AFFINITYコードの理論的背景を説明することとする。

1.1 自己アファイン性とフラクタルスケーリング則

(1) 自己アファイン性

多孔質あるいは亀裂状の飽和媒体における非吸着性の溶質移動と分散を支配する基本プロセスは良く知られた個々のイオンの分子拡散及びその背後にある流速場によってもたらされる機械的分散である。

しかしながら、微視的な空隙構造、従ってこれに影響される微視的な流れのゆらぎには未知の点が多く、これまで巨視的なモデルを用い、これに何らかの意味で“平均化”されたパラメータを入力するという方法で物質移動解析が為されてきた〔1〕、〔2〕。

この様な巨視的アプローチに対する一つの代替的手法は、微視的な透水係数分布を極度に不均質な、滑らかでない関数によって表現する方法である。この様な関数の代表的例は、フラクタル曲線である。フラクタル曲線の数学的特徴は至る所微分不能という点であり、隣接した2点が例えば数桁はなれた透水係数を示すような高度な不均質性を表現することができる。

自然界に見られる不均質性の一つの大きな特徴は、不規則性という点である。

これは透水係数場についても当てはまる。即ち、透水係数分布は決して決定論的な特性のみでは記述しきれない。この観点から言えば、自己相似という決定論的な特性は強すぎると言うことができる。実際、透水係数分布の測定結果にはコッホ曲線の様な完全な規則性は全く見られない。

こうして、自然に見られる特性の不均質性あるいは“いびつさ”といったものをできるだけ一般的に記述できる概念を探して行くと、統計的自己アファイン性に達することとなる。統計的自己アファイン性とは、透水係数のある統計的なモーメント（例えばensemble average）が自己相似性を満足する様な空間的パターンのことである。例えば、1万個の統計的に同値な自己アファインモデルを発生させたとして、

その平均値は決定論的な自己相似性を満足するが、個々のモデル (realization と呼ばれる) はそれぞれ違った形で自己相似性からのずれを有したものとなる。

この様に統計的な意味での自由度をもたらすことによって、自己アファインという概念は単に机上のアイディアにとどまらず、実用性を得ることになる。実際、これまでにいくつかのサイトにおいて数桁という広いスケールの範囲にわたり透水係数場の自己アファイン性が検証されている〔3〕、〔4〕、〔5〕、〔6〕。

また、自己アファインモデルは、サイト特性調査における不確実性を見積りにもそのまま適用できるという利点を持っている。例えば、調査地点数が少ないと前述した1万個のrealizationsは幅広い分布を持つことになる。そして、この分布は地点数を増すと共に減少していき、理想的には地点数無限大において一つのパターンに収束することとなる。統計的自己アファインモデルを用いることのもう一つの利点は、地点数が少なければ少ないなりに、それに伴う不確実性を定量化し、ある一定の上下限を見出すことができるということである。これは、現実的な制約を考えれば、大きな特長とすることができる。

(2) フラクタルスケーリング則

既に述べた様に、溶質の分散現象は、流速場の不均質性に起因するものであり、その背後にある空隙構造は広範なスケールにおいて不均質性を示していると言われている。そして、微視的な不均質性が巨視的な溶質移動特性を決定することも可能である。

しかしながら、あるサイト、あるいはある特定の岩体の全域にわたって微視的不均質性をくまなく調べるということは明らかに現実的ではない。従って、異なるスケールの不均質性間の相関を表す概念モデルが必要となる。これを一般にスケーリング則と呼ぶ。

一つの例として、ある岩体をブロックに切りくずし、それぞれのブロックに含まれる亀裂の開口幅の最大値 (以下、MFAと言う) を考えて見る。明らかに、ブロックの大きさが増すにつれてMFAは増大する。更に、非常に大きなMFAを有するブロックや非常に小さいMFAを有するブロックの数は相対的に少ないはずである。このことは、現実的なスケーリング則が非線型であり、かつ統計的なものであることを示唆している。

もっと具体的な例として、Henriette 等〔7〕によって行われた砂岩の空隙率分布の測定を考えてみよう。ここでは15×15×50cmの砂岩を 300個のブロックに分割し、それぞれの空隙率 $V(x)$ が測定されている。

さて、次式によってバリオグラム $\gamma_V(h)$ を定義する。

$$\gamma_V(h) = \langle \{X(x) - V(x+h)\}^2 \rangle \quad (1)$$

$\langle \cdot \rangle$ は同じ距離 h を有する様な点の組を数多く考え、その平均をとる操作を意味するものとする。つまり、バリオグラムはある距離 h 離れた点での特性値がどの程度異なるか、その期待値を表す。明らかにバリオグラムは自己相関関数と密接な関係を持つものである。

前出の例において実測値から算出したバリオグラムの自然対数は $\ell n(h)$ について線型である、さらにこの線型式によるフィッティングは $R^2 = 0.975$ というかなり良い数値を示す。

$$\ell n[\gamma_V(h)] = 8.38370 + 0.68921 \ell n(h) \quad (2)$$

さて、この形、即ち $\ell n[\gamma_V(h)] = a + 2b \ell n(h)$ 形式のスケーリング則は、この形のみではなく実に広範な特性値の不均質性に対して良く当てはまることが知られている。

このスケーリング則が、フラクタルスケーリング則と呼ばれるものである。実際、 R^n で定義された関数 $V(x)$ が上式を満たすとすると、これは $h+1-b$ のフラクタル次元を持つことになる。例えば、一次元問題について考えると b が1に近ければ隣り合った二点は強く相関しておりつまり滑らかな曲線 $V(x)$ (フラクタル次元が1に近い)

を与えることとなる。逆に、 b が0に近ければ隣り合った二点の特性がばらばらな rough な曲線(フラクタル次元が2に近い)を与える。因みに上の例では R^2 において $V(x)$ のフラクタル次元が2.65程度となる。

一般に、自然の不均質性は決定論的ではなく、さりとてrandomでもないという中間領域にあるが、上の2.65という数値はまさにこれを定量的に代表している。

上記の様にフラクタルスケーリング則を示すデータセット $\Psi(x_i)$ が与えられた時、我々の方法によればそのスケールについての階層構造から恣意的な推論をすることなく、

その構造全体をフラクタルとして表現することができる。

また、不均質媒体中での物質移動現象について、溶質の巨視的移流／分散挙動は流速場の微視的空間構造の関数として表されるものと考えることができる。そこで、この微視的な流れの構造を表現するために、不均質透水係数場を高解像度で定義するという必要性が生ずる。この要求を考えると、フラクタルスケーリング則の利用は、更に魅力的なものとなる。フラクタルスケーリング則を用いれば高解像度の統計的自己アファインモデルを極めて高効率で発生することができるし、また不均質特性を司るパラメータ（フラクタル次元）は数学的にコントロールしやすいものでもある。

フラクタルモデルの有する特性をさらに詳しく見るために、次の条件を満たす関数 $\Psi(x)$ を考える。

$$\gamma \phi(h) \equiv \langle |\Psi(x+h) - \Psi(x)|^2 \rangle \propto h^{2P} \quad (3)$$

但し、 P は定数、 $0 < P < 1$ 。また、ここでも $\langle \cdot \rangle$ は多くのサンプルについてアンサンブル平均をとることを意味するものとする。

上式を満足する関数 $\Psi(x)$ 、あるいは $\Psi(x)$ によって表現される場、を統計的に自己アファインなモデルと呼ぶ。

この関数 Ψ は、統計的な意味でのスケーリング則を満足する。即ち、対象とする領域を（つまりスケールを） γ 倍すると Ψ の増加 $\Delta\Psi = |\Psi(x+h) - \Psi(x)|$ のアンサンブル平均は、 γ^P 倍となる。

$$\langle \Delta\Psi(\gamma h)^2 \rangle = \langle \gamma^{2P} \Delta\Psi(h)^2 \rangle \quad (4)$$

(3) 式を満足する、即ち統計的に自己アファインな関数はその性質を極限 $h \rightarrow 0$ においても保存する。つまり、一般には滑らかでない。既に述べた様に、滑らかではない関数についての研究は、現在では広範多岐にわたり活発に行われており、その全てをここで述べることはできない。しかし、本研究でのフラクタルモデルの役割を理解する上では、統計的自己アファインなフラクタルとは、

- rough な関数であり、
- 微視的スケールから巨視的スケールまで、広くフラクタルスケーリング則を満足するもの

と考えると全く差し支えない。

1.2 フラクタル透水係数場モデル

MACRO-AFFINITYでは、透水量係数 T の空間的不均質性は、バリオグラム $\gamma\phi(h)$ 、

$$\gamma\phi(h) \equiv \langle |\Psi(x+h) - \Psi(x)|^2 \rangle \quad (5)$$

によって代表されるものと仮定する。但し、ここで $\Psi = \log_{10}(T)$ である。

上記のバリオグラムの挙動は、実測データのセットから推定することができる。この際、前出のフラクタルスケーリング則

$$\gamma\phi(h) = ah^{2p} \quad (6)$$

が広範なスケールにおいて、特に $h \rightarrow 0$ においても、成立するものと仮定する。但し、 a 及び p は定数である。

また、大きい h についてはある“しきい値”を設け、それ以上の h に対するバリオグラムは一定と仮定する。こうして、スケール0から“しきい値”までの間でフラクタルスケーリング則に従う統計的自己アファインモデルが得られる。

実際の問題への適用にあたっては、上記の概念モデルのrealization $\Psi(x)^*$ は、以下の条件を満足する様に設定される。

- (1) 全ての調査地点で実測値と一致する。
- (2) 所定のフラクタルスケーリング則を満足する。
- (3) 調査データセットの示す統計量と $\Psi(x)^*$ についてのそれとが一致する。

即ち、

- ① $\langle \Psi^* \rangle \equiv \tilde{\Psi}$ ($\tilde{\Psi}$: 実測データの平均)
- ② $\langle \Psi^* - \tilde{\Psi} \rangle^2 \equiv$ (実測データの分散)

が成り立つ。

上記のうち、(3)の第2の式はバリオグラムの漸近挙動を指定することとなるため、フラクタルスケーリング則の成立する範囲を定めるものとして重要である。

以上、この概念を数学的に取り扱う具体的方法についてまとめる。

(1) フラクタルスケーリング則へのカイニ乗フィッティング

与えられた透水係数データセット $\Psi(x_i) = \log_{10}(T(x_i))$, $i = 1, \dots, N$ が2で述

べたフラクタルスケーリング則を満足するか否か、また、適合するものである場合にスケーリング則のパラメータ値を見出すために、以下の手順でデータセットの区間分割を行う。

- ① 調査地点間の距離 h についての区間分割： $[h_0, h_1], [h_1, h_2], \dots, [h_{N-1}, h_N]$ を行う。
- ② 全ての調査地点のペア (x_i, x_j) について距離 h を求め、これに基づき各ペアを①の区間に割り振る。
- ③ 各区間でのバリオグラムの平均値を算出する。

$$\bar{\gamma}_k = \langle \{\Psi(x_i) - \Psi(x_j)\}^2 \rangle, \quad !k \in \{1, \dots, N\}$$

こうして、フラクタルスケーリング則のスケーリングパラメータ p を推定する問題は、上記手順で得られるバリオグラムについてのデータセット $(\bar{\gamma}_i(\bar{h}_i), \bar{h}_i)$, $(i = 1, \dots, N)$ に対して、

$$\bar{\gamma}(h|a, p) = a h^{2p} \tag{8}$$

をフィッティングすることとして理解される。

この問題はまた、データセット $(\tilde{\gamma}_i, \tilde{h}_i) = (\ln[\bar{\gamma}_i(\bar{h}_i)], \ln[\bar{h}_i])$ に対して、

$$\ln[\tilde{\gamma}(h|\alpha, \beta)] = \alpha + \beta \ln(h) \tag{9}$$

をフィッティングすることと同値である。但しここで、 $\alpha = \ln(a)$, $\beta = 2p$ 。

また、さきほどの区間分割によって誤差が介入することを付記する必要がある。これについては、 i 番目の区間での平均値の対数表示 $\tilde{\gamma}_i = \ln[\bar{\gamma}_i(\bar{h}_i)]$ の標準偏差をもとのデータセットから容易に算出することができる〔8〕。

区間分割されたデータセットと、各区間での標準偏差が与えられた状況でのフィッティングの手法として最も標準的なものは、maximum likelihood法である。この手法では、モデルパラメータの最尤推定値はカイニ乗量と呼ばれる以下の値を最小化することによって算出される〔9〕。

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\tilde{\gamma}_i - \tilde{\gamma}(h_i, \alpha, \beta)}{\tilde{\sigma}_i} \right)^2 \quad (10)$$

カイニ乗フィッティングは単にモデルパラメータの推定を行うのみではなく、同時にフィッティングに介在する不確実性、及びフィッティングの適合性についての定量的な尺度を与えるものである。フィッティングに伴う不確実性、より具体的には区間分割によって生ずる不確実性は、 α 及び β についての標準偏差 $\tilde{\sigma}$ 及び $\tilde{\sigma}$ によって定量化される。また、フィッティングの適合性については、 $N-2$ の自由度を有するカイニ乗分布によって表される χ^2 の確率分布

$$f(\chi^2) = \frac{\chi^{2(\nu/2-1)} e^{-\chi^2/2}}{2^{\nu/2} \Gamma(\nu/2)} \quad (11)$$

を用いて定量化される。ここで、 $\nu = N-2$ であり、 Γ はガンマ関数を表す。

従って、次式で与えられる信頼性レベル Q

$$Q = \int_0^{\infty} \frac{\chi^{2(\nu/2-1)} e^{-\chi^2/2}}{2^{\nu/2} \Gamma(\nu/2)} dx \quad (12)$$

は、カイニ乗量がある値を上回る確率を与えることとなり、従ってフィッティングの適合性を定量的に示すものとなる。この信頼性レベル Q は、実測値が真にフラクタルスケーリング則に従うものか否かを判断する上で、極めて重要な役割を果たす。

(2) 透水係数場についてのコンディショニング及びその作成

与えられた透水係数データセットに対して最適なフラクタルスケーリング則が得られた後、次には Inverse Problemを解くことが必要となる。MACRO-AFFINITYは、長方形の解析領域を任意数のグリッドに分割し、調査地点においては透水係数が実測値に一致し、また地点間では得られたフラクタルスケーリング則を満足する様な不均質透水係数場を発生することが可能である。

ここで用いられる手法は、スペクトル法もしくはフーリエフィルター法と呼ばれるものである。この手法は、透水係数場 $\Psi(x)$ *に対応するフーリエ級数の崩壊挙動が透

水係数場のスケーリング特性と相互関連を有するという事実に着目して考案されたものである。

例として、透水係数場 $\Psi(x)^*$ のフーリエ級数展開が以下の様に与えられたとする。

$$\Psi(x)^* = \sum_k a_k e^{2\pi i k \cdot x} \quad (13)$$

但し、ここで x 及び k はいずれも 2次元のベクトル量である。

この時、容易に確認できる様に、係数列 $\{a_k\}$ が以下の条件を満足すれば、 $\Psi^*(x)$ 自体が統計的自己アファイン性の定義式 (6) を満たす (10)。

$$\langle |a_k|^2 \rangle \sim |K|^{-(2+2P)} \quad (14)$$

実際の計算に当たっては、(13) の級数展開を

$$\Psi(x)^* = \sum_{k < N} a_k e^{2\pi i k \cdot x} \quad (15)$$

の様に有限個の項で打ち切り、高速フーリエ変換を行う。

次に、発生する透水係数場を実測値と整合的なものとするために、次の様なコンディショニングの操作を行う。

- ① コンディショニングされていない不均質透水係数場 (但し、上記の係数列の制約を満足することにより個々の realization はフラクタルスケーリング則に従っている) をランダムに複数個発生する。
- ② 次に、上記の realizations の線型和をとり、各調査地点において透水係数の推定値が実測値と一致する様に各 realization の係数を調整する。
この時、realizations の張る線型部分空間の次元が実測値の点数を上回る様、十分多くの realizations を①で作成しておくことにより、実測値と整合的な線型和が複数個得られる。
- ③、②で得られた線型和のうち、その分散が実測データの分散に最も近いものを最適解として選択する。

一般に、各項が所定の崩壊挙動を示す様なフーリエ級数の線型和の各項は、明らかに同じ崩壊挙動を示す。つまり、②の操作においてフラクタルスケーリング特性が保存されることは保証されている。

なお、①の操作においては、(14) 式の a_k についての条件が統計量として与えら

れていることから、ある確率密度関数からのサンプリングによって複数のスペクトル係数列 $\{a_k\}$ をランダムに作成し得る。現在のスキームでは、 a_k の位相と大きさをそれぞれ $[0, 1]$ の均一分布からサンプリングし、さらに大きさについては $|k|^{(2+2\beta)}$ で除することによって (14) 式を満足する様に調整している。

また、①～③を繰り返し用いることにより、上記の条件を全て満足する様な透水係数場を多数個発生することができる。このことは、既に述べた様に、調査がくまなく全域をカバーし得ず、従って透水係数分布が一意には推定し得ないということと一致している。MACRO-AFFINITYは、多数の透水係数場を発生可能であり、このことは、推定される透水係数場の示し得る変動幅を明示できるという利点につながる。

上記の方法によって作成された不均質透水場の例を図1.2-1 に示す。

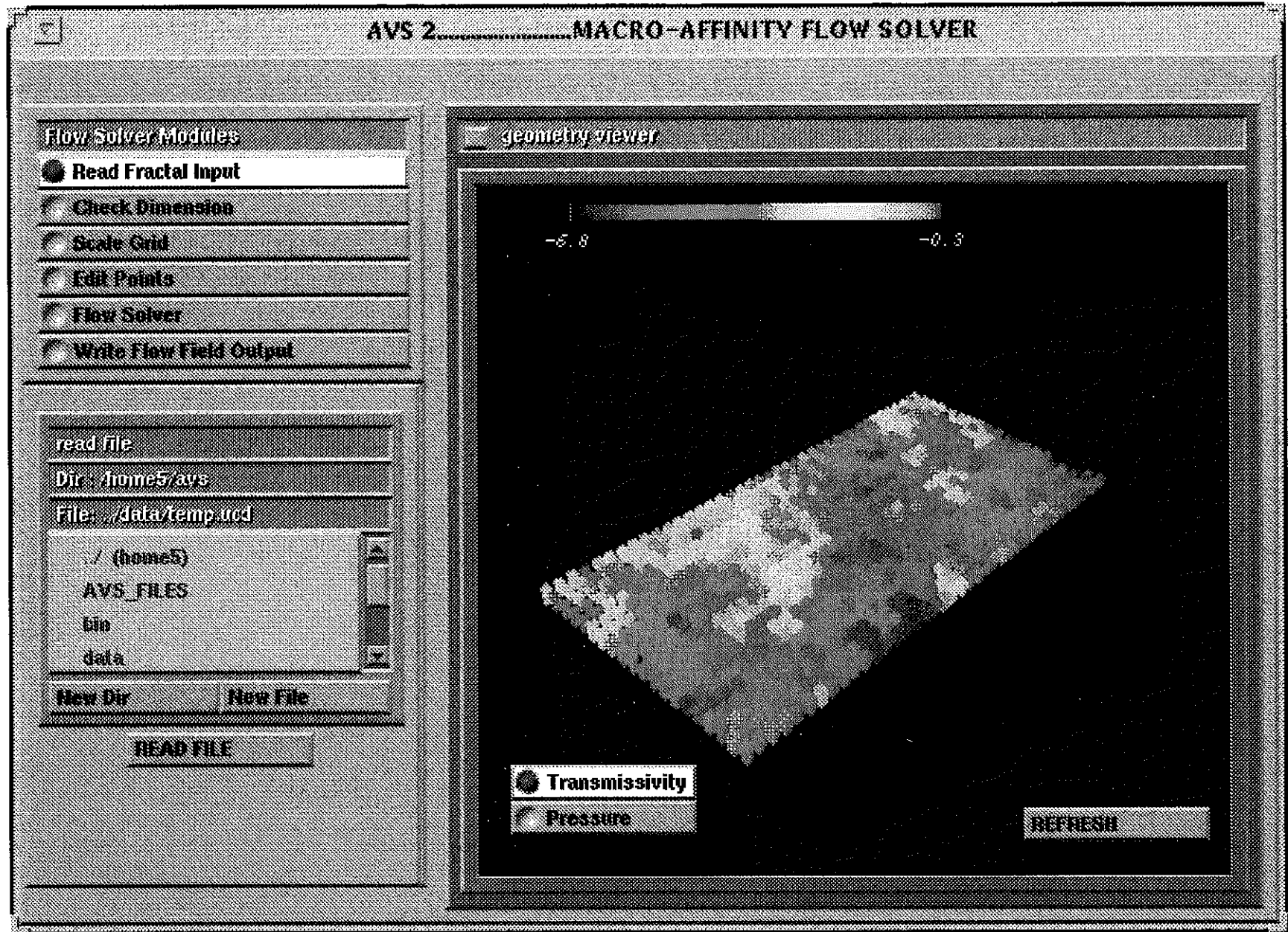


図 1. 2-1 フラクタル透水係数場の例

1.3 流動解析モデル

不均質な透水係数場を統計的自己アファインなフラクタルモデルで表現した後、次の課題となるのは、当該透水係数場での地下水流動の解析である。この解析を実施するにあたって、MACRO-AFFINITYコードでは以下の仮定を設ける。

- ① 流速場は定常状態にある。
- ② 流体は非圧縮性であり、ダルシー則が成立する。
- ③ 媒体は一定の厚さ e の平板の形状であり、二次元近似が有効である。

また、全領域にわたり空隙率 θ は一定である。

以上の仮定の下に、地下水流動解析の支配方程式は以下のものとなる。

$$\begin{aligned} e \theta u &= T(x) \nabla P(x), \\ \nabla \cdot [U] &= 0 \end{aligned} \quad (7)$$

ここで、 $P(x)$ 及び $T(x)$ はそれぞれ水頭及び透水係数であり、いずれも位置 x の関数として表される。 $U(x)$ は流速ベクトルである。

以上の支配方程式を与えられた任意の圧力分布、もしくは no-flux条件、あるいはこれらの組み合わせを境界条件として解法する。更に、領域内部の任意の点で圧力を指定し、この点をsourceもしくはsinkとすることが可能である。次に、数値解法について以下にまとめる。

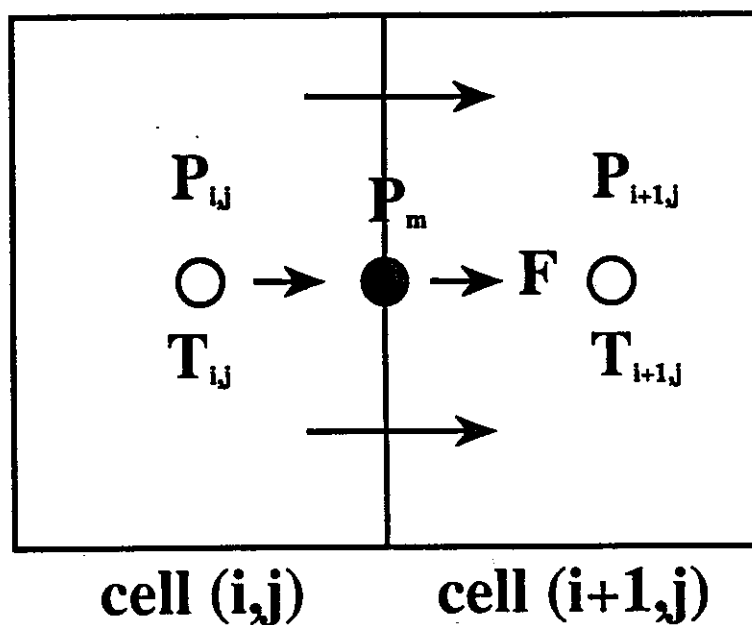
(1) 有限差分

MACRO-AFFINITYは、上記の支配方程式を任意数のグリッド上で差分化し、これを解くことによって高解像度の流速場を算出する。

図1.3.-1は隣接する二つのセルを表す。ここで、 $T_{i,j}$ (i, j) の位置にあるセルの透水量係数であり、 $P_{i,j}$ はセル中央での圧力を示す。なお、位置の添字については以下のルールを用いる。即ち、各セルはセル (i, j) に対して以下の位置関係にあるものとする。

($i+1, j$) : 右側 (R)

($i-1, j$) : 左側 (L)



Schematic of numerical scheme for calculating cell interface fluxes.

図1. 3-1 隣接したセルの境界におけるフラックス

(i, j + 1) : 上側 (T)

(i, j - 1) : 下側 (B)

また、各セル間の境界では境界上の圧力を、隣接した二つのセルの中央での圧力と整合的となる様に定め、これを用いて流入/流出フラックスを算出する。

即ち、セルの大きさを $\Delta x \times \Delta y$ とし、セル (i, j) からセル (i+1, j) への右向きフラックスを F_R 、境界上での圧力を P_m とすると、

$$F_R = T_{i,j} \frac{(P_{i,j} - P_m) \Delta y}{\Delta x/2} = T_{i+1,j} \frac{(P_m - P_{i+1,j}) \Delta y}{\Delta x/2} \quad (16)$$

となり、また、これを P_m について解いて、

$$P_m = \frac{T_{i,j} P_{i,j} + T_{i+1,j} P_{i+1,j}}{T_{i,j} + T_{i+1,j}} \quad (17)$$

が得られる。更に、(17)を(16)に代入して、 F_R は、

$$F_R = \frac{T_{i,j} T_{i+1,j}}{T_{i,j} + T_{i+1,j}} \frac{(P_{i,j} - P_{i+1,j}) \Delta y}{\Delta x/2} \quad (18)$$

と表される。

上記の操作は、隣接する2つのセルを横切るフラックスを、これらのセルの透水係数の調和平均に基づき算出することと同値である。また、同様の操作が、左向き、上向き、及び下向きのフラックスについてもそれぞれ行われる。

(18)式は、各セルの質量保存を制約として連立され、こうして作られる $P_{i,j}$ についての線型差分式系は、次節に述べるpreconditionされた共役勾配法に基づくソルバによって解法される。

図1.3-2にAFFINITY-2Dによって解かれた流速場の例を示す。

(2) Preconditionされた共役勾配法〔11〕

一般に、高度に不均質でroughな透水係数場においては、通常のFDMやFEMでは安定解を得ることができない。また、ガウス消去法の様な方法は代数的な厳密解を与えるものの計算効率の点から適用不能である。そこで開発されたものが共役勾配法に代表されるsemi-iterativeなスキームである。

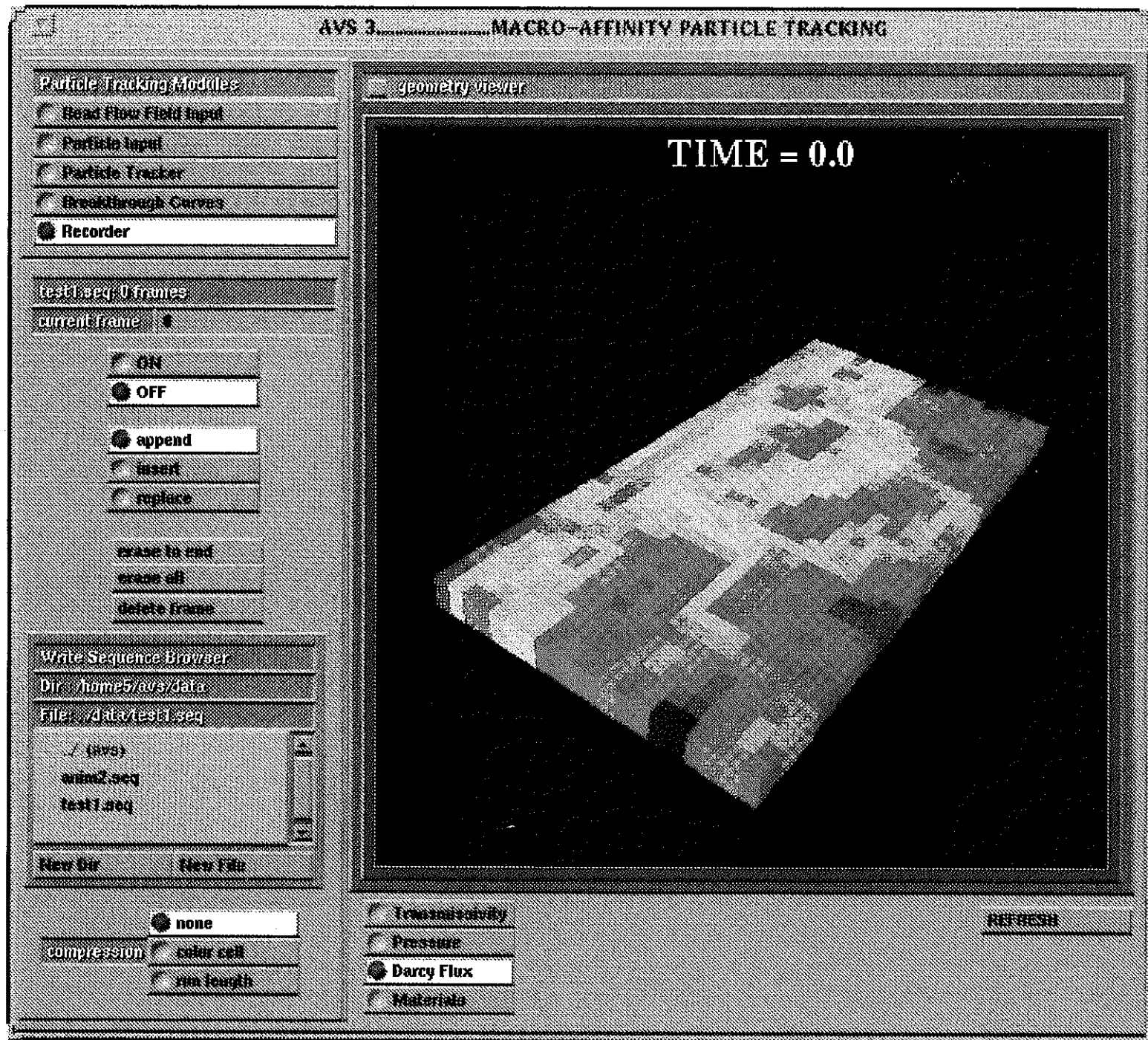


図 1. 3-2 プレコンディションされた共役勾配法による流動解析の結果（流速場）

この方法は、基本的にはある種の繰り返しスキームにおいて残差項を最小化するものである。例えば係数行列A、非同次項ベクトルbを有する線型方程式系において、次回値を探すものと仮定する。

xについての初期推定値 x_0 が得られた時、次の形式の次回値を探す。

$$x_1 = x_0 + \sum_{i=0}^{s-1} \alpha_i P_i \quad (19)$$

ここで、 α_i は残差ベクトル

$$r_i = b - Ax_i = b - Ax_0 - \sum_{j=0}^{i-1} \alpha_j AP_j \quad (20)$$

のKノルムを最小化する様を選ぶものとする。但し、Kノルム $\| \cdot \|_K$ は $\| r_i \|_K^2 = r_i^T K r_i$ により定義される。

残差ベクトルを最小とする必要十分条件は、

$$(AP_i)^T K (b - Ax_0 - \sum_{j=0}^{i-1} \alpha_j AP_j) = 0 \quad (21)$$

であり、この式は、 $(AP_i)^T K (AP_j)$ が特異でない場合 α_j に関して解法可能である。

以上に基づき、次の様な繰り返しスキームを考えることができる。

- (i) x_0 を選ぶ。
- (ii) $r_0 = b - Ax_0$ を計算し、 $P_0 = P r_0$ と置く。
- (iii) 残差ベクトル最小条件の式を解いて α_0 を求める。
- (iv) x_1 を算出する。
- (v) (ii) 以下を繰り返す。

このスキームを解が収束するまで繰り返すのがsemi-iterativeスキームの一般形である。そして、特に行列K_i 及びPをそれぞれA⁻¹、Iとする解法が共役勾配法である。この名は、このスキームによる解の探索が、解空間の中で残差Kノルムを最小化する様に、つまり勾配 $\text{grad} \| r_i \|_K$ の方向に進むことに由来する。

さて、上述した繰り返しスキームにもかかわらず、この手法の効率は常に高いとは言いきれない。そこで、この点を更に改良するのがpreconditionの操作である。

一般にFDMあるいはFEMによる離散化の結果得られる係数行列Aのスペクト

ル半径は大きく、固有値が複素平面図で広範に分布するという特徴を有する。このため、上記の繰り返しスキームにおいて全成分が収束するには莫大なステップ数を要する。preconditionは、基本式の両辺に行列Aの近似値 \tilde{A} の逆行列を乗じ、

$$\tilde{A}^{-1}Ax = \tilde{A}^{-1}b \quad (22)$$

の形式に問題を書き換えることである。そして、この操作によって新たな係数行列の固有値が単位円の近傍に密集することとなり、この結果、semi-iterativeなスキームの収束性は飛躍的に向上する。

1.4 物質移動解析モデル

次に、与えられた透水係数場、及びこれに付随する地下水流速場における物質の移流・分散現象を考える。MACRO-AFFINITYでは、パーティクルトラッキングの手法を用いてこの問題を解法する。

パーティクルトラッキングは、不均質媒体中での溶質移動を解析するのに極めて有効な手段である。第一に通常の濃度範囲を対象とする限りは計算効率が高く、また用途に柔軟に対応可能である。そしてまた、系内のソース及びシンクをも容易に表現することができる。

パーティクルトラッキングの手法は、これまでも不均質媒体中の溶質移動の解析に利用され、成功を収めている〔12〕、〔13〕、〔14〕、〔15〕。

溶質移動に影響を及ぼし得るプロセスとしては、以下のものが挙げられる。

- ① 移流
- ② 分子拡散
- ③ 各スケールでの分散現象
- ④ 化学反応

そして、上記の各現象がどの程度、溶質移行挙動に影響を及ぼすかは、流れの場の特性に依存したものとなる。

MACRO-AFFINITYのパーティクルトラッキングモデルDIVINITYでは溶質は非吸着性で、非反応性であり、かつまた非放射性であることが仮定されている。分子拡散の効果は、ここではexplicitに取り込まれている。

DIVINITY (Diffusion and Vector streamlINes in AFFINITY) は、従来のAFFINITY-2D のパーティクルトラッキングパッケージに分子拡散の効果を加えたものである。

DIVINITYのアルゴリズムは、個々のパーティクルが一定のタイムステップ経過後にどの位あるかを指定するものである。本節では、上下左右の流動フラックス F_T 、 F_B 、 F_R 、 F_L が与えられた場合に、各パーティクルの移動方向、移動時間を算出する方法について説明する。

(1) 移流

DIVINITYのアルゴリズムは、移流と分子拡散の双方を考慮するものであるが、実際の手順としては、まず移流のみを考えてパーティクルの移動を計算し、次に分子拡散の効果を加えるというステップが採られる。

純粋な移流によってパーティクルがセル (i, j) からセル(i+1, j) に移動する時間は、次式で与えられる。

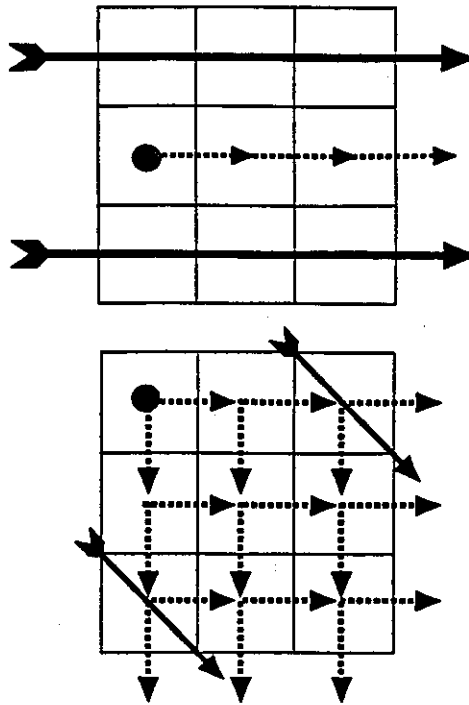
$$t_R = \frac{\Delta x}{F_R / (e \theta \Delta y)} \quad (23)$$

ここで、他の方向に向けての移動時間 t_L , t_T , t_B もまた (23) 式と同様に現される。従って、もし時刻 $t = t_{in}$ にパーティクルがあるセルに流入したとしてこのパーティクルが移流によりセルの外に出る時刻として可能性があるものは、 $t_{in} + t_R$, $t_{in} + t_L$, $t_{in} + t_T$, 及び $t_{in} + t_B$ ということになる。

あるセルの中にあるパーティクルがどの境界から外に出るかは、各境界上での外向きフラックスの大きさの比によって決められ、また、当該粒子がどの境界を通過してそのセルに進入したかとも関連する。

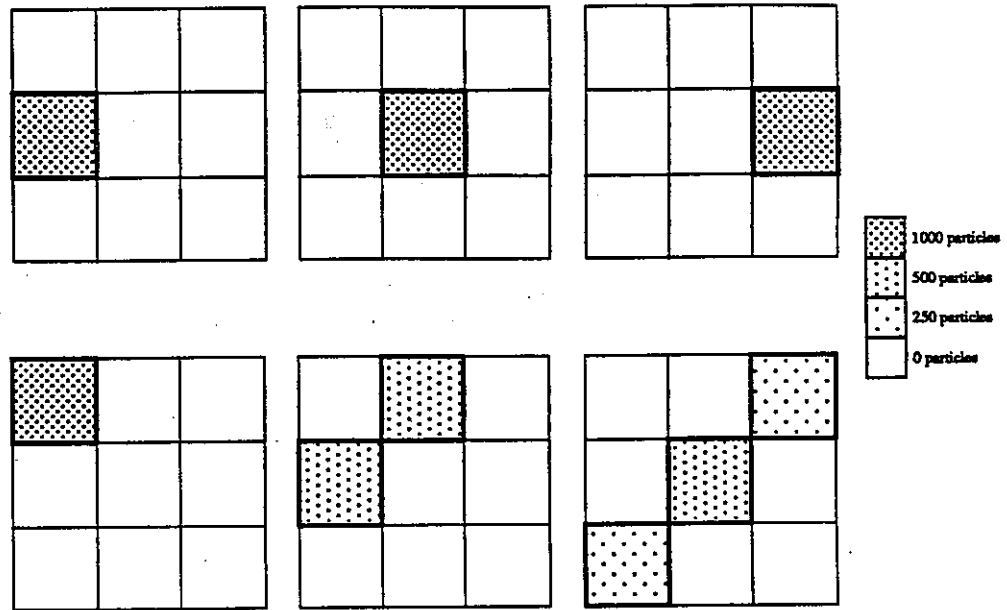
入口境界と出口境界との間の関係を説明するために均一な透水性を有する媒体中の平行流れを考えてみる。図1.4.-1は、全く同じ二つの流れが数値解法上のグリッドと異なる角度をもって流れている状況を示している。もし、流れがグリッドと平行であれば（同図上）、外向きフラックスが非0であるのは下流境界のみでありこの場合にはパーティクルの移動経路は流れに沿った直線となる。

しかしながら、流れがグリッドを斜めに横切る場合（同図下）において入口境界と出口境界との間の関係を全く無視することとすれば、上部境界から進入したパーティクルが下部境界から外に出る、あるいは左側境界から進入したパーティクルが右側境界から外に出るという事態が生じ得る。これは、流れと直交する方向の分散成分を生ずることとなり、数値解法上の誤差要因の一つとなる。この効果を模式的に表したものが図1.4-2である。グリッドに平行な場合（同図上）には分散現象は生じていないが、グリッドを斜めに横切る場合（同図下）には上に述べた



The variation of grid cell fluxes with grid orientation. Flow directions are marked with the solid arrows, and outward fluxes from each grid cell are denoted with dashed arrows. Top: flow parallel to grid cell edges. Bottom: flow aligned with grid cell diagonals.

図 1. 4—1 現行手法による平行流についての粒子軌道



Particle positions (left: at time $t=t_0$; centre: $t=t_0 + \Delta t$; right: $t=t_0 + 2\Delta t$) computed using a particle tracking algorithm that does not relate the exit and input boundaries. The key indicates the number of particles in each cell. Top: flow parallel to grid cell edges. Bottom: flow aligned with grid cell diagonals.

図 1. 4—2 斜行平行流における疑似分散効果

fictitiousな分散項が現れている。

この様な誤差を排除するために図1.4-3に示す様な方法で入口境界と出口境界との対応づけをする。グリッドを斜めに横切る流れについては、上部及び左側境界が入口に、下部及び右側境界が出口となるが、ここで、上部から進入したパーティクルは右側に、左側から進入したパーティクルは下部に進むというルールを設けるこのことによって、巨視的に見ればパーティクルは流れに沿って移動することとなり、パーティクルの移動方向が流線を横切るという非現実的な事態は避けることができる。

さて、上述した簡単な例を念頭に置いて、より一般的な状況でのパーティクルトラッキングのアルゴリズムを考えることとする。ここでの制約は、パーティクルが上述した意味において流線を横切らない様にするという点である。いま、パーティクルがセル上部から進入したとして、その後の全ての状況を考えることとする。勿論、このことによって一般性はいささかも失われない。

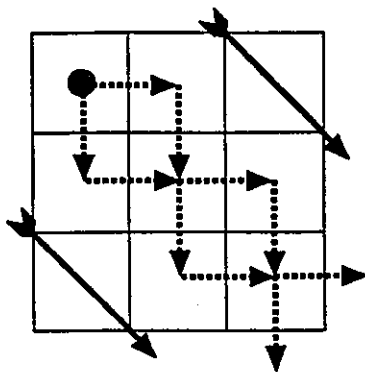
仮定より明らかに上部境界では流入フラックスである。そこで、他の3つの境界については以下の5種類のケースがある。

- (a) 他の3境界とも流出フラックス
- (b) 隣合った2境界が流出フラックスで残りの1つが流入フラックス
- (c) 向かい合った2境界が流出フラックスで残りが流入フラックス
- (d) 1つが流出フラックスで、他の2つの境界が流入フラックス
- (e) 3境界とも流入フラックス

これらのうち、ケース(e)は当該セルがシンクであることを意味し、明らかにここからのパーティクルの流出はない。そこで、以下残りの4つのケース(図1.4-4参照)についてそれぞれ検討を加えることとする。

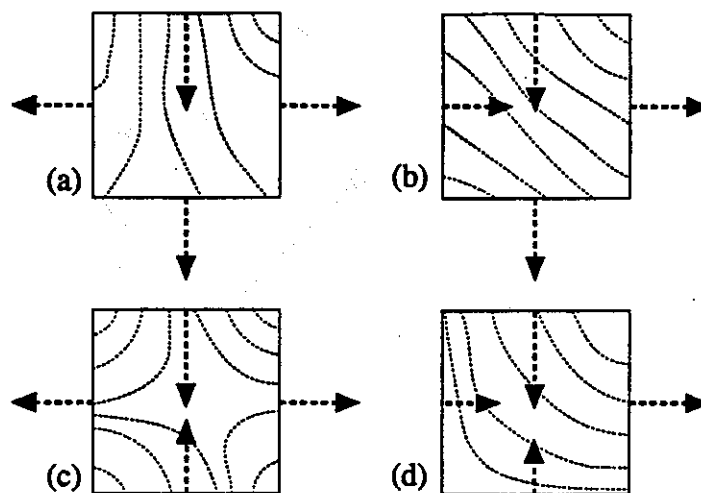
ケース(a)

図1.4-4(a)に見られる流線分布の概念図から明らかな様に、上部境界線上に位置するある点で、そこから流線を横切ることなく右側境界へと到ることのできるものがある。下部、及び左側境界についても同様である。つまり、このケースでは3つの境界の全てが出口となり得る。そこで、以下の式によってそれぞれの境界が出口となる確率、 P_R 、 P_L 、 P_T 、及び P_B を求める。



Outward grid cell fluxes relevant to physical particle transport in uniform flow aligned with grid cell diagonals.

図 1. 4-3 疑似分散効果を低減するためのトラッキングスキーム



Four combinations of grid cell influxes/outfluxes (dashed arrows) on the three boundaries of a cell with influx on the top boundary. Generic sets of streamlines are also marked (dotted lines). (a): outfluxes on all three sides; (b): outfluxes on two adjacent sides, influx at the third side; (c): outfluxes on two opposite sides, influx at the third side; (d): outfluxes on one side, influx on the other two.

図 1. 4-4 単一セルについての境界条件の場合分け
及び対応する圧力分布パターン

$$P_R = \frac{F_R}{F_R + F_L + F_B}$$

$$P_L = \frac{F_L}{F_R + F_L + F_B}$$

$$P_T = 0$$

$$P_B = \frac{F_B}{F_R + F_L + F_B} \quad (24)$$

ケース (b)

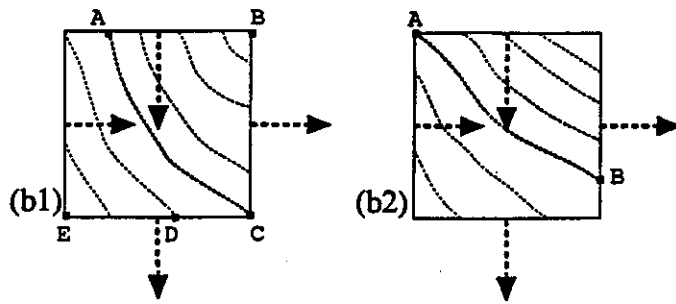
図1.4-4(b)に見られる流線分布から明らかな様に、上部境界から入り流線を横切らずに右へ出られる様な上部境界上の点は必ず存在する。しかし、下部境界を出口とするものについては、これだけではその存在が一意には決まらない。具体的には、図1.4-5 に示す2つのサブケース (b1)、(b2) を考える必要がある。サブケース (b1) では上部から入り下へ出る点が存在しているが、サブケース (b2) ではこの様な点は存在しない。

(サブケース (b1))

上部境界上でパーティクルが均一な密度で到ると仮定すれば、上部境界上の線分 AB 上を通過するパーティクルは右側境界を通過して外部へ出て、それ以外の部分を通るパーティクルは下部境界から外へ出ることとなる。従って、この二つの流れのフラックスの比から右側、及び下部境界が出口となる確率を求めることができる。

線分 AB 上を通過するフラックスは、明らかに右側から出るフラックス F_R と等しく、また、それ以外のフラックスは下部から出るフラックスのうち CD を通

過するもの即ち、 $F_B \frac{CD}{CE}$ に等しい。従って、各境界から外部へ出る確率は以



Streamlines for a grid cell with outfluxes on two adjacent sides (b1): streamlines from the input boundary to both boundaries with outfluxes; (b2): streamlines from the input boundary to only one outflux boundary.

図1. 4-5 ケース (b) についてのより詳しい場合分け

下の様に与えられる。

$$P_R = \frac{F_R}{F_R + F_B \frac{CD}{CE}}$$

$$P_L = 0$$

$$P_T = 0$$

$$P_B = \frac{F_B \frac{CD}{CE}}{F_R + F_B \frac{CD}{CE}} \quad (25)$$

(サブケース (b2))

この場合、上部境界を通したフラックスの全ては右側境界から外に出る。従って、各境界から外部へ出る確率は、

$$P_R = 1$$

$$P_L = 0$$

$$P_T = 0$$

$$P_B = 0 \quad (26)$$

となる。

さて、ケース(b) についてのパーティクルトラッキングのアルゴリズムを確立するためには、当該ケースがサブケース (b1) かあるいはサブケース (b2) なのかを判定し、必要であれば (即ちサブケース (b1) であれば) CD/CE を算出することが必要となる。これは、具体的には以下の方法で為される。

上部境界左端を通過する流線が出口境界を通過する点が、もし下部境界上にあれば、その状況はサブケース (b1) に該当し、 CD/CE を算出する必要性が生ずる

また、この点が右側境界上にあれば、サブケース (b2) が該当することを意味し、この場合には出口確率は簡単に定まる。以上を解析幾何学的に定式化してみよう。

まず、上部境界左端を通過する流線を直線で近似する。この際、直線の傾きは平均流速の水平及び鉛直成分の比に等しいと仮定する。図1.4-5(b1) の表記に従えば、この比Rは、

$$R = \frac{(F_R - F_L) / \Delta y}{(F_B - F_T) / \Delta x} \quad (27)$$

と表される。ここで、もし、 $R > \Delta x / \Delta y$ であれば出口は右側境界上にあることとなり、もし $R < \Delta x / \Delta y$ であれば出口は下部境界上にあることとなる。

従って、以下の量S、

$$S = \max \left\{ 0, 1 - R \frac{\Delta y}{\Delta x} \right\} \quad (28)$$

を定義すれば、このSは出口境界の判定をすると同時に、 CD / CE の数値を与えることとなる。そこで、このSを用い、サブケース (b1) 及び (b2) についての出口確率は一括して表現できることとなり、それは次のものとなる。

$$P_R = \frac{F_R}{F_R + F_B S}$$

$$P_L = 0$$

$$P_T = 0$$

$$P_B = \frac{F_B S}{F_R + F_B S} \quad (29)$$

ケース (c)

図1.4-4(c)にある様に、このケースは一つのセル内で反対方向の流れが出合うというものである。ここで、厳密に言えば、左右の出口確率は上部境界を通過してそれぞれ左及び右に出るフラックスの比から算出される。しかし、ここでは簡単のため対向流の間の分水嶺は水平であることを仮定して、この比を F_R 対 F_L によって近似する。即ち、出口確率を、

$$P_R = \frac{F_R}{F_R + F_L}$$

$$P_L = \frac{F_L}{F_R + F_L}$$

$$P_T = 0$$

$$P_B = 0 \quad (30)$$

とする。この近似は一つの誤差要因ではあるが、ケース(c) 自体が極めて稀にしか現れないこと、さらに分水嶺が水平から大きくずれる可能性も小さいことから結果に大きな影響を及ぼすことは考えにくい。

ケース (d)

この場合は、出口フラックスの存在する境界が1つしかないため、出口確率は単純に、

$$P_R = 1$$

$$P_L = 0$$

$$P_T = 0$$

$$P_B = 0 \quad (31)$$

となる。ケース(d) は、ケース(b) の F_B を0としたものに相当するが、因みに(29) 式で $F_B \rightarrow 0$ とすると (31) 式となることは容易に確認できる。

さて、(24)、(29)、(30)及び(31)式によって出口確率を算出した後、実際の計算においては乱数 r を発生させてパーティクルの移動経路を決定する。具体的には、 r が $[0, 1]$ の均一分布からサンプリングされた後、以下の不等式群に従い出口を決定する。

$$\begin{aligned}
 0 \leq r < P_R & && : \text{右側が出口} \\
 P_R < r < P_R + P_L & && : \text{左部が出口} \\
 P_R + P_L < r < P_R + P_L + P_T & && : \text{上部が出口} \\
 P_R + P_L + P_T < r < P_R + P_L + P_T + P_B & && : \text{下部が出口} \\
 P_R + P_L + P_T + P_B < r \leq 1 & && : \text{出口なし (シンク)} \quad (32)
 \end{aligned}$$

当該セルがシンクとなった場合には、パーティクルはそこから除去され、それ以降の時刻では考慮されない。またもし、流出時刻が次回計算時刻 $t_0 + \Delta t$ よりも遅ければ、パーティクルは動かないものとし、他のパーティクルについての演算が開始される。もし、流出時刻が次回計算時刻よりも早ければ、パーティクルは次のセルに移動することとし、その流入時刻は前のセルからの流出時刻と等しいものとされる。この手続きは、所定の時間範囲全体にわたって繰り返し行われる。

以上のアルゴリズムを冒頭の例のうち、平行流れがグリッドを斜めに横切るもの(図1.4-1)に適用してみる。これは明らかにケース(b)で $S = 0$ の場合に当たり、結果は図1.4-6に示すものとなる。同図から明らかな様に、パーティクルは上から流入した右に出て、次に下へと流出するというパターンを繰り返すこととなり、数値解法に起因する“にせの”分散効果は、巨視的に見れば無視し得るものとなる。

(2) 分子拡散

(1)に述べた方法で移流によるパーティクル移動を計算することに加え、分子拡散の効果をランダムな摂動として表現する。具体的には、摂動角 θ を $[0, 2\pi]$ の均

一分布からサンプリングし、パーティクルの軌道 $X(t)$ を次式によって算出する。

$$X(t+\Delta t) = X(t) + V \Delta t + a \sqrt{D \Delta t} \quad (33)$$

但し、 v : 移流ベクトル ($V = (v, 0)$ もしくは $(0, v)$)

a : 摂動ベクトル ($a = (\cos \theta, \sin \theta)$)

D : 分子拡散係数

移流のみを考慮して計算された出口境界の指定は、(33)式によって分子拡散を考慮したものに修正され、この修正された数値に基づき最も早い流出時刻を示す境界を通過してパーティクルが移動するものとする。

溶質移動全体への移流及び分子拡散それぞれの寄与を知るための簡単な指標としては、ペクレ数

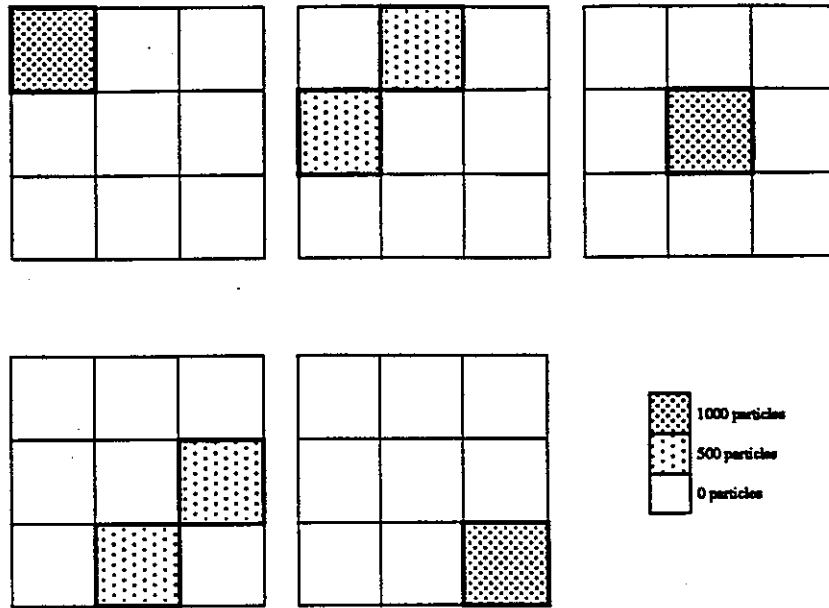
$$P_o = \frac{v \Delta h}{D} \quad (34)$$

がある。(但し、 Δh は代表長さ)

P_o が1のオーダーとなれば分子拡散の効果は無視し得なくなり、さらに1よりも十分小さくなれば支配的となる。

実際の地層中での溶質移動解析において、難透水性の部位において P_o が1よりも小さいものとなり、従って分子拡散が支配的となる可能性がある。この場合パーティクルは純粋な移流プロセスではaccessibleではない領域に分子拡散によってパーティクルが入り込み、そこに長時間とどまるという状況が生じ得る。このような二重空隙効果による溶質移動の遅延は、これまで述べたDIVINITYのパーティクルトラッキングアルゴリズムの改良によりMACRO-AFFINITYによって定量的に解析可能

となった。DIVINITYを用いたパーティクルトラッキングの例を図1.4-6に示す。



Particle transport in flow aligned with grid cell diagonals, computed using the DIVINITY particle tracking algorithm. The key indicates the number of particles in each cell. Top left: at time $t=t_0$; top centre: $t=t_0 + \Delta t_1$; top right: $t=t_0 + 2\Delta t_1$; bottom left: at time $t=t_0 + 3\Delta t_1$; bottom centre: $t=t_0 + 4\Delta t_1$.

図 1. 4—6 改良後の手法による粒子群のふるまい

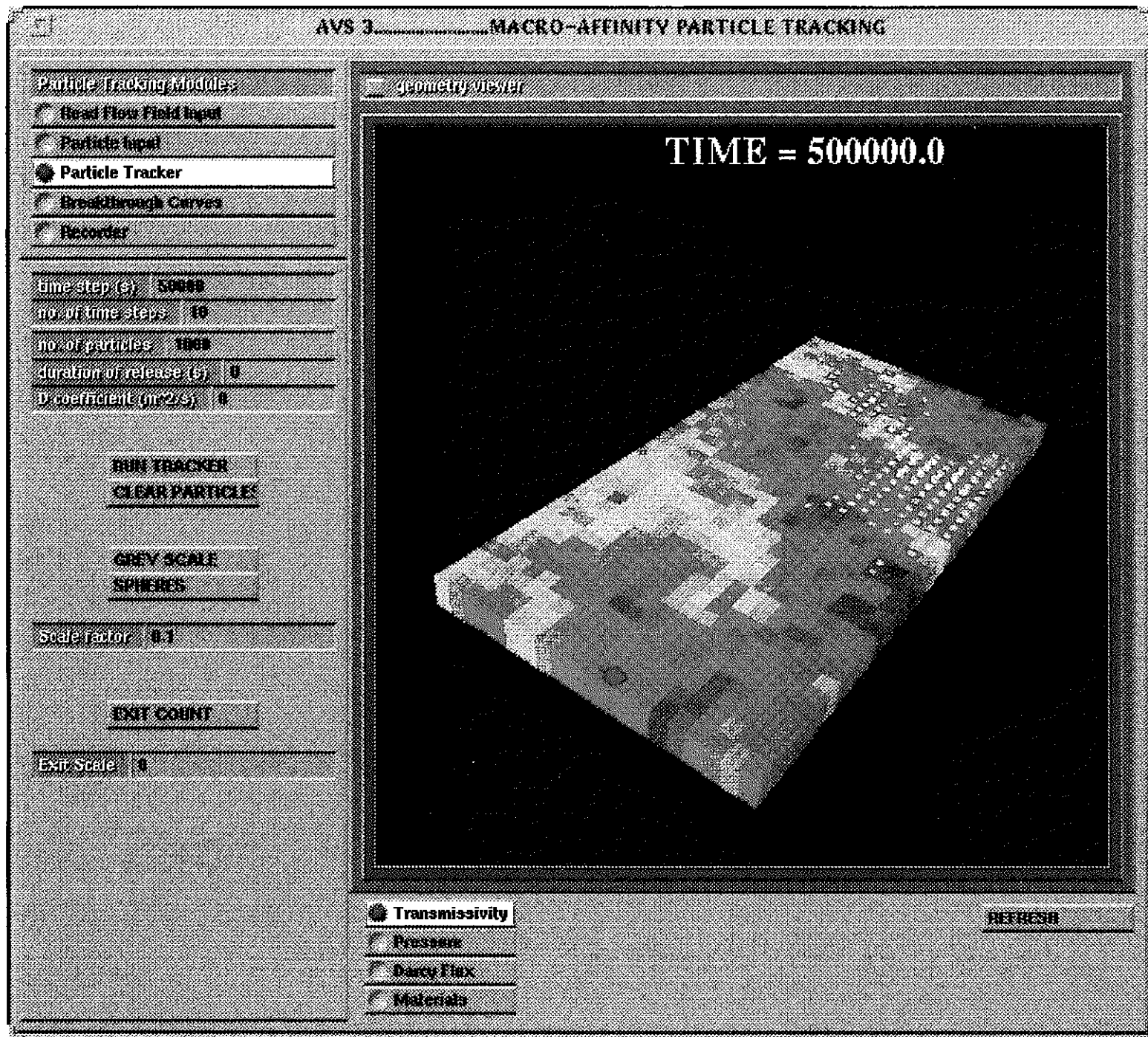


図1. 4-7 DIVINITYによるパーティクルトラッキング結果の例

2. AFFINITY-2Dコードの改良

前章に於て説明したフラクタルモデルの理論を踏まえ、ここではソフトウェアとしてのMACRO-AFFINITYについてその機能、構造及び基本操作をまとめる。また、改良点の確認を目的として行ったテストケースの解析結果についても述べることとする。

2.1 MACRO-AFFINITY コードの機能

今年度作成したMACRO-AFFINITYコード(MACRO Version 1.1)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イ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。

- ① 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。
- ② 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) グラフィックスの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。
- ③ ②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。
- ④ ②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。)
- ⑤ 試験に用いられるガラスビーズの粒径に合わせて、必要に応じて透水系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)

- ⑥ グラフィックの編集モードに於いて境界上の水頭を指定する。
- ⑦ ユーザー指定のグリッド(①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。
- ⑧ モデル化領域中のトレーサ注入位置を指定する。
- ⑨ 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)。
- ⑩ 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。
- ⑪ 破過曲線の算出とその表示。
- ⑫ パーティクルトラッキングの結果の録画。
- ⑬ 録画された粒子挙動の再生。

後述するテストケースにおいて、上記の各機能の確認を行った。内容については、2.4を参照のこと。

2.2 改良の基本方針

MACRO-AFFINITYコードは、Silicon Graphics社IRIS Elan 4000機を用いて、AVS Version 5.0上に於いて開発された。AVSは、ネットワーク型の編集を可能とする環境を提供することによりユーザーが独自のアプリケーションソフトウェアを作成できるようなデータの画像化ツールである。

このようなユーザーズペフィックなソフトウェアの開発は、“モジュール”を単位として行われる。モジュールとしてはAVSに元来含まれている一般的なもの、及びユーザーの作成したものが用いられる。ソフトウェアの中で、各モジュールはネットワークの中に組み込まれ、このネットワークがモジュール間のデータのやり取りを管理することとなる。モジュールは、それ自体の中に、ボタンやwidget、あるいはダイアルやメニューを含むことができ、ユーザーはこれらを用いてグラフィカルインターフェイス上でソフトウェアを動かすことができる。

MACRO-AFFINITYは、上述したモジュールのネットワーク構造として作成されているが、ユーザーがコードを動かす上ではネットワーク自体やモジュールの詳細については一切知識を必要としない様に考慮されている。しかし、その基本的内容の理解は、作業の効率を向上させるものであるため、以下に簡単にこれについてまとめることとする。

既に述べた様に、MACRO-AFFINITYコードは次の4つの主要なモジュール群から成り立っている。

- (1) フラクタル透水係数場作成モジュール群
- (2) 流動解析モジュール群
- (3) パーティクルトラッキングとその録画用モジュール群
- (4) 動画再生モジュール群

これらのモジュールの中のいくつかは、他のモジュールが既に動いている場合の

み稼働し得る（例えば、流動解析モジュールは他のモジュールに於いて境界条件が既に指定されている場合にのみ動かすことができる）。この意味からは、ソフトウェアの使用にある種の制約条件がある事は事実であるが、上の例の様に制約はいずれも直感的に明らかなものである。

2.3 コードのレイアウトと基本操作

2.2 に述べた4つのモジュール群それぞれについて、操作に必要なボタン、ダイアル、widget及び画像出力のディスプレイは独立したパネルに収められている。図2.3-1は、例としてパーティカルトラッキング・録画モジュール群についてパネルを示す。また、このパネル自体をディスプレイするか否かはコントロールパネル上で指定することができる。

4つのパネルは、いずれも類似したレイアウトを有している。ユーザーから見て右手には画像出力のディスプレイがあり、各モジュールのボタンやwidgetは左側の領域は、更に二つに区分されている。上のゾーンはテキスト選択用ボタンであり、当該パネルに関連するモジュール群のメニューとなっている。図2.3-1に示したパーティクルトラッキング・録画パネルの例では、メニューは以下のものから成る。

- Read Flow Field Input
- Particle Input
- Particle Tracker
- Breakthrough Curves
- Recorder

カーソルをこれらの中のいずれかのボタンに合わせ、マウスの左ボタンをクリックすることによって対応するモジュールを選択することができる。（一般に、マウスボタンとしては左のものを用いるため、以下特にことわらない限りはこれを指すものとする。また、クリックとはカーソルをあるボタンないしはwidgetに合わせ、マウスの左ボタンをクリックする操作を表すこととする。）この際、当該モジュールのボタン

は白く点灯し、次に赤い点が見れる。

次に、下のゾーンには、上のゾーンで選択されたモジュールに関連するボタンやwidgetが見れる。この部分は、モジュールの指定を変更する度に自動的に更新されることとなる。こうして、下のゾーンに見れるボタンやwidgetをインターフェイスとして用いて指定されているモジュールを実行することができる。各widgetはモジュールを実行する際のアルゴリズムと直接対応しており、ここでパラメータ値やセッティングを変えた結果が、モジュールの計算に反映されることとなる。

MACRO-AFFINITYコードでは、

- ・ タイプイン WIDGET,
- ・ トグルボタン,
- ・ ワンショットボタン,
- ・ ラジオボタン,
- ・ ダイアル,
- ・ ブラウザー,

という6種類のwidgetが用いられている。以下に、これらのそれぞれについて説明を加える。

(1) タイプインwidget

タイプインwidgetは、このwidgetの名称に続くテキストウィンドウにカーソルを合わせ、ここに必要な数値をタイプするという操作で用いられる。このwidgetが選択された段階でテキストウィンドウは白く点灯し、数値を入力した後にカーソルをずらすとともに戻って、モジュールは新たな数値に対応して計算を実行する。重要な点は、テキストウィンドウが点灯した状態でなければ数値の入力をすることができないという事である。

(2) トグルボタン及びワンショットボタン

これら二つのボタンは、いずれもクリックすることによって操作される。両者の間の差異は、クリックを終えた後の挙動のみである。トグルボタンは、ON及び

OFFのいずれの状態もとりに得るものであり、クリックすることによって二つの状態が切り換ることとなる。トグルボタンはONの間のみ白く点灯していることとなる。他方、ワンショットボタンはクリックされている時を除いて常にOFFである。このボタンをクリックした瞬間にON命令が送られ、クリックを終えた時にはまたOFF状態に戻る。

図2.3-1のパネルの例では、パーティクルに影をつけるGREY SCALEの切り換えにトグルボタンが用いられており、他方、ワンショットのRUN TRACKERボタンがパーティクルトラッキングを開始するために用いられている。

(3) ラジオボタン

ラジオボタンは、パラメータ選択値の範囲が限られており、かつ、一つの値のみが使われる場合に用いられる。図2.3-1の右下端にあるwidgetはラジオボタンであるに対応したモジュールである。この例では、

- Transmissivity,
- Pressure,
- Darcy Flux,
- Materials,

のうちいずれか一つのボタンをクリックすることにより、これら4つのうちの量を表示するかが選択される。また、クリックされたボタンは、白く点灯する。

(4) ダイアル

ダイアルの操作は、ダイアルのポインター（針）をマウスの左ボタンを用いて動かすことによってさなれる。ダイアルwidgetの例は、2.4のテストケースに於いてScale Gridモジュールを操作するところで詳しく述べることとする。

(5) ブラウザー

ブラウザーwidgetは、入出力のためのファイルやディレクトリーを選択する際

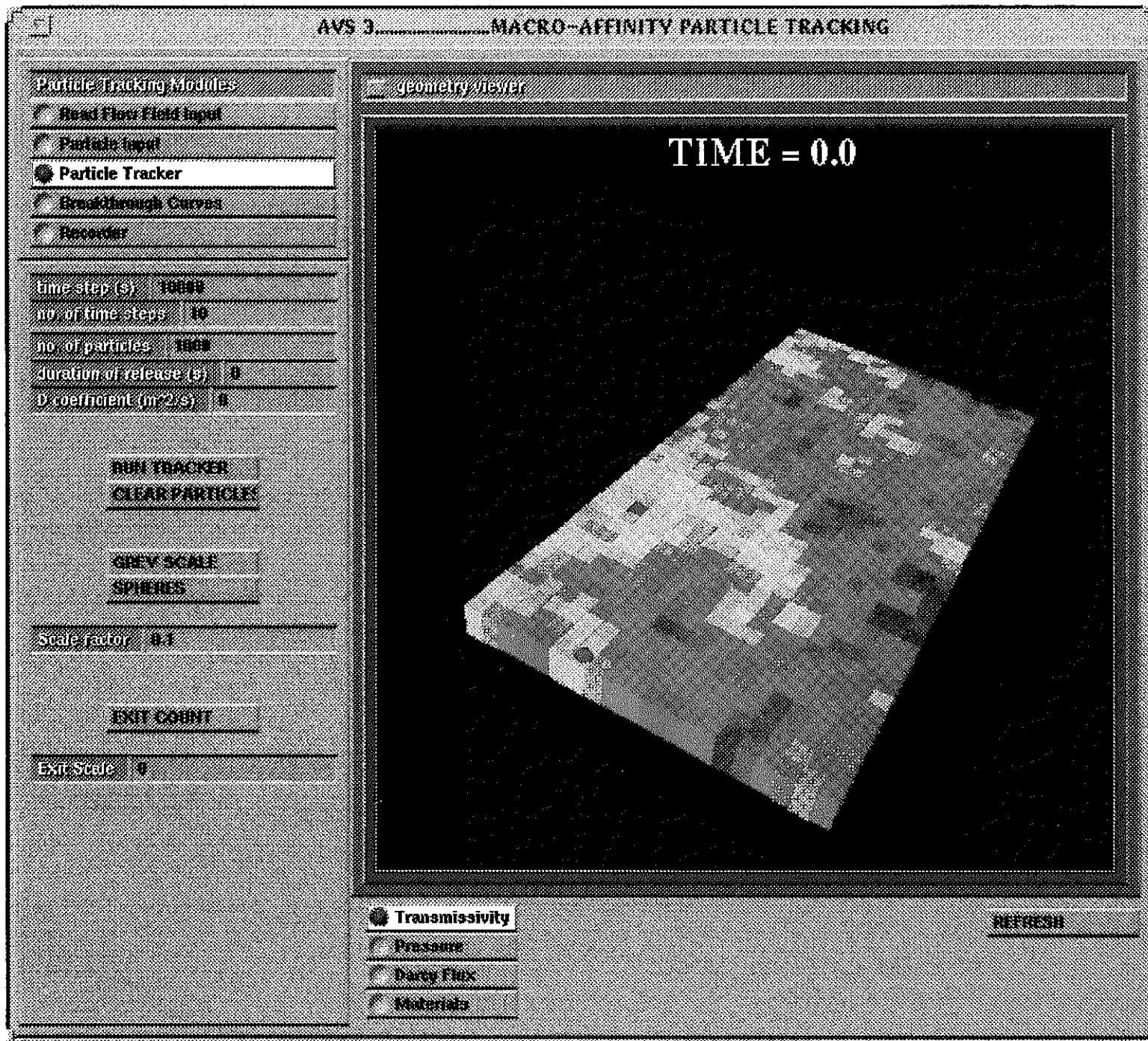


図 2. 3-1 MACRO-AFFINITY の操作パネルの例

に用いられる。ここでは、表示されるファイルリストを用いる事により、ユーザーはUNIXのファイルシステムに入ることができる(ファイルシステム中での操作はUNIXの通常のそれと同じである)。

New Directory もしくはNew Fileボタンを押した場合には、ユーザーは直ちにそのディレクトリあるいはファイルにテキスト入力をする事が求められる。つまり、必要な情報をタイプしてOKボタンをクリックするか、Cancelボタンを押して書き込みを避けるかである。ブラウザーの例はWrite Cancel Output あるいはRead Fractal であり、これらについては2.4に於いて説明する。

以上、4つのパネルに共通したレイアウトを説明したところで、次に各パネル間の関係について述べる事とする。

一つのパネルの出力は、ネットワークを通じて次のパネルへと送られることとなる。ここで、パネル間の入出力の関係として以下の3つの直接的なリンクが設定される。

1. Fractal Generation (出力) → Flow Solver (入力)
2. Flow Solver (出力) → Particle Tracker (入力)
3. Particle Tracker (出力) → Review Animation(入力)

以上については、先行するパネルの出力が作成された段階で、コード内で自動的にデータの転送が行われることとなる。また、ユーザーの指定があれば、出力は指定されたファイルに書き込まれることとなる。

上記のことからも明らかな様に、4つのモジュール群には次の様な順序関係が存在する。

1. フラクタル透水係数場作成モジュール群
2. 流動解析モジュール群
3. パーティクルトラッキングとその録画用モジュール群
4. 動画再生モジュール群

また更に、ユーザーの指定により、MACRO-AFFINITYの前回計算結果から始めて、任意のモジュール群を単独で起動することも可能である。このオプションにより、ユーザーは上記の1～4のいずれから作業を開始することも可能である。この点については、2.4のテストケースに於いて更に説明することとなる。

各モジュール群の間のリンクに入出力ファイルとのやりとりを加えたMACRO-AFFINITYの全体構造を図2.3-2に模式的に示す。

2.4 テストケースについての解析

本節では、テストケースを通じて2.3 に述べたMACRO-AFFINITYコードの構成と機能とをより詳しく説明することとする。このため、まず基本テストケースを設定し、これについてコードの最も一般的な特質を示し、次に代替的なケースにより他の機能を論ずることとする。

2.4.1 基本ケース

(1) 起動と終了

MACRO-AFFINITYを起動するためには、まず、SUN Open Window を開き、コードの収められているディレクトリ（通常のインストールを行った場合はMACRO-V 1.0 である）を指定する必要がある。このディレクトリを指定した後、macroとタイプすることにより、AVS コピーライトのメッセージと、AVS スクリプト及びパネルコマンドが現れる。そしてしばらく間をおいてAVS MACRO V 1.0 と表示されたウィンドがスクリーン左に現れる。このウィンドは次の5つのボタンを有している。

- Fractal Generation
- Flow Solver
- Particle Tracking
- Review Animation
- Quit

これらのうち4つはトグルボタンであり、それぞれ対応するパネルの表示/消去を指定するものである。スクリーン上に表示できるパネルの数に制限はないが、スペースを有効に使うためMACRO-AFFINITYと直接関係ないコマンドツールウィンドウはこの段階で閉じておくことが望ましい。

MACRO-AFFINITYの終了は、いつの時点であっても、AVS MACRO V 1.0 ウィンド

ウのQuitボタンを押すことによって可能である。この操作をすると、コードの終了に伴ういくつかのメッセージが現れた後、画面は元の状態に戻る。

(2) フラクタル透水係数場の作成

AVS MACRO V 1.0 ウィンドウのFractal Generationボタンを通じて左ボタンを用いてクリックすると、このボタンが白く点灯し、やがてフラクタル透水係数場作成のためのモジュール群のパネルがスクリーン右に現れる。このパネルは他のOpen Windows 3.0 ウィンドウと同様に、上端をクリックしながらマウスを動かすことにより任意の位置に移動することができる。然しながら、パネル上のWidgetの大きさは固定されているため、パネルのサイズを変化することは好ましくない。

テストケースを実行するためには、まずGenerate Region ボタンをクリックする。そして、現れるテキストウィンドウにそれぞれ以下の数値をタイプ入力する。

| | |
|-----------|-----|
| Maximum X | 100 |
| Minimum Y | 0 |
| Maximum Y | 200 |
| X Number | 10 |
| Y Number | 20 |
| Depth | 10 |
| Porosity | 0.5 |

この際、テキストウィンドウ中にすでに数値が存在している場合には、これらを消去してからタイプ入力を行えばよい。

上記の数値はそれぞれ、直交座標系に於ける境界の位置 (m)、X及びY方向のグリッドセルの数、領域の深さ (m)、及び空隙率に対応している。

これらの数値を入力した後、GENERATEボタンをクリックすることによって、画面右手にモデル領域が現れる（図2.4.1-1）。そして、更にREFRESHボタンをクリックすることによって、ディスプレイの中の表示が適切なサイズに変更される。

この表示はモデル領域の三次元的ディスプレイであり、個々のブロックは数値解法上のグリッドセルに対応している。各ブロックは見やすい様に分かれて表示されているが、数値的な取扱いでは勿論、連結されている。

このモデル領域は、もし必要であれば、動かすことができる。マウスの右ボタンをクリックしながら動かすことによってモデル領域は画面上を平行移動し、中央ボタンを押しながら動かすことによってモデル領域は中心のまわりに回転する。また、左ボタンを押しながらマウスを上下することによってモデル領域は中央の水平線のまわりを回転し、マウスを左右に動かせばモデル領域は中央の垂直線を中心に回転する。

シフトキーを押しながら中央のマウスボタンを押すことによってモデル領域をリサイズすることもできる。この2つのボタンを押しながらマウスを上には動かせばズームイン、下には動かせばズームアウトすることとなる。また、モデル領域が画面から消えてしまった場合等には、REFRESH ボタンを押すことによって元の状態に戻すことができる。

さて、次のステップはフラクタル透水係数場を発生させるためのコンディショニングポイントを入力することである。（これらは実サイトに適用する場合には、調査地点に対応する。）この入力を行うために、まずSet Pointsボタンをクリックしてグラフィカル編集ツールを使用可能とする。そして、この状態でカーソルをモデル領域の任意のブロックに移動してクリックするとパネルの” X Coordinate ”と表示されたテキストウィンドウに当該ブロックの中心の座標が現れる。次に、カーソルを” Log 10 T (m²/S)”のテキストウィンドウに移動し、数値をタイプ入力してADD POINTボタンをクリックすると、このブロックが青に点滅する。ここで、REMOVE POINTボタンをクリックすると、ブロックは元の灰色の状態（数値が入力されていないことを示す）に戻る。基本テストケースでは、上記の

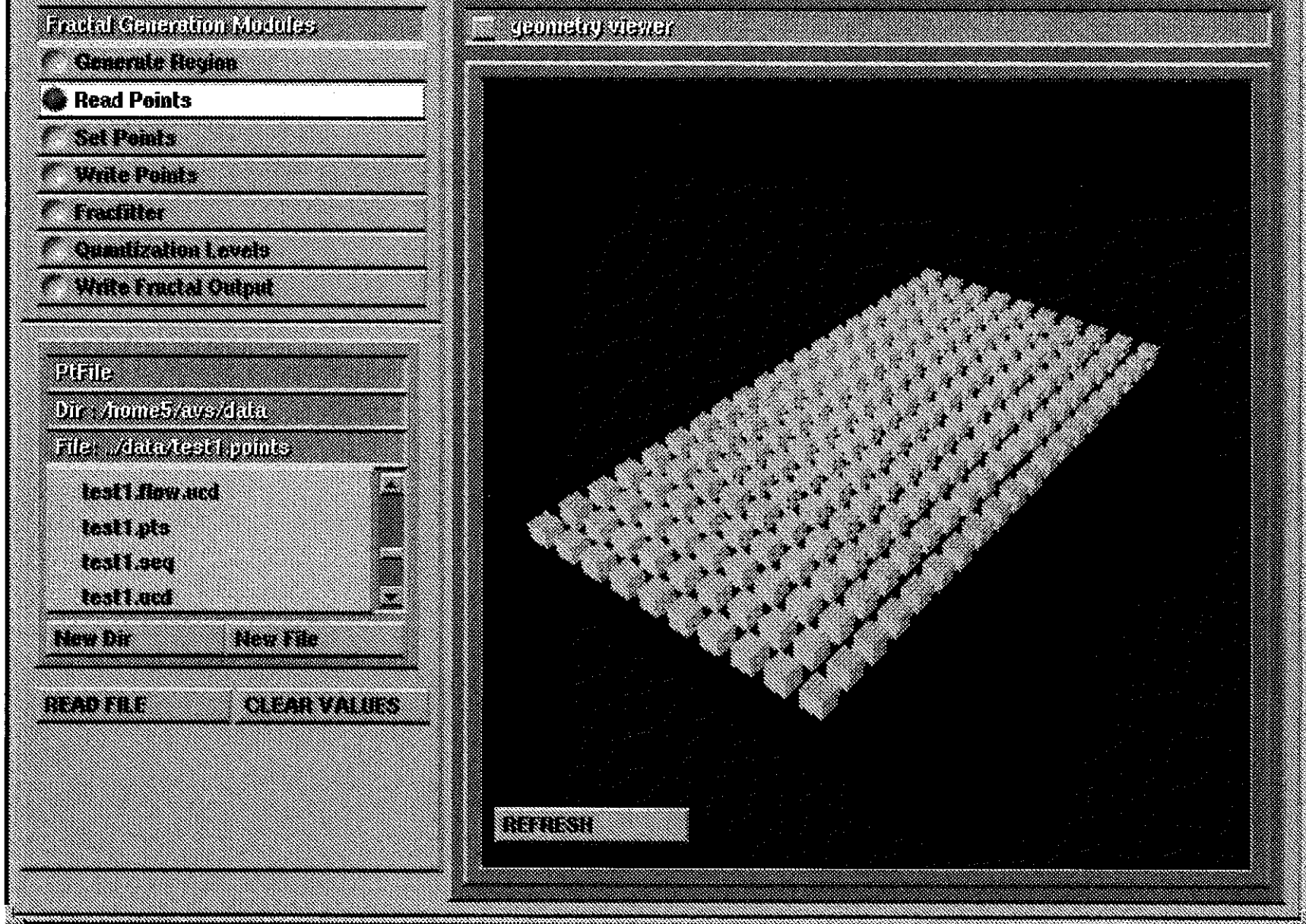


図 2. 4. 1—1 解析対象領域の設定

操作を行って、次のブロックに透水係数値を入力する。

| X coordinate | Y coordinate | Log 10 T(m ² /S) |
|--------------|--------------|-----------------------------|
| 15 | 15 | -2 |
| 25 | 15 | -2 |
| 25 | 25 | -2 |
| 15 | 25 | -2 |
| 75 | 175 | -5 |
| 85 | 185 | -5 |
| 85 | 185 | -5 |
| 75 | 185 | -5 |

ブロックをクリックして位置を指定する代わりに、X, Y座標を直接タイプすることも可能である。個々のブロックは非常に小さくなる場合には、この方法による入力がある効である。なお、以上の入力においてTの単位はm²/Sのみ許容されることに注意を要する。

以上の8点についてT値を入力することによって、モデル領域上の一つの角に4つの赤いブロックが現れ、これと対角線上の位置に4つの青い点が現れる。

(図2.4.1-2)

また、この時点では次の様なオプション操作をすることもできる。まず、Write Pointsボタンをクリックし、パネルを入力/出力モードとする。そして、表示されるブラウザの中でテキストファイルを収容すべきディレクトリをクリックする。更に、New Fileボタンをクリックしてファイル名(この場合が例えば"test 1. points")を点灯したテキストウィンドウにタイプした後、OKをクリックしてWRITE FILE ボタンを押すことによってテキストの書き込みが完了する。

既に作成されているテキストファイルが存在する場合には、これを用いてモデル領域のコンディショニングを行うこともできる。上記で作成した test points ファイルを用いてコンディショニングを行うことができることを見るために、ま

Fractal Generation Modules

- Generate Region
- Read Points
- Set Points
- Write Points
- Fracfilter
- Quantization Levels
- Write Fractal Output

X coordinate 75
Y coordinate 185
Log10 T (in 2/s) -5

ADD POINT
REMOVE POINT

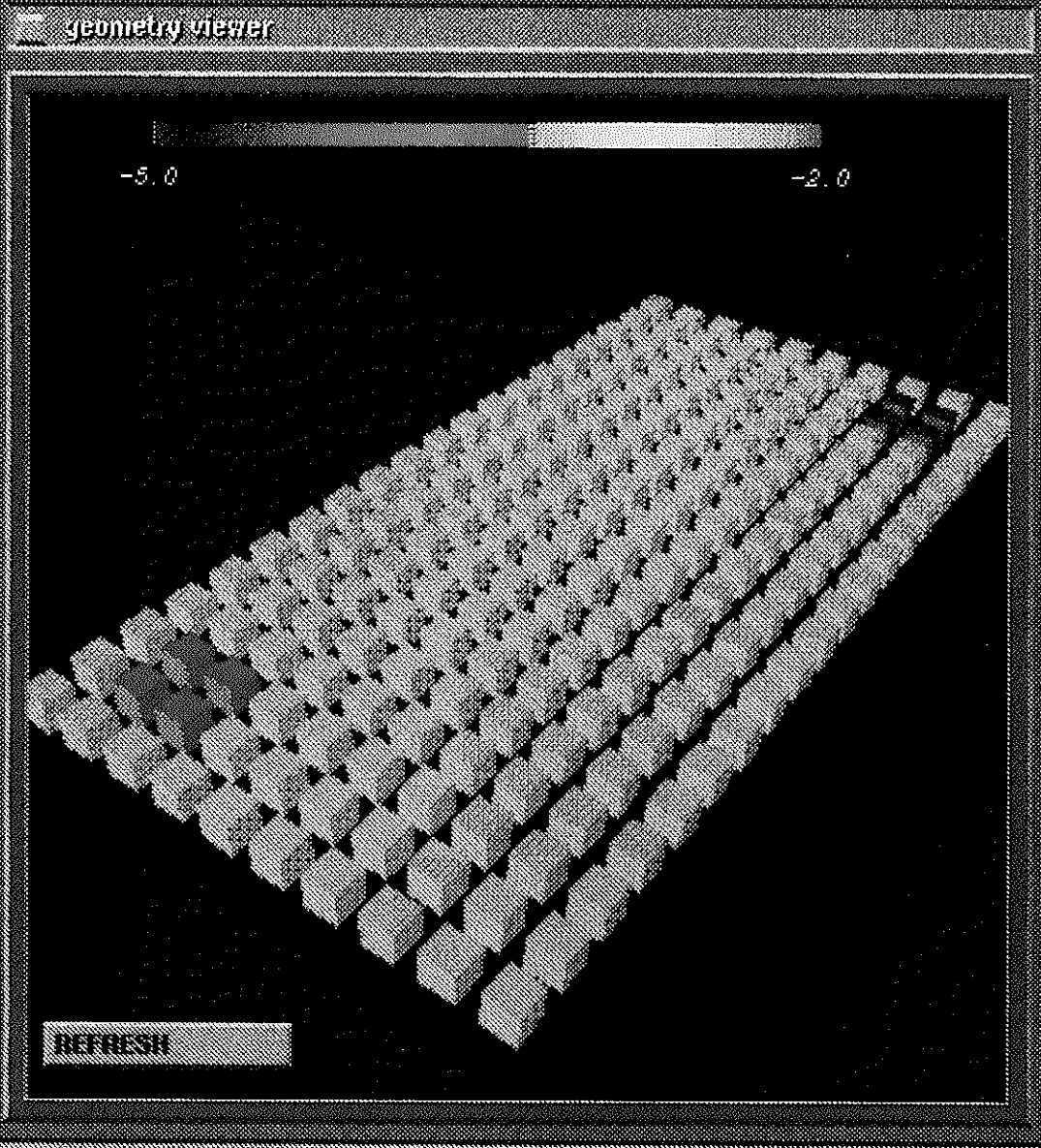


図 2. 4. 1-2 透水係数データの入力例

ず Read Pointsボタン、続いて CLEAR VALUESボタンをクリックする。この操作によってモデル領域は、全て元の灰色の状態に戻る。そして、ブラウザの中の test 1. pointsをクリックし、READ FILE ボタンをクリックすることによってモデル領域は再びコンディショニングされ、前と同様に赤と青のブロック群が現れる。(ブラウザが開いている間には、その内容は更新されないため、新しく作成したファイル名を表示するためには一旦親ディレクトリに戻る操作が必要である。)

コンディショニングされた地点でのT値についてフラクタルスケーリング則を特定するためには、Fracfitterボタンをクリックし、ユーザー指定のスケーリング則を用いる場合にはCHOOSEラジオボタンをクリックして”D”テキストウィンドウにフラクタル次元をタイプする(このケースでは、2.5)。フラクタル次元であるDの値は2～3の間であり、ユーザーが誤ってこの範囲外の数値を入力した場合には、2～3の最寄りの値に自動的に書き直される。(FITボタンと”a”テキストウィンドウについては後述する。)フラクタル次元を入力した後に、ACCEPTボタンをクリックする事によってこの次元を用いる事を確認する。

次に”variance”テキストウィンドウについての入力をお行おう。ここで正の数値を入力した場合に、その大きさの分散を有するフラクタル透水係数場が作成されることとなる。varianceの値が非正の場合には、可能な限り小さい分散を有する様なフラクタル透水係数場が作成される。基本テストケースでは、varianceテキストウィンドウに0入力し、Generate Fractalボタンをクリックする。この際、もしACCEPTボタンを押し忘れていると、ワーニングメッセージが現れる。この場合には、もう一度Generate Fractalボタンをクリックする前に、OK、CHOOSE ACCEPT をそれぞれこの順番でクリックする必要がある。フラクタル透水係数場がうまく作成された場合には、”Fitted Variance”テキストウィンドウが更新され、作成された場の分散を表示する。

作成されたフラクタル透水係数場は、後日の使用のためにファイルに保存して

おくことができる。これを行うためには、まず、フラクタル透水係数場作成パネルの上端をクリックして画面の全面に持ち出す。そして、Write Fractal Output ボタンをクリックし、ブラウザを用いて出力ファイルに名前をつける（例えばこのテストケースの場合にはtest frac.ucd.）。その後、ブラウザの中のNew File ボタンをクリックして、OK ボタンを押せば、出力はこのファイルに自動的に書き込まれることとなる。

ここで、とりあえず基本テストケースに関するフラクタル透水係数場作成モジュール群についての説明を終える。このパネルを画面からかくすには、AVS MACRO V 1.0 ウィンドウのFractal Generation ボタンをクリックすれば良い

(3) 流動解析

(2)で作成したフラクタル透水係数場上での二次元流動解析を次に行う。ここで、まずはじめに断っておかなくてはならないのは、画面上ではモデル領域は深さを持った三次元オブジェクトとして描かれているが、その特性値は鉛直方向については一定であり、対応する流動場は二次元であるということである。

このパネル上では、まず、Edit Points ボタンをクリックし、フラクタル透水係数場を編集可能なモードとする。ここでは、流動解析に必要な境界条件を定めるのがまず求められるが、その前に、(2)で作成したフラクタル透水係数場が所定の特性、即ちコンディショニングされた8点に於いて入力値をとっていることを確認して見る。このためには、画面上で当該するブロックをクリックし、この時表示される透水係数値を(2)で入力したものと比べて見れば良い。勿論、これらの点以外をクリックすればそのブロックでの（統計的に発生された）T値を見ることもできる。

さて、境界条件を設定するためには、まずPressure ボタンをクリックして全てのブロックが未入力であることを示す灰色に変わることを確かめる。水頭値の設定は、各点毎、あるいはX方向の一行、Y方向の一行毎に行うことができる。数

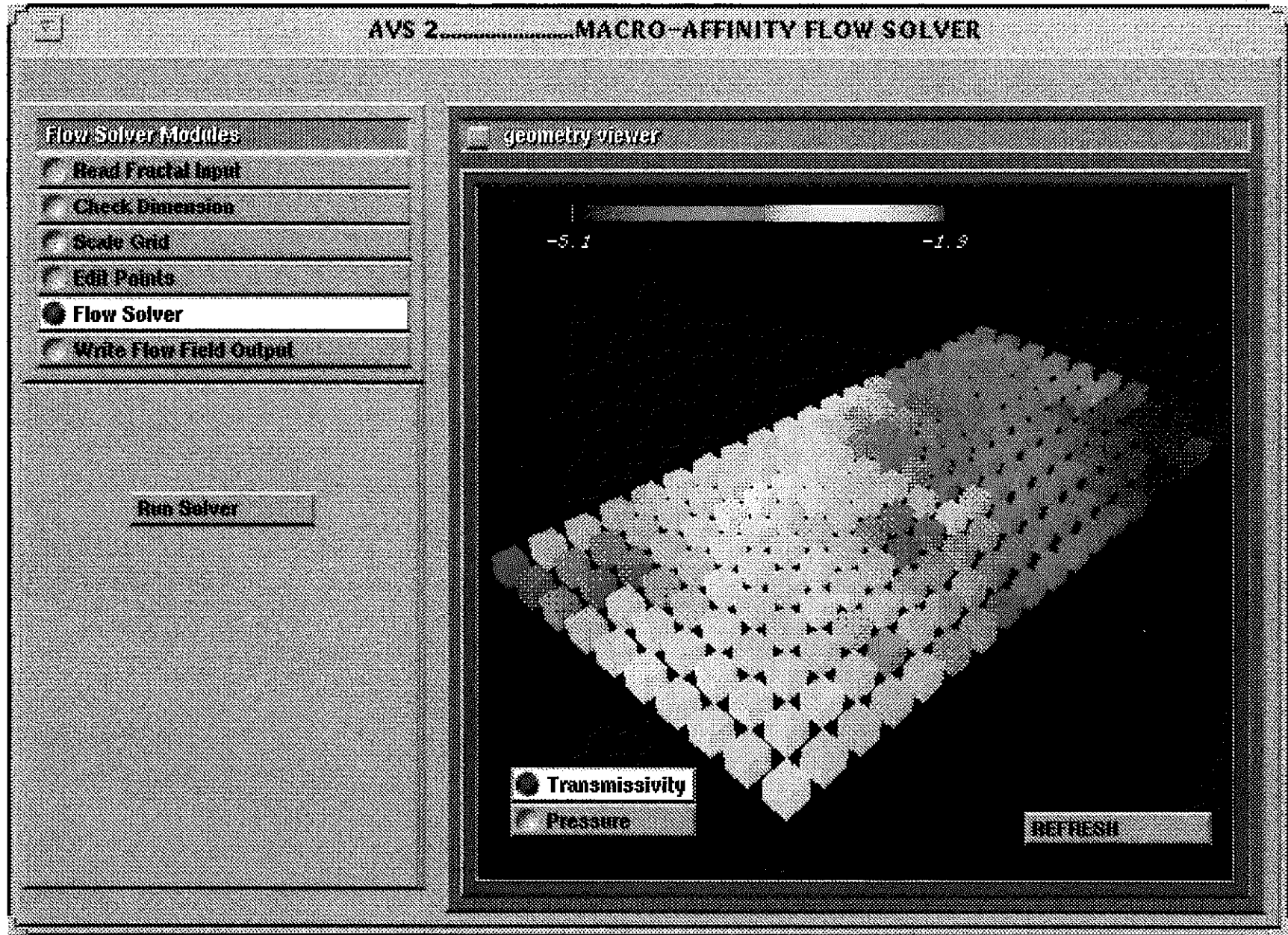


図 2. 4. 1-3 基本テストケースについての透水係数場

値の設定を行うには、カーソルで当該ブロックあるいはブロック列を指定し、テキストウィンドウのHead(m) 値をタイプ入力すれば良い。この際、誤ってTransmissivity値を変更してしまった場合には、RESTOREボタンをクリックすることによって全てのTransmissivity値は元の状態に戻る。但し、入力したHead値も同時に失われることに注意を要する。

基本テストケースでは、Y方向の第一列及び最終列に水頭固定の境界条件を与える。X方向の境界についてはNo Flux 条件を用いるが、これはデフォルト状態に対応しているため、何の操作も必要とはしない。まず、第一列については、この中の任意のブロックをクリックし、テキストウィンドウに1.0とタイプしてADDボタンをクリックする。このことによって、第一列の全体が青く点灯する。次に、最終列についても同様に任意のブロックをクリックし、0.0 とタイプした後にADDボタンをクリックする。この時点で第一列は赤く点灯し、最終列は青く点灯することとなる(図2.4.1-4)。ここで、水頭はmの単位で入力することしか許されず、また、負の値は使うことができない。

設定した境界条件の下に流動解析を行うには、まず、Flow Solver ボタンを、続いてRun Solverボタンをクリックすれば良い。基本的テストケースの場合には、計算時間は数秒程度である。結果は、AVS MACRO V 1.0 ウィンドウで Particle Tracking上に流動解析結果が現れない場合には、REFRESH ボタンをクリックしてPressureあるいはDarcy Fluxラジオボタンを押せば良い。この結果、水頭分布あるいはダルシー流速場の計算結果がそれぞれ表示されることとなる。

基本テストケースに於ける水頭分布は、第一列の1.0から最終列の0.0 へと滑らかに推移するものとなる。一方、ダルシー流速場では各ブロックの4つ境界を横切るダルシー流速の絶対値の総和が対数で表示され、結果は高い数値を示す領域(赤、オレンジ、及び黄色に対応する)と低い数値を示す領域(青と緑)とに上下に分割される形となる。

さて、流動解析の結果を出力ファイルに書き込むためには、(2)と同様の操作を

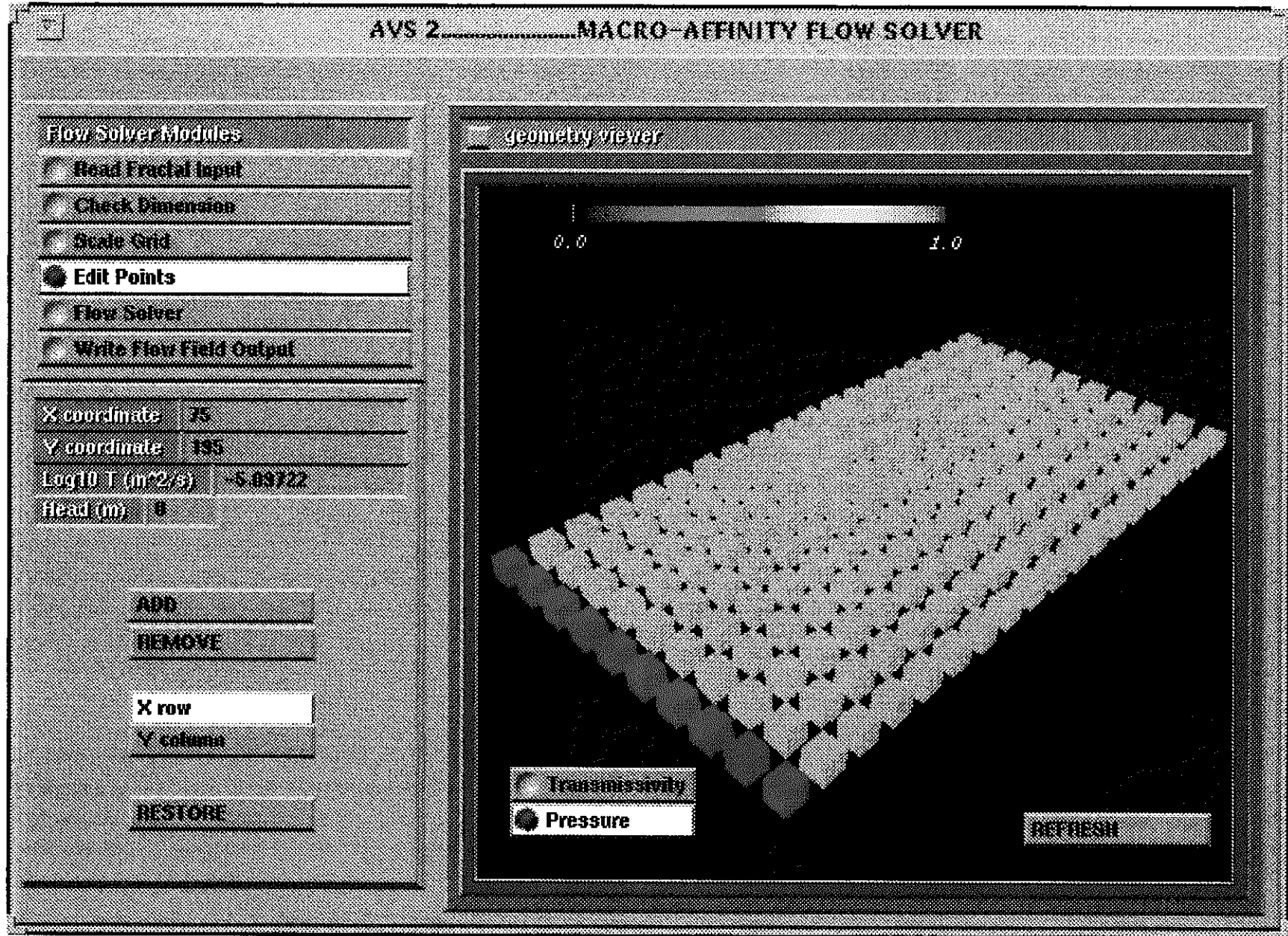


図 2. 4. 1-4 流動解析境界条件（水頭）の設定例

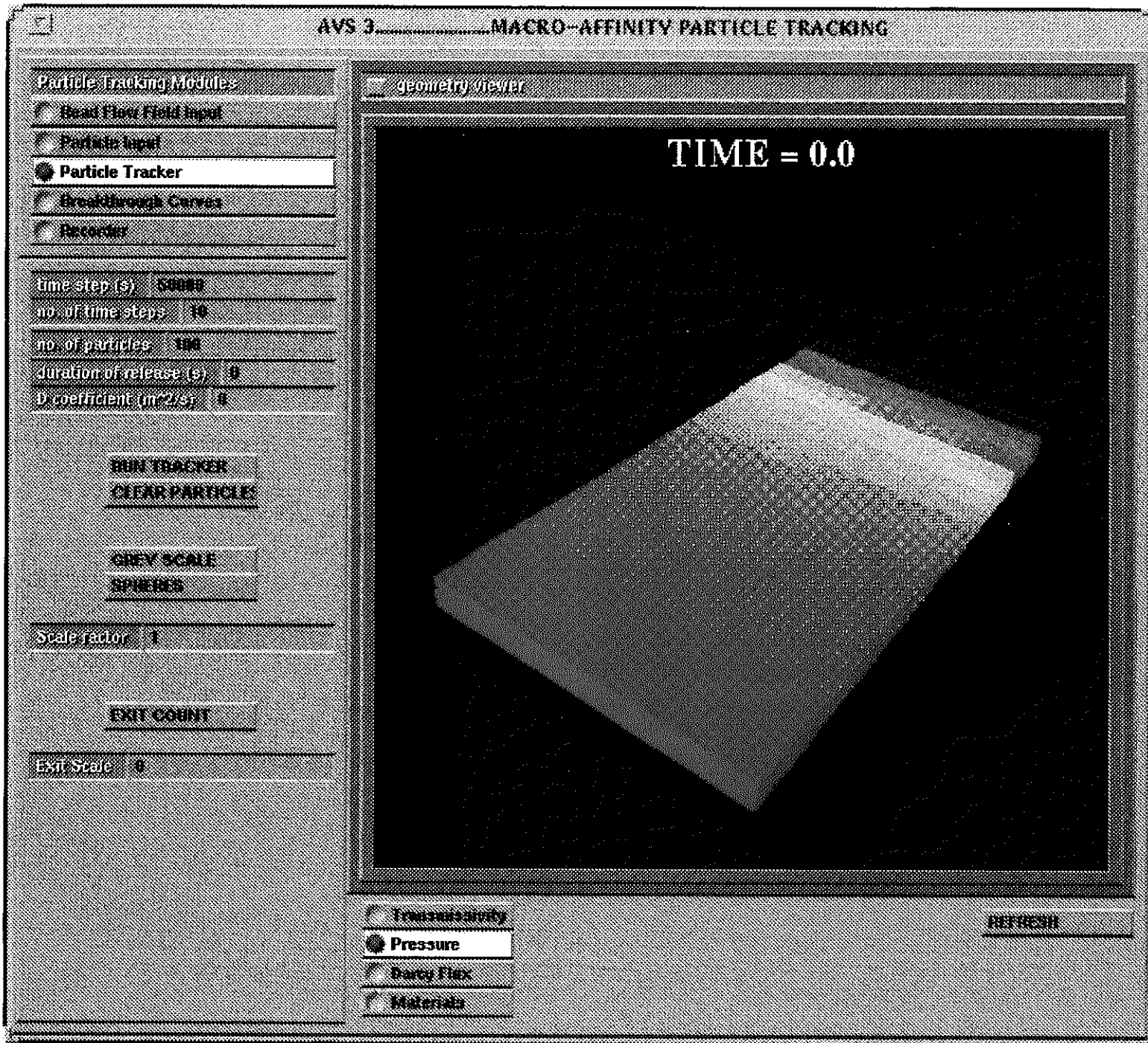


図 2. 4. 1—5 基本テストケースにおける流動解析結果 (圧力分布)

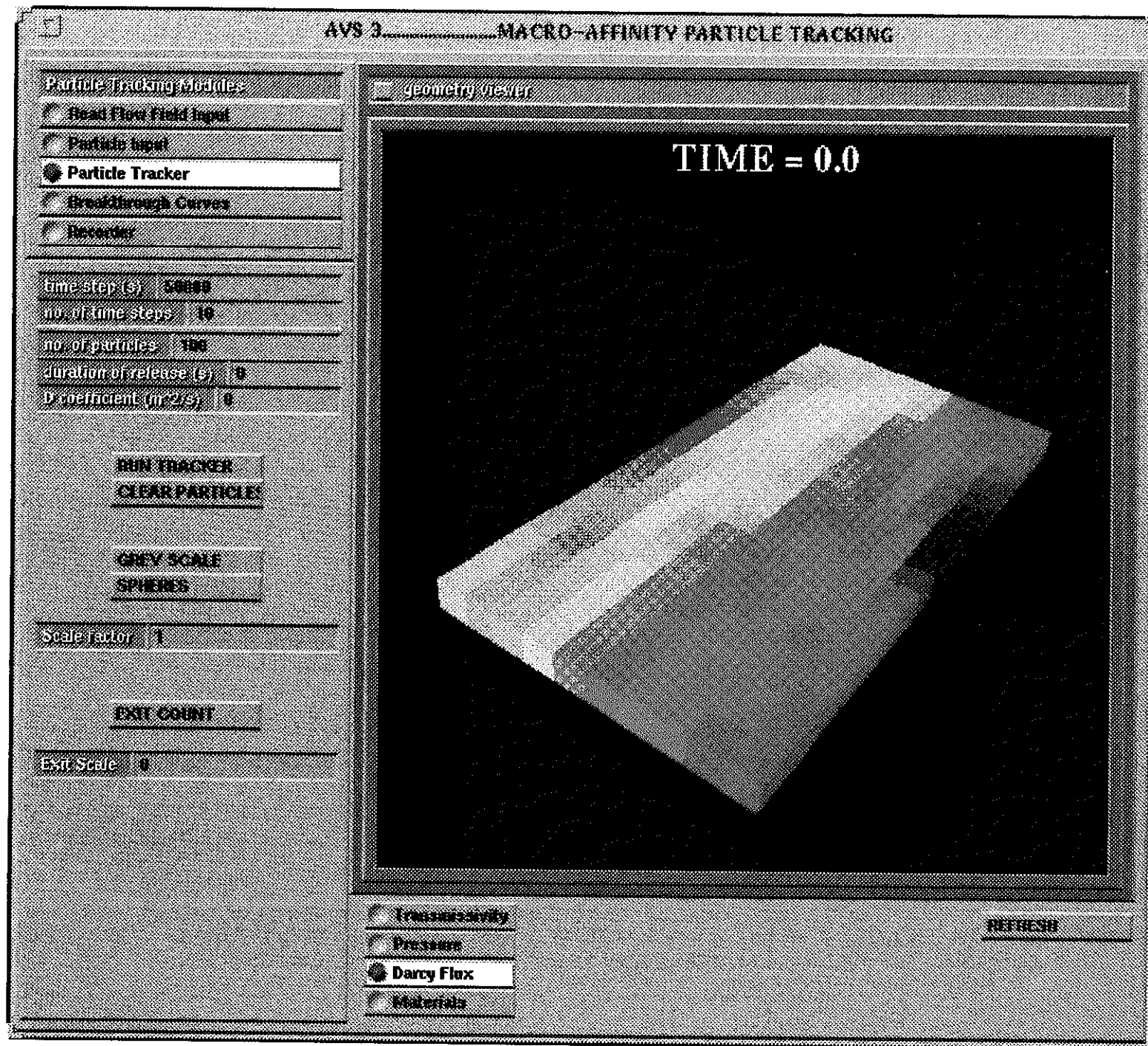


図 2. 4. 1—6 基本テストケースにおける流動解析結果（ダルシー流速場）

行えば良い。即ち、まず流動解析パネルに上端をクリックしてこれを全面に持ち出し、Write Flow Filed Outputボタンをクリックすれば前回と同様に出力は自動的に書き込まれる。

これで、基本テストケースについての流動解析は終了である。このパネルをかくすには、AVS MACRO V 1.0 ウィンドウのFlow Solver ボタンを押せば良い。

(4) パーティクルトラッキング

パーティクルトラッキングを実施するためには、まず、トレーサの注入位置を指定する必要がある。このために、Particle Inputボタンをクリックして編集モードに入り、画面上で注入位置に当たるブロックをクリックする。基本テストケースでは、(15,5) という座標を持つブロックをクリックする。この時点で、当該ブロックの透水量係数(-1.89719m²/S) と水頭値(1.0m)、そして座標がテキストウィンドウに表示される。

次に、ADD POINT ボタンをクリックすると、ブロック上に紫色の半球が現れる(図2.4.1-7)。

トレーサ注入位置が指定されたところで、次にテキストウィンドウ及びトグルボタンを以下の設定とする。

(テキストウィンドウ)

| | |
|-----------------------------------|-------|
| time step(s) | 10000 |
| no. of time steps | 50 |
| no. of particles | 100 |
| duration of release | 0 |
| D coefficient (m ² /S) | 0 |
| Scale Factor | 1.0 |
| Exit Scale | 0.0 |



図 2. 4. 1-7 トレーサ注入位置の指定

(トグルボタン)

GREY SCALE OFF

SPHERES OFF

EXIT COUNT OFF

各パラメータの意味は次の通りである。

① time step

パーティクルトラッキングの結果を表示する時間の間隔 (秒)。

② no. of time steps

パーティクルトラッキングを実施するタイムステップの数。

③ no. of particles

初期にトレーサ注入部に置かれるパーティクル数。注入位置が複数ある時には、このパーティクル数が均等に配分されることとなる。

④ duration of release

トレーサ注入の継続時間。この時間内では、流下した分のパーティクルは補充され、トレーサ注入位置でのパーティクル数は一定に保たれる。従って、この数値を0とした場合には注入モードはパルス状となり、解析対象時間 (①×②) よりも短い時間を指定した場合にはステップ状、長い時間を指定した場合には連続の注入モードが採られることとなる。

⑤ D coefficient (m²/S)

分子拡散係数

⑥ Scale Factor

パーティクルトラッキング時に各ブロック内に存在するパーティクル数を表

現するカラムの高さを決定する係数。この値を0とした場合には、パーティクルは正方形として平面的に表示される。

⑦ Exit Scale

パーティクルが系外に流出する位置の分布を示すヒストグラムの高さを決定する係数。

⑧ GREY SCALE

このトグルボタンをONにすると、カラムの高さに加えてその明暗によってもパーティクル数が表示される。(パーティクル数が多い場合に白で、数が少なくなるに従って灰色へと変化する。)

⑨ SPHERES

このトグルボタンをONにすると、パーティクル群はカラムでなく半球として表示される。この場合にはScale Factorは半球の径を調整するパラメータとなる。また、このモードにおいても、GREY SCALEをON, OFFいずれの指定とすることも可能である。

⑩ EXIT COUNT

このトグルボタンをONにすると、下流境界上にパーティクル流出位置の分布を示すヒストグラムが表示される。

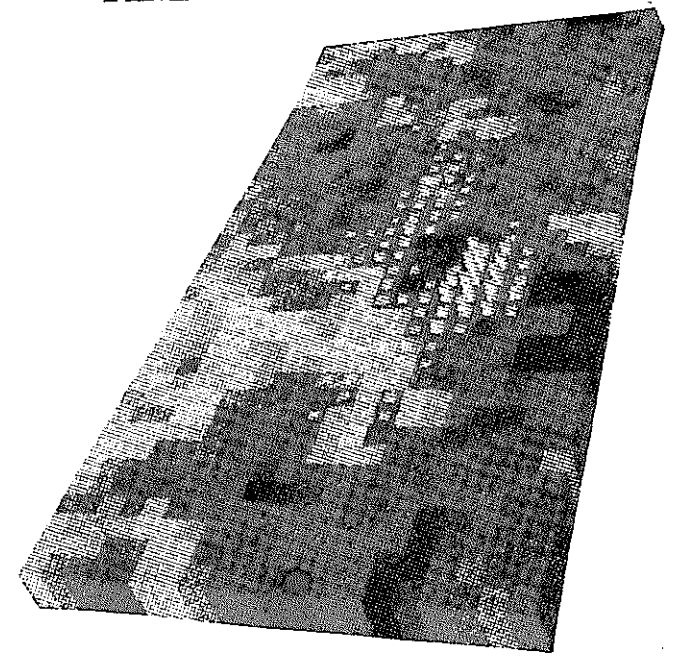
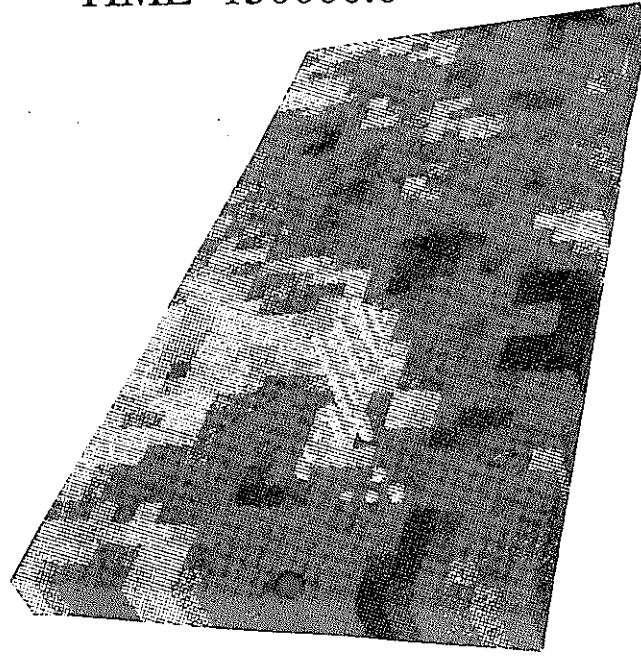
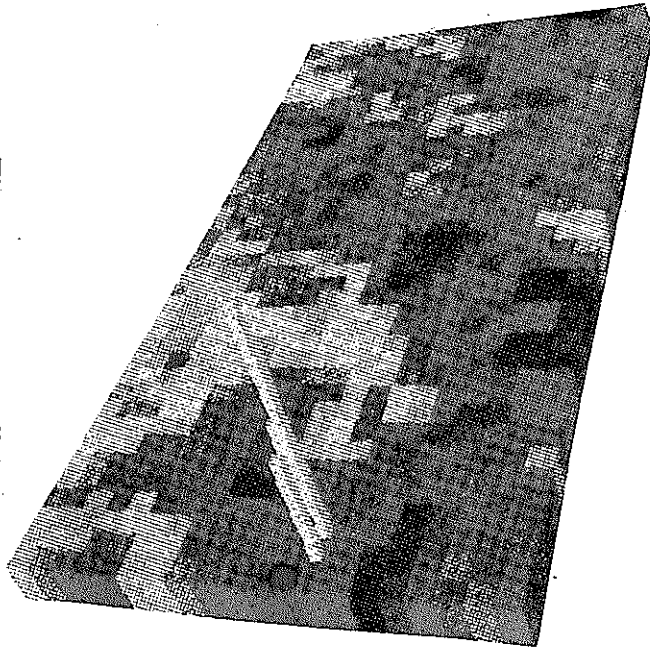
以上の設定を行った後に、RUN TRACKER ボタンをクリックすると、パーティクルトラッキングの計算と表示とが同時に開始される。(図2.4.1-8)

パーティクル挙動の画像表示に於いて、背景としては透水係数場、圧力分布、及びダルシー流速場のうちいずれか一つを選ぶことができる。この選択はユーザーの用途に合うように為されれば良く、指定は、ディスプレイの下にあるラジオボタンをクリックすることによって行われる。

TIME=50000.0

TIME=150000.0

TIME=250000.0



TIME=350000.0

TIME=400000.0

TIME=450000.0

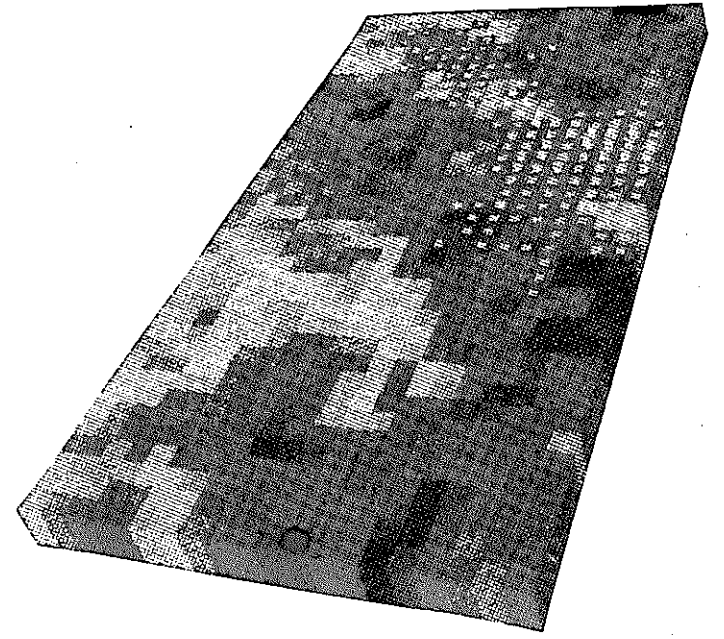
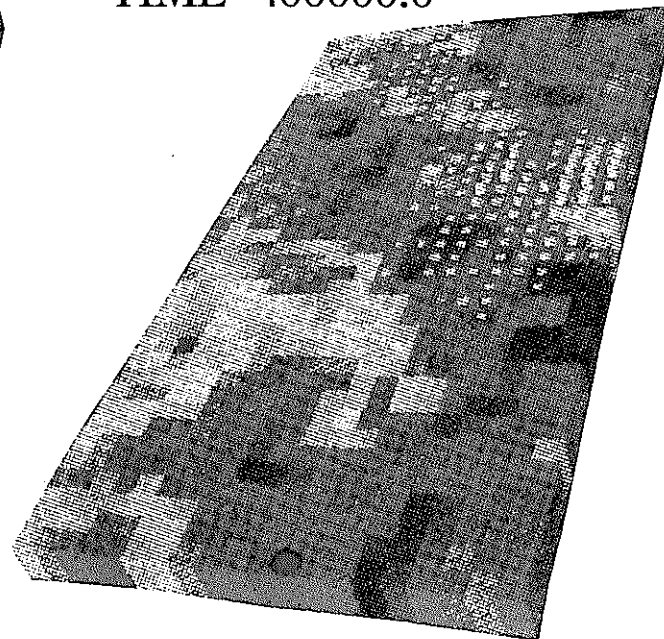
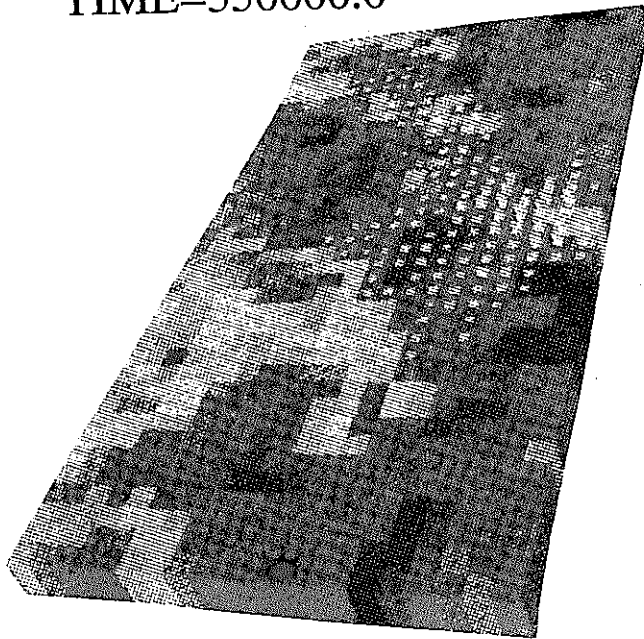


図 2. 4. 1—8 基本テストケースにおけるパーティクルトラックキングの結果

現実的な（つまり、時間的に滑らかな）パーティクル挙動の表示をするためには、タイムステップは小さい方が良いが、この場合にはシミュレーションの時間が全体として非常に長くなるという危険性が生ずる。最適なタイムステップを見出すためには、まず、大きなタイムステップを用いてシミュレーションの終了時間（例えば、全てのパーティクルが系外に流出する迄の時間）を見出し、次にパーティクルの挙動が滑らかになる様に徐々にタイムステップを小さくし、これと反比例してタイムステップ数を大きくとるという試作を行うことが必要である。

パーティクルトラッキングの計算結果として、パーティクルの実際の動きを動画として見ることに加えて、ユーザーは破過曲線及び累積破過曲線を見ることもできる。このためには、まずBreakthrough Curveボタンをクリックして、次にONラジオボタンをクリックする。ここで、NORTH, SOUTH, EAST, WEST という四つのラジオボタンはモデル領域を囲む四つの境界（右、左、上、下）にそれぞれ対応しており、ここで指定された境界についての破過曲線が表示されることとなる。

基本テストケースに於ては、NORTH 境界のみが系からの出口であり、これを指定した場合にのみ破過曲線が表示される。破過曲線がステップ上に増減しているのはパーティクルトラッキングに於ける時間離散化の効果であり、タイムステップを大きくとる程この効果は著しくなる。また、さらにCUMULATIVEボタンをクリックすると累積破過曲線（図2.4.1-10）が表示される様になる。破過曲線の検討を終えた時には、OFFボタンをクリックすることが必要である。これをONにしたまま次のパーティクルトラッキングを行うと、計算効率が低下することとなる。

最適な表示形式となるトグルの状態及びパラメータ値を見出した後、パーティクル挙動を録画する際には、以下の操作が必要となる。

- (i) Recorderボタンをクリックする。
- (ii) Write sequence ブラウザーを用いて、出力ファイルの名称をタイプする。
- (iii) ワーニングボックスの中のErase All ボタンをクリック出力ファイルの重複がないことを確認する。

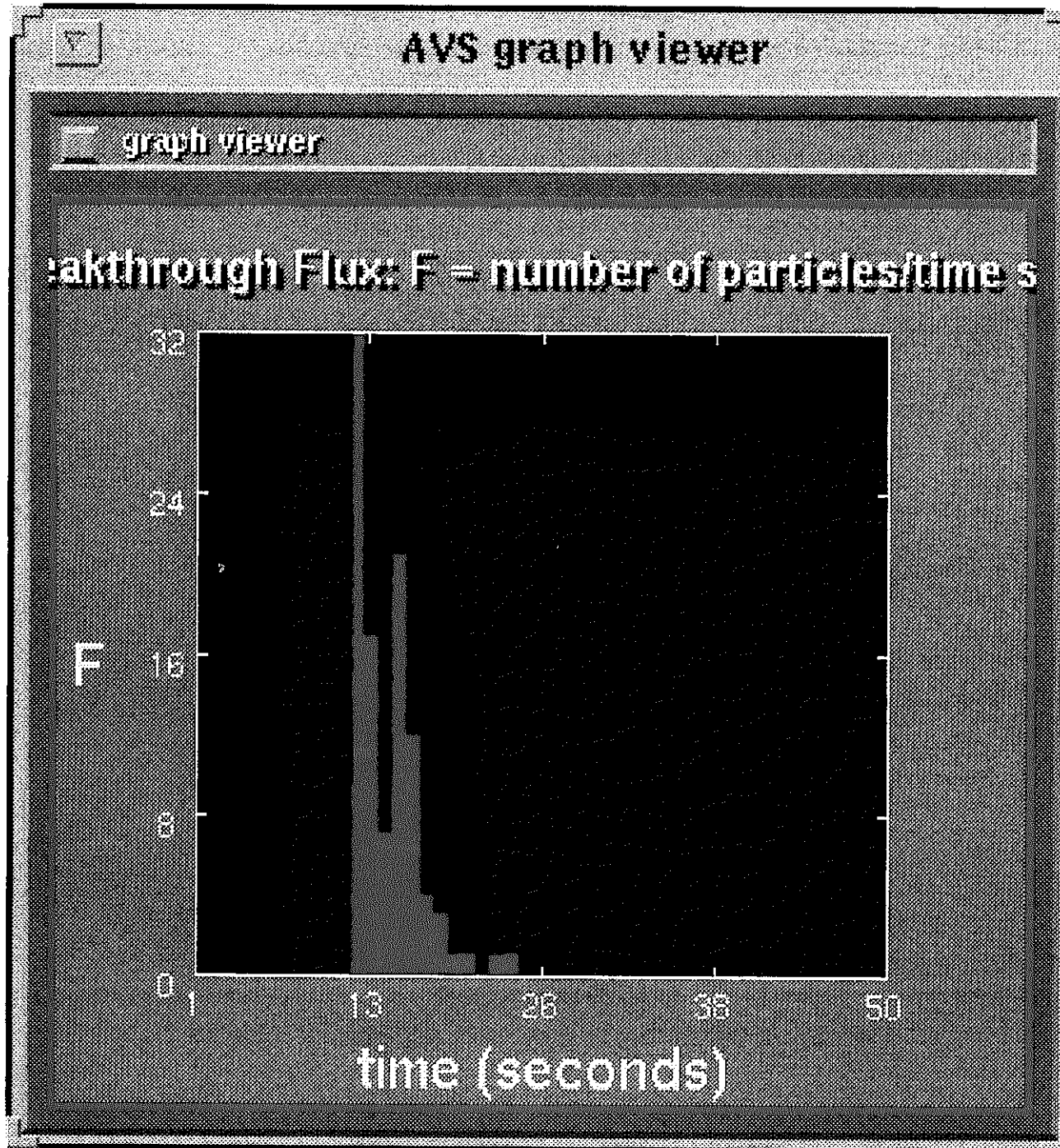


図 2. 4. 1—9 基本テストケースにおける破過曲線の算出例

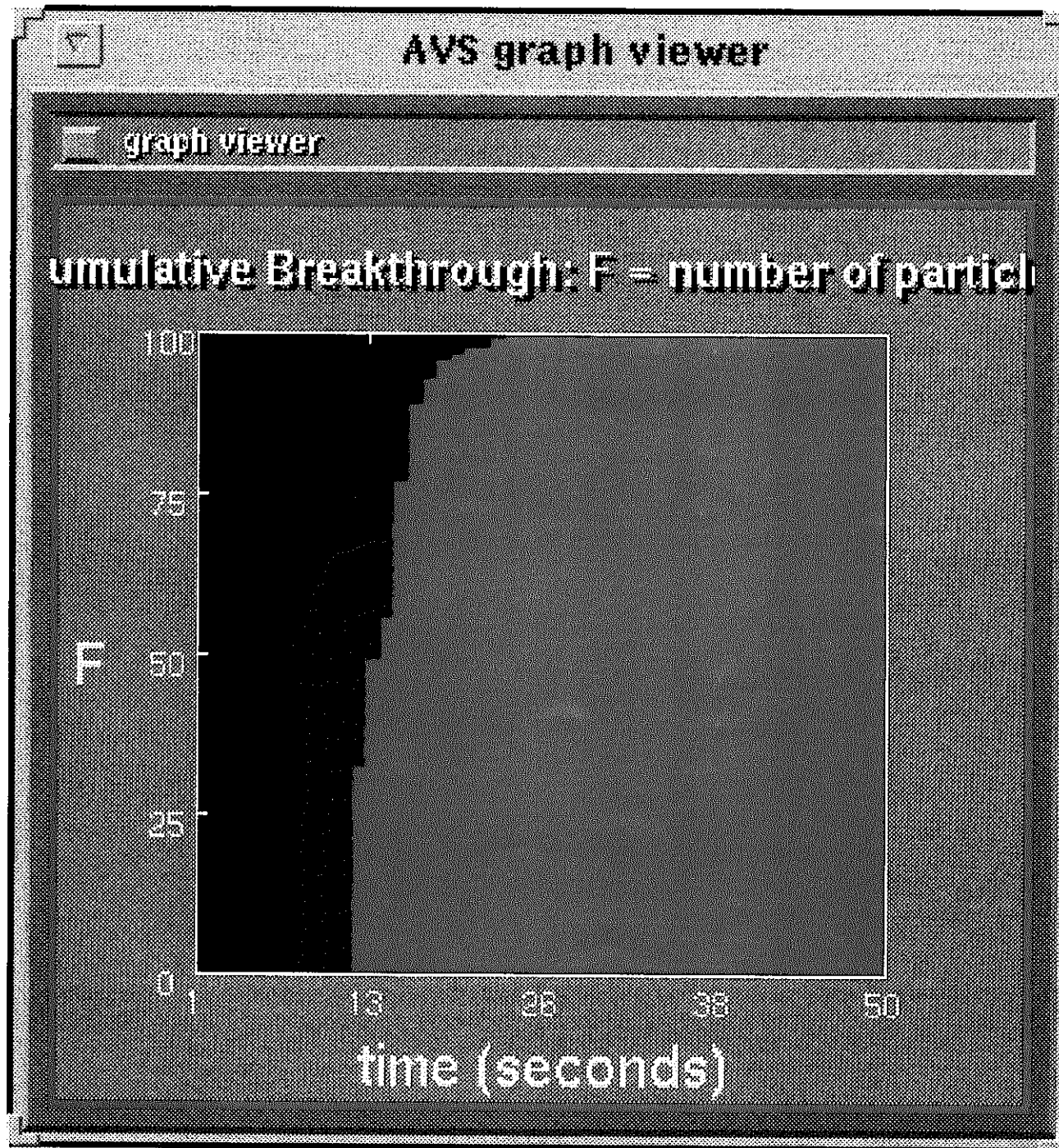


図2. 4. 1—10基本テストケースにおける累積破過曲線の算出例

- (iv) ON ボタンをクリックする。(この時点から、OFFボタンをクリックするまで、ディスプレイが更新されるたびにその結果は録画されることとなる。)
- (v) CLEAR PARTICLESボタンを2～3回クリックする。(この操作により。録画のはじめの数コマには初期の状態が現れることとなる。)
- (vi) RUN TRACKERボタンをクリックしてパーティクルトラッキングを開始する。(録画を行いながら計算を進めるためには、通常よりも実行時間は長くなる。)
- (vii) パーティクルトラッキングが終了した時点でOFFボタンをクリックする。これを行わないと、出力ファイルは非常に大きなものになってしまう可能性がある。この時点で録画を終了する事が重要である。)

さて、前回までと同様に、まずParticle Tracking ボタンを、続いてReview Animation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のパネルが閉じられ、続いて動画再生用のパネルが現れる。

(5) 動画の再生

動画再生用のパネルはただ一つのモジュールから成る。ディスプレイは他とは若干異なり、パーティクルトラッキングのスナップショットをマウスの右ボタンを使って移動することはできるが、回転することはできない。

録画された結果を呼び出すには、Read Sequence ブラウザーを用いて、ファイルリストの中のtest 1. seq をクリックする。動画の再生のための操作は、通常のビデオデッキと全く同くボタン類を用いて行う。即ち、△ボタンは連続的に動画を再生し、△|ボタンはコマ送りを行う。また、□ボタンは停止であり、△と|△とは再生方向を逆にする。これらの下にあるボタンは、再生のサイクルを指定する(ワンスルー、繰り返し、順方向に再生した後に、逆に戻る、等)。再生中、コマ数はモジュールパネルに表示され、実際の時刻はディスプレイの中に示される。

以上で、基本テストケースは終了である。次に、MACRO-AFFINITYの代替的操作モードに対応したテストケースについて説明を加えることとする。

2.4.2 代替ケース

(1) 透水量係数値の離散化

基本テストケースに対応する第一のバリエーションは、不均質多孔質媒体中物質移動試験と整合的になる様に（実際の試験で用いられるガラスビーズの粒径には規格があり、その結果として、透水量係数はある離散的な数値しかとり得ない）、連続量として作成されたフラクタル透水係数場を離散的な数値のセットと変換することである。

これを行うためには、まず、Fracfitterモジュールを起動するところまで基本ケースと全く同じ操作をする。そして、Flow Solver パネルを表示し、透水量係数場を選択する。次に、Quantization Levels ボタン（Fractal Generationパネル中にある）をクリックすることによって離散化を行うための環境が設定される。ここで、numberテキストウィンドウに離散化レベルの数（このテストケースでは3）をタイプ入力する。引き続きこの数に対応して（このテストケースでは3個）新たなテキストウィンドウが現れるので、それぞれに離散化された透水量係数値（このテストケースでは、-2、-4及び-5）をタイプ入力する。この操作によって、本来の透水量係数場は指定された数値のうち最寄りのものに置き換えられ、表示もこの離散化されたバージョンに自動的に変換される。（図2.4.2-1）

以上で、試験の条件と対応した離散化されたフラクタル透水係数場が得られる。引き続き流動解析と物質移動解析に於ける操作は、基本ケースの場合と全く同じである。解析の結果得られるダルシー流速場は、基本ケースに比して、明らかにブロック状の構造が強調されたものとなる（図2.4.2-2）。パーティクルトラッキングの例（図2.4.2-3）としては、注入*i*の座標を（45, 5）と指定して、以下のパラメータ設定を行う。

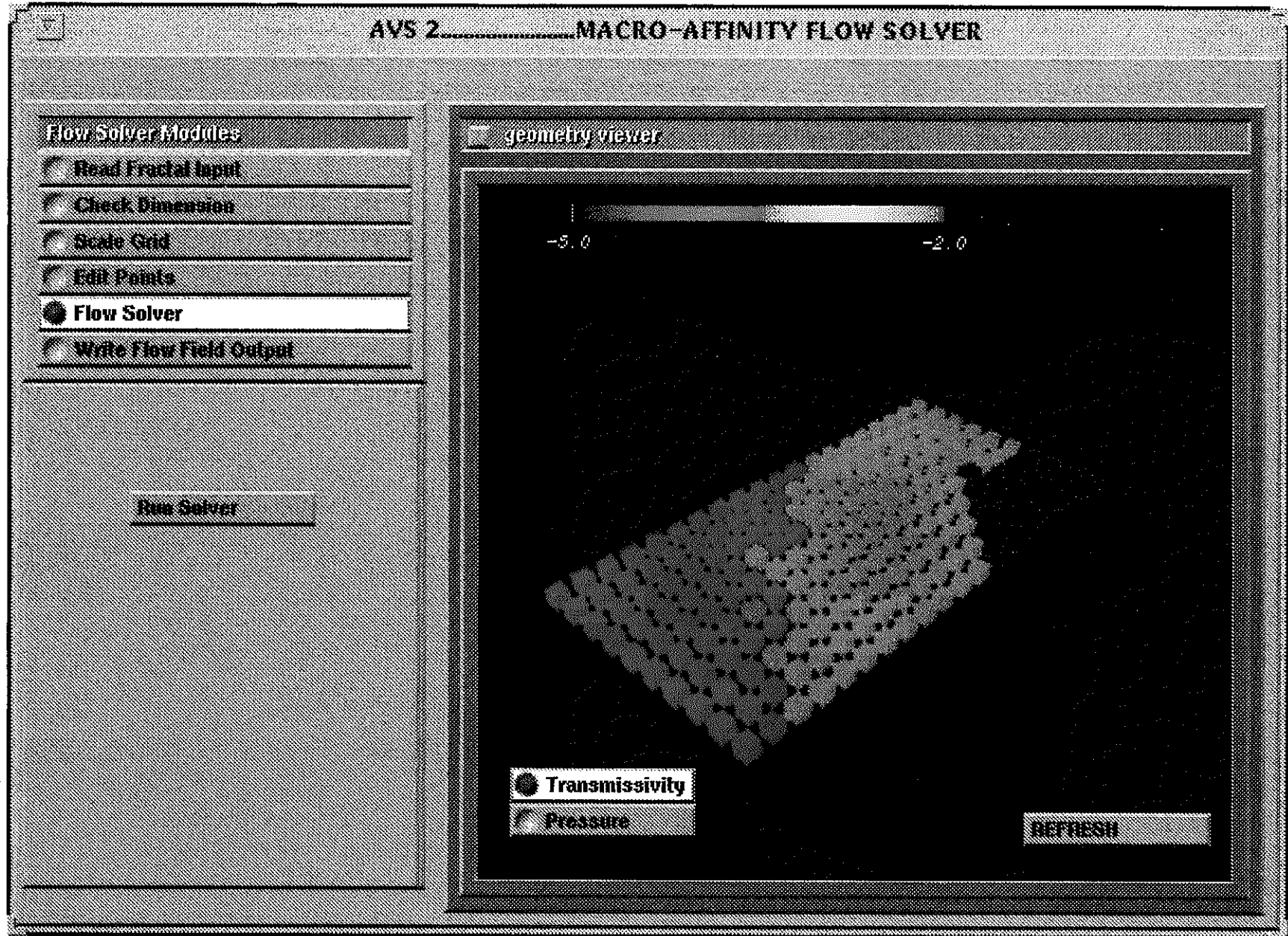


図 2. 4. 2-1 代替ケースにおける離散化された透水係数場

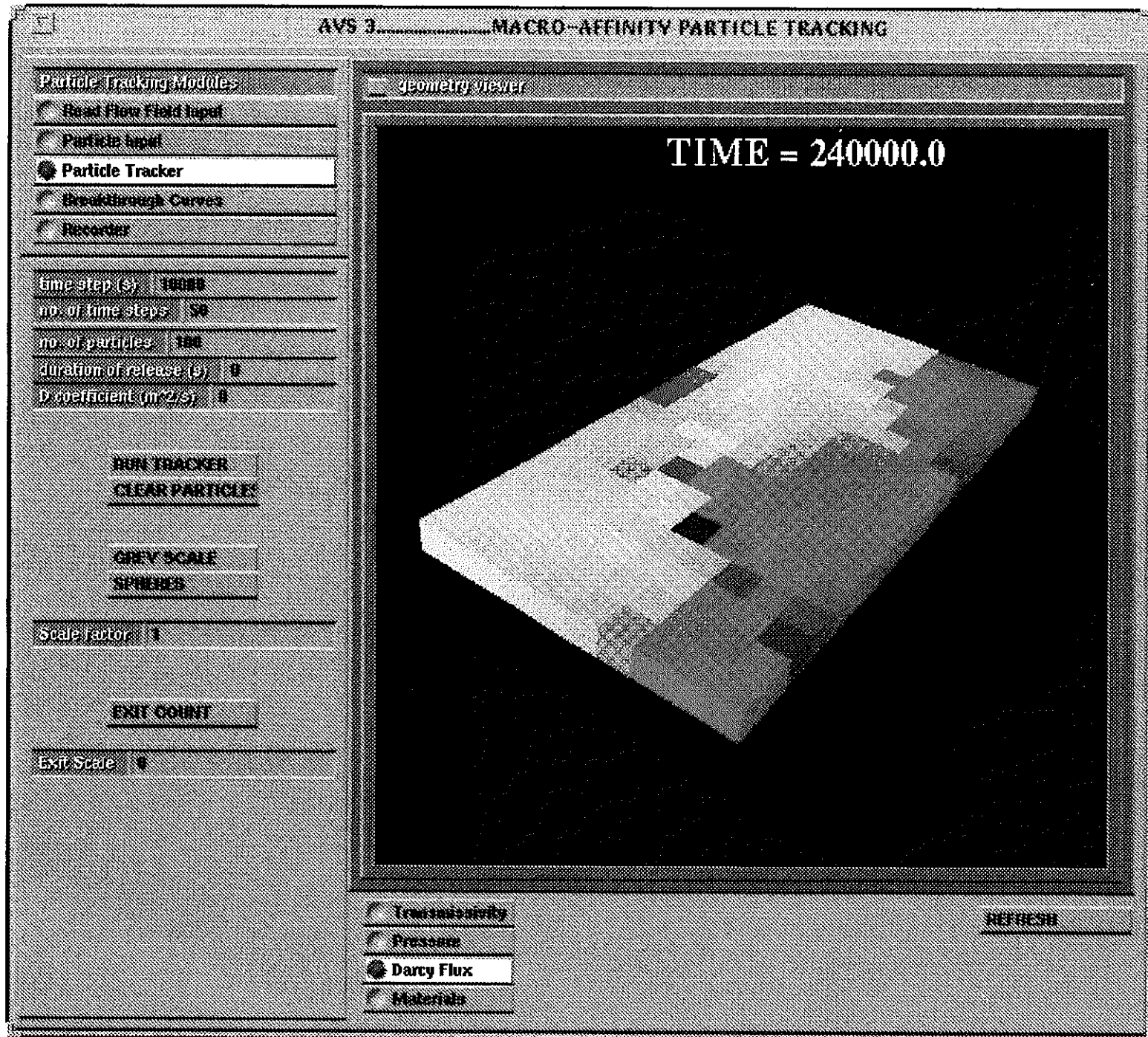


図 2. 4. 2-2 代替ケースにおける流動解析結果（ダルシー流速分布）

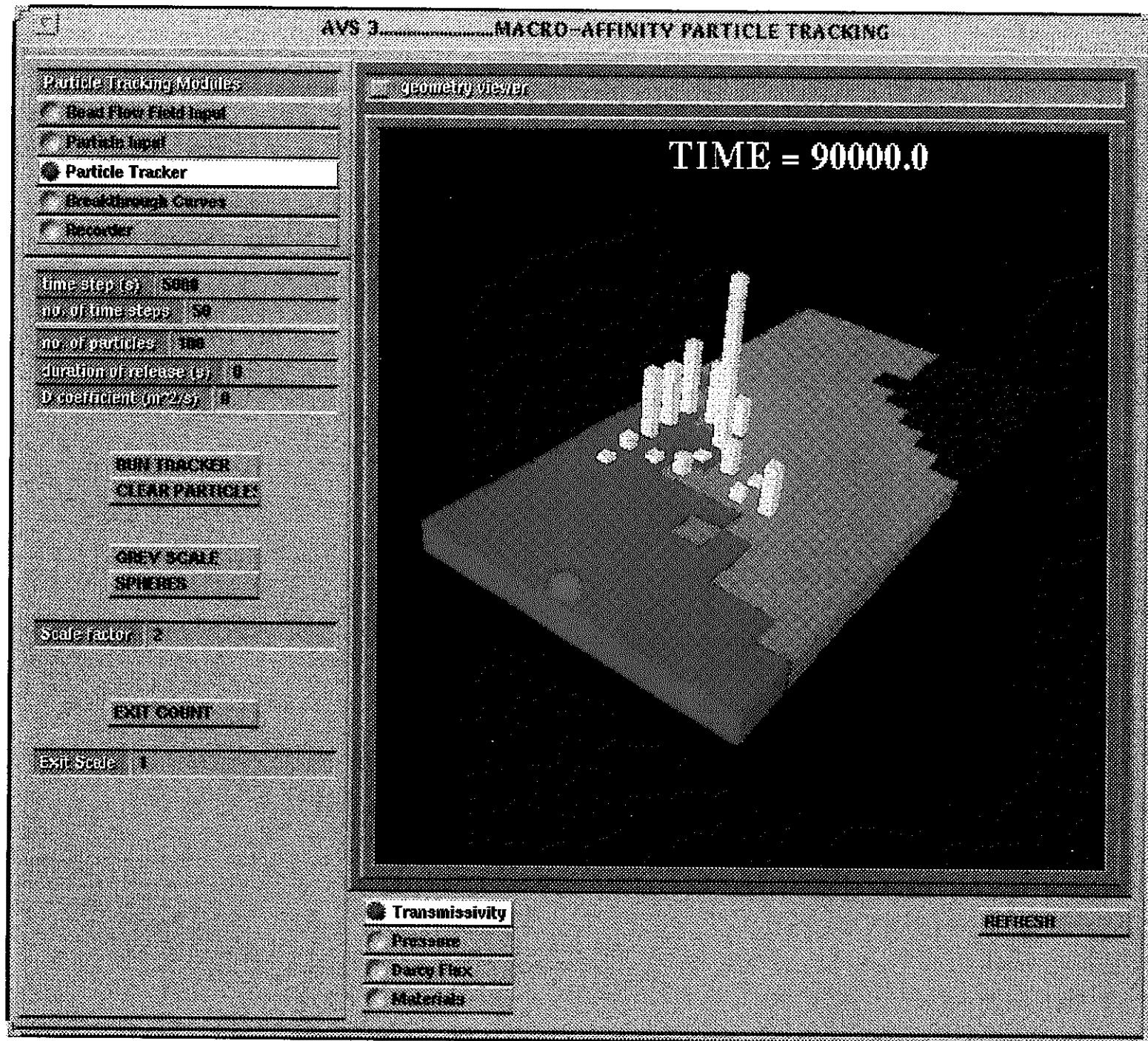


図 2. 4. 2-3 代替ケースにおけるパーティクルトラッキング結果の例

(テキストウィンドウ)

| | |
|----------------------------------|------|
| time step(s) | 5000 |
| no. of time steps | 50 |
| no. of particles | 100 |
| duration of release | 0 |
| D coefficient(m ² /S) | 0 |
| Scale Factor | 2.0 |
| Exit Scale | 1.0 |

(トグルボタン)

| | |
|------------|-----|
| GREY SCALE | OFF |
| SPHERES | OFF |
| EXIT COUNT | ON |

(2) フラクタル次元の確認

第二の代替ケースは、統計的に作成されたフラクタル透水係数場が所定のフラクタルスケーリング則を有していることの確認である。これを行うために、Flow Solver パネルを起動するところまでは(1)と同じ操作をする。(この場合は離散化された透水係数場についてのフィッティングとなるが、本来の連続量の場合についても以下の操作は同じである)。次に、FIT ラジオボタンをクリックし、続いてRUN CHECKボタンをクリックすることにより、画面に、バリオグラム $\gamma(h)$ を縦軸、地点間の距離 h を横軸とした両対数グラフが現れる(図2.4.1-4)。

グラフ中の点は各ビンの平均値であり、点をはさむバーは各ビンの標準偏差に対応している。また、フィッティングの結果得られるフラクタル次元 D と分散パラメータ a はそれぞれテキストウィンドウの中に表示される。このフィッティングの感度を見るために、例えば D を2.2と指定することによって得られる直線がフィットの結果($D: 2.433$)と比べてどの程度離れているかを調べて見ると良い(図2.4.1-5)。なお、このフィッティングモードを終了するには、EXIT CHECKボタンを押せば良い。

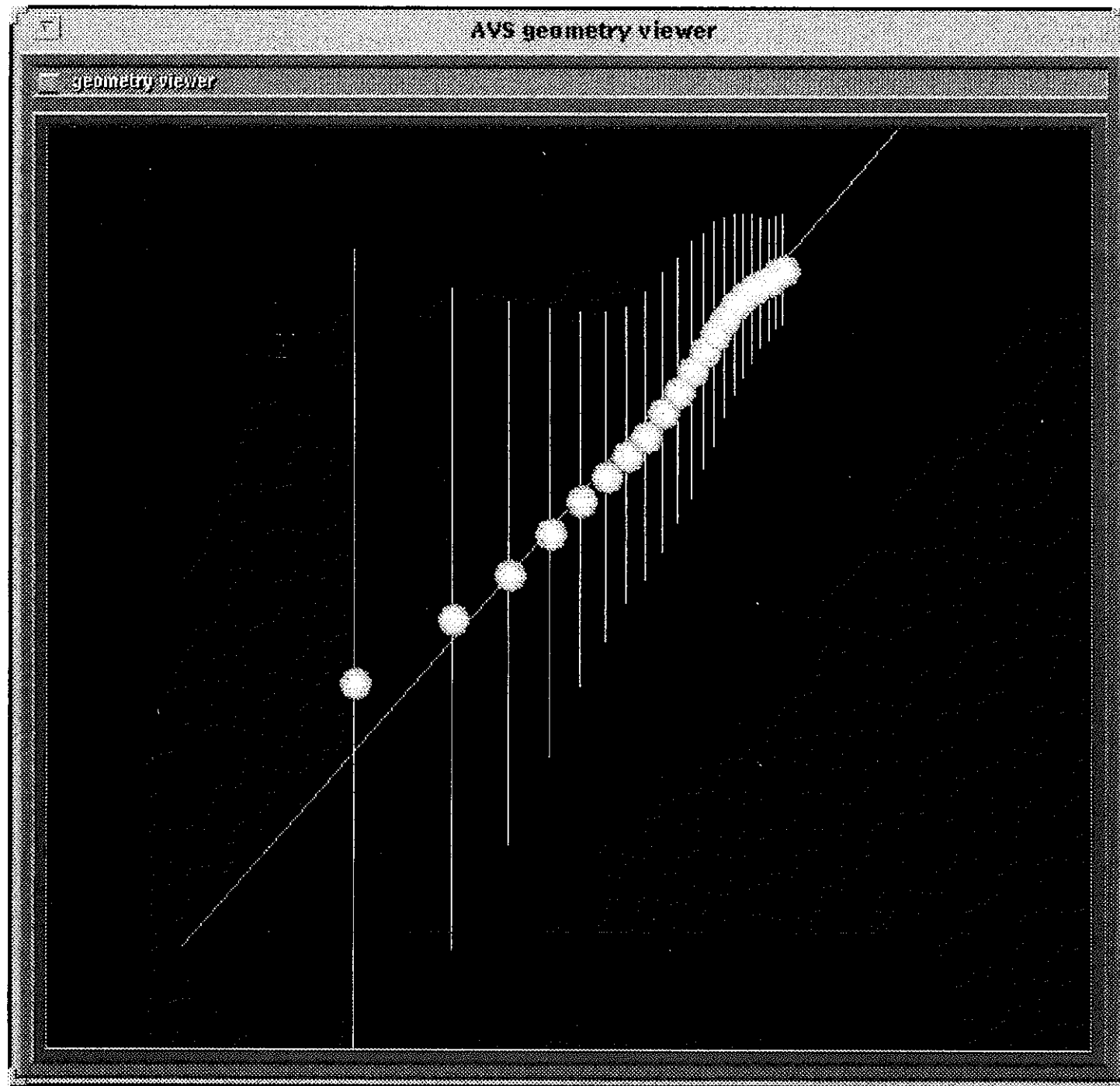


図 2. 4. 2-4 バリオグラムについてのフラクタルスケール則のフィッティング

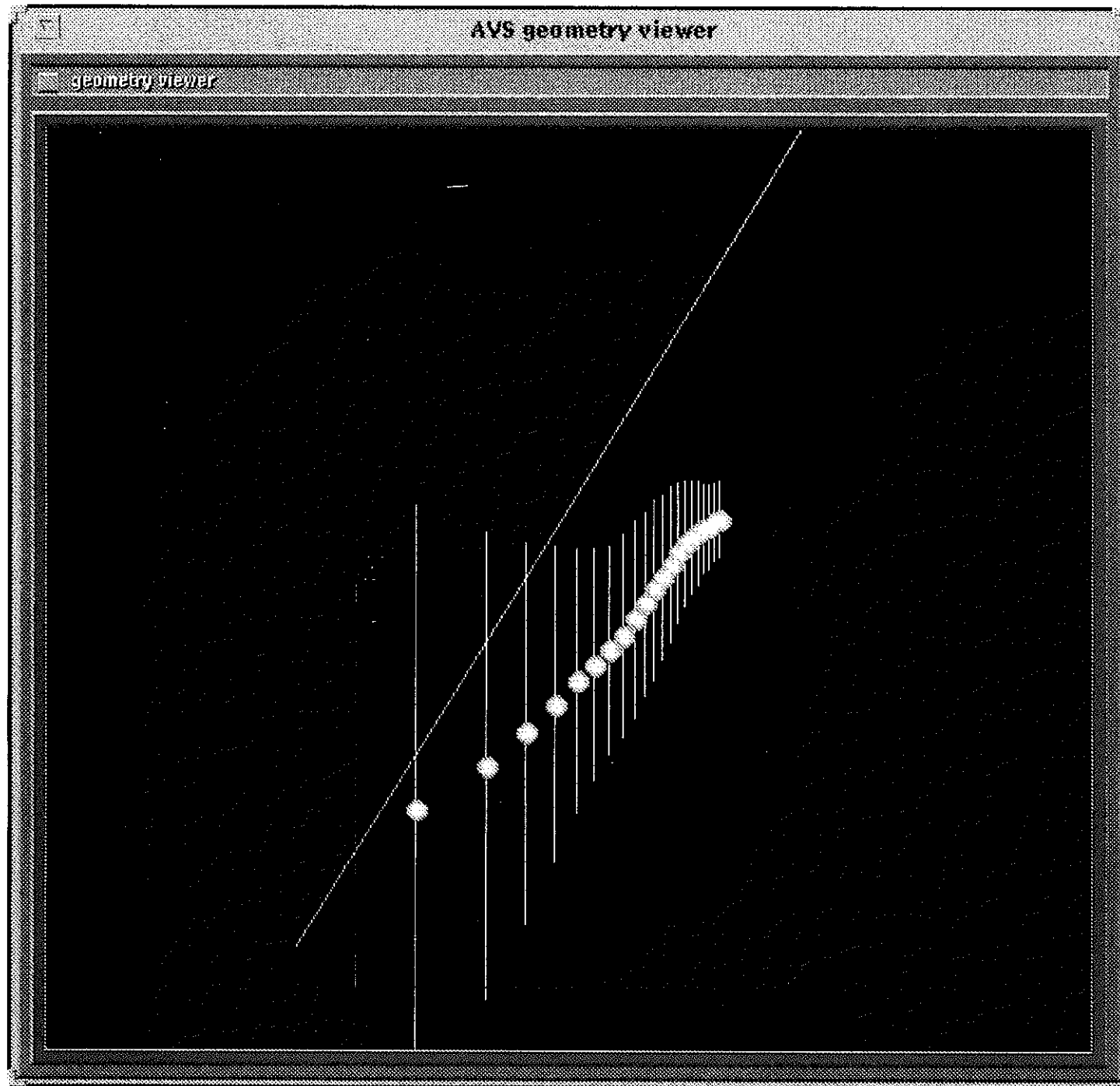


図 2. 4. 2-5 フィットされたフラクタル次元の感度

同様の機能は、Fractal Generationのモジュールに存在する。この場合には、Fractfitterモジュールのパネルに於いて、FIT 及びCHOOSEラジオボタンと、D及びaについてのテキストウィンドウとを用いて操作を行う。もしも入力データセットが十分な数の地点を含んでいれば、コードは自動的にフィッティングを行ない、バリオグラムのプロットと、D及びaの値を表示する。地点数が不十分な場合、あるいはフィッティング結果と異なるDないしはaの値を用いた場合にはFIT, CHOOSE ボタンを用いてこれを指定する。

いずれの場合も、フラクタルスケーリング則を決定した後にACCEPTボタンをクリックすることによってD及びaの値は確定され、フラクタル透水係数場作成のアルゴリズムへと送られる。

(3) グリッドサイズの変更

これまでのテストケースに於いては、いずれも透水係数場の作成に用いたものと同じサイズのグリッドを流動解析に於ても用いていた。しかし、実際の試験では実験上の制約から比較的大きなガラスビーズブロックサイズが選択されており（5 cm×5 cm）、ここでの流速分布を精度良く求めるためには、流動解析自体はより細かなグリッドについて行う事が必要となる。これを可能とするのが、Scale Gridモジュールである。

Scale Gridモジュールについてのテストケースとして、(1)のテストケースでFlow Solver パネルを起動した際に、Scale Fractor のテキストに2が現れるまで回す。マウスのボタンをはなすと、少し間をおいて画面が更新され、本来のグリッドを2×2に再度分割したより細かなグリッドが現れる（図2.4.2-6）。Scale Fractor としては最大8までが許容されるが、この場合には、画像の処理にはかなりの時間を要する様になることに注意する必要がある。

グリッドサイズを変更した後（このテストケースでは、Scale Factor 2）、流動解析（図2.4.2-7）とパーティクルトラッキングとはいずれもこれまでと全く同じ操作で実行することができる。（但し、(1)で指定したトレーサ注入位置（45、5）は

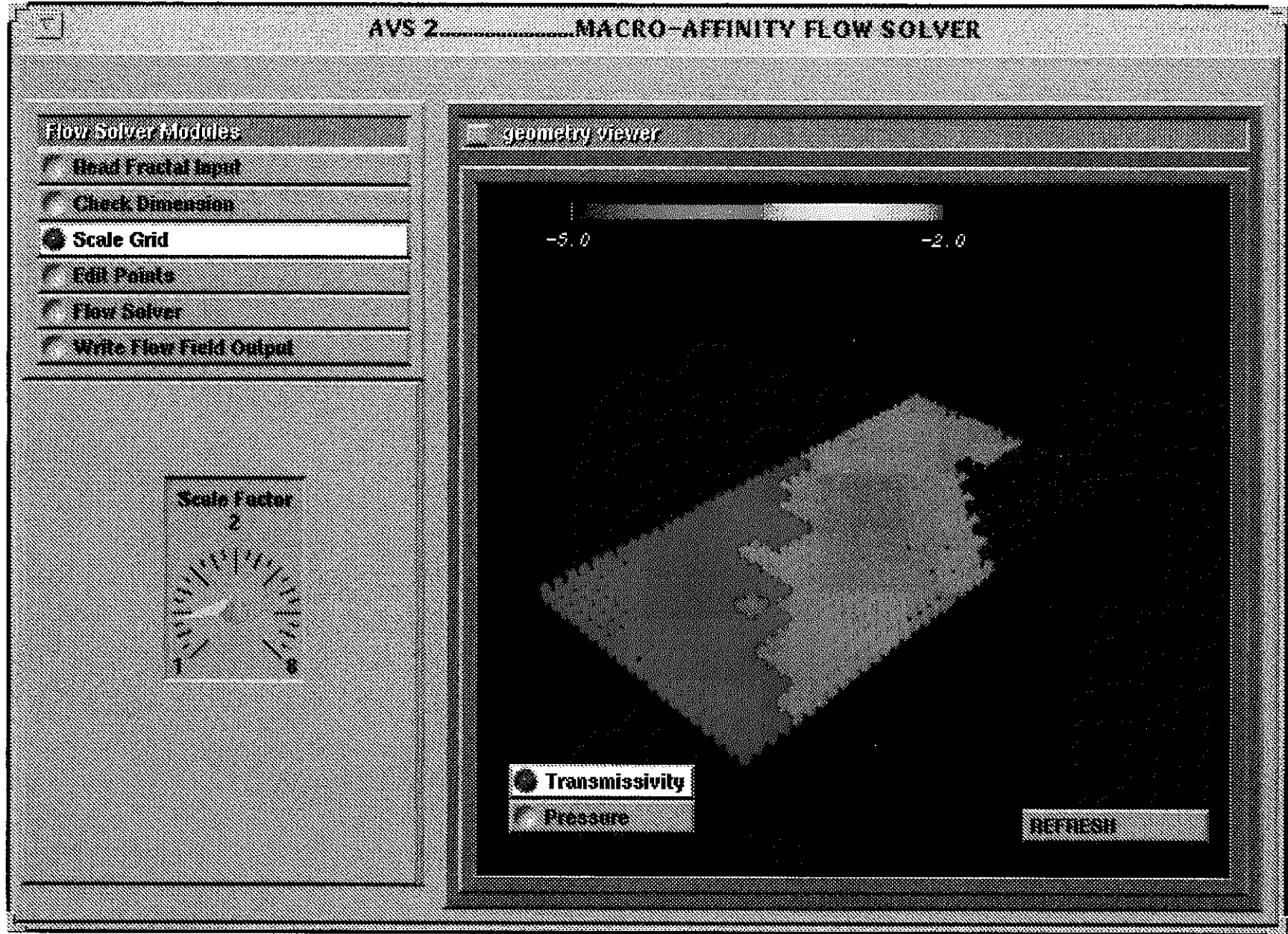


図 2. 4. 2-6 変更後のグリッドサイズ

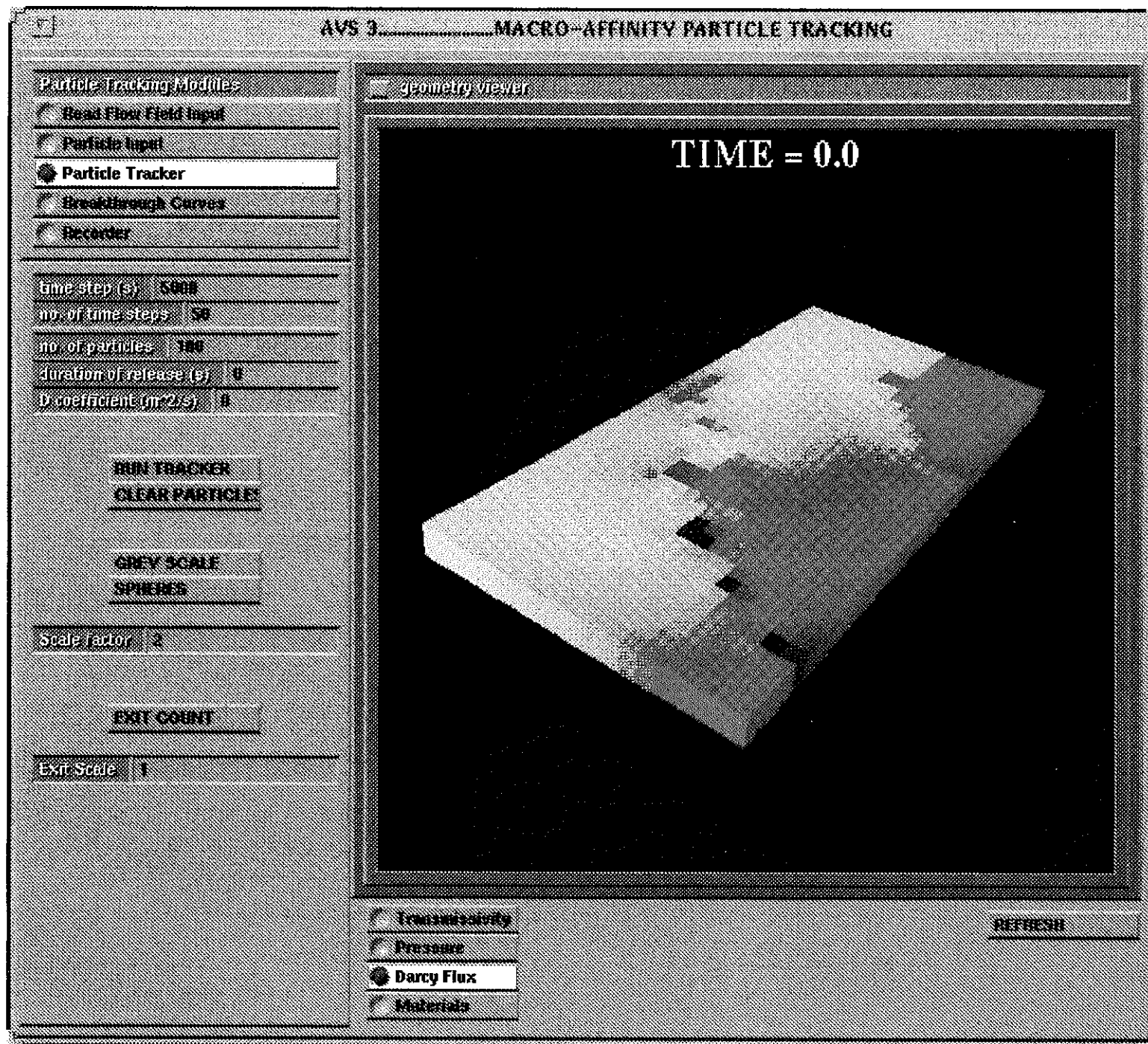


図 2. 4. 2-7 変更後の (高解像度の) 流動解析結果

もはやセルの中心ではなくなっているため、新たな値（例えば（47.5, 2.5））に変更する必要がある。）

(4) 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2.4.1 に述べた順序で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、Oarticle Tracking パネルのRead Flow Input モジュールを用いて既存の流動解析結果ファイル（圧力分布、ダルシー流速場；例えばtest 1 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。

3. 非等方性媒体の模擬と不均質多孔質媒体中物質移動試験結果の解析

3.1 非等方性媒体の模擬

地層は程度の差こそあれ、何がしかの異方性を有している場合が多い。特に、堆積岩系の地層においては、その形成過程を反映して明確な層構造を示すものとなる。この場合には、地層の特性は層方向について強く相関しており、層と鉛直方向には弱い相関しか示さない。つまり、現実的には、AFFINITYでモデル化すべき不均質の相関構造が異方的となる場合が含まれることとなる。4.1 にまとめる東濃サイトのデータセットは、この様な条件に該当する好例でもある。

本節では、異方的な不均質性を有する透水係数場についてもAFFINITYを適用可能としていくために、まず、この目的に沿った形でフラクタルスケール則の数学的取扱を見直し、次いで、それぞれ特性の異なる3つの手法を用いて異方的なフラクタル透水係数場の例を作成する。

3.1.1 フラクタルスケール則の数学的表現

概念的に言えば、不均質性は二つの因子によって表現される。第一のものは、滑らかなトレンドからの変動（あるいは「ずれ」）の強さであり、これは各部位での分散ないしは標準偏差によって表される。第二の因子は、この変動のより具体的なパターンであり、これは各所でのスケール則、言い換えれば自己相関のルールによって規定される。

1. に述べた様に、AFFINITYでは、不均質透水係数場の作成においていくつかの候補となる不均質場の線型和をとることによって代数的に分散をコントロールし、また、スケール則としてはべき乗型のものを用いその乗数を指定することによって自己アフィンなフラクタルのクラスを定めている。異方的なフラクタル場作成のために、まず、等方的な場の作成についての数学的な手続きを詳しく見てみることにする。

地層のある特性値の分布関数 $v(\underline{x}) \in \mathbb{R}^n$ を考え、等方場についてはこの $v(\underline{x})$ が次の式を満足するものとする。

$$\Gamma_v(\underline{h}) \equiv \langle |v(\underline{x}+\underline{h}) - v(\underline{x})|^2 \rangle \propto h^{2p}$$

但し、 $h = |\underline{h}|$

p ; Hurst係数、 $p \in (0, 1)$

$\langle \cdot \rangle$; 距離 h 離れた全ての2点間について平均をとる操作を示す。

この時、 v の増分 Δv は統計的平均として、次のべき乗則に従うものとなるため、統計的に自己アフィンなものであることが保証される。

$$\langle \Delta v(rh)^2 \rangle = r^{2p} \langle \Delta v(h)^2 \rangle$$

$v(\underline{x})$ のグラフは、 \mathbb{R}^{n+1} 上の曲面であり、トポロジカルな次元は n となるが、そのフラクタル次元 D_f は既に述べた様に、

$$D_f = n + 1 - p$$

となる。しかしながら、以下では、このフラクタル次元の代わりに、スケール則により直接関係したHurst係数 p を対象として議論を進めることとする。

スケール則のコントロールがより簡単に行えるように、 $v(\underline{x})$ のFourier変換を考える(既に述べた様に、コード内では空間差分に対応してFourier級数が用いられている)。なお、この操作は異方的な場においても同様である。

$a(\underline{k})$ を $v(\underline{x})$ のFourier変換、即ち、

$$\underline{v}(\underline{x}) = \int_{R^n} \exp(2 \pi i \underline{x} \cdot \underline{k}) \underline{a}(\underline{k}) \underline{dk}$$

とする。この時、スペクトル密度 $S(\underline{K})$ は、

$$S(\underline{K}) = | \underline{a}(\underline{k})^2 |$$

となる。

さらに、 \underline{h} を固定した場合、

$$\langle \underline{v}(\underline{h}+\underline{x}) \underline{v}(\underline{x}) \rangle = \int \int \int \underline{a}(\underline{k}_1) \underline{a}(\underline{k}_2) \exp[2 \pi i (\underline{k}_1 \cdot \underline{x} + \underline{k}_2 \cdot \underline{x} + \underline{k} \cdot \underline{h})] \underline{dk}_1 \underline{dk}_2 \underline{dx}$$

が成り立ち、この事から直ちに以下が導かれる。

$$\Gamma_v(\underline{h}) \propto \int_{R^n} S(\underline{k}) [1 - \exp(2 \pi i \underline{h} \cdot \underline{k})] \underline{dk}$$

これはKhintchin-Wienerの定理と呼ばれ、同様のものが離散的な操作 (Fourier 級数) についても成立する。

さて、等方場の問題においては、 $\underline{k} = | \underline{k} | > k_0$ において $S(\underline{K}) \sim k^{-(n+2p)}$ と指定して、単位ベクトル \underline{u} 及び \underline{n} によって $\underline{h} = h \underline{u}$ 、 $\underline{k} = k \underline{n}$ と表記すると、 $h \rightarrow 0$ において、

$$\Gamma_v(\underline{h}) \propto \int_{k_0}^{\infty} 1/k^{n+2p} \int_{S^n} [1 - \exp(2\pi i \underline{k} \cdot \underline{h} \cdot \underline{u} \cdot \underline{n})] d\underline{n} k^{n-1} dk$$

$$\propto \int_{k_0 h}^{\infty} 1/w^{n+2p} \int_{S^n} [1 - \exp(2\pi i \underline{w} \cdot \underline{u} \cdot \underline{n})] d\underline{n} dw h^{2p}$$

が成立する。ここで、 S の漸近的な挙動のみが問題となること、及び $h \rightarrow 0$ において $1 - \exp(2\pi i \underline{k} \cdot \underline{n})$ が 0 に一様収束することから、

$$\Gamma_v(\underline{h}) \propto h^{2p}, \quad (h \rightarrow 0)$$

が確認される。

以上の理論的背景に基づいて、AFFINITYは所定のスケール則を満足する様なフラクタル場を作成する。この際、 $S(\underline{k}) \sim k^{-(n+2p)}$ となる様にバイアスされた乱数によってFourier 級数を作成し、これを逆変換することによってフラクタル透水係数場が得られる。

3.1.2 異方的なフラクタル場の作成方法と作成例

3.1.1 において述べた数学的な取扱において、異方的なフラクタル場を表現するためには、バリオグラム、

$$\Gamma_v(\underline{h}) \equiv \langle |v(\underline{x}+\underline{h}) - v(\underline{x})|^2 \rangle$$

がベクトル \underline{h} の絶対値のみならず方向に依存する状況を考える必要がある。以下では、このための具体的な方法について検討した結果、及び考案された3つの方法によって異方的なフラクタル場を作成した例についてまとめる。

(1) 異方的な分散のコントロールによる手法

異方的な構造を作成するための最も簡単な方法は、スペクトル密度を規定する次の式、

$$S(\underline{k}) \sim k^{-(n+2p)}$$

を次の様に変更することである。

$$E[S(k_x, k_y)] \propto 1 / [k_x^2 + (\alpha k_y)^2]^{n/2+p}$$

この式を用いても、x、及びy方向についてのフラクタル次元は同一のままであるが、分散についてはy方向について α^2 を係数として変化することとなる。

図3.1.2 - 1にこの方法で作成した異方的なフラクタル場(フラクタル次元はいずれの方向についても2.7)の例を示す。図中で、(a)は完全に等方的な場であり、(b); $\alpha=0.75$ 、(c); $\alpha=0.5$ 、(d); $\alpha=0.25$ と次第に異方性が増している。

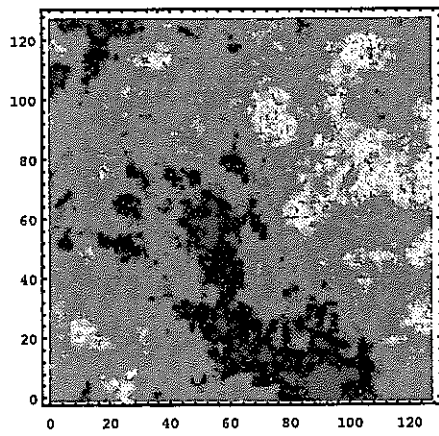
(2) 異方的なスペクトル挙動を用いた手法

この手法は、波数ベクトルの方向に対応してスペクトル密度の減衰挙動をコントロールするものである。つまり、 $\underline{n} = \underline{k} / |\underline{k}|$ として、

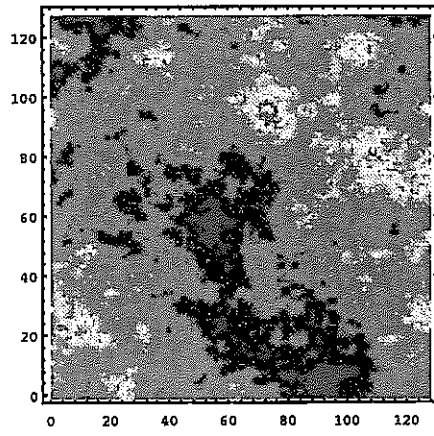
$$S(\underline{k}) \sim k^{-(n+2p(\underline{n}))}$$

という形でスペクトル密度を管理し、単位波数ベクトル \underline{n} が $\pm i$ 方向の場合 $p(\underline{n}) = p_1$ 、 $\pm j$ 方向の場合 $p(\underline{n}) = p_2$ と設定する。

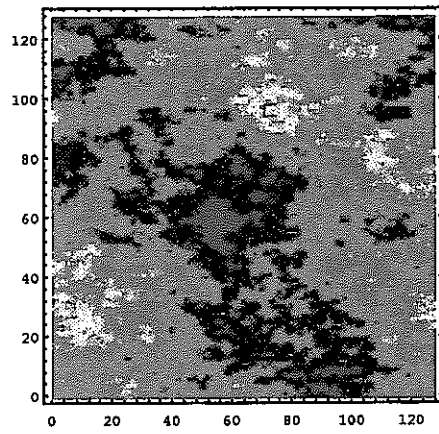
この設定により、バリオグラムに対する寄与は、前出の \underline{u} が \underline{n} と平行となる時に支配的となる。実際、



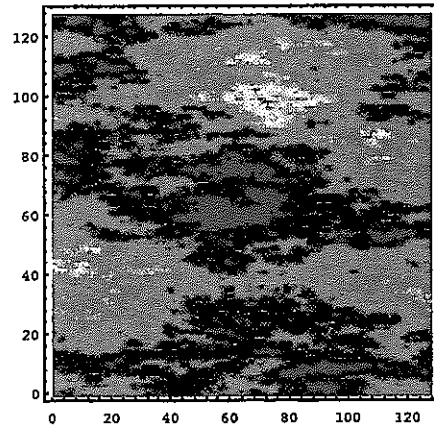
(a)



(b)



(c)



(d)

図 3. 1. 2-1 分散の異方化による非等方透水係数場の例

$$\Gamma_v(\underline{h}) \propto \int \int_{S^n} (h^{2p(n)} / w^{2p(n)+1}) \sin^2(w \underline{u} \cdot \underline{n} \pi) \underline{dn} \underline{dw}$$

が成り立つことから、 $h \rightarrow 0$ においては、明らかに $\underline{u} \cdot \underline{n} = 1$ の時に右辺の被積分関数が最大となる。

しかしながら、 \underline{u} と \underline{n} とが直行する ($\underline{u} \cdot \underline{n} = 0$) 場合を除いて、全ての方向の波数ベクトルの寄与は 0 ではない。従って、

$$\begin{aligned} p(n) &= p_1 && (\underline{u} \cdot \underline{i} > \underline{u} \cdot \underline{j}), \\ &= p_2 && (\underline{u} \cdot \underline{i} < \underline{u} \cdot \underline{j}). \end{aligned}$$

と設定しても、 \underline{j} 方向の \underline{h} についてのバリオグラムは h^{2p_1} という形の項の影響を多かれ少なかれ受けることとなる。つまり、この様な小さな h についてはバリオグラムの異方的なコントロールは厳密に行うことができず、結果として(作成される場はフラクタル次元及び分散の観点でまさに異方的ではあるが)、本来、より滑らかな不均質性を期待する軸についてのHurst 係数も低下してしまう(即ちフラクタル次元は増大する)。

図3.1.2 -2 にこの方法により作成された異方場の例を示す($p_1 = 0.3$, $p_2 = 0.7$)。作成された場について水平、垂直方向それぞれに対してバリオグラムのフィットを行った結果得られたHurst 係数は $p_1 = 0.32$, $p_2 = 0.41$ である。

(3) 接線のフラクタル特性をコントロールする手法

この方法は、 $n+1-p$ の次元を有する曲面が与えられることを想定して、その接線(フラクタル次元は $n-1$ から n の間にある)のフラクタル特性を調べるものである。しかしながら、曲面のHurst 係数と接線のHurst 係数の間の定量的な関係

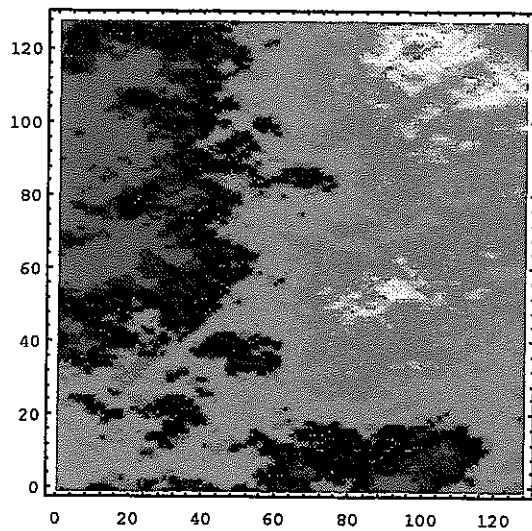
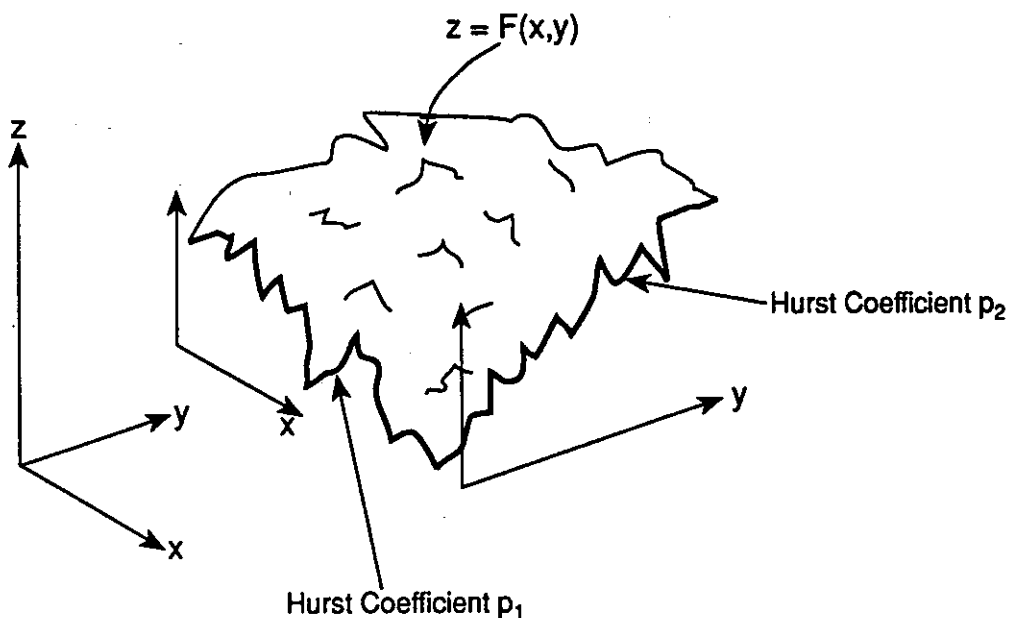


図3. 1. 2—2 スペクトル挙動の異方化による非等方透水係数場の例

についての理論は知られておらず、曲面のフラクタル特性が既知であっても接線のそれについては全く知ることができない。

上記と逆の問題は、しかしながら、より示唆的な内容を含んでいる。つまり、曲面全体としてのフラクタル特性が未知であるまま、接線についてのそれをコントロールすることである(下図参照)。サイトデータは垂直あるいは水平の坑道から得られるため、この操作は実際に取得可能なデータにより対応しているといえることができる。



接線のフラクタル特性管理の概念図

この手法は、次の様に数学的に展開することができる。

x 方向についてのHurst 係数 p_1 、y 方向についてのHurst 係数 p_2 を有する異方的なフラクタル場を作る場合には、これをx, yについて変数分離して、それぞれのフラクタル特性を満足するf, g をFourier 級数により作成し、

$$F(x, y) = f(x) g(y)$$

とすればよい。しかしながら、 F は変数分離可能なものに限られるため、比較的簡単な構造を示すものに限定されることとなる。そこで、上式の f 及び g を複数作成して($f_i(x)$; $i=1, \dots, m$ 及び $g_i(y)$; $i=1, \dots, m$)、これらの積の総和をとることにより、より複雑な曲面を作るという操作が必要となる。

$$F(x, y) = \sum_{i=1}^m f_i(x) g_i(y)$$

ここで、ある水平接線(あるいは垂直接線)を固定した場合、各 $g_i(y)$ (あるいは $f_i(x)$)の値は固定されることとなり、 F は g_i (あるいは f_i)の線型和となる。1. に述べた様に、同じフラクタル次元を有する関数群の線型和もまた同じフラクタル次元を示すことから、各水平(垂直)接線は所定の同じフラクタル次元をもつものとなる。

この手法によって作成された異方的なフラクタル場の例($p_1 = 0.3$, $p_2 = 0.7$)を図3.1.2 -3 に示す。

(4) まとめ

以上、それぞれに特性の異なる3つの異方的フラクタル場作成手法を考案した。これらの手法の適性は解析の目的及び対象とするサイトの特性に依存するため、その優劣を一般的に議論することは不適當である。

最も簡便に異方的なフラクタル場を作成し得る手法は異方的な分散のコントロールを行うことである。しかしながら、不均質場の異方性がフラクタル次元の方向依存性をも含むものである場合にはこの手法を適用することはできず、異邦的なスペクトル挙動あるいは接線のフラクタル特性のコントロールを行うことが必要となる。

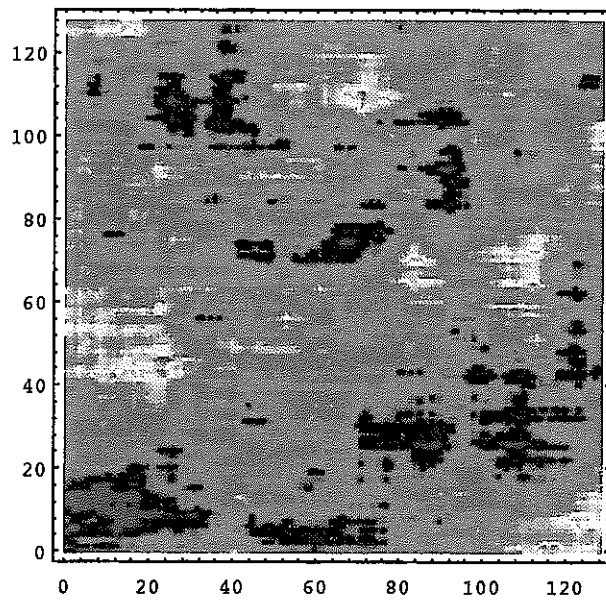


図 3. 1. 2—3 接線のフラクタル特性管理による非等方透水係数場の例

いずれにしても、それぞれの手法が長所と短所を有しているものである以上、今後更に検討を加えて、実際のサイトデータの示す異方性の詳細を明らかにすること、及び各手法の短所が解析上どの程度クリティカルとなるかについて流動解析あるいは物質移動解析による感度分析を試みる必要がある。

3.2 不均質多孔質媒体中物質移動試験結果の解析

昨年度の研究で述べた様に、MACRO-AFFINITYコードの検証は、以下の二つの項目に分けて実施することが可能であり、また望ましくもある。

- (1) 透水量係数場の空間的不均質性に対する統計的自己アフィンモデルの適合性の検証
- (2) 与えられた不均質透水係数場における、水理及び溶質移動プロセスモデルの検証

まず、(1)については、最も直接的な検証方法は、透水量係数の実測値に対して、以下のフラクタルスケーリング則、

$$\gamma \phi(h) = \langle |\Psi(x) - \Psi(x+h)|^2 \rangle = a h^{2P}$$

が成立するか否かを調べることである。

また、(2)については、本来(1)の検証項目とは独立した形での検証を行うことが望ましい。具体的には、統計的自己アフィン性を満足する様な透水量係数分布を示す媒体を人工的に設定し、これを用いた溶質移動試験結果とMACRO-AFFINITYによる解析結果を比較するという方法により、場のモデルについての不確実性を最小化した条件でプロセスモデルに的を絞った検証を行うことが可能となる。この点は、場の特性自体に不明点が残らざるを得ない自然系での溶質移動試験に対する、一つの大きな利点と考えることができる。

本年度も以上の方針に従い、上記の2つの検証課題に対して、東濃鉾山周辺の実測データ及び動燃事業団殿にて実施中の不均質多孔質媒体中溶質移動試験についての検討・解析を行った。

本節では、これらのうち不均質多孔質媒体中物質移動試験についての解析と実験結果との比較について以下にまとめることとする。

3.2.1 試験条件の詳細

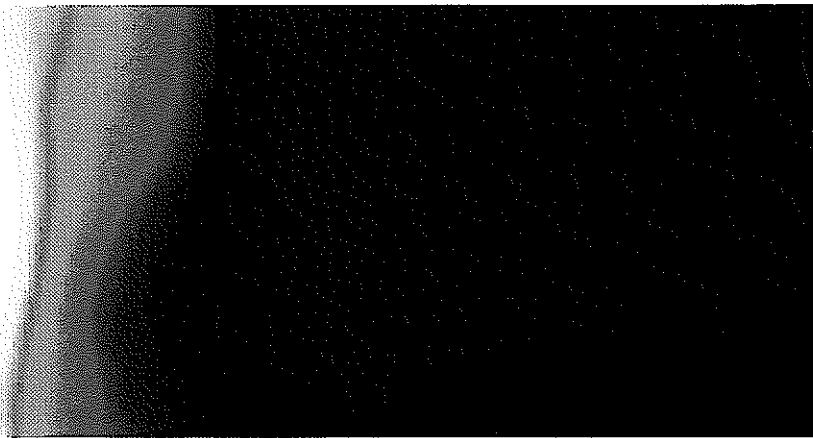
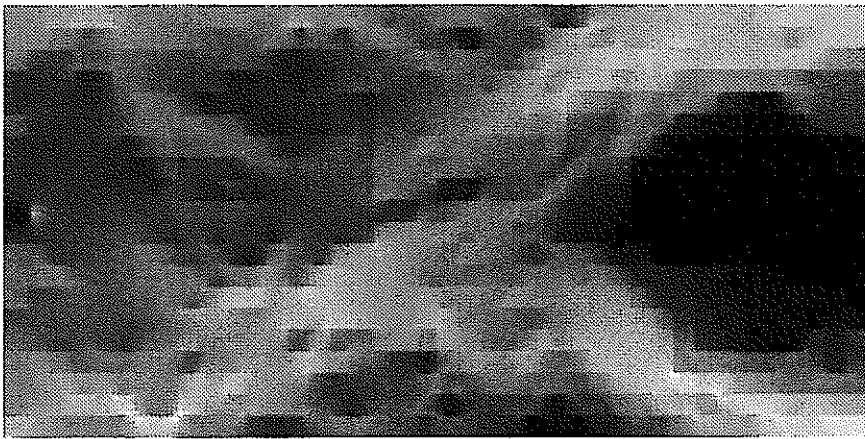
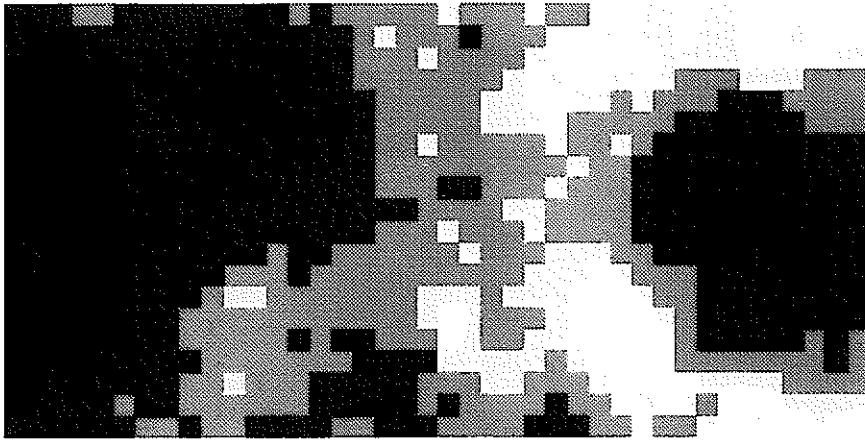
不均質多孔質媒体中物質移動試験装置は、供試体中の二点間の透水係数の自己相関関数を1. に述べた自己アフィン性を満足する様に設定することによって、所定のフラクタルスケーリング則が成り立つ様な不均質多孔質媒体が作製される。フラクタルスケーリング則は、フローセルの大きさ（1 m×2 m）及びガラスビーズブロックの大きさ（5 cm四方）に対応して、数cm～1 mオーダーに於いて有効となる様に選定される。

現在実施されている試験に於いては、昨年度本研究で実施した種々の予備解析のうち、標準ケースを選定し、対応するフラクタル透水係数場を作製してトレーサ移行挙動の調査が行われている。標準ケースの設定条件を表3.2.1-1 に、対応する予備解析の結果を図3.2.1-1 に示す。

表3.2.1-1 標準ケースの設定条件

| ブロックサイズ | 透水係数 (m/s) | トレーサ注入時間 (hr) | トレーサ注入圧 (hr) |
|-------------|---|---------------|--------------|
| 5 cm × 5 cm | 9.1 × 10 ⁻⁵ 1.9 × 10 ⁻⁴ | 0.1 | 0.5 |
| | 3.3 × 10 ⁻⁴ 1.2 × 10 ⁻³ | | |
| | 2.5 × 10 ⁻³ 4.3 × 10 ⁻³ | | |

昨年度実施した予備解析は、試験装置製作に先立って行われたもので、試験に際して不可避の現実的要因を考慮しない理想的な体系に対応している。本年度の研究は、実の製作と予備的試験の開始によって明らかとなった現実的諸要因を考慮してより詳細な解析を実施する。このため、まず、以下に試験条件の詳細についてまとめることとする。



The original MACRO-2D simulations Top: conductivity field;
Centre: Darcy flow field; Bottom: pressure field.

図 3. 2. 1—1 前回予備解析の結果 (標準ケース)

(1) 多孔質媒体槽

多孔質媒体槽の主要仕様は、下記の通りである。槽内は、水平状態で5 cm×5 cmの格子状にガラスビーズが充填される。背面には導電計及び圧力プローブ挿入用の貫通口が設けられ、この他に、トレーサ注入管貫通口とダイポール／モノポール用試験口が全面と背面とに開けられている。

(主要仕様)

① 槽本体形状寸法 約2400mmW×1300mmH×100mmD

② 材質

| | |
|--------------|-----------------------|
| トレーサ接液部 | SUS316L |
| その他の部分 | SUS304 |
| ディフュージョンプレート | SUS316L (注 排水側共交換可能性) |
| ガラスビーズ隔離板 | 焼結金属製 |
| チャネリング防止板 | 波型CRゴム接着張り (内側) |
| 多孔質媒体 | ガラスビーズ (充填量約200ℓ) |

③ エアバイブレータ 加振力：最大約220kg×6kg/cm²

以上の仕様のうち、予備解析との差異をもたらすものは、チャネリング防止板とガラスビーズ隔離板の存在である。

チャネリング防止板は、多孔質媒体と壁面との間の空隙が水の選択的流路となることを避けるために設けられているが、この存在により、実際にガラスビーズ充填部分の高さは930mmとなる。

また、ガラスビーズ隔離板充填されたガラスビーズを支持し、均一な流水場を担保するために入口及び出口部に設けられるものであるが、細孔の焼結金属板を用いるために、この箇所での圧損が生じ、ガラスビーズ充填にかかる差圧は低下することとなる。

試験開始時点で入口及び出口部の焼結金属板に於ける圧力損失は、流量1.5 ℓ/minに於いてそれぞれ96mm及び32mmであった。しかし、その後の大きなものとなっている。この点については、差圧536mm に於いて通水量0.15 ℓ/minという現状の特性から逆算して圧力損失を推定するものとする(3.2.2参照)。

(2) 不均質供試体

① ガラスビーズの充填方法

不均質供試体の作成は、所定の位置の粒径のガラスビーズを充填することによって行われる。ビーズの充填は、多孔質媒体槽を水平状態とし、仕切り板を用いて領域を5 cm四方の格子状に仮分割した状態で行われる。この際できるだけ理想系（細密充填）に近い状態を確保するために、常時裏面からバイブレータをかけながら充填を行う。また、充填終了後は仕切り板をはずして槽を垂直状態に戻すが、この操作によりビーズ層にゆるみができるため、再びバイブレータをかけ、それ以上沈下が生じないところまで十分加振する。この状態に於いてもビーズの充填は完全ではないため、長時間静置すれば自然沈下が生じてしまう。そこで、更にバイブレータをかけ、生ずる隙間を水封フランジの調整により解消する操作を2～3日間繰り返す。

② ガラスビーズブロックの透水係数

予備解析で想定した透水係数は、ビーズ粒径との間の関係式から推定されたものであり、本解析では実測値に換える必要がある。カラム試験によって測定したビーズブロックの透水係数値を表3.2.1-2にまとめる。

表3.2.1-2 透水係数実測値

| 平均粒径(mm) | 透水係数 (予備解析m/s) | 透水係数 (実測値m/s) |
|----------|----------------------|-----------------------|
| 0.115 | 9.1×10^{-5} | 1.16×10^{-4} |
| 0.163 | 1.9×10^{-4} | 2.26×10^{-4} |
| 0.214 | 3.3×10^{-4} | 3.68×10^{-4} |
| 0.425 | 1.2×10^{-3} | 1.30×10^{-3} |
| 0.605 | 2.5×10^{-3} | 2.54×10^{-3} |
| 0.850 | 4.3×10^{-3} | 4.72×10^{-3} |

③ ガラスビーズ粒径分析

ガラスビーズの粒径分析は、原則として、予備解析の標準ケースに対応したものと設定したが、チャンネリングを避けるために上端と下端には最小粒径のビーズを充填することとした、また、入口部の第一列についても均一な流れ場を確保するために最小粒径のものを用いた。この結果、解析対象となる領域対象となる領域は、 38×16 ブロックに縮小されることとなった。(図 3.2.2-2)

(3) 注排水系及びトレーサ注入系

注排水系は、多孔質媒体槽内の通水を一定の条件で継続するものであり、多孔質媒体槽をはさんで設定した注水槽、排水槽に を設けることにより、水頭差 (ΔH) を180mm, 300mm, 400mm, 500mm, 600mm, 700mm, あるいは800mm に設定・保持することができる。

(注排水系主要仕様)

① 注水槽

形状寸法 150mmw ×1000mmH ×100mmD

材質 SUS304

② 排水槽

形状寸法 150mmw ×1000mmH ×100mmD

材質 SUS304

③ 注水タンク 1m³, PVC

④ 排水タンク 0.3m³, PVC

⑤ 注水ポンプ 20 ℓ/min

トレーサ注入系は多孔質媒体槽内でトレーサを点注入するものである。トレーサ注入と注入の切替えは瞬時に可能であり、注入位置としては上流側のい5点まで指定可能である。また、注入圧は注排水系と同様の機構により可変である。

(トレーサ注入系主要仕様)

- ① トレーサタンク 1m³, PVC
- ② トレーサ注入ポンプ 300cm³/min
- ③ 流量調節バルブ ニードルバクブ
- ④ 流量計 測定範囲 0~200 cm³/min
- ⑤ トレーサ注入管 二重管、スリット幅5mm 及び10mm
- ⑥ トレーサ 食塩水あるいは染料 (赤色102号)

(4) 計器類

① 導電計

センサーA 測定範囲;NaCl 濃度0~1.0%

33本

センサーB 測定範囲;NaCl 濃度0~0.1%

70本

② 圧力計

測定範囲 100 ~2000mmH₂O

3.2.2 現実的試験条件を考慮した再解析

本節では、3.2.1 に於いて述べたより現実的な条件を考慮して行った再解析の内容とその結果についてまとめる。前回の解析と比較した場合の第一の主要な変更点は、多孔質媒体槽の上流及び下流に置かれた焼結金属板の存在であり、第二に変更点は多孔質媒体自体の透水係数に変化である。より具体的には、供試体の上、下及び上流側の端のは最も透水係数の小さい（粒系の小さい）ガラスビーズのブロック列が配されており、また、各ブロックの透水係数自体も前回の解析に用いた数値とは異なっている。

この様な変更に対応して、実験結果は次の2つの点に於いて前回の解析結果とは異なる特徴を示している。まず第一に、トレーサ注入孔近傍に於いて高速流路が形成され、トレーサは解析とは異なりこの流路に沿って非分散的に移動している点、そして第二に、実験時間の経過に従い同じ差圧を与えた場合の槽を横切る総流量が0.5 l/分から0.15 l/分に低下した点である。

本節の解析の目的は、実験で観察された上記の傾向をMACRO-AFFINITYを用いた計算に取り込み、対応する実際の系の流動と物質移動の特性を定性的に明らかにすりことである。現在の状況では、水中の不純物による目詰まりのために焼結金属板の透水係数値を持定することは極めて困難であり、このため、本解析に於いてはこれは可変パラメータとして扱われた。この効果に加えて、ガラスビーズブロック自体も目詰まりを生じている可能性があり、この事も前述した総流量の位下に寄与していることが考えられる。この点についても、本解析では簡単なモデルを用いてその影響の傾向と程度を検討した。

また最後に、これらの解析結果に基づいて今後更に実験あるいは解析の課題として検討を要する事項を整理した。

(1) 解析条件の変更

まず、実験条件の変更に伴い、透水係数場自体を次の様に改訂した。

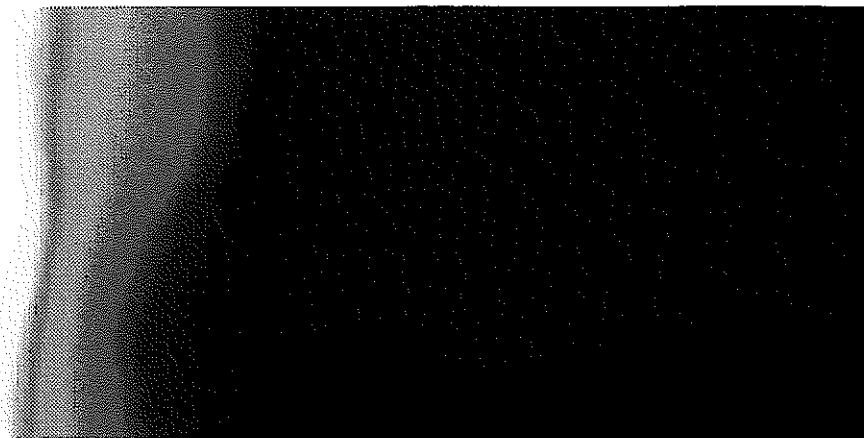
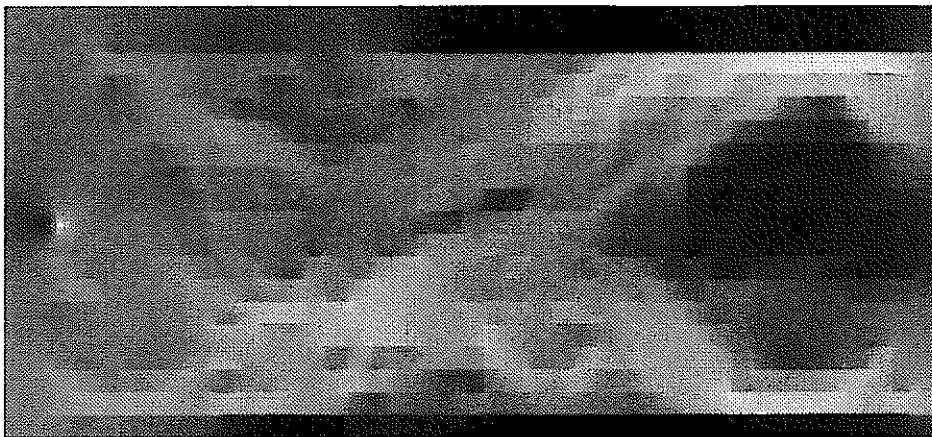
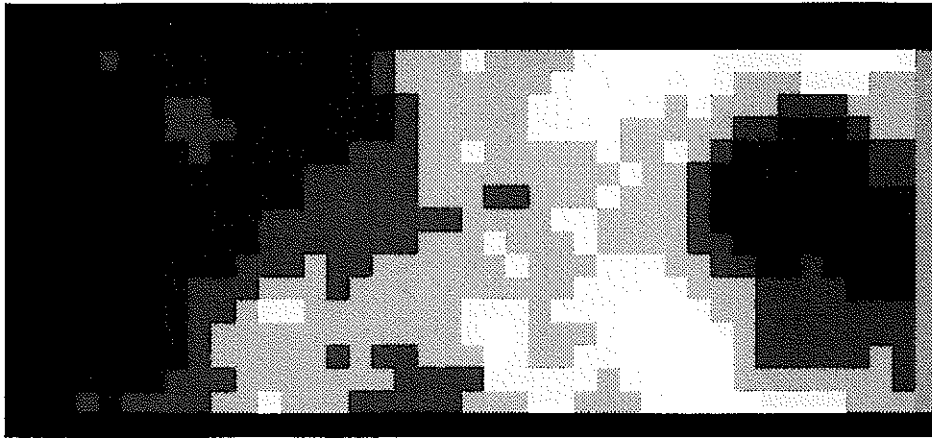
焼結金属板の初期の透水係数／厚さ比 (K/I) は3.2.1 で述べた圧損の測定結果から $2.78 \times 10^{-3}/\text{sec}$ (上流側) 及び $8.68 \times 10^{-3}/\text{sec}$ (下流側) とそれぞれ推定される。この焼結金属板が流動に及ぼす影響を定量化するために。国会の解析では供試体の上流及び下流端に 5 cm の透水抵抗を設定した (透水係数値は $0.05 \times K/I$ とすることによって所定の K/I 値が満足される。更に、水中の不純物による目詰まりの効果を考慮して、上記の初期 K/I 値を上限として種々の数値を用いたパラメトリックサーベイを行った。

更に、供試体上流側及び、下端に置かれた最小透水係数のガラスビーズブロック列についても、これを透水係数場の設定に於いて考慮することとした、この結果、フラクタル透水係数場が再現される正味の領域は、前回の解析よりも小さい 38×16 ブロック分となった。

以上の変更を行った結果得られる新たな 41×29 ブロック透水係数場を図3.2.2-1 に示す。同図に示されているダルシー流速場は、ガラスビーズブロックをそれぞれ更に 4 分割した 164×80 セルから成るグリッド上で流動問題を解いた結果である。ここで、焼結金属板の K/I 値は上述した初期条件を仮定し、上下流間の水頭差 (焼結金属板を含めて) は 0.536m としている。なお、ガラスビーズブロックの透水係数値が見直されたことに対応して、図3.2.2-1 中のカラースケールは以下の透水係数値に変更されている。

| | | |
|----|-------|-----------------------------|
| 黒 | | 1.16×10^{-4} (m/s) |
| 赤 | | 2.26×10^{-4} (m/s) |
| 青 | | 3.68×10^{-4} (m/s) |
| 緑 | | 1.30×10^{-3} (m/s) |
| 水色 | | 2.54×10^{-3} (m/s) |
| 白 | | 4.72×10^{-3} (m/s) |

(2) 多孔質媒体槽の変更による流動及び物質移動状況の変化



Top: MACRO-2D conductivity field; Centre: MACRO-2D flow field; Bottom: MACRO-2D pressure field. The colour scale for these fields is explained in the text.

図 3. 2. 2-1 現実的な実験条件を考慮して改訂された解析結果

ここでは、焼結金属板のK/I 比を種々に変化させたパラメトリックサーベイの結果についてまとめる。既に述べた様に槽を通過する総流量が実験開始時の0.5 ℓ/minから0.15 ℓ/minに迄減少した理由の一つとして、入口焼結金属板の水中不純物による目詰まりの影響が考えられる。この観点から流量減少を説明することを目的として16ケースの解析を行ない、それぞれに場合の総流量を計算した。結果を表3.2.2-1 にまとめる。

計算結果から次の2つの点が指摘できる。

- ・ 圧損測定から推定した焼結金属板のK/I 比を用いた解析ケースでは、総流量0.5698 ℓ/minという結果が得られており、これは初期の総流量実測値0.5 ℓ/minと整合的である。
- ・ 入口部焼結金属板のK/I 比を3析以上低下させた場合でも、解析であられる総流量は0.2977 ℓ/minと現状の実測値を表現することはできない。つまり、焼結金属板の目詰まりだけで、上述した流量減少を説明することは難しい。

更に、物質移動解析を実施した結果、次の様な点が明らかになった。

焼結金属板のK/I 比として初期値を用いた解析結果に於いて、DIVINITYによるパーティクルトラッキングは明らかに高速流路の存在を示している。(図3.2.2-2)このため、パーティクルは前回の解析とは異なり、非分散的に移行している。この効果が、供試体の変更によるものであるかを見るために、焼結金属板のみを前回解析と同じ供試体に加えて解析を行った。同図からわかる様に、高速流路の影響はむしろこの場合の方が顕著である。



The results of particle tracking simulation of transport in the MACRO-2D flow-bed. Top: Tracer in the modified MACRO-2D conductivity field with k/τ ratios of 2.78×10^{-3} and $8.68 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$; Bottom: Tracer in the original MACRO-2D conductivity field.

図 3. 2. 2-2 焼結金属板の目づまりを考慮した場合のパーティクル挙動

表3.2.2-1 焼結金属板の目詰まりを仮定した、流動解析の結果

| 上流側 $K\gamma$ (S^{-1}) | 下流側 $K\gamma$ (S^{-1}) | 総流量 (ℓ/min) |
|----------------------------|----------------------------|--------------------|
| 2.78×10^{-3} | 8.68×10^{-3} | 0.5698 |
| 2.0×10^{-3} | 8.68×10^{-3} | 0.5617 |
| 1.0×10^{-3} | 8.68×10^{-3} | 0.5391 |
| 5.0×10^{-4} | 8.68×10^{-3} | 0.5105 |
| 1.0×10^{-4} | 8.68×10^{-3} | 0.4506 |
| 1.0×10^{-5} | 8.68×10^{-3} | 0.4227 |
| 1.0×10^{-6} | 8.68×10^{-3} | 0.4193 |
| 1.0×10^{-7} | 8.68×10^{-3} | 0.4189 |
| 1.0×10^{-4} | 1.0×10^{-3} | 0.3806 |
| 1.0×10^{-5} | 1.0×10^{-3} | 0.3837 |
| 1.0×10^{-6} | 1.0×10^{-3} | 0.3809 |
| 1.0×10^{-7} | 1.0×10^{-3} | 0.3806 |
| 1.0×10^{-4} | 1.0×10^{-4} | 0.3134 |
| 1.0×10^{-5} | 1.0×10^{-4} | 0.2996 |
| 1.0×10^{-6} | 1.0×10^{-4} | 0.2979 |
| 1.0×10^{-7} | 1.0×10^{-4} | 0.2977 |

この様な高速流路形成の最大の要因は、槽の変更により焼結金属板の圧損と第一列での圧損が生じ、トレーサ注入部での注入圧力と周囲の水圧との差が増したことを考えられる。

(3) ガラスビーズブロックの目詰まりによる影響

(2)に述べた結果は、トレーサ挙動の傾向については実験結果と整合的なものであったが、総流量については実測値を説明することができなかった。そこで、ここでは、一つの代替的な現象理解として、焼結金属板に加えてガラスビーズブロック自体にも目詰まりより透水係数低下が生じていることを仮定し、追加解析を行った。実験途中で槽内にコケの成長等が見られたことを考えれば、この仮定も一つの可能性として考え得るものである。

この様なモデル化を行うに当たって、問題となることは目詰まりによるガラスビーズブロックの透水係数変化をどの様に定量化するかという点である。勿論、各ブロックの透水係数を一様に30%程度にまで低下させれば実験で測定された総流量を説明することは現実的に極めて考えにくい。ここでの解析は、より合理的な仮定を見出し、流量低下を定量的に説明することである。

上記に代わるモデル化の仮定として、各ブロックの空隙径が不純物の付着によって一様に減少することを考える。この際、ガラスビーズ径と空隙径との間には線型の対応付けがなされることから、ビーズ径と透水係数との間の関係式（実測値に対応する回帰式）、

$$K r = 2433.7 r^{1.8565}$$

を用いて結果として生じる透水係数の変化を計算する。この式に於ける右辺の r の指数が1より大であることから、目詰まりによる透水係数の減少は、小さいガラスビーズを用いたブロックにおいてより顕著に生じることとなる。表3.2.2-2 に、0.02mm, 0.05mm, 0.06mm, 及び0.07mmの空隙径減少が生じた場合の買うブロックの透水係数値の変化をまとめる。

この様なガラスビーズブロックの目詰まりを考えて、(2)の焼結金属板の目詰まり（上流側のみ、下流側については初期値で固定）を加えた種々の流動解析を行った。結果を表3.2.2-3 に示す。同表から明らかな通り、0.07mmの空隙径減少を考えた場合、焼結金属板のK/I 比低下が現実的な範囲内で実測値に近い総流量が得られる。

表3.2.2-2 一様な空隙径減少を考慮した場合のガラスビーズブロック透水係数変化

| 初期値 | 減少0.02mm | 減少0.02mm | 減少0.02mm | 減少0.02mm |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 1.16×10^{-4} | 7.97×10^{-5} | 3.87×10^{-5} | 2.81×10^{-5} | 1.90×10^{-5} |
| 2.26×10^{-4} | 1.77×10^{-4} | 1.14×10^{-4} | 9.64×10^{-5} | 7.97×10^{-5} |
| 3.68×10^{-4} | 3.06×10^{-4} | 2.23×10^{-4} | 1.98×10^{-4} | 1.75×10^{-5} |
| 1.30×10^{-3} | 1.18×10^{-3} | 1.02×10^{-3} | 9.74×10^{-4} | 9.24×10^{-5} |
| 2.54×10^{-3} | 2.39×10^{-3} | 2.16×10^{-3} | 2.09×10^{-3} | 2.02×10^{-5} |
| 4.72×10^{-3} | 4.52×10^{-3} | 4.21×10^{-3} | 4.11×10^{-3} | 4.02×10^{-5} |

表3.2.2-3 一様空隙減少を仮定した場合の流動解析結果

| input Kr(s ⁻¹) | bead size reduction(mm) | FLUX (litre/min) |
|----------------------------|-------------------------|------------------|
| 2.78×10 ⁻³ | 0.02 | 0.4463 |
| 2.0×10 ⁻³ | 0.02 | 0.4408 |
| 1.0×10 ⁻³ | 0.02 | 0.4247 |
| 5.0×10 ⁻⁴ | 0.02 | 0.4025 |
| 2.78×10 ⁻³ | 0.05 | 0.3134 |
| 2.0×10 ⁻³ | 0.05 | 0.2996 |
| 1.0×10 ⁻³ | 0.05 | 0.2979 |
| 5.0×10 ⁻⁴ | 0.05 | 0.2977 |
| 2.78×10 ⁻³ | 0.06 | 0.2271 |
| 2.0×10 ⁻³ | 0.06 | 0.2253 |
| 1.0×10 ⁻³ | 0.06 | 0.2195 |
| 5.0×10 ⁻⁴ | 0.06 | 0.2104 |
| 2.78×10 ⁻³ | 0.07 | 0.1705 |
| 2.0×10 ⁻³ | 0.07 | 0.1694 |
| 1.0×10 ⁻³ | 0.07 | 0.1658 |
| 5.0×10 ⁻⁴ | 0.07 | 0.1599 |
| 5.0×10 ⁻⁴ | 0.07* | 0.1721 |

*トレーサ注入部近傍の高速流路では目詰まりが生じないとしたケース

図3.2.2-3(上) に上流側焼結果金属板K/I 比 2.78×10^{-3} /S、空隙径減少0.07 mmのケースについてのパーティクルトラッキングの結果を示す。このケースでは、総流量は実測値に最も近い値を示している。ことがわかる。これは、トレーサ注入圧とその周囲の圧力との差はより大きくなっているが、これにも増してガラスビーズ自体の透水係数が減少していることに伴う偏向流の抑制効果が現れているためと考えられる。

上記に対して代替的モデルとなるもう一つの考え方は、不純物の付着等による空隙径の減少に流速依存性があり、高流速域では、低流速域には空隙径が減少しないと仮定することである。そこで、最も高流速となるトレーサ注入口から低圧部へのショートカット部分がチャンネルとして働くことより、パーティクル挙動はより非分散性のものとなっている。

以上の解析から、ガラスビーズブロック自体の目詰まりによる透水係数の減少は、実験で観察された総流量の低下を説明し得るものであることがわかった。また、この際、透水係数の全体的な低下を仮定すると、高速領域では目詰



The results of particle tracking simulation of transport in the MACRO-2D flow-bed with modified conductivities corresponding to a 0.07 mm reduction in bead size. Top: bead size reduction in all grid blocks; Bottom: bead size reduction in all grid blocks except in a 5×10 cm region around the tracer injection point.

図3. 2. 2-3 ガラスビーズの目づまりを考慮した場合のパーティクル挙動

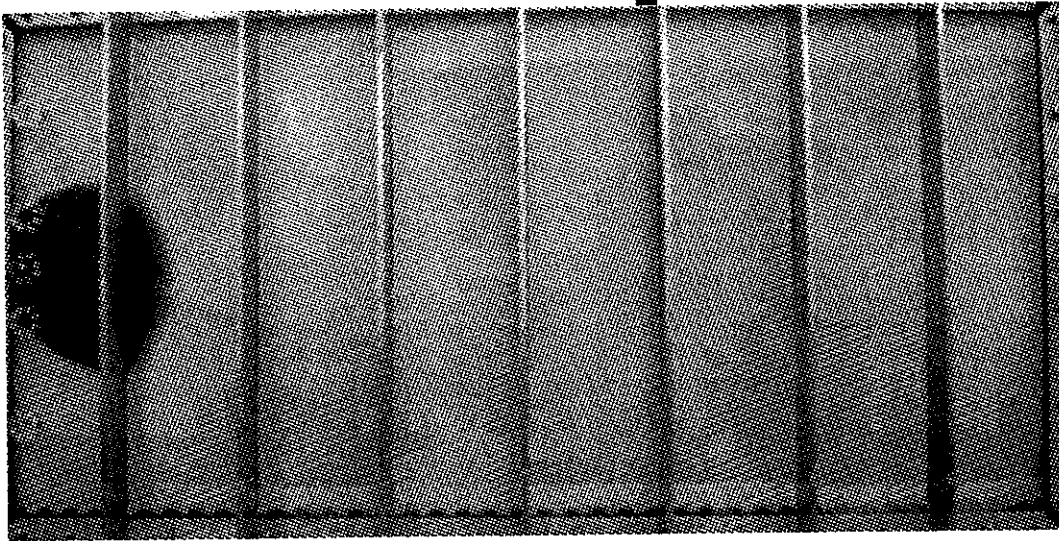
まりが生じにくいことを考慮することより、総流量については実測値から大きく異ならないまま、実験で見られたパーティクルの非分散的挙動を再現することが可能である。

(4) トレーサ注入圧変更後の解析と実験結果との比較

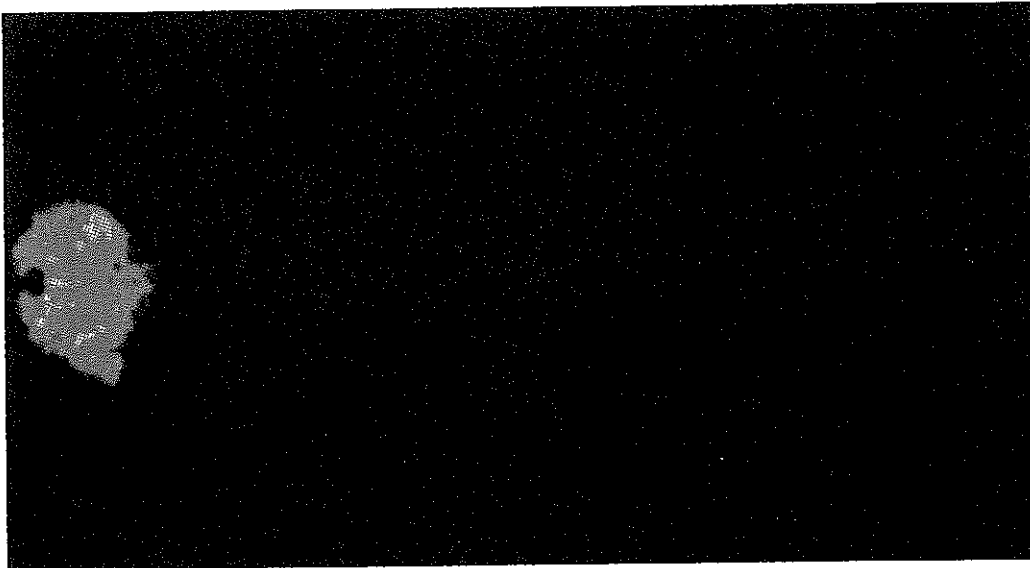
(2)に述べた様に、ガラスビーズブロックの目詰まりがトレーサの非分散的な挙動の原因として考えられたが、(3)の結果これは総流量の減少は説明し得るものの、分散が小さいことをこの要因のみで説明することは困難であることがわかった。そこで次にトレーサ注入圧を種々に変化させた解析を行い、それぞれの場合に分散挙動がどの様に変化するかを調べた。この結果、むしろ注入圧が高い方が分散効果が大きくなることがわかった。これは、トレーサ注入部の圧力が周囲の全てのセルの圧力よりも大きくなるため、トレーサ注入方向が等方的になるためと考えられる。

以上の検討を踏まえトレーサ注入圧を上昇(0.6m)した実験を再度行うと共に、これと対応する解析((1)~(3)に述べた条件変更を全て行ったもの)との比較を行った。結果を図3.2.2-4に示す。図から明らかな様に、実験で観察されたトレーサ挙動における分散効果は増大し、また、解析結果とも各時刻で良い一致を示している。

MACRO-2D Experiment



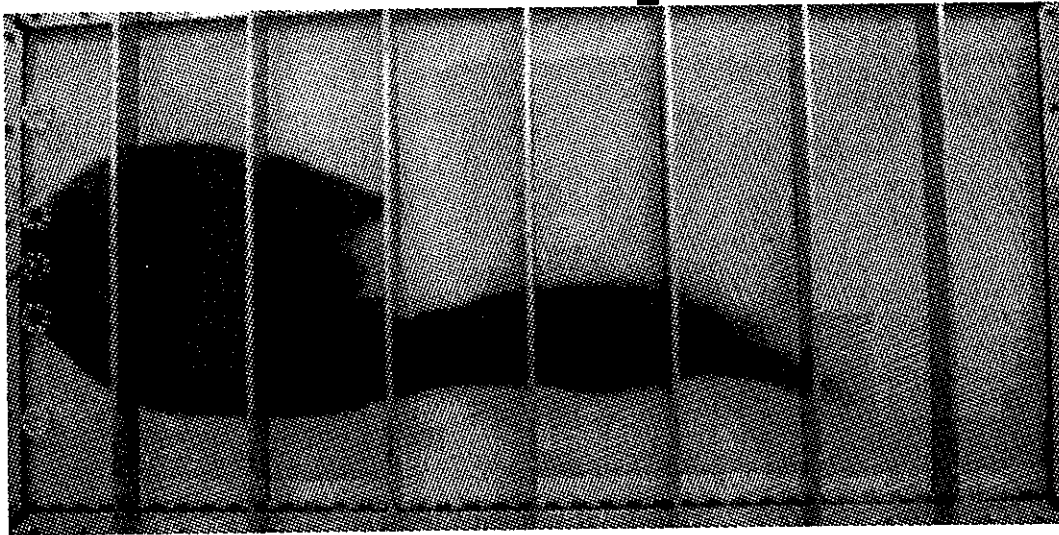
MACRO-AFFINITY Simulation



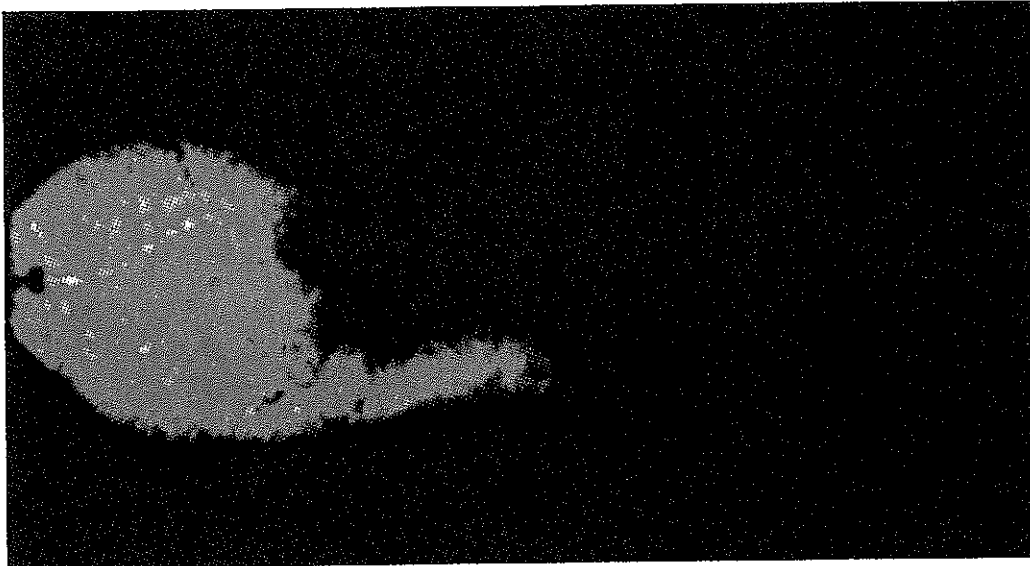
Time = 0.5 h

図 3. 2. 2 - 4 (1) トレーサ注入圧変更後の試験結果と解析結果との比較

MACRO-2D Experiment



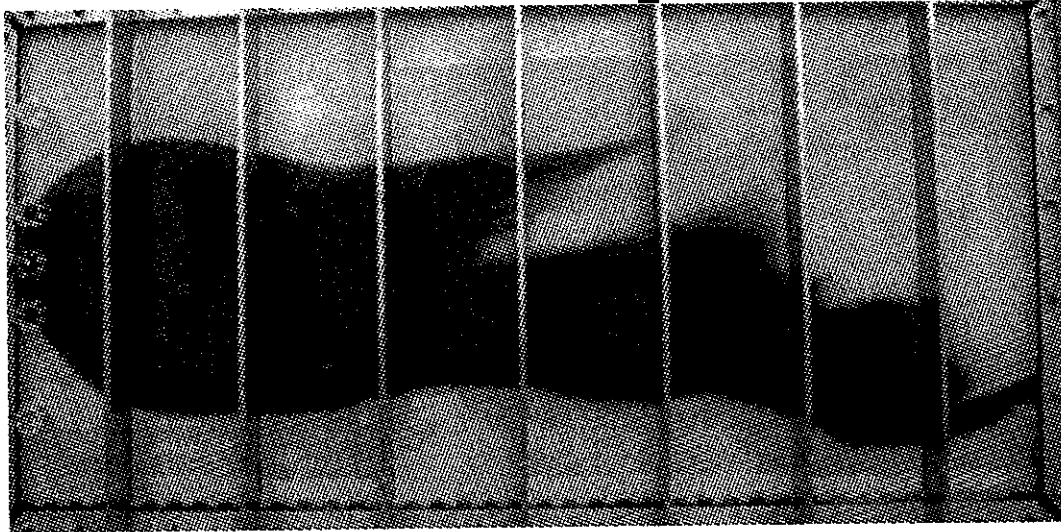
MACRO-AFFINITY Simulation



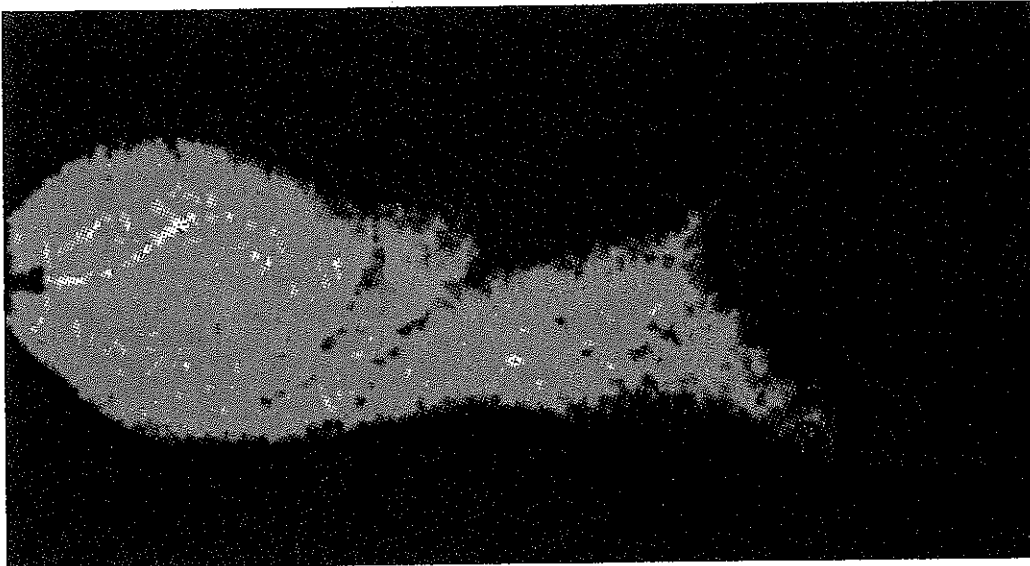
Time = 4.5 h

図3.2.2 - 4(2) トレーサ注入圧変更後の試験結果と解析結果との比較

MACRO-2D Experiment



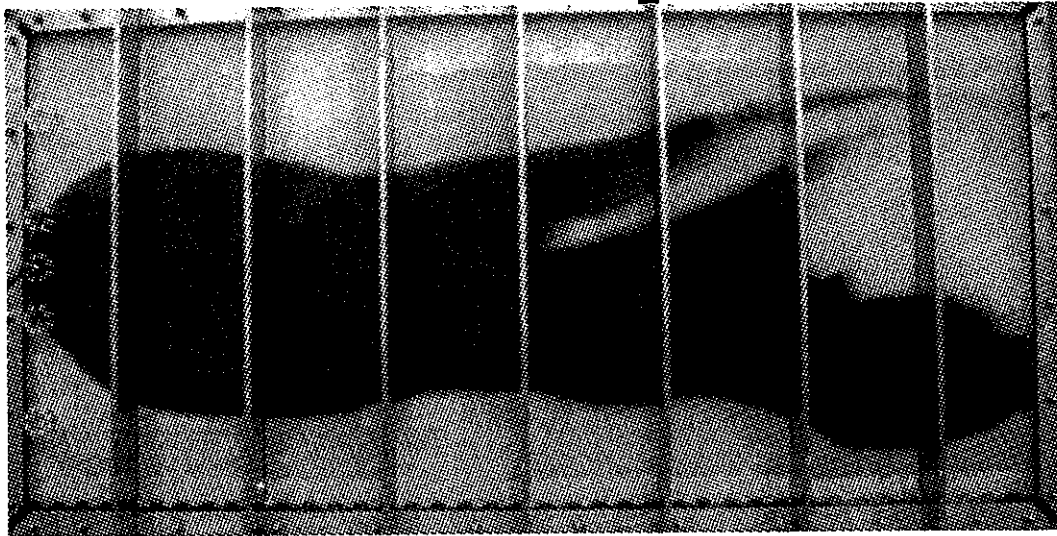
MACRO-AFFINITY Simulation



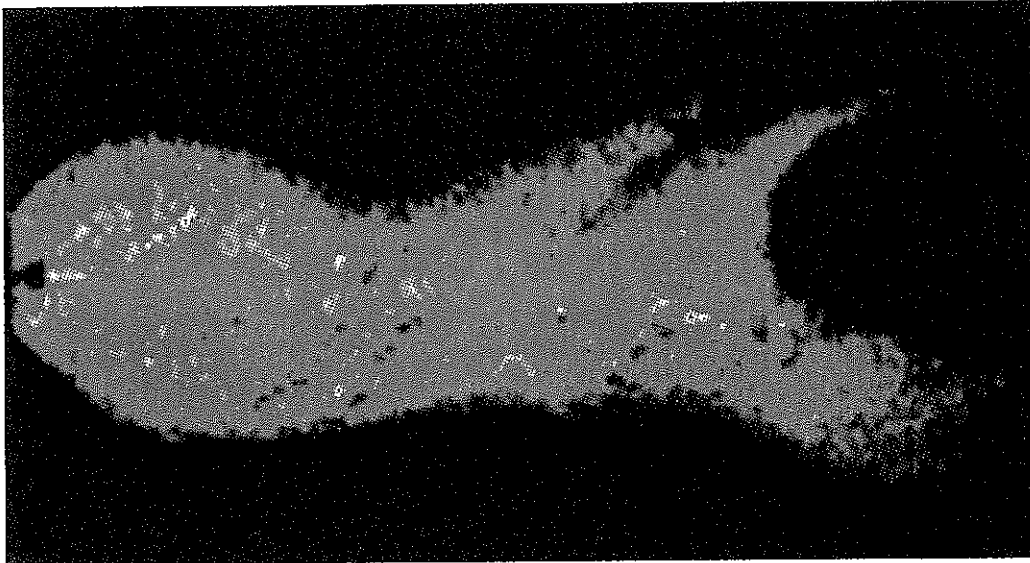
Time = 8.5 h

図 3.2.2 - 4 (3) トレーサ注入圧変更後の試験結果と解析結果との比較

MACRO-2D Experiment



MACRO-AFFINITY Simulation



Time = 12.5 h

図3.2.2-4(4) トレーサ注入圧変更後の試験結果と解析結果との比較

4. 天然バリア中核種移行解析のための解析手法としてのAFFINITYについての検討

昨年度の研究に於いて、AFFINITYを中核とした天然バリア性能評価の体系を提案すると共に、この体系を用いて岩体中の不均質場評価モデルの妥当性を明らかにするという研究の方向性を検討した。

AFFINITYを中核とした天然バリア性能評価の体系は、以下の三つの主要部分からなる。

(図4-1参照)

(1) フロントエンド

地質環境調査において、各地質・岩体についてのフラクタルスケーリング則を定量化する段階。

(2) 中核部

MACRO-AFFINITYを用いて、不均質透水係数場の統計的自己アファインモデルのrealization を発生し、対応する水理・物質移動問題を解く段階。

(3) バックエンド

MACRO-AFFINITYの出力を簡単化し、人工バリアモデルとの結合等、全体システム性能評価のフレームワークでの利用を可能とする段階。

本年度は、昨年度概略の検討を加えた上記(1)～(3)のそれぞれについて、より具体的な検討、解析を行った。結果を以下にまとめる。

4.1 実験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

4.1.1 東濃サイトの透水係数データについての解析

昨年度、透水係数データセットのうちTH-3こうについてのフラクタルスケーリング則の適合性を確認した。本年度は、他のボーリング孔も含め、各地点のデータがサイト全体として整合的にフラクタルモデルにより表現されるか否かという点を主眼として検討を行った。

(1) 東濃鉱山周辺地域の地質概要[19]

同地域の地質は、中・古生層及び花崗岩類を基礎岩として、それを覆って新第三系と第四系が分布する。新第三系端浪層群は、基礎花崗岩を不整合で覆って分布する。(図4.1.1-1 参照)

(i) 基礎岩類

東濃地域には、中生代～古第三紀の花崗岩が広く分布する。この土岐花崗岩と呼ばれる花崗岩は岩相変化があまり大きくなく、中粒～粗粒黒雲母花崗岩・斑状黒雲母花崗岩・中粒角閃緑岩等から成り、板状の節理が発達する。

(ii) 堆積岩

この地域の堆積岩は、中新世の端浪層群及び鮮新世～更新世の瀬戸層群から成り、端浪層群はさらに下位より土岐夾炭累層、明世累層、生俵累層に区分される。

(a) 端浪層群

端浪層群の岩相は、主として火山碎屑物と花崗岩碎屑物によって構成されており、ケイ化木と生物遺骸(貝化石、植物化石などの大型化石等)が部分的に出現する。一般に下位ほど粒子が粗く、最上部ではシルト質になっている。土岐炭累層は、アルコール質砂岩(花崗岩碎屑物質を多く含む砂岩)、角礫の花崗岩を含む巨礫～大礫岩から構成され、明世累層は凝灰質中粒砂岩を主体とする。生俵累層は凝灰質中粒砂岩、シルト岩を主体とする。

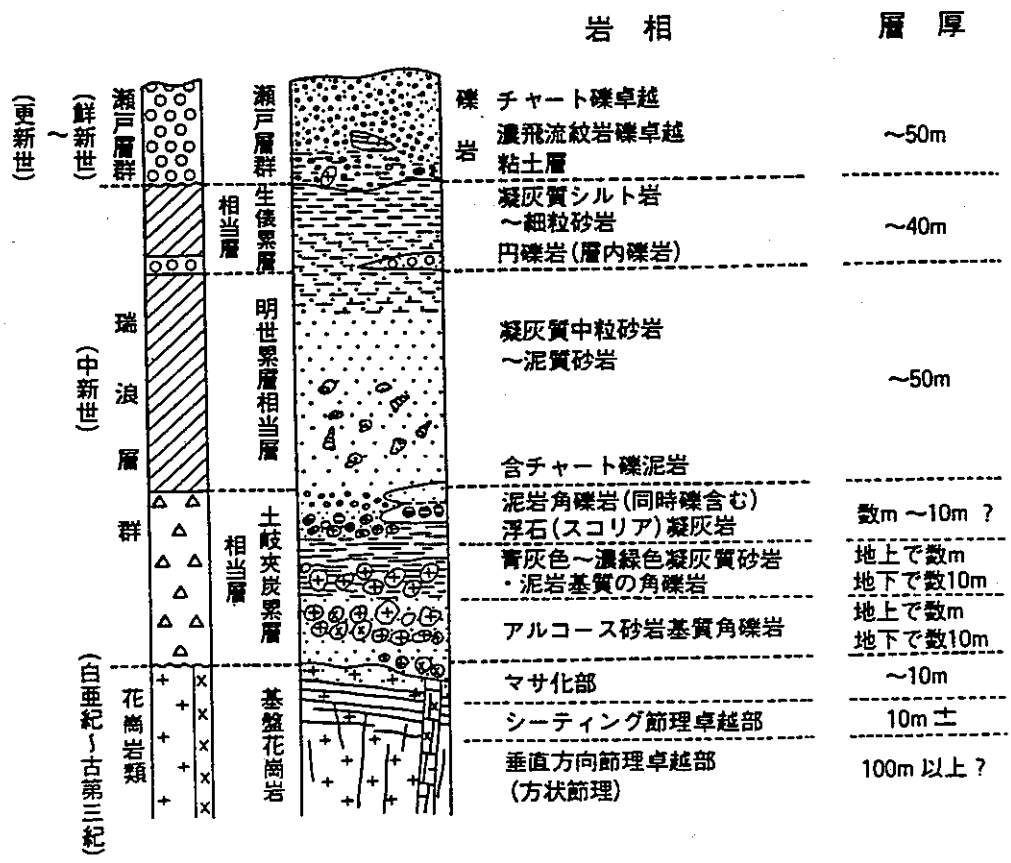


図 4. 1. 1-1 東濃鉱山地域の模式柱状図

(b) 瀬戸層群

瀬戸層群は、下位の端浪層群や花崗岩とは不整合の関係を示しており、端浪層群がほぼ固結した後に調査地域を覆った堆積物である。細～大から成る円岩を主体とし、下位に粘土層や砂質粘土層の薄層(厚さ1～3)を1～2層入っている。その礫種は花崗岩・チャート・流紋岩・泥岩・火山岩で、気質は白色極細粒凝灰質ないしはアルコール質である。

今回の解析で使用したデータセットは、堆積岩下部及び基礎岩最上部についてのものである。このうち、特に堆積岩については、上の記述にも一部見られる通り、各スケールにおいて層構造が幾重のも織り込まれており、定性的ながら、ある種のフラクタル性を示す外観を呈していることは注目に値する。

- (2) 一般に、孔内における物理検層は、試錐孔中にプローブを下ろして孔壁周辺の地層を直接的に探査する方法で、深度方向に岩盤の物性値を連続的に測定可能である。本領域で掘削された試錐孔では、電気検層、r-r検層、自然放射能検査層が行われている。

電気検層は、試錐孔内に電流電極と電位電極を下ろして電流電極から地層中に電流を流し、それと近接する電位電極の電位を測定することにより、その地点の地層の比抵抗値を求められるものである。

電気検層によって得られる見かけ比抵抗値は、孔壁における空隙の連絡性を示す指標として、透水係数とある種の類似性を有する考え得る。実際、室内試験において見かけ比抵抗値と透水係数との間に定量的相関のあることが認められている[20]。東濃地域でもこの二つの物性値の比較が行われており[19]、砂岩、泥岩部及び礫岩部のそれぞれにおいて見かけ比抵抗値と原位置透水試験結果との良好な一致が得られている。(図4.1.1-2)

このことにより、約250 cmの電極間隔から100mオーダーに到るまで、3桁近いスケール範囲にわたるフラクタルスケーリング則の確証を試みる事が可能となる。

なお、各孔の貫く層序の模式図を図4.1.1-3に、各孔の水平断面での位置関

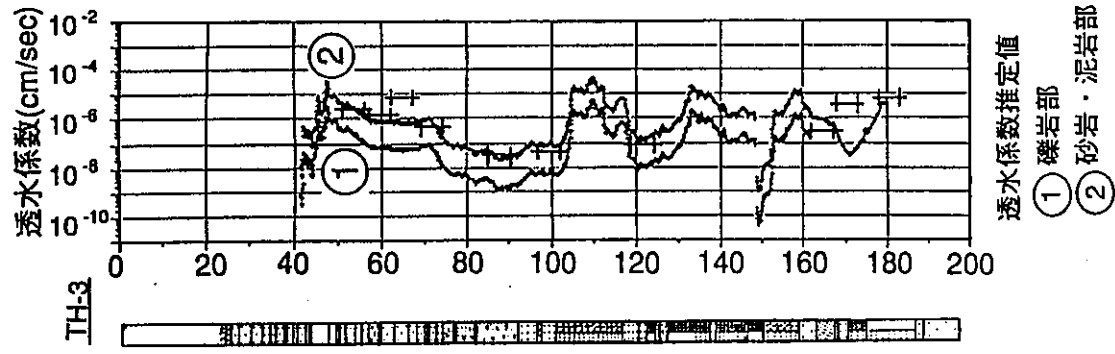


図4.1.1-2 電気検層による透水係数推定結果と原位置透水係数試験結果の比較

係を図4.1.1-4 に示す。

(3) フラクタルスケーリング則によるカイニ乗フッティング

既に述べた様に、今回の解析対象となる各孔は比較的明瞭に区分され得る層序を貫いて掘削されている。各堆積層においては粒度、分級度、堆積物の種類が異なり、また、過去の続生作用や風化作用の相違を反映してそれぞれ異なる特性を有しているものと考えられる。特に、砂岩・泥岩の相互構造、級化構造（礫岩→砂岩→泥岩等の堆積サイクルに対応した層構造）の観点にける各層の相違は、それぞれの層におけるフラクタルスケーリング則の成立性とその特徴に強い影響を及ぼすものと考えられる。

ここでの解析の目標は、各ボーリング孔データ毎に対象となる層についてフラクタルスケーリング則が適合するか否かを調査し、更に、各層についてスケーリングパラメータを求めることである。このパラメータは、各層の特徴を反映して互いに異なるものとなるはずである。

また、この結果に基づき、各ボーリング孔間で整合的なフラクタル特性が得られるか否かを明らかにすることが特に本年度の研究の最大の眼目である。

1.に述べたカイニ乗フッティングの方法により、それぞれのボーリング孔におけるフラクタルスケーリング則の適合性を調べた。各層についてのフッティングの信頼性レベルは極めて高く、いずれの層のスケーリング特性もフラクタルスケーリング則によって良く表されることを示している。また、このことは、各層でのフラクタル次元の標準偏差が小さいものであることを意味しており、実際、隣接した二層間のフラクタル次元の差異は標準偏差よりも十分に大きく、この意味から層間の境界は明確である。このことは、逆に新しく掘削された試錐孔に沿って電気検層を行ない、そのデータにmoving window average の操作を施すことによって、物質移動特性を規定する透水係数の不均質性の観点から、互いに異なる層を同定していくという新たな調査方法が成立し得ることを示唆している。

更に、もう一つ注目すべき点は、各層毎にフラクタルスケーリング則が成立し得る範囲が得られていることである。特に、この範囲の上限はcorrelation lengthと呼ばれ、それ以上の距離を離れた二点が相関を示さなくなる距離に対応している。この数値がそれぞれの層において異なっていることは、各層に見られる互

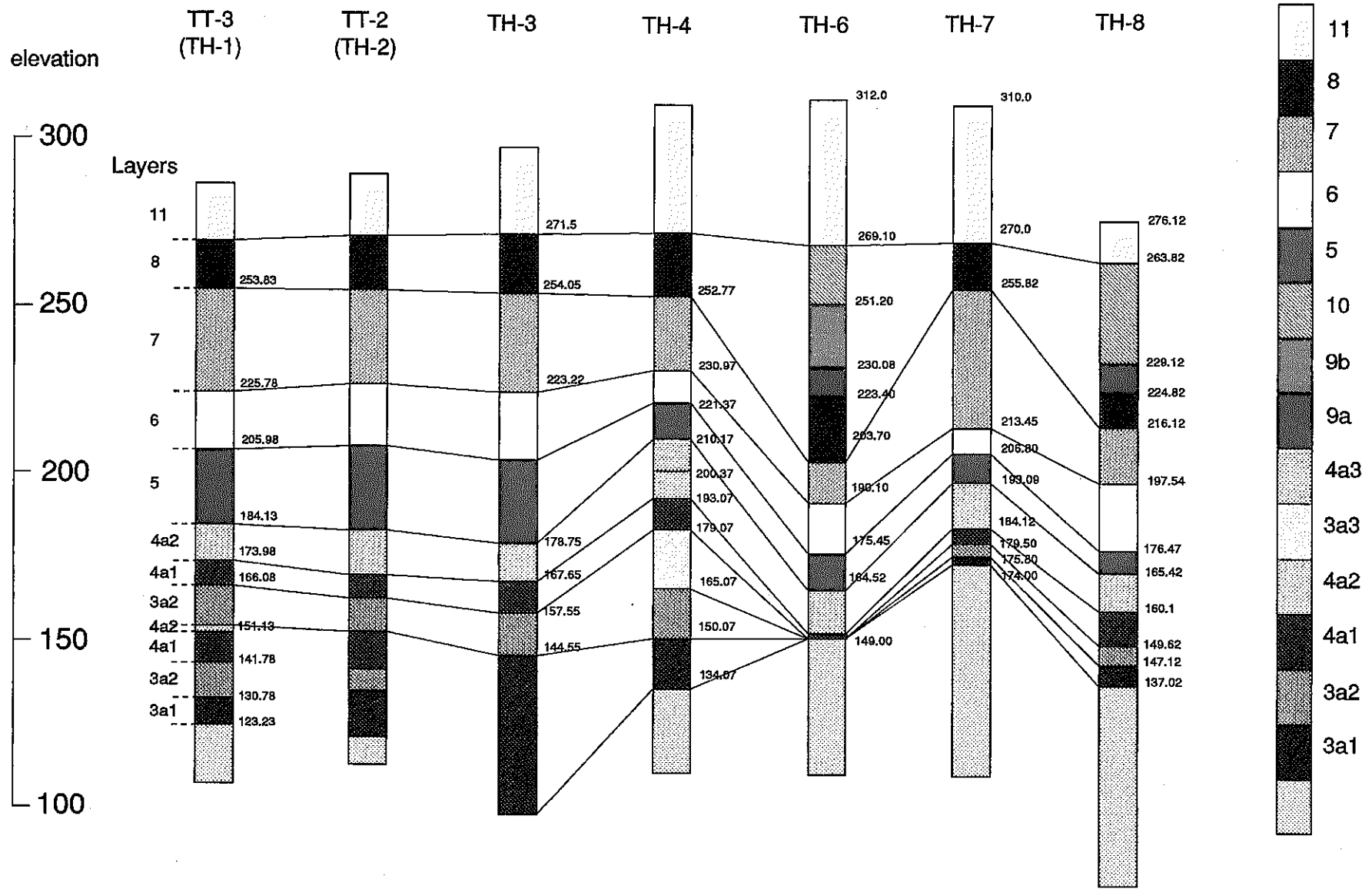


図 4. 1. 1-3 各ボーリング孔についての層序の模式図

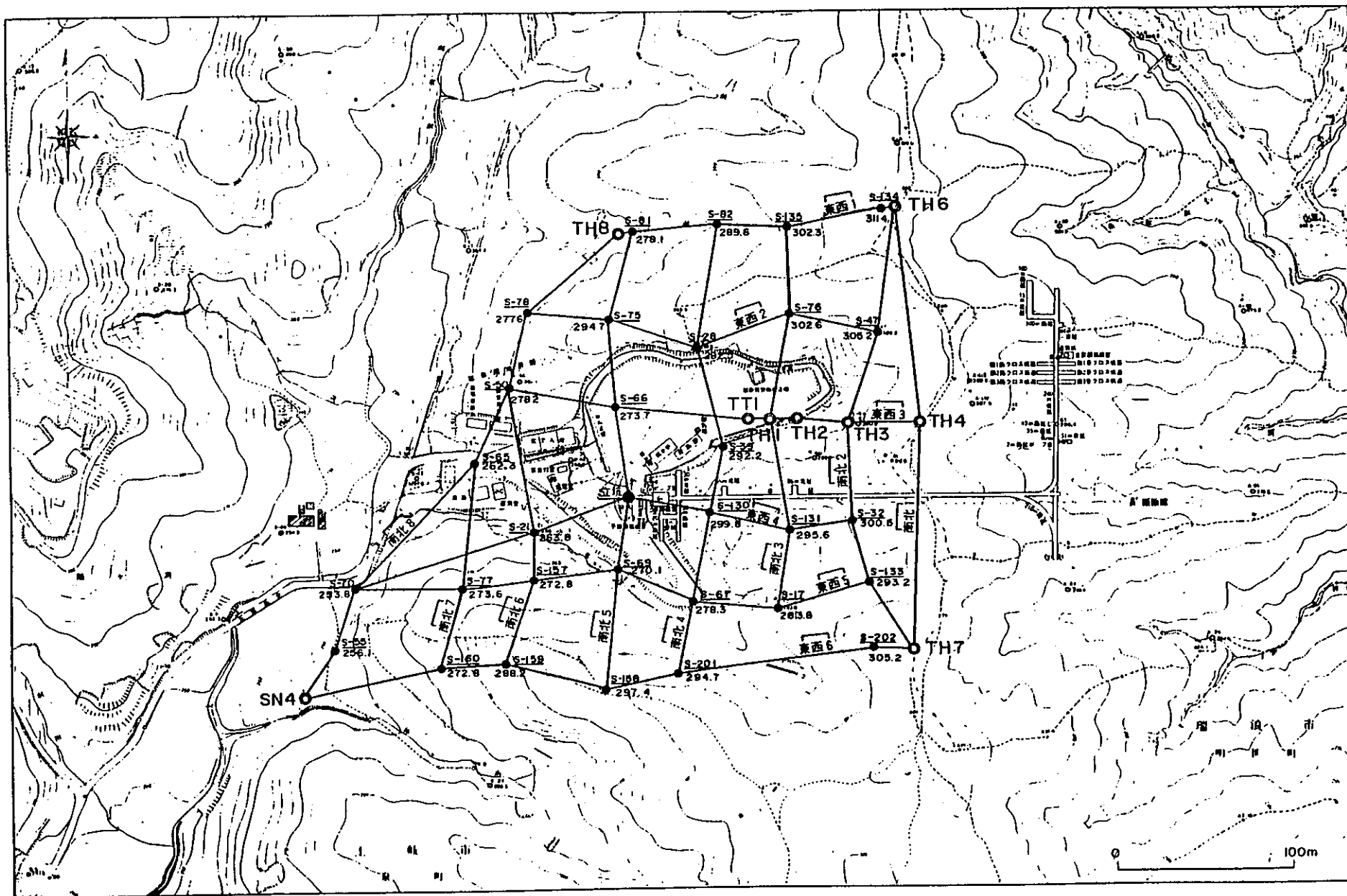


图 4. 1. 1—4 断面线位置图

層構造、級化構造のサイクルにおけるユニットの大きさの差異を示していると考えられることもできる。

また、異なるボーリング孔から得られた同一地層のフラクタル特性を比較すると次の様なことがわかる。図4.1.1-5 はTH-5孔から得られた3a1層（礫岩層）のデータについてフラクタルスケーリング則をフィッティングした結果である。フラクタル次元は1.25であり、フィットの信頼性レベルは79.6%である。また、図4.1.1-6 はTH-7孔から得られた3a1層のデータについてのフィッティング結果である。ここでもフラクタル次元は1.25と同一であり、信頼性レベルはさらに高く99.99%となっている。この結果は、異なるボーリング孔について独立に測定されたデータに基づき、3a1層の地層としてのidentityが示されたものと考えられ、また、逆にフラクタルスケーリング則による地層の特性把握の方法論が安定したものであることを検証するものにとらえることもできる。なお、図4.1.1-7 にTH-8孔5層のデータについてのフィッティング結果を示す。ここでは、フィッティングの信頼性は41.15%であり、フラクタル次元は1.24である。しかし、5層が3a1層と同じ礫岩部であることを考えれば、フラクタル次元が類似した値を示していることはやはり整合的と言うことができる。

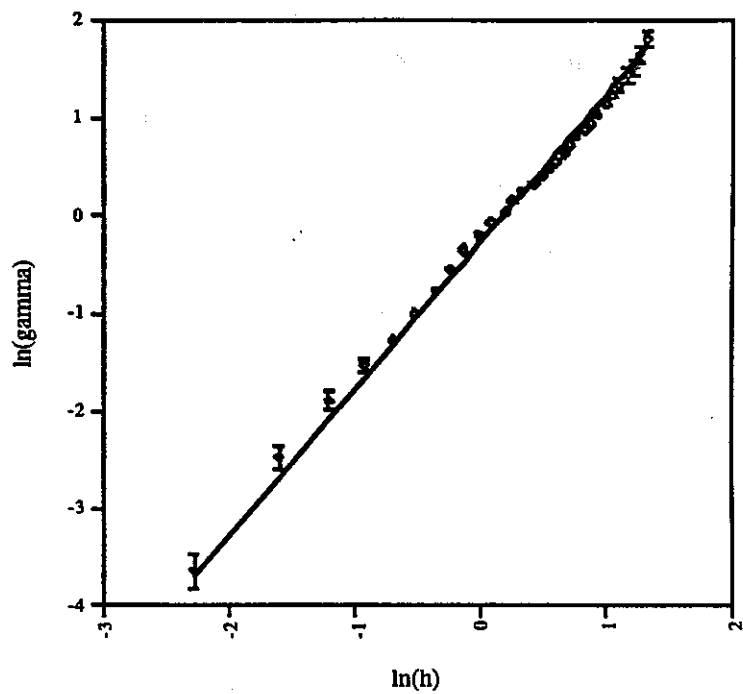


図4. 1. 1-5 TH-5孔3 a 1層についてのフィッティング結果

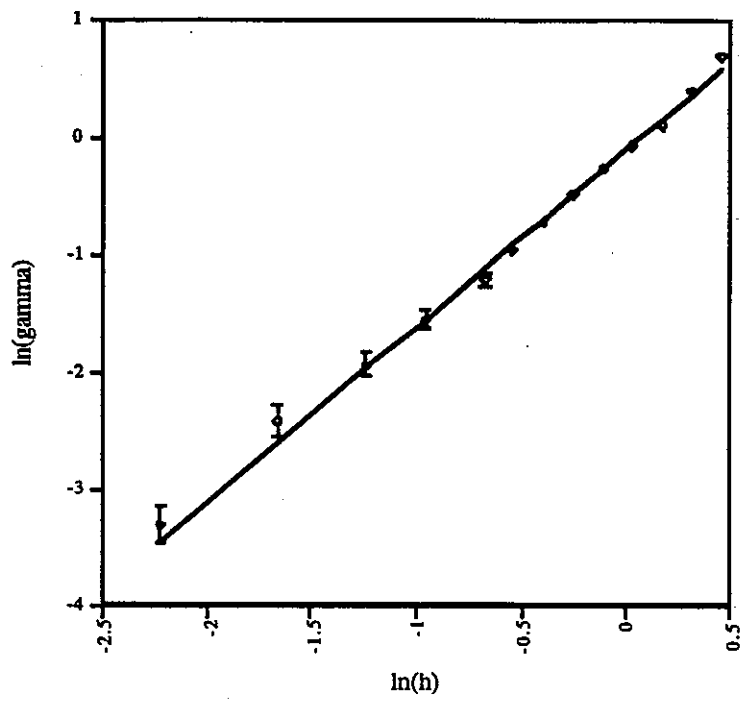


図4. 1. 1-6 TH-7孔3 a 1層についてのフィッティング結果

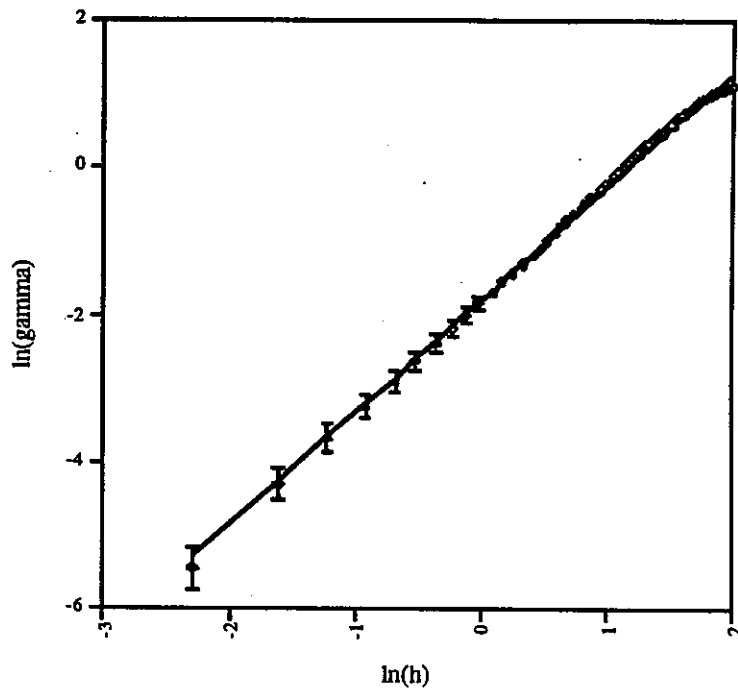


図4. 1. 1-7 TH-8孔5層についてのフィッティング結果

4.2 パーティクルトラッキングアルゴリズムの改良

現在のMACRO-AFFINITYコードは、トレーサの吸着を考慮していないため、その適用範囲は非吸着性の溶質移動に限られている。しかしながら、実際の性能評価では勿論吸着性の溶質移動も解析の対象となり、また将来の多孔質媒体中物質移動試験に於いても吸着性のトレーサを用いた実験を行うことが望ましい。そこで今年度は、線型及び非線型の吸着を考慮した新たなパーティクルトラッキングアルゴリズムの開発を行った。

吸着等湿式(isotherm)としては、次のLangmuir型のものを考える。

$$S = \frac{a C}{1 + b C}$$

但し、 S ; 吸着したトレーサ濃度

C ; 液相中のトレーサ濃度

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)と帰着する。この場合にはもう一つの定数 a は、線型吸着における K_d と等価なものとなる。逆に、 $b \gg 1$ 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 R_d を定義するために、線型の場合とのアナロジーから、

$$R_d = \frac{S}{C} = \frac{a}{1 + b c}$$

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。

以上の変更を行った新たなパーティクルトラッキングアルゴリズムを用いた計算結果の例を図4.2-1～3に示す。図4.2-1は、非吸着性トレーサ($a=b=1$)、図4.2-2は線型吸着型($a=1, b=0$)、図4.2-3は非線型吸着型($a=1, b=0.25$)にそれぞれ対応している。トレーサの移動は、図4.2-1で最も速く、図4.2-2で最も遅い。そして、図4.2-3では吸着飽和の効果によりこれら2つの中間に位置する結果が得られている。この傾向は、破過曲線により顕著に表されている(図4.2-4)。この図では、非線型性の程度を表すパラメータbの増加と共に、破過曲線が線型吸着に対応したものから非吸着に対応したものへと段階的に推移することが示されている。

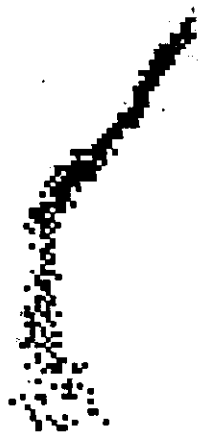


図4.2 - 1 非吸着 ($a = b = 0$) の場合のトレーサ分布

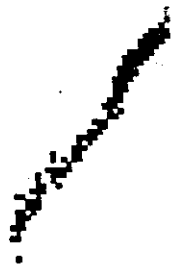


図4.2-2 線型吸着 ($a=1$, $b=0$) の場合のトレーサ分布

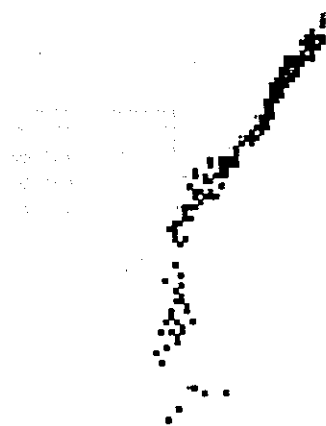


図4.2-3 非線型吸着 ($a=1$, $b=0.24$) の場合のトレーサ分布

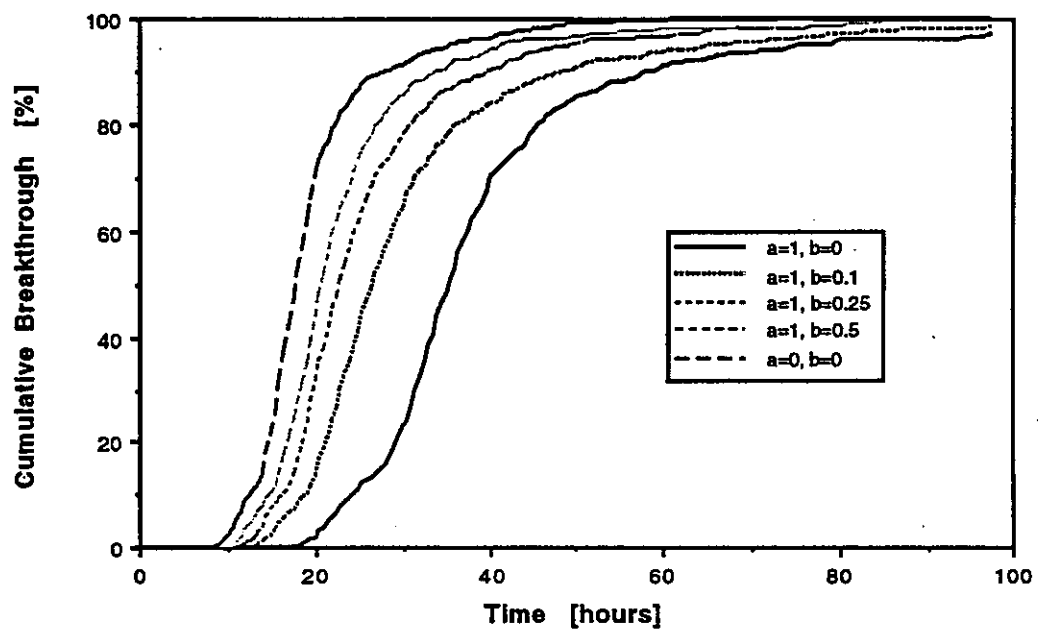


図4.2-4 種々の (a, b) についての累積破過曲線

4.3 ニアフィールド核種移行問題へのAFFINITYモデルの適用と単純化モデルによる近似
昨年度の研究に於いては、ニアフィールド中での核種移行問題に対してAFFINITY-2Dモデルを適用し、現実的な岩体不均質性を詳細に再現した透水係数場での流動解析、物質移動解析を行うことによって、不均質性の効果を巨視的に平均化した簡単な一次元核種移行モデルによる性能評価を裏付けていくことの可能性と、その具体的方法論、特にAFFINITYに詳細な解析結果を一次元モデルによってどの様に整合的に再現するかという点について検討を行った。

本年度は、対象をニアフィールド中での核種移行問題として、同様な検討を行った。検討の目的は以下の二つである。

- ① AFFINITYモデルが、自然の不均質系（ニアフィールド母岩）と人工的に設定された領域と成る二元的な体系においても適用可能である事を確かめる。
- ② 自然な不均質性を有するニアフィールド母岩中に難透水性領域を人工的に持ち込んだ場合、母岩中の流動状況はどのような影響を受け、また逆に、緩衝材中の核種挙動は、その境界条件として現実的な不均質性を考えることによって、従来の平均化された均質な外側境界を仮定したモデルによる結果から変化し得るか否かを明らかにする。

但し、ここで行う解析は例題としての位置付けであり、性能評価に直接適用可能なものとするためには、原位置での調査・研究によるデータ収集（特に坑道掘削による影響を受けた状況でのニアフィールド母岩の透水係数分布）、及びコード自体の改良を必要とする。この点については、5.に於いて詳しく述べることとする。

4.3.1 解析条件の設定

現在のAFFINITYコードは2次元モデルであるため、廃棄物の置かれた水平坑道に垂直な二次元断面を考え、この平面上での流動及び物質移動を解析する。ここで、モデル化するニアフィールド母岩は30m×30mの正方形領域とし、これを128×128のブロックに分割する。水平坑道は直径5mの円筒形とし、この正方形領域の中心に位

置するものとする。また、水平坑道の中心部には、トレーサ注入口を設け、これによりガラス固化体を模擬する。

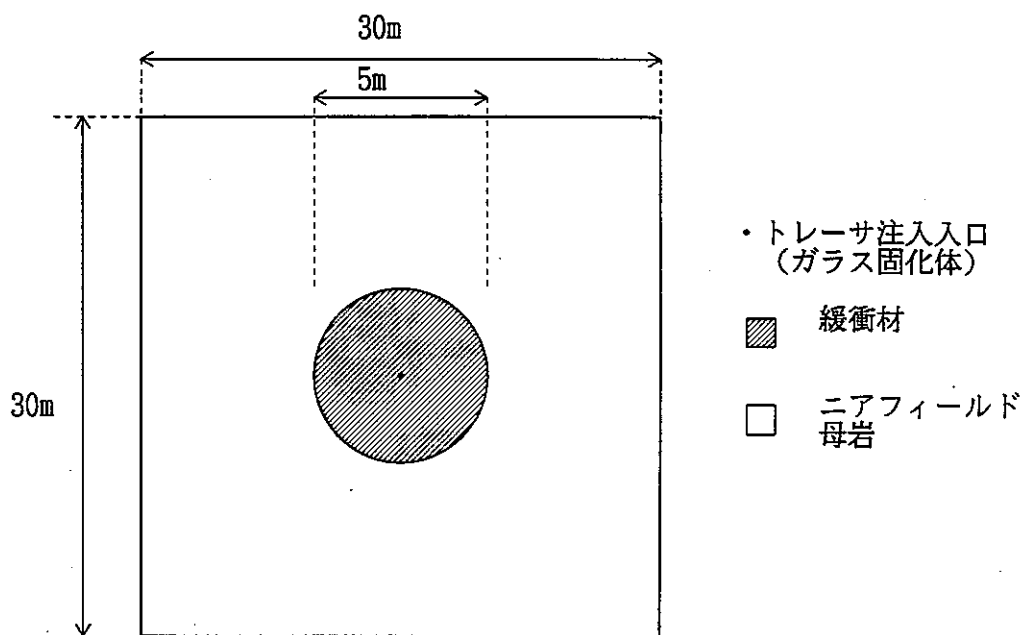


図4.3.1-1 モデル化領域

他の解析条件については以下の様に設定した。

(1) ニアフィールド母岩の透水係数分布

透水係数値は、東濃鉱山のボーリングデータ(4.1参照)のうち、TH-3孔、TH-5孔及びTH-6孔からそれぞれ2点を任意抽出し(いずれも第6層)、次の様な位置に配置した。

表4.3.1-1 コンディショニングに用いた透水係数値

| 透水係数(m/s) | X座標(m) | Y座標(m) |
|----------------------|--------|--------|
| 3.0×10^{-7} | 6.0 | 9.0 |
| 2.0×10^{-8} | 21.0 | 10.0 |
| 1.6×10^{-7} | 26.0 | 15.0 |
| 5.0×10^{-8} | 15.0 | 17.0 |
| 2.0×10^{-7} | 22.0 | 25.0 |
| 8.0×10^{-8} | 8.0 | 25.0 |

但し、表中の座標はニアフィールド母岩左下角を原点として定義されている。

・母岩のフラクタル透水係数場は、表4.3.1-1 中の6点での値を固定してコンディショニングされた状態で、フラクタル次元を2.5 及び2.7 として作成した。

(2) 緩衝材の透水係数

標準ケースとしては、緩衝材透水係数を母岩の平均値の1/100 一定と仮定した。また、施工時のばらつき、あるいは閉鎖後の浸食等により不均質性が生じることが考慮したケースを補足的に考えることとした。

(3) 境界条件

流動解析に於ける境界条件は水頭固定とし、上辺で1.0m下辺で0.0mと設定した。側辺では、これら二つの水頭値を線型に補間するものとした。

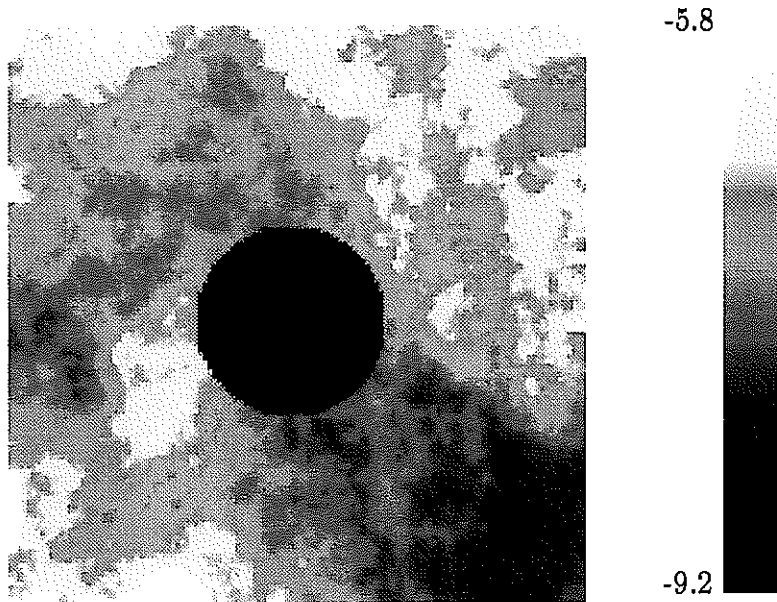
なお、パーティクルトラッキングについては、注入部での濃度一定の連続注入を仮定した。

4.3.2 解析結果

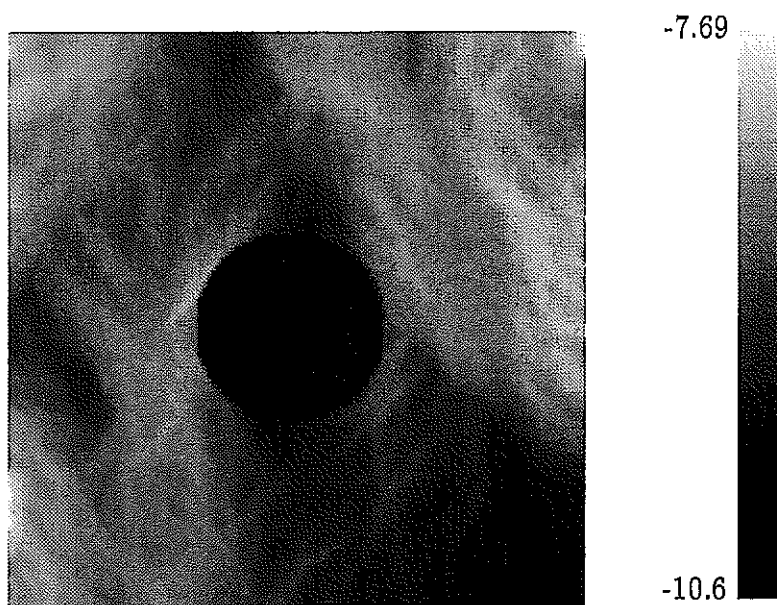
(1) 流動解析

上述した解析条件のもとに算出した標準ケースにおけるニアフィールド母岩中透水係数分布とダルシー流速場とを図4.3.2-1 に示す。明らかに、図4.3.2-1 に於いては緩衝材部分を迂回した流動状態があらわれている。しかし、緩衝材周辺でも本来のフラクタル場に起因するチャンネルング構造は保持されており、均一場の中に難透水性領域を置いた場合とは異なる流動状況が現れている。また、予想した通り、標準ケースに於いては緩衝材領域を横切る様な流れはほとんど見られない。

代替ケースについての解析結果を図4.3.2-2 及び図4.3.2-3 に示す。代替ケー



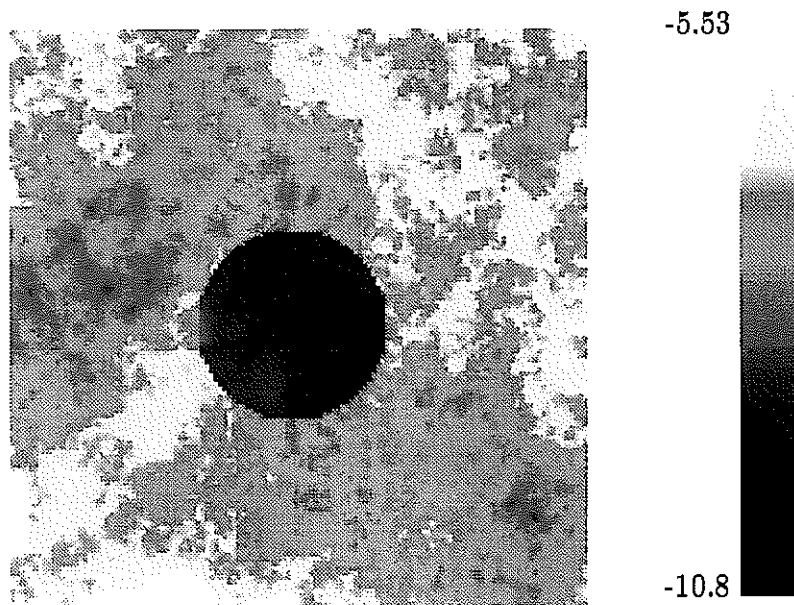
Log(Permeability/ ms^{-1})



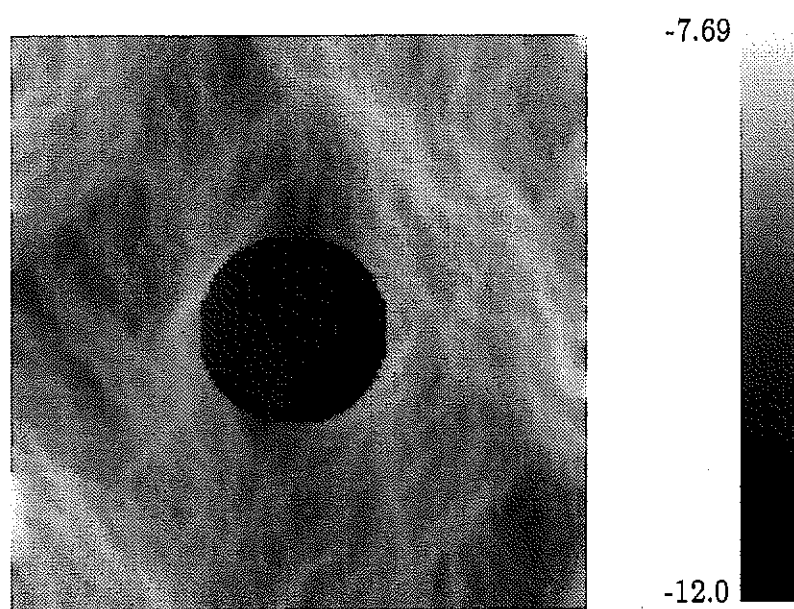
Log(Flow Velocity/ ms^{-1})

Repository permeability is 1/100 of mean host permeability

図4. 3. 2-1 標準ケースについての流動解析結果



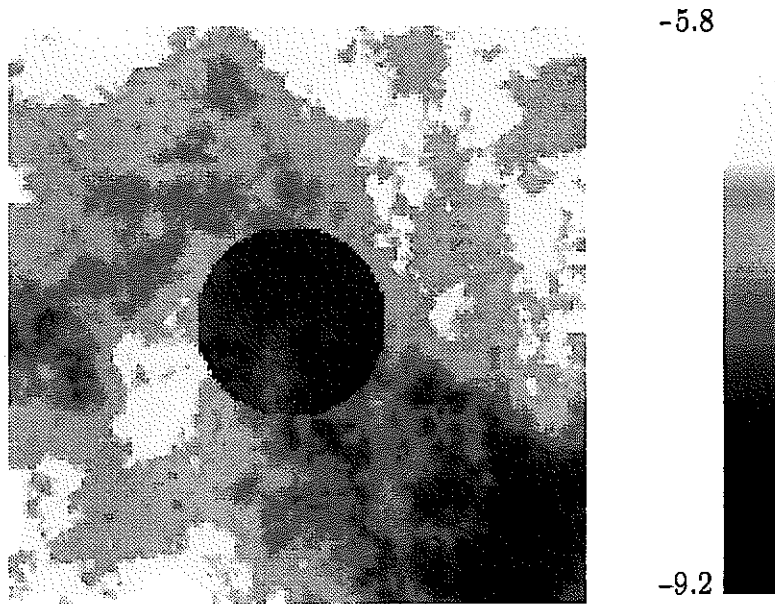
Log(Permeability/ ms^{-1})



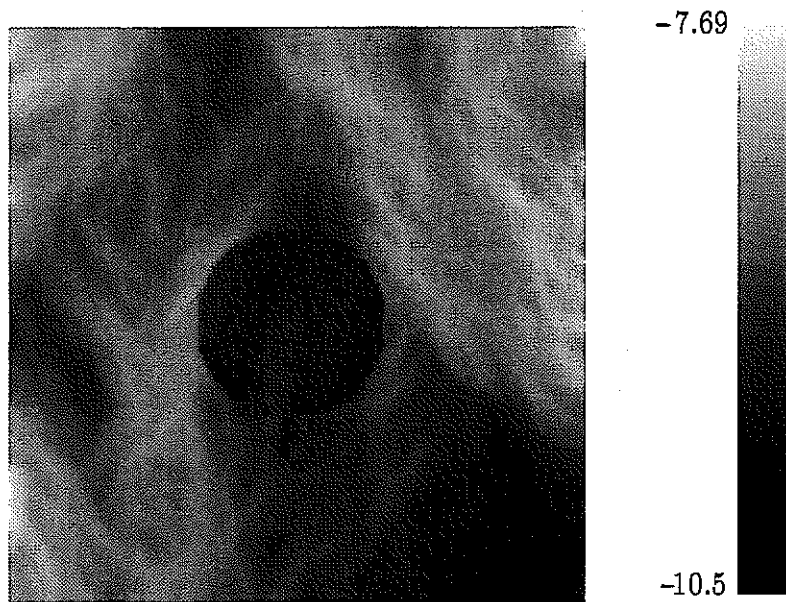
Log(Flow Velocity/ ms^{-1})

- Repository fractal permeability is 1/100 of mean host permeability
- Fractal Dimension = 2.2, Variance = 0.78

図4. 3. 2-2 代替ケース1についての流動解析結果



Log(Permeability/ ms^{-1})



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

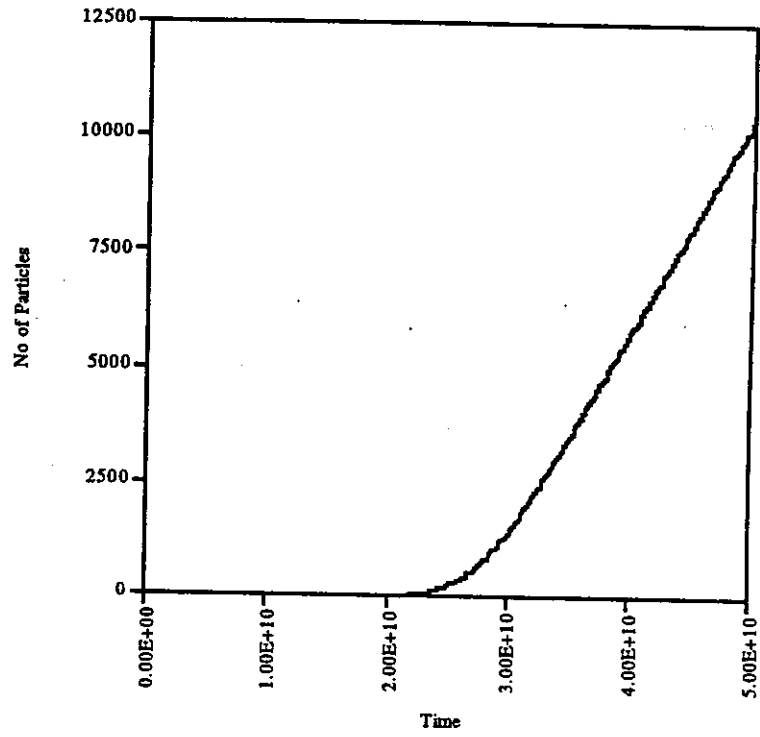
Repository fractal permeability is 1/10 of mean host permeability
 Fractal Dimension = 2.7, Variance = 0.056

図 4. 3. 2—3 代替ケース 2 についての流動解析結果

ス1（緩衝材領域の平均透水係数は標準ケースと同じ、フラクタル次元2.2、分散0.78の不均質性を仮定）では、緩衝材領域中の透水係数変化が（空間的に）滑らかであるためにはチャンネル流はほとんど生じていない（図4.3.2-2）。これに対して代替ケース2（平均透水係数は標準ケースの10倍、フラクタル次元2.7、分散5.6の不均質性を仮定）では、緩衝材中に於いてもチャンネルリングの効果が顕著に現れている。

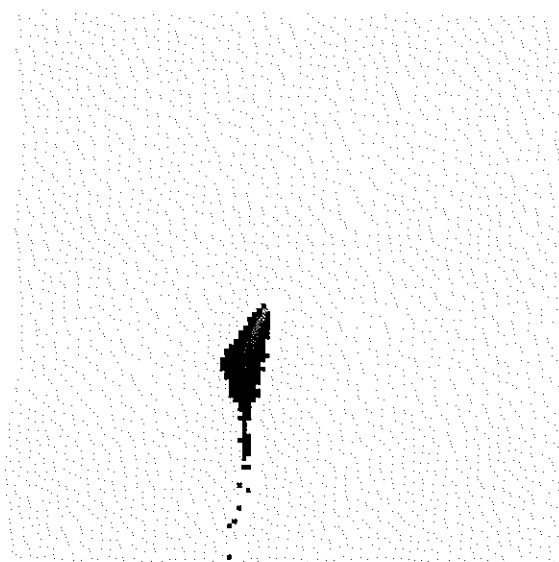
(2) 物質移動解析

図4.3.2-4に標準ケースに於けるパーティクルの累積破過曲線を示す。ここでは、約 3×10^1 秒に於いて人工バリアからの放出挙動は定常となっている。図4.3.2-5はこれと対応するパーティクル分布（ $t = 3.5 \times 10^1$ sec）である。人工バリアからの放出が下流側に偏在していることが明らかである。



Breakthrough curve for Case 1

図 4. 3. 2-4 標準ケースについての累積破過曲線



Particle density for Case 1 at $t = 3.5 \times 10^{10}$

図4. 3. 2—5 標準ケースについてのパーティクル挙動

5. まとめと今後の課題

昨年度に引き続き、統計的に自己アファインなフラクタル透水係数場のモデルを用いて不均質多孔質媒体中の水理及び物質移動問題について以下の検討・解析を行った。

昨年度調査を行ったAFFINITY-2D コードの各モジュールを統合し、これをグラフィカルユーザーインターフェースであるAVS 上でプログラミングすることによって一連の計算を効率的かつ体系的に実施可能とするソフトウェアMACRO-AFFINITYを作成した。

実際のサイト、特に堆積岩系、では異方的な不均質性が見られるにもかかわらず、これまでの解析は等方的な場に限られていたことから、方向に応じて分散あるいはフラクタル次元の異なる異方的なフラクタル場を作成するための3つの手法を考案した。また、それぞれの手法を用いて異方的なフラクタル場の例を作成し、それぞれの手法の特性を比較した。

昨年度実施した予備解析と対応する供試体に関する不均質多孔質媒体中物質移動試験について、装置の製作・予備的試験の実施により明らかとなった現実的な実験条件を考慮して解析を再度行い、実験結果との比較及び今後の実験についての変更の必要性をまとめた。

実サイトの透水係数データセットとの比較によるフラクタルスケール則の成立性の検証としては、昨年度に引き続き東濃鉱山周辺のボーリング孔における調査結果についてフラクタルスケール則のフィッティングを行い、各孔・各層において高い適合性が認められた。また、異なるボーリング孔において独立に測定された同一層のデータセットが、同様のフラクタル特性を示すことから、フラクタルスケール則がサイト内の空間的拡がりにおいて整合的に適用されることが示された。

AFFINITYモデルの性能評価への適用としては、ニアフィールドにおける人工バリアと周辺母岩との連成問題を検討した。具体的には、例題として、フラクタルモデルにより表現された不均質岩体断面内に、緩衝材に対応する難透水性の円筒領域を設定して、流

動解析及び物質移動解析を実施し、この様な自然・人工の複合系に対して本モデルが適用可能であることを示した。また、この結果得られる詳細かつ現実的な母岩部の応答特性を簡単なモデルにより代表する方法についても検討を行った。

なお、以上の検討を通じて次に示す研究開発課題が抽出された。

- (1) 今年度の研究において作成した異方的フラクタルモデルにより、東濃サイトのボーリングデータセットから各層の垂直断面における透水係数分布を再現すること。
- (2) 同じく異方的フラクタルモデルにより、次期の不均質多孔質媒体中物質移動試験に用いる非等方的不均質供試体を設計し、対応する流動解析・物質移動解析を行うこと。
- (3) 実験で観察されたトレーサ挙動についての定性的比較から一步進んで、各濃度測定ポイントでの測定値の経時変化との定量的比較を行うこと。また、このためには、パーティクルトラッキングに加え移流・拡散（あるいは微視的分散）方程式を高解像度で数値解法することのできるソーパーを開発することが望ましい。
- (4) より現実的なニアフィールド体系における人工バリア・母岩中水理、核種移行問題の解析。このためには、(3)の移流・拡散ソーパーに加えて、3次元（多孔質媒体の場合）あるいは準3次元（人工バリアを横切る単一亀裂を考え、亀裂内開口幅の分布をフラクタルモデルで表現するとともに、亀裂と垂直な方向へのマトリクス拡散を考慮する場合）への拡張が必要である。

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] PSAC0IN LEVEL B INTERCOMPARISON, Probabilistic System Assessment Code
(PSAC) User Group, OECD Nuclear Energy Agency, Paris, 1989.
- [3] G. de Marsily, Quantitative Hydrogeology, Academic Press, London, 1986.
- [4] J. Bear, Dynamics of Fluids in Porous Media, Amsterdam, 1972.
- [5] B. Doerstorp and J. Anderson, Applications of the discrete fracture network
concept with field data, Wat. Res. Res. 25(3), 540-550, 1989.
- [6] 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.
- [7] P. Grindrod, M. D. Impey, Fractal Field Simulations of Tracer Migration
within the WIPP Culebra Dolomite, IM2856-1, Version 2, 1992.
- [8] M. D. Impey, P. Grindrod, Cross Well Fractal Interpolation of Permeability
Data, IHEN / 20-1, Version 1, 1992.
- [9] M. D. Impey, P. Grindrod, Channelling and Fickian Dispersion in a Fractal
Simulated Porous Media, WRR/1, Version 1, 1991.
- [10] 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.

- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] M. D. Impey, P. Grindrod and H. Takase. A fractal methodology for the MACRO-2D experiments. Intera Report ID3249-1 Version 1, Seprember 1992.
- [14] M. D. Impey, 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.
- [15] W. H. Press, B. P. Flannery, S. A. Teukolsky and W. T. Vetterling. Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing, Cambridge Uni. Press, 1986.
- [16] 中塚利直, 時系列解析の数学的基礎, 教育出版, 1978.
- [17] D. C. Boes, F. A. Grayhill and A. M. Mood, Introduction to the Theory of Statistics, McGraw-Hill, London 1988.
- [18] 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.
- [19] 尾方伸久他, 堆積岩の地質学的特性および透水係数, 見かけ比抵抗相互の関係とその水理地質構造モデル化への適用, 応用地質, 第32巻6号, 1992.
- [20] Brace, W. F., J. B. Walsh and W. T. Frangos, Permeability of Granite under High Pressure, Jour, of Geophy. Resh., Vol 73, No. 6, pp 2225-2236, 1968.

- [21] P. Grindrod and M. D. Impey. Channeling and Fickian dispersion in fractal simulated Water Res. Res.
- [22] K. Worgan, The CRYSTAL User Guide, 9105-2, Version 1, 1992.
- [23] I. Neretnieks. A note on fracture flow mechanisms in the ground. Water Res. Res. 19(2), 363-370, 1983.
- [24] H. Feshbach and P. M. Morse Methods of Theoretical Physics. New York, McGraw-Hill, 1953.
- [25] Bradbury M. H. and Baeyens B., A mechanistic approach to the generation of sorption databases, Proceedings of the NEA Sorption Work shop, Interlaken, Switzerland, 1991.

付録1 AVS License
Administration

AVS LICENSE ADMINISTRATION

CHAPTER FIVE

Introduction

AVS and its associated applications are licensed products of Advanced Visual Systems Inc. Access to AVS and its applications (such as the AVS Animation Application) is controlled by the Flexible License Manager (FLEXlm) network-wide floating licensing system from Highland Software.

When correctly installed and functioning, the licensing mechanism is largely transparent to the AVS end-user. Those conditions that make the license control visible to the end-user are discussed in "Using AVS with Licenses." This document is available online in the file `/usr/avs/license/user.ps`, where users can refer to it to understand, diagnose, and solve licensing problems that do not require administrator intervention.

Depending upon the type of AVS license purchased from Advanced Visual Systems, you will be able to control access to AVS in the following modes:

Node Locked Licenses

Restricts execution of AVS to a specific set of host systems, with n concurrent users per system, where n is the number of licenses purchased. n may vary from system to system.

Floating Licenses

AVS may execute on any heterogeneous host within a UNIX network, up to n simultaneous users, where n is the number of floating licenses purchased. Customers may purchase separate floating license pools in order to support separate, independent work groups.

Mixed Licenses

Allows a mixture of Node Locked and Floating Licenses.

Within these license categories established by Advanced Visual Systems, you, as the license administrator, can further regulate access to AVS by any combination of these criteria:

- Allow access to all users, while reserving license(s) for specific users, hosts, displays, or groups of users.
- Create a list of users, hosts, displays, or groups who are allowed to use the software.
- Create a list of users, hosts, displays, or groups who are not allowed to use the software.

Introduction (continued)

- Specify a timeout that will return idle licenses to the pool for use by other users.

Different AVS applications may be governed by different licenses. For example, AVS itself requires an AVS license. The AVS Animation Application may require a different, separately-purchased license. Each aspect of AVS that is governed by a separate license count is called a *feature*.

A Brief Version of the Story

This section briefly summarizes the licensing mechanism and describes how to install it. If there is any aspect of it that is not clear, refer to "The Detailed Story" later in this chapter that describes each component and their interactions in greater detail.

The Mechanism

When AVS or one of its associated applications first starts, the software will look for a *license.dat* file. Finding this file, it will contact a program called a *license daemon* running on a host system somewhere in your network. The license daemon finds another program, the *AVS vendor daemon*, that is also running on the remote host, and gives it the program's request to run.

The AVS vendor daemon compares the "check out" request against the number of simultaneous uses allowed in the *license.dat* file. If there are still unused licenses available, it gives the AVS application permission to go ahead and run.

When AVS exits, either normally or abnormally through a Ctrl-C or a crash, the license token is checked back into the vendor daemon so that others can use it.

If the application cannot contact the license daemon, it will not be able to run.

Installing Licenses

There are three files to be concerned with:

/usr/avs/license/license.dat

A template for your own *license.dat* file.

/usr/avs/license/lmgrd

The license manager daemon.

/usr/avs/license/avs_lmd

The AVS vendor daemon.

To install the licensing mechanism:

1. Obtain a *license.dat* file that is correct for the type of licenses (node locked or floating) that you purchased. The server and (if present) node locked hostids must match the actual hostids of those systems that will be acting as license daemon servers and those running node locked copies of AVS. The hostids are encrypted into the 20-character license code on each *license.dat* FEATURE line. The "Typical License

File Configurations" section later in this document shows the license file formats that go along with each licensing configuration.

The correct contents of the *license.dat* file should be in a letter that accompanies the AVS product. If the letter does not contain the license file text, or if the information is incorrect, you must contact your Customer Support representative as described at the beginning of the "AVS Installation" chapter in the *Installation and Release Notes*.

2. Use a text editor to create the *license.dat* file. You may either type it in from scratch, or use */usr/avs/license/license.dat* as a template. The template file is for a floating license configuration. Copy the contents of the license letter exactly.

On SERVER lines:

```
SERVER hostname hostid TCP_socket_#
```

you can edit the *hostname* and the *TCP_socket_#*. (See step 6 below for an explanation of the socket number.) The numeric *hostid* must match that shown in your license letter.

On DAEMON lines:

```
DAEMON avs_lmd daemon_filespec options_filespec
```

replace *filespec* with the location of your AVS vendor daemon binary (see step 4 below). *options_filespec* is optional; it lets you establish additional local controls on access such as reserving licenses for certain users, making an access list, or restricting use to certain displays. See the "Location Control Options" section later in this document.

FEATURE lines must be copied exactly as shown in the license letter.

3. Install *license.dat* in */usr/local/flexlm/licenses* on any machine that will run AVS features, and on any server nodes. Place a separate copy on each of the server nodes. The file must be world-readable.

There may be two different *license.dat* files: one used by the application when it starts to locate the license daemon, and one used as a database by the license and AVS vendor daemons when they initialize. These can be the same or different files.

If you decide to put the license file used by the license daemons somewhere other than */usr/local/flexlm/licenses/license.dat*, then use one of the following methods for the license daemon to locate the license file:

1. Start the license daemon as follows:

```
lmgrd -c license_file_path -t connect_timeout >logfile
```

where:

| | |
|--------------------------|---|
| <i>license_file_path</i> | The full pathname to the license file. |
| <i>connect_timeout</i> | The timeout, in seconds, for "connect" calls to other daemons if operating redundant license daemons on multiple servers. |
| <i>logfile</i> | A file to which the license daemon writes |

transaction messages.

We recommend the using the "-c" option to locate the license file if the default location cannot be used.

2. Use the environment variable `LM_LICENSE_FILE` to override `/usr/local/flexlm/license/license.dat` as the location of the license file, for example:

```
setenv LM_LICENSE_FILE license_file_path
```

where:

`license_file_path` is the full pathname to the license file.

Note that the "-c" option overrides the setting of the `LM_LICENSE_FILE` environment variable.

Either of these two methods solves the problem of informing the license daemon and the vendor daemon where to look for the `license.dat` file. They do not tell the licensed AVS feature where to find the license file.

If you change the default location of the license file, AVS feature users must also be told to set the `LM_LICENSE_FILE` environment variable so that the AVS feature can find the license file when it starts.

If you install `license.dat` in the `/usr/avs` directory, it may be overwritten by subsequent AVS release installations.

4. Decide where you want the binaries for the license daemon `lmgrd` and the vendor daemon `avs_lmd` to reside and install them.

In some network organizations, application-specific information is intentionally kept out of the "system directories". In this case, you can leave `lmgrd` and `avs_lmd` in the `/usr/avs/license` directory where they are already located.

In other organizations, such programs are copied to the system utility area (usually `/etc`).

5. In a network organization, it is usually desirable to start the license daemon and vendor daemon when the SERVER system boots. You should add a line like the following to your system's boot file:

```
lmgrd options > license.logfile &
```

On Sun systems, this line would be added to the `/etc/rc.local` file. (Remember: `/etc/rc.local` is run as a BOURNE shell, so do not use the `cs` ">&" redirection syntax.)

On SGI systems, the directory `/etc/rc2.d` contains links (e.g., `S54avs`) to specific feature startup scripts. The scripts themselves may be anywhere, including the `/etc` directory.

On IBM RS/6000 systems, the boot startup file is `/etc/rc`.

On HP 9000/7xx systems, the startup file is `/etc/rc`.

Note: if you are concerned with security, an "su username <" can be placed in the front of this line. Without this restriction, the `lmgrd` start-

up can be done manually by any ordinary user. It is usually desirable to leave this option open so that users can restart the license daemon without administrator intervention.

You may wish to replace the single command line with a script.

6. Application programs contact the license daemon through a TCP/IP socket. If your system supports the */etc/services* TCP socket binding lookup service, then add a line like the following to */etc/services*:

```
license          1700/tcp
```

1700 is a locally unique port number. 1700 is used for illustration purposes. Choose any number appropriate to your system and network. If the daemons are to be run from a non-root account, the specified port number must be greater than 1024. If the network is running the Sun Network Control System (aka "yellow pages"), then this line must be added on the NCS master, and the services map must be propagated to the network.

If modifying the */etc/services* file is unacceptable, then add the port number at the end of SERVER lines in the license file. If a port number is present in the license file it will be used. The following illustrates a modified server line:

```
SERVER mynode 1700ae83 1700
```

In this example, TCP/IP port 1700 will be used for the license manager daemons. You may replace 1700 with any locally unique number.

See the "Using AVS with Licenses" chapter for a list of the information that users will need from the administrator to run AVS.

This section describes each of the actors in the licensing mechanism in detail.

The *license daemon* is a process that resides on a host within the network. When AVS (or any licensed AVS feature) starts, it contacts the license daemon host defined in a *license.dat* file. (The system trying to run AVS must be able to contact the license daemon through a numbered TCP/IP socket that is defined either in the *license.dat* file, or in an */etc/services* file.)

The license daemon uses the information in the *license.dat* file to locate the AVS vendor daemon that actually dispenses licenses, and then forwards the program's request to the vendor daemon.

Other application software on your network may already use FLEXlm to control their licenses. If so, you can use the existing license daemon to control AVS licenses. Alternately, you can make the AVS licensing mechanism independent by running a separate license daemon on a different host.

If the license daemon is not accessible to the AVS program, the program will not be able to run. You can create redundancy by running an odd number of license daemons on different hosts. If a majority of the license daemons are

The Detailed Story

The License Daemon

active, the program will be able to contact the AVS vendor daemon.

The binary of the license daemon is in the file `/usr/avs/license/lmgrd`. You may leave it there or copy it elsewhere in your file system, possibly `/etc/lmgrd`. In general, end-users should know the location of the license daemon (or a local script that starts it with appropriate local parameters) so that, in the event of a failure, they can restart it without administrator intervention.

Starting the license daemon is usually made part of its host system's boot/startup procedure. The files invoked when a system starts varies from workstation vendor to vendor. On Sun workstations, for example, the files would be typically be `/etc/rc.local` or `/etc/rc.boot`.

The license daemon is also referred to as the *master license daemon*, the *master daemon*, or the *license manager daemon*.

The AVS Vendor Daemon

The *AVS vendor daemon* is the process that actually dispenses licenses according to the information in the `license.dat` file, and according to any further modifications that the local administrator has established in a local configuration file. Vendor daemons are started by the license daemon when it first initializes, again according to instructions in the `license.dat` file. They execute on the same host as the license daemon. If your site has multiple applications that use FLEXlm, there will be a separate vendor daemon for AVS.

The binary for the AVS vendor daemon is located in `/usr/avs/license/avs_lmd`. You may leave it there, or copy it to a central directory such as `/etc/avs_lmd`.

license.dat file

A typical floating license `license.dat` file looks like the following:

```
SERVER menelaus 67069f38 1700
DAEMON avs_lmd /usr/avs/license/avs_lmd /usr/avs/license/localoptions
FEATURE AVS avs_lmd 4.000 1-jan-00 4 0B98A091178E1B37FEA5 ""
FEATURE AVS/beta avs_lmd 4.000 1-jan-93 4 BB4830D1E024B5347B15 ""
FEATURE AVS-Animator avs_lmd 4.000 1-jan-00 4 CBF8D091C8E3363DB9A3 ""
FEATURE AVS-Animator/beta avs_lmd 4.000 1-jan-93 4 0B3810C1CDAC63A816A9 ""
```

The SERVER line defines which network host runs the license daemon, both by name and by unique hostid. The 1700 defines the locally unique UNIX TCP/IP socket number that the application will use to connect to the license server. This number may be absent if this socket==program equivalence is defined in an `/etc/services` file available to all parties in the network.

In SERVER lines, the hostid cannot be changed by the administrator because it encrypted into the license codes in the FEATURE lines. If you wish to create redundant license daemons, there will be three or five server lines, all of whose hostids are encrypted in the license code.

The DAEMON line defines the string name of the vendor daemon, the pathname where the vendor daemon binary resides, and, optionally, a pathname to a local administrator-defined configuration file that specifies who can and cannot use the various software features. Within this line, the string name of

the vendor daemon (*avs_lmd*) cannot be changed by the local administrator.

FEATURE lines define specific aspects of AVS that are subject to license control. In this example, there are four features: for AVS itself, for an AVS/beta release, for the AVS-Animator, and for an AVS-Animator beta release. The remainder of the line specifies the string name of the vendor daemon that dispenses licenses for this feature (*avs_lmd*), the version of the software licensed, the expiration date, the number of licenses, and the actual license code that embodies in encrypted form the previous clear text data. Additional fields are possible. The fields in the FEATURE line cannot be changed by the local administrator.

By default, the license file is expected to be located in */usr/local/flexlm/licenses/license.dat*. You can place it elsewhere provided that:

- The license manager daemon is started with a *-c license_file* option that specifies the new location; and
- The user running AVS or one of its features has the environment variable *LM_LICENSE_FILE* defined to specify the new location.

It is possible to have both the license daemon, the vendor daemon, and the end-user specify a series of license files through which FLEXlm will search until it finds a FEATURE line that matches that of the requesting application.

The administrator installs the license file, usually by copying the template file in */usr/avs/license/license.dat*. The administrator uses a text editor to fill in the locally-correct values for fields in the SERVER and DAEMON lines. FEATURE lines are supplied by Advanced Visual Systems Inc, either in the license letter that accompanies the product, or by contacting Advanced Visual Systems Customer Support. The administrator transcribes FEATURE lines exactly as relayed by AVS Inc. into the *license.dat* file.

Log File

The license daemon writes transaction messages to a log file. The name and location of the log is determined by redirecting the *lmgrd* license manager program's *stdout* to a pathname, e.g., *lmgrd >/tmp/flexlog*. Redirecting to */dev/null* effectively eliminates the log file. The online file */usr/avs/license/logmessages* lists the log messages and their meanings.

Administrator Utilities

FLEXlm supplies a series of utility commands that let the administrator control and monitor license daemons and software use. End-users can monitor license activity. For example, *lmstat -a* reports on the status of server nodes, vendor daemons, vendor features, and users of each feature. *lmremove* will remove specific licenses and return them to the license pool. *lmdown* will shutdown all license daemons. These features are described below under "License Administration Tools". Binaries and man pages for these utilities are also located in the */usr/avs/license* directory.

Once Through

The following represents a typical series of license transactions:

1. A user on workstation A types the *avs* command to start AVS.
2. AVS needs to find a license file. It first checks for the user's environment variable *LM_LICENSE_FILE*. This environment variable is not defined. Therefore, AVS looks in the default license file location, */usr/local/flexlm/licenses/license.dat*, and finds the license file.
3. AVS examines the license file to determine the hostname of the server on which the license manager resides (the second field on the *SERVER* line). It contacts the license manager on that host through the designated TCP/IP socket.
4. The license manager on the server host is running. It receives the request for a license from AVS. Using the data in the *license.dat* it read when its process initialized, it finds the AVS vendor daemon *avs_lmd* associated with the application, starts up or contacts the vendor daemon, and forwards it the license request.
5. The AVS vendor daemon receives the request. It checks to see how many licenses have been checked out against the number of licenses that were defined for that particular *FEATURE* in the *license.dat* file when the vendor daemon initialized. If there are unused licenses, it sends the authorization to start back to the AVS process on the original host.
6. AVS starts. Periodically during the user's session, it checks back with the license daemon to make sure that it is still running.
7. When AVS exits, either normally or abnormally through a *Ctrl-C* or crash, the circuit of communications is repeated. This time, the transaction is to check the license back in to the vendor daemon.

License Daemon Down

If an AVS application loses contact with the license daemon *lmgrd*—possibly because the host on which it runs has crashed—a 15 minute timer is started. The user is given successive warnings to restart the license daemon or to save their work before the timer expires. If the license daemon has not been restarted by the end of the time period, the application will exit.

If you have established redundant license daemons on three or five host systems, then if AVS is able to contact two of the three defined, (or three of the five defined) license daemons, then AVS will be satisfied that it has reestablished contact with a suitable license daemon and will continue to execute.

Changing License Files

The license and vendor daemons read the *license.dat* file once when they initialize. If modifications are made to the license file "on the fly", then the administrator must either restart the *lmgrd* license daemon, or force it to re-read the license file with the *lmrread* administrative command.

Typical License File Configurations

The series of pictures in this section diagrams different common license configurations options. Each shows the particular *license.dat* file that implements the configuration.

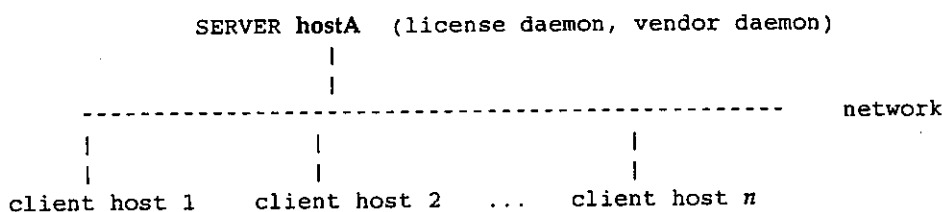
Note that explicit machine hostids and their position in the license file are key to the licensing configurations. Those hostids that you must provide are shown in **boldface**. These hostids are encrypted into the 20 character license code on the FEATURE lines and cannot be changed without obtaining a new license code.

Thus, you should have worked out your license configuration, including the exact hostids of the systems that will be involved, when you placed your order with the sales representative from which you purchased AVS.

The key difference between floating licenses and node locked licenses are that floating licenses allow AVS and its features to execute on any host in the network, subject only to the local restrictions that you define in your daemon options file. Node locked licenses allow AVS execution only on the designated host. Users may still *rlogin* to that host from another workstation or X terminal, subject to the local restrictions that you establish.

Floating License with One Workgroup

This configuration is useful in a centrally-administered network. AVS becomes a public utility "network service" that many users will be able to execute on a variety of hosts and displays limited only by the total number of floating licenses available, and any locally-defined restrictions.



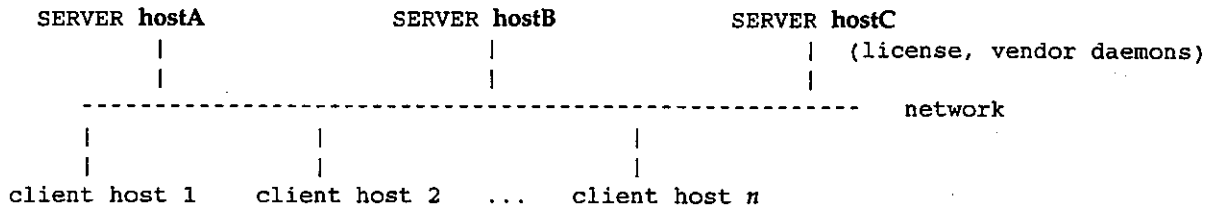
Corresponding *license.dat* file

```
SERVER hostA hostidA 1700
DAEMON avs_lmd /usr/avs/license/avs_lmd
FEATURE AVS avs_lmd 4.000 1-jan-94 n 0B98A091178E1B37FEA5 ""
FEATURE
```

Typical License File Configurations
(continued)

Floating License, One Workgroup, Redundant Servers

This configuration is the same as the previous, but more robust. To avoid having AVS become inaccessible because the single server is down (system crash, out for preventive maintenance), three license servers are available. The license daemons communicate and a majority constitutes a quorum that will permit AVS access. Running redundant servers requires an odd number of servers.



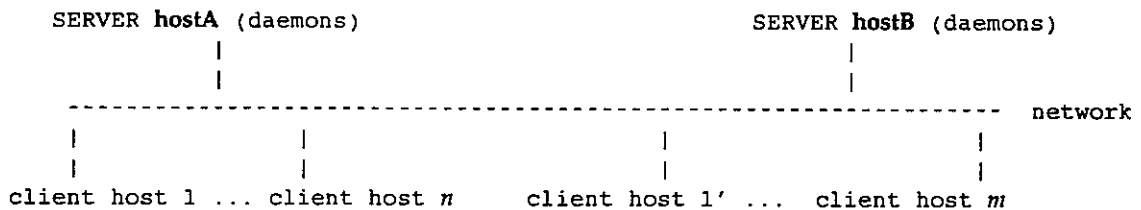
Corresponding license.dat file

```

SERVER hostA  hostidA  1700
SERVER hostB  hostidB  1700
SERVER hostC  hostidC  1700
DAEMON avs_lmd /usr/avs/license/avs_lmd
FEATURE AVS avs_lmd 4.000 1-jan-94 n 0B98A091178E1B37FEA5 ""
FEATURE
  .
  .
  .
  
```

Floating License, Multiple Independent Workgroups

This configuration is really multiple instances of the first configuration. It represents the common case where systems are all part of a single network—such as an Economics department and a Mechanical Engineering department at a university—but who otherwise have very little to do with each other administratively. Each group purchases and administers AVS floating license pools separately. Each workgroup can use the redundant license scheme in the second configuration if it wishes.



Corresponding license.dat files

For the workgroup using SERVER hostA:

```
SERVER hostA hostidA 1700
DAEMON avs_lmd /usr/avs/license/avs_lmd
FEATURE AVS avs_lmd 4.000 1-jan-94 n 0B98A091178E1B37FEA5 ""
FEATURE
```

For the workgroup using SERVER hostB:

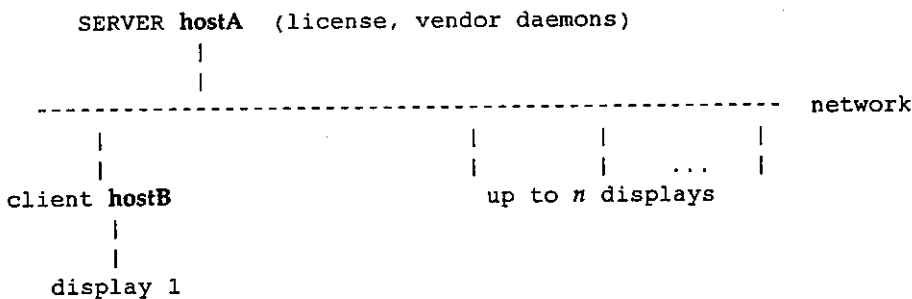
```
SERVER hostB hostidB 1700
DAEMON avs_lmd /usr/avs/license/avs_lmd
FEATURE AVS avs_lmd 4.000 1-jan-94 m CBF8D091C8E3363DB9A3 ""
FEATURE
```

This configuration restricts AVS execution to a specific host on the network. People on displays throughout the network can *rlogin* to this host and run as many copies of AVS as there are node locked licenses available. The local administrator can use the daemon options file to control access further.

The picture shows the license server *hostA* and the client machine *hostB* that is licensed to run AVS as separate systems. They can, of course, be the same machine.

This configuration would be typical in a small department with a limited number of users and only one system suitable to run AVS (perhaps one person on one machine), or on a large system supporting multiple X terminals.

Node Locked, Single
Host



Corresponding license.dat file

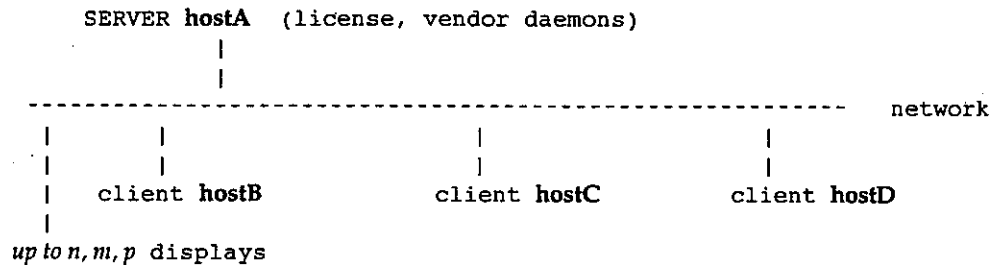
```
SERVER hostA hostidA 1700
DAEMON avs_lmd /usr/avs/license/avs_lmd
FEATURE AVS avs_lmd 4.000 1-jan-00 n 0B98A091178E1B37FEA5 "" hostidB
FEATURE
```

Typical License File Configurations
(continued)

Node Locked, Multiple Hosts

This configuration is similar to the previous except that multiple hosts (**hostB**, **C**, and **D**) are acting as AVS execution servers. Each has its own pool of fixed, node locked licenses *n*, *m*, and *p*. The server **hostA** need not be a separate system, but can be any of the other hosts. At the extreme, each host running AVS acts as its own server, and these three systems have nothing administratively to do with one another.

Unless restricted by other means such as local independent password files or the daemon options file, if a user trying to use AVS on **hostB** finds it full, he/she could *rlogin* to **hostC** and run AVS there.

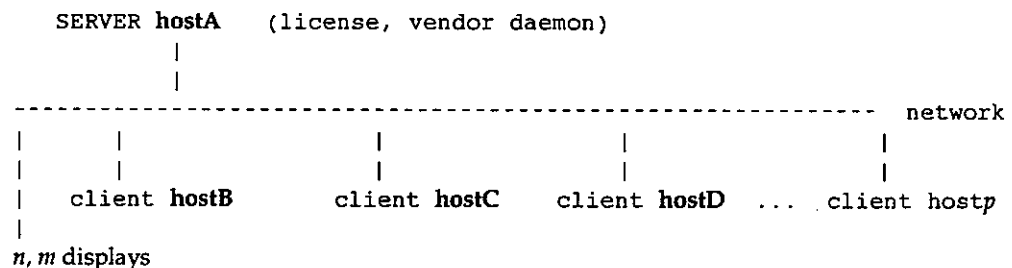


Corresponding license.dat file

```
SERVER hostA  hostidA 1700
DAEMON avs_lmd /usr/avs/license/avs_lmd
FEATURE AVS avs_lmd 4.000 1-jan-00 n 0B98A091178E1B37FEA5 "" hostidB
FEATURE AVS avs_lmd 4.000 1-jan-00 m CBF8D091C8E3363DB9A3 "" hostidC
FEATURE AVS avs_lmd 4.000 1-jan-00 p 0B3810C1CDAC63A816A9 "" hostidD
```

Mixed Node Locked and Floating Licenses

This configuration shows one server host dispensing access to a combination of node locked and floating license users. People attempting to run from a node locked host consume that host's pool of licenses. Floating licenses can be used from anywhere on the network. The main subtlety is that the node locked FEATURE lines should proceed the floating FEATURE lines (no trailing **hostid**) or users from node locked hosts will be awarded floating licenses first.



Corresponding license.dat file

```
SERVER hostA  hostidA 1700
DAEMON avs_lmd /usr/avs/license/avs_lmd
FEATURE AVS avs_lmd 4.000 1-jan-00 n 0B98A091178E1B37FEA5 "" hostidB
FEATURE AVS avs_lmd 4.000 1-jan-00 m 0B98A091178E1B37FEA5 "" hostidC
FEATURE AVS avs_lmd 4.000 1-jan-00 p 0B98A091178E1B37FEA5 ""
```

hostids

The AVS *Installation and Release Notes* for each platform describe what command to use on your workstation type to see the hostid for your systems. This is an abbreviated listing that may be superceded by the information in the *Installation and Release Notes*.

```
Sun SPARCstations  /usr/bin/hostid
IBM RS/6000        uname -m
HP 9000/7xx        /etc/lanscan
Silicon Graphics 4D  /etc/sysinfo -s
```

Note: On HP 9000/700-series systems, the licensing mechanism uses the hardware ethernet address, not the system hostid. */etc/lanscan* lists the ethernet address.

Note: On Silicon Graphics workstations, the */etc/sysinfo -s* command produces a decimal representation of the hostid. This is the number that you should report to Advanced Visual Systems when discussing licensing issues. However, the *license.dat* file requires the hexadecimal representation of the hostid. You can either convert the numbers yourself, or use the */etc/sysinfo* command without the "-s" option to print out the hexadecimal hostid. Use the digits in the first four slots and ignore the trailing zeroes. The license codes that you receive from Advanced Visual Systems will have the correct representation of the hostid already in them.

Local Control Options

As the AVS license administrator, you can customize local use of AVS and its features using a *daemon options file* that can be specified as the fourth parameter on the DAEMON line in the *license.dat* file. This options file allows you to reserve licenses, to allow or disallow use of your software to certain entities, and to set software timeouts.

The following keywords are supported:

RESERVE

Insures that AVS or one of its features will always be available to one or more named users, groups of users, host computer systems, or specific displays.

INCLUDE

Specifies a list of users, hosts, displays, or groups of users who are allowed access to AVS or one of its features.

EXCLUDE

Disallows certain users, hosts, displays, or groups of users access to AVS or one of its features.

GROUP

Specifies a group of users for use in the other commands.

TIMEOUT

Allows licenses that are idle to be returned to the free pool, for use by someone else.

REPORTLOG

Specifies that a logfile be written suitable for use by the Enhanced User Tools report writer. DO WE USE THIS??

NOLOG

Causes messages of the specified type to be filtered out of the daemon's log output.

In order to use the daemon options capability, the administrator creates a daemon options file and lists its pathname as the fourth field on the AVS vendor DAEMON line. The daemon options file consists of lines in the following format:

```
RESERVE number feature {USER | HOST | DISPLAY | GROUP} name
INCLUDE feature {USER | HOST | DISPLAY | GROUP} name
EXCLUDE feature {USER | HOST | DISPLAY | GROUP} name
GROUP name <list_of_users>
TIMEOUT feature timeout_in_seconds
NOLOG {IN | OUT | DENIED | QUEUED}
REPORTLOG file
```

Lines beginning with the sharp character (#) are ignored, and can be used as comments. If the filename in the REPORTLOG line starts with a + character, the old report log file will be opened for append.

For example, the following options file would reserve a copy of feature AVS for user *pat*, three copies for user *lee*, and a copy for anyone on a computer with the hostname of *terry*. QUEUED messages will be omitted from the log file. In addition, user *joe* would not be allowed to use the feature AVS:

```
RESERVE 1 AVS USER pat
RESERVE 3 AVS USER lee
RESERVE 1 AVS HOST terry
EXCLUDE AVS USER joe
NOLOG QUEUED
```

If this data were in file */usr/local/local.options*, then you would modify the license file DAEMON line as follows:

```
DAEMON avs_lmd /usr/local/xxx /usr/local/local.options
```

**License
Administration
Tools**

Binaries and *man* pages for the following utilities are located in the */usr/avs/license* directory.

lmstat

License administration is simplified by the *lmstat* utility. *lmstat* allows the user of FLEXlm to instantly monitor the status of all network licensing activities. *lmstat* allows the administrator at a site to monitor license management operations including:

- which daemons are running
- users of individual features
- users of features served by a specific DAEMON

The *lmstat* syntax is as follows:

```
lmstat [-a] [-S DAEMON] [-f feature] [-s server]
       [-t value] [-c license_file]
       [-A] [-l regular expression]
```

- a Display everything
- A List all active licenses
- c *license_file*
Use *license_file*
- S *DAEMON*
List all users of DAEMONS features
- f *feature_name*
List users of feature(s)
- l *regular expression*
List users of matching license(s)
- s *server_name*
Display status of server node(s)
- t *value*
Set *lmstat* timeout to *value*.

lmdown

The *lmdown* utility allows for the graceful shutdown of all license daemons (both *lmgrd* and all vendor daemons) on all nodes. Type *lmdown* with the correct license file in either */usr/local/license.dat*, or the license file pathname in the environment variable *LM_LICENSE_FILE*. In addition, *lmdown* takes the *-c license_file_path* argument to specify the license file location. *lmdown* can only be executed by the root user. The local administrator should protect the execution of *lmdown*, since shutting down the servers will cause loss of licenses.

lmlist

The *lmlist* utility will list the users of any individual feature, in much the same way as *lmstat -f*. To use *lmlist*, type *lmlist <feature name>*. A list of users of the selected feature will be displayed.

lmremove

The *lmremove* utility allows the administrator to remove a single user's license for a specified feature. This could be required in the case where the licensed user was running the software on a node that subsequently crashed. This situation will sometimes cause the license to remain unusable. *lmremove* will allow the license to return to the pool of available licenses.

lmremove's syntax is as follows:

```
lmremove [-c file] feature user host [display]
```

lmremove will remove all instances of *user* on node *host* (on display *display*, if specified) from use of *feature*. If the optional *-c file* is specified, the indicated file will be used as the license file. The administrator should protect the execution of *lmremove* since removing a user's license can be disruptive.

lmreread

The *lmreread* utility will cause the license daemon to reread the license file and start any new vendor daemons that have been added. In addition, all pre-existing daemons will be signaled to re-read the license file for changes in feature licensing information. Usage is:

```
lmreread [-c license_file]
```

Note: if the *-c* option is used, the license file specified will be read by *lmreread*, NOT by *lmgrd*; *lmgrd* re-reads the file it read originally. Also, *lmreread* cannot be used to change server node names or port numbers. Vendor daemons will not re-read their option files as a result of *lmreread*.

付録2 Using AVS
with Licenses

USING AVS WITH LICENSES

CHAPTER SIX

Introduction

AVS and its associated applications are licensed products of Advanced Visual Systems Inc. Access to AVS and its applications (such as the AVS Animation Application) is controlled by the Flexible License Manager (FLEXlm) network-wide floating licensing system from Highland Software.

When your installation purchased AVS from Advanced Visual Systems, it purchased a certain number of *license tokens*. A license token represents one "use" of the AVS software. License tokens can be so-called *floating licenses* that are available network-wide, allowing you to run AVS on any host on the network. Alternatively, they may be *node locked*, meaning that you can run AVS only on designated host systems.

Your local administrator may have defined additional local rules for AVS use, such as reserving licenses for particular users, defining explicit lists of who can or cannot use AVS, declaring that it can only be run from certain displays, and setting timeouts that will return licenses that have been idle to the system so that others can use them.

When correctly installed and functioning, the licensing mechanism is largely transparent. Those conditions that make the license control visible are discussed in this document. This document is also available online in the printable PostScript file `/usr/avs/license/user.ps`. (The printer must support the Palatino font.) Using this document, you will be able to understand, diagnose, and solve licensing problems, often without the assistance of your administrator.

The Mechanism

When you first start AVS or one of its associated applications, the software will look for a *license.dat* file. Finding this file, it will contact a program called a *license daemon* running on a host system somewhere in your network. The license daemon finds another program, the *AVS vendor daemon*, that is also running on the remote host, and gives it your program's request to run.

The AVS vendor daemon compares your "check out" request against the number of simultaneous uses allowed in the *license.dat* file. If there are still unused licenses available, it gives your AVS application permission to go ahead and run.

When you exit AVS, either normally or abnormally through a Ctrl-C or a crash, your license token is checked back into the vendor daemon so that others can use it.

If your application cannot contact the license daemon, it will not be able to run.

You Need to Know...

1. Find out your local license restrictions.

From your local administrator, find out how AVS use is governed at your site:

- How many licenses are freely-available floating licenses? How many are node locked, and to which hosts?
- Are there additional local rules such as access lists that you need to be on, or certain displays that you must use?
- Different AVS "features" may be regulated by separate license token pools. For example, there may be 50 licenses available for AVS, but only 5 available for the AVS Animation Application. Each may have separate rules under the two items above.

2. Find out where the *license.dat* file is kept.

When you start any AVS application that is license controlled, that application **must** be able to find a *license.dat* file.

In the default configuration as shipped by Advanced Visual Systems Inc., *license.dat* files are kept in */usr/local/flexlm/licenses*. Look to see if this directory exists, and if its *license.dat* file contains FEATURE lines with the various AVS applications defined. If so, it is probably the correct license file and you need do nothing special to access it.

If your local administrator has placed the *license.dat* file elsewhere, then you must find out from them where it is. If your host cannot directly access the *license.dat* file through a UNIX path specification, you will need to copy it to someplace where it can be accessed.

Next, define the environment variable `LM_LICENSE_FILE` to point to the *license.dat* file. *ksh* or *sh* users would do this in one of their session startup files as follows:

```
LM_LICENSE_FILE=/usr/share/flex/licenses/license.dat
export LM_LICENSE_FILE
```

while *csh* users would do it like this:

```
setenv LM_LICENSE_FILE /usr/share/flex/licenses/license.dat
```

Replace the example */usr/share/flex/licenses/license.dat* with whichever pathname is appropriate. Note that the *license.dat* file may be named something else such as *avsllicense.dat*.

It is possible that you may be using more than one application that controls its use through FLEXlm. In this case, you may need to define a search path of *license.dat* files. In the *csh*, define the search path for the `LM_LICENSE_FILE` environment variable as follows:

```
setenv LM_LICENSE_FILE /usr/local/license.dat:/u2/flexlm/chemlicense.dat
```

The `LM_LICENSE_FILE` environment variable is only necessary if the *license.dat* file is not in */usr/local/flexlm/licenses*.

The file */usr/avs/license/license.dat* as shipped by Advanced Visual Systems is only a template license file, meant to be edited and copied by the local administrator; its format and data may not be correct for your installation, and its shipped codes are not real values.

3. Find out where the license daemon program or script is kept. Find out if you are allowed to restart it, and how to

do it.

Licensed AVS applications will not run without the license daemon and vendor daemons being present.

The license daemon is normally started as part of the boot procedure for the host(s) that is acting as the license server. The license daemon starts the vendor daemon. Thus in, the normal course of events both should be present.

If they are not present, somebody has to start them. Your local administrator will have developed some policy on this: either restricting it to a root privilege on the license server host, restricting it to a UNIX-defined group privilege, or allowing world access.

A copy of the license daemon and vendor daemon is shipped with AVS in */usr/avs/license/lmgrd* and */usr/avs/license/avs_lmd*. These may or may not be the "right" binaries, as your administrator may have copied or moved them to another directory such as */etc*.

Other complicating factors are:

- The license daemon has to find its own correct *license.dat* file.
- Your network may be running multiple redundant license and vendor daemons so that work can continue if one fails.
- The license daemon generates a log file. The output of the license daemon command must be redirected away from *stdout* to the correct log file location.

All of these conditions may prompt your administrator to start the license daemon(s) with special parameters from a startup script.

As a general statement, there is no disadvantage to having multiple people trying to start license daemons. The first license daemons get the TCP/IP connection socket, and the subsequent daemons simply idle uselessly waiting to acquire the socket.

Thus, find out from your local administrator the policy and procedure for restarting license daemons. It may range

from "call this phone number" to "rlogin to host penelope, and type */etc/localavslcstart*".

If you have a valid, accessible *license.dat* file, and the license and vendor daemons are running so that the AVS application can contact them, the existence of license control will be transparent.

Otherwise, the sections below describe the most common occurrences and how to deal with them.

AVS periodically contacts the license daemon while it is running. If AVS loses contact with the license daemon—either because the daemon itself died, or the system on which it was running crashed or became inaccessible—a yellow-bordered warning window will pop-up on your screen declaring:

```
The connection to the license daemon has been lost.
You have 15 minutes to save your work or
restart the license daemon before your AVS session ends.
```

In the terminal emulator window from which you started AVS, this message appears and periodically repeats:

```
Attempting reconnection to license server for AVS
```

The prudent thing to do is to first save your work (Write Network in the Network Editor, Save Scene in the Geometry Viewer, etc.) and then turn your attention to restarting the license daemon.

If the license daemon does not restart, then the warning message will be repeated when 5 minutes remain. At the end of 15 minutes, the AVS session will exit.

Use the local procedure that you discovered from your administrator to get the license daemon restarted.

Some installations will run three or five redundant license daemons so that if one fails, the remaining two (or three) will continue to service the AVS applications.

What Can Go Wrong

*Pop-
Up Message—
Connection to the
license daemon has
been lost*

Problems Starting AVS Applications

The usual messages that you will see when you start an AVS application are fairly self-explanatory. They are written to the terminal emulator window from which the original AVS application was started.

A complete list of messages is kept for user-reference in the file */usr/avs/license/usermessages*. These are the most commonly seen.

cannot connect to license server

Your host's attempt to connect with the license daemon has failed. This could be because the license daemon is down, the host it runs on is down, or network traffic is slow. Connect requests will timeout after 30 seconds.

cannot connect to a license server

The DAEMON name specified in your *license.dat* FEATURE line does not match the vendor daemon name.

cannot find license file

The license file cannot be opened. The license mechanism first uses your LM_LICENSE_FILE environment variable, if present. Next it looks for */usr/local/flexlm/licenses/license.dat*. Something is preventing your access to the license file.

Clock difference too large between client and server

The system clock on your host and that of the license daemon must be set within 27 minutes of each other.

feature has expired

Today's date is after the expiration date in the license file. This may occur for demonstration, evaluation, or beta copies of software.

licensed number of users already reached

There were n licenses purchased for this AVS feature, and yours is the $n+1$ request. This may also appear as "request for more licenses than this feature supports".

User/host not on INCLUDE list for feature

The local administrator has established local access lists for the feature. Contact your administrator.

feature checkin failure detected at license server

This is somewhat serious and should be brought to the attention of the administrator. When it occurs, it is usually because

the host on which the application was running has crashed. A license token may be temporarily "lost" from the pool.

**License Monitoring
Utilities**

The license software has utilities that let you see the license daemons, vendor daemons, and which users have licenses checked out on which machines. Binaries of these utilities, along with their man pages are shipped with AVS in */usr/avs/license*.

The most universally useful command is *lmstat -a*. It produces a listing like the following:

```
hera 5% /usr/avs/license/lmstat -a
lmstat - Copyright (C) 1989, 1990, 1991, Highland Software, Inc.
Flexible License Manager status on Fri 1/31/92 15:41
```

License server status:

```
hera: license server UP (MASTER)
```

Vendor daemon status (on hera):

```
avs_lmd: UP
```

Feature usage info:

```
Users of AVS: (Total of 10 licenses available)
```

```
Users of AVS/beta: (Total of 10 licenses available)
```

```
dkfritz at hera on /dev/ttyq2 (v4.000), started Fri 1/31/92 at 15:41
dkg at putty on /dev/tty4 (v4.000), started Fri 1/31/92 at 09:03
```

```
Users of AVS-Animator: (Total of 10 licenses available)
```

```
Users of AVS-Animator/beta: (Total of 10 licenses available)
```

```
dkfritz at hera on /dev/ttyq2 (v4.000), started Fri 1/31/92 at 15:50
```

This lets you know who to call up on the phone and try to convince them to logout.

More Information

If you wish more detailed information on the licensing mechanism, see the *AVS License Administration* manual. This accompanies the *AVS Installation and Release Notes*. It is also available online in the printable Postscript file */usr/avs/license/admin.ps*. The

Postscript printer must support the Palatino font.