

本資料は2000年 3月3日付けて登録区分
変更する。

東濃地科学センター 【研究調整グループ】

フラクタルモデルを用いた 水理学的不均質場の解析

(動力炉・核燃料開発事業団 契約業務報告書)

1995年 3月

本文の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせ下さい。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松 4 番地 49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184
Japan

©核燃料サイクル開発機構
(Japan Nuclear Cycle Development Institute)
1995

~~この資料は、動燃事業団社内における検討を目的とする社内資料です。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使用しないよう特に注意してください。~~

~~本資料についての問い合わせは下記に願います。注)~~

~~〒509-51 岐阜県土岐市泉町定林寺959-31~~

~~動力炉・核燃料開発事業団~~

~~東濃地科学センター 技術開発課~~

本資料は2000年3月31日付けで登録区分
変更する。

東濃地科学センター 【研究調整グループ】

フラクタルモデルを用いた 水理学的不均質場の解析

(動力炉・核燃料開発事業団 契約業務報告書)

1995年3月



フラクタルモデルを用いた水理学的不均質場の解析

高瀬博康*、深谷友紀子*

要 旨

統計的自己アファインフラクタルモデルに基づくMACRO AFFINITY コードを用いて、東濃地域のウラン鉱床部分を含む鉛直断面の透水係数場の不均質性を現実的かつ詳細に表現した水理解析を実施した。

4つの試錐孔における見かけ比抵抗値測定結果に基づきフラクタル次元を推定するとともに、測定点での透水係数値をコンディショニングしたフラクタル透水係数場を作成し、いくつかの水理境界条件についての地下水流動解析を行った。また、この流速場に基づきパーティクルトラッキングの計算を行ったところ複数の時系列ソースからの寄与をコンボリューションしたパーティクル分布は、現在のウランの分布を定性的に再現するものとなった。この結果は、上述したフラクタルモデルによる水理解析の本問題への適合性を検証するものと見ることができるとともに、東濃地域のウランの分布について水理学的な因子、即ち当該領域へウランを供給し得た地下水移行経路の有無、により説明し得る部分があることを示していると考えられる。

さらに、フラクタルデコンボリューションの手法により10cmグリッドのより詳細な解析を行ったところ、流速分布及び推定されるウラン分布（パーティクル分布）にも実際のサイトで見られるものに類似した、より大きなスケールと自己相似的なパターンが見られ、階層構造的に組み込まれるいくつかのスケールでの不均質性を有する本地域の地層（特に

本報告書は、日揮株式会社が動力炉・核燃料開発事業団との契約により実施した業務の成果である。

契約番号： 0600790

事業団担当部課室および担当者：東濃地科学センター 技術開発課 前川 恵輔

*：日揮株式会社 原子力・環境・エネルギー事業本部

土岐夾炭累層下部層) に対するフラクタル水理モデルの有効性が明らかになったものと考えられる。

今後は、MACRO AFFINITY コードの改良版 (version 2.0) が、平成 7 年 3 月に完成することから、ここで付加された機能、特に複数の異なるフラクタル特性を持つ地層を組み合わせる機能を用いて、断層の上下を明確に区分した解析等、より現実的な解析を行うことによって本手法の適用性を高めていくことが肝要であると考える。

Analysis of inhomogeneous geometry with fractal model

Hiroyasu Takase*
Yukiko Fukaya*

Abstract

A set of detailed and realistic flow/transport calculations using the stochastically self-affine fractal model MACRO AFFINITY were attempted for a highly heterogeneous 2D (vertical) transmissivity field in Tono uranium mine.

A number of realizations of the fractal transmissivity field which have the fractal dimension same as the one estimated from the apparent electric resistance data set along the boreholes and are conditioned on the measurement points (boreholes) were generated. Based upon these fractal transmissivity field, a number of flow and transport calculations were performed. The particle distribution, which was derived via convolution of the effects of the multiple time dependent sources, indicated a fairly good agreement with the current distribution of the uranium deposit. This implements;

- applicability of the fractal model to this system is verified to some extent,
- distribution of uranium could be explained by considering hydrological factors, i.e., the distribution of the flow path which contributed to the supply of the uranium.

Further analysis with finer resolution was also attempted by utilizing the fractal deconvolution method. The resulting flow field and particle distribution indicated a channel structure which is self-

Work performed by JGC Corporation under contract with Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation

PNC Liaison : Chubu Works, Waste Isolation Research Section, Keisuke Maekawa

* Nuclear & Advanced Technology Division, JGC Corporation

similar to the pattern in larger scales. The pattern is consistent with the one seen in the actual site and, thus, applicability of the fractal model to this site which possesses a hierarchical (heterogeneous) correlation structure was demonstrated.

For the future R&D, a set of calculations considering further realistic features of the site, e.g., difference of the fractal property in the subregions above and below the fault, should be carried out. The latest version of MACRO AFFINITY (version2.0), which is due in March 1995, enables these necessary modifications.

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
2. MACRO AFFINITY コードの概要	4
2.1 フラクタル透水係数場モデル	4
2.2 流動解析モデル	10
2.3 物質移動解析モデル	16
2.4 非等方性媒体の模擬	32
2.4.1 フラクタルスケーリング則の数学的表現	32
2.4.2 異方的なフラクタル場の作成方法と作成例	35
3. 東濃鉦山周辺の水理条件及び解析対象領域の設定	42
3.1 地質概要	42
3.2 水理地質構造	43
3.3 地下水化学	47
3.4 解析対象領域	48
3.4.1 対象領域の設定	48
3.4.2 境界条件の設定	51
4. 不均質場における水理解析	54
4.1 対象領域の透水係数部分布に対するフラクタルスケーリング則の適合性	54
4.2 フラクタル特性値の推定	59
4.3 フラクタル透水係数場の作成	60
4.4 地下水流動解析	73
5. 統計的自己アファインフラクタルモデルによる水理解析結果の検証	98
5.1 ウランの分布状況	98
5.2 解析結果と試錐孔における物理検層データ統計的自己アファインモデルの比較 ・ 検討	106
5.2.1 解析手法	106

5.2.2 解析結果	107
6. 小領域についての追加解析	171
6.1 フラクタルデコンボリューション	171
6.2 小領域についての水理解析	180
7. まとめ	194
参考文献	195

図リスト

- 図2.1-1 フラクタル透水係数場の例
- 図2.2-1 隣接したセルの境界におけるフラックス
- 図2.2-2 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2.3-1 現行手法による平行流についての粒子軌道
- 図2.3-2 斜行平行流における疑似分散効果
- 図2.3-3 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2.3-4 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2.3-5 ケース(b)についてのより詳しい場合分け
- 図2.3-6 改良後の手法による粒子群の振る舞い
- 図2.3-7 DIVINITYによるパーティクルトラッキング結果の例
- 図2.4-1 分散の異方化による非等方透水係数場の例
- 図2.4-2 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2.4-3 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3.1-1 調査地域の模式柱状図
- 図3.2-1 古地形・堆積環境と地層の異質性
- 図3.2-2 水理地質構造モデルの例（東西断面）
- 図3.4.1-1 試錐孔配置
- 図3.4.1-2 解析対象領域
- 図3.4.2-1 考慮すべき境界条件の種類

- 図4.1-1 各試錐孔における垂直区分
- 図4.1-2 TH-5孔3a1層の見かけ非抵抗値測定データに基づき作成したバリオグラムに対するフラクタルスケーリング則のカイ自乗フィッティング結果
- 図4.1-3 TH-7孔3a1層の見かけ非抵抗値測定データに基づき作成したバリオグラムに対するフラクタルスケーリング則のカイ自乗フィッティング結果
- 図4.1-4 TH-8孔5層の見かけ非抵抗値測定データに基づき作成したバリオグラムに対するフラクタルスケーリング則のカイ自乗フィッティング結果
- 図4.3-1 フラクタル透水係数場
- 図4.4-1 地下水流動解析結果

- 図5.1-1 ウランの移行経路と濃集位置との関係
- 図5.1-2 各試錐孔に沿った γ 線強度、透水係数及びダルシー流速
- 図5.2.2-1 フラクタル透水係数場 Case 69 の場合のソース点の配置
- 図5.2.2-2 スナップショットの例
- 図5.2.2-3 各ソース点でのウラン供給フラックスの時間変化
- 図5.2.2-4 パーティクル分布と γ 線強度分布との比較結果
- 図5.2.2-5 コンボリューション後のパーティクル分布
- 図5.2.2-6 ウラン浸出開始0～1000Rd年後に解析対象領域に供給されたウランの分布
- 図6.1-1 フラクタルデコンボリューションの概念
- 図6.1-2 追加解析の対象とする小領域の配置
- 図6.1-3 追加解析の対象となる小領域のフラクタル透水係数場
- 図6.2-1 小領域に対する水理解析の結果（ダルシー流速分布）
- 図6.2-2 小領域に対する水理解析の結果（圧力分布）
- 図6.2-3 小領域におけるパーティクル分布
- 図6.2-4 全体の解析結果と小領域についての解析結果との比較

表リスト

表4.2-1 TH-1～4孔の標高100～200m区間に対する鉛直方向のフラクタル次元

表4.3-1 フラクタル透水係数場のケース設定

表6.1-1 小領域のフラクタル透水係数場作成のためのケース設定

1. フラクタルスケーリング則に基づく不均質透水係数場の理論

ここでは、本業務で使用するMACRO AFFINITY コードの背景となるフラクタルスケーリング則に基づく不均質透水係数場の理論についてまとめる。

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

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

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

$$\gamma_{(h)} = \left\langle \left\{ \varphi_{(x)} - \varphi_{(x+h)} \right\}^2 \right\rangle \quad (1.1)$$

但し、

$\phi(x)$; 位置 x における物理量 (例えば透水系数)

h ; 二点間の距離

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

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

$$\gamma_{(h)} = ah^{2p} \quad (1.2)$$

但し、

a, p ; 定数

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

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

幅広い適合性に加えて、統計的自己アファインモデルのもう一つの実用的な長所は、いわゆる地質統計的な意味でのInverse Problemに用いることができるという点である。サイト特性調査においては、広範囲にわたるサイトの中で限られた数の地点で測定が行われるのみであり、サイトの全体像を知るためには何らかの形で調査地点間を内挿することが必要となる (Inverse Problem)。ここでは、未知数の数 (全地点での物理量) に対して入手できる情報が限られており、このため、Inverse Problemの解は決して一意的には定まらない。統計的自己アファインモデルでは、調査地点での測定値に対して(1.2) 式をfittingすることによってバリオグラムの関数形 (具体的には定数 a , p) を推定し、調査地点間の全ての点での値をバリオグラムを満足する様に統計的に割り当てることが可能である。ここで、調査地点数が少なければ統計的試行 (realization と呼ばれる) により内挿される値は、試行の度毎に異なるものとなり、地点数が増すにつれて各realization は一定のパターン (恐らくは真のサイト特性) に収束していくこととなる。前出の根本的な情報不足に起因する不確実性がブラックボックスとして取り扱われ、従って最終的な評価の変動幅を定量化することができない従来の決定論的な手法と異なり、統計的自己アファインモデルを用いたアプローチでは、調査地点数に応じた不確実性が常に顕在化し定量化できるという利点を持っている。また、これをさらに進めれば、限られた調査地点数で不確実性を最小化する様な調査地点配置の明確化、といった問題にも応用することが可能である。

2. MACRO AFFINITY コードの概要

2.1 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 $\gamma\phi(h)$,

$$\gamma\phi(h) \equiv \langle |\psi(x+h) - \psi(x)|^2 \rangle \quad (2.1)$$

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

$$\gamma\phi(h) = ah^{2p} \quad (2.2)$$

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、

$$i) \langle \Psi^* \rangle \equiv \bar{\Psi} \quad (\bar{\Psi}: \text{実測データの平均})$$

$$ii) \langle (\Psi^* - \bar{\Psi})^2 \rangle \equiv (\text{実測データの分散})$$

が成り立つ。

上記のうち、(3)の第2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。

次に、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いだすために、以下の手順でデータセットの区間分割を行う。

- i) 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。
- ii) 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 i) の区間に割り振る。
- iii) 各区間でのバリオグラムの平均値を算出する。

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

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

$(\bar{\gamma}_i(h_i), h_i), (i=1, \dots, N)$ に対して、

$$\bar{\gamma}(h_i, p) = ah^{2p} \tag{2.3}$$

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 $(\bar{\gamma}_i(h_i), h_i) = (\ln[\bar{\gamma}_i(h_i)], \ln[h_i])$ に対して、

$$\ln[\bar{\gamma}(h_i, \alpha, \beta)] = \alpha + \beta \ln[h] \tag{2.4}$$

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 $\bar{y}_i = \ln[\bar{y}(h_i)]$ 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]。

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \left[\frac{\bar{y}_i - \bar{y}(h_{ij}, \alpha, \beta)}{\bar{\sigma}_i} \right]^2 \quad (2.5)$$

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 $\bar{\sigma}_\alpha$ 及び $\bar{\sigma}_\beta$ 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

$$f(\chi^2) = \frac{\chi^{2(\nu/2-1)} e^{-\chi^2/2}}{2^{\nu/2} \Gamma(\nu/2)} \quad (2.6)$$

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、次式で得られる信頼性レベル Q

$$Q = \int_{\chi^2}^{\infty} \frac{x^{2(\nu/2-1)} e^{-x^2/2}}{2^{\nu/2} \Gamma(\nu/2)} dx \quad (2.7)$$

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伴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。

$$\Psi(x)^* = \sum_K a_k e^{2\pi i k \cdot x} \quad (2.8)$$

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(2.2) を満たす[10]。

$$\langle |a_k|^2 \rangle \sim |k|^{-(2+2P)} \quad (2.9)$$

実際の計算に当たっては、(2.8) の級数展開を

$$\psi(x)^* = \sum_{k < N} a_k e^{2\pi i k \cdot x} \quad (2.10)$$

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。

- i) 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。
- ii) 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i)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。
- iii),ii) 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、ii)の操作においてフラクタルスケーリング特性が保持されていることは保証されている。

なお、i)の操作においては、(2.10)式の a_k についての条件が透水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 $|k|^{(2+2P)}$ で除することによって(2.10)式を満足する様に調整している。

また、i)～iii)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。本手法により作成したフラクタル不均質透水係数場の例を図2.1-1に示す。

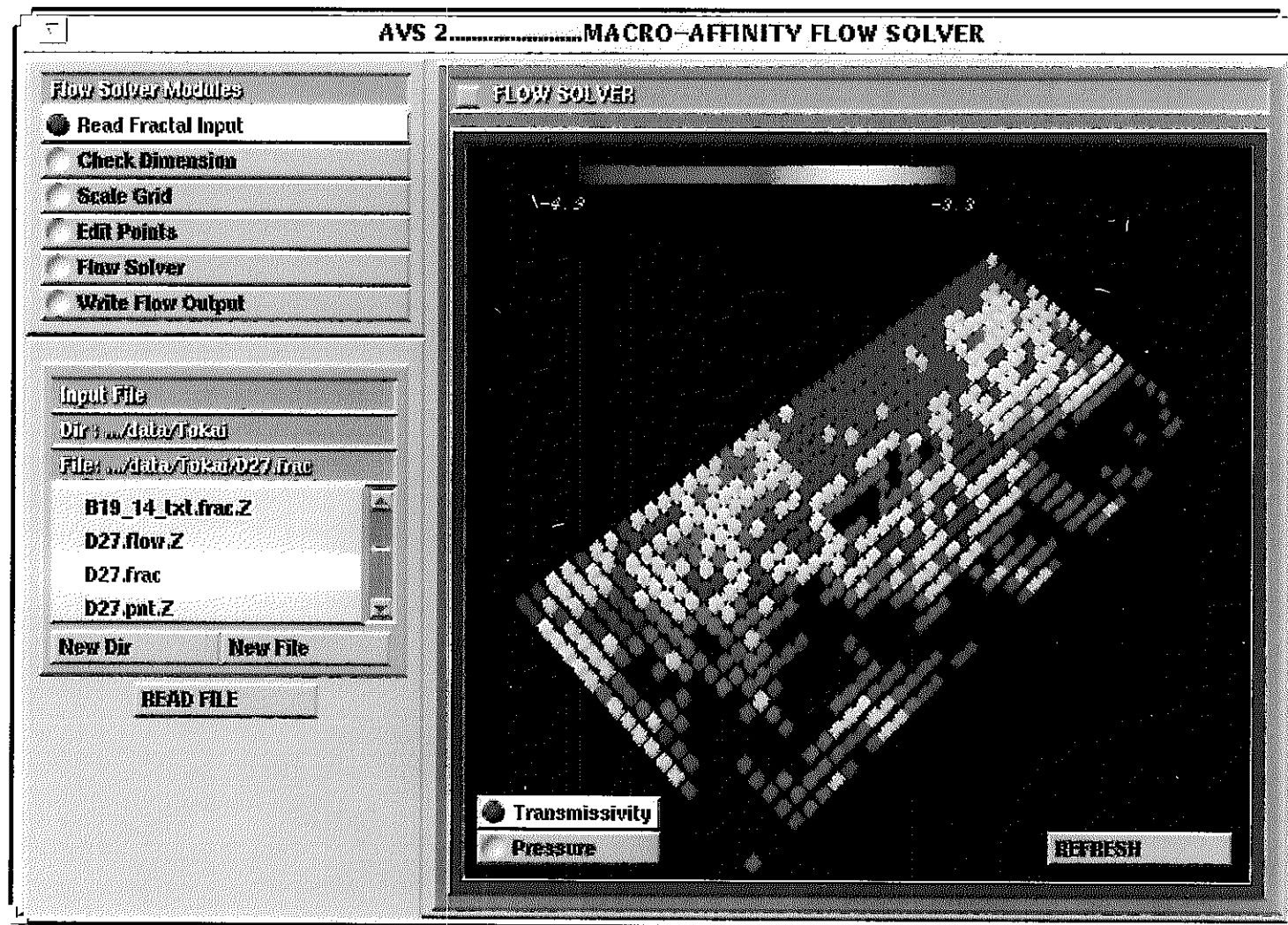


図 2.1-1 フラクタル透水係数場の例

2.2 流動解析モデル

不均質な透水係数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は、MACRO AFFINITYコードでは以下の仮定を設ける。

- i) 流速場は定常状態にある。
 - ii) 流体は非圧縮性であり、ダルシー則が成立する。
 - iii) 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。

$$\begin{aligned} e\theta u &= T(x) \nabla P(x), \\ \nabla \cdot [U] &= 0 \end{aligned} \tag{2.11}$$

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。

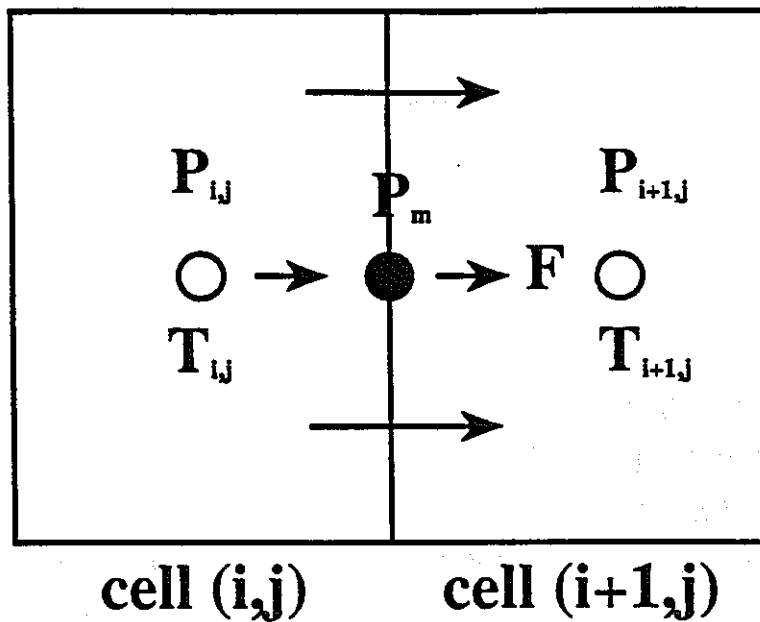
以上の支配方程式を与えられた任意の圧力分布、もしくはno-flux条件、あるいはこれらの組み合わせを境界条件として解法する。更に、領域内部の任意の点で圧力を指定し、この点をsourceもしくはsinkとすることが可能である。次に、数値解法について以下にまとめる。

(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2.2.-1は隣接する二つのセルを表す。ここで、 T_{ij} はセル (i,j) の位置にあるセルの透水量係数であり、 p_{ij} 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)



Schematic of numerical scheme for calculating cell interface fluxes.

図2.2-1 隣接したセルの境界におけるフラックス

(i-1,j) : 左側 (L)

(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、

$$F_R = T_{ij} \frac{(P_{ij} - P_m) \Delta y}{\Delta x / 2} = T_{i+1,j} \frac{(P_m - P_{i+1,j}) \Delta y}{\Delta x / 2} \quad (2.12)$$

となり、また、これを P_m について解いて、

$$P_m = \frac{T_{ij} P_{ij} + T_{i+1,j} P_{i+1,j}}{T_{ij} + T_{i+1,j}} \quad (2.13)$$

が得られる。更に、(2.13) を (2.12) に代入して、 F_R は、

$$F_R = \frac{T_{ij} T_{i+1,j}}{T_{ij} + T_{i+1,j}} \frac{(P_{ij} - P_{i+1,j}) \Delta y}{\Delta x / 2} \quad (2.14)$$

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。

(2.14) 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_{ij} 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2.2-2にAFFINITY-2Dによって解かれた流速場の例を示す。

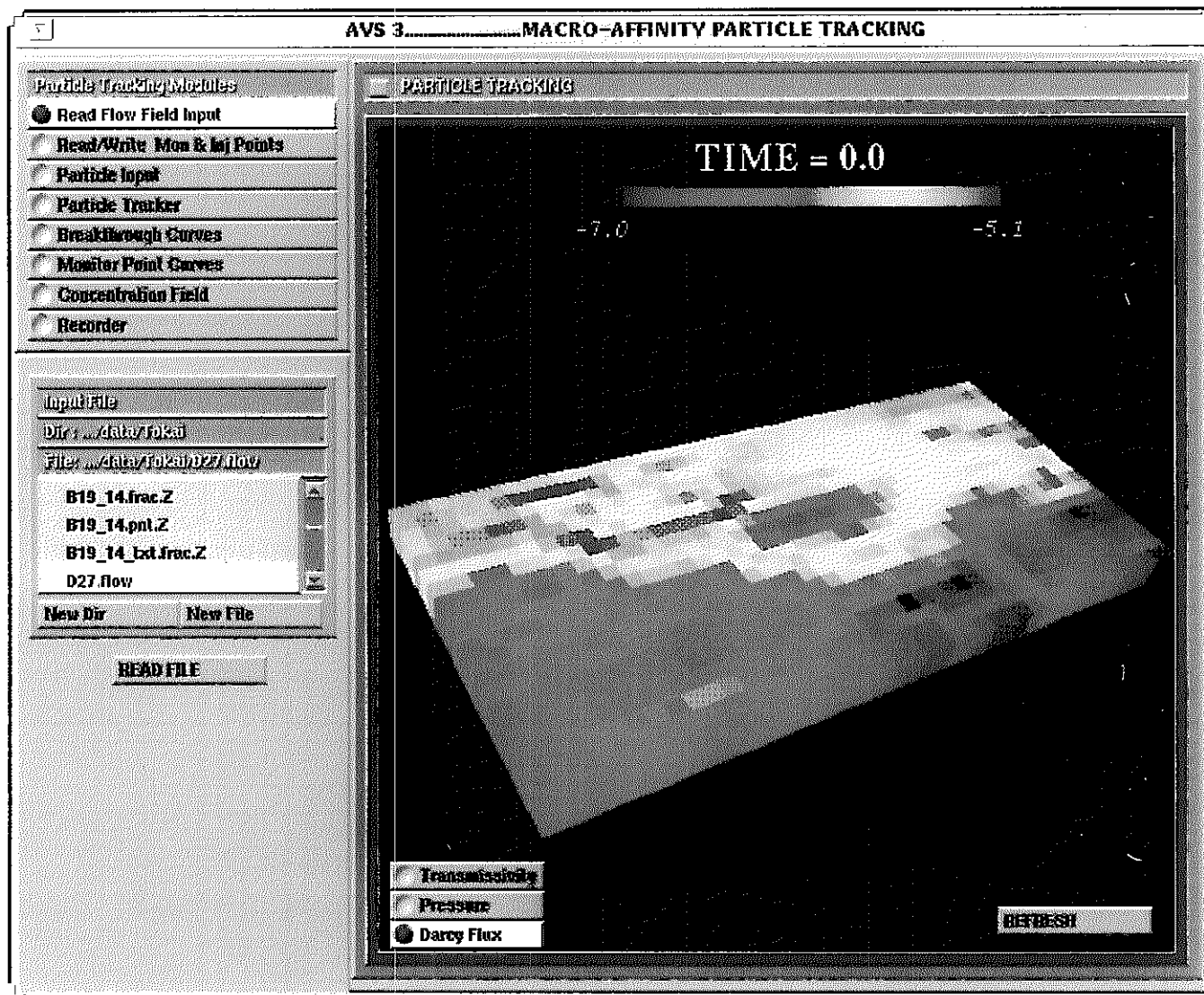


図 2.2-2 プレコンディショニングされた共役勾配法による流動解析の結果（流速場）

(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難しい。また、ガウス消去法のよう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。

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についての初期値推定値 x_0 が得られた時、次の形式の次回値を探す。

$$x_1 = x_0 + \sum_{i=0}^{s-1} \alpha_i P_i \quad (2.15)$$

ここで、 α_i は残差ベクトル

$$r_1 = b - Ax_1 = b - Ax_0 - \sum_{i=0}^{s-1} \alpha_i AP_i \quad (2.16)$$

のKノルムを最小化する様に選ぶものとする。但し、Kノルム $\| \cdot \|_k$ は $\| r_1 \|_k = r_1^T K r_1$ 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、

$$(AP_i)^T K (b - Ax_0 - \sum_{j=1}^{s-1} \alpha_j AP_j) = 0 \quad (2.17)$$

であり、この式は、 $(AP_j)^T K (AP_j)$ 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、 $P_0 = Pr_0$ と置く。
- (iii) 残差ベクトル最小条件の式を解いて a_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_1 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 $\text{grad} \| r_1 \|_k$ 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、

$$\tilde{A}^{-1}Ax = \tilde{A}^{-1}b \tag{2.18}$$

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。

2.3 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。

- i) 移流
- ii) 分子拡散
- iii) 各スケールでの分散現象
- iv) 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置に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、次の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、次式で得られる。

$$t_R = \frac{\Delta x}{F_R / (e\theta\Delta y)} \quad (2.19)$$

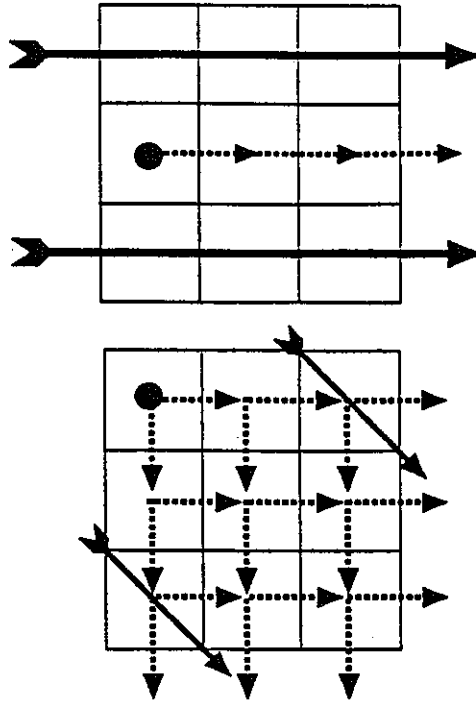
ここで、他の方向に向けての移動時間 t_L, t_T, t_B もまた(2.19)式と同様に表される。従って、もし時刻 $t=t_{in}$ にパーティクルがあるセルに流入したとしてこのパーティクルが移流によりセルの外に出る時刻として可能性があるものは、 $t_{in}+t_R, t_{in}+t_L, t_{in}+t_T$ 及び $t_{in}+t_B$ ということになる。

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衡流れを考えてみる。図2.3-1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。

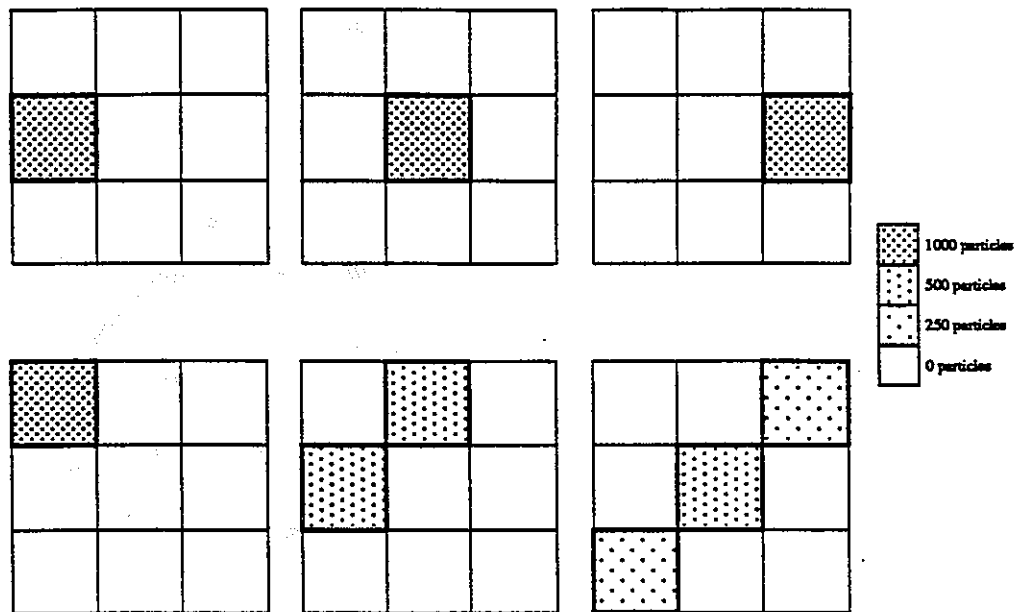
しかしながら、流れがグリッドを斜めに横切る場合(同図下)において入口境界と出口境界との間の関係を全く無視することとすれば、上部境界から進入したパーティクルが下部境界から外に出る、あるいは左側から進入したパーティクルが右側境界から外に出るという事態が生じ得る。これは、流れと直交する方向の分散成分を生ずることとなり、数値解法上の誤差要因の一つとなる。この効果を模式的に表したものが図2.3-2である。グリッドに平行な場合(同図上)には分散現象は生じていないが、グリッドを斜めに横切る場合(同図下)には上に述べたfictitiousな分散項が現れている。

この様な誤差を排除するために図2.3-3に示す様な方法で入口境界と出口境界との



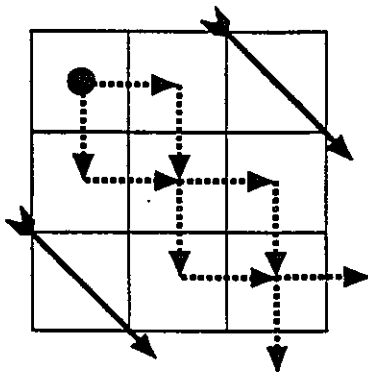
The variation of grid cell fluxes with grid orientation. Flow directions are marked with the solid arrows, and outward fluxes from each grid cell are denoted with dashed arrows. Top: flow parallel to grid cell edges. Bottom: flow aligned with grid cell diagonals.

図2.3-1 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2.3-2 斜行平行流における疑似分散効果



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

図2.3-3 疑似分散効果を低減するためのトラッキングスキーム

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侵入したとして、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。

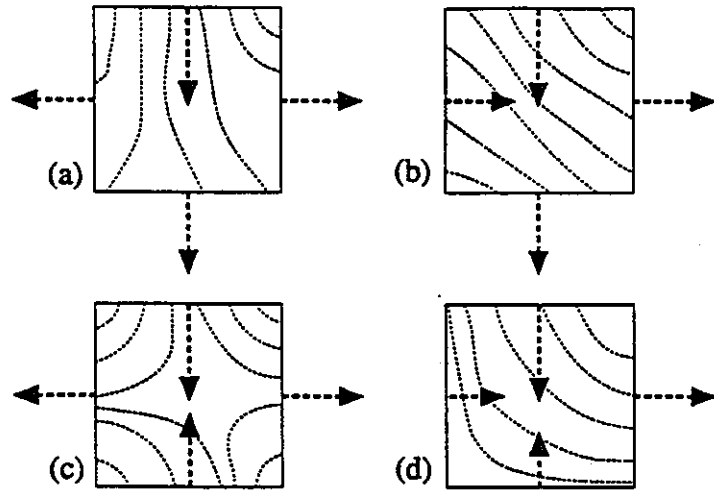
- (a)他の3境界とも流出フラックス
- (b)隣り合った2境界が流出フラックスで残りの1つが流入フラックス
- (c)向かい合った2境界が流出フラックスで残りが流入フラックス
- (d)1つが流出フラックスで他の2つが流入フラックス
- (e)3境界とも流入フラックス

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、以下の残りの4つのケース（図2.3-4参照）についてそれぞれ検討を加えることとする。

ケース(a)

図2.3-4(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。

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



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2.3-4 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

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

$$P_T = 0$$

$$P_B = \frac{F_B}{F_R + F_L + F_B} \quad (2.20)$$

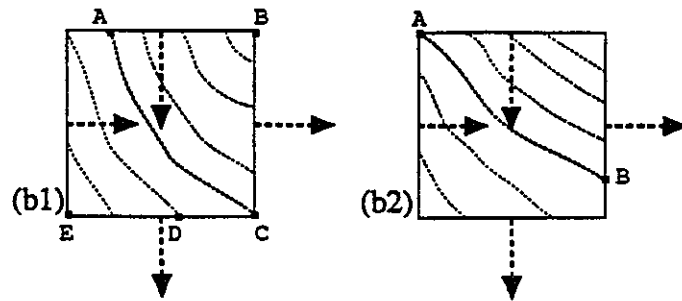
ケース(b)

図2.3-4(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2.3-5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過するパーティクルは下部境界から外に出ることとなる。従って、この2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下の様に与えられる。



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2.3-5 ケース(b)についてのより詳しい場合分け

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

$$P_L = 0$$

$$P_T = 0$$

$$P_B = \frac{F_B \frac{CD}{CE}}{F_R + F_B \frac{CD}{CE}} \quad (2.21)$$

(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、

$$P_R = 1$$

$$P_L = 0$$

$$P_T = 0$$

$$P_B = 0 \quad (2.22)$$

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と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じ、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る。

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2.3-5(b1)の表記に従えば、この比Rは、

$$R = \frac{(F_R - F_L) / \Delta y}{(F_B - F_T) / \Delta X} \quad (2.23)$$

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、

$$S = \max \left\{ 0, 1 - R \frac{\Delta y}{\Delta x} \right\} \quad (2.24)$$

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。

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

$$P_L = 0$$

$$P_T = 0$$

$$P_B = \frac{F_B S}{F_R + F_B S} \quad (2.25)$$

ケース (C)

図2.3-4(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、

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

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

$$P_T = 0$$

$$P_B = 0 \tag{2.26}$$

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、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、

$$P_R = 1$$

$$P_L = 0$$

$$P_T = 0$$

$$P_B = 0 \tag{2.27}$$

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 (2.25) 式で $F_B \rightarrow 0$ とすると (2.27) 式となることは容易に確認できる。

さて、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。

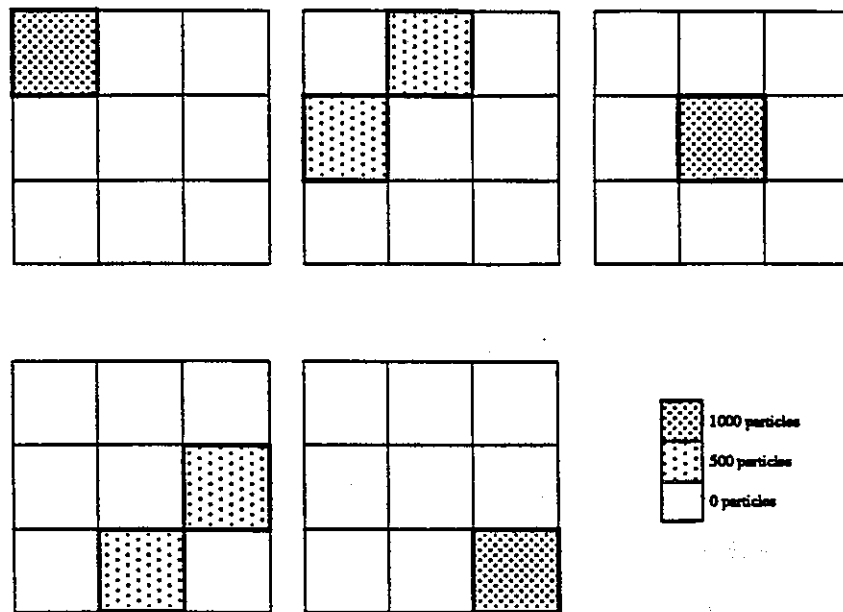
$$\begin{aligned}
 0 \leq r &\leq P_R && : \text{右側が出口} \\
 P_R < r &\leq P_R + P_L && : \text{左側が出口} \\
 P_R + P_L < r &\leq P_R + P_L + P_T && : \text{上部が出口} \\
 P_R + P_L + P_T < r &\leq P_R + P_L + P_T + P_B && : \text{下部が出口} \\
 P_R + P_L + P_T + P_B < r &\leq 1 && : \text{出口なし (シンク)} \quad (2.28)
 \end{aligned}$$

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2.3-1) 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2.3-6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、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”みかけ”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す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。



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2.3-6 改良後の手法による粒子群のふるまい

$$X(t + \Delta t) = X(t) + V\Delta t + a\sqrt{D\Delta t} \quad (2.29)$$

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、(2.29)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

$$P_e = \frac{v\Delta h}{D} \quad (2.30)$$

がある。(但し、 Δh は代表長さ)

P_e 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_e が1よりも十分小さいものとなり、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った状況が生じ得る。この様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2.3-7に示す。

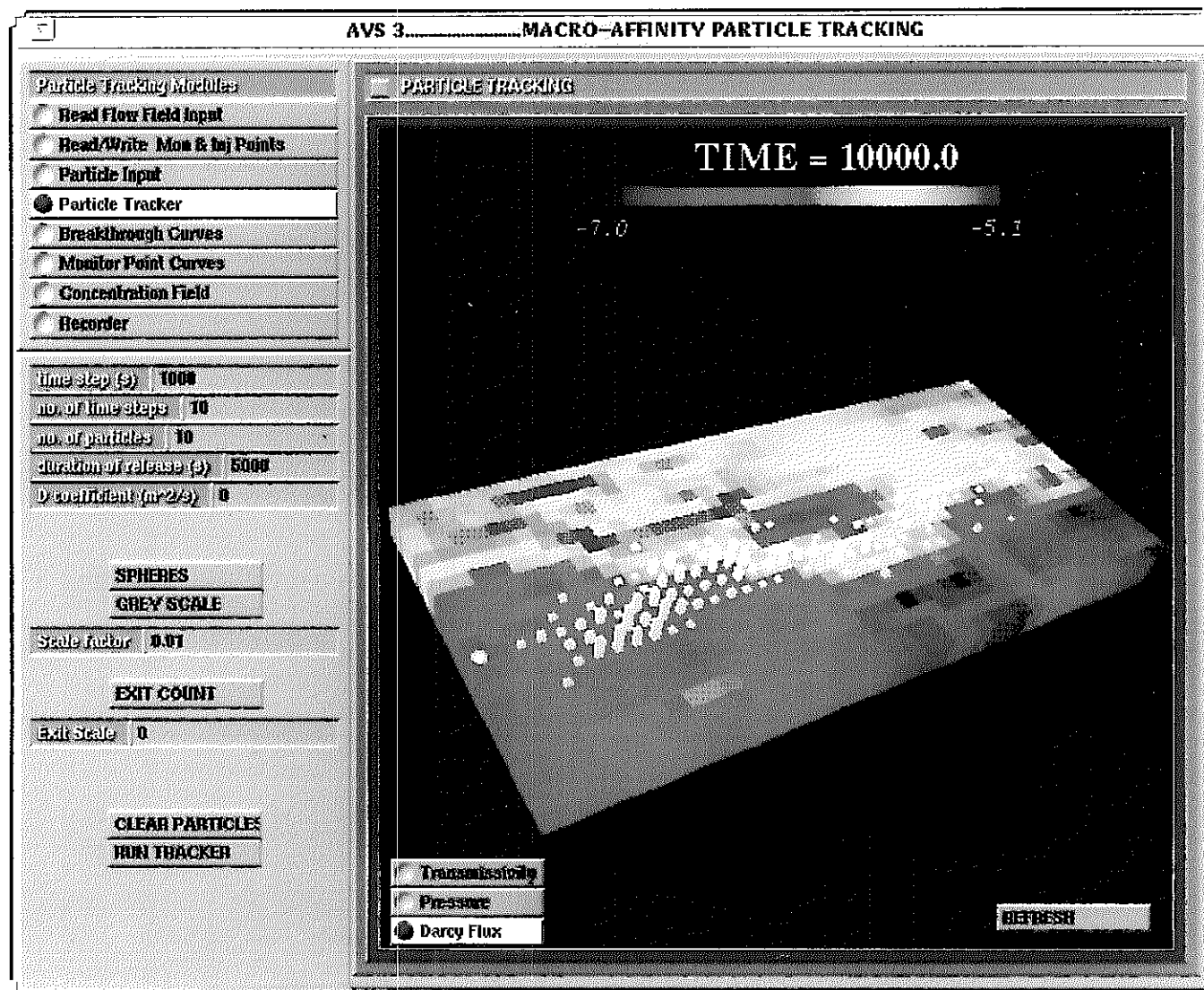


図2.3-7 DIVINITY よるパーティクルトラッキング結果の例

2.4 非等方性媒体の模擬

地層は程度の差こそあれ、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（水平方向）について強く相関しており、層と鉛直方向（垂直方向）には弱い相関しか示さない。本業務で対象とする東濃鉦山周辺の透水係数分布も、特に堆積岩部分については異方性の存在が予想される。

本節では、異方的な不均質性を有する解析対象透水係数場についてMACRO AFFINITYを適用するために、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し、本業務で用いる手法選定のための比較を行うこととする。

2.4.1 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。

既に述べた様に、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ァイ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 $v(X) \in \mathbb{R}^n$ を考え、等方場についてはこの $v(X)$ が次の式を満足するものとする。

$$\Gamma_v(H) \equiv \langle |v(x+h) - v(x)|^2 \rangle \propto h^{2P} \quad (2.31)$$

但し、 $h=|H|$
 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、統計的に自己アファインなものであることが保証される。

$$\langle \Delta v(RH)^2 \rangle = r^{2p} \langle \Delta v(H)^2 \rangle \quad (2.32)$$

$v(X)$ のグラフは、 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、

$$D_f = n + 1 - p \quad (2.33)$$

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、 $v(X)$ 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。

$a(K)$ を $v(X)$ のFourier変換、即ち、

$$v(X) = \int_{R^n} \exp(2\pi X \cdot K) a(K) dK \quad (2.34)$$

とする。この時、スペクトル密度 $S(K)$ は、

$$S(K) = a(K)^2 \quad (2.35)$$

となる。

さらに、Hを固定した場合、

$$\langle v(H+X) v(X) \rangle = \iint a(K_1) a(K_2) \exp[2\pi i (K_1 \cdot X + K_2 \cdot X + K \cdot H)] DK_1 DK_2 DX \quad (2.36)$$

が成り立ち、この事から直ちに以下が導かれる。

$$\Gamma_v(H) \propto \int_{R^n} S(K) [1 - \exp(2\pi i H \cdot K)] DK \quad (2.37)$$

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、 $K = |K| > k_0$ において $S(K) \sim K^{-(n-2p)}$ と指定して、単位ベクトルU及びNによって $H = hU$, $K = kN$ と表記すると、 $h \rightarrow 0$ において、

$$\begin{aligned} \Gamma_v(H) &\propto \int_{k_0}^{\infty} 1/k^{n+2p} \int_{S^n} [1 - \exp(2\pi i kh U \cdot N)] dN k^{n-1} dk \\ &\propto \int_{k_0 h}^{\infty} 1/w^{2p+1} \int_{S^n} [1 - \exp(2\pi i w U \cdot N)] dN dw h^{2p} \end{aligned} \quad (2.38)$$

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 $1 - \exp(2\pi i K \cdot N)$ が0に一様収束することから、

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

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、 $S(K) \sim K^{-(n+2p)}$ 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。

2.4.2 異方的なフラクタル場の作成方法と作成例

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、

$$\Gamma_v(H) \equiv \langle |v(X+H) - v(X)|^2 \rangle$$

がベクトル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式、

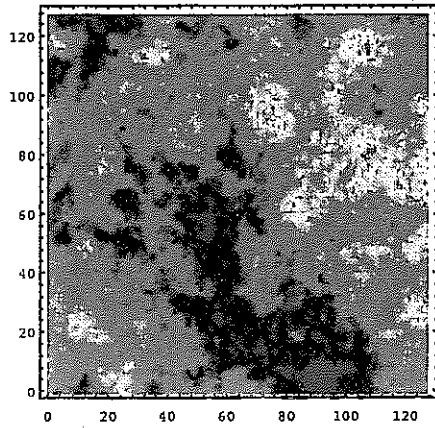
$$S(K) \sim k^{-(n+2p)}$$

を次の様に変更することである。

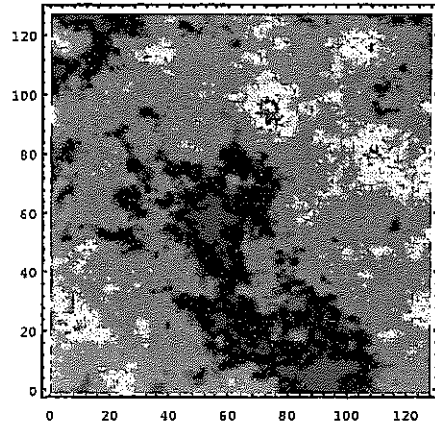
$$E[S(k_x, k_y)] \propto 1/[k_x^2 + (\alpha k_y)^2]^{n/2+p} \quad (2.39)$$

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。

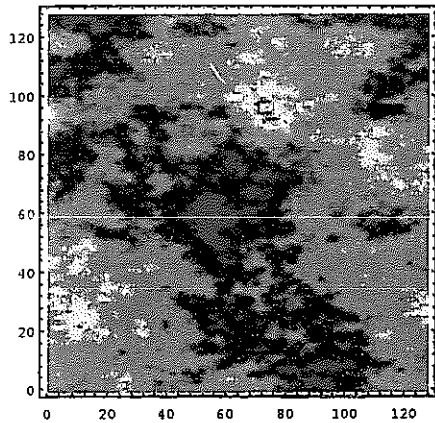
図2.4-1にこの方法で作成した異方的なフラクタル場（フラクタル次元はいずれの方向についても2.7）の例を示す。図中で、(a)は完全に等方的な場であり、



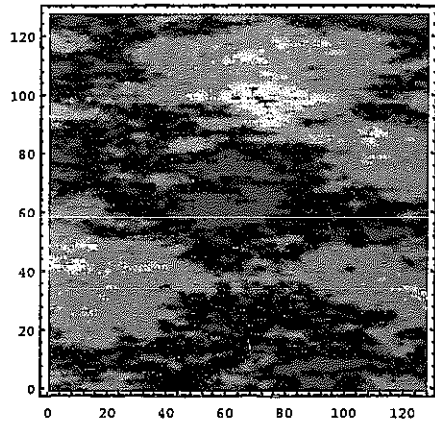
(a)



(b)



(c)



(d)

図2.4-1 分散の異方化による非等方透水係数場の例

(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、 $N=K/|K|$ として、

$$s(K) \sim k^{-(n+2P(N))}$$

という形でスペクトル密度を管理し、単位波数ベクトル N が $\pm I$ 方向の場合 $p(N)=p_1$ 、 $\pm J$ 方向の場合 $p(N)=p_2$ 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 U が N と平行となる時に支配的となる。実際、

$$\Gamma_v(H) \propto \int \int_{S^n} (h^{2p(n)} / w^{2p(n)+1}) \sin^2(w \cdot U \cdot N \pi) DN dw$$

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

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

$$\begin{aligned} p(n) &= p_1 && ((U \cdot I) > (U \cdot J)), \\ &= p_2 && ((U \cdot I) < (U \cdot J)). \end{aligned}$$

と設定しても、 J 方向の 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2.4-2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、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、接線についてコントロールすることである。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うことが出来る。

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、

$$F(x,y)=f(x) g(y) \quad (2.40)$$

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。

$$F(x,y)=\sum_{i=1}^m f_i(x) g_i(y) \quad (2.41)$$

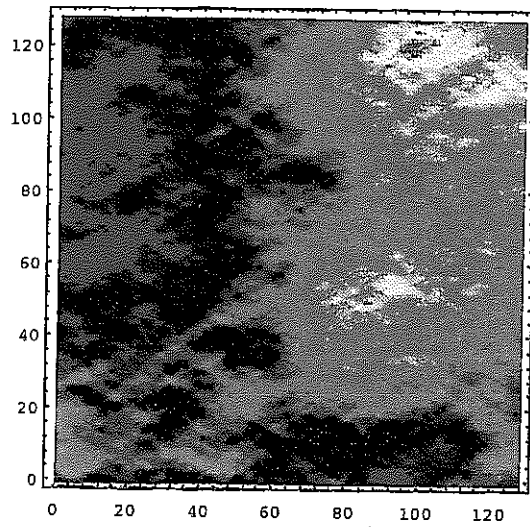


図2.4-2 スペクトル挙動の異方化による非等方透水係数場の例

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2.4-3に示す。

本業務では、異方性のコントロールが比較的容易であること、及び用いるデータセットも試錐孔に沿った形式のものであることから、三番目の接線コントロールによる方法で透水係数場の異方性を表現することとする。

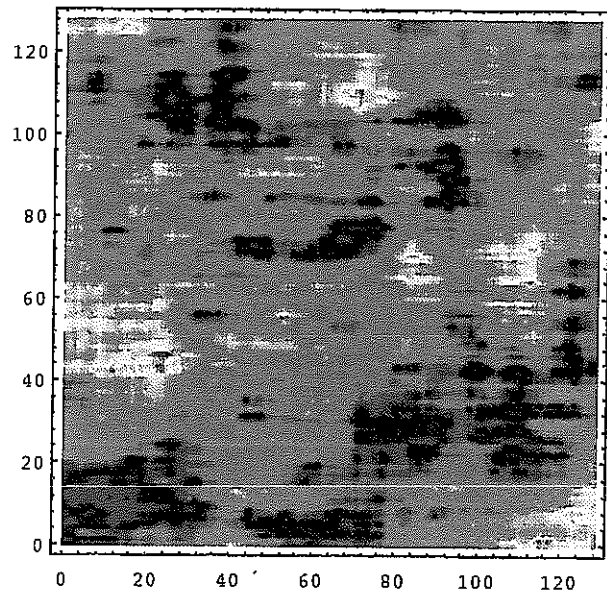


図2.4-3 接線のフラクタル特性管理による非等方透水係数場の例

3. 東濃鉦山周辺の水理条件及び解析対象領域の設定

3.1 地質概要[16]

東濃地域の地質は、中・古生層及び花崗岩を基盤岩として、それを覆って新第三系と第四系が分布する。新第三系瑞浪層群は、基盤花崗岩を不整合で覆って分布する。その上位には瀬戸層群が、これらを明瞭な不整合で覆って分布する。

(1) 基盤岩類

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・中粒角閃石黒雲母花崗閃緑岩等から成り、板状の節理が発達する。

(2) 堆積岩

この地域の堆積岩は、中新世の瑞浪層群及び鮮新世～更新世の瀬戸層群から成り、瑞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) 瑞浪層群

瑞浪層群の岩相は、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が部分的に出現する。一般に下位ほど粒度が粗く最上部ではシルト質になっている。土岐夾炭累層は、アルコース質砂岩（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。生俵累層は凝灰質細粒砂岩、シルト岩を主体とする。

(b) 瀬戸層群

瀬戸層群は、下位の瑞浪層群や花崗岩とは不整合の関係を示しており、瑞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。細礫～大礫から成る円礫岩を主体とし、下位に粘土層や砂質粘土層の薄層（厚さ1～3m）を1～2層挟んでいる。その礫種は花崗岩・チャート・流紋岩・泥岩・火山岩で、基質は白色極細粒凝灰質ないしはアルコース質

である。

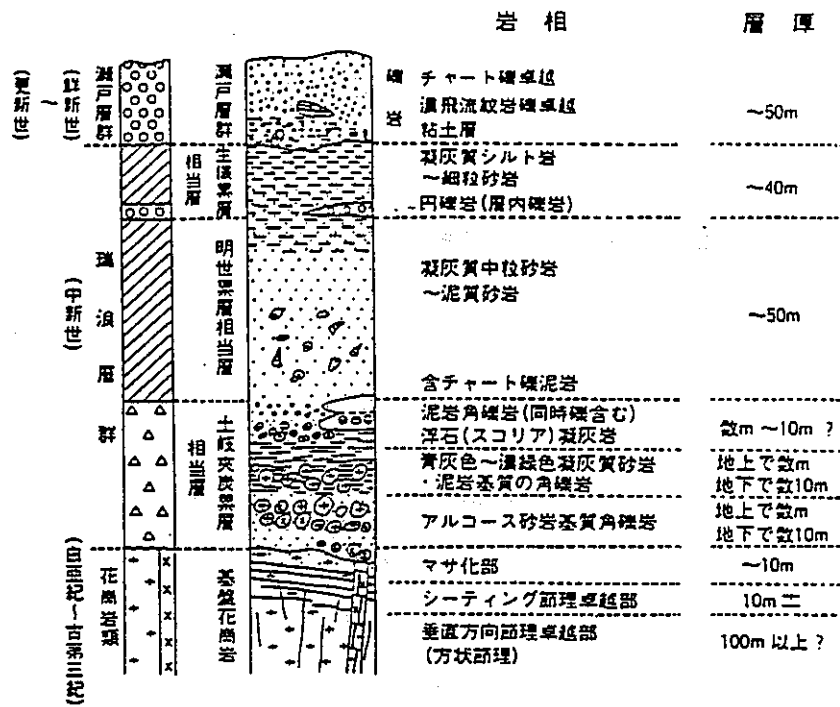
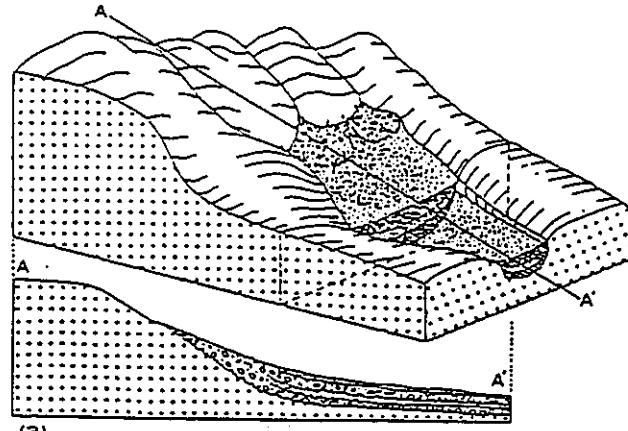


図3.1-1 調査地域の模式柱状図[16]

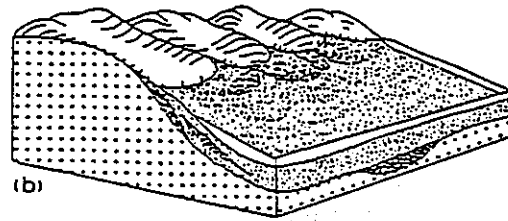
3.2 水理地質構造

東濃地域では、図3.2-1に示す様に基盤花崗岩のチャンネル構造に支配される河川・湖成性の環境（図3.2-1(a)）から内湾（汽水から海水域へと変化（図3.2-1(b),(c)）へと変化し、その時期の古地形・古地理に支配されて岩相が分布している可能性が考えられる。河川・湖成性の環境ではチャンネル構造にそって流下した土石流的堆積物が、勾配の緩やかな流域にたまる現象が認められ、チャンネルの形態に支配された異質性が認められる可能性が考えられる[16]。そして、この様な異質性は、水平方向及び鉛直方向の透水係数の不均質性そして異方性として現れることが予想される。

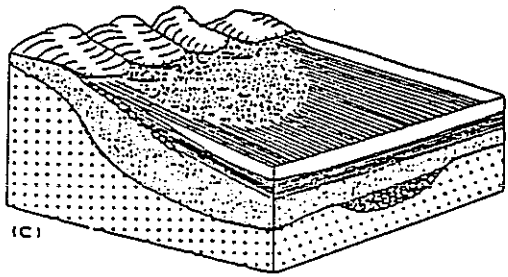
東濃地域では、物理検層の一つとして電気検層による見かけ比抵抗測定値が各試錐孔に沿って高い頻度で得られている。そして、この見かけ比抵抗値と透水係数値との間には良好な相関関係が認められることから、見かけ比抵抗値に基づき透水係数分布を推定することが可能と考えられている[16]。この様な観点から見かけ比抵抗値と岩層及び垂直区分が整理された結果を図3.2-2に示す



(a)



(b)



(c)

図3.2-1 古地形・堆積環境と地層の異質性

(1) 垂直方向の異質性

3a1~3, 4a1~3層

下位から礫岩層(3a1, 4a1) → 礫岩・砂岩・泥岩互層(3a2, 4a2) → 砂岩層(3a3, 4a3) へとサイクリックに変化する。また、3a1~3 → 4a1~3 に向かって見かけ比抵抗値が低くなり、花崗岩碎屑物主体の岩相から泥質、凝灰質物質が増加し透水係数が低くなる傾向を示す。また、礫岩層(3a1, 4a1)、礫岩・砂岩・泥岩互層(3a2, 4a2) は、見かけ比抵抗値の変化も著しいと同時に水平方向の連続性も悪い。透水係数値は $10^{-5} \sim 10^{-7}$ cm/s のオーダーの範囲内にある。

5層

主として礫岩から構成され、垂直方向への見かけ比抵抗値の変化も著しい。透水係数値は $10^{-7} \sim 10^{-8}$ cm/s のオーダーを示す。

6層

凝灰質砂岩、凝灰岩から構成され、最も低い見かけ比抵抗値を示し、透水性は著しく低い (10^{-8} cm/s オーダーを示す)。

7層

主として細～中粒砂岩、泥岩から構成され、見かけ比抵抗値の変化も小さい。見かけ比抵抗値は下位に向かって低くなる傾向が認められ、透水性も低下する。

8層

中～粗粒砂岩から構成され、異質性も少ない。

9層

礫岩層を主体とする9aと、砂岩、泥質岩を主体とする9bとに区分される。見かけ比抵抗値が高く、透水係数も高い (9a, 9b層は 10^{-6} cm/s オーダーを示す)。

10層

主としてシルト岩から構成され透水係数が著しく低い (10^{-8} cm/s オーダーを示す)。

11層

半固結～未固結の砂礫から構成され、透水性が著しく高い部分である。

(2) 水平方向の異質性

5・4・3層

礫岩層を伴う5、4、3層では、各層準で堆積サイクルは認められ、かつ物性的にも異質性が認められる。特に、3層でチャンネル中心部に向かって層厚が大きくなるだけでなく、透水係数が 10^{-5} cm/sオーダーのものが認められる。

7層

若干西から東へ透水性が低下する傾向が認められるが、概ね一様と見て差し支えない。

6・8層

水平方向の著しい異質性は認められない。

3.3 地下水化学[17]

東濃鉦山及びその周辺地域の地下水の水質は、帯水層の地質に対応して次の3層に分類できることが明らかにされている。

- (1) 瀬戸層群～土岐夾炭累層上部層・・・Na・Ca - HCO₃ (SO₄)型
- (2) 土岐夾炭累層下部層・・・・・・・・Na - HCO₃ 型
- (3) 土岐花崗岩・・・・・・・・Na・Ca - HCO₃ 型

瀬戸層群～土岐夾炭累層上部層中では、地下水の各種溶存化学成分は、それぞれ、深度の増加とともに連続的に濃度を変化させており、これらの地層中で地下水の混合が行われていることを示唆している。しかし、土岐夾炭累層上部層から下部層にかけて粘土化の進んだ部分(3.2に述べた6層に含まれる)が存在し、それが不透水層となっている。従って、土岐夾炭累層上部層の地下水は下部層へと浸透することができない。このことが、上述した異なる地下水の存在、特に標高200m近傍を境界として[18]地下水のタイプがNa・Ca - HCO₃ (SO₄)型とNa - HCO₃ 型に区分されることの原因となっている。

土岐夾炭累層下部層の水質型であるNa - HCO₃ 型は、地下水の水質進化が最も進んだ場

合に見られる型で、深層地下水に多く見られる。東濃鉾山深層地下水とは、この土岐夾炭累層下部層の地下水のことを指し、その主な帯水層は土岐花崗岩の上の風化された花崗岩の礫を主体とする基底礫岩層である。土岐花崗岩中の割れ目の地下水の水質は、地下水と同花崗岩との間の水-岩石相互作用によって規制されていると考えられている。

この様な水質の違いに対応して、これらの地下水の水素及び酸素安定同位体比 (δD 及び $\delta^{18}O$) は、帯水層によって明らかに異なることが知られている。即ち、瀬戸層群の地下水における δD 及び $\delta^{18}O$ は、この地域の降水と同様の数値を示すが、土岐夾炭累層下部層の地下水の δD 及び $\delta^{18}O$ は、 δD において約10‰、 $\delta^{18}O$ で1~1.5‰低い値を持っている。これは、同層の地下水が現在よりも気温の低かった時期、例えば氷河期、の降水に由来するものであることを示唆している。実際、土岐夾炭累層下部層の地下水の ^{14}C 年代は、13000~15000年と推定されており、これは最後の氷期（ウルム氷期）の末期に相当する値である。

3.4 解析対象領域

3.4.1 対象領域の設定

既に述べた様に、本業務で行う解析はフラクタルモデルを用いて東濃鉾山周辺の水理学的な不均質性を現実的かつ詳細な透水係数分布として表現することを前提とする物である。このため、解析対象領域としては、各孔にそって高頻度の見かけ比抵抗値測定結果の得られる複数の試錐孔を含んだ1鉛直断面を採ることが適当である。そこで、図3.4.1-1に示す試錐孔配置に基づき、TH-1~4孔を含む鉛直断面を解析対象領域として選定することとした。

次に、この鉛直断面における解析対象深度の幅としては、次の2点に着目して選定を行った。

- (1) 上下端に簡単な境界条件を設定することが正当化されやすいものであること
- (2) 水理解析結果の検証の一環として、パーティクルトラッキングの結果とウランの分布状況の比較ができるよう、ウラン鉍床の一部を含む領域であること

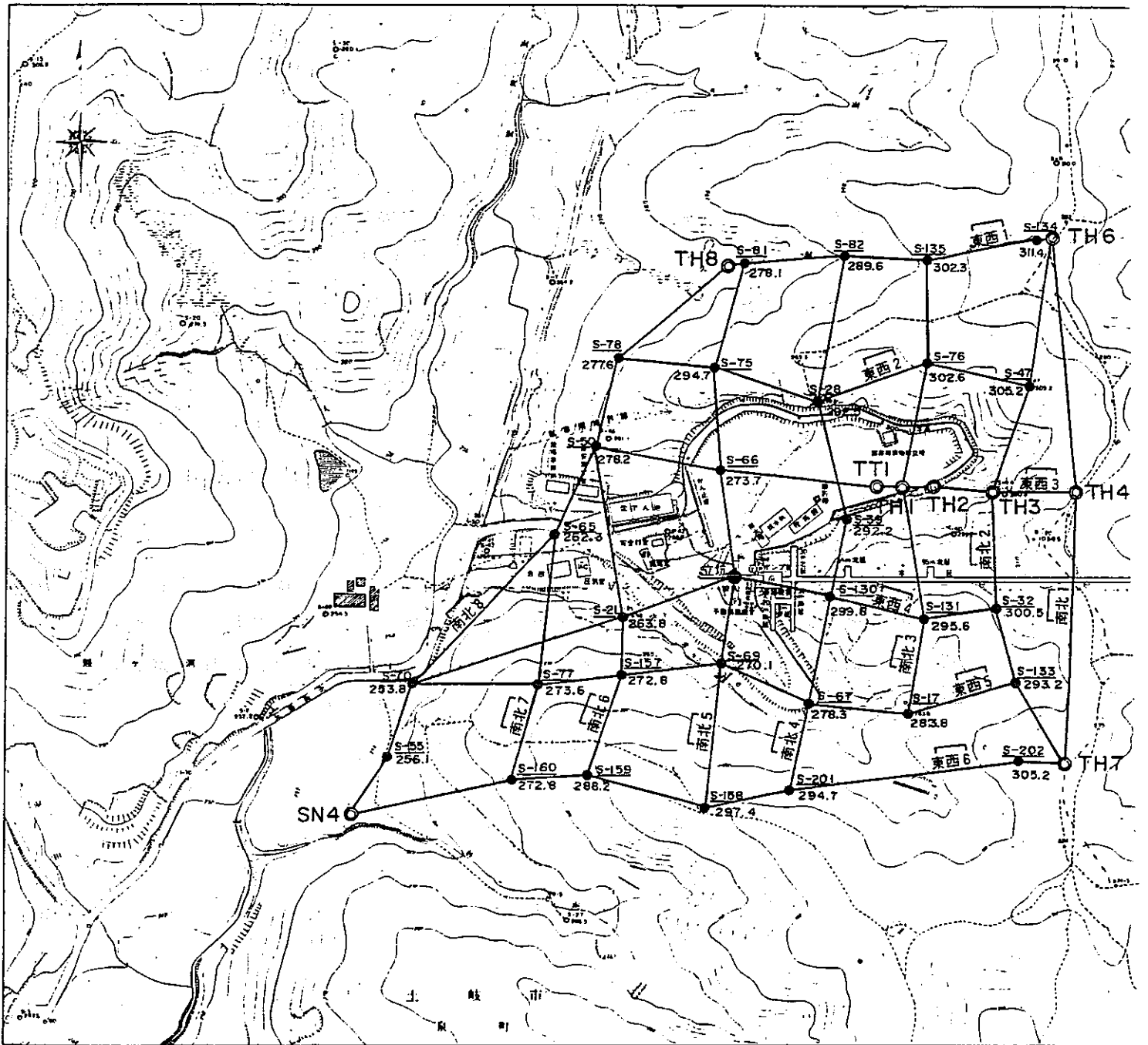


図3.4.1-1 試錐孔配置

既に述べた様に、基盤岩である花崗岩の健全部と、3.2の垂直区分における6層の粘土化の進んだ部分とはいずれも他と比して著しく透水性が低く、このためこれら2層に挟まれた土岐夾炭累層下部層と風化花崗岩帯から上下方向への地下水の流入・流出は相対的に無視し得るものと考えられる。また、この領域はウラン鉱床を含むものでもある。そこで、標高100~200mを解析対象深度として考えることとした。

解析対象領域と、TH-1~4孔、及び断層の位置関係を図3.4.1-2にまとめる。

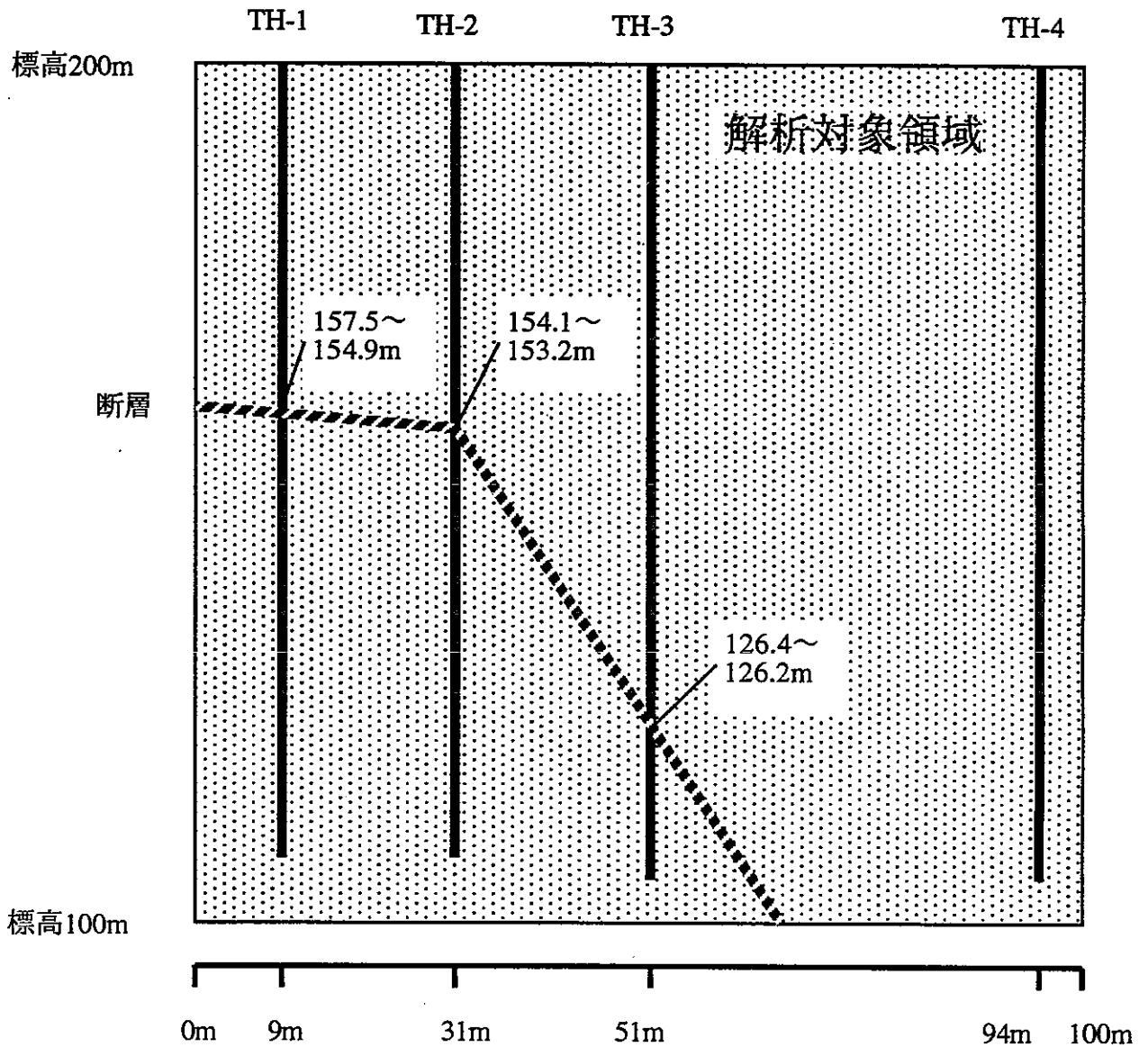
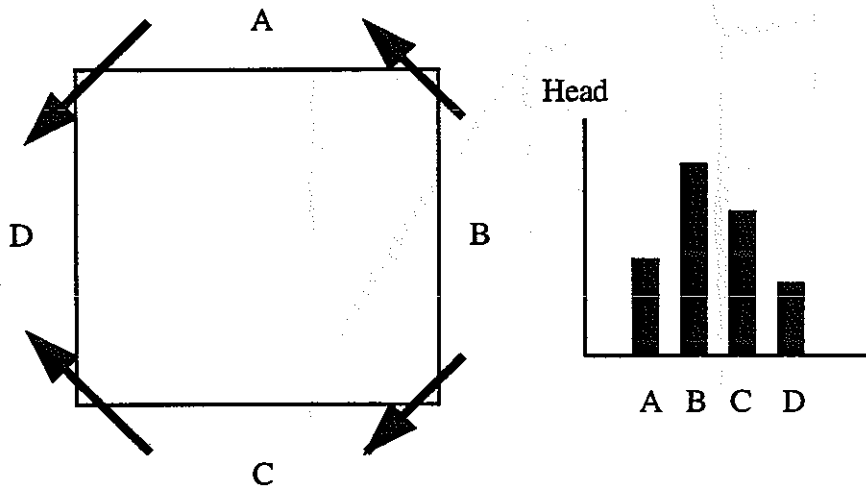
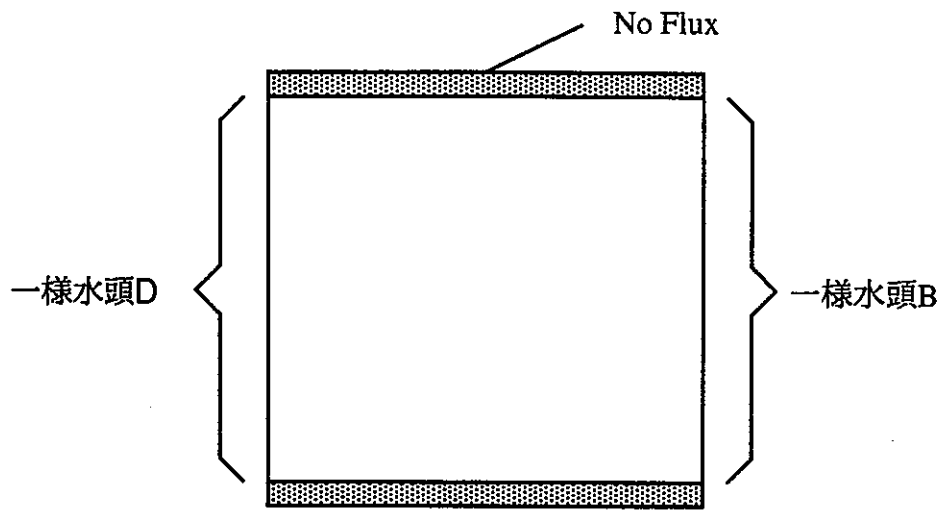


図3.4.1-2 解析対象領域

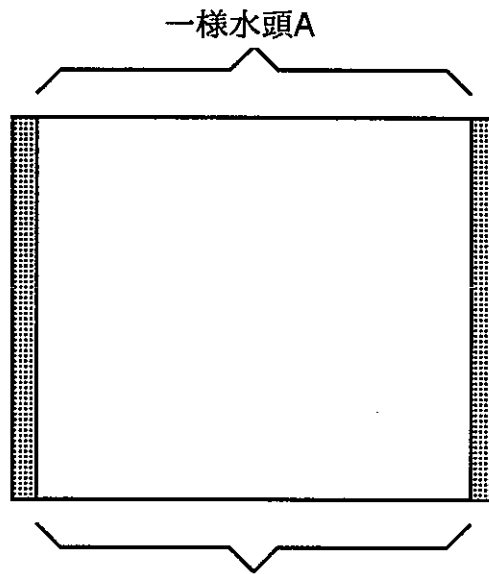
3.4.2 境界条件の設定

現在のMACRO AFFINITYコードでは、水頭として与える境界条件は各境界線上で一定の場合には一括指定が可能であるが、線上で変化させる場合には各グリッド毎に入力する必要がある。また、解析結果の検証の対象となるウラン鉱床が生成された時点での水理条件に不明な点が多いことから、各グリッド毎の詳細な境界条件の設定は必ずしも適切な物とは考えられない。そこで、本解析においては、前節で述べた正方形の領域の各辺についてそれぞれ一様な境界条件を設定することとした。この場合、隣接した二辺が異なる水頭値を持つ場合には、四隅に下の様な不自然な流れが生ずることから、合理的な境界条件の設定としては、図3.4.2-1に示す4通りが考えられる。





Case a-1 $B > D$
Case a-2 $D > B$



Case b-1 $A > C$
Case b-2 $C > A$

図3.4.2-1 考慮すべき境界条件の種類

上述した4種類の境界条件のうち、Case a-1, Case a-2 が既に述べた水理地質構造と整合的であることからこれらの二つを基本ケース、他を代替ケースとして取り扱うこととする。また、図3.4.2-1に示した境界条件においては、それぞれ二辺の境界における水頭を設定することによって条件設定がなされる。また、この条件に対応した流速分布は、上記の二つの境界間の差圧によって比例的にスケールされるため、一つの参考値について流動解析を実施しておけば他の水頭値についての結果（ダルシー流速分布、及び圧力分布）は簡単な比例計算により求めることができる。この意味から、4.に述べる水理解析では、動水勾配の絶対値は流れのパターンそのものには大きな影響を及ぼさないものと考えることができる。ここでは、例示的な意味で動水勾配を0.1として解析を行った。

4. 不均質場における水理解析

4.1 対象領域の透水係数分布に対するフラクタルスケーリング則の適合性

既に述べた様に、東濃地域の各試錐孔は比較的明瞭に区分され得る層を貫いて掘削されている。各堆積層においては粒土、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異を反映してそれぞれ異なる特性を有している物と考えられる。特に、砂岩・泥岩の互層構造、級化構造に関する各層の相異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物と考えられる。本節では、各試錐孔の貫く層毎にフラクタルスケーリング則の成立性を調べ、また、関連するパラメータ値を明らかにすることを目的として実施したカイ2乗フィッティングによる解析の結果についてまとめる。

図4.1-1に、カイ2乗フィッティングの対象とした試錐孔と、対応する垂直区分を示す。これらの各層における見かけ比抵抗値の測定結果からバリオグラムを作成し、作成されたバリオグラムに対しフラクタルスケーリング則（1章参照）をカイ2乗フィッティングした結果、ほとんど全ての層についてフィッティングの信頼性レベルは仮説検証の目安とされる40%を上回る物となり、各層のスケーリング特性がフラクタルスケーリング則によって良く表現されるものであることがわかった。

図4.1-2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。ここでのフラクタル次元は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4.1-3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%に達している。ここで、これら二つの試錐孔における3a1層のフラクタル次元が同一であることは、TH-5孔とTH-7孔の位置における3a1層が水平的にも似通った堆積環境にあったことを示唆するものとも考えることもできる。

次に比較的フィッティングの信頼性が低かったTH-8孔についての結果を、図4.1-4に示す。図から明らかな通り、ここでもバリオグラムは両対数プロットで直線に極めて近く、信頼性レベルの低い部位においてもフラクタルスケーリング則の適合性が決して低いものではないことが明らかである。

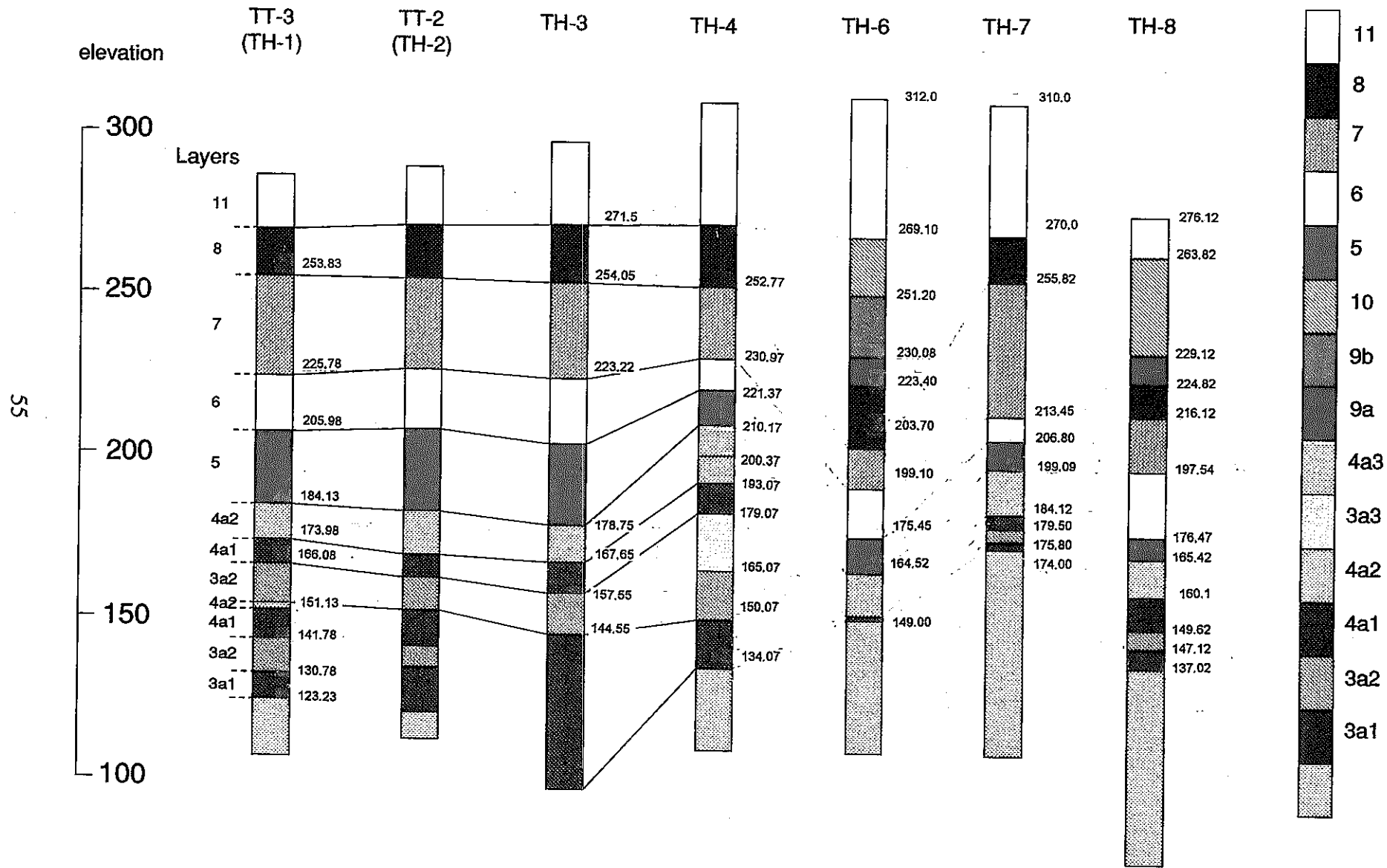


図4.1-1 各試錐孔における垂直区分

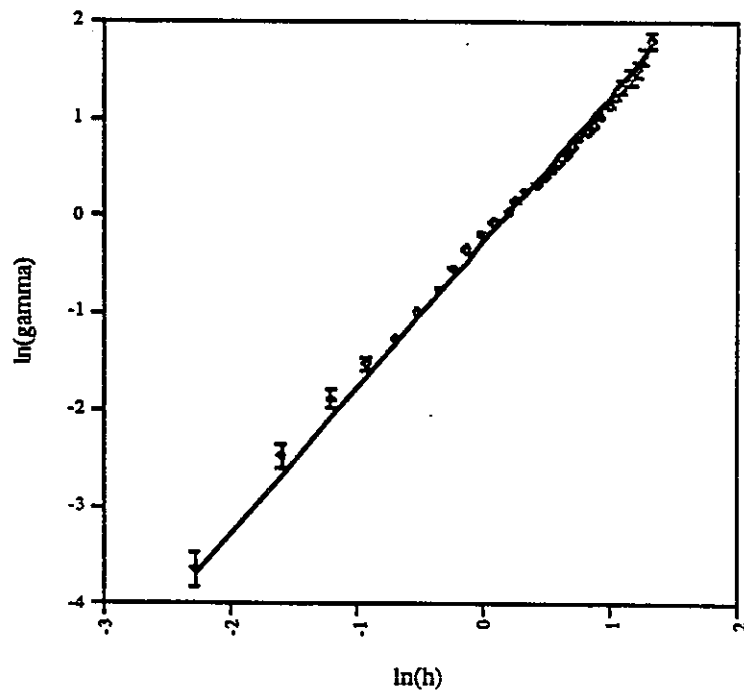


図4.1-2 TH-5孔3a1層の見かけ比抵抗値測定データに基づき作成したバリオグラム
 に対するフラクタルスケーリング則のカイ2乗フィッティング結果

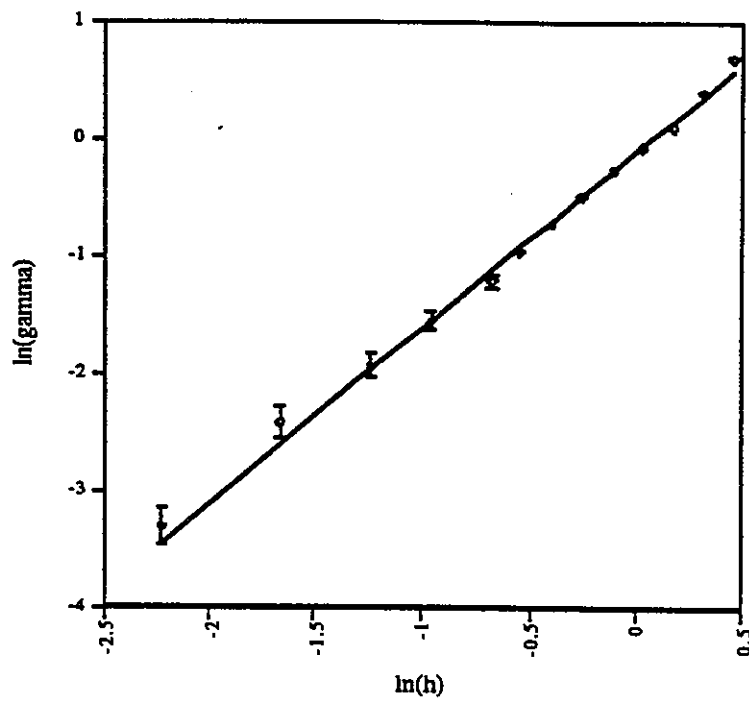


図4.1-3 TH-7孔3a1層の見かけ比抵抗値測定データに基づき作成したバリオグラム
 に対するフラクタルスケーリング則のカイ2乗フィッティング結果

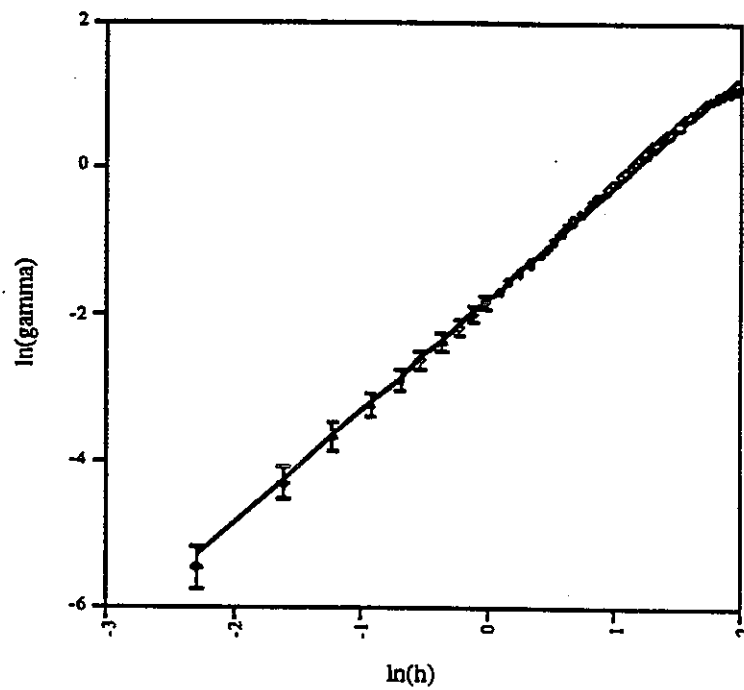


図4.1-4 TH-8孔5層の見かけ比抵抗値測定データに基づき作成したバリオグラム
 に対するフラクタルスケーリング則のカイ2乗フィッティング結果

4.2 フラクタル特性値の推定

現在のMACRO AFFINITYコードは、解析対象領域の場所毎に異なるフラクタル次元を与える機能を有していない（平成7年3月に完成予定のversion2.0では可能である）ために、4.1に述べた各試錐孔の垂直区分毎に異なるフラクタル特性を付与することは困難である。そこで、ここでは、解析に直接使用することのできる大域的なフラクタル特性値を推定するために、3.4に述べた解析対象領域に含まれるTH-1,2,3, 及び4孔の標高100～200mをそれぞれ一つの区間とみなして見かけ比抵抗値測定結果に基づき鉛直方向のバリオグラムを作成し、これらに対して4.1に述べたのと同様の手法によりフラクタルスケーリング則のフィッティングを行った。結果を表4.2-1にまとめる。ただし、ここで、TH-1孔については他と整合的な手法で行われたみかけ比抵抗値測定結果がないために、直近にあり岩相も類似したTT-1孔のデータを用いた。

表4.2-1 TH-1～4孔の標高100～200m区間に対する鉛直方向のフラクタル次元

	TH-1	TH-2	TH-3	TH-4
フラクタル次元	1.7	1.93	1.77	1.6

ここで求められた大域的なフラクタル次元は、個々の垂直区分に対するそれよりも高いものとなっている。これは、大域的な見かけ比抵抗値データが層間での変動も含んでいるために、全体としてよりroughな不均質性を呈するためと考えられる。

また、今回の解析に使用した電気検層データは10cmおきに得られているが、電極間隔は1mであり、つまり隣接したデータは互いに重複した区間での平均値となっている。従って、上記のフィッティングには、1mおきの即ち互いに重複しない区間で採られたデータを用いることとした。なお、もとの10cmおきのデータに基づきより細かいresolutionでの透水係数分布を推定することについても、本業務で追加的な検討を行った。この点については、6.を参照されたい。

4.3 フラクタル透水係数場の作成

既に述べた様に、解析対象領域に含まれるTH-1～4孔における見かけ比抵抗値の鉛直方向のフラクタル次元は、1.6～1.9程度の範囲にあることが明らかとなった。また、水平方向については各4点のデータしか得られないため、信頼できるフラクタル次元の推定は困難である。そこで、水平方向については上限として垂直方向の下限值 (=1.6) を、また下限として相関の良い地層で見られる通常の値 (必ずしも最小値ではない) を用いることとした[5][6][8][9]。以上から、解析のためのフラクタル透水係数場のケース設定として、表4.3-1に示す12通りのものを考えることとした。

表4.3-1 フラクタル透水係数場のケース設定

	DX=1.4	DX=1.5	DX=1.6
DY=1.6	Case 46	Case 56	Case 66
DY=1.7	Case 47	Case 57	Case 67
DY=1.8	Case 48	Case 58	Case 68
DY=1.9	Case 49	Case 59	Case 69

図4.3-1に、上述した各ケースにおいて各試錐孔における346の測定点での値について conditioning し、2.に述べた接線のフラクタル特性をコントロールする方法(Traverse Section Control Method)により作成したフラクタル透水係数場を示す。各ケースを比較すると、DXとDYの差が小さいほど透水係数場は等方的であり、不均質性のパターンが鉛直・水平方向にほぼ同じスケールで構成されていることがわかる。逆に、DXとDYの差が大きい物については、水平方向により相関性の高い縞模様が顕著に現れており、堆積過程に対応した層構造をよりはっきりと呈するものとなっている。この意味からは、Case66とCase49の二つがそれぞれ最も等方的および異方的なものとなっている。

また、各ケースで作成された透水係数場の示す分散の程度は、それぞれのフラクタル次元の適合性についての尺度として見る事ができる。この意味からは、Case69の透水係数分布の分散が最も小さく、この時点でのbest estimate と考え得る。

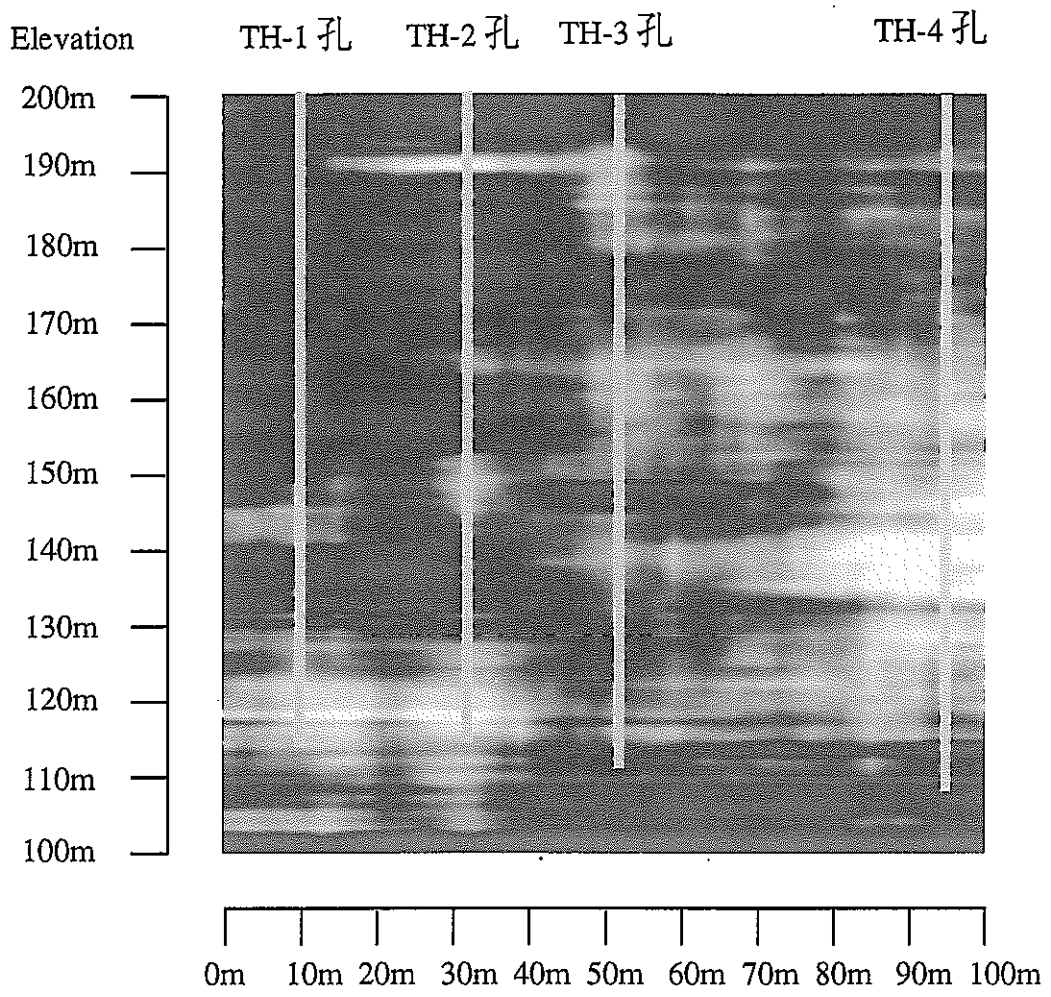


図4.3-1 フラクタル透水係数場（解析対象領域内での当該試錐孔の位置）

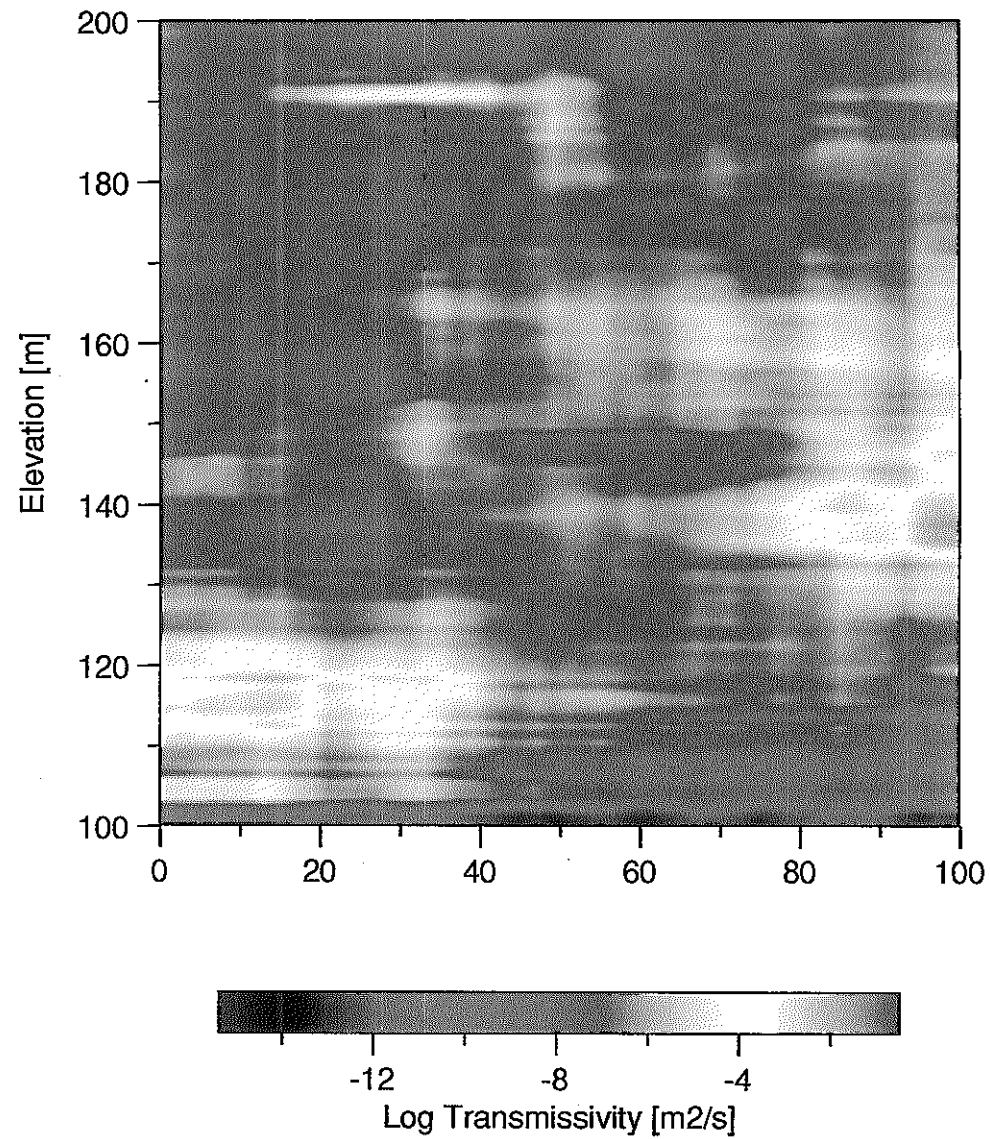


図4.3-1 フラクタル透水係数場 (DX=1.4、DY=1.7)

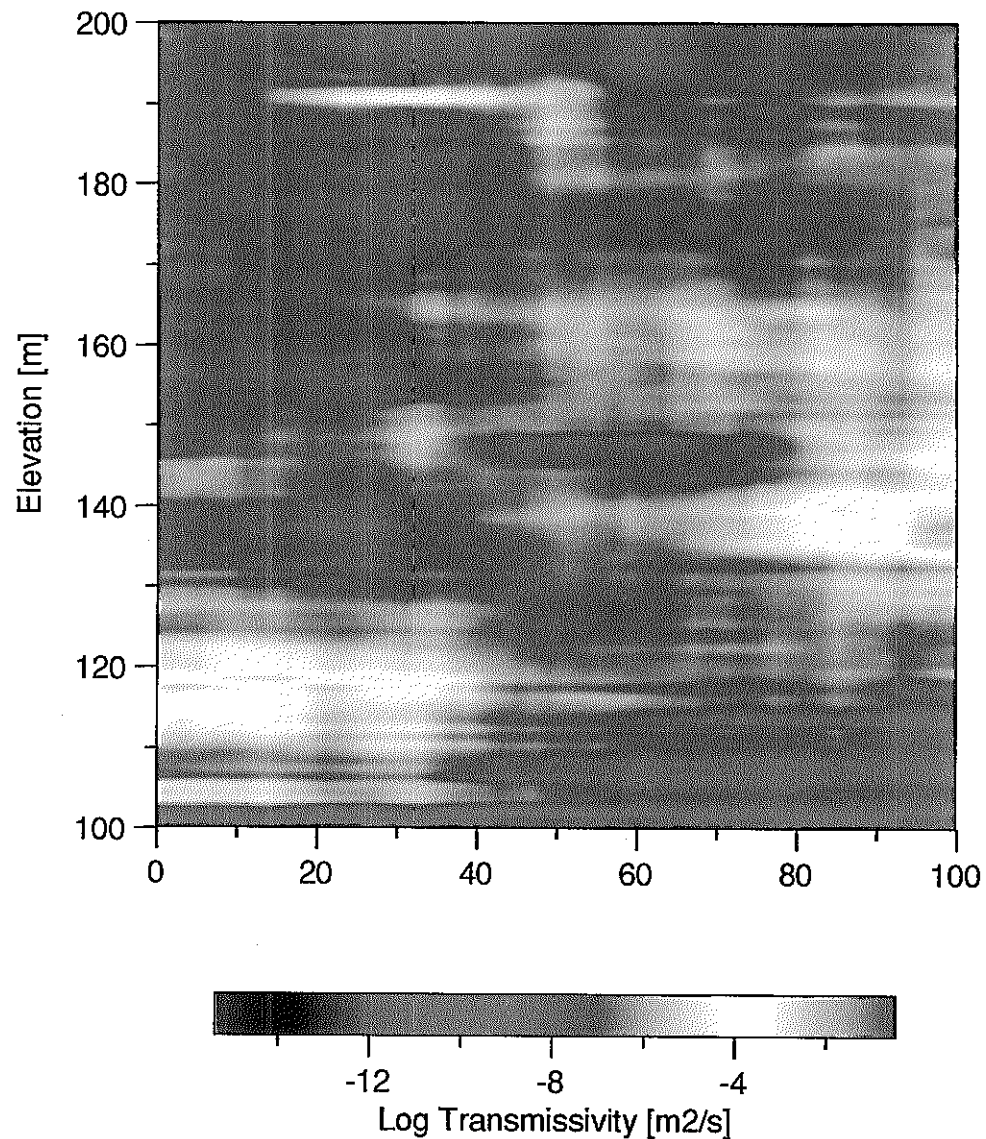


図4.3-1 フラクタル透水係数場 (DX=1.4、DY=1.8)

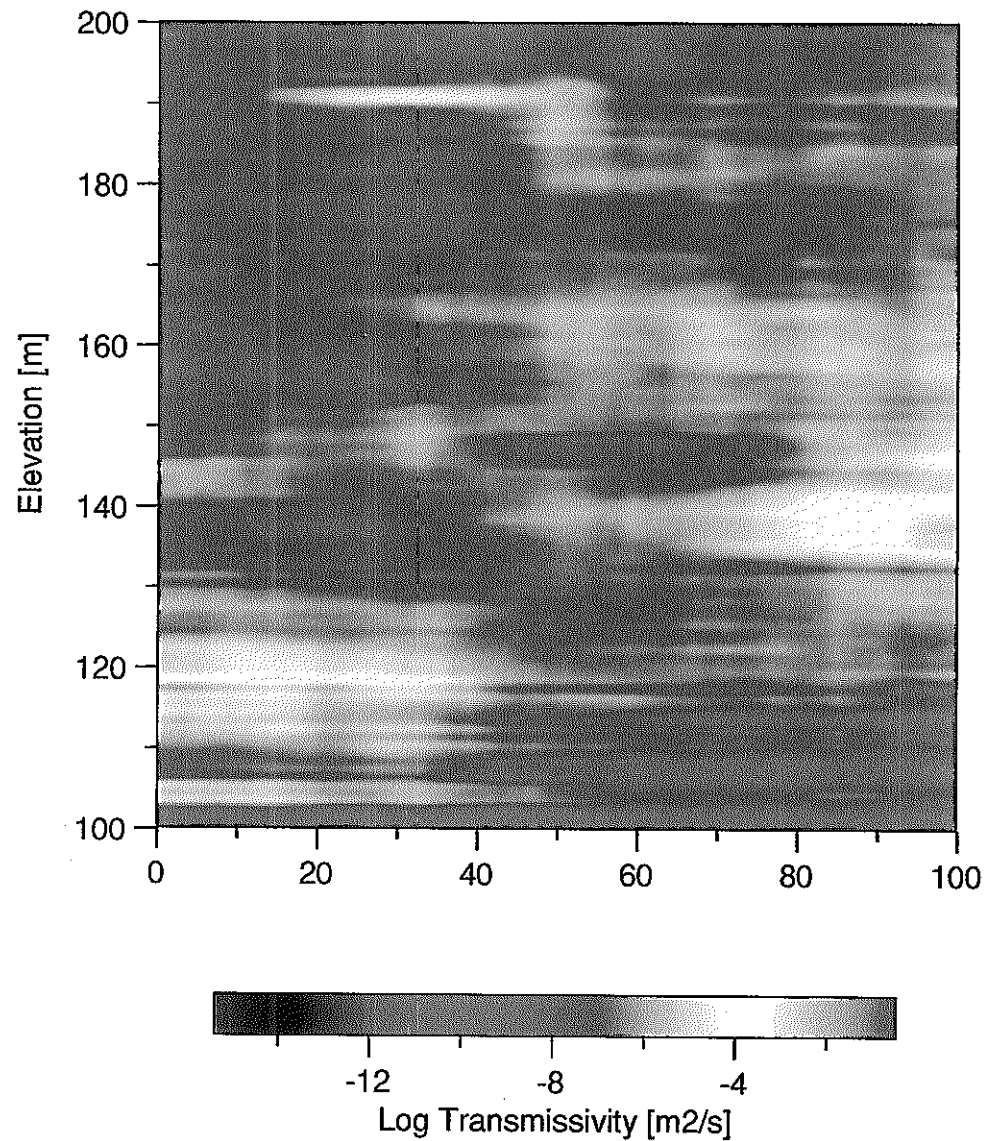


図4.3-1 フラクタル透水係数場 (DX=1.4、DY=1.9)

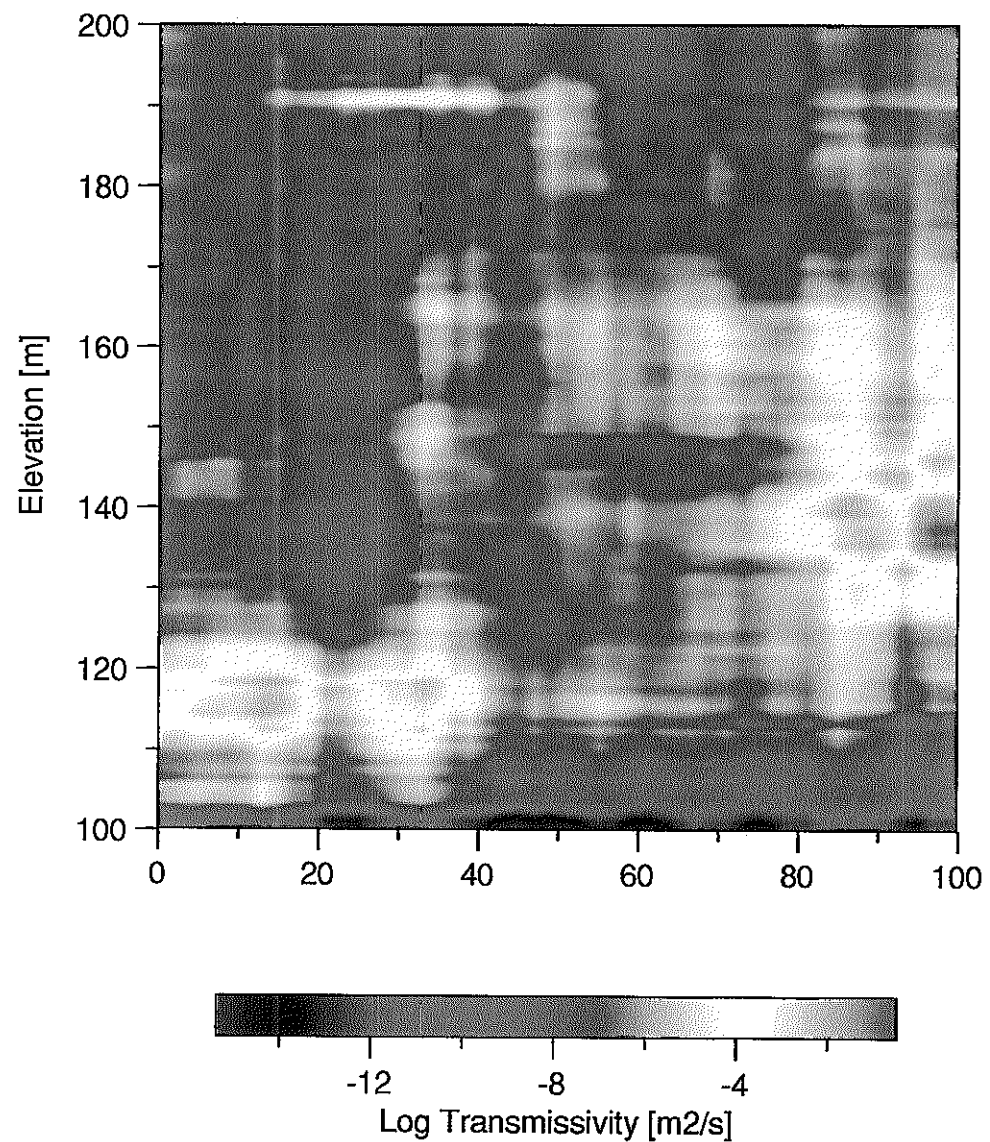


図4.3-1 フラクタル透水係数場 (DX=1.5、DY=1.6)

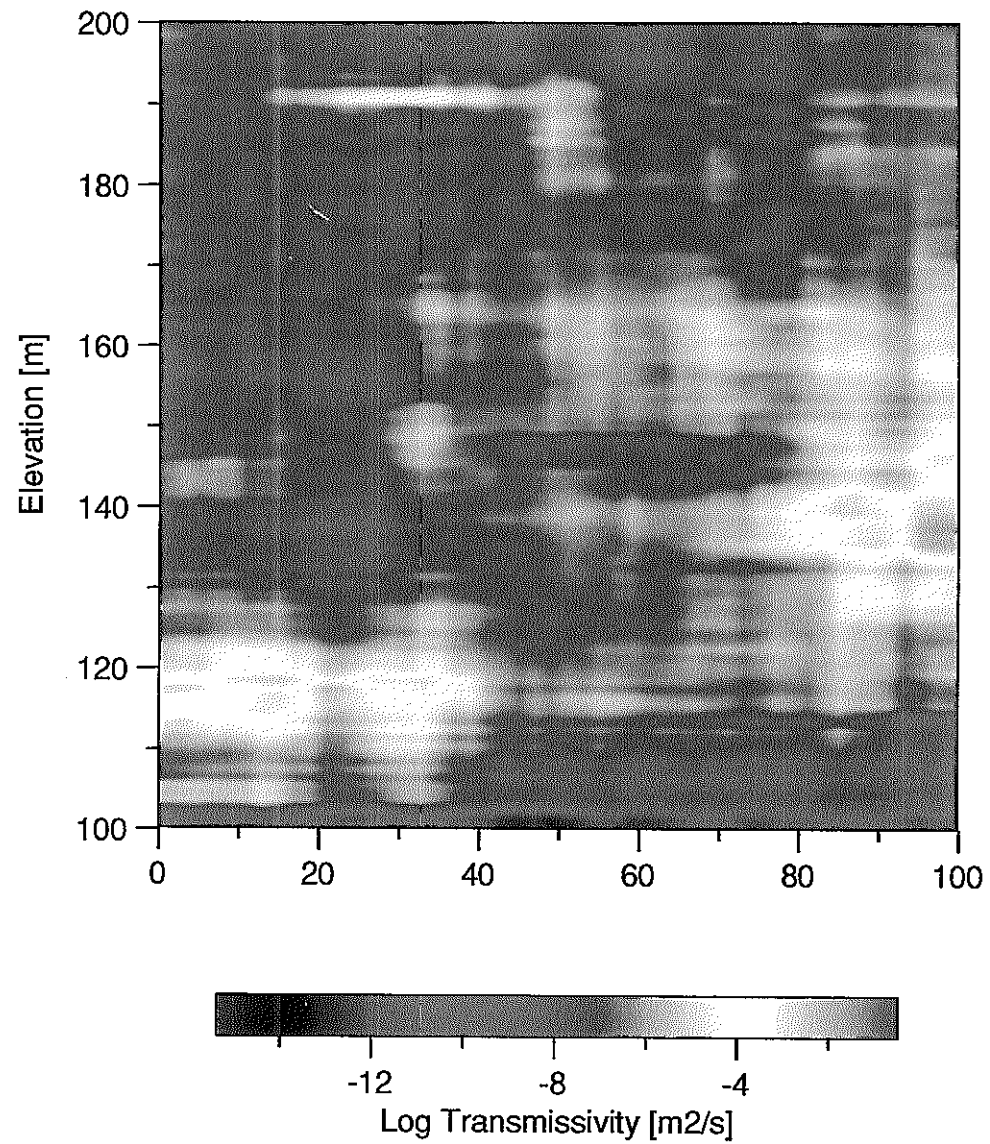


図4.3-1 フラクタル透水係数場 (DX=1.5、DY=1.7)

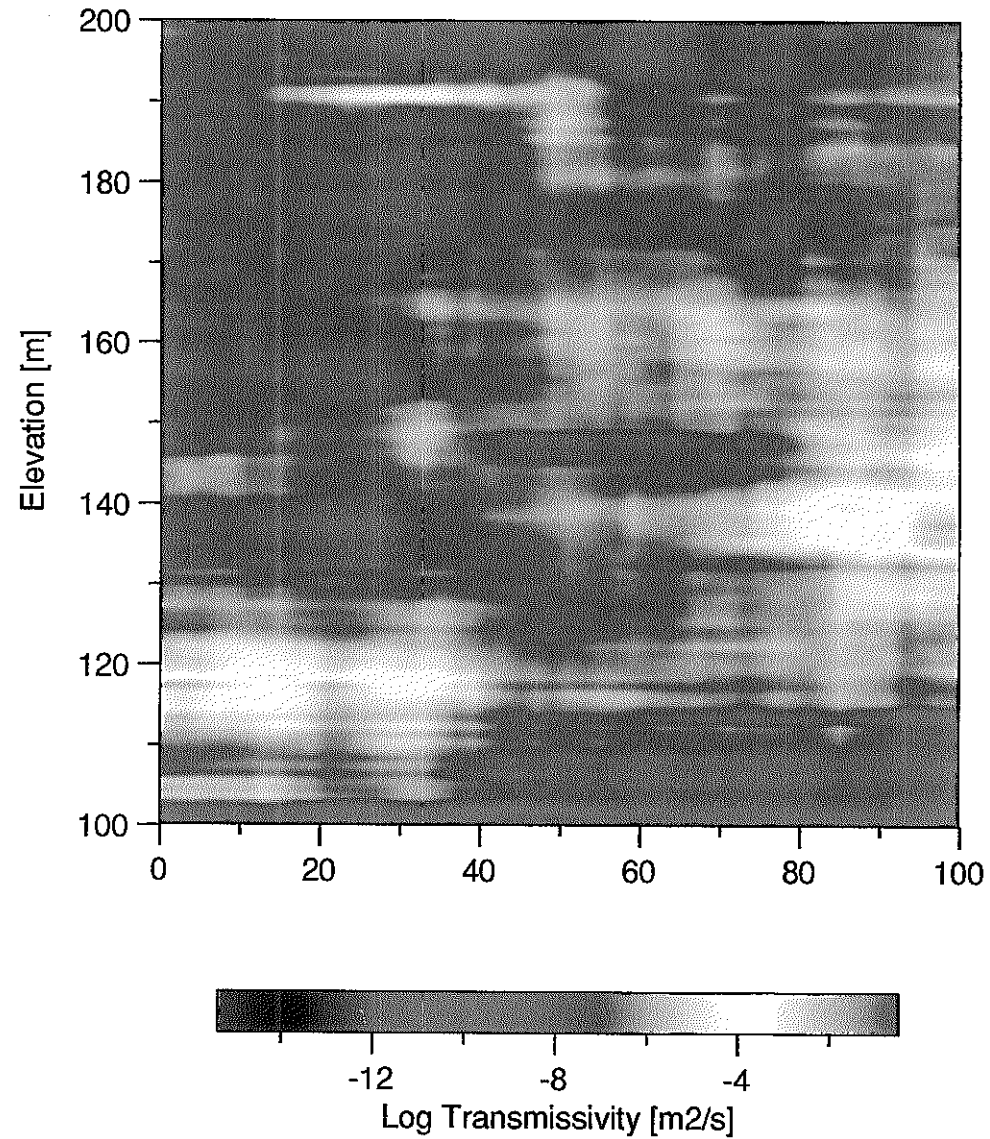


図4.3-1 フラクタル透水係数場 (DX=1.5、DY=1.8)

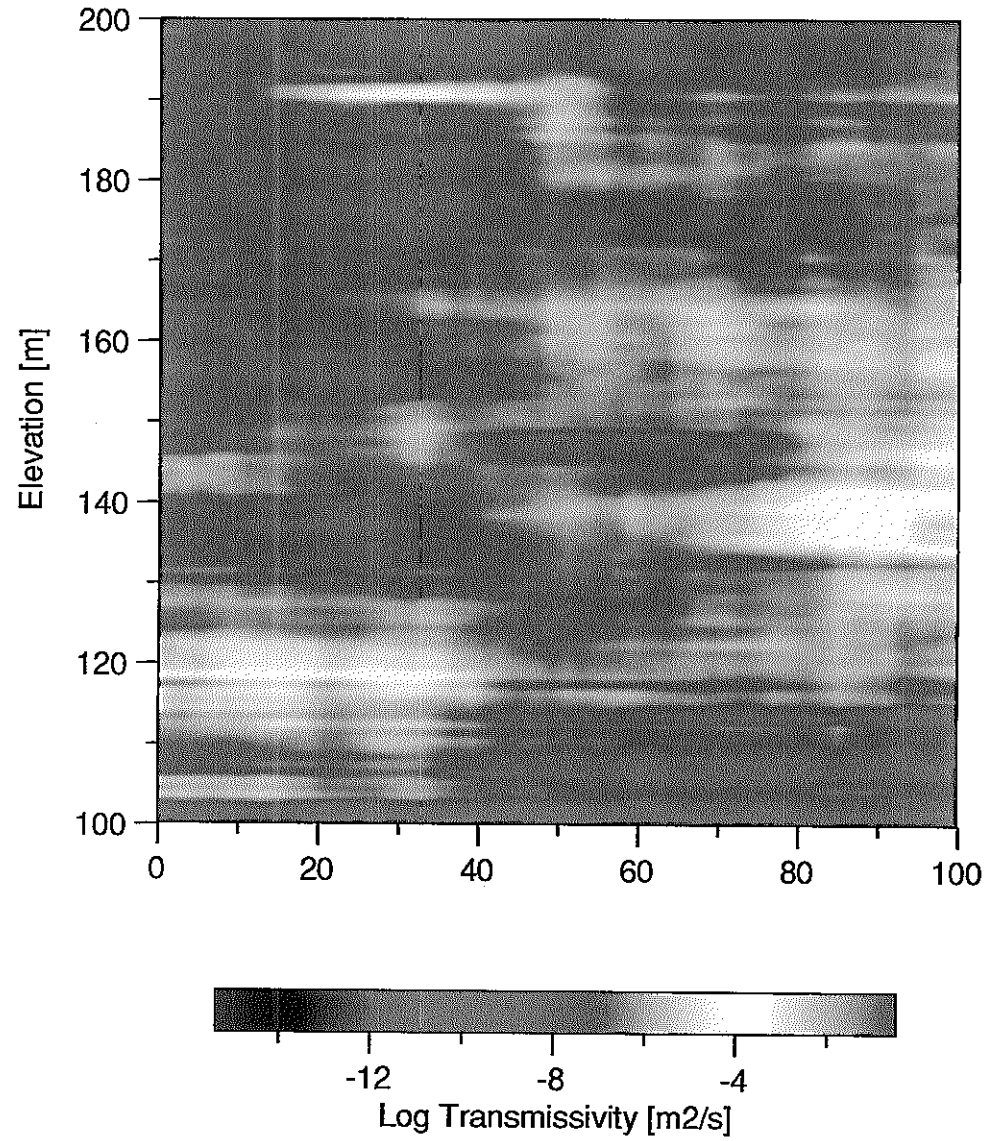


図4.3-1 フラクタル透水係数場 (DX=1.5、DY=1.9)

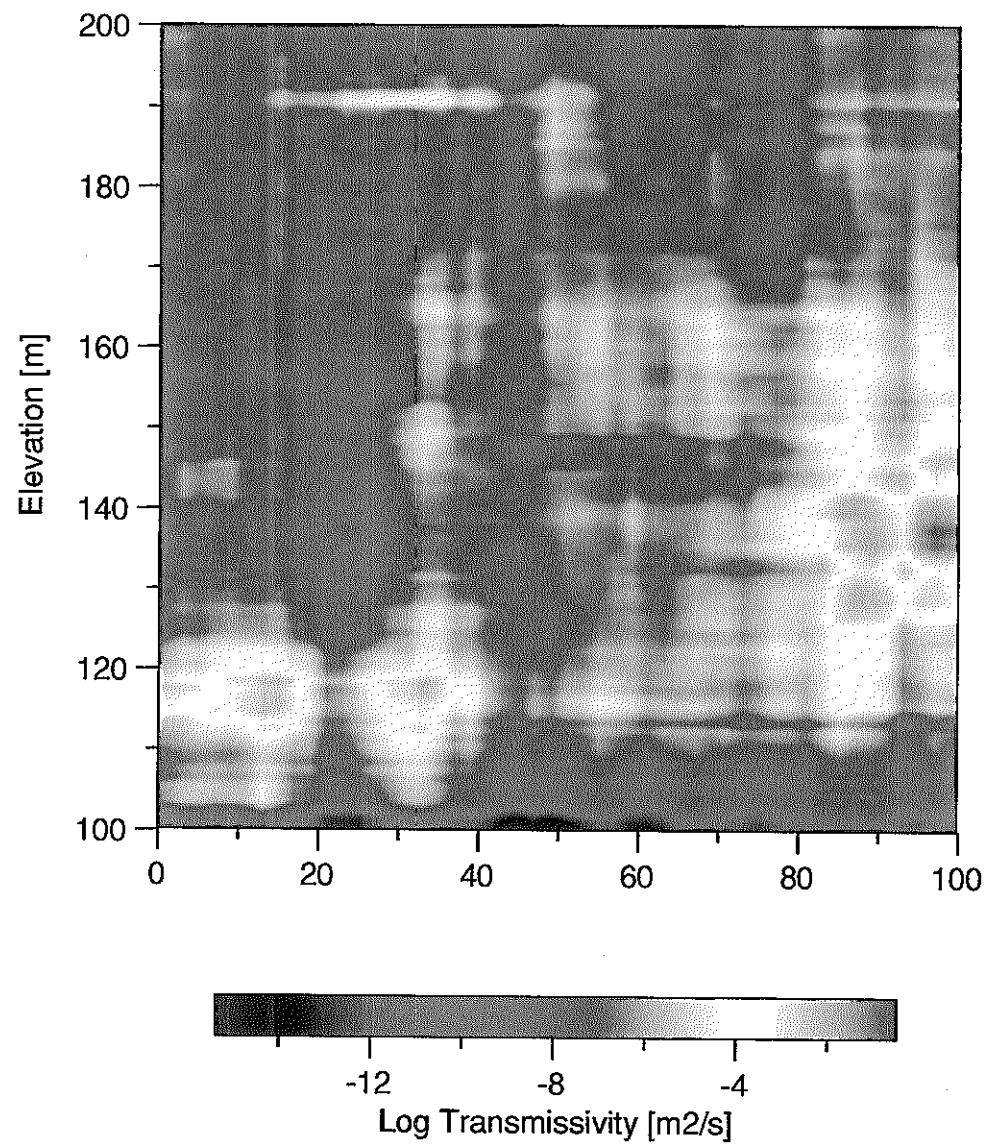


図4.3-1 フラクタル透水係数場 (DX=1.6、DY=1.6)

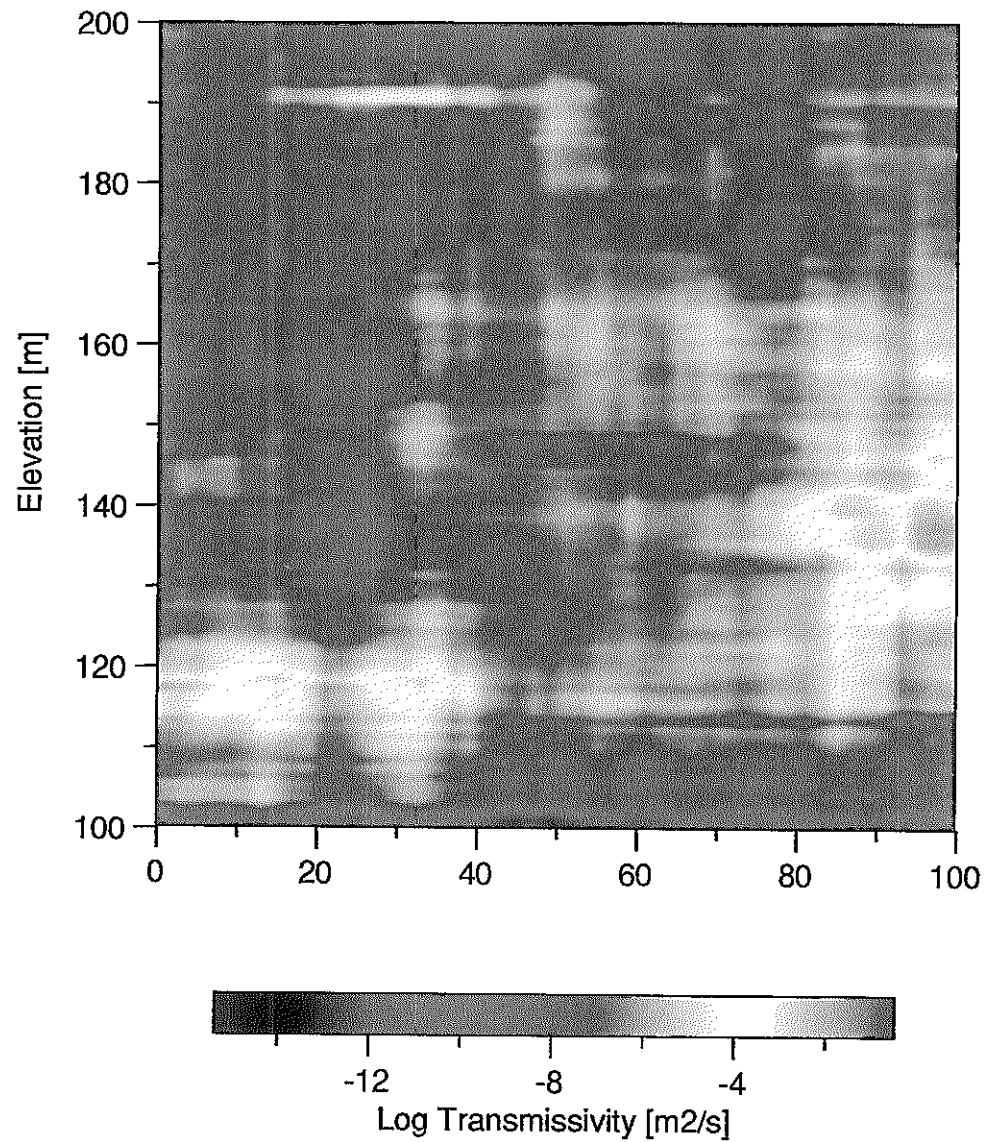


図4.3-1 フラクタル透水係数場 (DX=1.6、DY=1.7)

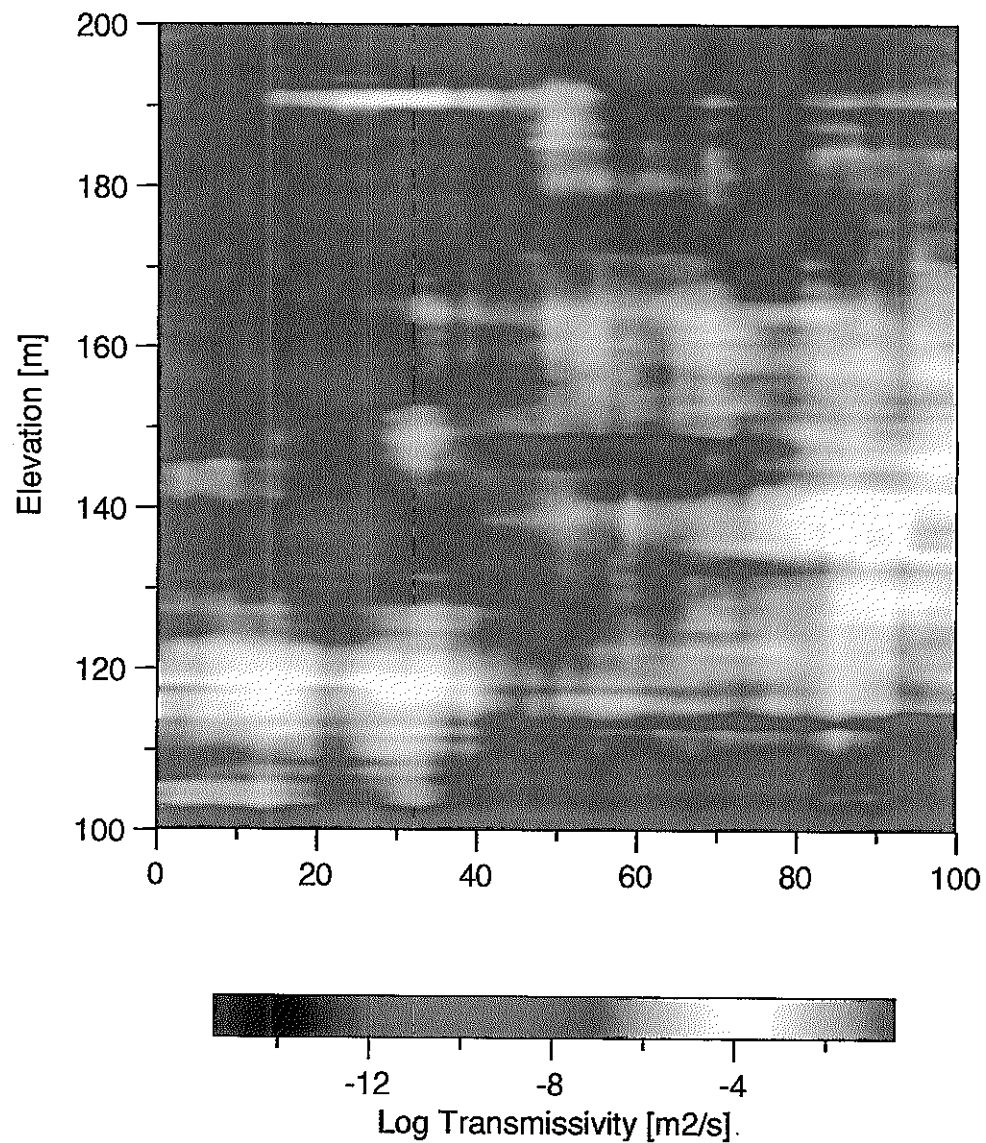


図4.3-1 フラクタル透水係数場 (DX=1.6、DY=1.8)

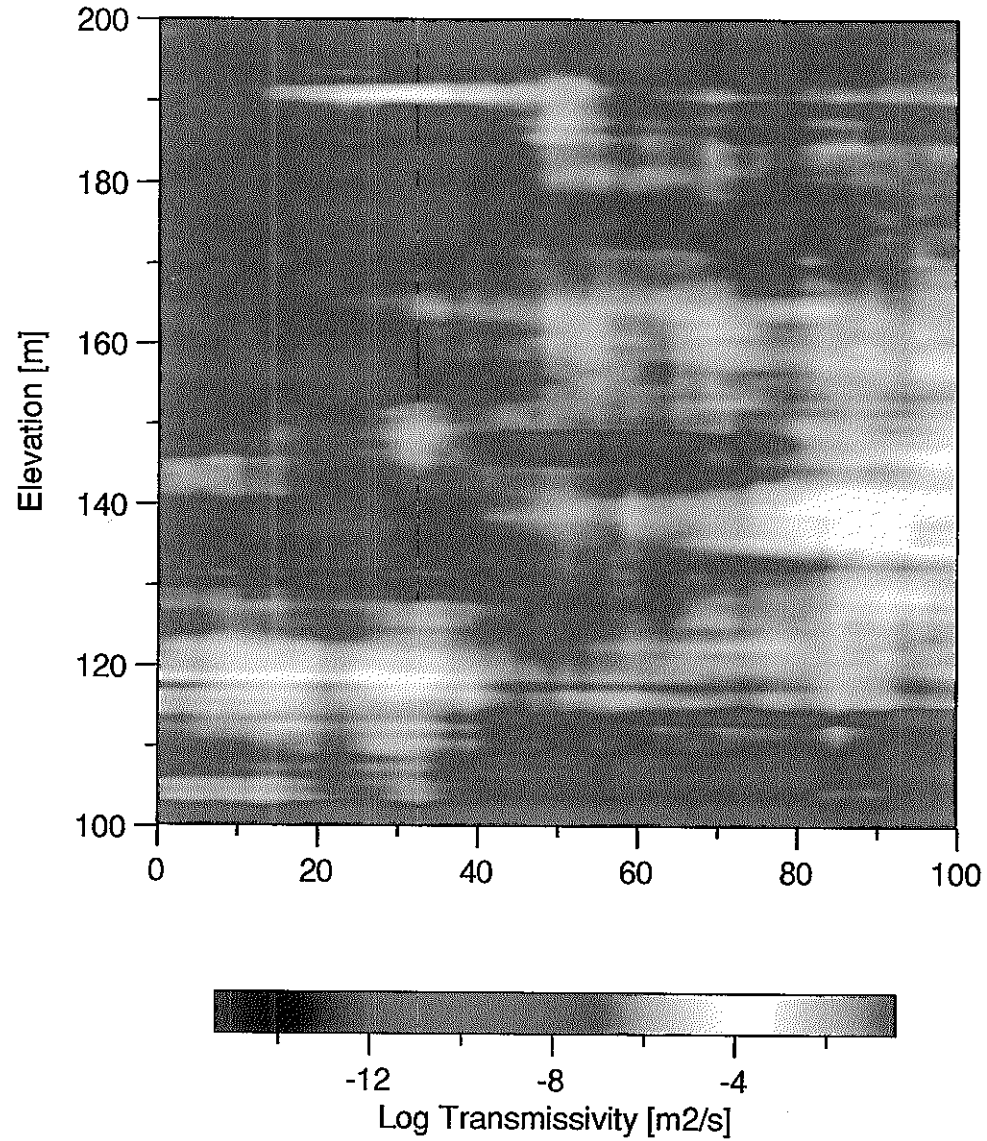


図4.3-1 フラクタル透水係数場 (DX=1.6、DY=1.9)

4.4 地下水流動解析

4.3に述べた12ケースのフラクタル透水係数場に対して、3.4.2に述べた4ケースの水理境界条件を組み合わせた合計48ケースについて地下水流動解析を行った。結果（ダルシー流速分布、及び圧力分布）を、フラクタル透水係数場のCase69（best estimate）、Case49（最も異方的なもの）、Case66（最も等方的なもの）の3つを代表例として図4.4-1にまとめる。なおここでの解析メッシュサイズは1m（垂直）×2m（水平）の長方形であり、総メッシュ数は5,000である。

水理境界のCase b-1及びb-2については、予想通り上端と下端における急激な圧力勾配が生じている。これは、粘土化が進んで難透水性を示す上端の6層と、下端にある同じく難透水性の健全な基盤岩の存在にもかかわらず、この領域を強制的に流下する様な鉛直方向の動水勾配を仮定しているためである。

また、水理境界のCase a-1及びa-2に関する、最も異方的なフラクタル透水係数場Case49のダルシー流速分布では、水平方向に卓越したチャンネルの存在が明らかである。また、これらのチャンネル相互（鉛直方向の）の連絡は乏しく、個々のチャンネルがそれぞれ強い独立性をもって振る舞うことが推察される。これに対して、最も等方的なCase66のダルシー流速分布では、チャンネルは水平及び鉛直の双方に発達しており、むしろチャンネルネットワークと呼ぶべきものを構成している。また、等方的なケースでは透水係数分布の分散が大きいためからチャンネルは異方的なケースよりもさらに卓越した流路となっている。

水理境界のCase a-1及びa-2を仮定したいずれのケースにおける圧力分布も、TH-1孔（ $x=9\text{m}$ ）の半ばから、TH-2孔を斜めに横切ってTH-3孔下端近傍に到る圧力的な“崖”の存在が見られる。これは、丁度断層の位置と符合するものであり、本解析では顕に断層をモデル化してはいないが、透水係数場の作成時に各試錐孔の断層にあたる位置において比較的低い透水係数値が与えられており、これがフラクタルモデルによる内挿時に自動的に、高い透水抵抗を持つ水理的な“壁”として認識されていることを示している。

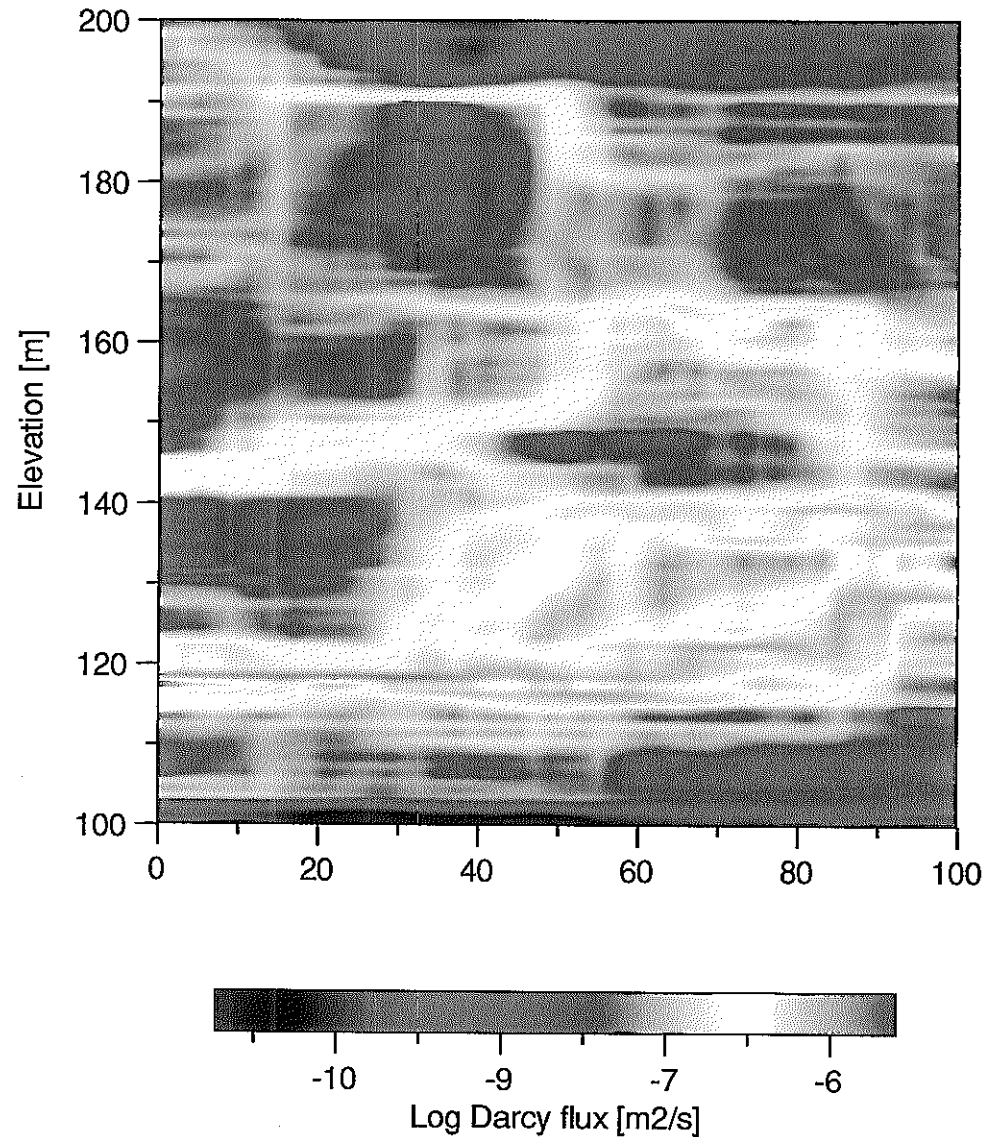


図4.4-1 地下水流動解析結果
(フラクタル透水係数場Case 69、水理境界条件Case a-1の場合のダルシー流速分布)

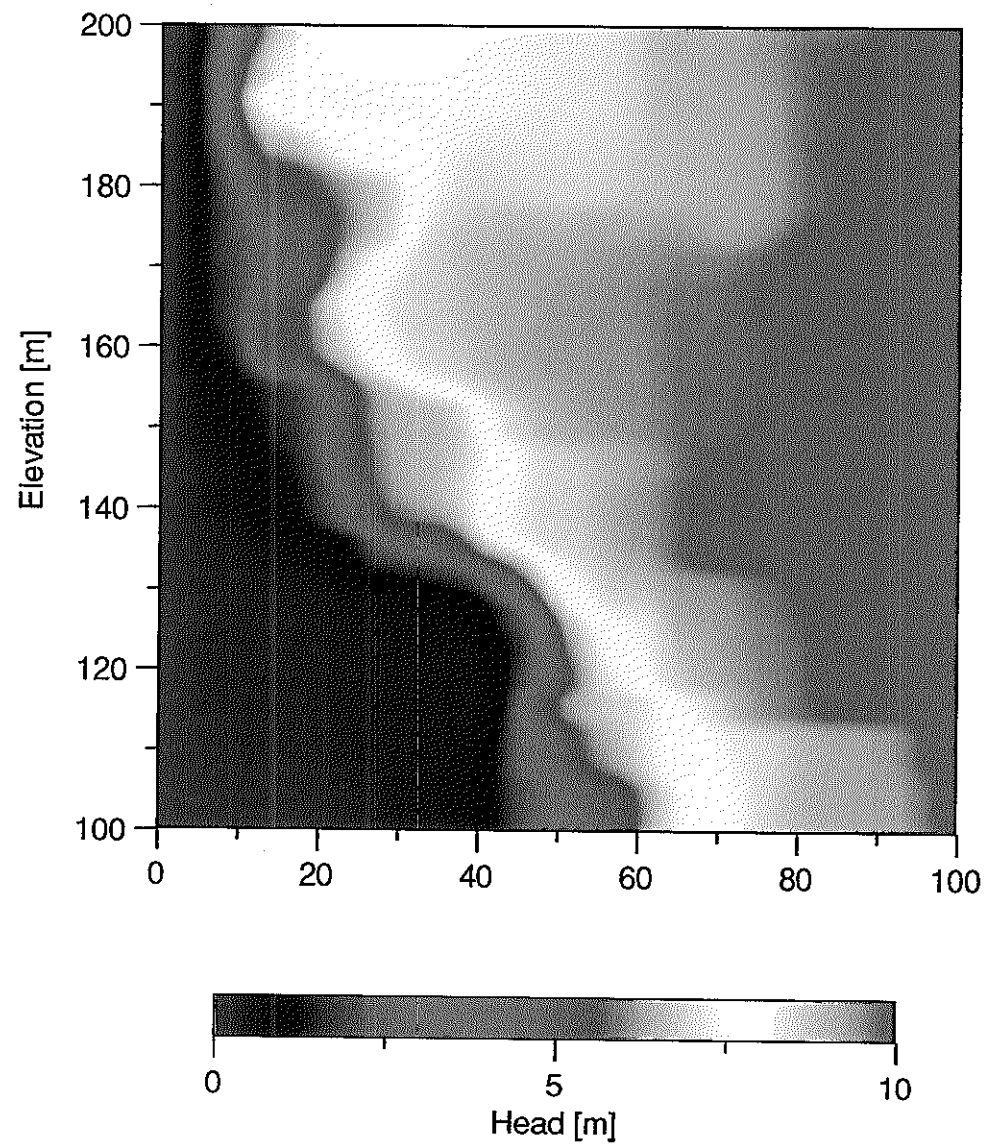


図4.4-1 地下水流動解析結果
(フラクタル透水係数場Case 69、水理境界条件Case a-1の場合の圧力分布)

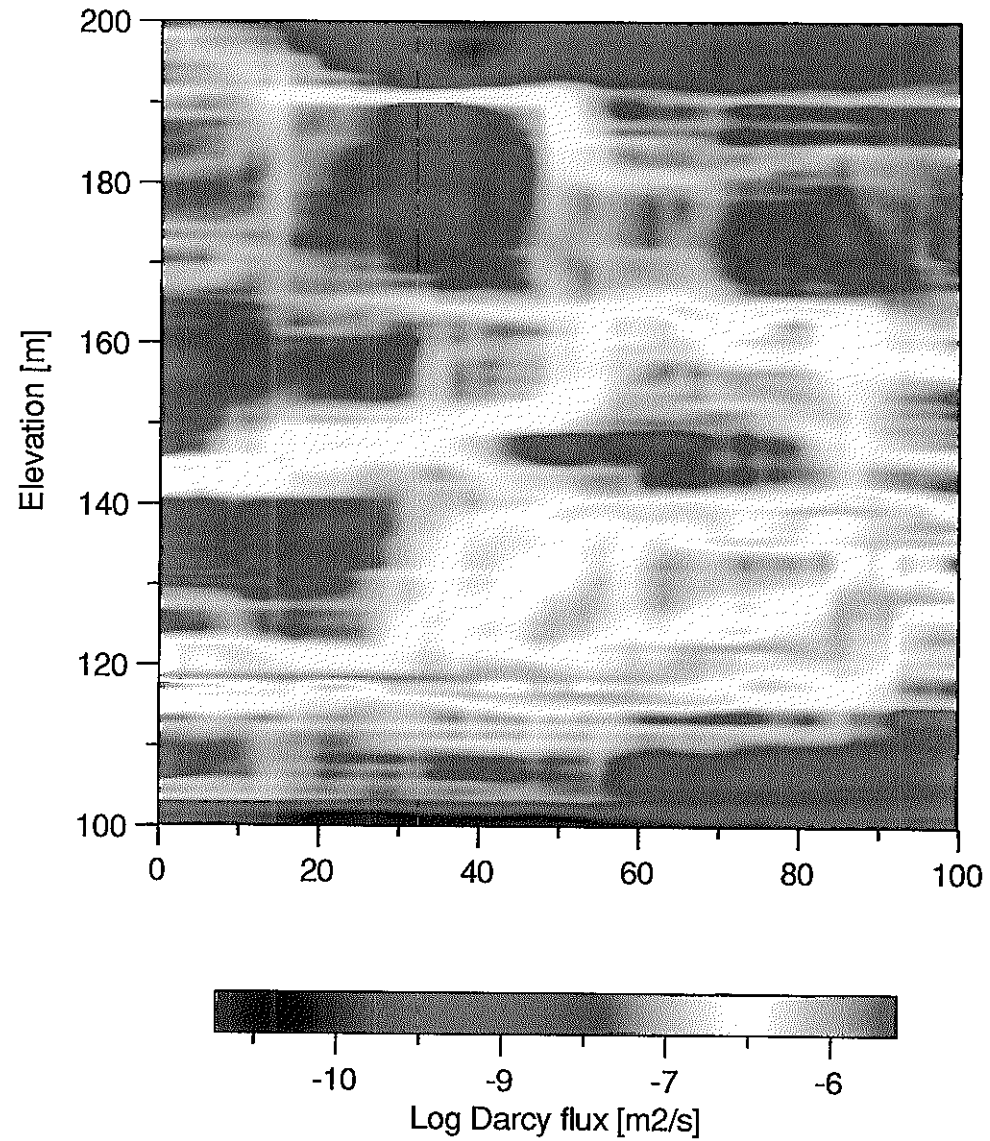


図4.4-1 地下水流動解析結果
(フラクタル透水係数場Case 69、水理境界条件Case a-2の場合のダルシー流速分布)

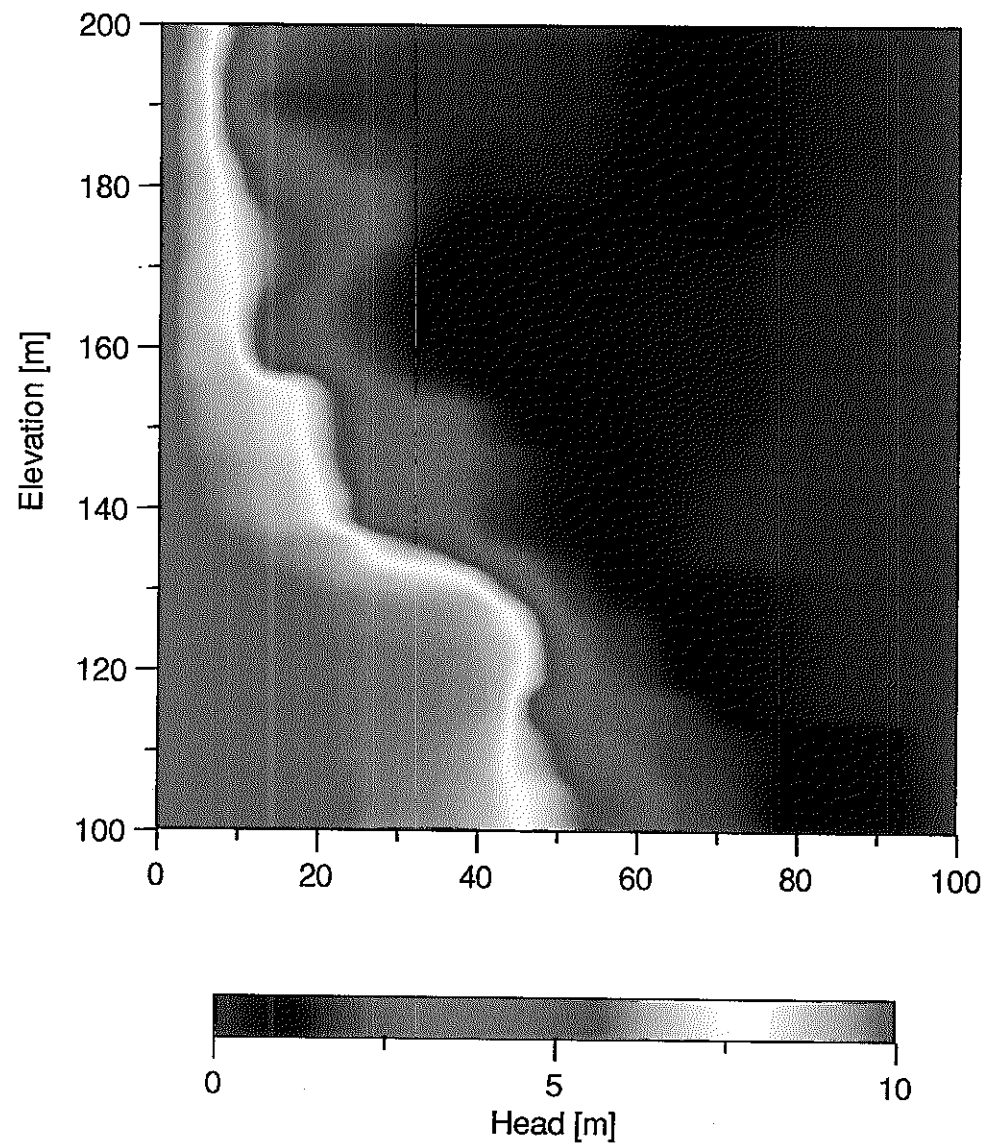


図4.4-1 地下水流動解析結果
(フラクタル透水係数場Case 69、水理境界条件Case a-2の場合の圧力分布)

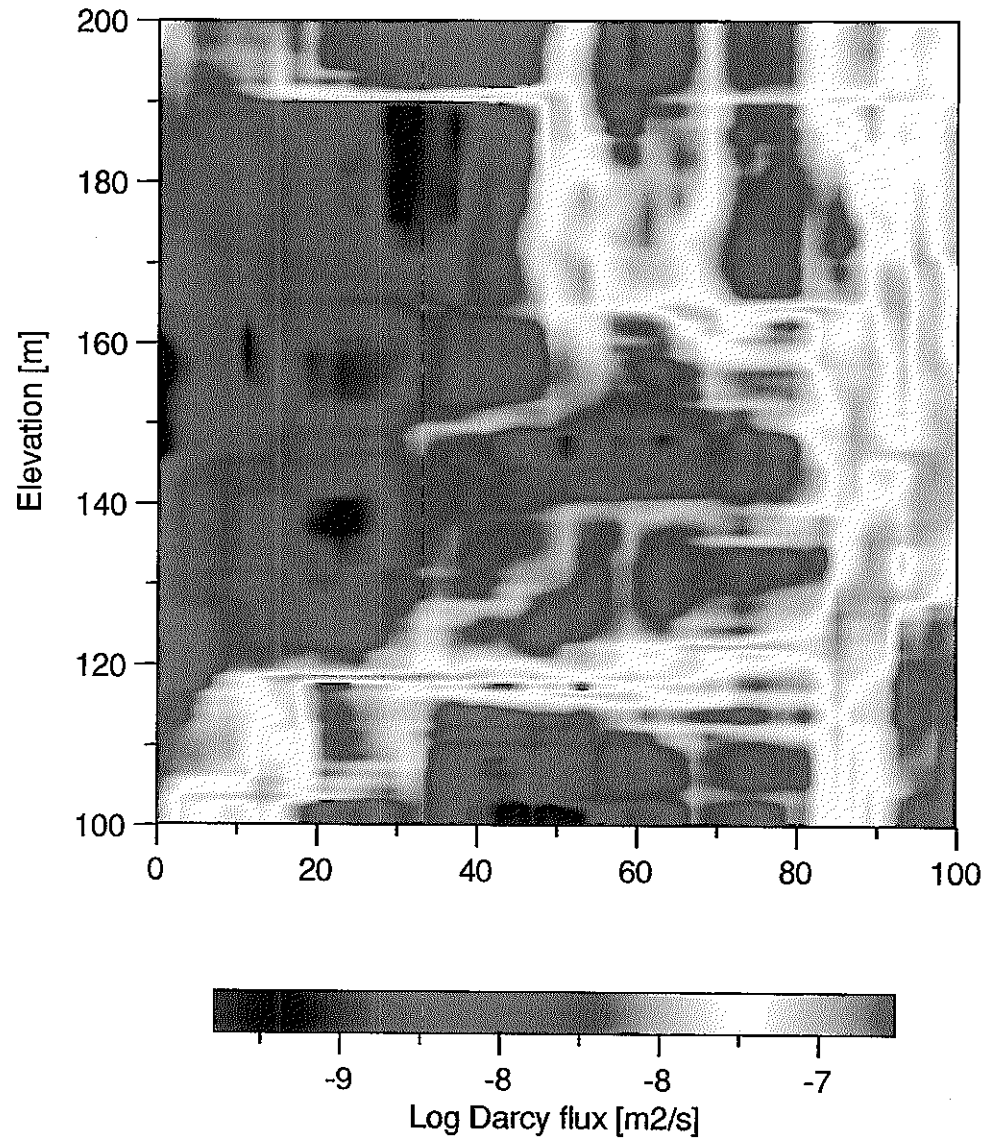


図4.4-1 地下水流動解析結果

(フラクタル透水係数場Case 69、水理境界条件Case b-1の場合のダルシー流速分布)

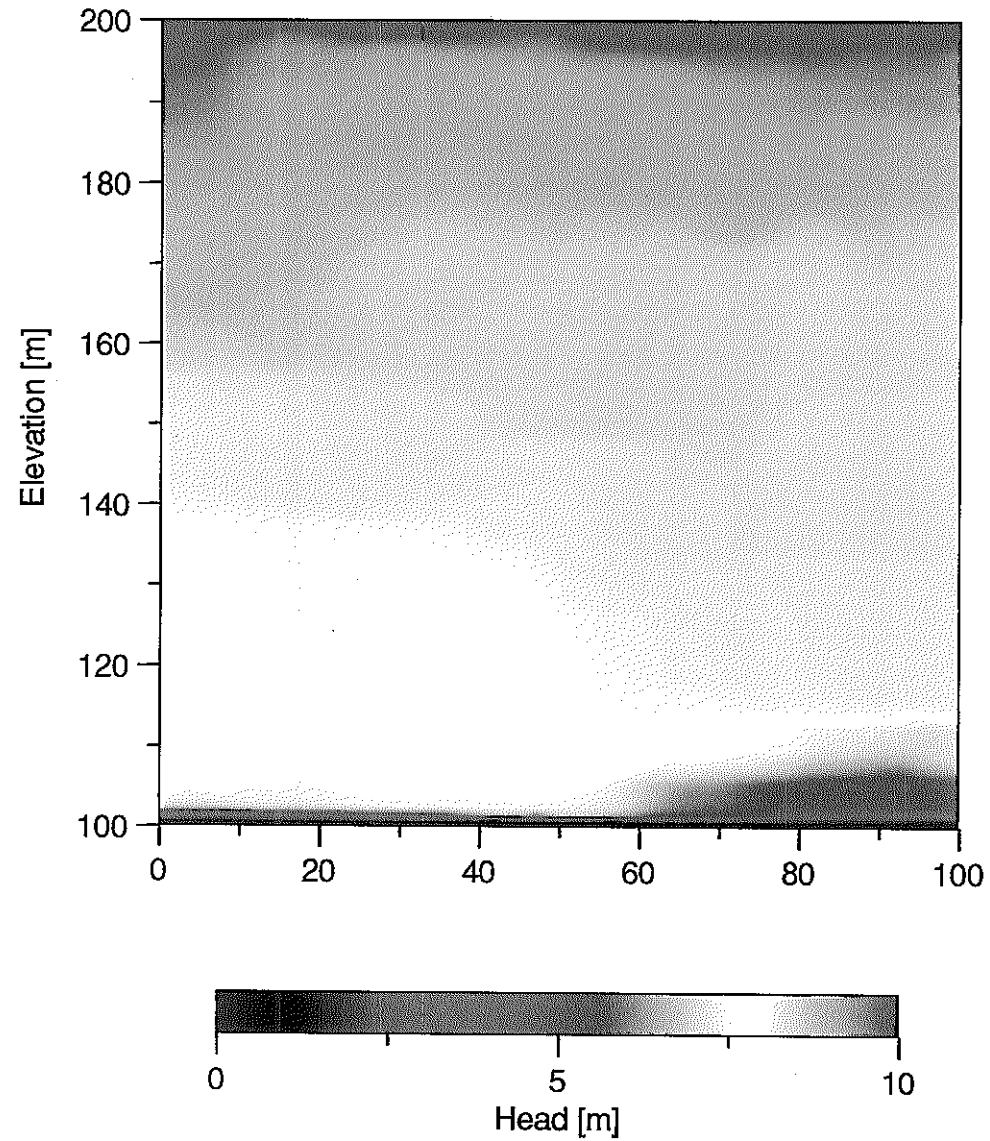


図4.4-1 地下水流動解析結果
(フラクタル透水係数場Case 69、水理境界条件Case b-1の場合の圧力分布)

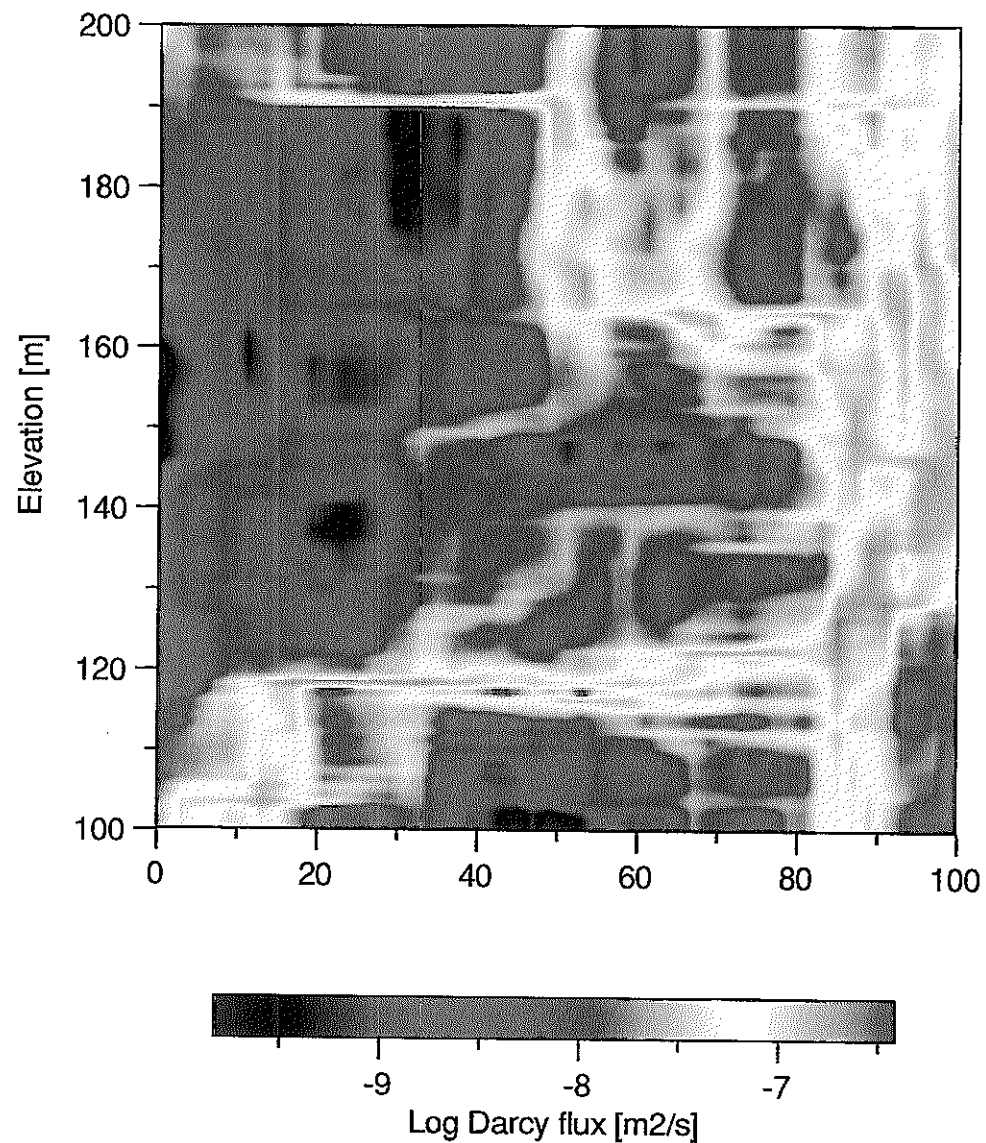


図4.4-1 地下水流動解析結果
(フラクタル透水係数場Case 69、水理境界条件Case b-2の場合のダルシー流速分布)

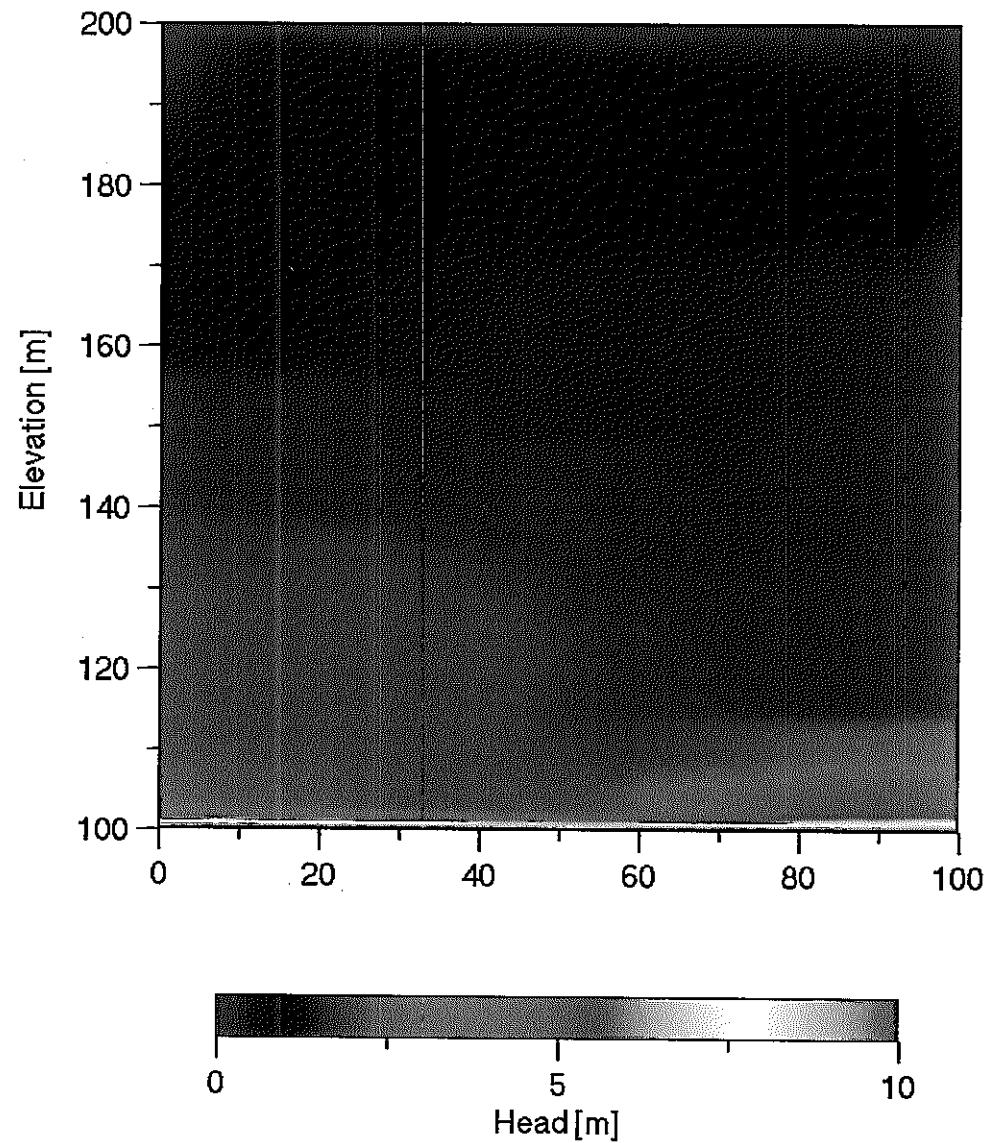


図4.4-1 地下水流動解析結果
(フラクタル透水係数場Case 69、水理境界条件Case b-2の場合の圧力分布)

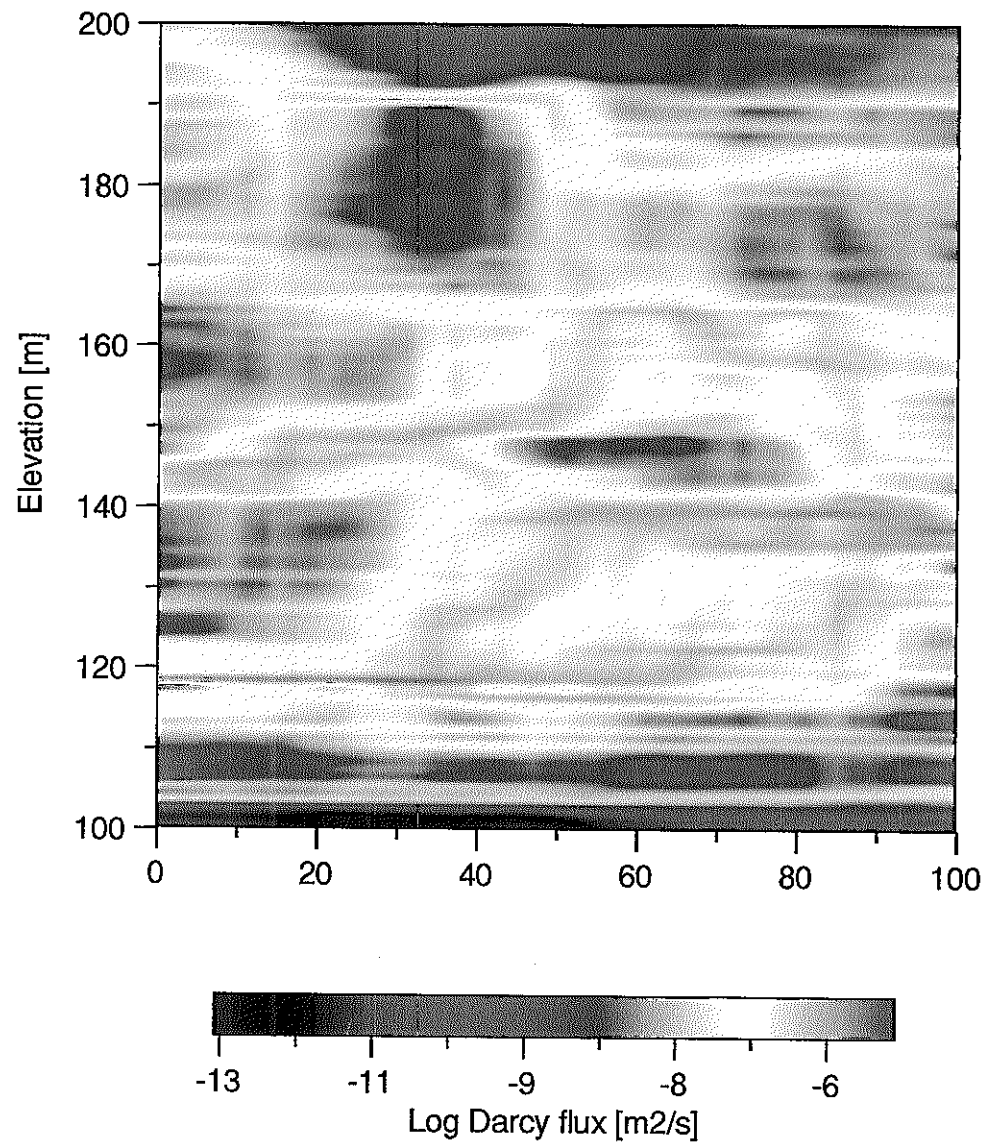


図4.4-1 地下水流動解析結果
(フラクタル透水係数場Case 49、水理境界条件Case a-1の場合のダルシー流速分布)

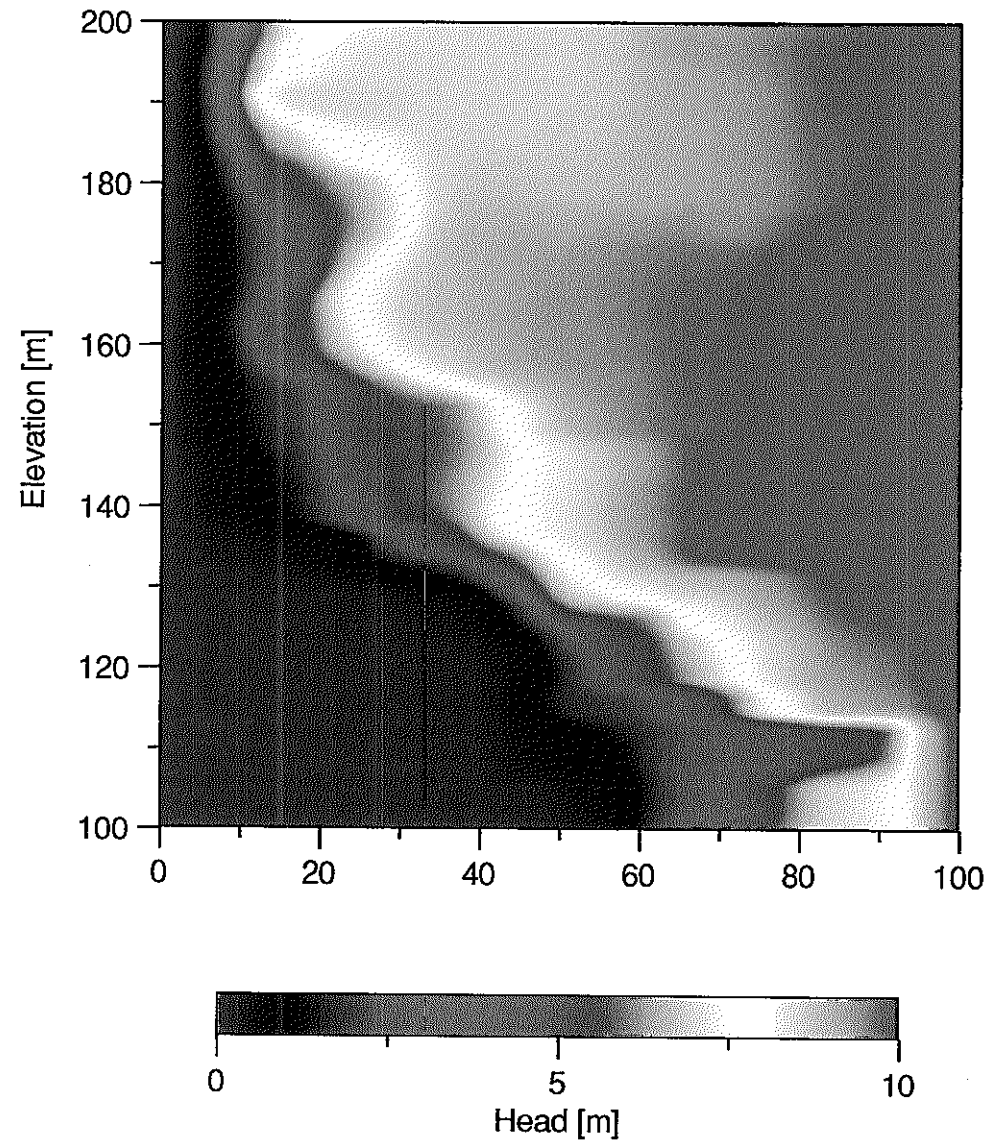


図4.4-1 地下水流動解析結果
(フラクタル透水係数場Case 49、水理境界条件Case a-1の場合の圧力分布)

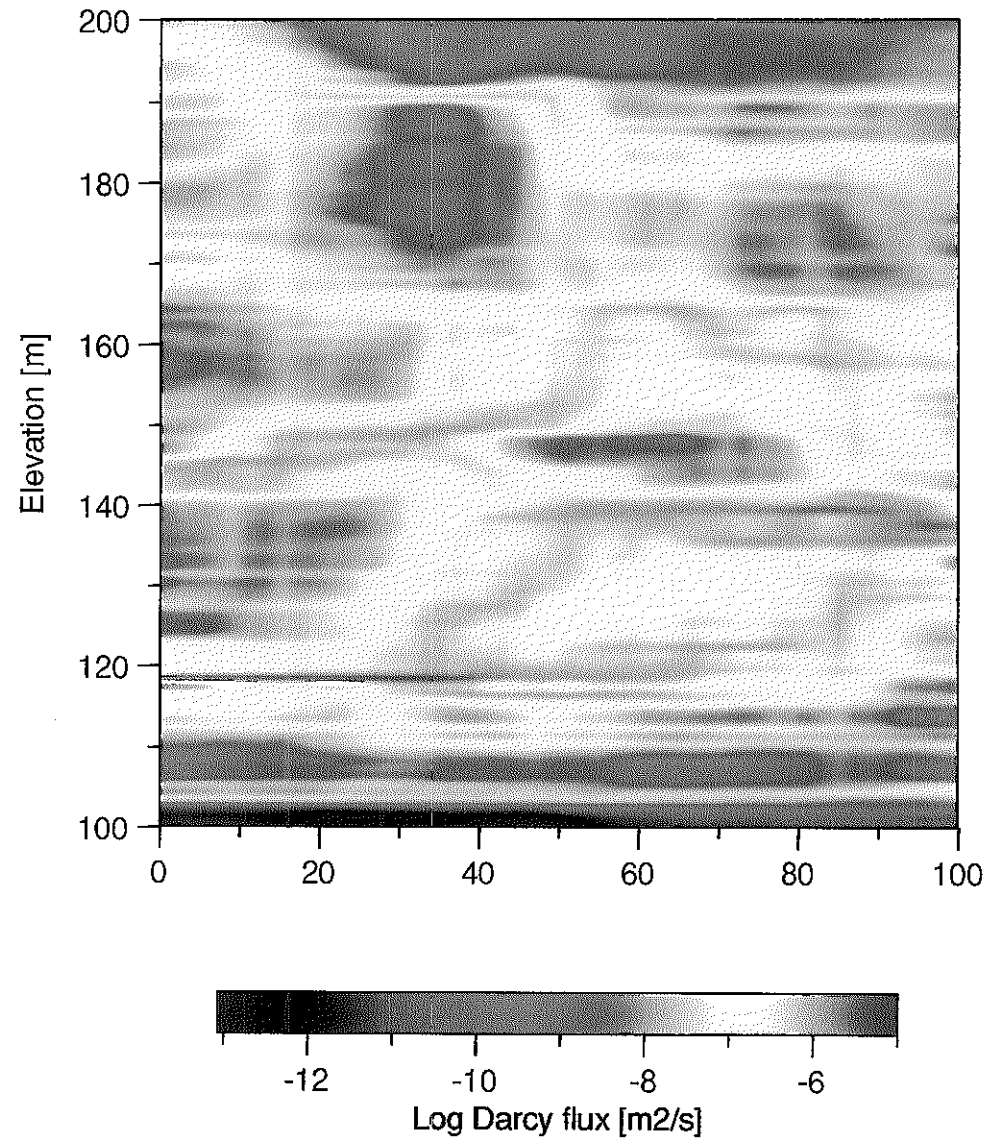


図4.4-1 地下水流動解析結果
(フラクタル透水係数場Case 49、水理境界条件Case a-2の場合のダルシー流速分布)

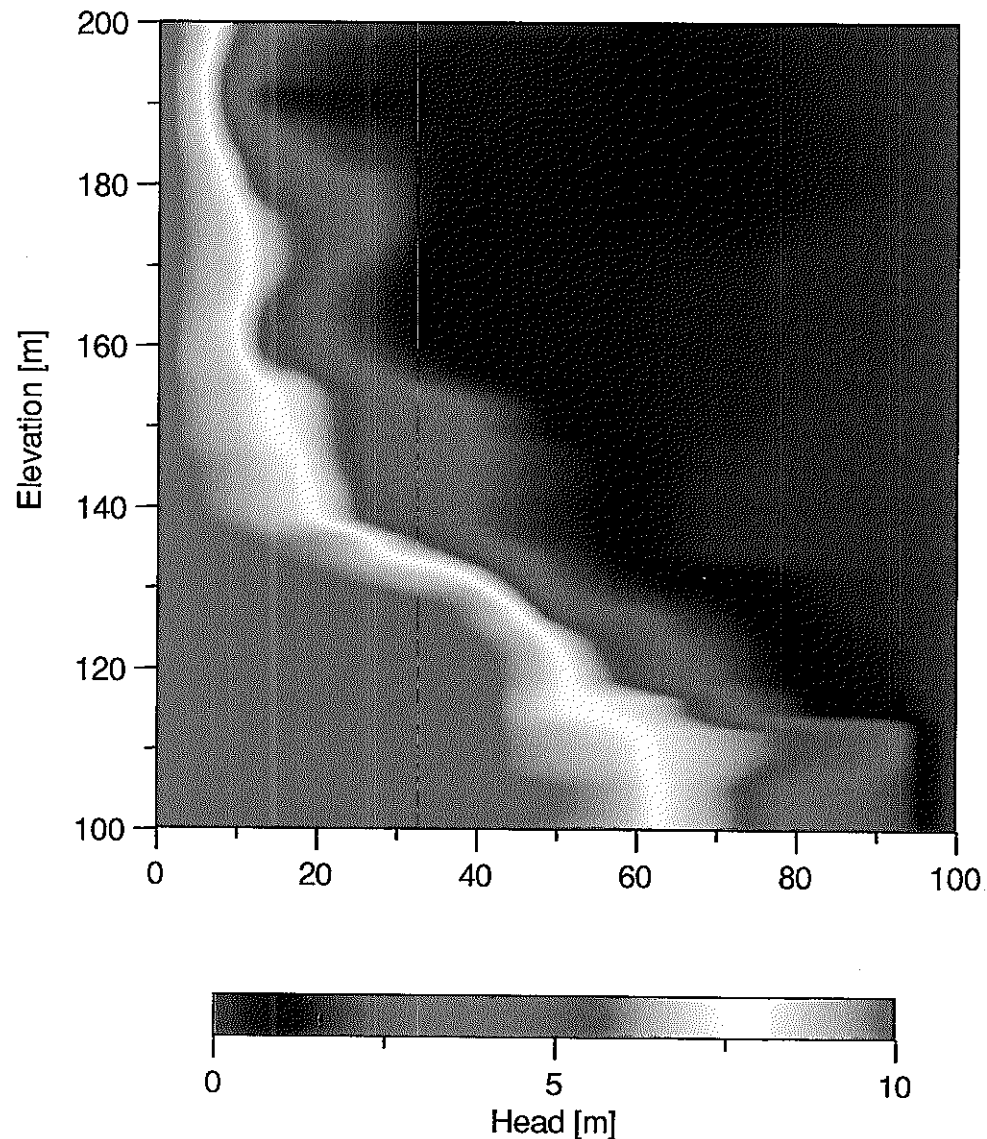


図4.4-1 地下水流動解析結果

(フラクタル透水係数場Case 49、水理境界条件Case a-2の場合の圧力分布)

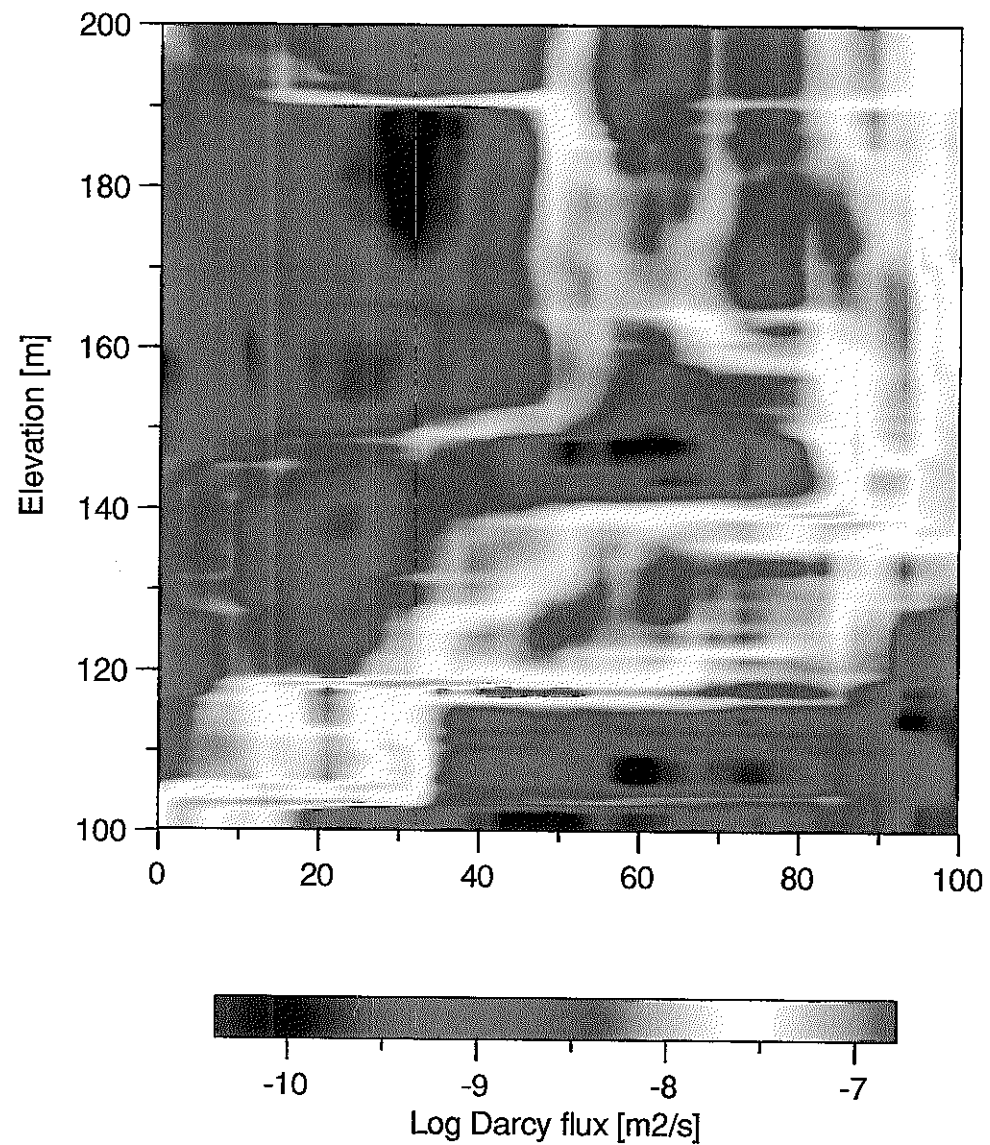


図4.4-1 地下水流動解析結果
(フラクタル透水係数場Case 49、水理境界条件Case b-1の場合のダルシー流速分布)

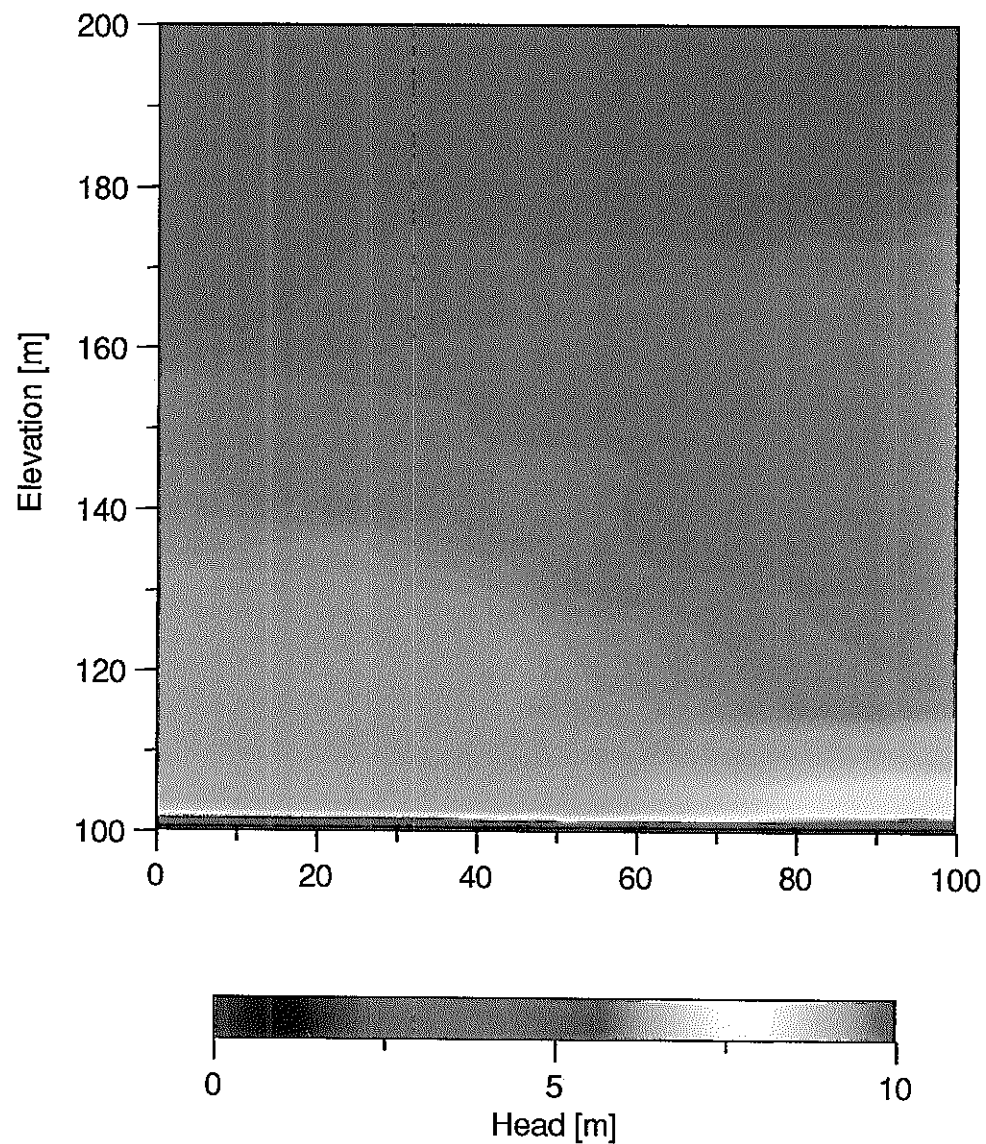


図4.4-1 地下水流動解析結果

(フラクタル透水係数場Case 49、水理境界条件Case b-1の場合の圧力分布)

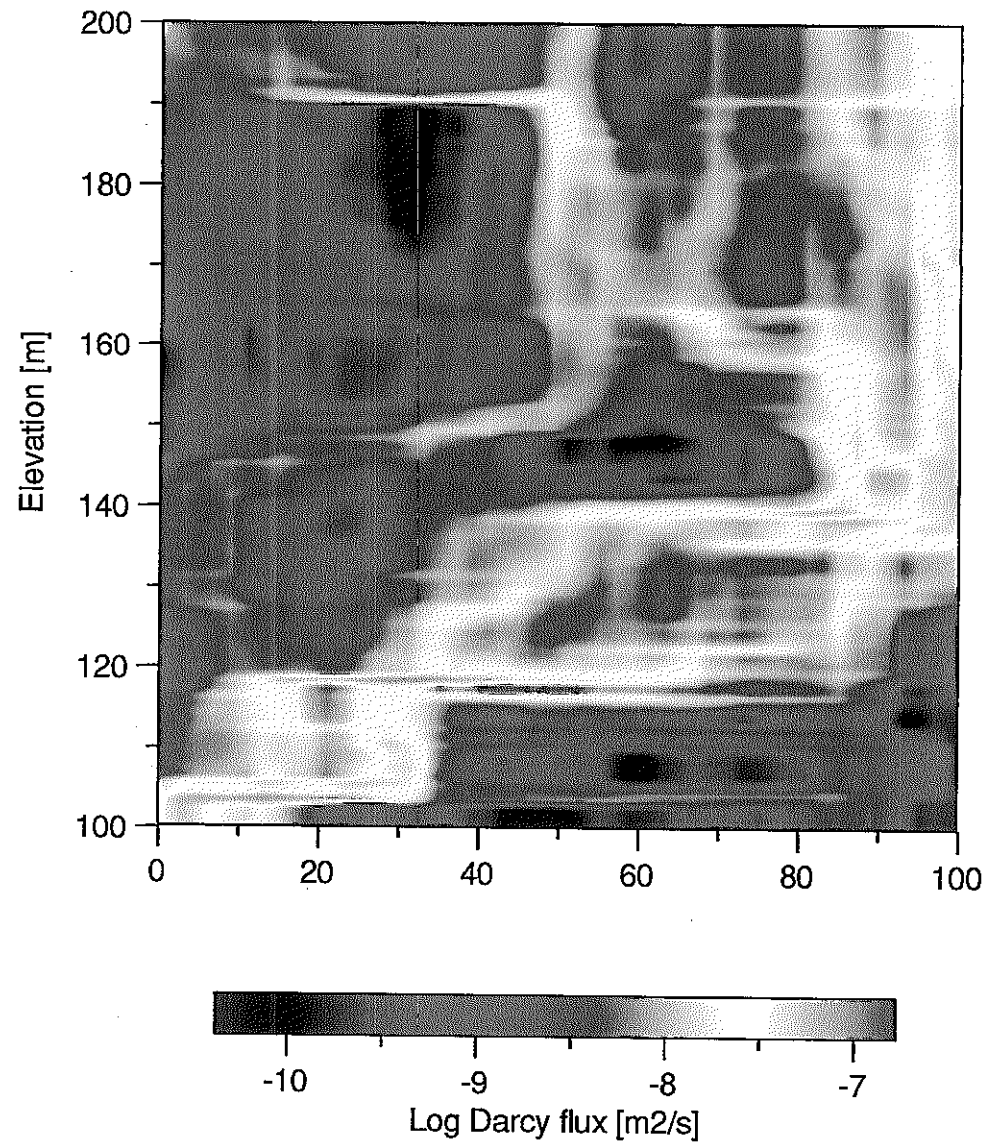


図4.4-1 地下水流動解析結果
(フラクタル透水係数場Case 49、水理境界条件Case b-2の場合のダルシー流速分布)

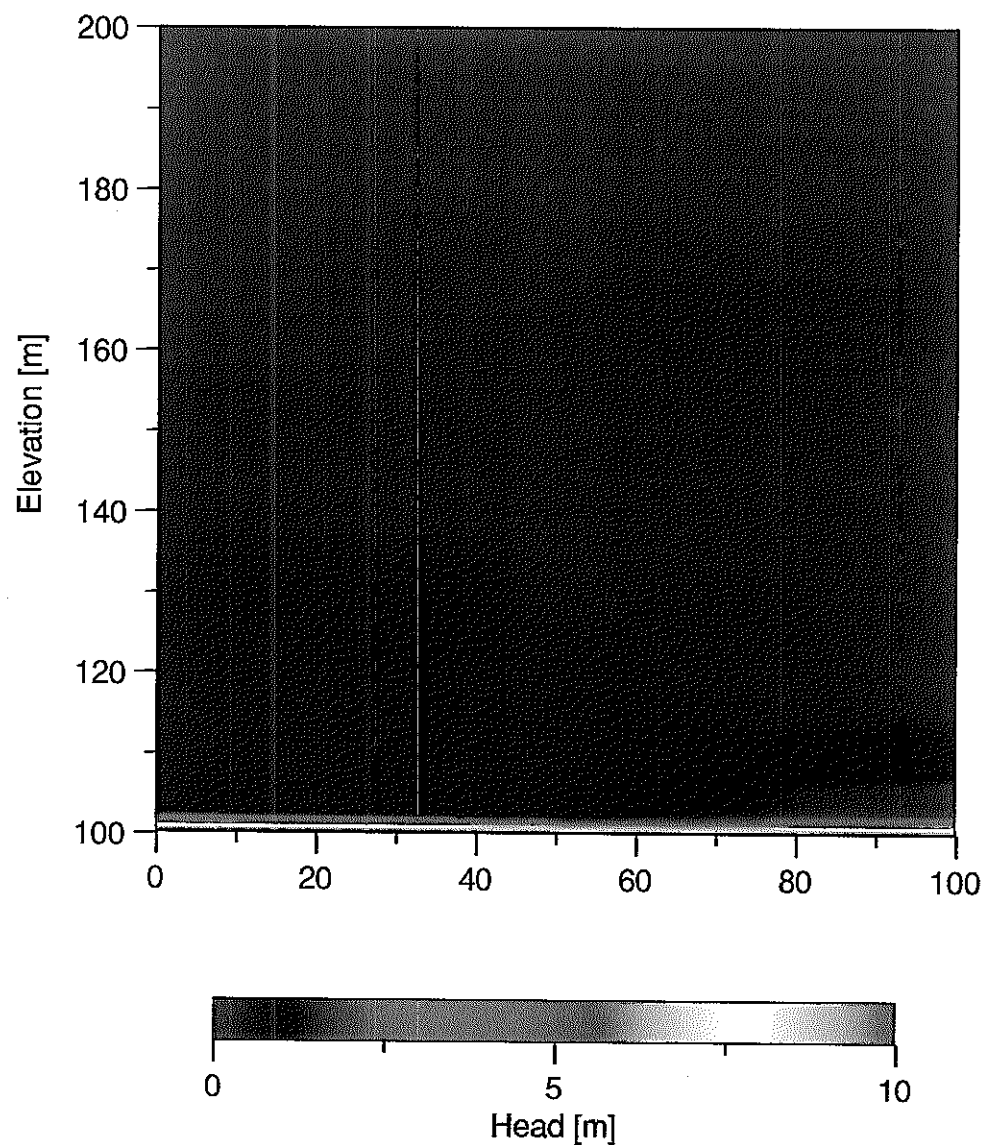


図4.4-1 地下水流動解析結果
(フラクタル透水係数場Case 49、水理境界条件Case b-2の場合の圧力分布)

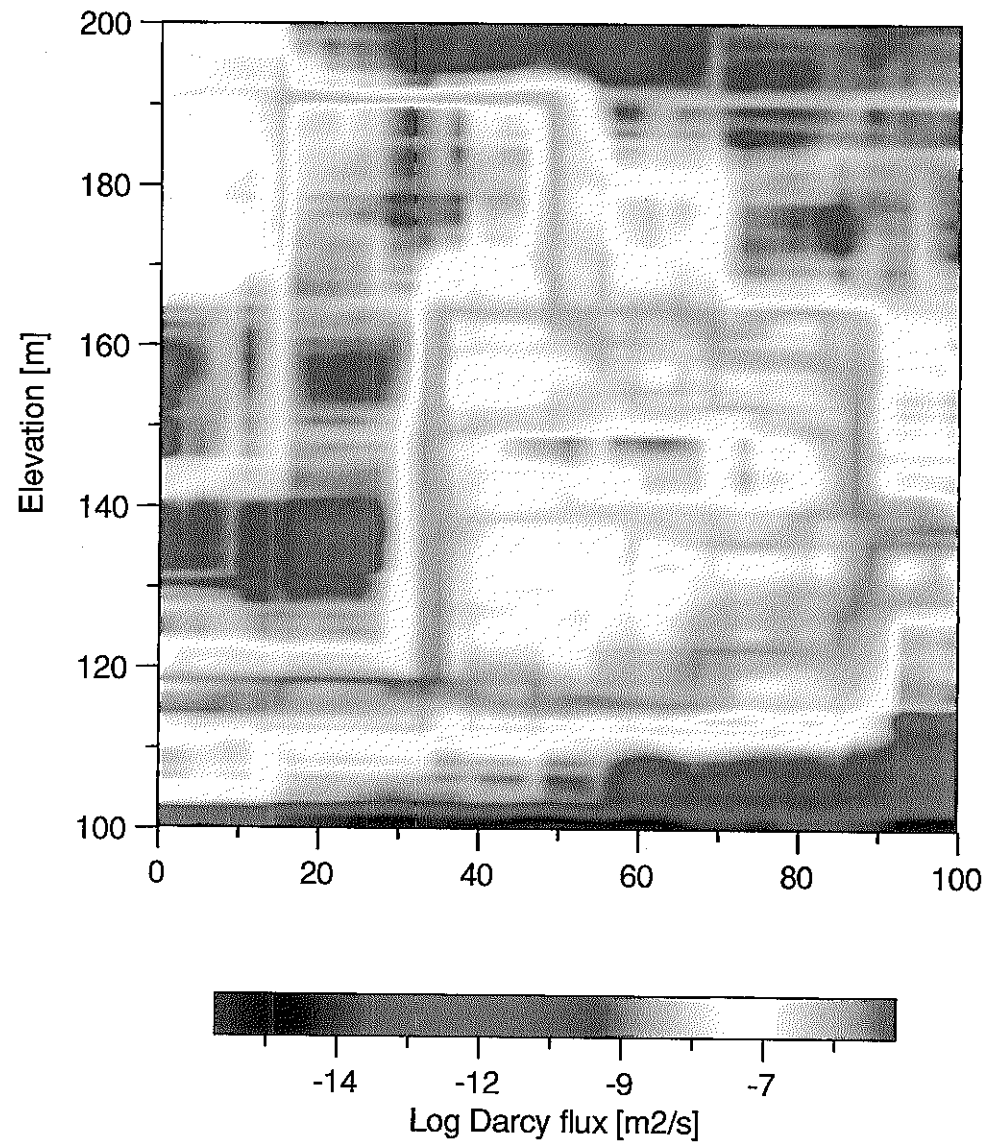


図4.4-1 地下水流動解析結果
(フラクタル透水係数場Case 66、水理境界条件Case a-1の場合のダルシー流速分布)

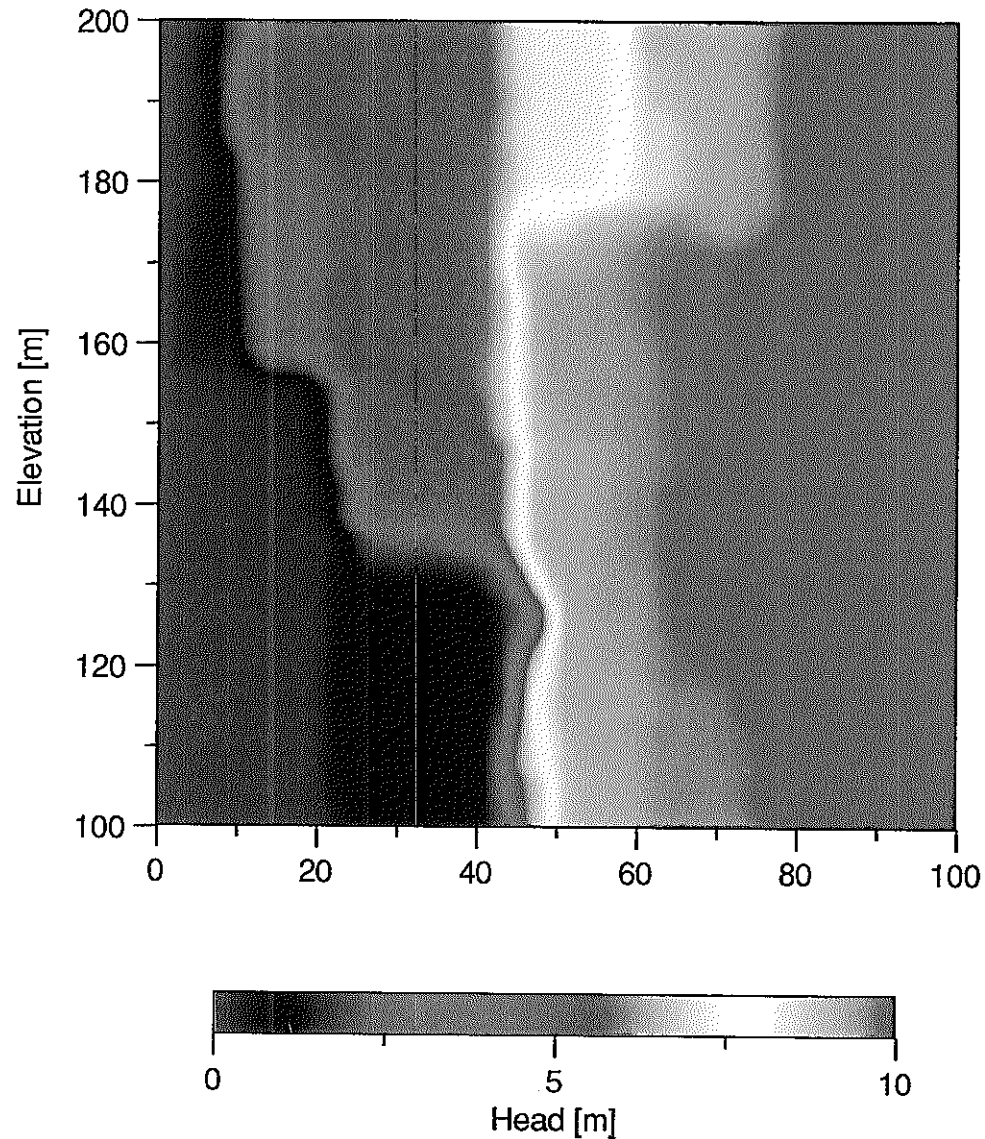


図4.4-1 地下水流動解析結果
(フラクタル透水係数場Case 66、水理境界条件Case a-1の場合の圧力分布)

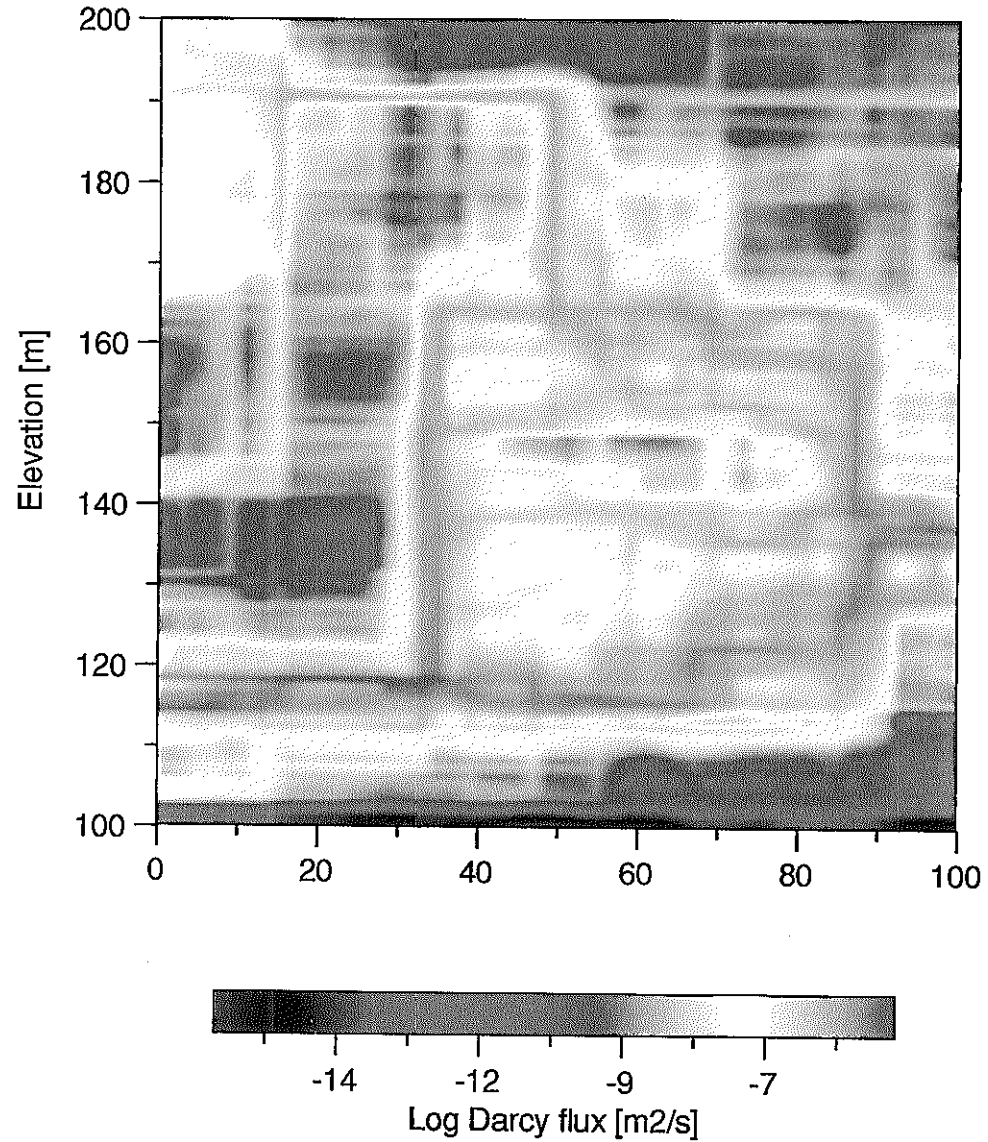


図4.4-1 地下水流動解析結果
(フラクタル透水係数場Case 66、水理境界条件Case a-2の場合のダルシー流速分布)

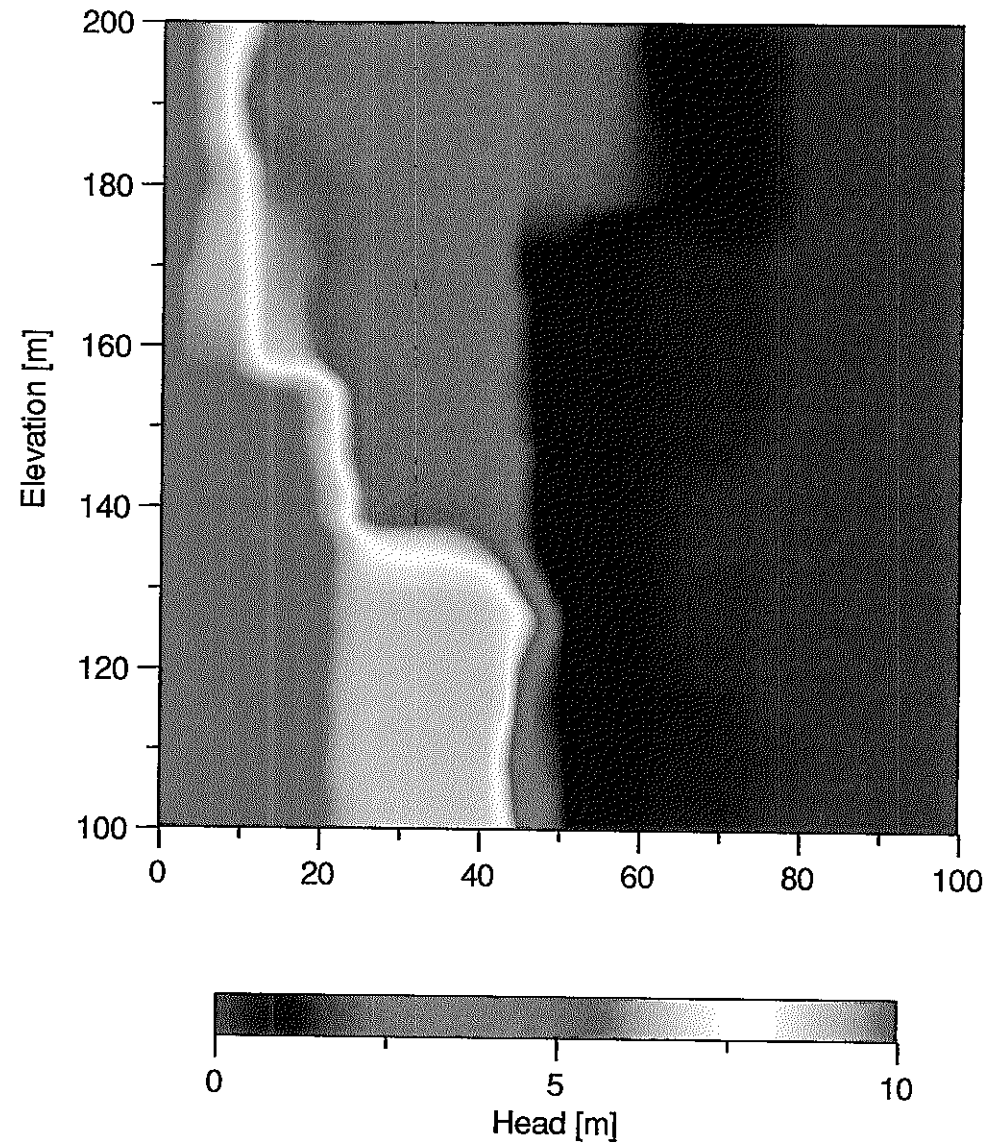


図4.4-1 地下水流動解析結果
(フラクタル透水係数場Case 66、水理境界条件Case a-2の場合の圧力分布)

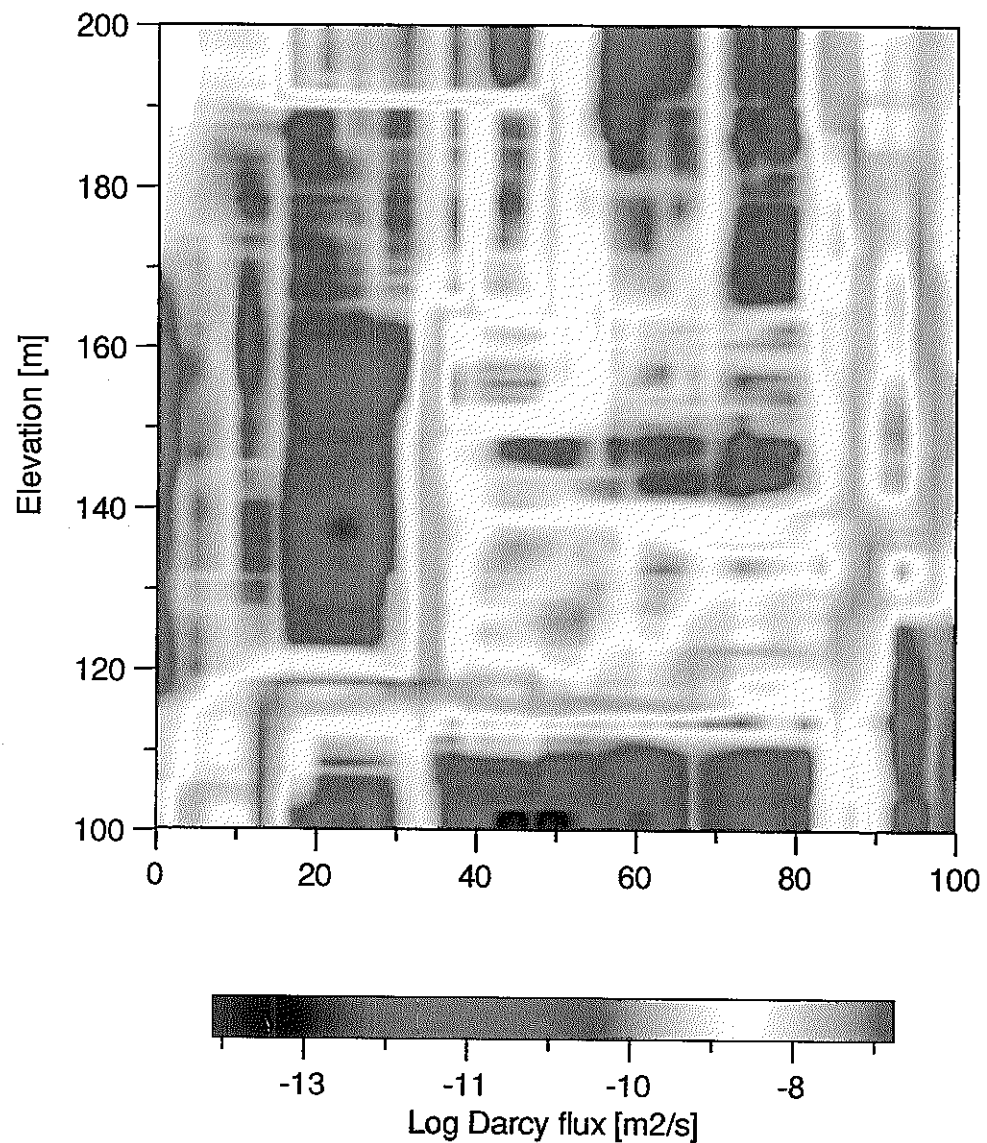


図4.4-1 地下水流動解析結果
(フラクタル透水係数場Case 66、水理境界条件Case b-1の場合のダルシー流速分布)

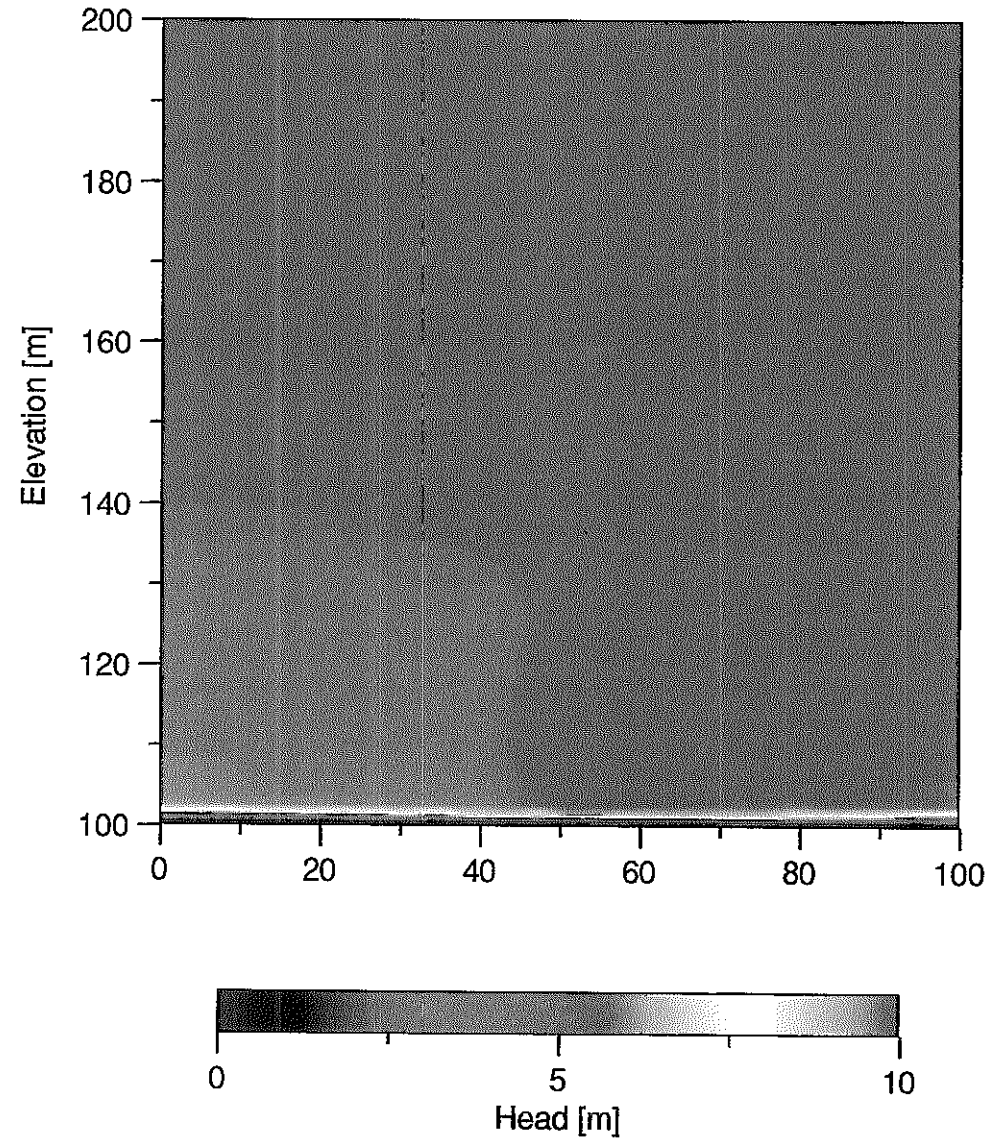


図4.4-1 地下水流動解析結果
(フラクタル透水係数場Case 66、水理境界条件Case b-1の場合の圧力分布)

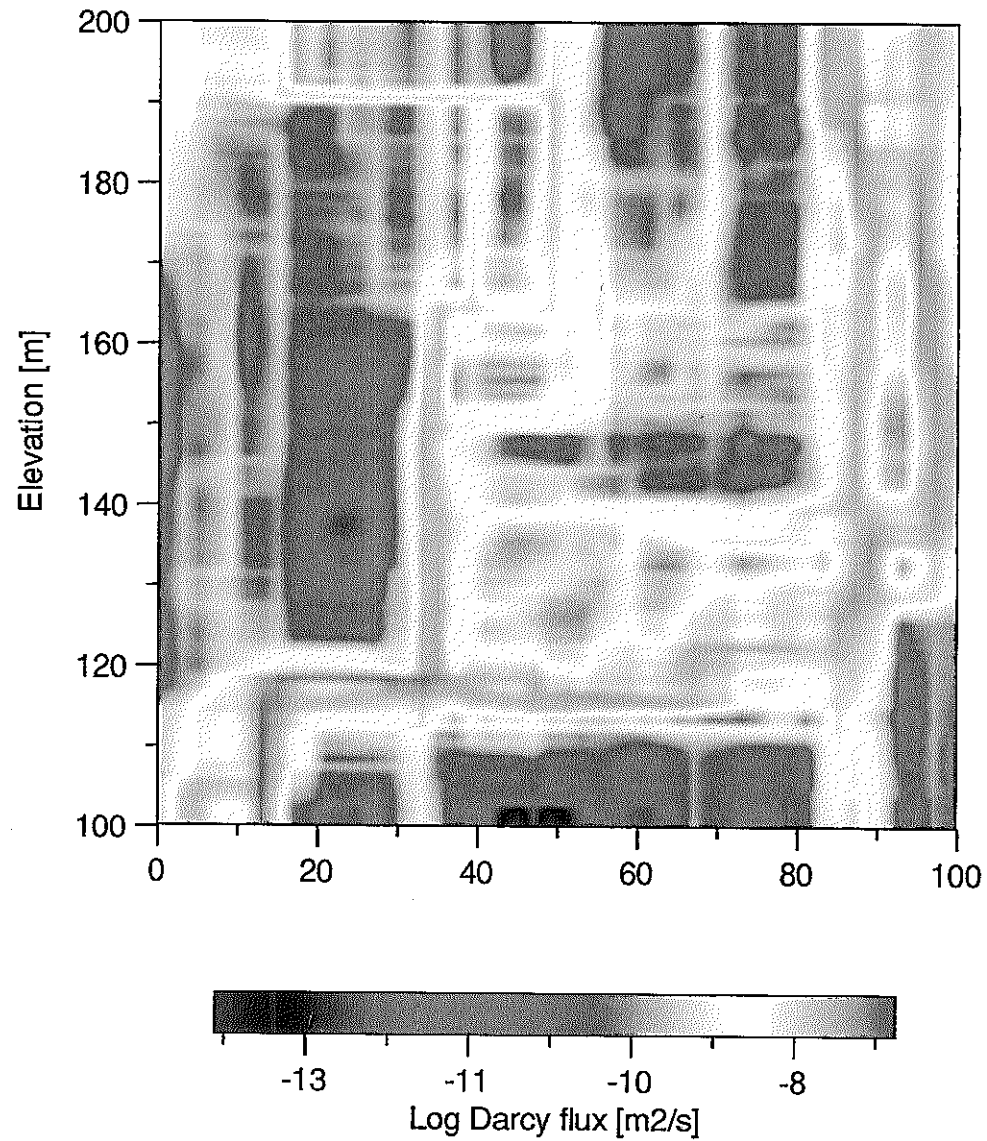


図4.4-1 地下水流動解析結果
(フラクタル透水係数場Case 66、水理境界条件Case b-2の場合のダルシー流速分布)

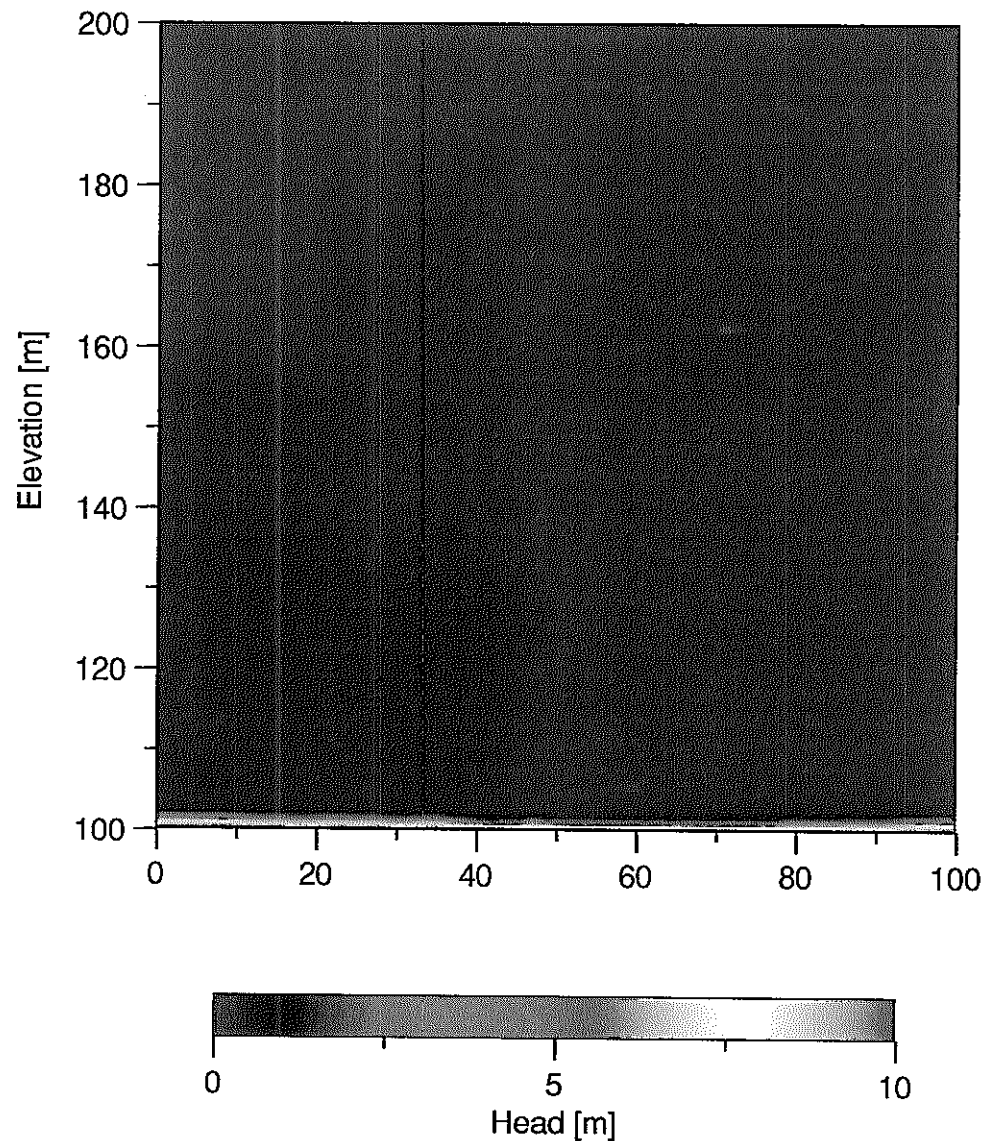


図4.4-1 地下水流動解析結果
(フラクタル透水係数場Case 66、水理境界条件Case b-2の場合の圧力分布)

5. 統計的自己アファインフラクタルモデルによる水理解析結果の検証

ここでは、フラクタルモデルによって行った水理解析に基づきパーティクルトラッキングの手法で溶質移動を計算し、これと、やはり地下水流動によって供給されたウランの現在の分布状況とを比較することによる水理解析結果の検証についてまとめる。

ウラン鉱床の成因としては、地下水流動によって溶存形のウランが供給されることと、供給されたウランが吸着あるいは沈澱といった化学的なプロセスによって固定化されることの二つの点を考慮することが必要であるが、本業務で行う解析は明らかにこれらのうち前者のみを取り扱ったものである。従って、ここでの比較は、ガンマ線強度として表現されるウランの分布濃度を定量的に表現することを目的としたものではなく、ガンマ線異常を示す様な高濃集の部位とそれ以外の場所との差異が水理学的な見地から説明できるか否か、換言すれば、場所毎のウランの有無という定性的な特徴が、地下水流動によるウラン供給の有無によってどれほど説明できるかを明らかにすることを目標とするものである。

5.1 ウランの分布状況

(1) 東濃ウラン鉱床地域の地史[18]

本地域に起こった地質事象を、地質学的な知見に基づき年代順に構成すると次の様になる。

約7000万年前にマグマが地下深く貫入し、徐々に冷え固まって基盤岩である花崗岩が形成された。その後、地表は浸食されて、ついには花崗岩が地表に露出・浸食されるようになった。地表に花崗岩が露出していたこの地域は約2000万年前から沈降しはじめ、湖やがては海の底まで水没した。その間、花崗岩の上に陸地から運搬されてきた礫・砂・泥が堆積しはじめ、それが約1500万年前まで続いた。これらの堆積物は固結し、堆積岩（瑞浪層群）となった。

その後、この地域は隆起して陸化し、瑞浪層群は地表へ露出した。そして、瑞浪層群は約500万年前まで浸食を受ける様になった。この間、約1000万年前に地下水の関与によってウラン鉱床が地下深部に形成されたと考えられる。この間にもこの地層は浸食を受け続け、さらには東西方向の断層（月吉断層）が生じ、鉱床とそれを含む瑞浪層群に約30m程

のずれが形成された。しかしこの断層によってウラン鉱床が切られたにもかかわらず、ウランは地表に漏出することなく、地下深部に存在し続けた。地表からの浸食はその後も約500万年前まで続いた。瀬戸層群の堆積は、水没した後約70万～10万年前まで続いた。この地域はその後、再び隆起し、最上位の瀬戸層群が主に浸食を受け、現在の地形の骨格が形作られた。

東濃地域のウラン鉱床は、これらの地質学的変遷を経て現在に到ったものと考えられる。

(2) ウランの産状[18]

顕微鏡やX線マイクロアナライザー(EPMA)などによる調査の結果、ウランは主に第三紀層中の細～粗粒砂岩中に濃集することが認められる。これらの砂岩中で、ウランは碎屑性鉱物である黒雲母や二次鉱物である黄鉄鉱などに伴う。透過型電子顕微鏡やEPMAを用いて黒雲母について詳細な調査を行ったところ、一部がスメクタイト化し、0.1～1 μ mの微細なウラン鉱物(コフィナイト)を伴うことが見いだされた。このことは、変質部にウランが収着・濃集し、還元環境下で固定されたことを示している。

岩石へのウランの収着が、本地域での鉱床成因の重要な要素となっていることから、同地域の高濃集部及び低濃集部にあたる砂質凝灰岩についてのウランのバッチ収着試験が実施されている。その結果、分配係数値としては、低濃集部で58.8～164.7ml/g、高濃集部で3.6～4.4ml/gとなり、低濃集部の方がむしろ高い値を示した。また、透水係数は、高濃集部が低濃集部よりも2～3桁高い値を示した。 α -オートラジオグラフや走査型電子顕微鏡(SEM)を用いた空隙構造調査から、高濃集部の岩石中の黒雲母や石英粒子中の割れ目、鉱物粒子間などの空隙にウランが濃集していることが確認できる(図5.1-1)。つまり、ウランの移行経路及び濃集場所としては、鉱物粒子中や粒子間の空隙が重要な役割を果たしたと考えられる。これらのことから、ウランの移行・濃集には、岩石の持つ収着能力だけでなく、地下水が流れることのできる移行経路が存在するかどうかにも影響されるものと考えられる。

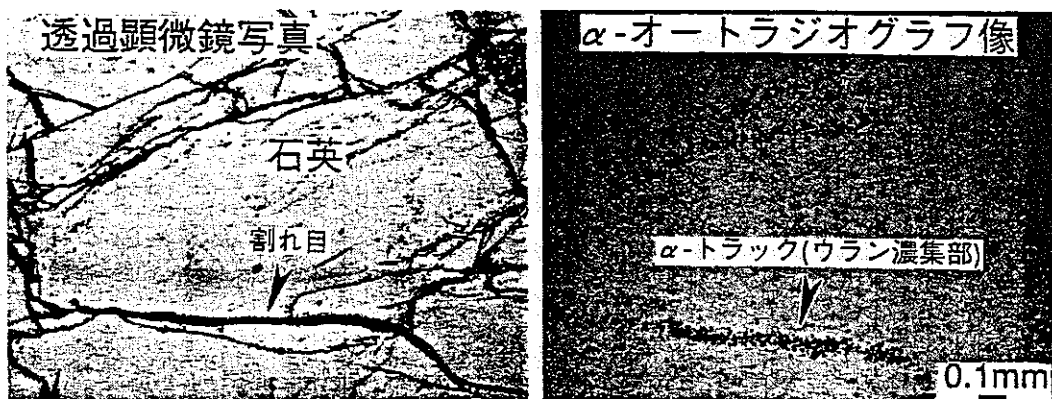


図5.1-1 ウランの移行経路と濃集位置との関係[18]

(3) γ 線強度と透水係数及びダルシー流速の関係

(2) の議論に基づき、 γ 線強度と透水係数及びダルシー流速（水理境界条件Case a-2、フラクタル透水係数場Case 69）の関係について整理を行った。結果を、図5.1-2にまとめる。ウランの高濃集部即ち γ 線異常の認められる部分は、比較的透水係数及びダルシー流速の高い部位にあるが、ダルシー流速が高いにもかかわらずウランが濃集していない部分や、逆にダルシー流速が際だって高くないにもかかわらずウランの濃集が認められる部分の存在も顕著である。

以上の特徴の解釈としては、地球化学的な要素まで含めれば鉱物組成の相異に伴う収着能力の相異として説明することも勿論可能であるが、水理学的な立場からは溶質移動の位相のずれと見ることもできる。即ち、現在のウランの分布状況は、供給が開始されてから一定期間経過して供給源が枯渇し、支配的なチャンネルにおいては脱着が始まっているがその近傍の比較的low透水性の部分では引き続き（時間遅れを伴う）ウランの供給が生じている様な状況に対応するものと解釈することが可能である。ウラン鉱床が現在まで安定に存在している以上、何らかの非可逆な固定化プロセスが働いたことは明らかであり、上の解釈ではウランの供給源が枯渇して脱着が開始された後、この固定化プロセスの進むために必要なタイムラグをおいて、ある時点でのプロファイルが”凍りついた”状態となって現在にまで続いていると考えることとする。

TH-1 孔

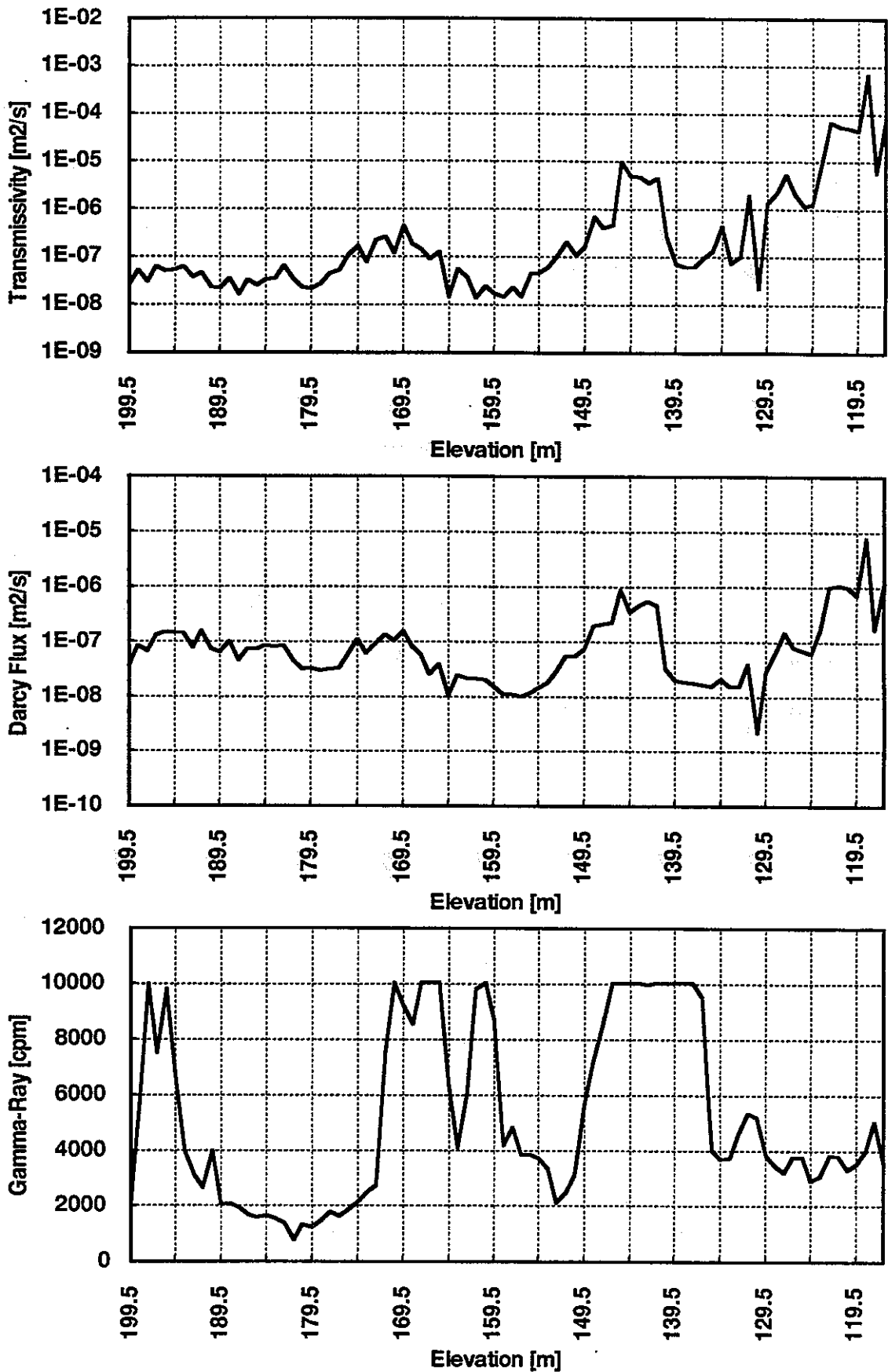


図 5.1-2 各試錐孔に沿ったγ線強度、透水係数及びダルシー流速
(水理境界条件 Case a-2、フラクタル透水係数場 Case 69)

TH-2孔

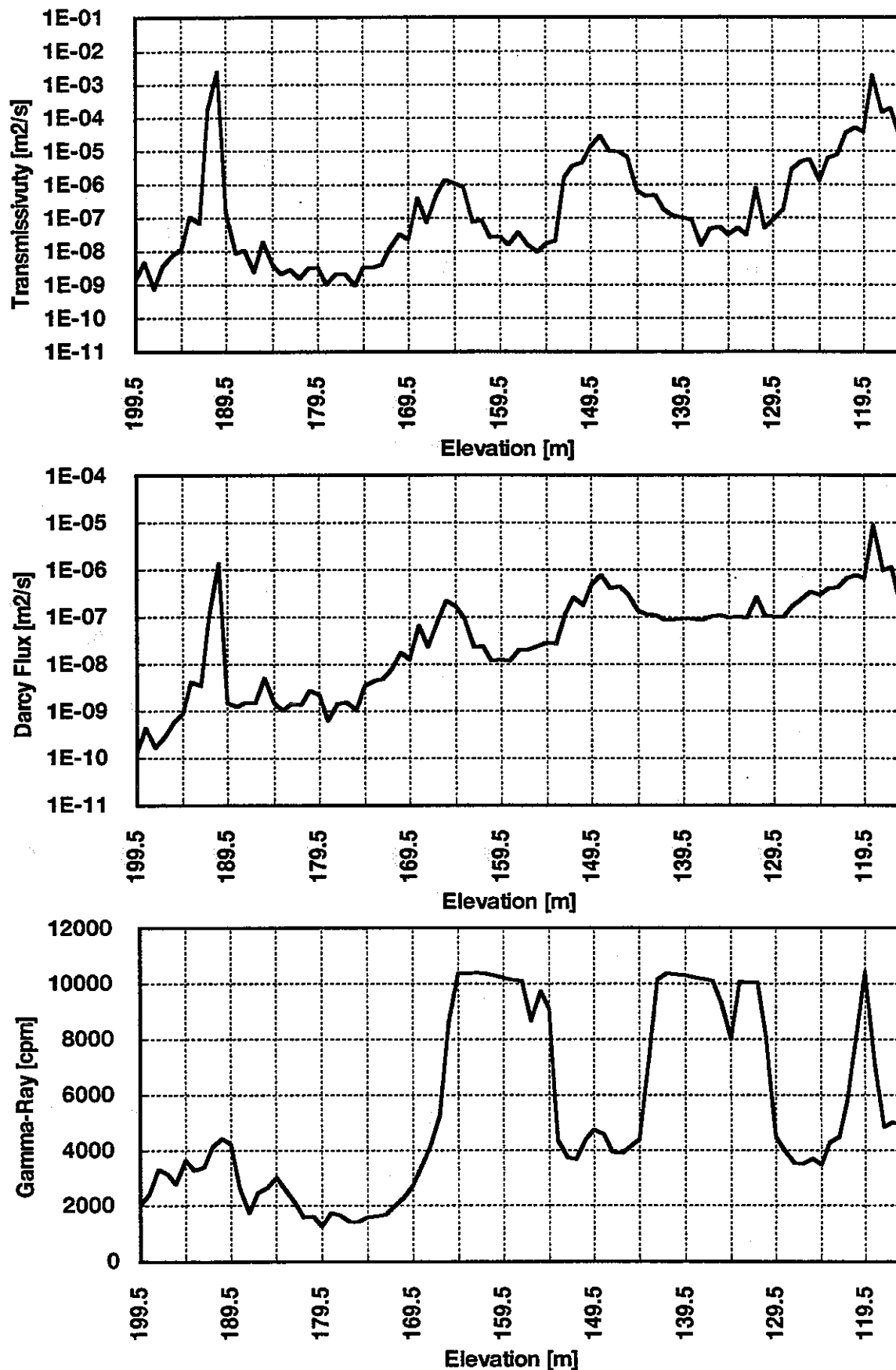


図 5.1-2 各試錐孔に沿ったγ線強度、透水係数及びダルシー流速
(水理境界条件 Case a-2、フラクタル透水係数場 Case 69)

TH-3孔

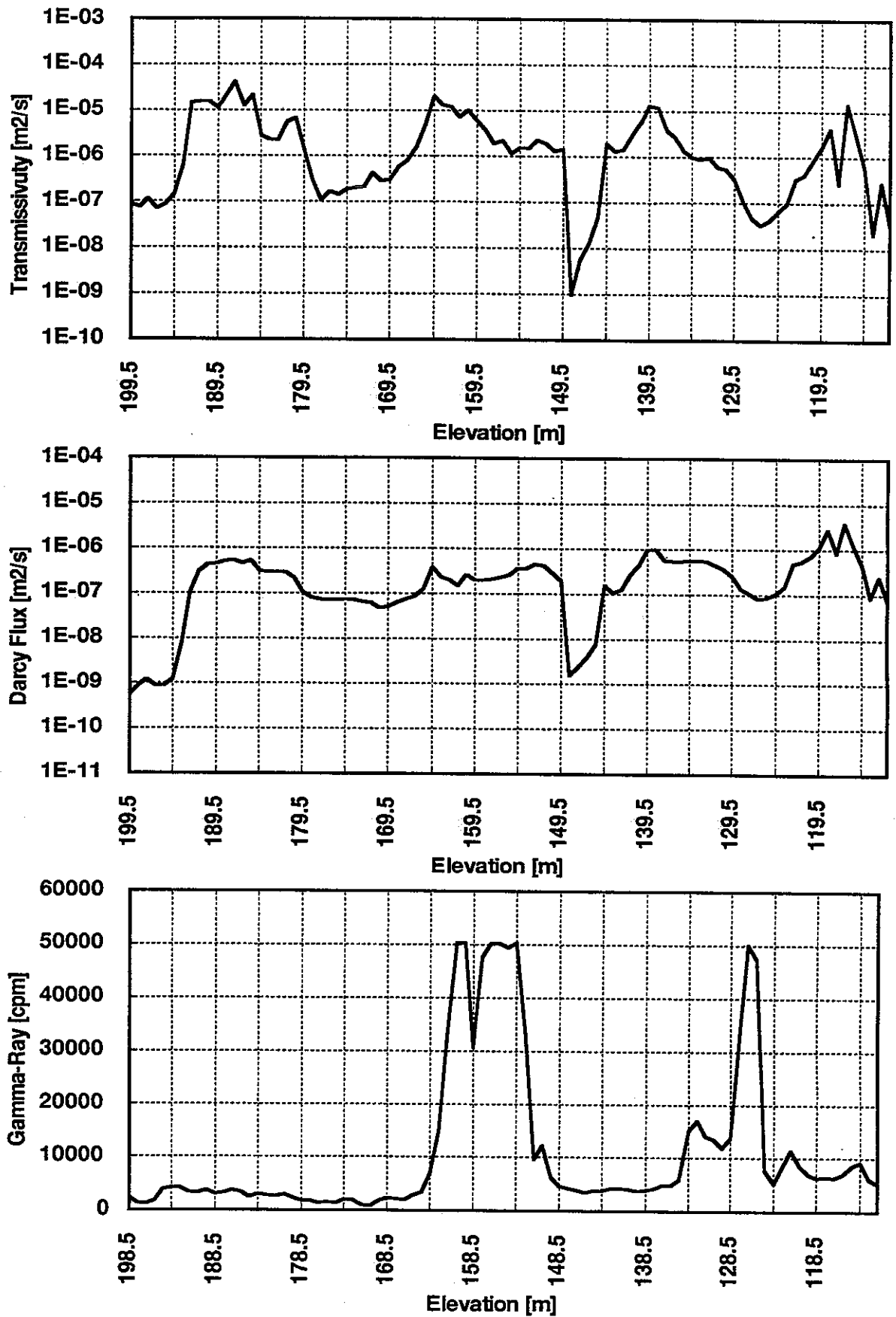


図 5.1-2 各試錐孔に沿ったγ線強度、透水係数及びダルシー流速
(水理境界条件 Case a-2、フラクタル透水係数場 Case 69)

TH-4 孔

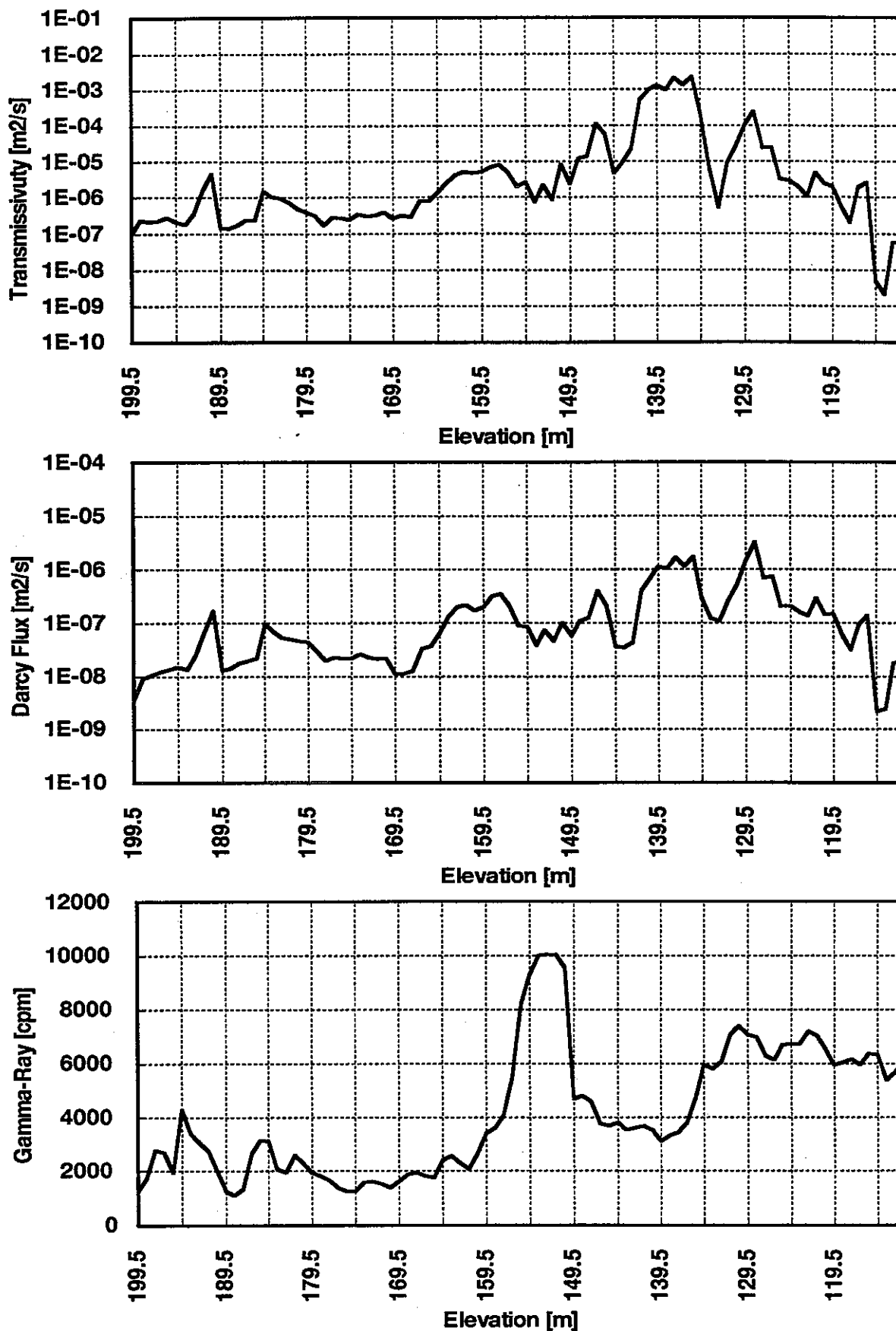


図 5.1-2 各試錐孔に沿ったγ線強度、透水係数及びダルシー流速
(水理境界条件 Case a-2、フラクタル透水係数場 Case 69)

5.2 解析結果と試錐孔における物理検層データとの比較・検討

5.2.1 解析手法

5.1に述べたことから、ここでのパーティクルトラッキングは十分長い期間を経過した後の定常的なパーティクル分布を求めるのではなく、時系列的に強度の変化するソースからのウランの供給を考える必要があることは明らかである。また、4.に示した水理解析の結果が複数のチャンネルの存在を示していることから、解析対象領域へのウランの供給口（以下、ソースと呼ぶ）は複数を考える必要がある。つまり、本解析では、複数ソースのそれぞれにおいて時間変化するウランの供給モードを考えることによって、現在のウラン分布を説明することが必要となる。

この目標を達成するために、以下の手順で解析を行うこととした。

- (1) 各単一ソースにおいて単位時間のステップ入力によるパーティクル注入を行い、その後の各時刻における二次元プロファイル（以下、スナップショットと呼ぶ）を記録する。
- (2) 各スナップショット毎に、TH-1～4孔に沿った1次元のパーティクル分布を抽出し、現在のウラン分布に対応すると考えられる γ 線強度分布を、1次元パーティクル分布の線形和として次の様に表現する。

$$\Gamma = \sum_{ij} \alpha_i^j S_i^j \quad (5.1)$$

但し、

Γ ; γ 線強度分布

S_i^j ; ソース i 、時刻 j におけるスナップショット

α_i^j ; ソース i 、時刻 j におけるスナップショットの重み係数

- (3) (5.1)式に従い、最小2乗法により各スナップショットの重み係数 α を求める。
- (4) スナップショットの後の時刻ほど現在に近いことから、時間を反転、つまり α の添字 i を反対に並べ替えることによって、当該ソースのウラン供給フラックスの時間変化を求める。
- (5) (4)で求める各ソースからのウラン供給フラックスの時間変化に対応して、(5.1)

式に従い各スナップショットを重み付けした上で重ね合わせるにより、ウランの二次元的な分布を再現する。

(6) (5)の結果を γ 線強度分布と比較する。

5.2.2 解析結果

5.2.1に述べた方法により、パーティクルトラッキングを行った。結果を以下にまとめる。なお、3.及び4.に述べた様に、水理境界条件については水理地質構造との整合性の高いCase a-1及びa-2、フラクタル透水係数場については代表性の高いCase 69, Case 49、及びCase 66を選定して $2 \times 3 = 6$ 通りの計算を実施した。

まず、各ケースにおいて4.に示した水理解析結果（ダルシー流速分布）に従い、各チャンネルの最上流側をソース点として選定した。水理境界条件Case a-2、フラクタル透水係数場Case 69の場合のソース点の配置を、例として図5.2.2-1に示す。

次に、各ソース点において単位時間（ $100 \times$ 遅延係数(Rd)年）のステップ入力によりパーティクルを注入し、その後の時刻におけるスナップショットを記録した。上と同じ水理境界条件Case a-2、フラクタル透水係数場Case 69の場合のスナップショットについて、TH-1～4孔に沿って抽出した1次元パーティクル分布を図5.2.2-2に示す。

最後に、(5.1)式に従い、最小2乗法によって各スナップショットの重み係数 α を推定した。同じく水理境界条件Case a-2、フラクタル透水係数場Case 69の場合に求めた重み係数 α の推定値を時間反転させて再構成した各ソース点でのウラン供給フラックスの時間変化を図5.2.2-3に示す。

各ケースにおいて推定されたパーティクル分布と、TH-1～4孔の γ 線強度分布とを比較した結果を図5.2.2-4にまとめる。水理境界条件Case a-2、フラクタル透水係数場Case 69ないし49の場合に、ウランの濃集の位置依存性に定性的な意味で比較的良い一致が認められる。なお、水理境界条件Case a-1では、TH-4孔の位置が上流側境界に近すぎ、パーティクルの現実的な分散が得られないことから、この試錐孔については最小2乗法によるフィッティングの対象外とした。

比較的良い一致の得られた水理境界条件Case a-2、フラクタル透水係数場Case 69につい

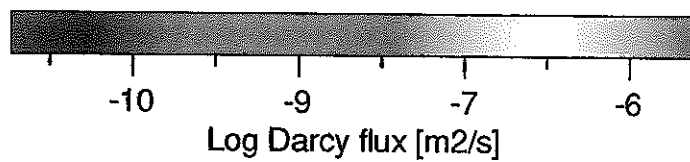
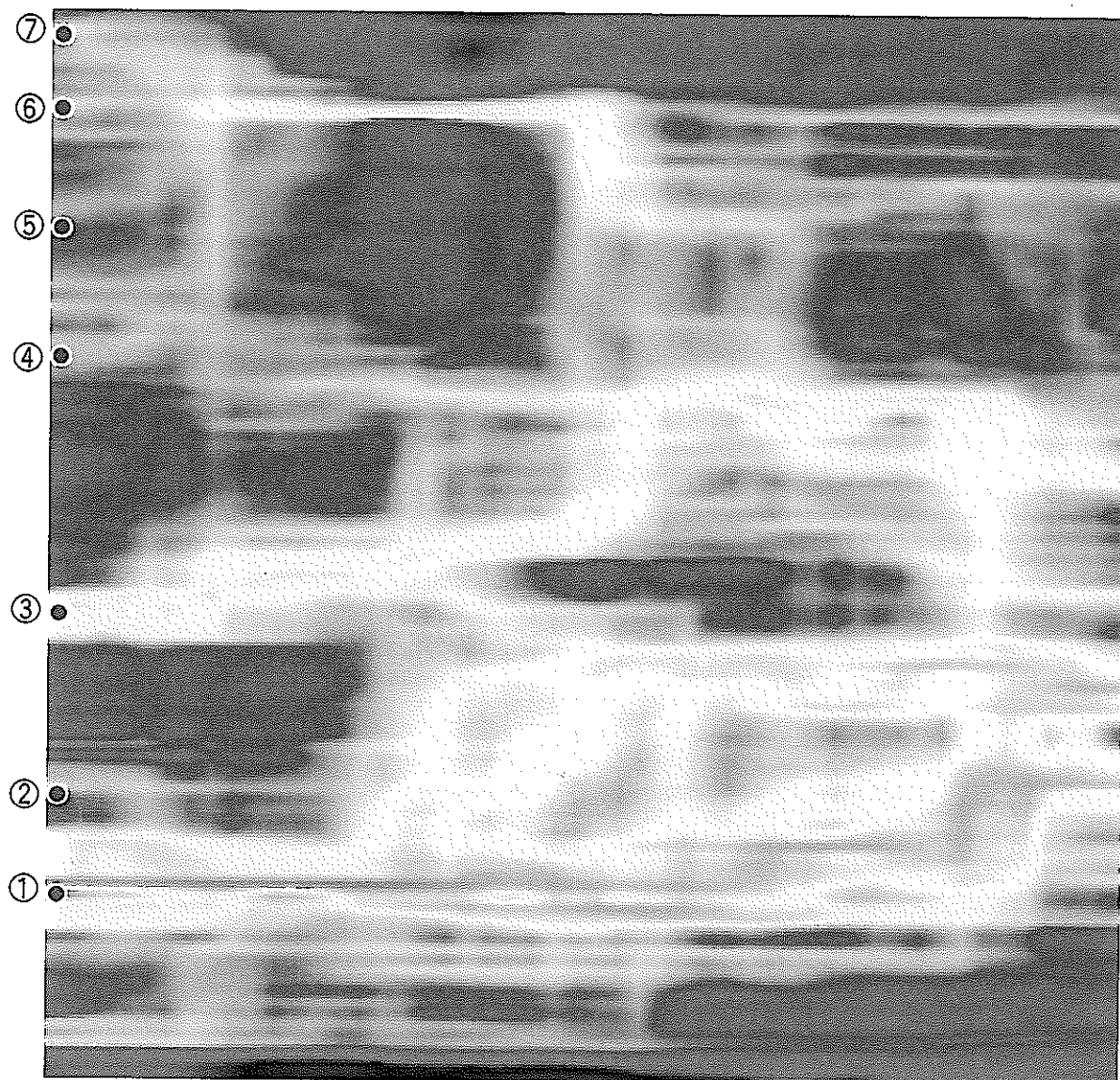


図 5.2.2-1 フラクタル透水係数場 Case 69 の場合のソース点の配置

snapshots P1 TH-1

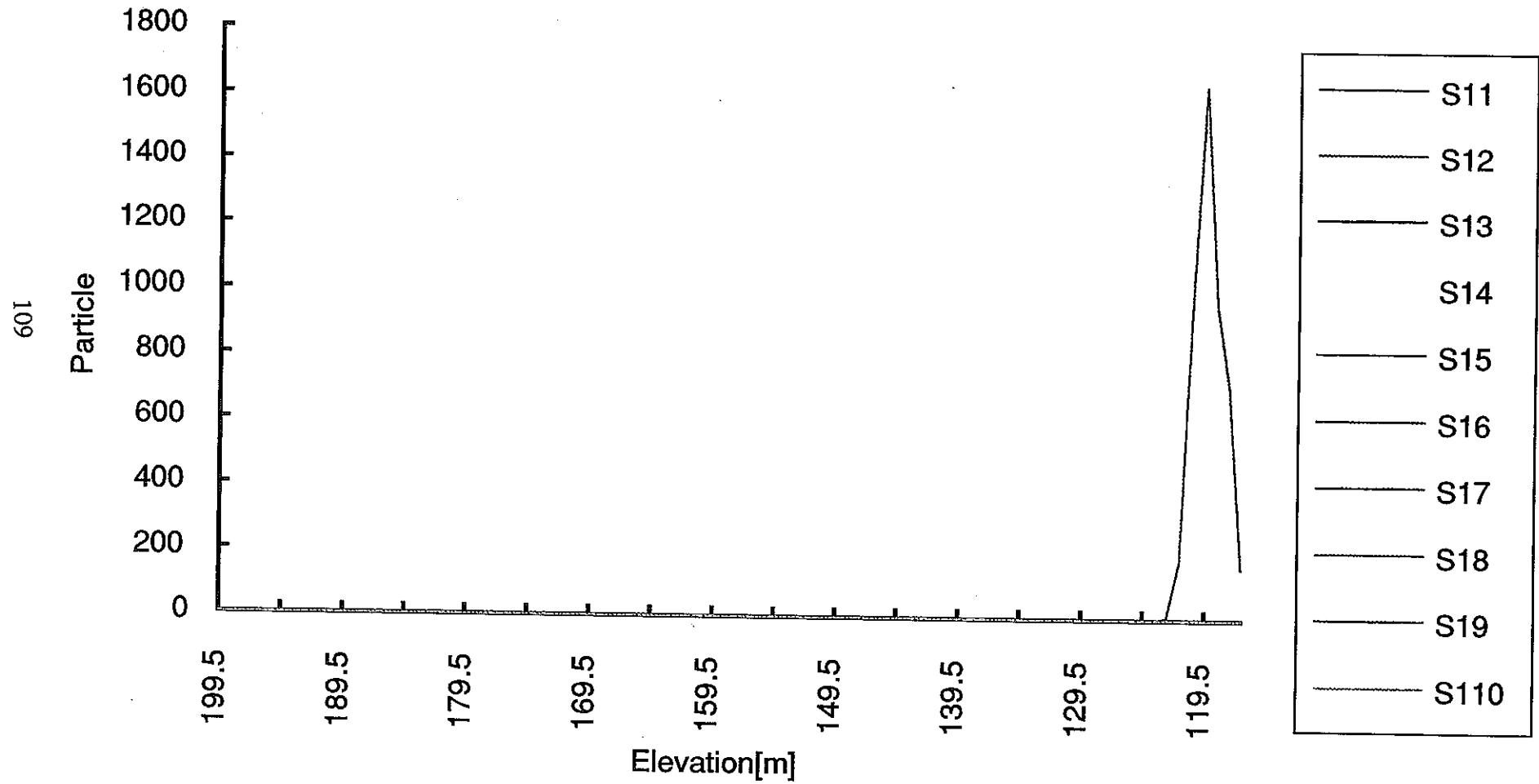


図5.2.2-2 スナップショットの例

(水理条件Case a-2, 透水係数場 Case 69/ソース1,TH-1)

snapshots P1 TH-2

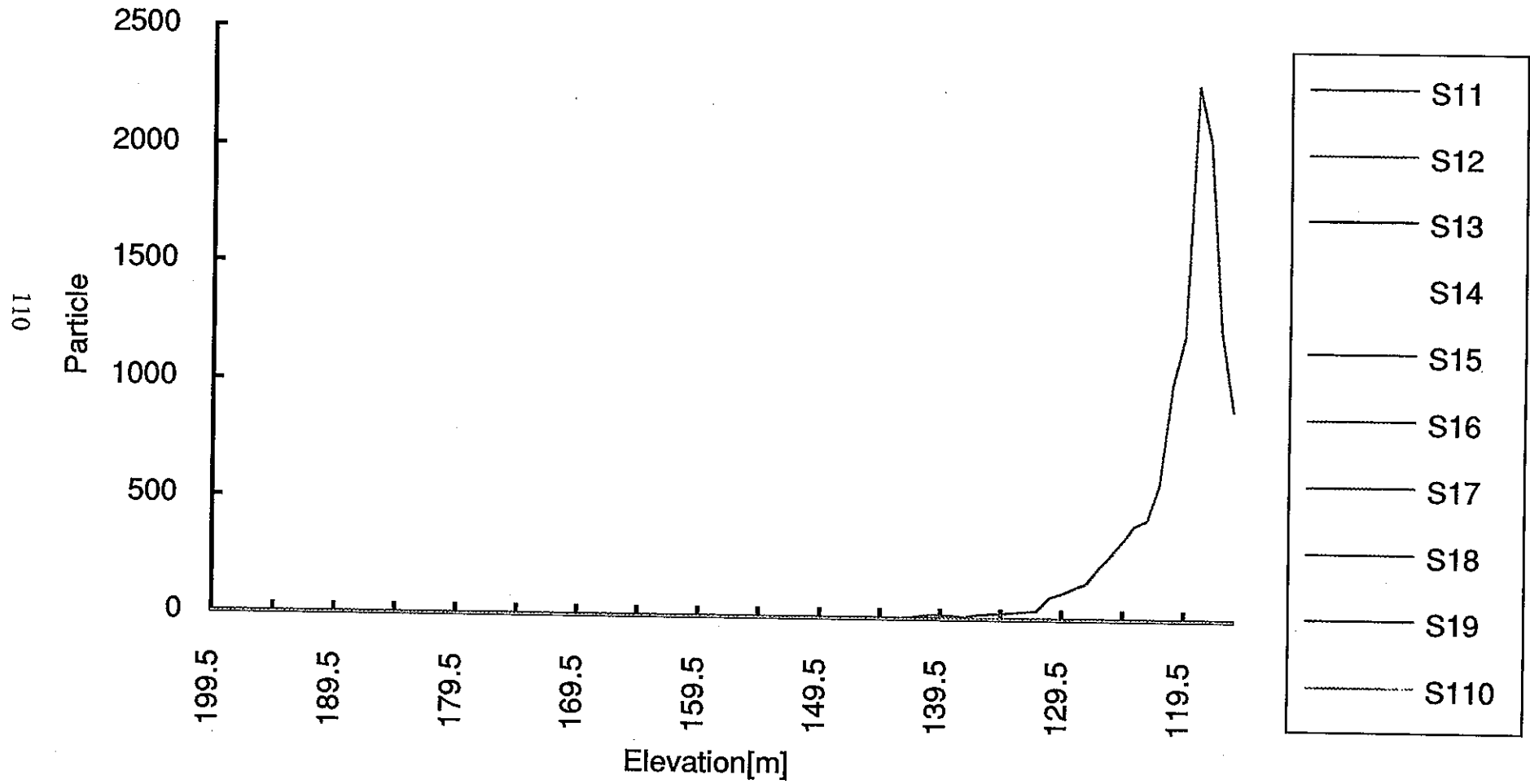


図5.2.2-2 スナップショットの例

(水理条件Case a-2, 透水係数場 Case 69/ソース1,TH-2)

snapshots P1 TH-3

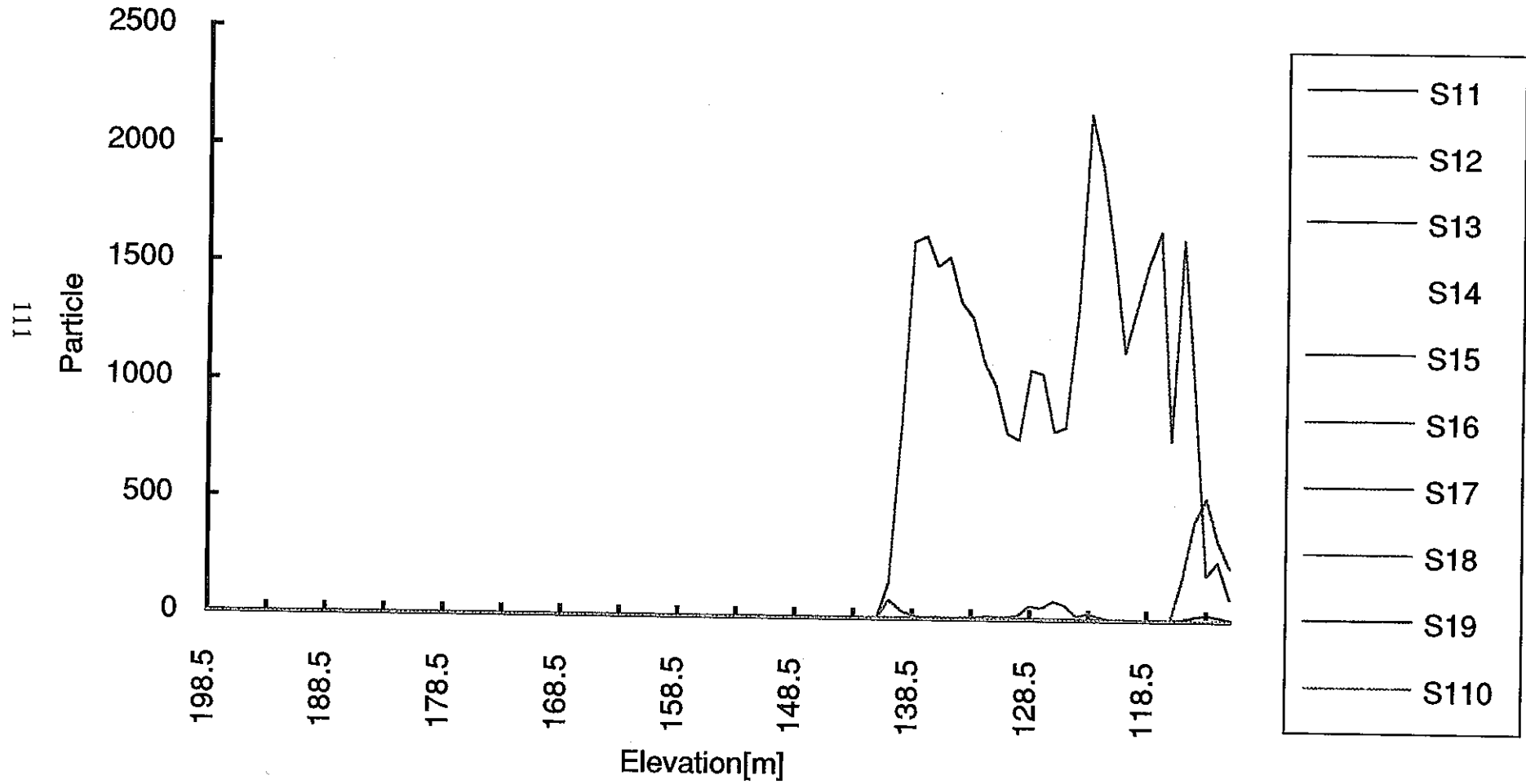


図5.2.2-2 スナップショットの例

(水理条件Case a-2, 透水係数場 Case 69/ソース1,TH-3)

snapshots P1 TH-4

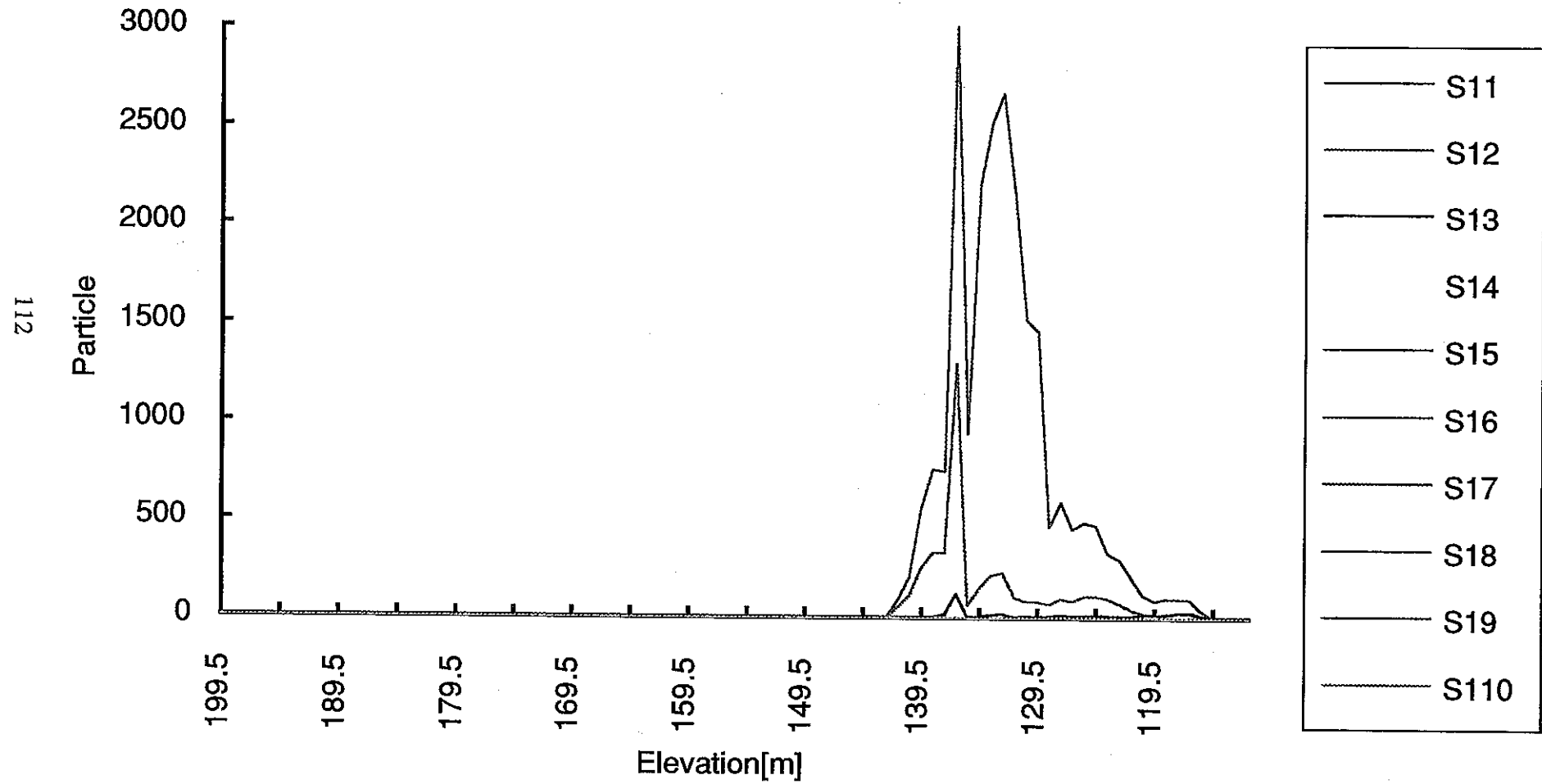


図5.2.2-2 スナップショットの例

(水理条件Case a-2, 透水係数場 Case 69/ソース1, TH-4)

snapshots P2 TH-1

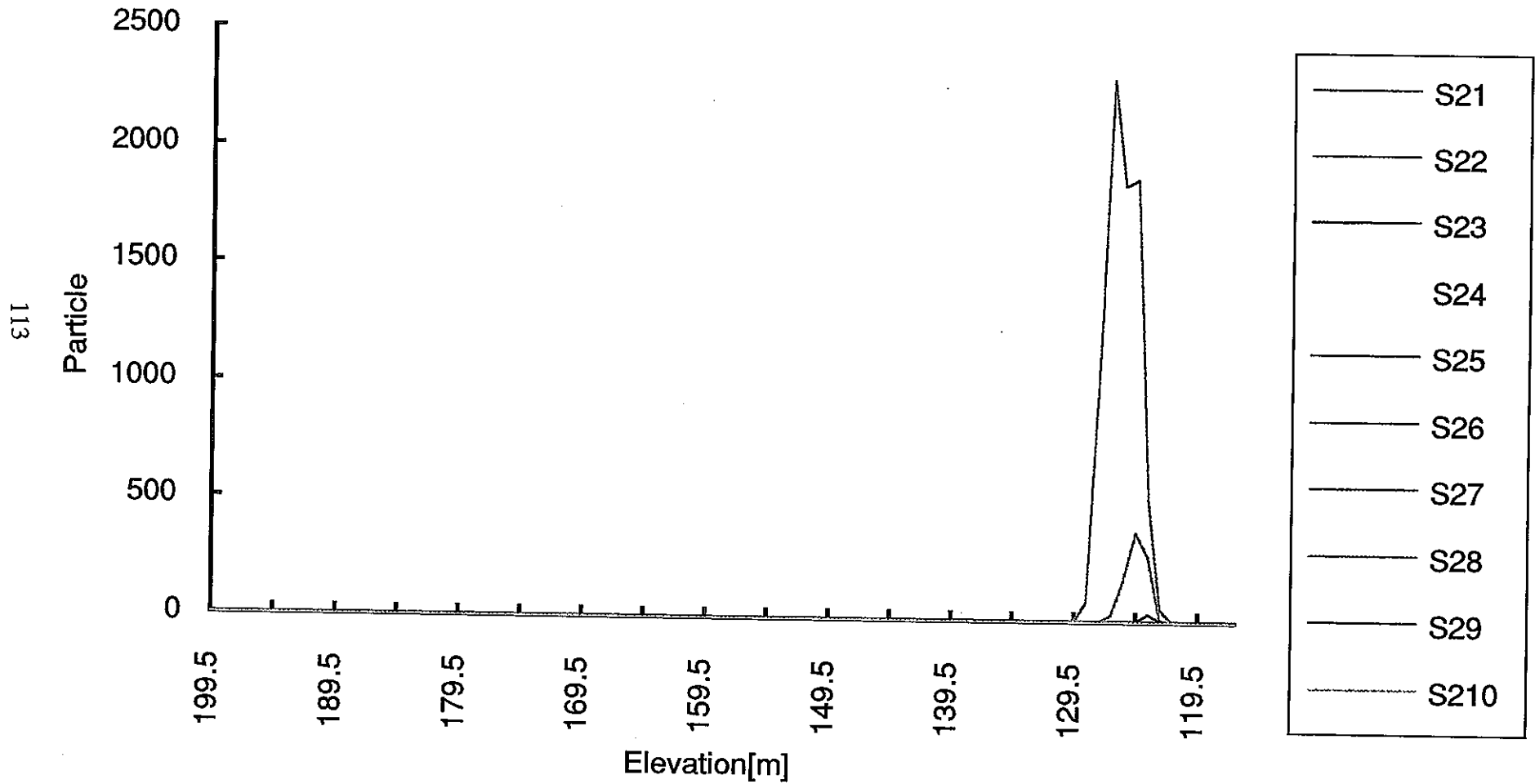


図5.2.2-2 スナップショットの例

(水理条件Case a-2, 透水係数場 Case 69/ソース2,TH-1)

snapshots P2 TH-2

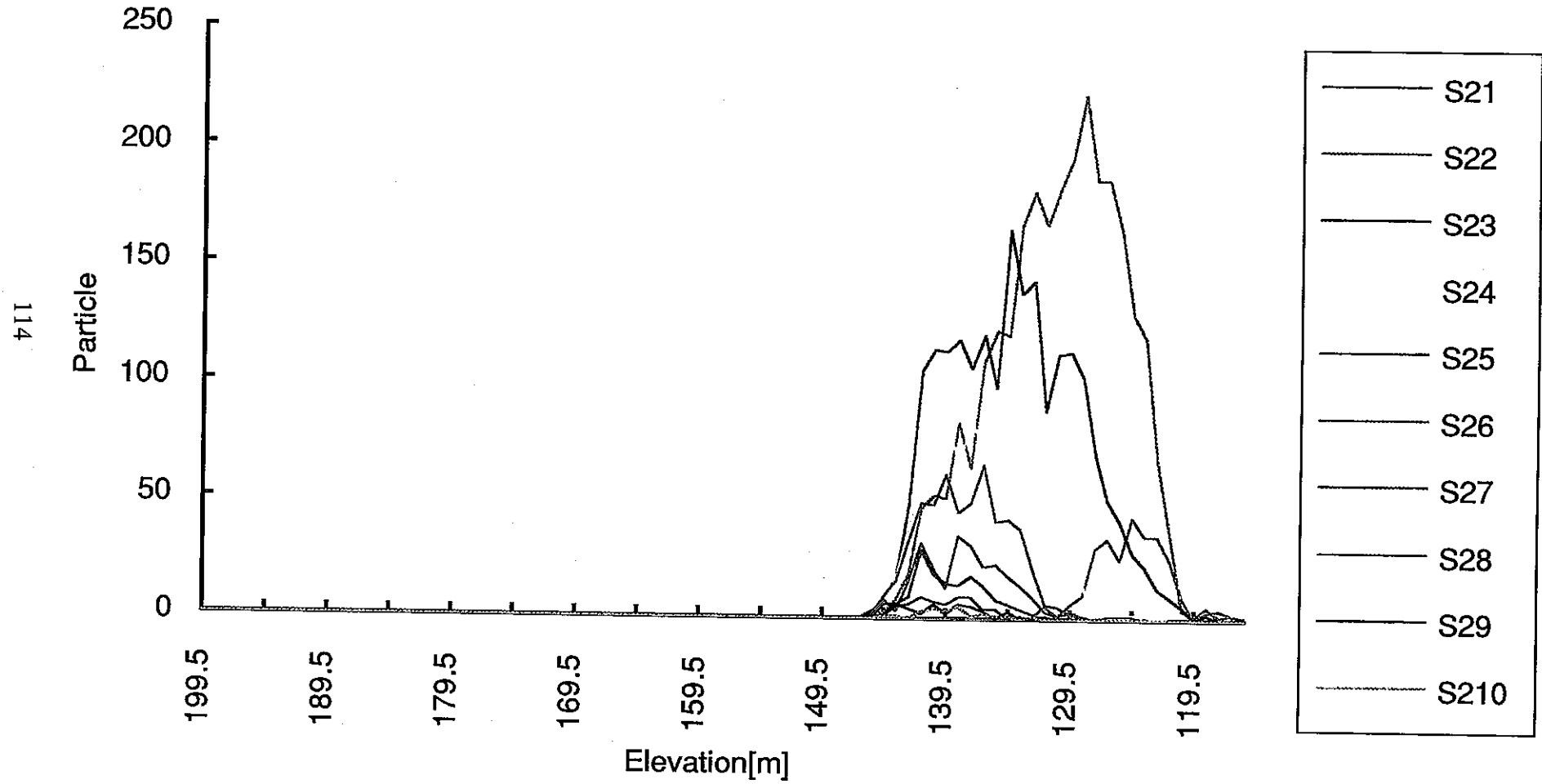


図5.2.2-2 スナップショットの例

(水理条件Case a-2, 透水係数場 Case 69/ソース2,TH-2)

snapshots P2 TH-3

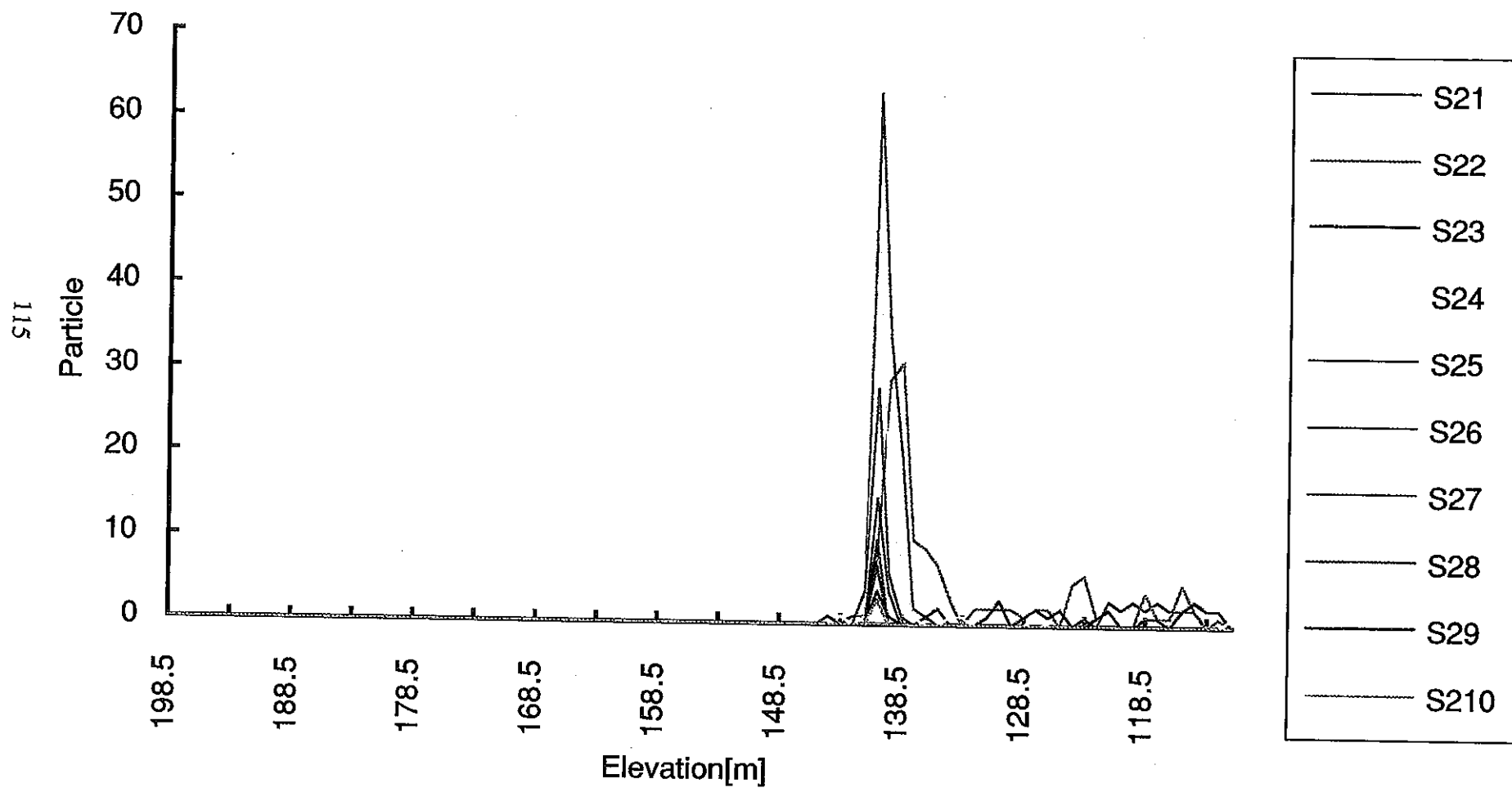


図5.2.2-2 スナップショットの例

(水理条件Case a-2, 透水係数場 Case 69/ソース2,TH-3)

snapshots P2 TH-4

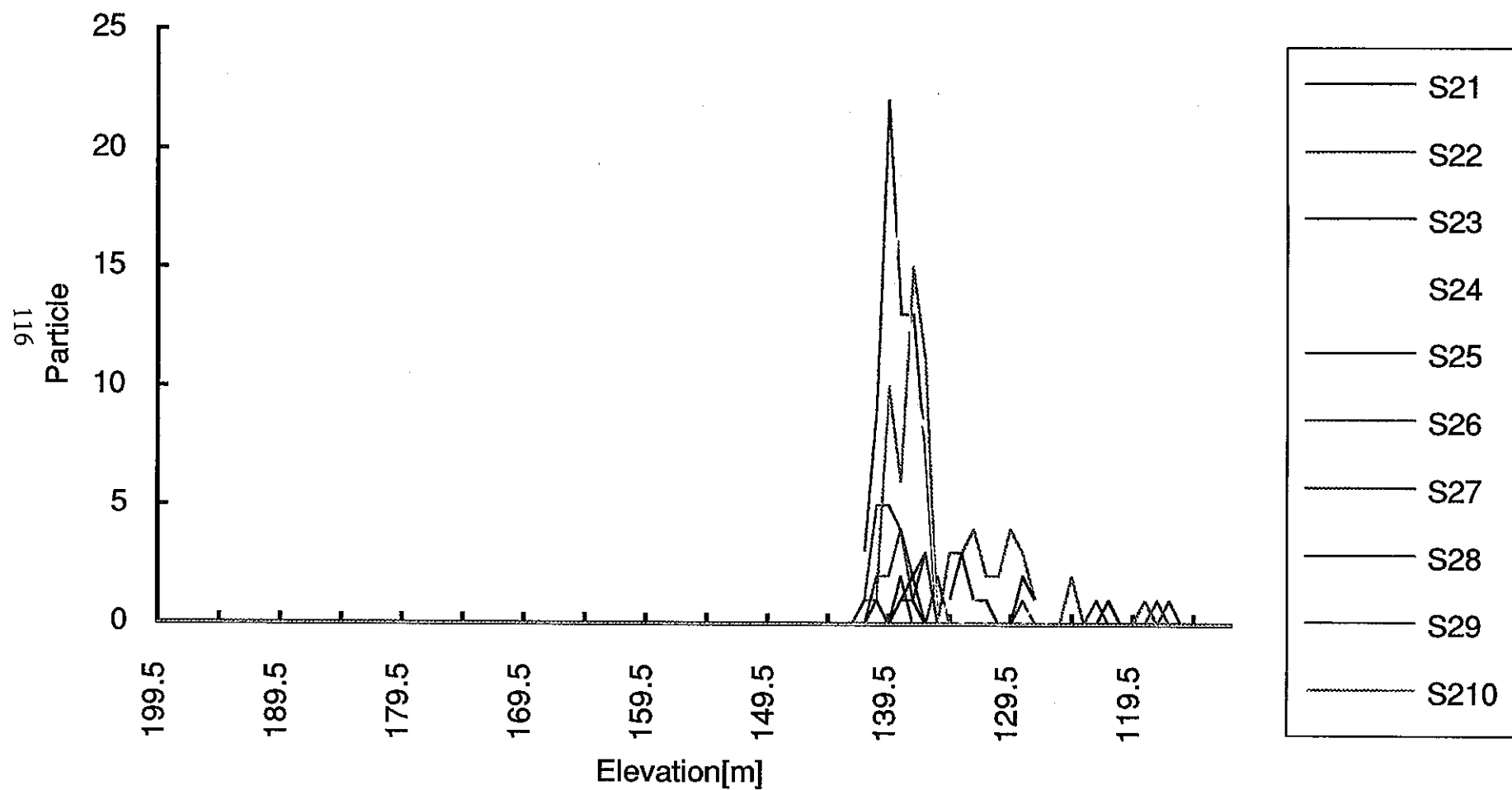


図5.2.2-2 スナップショットの例

(水理条件Case a-2, 透水係数場 Case 69/ソース2,TH-4)

snapshots P3 TH-1

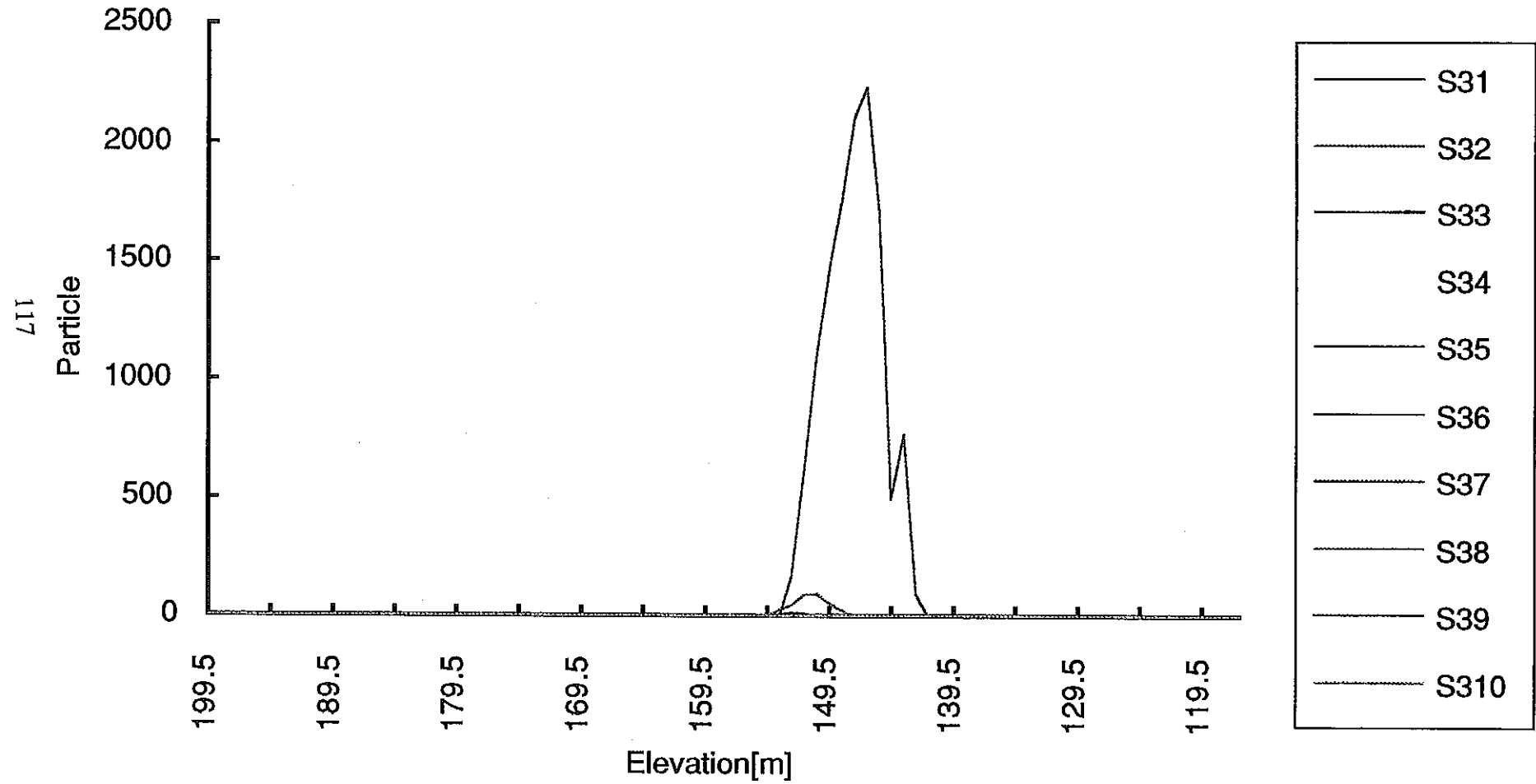


図5.2.2-2 スナップショットの例

(水理条件Case a-2, 透水係数場 Case 69/ソース3,TH-1)

snapshots P3 TH-2

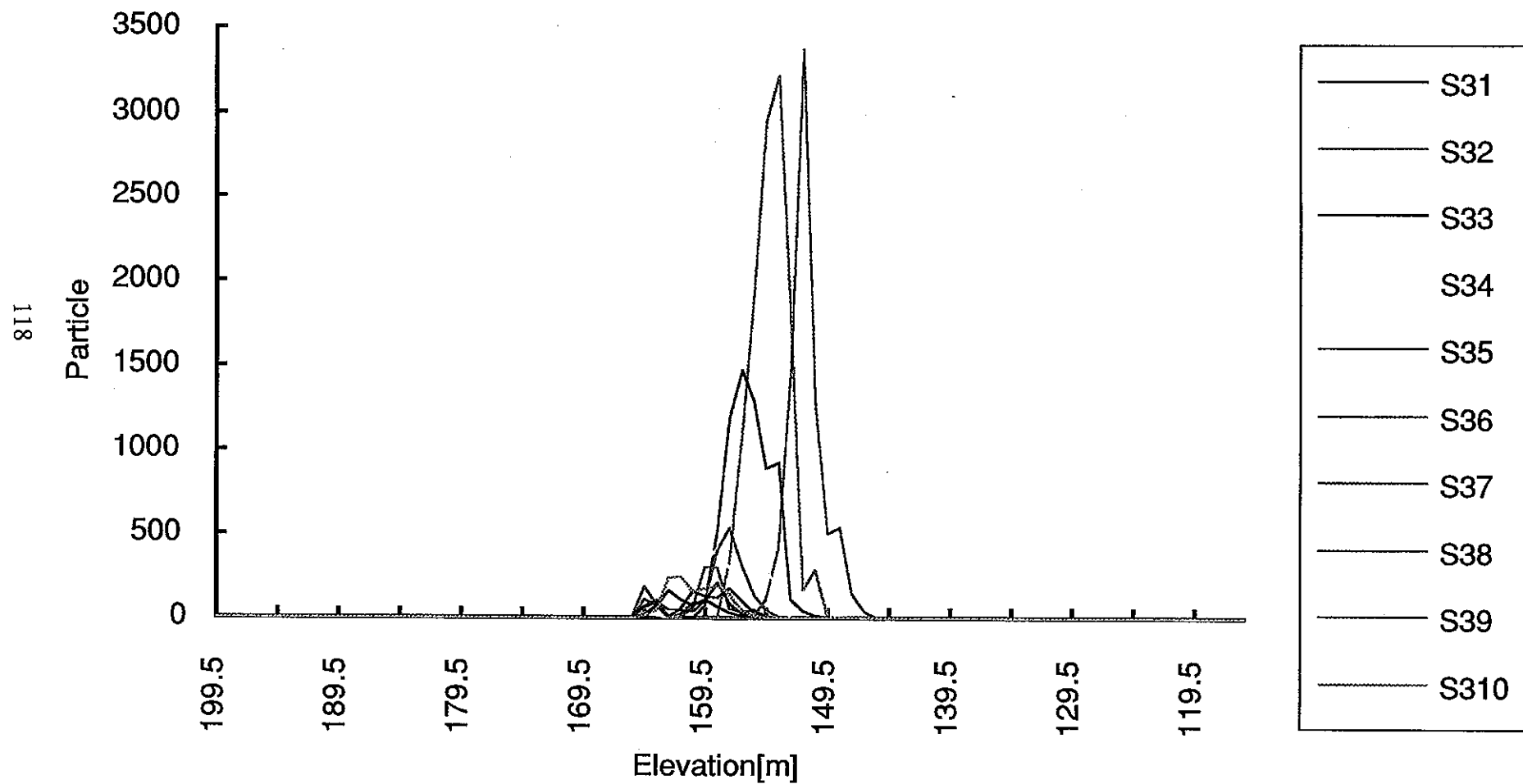


図5.2.2-2 スナップショットの例

(水理条件Case a-2, 透水係数場 Case 69/ソース3,TH-2)

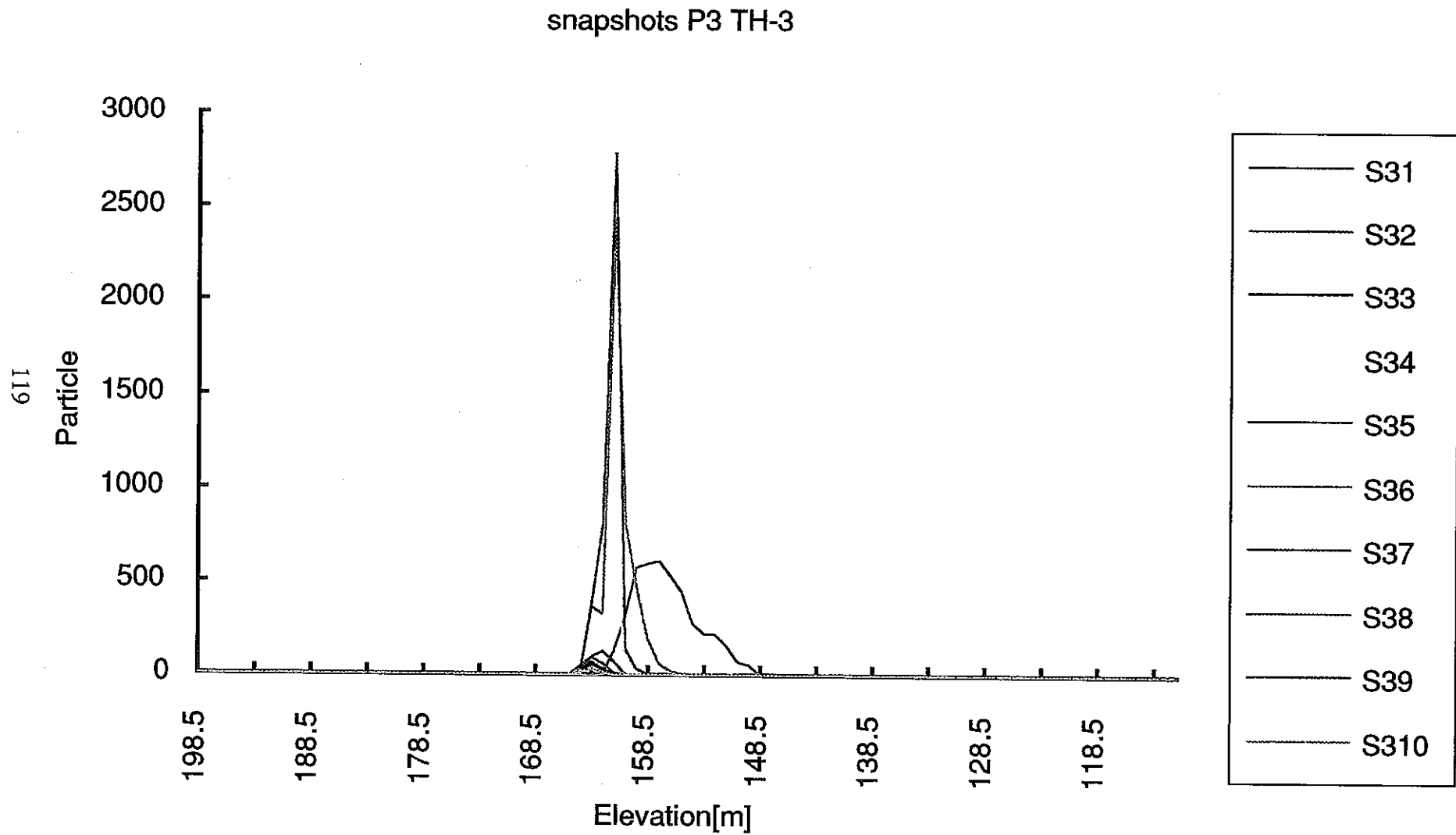


図5.2.2-2 スナップショットの例

(水理条件Case a-2, 透水係数場 Case 69/ソース3,TH-3)

snapshots P3 TH-4

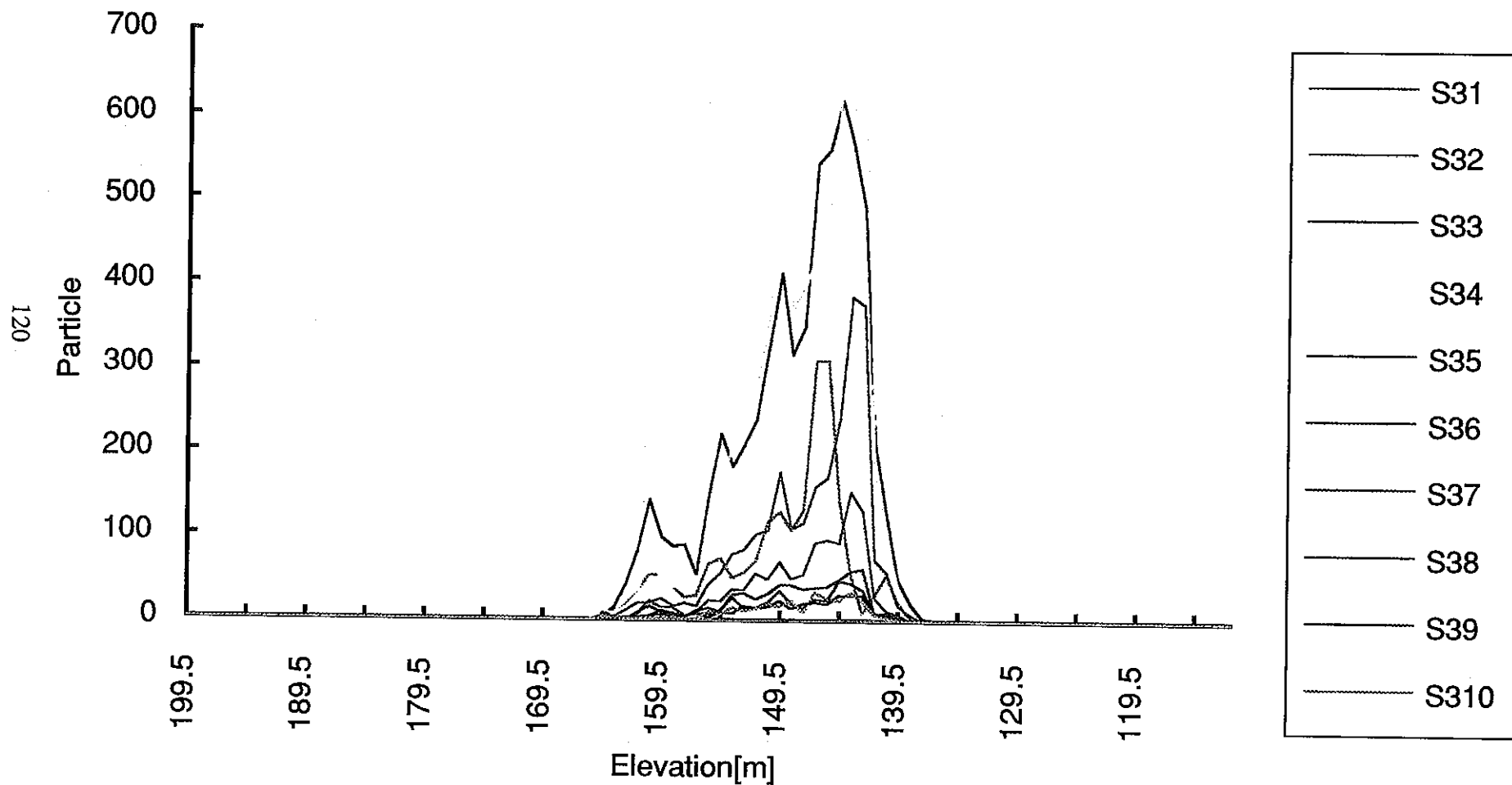


図5.2.2-2 スナップショットの例

(水理条件Case a-2, 透水係数場 Case 69/ソース3, TH-4)

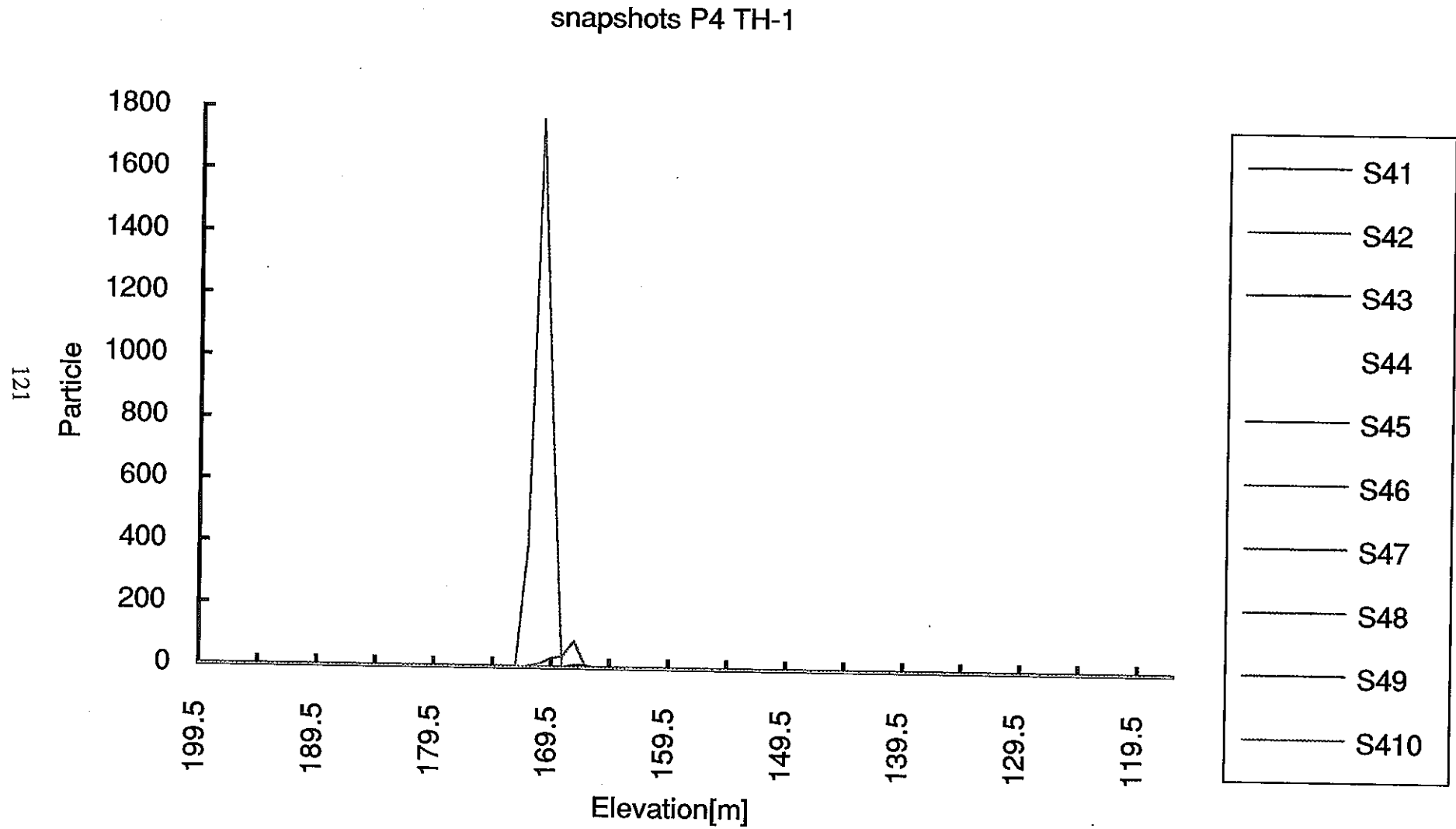


図5.2.2-2 スナップショットの例

(水理条件Case a-2, 透水係数場 Case 69/ソース4,TH-1)

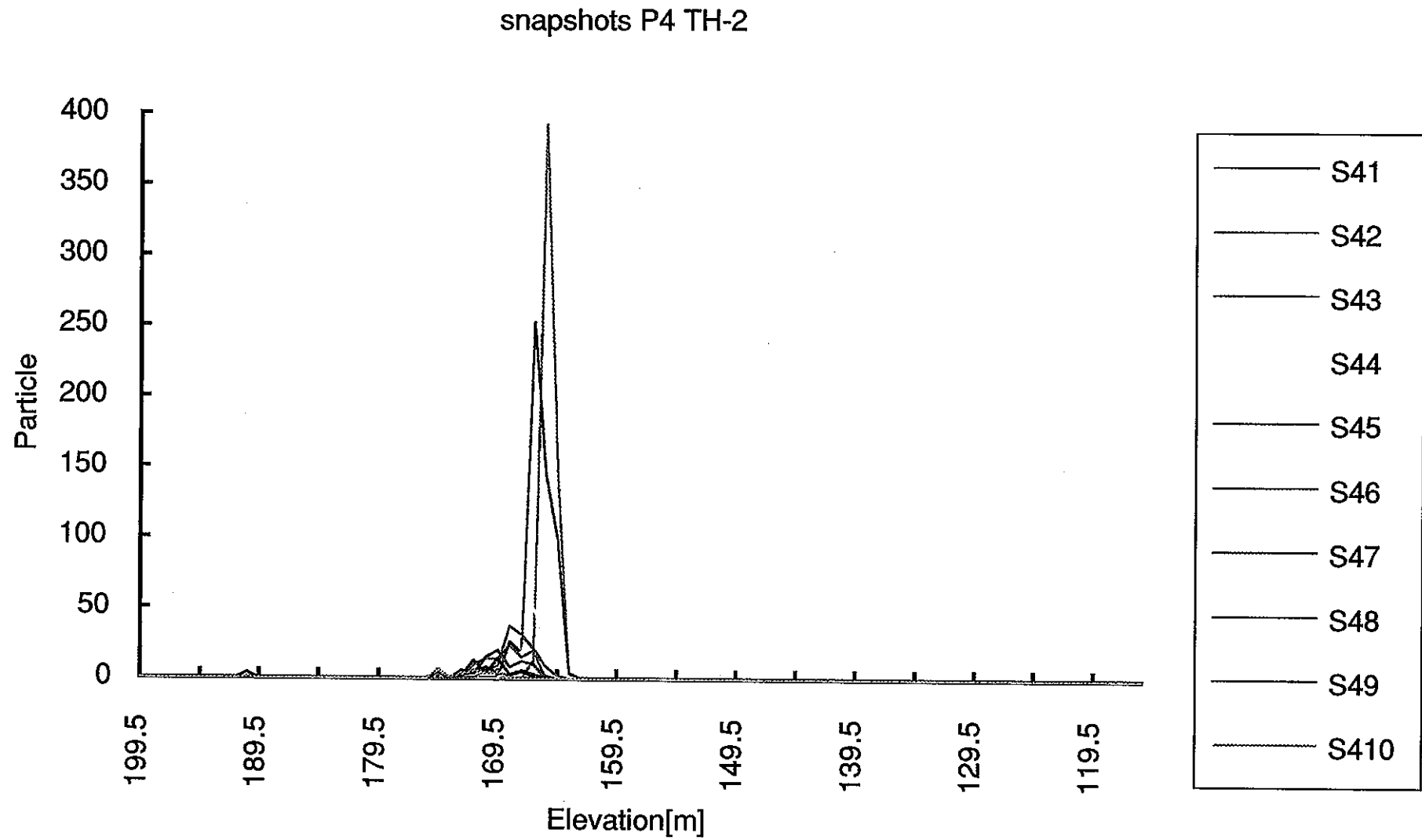


図5.2.2-2 スナップショットの例

(水理条件Case a-2, 透水係数場 Case 69/ソース4,TH-2)

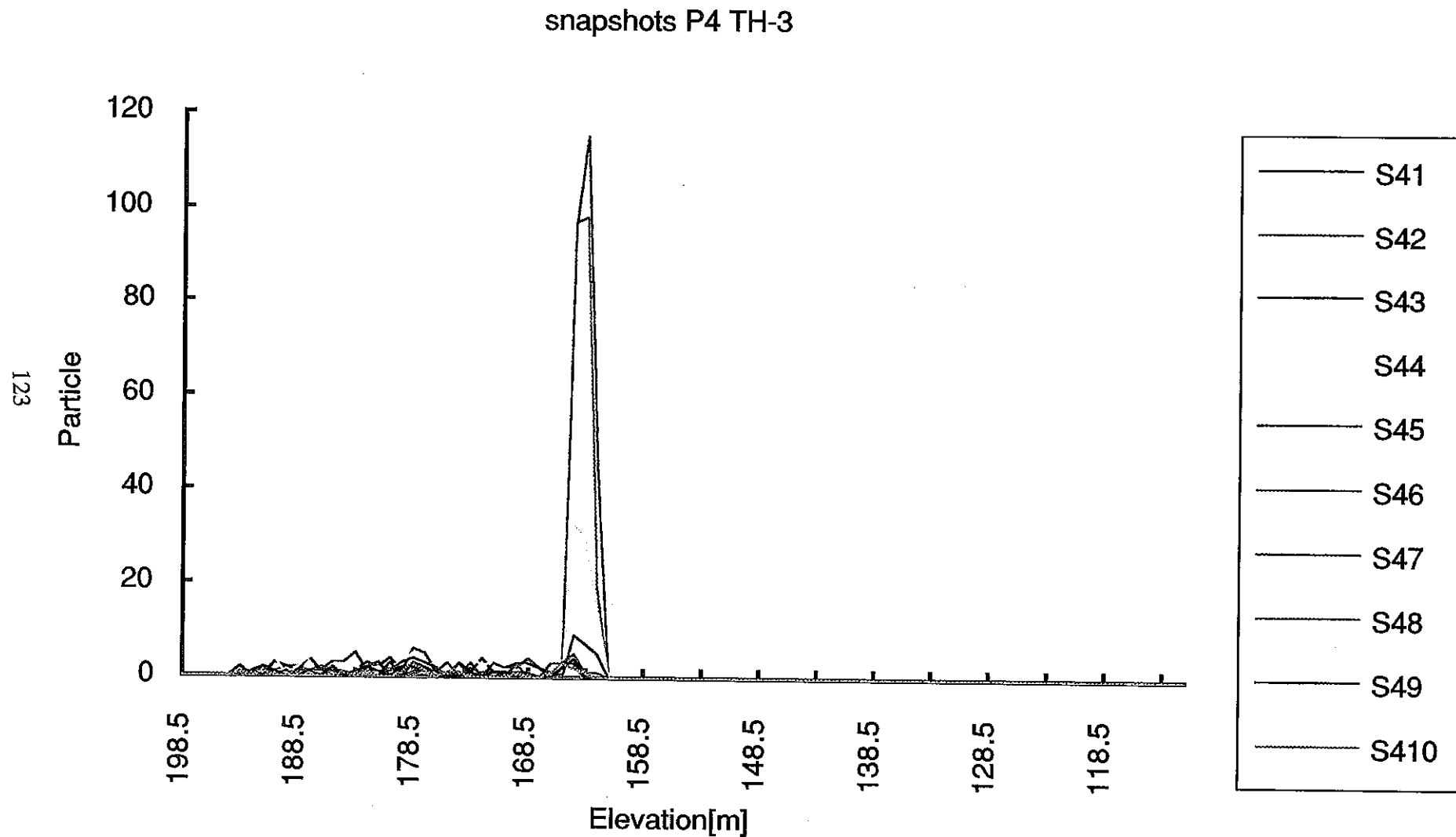


図5.2.2-2 スナップショットの例
 (水理条件Case a-2, 透水係数場 Case 69/ソース4,TH-3)

snapshots P4 TH-4

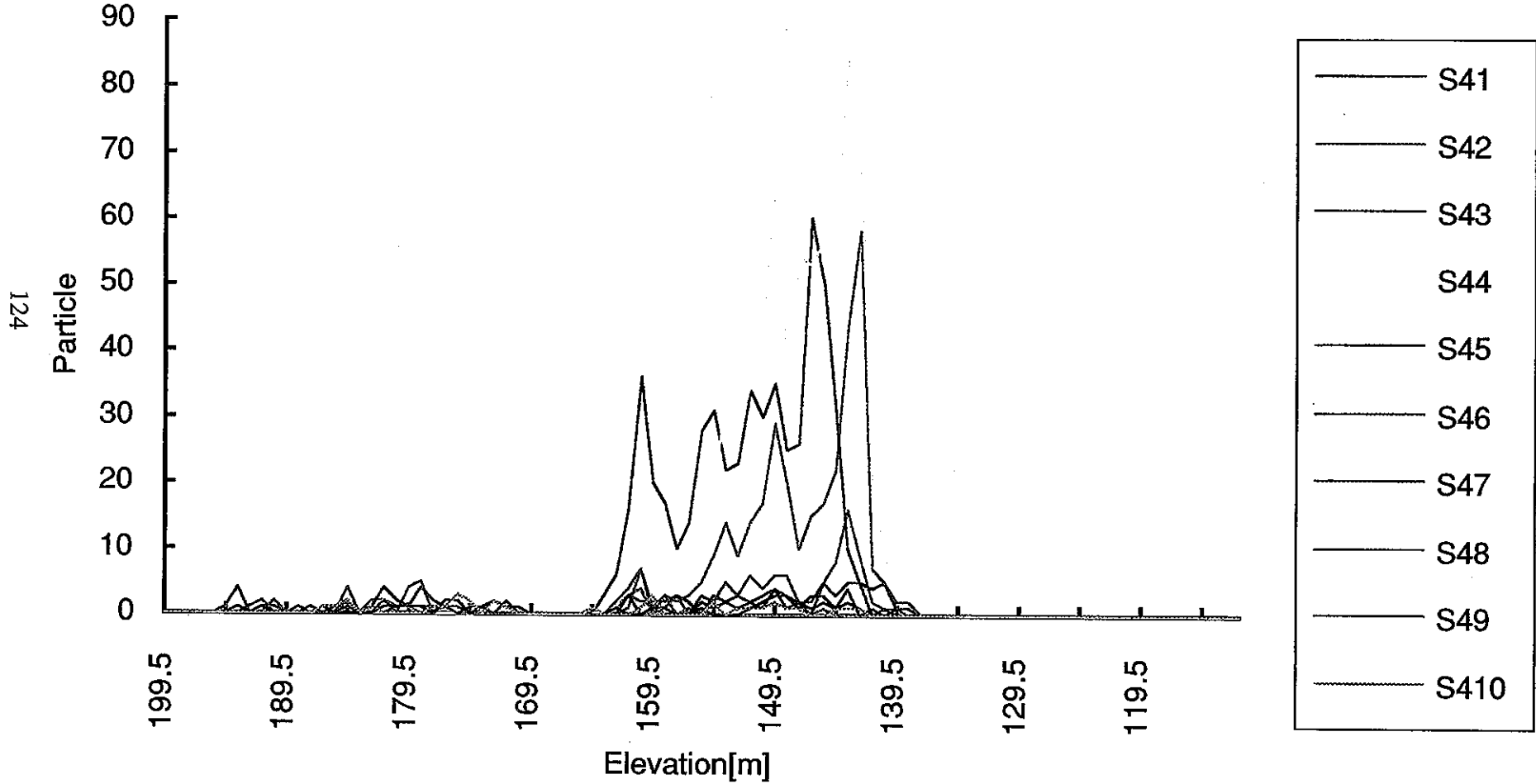


図5.2.2-2 スナップショットの例
(水理条件Case a-2, 透水係数場 Case 69/ソース4,TH-4)

snapshots P5 TH-1

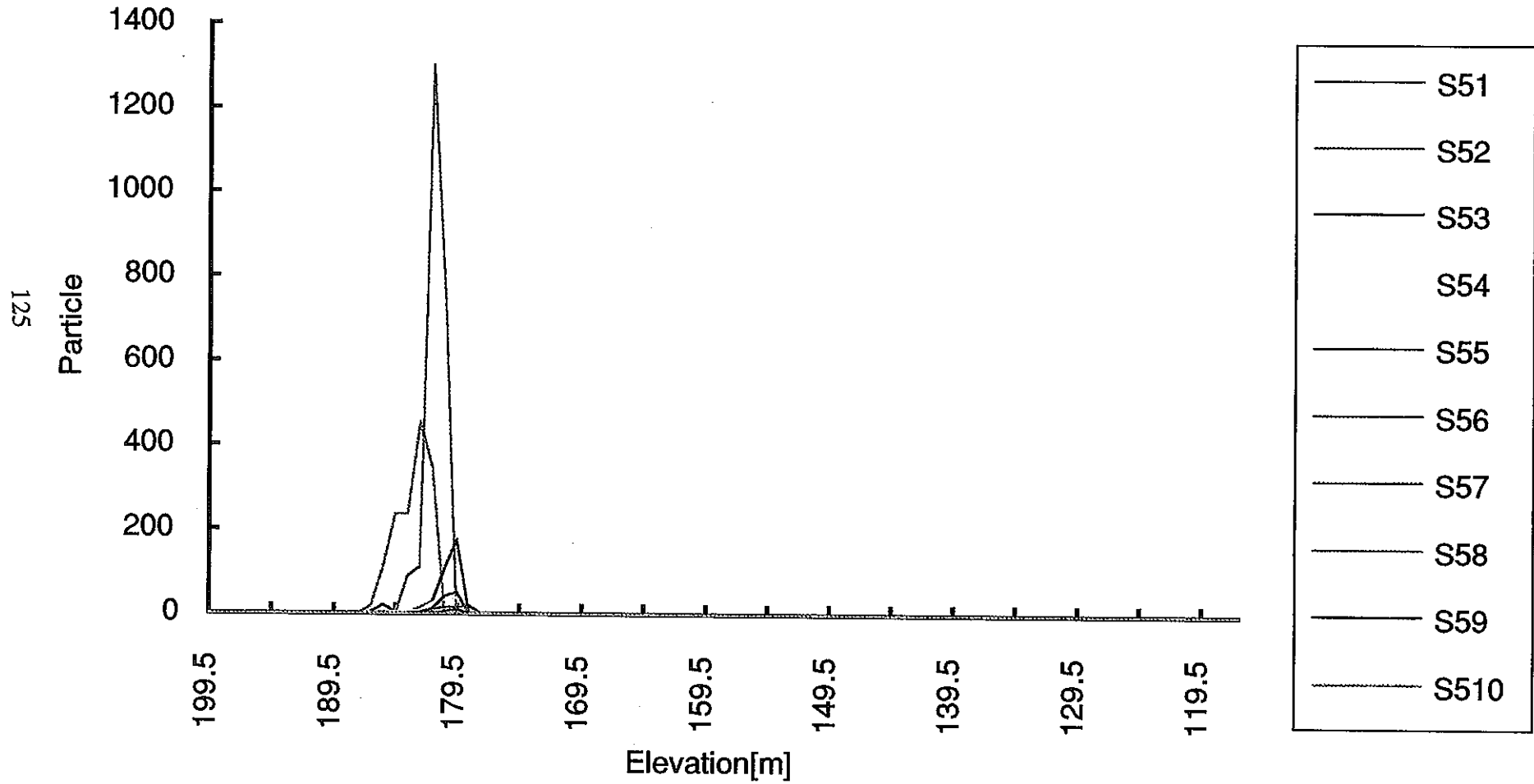


図5.2.2-2 スナップショットの例

(水理条件Case a-2, 透水係数場 Case 69/ソース5,TH-1)

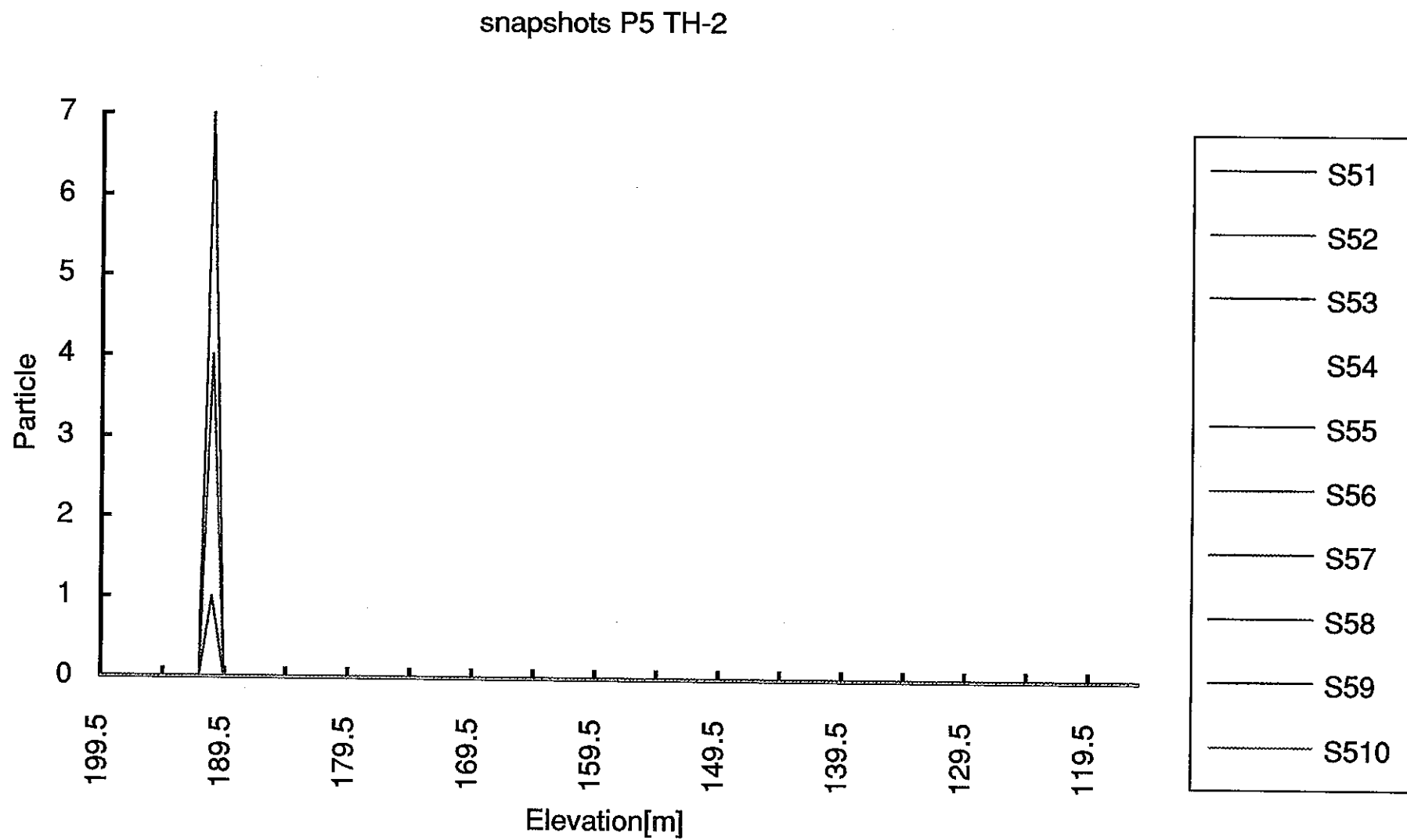


図5.2.2-2 スナップショットの例

(水理条件Case a-2, 透水係数場 Case 69/ソース5,TH-2)

snapshots P5 TH-3

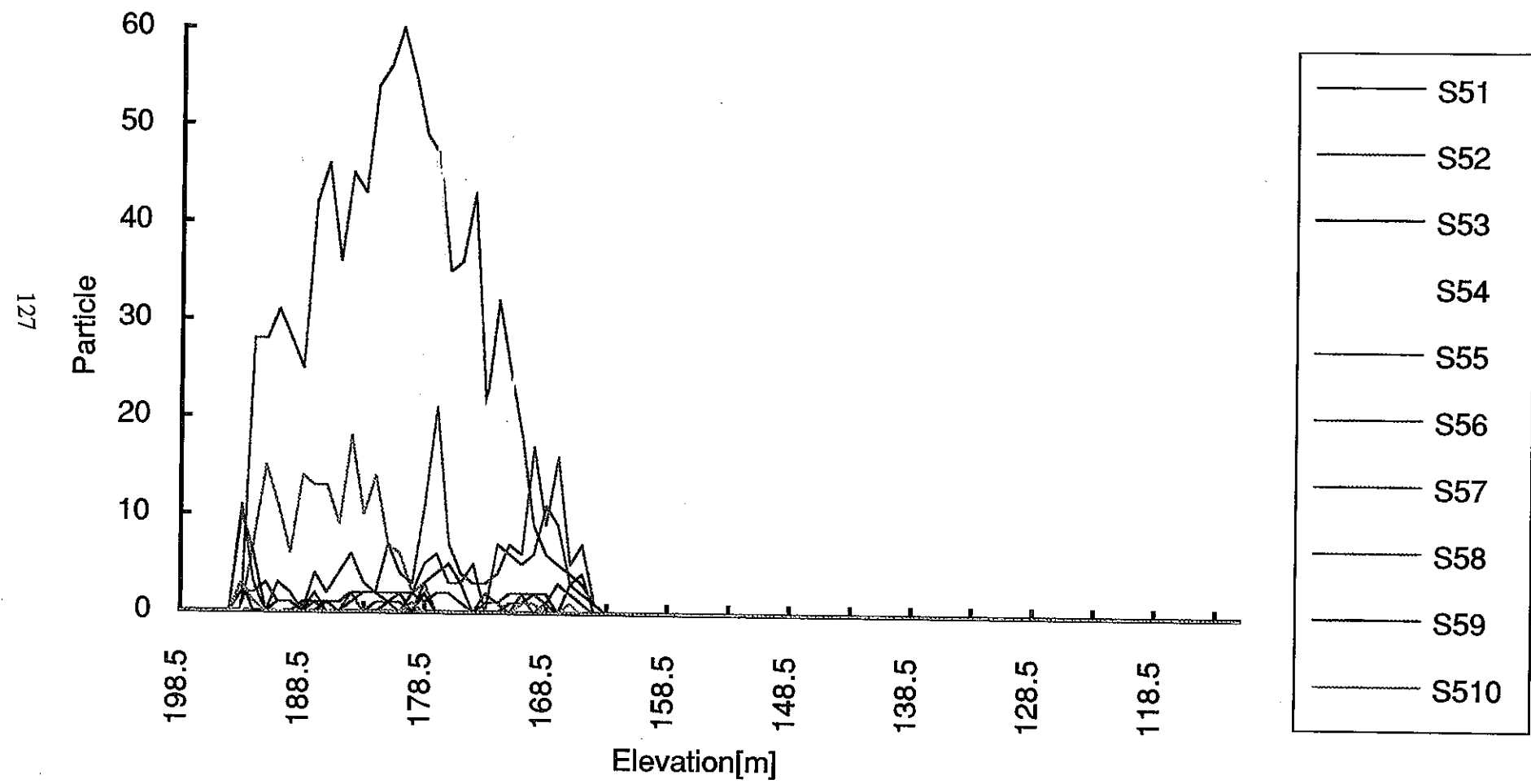


図5.2.2-2 スナップショットの例
(水理条件Case a-2, 透水係数場 Case 69/ソース5,TH-3)

snapshots P5 TH-4

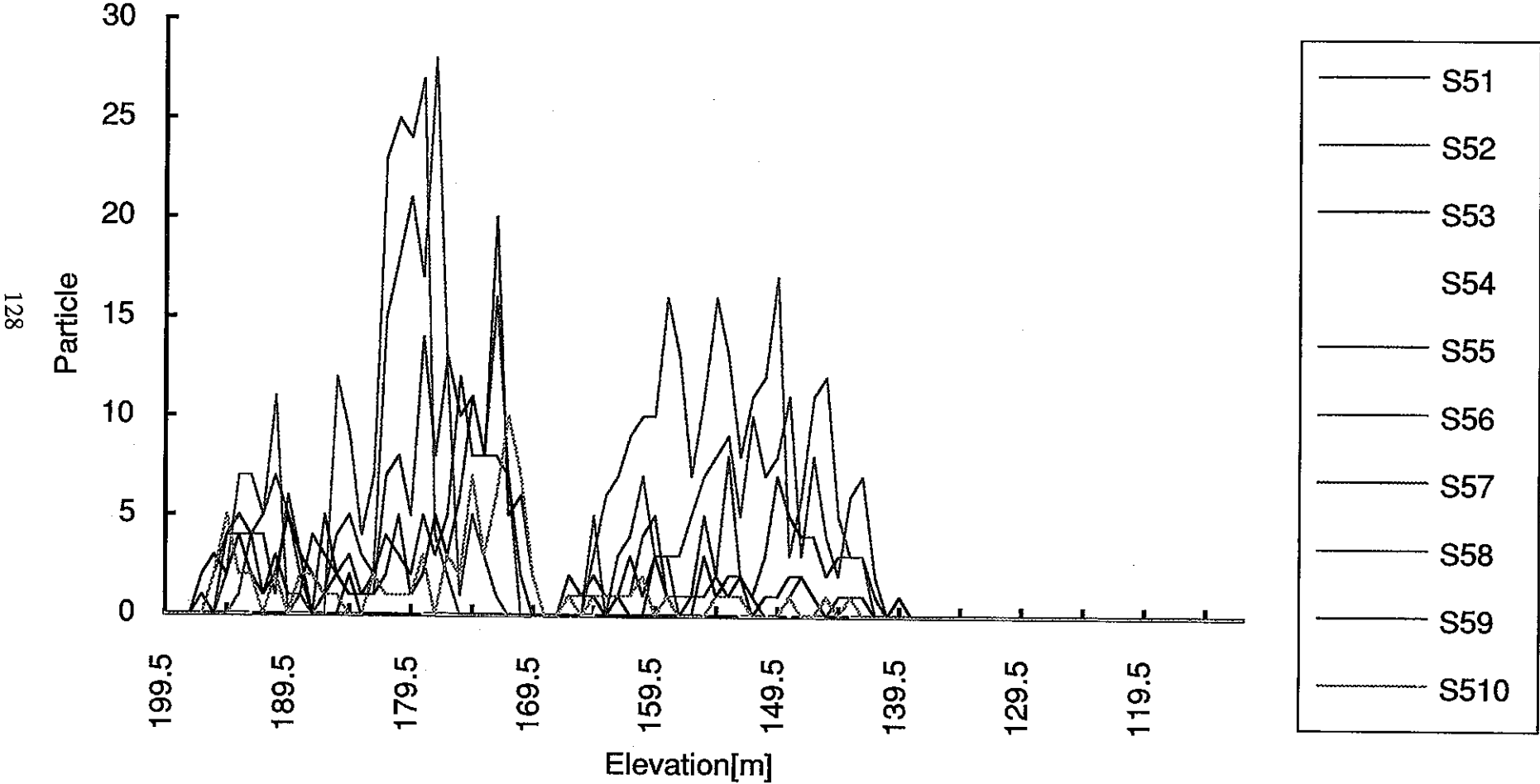


図5.2.2-2 スナップショットの例
(水理条件Case a-2, 透水係数場 Case 69/ソース5,TH-4)

snapshots P6 TH-1

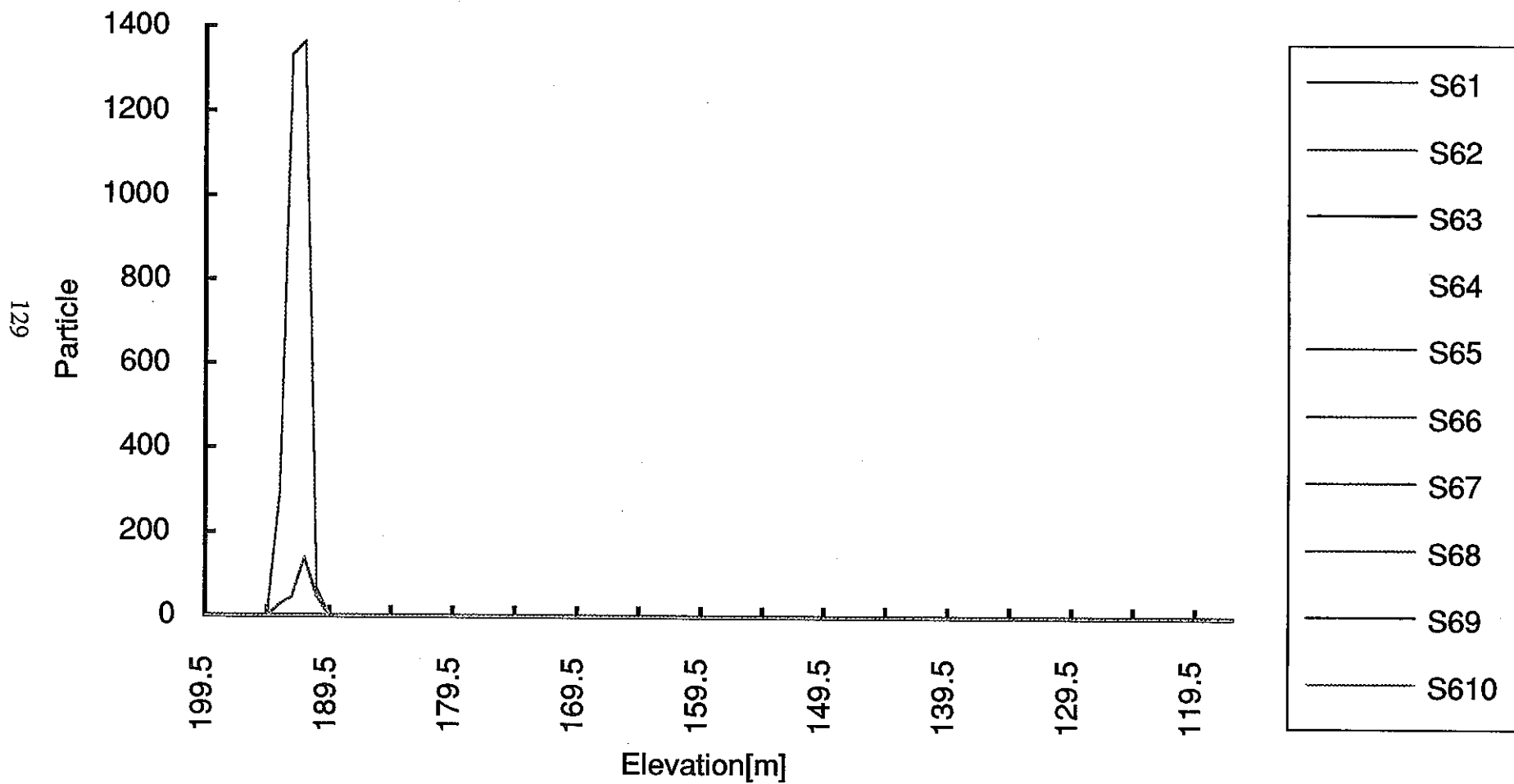


図5.2.2-2 スナップショットの例

(水理条件Case a-2, 透水係数場 Case 69/ソース6,TH-1)

snapshots P6 TH-2

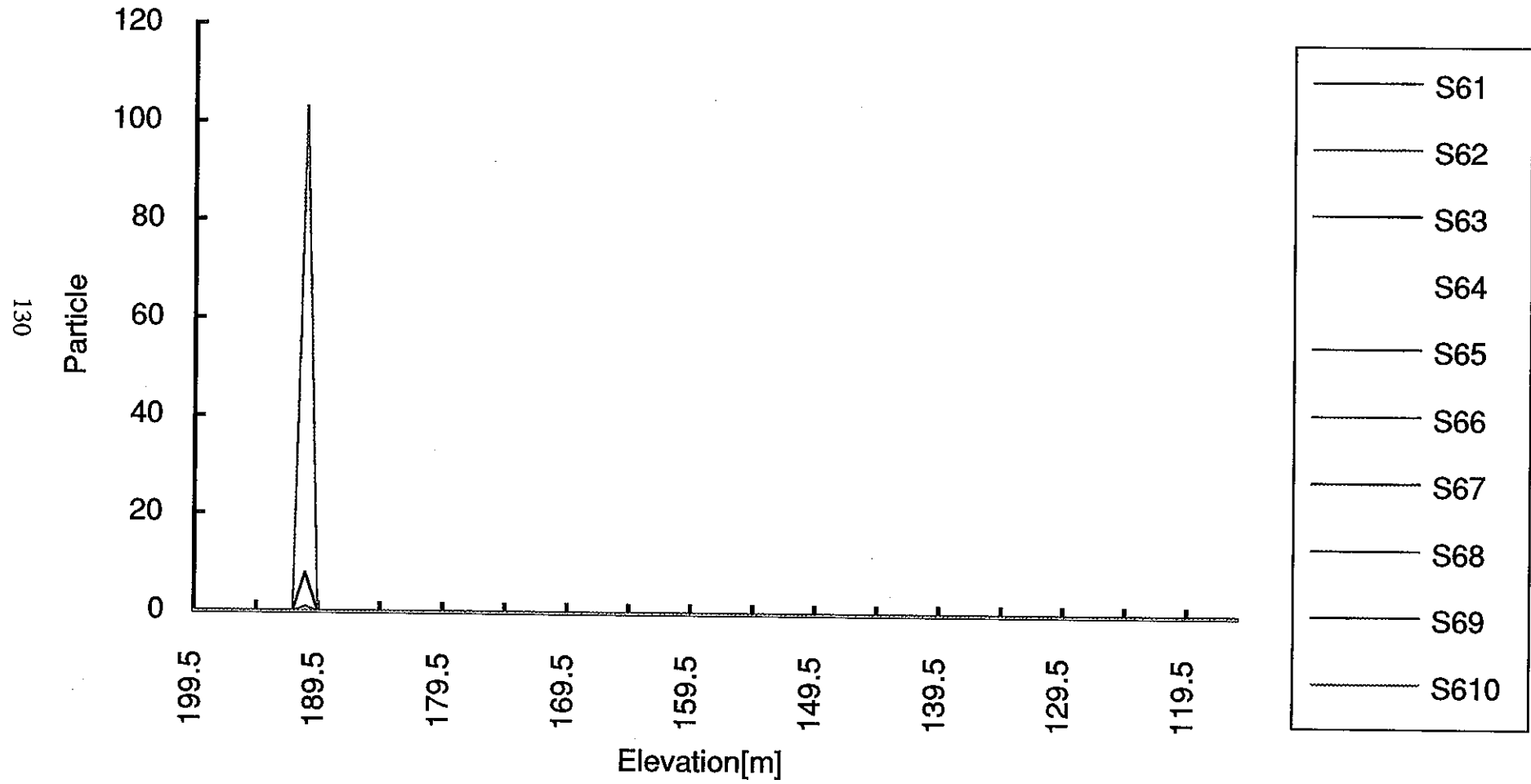


図5.2.2-2 スナップショットの例

(水理条件Case a-2, 透水係数場 Case 69/ソース6,TH-2)

snapshots P6 TH-3

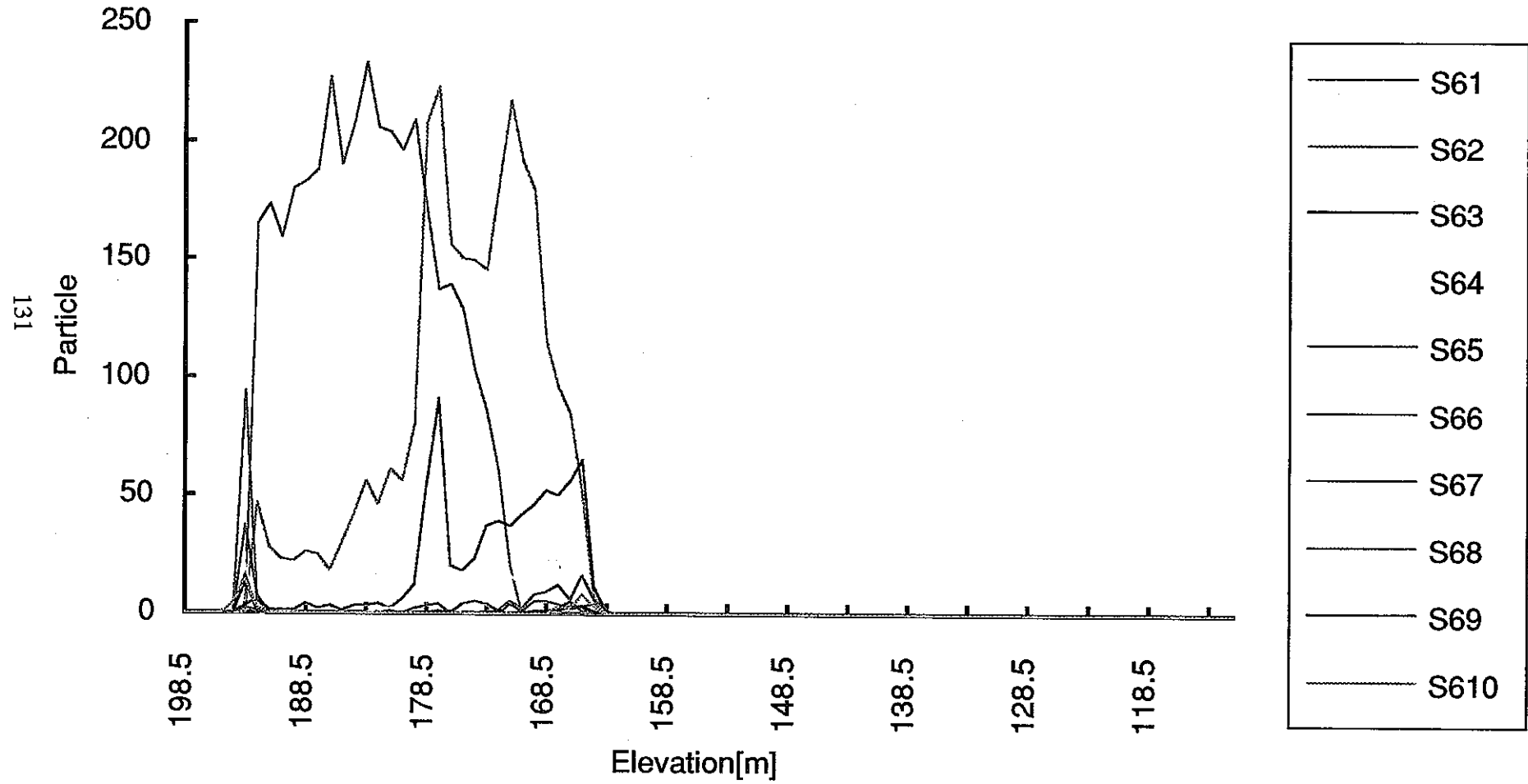


図5.2.2-2 スナップショットの例

(水理条件Case a-2, 透水係数場 Case 69/ソース6, TH-3)

snapshots P6 TH-4

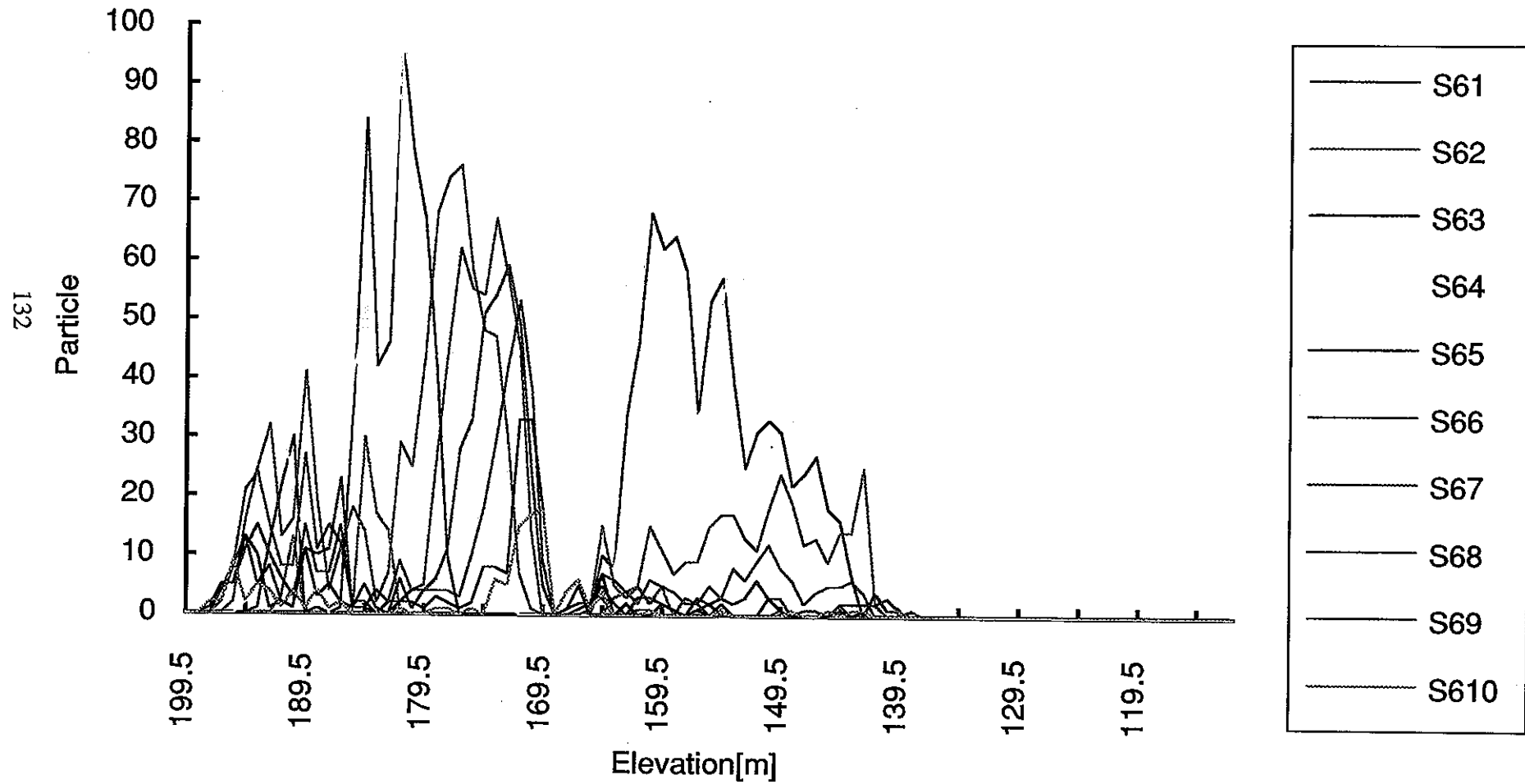


図5.2.2-2 スナップショットの例

(水理条件Case a-2, 透水係数場 Case 69/ソース6,TH-4)

snapshots P7 TH-1

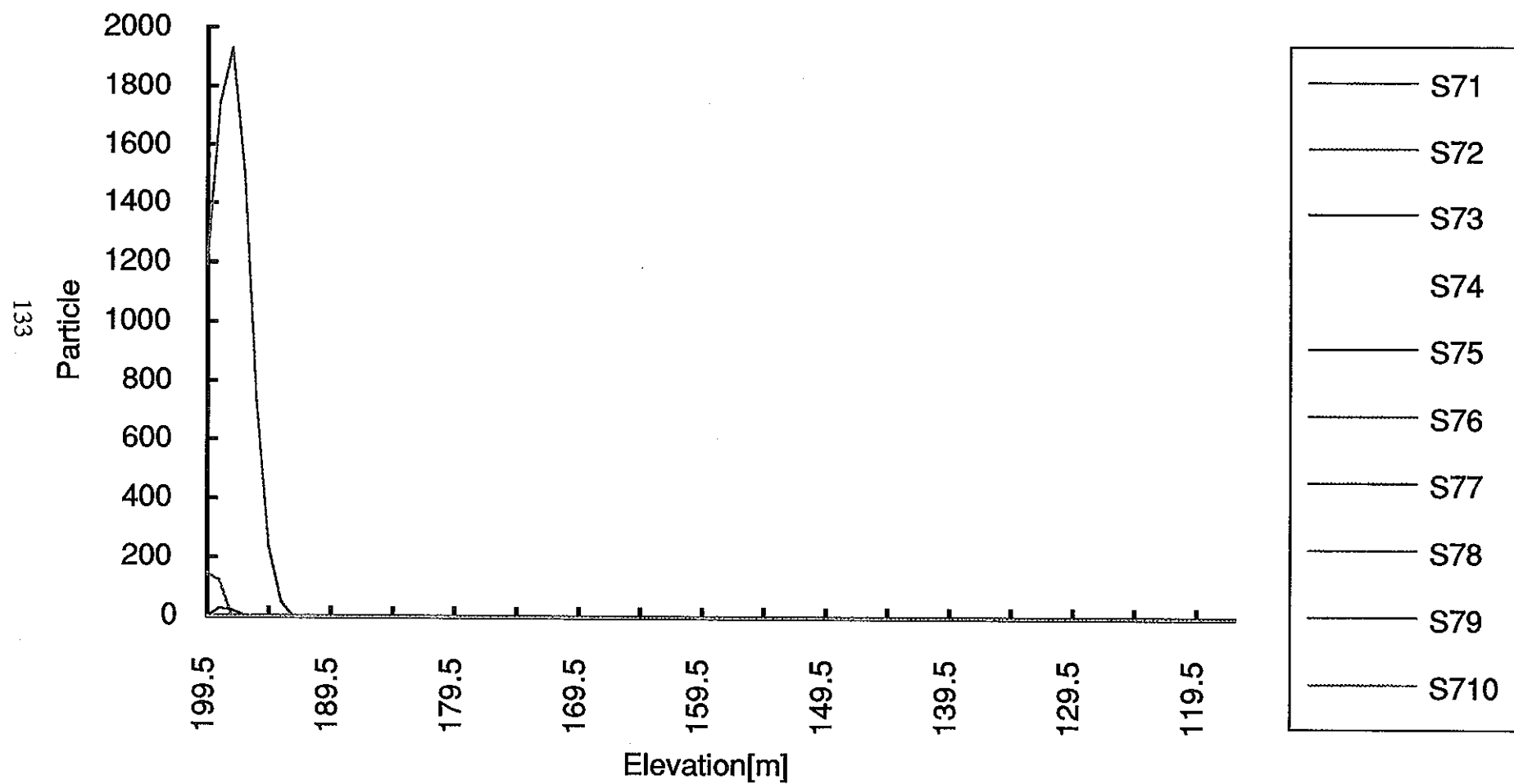


図5.2.2-2 スナップショットの例

(水理条件Case a-2, 透水係数場 Case 69/ソース7,TH-1)

snapshots P7 TH-2

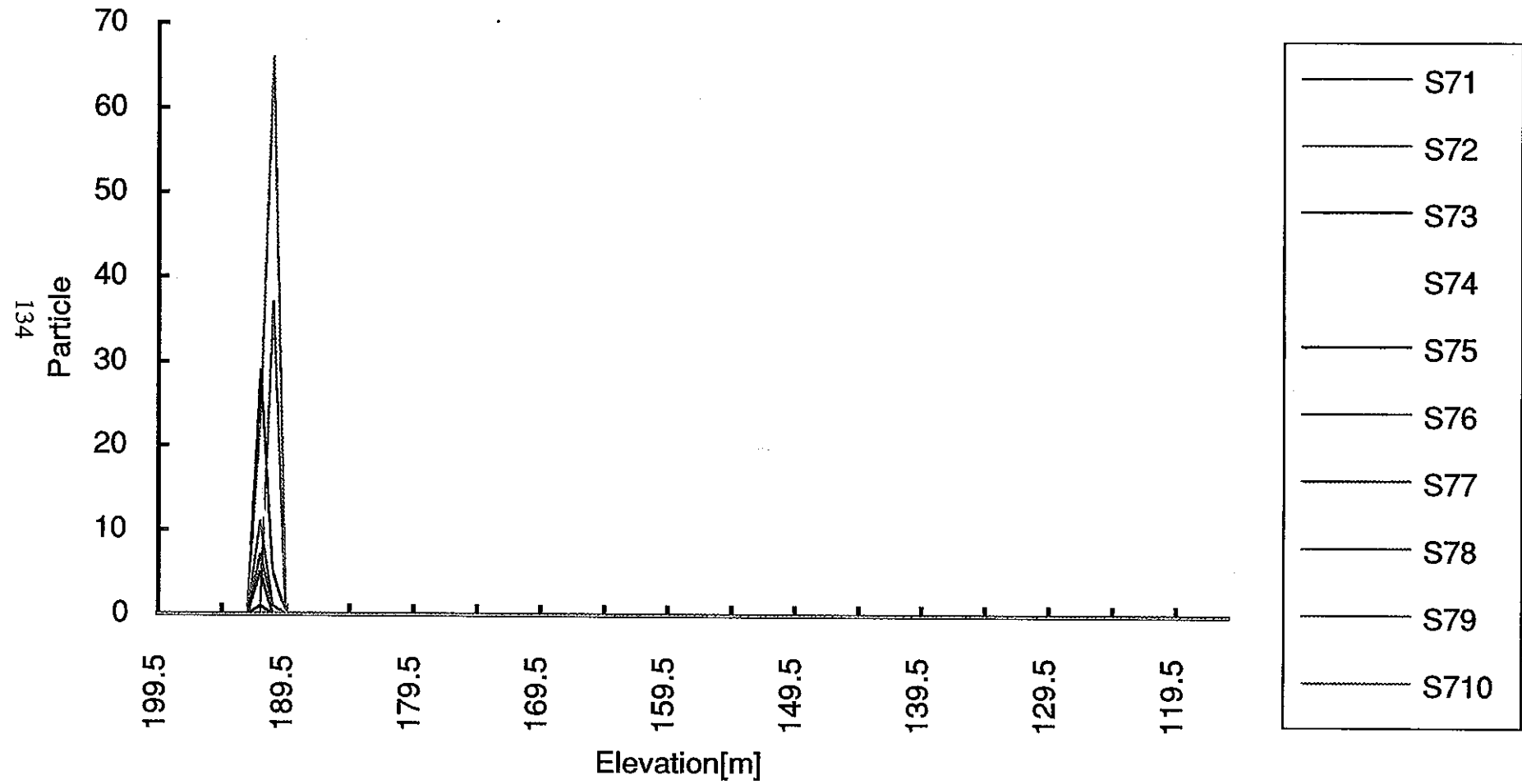


図5.2.2-2 スナップショットの例

(水理条件Case a-2, 透水係数場 Case 69/ソース7,TH-2)

snapshots P7 TH-3

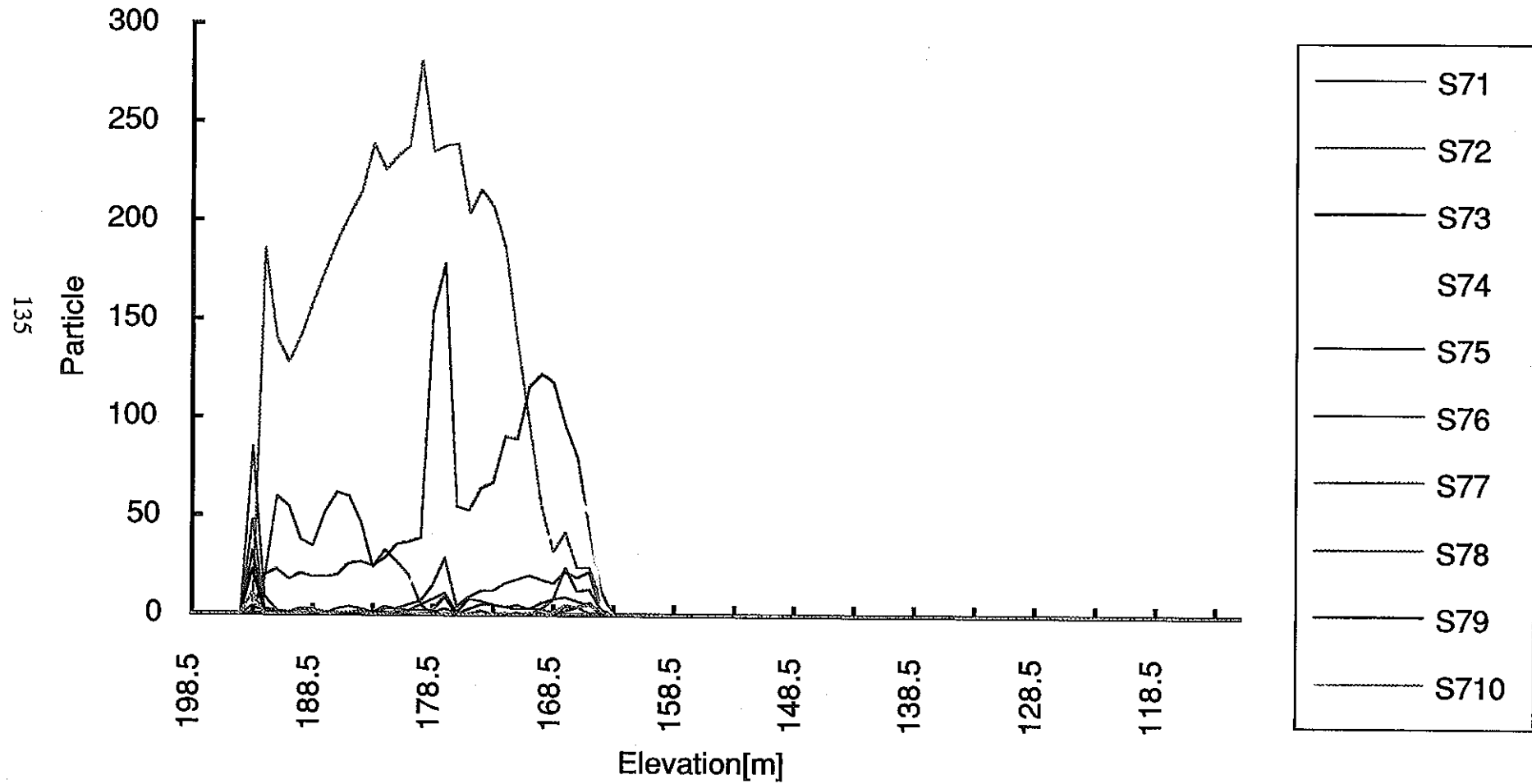


図5.2.2-2 スナップショットの例

(水理条件Case a-2, 透水係数場 Case 69/ソース7,TH-3)

snapshots P7 TH-4

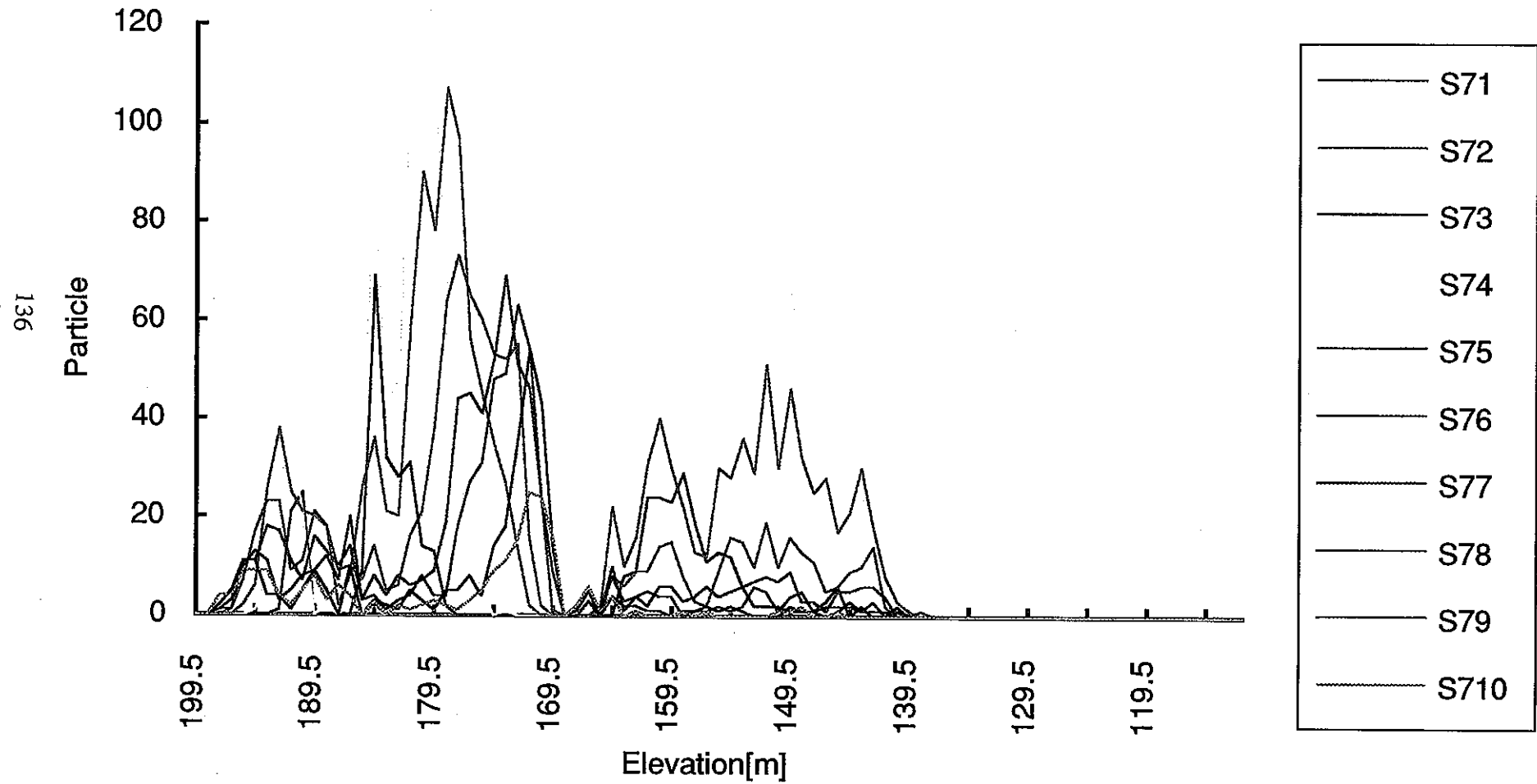


図5.2.2-2 スナップショットの例

(水理条件Case a-2, 透水係数場 Case 69/ソース7,TH-4)

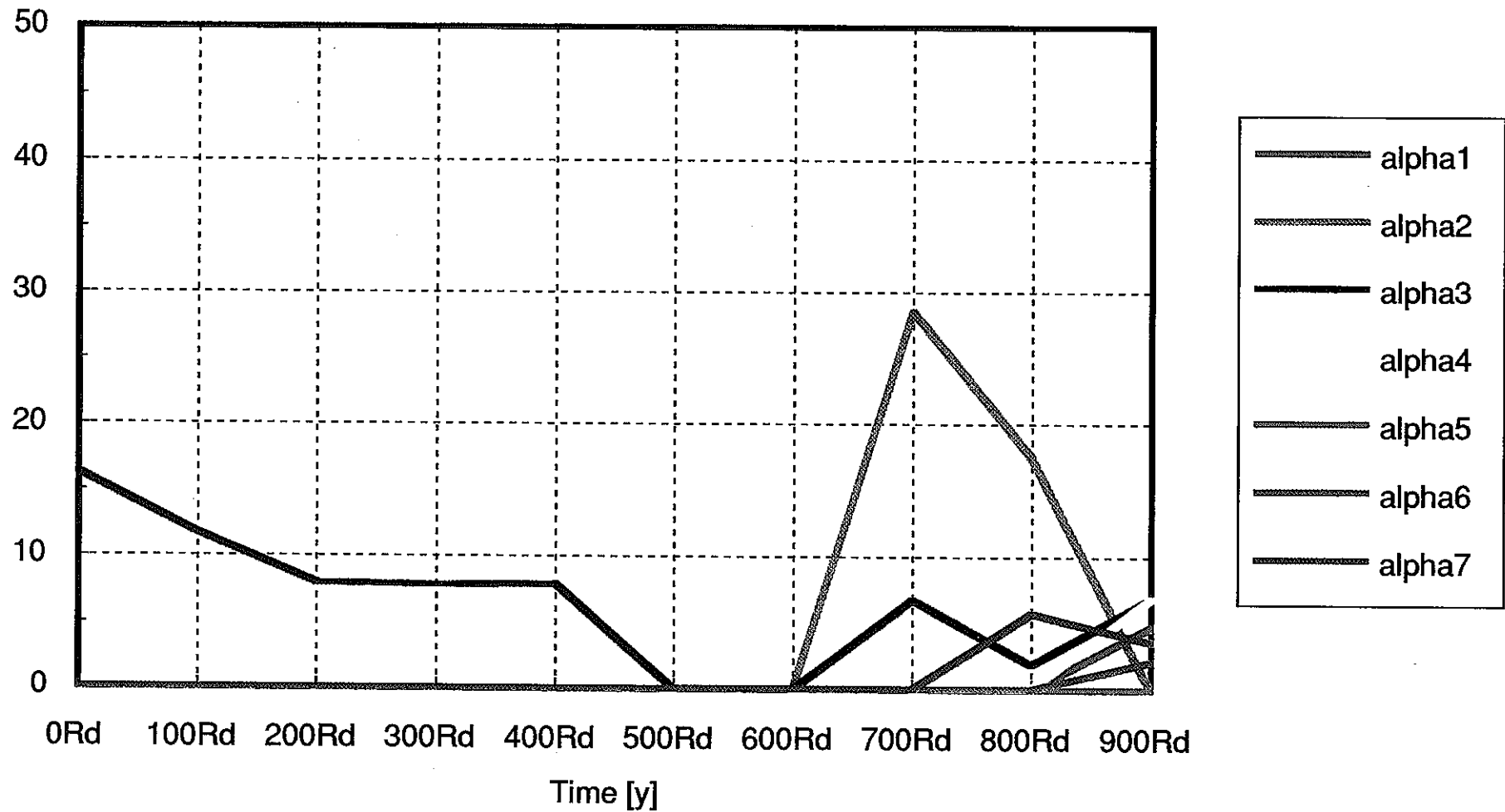


図5.2.2-3 各ソース点でのウラン供給フラックスの時間変化
(フラクタル透水係数場Case 69、水理境界条件Case a-2)

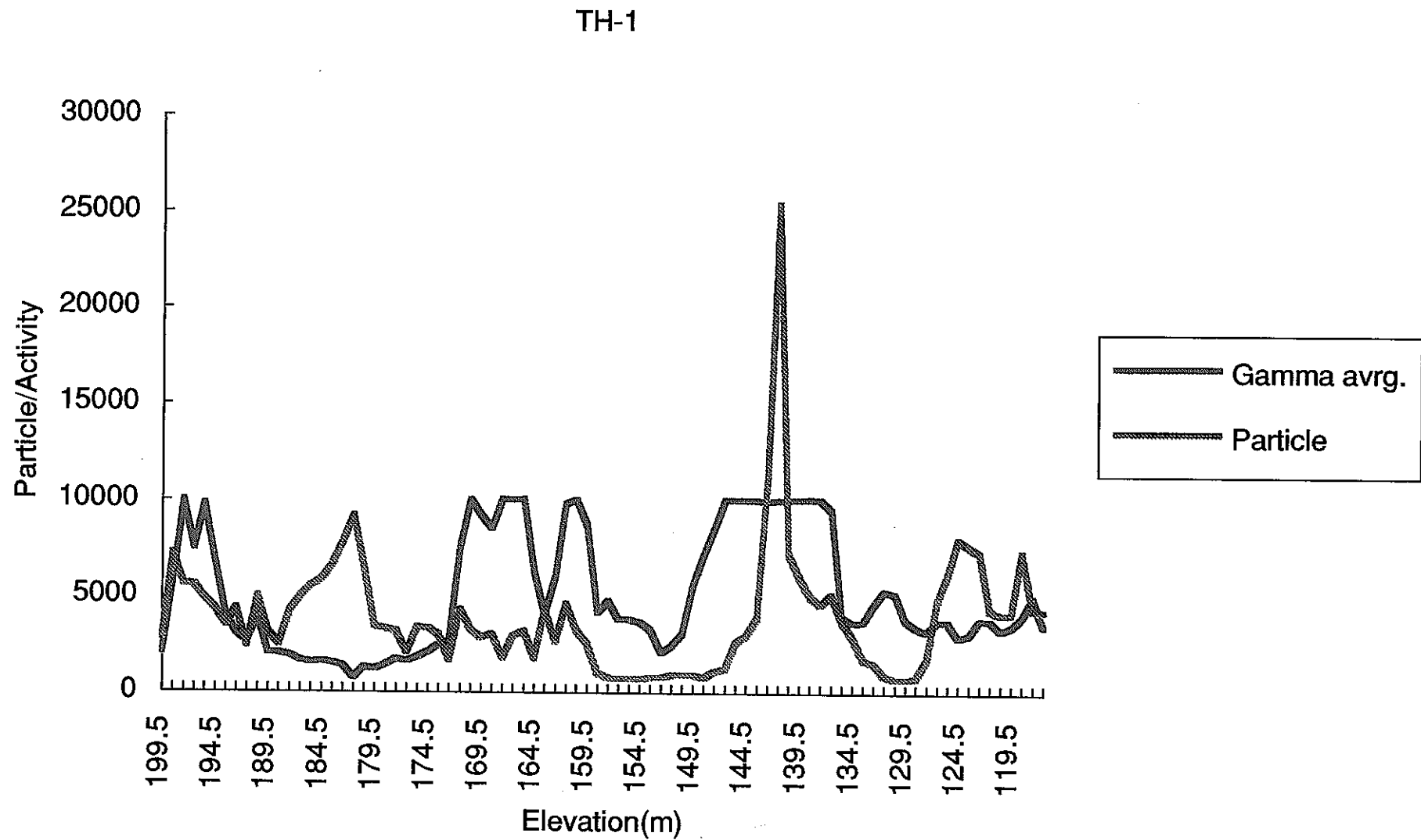


図5.2.2-4 パーティクル分布と γ 線強度分布との比較結果
(フラクタル透水係数場Case 69、水理境界条件Case a-1)

TH-2

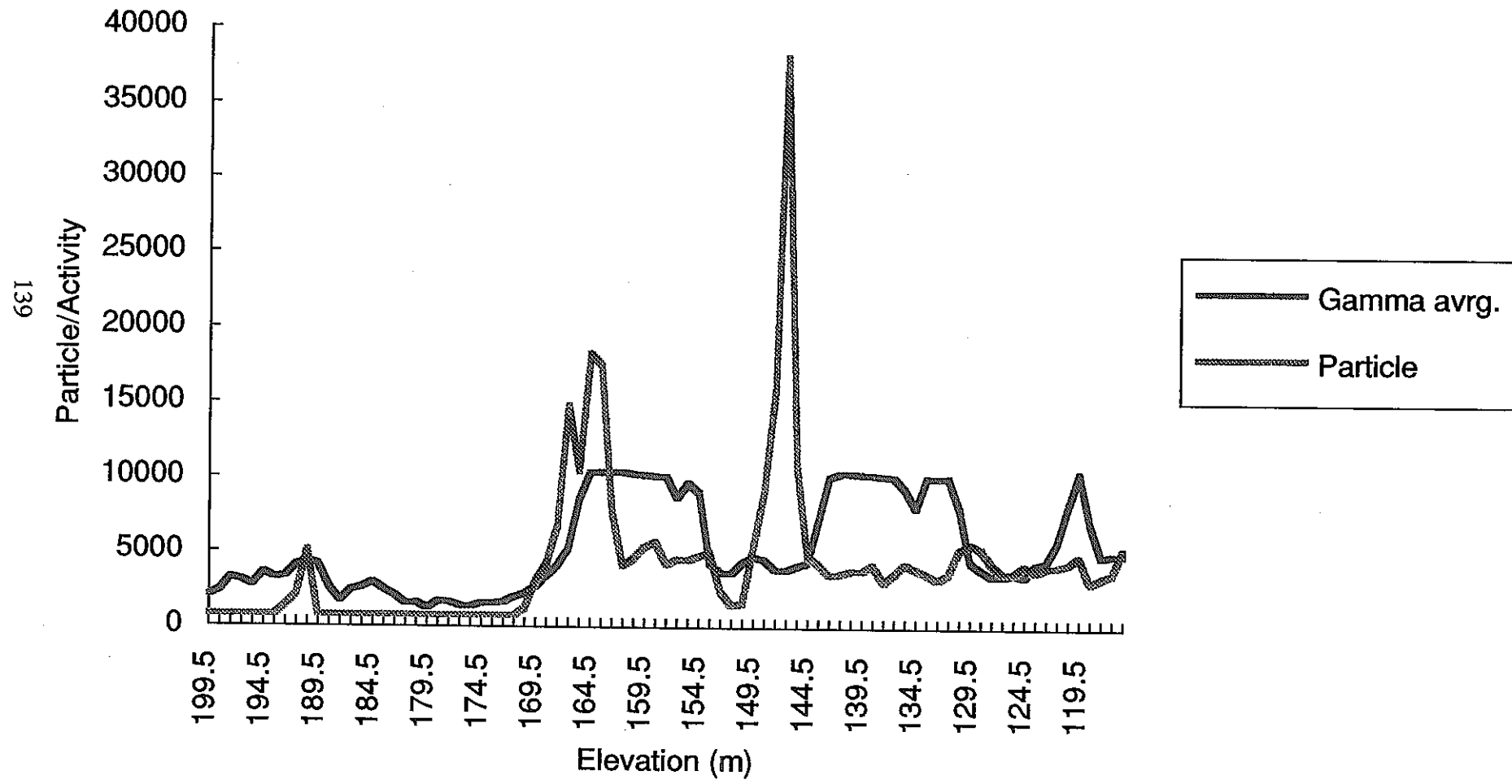


図5.2.2-4 パーティクル分布とγ線強度分布との比較結果
(フラクタル透水係数場Case 69、水理境界条件Case a-1)

TH-3

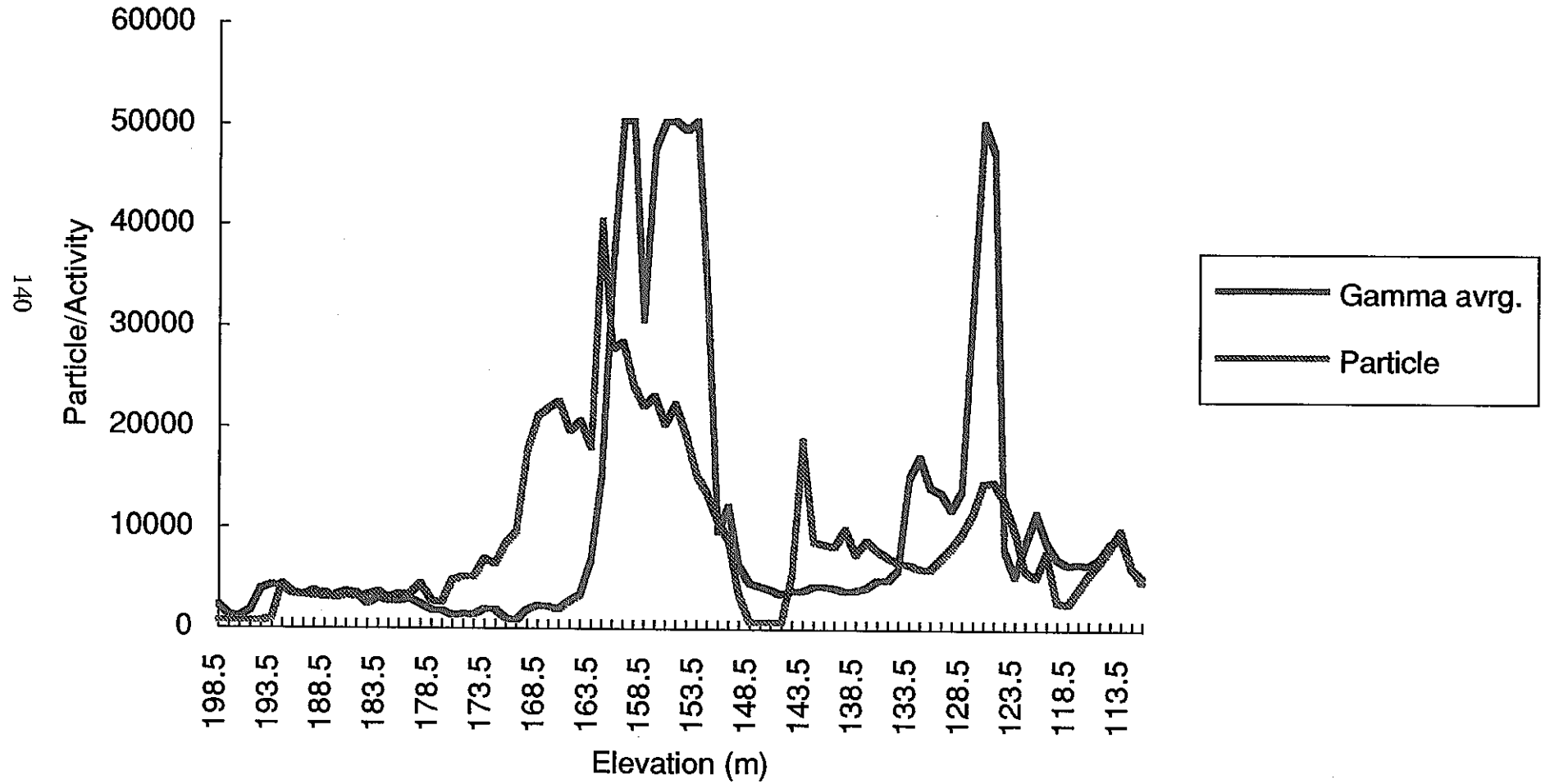


図5.2.2-4 パーティクル分布とγ線強度分布との比較結果
(フラクタル透水係数場Case 69、水理境界条件Case a-1)

TH-1

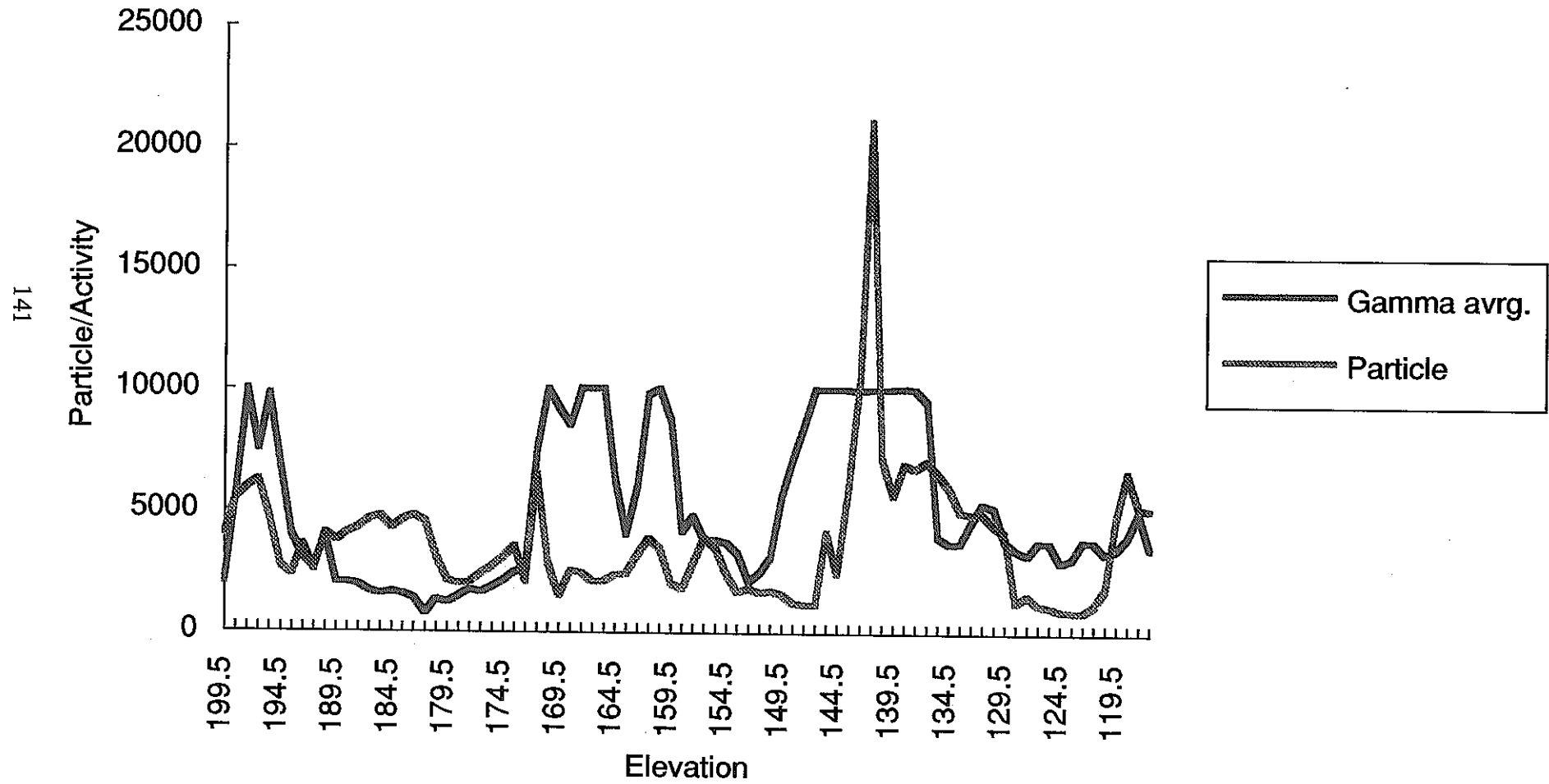


図5.2.2-4 パーティクル分布とγ線強度分布との比較結果
(フラクタル透水係数場Case 49、水理境界条件Case a-1)

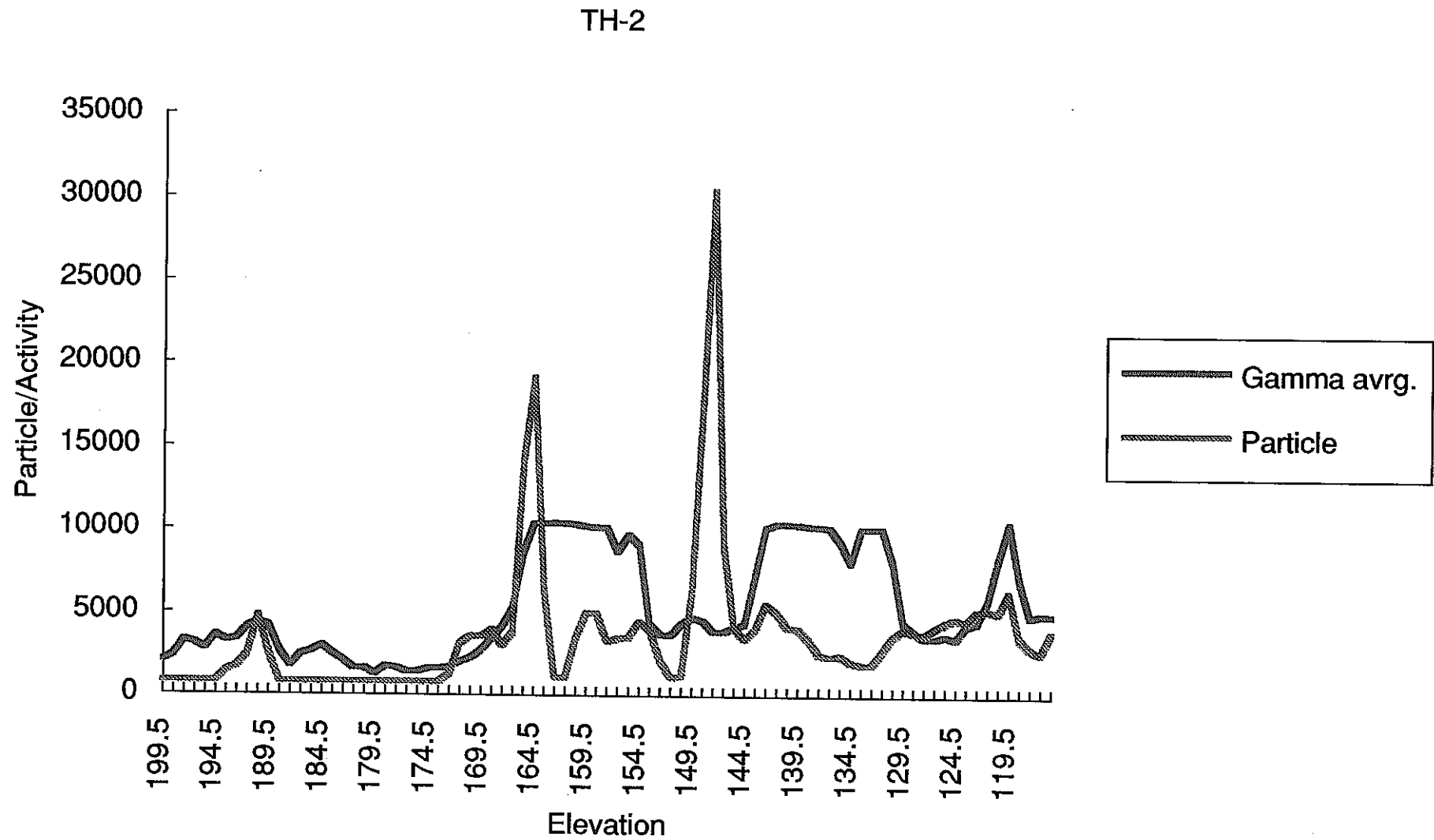


図5.2.2-4 パーティクル分布と γ 線強度分布との比較結果
(フラクタル透水係数場Case 49、水理境界条件Case a-1)

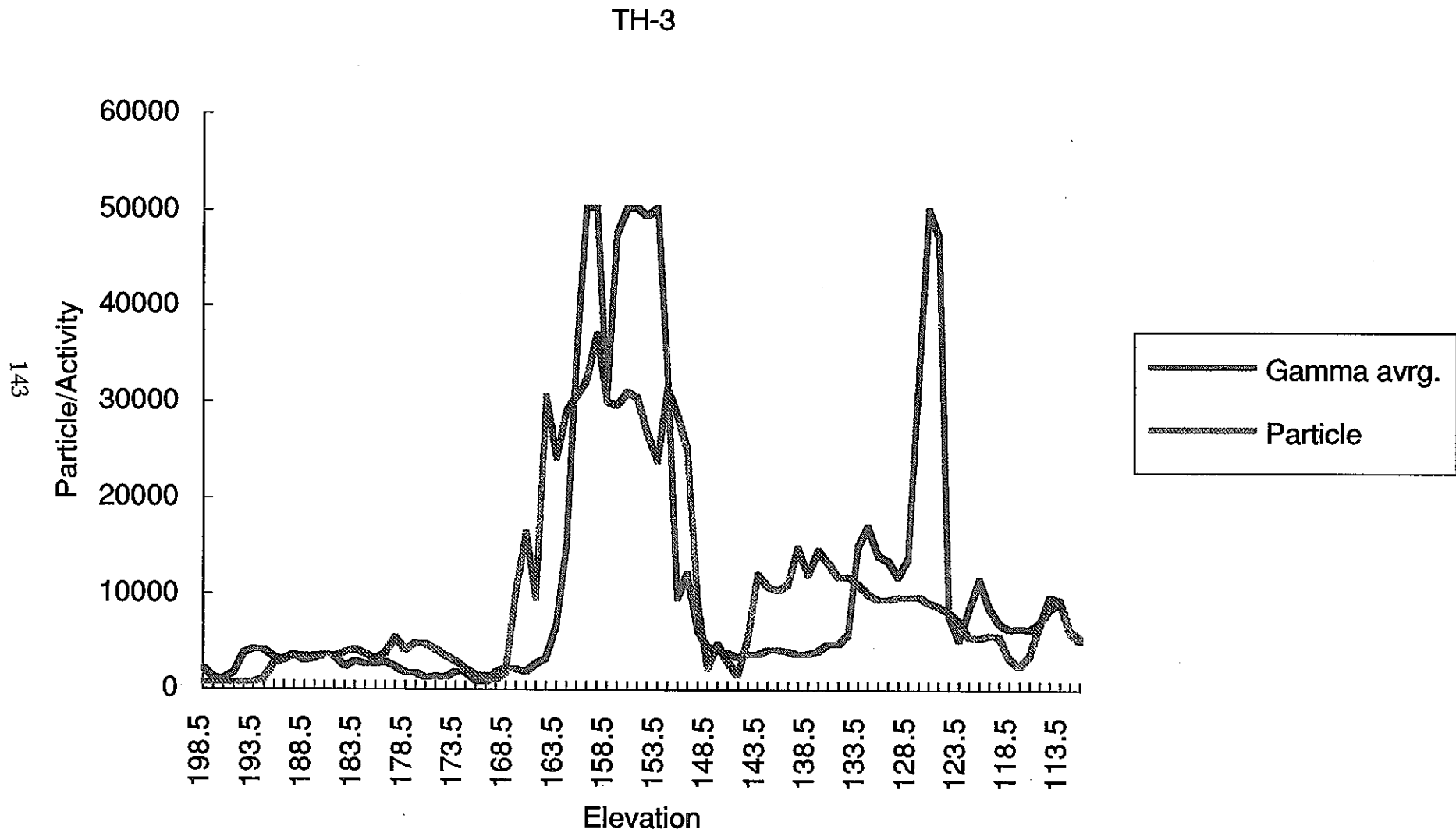


図5.2.2-4 パーティクル分布とγ線強度分布との比較結果
 (フラクタル透水係数場Case 49、水理境界条件Case a-1)

TH-1

144

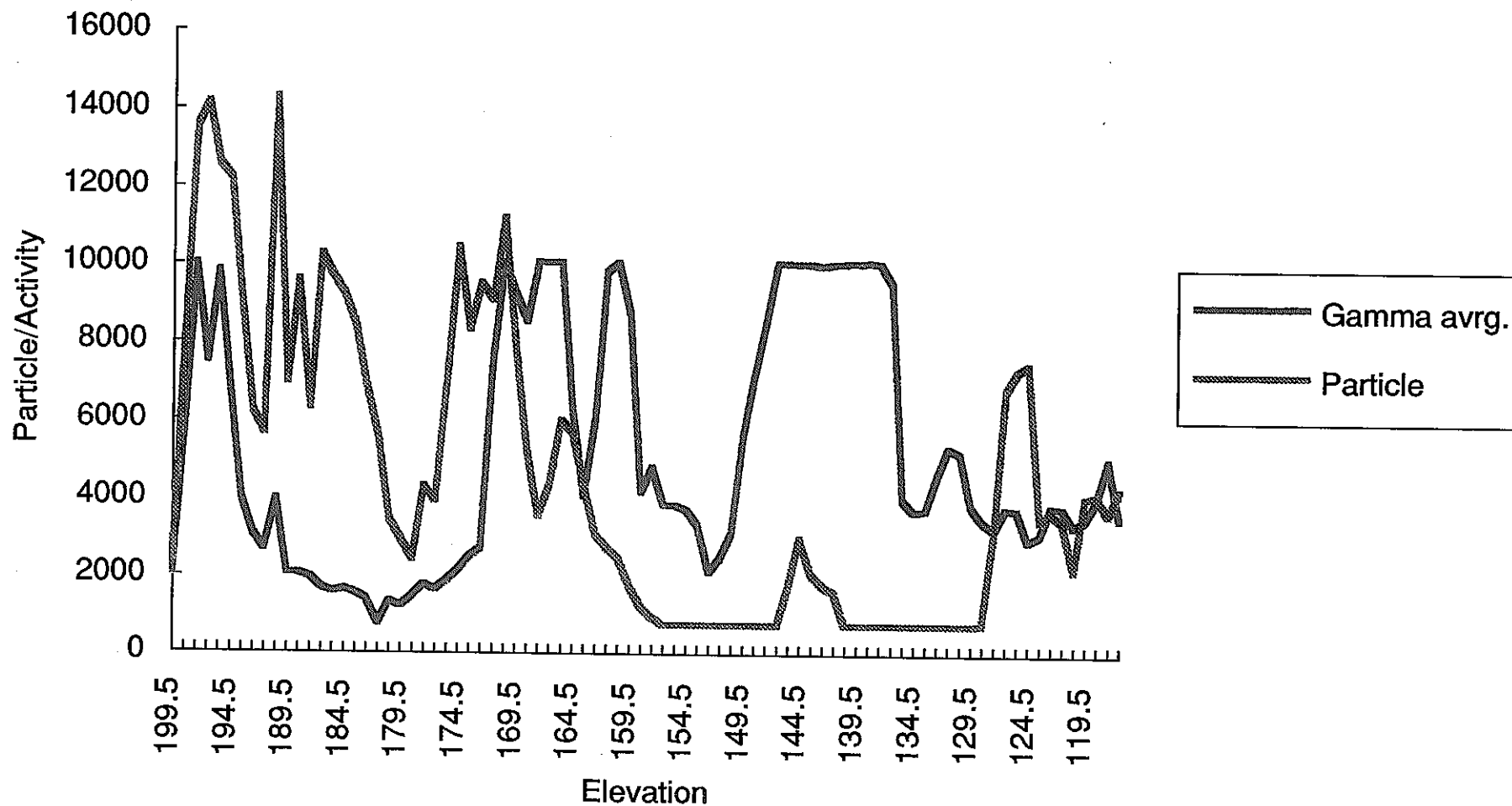


図5.2.2-4 パーティクル分布と γ 線強度分布との比較結果
(フラクタル透水係数場Case 66、水理境界条件Case a-1)

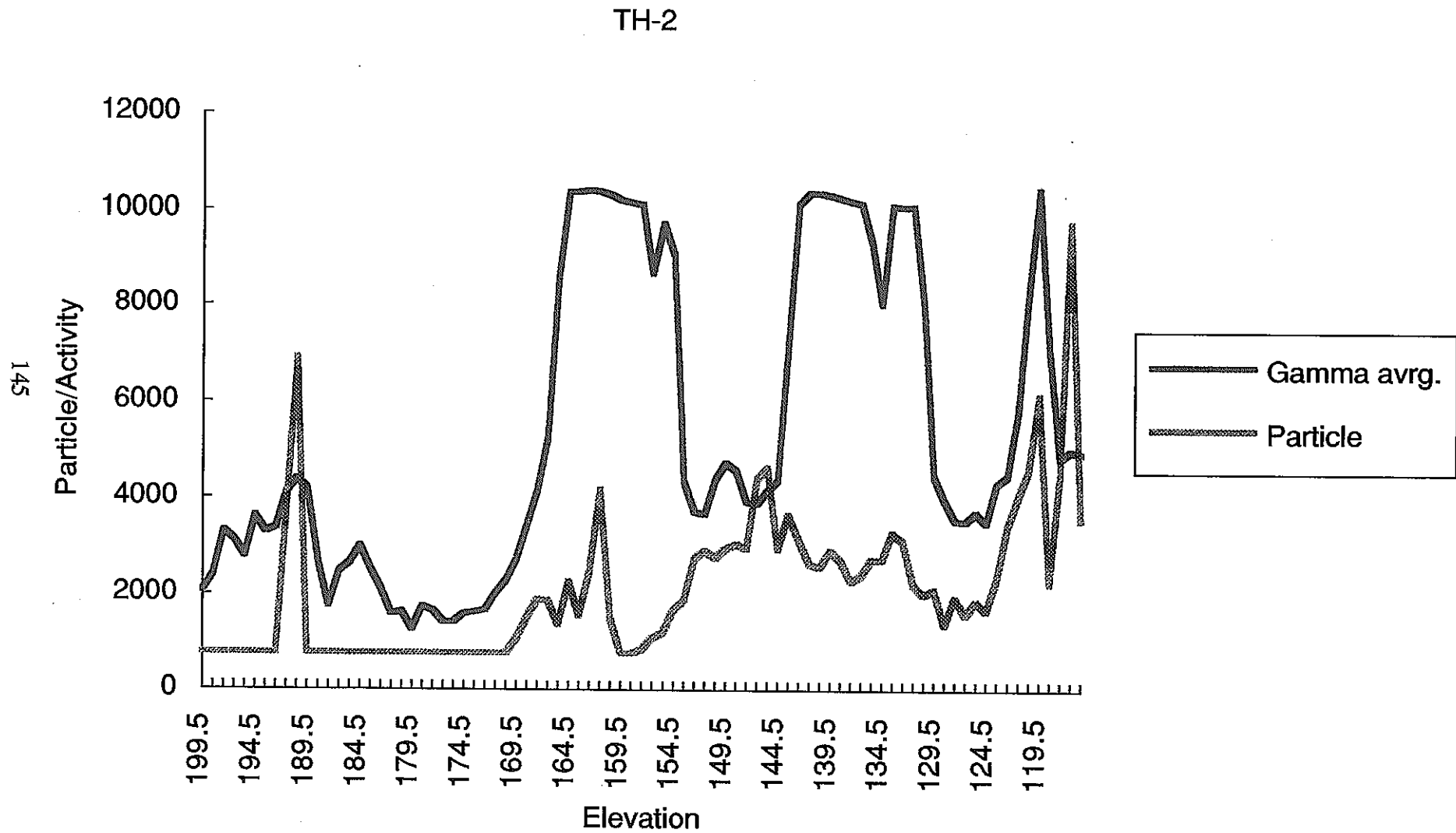


図5.2.2-4 パーティクル分布とγ線強度分布との比較結果
(フラクタル透水係数場Case 66、水理境界条件Case a-1)

TH-3

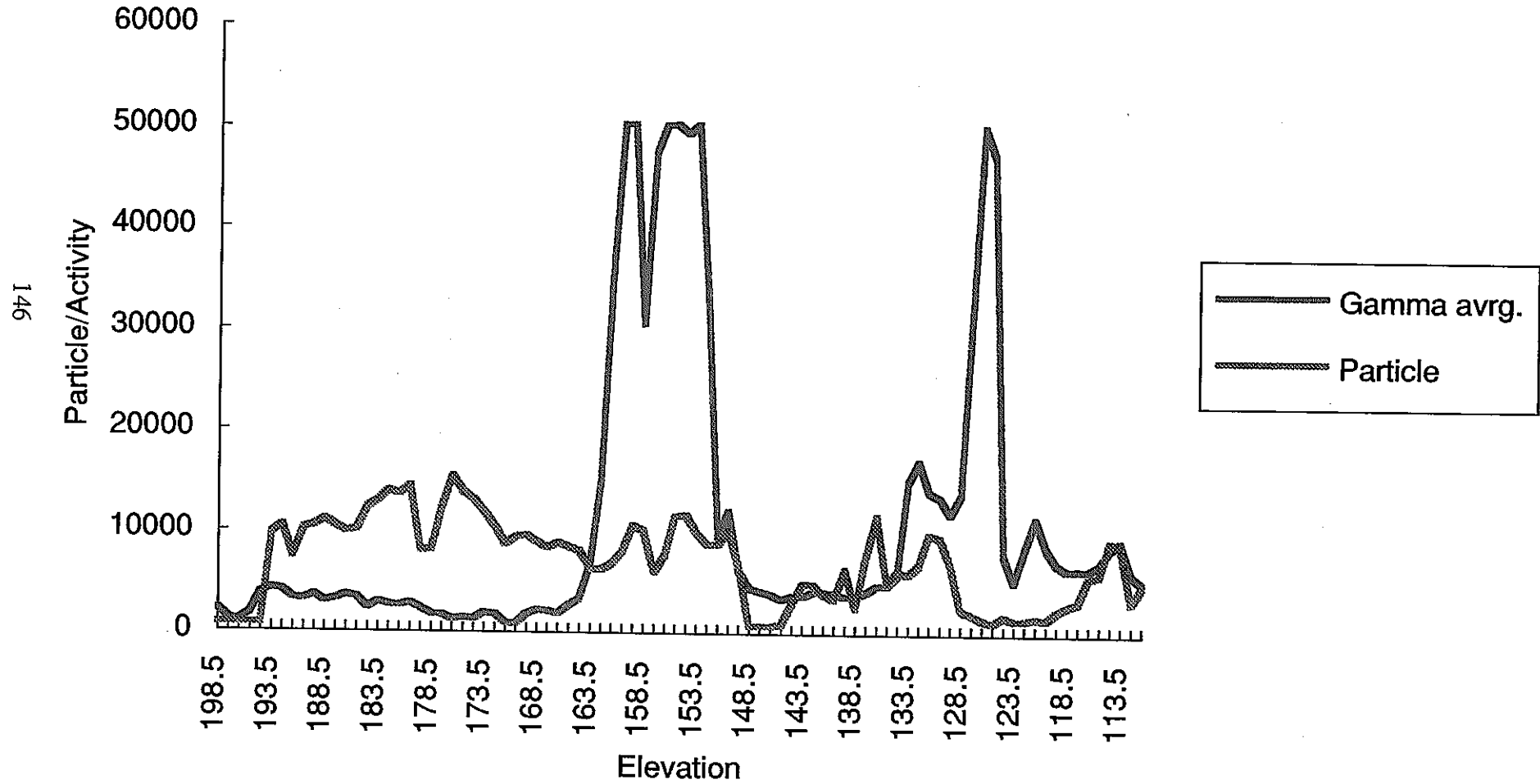


図5.2.2-4 パーティクル分布とγ線強度分布との比較結果
(フラクタル透水係数場Case 66、水理境界条件Case a-1)

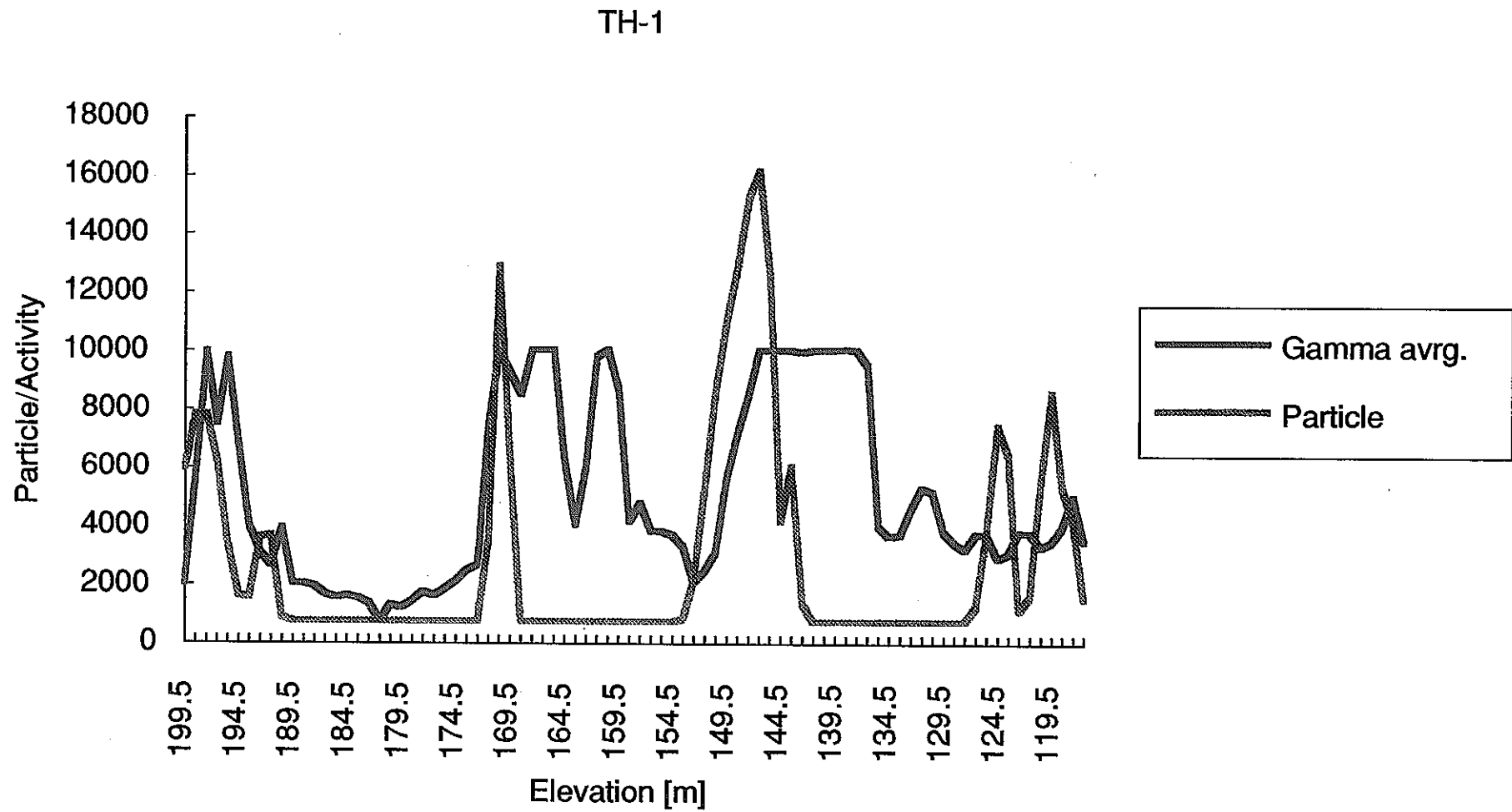


図5.2.2-4 パーティクル分布と γ 線強度分布との比較結果
(フラクタル透水係数場Case 69、水理境界条件Case a-2)

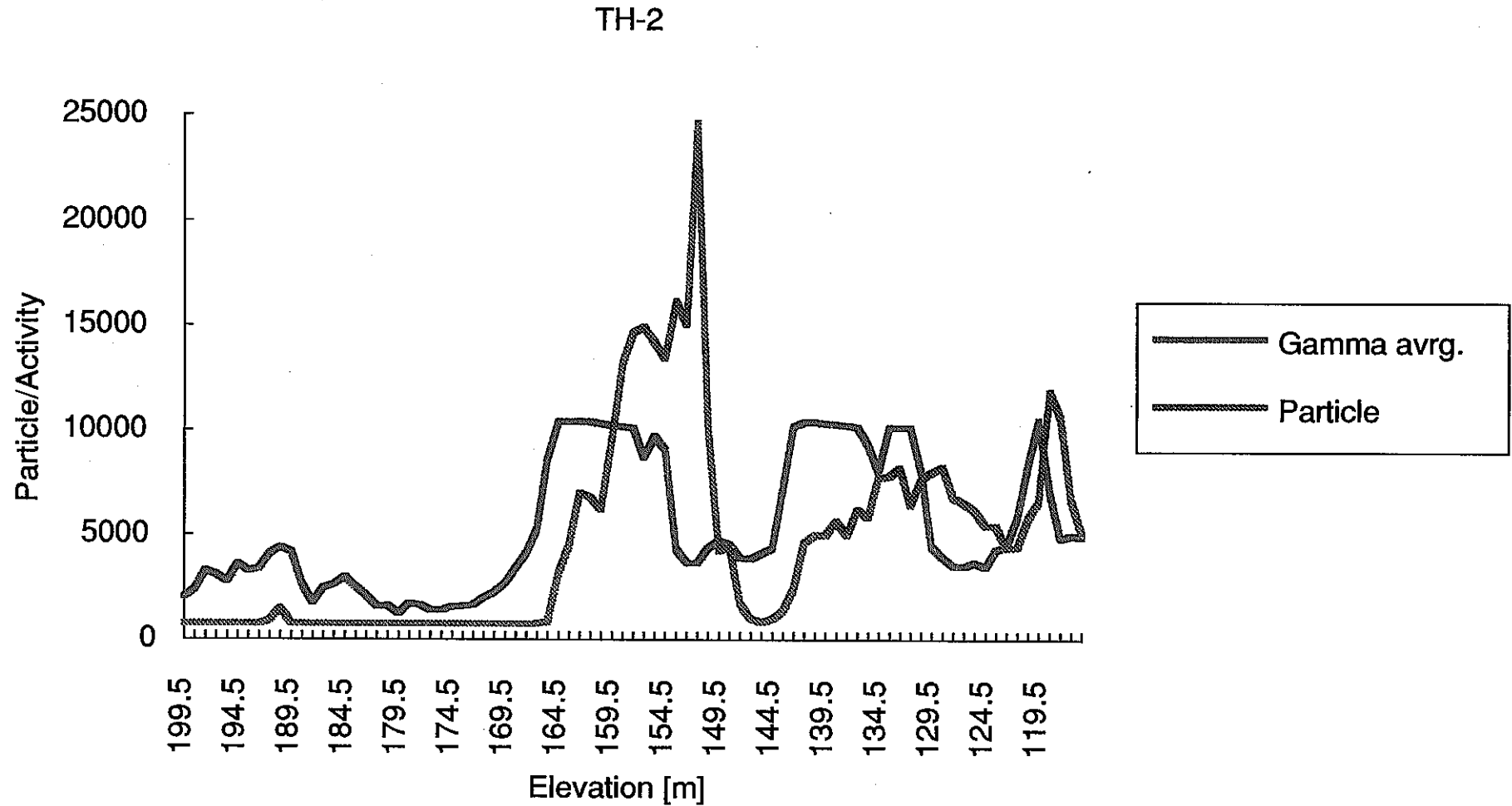


図5.2.2-4 パーティクル分布と γ 線強度分布との比較結果
 (フラクタル透水係数場Case 69、水理境界条件Case a-2)

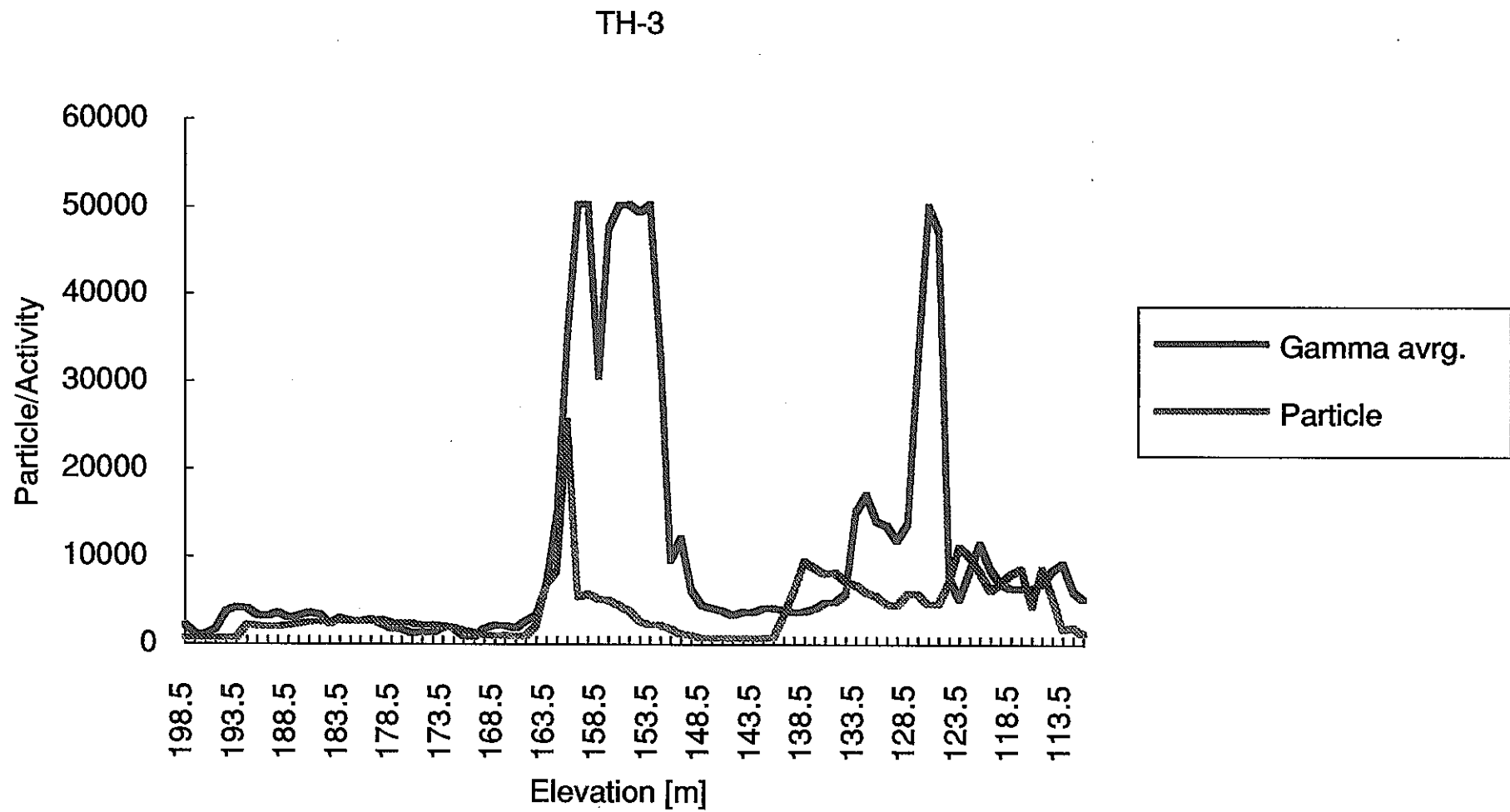


図5.2.2-4 パーティクル分布とγ線強度分布との比較結果
(フラクタル透水係数場Case 69、水理境界条件Case a-2)

TH-4

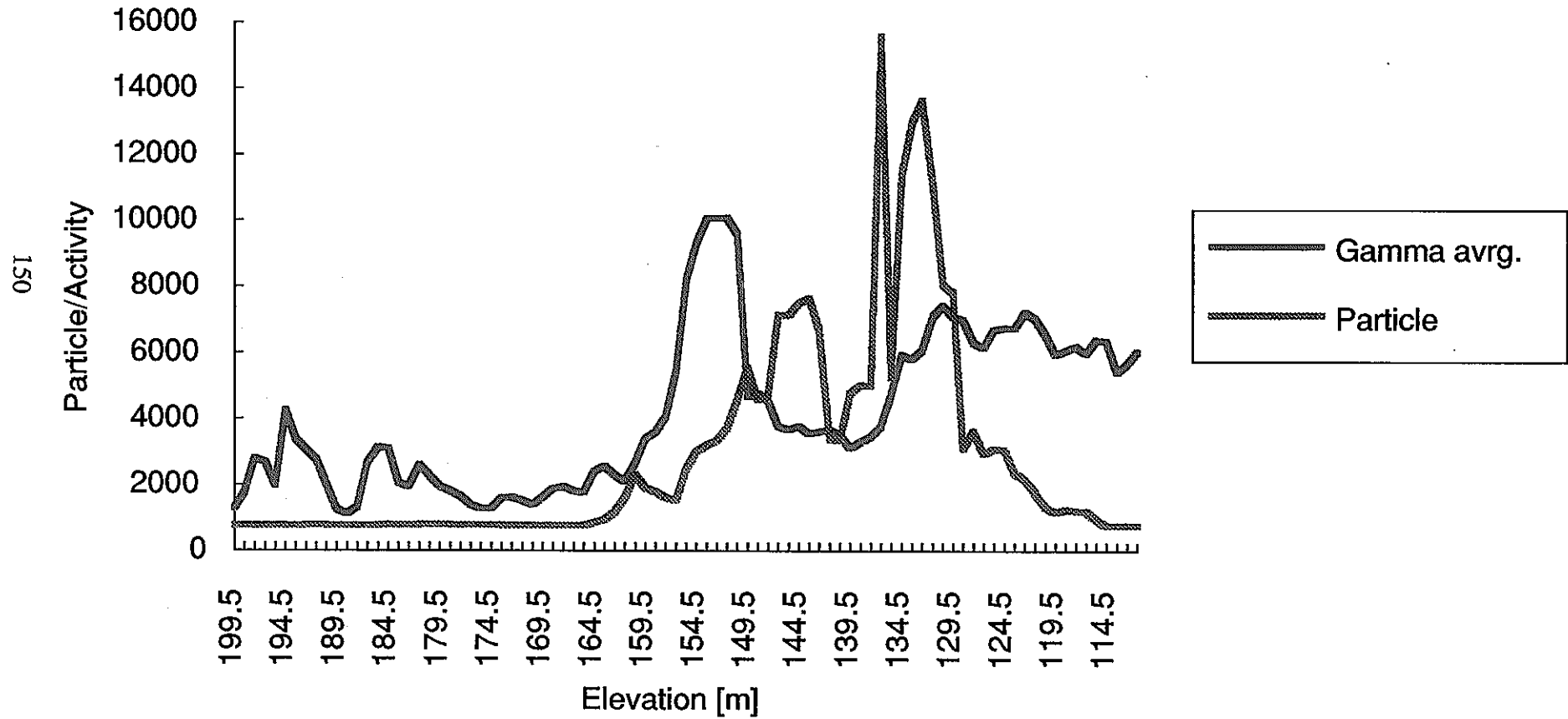


図5.2.2-4 パーティクル分布とγ線強度分布との比較結果
(フラクタル透水係数場Case 69、水理境界条件Case a-2)

TH-1

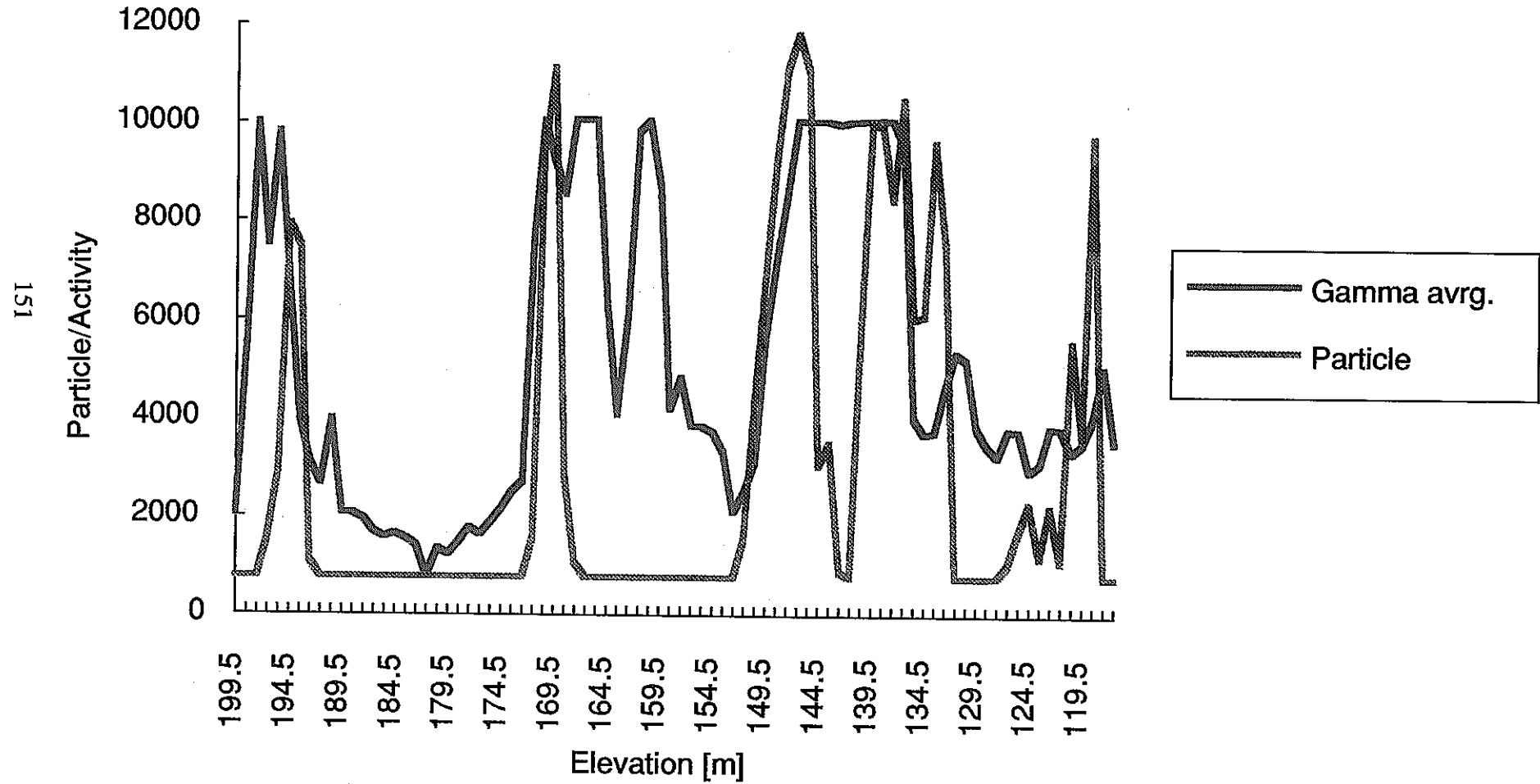


図5.2.2-4 パーティクル分布とγ線強度分布との比較結果
(フラクタル透水係数場Case 49、水理境界条件Case a-2)

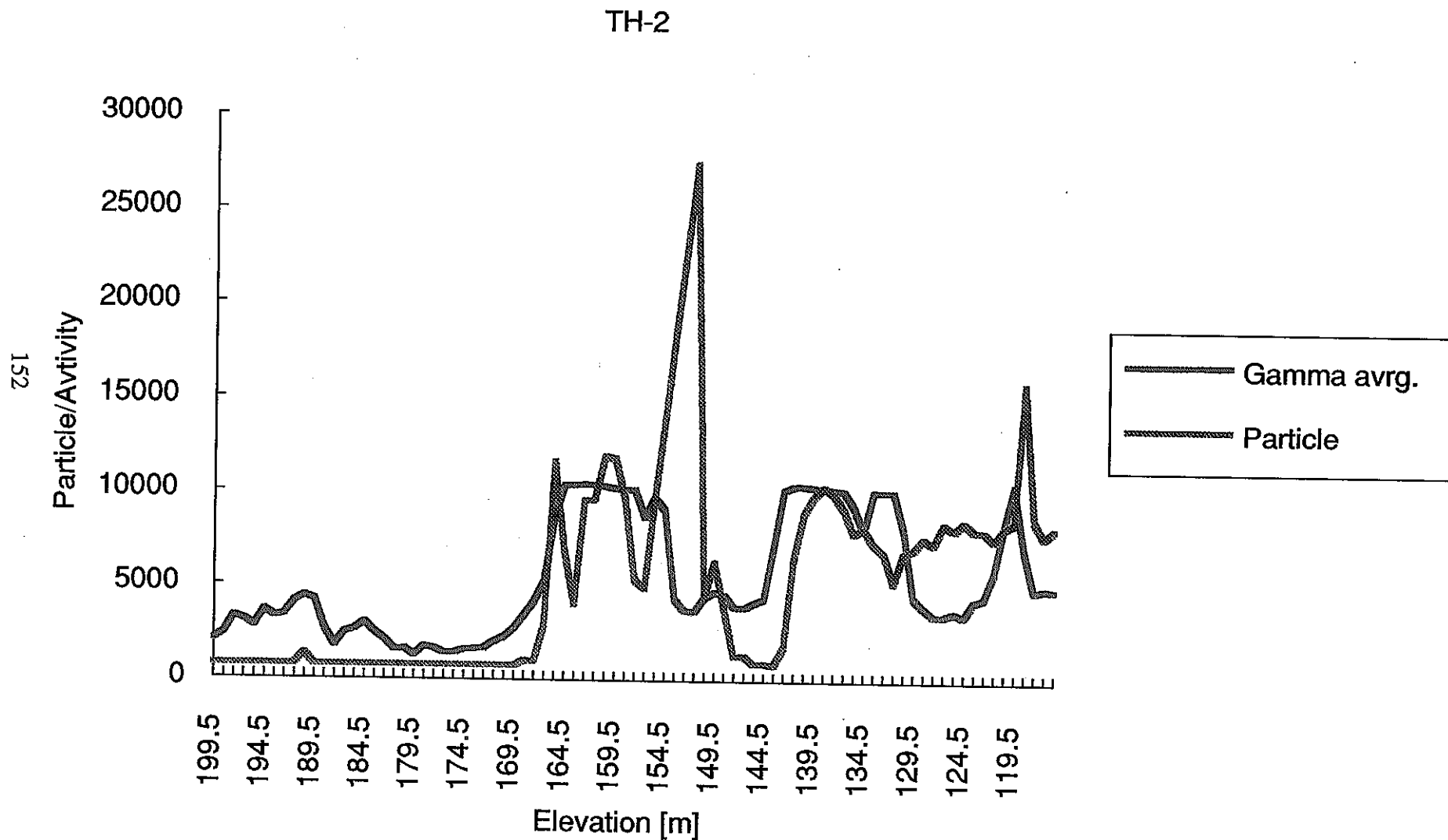


図5.2.2-4 パーティクル分布とγ線強度分布との比較結果
 (フラクタル透水係数場Case 49、水理境界条件Case a-2)

TH-3

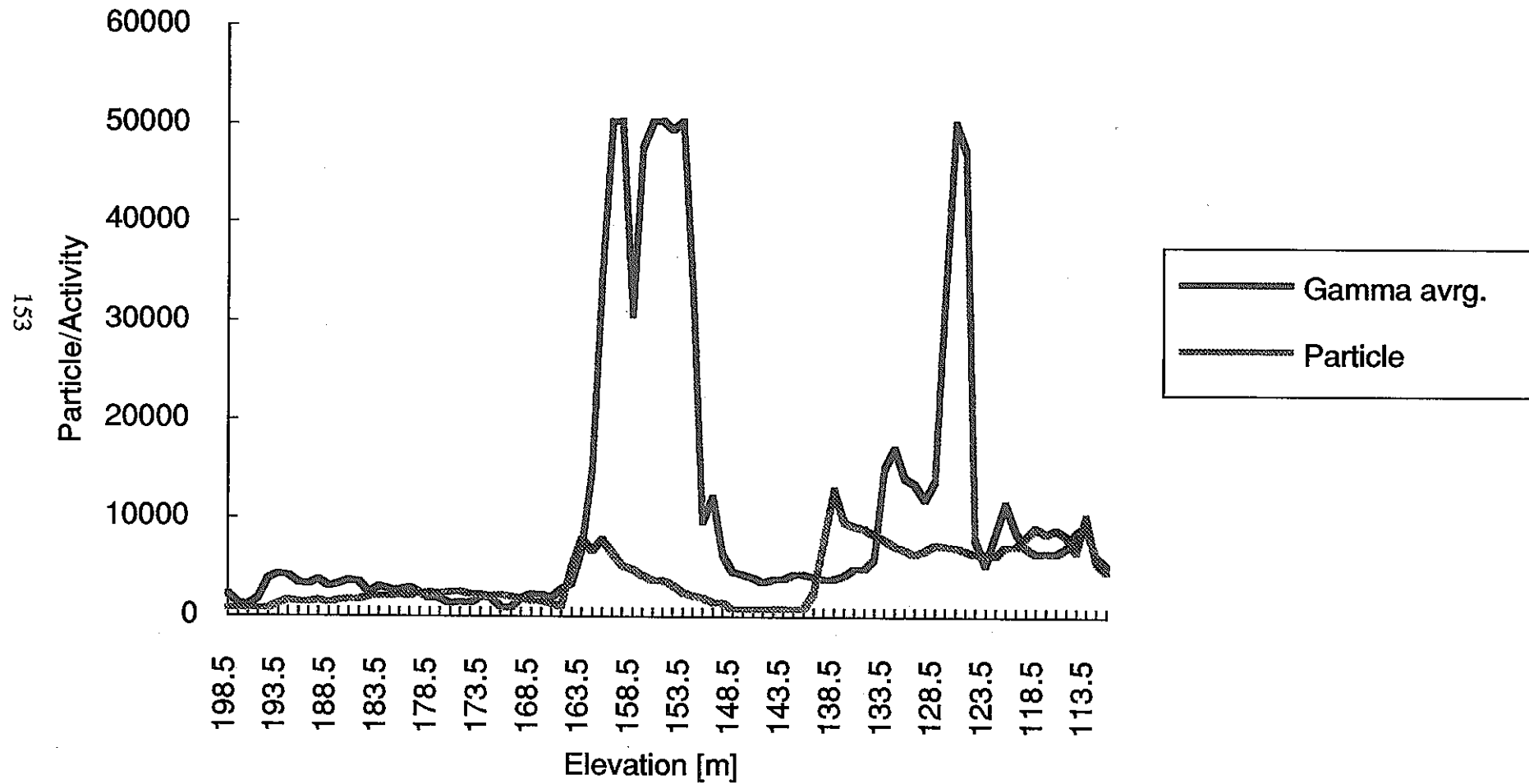


図5.2.2-4 パーティクル分布とγ線強度分布との比較結果
(フラクタル透水係数場Case 49、水理境界条件Case a-2)

TH-4

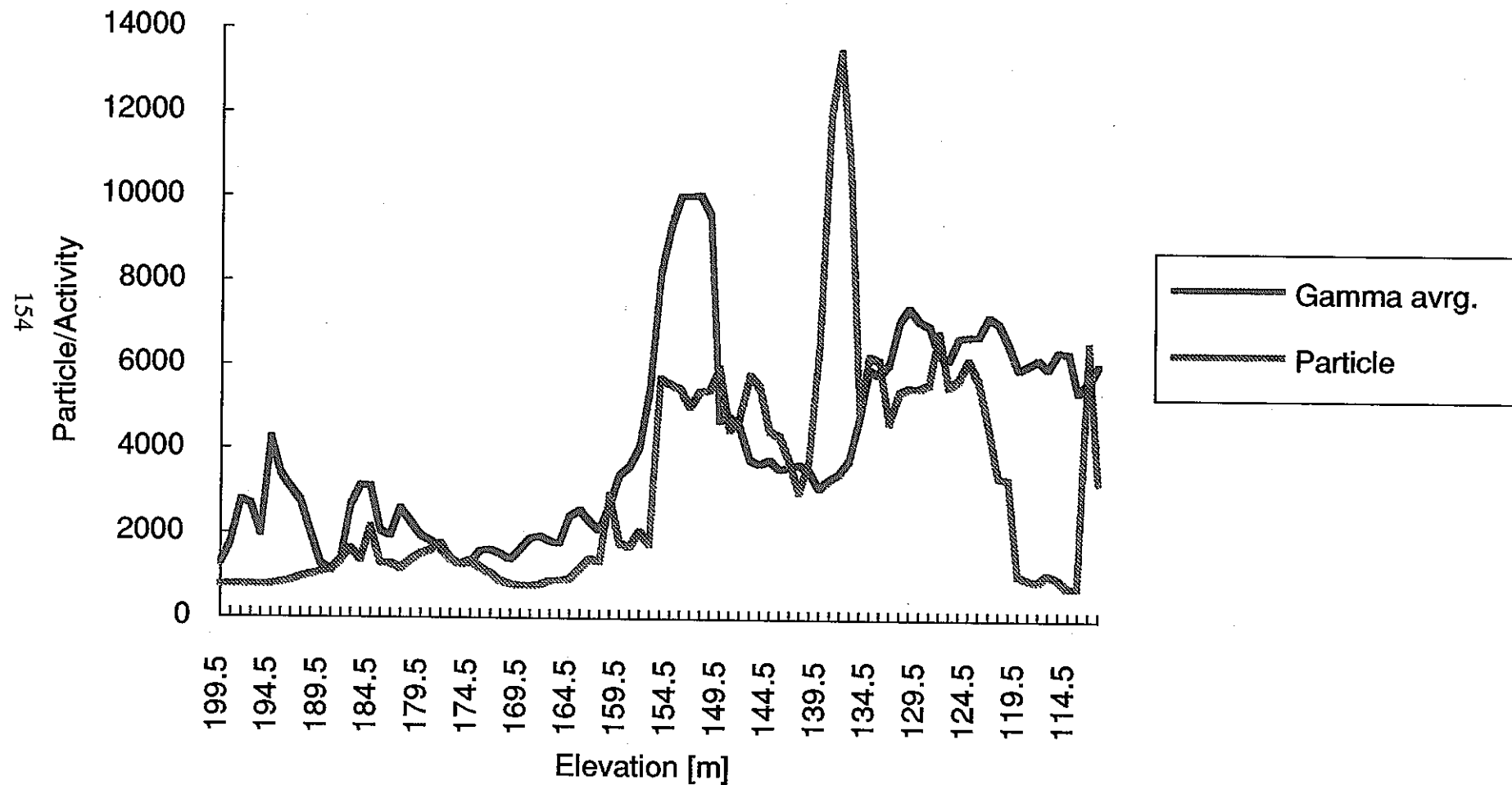


図5.2.2-4 パーティクル分布とγ線強度分布との比較結果
(フラクタル透水係数場Case 49、水理境界条件Case a-2)

TH-1

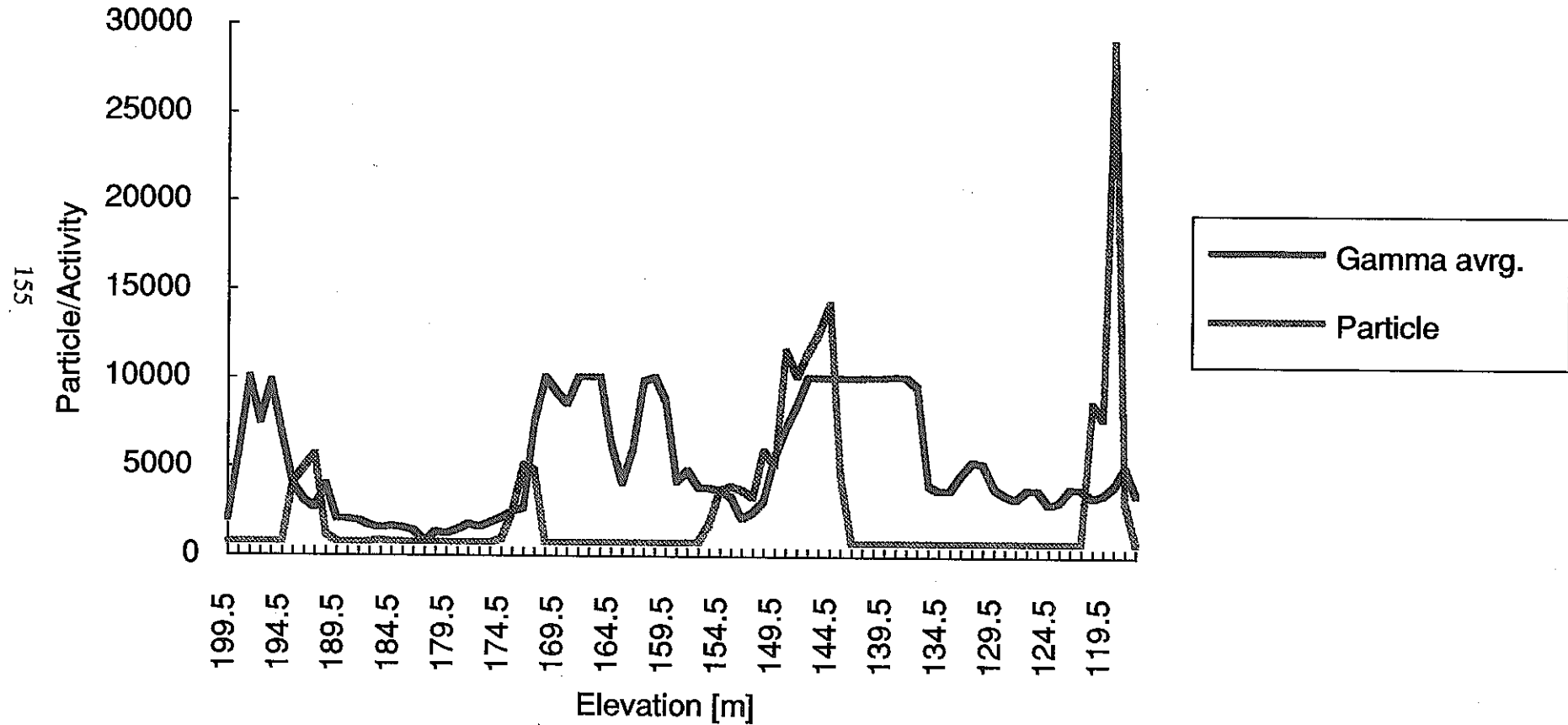


図5.2.2-4 パーティクル分布とγ線強度分布との比較結果
(フラクタル透水係数場Case 66、水理境界条件Case a-2)

TH-2

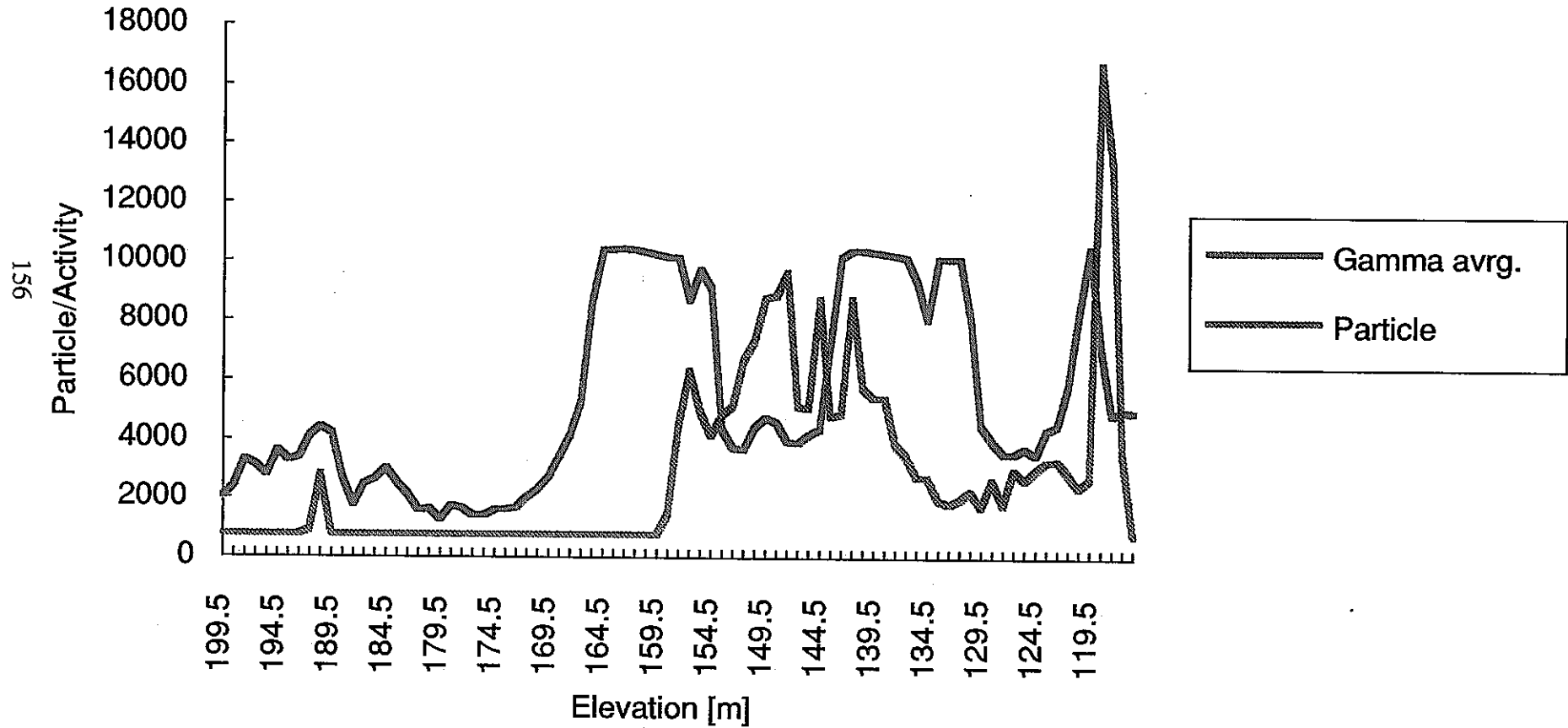


図5.2.2-4 パーティクル分布とγ線強度分布との比較結果
(フラクタル透水係数場Case 66、水理境界条件Case a-2)

TH-3

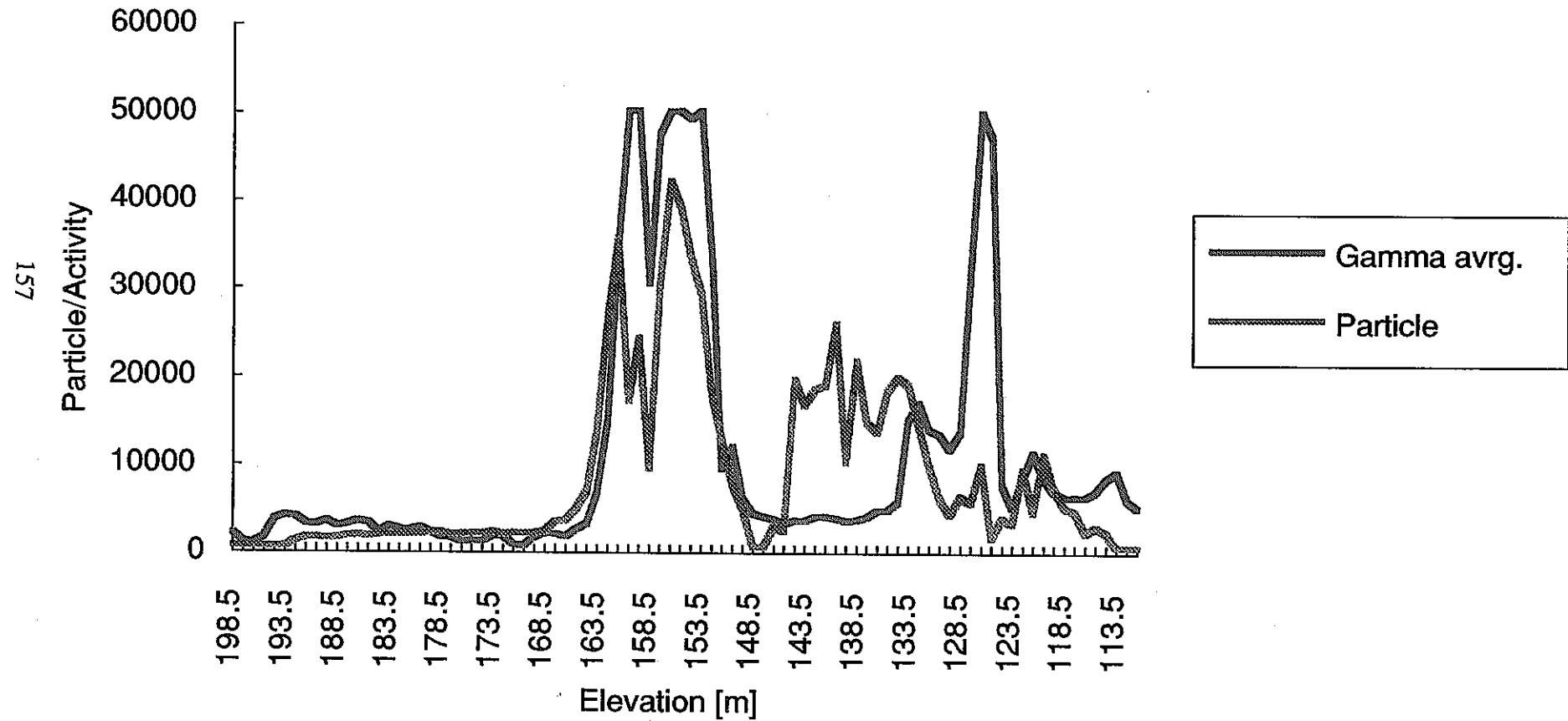


図5.2.2-4. パーティクル分布とγ線強度分布との比較結果
(フラクタル透水係数場Case 66、水理境界条件Case a-2)

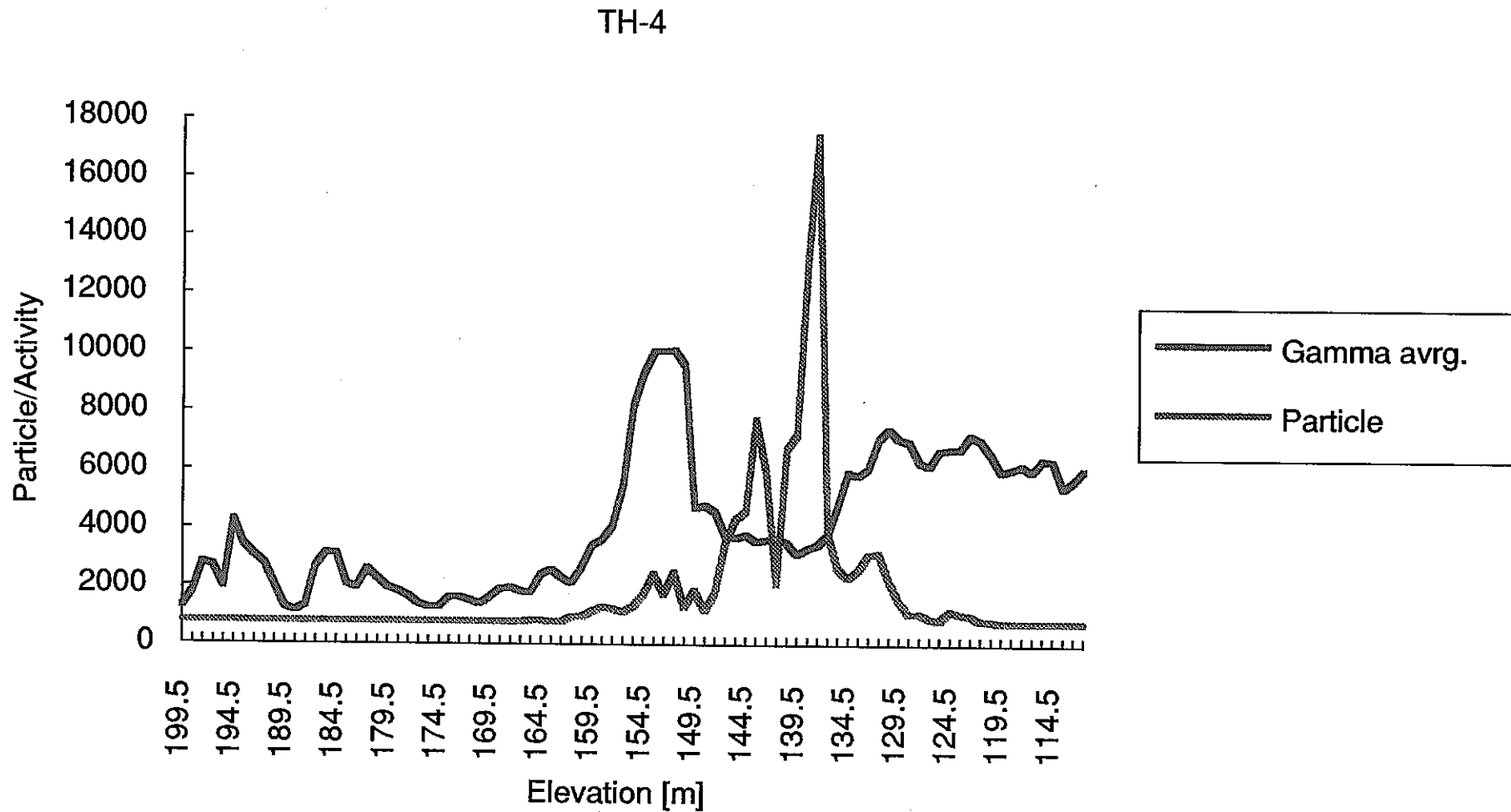


図5.2.2-4 パーティクル分布と γ 線強度分布との比較結果
(フラクタル透水係数場Case 66、水理境界条件Case a-2)

て、パーティクルトラッキングの結果から二次元的なウラン分布を再現した結果と既知の（即ち試錐孔に位置する）ウラン高濃集部（ γ 線強度5000cpm以上の部分とした）との比較を図5.2.2-5に示す。解析の最終タイムステップにおけるパーティクル分布と、現在の既知の高濃集位置とはほぼ整合的な位置関係にあるとすることができる。また、これに対して、各ソースにおいて各時刻に解析対象領域に供給されたウランが現在どのように分布しているかを図5.2.2-6にまとめる。

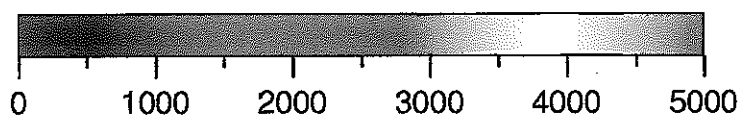
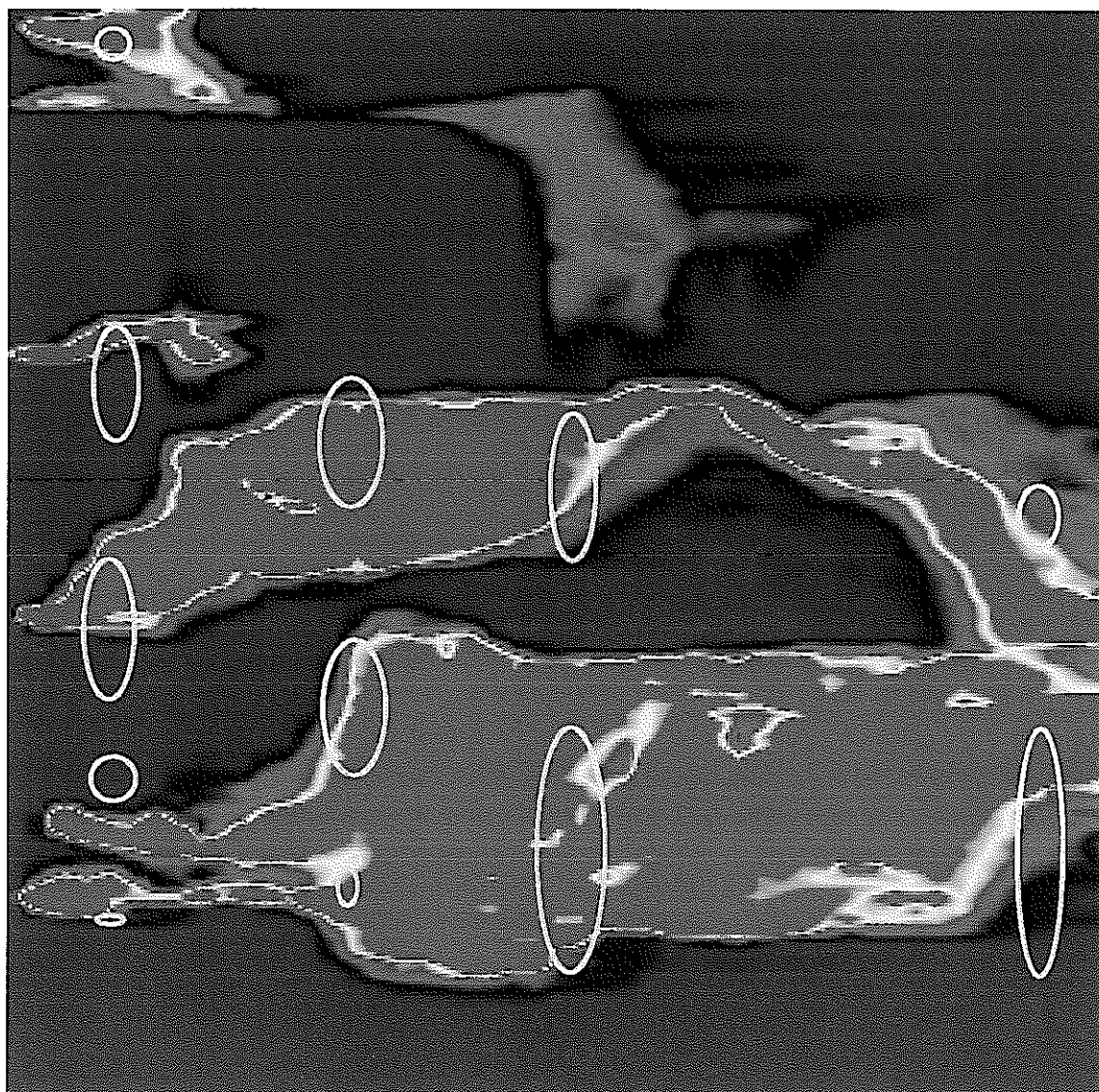
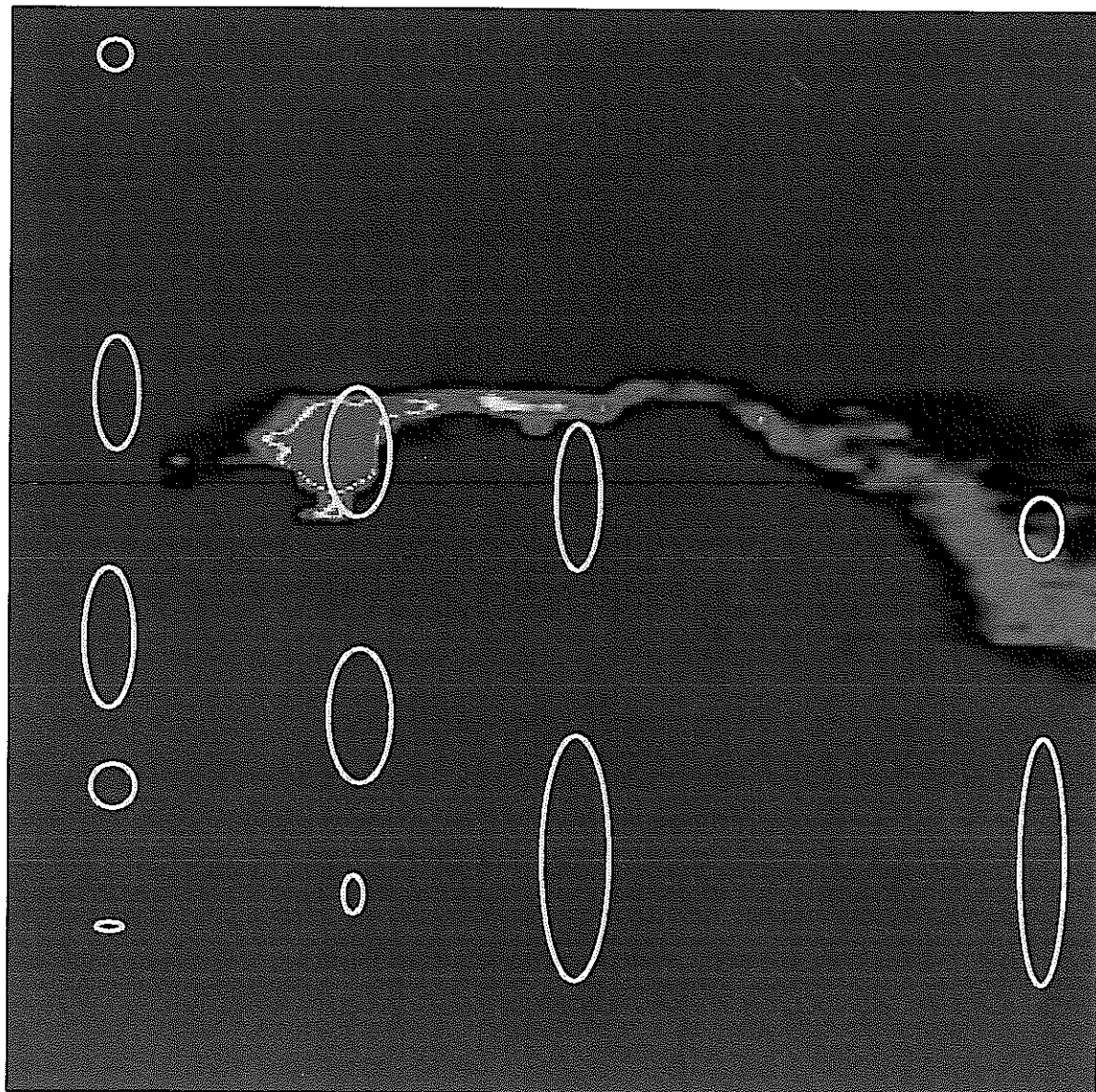


図5.2.2-5 コンボリューション後のパーティクル分布 (1000Rd年後)



* …試錐孔近傍のウラン高濃集部

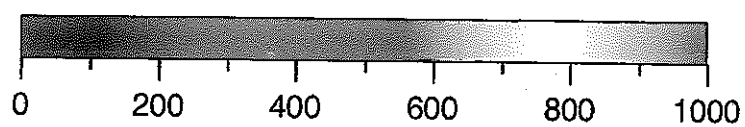
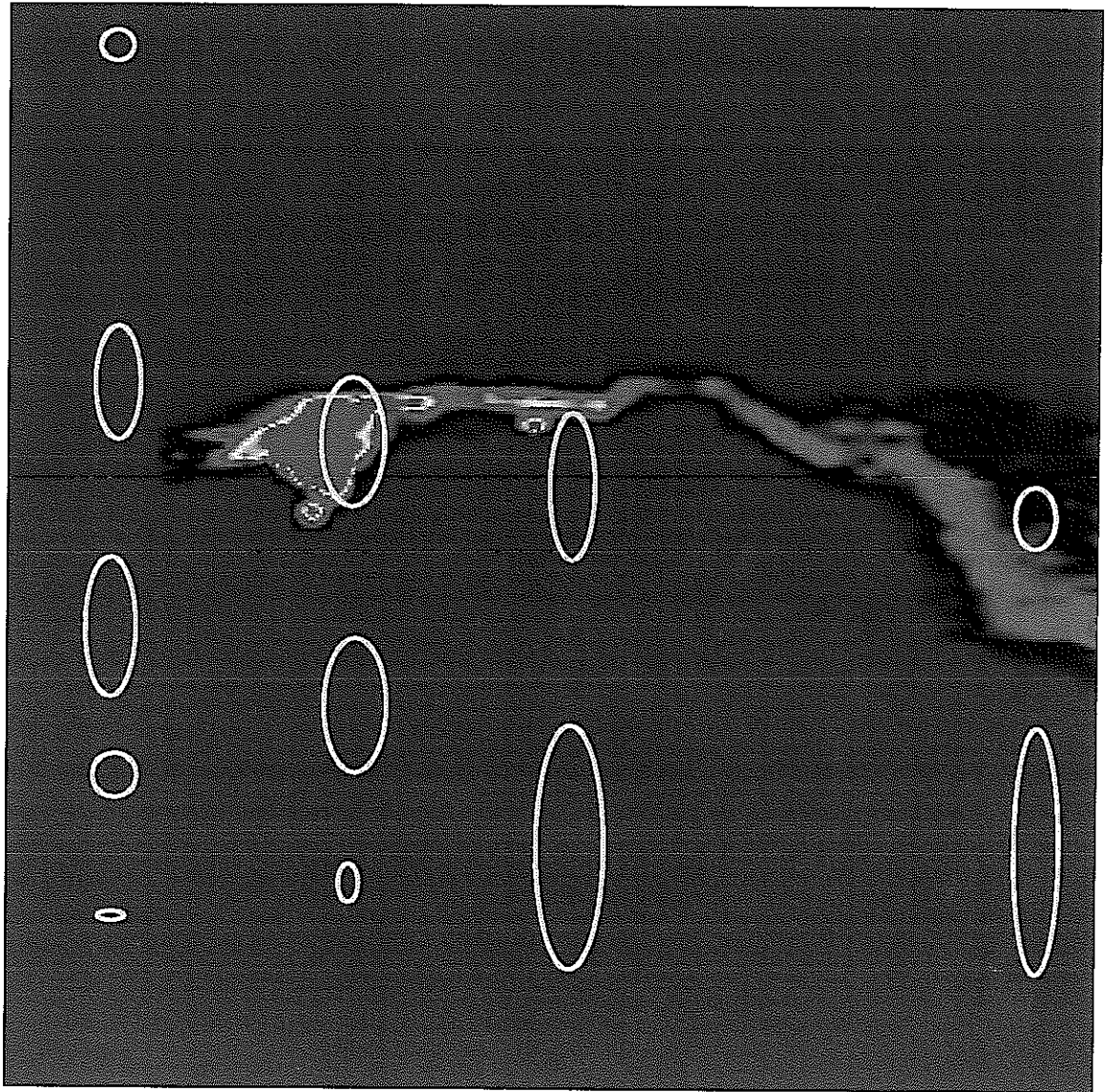


図 5.2.2-6 ウラン浸出開始 0Rd 年後に解析対象領域に供給されたウランの分布



* …試錐孔近傍のウラン高濃集部

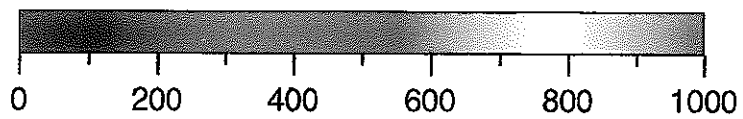
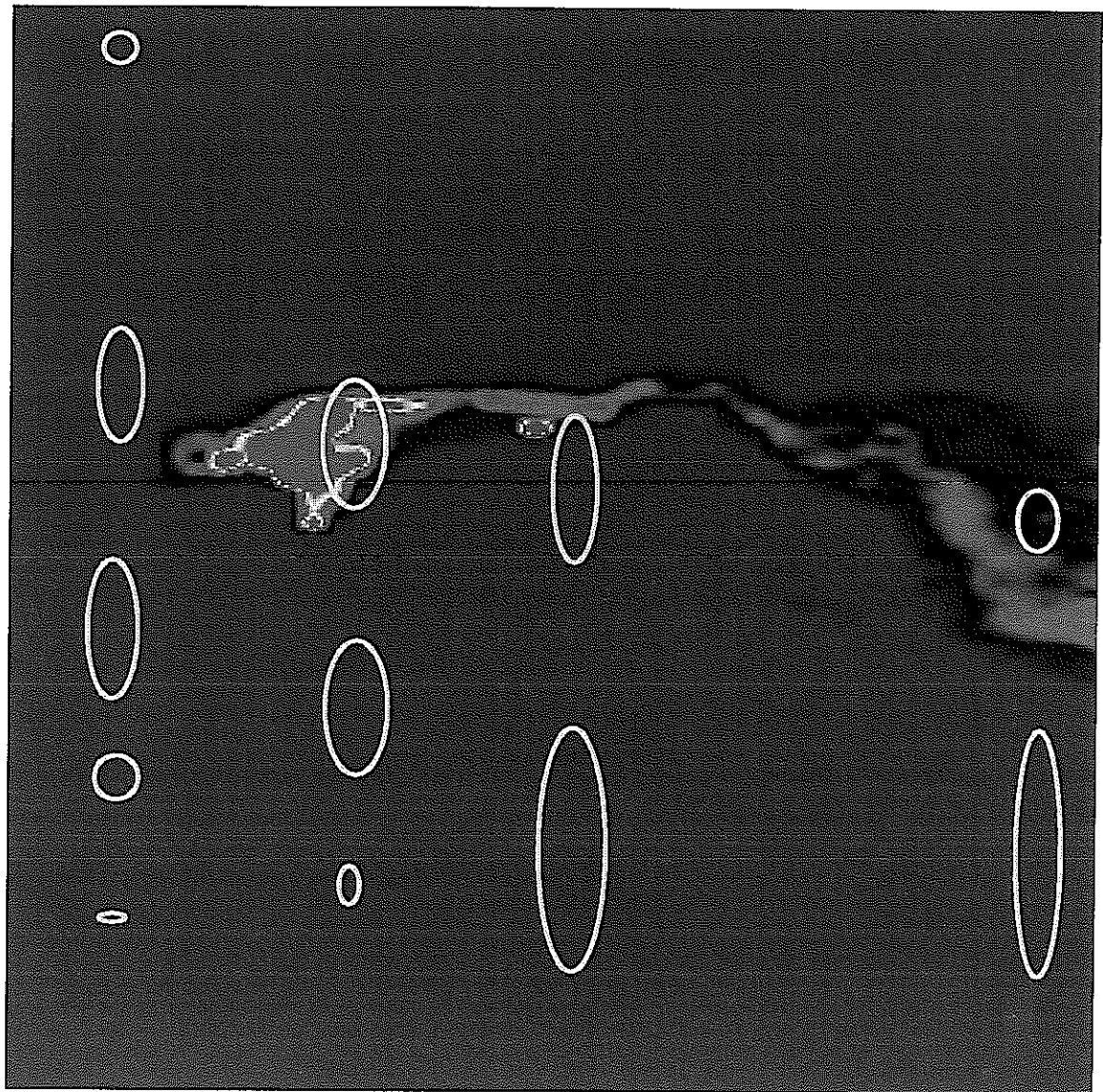


図 5.2.2-6 ウラン浸出開始 100Rd 年後に解析対象領域に供給されたウランの分布



* …試錐孔近傍のウラン高濃集部

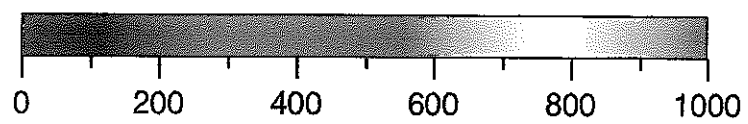
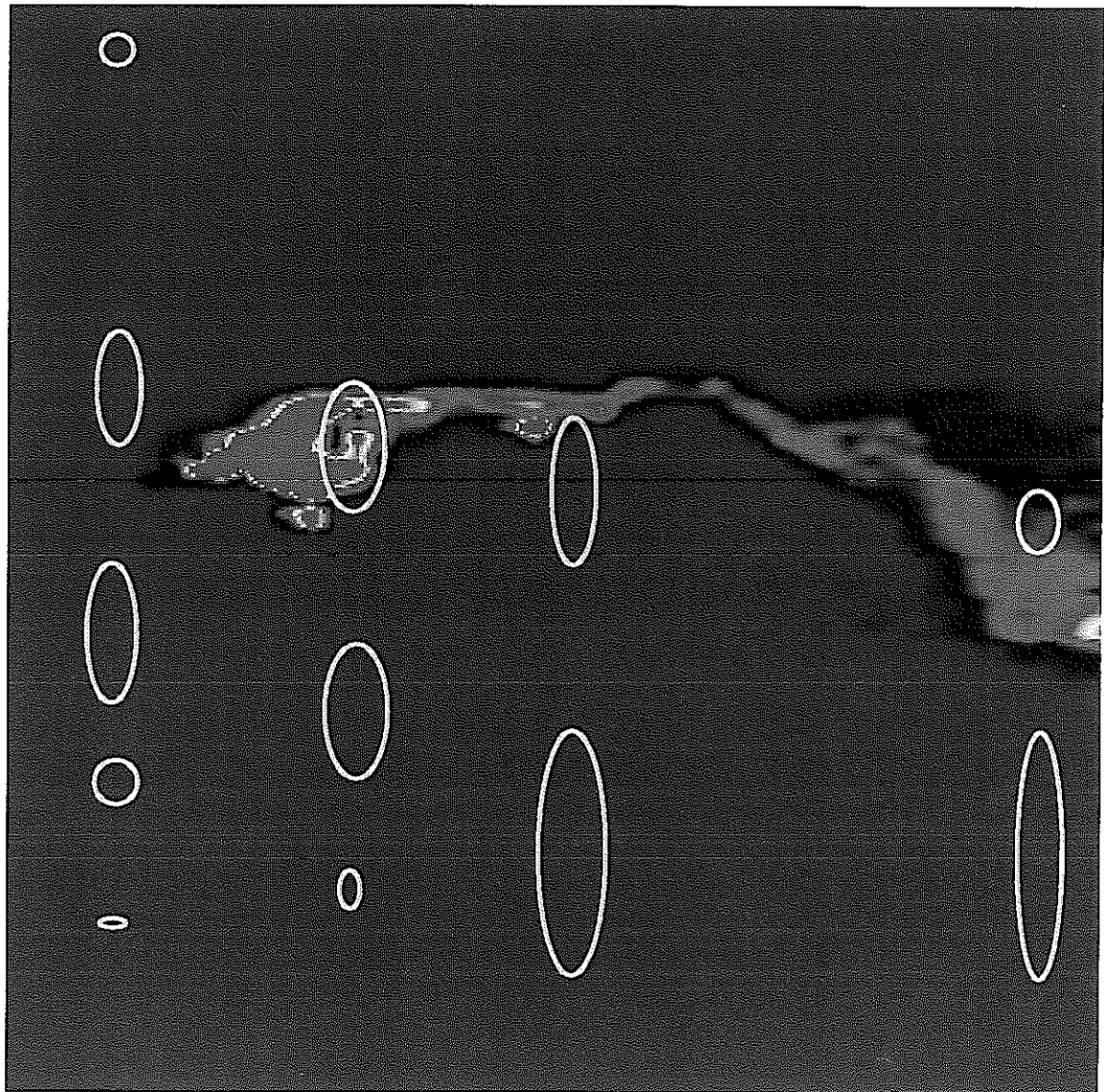


図 5.2.2-6 ウラン浸出開始 200Rd 年後に解析対象領域に供給されたウランの分布



* …試錐孔近傍のウラン高濃集部

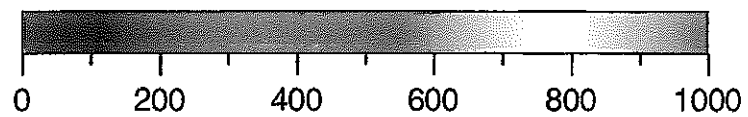
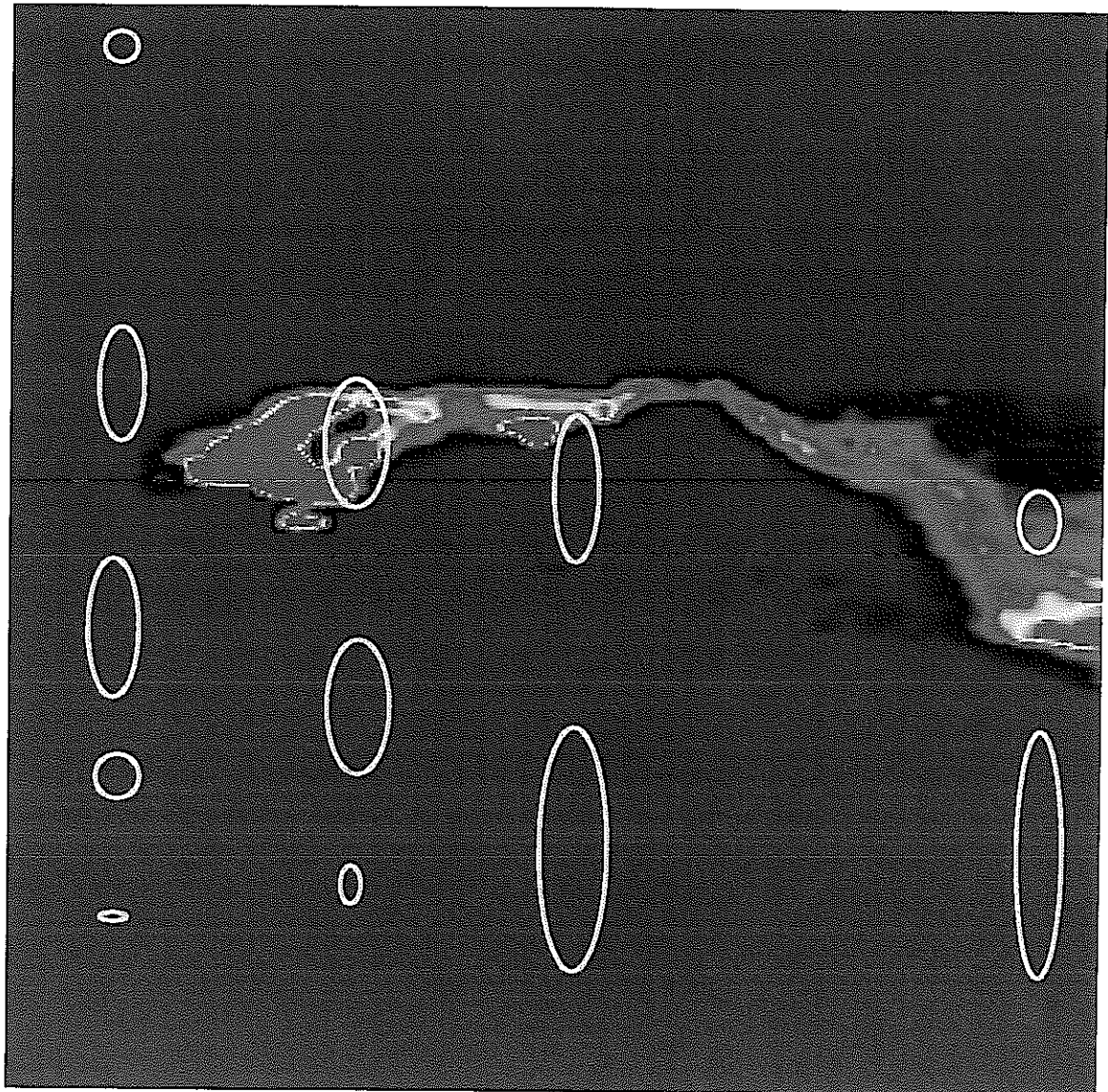


図 5.2.2-6 ウラン浸出開始 300Rd 年後に解析対象領域に供給されたウランの分布



* …試錐孔近傍のウラン高濃集部

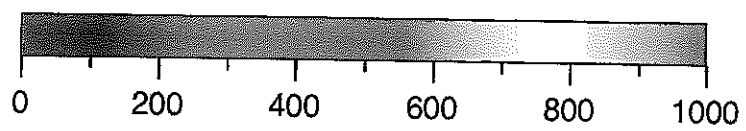
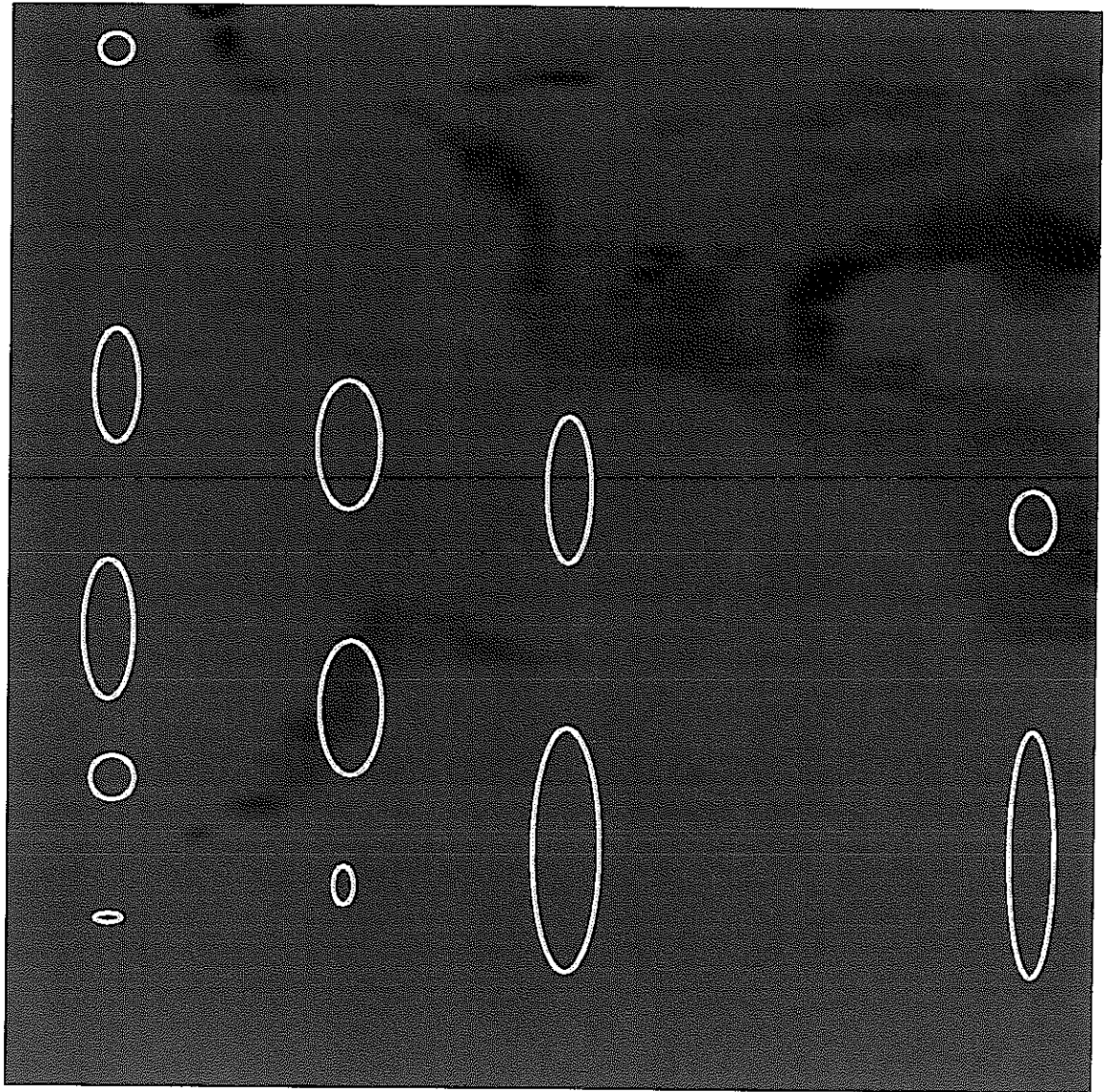


図 5.2.2-6 ウラン浸出開始 400Rd 年後に解析対象領域に供給されたウランの分布



* ...試錐孔近傍のウラン高濃集部

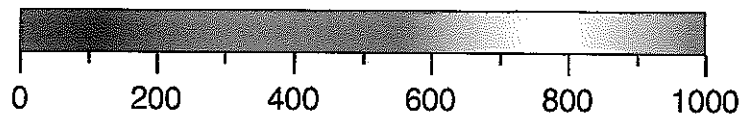
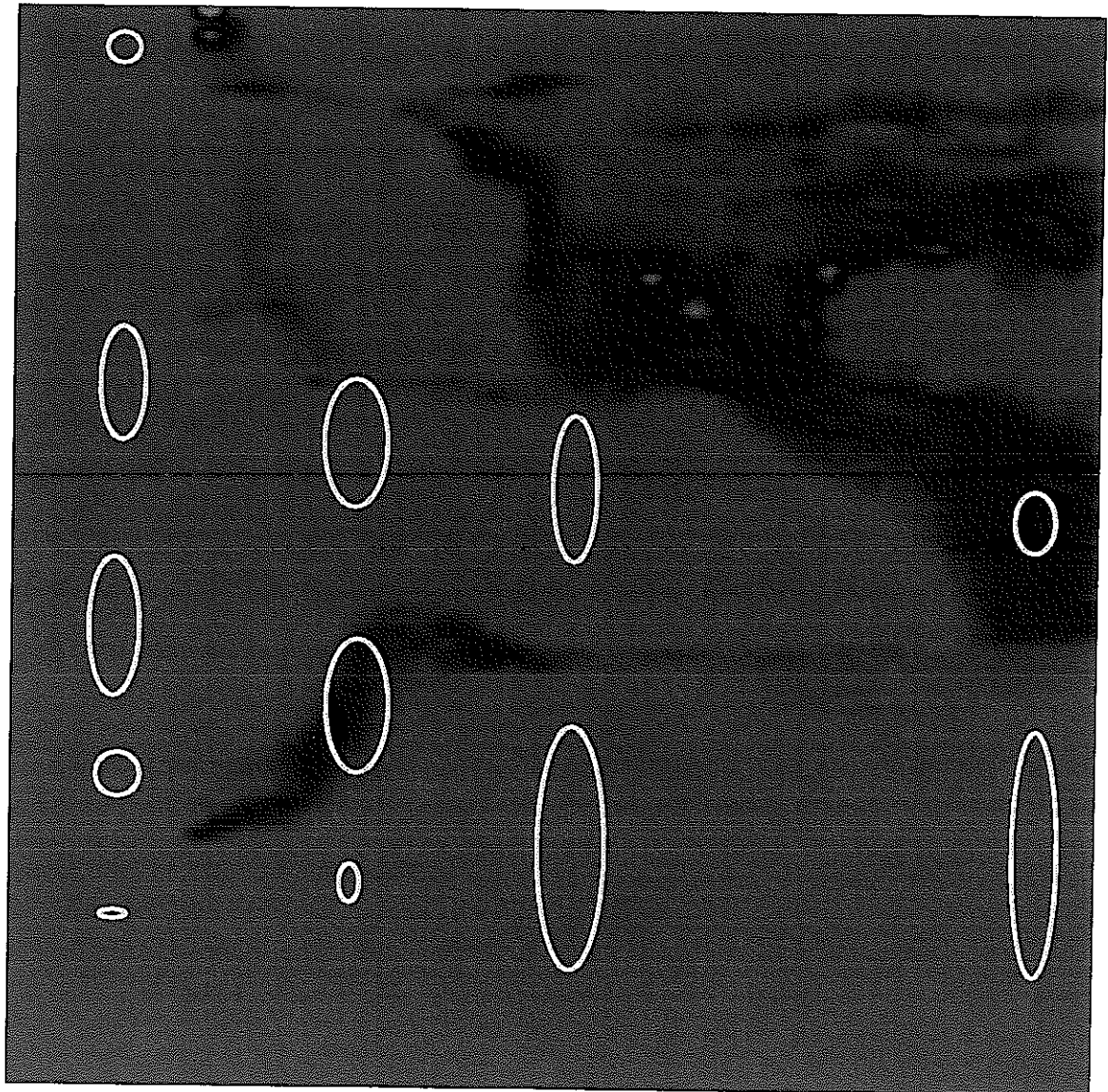


図 5.2.2-6 ウラン浸出開始 500Rd 年後に解析対象領域に供給されたウランの分布



* …試錐孔近傍のウラン高濃集部

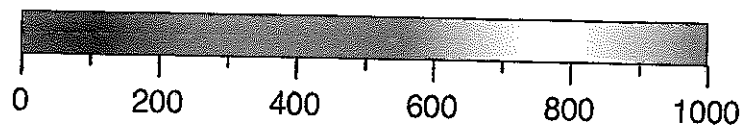
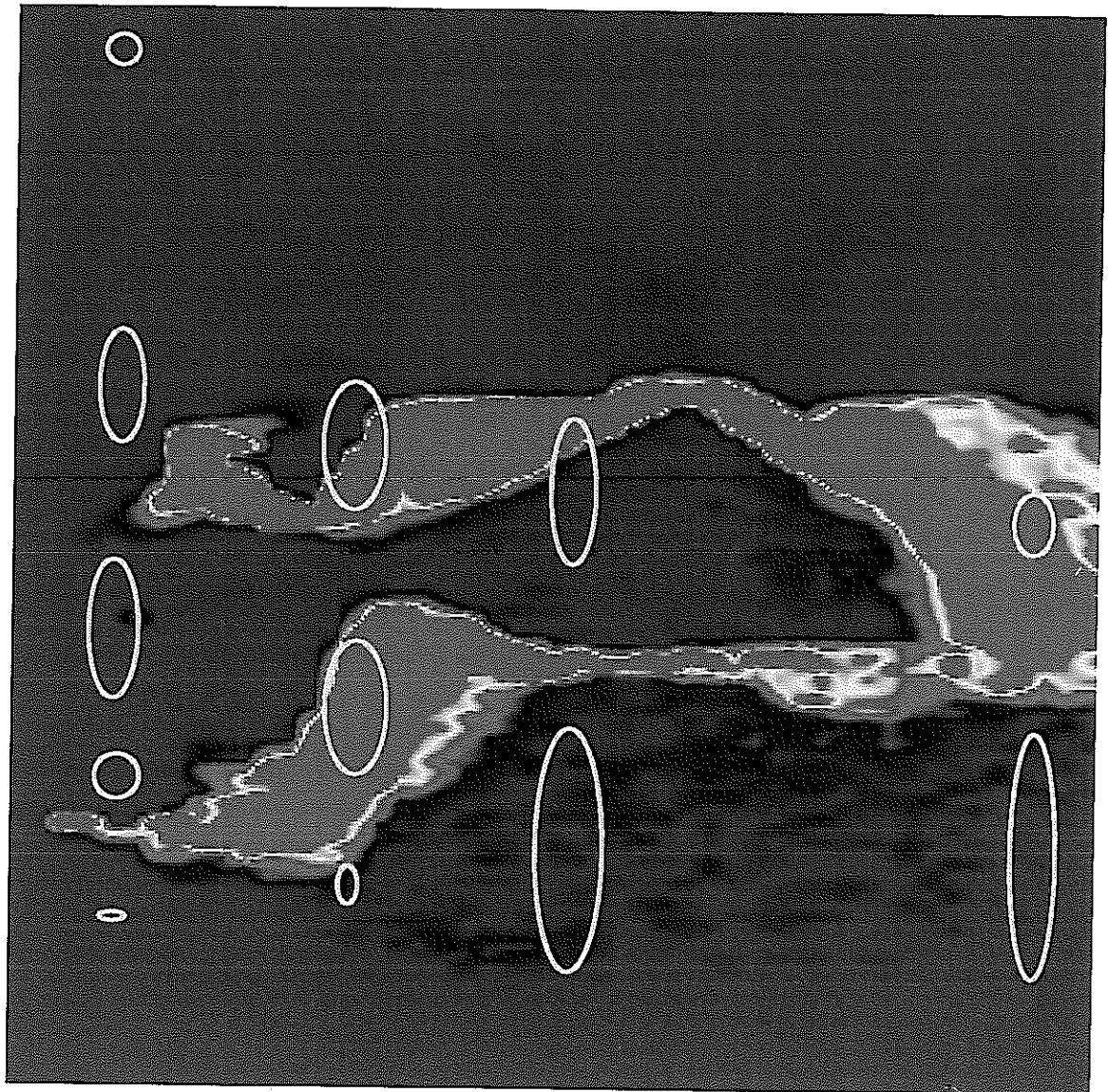


図 5.2.2-6 ウラン浸出開始 600Rd 年後に解析対象領域に供給されたウランの分布



* …試錐孔近傍のウラン高濃集部

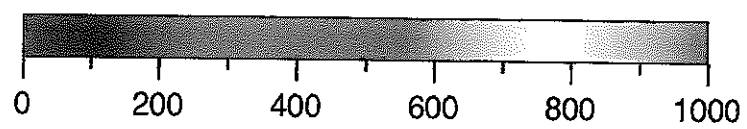
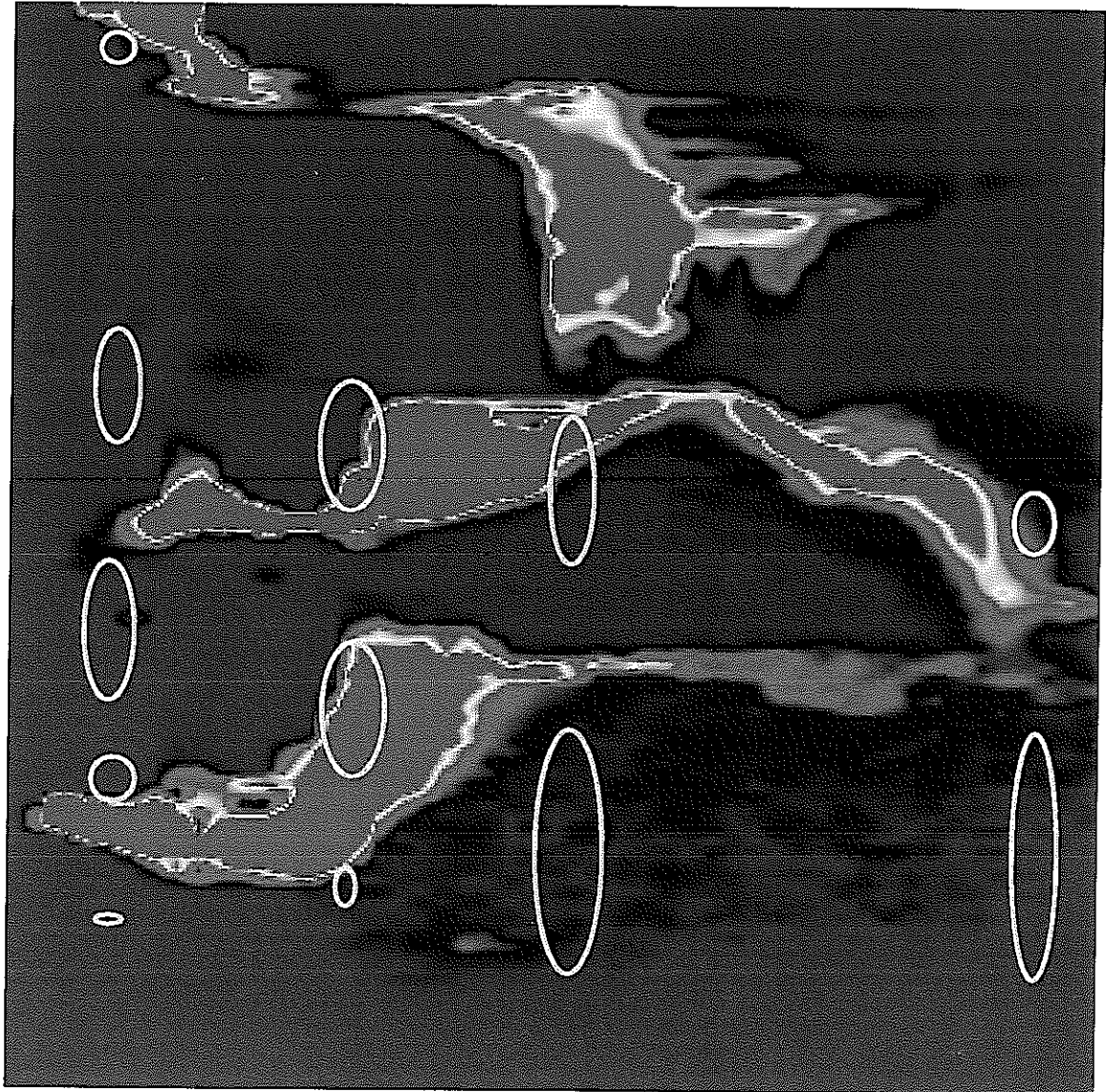


図 5.2.2-6 ウラン浸出開始 700Rd 年後に解析対象領域に供給されたウランの分布



* …試錐孔近傍のウラン高濃集部

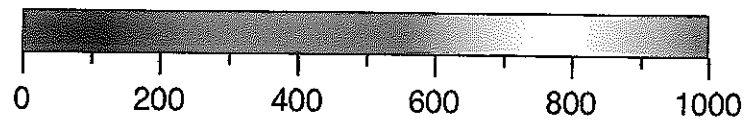
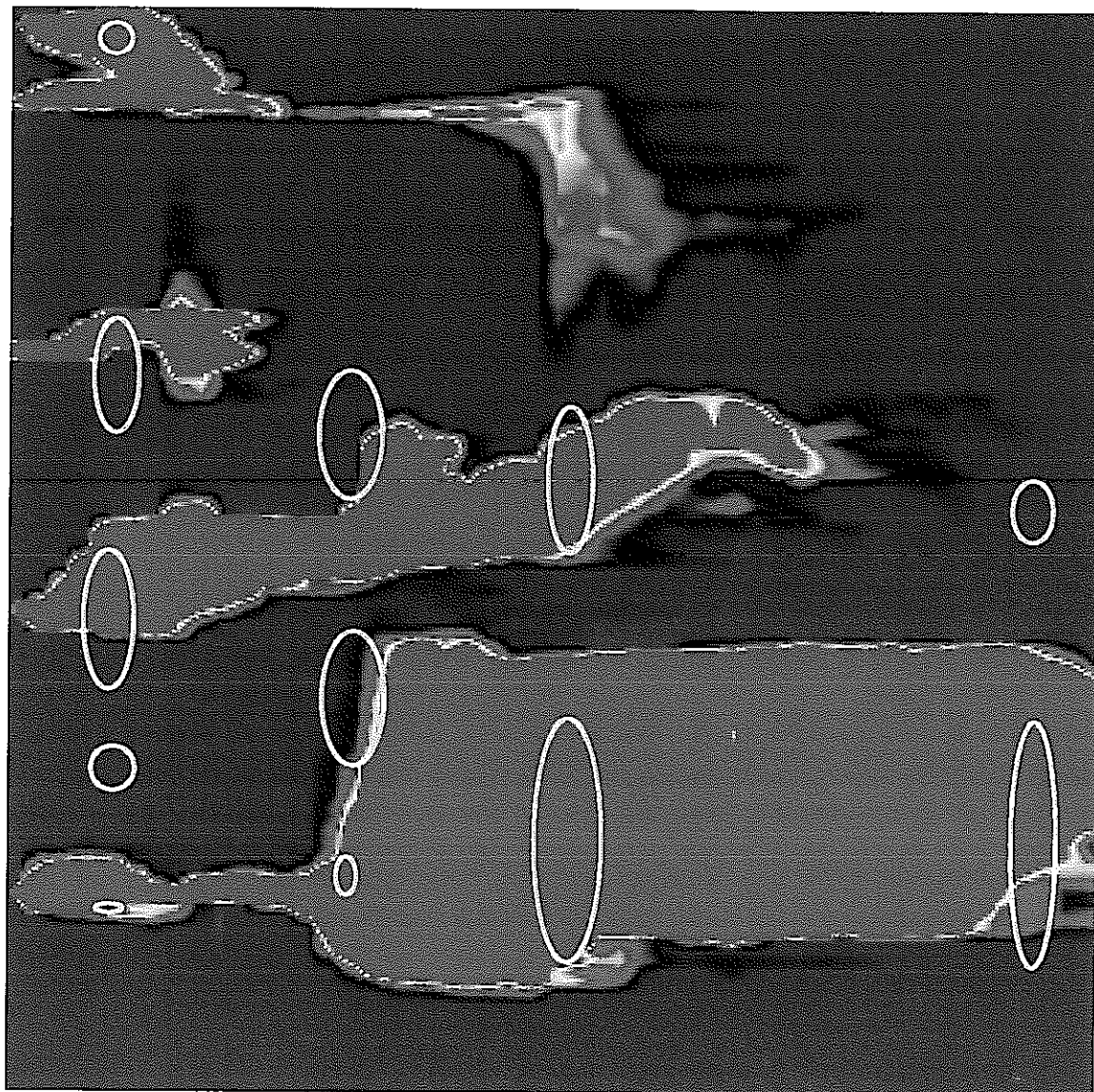


図 5.2.2-6 ウラン浸出開始 800Rd 年後に解析対象領域に供給されたウランの分布



* …試錐孔近傍のウラン高濃集部

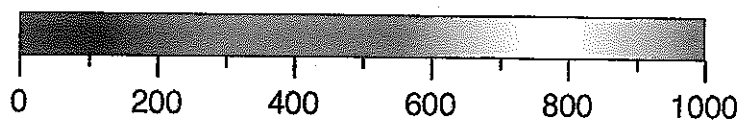


図 5.2.2-6 ウラン浸出開始 900Rd 年後に解析対象領域に供給されたウランの分布

6. 小領域についての追加解析

6.1 フラクタルデコンボリューション

既に述べた様に、試錐孔に沿った電気検層による見かけ比抵抗値の測定は、電極間隔1mを10cmずつずらした、言わばmoving window average に対応したデータである。そして、この様なデータからより細かなresolution の不均質分布を推定する問題は一意の解を持たない。そこで、本業務では、フラクタルデコンボリューションの方法を用いて10cmグリッドの透水係数分布を統計的に推定することを試みた。

フラクタルデコンボリューションは、2.に述べた通常のフラクタル透水係数場の作成と同様にバリオグラムが所定のフラクタル特性を満たす様により細かな不均質性を推定する物である。2.に述べた方法との唯一の相異は、2.に述べた方法ではコンディショニングとして、測定点での透水係数値を固定するのに対して、フラクタルデコンボリューションでは、作成されたより細かなフラクタル透水係数場に対して1mサイズのmoving window average を採った時に、上述した10cmずつずれる電極間隔1mの見かけ比抵抗測定値が得られる様に特殊なコンディショニングを行うことにある。このコンディショニングの概念を図6.1-1に示す。

本業務では、このフラクタルデコンボリューションの方法を用いて、5.の解析対象とした領域に含まれる小領域についてのより詳しい解析を行った。対象とする小領域としては、TH-1~4孔それぞれのウラン高濃集部を含む10m x 10mの正方形を選定した。小領域の配置を図6.1-2に示す。

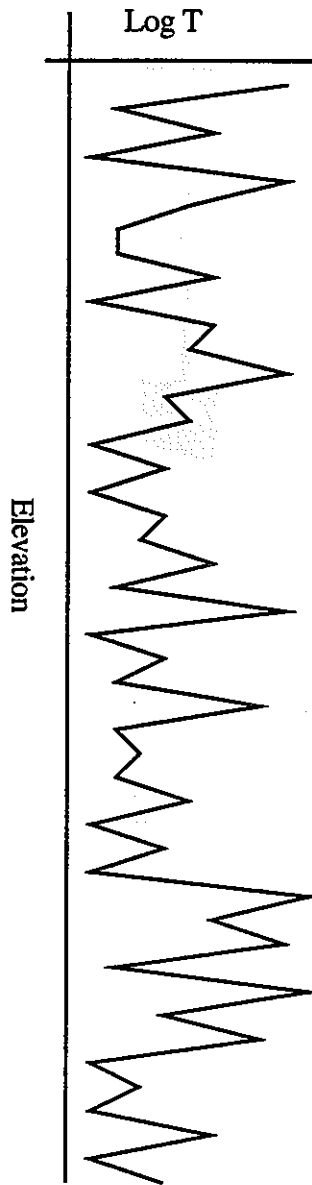
また、フラクタルデコンボリューションの実施に当たっては、鉛直及び水平方向のフラクタル次元を指定する必要がある。鉛直方向についての最も自然な指定は、小領域のフラクタル次元が試錐孔全体について求められたフラクタル次元(4.参照)と等しいものと仮定することである。また、水平方向については、データ不足のためにバリオグラムの作成が困難であることから5.の結果を踏まえ1.5と仮定することとする。具体的には、表6.1-1に示す鉛直・水平方向のフラクタル次元を組み合わせることで4つの小領域についてフラクタル透水係数場を作成することとした。

フラクタルデコンボリューションの結果得られた小領域のフラクタル透水係数場を、図

6.1-3に示す。

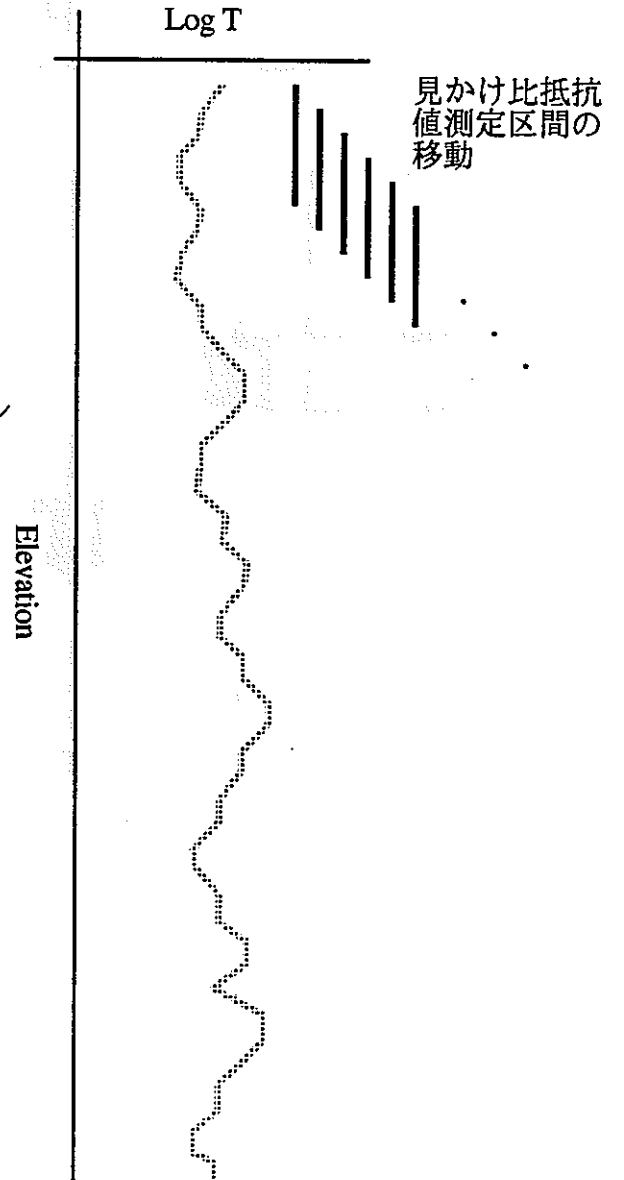
A

詳細なフラクタル
透水係数場



B

Aのmoving window average
= 見かけ比抵抗測定値



フラクタル
デコンポリューション

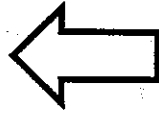


図6.1-1 フラクタルデコンポリューションの概念

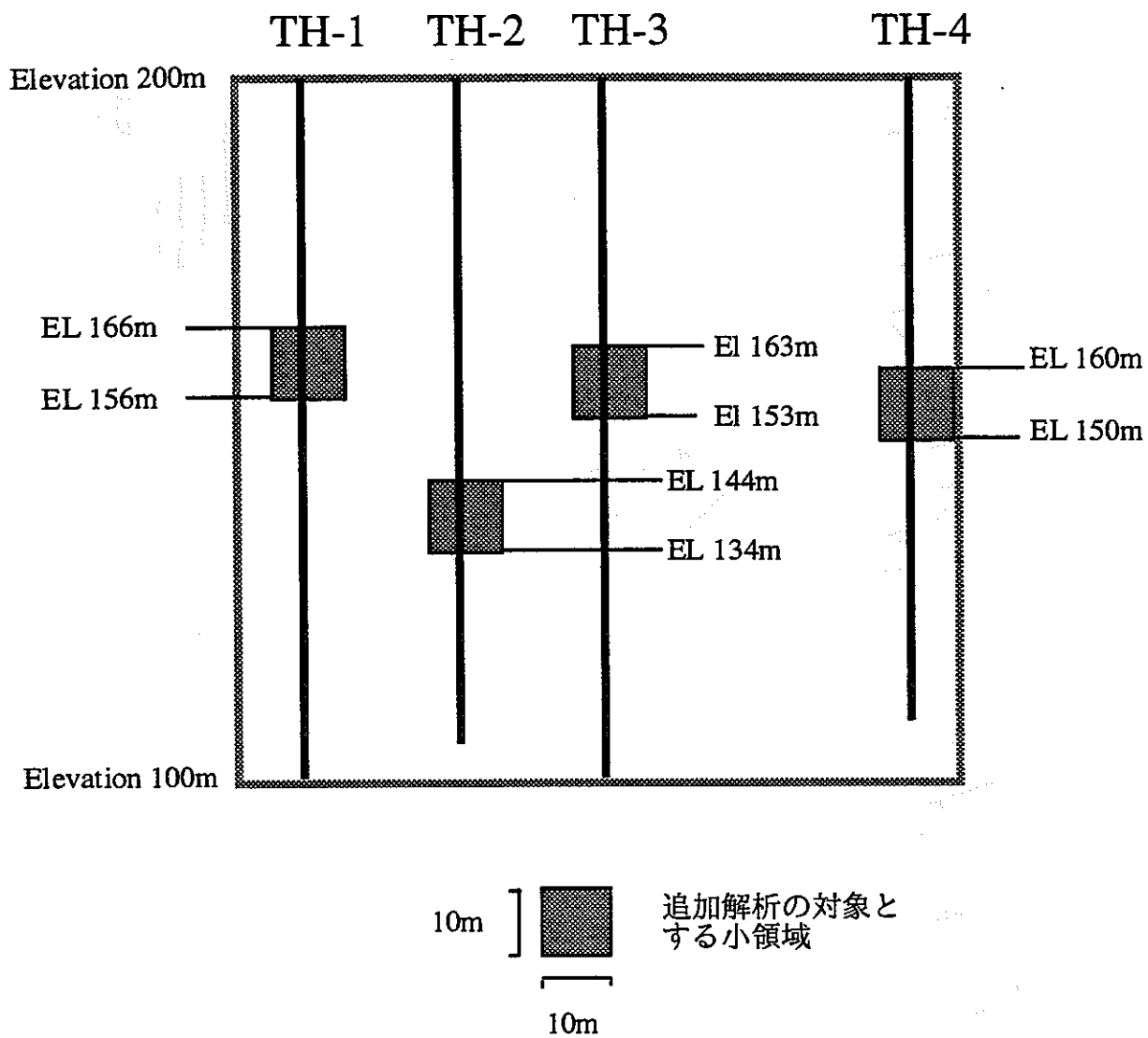


図6.1-2 追加解析の対象とする小領域の配置

表6.1-1 小領域のフラクタル透水係数場作成のためのケース設定

	TH-1	TH-2	TH-3	TH-4
DY	1.7	1.93	1.77	1.6
DX	1.5	1.5	1.5	1.5

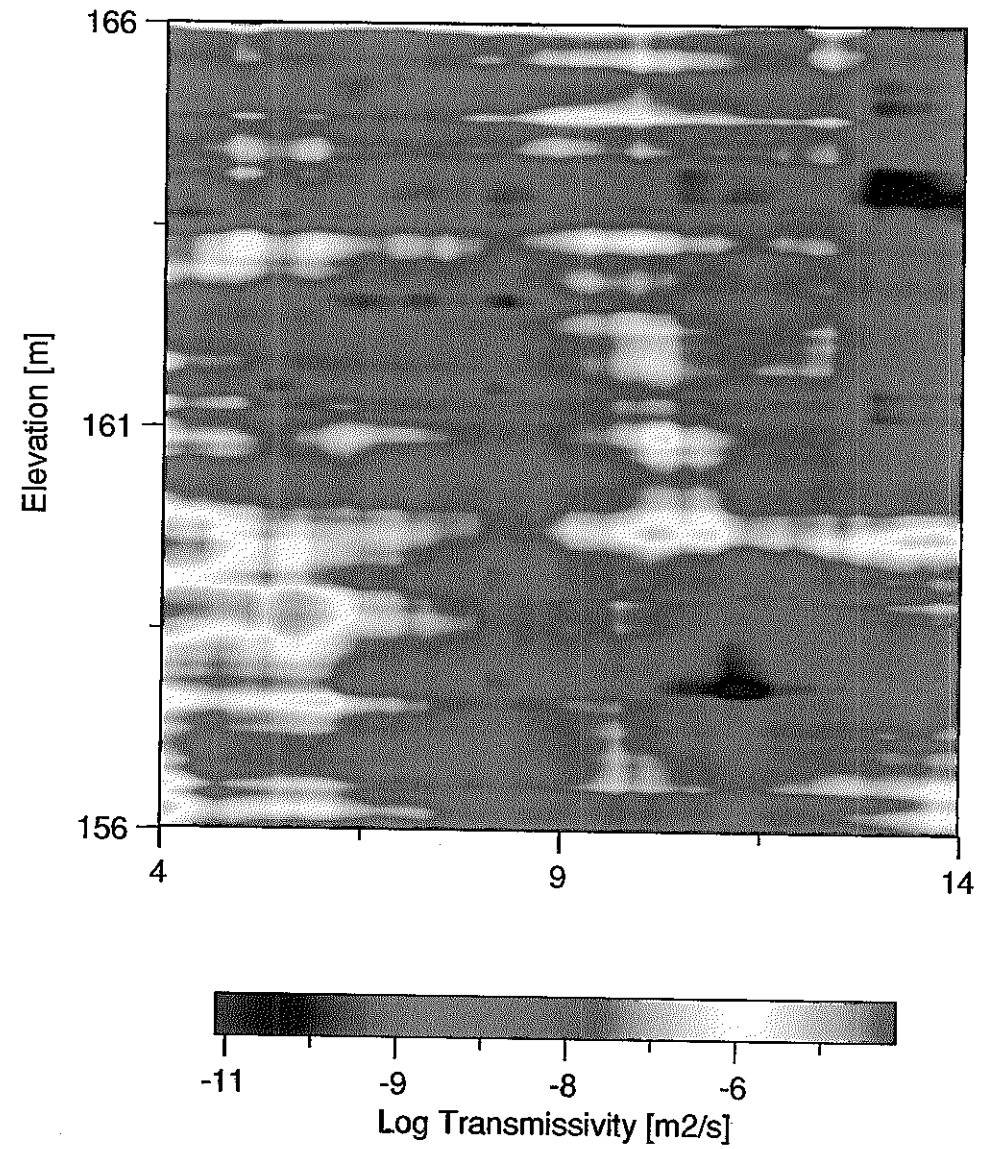


図6.1-3 追加解析の対象となる小領域のフラクタル透水係数場 (TH-1孔)

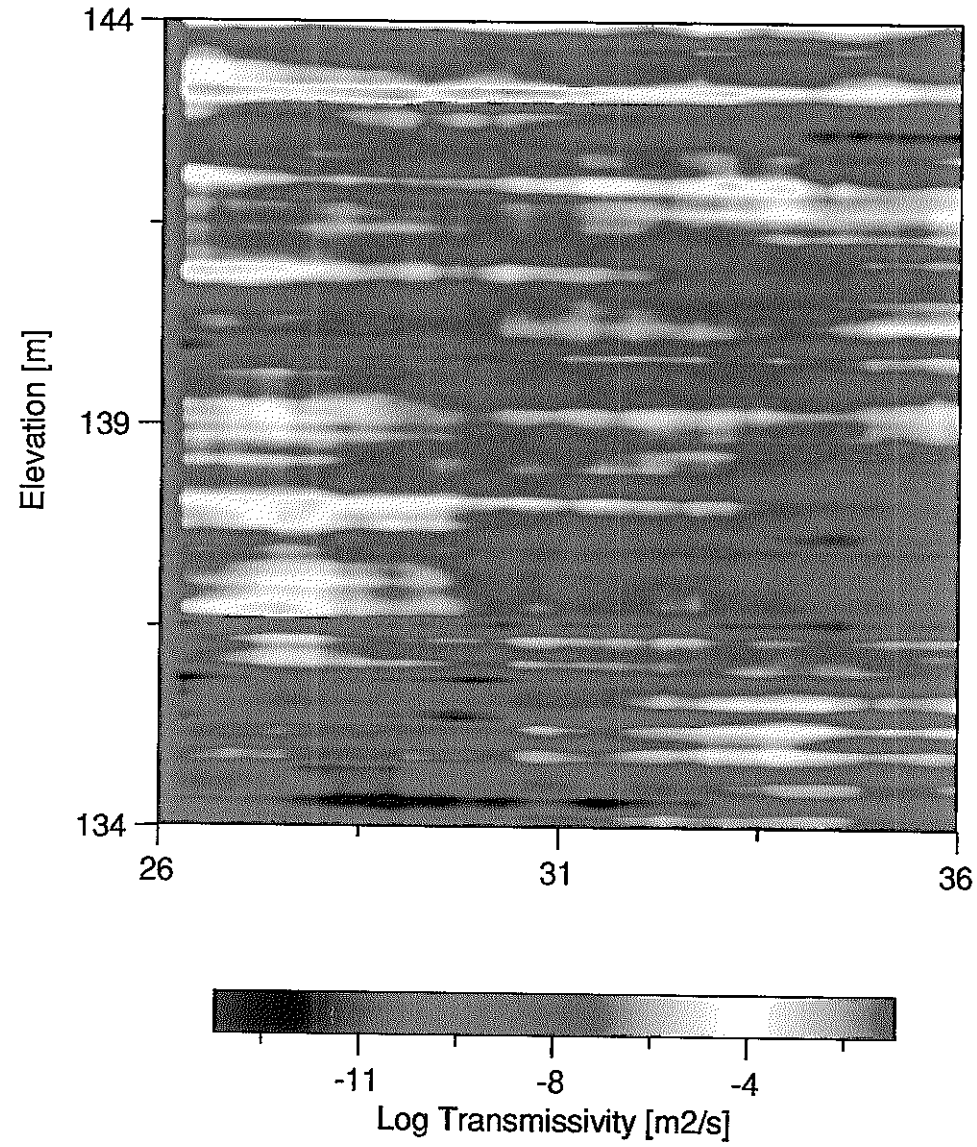


図6.1-3 追加解析の対象となる小領域のフラクタル透水係数場 (TH-2孔)

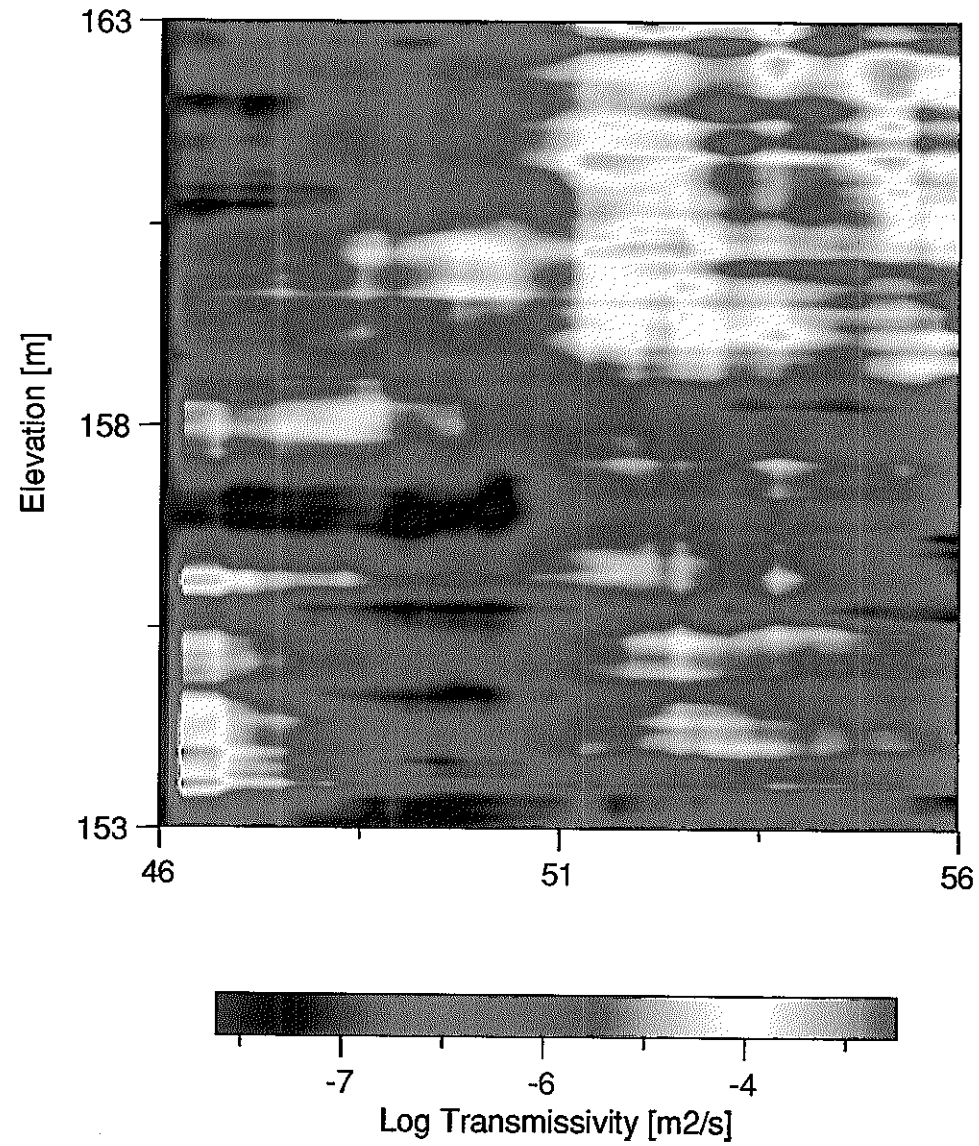


図6.1-3 追加解析の対象となる小領域のフラクタル透水係数場 (TH-3孔)

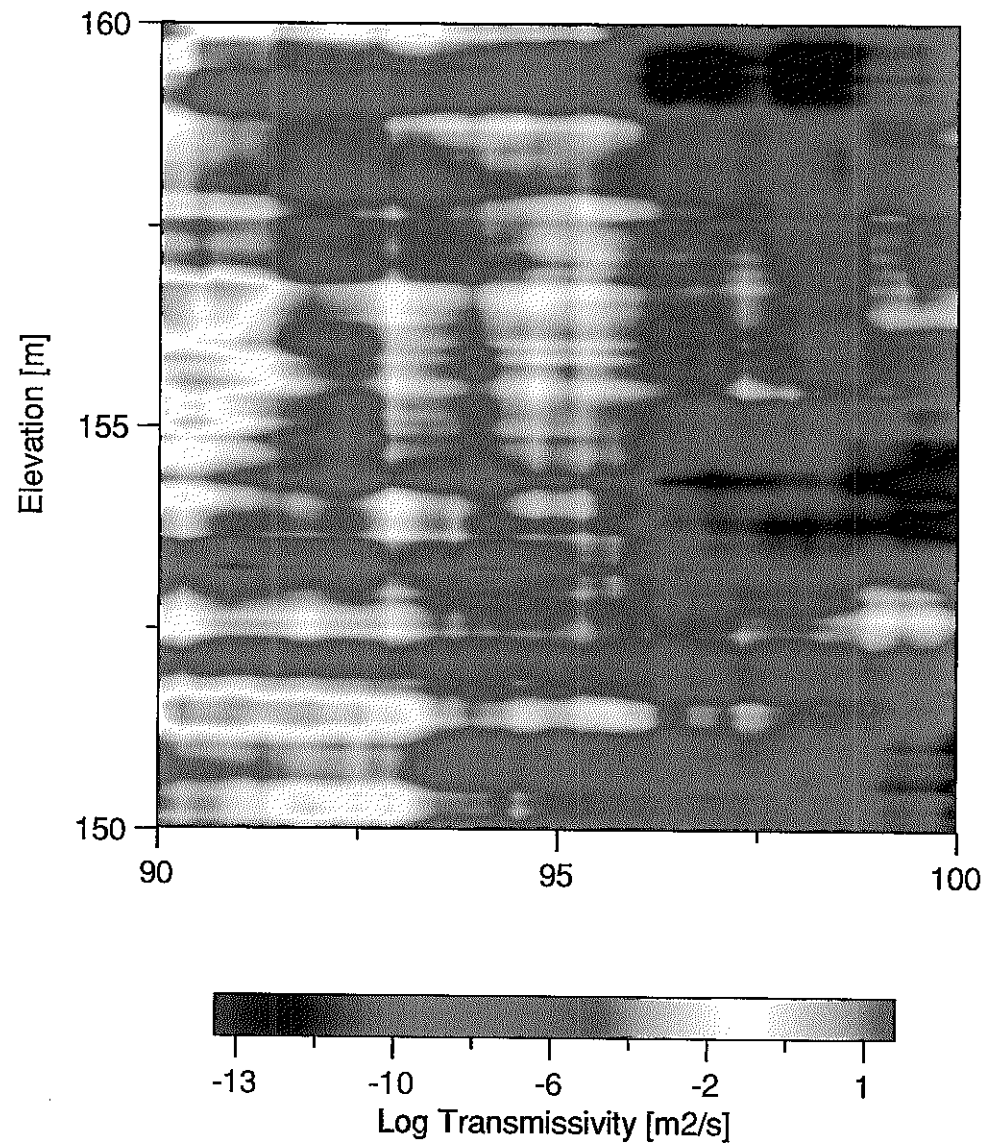


図6.1-3 追加解析の対象となる小領域のフラクタル透水係数場 (TH-4孔)

6.2 小領域についての水理解析

5.に述べた水理解析と同様、左から右への水平な流れ（動水勾配=0.1）を与えて各試験孔の貫く小領域について水理解析を行った。

解析結果を図6.2-1（ダルシー流速分布）、及び図6.2-2（圧力分布）に示す。流速分布からは、この小さなスケールにおいても、解析領域全体に見られたチャンネル構造が自己相似的に繰り込まれていることがわかる。

また、各小領域において、チャンネル上流側からパーティクルを注入した場合のパーティクルトラッキングの結果（100Rd年後）を、図6.2-3に示す。ここでも、解析領域全体にみられたものと自己相似的な層構造の分布が顕著に現れている。

以上の結果から得られた、全体の解析結果と小領域についての解析結果の比較図を図6.2-4に示す。

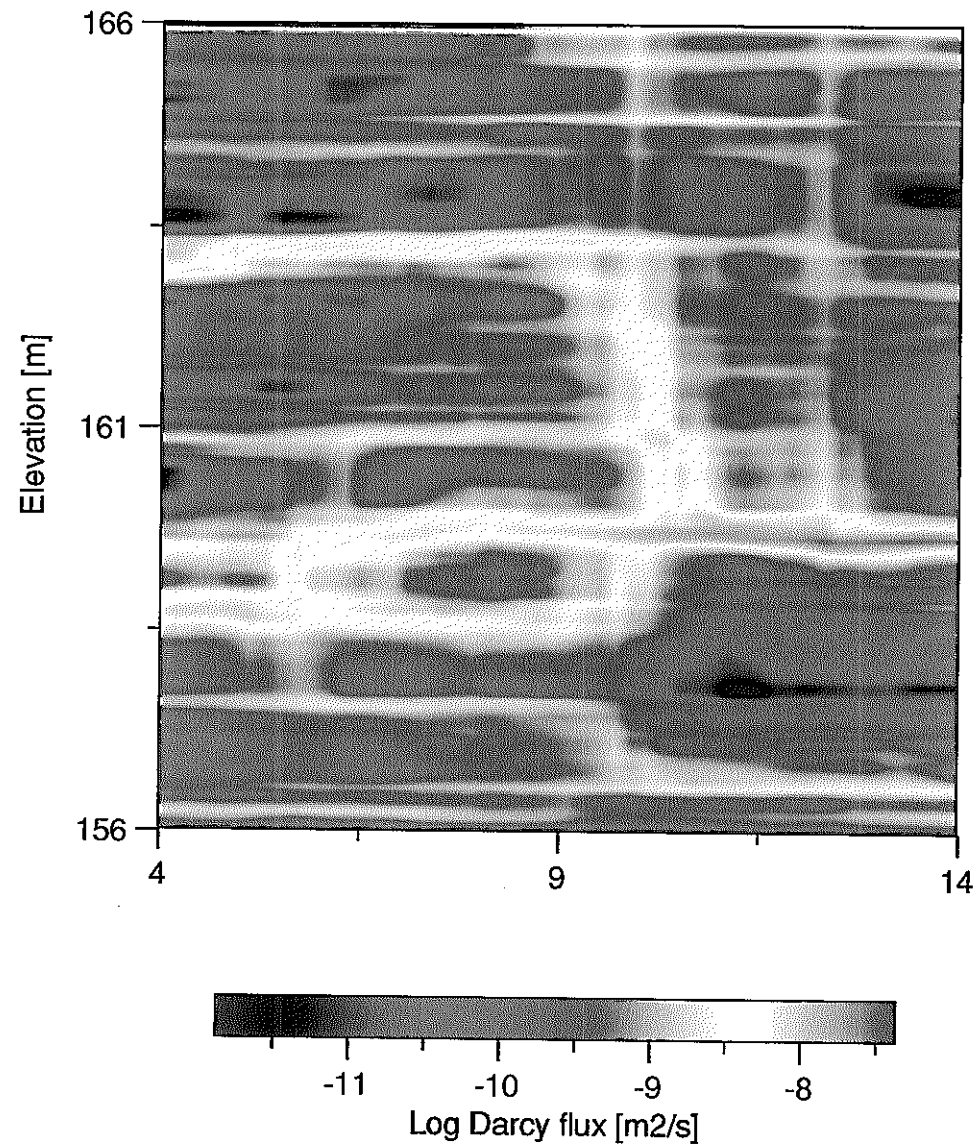


図6.2-1 小領域に対する水理解析の結果（ダルシー流速分布、TH-1孔）

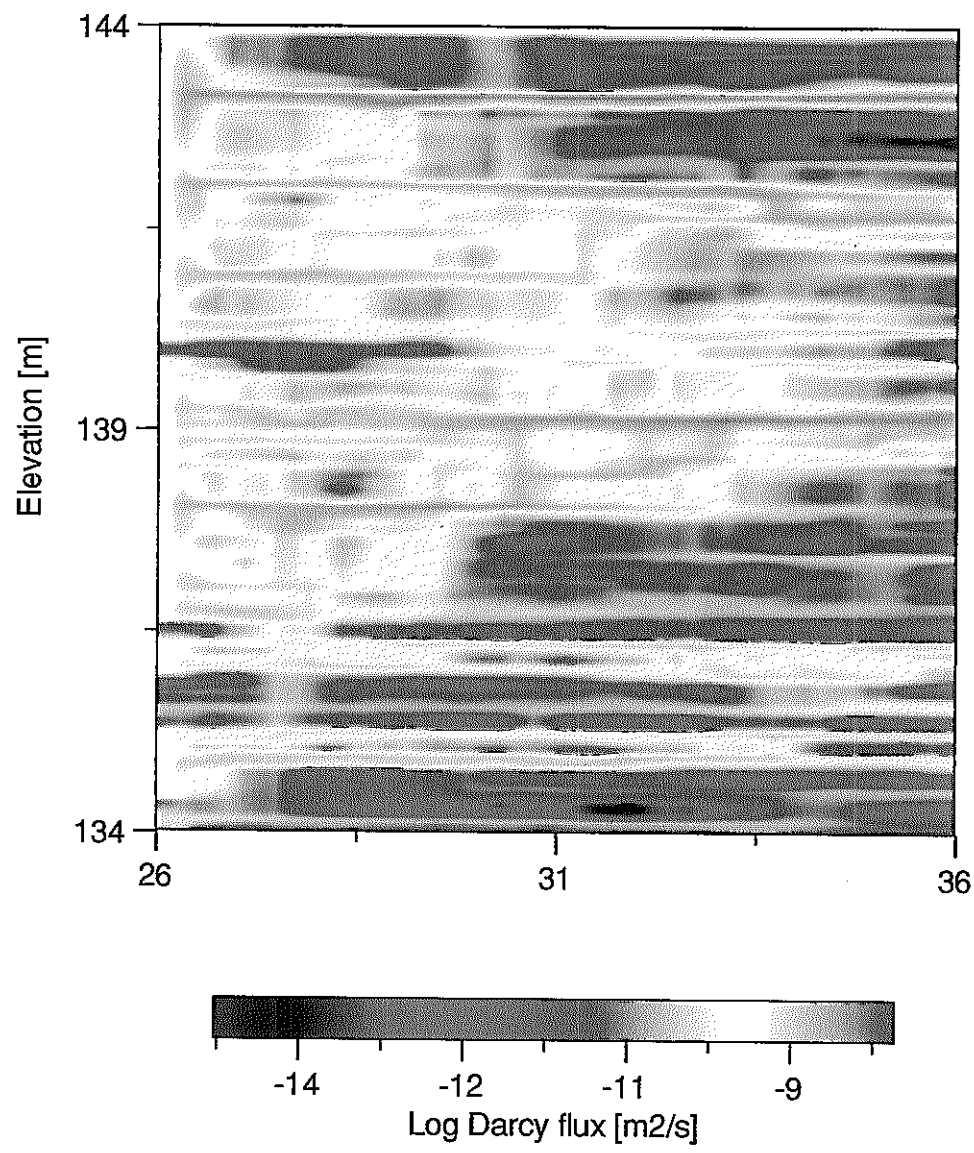


図6.2-1 小領域に対する水理解析の結果（ダルシー流速分布、TH-2孔）

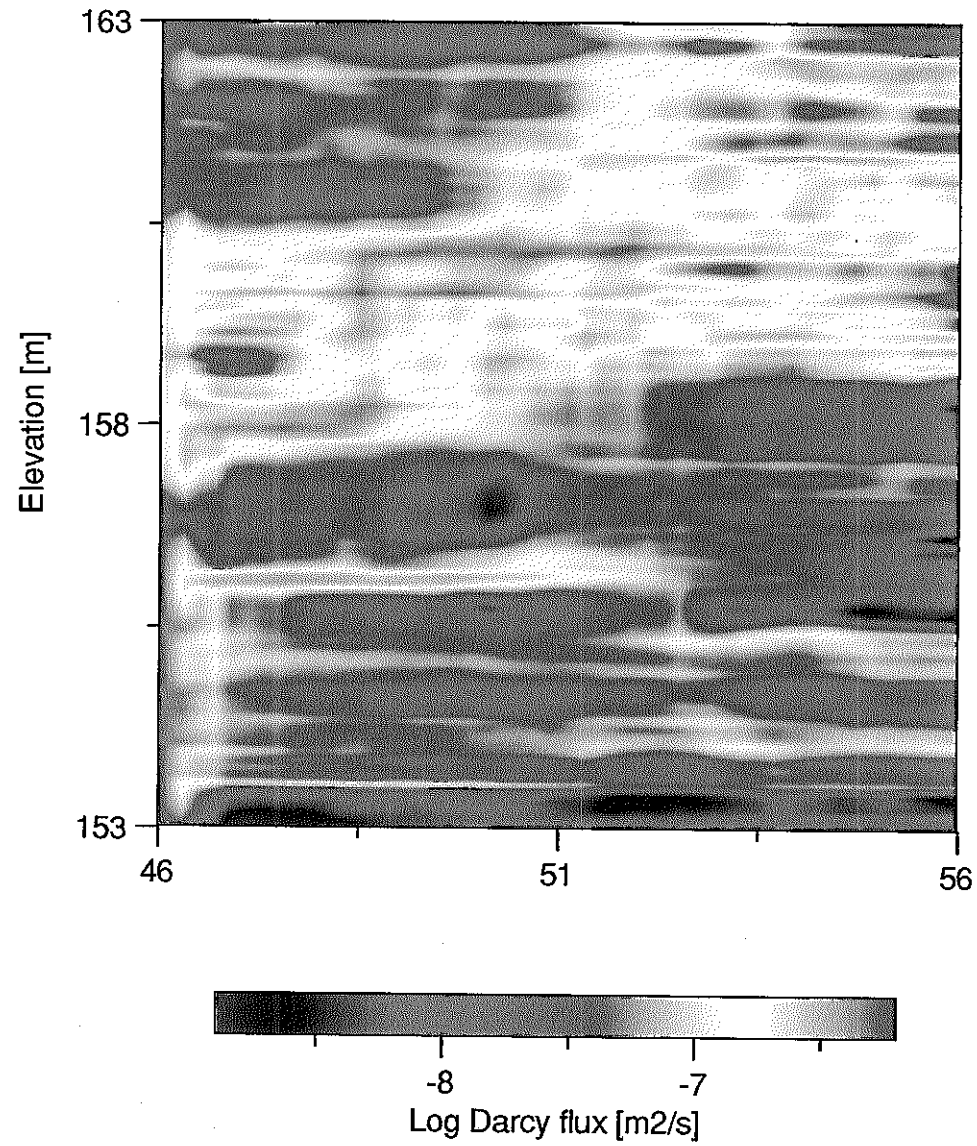


図6.2-1 小領域に対する水理解析の結果（ダルシー流速分布、TH-3孔）

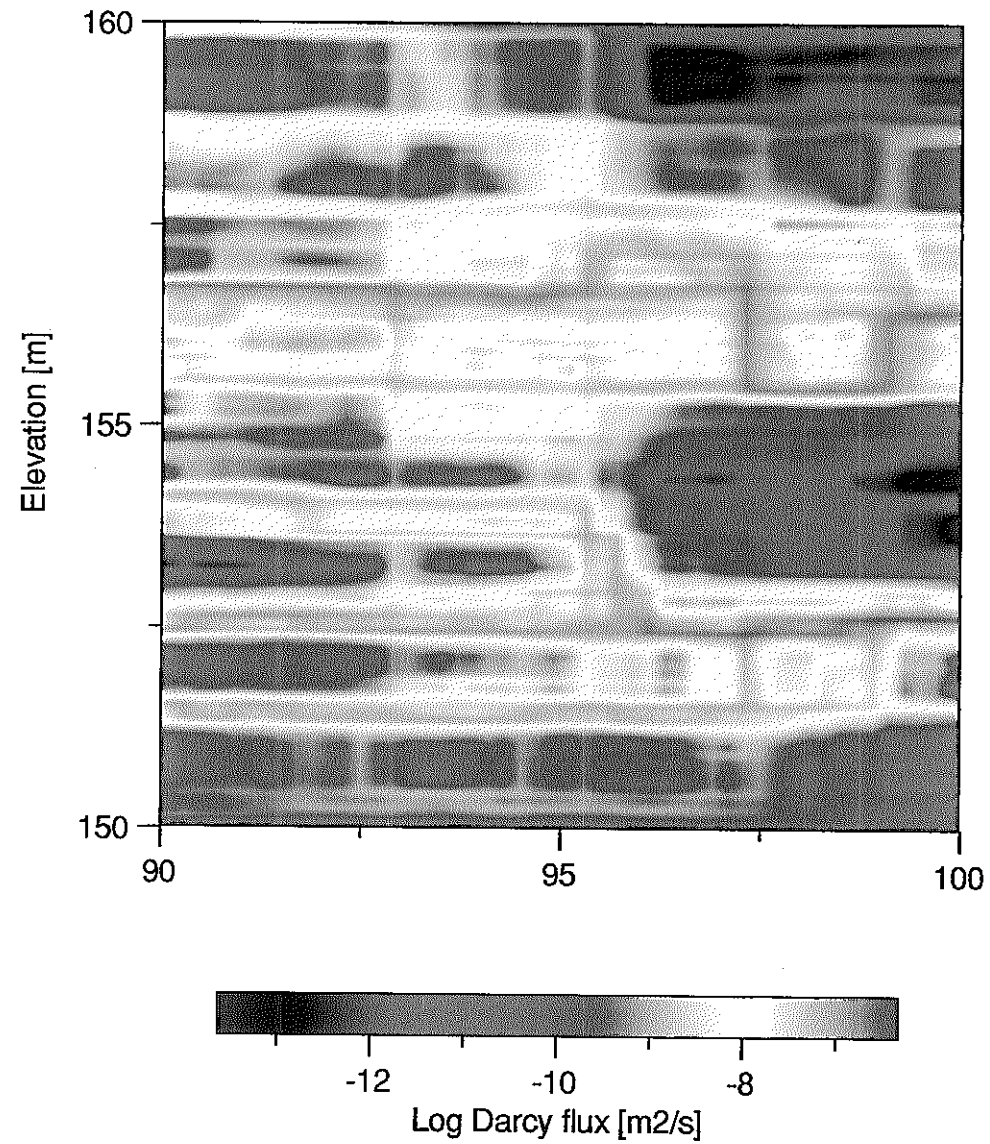


図6.2-1 小領域に対する水理解析の結果（ダルシー流速分布、TH-4孔）

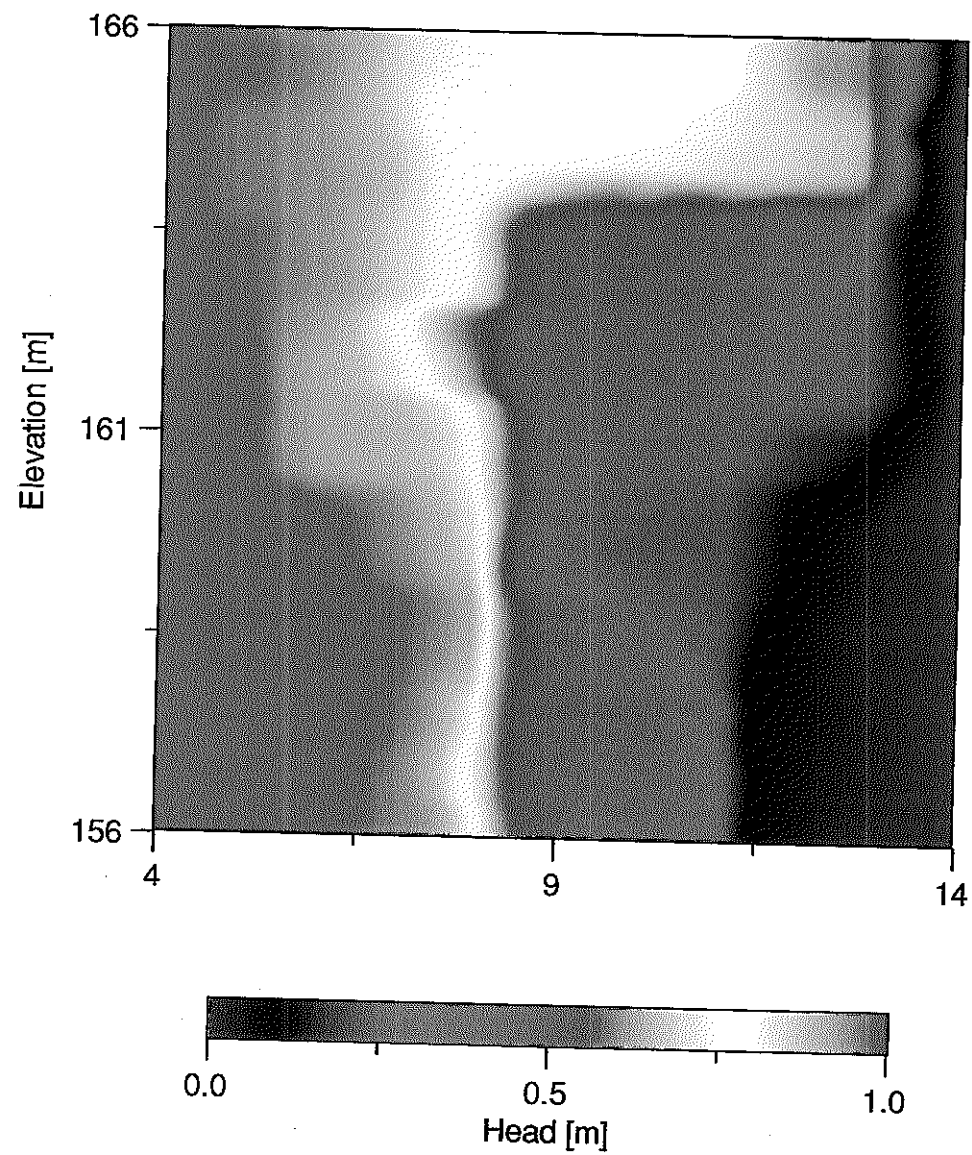


図6.2-2 小領域に対する水理解析の結果 (圧力分布、TH-1孔)

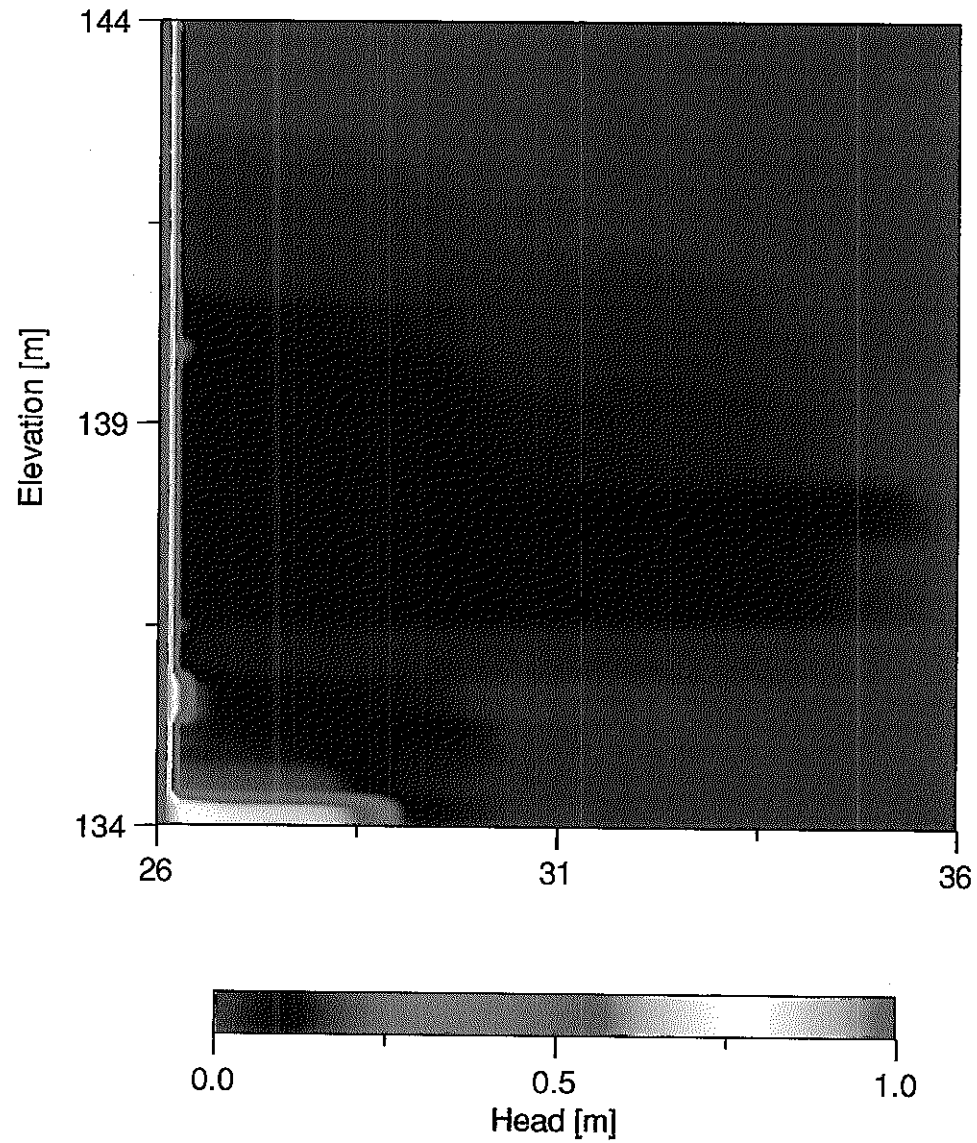


図6.2-2 小領域に対する水理解析の結果（圧力分布、TH-2孔）

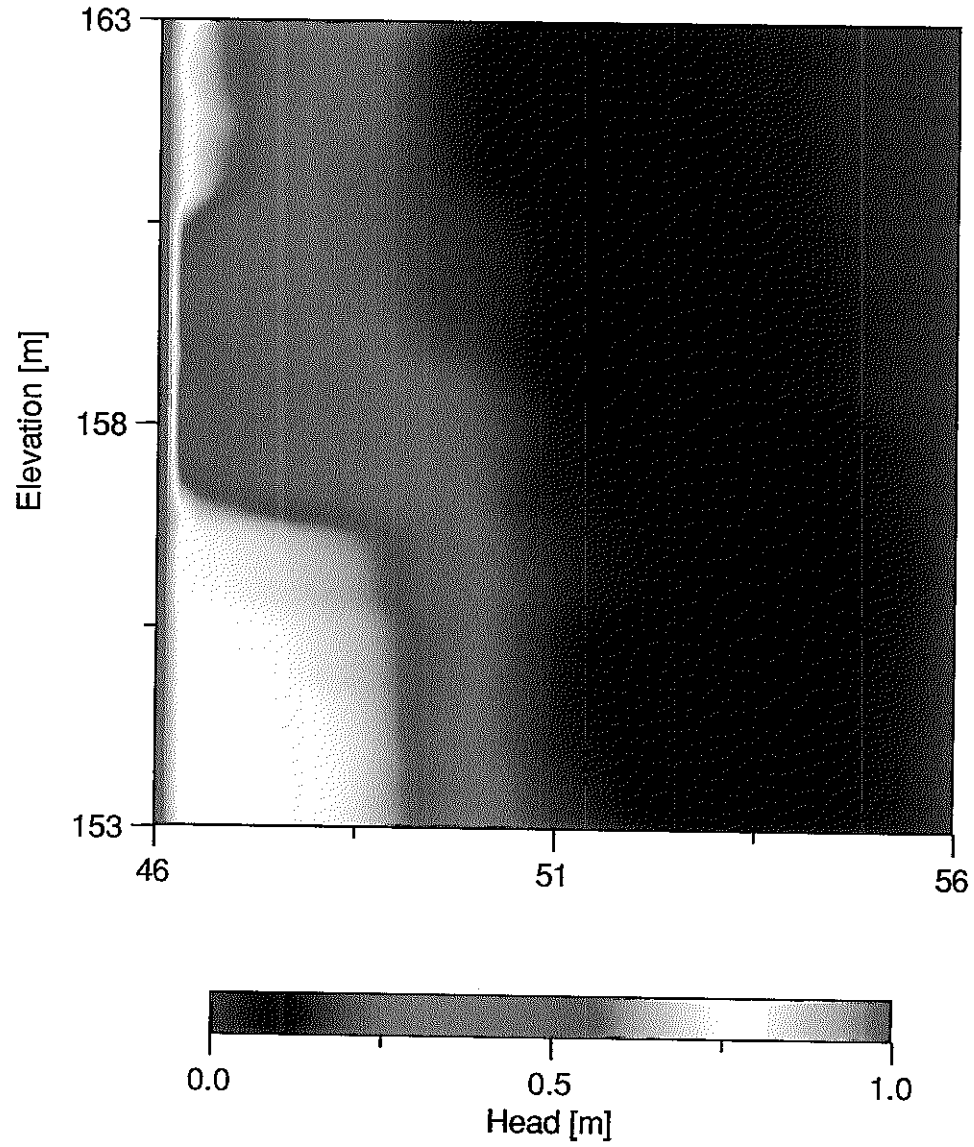


図6.2-2 小領域に対する水理解析の結果（圧力分布、TH-3孔）

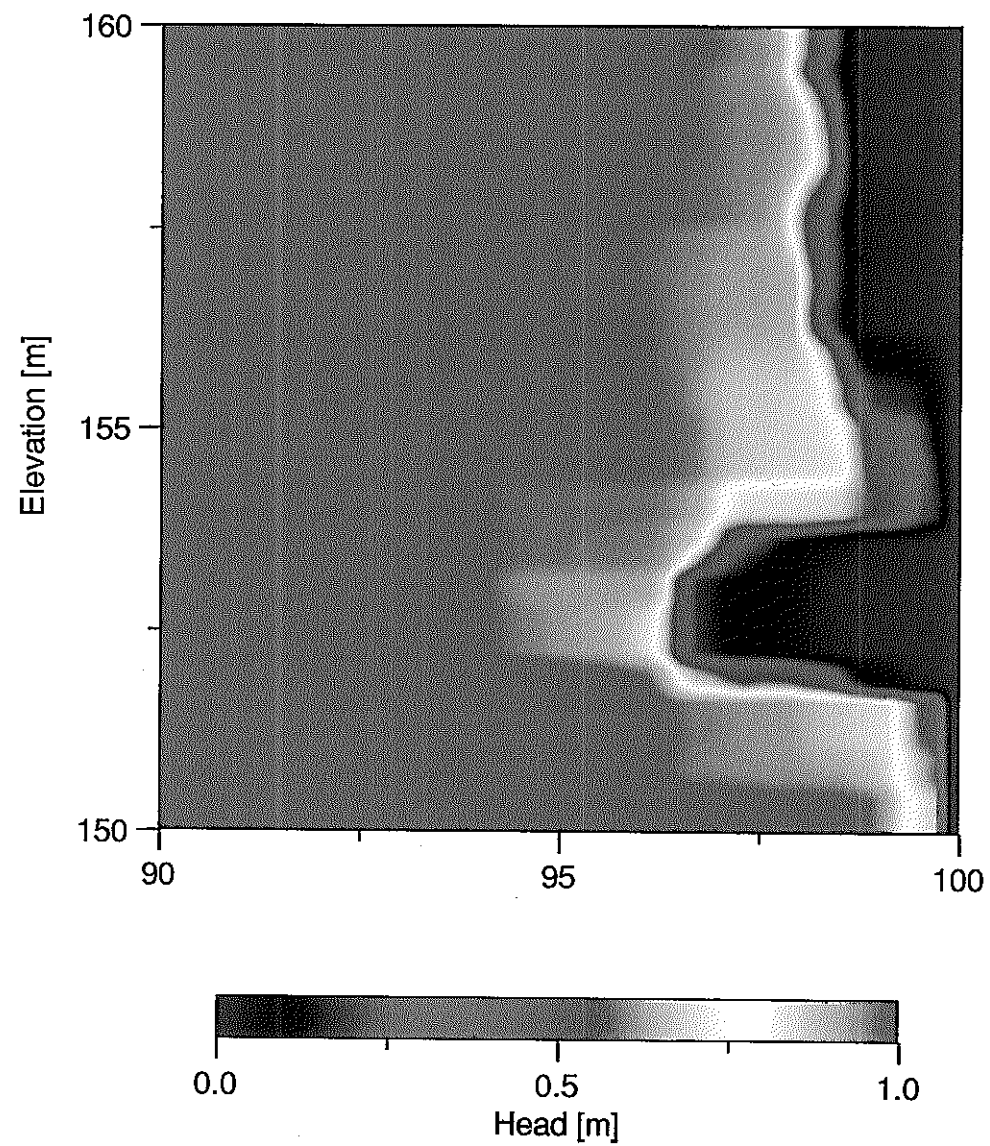


図6.2-2 小領域に対する水理解析の結果（圧力分布、TH-4孔）

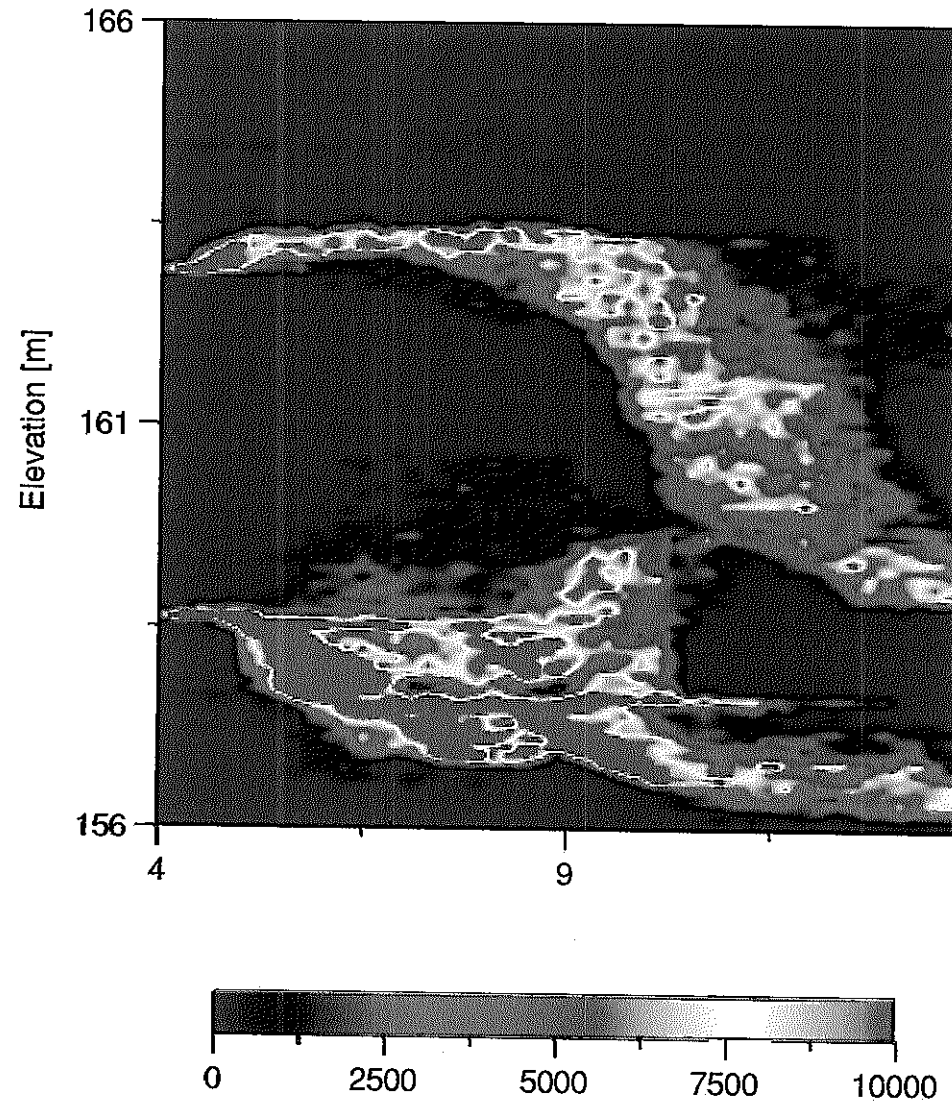


図6.2-3 小領域におけるパーティクル分布 (100 Rd年後、TH-1孔)

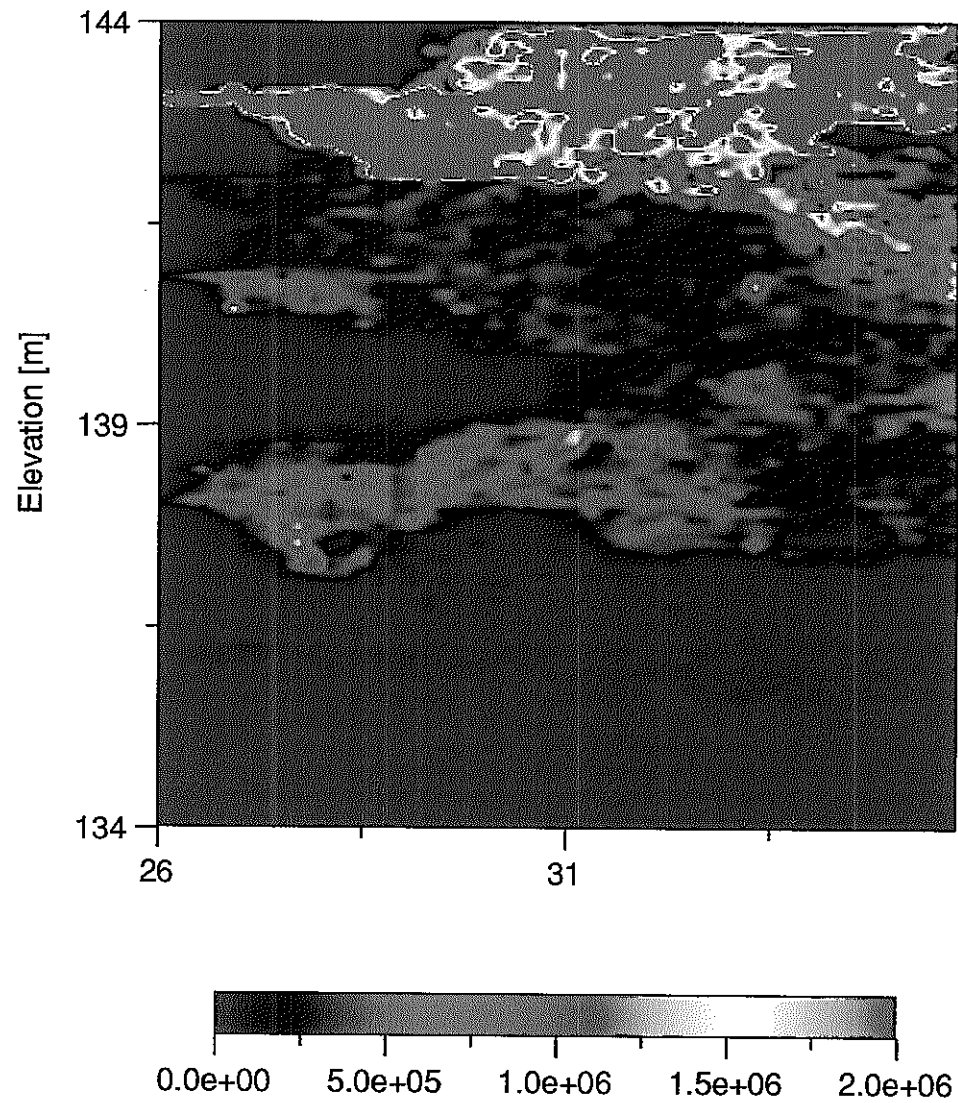


図6.2-3 小領域におけるパーティクル分布 (100 Rd年後、TH-2孔)

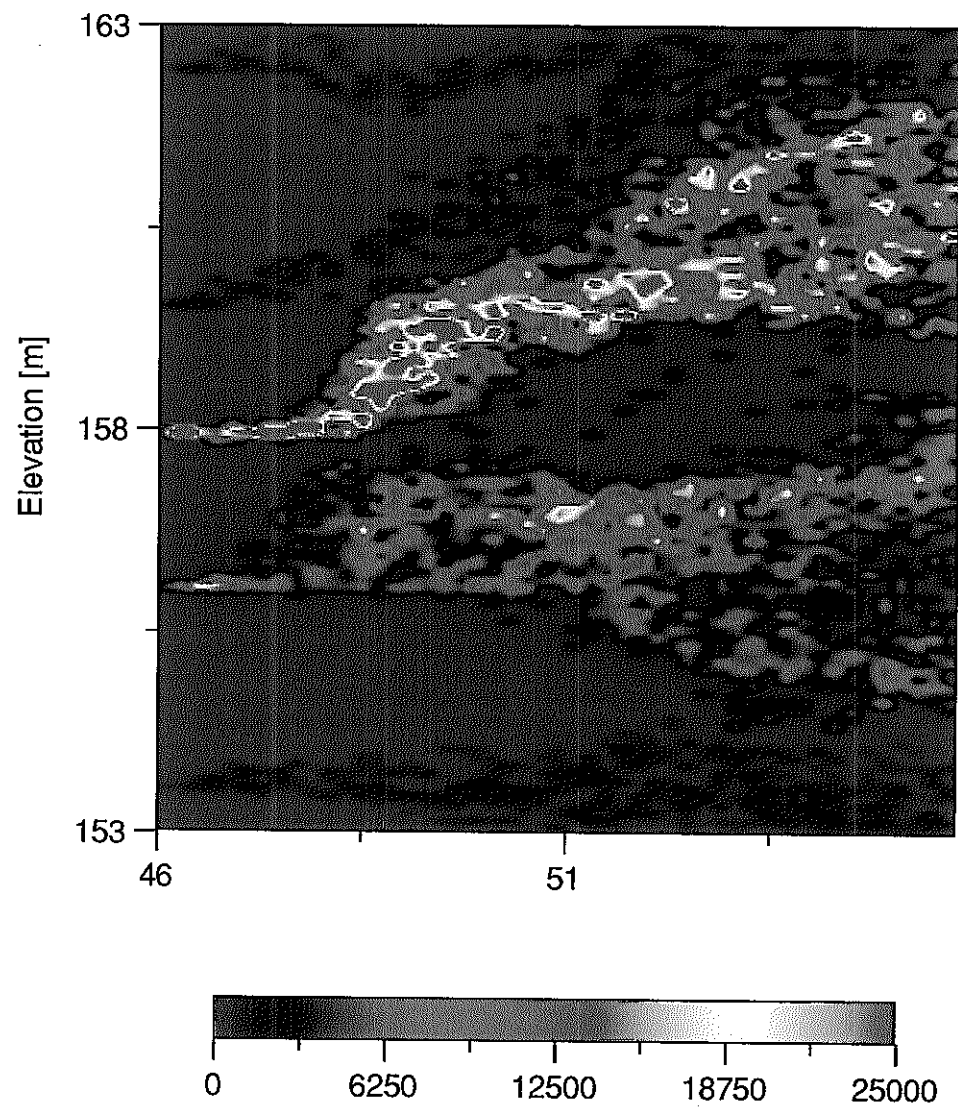


図6.2-3 小領域におけるパーティクル分布 (100 Rd年後、TH-3孔)

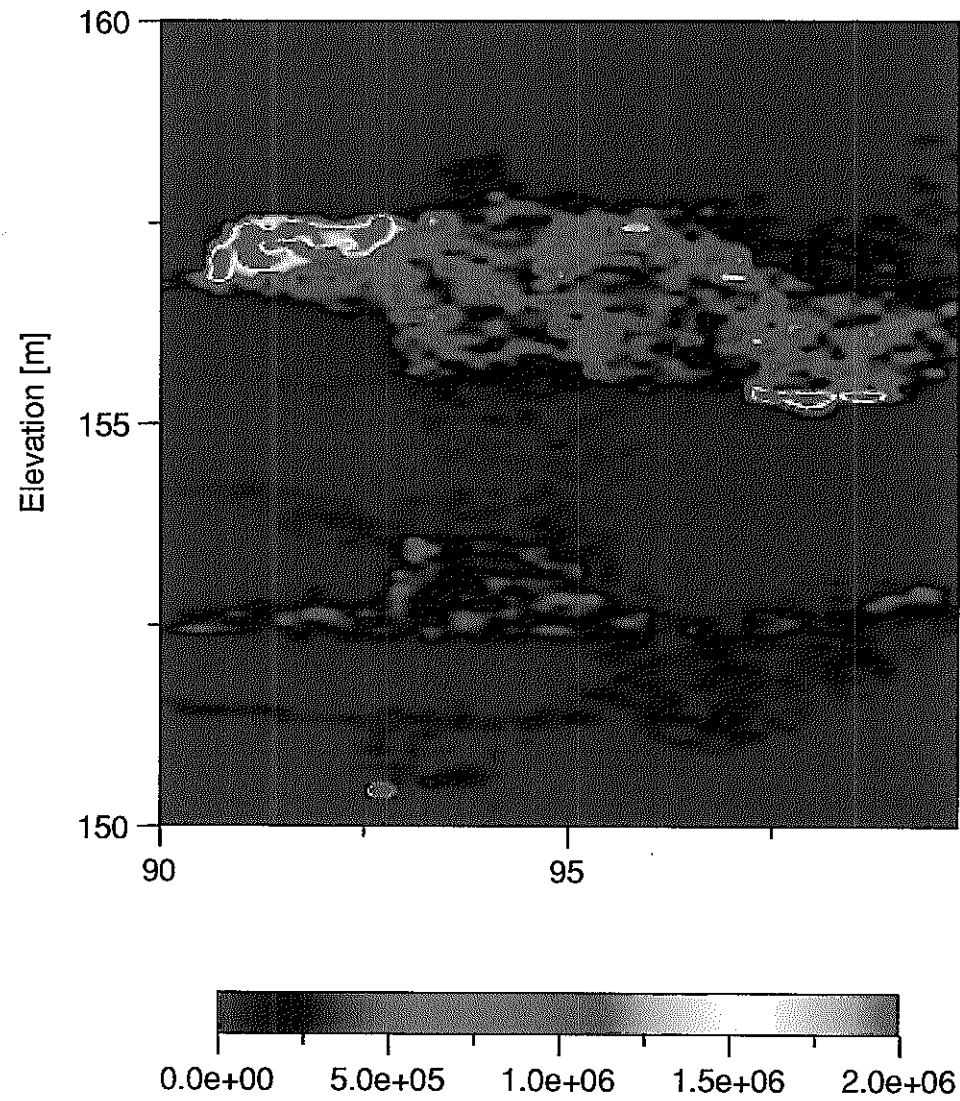


図6.2-3 小領域におけるパーティクル分布 (100 Rd年後、TH-4 孔)

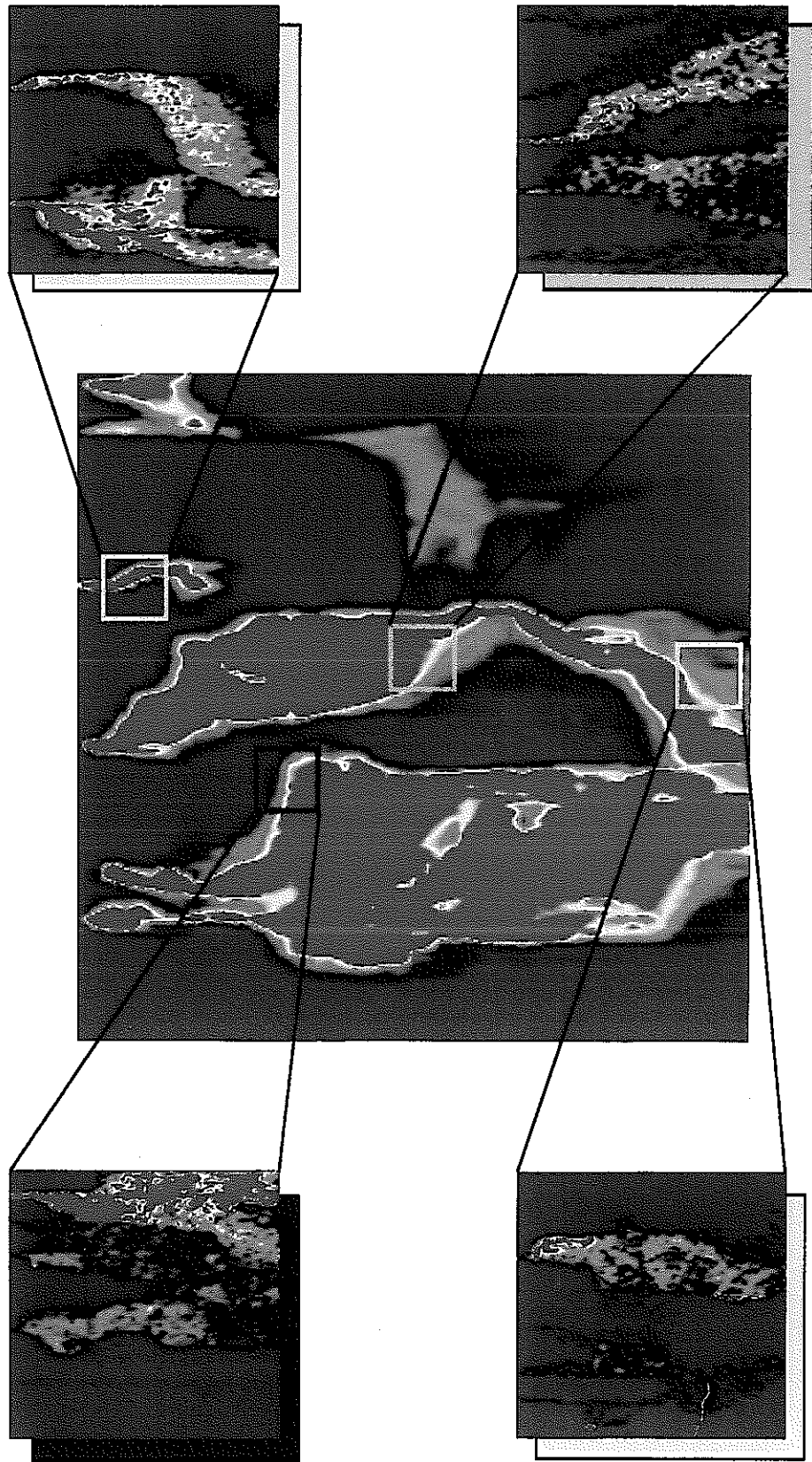


図6.2-4 全体の解析結果と小領域についての解析結果との比較

7. まとめ

統計的自己アファインフラクタルモデルであるMACRO AFFINITY コードを用いて、東濃地域のウラン鉱床部分を含む鉛直断面の透水係数場の不均質性を現実的かつ詳細に表現した水理解析を実施した。

4つの試錐孔における見かけ比抵抗値測定結果に基づきフラクタル次元を推定するとともに、測定点での透水係数値をコンディショニングしたフラクタル透水係数場を作成し、いくつかの水理境界条件についての地下水流動解析を行った。また、この流速場に基づきパーティクルトラッキングの計算を行ったところ複数の時系列ソースからの寄与をコンボリューションしたパーティクル分布は、現在のウランの分布を定性的に再現するものとなった。この結果は、上述したフラクタルモデルによる水理解析の本問題への適合性の検証の一つと見ることができるとともに、東濃地域のウランの分布について水理学的な因子、即ち当該領域へウランを供給し得た地下水移行経路の有無、により説明し得る部分があることを示しているものと考えられる。

さらに、フラクタルデコンボリューションの手法により10cmグリッドのより詳細な解析を行ったところ、流速分布及び推定されるウラン分布（パーティクル分布）にも実際のサイトで見られるものに類似した、より大きなスケールと自己相似的なパターンが見られ、階層構造的に繰り込まれるいくつかのスケールでの不均質性を有する本地域の地層（特に土岐夾炭累層下部層）に対するフラクタル理論に基づく水理モデルの有効性が明らかになったものと考えられる。

今後は、MACRO AFFINITY コードの改良版(version 2.0) が、平成7年3月に完成することから、ここで付加された機能特に複数の異なるフラクタル特性を持つ地層を組み合わせる機能を用いて、断層の上下を明確に区分した解析等より現実的な解析を行うことによって本手法の適用性を高めていくことが肝要であると考えられる。

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] PSACoin LEVEL E INTERCOMPARISON, Probabilistic System Assessment Code (PSAC) User Group, OECD Nuclear Energy Agency, Paris, 1989.
- [3] T. A. Hewitt, Fractal distribution of reservoir Heterogeneity and their influence on fluid transport, 61st Annual Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers, New Orleans, 1988.
- [4] P. Grindrod, M. D. Impey, Fractal field Simulations of Tracer Migration within the WIPP Culebra Dolomite IM2856-1, Version 2, 1992.
- [5] M. D. Impey, P. Grindrod, Cross Well Fractal Interpolation of Permeability Data, IHEN/20-1, Version 1, 1992.
- [6] M. D. Impey, P. Grindrod, Channelling and Fickian Dispersion in a Fractal Simulated Porous Media, WRR/1, Version 1, 1991.
- [7] P. M. Alder, A. Henriette And C. J. Jacquin, The effective permeability of heterogeneous porous medas, physico Chemical Hydrodynamics, 11 No. 1, 63-80, 1989.
- [8] M. D. Impey and P. Grindrod, Application of fractal geometry to geological site characterization. Proc. British Computer Society Conference "Applications of Fractals and Chaos", London, February 1992.
- [9] P. Grindrod and M. D. Impey. Fractal field simulations of tracer migration within the WIPP Culebra Dolomite. Intera Report IM2856-1 Versiob 2, March 1992.
- [10] M. D. Impey and P. Grindrod and H. Takase. A fractal methodology for the MACRO-2D experiments. Intera Report ID3249-1 Version 1, September 1992.

- [11] P. C. Robinson and C. P. Jackson. A numerical study of various algorithms related to the preconditioned conjugate gradient method. *Int. J. Num. Meth. Eng.*, 21, 1315, 1985.
- [12] M. D. Impey and P. Grindrod and K. Worgan. Analysis of the WIPP Geostatistical Test Problems using self-affine fractal simulations. *Intera Report ID3406-1 Version 1*, November 1992.
- [13] W. H. Press, B. P. Flannery, S. A. Teukolsky and W. T. Vetterling. *Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing*, Cambridge Uni. Press, 1986.
- [14] 中塚利直、時系列解析の数学的基礎、教育出版、1978.
- [15] D. C. Boes, F. A. Grayhill and A. M. Mood, *Introduction to the Theory of Statistics*, McGraw-Hill, London 1988.
- [16] 尾方伸久、大澤英昭、中野勝志、柳澤孝一、西垣誠、”堆積岩の地質学的特性及び透水係数、見かけ比抵抗相互の関係とその水理地質構造モデルへの適用、応用地質、32-6, p.51-62
- [17] 水谷義彦、瀬尾俊弘、太田久仁雄、中井信之、村井康浩、”岐阜県東濃鉾山深層地下水の ^{14}C 年代”、加速器質量分析と炭素安定同位体の学際的応用シンポジウム論文集 p.159-168
- [18] 湯佐泰久、吉田英一、”天然放射性核種の地層中の挙動—東濃ウラン鉾床における事例研究—”、放射線 Vol.20, No.1, (1993)