

JNC T J7440 2001-015

**地質環境の不均一性評価における
統計解析手法の適用性調査(その2)**

**—2次元データを基にした統計解析手法の適用性調査と
実用化に関する課題の整理—**

(核燃料サイクル開発機構 契約業務報告書)

2001年3月

鹿島建設株式会社

JNC T J7440 2001-015

地質環境の不均一性評価における
統計解析手法の適用性調査(その2)

—2次元データを基にした統計解析手法の適用性調査と
実用化に関する課題の整理—

(核燃料サイクル開発機構 契約業務報告書)

2001年3月

鹿島建設株式会社



本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂群東海村大字村松 4-49
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, Ibaragi-ken, 319-1184
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2001

地質環境の不均一性評価における統計解析手法の適用性調査（その2）

（核燃料サイクル開発機構 契約業務報告書）

戸井田 克* 塩釜 幸弘* 升元 一彦* 須山 泰宏*
阿部 泰典* 古市 光昭**

要 旨

東濃地科学センターにおける地層科学研究では、地質環境特性の調査・解析・評価手法を開発することを目的として、広域地下水流動研究、超深地層研究計画を進めている。これらの計画では、地表から地下深部に至る花崗岩中の地下水の流れを把握することが重要となる。そのための大きな課題は、できるだけ少ない調査量で高精度に地質環境を把握するための合理的な調査手法を確立することである。

本業務は、統計解析手法を用い、上記の合理的調査手法を確立するのに必要な定量的地質環境モデル構築方法の開発を目的としている。

本年度は、昨年度の成果を受けて、2次元の地質環境の不均一性の具体的評価手法や手順を明確にするため、実際に東濃鉱山周辺の地質環境データによる例題演習を行い、以下のような成果を得た。

1. ファジーデータを用いることにより、ハードデータ（実測透水係数）にソフトデータ（インタビュー結果）を加えた形で、地質環境の不均一性に付随した不確実性の大きさを定量的に示すことが可能である。
2. 不確実性に関しては、ファジー変動幅とクリッキング標準偏差を用いて定量化することが可能であり、今後の調査計画立案において、ファジー変動幅は調査手法の選定に、クリッキング標準偏差は調査位置の選定に適用が可能である。

本報告書は、鹿島建設株式会社が核燃料サイクル開発機構との契約により実施した業務成果に関するものである。

契約番号：12C1144

機構担当部課室及び担当者：東濃地科学センター 地質環境特性研究グループ 武田精悦

* 鹿島建設（株）技術研究所

** 鹿島建設（株）建設総事業本部 原子力部

Application of Geostatistical Techniques to Modelling Spatial
Heterogeneity of Geological Environment (Part II) ;
A Technical Review

Masaru Toida* , Yukihiro Shiogama* , Kazuhiko Masumoto* ,
Yasuhiro Suyama* , Yasunori Abe* , and Mitsuaki Furuichi**

Abstract

“Regional hydrogeological study” and “Mizunami Underground Research Laboratory” are conducted in “Geoscience studies” at Tono to develop site investigation techniques in geological environment. They treat groundwater flow in granite from surface to deep underground. One of the their common themes is to establish the rational methodology to understand the accurate geological conditions in required investigation quantity.

Objectives of the study are to develop the methodology of the quantitative geological modeling with the geostatistical techniques.

The following results have been obtained within the fiscal year 2000 :

1. It is possible to estimate the quantitative uncertainty of the spatial heterogeneity of the geological environment by fuzzy method with hard data and soft data.
2. The quantitative uncertainty is evaluated by the width of fuzzy kriged values and kriging standard deviation. On planning, the width of fuzzy kriged values is useful for the selection of investigation method and kriging standard deviation is useful for the selection of the location of investigation.

This work was performed by Kajima Corporation under contract with Japan Nuclear Cycle Development Institute.

JNC Liaison : Geoscience Research Group, Tono Geoscience Center

* : Kajima Technical Research Institute, Kajima Corporation

** : Nuclear Power Department , Kajima Corporation

目 次

1. はじめに	1
2. 業務計画	2
2. 1 件名	2
2. 2 実施期間	2
2. 3 実施機関	2
2. 4 業務体制	2
3. 業務内容	3
3. 1 東濃鉱山周辺の堆積岩水理場の不確実性の評価	3
3. 2 地質環境の不均一性評価のための課題整理と対応案作成	3
4. 業務手順	4
4. 1 業務対象領域	4
4. 2 使用データ	4
4. 3 作業手順	4
5. 検討結果	
5. 1 東濃鉱山周辺の堆積岩水理場の現状評価	9
5. 2 東濃鉱山周辺の堆積岩水理場の不確実性の評価	18
5. 2. 1 ファジー地球統計	18
5. 2. 2 透水係数分布のメンバーシップ関数	34
5. 2. 3 解析結果	39
6. まとめ	113
7. 今後の研究課題	130
参考文献	150

表 目 次

表 2-1 担当者一覧

表 5-1(1) 透水試験結果 (TH-1,2)

表 5-1(2) 透水試験結果 (TH-3,4)

目 次

- 図 4-1 業務対象領域
- 図 4-2 業務対象領域の地質情報の一例
- 図 4-3 水理場の推定例
- 図 5-1 ボーリング柱状図
- 図 5-2(1) 電気検層結果 (TH-1)
- 図 5-2(2) 電気検層結果 (TH-2)
- 図 5-2(3) 電気検層結果 (TH-3)
- 図 5-2(4) 電気検層結果 (TH-4)
- 図 5-3 電気検層の電極の位置と深度補正について
 - 図 5.2.1.2.a-1 特性関数のグラフ
 - 図 5.2.1.2.a-2 メンバーシップ関数のグラフ
 - 図 5.2.1.2.a-3 絶対値が小さい実数
 - 図 5.2.1.2.a-4 背が高い
 - 図 5.2.1.2.a-5 背が高い学生
 - 図 5.2.1.2.a-6 0 よりもかなり大きい実数
 - 図 5.2.1.2.b-1 既往の研究例におけるファジーデータセット
 - 図 5.2.1.2.b-2 ソフトデータを含むデータセットから作成されたファジーバリオグラム
 - 図 5.2.1.2.b-3 ファジークリッキングにより得られた各メンバーシップレベルの透水係数分布の例
 - 図 5.2.2.1-1 U_0, L_0, U_1, L_1 のメンバーシップ関数上での位置関係
 - 図 5.2.2.1-2 透水試験に基づく $\log k$ のメンバーシップ
 - 図 5.2.2.2-1 α のメンバーシップ分布
 - 図 5.2.2.2-2 比抵抗 (横軸) と透水係数の対数 (縦軸) のプロット
 - 図 5.2.2.2-3 ε のメンバーシップ関数
 - 図 5.2.2.2-4 $\log k_p$ のメンバーシップ分布の例 (ケース 1)
 - 図 5.2.2.2-5 $\log k_p$ のメンバーシップ分布の例 (ケース 2)
 - 図 5.2.3.1.a-1 断層の上下にある全てのデータを用いて算出したバリオグラムの例(メンバーシップ 1.0)
 - 図 5.2.3.1.a-2 透水試験結果から作成したファジーバリオグラム(メンバーシップ 1.0)
 - 図 5.2.3.1.a-3 透水試験結果から作成したファジーバリオグラム(メンバーシップ 0.8)

- 図 5.2.3.1.a-4 透水試験結果から作成したファジーバリオグラム(メンバーシップ 0.5)
- 図 5.2.3.1.a-5 透水試験結果から作成したファジーバリオグラムに対するフラクタルモデルのフィッティング結果(メンバーシップ 1.0)
- 図 5.2.3.1.a-6 透水試験結果及び比抵抗測定結果(ケース 1)から作成したバリオグラム及びフラクタルモデルのフィッティング結果(メンバーシップ 1.0)
- 図 5.2.3.1.b-1 (1) 透水試験結果のみに基づくファジークリッキングの結果(メンバーシップ 0.0)(断層より上の領域のデータセット)
- 図 5.2.3.1.b-1 (2) 透水試験結果のみに基づくファジークリッキングの結果(メンバーシップ 0.25)(断層より上の領域のデータセット)
- 図 5.2.3.1.b-1 (3) 透水試験結果のみに基づくファジークリッキングの結果(メンバーシップ 0.5)(断層より上の領域のデータセット)
- 図 5.2.3.1.b-1 (4) 透水試験結果のみに基づくファジークリッキングの結果(メンバーシップ 0.75)(断層より上の領域のデータセット)
- 図 5.2.3.1.b-1 (5) 透水試験結果のみに基づくファジークリッキングの結果(メンバーシップ 1.0)(断層より上の領域のデータセット)
- 図 5.2.3.1.b-2 (1) 透水試験結果及び比抵抗値からの推定結果に基づくファジークリッキング(ケース 1)の結果(メンバーシップ 0.0)(断層より上の領域のデータセット)
- 図 5.2.3.1.b-2 (2) 透水試験結果及び比抵抗値からの推定結果に基づくファジークリッキング(ケース 1)の結果(メンバーシップ 0.25)(断層より上の領域のデータセット)
- 図 5.2.3.1.b-2 (3) 透水試験結果及び比抵抗値からの推定結果に基づくファジークリッキング(ケース 1)の結果(メンバーシップ 0.5)(断層より上の領域のデータセット)
- 図 5.2.3.1.b-2 (4) 透水試験結果及び比抵抗値からの推定結果に基づくファジークリッキング(ケース 1)の結果(メンバーシップ 0.75)(断層より上の領域のデータセット)
- 図 5.2.3.1.b-2 (5) 透水試験結果及び比抵抗値からの推定結果に基づくファジークリッキング(ケース 1)の結果(メンバーシップ 1.0)(断層より上の領域のデータセット)
- 図 5.2.3.1.b-3 (1) 透水試験結果及び比抵抗値からの推定結果に基づくファジークリッキング(ケース 2)の結果(メンバーシップ 0.0)(断層より上の領域のデータセット)

- 図 5.2.3.1.b-3 (2) 透水試験結果及び比抵抗値からの推定結果に基づくファジークリッキング (ケース 2) の結果 (メンバーシップ 0.25) (断層より上の領域のデータセット)
- 図 5.2.3.1.b-3 (3) 透水試験結果及び比抵抗値からの推定結果に基づくファジークリッキング (ケース 2) の結果 (メンバーシップ 0.5) (断層より上の領域のデータセット)
- 図 5.2.3.1.b-3 (4) 透水試験結果及び比抵抗値からの推定結果に基づくファジークリッキング (ケース 2) の結果 (メンバーシップ 0.75) (断層より上の領域のデータセット)
- 図 5.2.3.1.b-3 (5) 透水試験結果及び比抵抗値からの推定結果に基づくファジークリッキング (ケース 2) の結果 (メンバーシップ 1.0) (断層より上の領域のデータセット)
- 図 5.2.3.1.b-4 (1) 透水試験結果のみに基づくファジークリッキングの結果 (メンバーシップ 0.0) (断層より下の領域のデータセット)
- 図 5.2.3.1.b-4 (2) 透水試験結果のみに基づくファジークリッキングの結果 (メンバーシップ 0.25) (断層より下の領域のデータセット)
- 図 5.2.3.1.b-4 (3) 透水試験結果のみに基づくファジークリッキングの結果 (メンバーシップ 0.5) (断層より下の領域のデータセット)
- 図 5.2.3.1.b-4 (4) 透水試験結果のみに基づくファジークリッキングの結果 (メンバーシップ 0.75) (断層より下の領域のデータセット)
- 図 5.2.3.1.b-4 (5) 透水試験結果のみに基づくファジークリッキングの結果 (メンバーシップ 1.0) (断層より下の領域のデータセット)
- 図 5.2.3.1.b-5 (1) 透水試験結果及び比抵抗値からの推定結果に基づくファジークリッキング (ケース 1) の結果 (メンバーシップ 0.0) (断層より下の領域のデータセット)
- 図 5.2.3.1.b-5 (2) 透水試験結果及び比抵抗値からの推定結果に基づくファジークリッキング (ケース 1) の結果 (メンバーシップ 0.25) (断層より下の領域のデータセット)
- 図 5.2.3.1.b-5 (3) 透水試験結果及び比抵抗値からの推定結果に基づくファジークリッキング (ケース 1) の結果 (メンバーシップ 0.5) (断層より下の領域のデータセット)
- 図 5.2.3.1.b-5 (4) 透水試験結果及び比抵抗値からの推定結果に基づくファジークリッキング (ケース 1) の結果 (メンバーシップ 0.75) (断層より下の領域のデータセット)
- 図 5.2.3.1.b-5 (5) 透水試験結果及び比抵抗値からの推定結果に基づくファジークリッ

キング（ケース 1）の結果（メンバーシップ 1.0）（断層より下の領域のデータセット）

図 5.2.3.1.b-6 (1) 透水試験結果及び比抵抗値からの推定結果に基づくファジークリッキング（ケース 2）の結果（メンバーシップ 0.0）（断層より下の領域のデータセット）

図 5.2.3.1.b-6 (2) 透水試験結果及び比抵抗値からの推定結果に基づくファジークリッキング（ケース 2）の結果（メンバーシップ 0.25）（断層より下の領域のデータセット）

図 5.2.3.1.b-6 (3) 透水試験結果及び比抵抗値からの推定結果に基づくファジークリッキング（ケース 2）の結果（メンバーシップ 0.5）（断層より下の領域のデータセット）

図 5.2.3.1.b-6 (4) 透水試験結果及び比抵抗値からの推定結果に基づくファジークリッキング（ケース 2）の結果（メンバーシップ 0.75）（断層より下の領域のデータセット）

図 5.2.3.1.b-6 (5) 透水試験結果及び比抵抗値からの推定結果に基づくファジークリッキング（ケース 2）の結果（メンバーシップ 1.0）（断層より下の領域のデータセット）

図 5.2.3.1.b-7 (1) 透水試験結果のみに基づくファジークリッキングの結果（メンバーシップ 0.0）（全領域のデータセット）

図 5.2.3.1.b-7 (2) 透水試験結果のみに基づくファジークリッキングの結果（メンバーシップ 0.25）（全領域のデータセット）

図 5.2.3.1.b-7 (3) 透水試験結果のみに基づくファジークリッキングの結果（メンバーシップ 0.5）（全領域のデータセット）

図 5.2.3.1.b-7 (4) 透水試験結果のみに基づくファジークリッキングの結果（メンバーシップ 0.75）（全領域のデータセット）

図 5.2.3.1.b-7 (5) 透水試験結果のみに基づくファジークリッキングの結果（メンバーシップ 1.0）（全領域のデータセット）

図 5.2.3.1.b-8 (1) 透水試験結果及び比抵抗値からの推定結果に基づくファジークリッキング（ケース 1）の結果（メンバーシップ 0.0）（全領域のデータセット）

図 5.2.3.1.b-8 (2) 透水試験結果及び比抵抗値からの推定結果に基づくファジークリッキング（ケース 1）の結果（メンバーシップ 0.25）（全領域のデータセット）

図 5.2.3.1.b-8 (3) 透水試験結果及び比抵抗値からの推定結果に基づくファジークリッキング（ケース 1）の結果（メンバーシップ 0.5）（全領域のデータ

- セット)
- 図 5.2.3.1.b-8 (4) 透水試験結果及び比抵抗値からの推定結果に基づくファジークリッキング (ケース 1) の結果 (メンバーシップ 0.75) (全領域のデータセット)
- 図 5.2.3.1.b-8 (5) 透水試験結果及び比抵抗値からの推定結果に基づくファジークリッキング (ケース 1) の結果 (メンバーシップ 1.0) (全領域のデータセット)
- 図 5.2.3.1.b-9 (1) 透水試験結果及び比抵抗値からの推定結果に基づくファジークリッキング (ケース 2) の結果 (メンバーシップ 0.0) (全領域のデータセット)
- 図 5.2.3.1.b-9 (2) 透水試験結果及び比抵抗値からの推定結果に基づくファジークリッキング (ケース 2) の結果 (メンバーシップ 0.25) (全領域のデータセット)
- 図 5.2.3.1.b-9 (3) 透水試験結果及び比抵抗値からの推定結果に基づくファジークリッキング (ケース 2) の結果 (メンバーシップ 0.5) (全領域のデータセット)
- 図 5.2.3.1.b-9 (4) 透水試験結果及び比抵抗値からの推定結果に基づくファジークリッキング (ケース 2) の結果 (メンバーシップ 0.75) (全領域のデータセット)
- 図 5.2.3.1.b-9 (5) 透水試験結果及び比抵抗値からの推定結果に基づくファジークリッキング (ケース 2) の結果 (メンバーシップ 1.0) (全領域のデータセット)
- 図 5.2.3.1.b-10 (1) データの不確実性に起因するクリッキング結果の変動範囲 (メンバーシップ 0.0)
- 図 5.2.3.1.b-10 (2) データの不確実性に起因するクリッキング結果の変動範囲 (メンバーシップ 0.25)
- 図 5.2.3.1.b-10 (3) データの不確実性に起因するクリッキング結果の変動範囲 (メンバーシップ 0.5)
- 図 5.2.3.1.b-10 (4) データの不確実性に起因するクリッキング結果の変動範囲 (メンバーシップ 0.75)
- 図 5.2.3.1.b-10 (5) データの不確実性に起因するクリッキング結果の変動範囲 (メンバーシップ 1.0)
- 図 5.2.3.2.-1 (1) 透水試験結果のみに基づくファジークリッキングの結果 (1.0) (断層より上の領域のデータセット)
- 図 5.2.3.2.-1 (2) 透水試験結果のみに基づくファジークリッキングの結果 (メンバーシ

- ップ0.75) (断層より上の領域のデータセット)
- 図 5.2.3.2-1 (3) 透水試験結果のみに基づくファジークリッキングの結果 (メンバーシップ0.5) (断層より上の領域のデータセット)
- 図 5.2.3.2-1 (4) 透水試験結果のみに基づくファジークリッキングの結果 (メンバーシップ0.25) (断層より上の領域のデータセット)
- 図 5.2.3.2-1 (5) 透水試験結果のみに基づくファジークリッキングの結果 (メンバーシップ0.0) (断層より上の領域のデータセット)
- 図 5.2.3.2-2 (1) 透水試験結果及び比抵抗値からの推定結果に基づくファジークリッキング (ケース1) の結果 (メンバーシップ1.0) (断層より上の領域のデータセット)
- 図 5.2.3.2-2 (2) 透水試験結果及び比抵抗値からの推定結果に基づくファジークリッキング (ケース1) の結果 (メンバーシップ0.75) (断層より上の領域のデータセット)
- 図 5.2.3.2-2 (3) 透水試験結果及び比抵抗値からの推定結果に基づくファジークリッキング (ケース1) の結果 (メンバーシップ0.5) (断層より上の領域のデータセット)
- 図 5.2.3.2-2 (4) 透水試験結果及び比抵抗値からの推定結果に基づくファジークリッキング (ケース1) の結果 (メンバーシップ0.25) (断層より上の領域のデータセット)
- 図 5.2.3.2-2 (5) 透水試験結果及び比抵抗値からの推定結果に基づくファジークリッキング (ケース1) の結果 (メンバーシップ0.0) (断層より上の領域のデータセット)
- 図 5.2.3.2-3 (1) 透水試験結果及び比抵抗値からの推定結果に基づくファジークリッキング (ケース2) の結果 (メンバーシップ1.0) (断層より上の領域のデータセット)
- 図 5.2.3.2-3 (2) 透水試験結果及び比抵抗値からの推定結果に基づくファジークリッキング (ケース2) の結果 (メンバーシップ0.75) (断層より上の領域のデータセット)
- 図 5.2.3.2-3 (3) 透水試験結果及び比抵抗値からの推定結果に基づくファジークリッキング (ケース2) の結果 (メンバーシップ0.5) (断層より上の領域のデータセット)
- 図 5.2.3.2-3 (4) 透水試験結果及び比抵抗値からの推定結果に基づくファジークリッキング (ケース2) の結果 (メンバーシップ0.25) (断層より上の領域のデータセット)
- 図 5.2.3.2-3 (5) 透水試験結果及び比抵抗値からの推定結果に基づくファジークリッキ

ング（ケース2）の結果（メンバーシップ0.0）（断層より上の領域のデータセット）

- 図 6-1 (1) 透水試験結果のみに基づく透水係数分布（メンバーシップ1.0）のファジー変動幅（左）とクリッキング標準偏差（右）
- 図 6-1 (2) 透水試験結果のみに基づく透水係数分布（メンバーシップ0.75）のファジー変動幅（左）とクリッキング標準偏差（右）
- 図 6-1 (3) 透水試験結果のみに基づく透水係数分布（メンバーシップ0.5）のファジー変動幅（左）とクリッキング標準偏差（右）
- 図 6-1 (4) 透水試験結果のみに基づく透水係数分布（メンバーシップ0.25）のファジー変動幅（左）とクリッキング標準偏差（右）
- 図 6-1 (5) 透水試験結果のみに基づく透水係数分布（メンバーシップ0.0）のファジー変動幅（左）とクリッキング標準偏差（右）
- 図 6-2 (1) 透水試験結果および比抵抗値に基づく透水係数分布（ケース1、メンバーシップ1.0）のファジー変動幅（左）とクリッキング標準偏差（右）
- 図 6-2 (2) 透水試験結果および比抵抗値に基づく透水係数分布（ケース1、メンバーシップ0.75）のファジー変動幅（左）とクリッキング標準偏差（右）
- 図 6-2 (3) 透水試験結果および比抵抗値に基づく透水係数分布（ケース1、メンバーシップ0.5）のファジー変動幅（左）とクリッキング標準偏差（右）
- 図 6-2 (4) 透水試験結果および比抵抗値に基づく透水係数分布（ケース1、メンバーシップ0.25）のファジー変動幅（左）とクリッキング標準偏差（右）
- 図 6-2 (5) 透水試験結果および比抵抗値に基づく透水係数分布（ケース1、メンバーシップ0.0）のファジー変動幅（左）とクリッキング標準偏差（右）
- 図 6-3 (1) 透水試験結果および比抵抗値に基づく透水係数分布（ケース2、メンバーシップ1.0）のファジー変動幅（左）とクリッキング標準偏差（右）
- 図 6-3 (2) 透水試験結果および比抵抗値に基づく透水係数分布（ケース2、メンバーシップ0.75）のファジー変動幅（左）とクリッキング標準偏差（右）
- 図 6-3 (3) 透水試験結果および比抵抗値に基づく透水係数分布（ケース2、メンバーシップ0.5）のファジー変動幅（左）とクリッキング標準偏差（右）
- 図 6-3 (4) 透水試験結果および比抵抗値に基づく透水係数分布（ケース2、メンバーシップ0.25）のファジー変動幅（左）とクリッキング標準偏差（右）
- 図 6-3 (5) 透水試験結果および比抵抗値に基づく透水係数分布（ケース2、メンバーシップ0.0）のファジー変動幅（左）とクリッキング標準偏差（右）
- 図 7-1 (1a) クリッキングによる透水係数分布（左）とファジーシミュレーションによる透水係数分布（右）の比較（透水試験結果のみによる、メンバーシップ1.0）

- 図 7-1 (1b) クリックによる透水係数分布 (左) とファジーシミュレーションによる透水係数分布 (右) の比較 (透水試験結果のみによる、メンバーシップ 1.0)
- 図 7-1 (2a) クリックによる透水係数分布 (左) とファジーシミュレーションによる透水係数分布 (右) の比較 (透水試験結果のみによる、メンバーシップ 0.5)
- 図 7-1 (2b) クリックによる透水係数分布 (左) とファジーシミュレーションによる透水係数分布 (右) の比較 (透水試験結果のみによる、メンバーシップ 0.5)
- 図 7-1 (3a) クリックによる透水係数分布 (左) とファジーシミュレーションによる透水係数分布 (右) の比較 (透水試験結果のみによる、メンバーシップ 0)
- 図 7-1 (3b) クリックによる透水係数分布 (左) とファジーシミュレーションによる透水係数分布 (右) の比較 (透水試験結果のみによる、メンバーシップ 0)
- 図 7-2 (1a) クリックによる透水係数分布 (左) とファジーシミュレーションによる透水係数分布 (右) の比較 (透水試験結果および比抵抗値による、ケース 1、メンバーシップ 1.0)
- 図 7-2 (1b) クリックによる透水係数分布 (左) とファジーシミュレーションによる透水係数分布 (右) の比較 (透水試験結果および比抵抗値による、ケース 1、メンバーシップ 1.0)
- 図 7-2 (2a) クリックによる透水係数分布 (左) とファジーシミュレーションによる透水係数分布 (右) の比較 (透水試験結果および比抵抗値による、ケース 1、メンバーシップ 0.5)
- 図 7-2 (2b) クリックによる透水係数分布 (左) とファジーシミュレーションによる透水係数分布 (右) の比較 (透水試験結果および比抵抗値による、ケース 1、メンバーシップ 0.5)
- 図 7-2 (3a) クリックによる透水係数分布 (左) とファジーシミュレーションによる透水係数分布 (右) の比較 (透水試験結果および比抵抗値による、ケース 1、メンバーシップ 0)
- 図 7-2 (3b) クリックによる透水係数分布 (左) とファジーシミュレーションによる透水係数分布 (右) の比較 (透水試験結果および比抵抗値による、ケース 1、メンバーシップ 0)
- 図 7-3 (1a) クリックによる透水係数分布 (左) とファジーシミュレーションによる透水係数分布 (右) の比較 (透水試験結果および比抵抗値による、ケー

ス2、メンバーシップ1.0)

- 図 7-3 (1b) クリックによる透水係数分布 (左) とファジーシミュレーションによる透水係数分布 (右) の比較 (透水試験結果および比抵抗値による、ケース2、メンバーシップ1.0)
- 図 7-3 (2a) クリックによる透水係数分布 (左) とファジーシミュレーションによる透水係数分布 (右) の比較 (透水試験結果および比抵抗値による、ケース2、メンバーシップ0.5)
- 図 7-3 (2b) クリックによる透水係数分布 (左) とファジーシミュレーションによる透水係数分布 (右) の比較 (透水試験結果および比抵抗値による、ケース2、メンバーシップ0.5)
- 図 7-3 (3a) クリックによる透水係数分布 (左) とファジーシミュレーションによる透水係数分布 (右) の比較 (透水試験結果および比抵抗値による、ケース2、メンバーシップ0)
- 図 7-3 (3b) クリックによる透水係数分布 (左) とファジーシミュレーションによる透水係数分布 (右) の比較 (透水試験結果および比抵抗値による、ケース2、メンバーシップ0)

1. はじめに

東濃地科学センターにおける地層科学研究では、土岐花崗岩およびそれを覆う瑞浪層群、瀬戸層群を対象に、地表から地下深部までの地下水の流動特性や地球化学特性を規制していると考えられる地質・地質構造を把握するために、各種の調査・検討が行われている。

これらの研究では、できるだけ少ない調査量で高精度に地質環境を把握するための合理的な手法を確立することを一つの大きな目標としている。一般に花崗岩のような不均一な媒体を流れる地下水の挙動評価においては、それに従う不確実性が均質な媒体と比べて大きく、試錐の数などの調査量と調査結果の不確実性との関係の評価することが極めて重要である。この両者の関係を数学的に解析するための1つの方法に、統計的評価手法があり、これは地下に埋蔵する資源量の評価など他の分野において用いられてきている実績がある。昨年度、「地質環境の不均一性評価における統計解析手法の適用性調査」においては、事例調査として東濃地域の試錐孔および釜石鉾山の試錐孔での亀裂頻度を対象に統計解析を行い、かつ国内・国外の検討事例を収集検討することで、不確実性評価指標を得ることを試みた。その結果、以下のような成果を得た。

- (1) 統計的手法により、調査の各時点におけるデータの数量に応じた、地質環境の不均一性に付随する不確実性の大きさを定量的に示すことが可能であることが確認できた。
- (2) 文献調査から、通常、透水係数のような、より直接的な特性値ではあるがデータの取得が容易ではないハードデータを、より入手しやすいソフトデータで補完することが行われるが、ハードデータ不足時にソフトデータを用いる利点は十分定量的に評価されてはいない。
- (3) 同様に、ソフトデータとハードデータが混在するような調査段階においては、統計的な手法のうち、ファジー理論を用いたものが最も信頼性が高い。

本年度の業務は、昨年度の成果を受けて、地質環境の不均一性の具体的評価手法や手順を明確にするため、実際に東濃鉾山周辺の地質環境データ（ソフトデータ及びハードデータ）による例題演習を行い、課題の抽出と堆積岩中での地質環境の不均一性評価における統計解析手法の取りまとめを行った。

2. 業務計画

2. 1 件名

「地質環境の不均一性評価における統計解析手法の適用性調査（その2）

ー 2次元データを基にした統計解析手法の適用性調査と実用化に関する課題の整理 ー」

2. 2 実施期間

平成12年12月14日～平成13年3月15日

2. 3 実施機関

鹿島建設株式会社 技術研究所 土木技術研究部

〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1 (TEL.0424-89-7081)

2. 4 業務体制

業務の担当者を表 2-1 に示す。

表 2-1 担当者一覧

会社名	鹿島建設（株）
実施責任者	戸井田 克
実施担当者	塩釜 幸弘
研究業務担当	升元 一彦
	須山 泰宏
	阿部 泰典
	古市 光昭

3. 業務内容

3. 1 東濃鉦山周辺の堆積岩水理場の不確実性の評価

東濃鉦山の周辺では、立坑掘削影響試験のために、主に堆積岩部分を対象とした試錐孔がある。これらの試錐孔のうち、数ヶ所で、水理試験(透水係数の測定)が行われており、試錐孔全長に渡っては、各種検層が実施されている。

本業務では、各種検層データや岩盤分類、地質学的分類をソフトデータとみなし、これらソフトデータについては、推定した透水係数のメンバーシップ分布の設定を試みた。特に、堆積岩においては、電気検層の比抵抗値と透水係数に良い相関があるため、これを中心として作業を実施した。

また、ソフトデータ及び実測透水係数(ハードデータ)に対しては、ファジー理論に基づく手法を適用することにより、東濃鉦山周辺の堆積岩水理場の不確実性の評価を行い、手法に関する詳細な知見の取得を行った。なお、昨年度は定量的なモデル構築の方法論策定が一次元的な統計解析作業に留まる制約があったが、本年度は、2孔以上のデータを用いることで、2次元的な統計解析の適用性を検討した。

3. 2 地質環境の不均一性評価のための課題整理と対応案作成

昨年度業務の成果の一つである定量的地質環境モデル構築の方法論では、以下の2点が特徴的であった。

- ① 地球統計学的解釈と決定論的解釈とを相互補完的に用いること、
- ② 限られた数の原位置データによる不確実性を定量化し、その減少挙動を時系列的に評価することで、研究・調査の進捗状況を定量的に評価できる。

本業務では、定量的地質環境モデル構築の方法論の具体的な手法・手順を明確にするため、3. 1で行った作業から、広域地下水流動研究等、実際の研究作業でモデル構築を行う上での問題点・課題を抽出した。また、それに対してデータ取得の方法など具体的対応案を提示した。

4. 業務手順

4. 1 業務対象領域

本業務の対象領域は、岐阜県土岐市の東濃鉦山敷地内に削孔されたTH-1～4を含む2次元断面内とした（図4-1参照）。

4. 2 使用データ

本業務に使用するデータは、1)東濃鉦山周辺で得られた地質学的知見、2)TH-1～4で実施した電気検層結果（比抵抗値）、及び3)TH-1～4で測定された水理試験結果（透水係数）とした。

4. 3 作業手順

本業務の作業手順を、以下に示す。

(1) 東濃鉦山周辺で得られた地質学的情報、電気検層結果（比抵抗値）及び水理試験結果（透水係数）の収集・整理

①これまで東濃鉦山周辺で得られた地質学的情報（図4-2参照、コア観察等）、電気検層結果（比抵抗値）及び水理試験結果（透水係数）を収集・整理した。本業務では、各調査段階と情報量の関係については考慮せず、現在得られている情報を全て用いて実施することとした。

②特に、電気検層結果（比抵抗値）については、必要に応じて比抵抗値の反映深度を修正した。

(2) メンバーシップ（確からしさ）推定のためのインタビューシートの作成

①東濃鉦山周辺の地質学的情報から推定される透水係数、電気検層結果（比抵抗値）から推定される透水係数、及び水理試験結果の透水係数のメンバーシップ（確からしさ）推定のためのインタビューシートの作成を行った。

②特に、電気検層結果（比抵抗値）から推定される透水係数については、事前に電気検層結果（比抵抗値）と透水係数の関係を整理し、電気検層結果（比抵抗値）からの透水係数推定式を設定した。

(3) 透水係数のメンバーシップ（確からしさ）推定

①JNC各担当者にインタビューシートの記入を依頼した。この調査は、複数の担当者に依頼した。

- ②上記の調査結果を基に、透水係数のメンバーシップを設定した。
 - ③特に、電気検層結果（比抵抗値）から推定される透水係数のメンバーシップについては、電気検層の比抵抗値における測定誤差と、電気検層結果（比抵抗値）からの透水係数推定における推定誤差を考慮して行った。
- (4) 2次元断面における水理場の推定に伴う不確実性の定量化
- ①(3)の結果を基に、ファジークリッキングを行い、水理場の推定（図 4-3 参照）及び不確実性の定量化を行った。不確実性については、ファジー変動幅とクリッキング標準偏差の2種類の値を用い定量化した。
 - ②ファジークリッキング及びファジーシミュレーション結果の違いが流動解析結果に与える影響を把握するために、予備的な地下水流動解析を実施した。
 - ③本手法の適用性の評価を行った。
- (5) 地質環境の不均一性評価のための課題整理と対応案作成
- ①(4)の不確実性の定量化結果に基づき、地質環境のモデル構築（不均一性評価等）のための課題を整理した。
 - ②上記の課題を克服するための対応案を作成した。

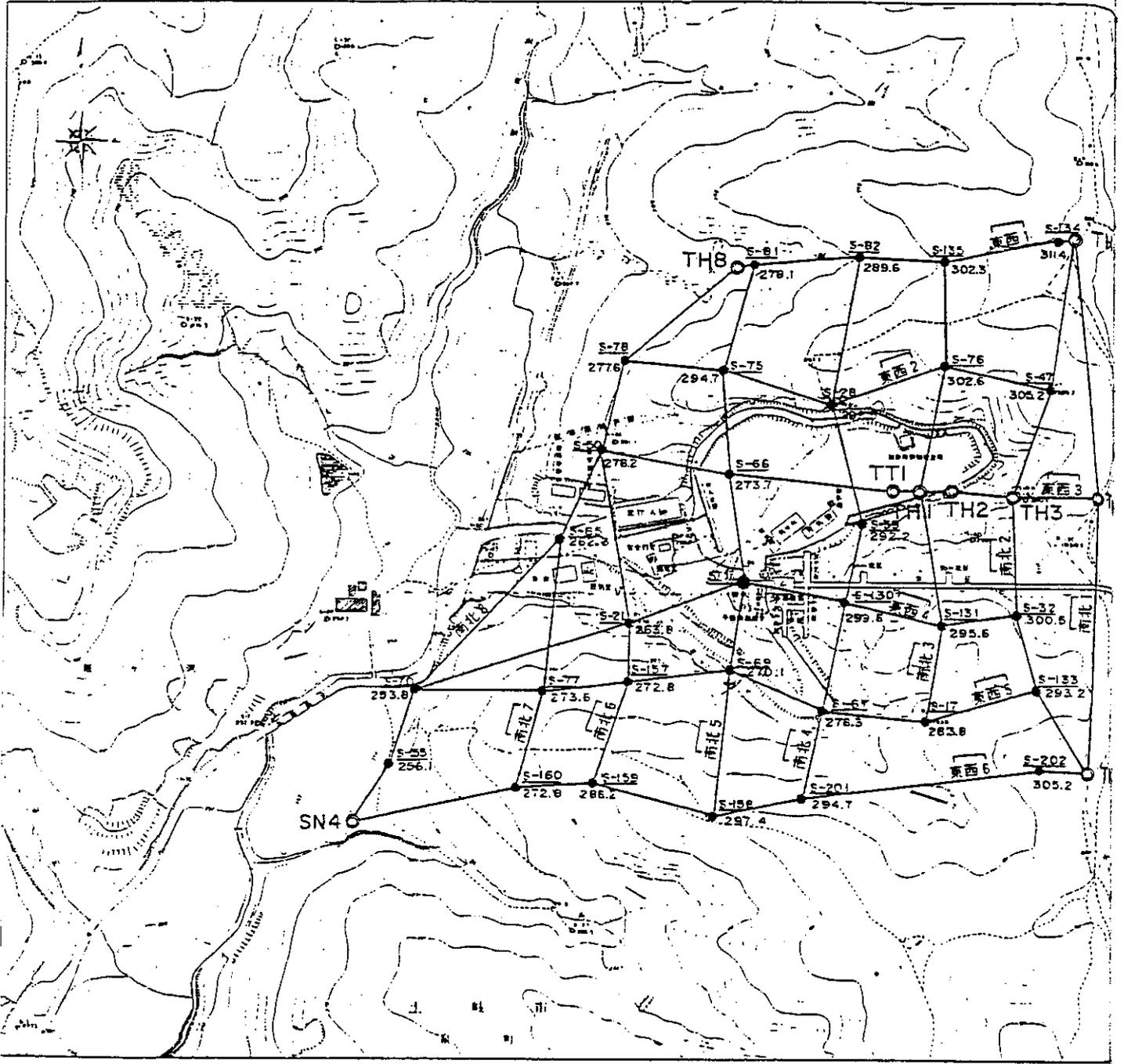


図 4-1 業務対象領域

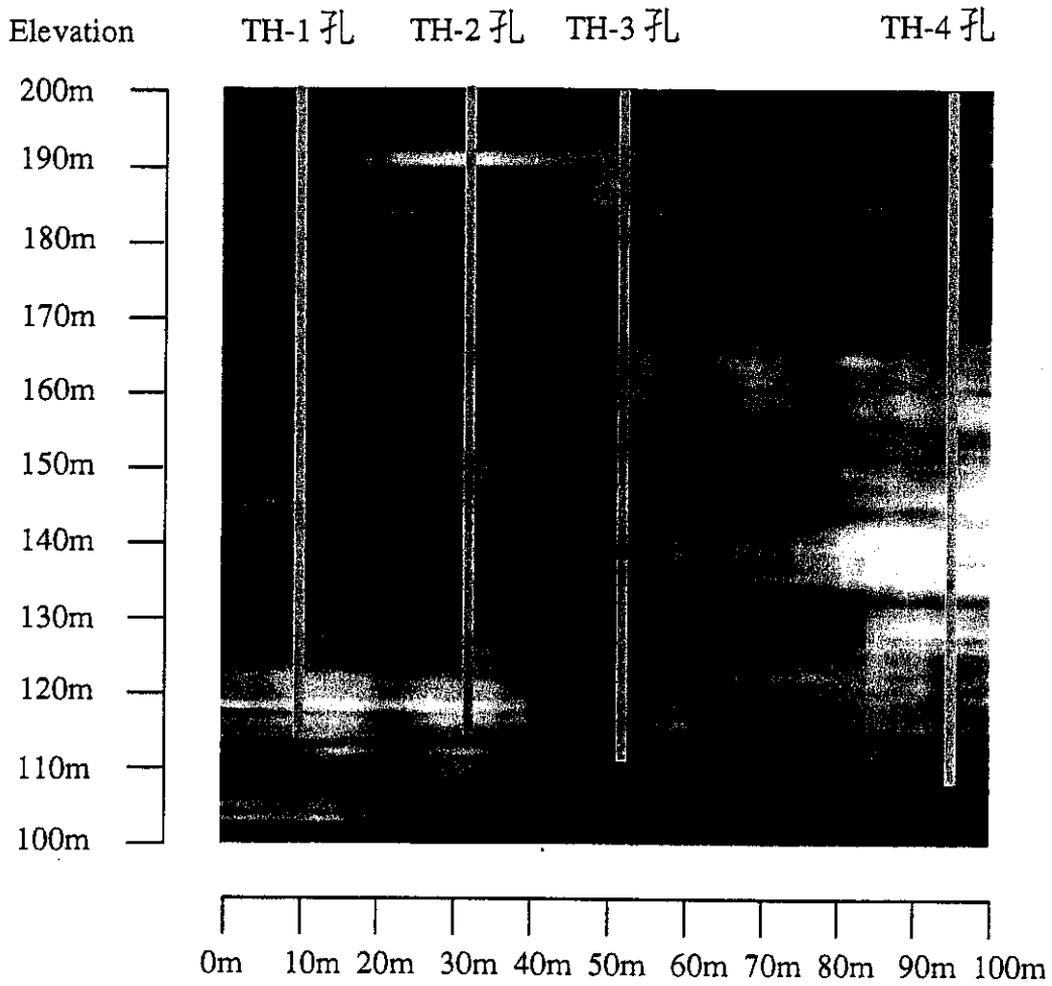


図 4-3 水理場の推定例

5. 検討結果

5. 1 東濃鉦山周辺の堆積岩水理場の現状評価

不確実性評価に先立ち、使用するデータを吟味すると共に、透水係数のメンバーシップ（確からしさ）推定のためのインタビューシートを作成及びインタビューを行って解析用データセットの基礎資料の作成を行った。

(1) 使用データ

解析・検討に使用したデータは、いずれもサイクル機構から提供された以下に示すものである。

- ・ ボーリング柱状図（図 5-1）
- ・ 透水試験結果（表 5-1）
- ・ 電気検層結果（図 5-2）

また、今回用いたボーリング地点の座標を以下に示す。

Borehole_ID	x	y	z(top)
TH-1	4829.64	-68245.8	287.006
TH-2	4850.51	-68246.6	290.177
TH-3	4870.08	-68247.1	298.613
TH-4	4913.51	-68249.1	309.89

なお、電気検層結果については、データ取得時の状況に関する情報から、比抵抗値の深度変更が必要と考え、図 5-3 に示すような考え方で、処理を施した。

図 5-2 には、この深度補正後のデータを用いている。

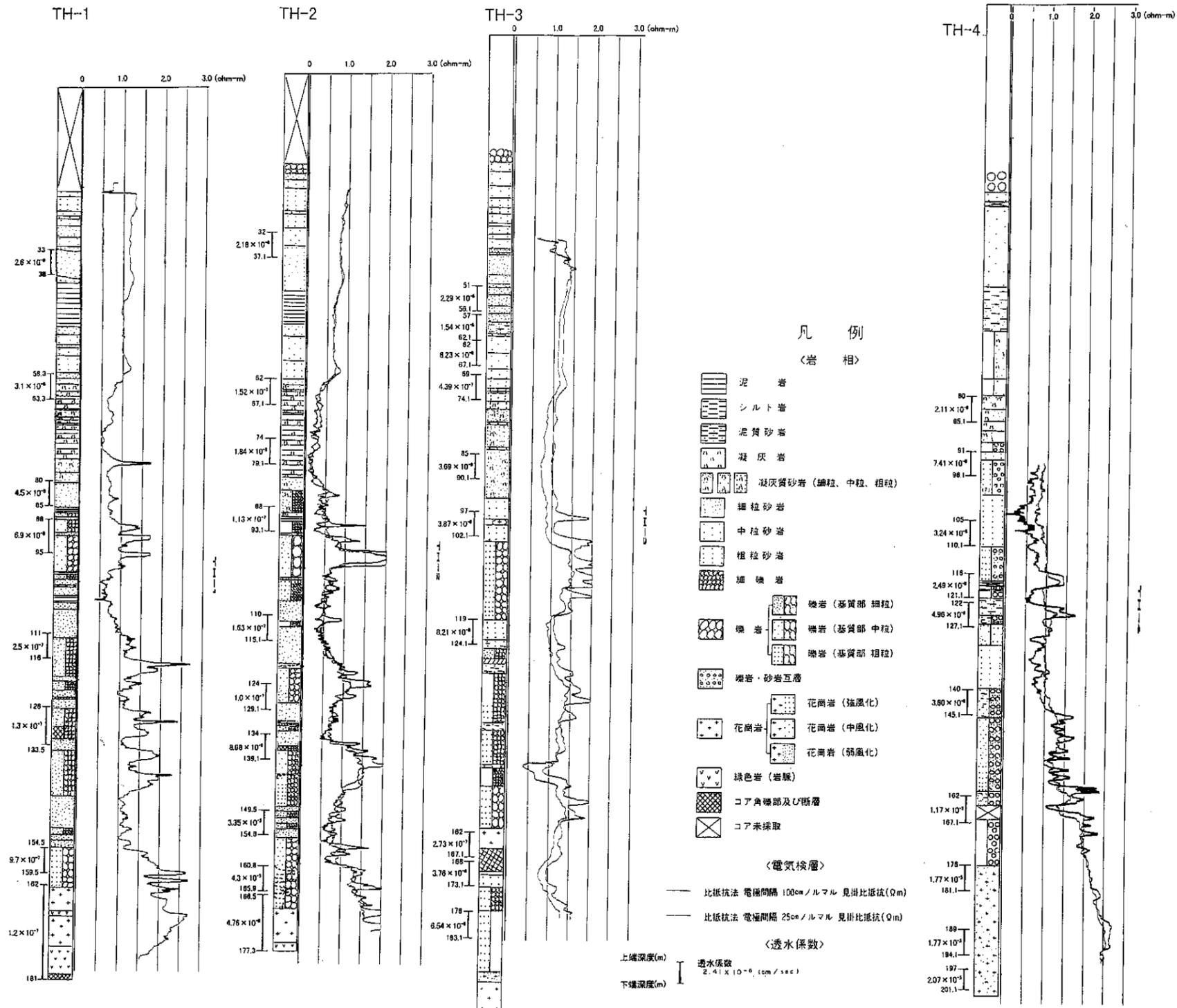


図 5-1 ボーリング柱状図

表 5-1(1) 透水試験結果 (TH-1, 2)

試錐孔名	種類	項目	上端深度	下端深度	値	単位
			(m)	(m)		
TH-1	低圧ルジオン	透水係数	33.0	38.0	2.60E-06	cm/sec
	低圧ルジオン	透水係数	58.3	63.3	3.10E-06	cm/sec
	低圧ルジオン	透水係数	80.0	85.0	4.50E-08	cm/sec
	低圧ルジオン	透水係数	88.0	95.0	6.90E-08	cm/sec
	低圧ルジオン	透水係数	111.0	116.0	2.50E-07	cm/sec
	低圧ルジオン	透水係数	126.0	133.5	1.30E-07	cm/sec
	低圧ルジオン	透水係数	154.5	159.5	9.70E-07	cm/sec
	低圧ルジオン	透水係数	162.0	181.0	1.20E-07	cm/sec
TH-2	低圧ルジオン	透水係数	32.0	37.1	2.18E-06	cm/sec
	低圧ルジオン	透水係数	62.0	67.1	1.52E-07	cm/sec
	低圧ルジオン	透水係数	74.0	79.1	1.84E-08	cm/sec
	低圧ルジオン	透水係数	88.0	93.1	1.13E-07	cm/sec
	低圧ルジオン	透水係数	110.0	115.1	1.63E-07	cm/sec
	低圧ルジオン	透水係数	124.0	129.1	1.00E-07	cm/sec
	低圧ルジオン	透水係数	134.0	139.1	8.68E-08	cm/sec
	低圧ルジオン	透水係数	149.5	154.6	3.35E-05	cm/sec
	低圧ルジオン	透水係数	160.8	165.9	4.30E-05	cm/sec
	低圧ルジオン	透水係数	166.5	177.3	4.76E-06	cm/sec

表 5-1(2) 透水試験結果 (TH-3, 4)

試錐孔名	種類	項目	上端深度	下端深度	値	単位
			(m)	(m)		
TH-3	低圧ルジオン	透水係数	51.0	56.1	2.29E-06	cm/sec
	低圧ルジオン	透水係数	57.0	62.1	1.54E-06	cm/sec
	低圧ルジオン	透水係数	62.0	67.1	8.23E-06	cm/sec
	低圧ルジオン	透水係数	69.0	74.1	4.39E-07	cm/sec
	低圧ルジオン	透水係数	85.0	90.1	3.69E-08	cm/sec
	低圧ルジオン	透水係数	97.0	102.1	3.87E-08	cm/sec
	低圧ルジオン	透水係数	119.0	124.1	8.21E-08	cm/sec
	低圧ルジオン	透水係数	162.0	167.1	2.73E-07	cm/sec
	低圧ルジオン	透水係数	168.0	173.1	3.76E-06	cm/sec
	低圧ルジオン	透水係数	178.0	183.1	6.54E-06	cm/sec
TH-4	低圧ルジオン	透水係数	80.0	85.1	2.11E-08	cm/sec
	低圧ルジオン	透水係数	91.0	96.1	7.41E-06	cm/sec
	低圧ルジオン	透水係数	105.0	110.1	3.24E-08	cm/sec
	低圧ルジオン	透水係数	116.0	121.1	2.49E-08	cm/sec
	低圧ルジオン	透水係数	122.0	127.1	4.96E-08	cm/sec
	低圧ルジオン	透水係数	140.0	145.1	3.60E-08	cm/sec
	低圧ルジオン	透水係数	162.0	167.1	1.17E-05	cm/sec
	低圧ルジオン	透水係数	176.0	181.1	1.77E-05	cm/sec
	低圧ルジオン	透水係数	189.0	194.1	1.77E-05	cm/sec
	低圧ルジオン	透水係数	197.0	201.1	2.07E-05	cm/sec

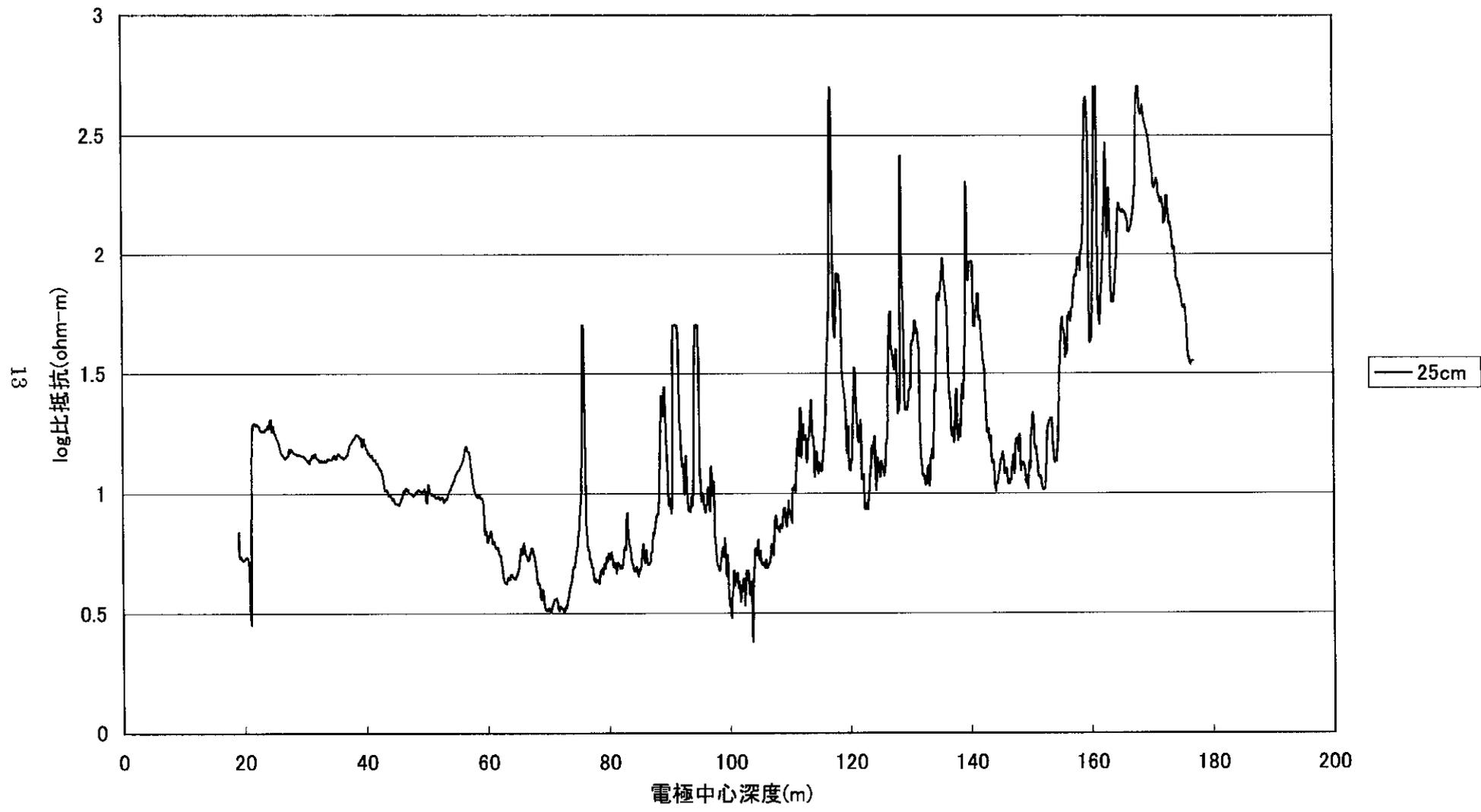


図 5-2(1) 電気検層結果 (TH-1)

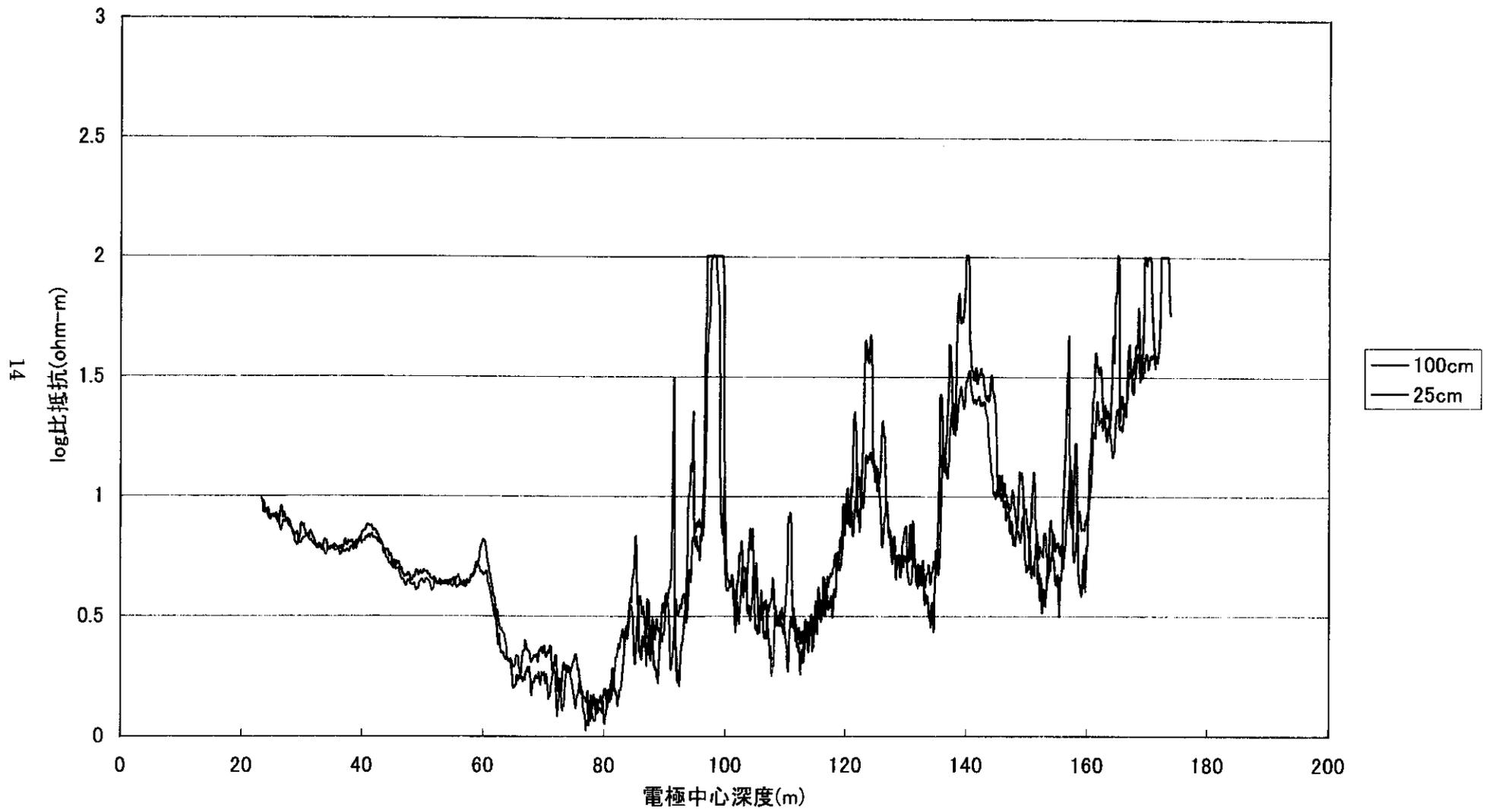


図 5-2(2) 電気検層結果 (TH-2)

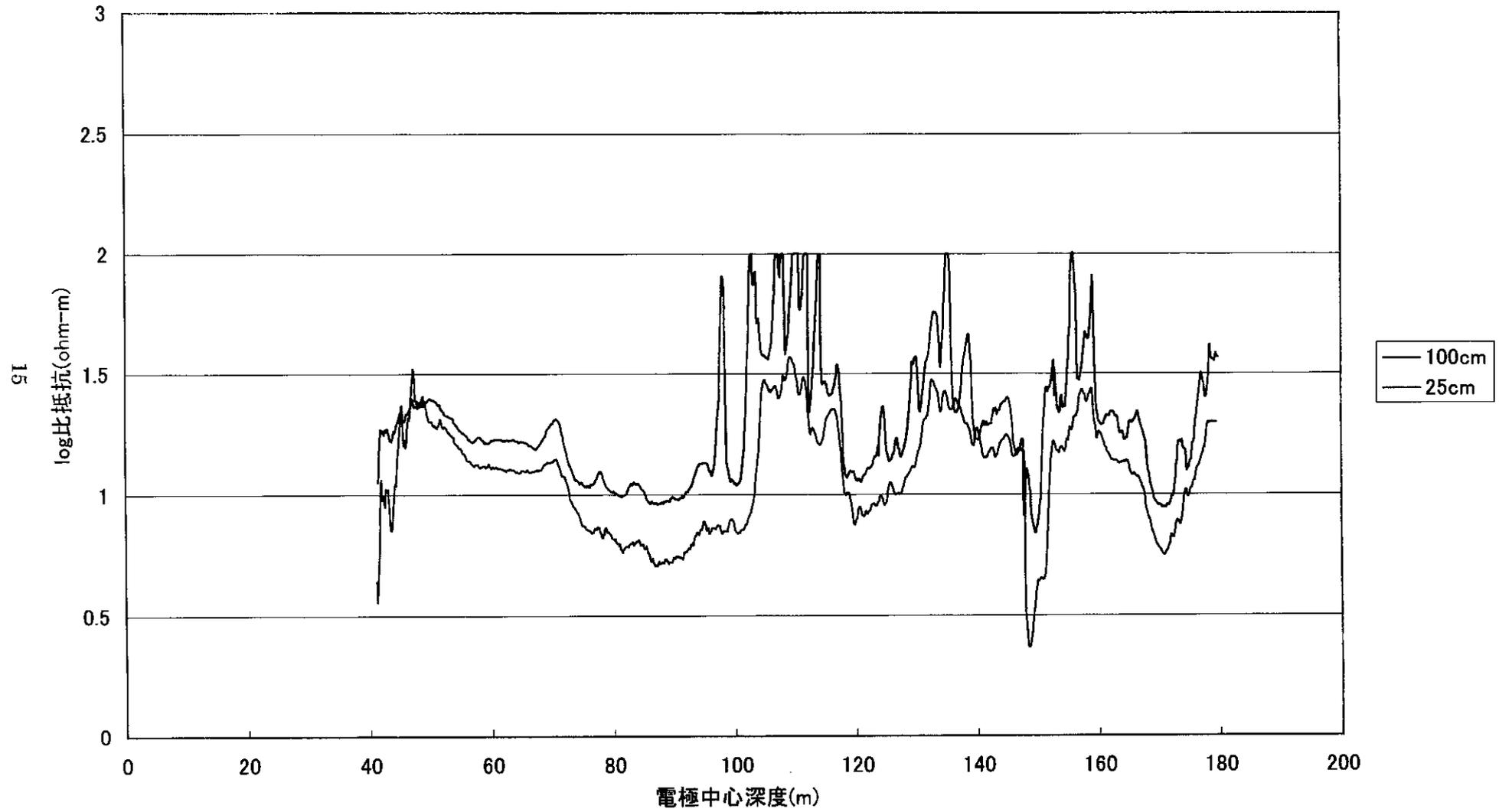


圖 5-2(3) 電氣檢層結果 (TH-3)

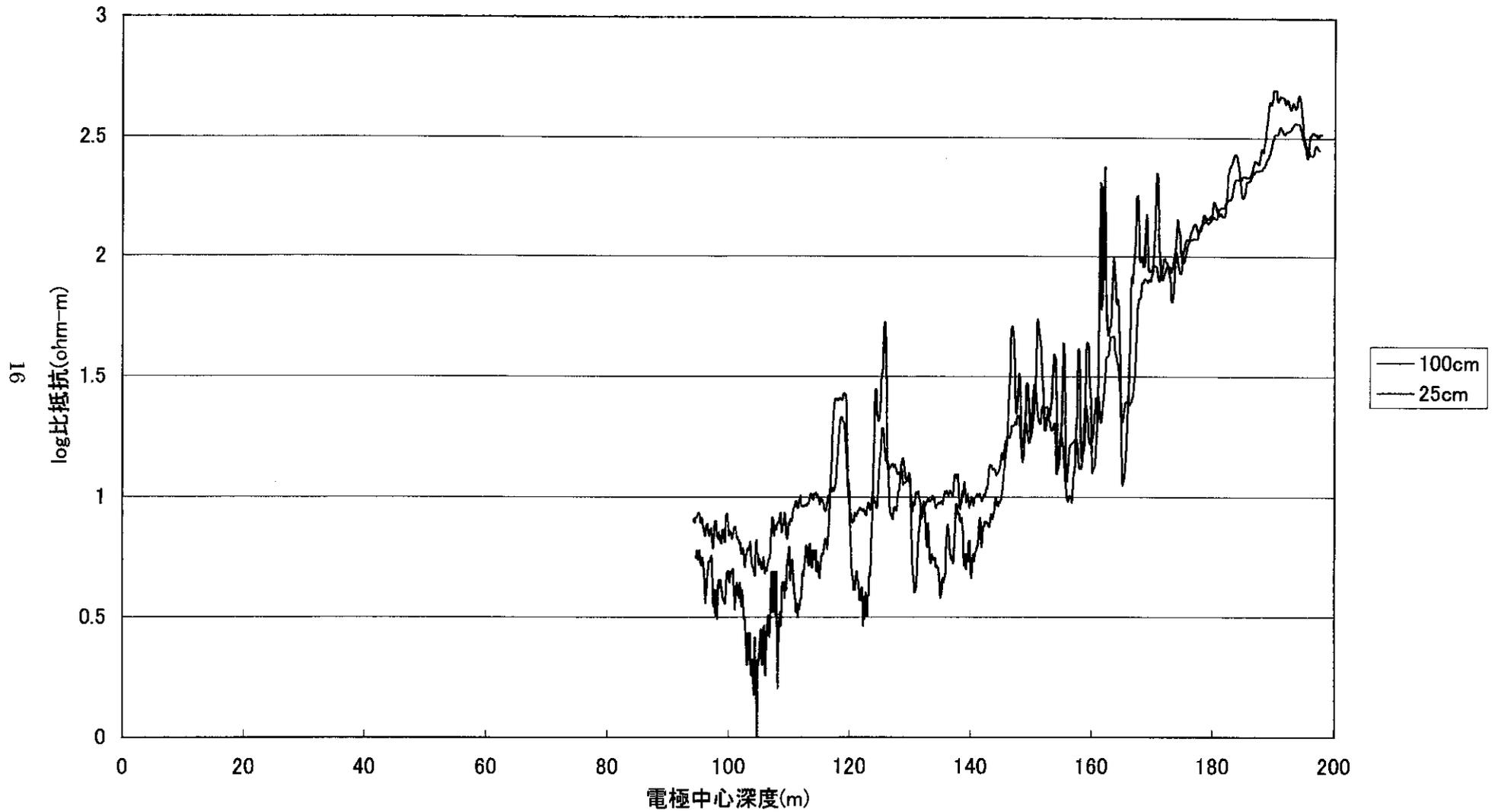


図 5-2(4) 電気検層結果 (TH-4)

「立坑掘削影響試験の試錐孔（TH シリーズ）における電気検層の深度について」

当時、電気検層を行った際、深度の基準は、最下部の電流電極にしていた（図 5-3 の A）。

デジタルデータは、アナログデータ（チャート紙）をデジタイズしたもので、特に深度補正を加えていない。従って、ロングノルマル（100cm）の値の深度を電極間隔（A-D）の中心（図 5-3 の LN の中心）とするためには、デジタルデータの深度から 50cm 引いた深度に補正する必要がある。また、ショートノルマル（25 cm）の値の深度を電極間隔（A-B）の中心（図 5-3 の SN の中心）とするためには、デジタルデータの深度から 12.5cm 引いた深度に補正する必要がある。

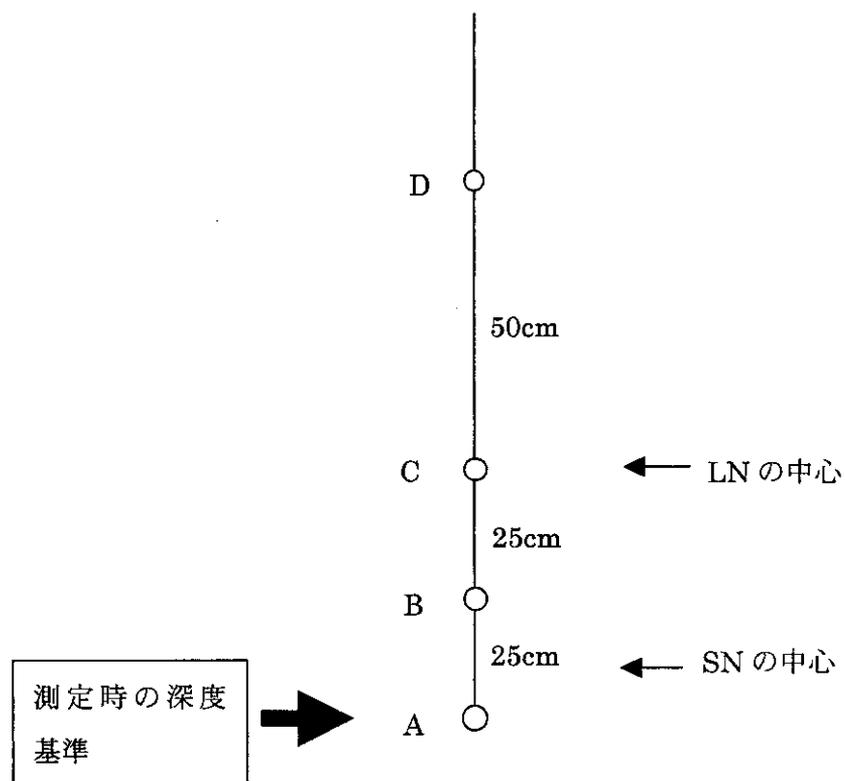


図 5-3 電気検層の電極の位置と深度補正について

5. 2 東濃鉱山周辺の堆積岩水理場の不確実性評価

5. 2. 1 ファジー地球統計

(1) 目的及び概要

地質環境の空間的不均一性を評価する際の最大の制約条件は、データの入手可能性である。水理学的不均一性の場合には、透水係数測定に要する時間とコストが比較的大きいため、地球統計学の最も古典的な適用事例である探鉱分野よりも、この制約条件は重要性が高いと考えられる。

この制約条件を緩和するために試みられている方法が、ソフトデータ（あるいは *uncertain* データ）の利用である(Chiles, 1976; Journel, 1986; Bardossy, 1988)。ソフトデータとは、当該地点の透水係数値と何らかの相関を有するような情報のことを指し、透水係数の直接的な測定結果（ハードデータ）の数及び位置の制約を緩和するために用いることができる。

ソフトデータを用いる際には、データの数値情報に加えて、その「確からしさ」を何らかの指標によって表現することが必要となる。このような指標は、確率(Chiles, 1976; Journel, 1986)及びファジーメンバーシップ(Bardossy, 1988)に大別される。確率を指標として用いた手法では、確率論的な演算のフレームワークがそのまま適用可能となることが利点であるが、一方、上述した意味での不確実性 (*uncertainty*) は、情報の不足に起因するものであり、本来、頻度に基づく確率の概念にはなじまない。この意味では、確率論的な取り扱いの確立されている統計的不均一性 (*variability*) とは全く異なるという点に注意することが必要である。実際、情報不足に起因する不確実性を確率として定量化することには本質的な困難が含まれ、また、不確実性を確率として表現して安全評価等に用いた場合には、不確実性のために見かけ上影響が低下するという矛盾 (リスク希釈) が生じることが知られている (Robinson and Cooper, 1995)。

確率論に代わって、ソフトデータを取り扱うための手法としては、ファジー理論に基づくものがある。ファジー理論は、不確実性を人間の判断の曖昧さとして認めることが立脚点となっており、確率論の場合のような、本来主観的な情報である「不確実性」を無理に客観化することによって生ずる種々の基本的問題を回避することが可能である (Robinson and Cooper, 1995)。

本研究は、ファジー理論に基づきハード及びソフトデータを併用して不均一な透水係数分布を推定する手法の開発を行うことを目的とする。また、この手法を東濃鉱山の TH-1～-4 孔を含む鉛直断面における透水係数分布不均一性の推定に適用することによって、手法の適用性についても検討を加えることとする。

(2) 手法

a. ファジー理論の基礎

(a) ファジー集合とメンバーシップ関数

集合を構成する個々の”もの”をその集合の要素または元という。

x が集合 A の要素であるとき、 x は A に属するといひ $x \in A$ と書く。また、 x が A の要素でないとき、 x は A に属さないといひ $x \notin A$ と書く。

例通学時間が 60 分以上の学生の集合	-----	自宅が <u>遠い</u> 学生の ‘集合’	
20 代の女性の集合	-----	-----	若い女性の ‘集合’
10,000 以上の実数の集合	-----	-----	大きい数の ‘集合’

左側はいずれも集合である。それぞれに対して右側は範囲がはっきりしないため、通常集合論では扱わない。

さて、条件あるいは性質 $P(x)$ を満たすような x の集合を、 $\{x : P(x)\}$ で表し、すべての要素を書き出すことができる場合、 x_1, x_2, \dots, x_n からなる集合を、 $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ で表す。

例 $\{1,2,3,4,5,6,7,8\}$ は $\{x : x \text{ は整数、} 1 \leq x \leq 8\}$ と書いてもよい。

集合 A のすべての要素が集合 B の要素であるとき、 A は B の部分集合であるといひ、 $A \subseteq B$ と書く。

$$(5.2.1-1) \quad A \subseteq B \Leftrightarrow (a \in A \Rightarrow a \in B)$$

全体集合 X の部分集合に A 対して、

$$(5.2.1-2) \quad C_A(x) = \begin{cases} 1 & (x \in A) \\ 0 & (x \notin A) \end{cases}$$

と定義される関数 C_A を A の特性関数(characteristic function)という(図 5.2.1.2.a-1)。

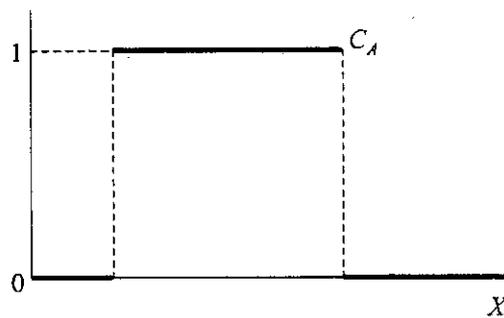


図 5.2.1.2.a-1 特性関数のグラフ

今、「教室が暑い」という言葉を、yes か no、1 または 0 という(二値論的な)考え方で 32°C 以上と約束すると、 33°C 、 34°C の場合は yes、 30°C 、 31°C の場合は no である。しかし、 32°C ならば yes、 31.9°C ならば no で yes と no が突如入れ換わるというのは我々の感覚に合わない、言い換えれば、「暑い」を yes か no で表現することは我々の感覚を正確には表さない。そこで 1 つの解決策として、評価の「度合い」を考え、0 と 1 の間の数値を割り振ることにしてみる。これによって「暑い」を数量的に表現することが可能となる。

集合 X の各要素に評価の「度合い」を割り当てる規則を定めることにより、次のような定義をする。

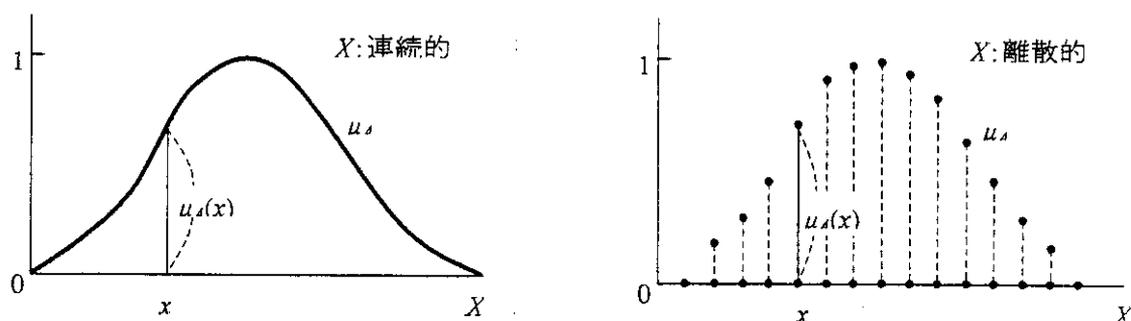


図 5.2.1.2.a-2 メンバーシップ関数のグラフ

集合 X におけるファジィ集合 A は、次のようなメンバーシップ関数 (membership function) μ_A によって特徴づけられる：

$$(5.2.1-3) \quad \mu_A : X \rightarrow [0, 1]$$

$\mu_A(x) \in [0, 1]$ を $x (\in X)$ が A に属するグレードまたは度合いという。この値が 1 に近ければ x の A に属する度合いが高く、0 に近ければ x の A に属する度合いが低いことを示している。

ファジィ集合は X を横軸にとり、 $x \in X$ に対し高さが $\mu_A(x)$ である点を取る時 (X が連続的ならば) 曲線 μ_A で表される (図 5.2.1.2.a-2)。とくに、 $\mu_A(x) = 1$ または 0 でそれ以外の値をとらないとき、 A は通常の場合である。これはファジィ集合の特別な場合でクリップ集合 (crisp set) と呼ばれる。

例 X を実数全体の集合とする。「絶対値が小さい実数」を表すファジィ集合 A のメンバーシップ関数は、たとえば、

$$\mu_A(x) = \frac{100}{100 + x^2} (x \in X)$$

で与えられる (図 5.2.1.2.a-3)。

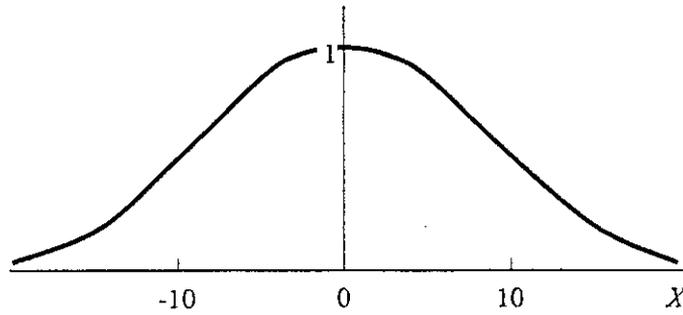


図 5.2.1.2.a-3 絶対値が小さい実数

例 ファジィ集合「背が高い」を A 、ある大学の学生全員の集合を S 、「背が高い学生」のファジィ集合を H とする(図 5.2.1.2.a-4、図 5.2.1.2.a-5)。

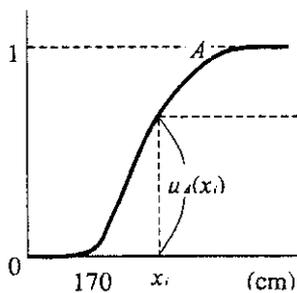


図 5.2.1.2.a-4 背が高い

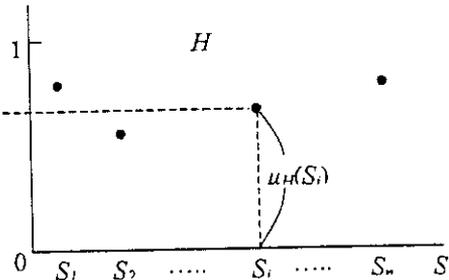


図 5.2.1.2.a-5 背が高い学生

S における H のメンバーシップ関数は、 S_i 君の身長が x_i cm ならば、図 5.2.1.2.a-4 より「背が高い」における x_i のグレードを求め、

$$(5.2.1-4) \quad \mu_H(S_i) = \mu_A(x_i)$$

とすればよい。

ファジィ集合の表記にあたっては、各要素のグレードを明示することが重要であり、次のように書く。

$$(5.2.1-5) \quad A = \{x, \mu_A(x) : x \in X\}$$

または、 X が有限集合のときは、

$$(5.2.1-6) \quad A = \{\mu_A(x_1)/x_1, \mu_A(x_2)/x_2, \dots, \mu_A(x_n)/x_n\} = \sum_{i=1}^n \mu_A(x_i)/x_i$$

X が連続集合のときは、

$$(5.2.1-7) \quad A = \int_x \mu_A(x)/x$$

のように表す。

例 X を実数全体の集合、 A を「0よりもかなり大きい実数」を表すファジィ集合とする。メンバーシップ関数は、たとえば、

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0 & (x \leq 0) \\ \frac{x^2}{x^2 + 100} & (0 < x) \end{cases}$$

で与えられる(図 5.2.1.2.a-6)。このとき A を、

$$A = \int_0^{\infty} \frac{x^2}{x^2 + 100} / x$$

のように表記する。

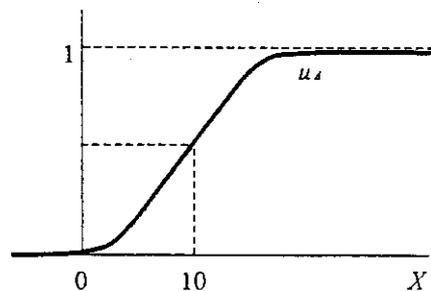


図 5.2.1.2.a-6 0よりもかなり大きい実数

ファジィ集合 A のメンバーシップ関数 $\mu_A(x)$ の値が正であるような $x \in X$ の

集合、すなわち、

$$(5.2.1-7) \quad \{x \in X : \mu_A(x) > 0\}$$

を A の台(support)または台集合という。

すべての $x \in X$ に対して、

$$(5.2.1-8) \quad \mu_A(x) \leq h$$

となる実数 μ のうち最も小さい数 (X における $\mu_A(x)$ の上限) を A の高さ(height) といい、 $\text{hgt}(A)$ と書く。特に、 $\text{hgt}(A)=1$ のとき、ファジィ集合 A は正規(normal) であるという。

(b) ファジー算法

ファジーメンバーシップは、人間の判断の確からしさという主観的な指標であるために、加減乗除といった（確率の場合に自明であるような）一般的な演算規則をそのまま適用することはできない。そこで、以下に示すようなファジー算法と呼ばれる演算が用いられることとなる。

あるファジー集合 A_1, A_2, \dots, A_n が与えられた時、これらの直積集合 $A_1 \times A_2 \times \dots \times A_n$ の一つの要素 $\underline{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ のメンバーシップは、次式により定義される（拡張原理）。

$$(5.2.1-9) \quad \mu(\underline{x}) = \text{Min}[\mu_1(x_1), \mu_2(x_2), \dots, \mu_n(x_n)]$$

ファジー算法は、この拡張原理に基づくものであり、例えば、ある関数 $f: A_1 \times A_2 \times \dots \times A_n \rightarrow Y$ によって算出される $y = f(\underline{x})$ のメンバーシップは、

$$(5.2.1-10) \quad \mu(y) = \mu(\underline{x}) = \text{Min}[\mu_1(x_1), \mu_2(x_2), \dots, \mu_n(x_n)]$$

となる。より一般的に、 f が一対一写像ではなく、従って、ある y を得るような

$$(5.2.1-11) \quad \underline{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$$

が複数存在する場合には、

$$(5.2.1-12) \quad \mu(y) = \text{Max}_i [\mu(\underline{x}_i) | f(\underline{x}_i) = y] = \text{Max}_i \left\{ \text{Min}_j [\mu_j(x_i^j)] \right\}$$

となる。上式は Min-Max ルールと呼ばれ、このルールを用いて、入力パラメータの不確実性が計算結果にどの様に伝播していくかを計算することが可能となる。また、この算法は、主観的な意見の数学的操作として確率よりも合理的なものであることが知られている (Robinson and Cooper, 1995)。

ファジー理論を地球統計学的手法に応用するには、以下の二つのアプローチが考えられる (Bardossy et al., 1988)。

- ・ 統計量やそのパラメータ値について直接メンバーシップを付与することにより不確実性を定義する (直接法)
- ・ データをファジー数とみなしてメンバーシップを付与し、このファジーデータセットから統計量やパラメータ値のメンバーシップ関数を算出することによって不確実性を算出する (間接法)

勿論、計算手順としては直接法の方が簡便であるが、この方法では、メンバーシップの設定が全て専門家の思考の中で行われ、顕在化しないという短所がある。これに対して、間接法では、次の様な利点が存在する。

- ・ 実際には測定が行われていない箇所についても、ソフトデータに基づきメンバーシップを設定することができる。
- ・ 実際に測定が行われていない箇所についてソフトデータや専門家の判断に基づくメンバーシップを与えて、統計量やそのパラメータ値のメンバーシップ関数を算出しておき、これらの箇所において実測が行われる毎にハードデータで置き換え、順次、統計量やパラメータ値のメンバーシップ関数の評価を改訂していくことにより、調査履歴に対応した不確実性の変化をモニターすることができる。

できる。

そこで、以下では、間接法に焦点をあてて手法の開発を行うこととする。

b. ファジークリッキング

(a) ファジーバリオグラム

地球統計学において空間的不均一性をモデル化する際には、不均一性のパターンをバリオグラムと呼ばれる統計量によって表現することが一般的である (Chiles and Delfiner, 1999)。

ある物理量 Z について、空間的な分布を有するデータセット $\{z(x_i)\}$ が与えられているものとし (ただし、 $\{x_i\}$ はデータの与えられている地点の集合を表す)、まず、簡単のため、 $\{z(x_i)\}$ はクリスプな集合であると仮定する。この時、バリオグラム $\gamma(h)$ は次式によって定義される。

$$(5.2.1-13) \quad \gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{|x_i - x_j| = h} |z(x_i) - z(x_j)|^2$$

ただし、 $N(h)$ は、距離 h だけ離れた地点の組の数を表す。

さて、 $\{z(x_i)\}$ がファジー数の集合である場合には、バリオグラム $\gamma(h)$ も決定論的には定義されず、やはり、ファジー数となる。ファジーバリオグラムを定義するために、まず、データセットをファジー数として定義し、位置 x_i における Z の値が z であることのメンバーシップを $\mu(x_i, z)$ として表す。また、各点 x_i における Z の値を任意に多数回抽出し、 k 回目の試行の結果が、 $\{z^k(x_i)\}$ であるとする。この時、各点における抽出値のメンバーシップは、 $\mu(x_i, z^k(x_i))$ となる。

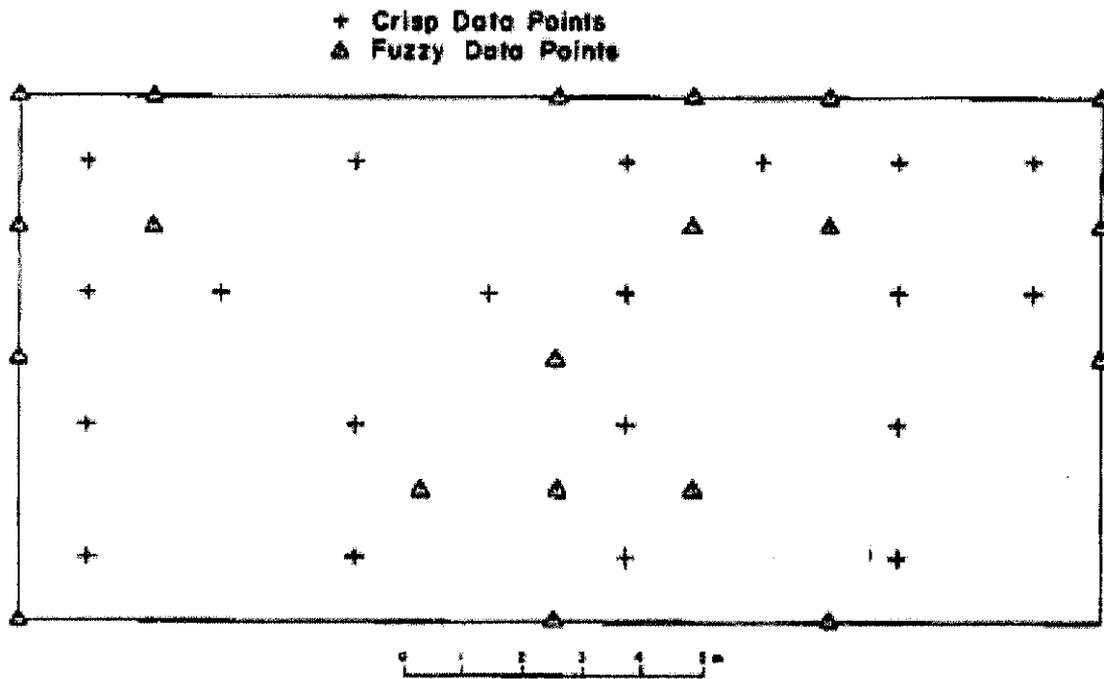
以上の前提条件の下で、ファジーバリオグラム $\mu(h, \gamma)$ (離間距離 h においてバリオグラムの値が γ となることのメンバーシップ) は、次式によって定義されることとなる。

$$(5.2.1-14) \quad \mu(h, \gamma) = \text{Max}_k \left\{ \text{Min}_i [\mu(x_i, z^k(x_i))] \mid \gamma = \frac{1}{2N(h)} \sum_{|x_i - x_j| = h} |z^k(x_i) - z^k(x_j)|^2 \right\}$$

上式は、各試行において作成されたバリオグラムのメンバーシップが、当該試行で抽出された各点の数値に対応するメンバーシップ $\mu(x_i, z^k(x_i))$ の最小値によって定まり、また、離間距離 h においてバリオグラムの値が γ となることのメンバーシップ $\mu(h, \gamma)$ は、多数の試行のうち $\mu(h, \gamma)$ を満たすもののメンバーシップの最大値を採ることを意味している。

Bardossy 等の研究例におけるファジーデータを図 5.2.1.2.b-1 に、また、これに基づき作成されたファジーバリオグラムの例を図 5.2.1.2.b-2 に示す。

a) ハードデータ (+) 及びソフトデータ (Δ) の共存するデータセット



b) ソフトデータに基づき推定された透水係数のメンバーシップ関数

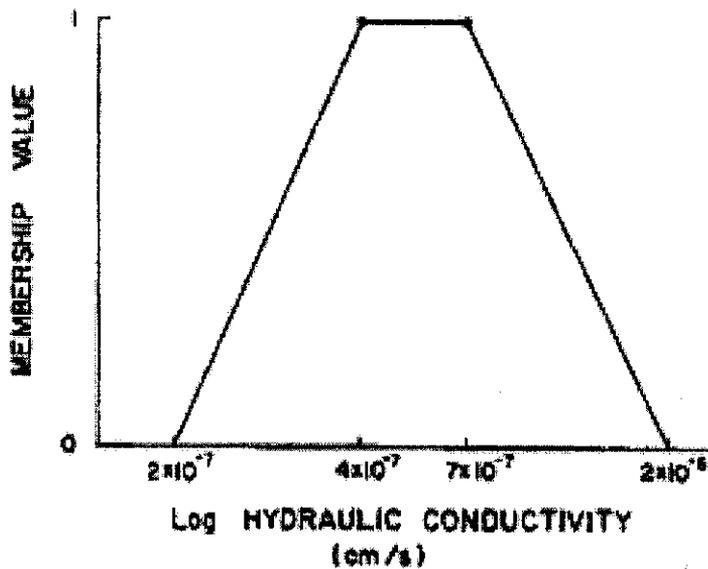


図 5.2.1.2.b-1 既往の研究例におけるファジーデータセット (Bardossy, 1988)

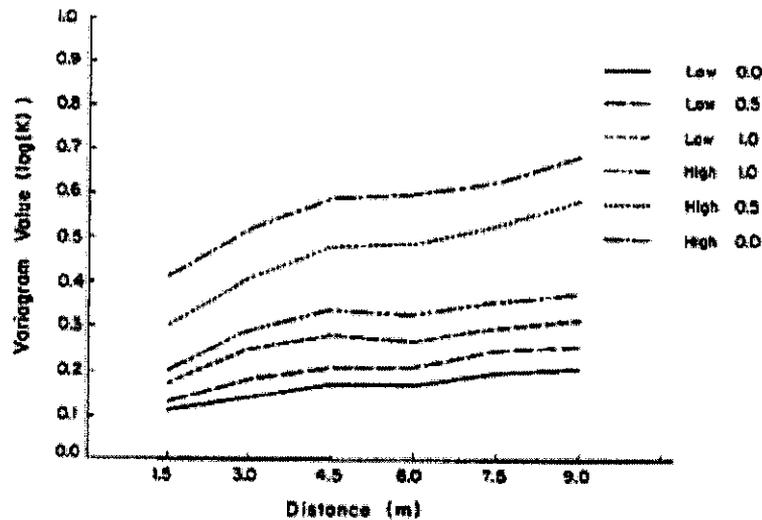


Fig. 6. Fuzzy variogram of permeability estimated using the extension principle.

図 5.2.1.2.b-2 ソフトデータを含むデータセットから作成されたファジーバリオグラム(Bardossy, 1988)

(b) リニアクリッキング

あるメンバーシップ μ に対応するファジーバリオグラムの値は、区間として与えられることとなる。以下では、この区間の中に含まれるバリオグラムの代表（多くの場合は、区間中央値に対する最小二乗フィットとして求められる）をクリस्पなバリオグラムとして用いることとし、これを $\hat{\gamma}(h, \mu)$ とする。

以下の仮定の下に、 N 個のデータを含むデータセット $\{Z(x_i)\}$ から、欠測地点 x_0 における最良推定値 $Z^*(x_0)$ は、Ordinary kriging によって(5.2.1-15)式のように、全ての測定データの線形和として算出される（例えば、de Marsiley, 1989）。

- ・ 対象とする不均一分布が本質的定常過程である
- ・ 期待値は一定である（ただし、未知）
- ・ x_0 における未知の欠測値 $Z(x_0)$ との二乗残差の期待値 $E[Z^*(x_0) - Z_0]^2$ を最小とするような $Z^*(x_0)$ を最良とみなす

$$(5.2.1-15) \quad Z^*(x_0) = \sum_i \lambda_i(x_0) Z(x_i)$$

ただし、定数 λ_i 及びラグランジュ乗数 μ は次式を解くことによって与えられる。

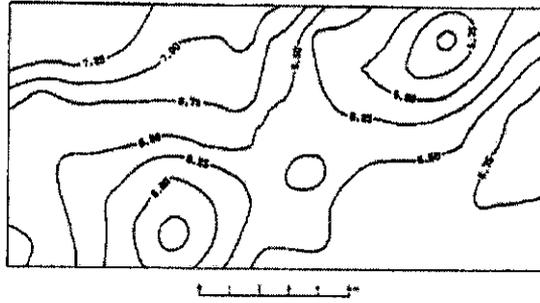
$$(5.2.1-16) \quad \begin{aligned} \sum_i \lambda_i(x_0) &= 1 \\ \sum_j \lambda_j(x_0) \gamma(|x_i - x_j|) + \mu &= \gamma(|x_i - x_0|) \end{aligned}$$

なお、 x_0 における未知の欠測値 $Z(x_0)$ と $Z^*(x_0)$ との二乗残差の期待値 $E[Z^*(x_0) - Z_0]^2$ として定義されるクリッキングバリエンス $\text{var}(x_0)$ は、次式によって定義されることとなる（例えば、de Marsiley, 1989）。

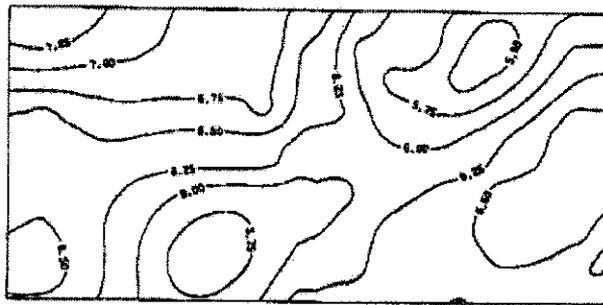
$$(5.2.1-17) \quad \text{var}(Z^*(x_0) - Z(x_0)) = E\left[(Z^*(x_0) - Z(x_0))^2\right] = \sum_i \lambda_i(x_0) \gamma(|x_i - x_j|) + \mu$$

ファジーデータセット $\mu(x_i, z)$ の場合には、まず、注目するメンバーシップレベル μ を指定する。この時、各点のメンバーシップ関数から、 μ に対応する Z の値の変動範囲が導出される（これを、 $I(x_i, \mu)$ とする）。ここで、各点における $I(x_i, \mu)$ から代表点を選出し、これに対して(5.2.1-15)及び(5.2.1-17)のシンプルクリッキングを行うことによって、当該メンバーシップレベルのクリッキングが得られることとなる。なお、代表点としては、各点における $I(x_i, \mu)$ の上限あるいは下限が用いられることが多い。

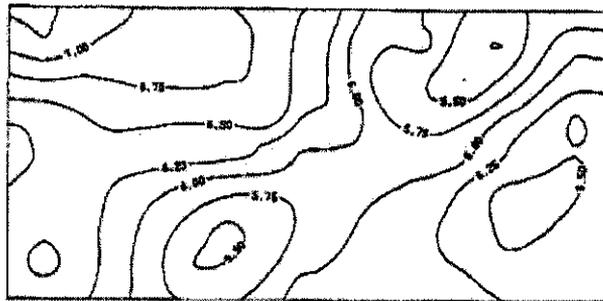
Bardossy 等によるファジークリッキングの例を図 5.2.1.2.b-3 に示す。



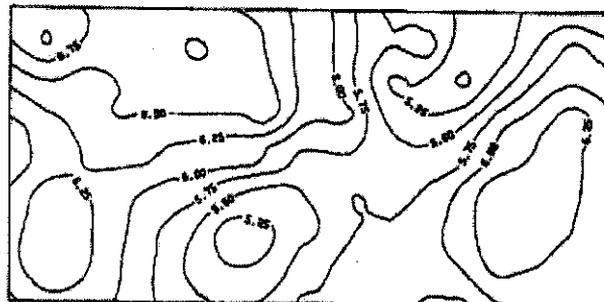
メンバーシップ0 下限の透水係数クリッキング結果



メンバーシップ1 下限の透水係数クリッキング結果



メンバーシップ1 上限の透水係数クリッキング結果



メンバーシップ0 上限の透水係数クリッキング結果

図 5.2.1.2.b-3 ファジークリッキングにより得られた各メンバーシップレベルの透水係数分布の例 (Bardossy, 1998)

c. ファジーシミュレーション

クリッキングは、空間的不均一性を前提として、各地点における未測定値についての最良推定値を統計的に算出する手法である。ただし、注意を要する点は、クリッキングによって得られた結果は、当該物理量の最良推定値の分布であり、物理量自体の分布を示すものではないという点である。つまり、実際の物理量の分布は、各点におけるクリッキング結果を中心として上下にばらつくこととなる。このため、一般に、クリッキング結果は、実際の空間分布における不均一性を過小評価する傾向がある。この点は、推定された物理量の空間分布に基づき、あるプロセスの解析を行う場合には特に重要である。例えば、透水係数の空間分布を推定し、さらに、この結果に基づき流動解析や物質移動解析を行う場合には、クリッキング結果を用いることはできない。

上記の理由から、クリッキングに代わって、現実的な空間分布をシミュレーションする手法が各種開発されている。特に、バリオグラム $\hat{\gamma}(h)$ が既知の時、対応する自己相関構造を有する空間分布は、スペクトル法等によって比較的容易に作成することができる(Chiles and Delfiner, 1999)。また、このようなシミュレーションは統計的なものであり、多数作成することができる(この場合、個々のシミュレーション結果をリアライゼーションと呼ぶ)。さらに、各リアライゼーションが線形演算について閉じている場合(つまり、複数のリアライゼーション間の重みづけされた線形和が、所定のバリオグラムを満足する場合)には、多数のリアライゼーション間の重みづけされた線形和を用いて、各測定地点において実測値が再現されるようなシミュレーションを行うことができる(コンディショニングされたシミュレーション)。このようなコンディショニングの手法は、以下のように、ファジーデータセットの場合にも拡張することができる。

n 点から成るファジーデータセット $\mu(x_i, z)$ 及び各メンバーシップに対応する(クリस्पな)バリオグラム $\hat{\gamma}(h, \mu)$ が与えられた時、まず、コンディショニングされていない $N (>n)$ 個のリアライゼーション $\{R_i\}$ を作成することができる。そして、前項と同様に、メンバーシップレベル μ における各点の区間 $I(x_i, \mu)$ から代表点を選出し、得られたデータセットを $\{\hat{z}(x_i, \mu)\}$ とする。この時、以下の最適化問題を解くことによって、各測定地点で $\{\hat{z}(x_i, \mu)\}$ の値を再現するようなコンディショニングを行うことができる。

コンディショニングのための最適化問題

$$(5.2.1-18) \quad \begin{aligned} \sum_i \alpha_i &= 1 \\ \sum_i \alpha_i R_i(x_j) &= \hat{Z}(x_j, \mu), \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad j = 1, 2, \dots, n \end{aligned}$$

という制約条件の下に（ただし、 x_j は測定地点）、分散 σ_R^2

$$(5.2.1-19) \quad \begin{aligned} \sigma_R^2 &= \frac{\int_{\Omega} [R(x) - m]^2 dx}{\int_{\Omega} dx} \\ R(x) &= \sum_i \alpha_i R_i(x) \end{aligned}$$

が $\{\hat{Z}(x_i, \mu)\}$ の分散に最も近いような、重み係数ベクトル $(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N)$ を求める。こうして得られた合成リアライゼーション $R(x)$ は、(5.2.1-18)の制約条件から明らか通り、

- ・各測定地点において実測値を再現し
- ・所定の期待値を有し

また、(5.2.1-19)から、

- ・標本（実測データセット）

に近い分散を有するものとなる。また、前出の仮定から、 $R(x)$ の自己相関構造は、

- ・当該メンバーシップに対応する（クリस्पな）バリオグラム $\hat{\gamma}(h, \mu)$

を満足する、つまり、コンディショニングされたシミュレーションとなる。

5. 2. 2 透水係数分布のメンバーシップ関数

(1) 透水試験結果についてのメンバーシップ関数

透水係数の値については、低圧ルジオン試験による測定結果が得られているが、一定の誤差が存在するため、この値がそのまま真値であるとは断言できない。そのため、専門家へのインタビューに基づき、透水係数 k のメンバーシップ関数を以下のように設定した。

「 $k > 10^{-7}$ cm/s」のとき、

$$\log U_0 = \log k^* + 1, \quad \log L_0 = \log k^* - 1, \quad U_1 = 1.2k^*, \quad L_1 = 0.8k^*$$

$$k \leq 10^{-7} \text{ cm/s のとき、} \log U_0 = \log k^* + 1, \quad L_0 = 10^{-10}, \quad U_1 = 1.2k^*, \quad L_1 = 0.5k^*$$

但し、 k^* は透水係数の測定値である。

また、 U_0 、 L_0 、 U_1 、 L_1 はメンバーシップ関数に対応する台形の頂点を示しており、図示すると次のようになる（図 5.2.2.1-1）。

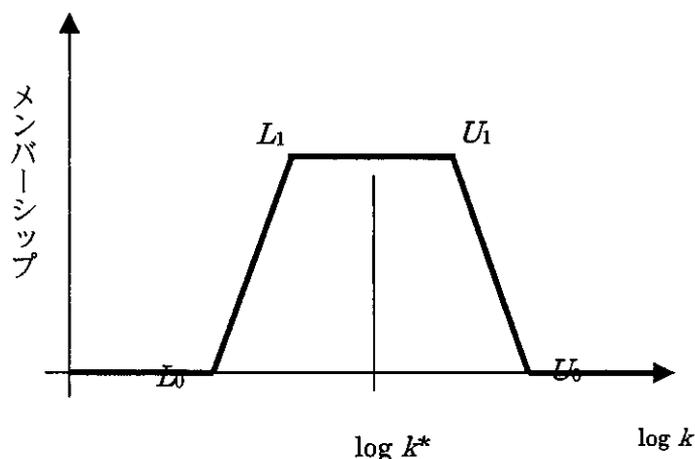


図 5.2.2.1-1 U_0 、 L_0 、 U_1 、 L_1 のメンバーシップ関数上での位置関係

なお、 10^{-7} cm/s を境にメンバーシップ関数の形状が異なるのは、 10^{-7} cm/s 以下については低圧ルジオン試験の精度が低下するためである。以下に $k=10^{-6}$ (左)、 $k=10^{-8}$ (右) のときのメンバーシップ関数の例を示す。

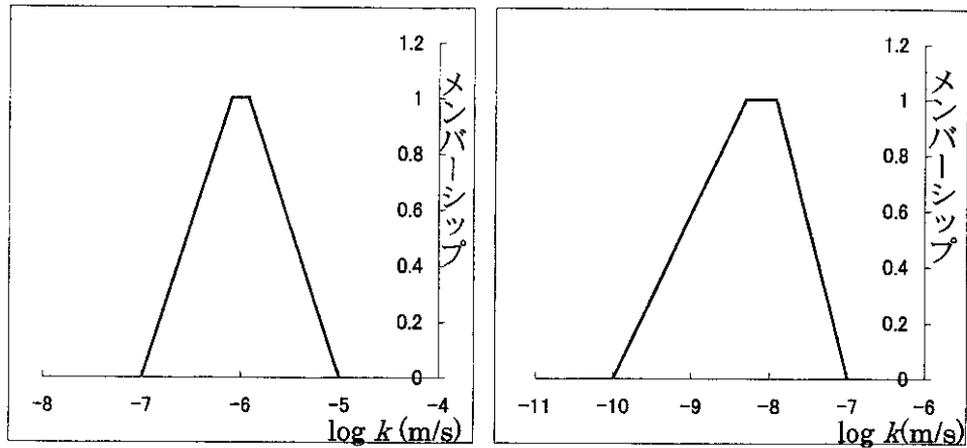


図 5.2.2.1-2 透水試験に基づく $\log k$ のメンバーシップ

(2) 比抵抗値から推定される透水係数についてのメンバーシップ関数
比抵抗値についても、測定誤差を考慮して、インタビュー結果から、メンバーシップ関数を以下の様に定義するものとした。

比抵抗の真値を ρ 、実測値を ρ^* とすれば、

$$(5.2.2-1) \quad \rho = \alpha \rho^*$$

と表現でき、このときの α のメンバーシップ関数は図 5.2.2.2-1 のように表される。

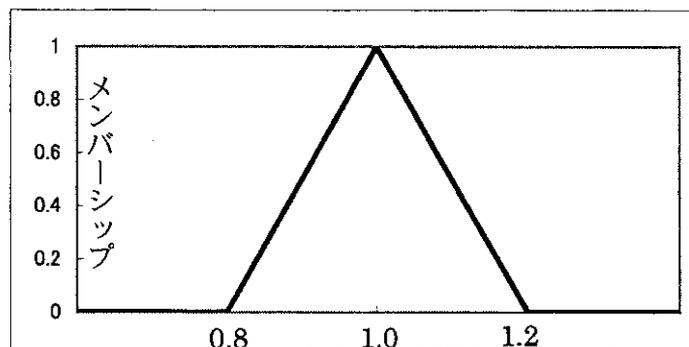


図 5.2.2.2-1 α のメンバーシップ分布

次に、比抵抗値から、透水係数への変換を次の様に行う。試錐孔において測定された電気比抵抗と対数透水係数データに対する線形回帰分析を行い、比抵

抗と透水係数の対数との関係を

$$(5.2.2-2) \quad \begin{aligned} \log k_{\rho} &= a + b\rho \\ &= a + \alpha b\rho^* \end{aligned}$$

と表現する。この結果、比抵抗（横軸）と透水係数の対数（縦軸）は、図 5.2.2.2-2 のような相関を示し、回帰式中の定数、標準偏差 σ は以下のとおりとなった。

$$a = -6.75063, \quad b = 0.0275526$$

$$\sigma = 0.855551$$

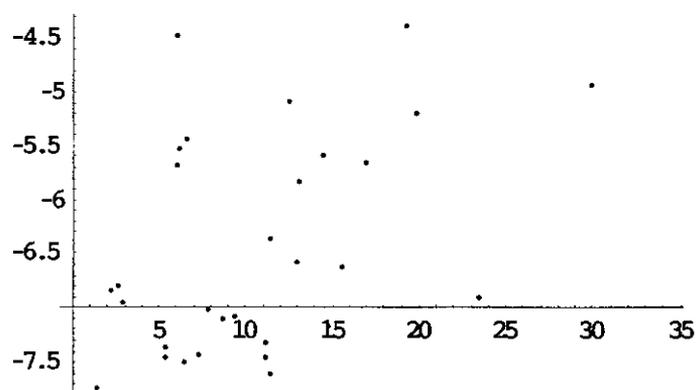


図 5.2.2.2-2 比抵抗（横軸）と透水係数の対数（縦軸）のプロット

次に、この回帰式を用いて、 ρ から $\log k$ を推定するが、この推定のプロセスにも誤差が含まれることから、次式に誤差 ε を含めるものとし、

$$(5.2.2-2) \quad \begin{aligned} \log k &= \log k_{\rho} + \varepsilon \\ &= a + b\rho + \varepsilon \\ &= a + \alpha b\rho^* + \varepsilon \end{aligned}$$

ε はメンバーシップ関数により表現されるものとする。

ε のメンバーシップ関数は、専門家へのインタビューに基づき、以下のケース 1、あるいはケース 2 のいずれかによって表されるものとした（図 5.2.2.2-3）。

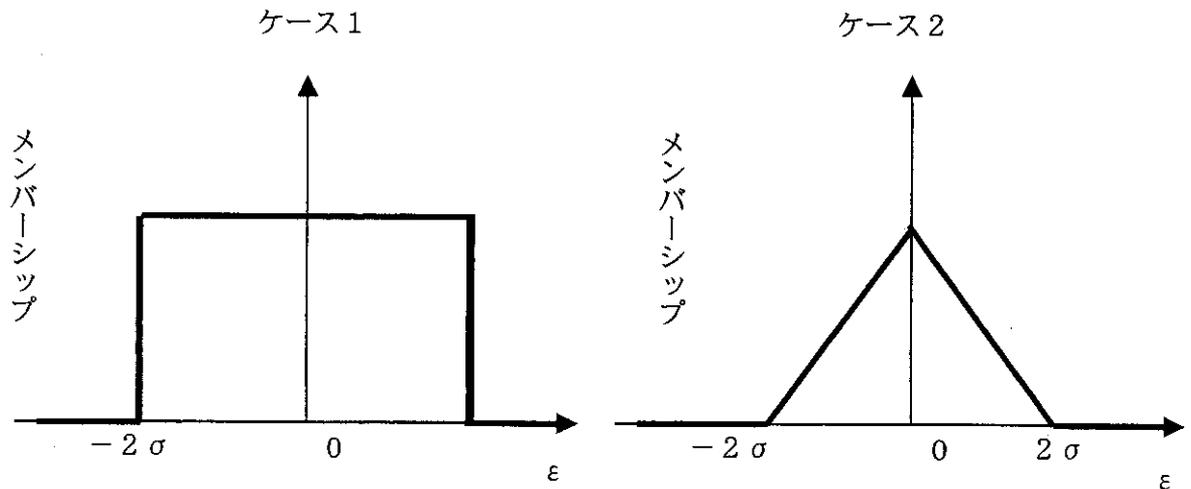


図 5.2.2.2-3 ε のメンバーシップ関数

最後に、 $\log k$ のメンバーシップ関数は、(5.2.2-3) 式、及び図 5.2.2.2-2 と図 5.2.2.2-3 に対して Min-Max ルールを適用することによって、次の様に表現される。

$$(5.2.2-4) \quad \mu(\log K) = \underset{\alpha, \varepsilon}{\text{Max}} \cdot \underset{\alpha, \varepsilon}{\text{Min}} [\mu(\alpha), \mu(\varepsilon) \mid a + \alpha b \rho^* + \varepsilon = \log K]$$

この関数の形状は、 α と ε のメンバーシップ、及び (5.2.2-3) 式から推定することができる。例えば、ケース 1 の場合、 $\log k$ のメンバーシップが 1 となるためには、 α と ε のメンバーシップはいずれも 1 でなければならず、このため、 $\alpha = 1$ かつ $-2\sigma \leq \varepsilon \leq 2\sigma$ が必要となる。そこで、 $(\alpha, \varepsilon) = (1, -2\sigma), (1, 2\sigma)$ を (5.2.2-3) 式に代入することによって、それぞれ、メンバーシップ 1 の $\log k$ の区間の下限と上限が指定される。同様に、正の小さい定数 δ をとり、これに対して $(\alpha, \varepsilon) = (\alpha^-(\delta), -2\sigma), (\alpha^+(\delta), 2\sigma)$ を (5.2.2-3) 式に代入すれば、メンバーシップレベル δ における $\log k$ の区間が算出される（ここで、 $\alpha^-(\delta)$ 及び $\alpha^+(\delta)$ は、それぞれメンバーシップレベル δ における α の区間の下限と上限を示す）。また、 $\delta \rightarrow 0$ の極限をとれば、 $\log k$ のメンバーシップ関数に対応する台形の底辺が求まる。こうして導出した $\log k$ のメンバーシップ関数の例を図 5.2.2.2-4 に示す。

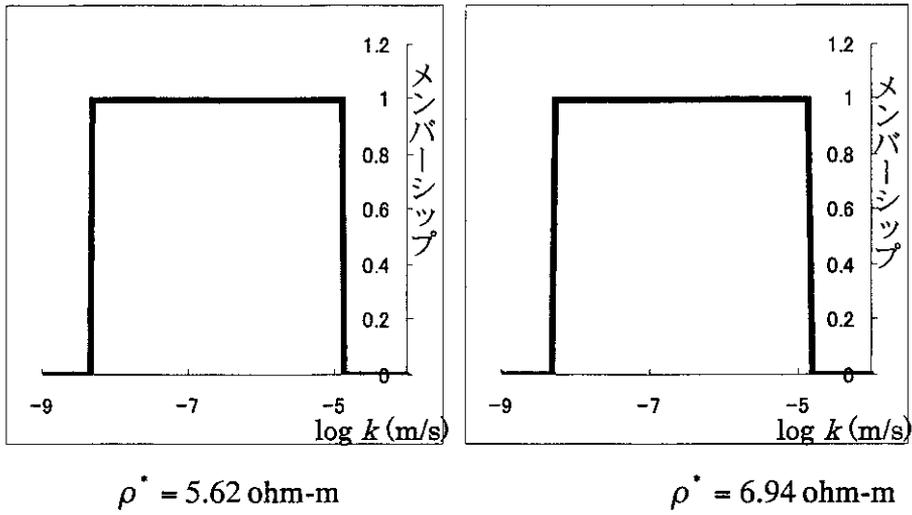


図 5.2.2.2-4 $\log k_p$ のメンバーシップ分布の例 (ケース 1)

同様にケース 2 の場合には、次の様なメンバーシップ関数が得られる。ε のメンバーシップ関数が三角形になることを反映して、ケース 1 とは異なり、 $\log k$ のメンバーシップも三角形となっている (図 5.2.2.2-5)。

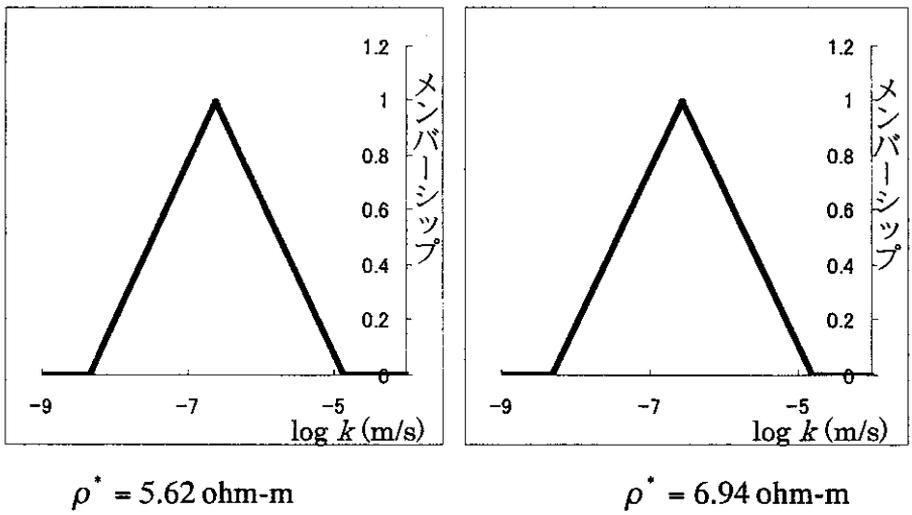


図 5.2.2.2-5 $\log k_p$ のメンバーシップ分布の例 (ケース 2)

5. 2. 3 解析結果

(1) ファジークリッキング

a. ファジーバリオグラム

5.2.1(2)b に述べた手法により、5.2.2.において作成した東濃鉦山 TH-1~4 孔透水係数分布のファジーメンバーシップ関数に対して図 5.2.3.1.a-1 に示すようにファジーバリオグラムを算出した。なお、全領域のデータを用いてバリオグラムを作成すると、下図の通り、非単調なものになってしまう。これは、解析対象領域に断層が含まれ、その上と下の領域をまたいでバリオグラムを定義することが不適切であることを示すものと考えられる。

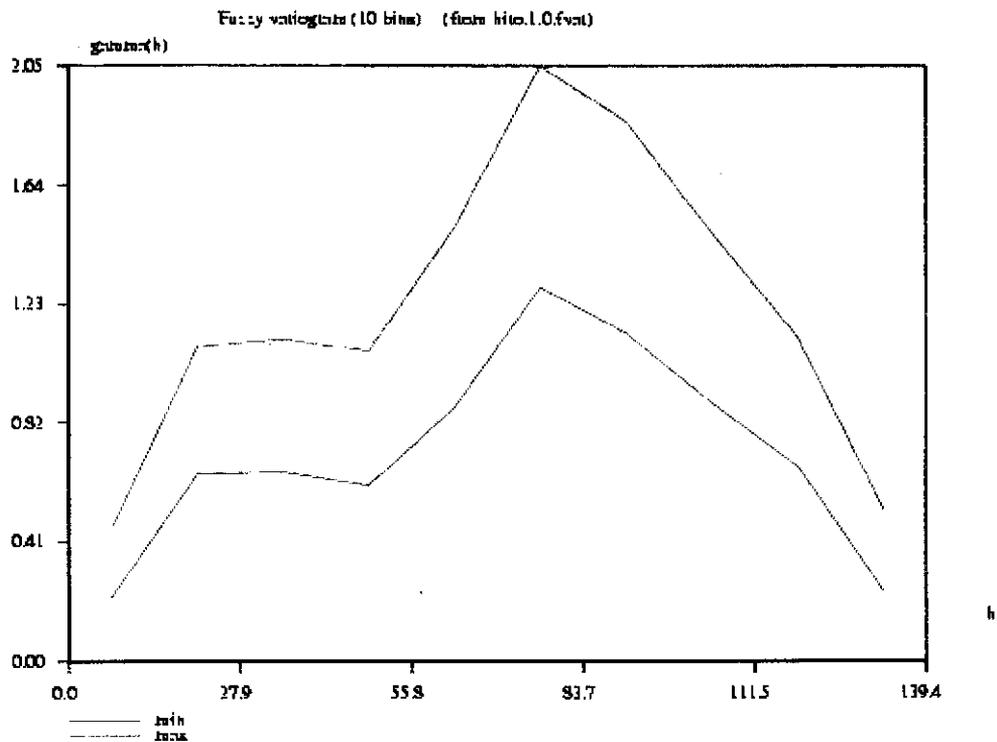


図 5.2.3.1.a-1 断層の上下にある全てのデータを用いて算出したバリオグラムの例(メンバーシップ 1.0)

そこで、全データを断層より上及び下の領域に区分して、それぞれに対してバリオグラムを作成することとした。断層よりも上の透水試験データのみを用

いた場合の例を図 5.2.3.1.a-2~4 に示す。

図 5.2.3.1.a-5 は、上記のファジーバリオグラム（メンバーシップ 1.0）に対して、代表的なクリस्पバリオグラムを抽出した結果である。ここでは、各離間距離における γ の変動区間の中央値に対して、フラクタル（べき乗則）モデル（例えば Chiles and Delfiner, 1999）

$$(5.2.3-1) \quad \gamma(h) = ch^\alpha$$

を最小二乗フィッティングすることによって抽出を行っている。なお、比抵抗値を含めたデータセットに対するファジーバリオグラム及びフラクタルモデルの例（メンバーシップ 1.0）を図 5.2.3.1.a-6 に示す。バリオグラムを作成するという目的のためには、透水試験結果の点数で十分であると考えられること、そして、同目的のためには、比抵抗測定結果は精度の制約のためにプラスの寄与をするものではないこと、から、以下の検討においては、各メンバーシップレベルにおいて、透水試験結果のみから算出されるバリオグラムを用いることとする。

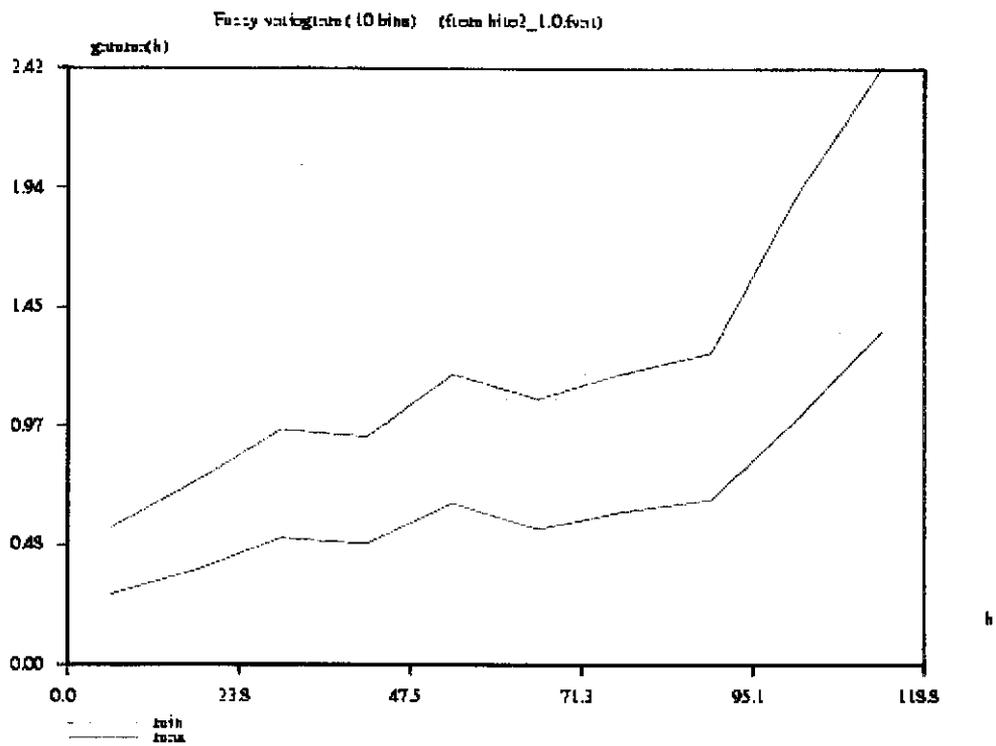


図 5.2.3.1.a-2 透水試験結果から作成したファジーバリオグラム
(メンバーシップ 1.0)

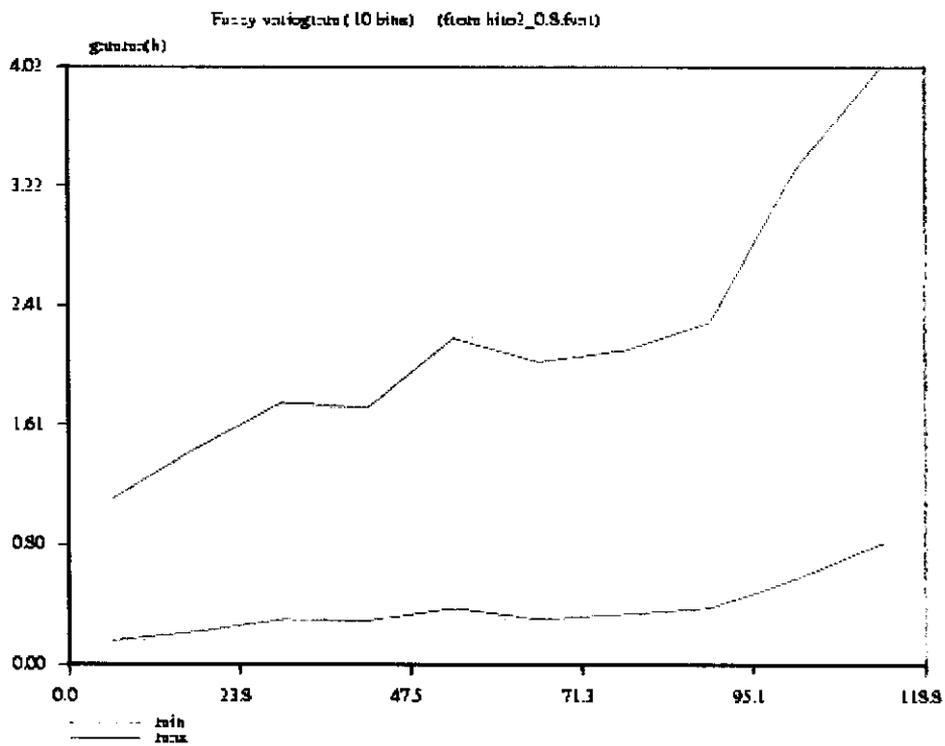


図 5.2.3.1.a-3 透水試験結果から作成したファジーバリオグラム
(メンバーシップ 0.8)

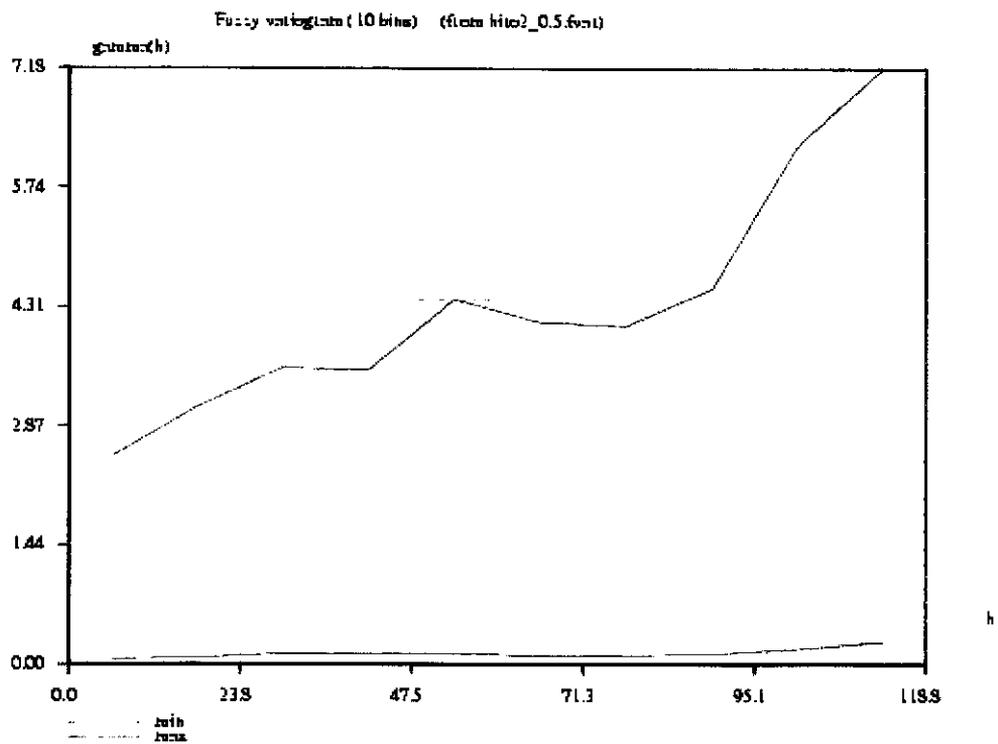


図 5.2.3.1.a-4 透水試験結果から作成したファジーバリオグラム
(メンバーシップ 0.5)

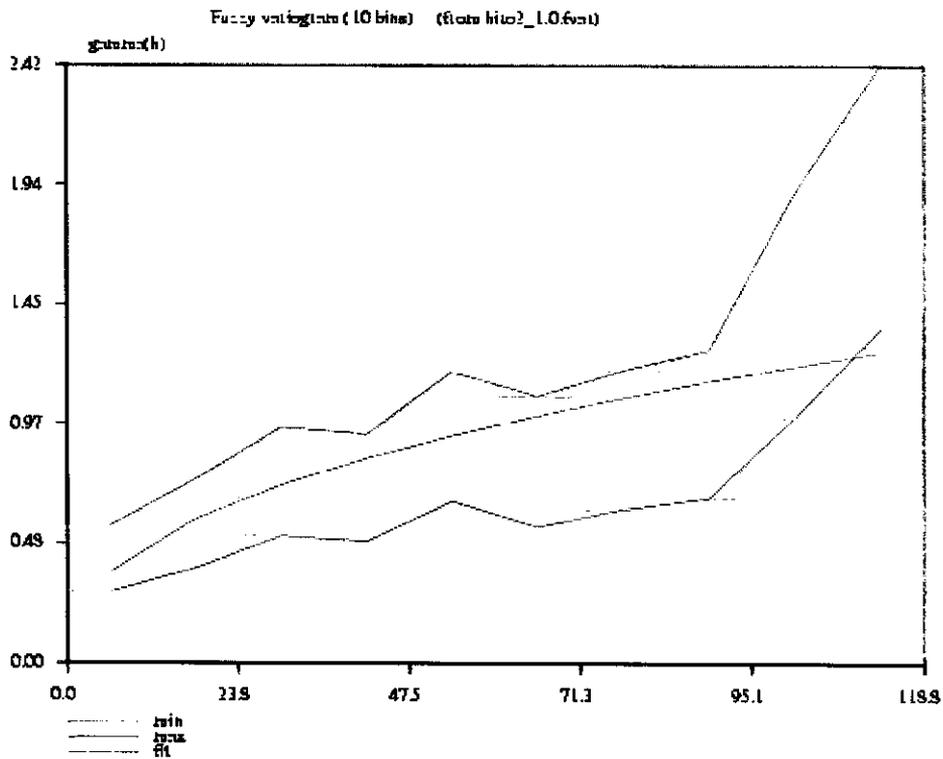


図 5.2.3.1.a-5 透水試験結果から作成したファジーバリオグラムに対する
フラクタルモデルのフィッティング結果 (メンバーシップ 1.0)

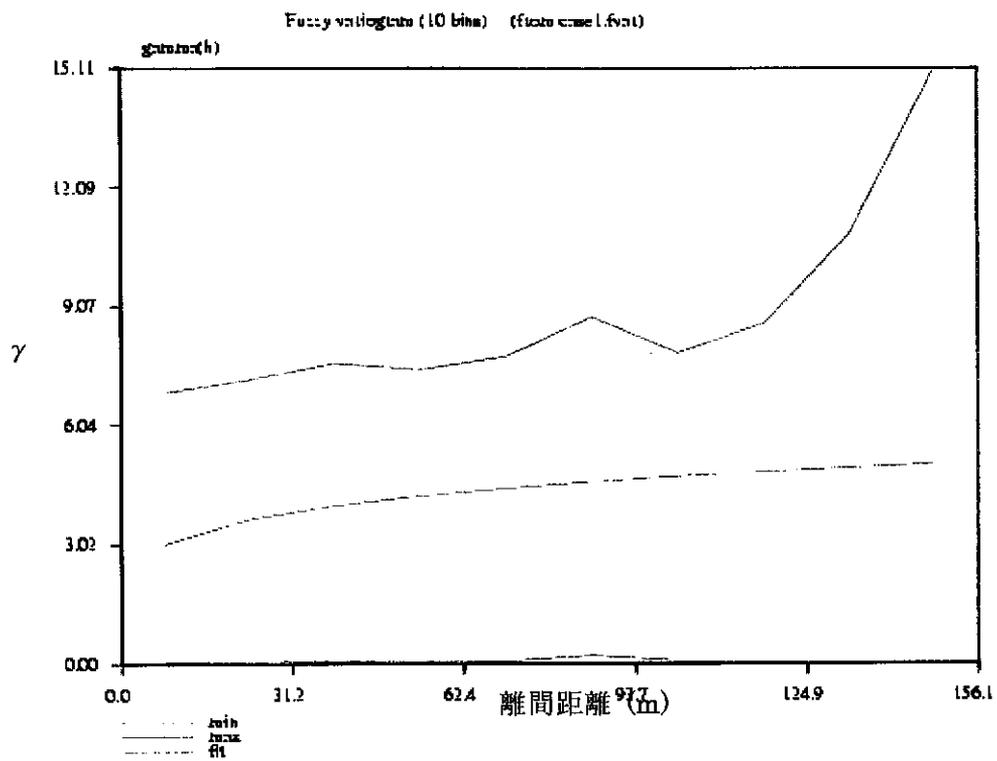


図 5.2.3.1.a-6 透水試験結果及び比抵抗測定結果（ケース 1）から作成したバリ
 オグラム及び
 フラクタルモデルのフィッティング結果（メンバーシップ 1.0）

b. ファジークリッキング

前節において算出した各メンバーシップのバリオグラム、及び透水係数推定値についてのファジーデータセットを用いてファジークリッキング (5.2.1(1)b) を行った。

断層より上に位置するデータのみを用いてファジークリッキングを行った結果を、図 5.2.3.1.b-1～-3 に、また、断層より下に位置するデータのみを用いてファジークリッキングを行った結果を、図 5.2.3.1.b-4～-6 に示す。なお、各メンバーシップレベルにおけるデータとして、下限、ランダム、及び上限を用いている。ここで、下限及び上限は、各点について、対応するメンバーシップレベルでの透水係数推定値の変動範囲のそれぞれ下限及び上限を抽出したものであり、ランダムは、同変動範囲から統計的に数値を抽出したものである。

図 5.2.3.1.b-1～-3 及び図 5.2.3.1.b-4～-6 は、それぞれ、断層よりも上あるいは下の領域にあるデータを用いて算出されたバリオグラムに基づくものであり、ファジークリッキングの結果を、断層を超えて延長することは適切ではない。そこで、断層を境界として、上部及び下部の領域のファジークリッキング結果を合成することが必要となる。合成後の最終的なファジークリッキング結果を図 5.2.3.1.b-7～-9 に、また、各メンバーシップレベルでの変動幅を図 5.2.3.1.b-10 にまとめる。よりハードなデータである透水試験結果のみを用いた場合の方が、データの不確実性の影響は少なく、また、比抵抗値を用いる場合には、ケース 1 よりもケース 2 の方が不確実性の小さいことがわかる。ただし、このことは、ソフトデータである比抵抗値データが不要であることを意味するものではない。少数のハードデータのみでクリッキングを行った場合と、多数のソフトデータを併用した場合とを適切に比較するためには、以下の点を考慮する必要がある。

「ハードデータである透水試験結果のみではデータ点数が少ないために、クリッキング自体の誤差、つまりクリッキングバリエーションが測定地点から離れるにつれて増大する。」

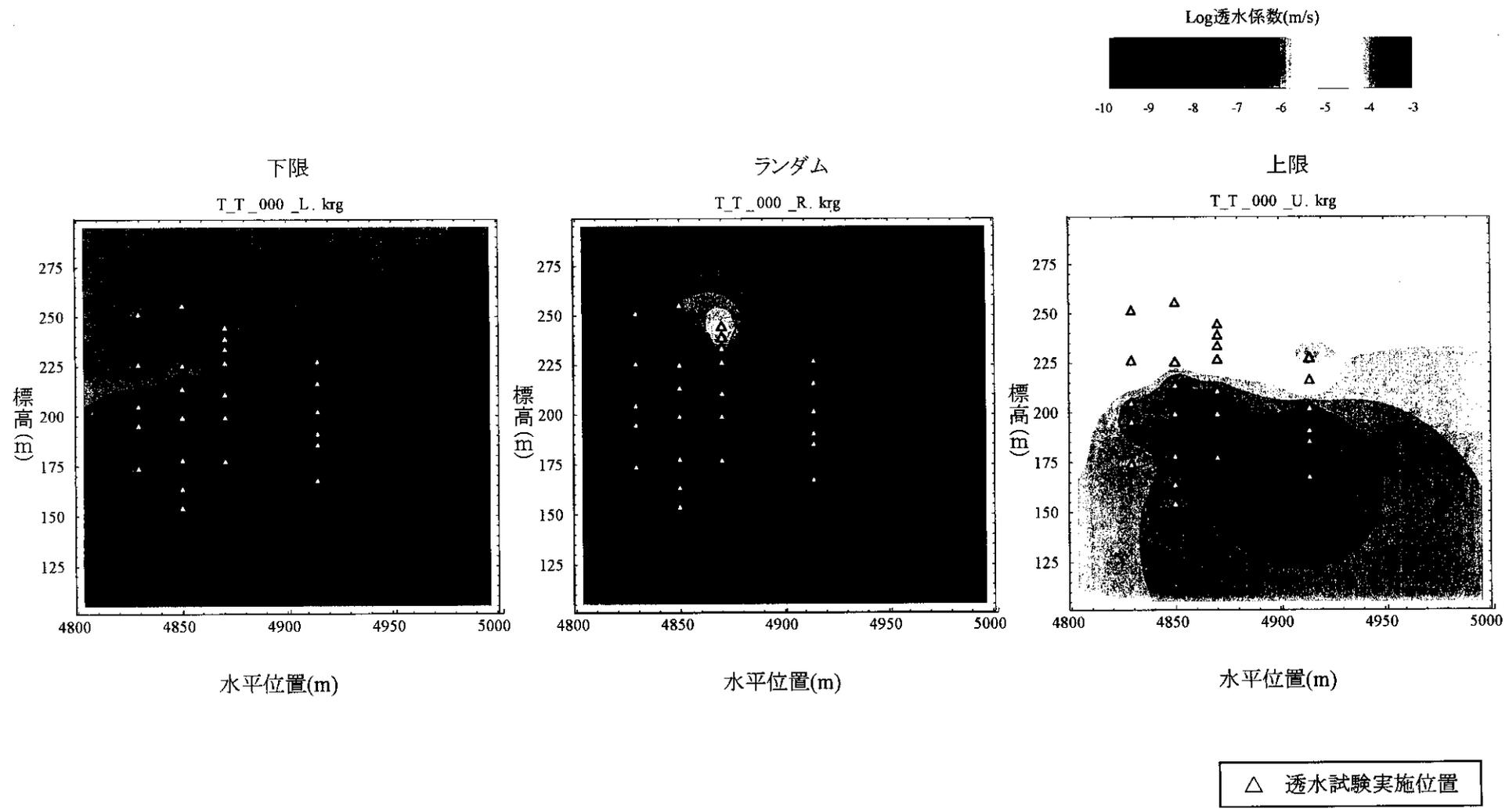


図5.2.3.1.b-1(1) 透水試験結果のみに基づくファジークリッキングの結果(メンバーシップ0.0)
(断層より上の領域のデータセット)

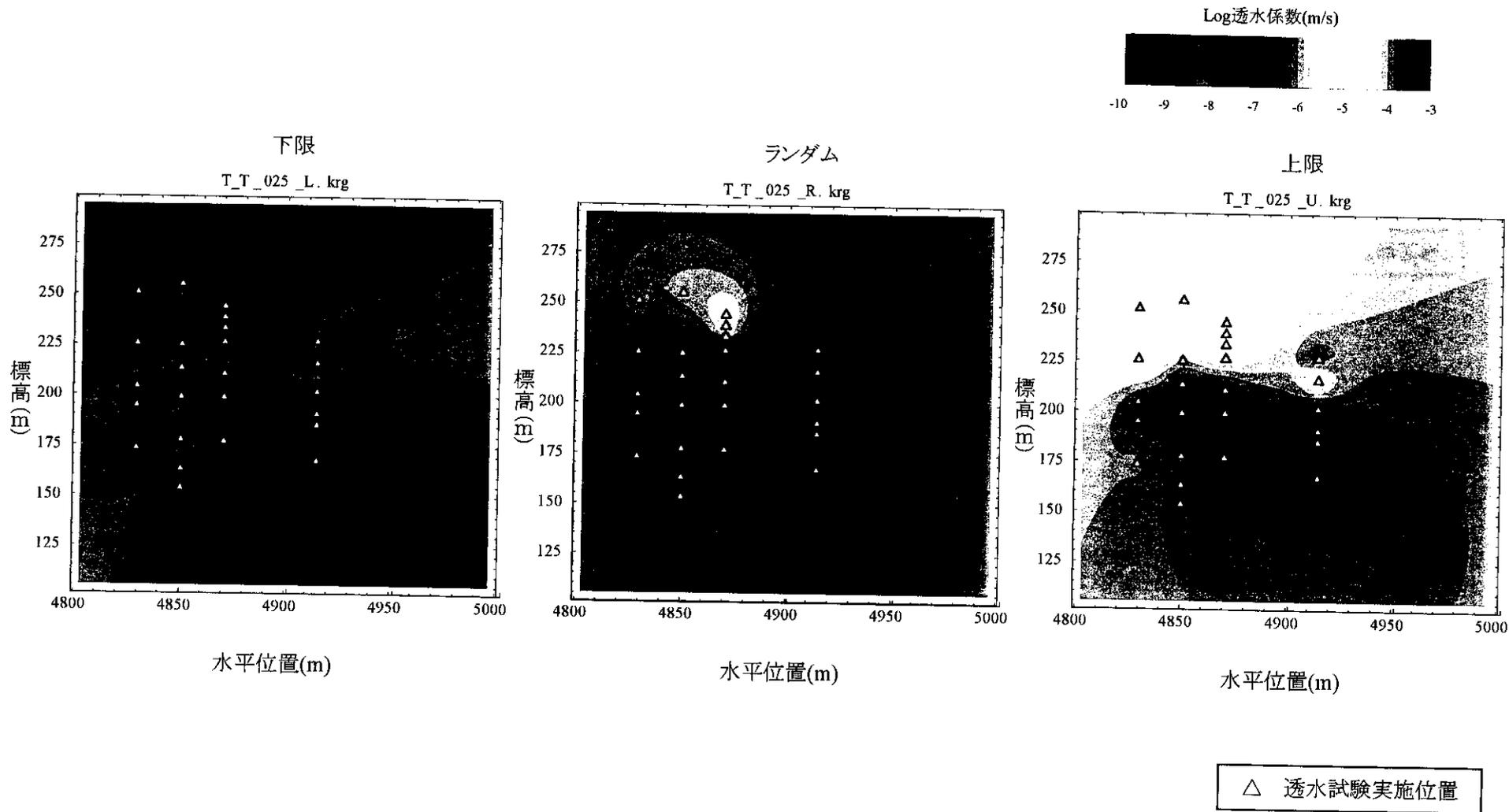


図5.2.3.1.b-1(2) 透水試験結果のみに基づくファジークリッキングの結果(メンバーシップ0.25)
(断層より上の領域のデータセット)

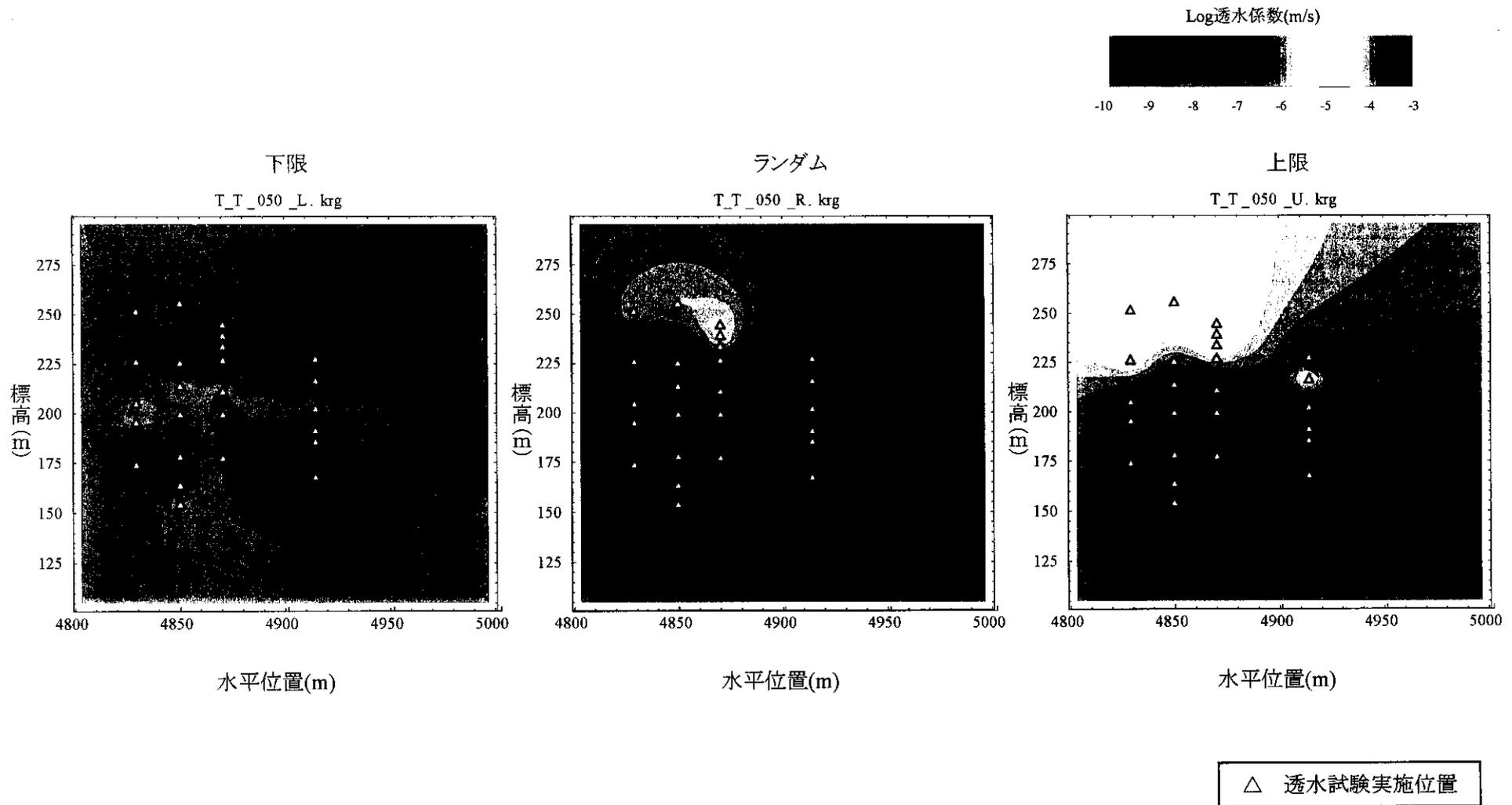


図5.2.3.1.b-1(3) 透水試験結果のみに基づくファジークリッキングの結果(メンバーシップ0.5)
(断層より上の領域のデータセット)

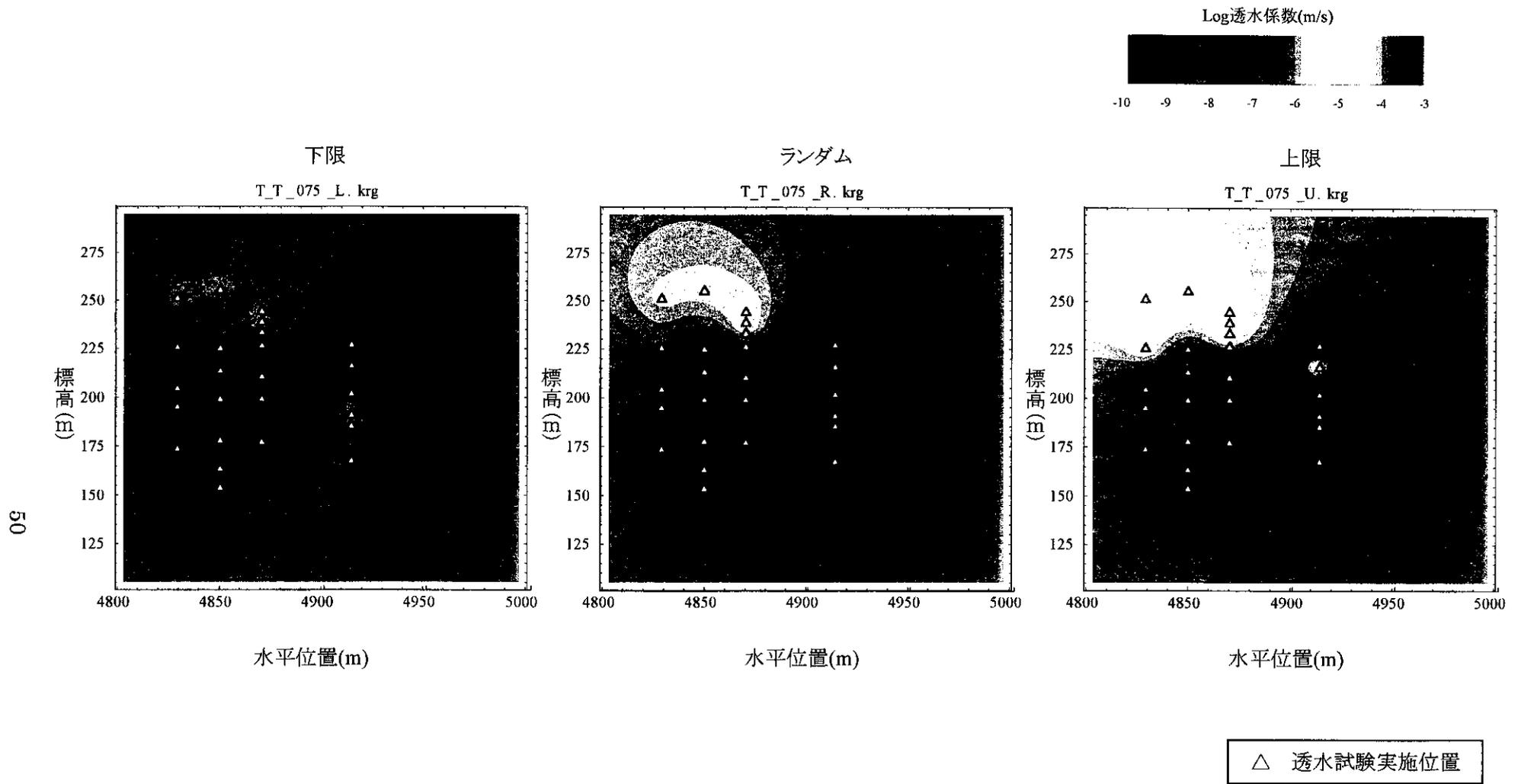


図5.2.3.1.b-1(4) 透水試験結果のみに基づくファジークリッキングの結果(メンバーシップ0.75)
(断層より上の領域のデータセット)

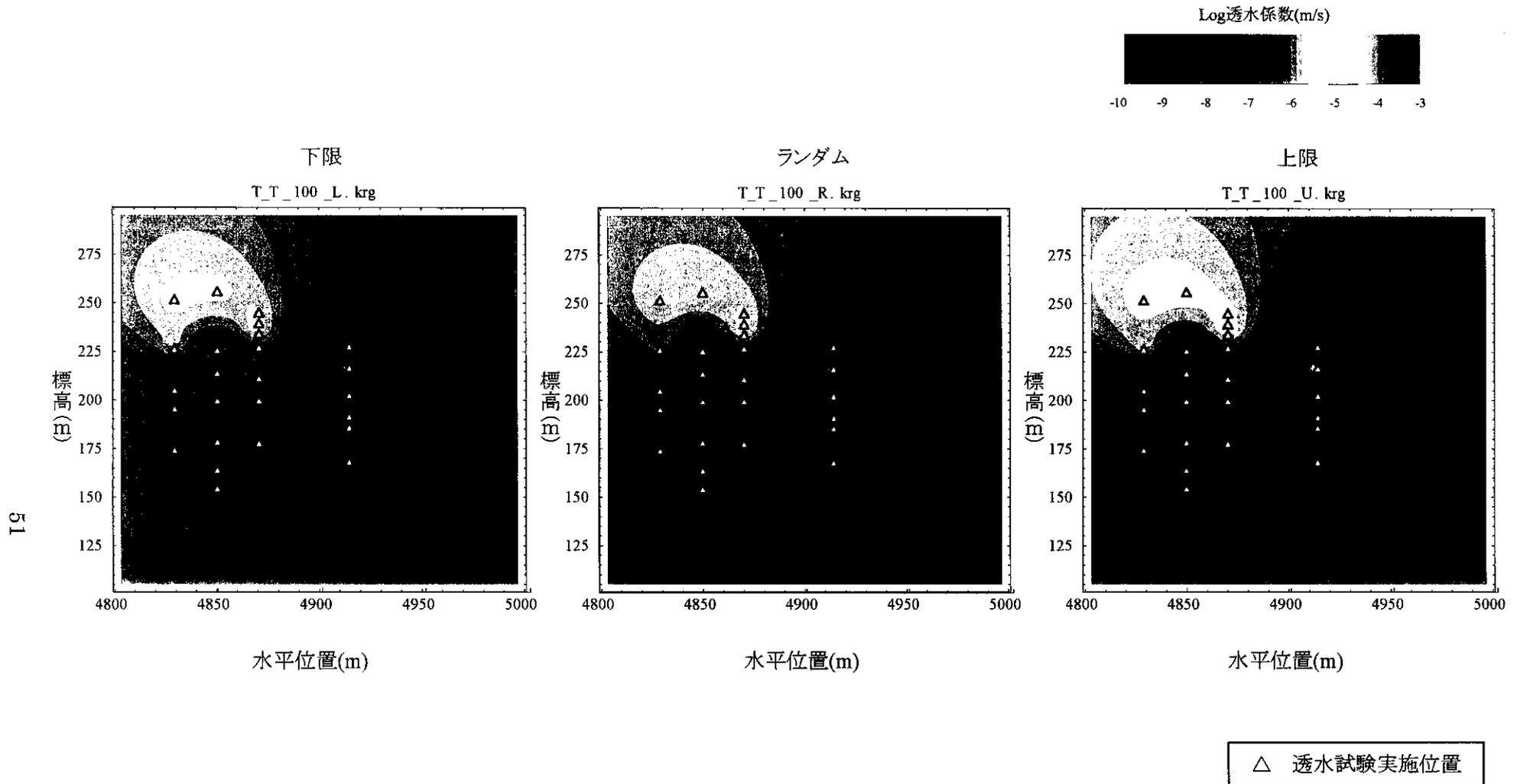


図5.2.3.1.b-1(5) 透水試験結果のみに基づくファジークリッキングの結果(1.0)
(断層より上の領域のデータセット)

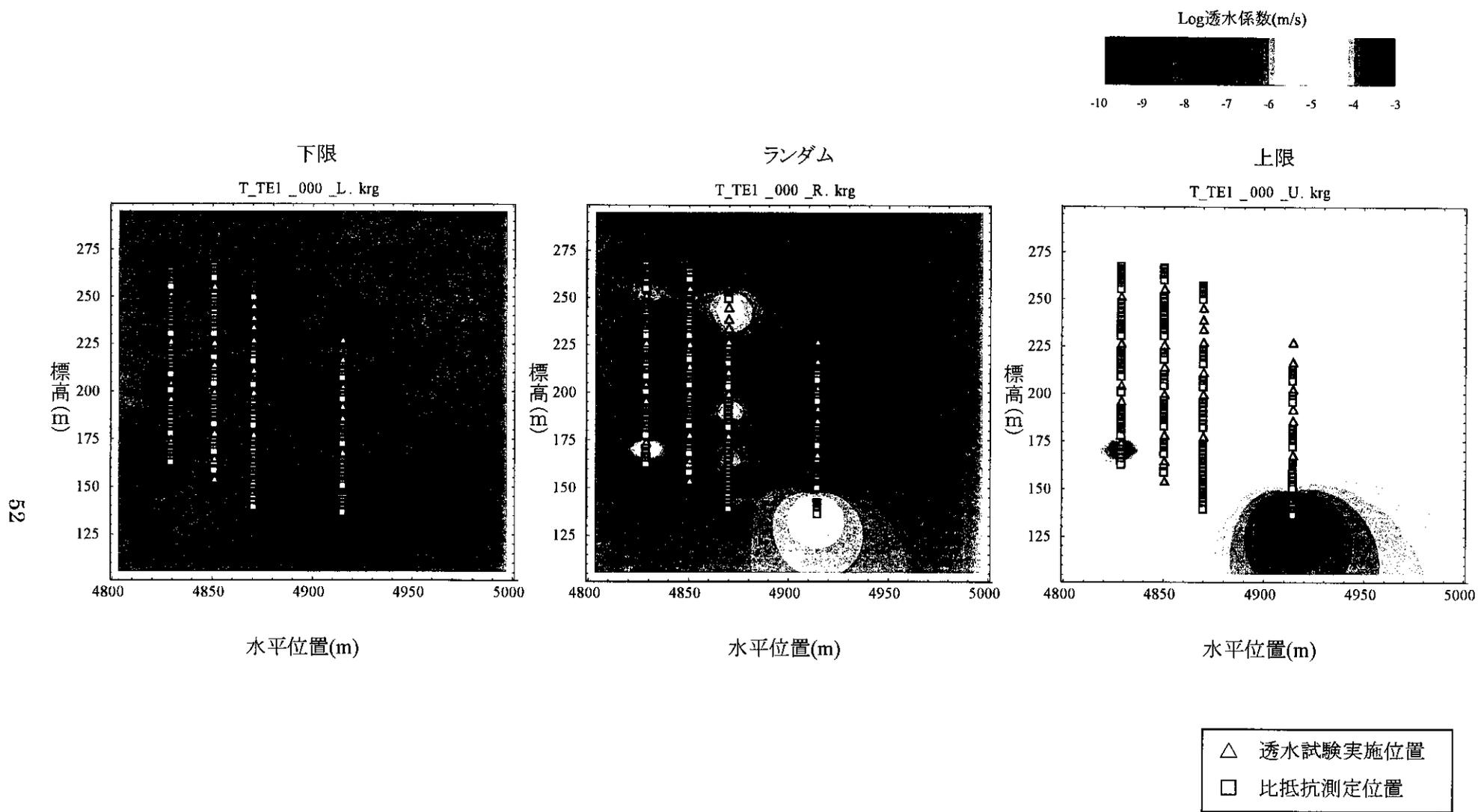


図5.2.3.1.b-2(1) 透水試験結果及び比抵抗値からの推定結果に基づくファジークリッキング(ケース1)の結果(メンバーシップ0.0)
(断層より上の領域のデータセット)

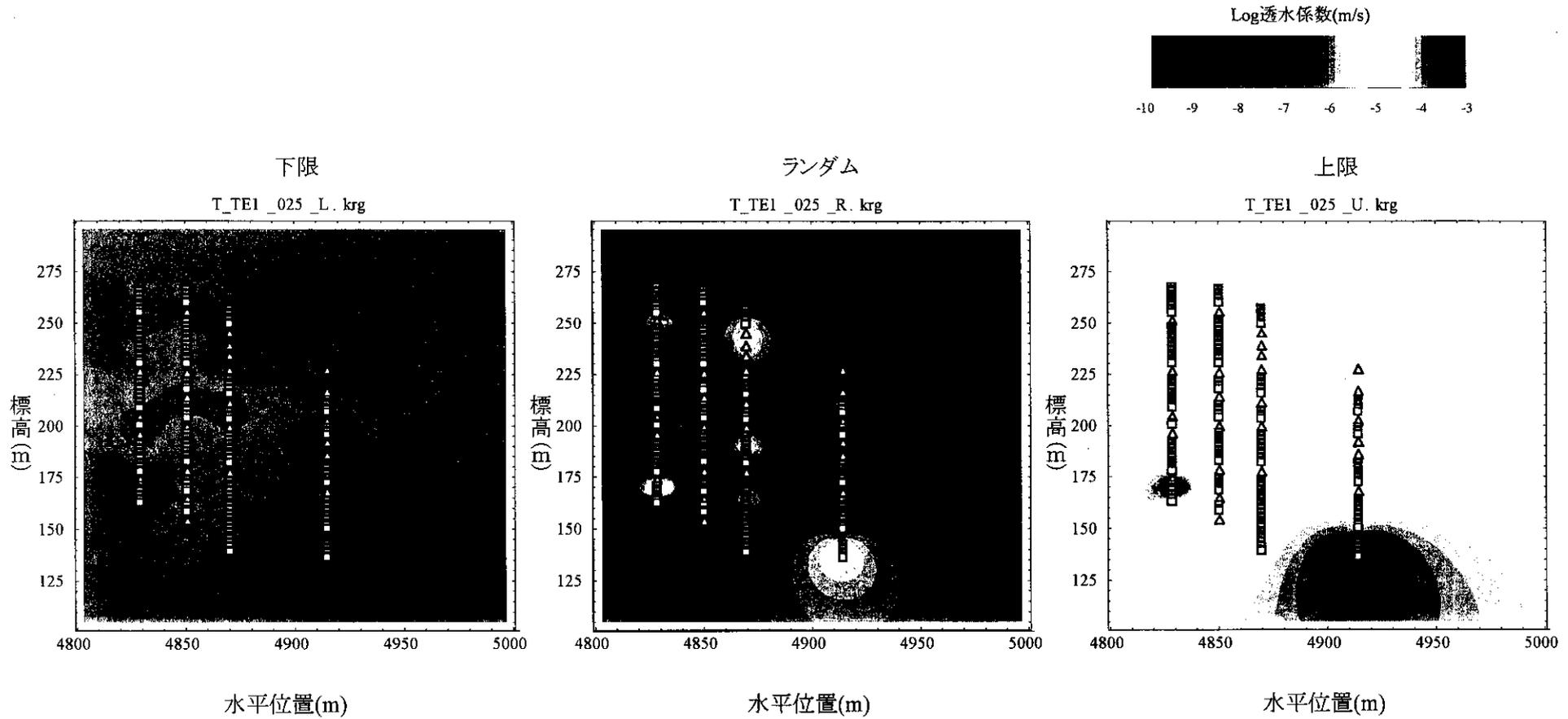


図5.2.3.1.b-2(2) 透水試験結果及び比抵抗値からの推定結果に基づくファジークリッキング(ケース1)の結果(メンバーシップ0.25)
(断層より上の領域のデータセット)

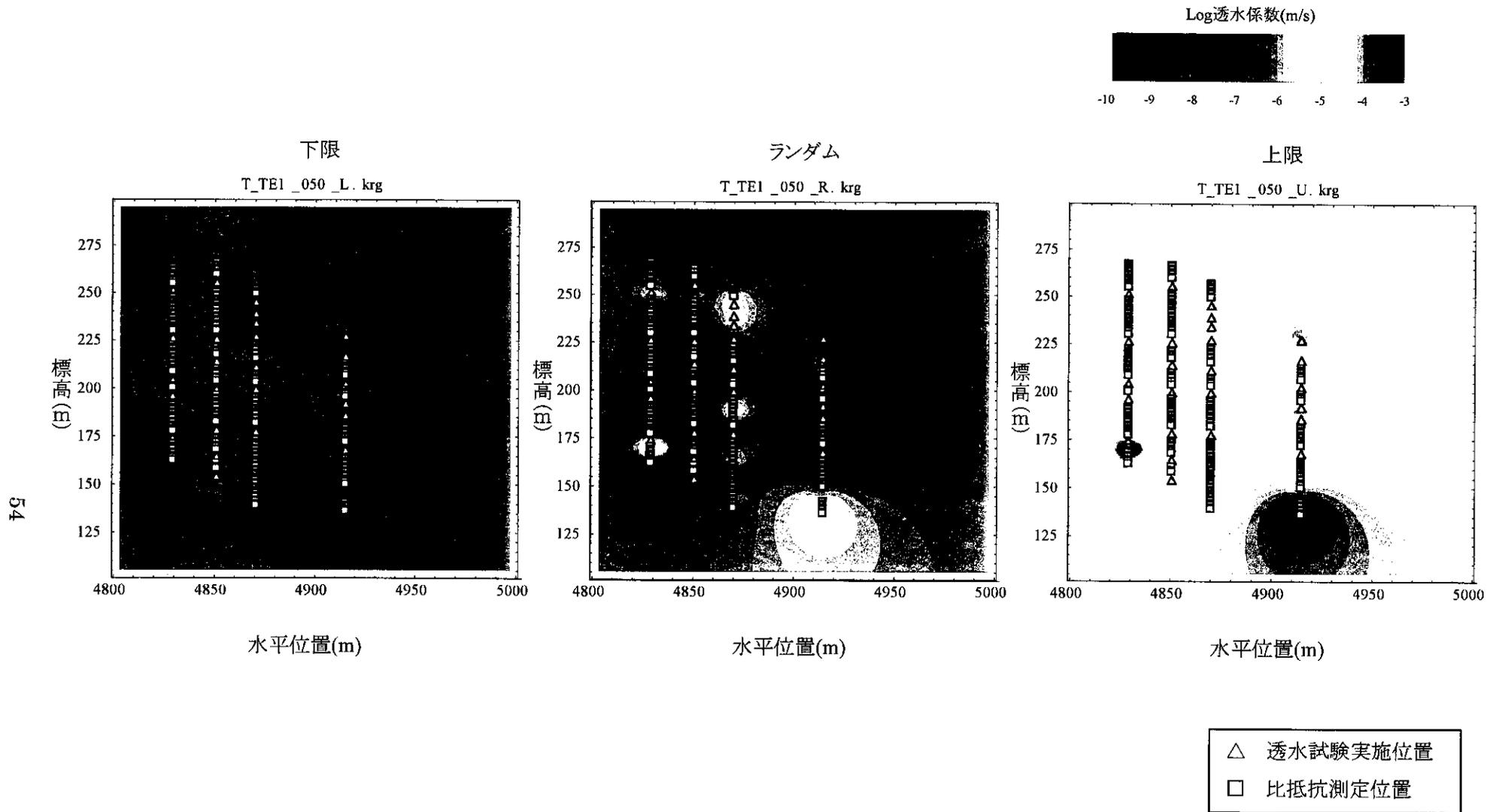


図5.2.3.1.b-2(3) 透水試験結果及び比抵抗値からの推定結果に基づくファジークリッキング(ケース1)の結果(メンバーシップ0.5)
(断層より上の領域のデータセット)

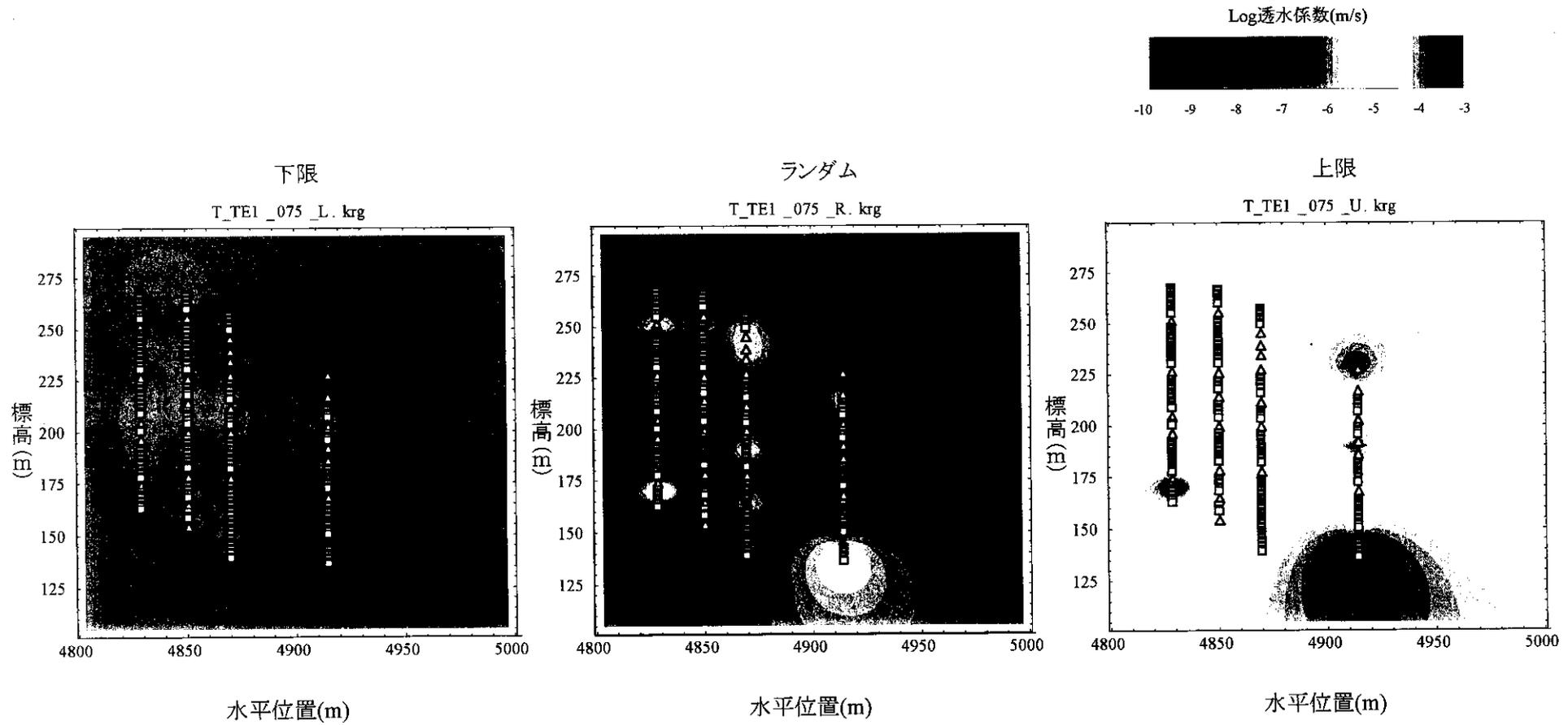


図5.2.3.1.b-2(4) 透水試験結果及び比抵抗値からの推定結果に基づくファジークリッキング(ケース1)の結果(メンバーシップ0.75)
(断層より上の領域のデータセット)

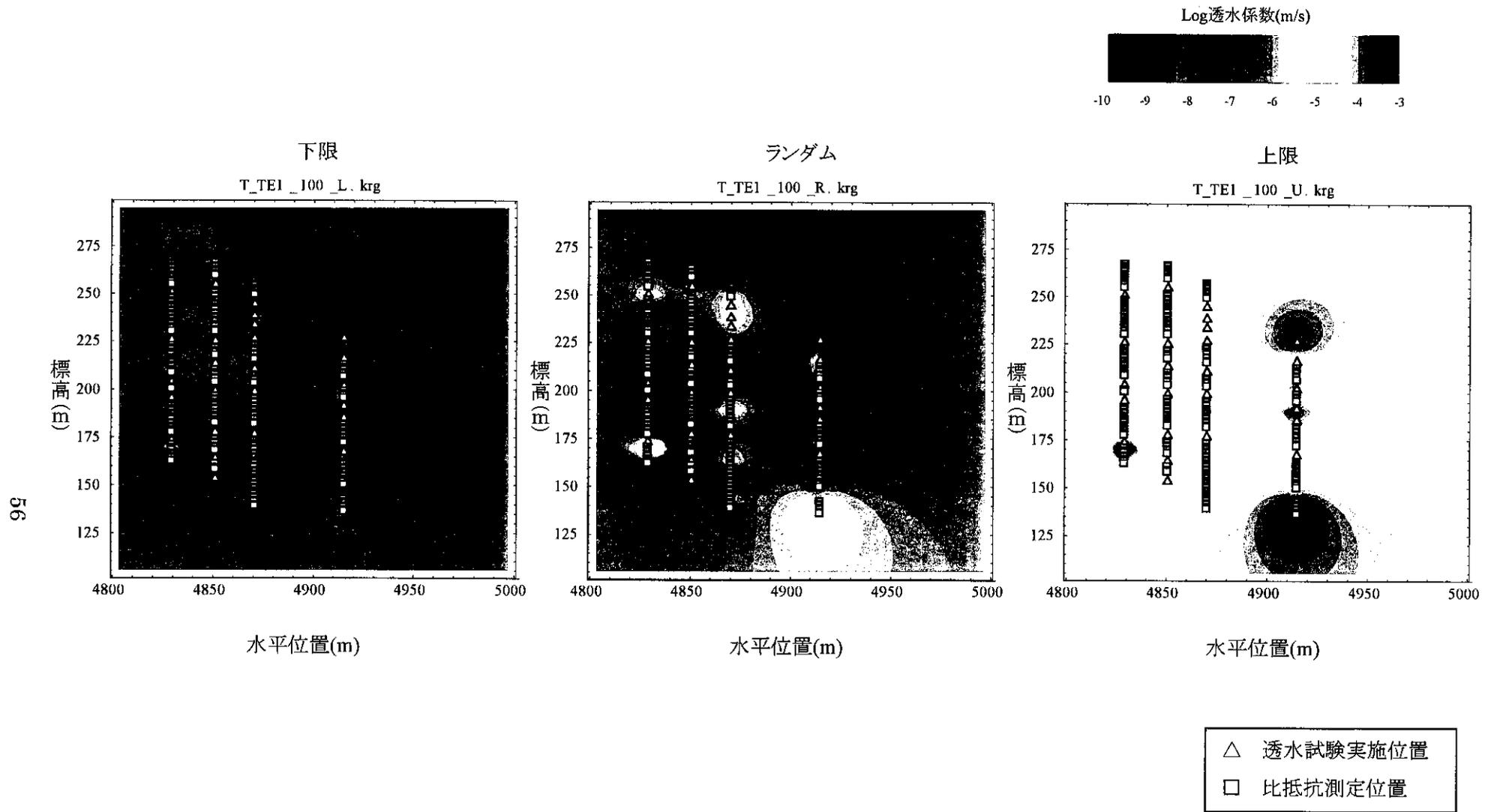


図5.2.3.1.b-2(5) 透水試験結果及び比抵抗値からの推定結果に基づくファジークリッキング(ケース1)の結果(メンバーシップ1.0)
(断層より上の領域のデータセット)

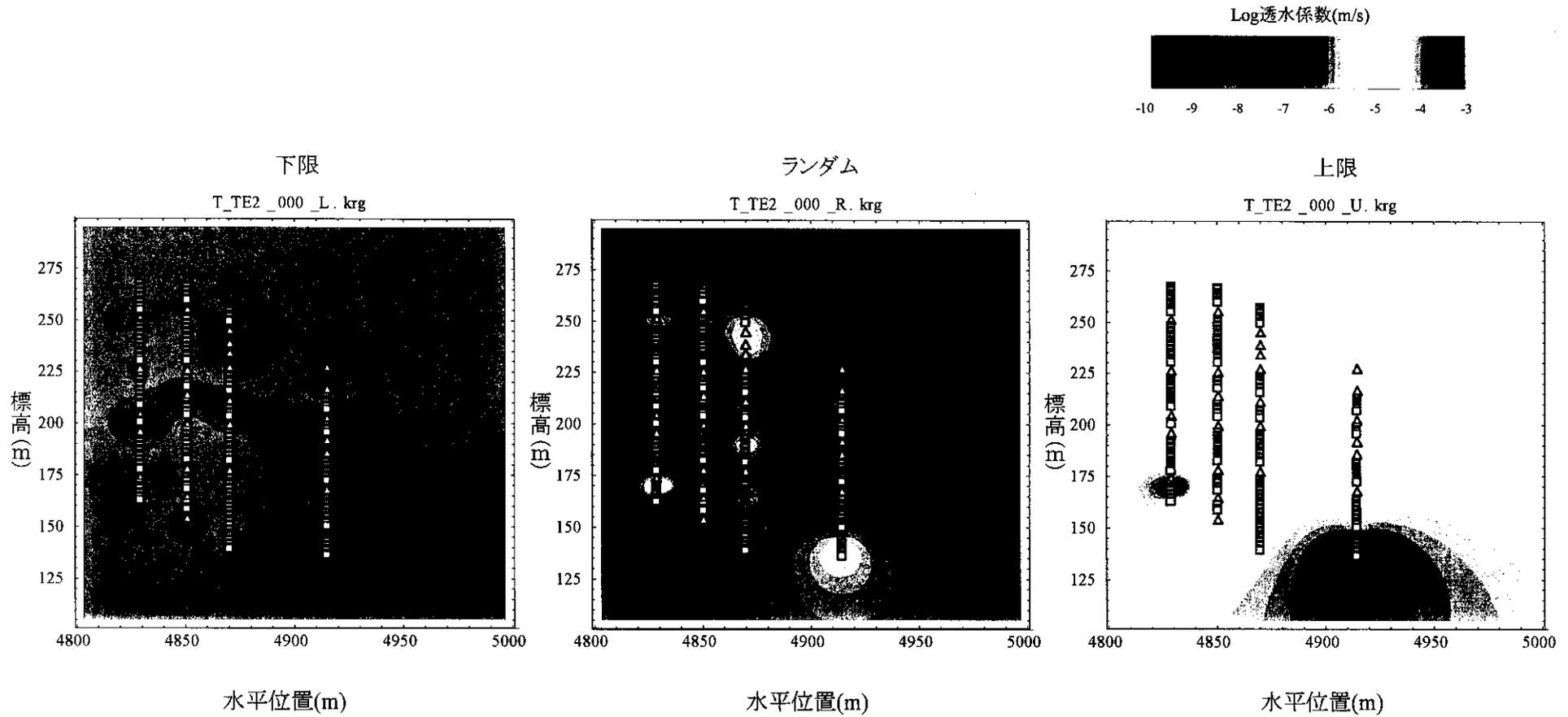


図5.2.3.1.b-3(1) 透水試験結果及び比抵抗値からの推定結果に基づくファジークリッキング(ケース2)の結果(メンバーシップ0.0)
(断層より上の領域のデータセット)

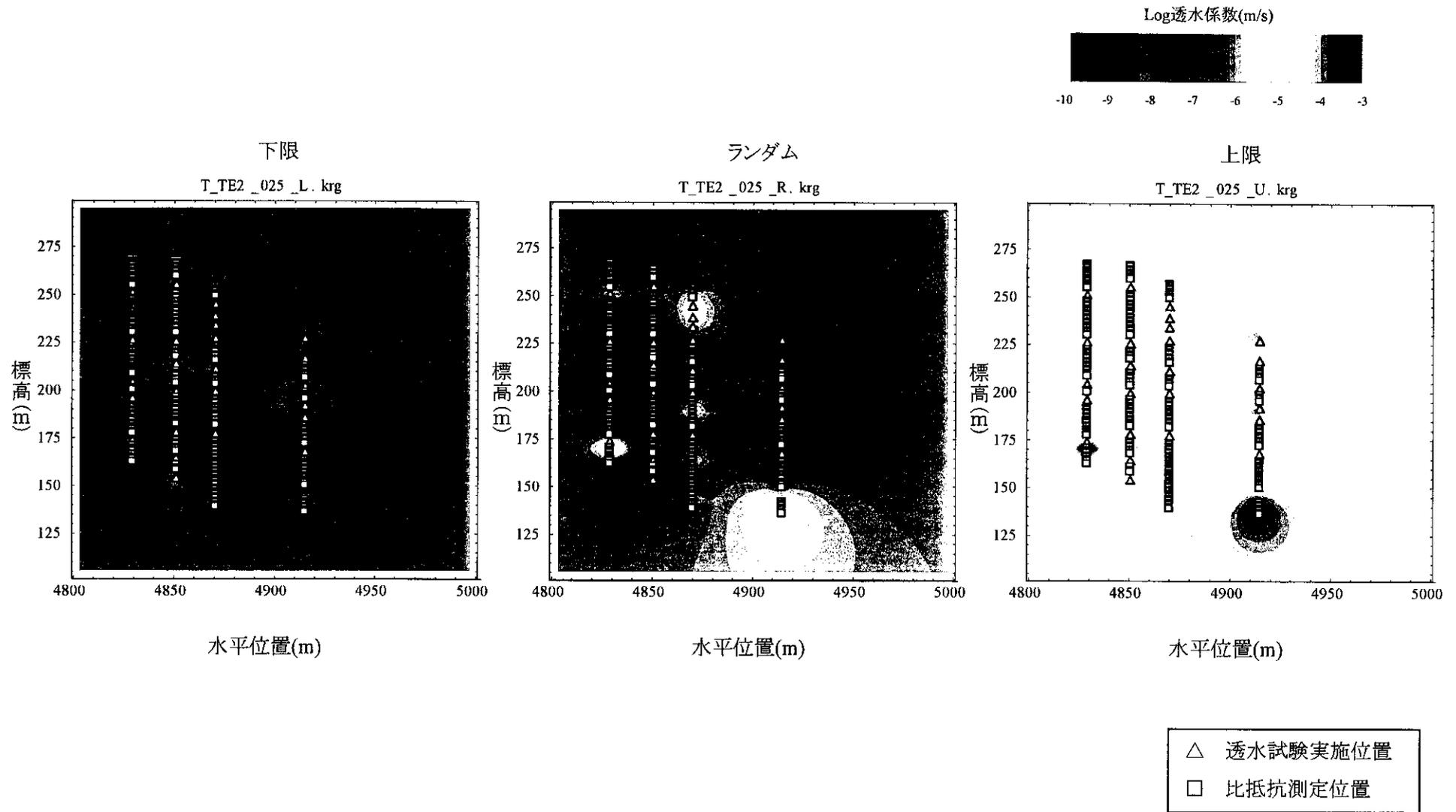


図5.2.3.1.b-3(2) 透水試験結果及び比抵抗値からの推定結果に基づくファジークリッキング(ケース2)の結果(メンバーシップ0.25)
(断層より上の領域のデータセット)

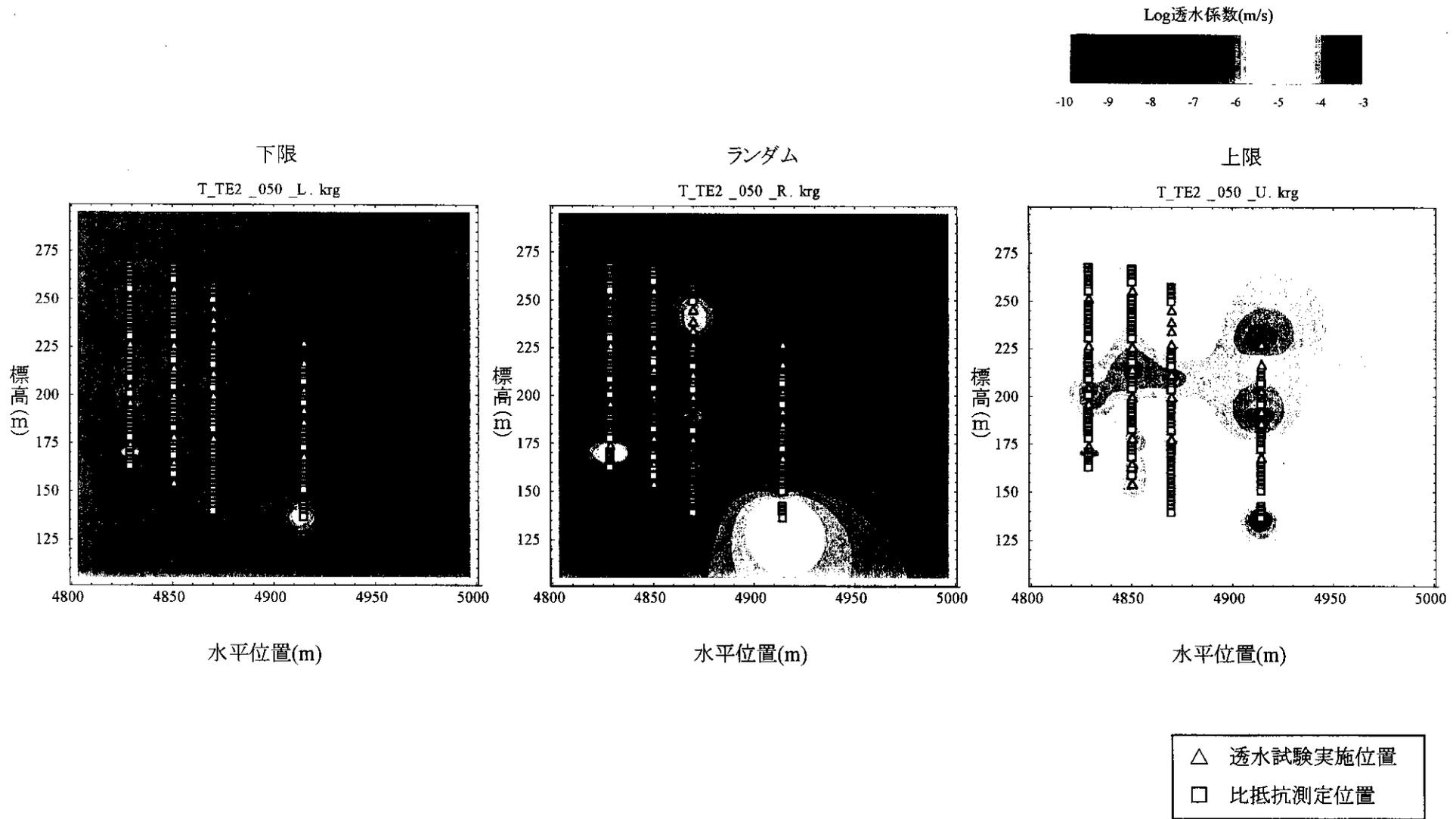


図5.2.3.1.b-3(3) 透水試験結果及び比抵抗値からの推定結果に基づくファジークリッキング(ケース2)の結果(メンバーシップ0.5)
(断層より上の領域のデータセット)

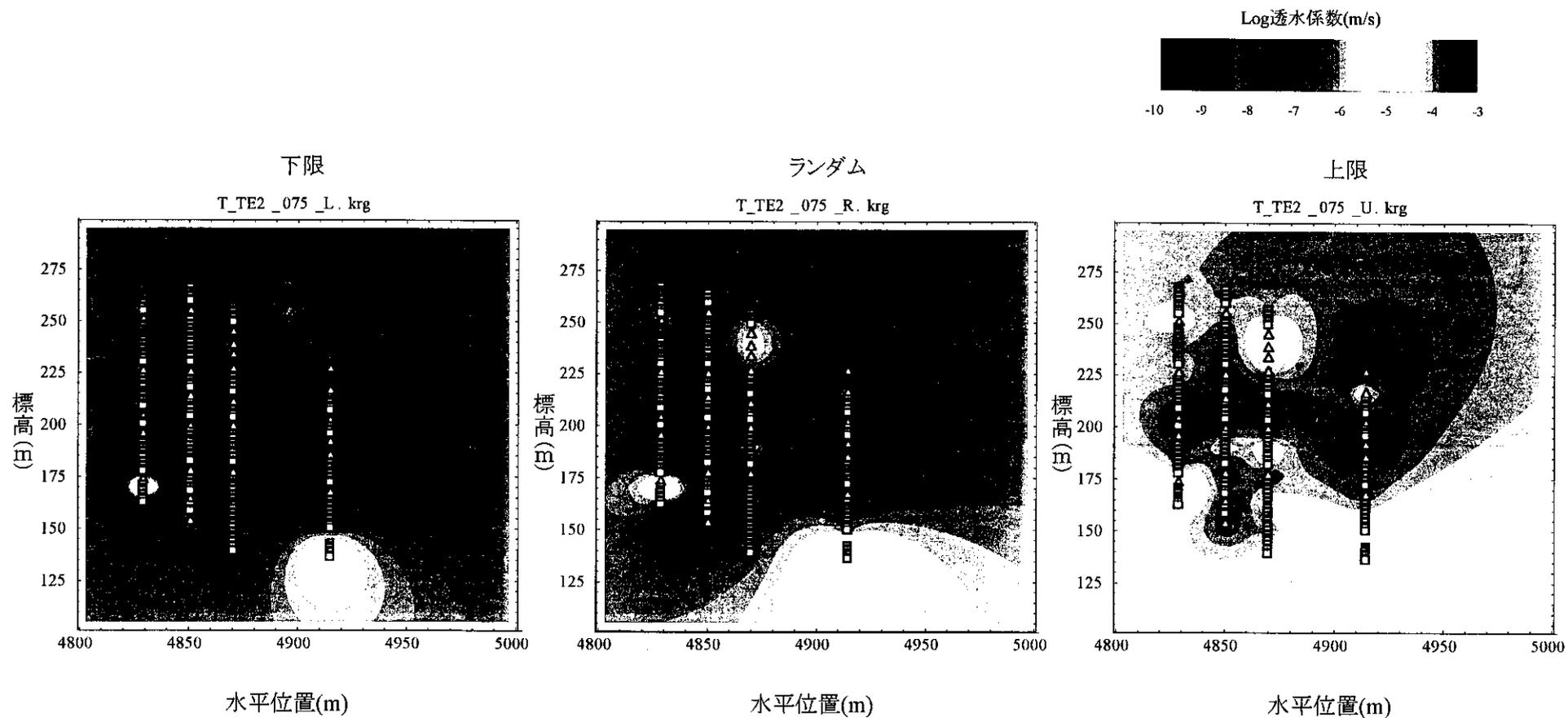
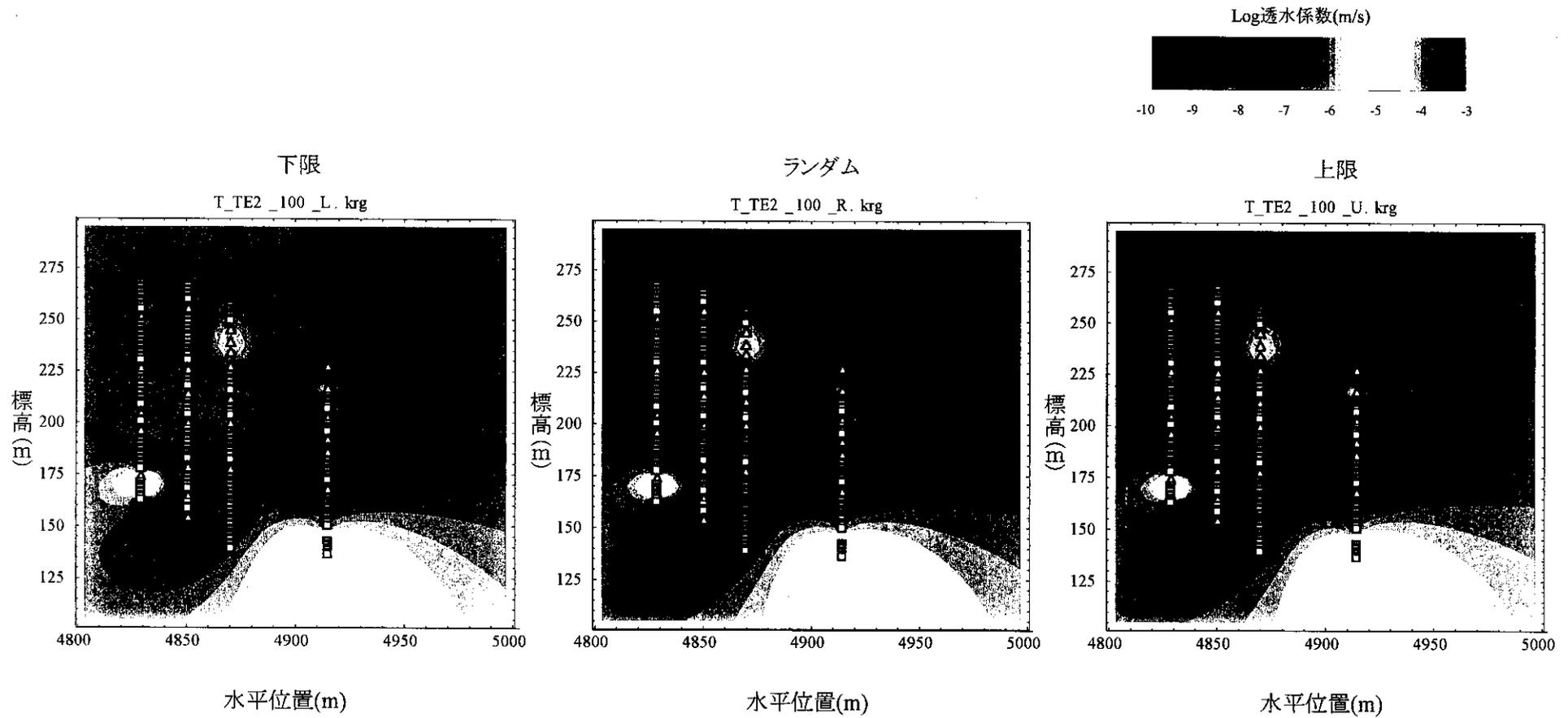


図5.2.3.1.b-3(4) 透水試験結果及び比抵抗値からの推定結果に基づくファジークリッキング(ケース2)の結果(メンバーシップ0.75)
(断層より上の領域のデータセット)



△ 透水試験実施位置
□ 比抵抗測定位置

図5.2.3.1.b-3(5) 透水試験結果及び比抵抗値からの推定結果に基づくファジークリッキング(ケース2)の結果(メンバーシップ1.0)
(断層より上の領域のデータセット)

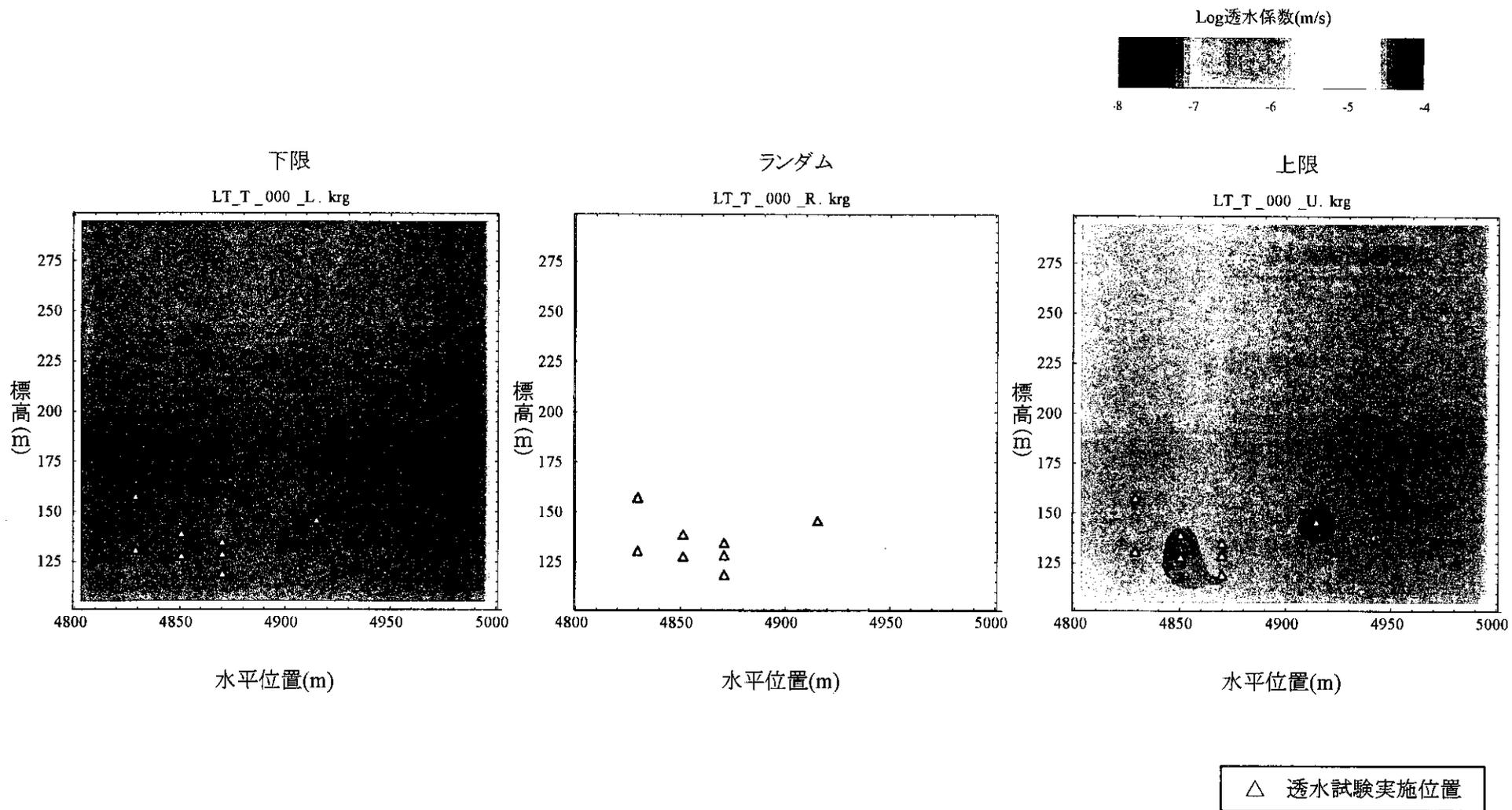


図5.2.3.1.b-4(1) 透水試験結果のみに基づくファジークリッキングの結果(メンバーシップ0.0)
(断層より下の領域のデータセット)

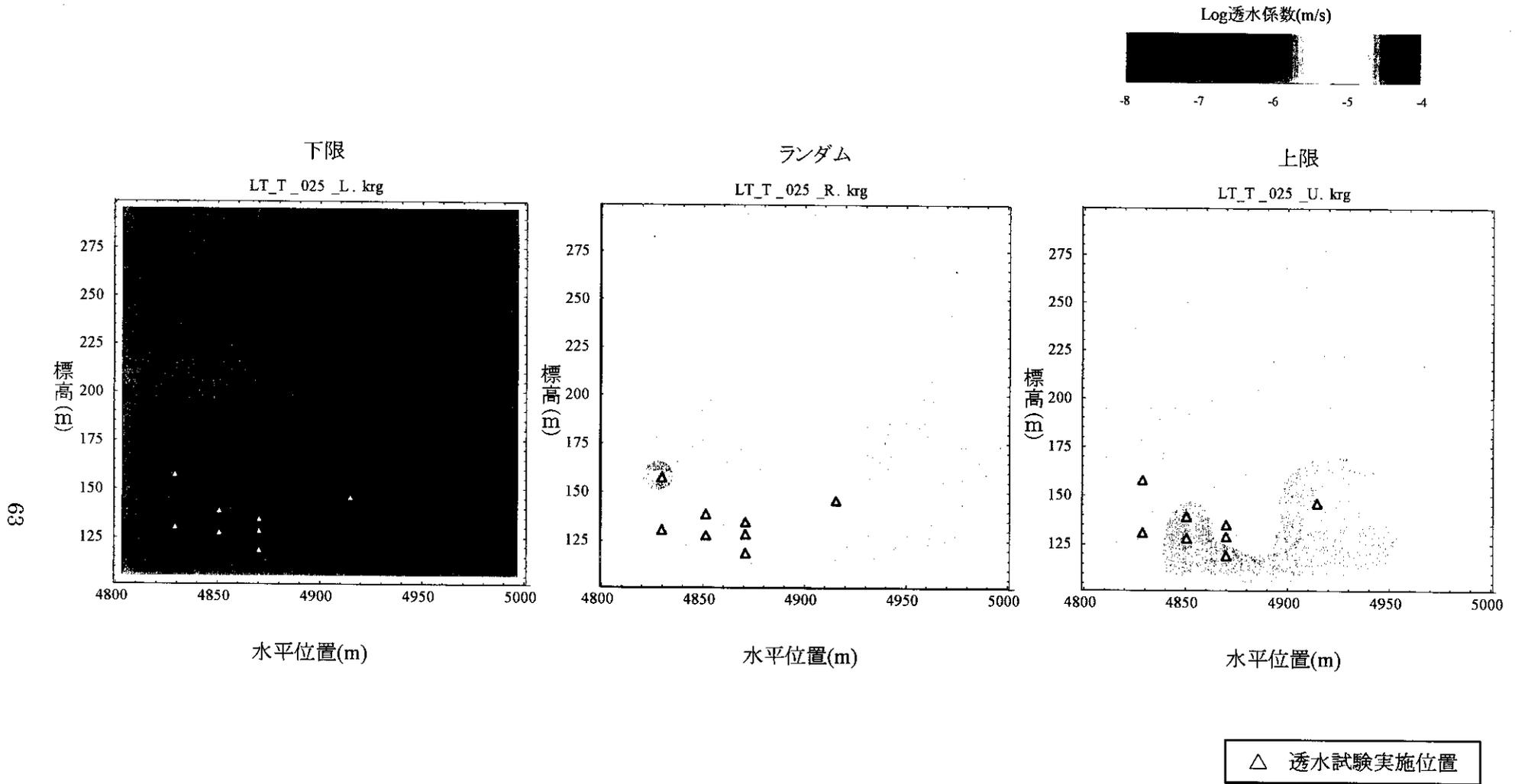


図5.2.3.1.b-4(2) 透水試験結果のみに基づくファジークリッキングの結果(メンバーシップ0.25)

(断層より下の領域のデータセット)

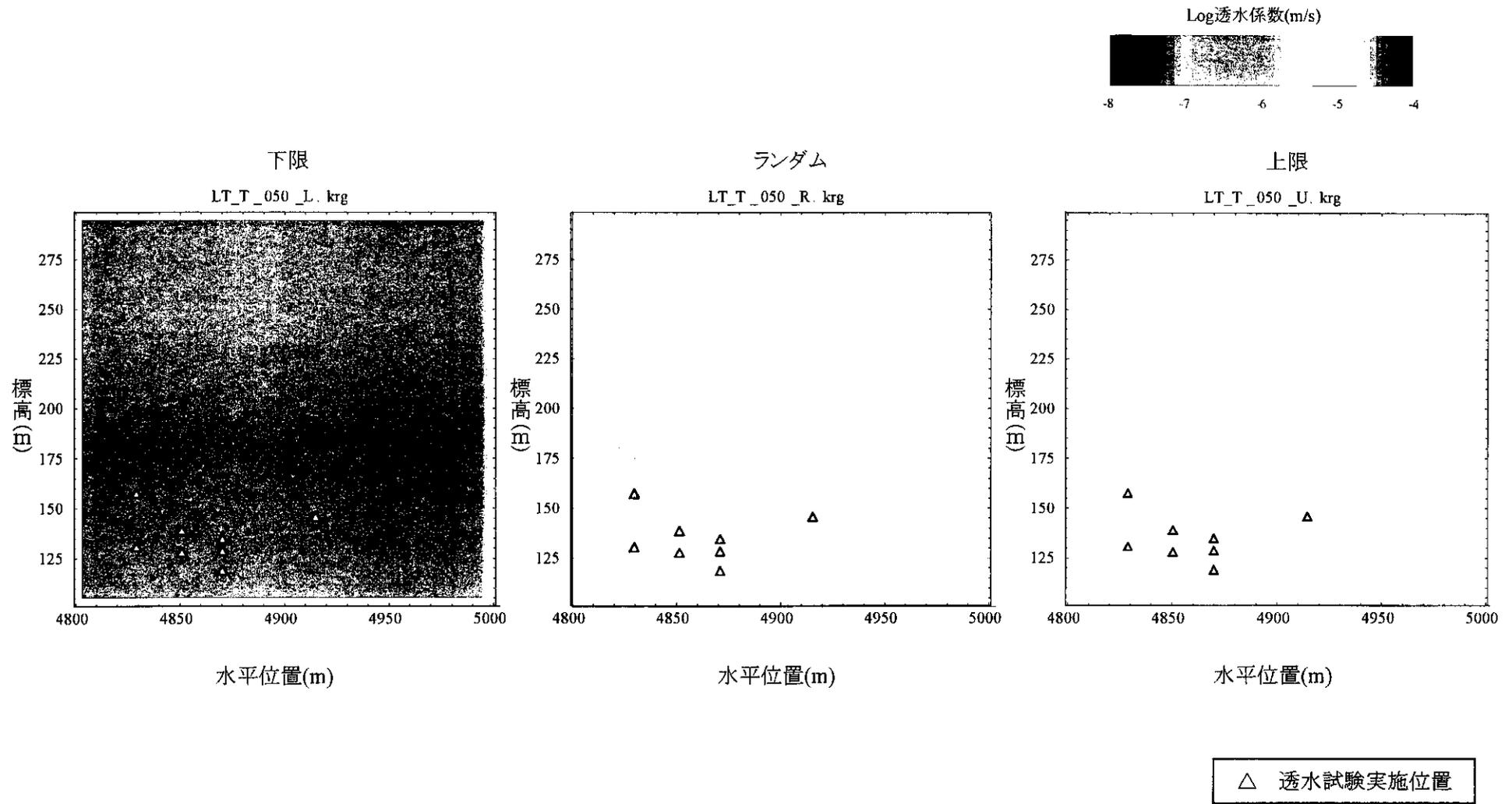


図5.2.3.1.b-4(3) 透水試験結果のみに基づくファジークリッキングの結果(メンバーシップ0.5)
(断層より下の領域のデータセット)

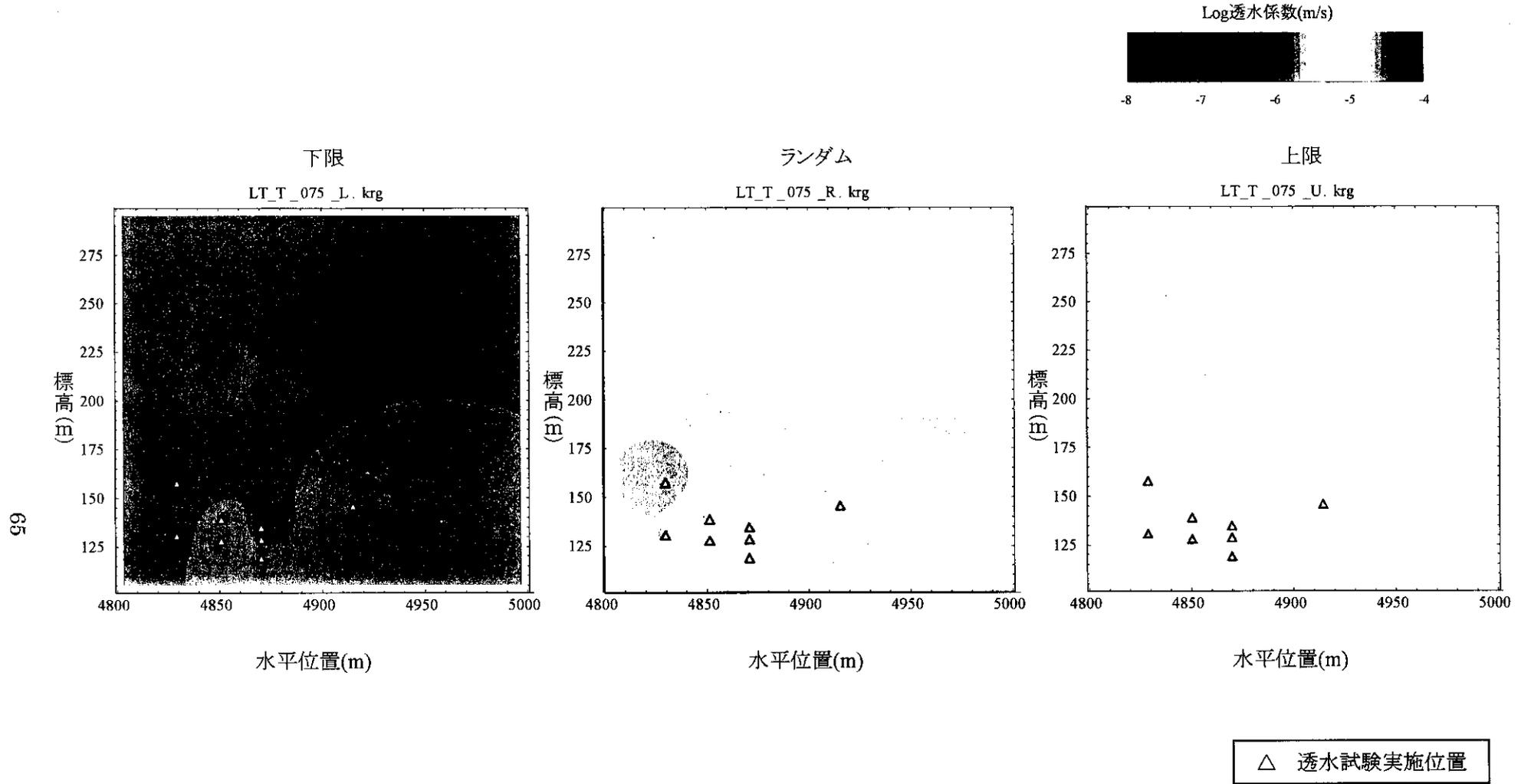


図5.2.3.1.b-4(4) 透水試験結果のみに基づくファジークリッキングの結果(メンバーシップ0.75)
 (断層より下の領域のデータセット)

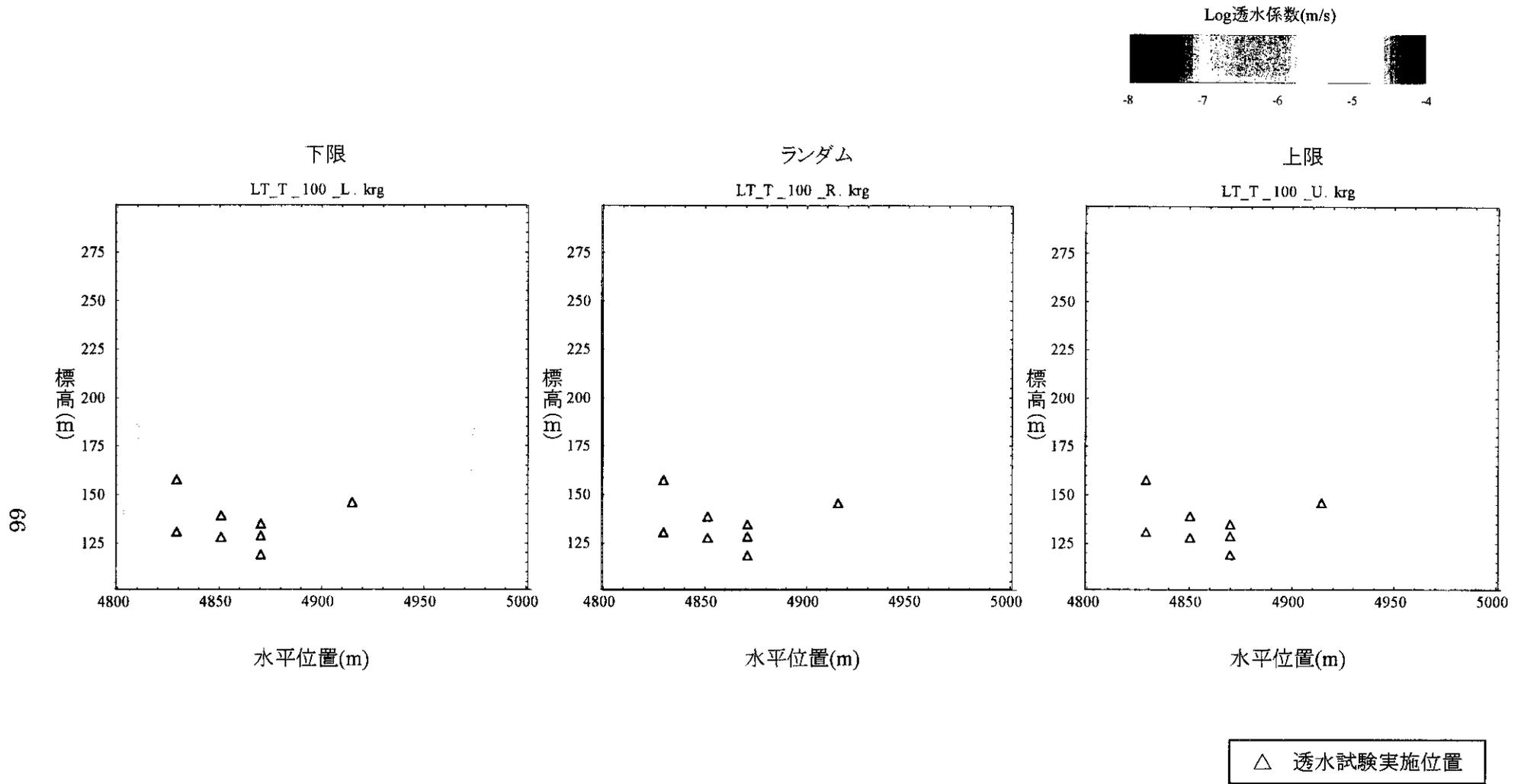


図5.2.3.1.b-4(5) 透水試験結果のみに基づくファジークリッキングの結果(1.0)
 (断層より下の領域のデータセット)

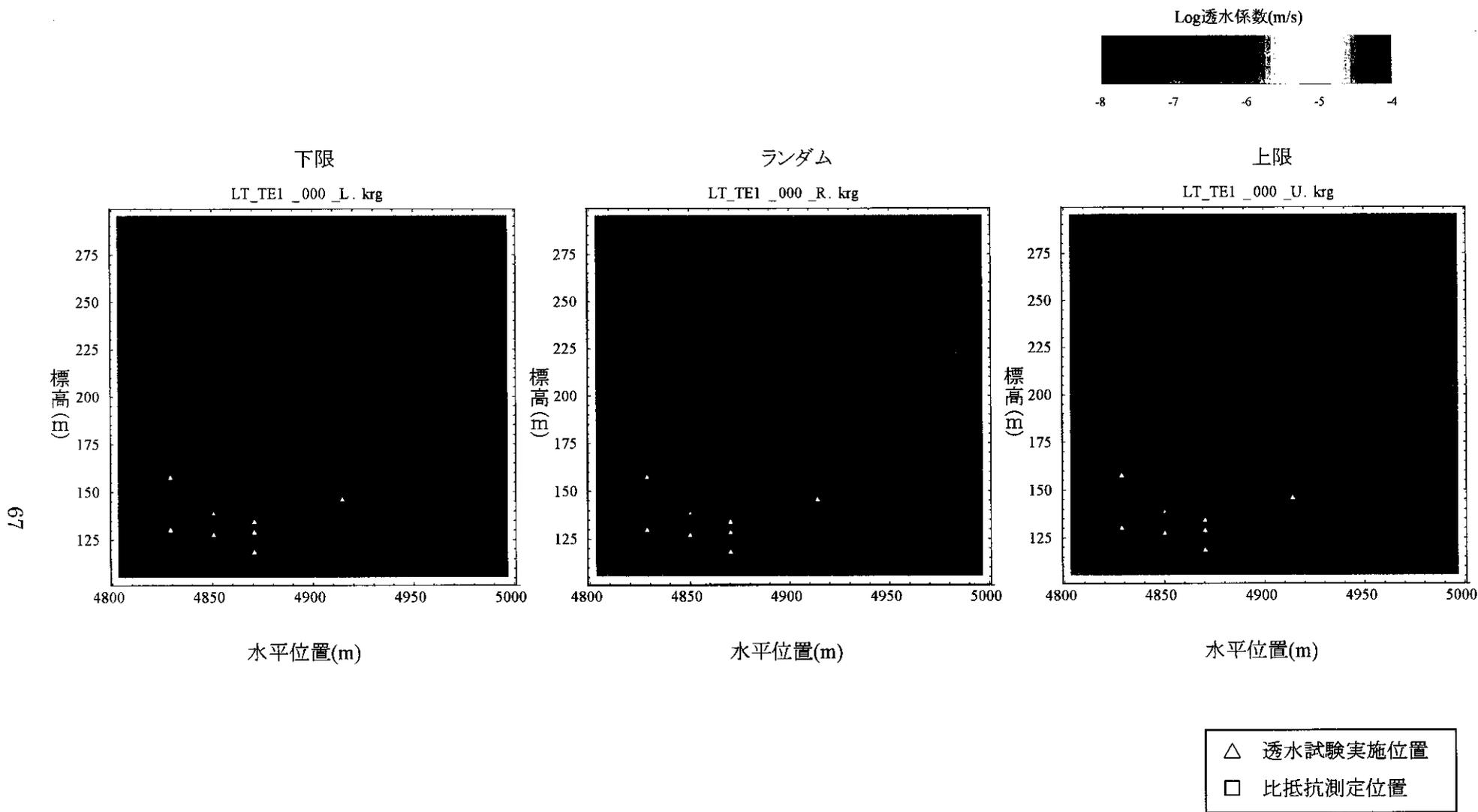


図5.2.3.1.b-5(1) 透水試験結果及び比抵抗値からの推定結果に基づくファジークリッキング(ケース1)の結果(メンバーシップ0.0)
(断層より下の領域のデータセット)

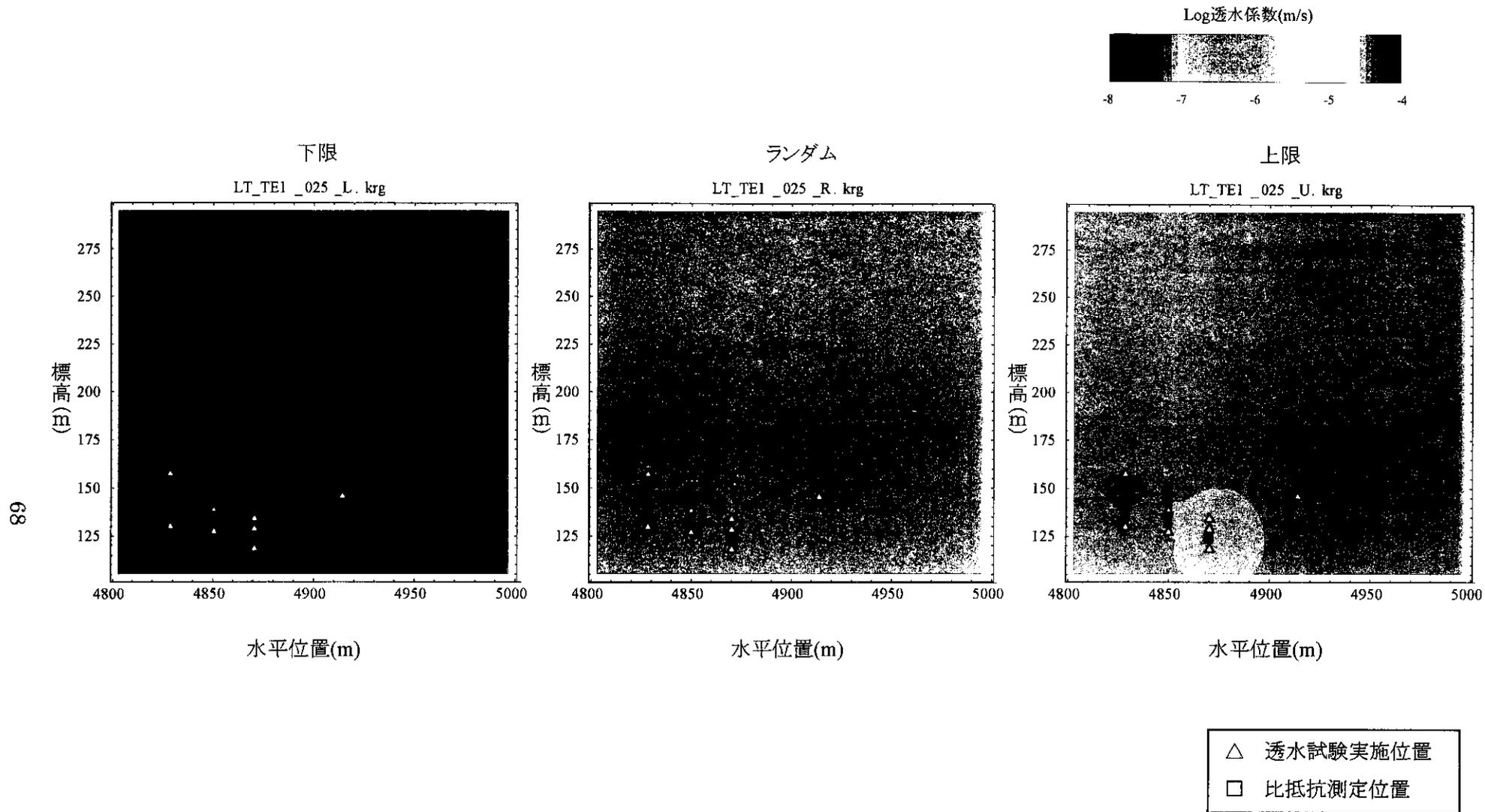


図5.2.3.1.b-5(2) 透水試験結果及び比抵抗値からの推定結果に基づくファジークリッキング(ケース1)の結果(メンバーシップ0.25)
(断層より下の領域のデータセット)

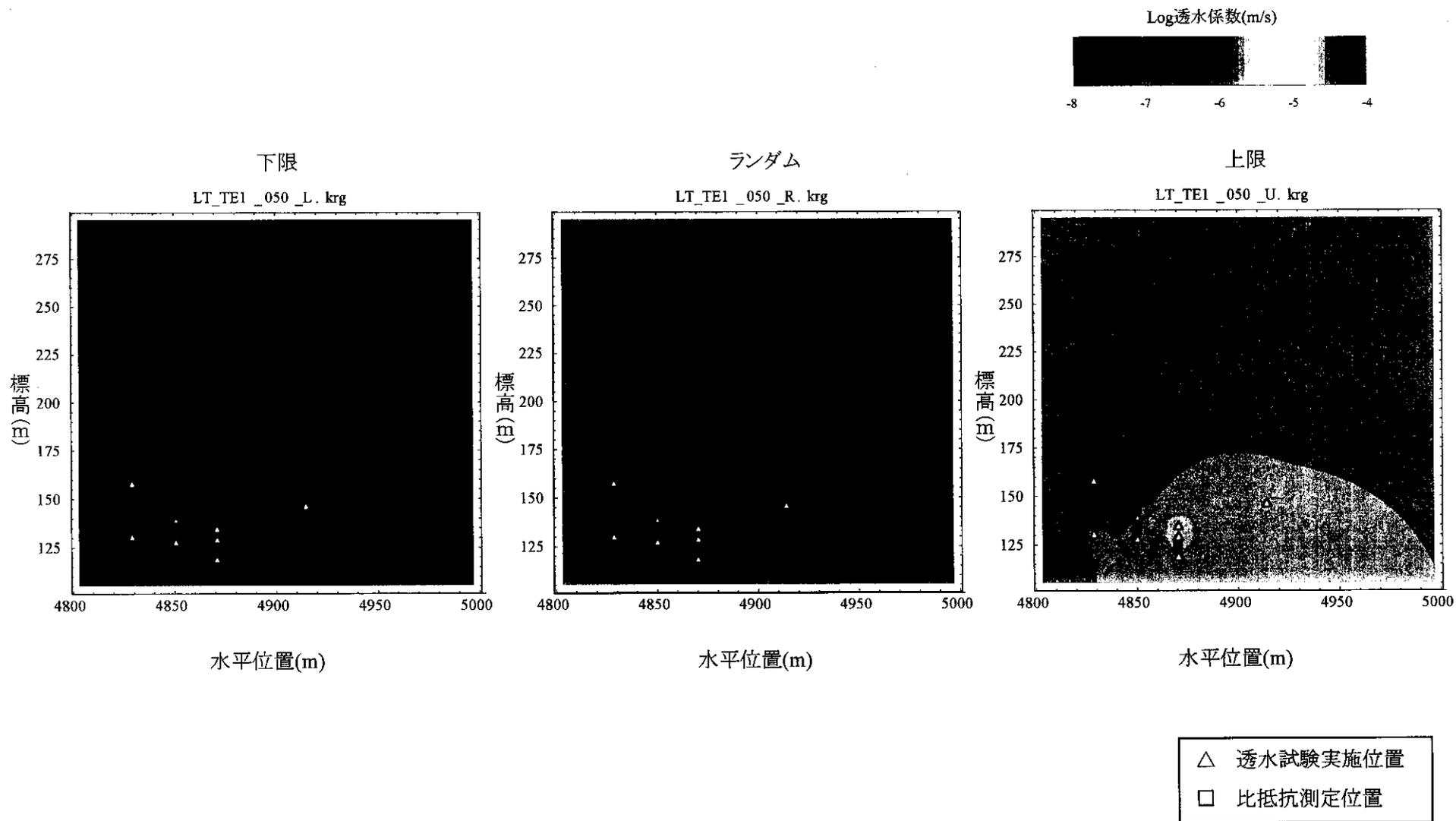


図5.2.3.1.b-5(3) 透水試験結果及び比抵抗値からの推定結果に基づくファジークリッキング(ケース1)の結果(メンバーシップ0.5)
(断層より下の領域のデータセット)

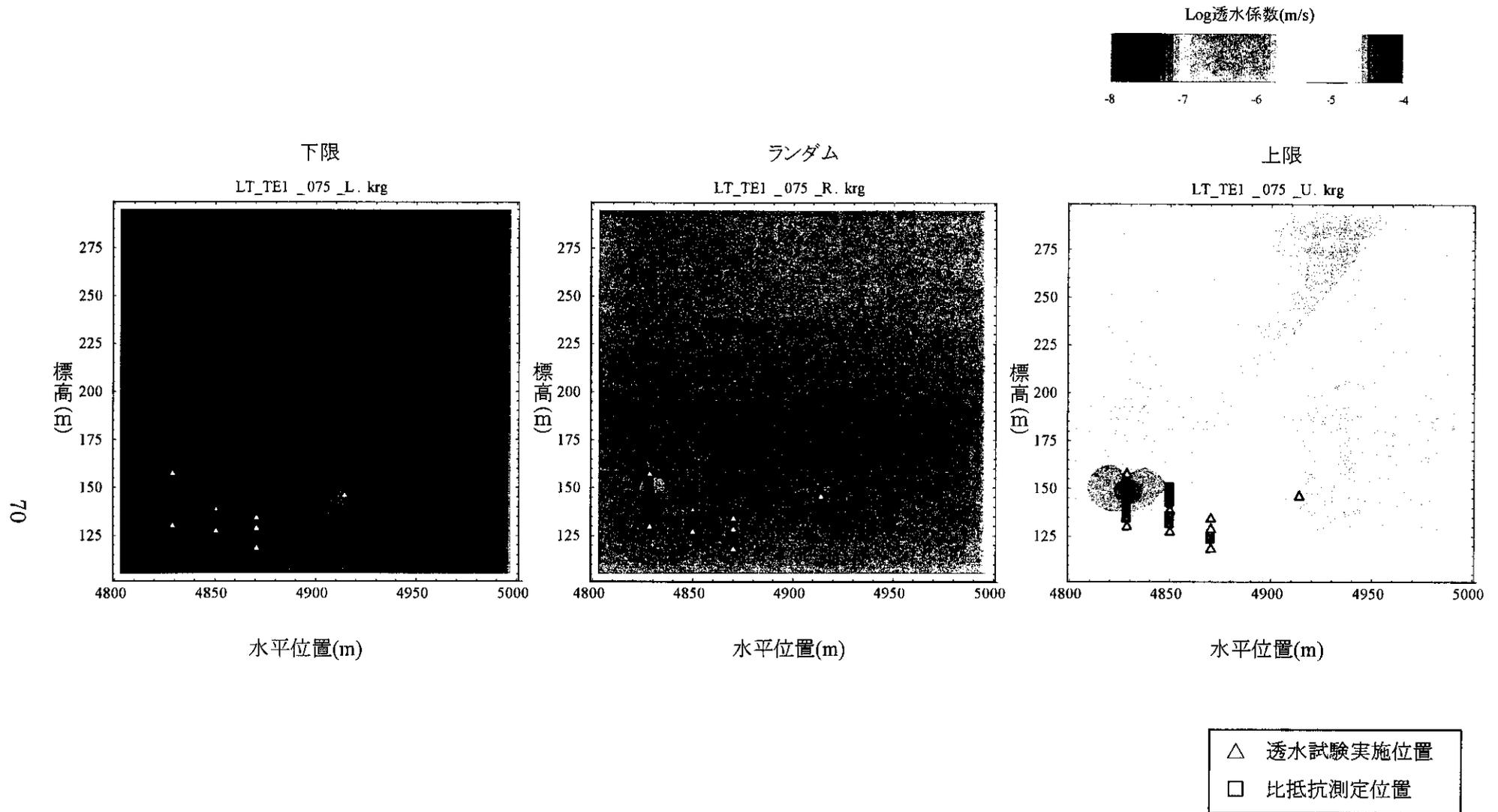


図5.2.3.1.b-5(4) 透水試験結果及び比抵抗値からの推定結果に基づくファジークリッキング(ケース1)の結果(メンバーシップ0.75)
(断層より下の領域のデータセット)

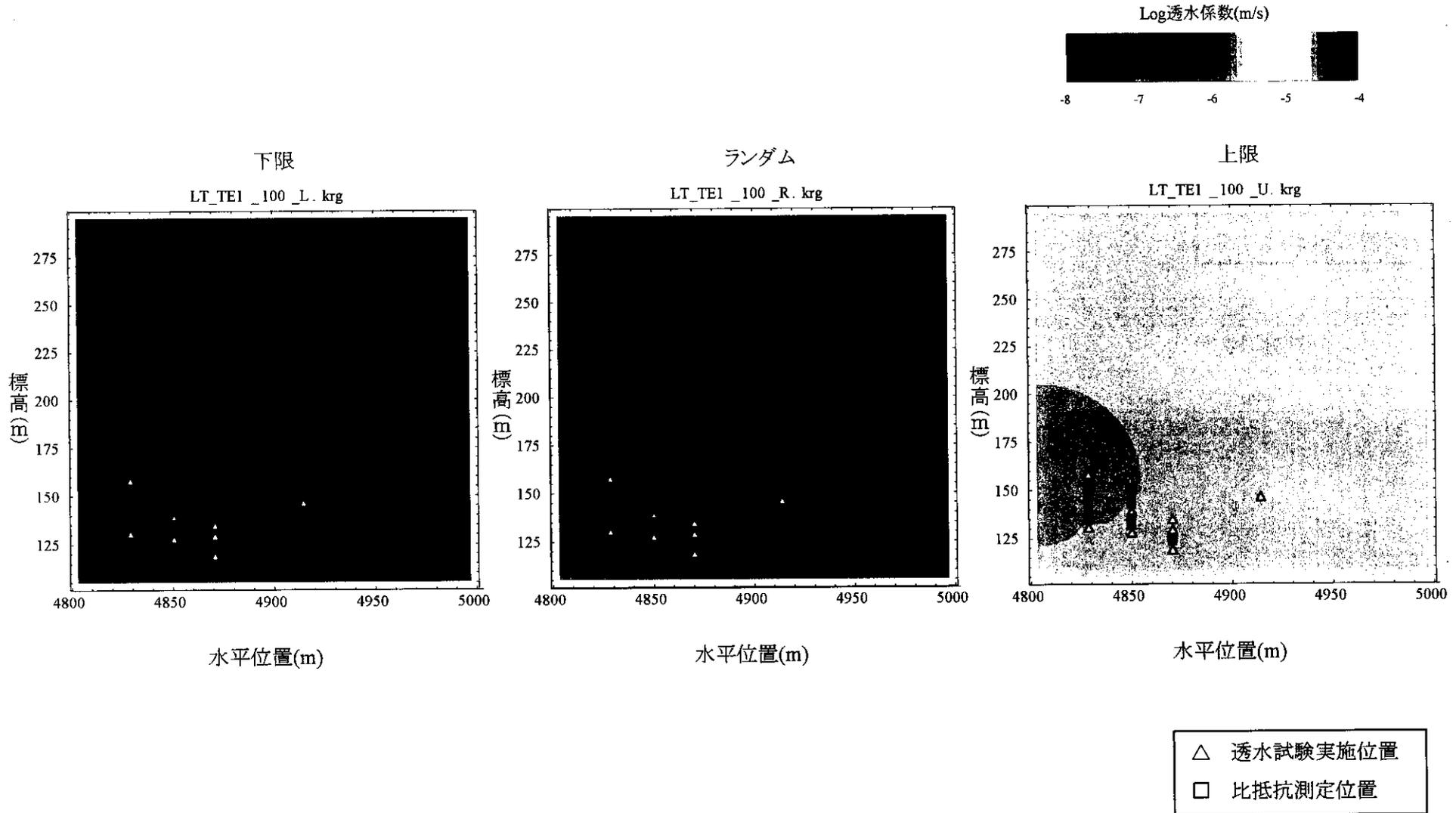


図5.2.3.1.b-5(5) 透水試験結果及び比抵抗値からの推定結果に基づくファジークリッキング(ケース1)の結果(メンバーシップ1.0)
(断層より下の領域のデータセット)

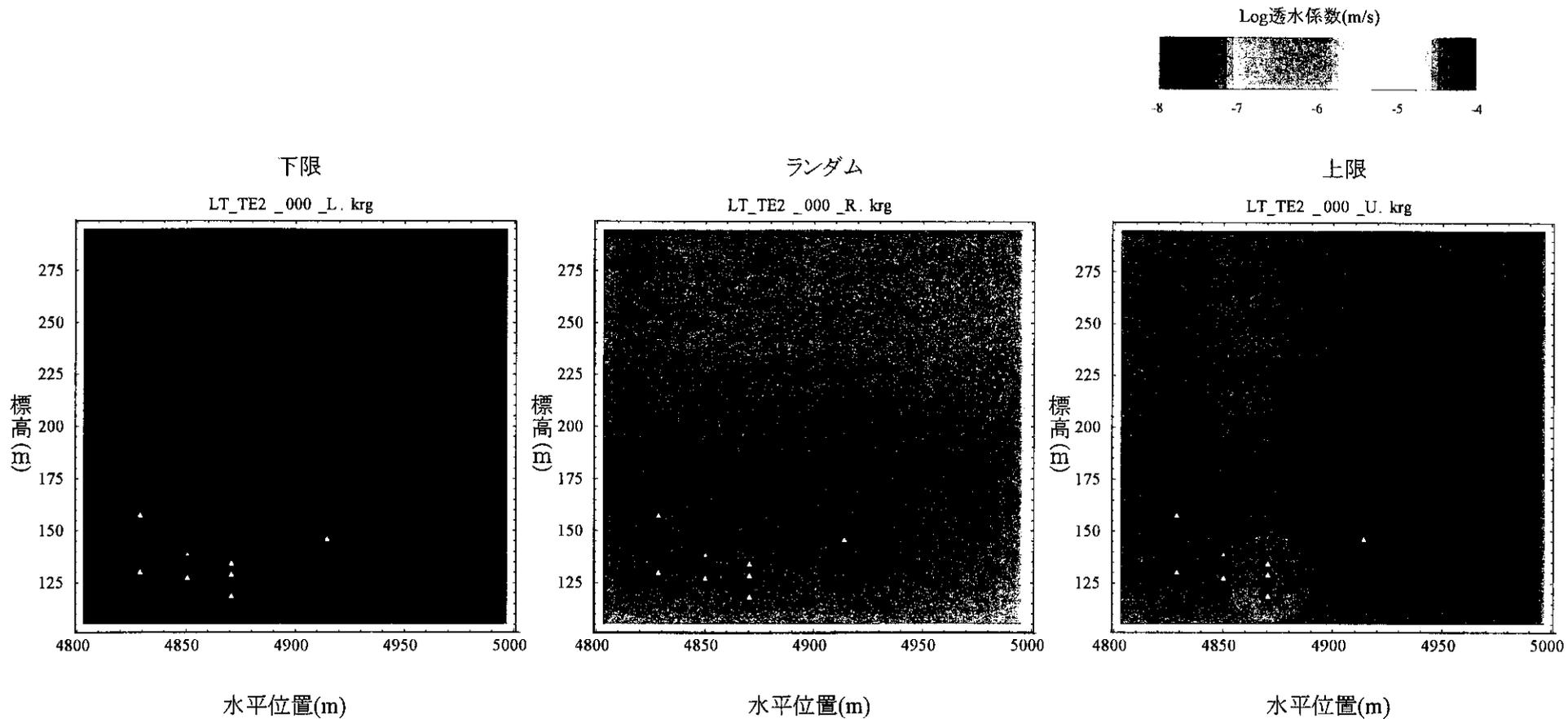


図5.2.3.1.b-6(1) 透水試験結果及び比抵抗値からの推定結果に基づくファジークリッキング(ケース2)の結果(メンバーシップ0.0)
(断層より下の領域のデータセット)

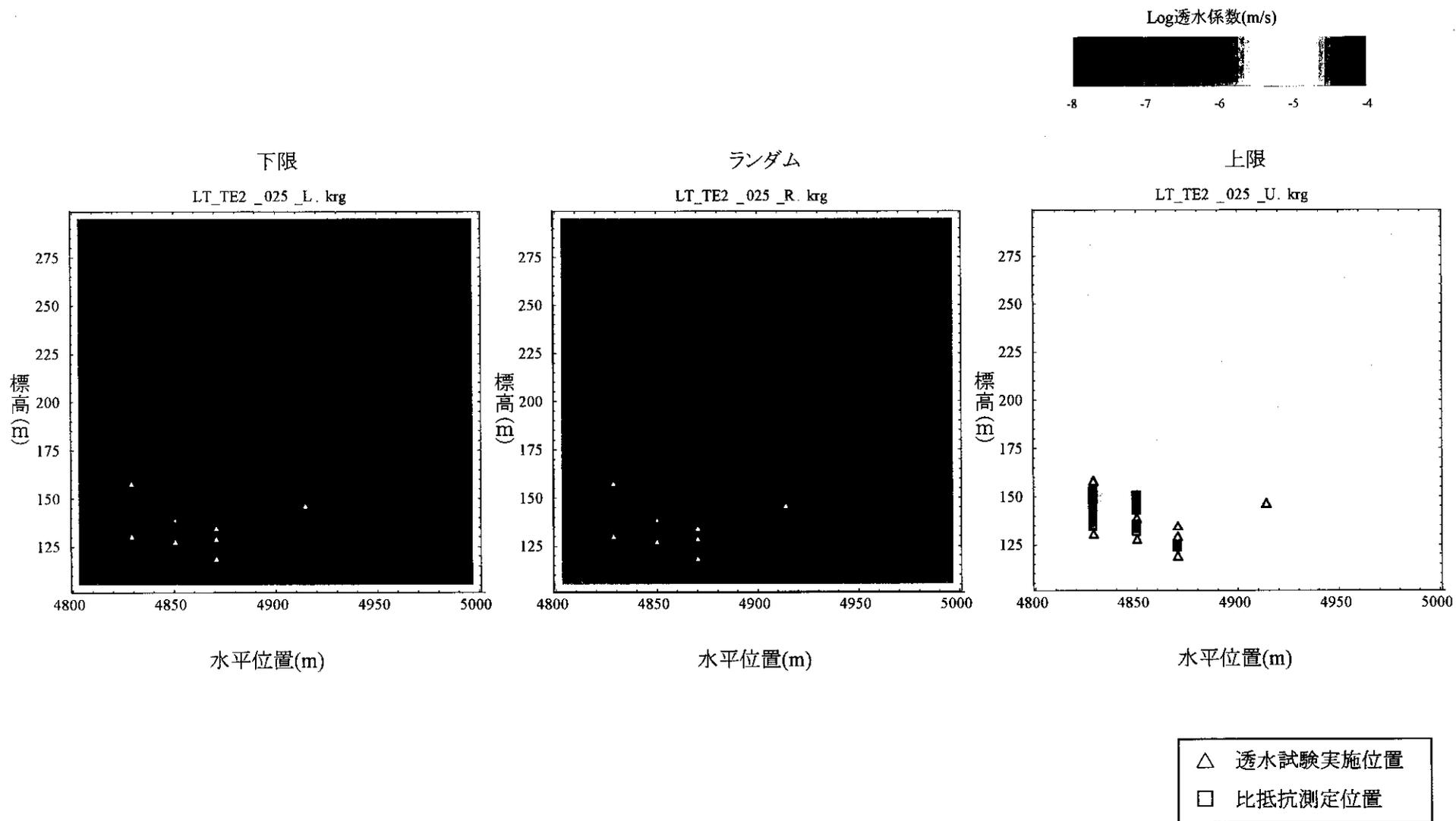


図5.2.3.1.b-6(2) 透水試験結果及び比抵抗値からの推定結果に基づくファジークリッキング(ケース2)の結果(メンバーシップ0.25)
(断層より下の領域のデータセット)

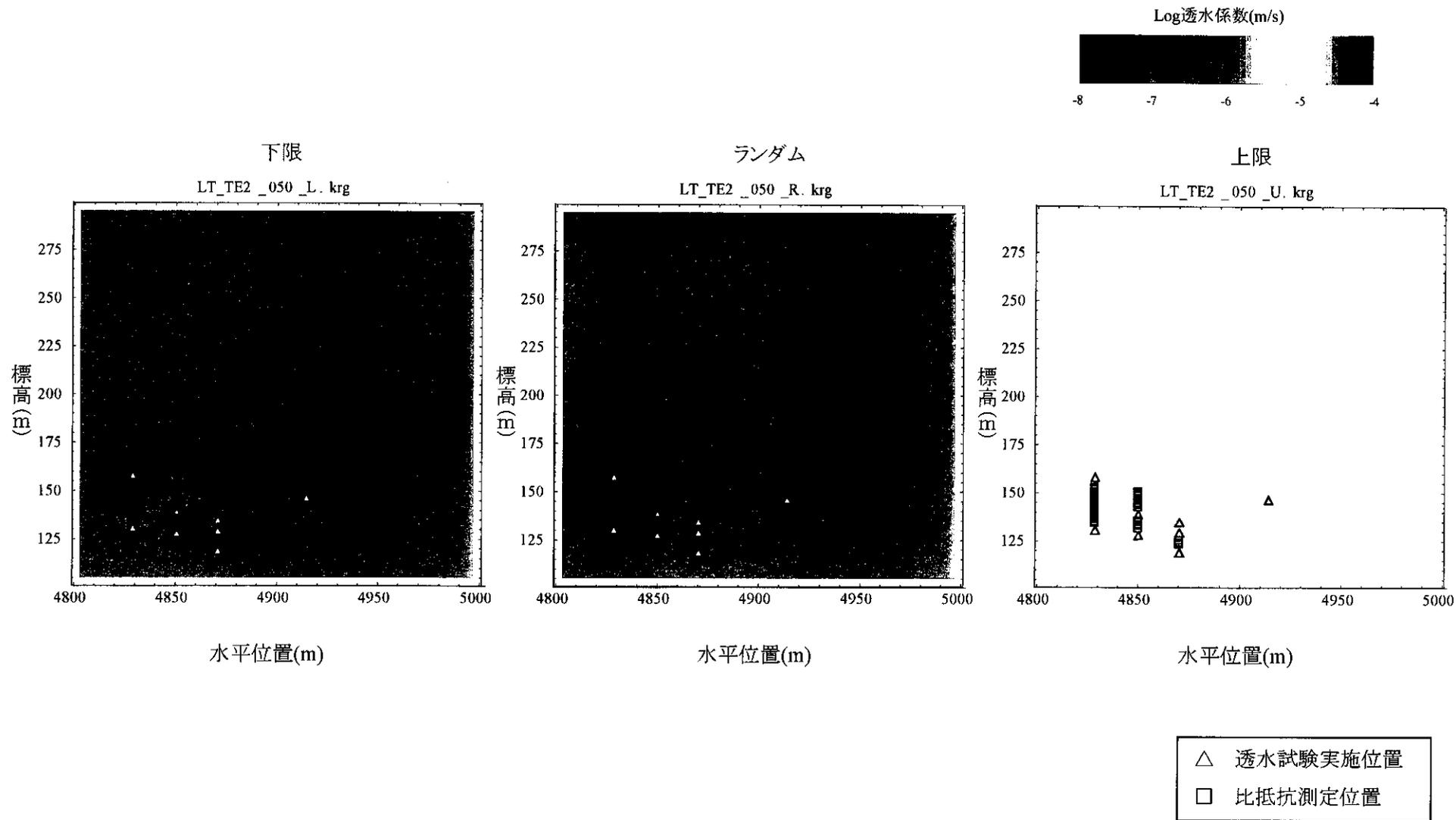


図5.2.3.1.b-6(3) 透水試験結果及び比抵抗値からの推定結果に基づくファジークリッキング(ケース2)の結果(メンバーシップ0.5)
(断層より下の領域のデータセット)

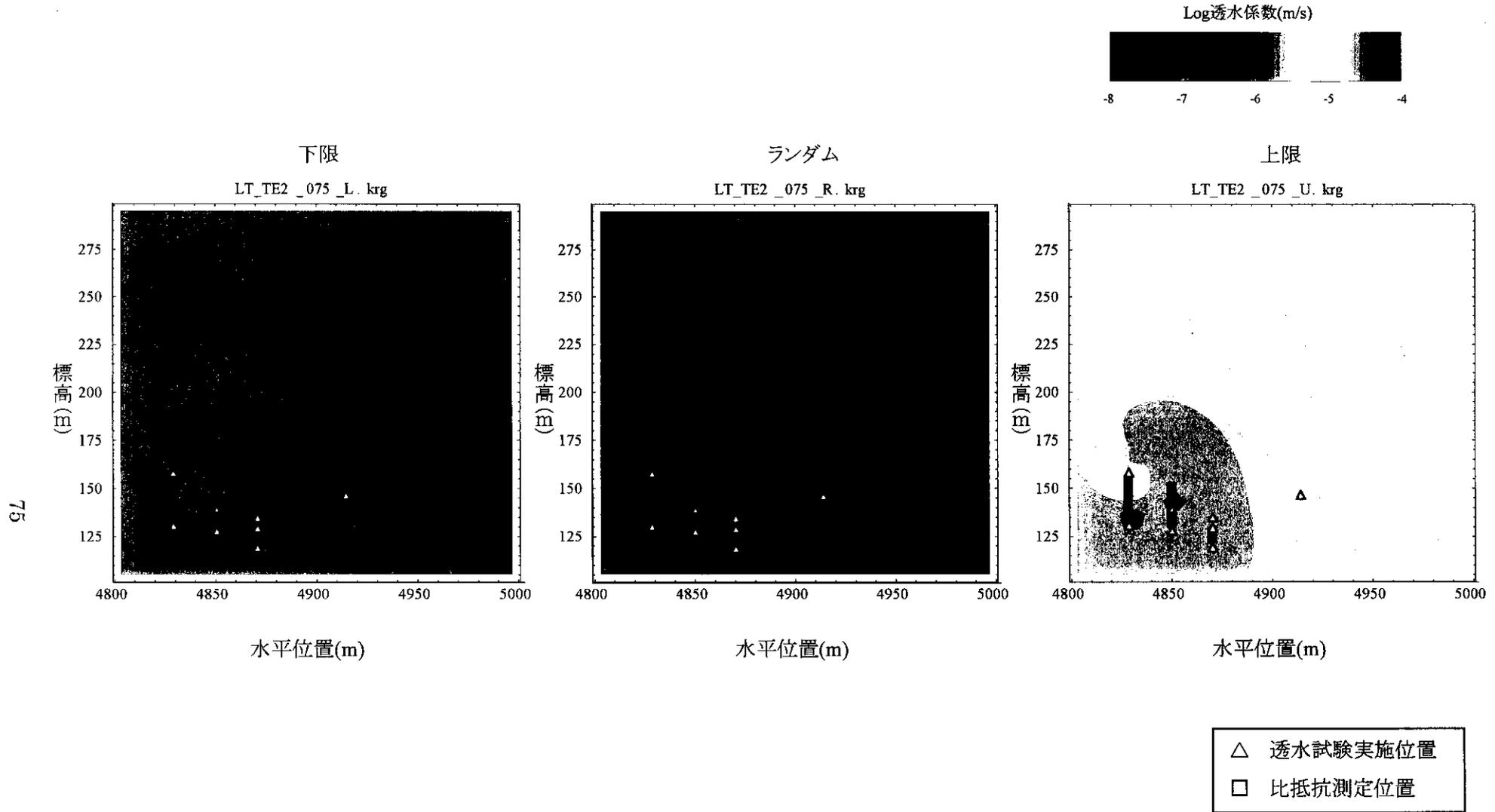


図5.2.3.1.b-6(4) 透水試験結果及び比抵抗値からの推定結果に基づくファジークリッキング(ケース2)の結果(メンバーシップ0.75)
(断層より下の領域のデータセット)

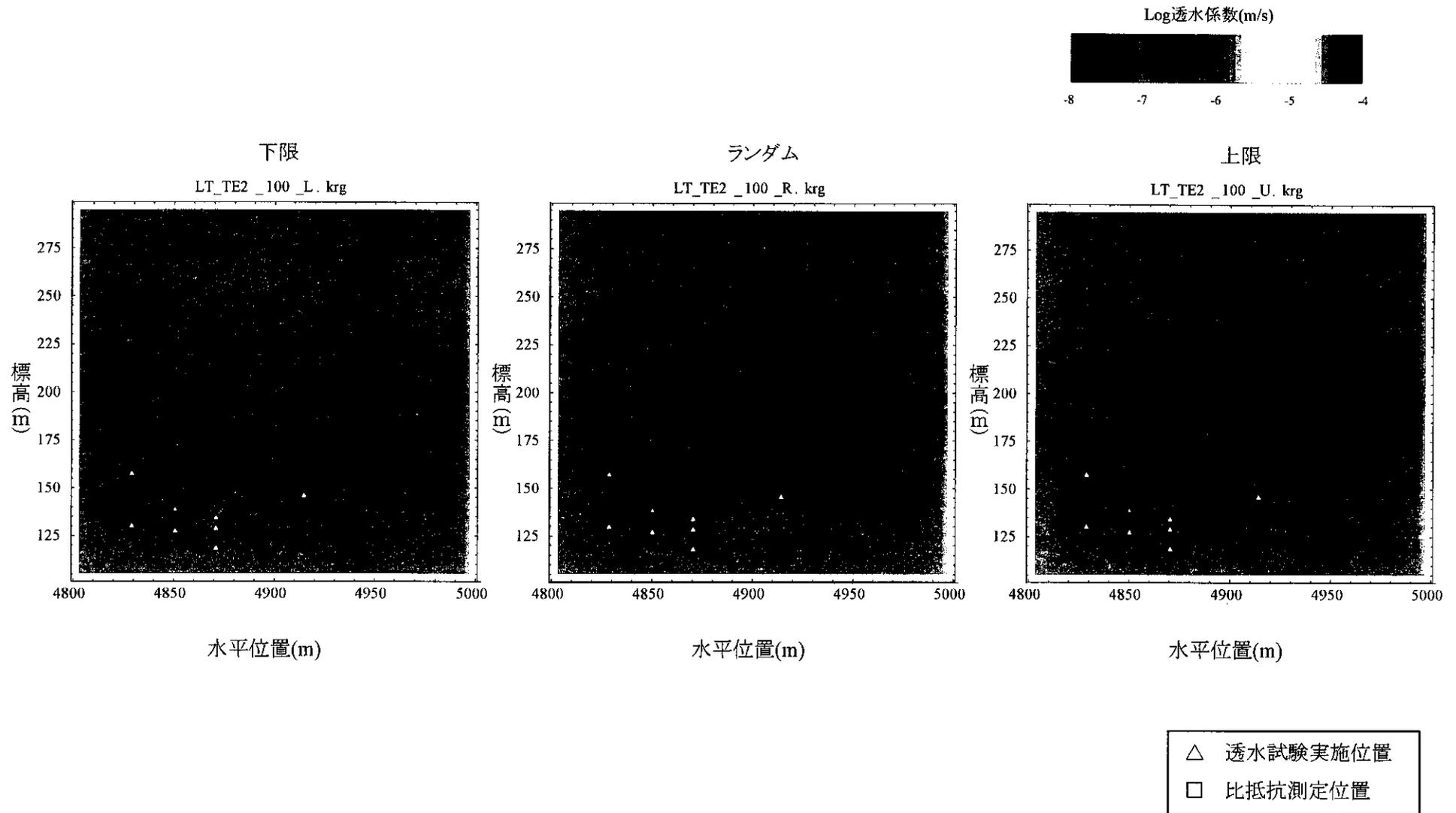


図5.2.3.1.b-6(5) 透水試験結果及び比抵抗値からの推定結果に基づくファジークリッキング(ケース2)の結果(メンバーシップ1.0)
(断層より下の領域のデータセット)

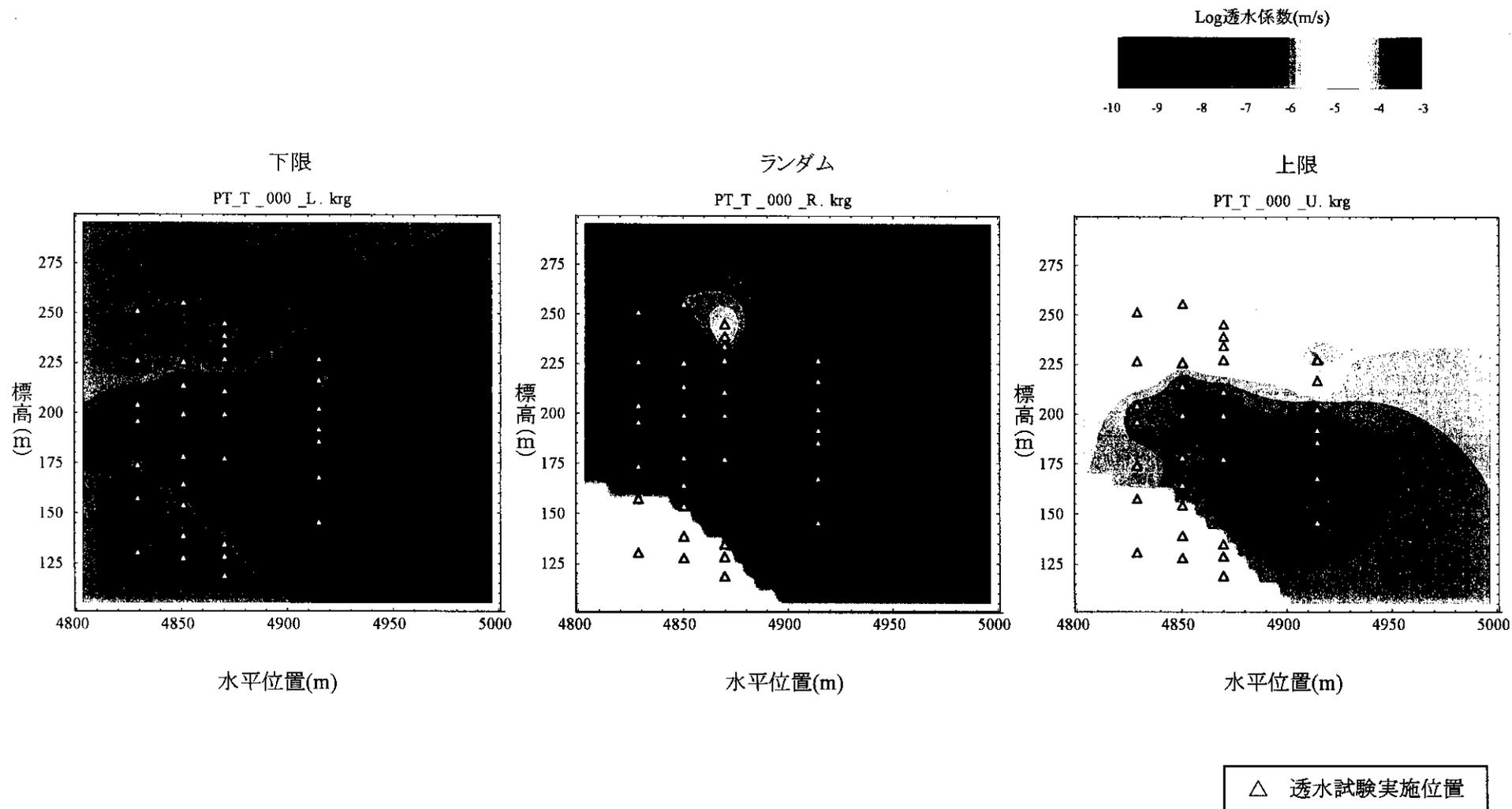


図5.2.3.1.b-7(1) 透水試験結果のみに基づくファジークリッキングの結果(メンバーシップ0.0)
(全領域のデータセット)

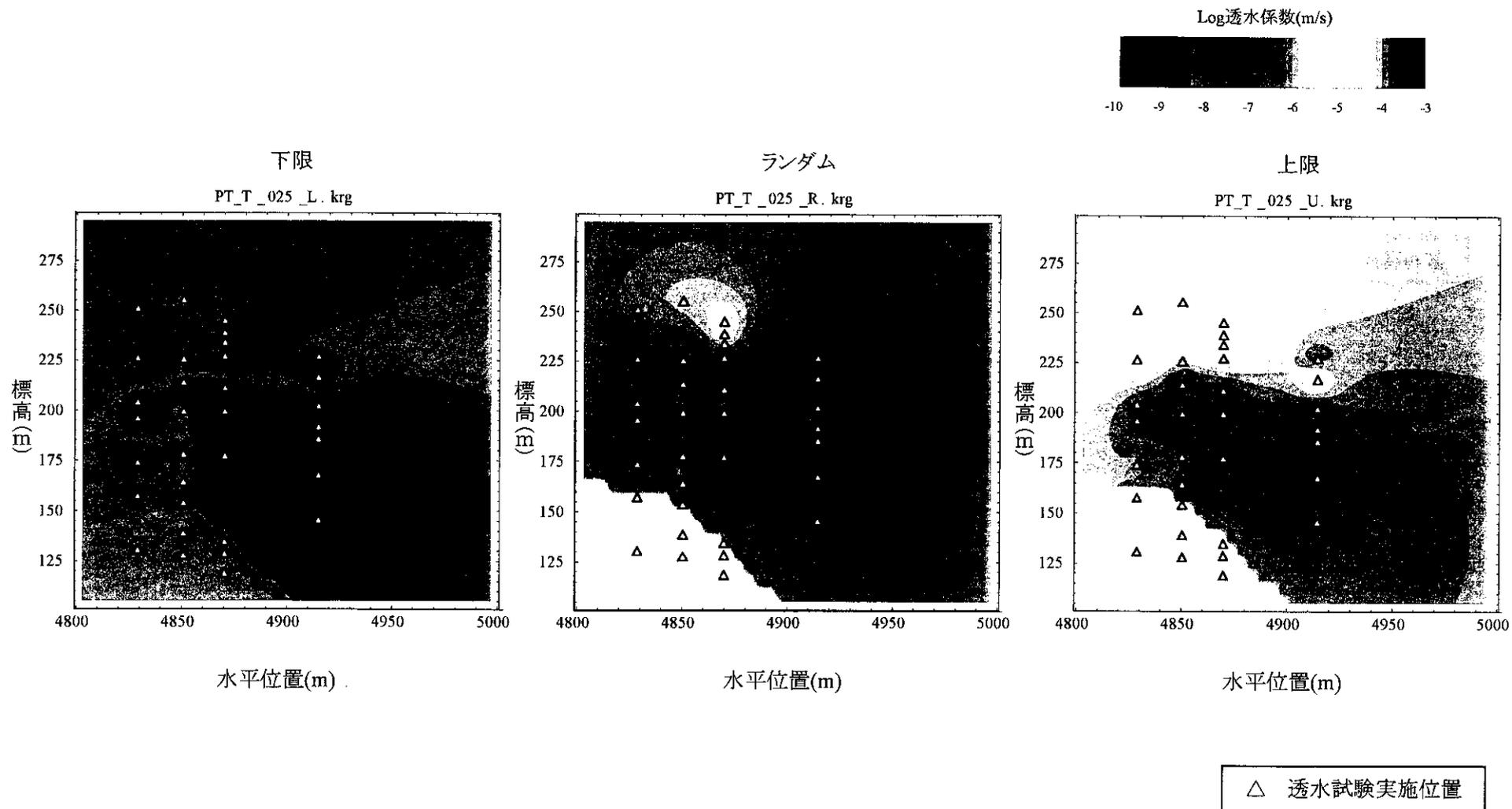


図5.2.3.1.b-7(2) 透水試験結果のみに基づくファジークリッキングの結果(メンバーシップ0.25)
(全領域のデータセット)

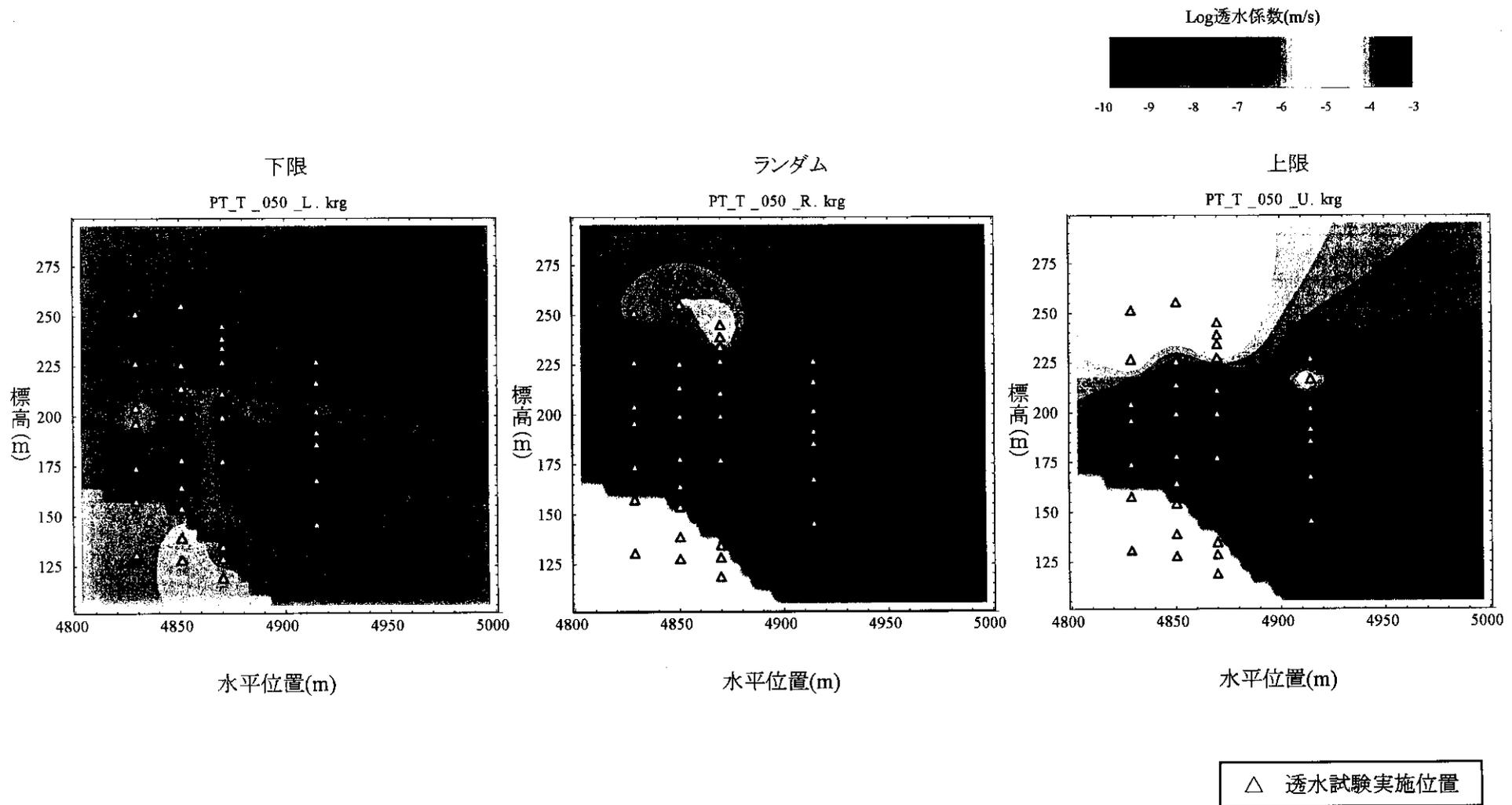


図5.2.3.1.b-7(3) 透水試験結果のみに基づくファジークリッキングの結果(メンバーシップ0.5)
(全領域のデータセット)

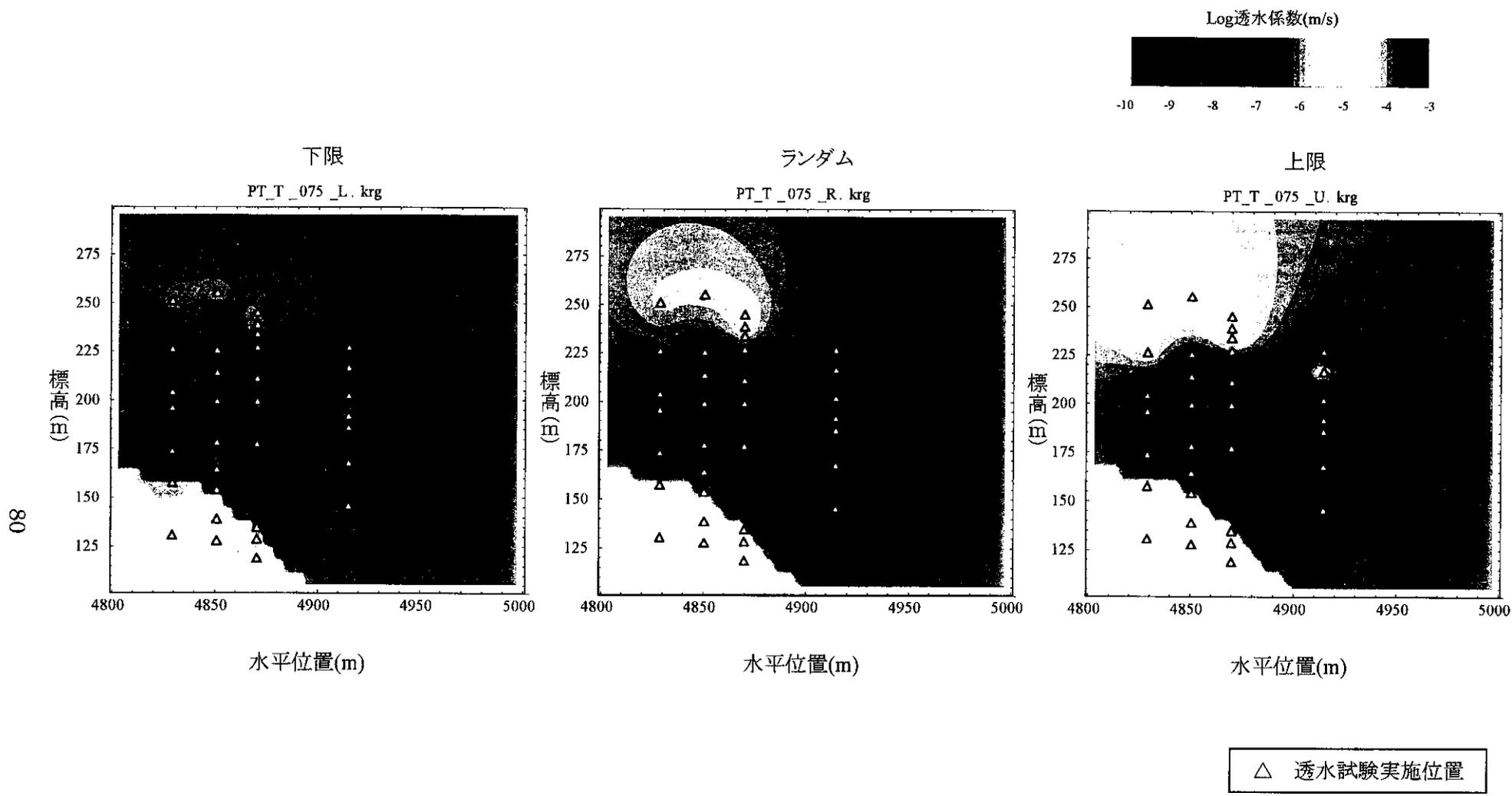


図5.2.3.1.b-7(4) 透水試験結果のみに基づくファジークリッキングの結果(メンバーシップ0.75)
(全領域のデータセット)

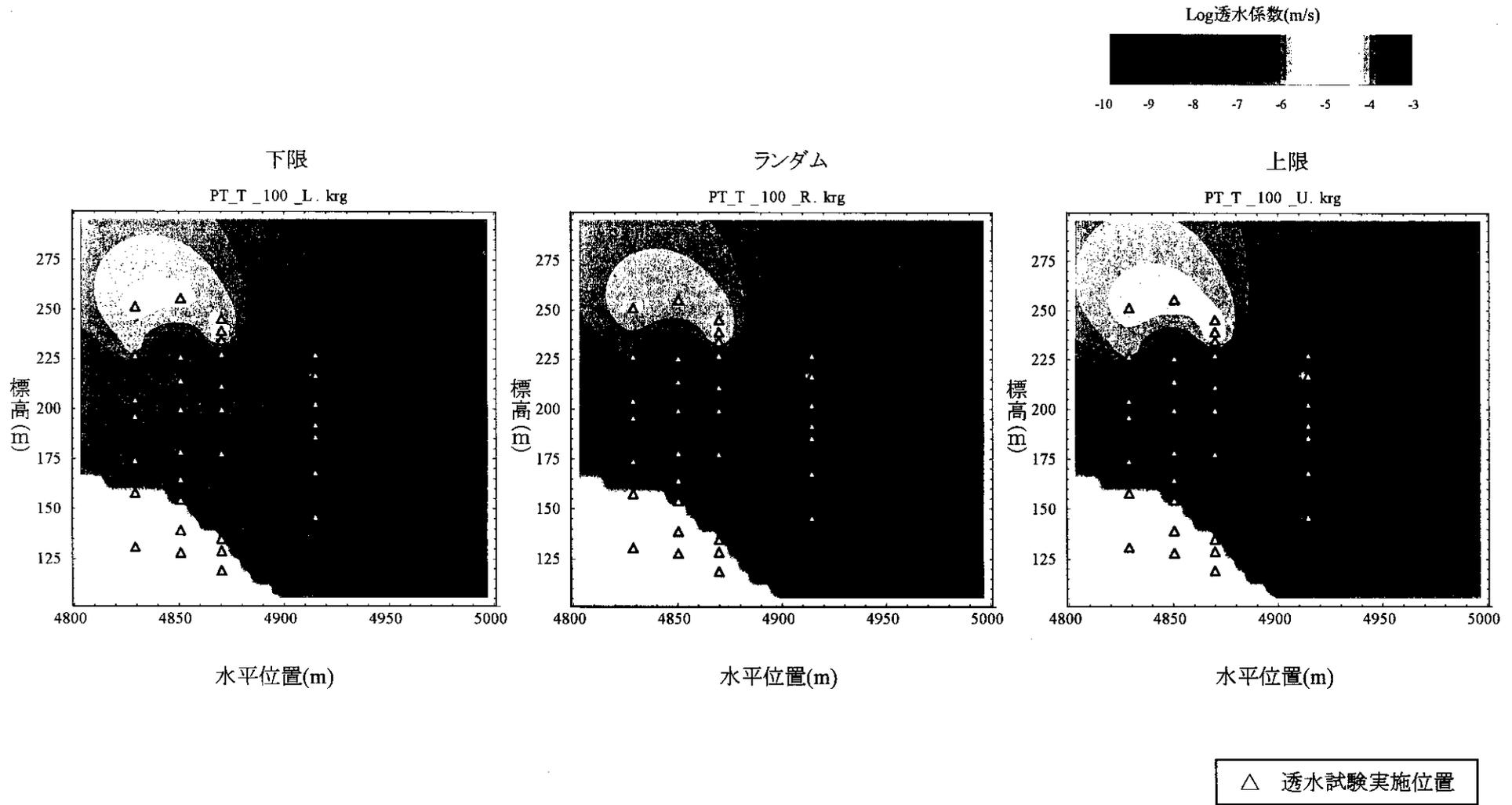


図5.2.3.1.b-7(5) 透水試験結果のみに基づくファジークリッキングの結果(1.0)
(全領域のデータセット)

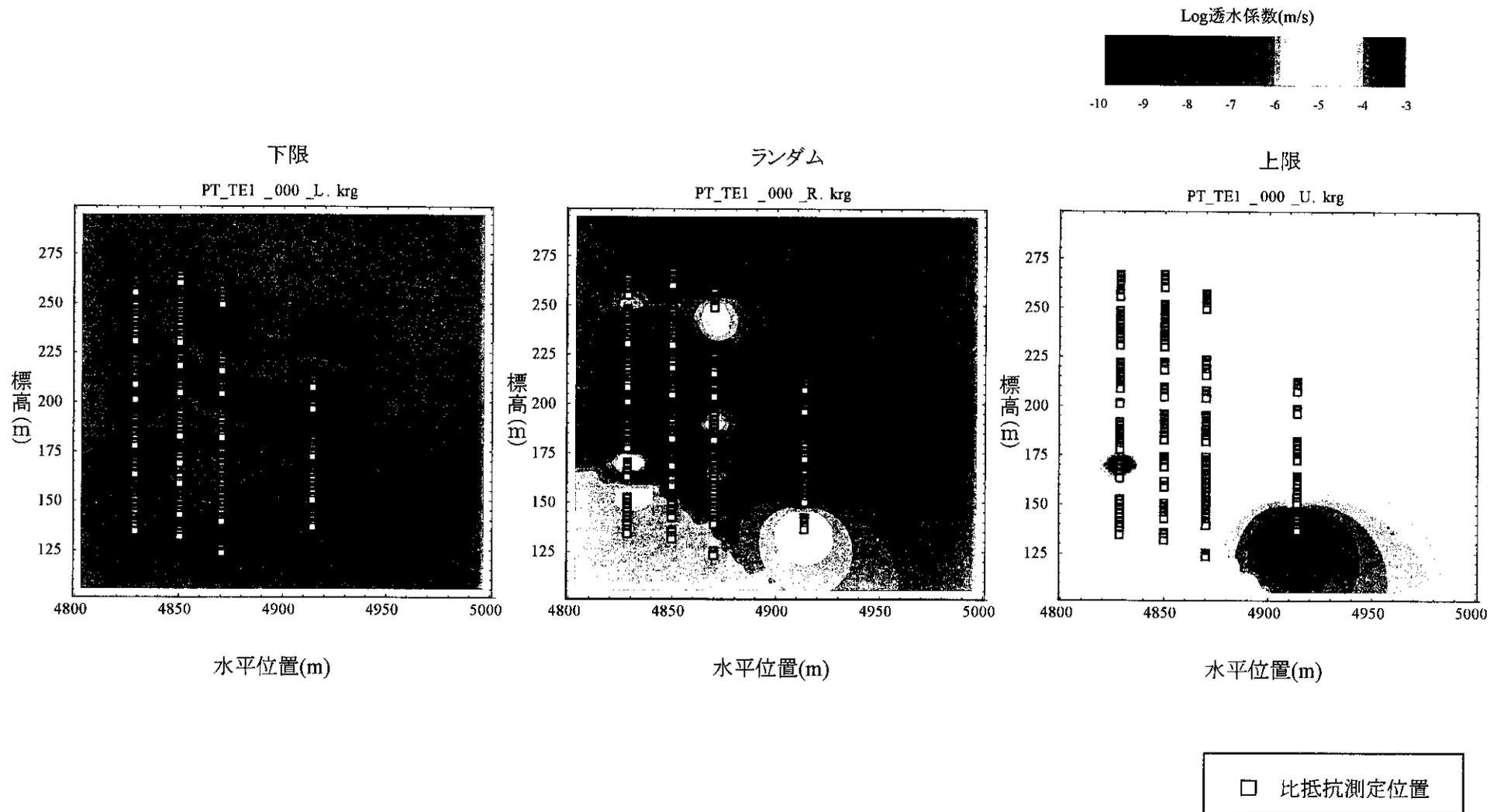


図5.2.3.1.b-8(1) 透水試験結果及び比抵抗値からの推定結果に基づくファジークリッキング(ケース1)の結果(メンバーシップ0.0)
(全領域のデータセット)

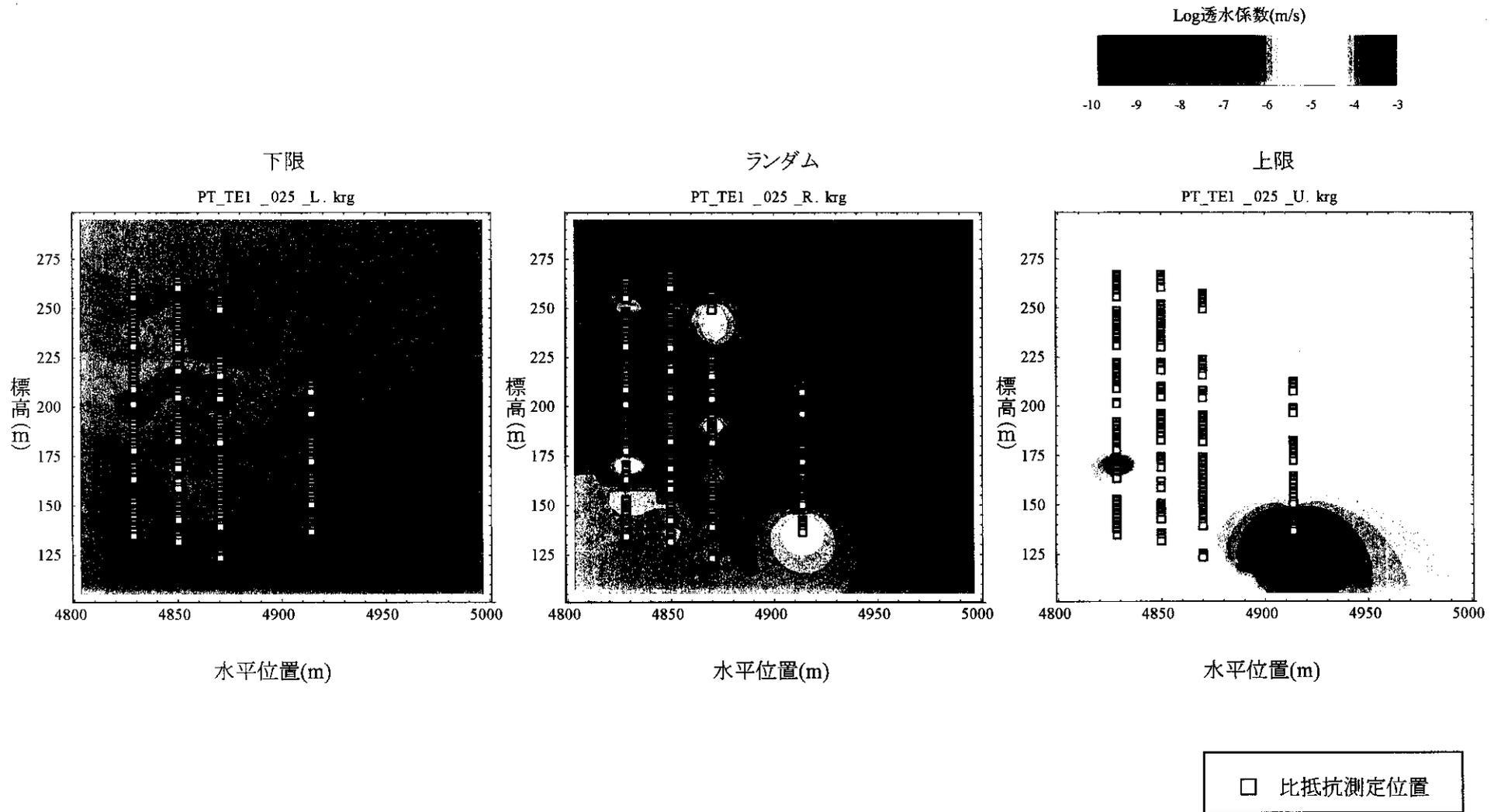


図5.2.3.1.b-8(2) 透水試験結果及び比抵抗値からの推定結果に基づくファジークリッキング(ケース1)の結果(メンバーシップ0.25)
(全領域のデータセット)

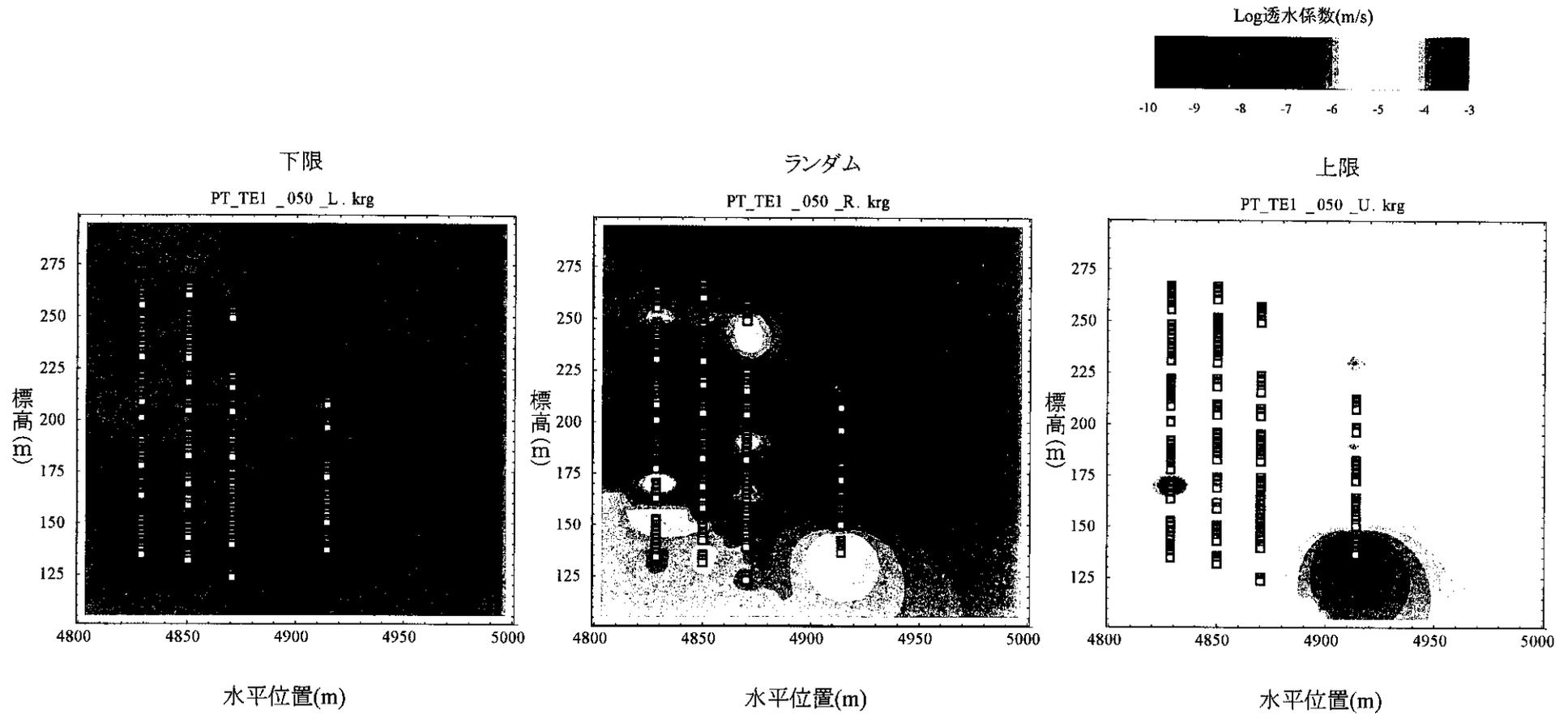


図5.2.3.1.b-8(3) 透水試験結果及び比抵抗値からの推定結果に基づくファジークリッキング(ケース1)の結果(メンバーシップ0.5)
(全領域のデータセット)

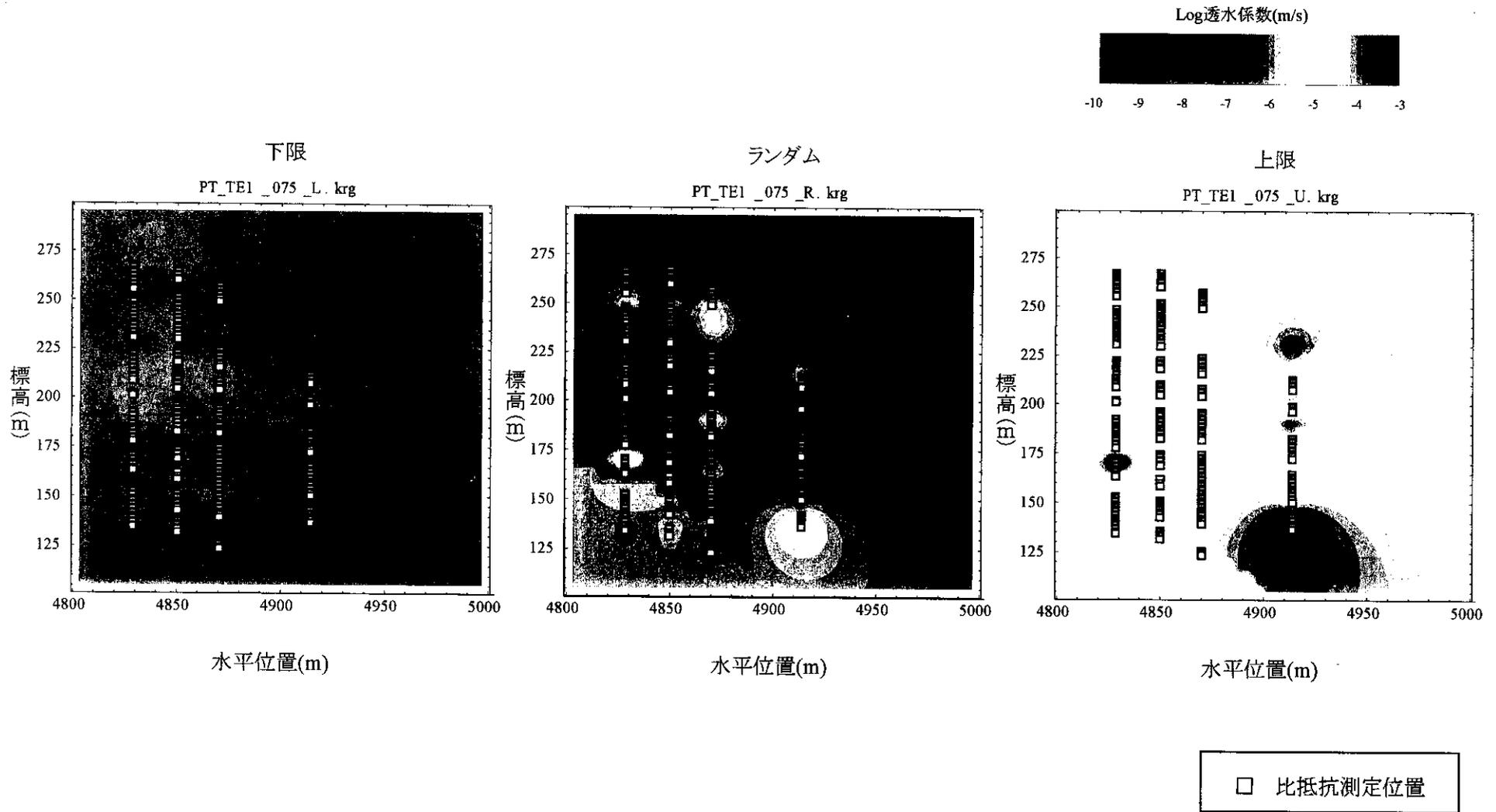


図5.2.3.1.b-8(4) 透水試験結果及び比抵抗値からの推定結果に基づくファジークリッキング(ケース1)の結果(メンバーシップ0.75)
(全領域のデータセット)

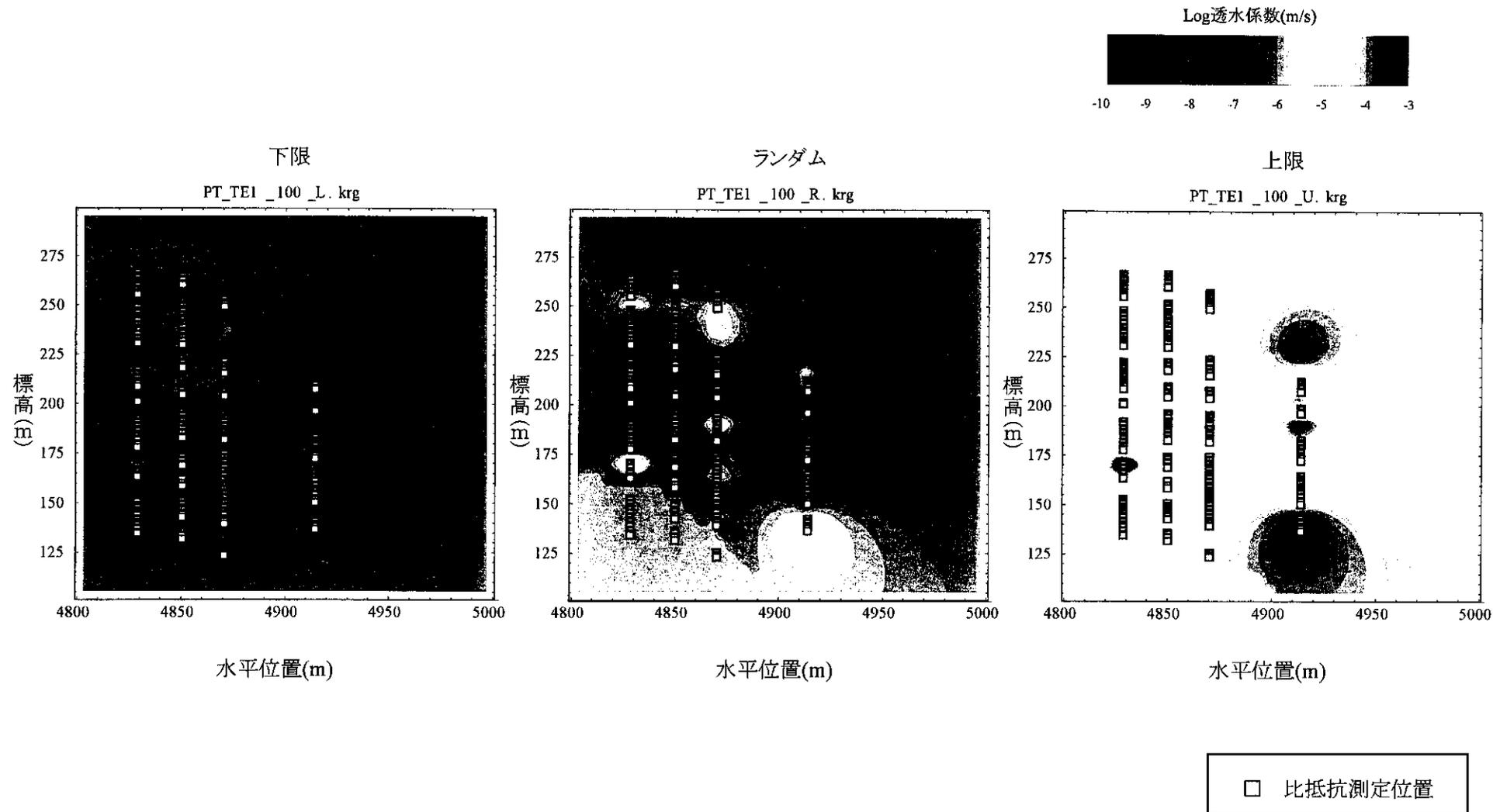


図5.2.3.1.b-8(5) 透水試験結果及び比抵抗値からの推定結果に基づくファジークリッキング(ケース1)の結果(メンバーシップ1.0)
(全領域のデータセット)

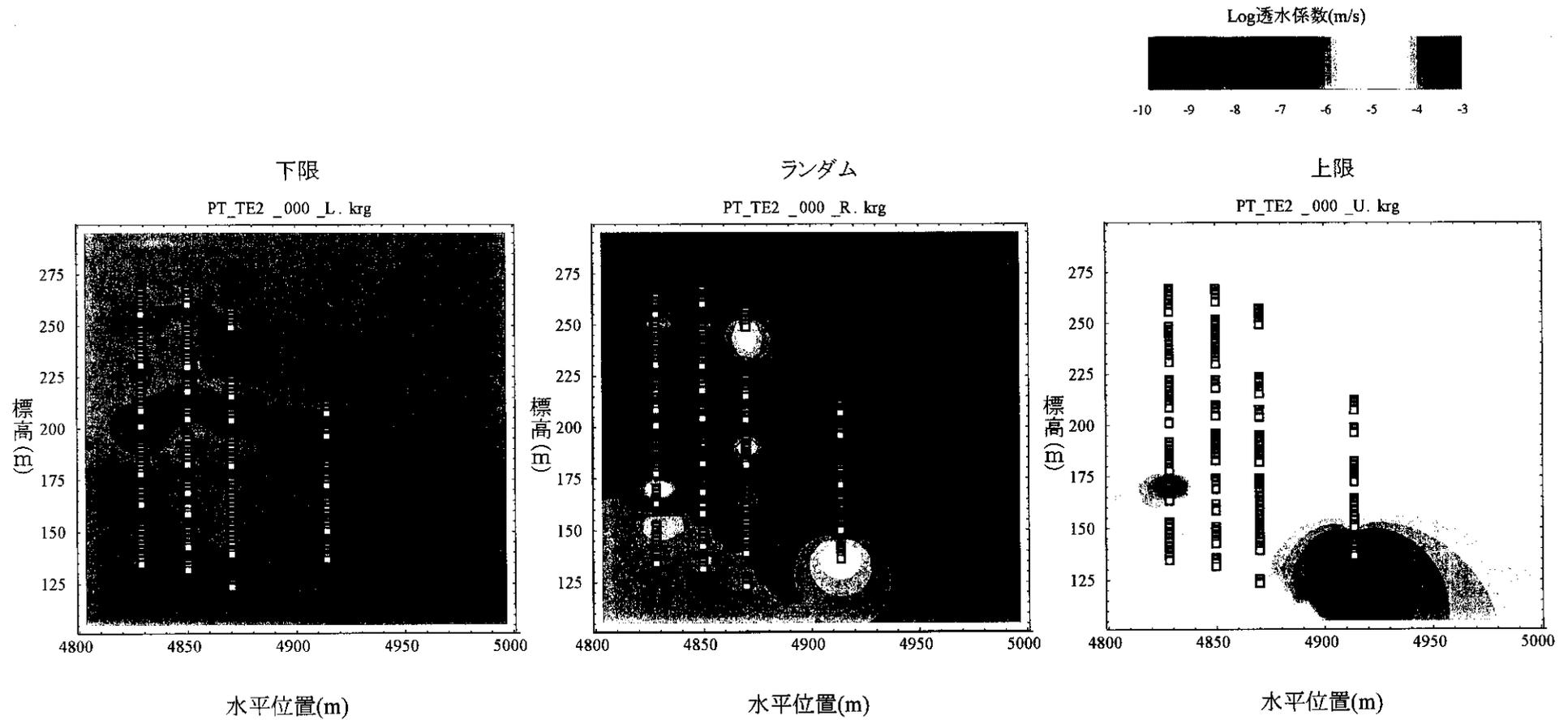


図5.2.3.1.b-9(1) 透水試験結果及び比抵抗値からの推定結果に基づくファジークリッキング(ケース2)の結果(メンバーシップ0.0)
(全領域のデータセット)

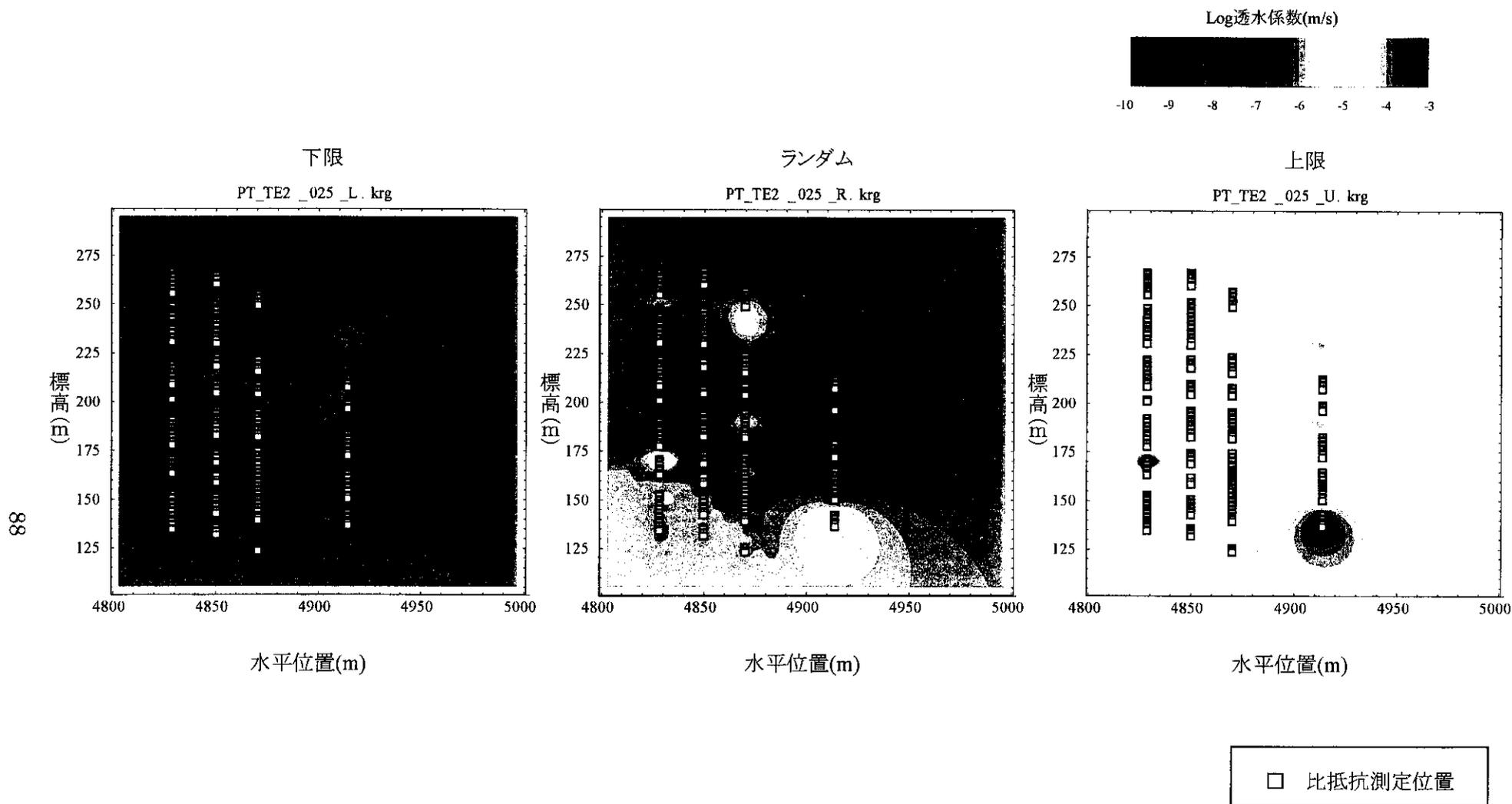


図5.2.3.1.b-9(2) 透水試験結果及び比抵抗値からの推定結果に基づくファジークリッキング(ケース2)の結果(メンバーシップ0.25)
(全領域のデータセット)

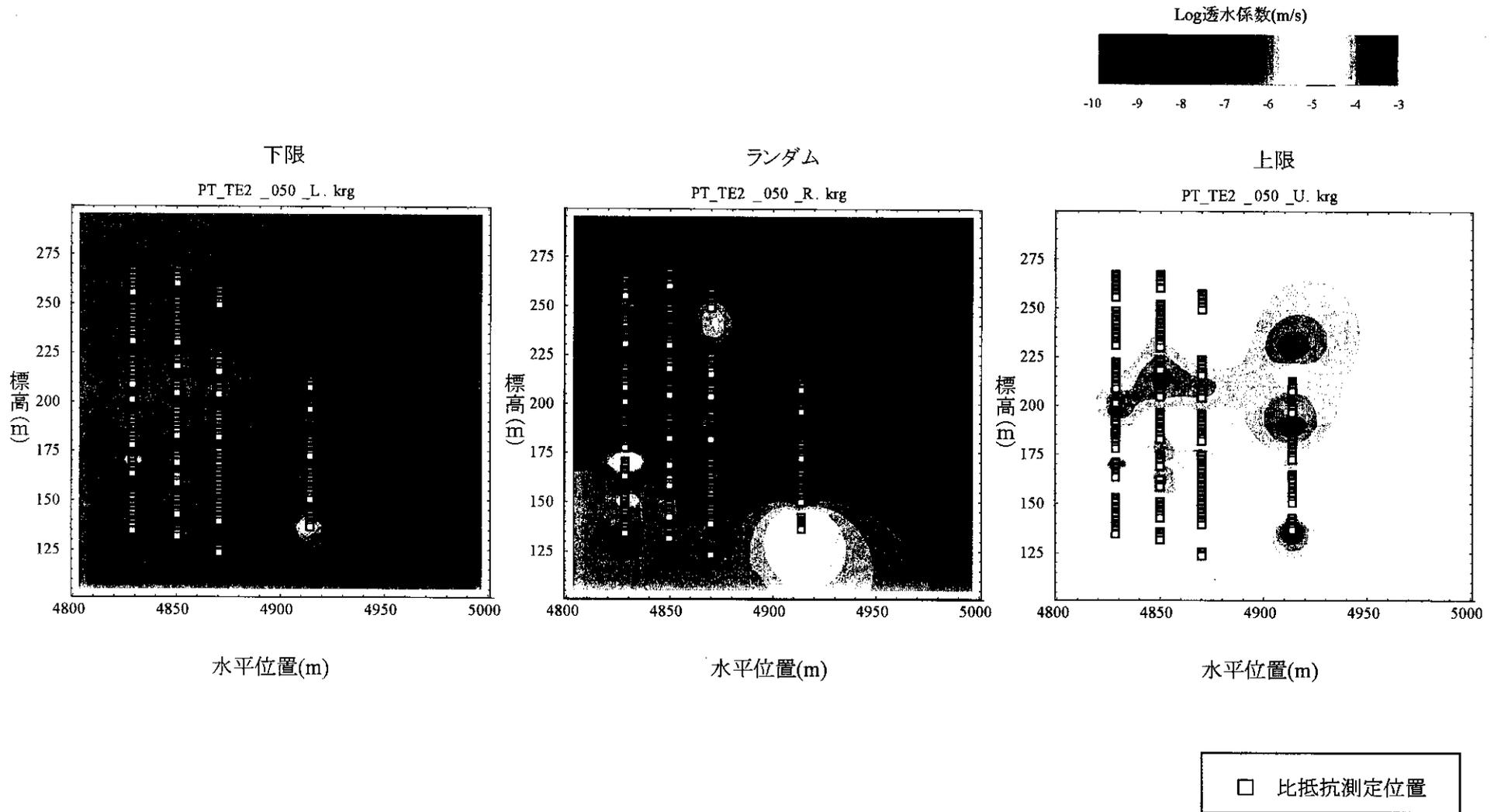


図5.2.3.1.b-9(3) 透水試験結果及び比抵抗値からの推定結果に基づくファジークリッキング(ケース2)の結果(メンバーシップ0.5)
(全領域のデータセット)

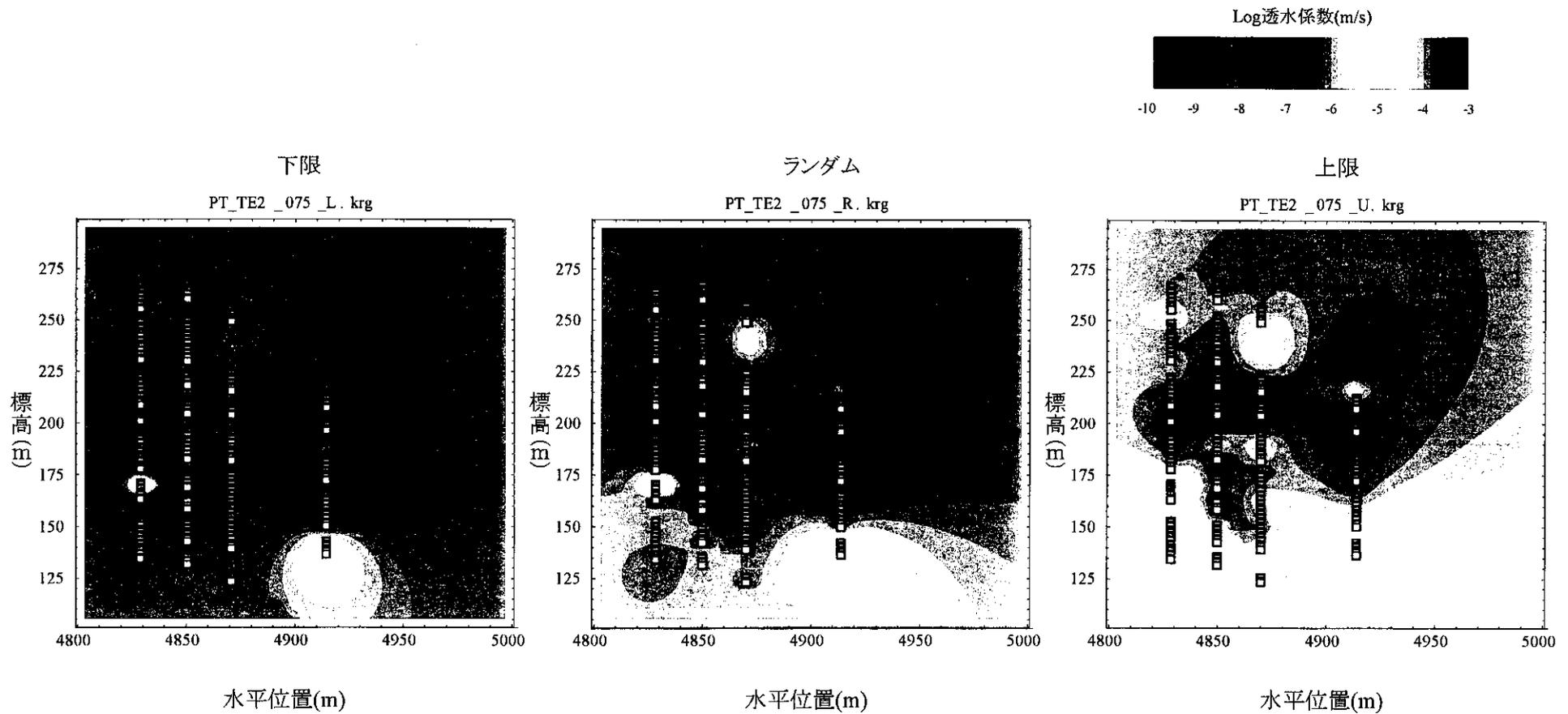
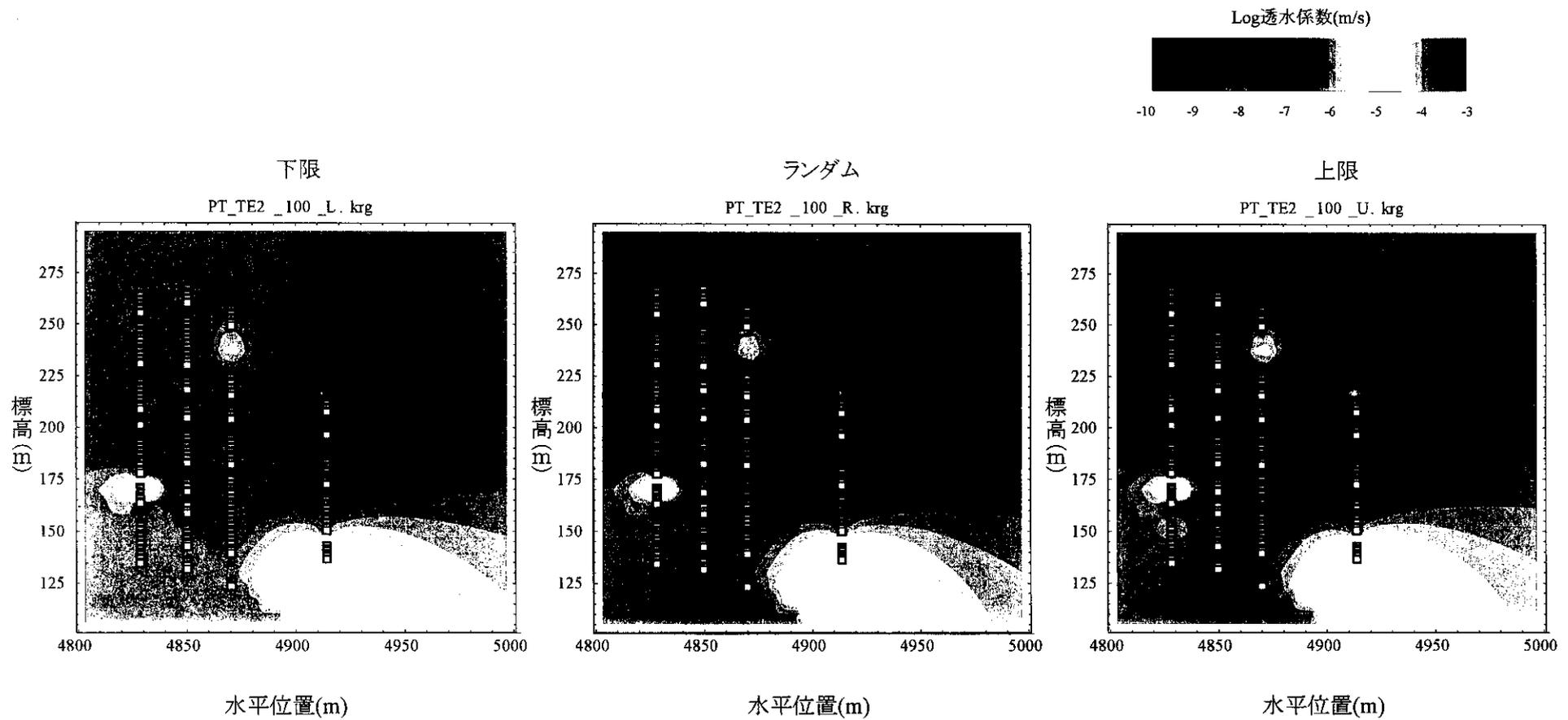


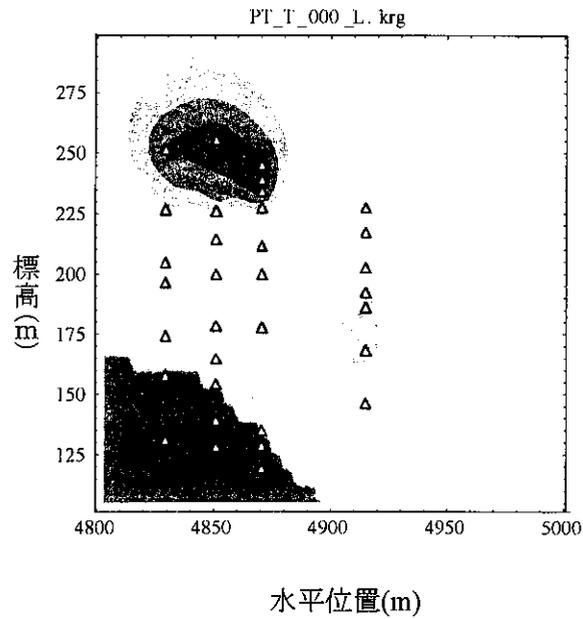
図5.2.3.1.b-9(4) 透水試験結果及び比抵抗値からの推定結果に基づくファジークリッキング(ケース2)の結果(メンバーシップ0.75)
(全領域のデータセット)



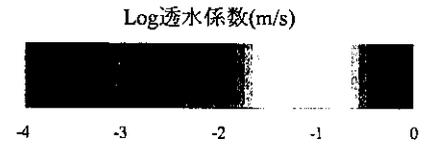
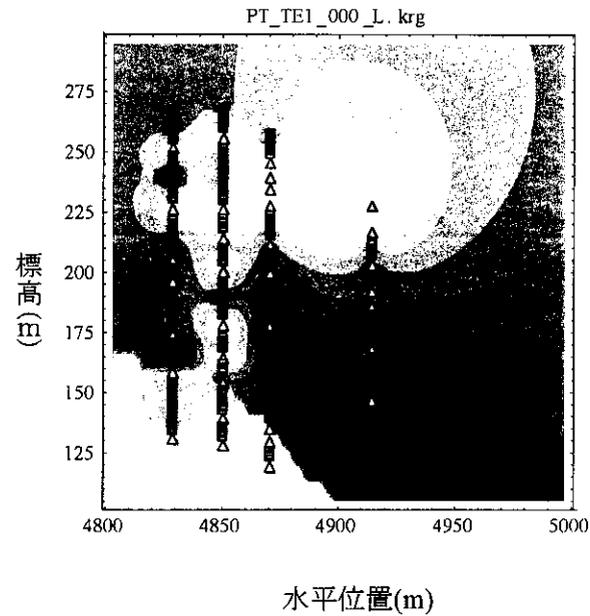
□ 比抵抗測定位置

図5.2.3.1.b-9(5) 透水試験結果及び比抵抗値からの推定結果に基づくファジークリッキング(ケース2)の結果(メンバーシップ1.0)
(全領域のデータセット)

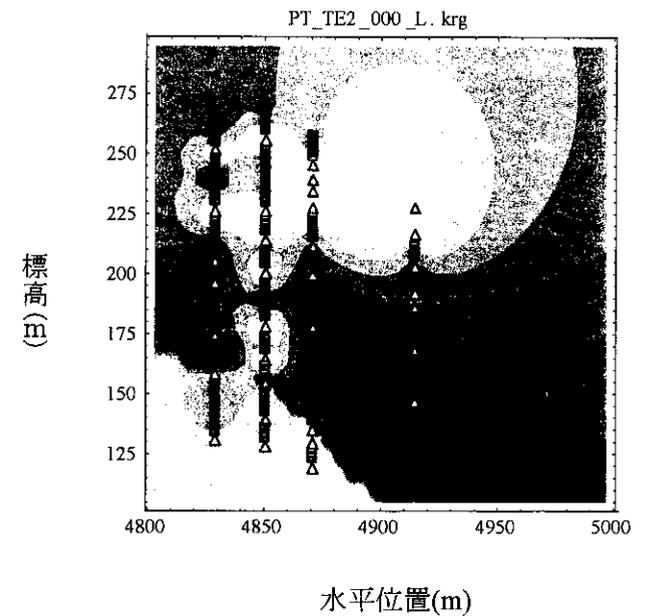
透水係数データのみの場合



透水係数データ及び比抵抗値を用いた場合 (ケース1)



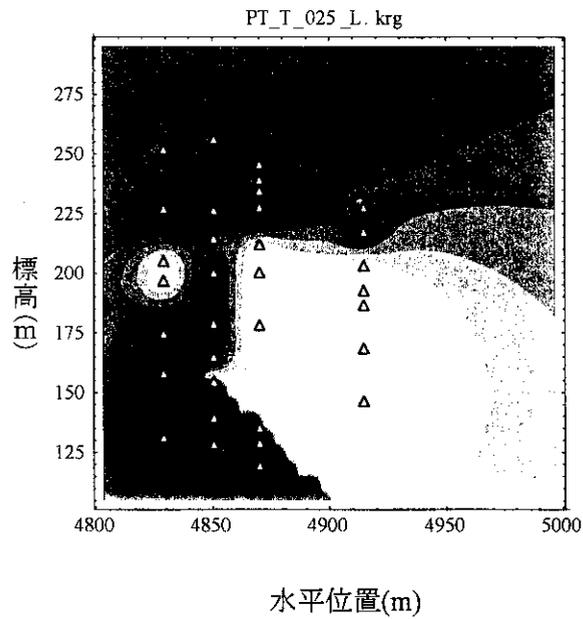
透水係数データ及び比抵抗値を用いた場合 (ケース2)



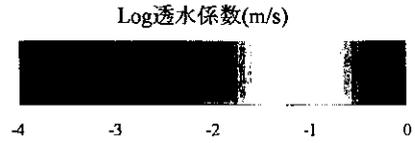
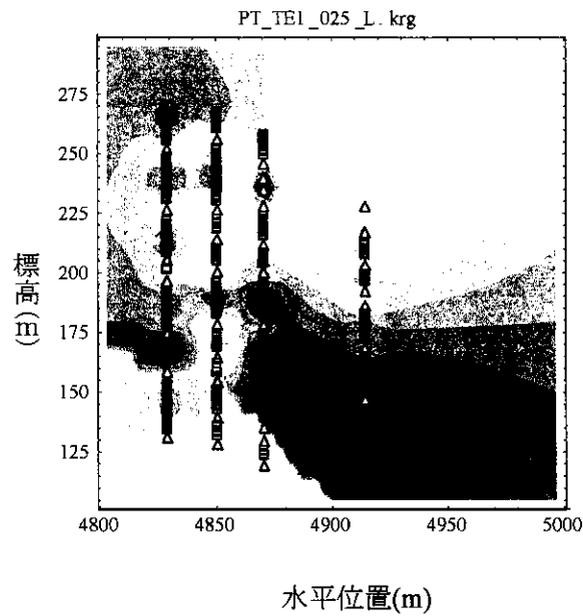
△ 透水試験実施位置
□ 比抵抗測定位置

図5. 2. 3. 1. b-10(1) データの不確実性に起因するクリッキング結果の変動範囲 (メンバーシップ0.0)

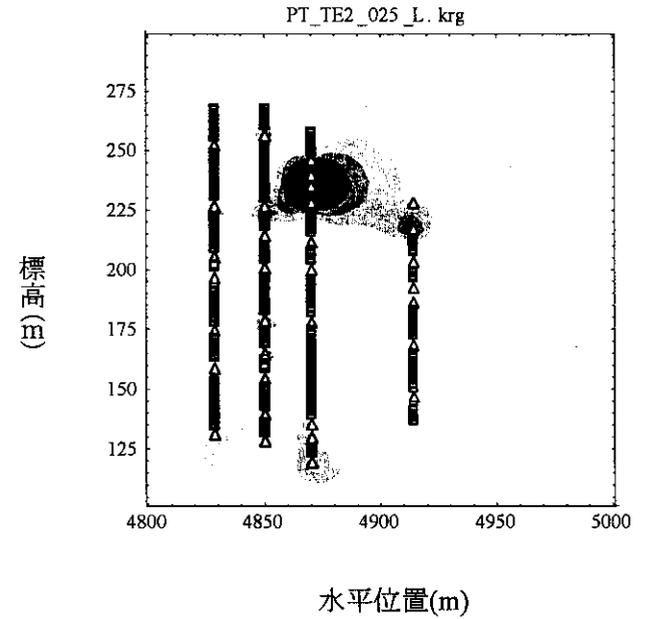
透水係数データのみの場合



透水係数データ及び比抵抗値を用いた場合 (ケース1)



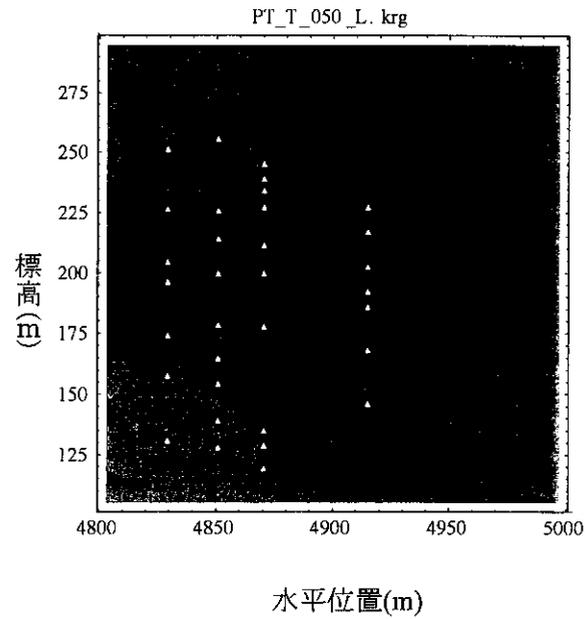
透水係数データ及び比抵抗値を用いた場合 (ケース2)



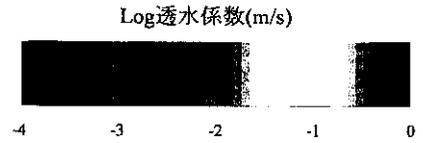
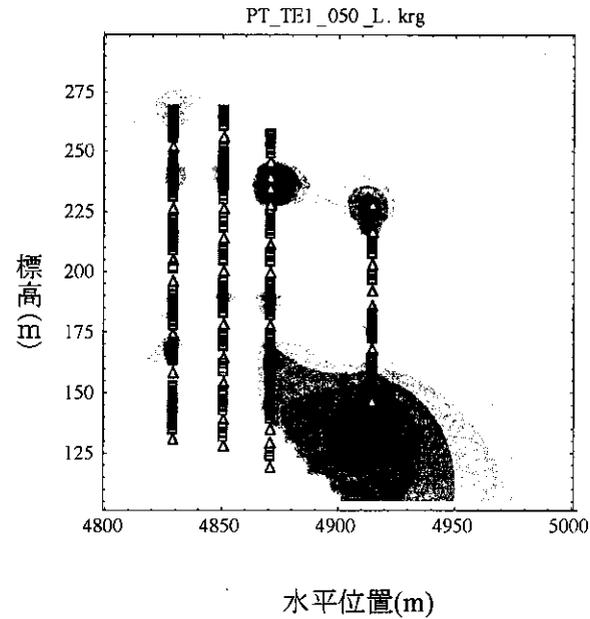
△ 透水試験実施位置
□ 比抵抗測定位置

図5.2.3.1.b-10(2) データの不確実性に起因するクリッキング結果の変動範囲 (メンバーシップ0.25)

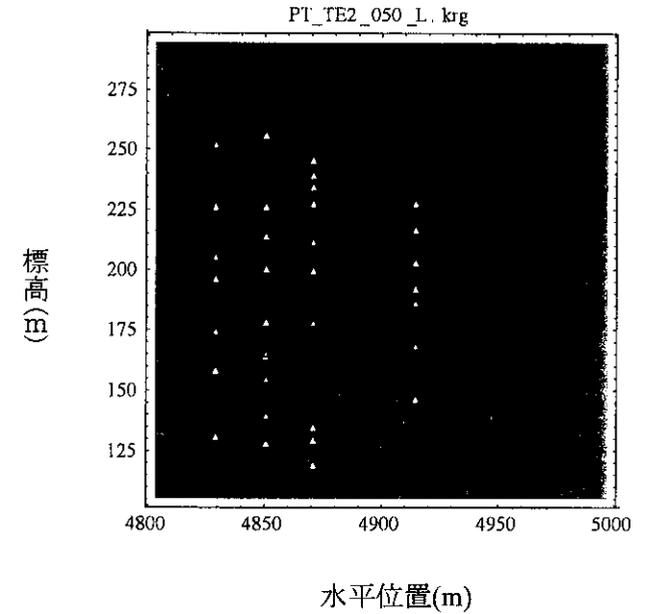
透水係数データのみの場合



透水係数データ及び比抵抗値を用いた場合 (ケース1)



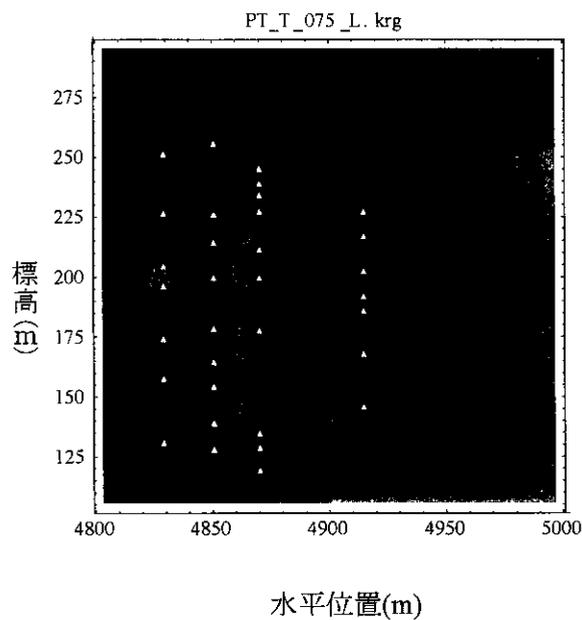
透水係数データ及び比抵抗値を用いた場合 (ケース2)



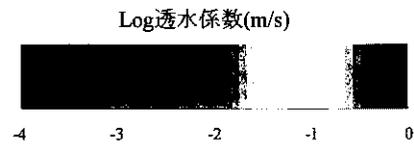
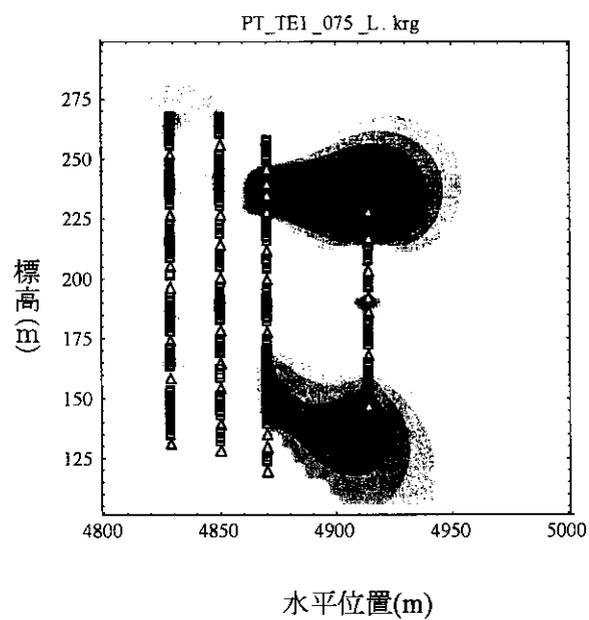
△ 透水試験実施位置
□ 比抵抗測定位置

図5.2.3.1.b-10(3) データの不確実性に起因するクリッキング結果の変動範囲 (メンバーシップ0.5)

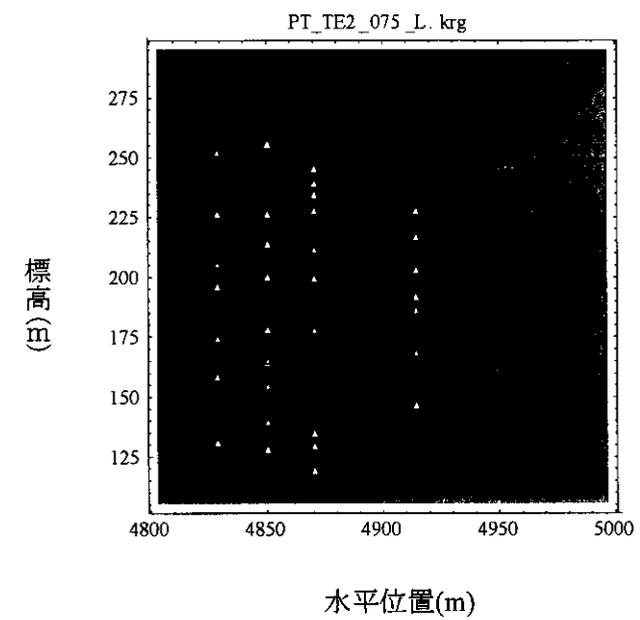
透水係数データのみの場合



透水係数データ及び比抵抗値を用いた場合 (ケース1)



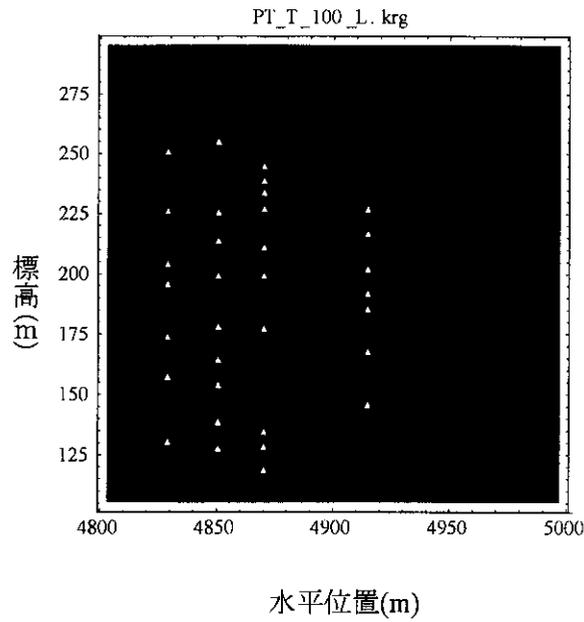
透水係数データ及び比抵抗値を用いた場合 (ケース2)



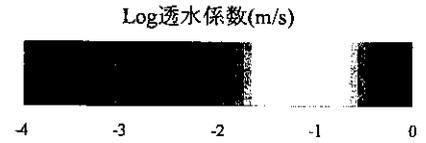
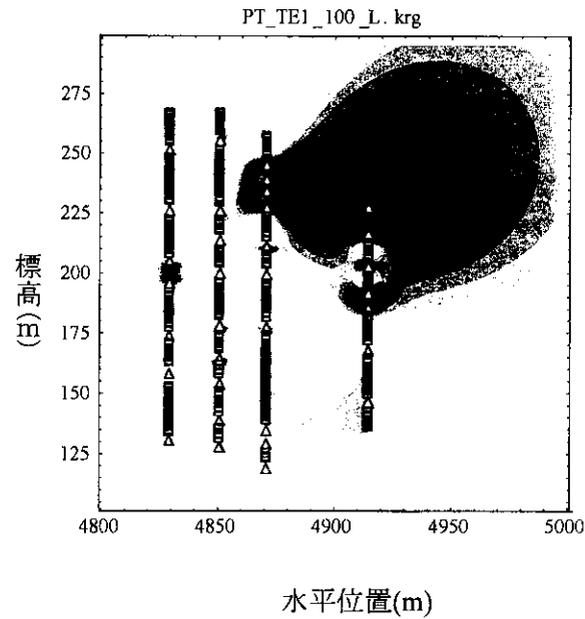
△ 透水試験実施位置
□ 比抵抗測定位置

図5.2.3.1.b-10(4) データの不確実性に起因するクリッキング結果の変動範囲 (メンバーシップ0.75)

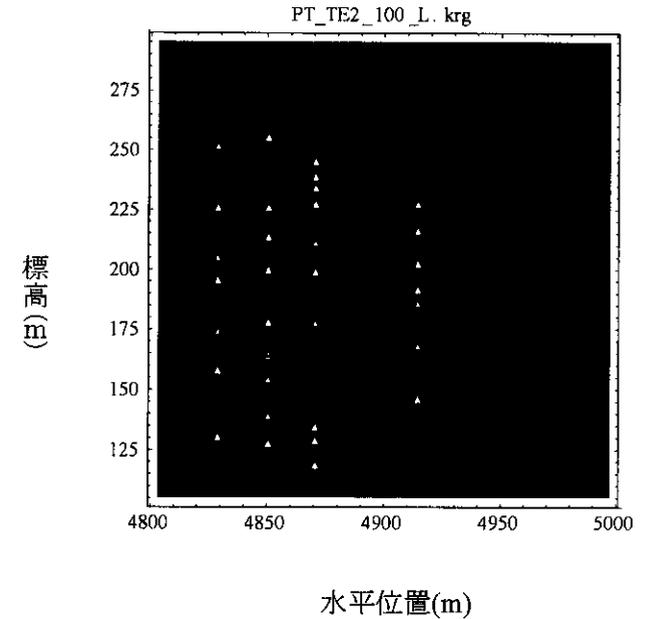
透水係数データのみの場合



透水係数データ及び比抵抗値を用いた場合 (ケース1)



透水係数データ及び比抵抗値を用いた場合 (ケース2)



△ 透水試験実施位置
□ 比抵抗測定位置

図5.2.3.1.b-10(5) データの不確実性に起因するクリッキング結果の変動範囲 (メンバーシップ1.0)

(2) ファジーシミュレーション

5.2.1.(2)c に述べた手法を用いて、ファジーシミュレーションを行った。このシミュレーションにおいても、前節に述べた同じ理由から、断層より上の領域と下の領域とを区分して、それぞれに対してコンディショニングを施したシミュレーションを行った後、これらを合成することによって結果が得られる。

透水試験結果のみをコンディショニングに用いた場合の結果（メンバーシップ 1.0 の下限及び上限）を図 5.2.3.2-1～3 に示す。同図から明らかな通り、ファジーシミュレーションを行うことによって、ファジークリッキングでは表現することのできない現実的な不均一性のパターンを（統計的に）例示可能であることがわかる。

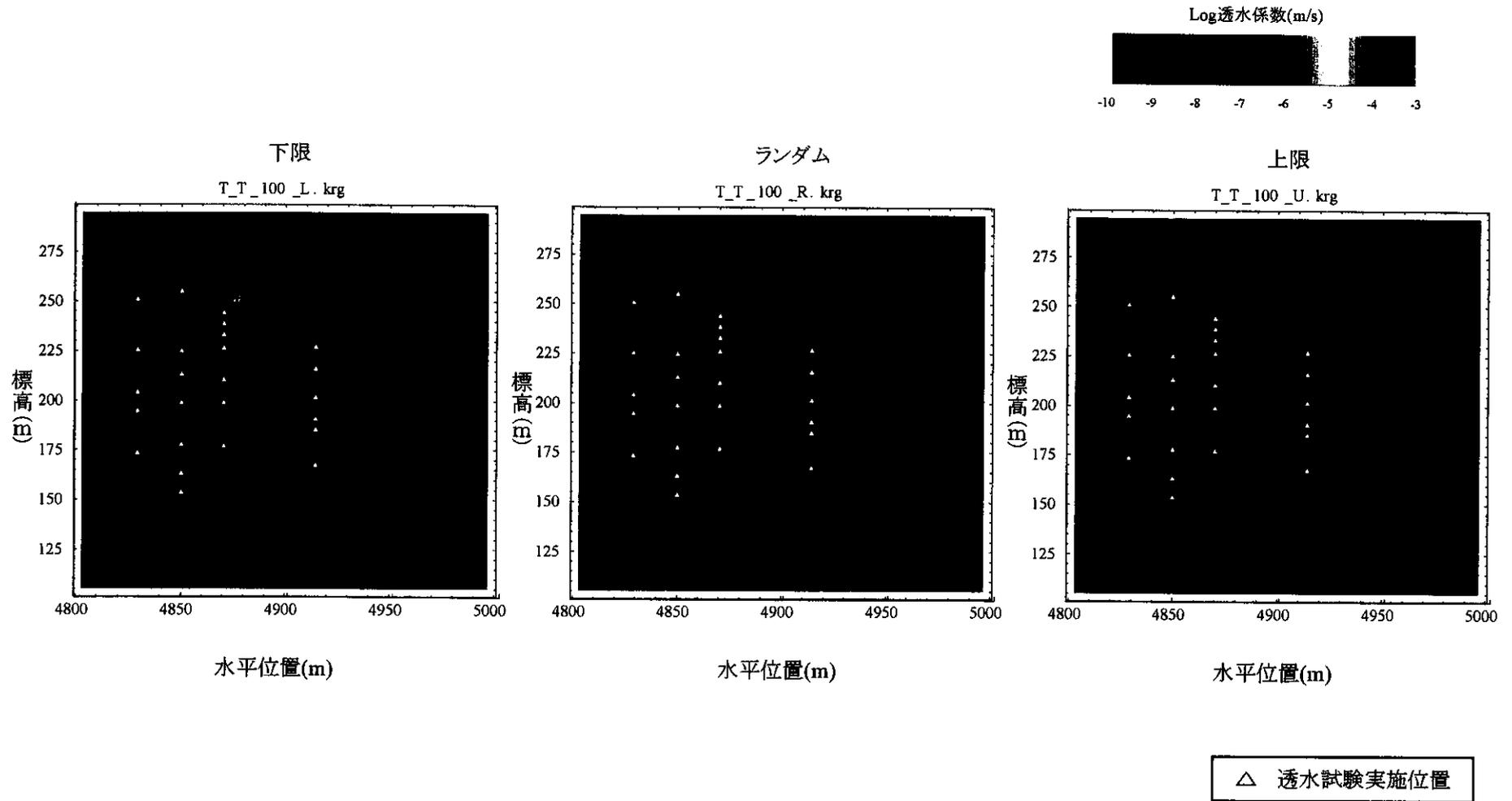


図5.2.3.2-1(1) 透水試験結果のみに基づくファジークリッキングの結果(1.0)
(断層より上の領域のデータセット)

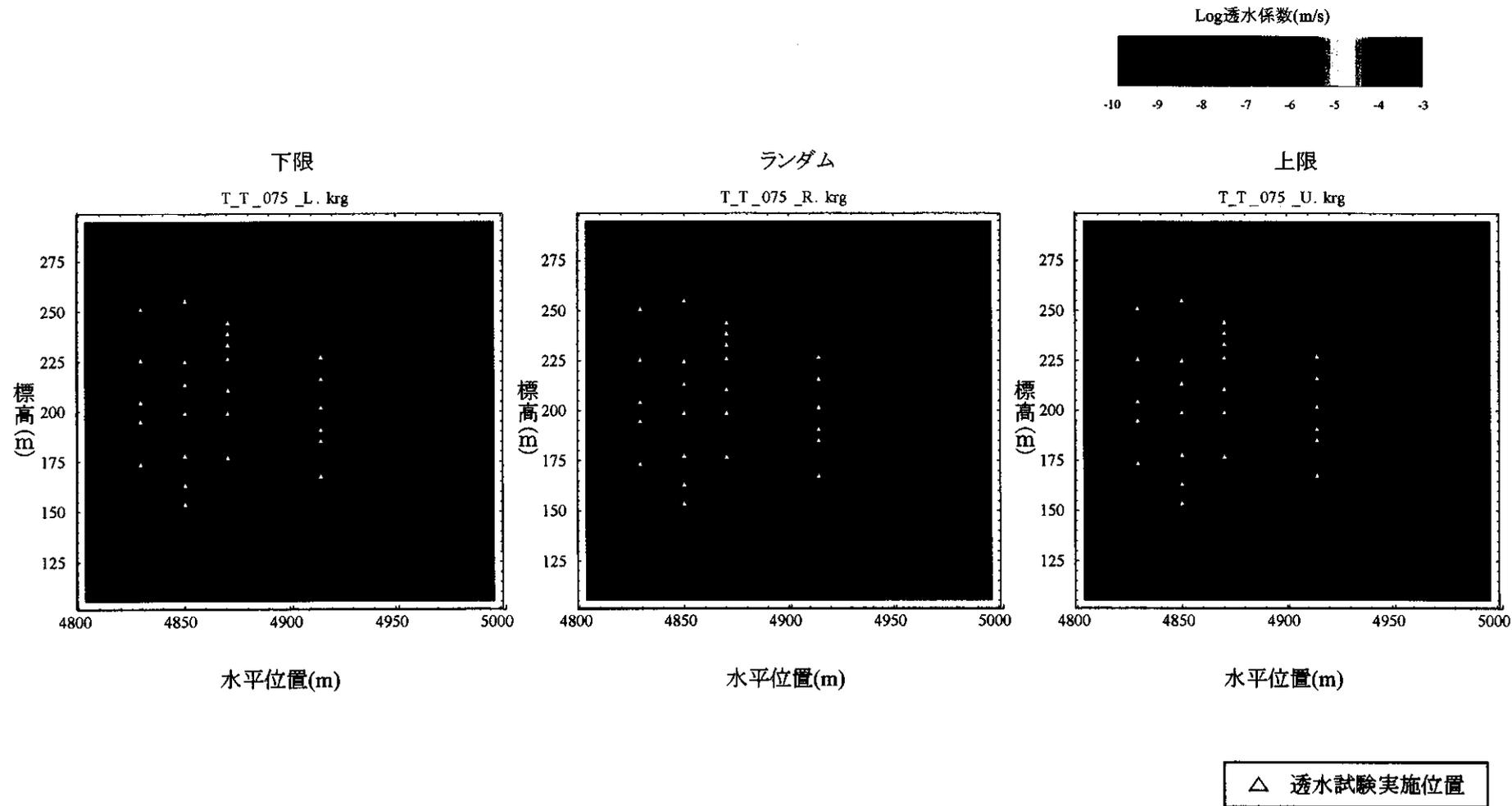


図5.2.3.2-1(2) 透水試験結果のみに基づくファジークリッキングの結果(メンバーシップ0.75)
(断層より上の領域のデータセット)

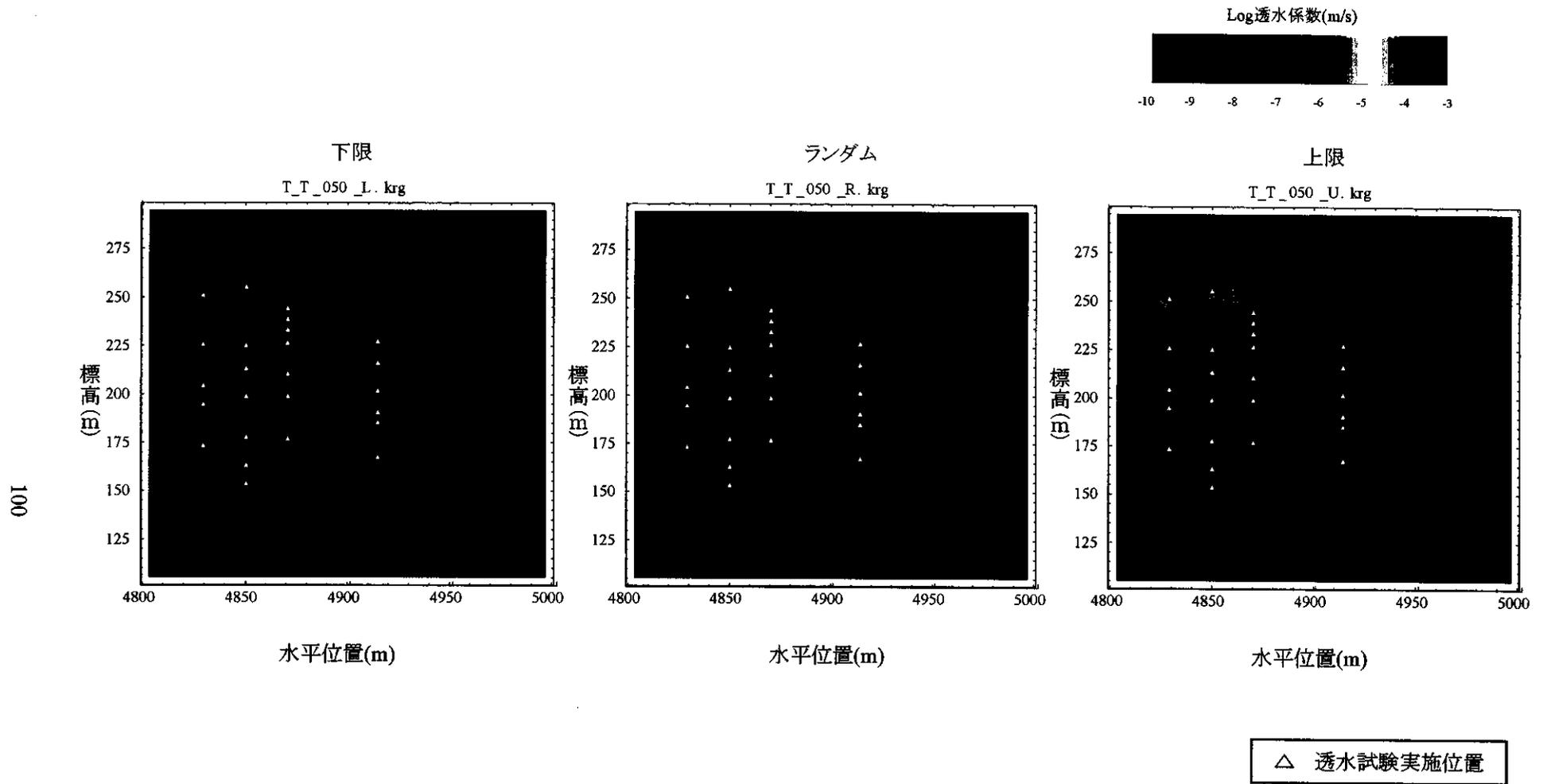


図5.2.3.2-1(3) 透水試験結果のみに基づくファジークリッキングの結果(メンバーシップ0.5)
(断層より上の領域のデータセット)

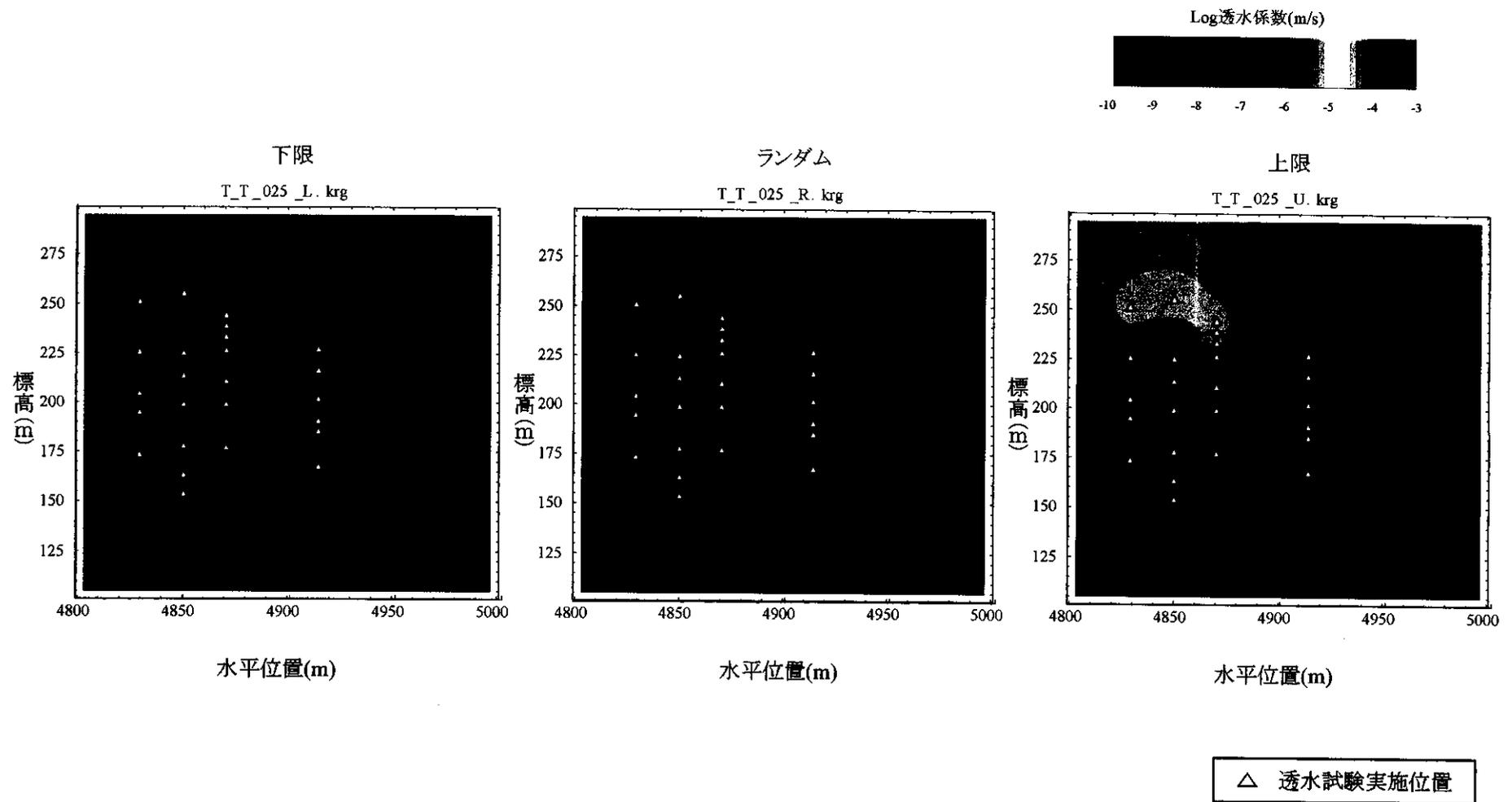


図5.2.3.2-1(4) 透水試験結果のみに基づくファジークリッキングの結果(メンバーシップ0.25)
(断層より上の領域のデータセット)

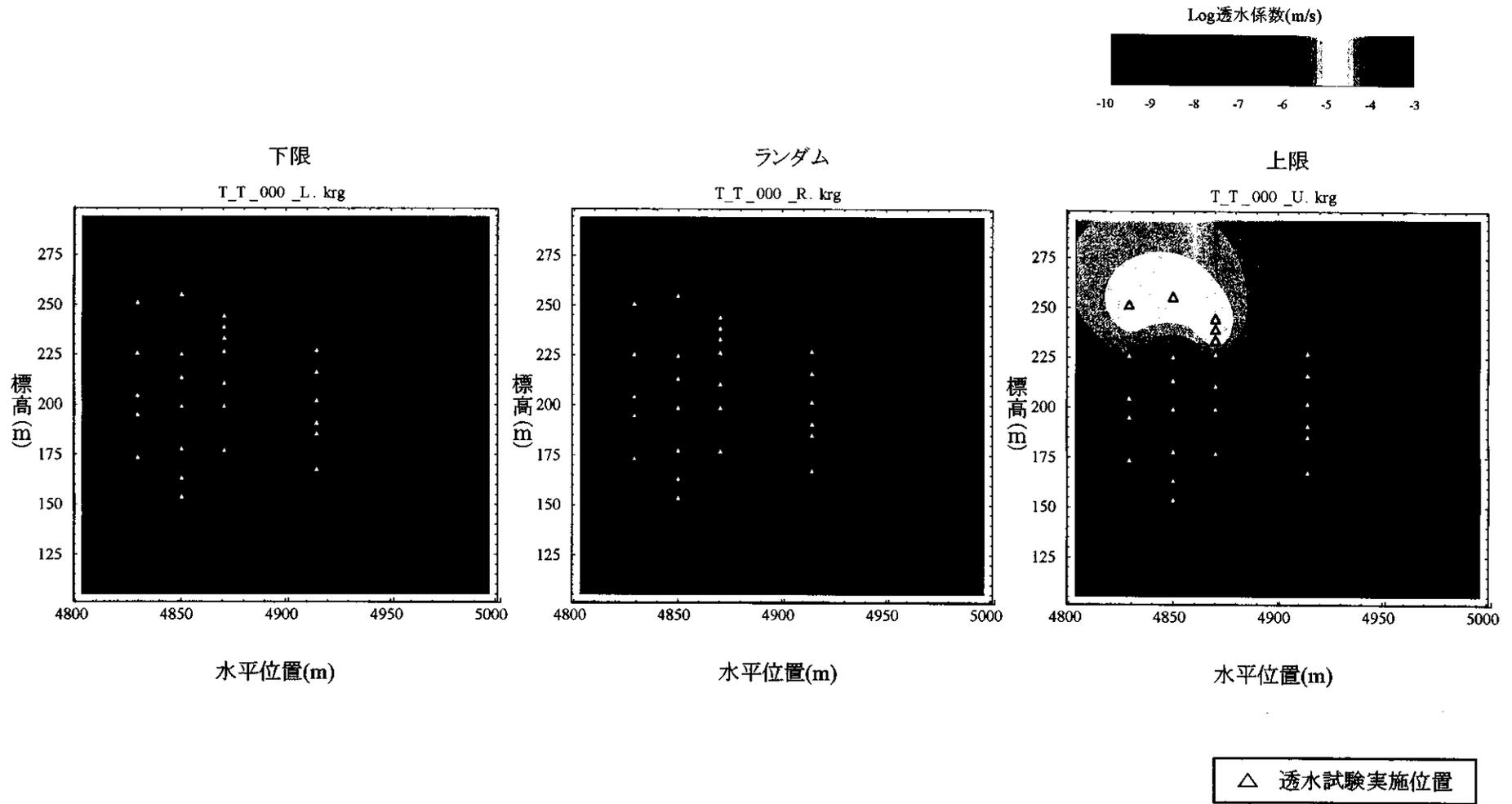


図5.2.3.2-1(5) 透水試験結果のみに基づくファジークリッキングの結果(メンバーシップ0.0)
(断層より上の領域のデータセット)

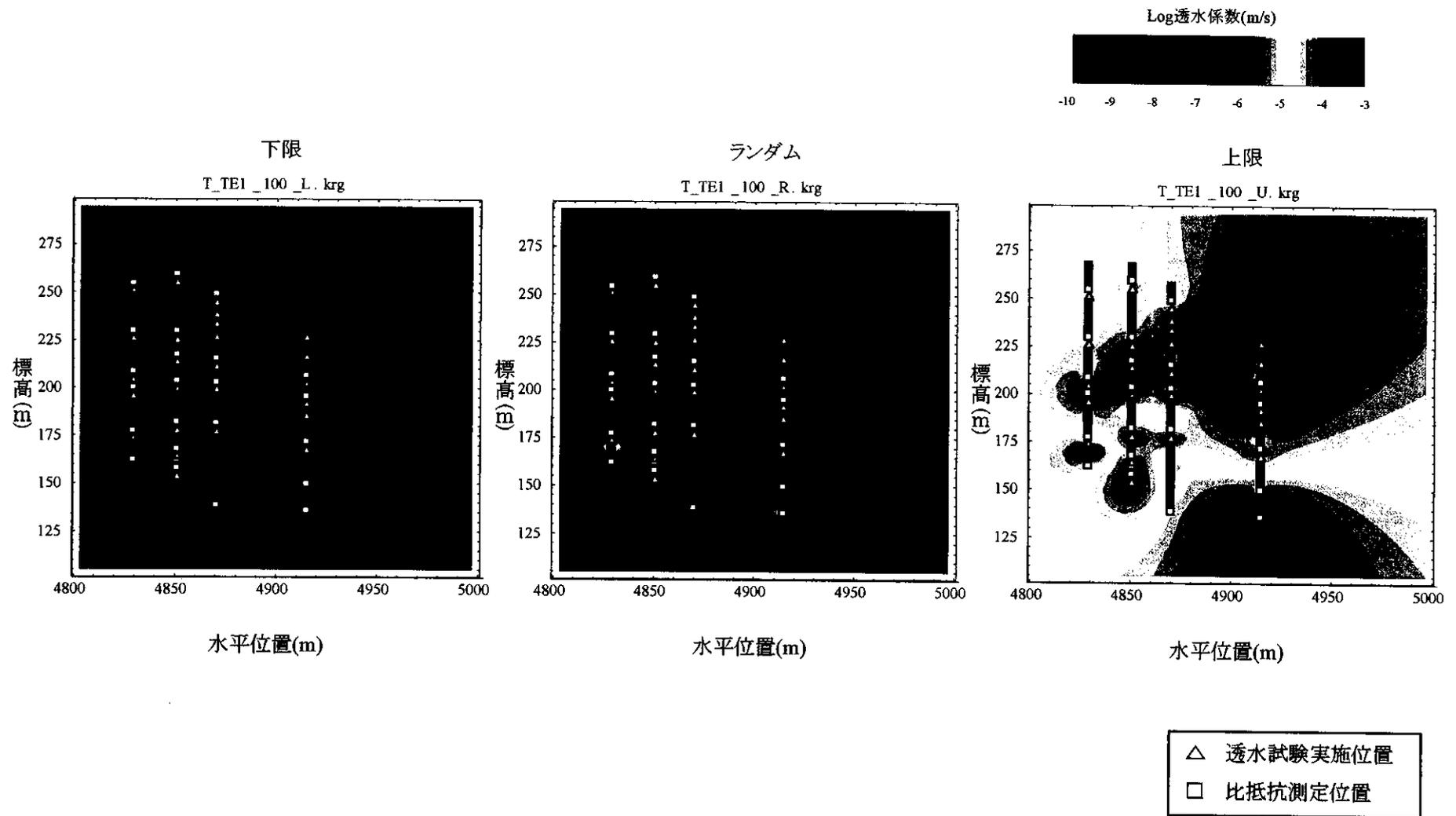


図5.2.3.2-2(1) 透水試験結果及び比抵抗値からの推定結果に基づくファジークリッキング(ケース1)の結果(メンバーシップ1.0)
(断層より上の領域のデータセット)

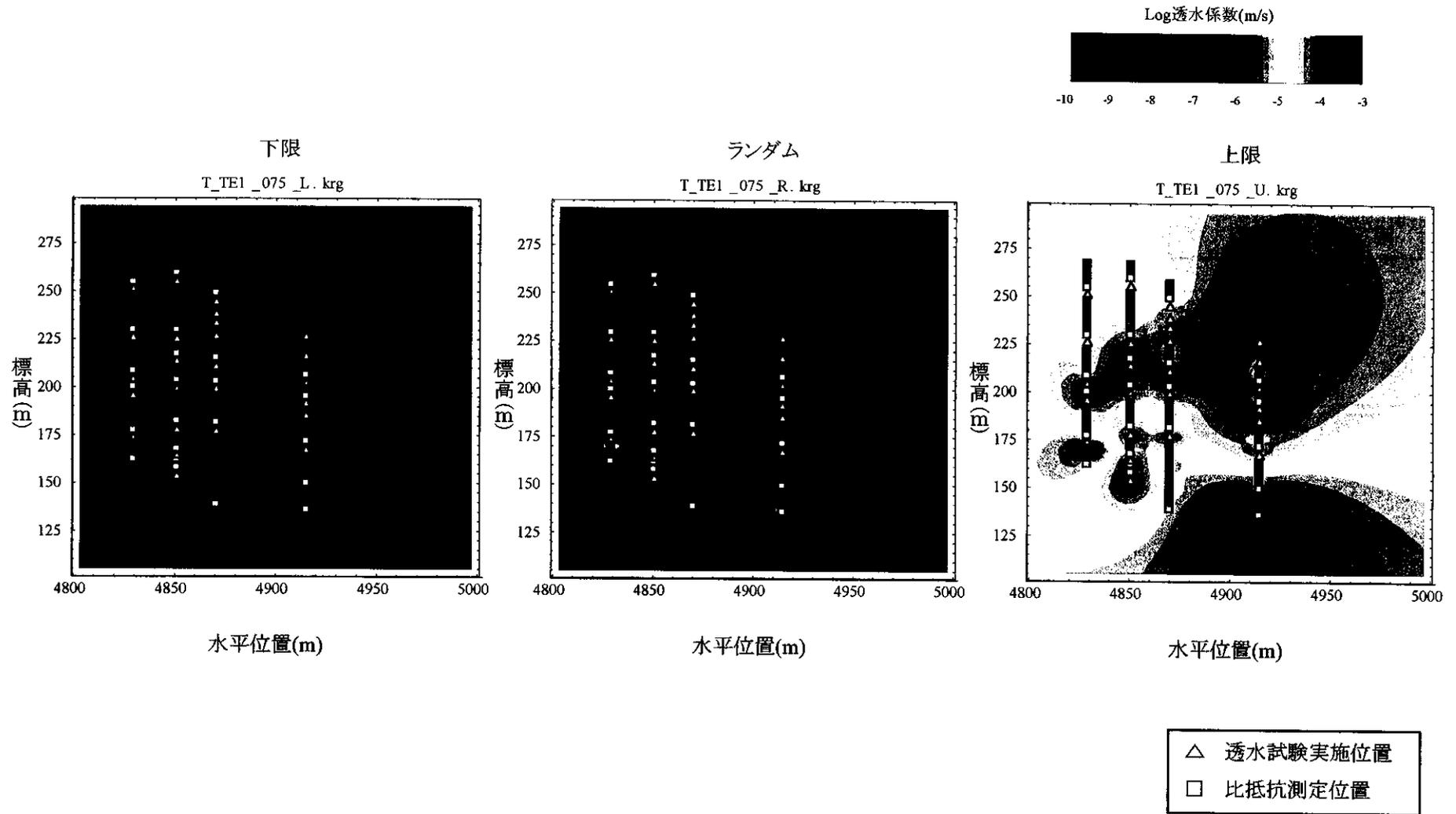


図5.2.3.2-2(2) 透水試験結果及び比抵抗値からの推定結果に基づくファジークリッキング(ケース1)の結果(メンバーシップ0.75)

(断層より上の領域のデータセット)

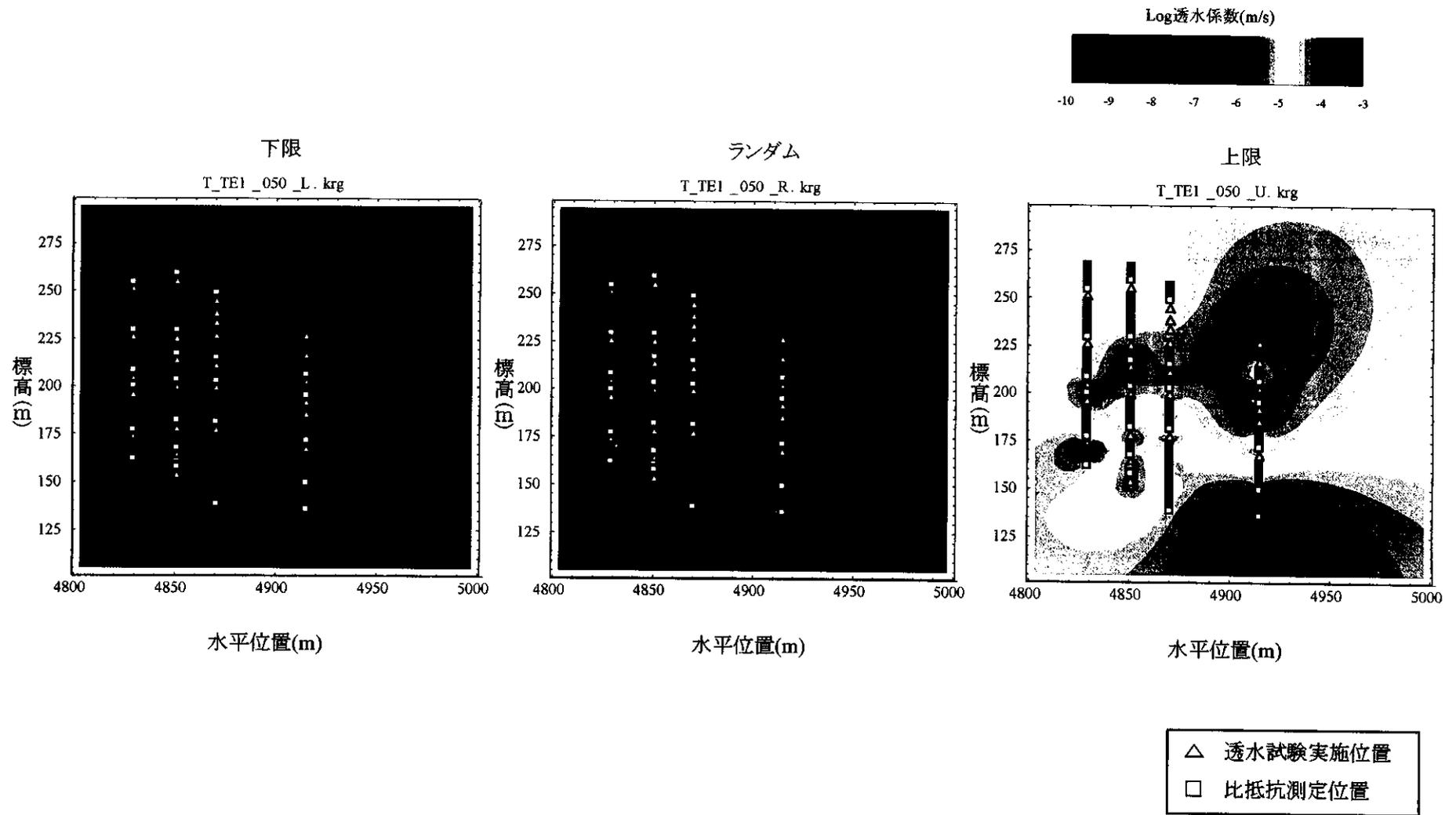


図5.2.3.2-2(3) 透水試験結果及び比抵抗値からの推定結果に基づくファジークリッキング(ケース1)の結果(メンバーシップ0.5)
(断層より上の領域のデータセット)

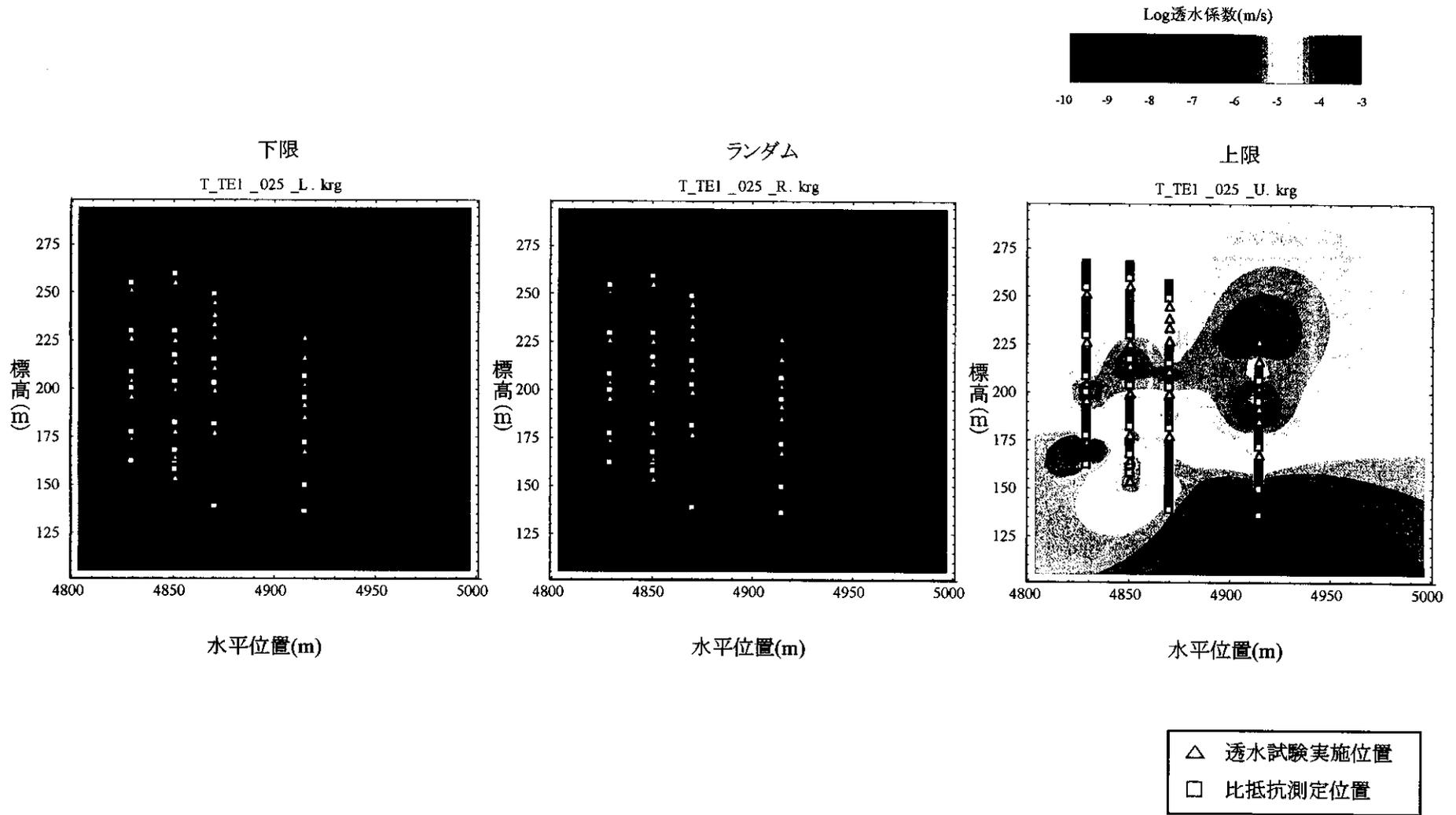


図5.2.3.2-2(4) 透水試験結果及び比抵抗値からの推定結果に基づくファジークリッキング(ケース1)の結果(メンバーシップ0.25)
(断層より上の領域のデータセット)

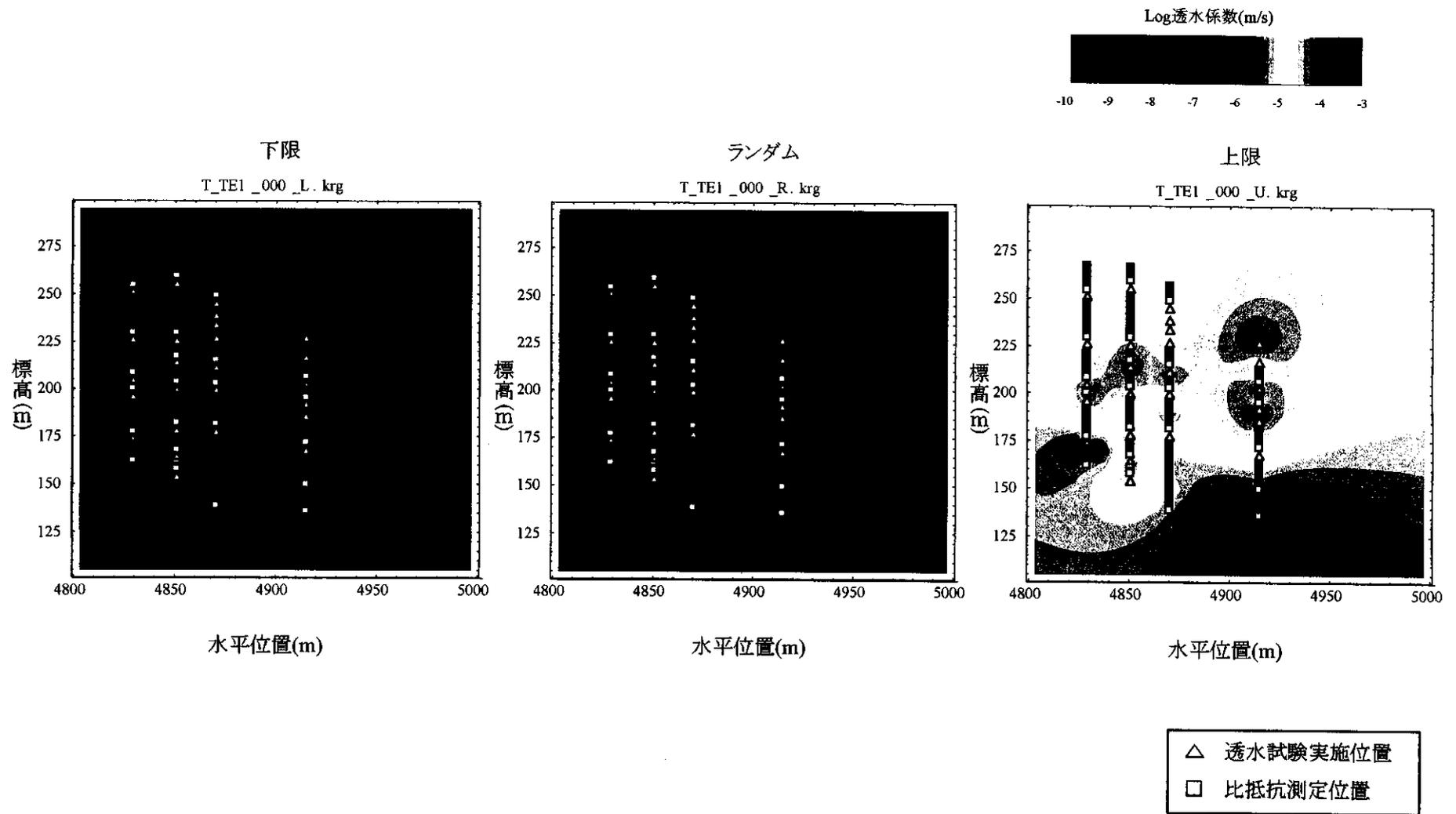


図5.2.3.2-2(5) 透水試験結果及び比抵抗値からの推定結果に基づくファジークリッキング(ケース1)の結果(メンバーシップ0.0)
(断層より上の領域のデータセット)

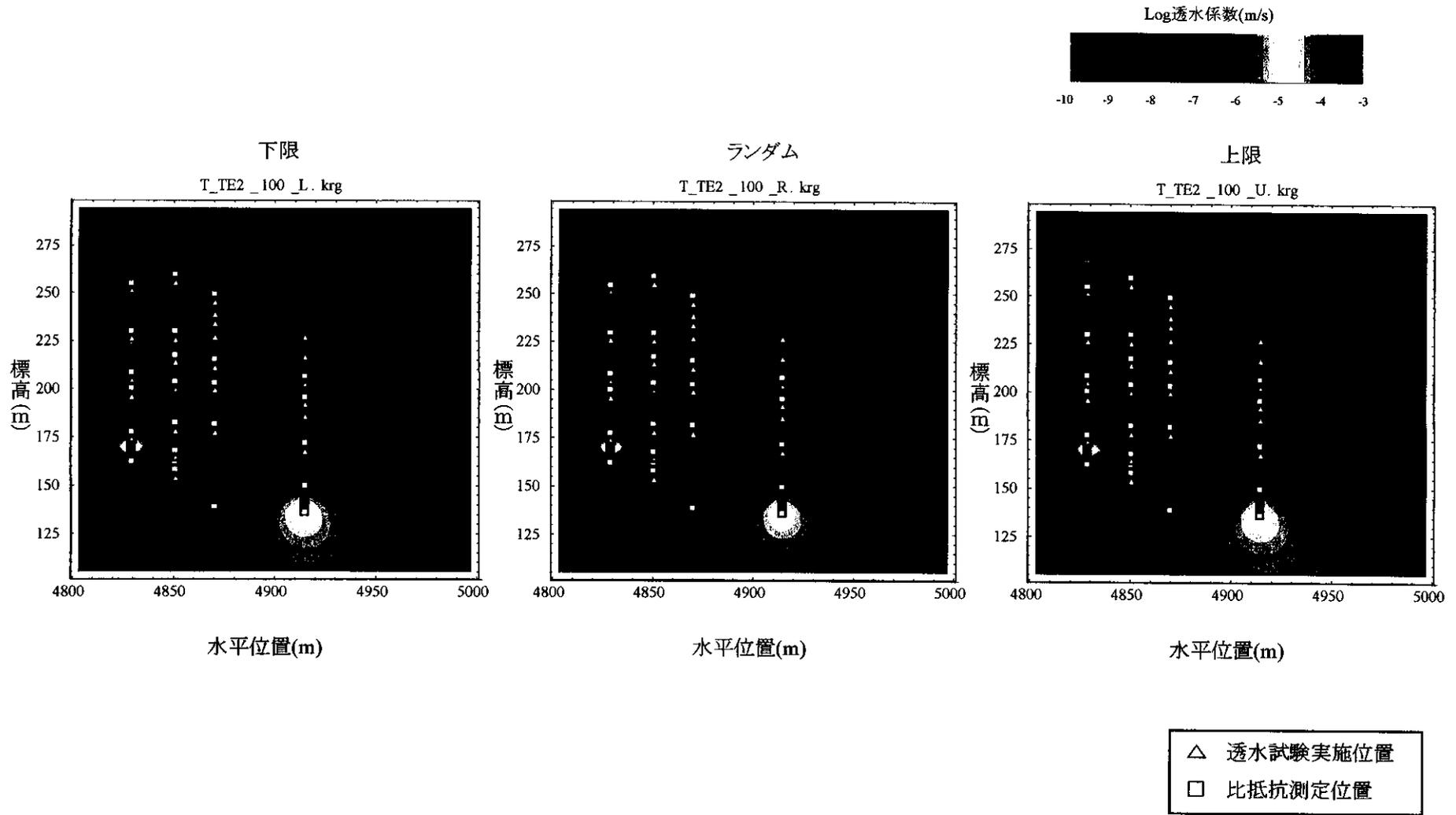


図5.2.3.2-3(1) 透水試験結果及び比抵抗値からの推定結果に基づくファジークリッキング(ケース2)の結果(メンバーシップ1.0)
(断層より上の領域のデータセット)

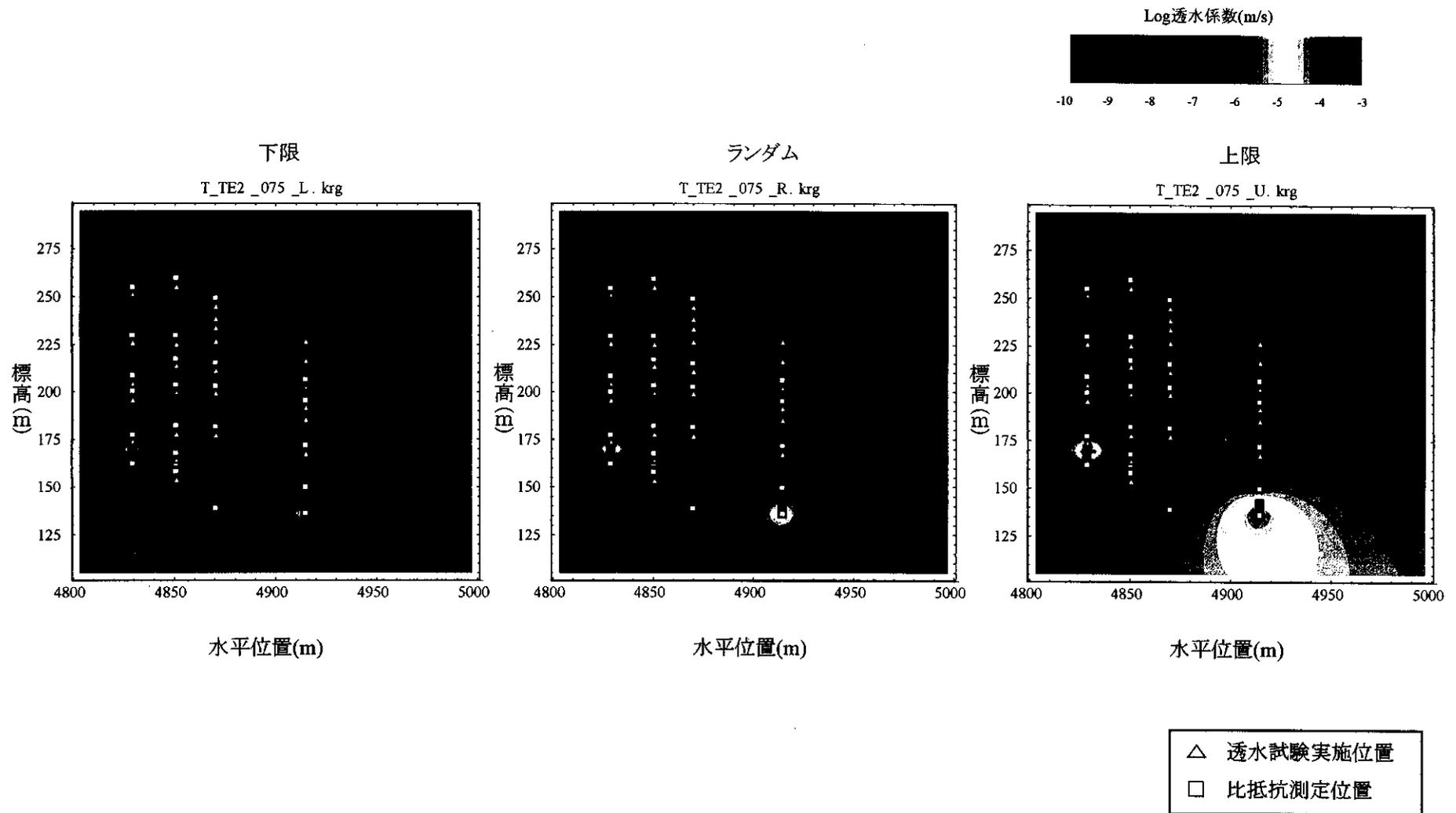


図5.2.3.2-3(2) 透水試験結果及び比抵抗値からの推定結果に基づくファジークリッキング(ケース2)の結果(メンバーシップ0.75)
(断層より上の領域のデータセット)

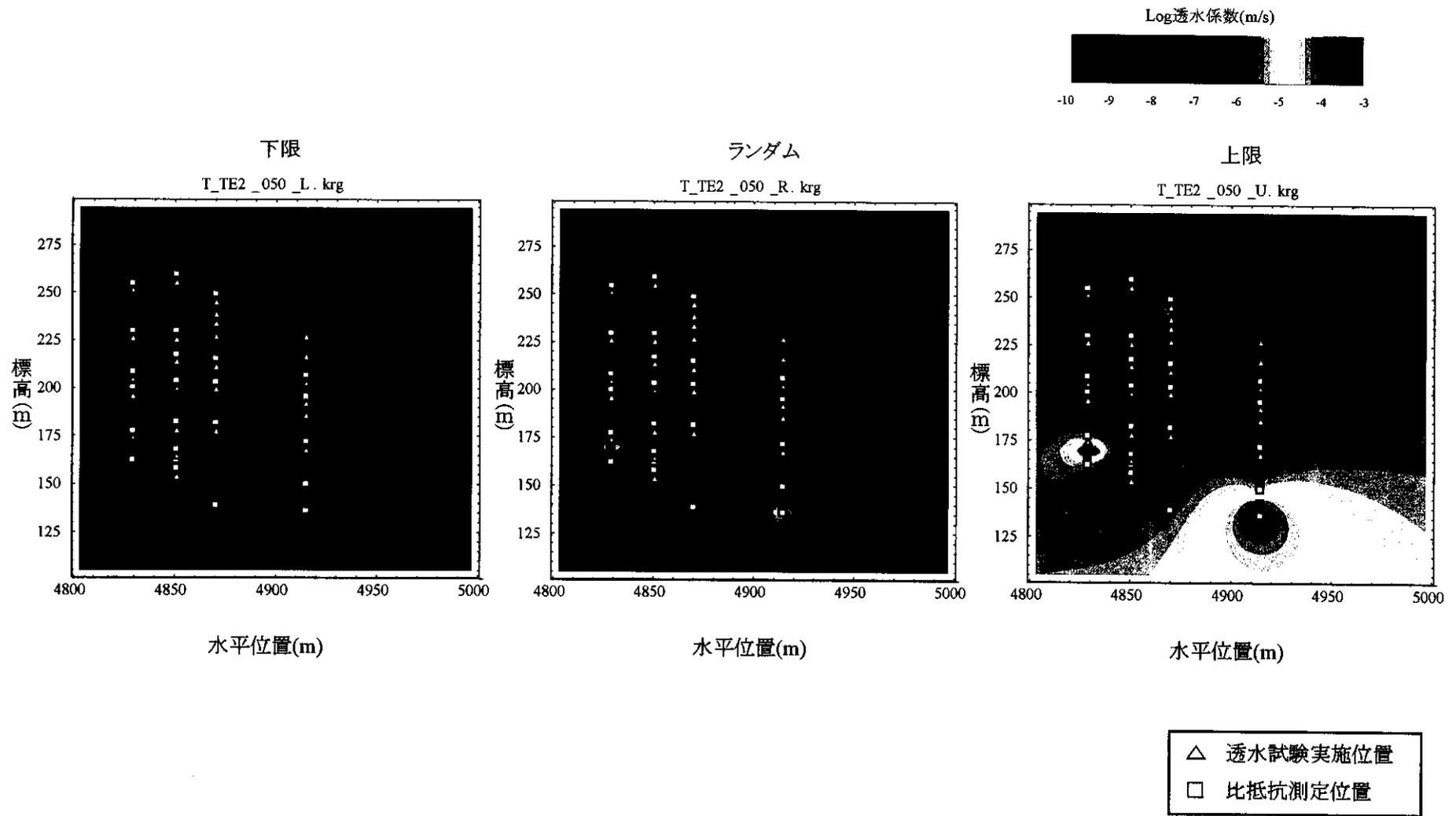


図5.2.3.2-3(3) 透水試験結果及び比抵抗値からの推定結果に基づくファジークリッキング(ケース2)の結果(メンバーシップ0.5)
(断層より上の領域のデータセット)

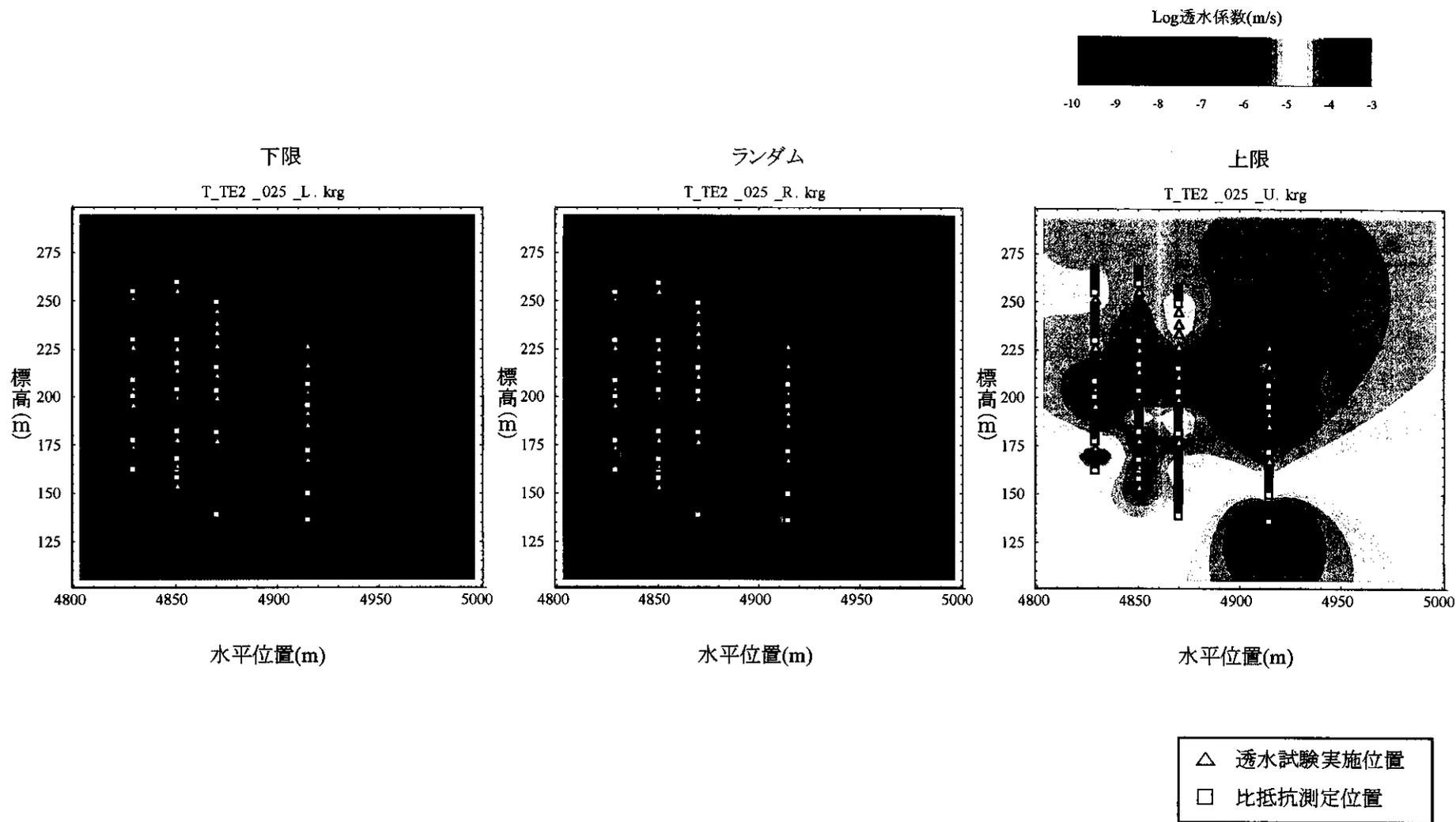


図5.2.3.2-3(4) 透水試験結果及び比抵抗値からの推定結果に基づくファジークリッキング(ケース2)の結果(メンバーシップ0.25)
(断層より上の領域のデータセット)

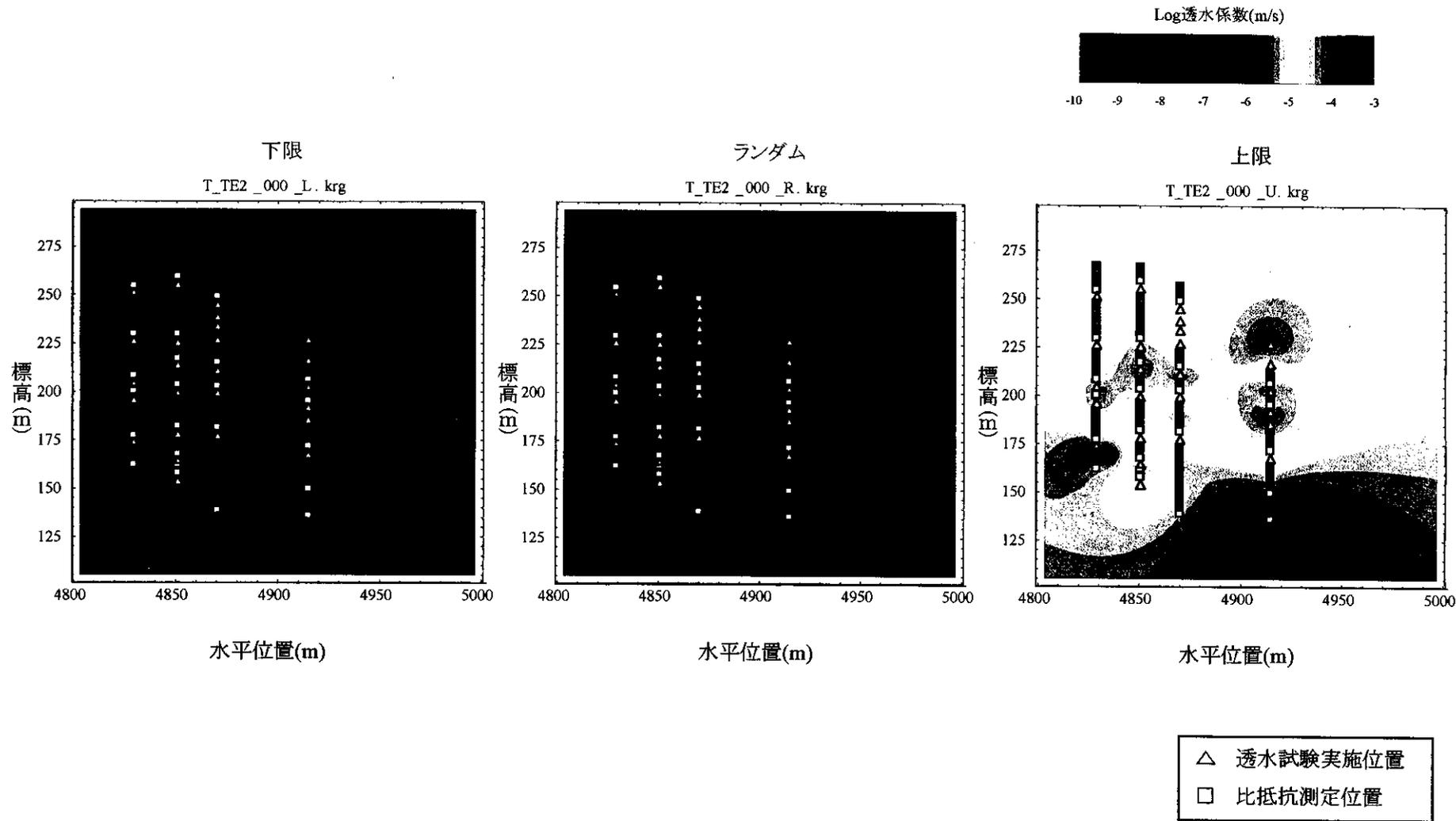


図5.2.3.2-3(5) 透水試験結果及び比抵抗値からの推定結果に基づくファジークリッキング(ケース2)の結果(メンバーシップ0.0)
(断層より上の領域のデータセット)

6. まとめ

本研究により、精度は高いがデータ数が少ないハードデータ（ここでは透水試験結果）と精度は必ずしも高くはないもののデータ数が多く得られるソフトデータ（ここでは比抵抗値）を、それぞれの確からしさの相異を適切に考慮しながら、統合して空間の不均一性を表現し、不確実性を定量化することのできる手法を開発した。また、この新たな手法を東濃鉦山の試錐孔データに適用することによって、以下に示すような知見が得られた。

透水試験結果に基づき透水係数値(k)を定義する場合には測定誤差が、また、比抵抗測定結果(ρ)に基づき透水係数を推定する場合には測定誤差に加えて推定誤差が存在し、これらが不確実性要因の一部となる。これらの誤差の大きさに対する指標としては、各メンバーシップレベルにおける各位置での透水係数推定値の上限と下限の差（ファジー変動幅）を採ることが適切である。他方、クリッキングによって得られた各位置での透水係数の最良推定値に含まれる誤差は、実測地点から離れるにつれて、バリオグラムによって表現される自己相関構造に従って増大することとなる。このクリッキング誤差も不確実性要因の一つであり、その大きさに対する指標としては、クリッキング標準偏差を用いることが適切である。

ハードデータ（透水試験結果）を用いることには、データの測定あるいは推定誤差が小さいという利点はあるものの、このような透水試験の測定値を多くの地点で得ることは現実的に困難であるため、クリッキング誤差が大きくなる傾向にある。一方、ソフトデータ（比抵抗値）を用いて透水係数を推測することには、データ点数を増やすことによってクリッキング誤差を低減できる、という利点があるが、このときのデータの測定あるいは推定誤差が大きくなるという短所がある。

今回の研究目的であるハード（透水試験結果）及びソフトデータ（比抵抗値）の併用による透水係数分布の推定が効果的なものであるか否かは、透水試験結果のみのデータセット（ハードデータ）、及びそれらに比抵抗値（ソフトデータ）を加えたデータセットによって推定した透水係数分布のそれぞれのファジー変動幅、及びクリッキング標準偏差の比較を行うことで判断することができる。

これらを、それぞれのケースについてメンバーシップごとに表したものを図 6-1～3 に示す。

不均一な透水係数分布の推定という観点からは、ファジー変動幅が小さく、かつクリッキング標準偏差も小さい解析結果が、不確実性の小さい解析結果であることになる。図 6-2 及び 3 より、ファジー変動幅は、ケース 2 のほうがケース 1 よりも小さいことが明らかであり、これはメンバーシップ関数の形状の違いによるものである。また、メンバーシップの上昇に伴ってデータセットの標準誤差が減少するため、クリッキング標準偏差も減少している。

今回の研究では、ケース 2、メンバーシップ 1.0～0.5 で、ファジー変動幅が小さく、クリッキング標準偏差も透水試験のみを用いて行った推定結果と比べると比較的小さい（特に透水試験間隔の広い部分において）、つまり計算されたデータの不確実性が小さい結果を得た。これらのケースでは、ソフトデータを併用した透水係数分布の推定結果は不確実性が小さく、ハードデータのみによる推定結果に比べ、ソフトデータを加えたデータセットを用いることが有効であることが示唆される。一方、その他のケースでは透水試験結果のみを用いた結果に比べてファジー変動幅が顕著に大きく、必ずしもこの手法の適応が効果的であるとは言い切れない。

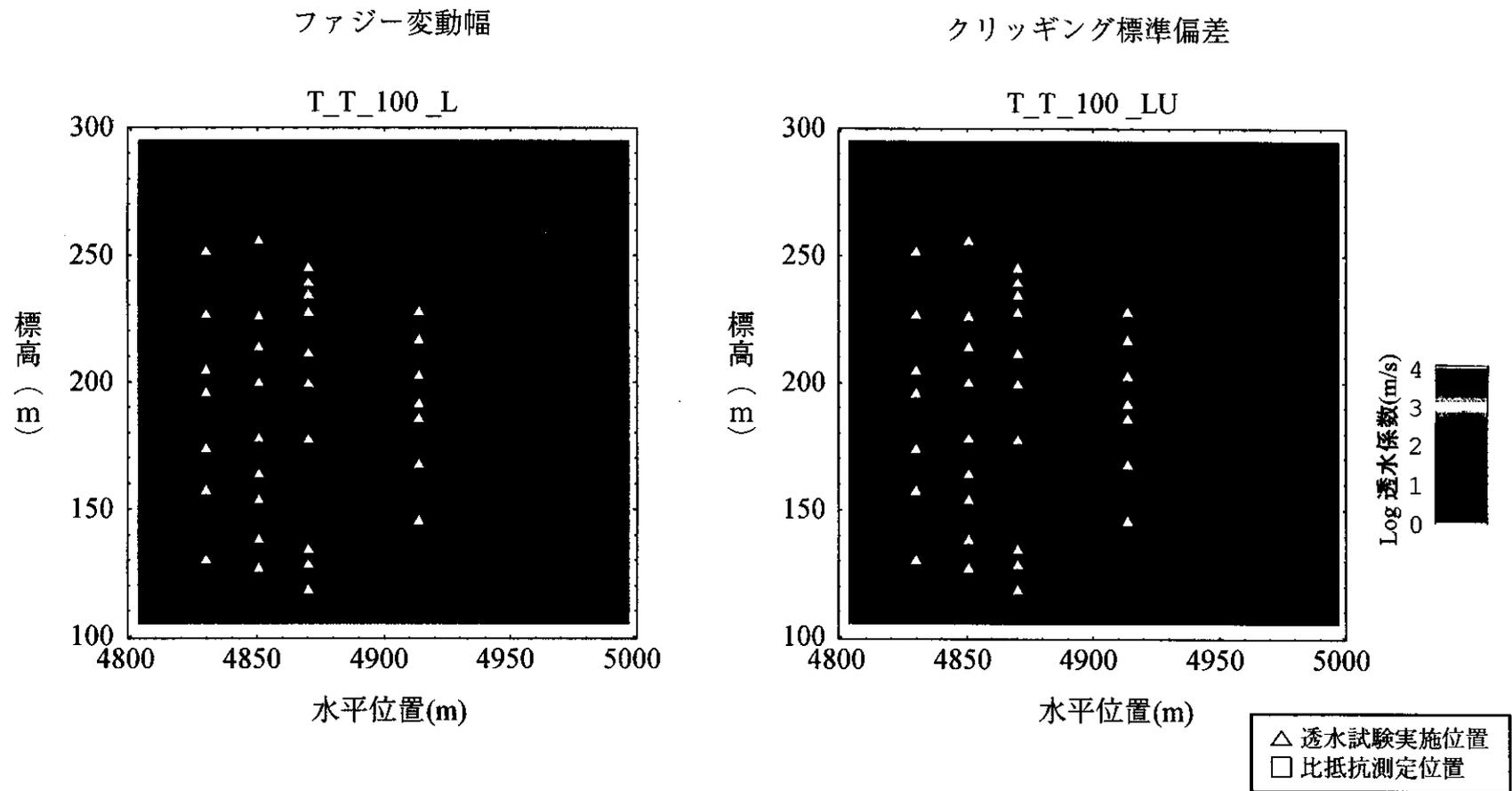


図6-1(1) 透水試験結果のみに基づく透水係数分布 (メンバーシップ1.0) の
 ファジー変動幅 (左) とクリッキング標準偏差(右)

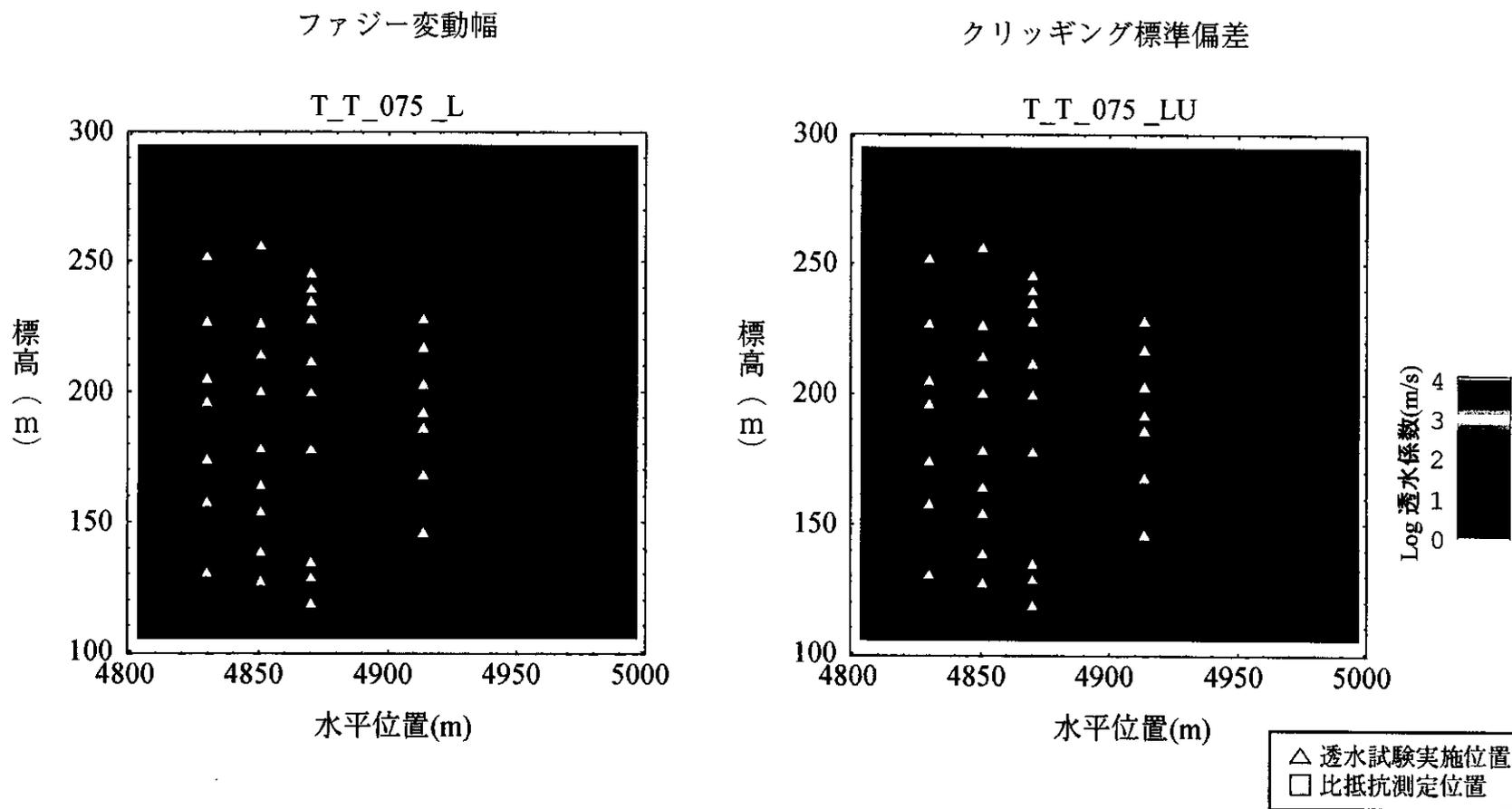


図6-1(2) 透水試験結果のみに基づく透水係数分布 (メンバーシップ0.75) の
ファジー変動幅 (左) とクリッキング標準偏差(右)

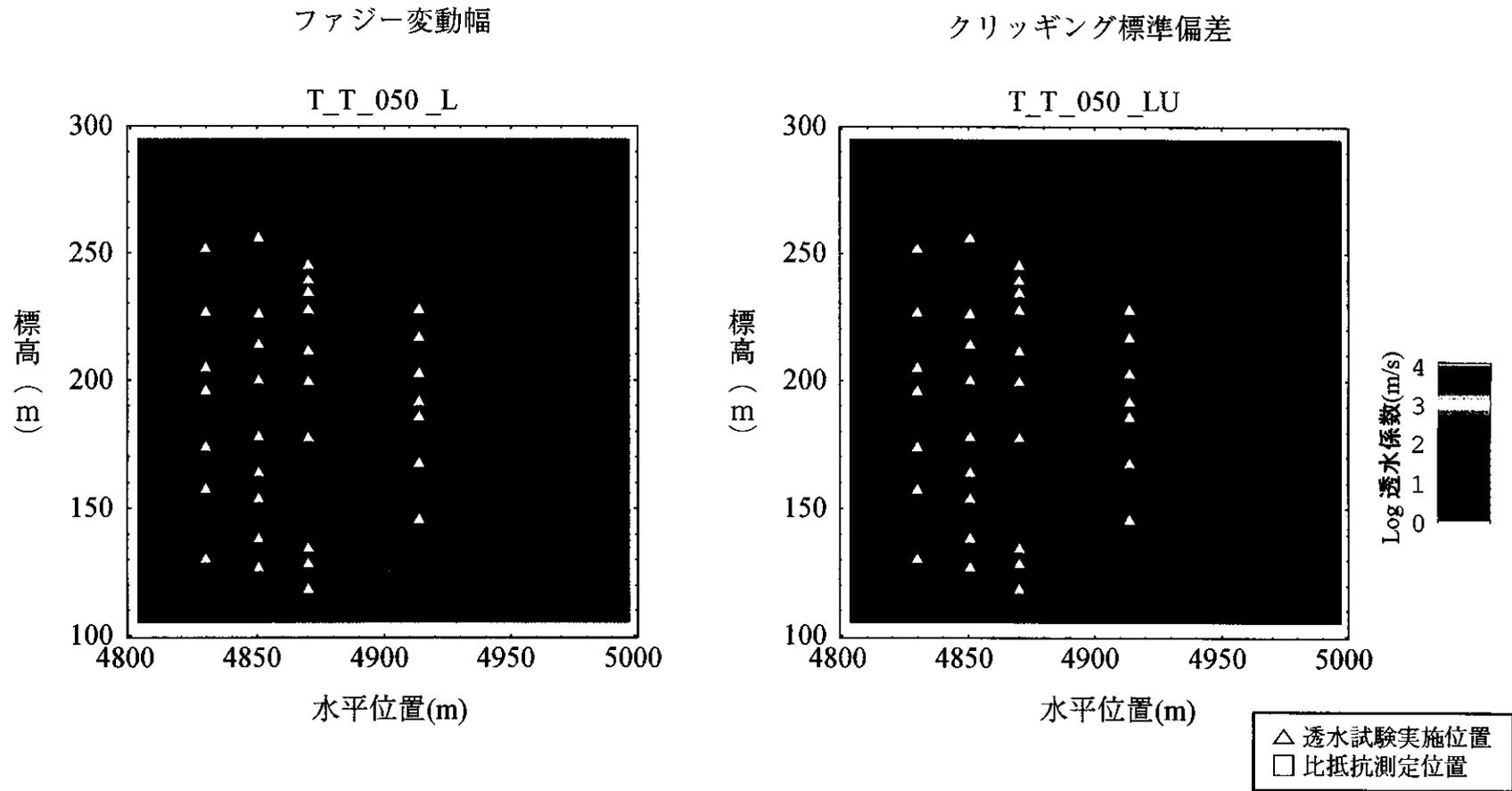


図6-1(3) 透水試験結果のみに基づく透水係数分布 (メンバーシップ0.5) の
ファジー変動幅 (左) とクリッキング標準偏差(右)

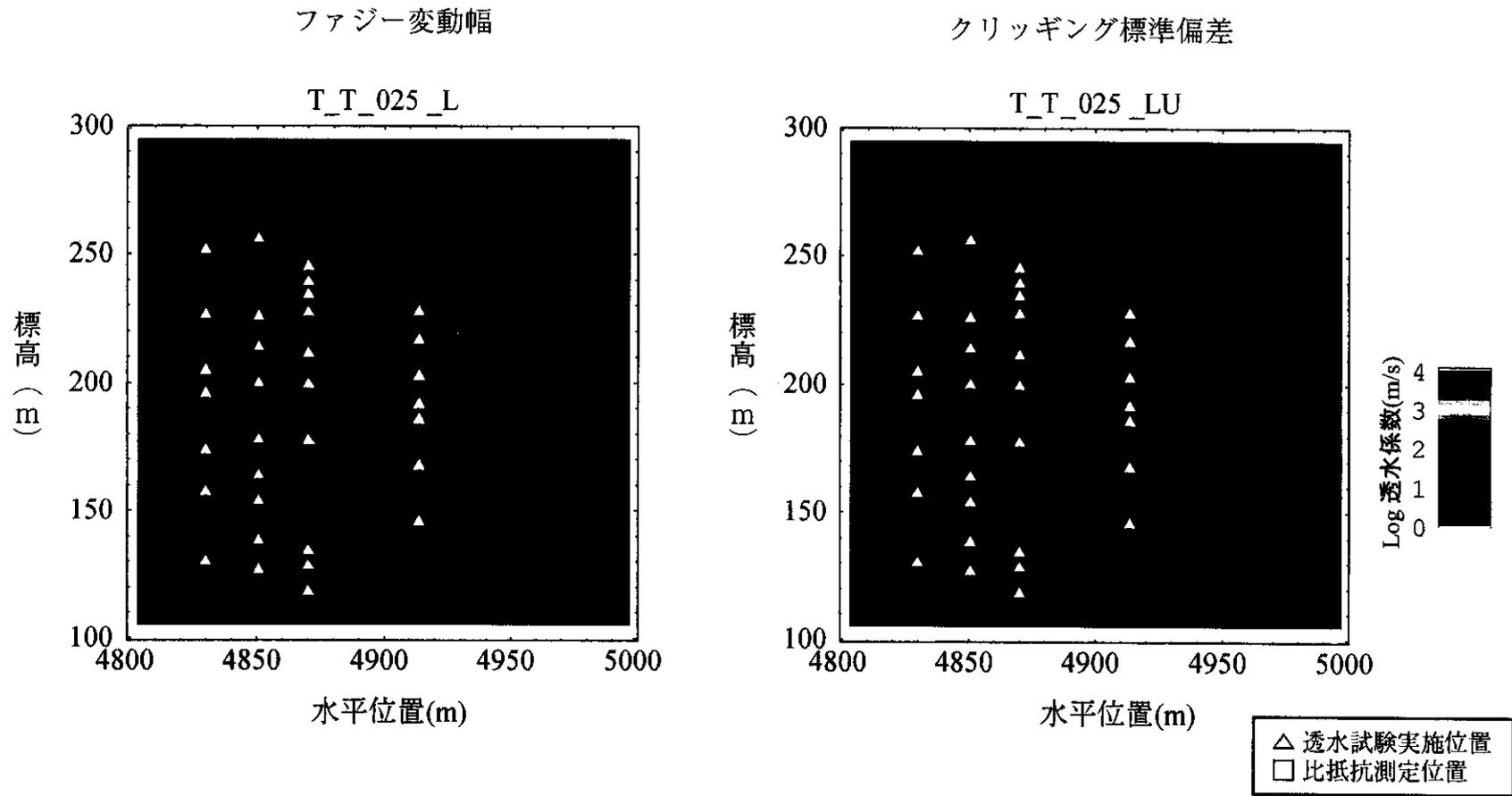


図6-1(4) 透水試験結果のみに基づく透水係数分布（メンバーシップ0.25）の
ファジー変動幅（左）とクリッキング標準偏差(右)

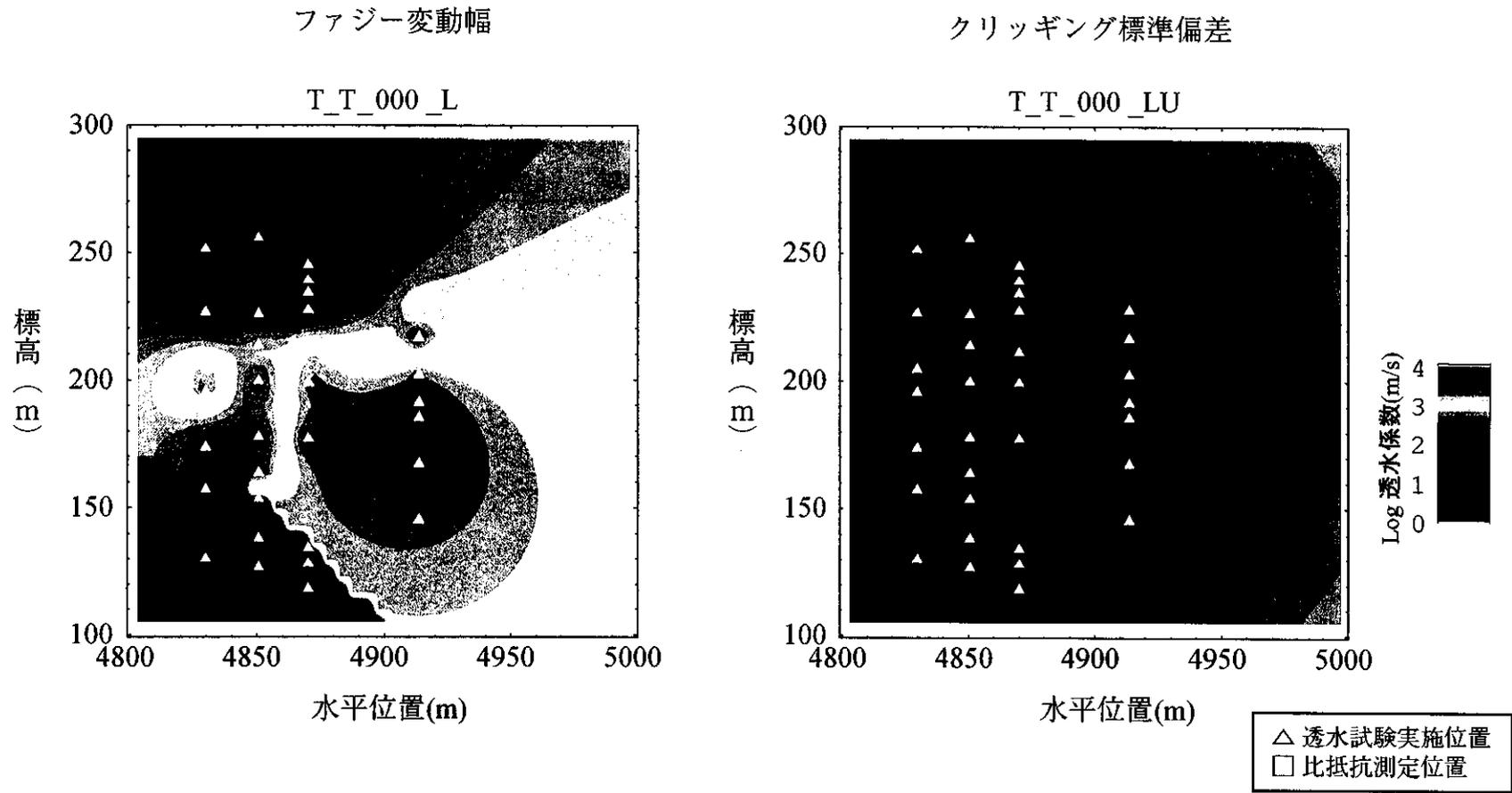


図6-1(5) 透水試験結果のみに基づく透水係数分布 (メンバーシップ0.0) の
ファジー変動幅 (左) とクリッピング標準偏差(右)

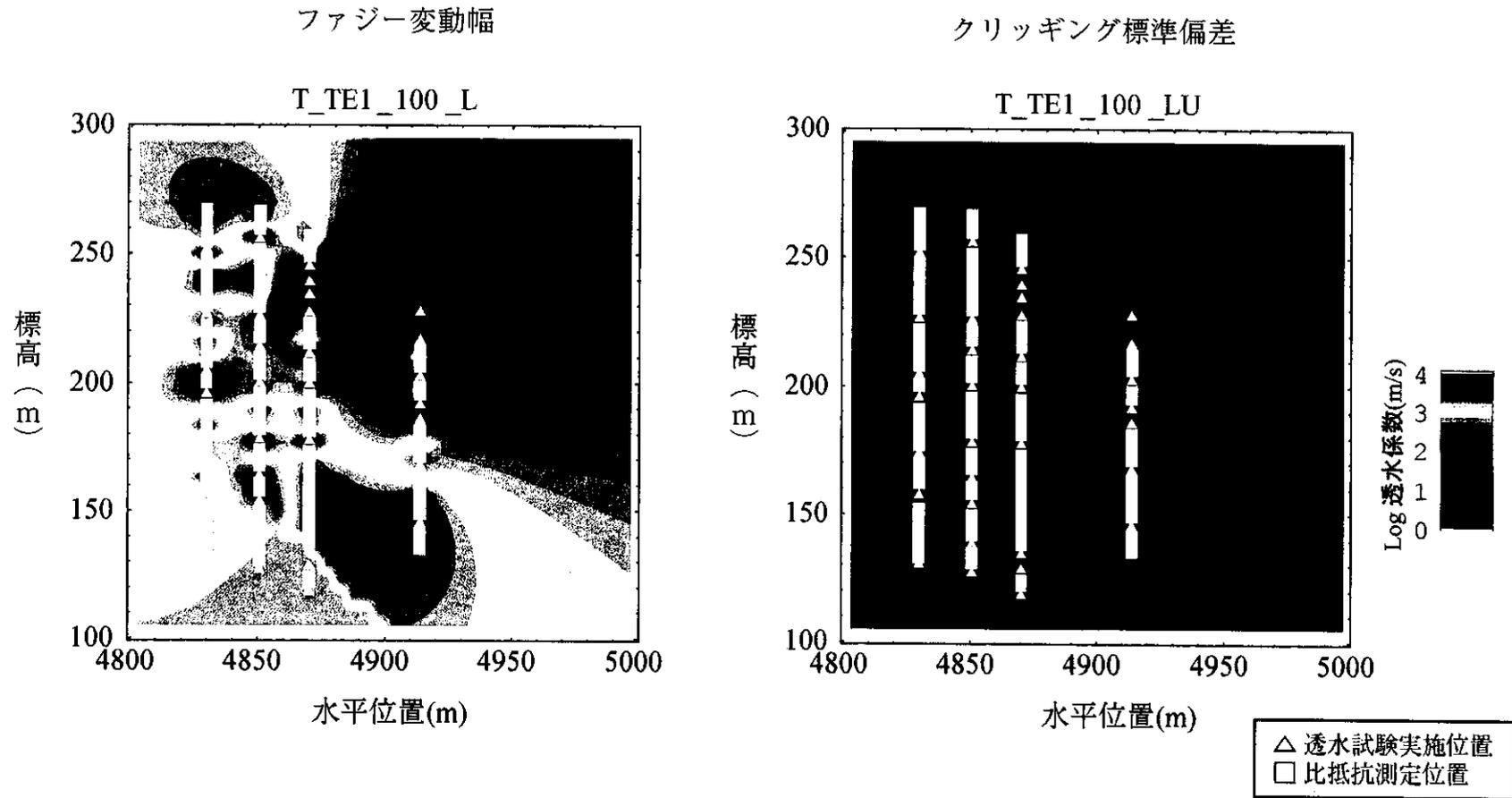


図6-2(1) 透水試験結果および比抵抗値に基づく透水係数分布（ケース1、メンバーシップ1.0）のファジー変動幅（左）とクリッキング標準偏差(右)

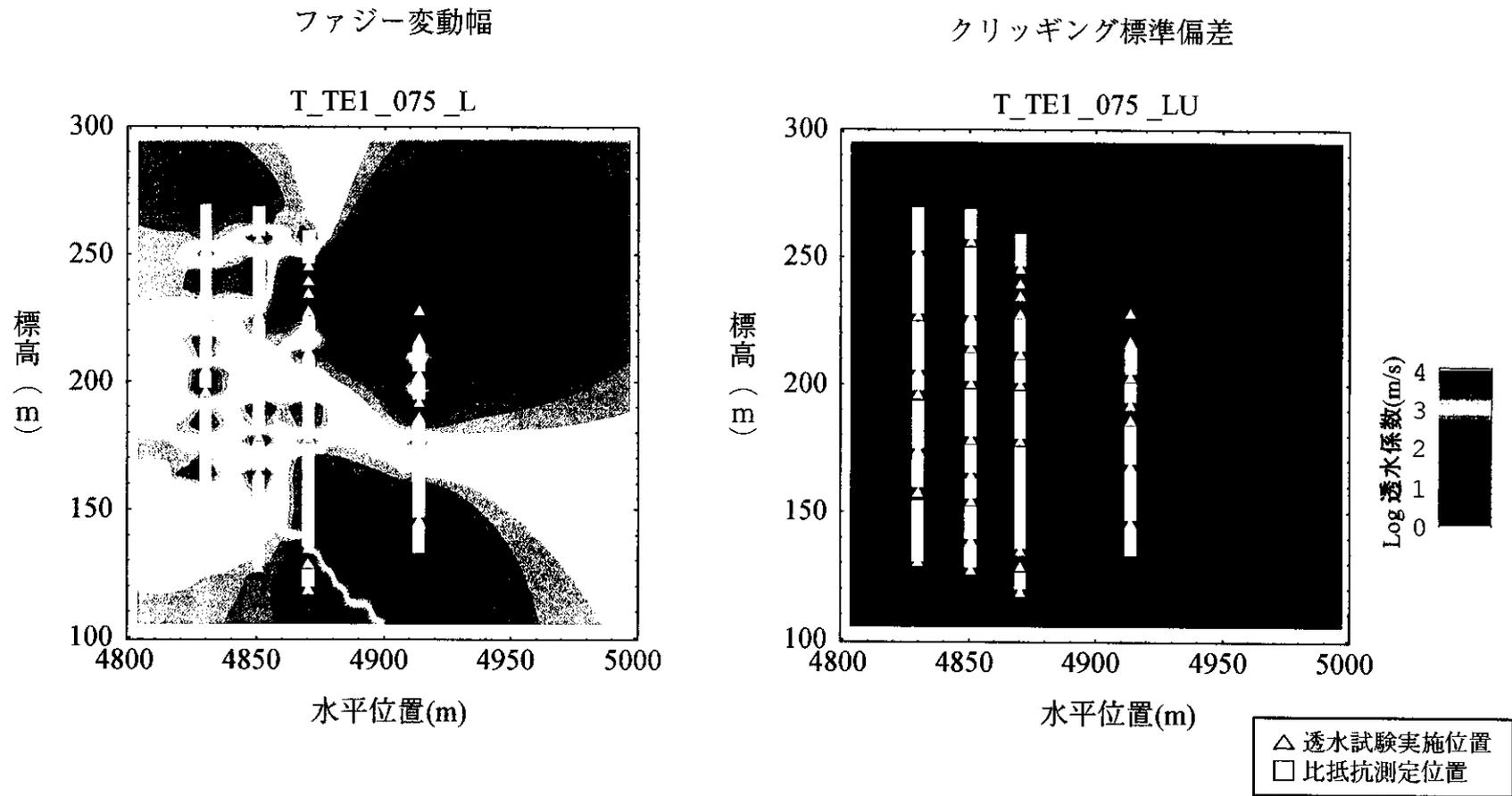


図6-2(2) 透水試験結果および比抵抗値に基づく透水係数分布（ケース1、メンバーシップ0.75）のファジー変動幅（左）とクリッキング標準偏差(右)

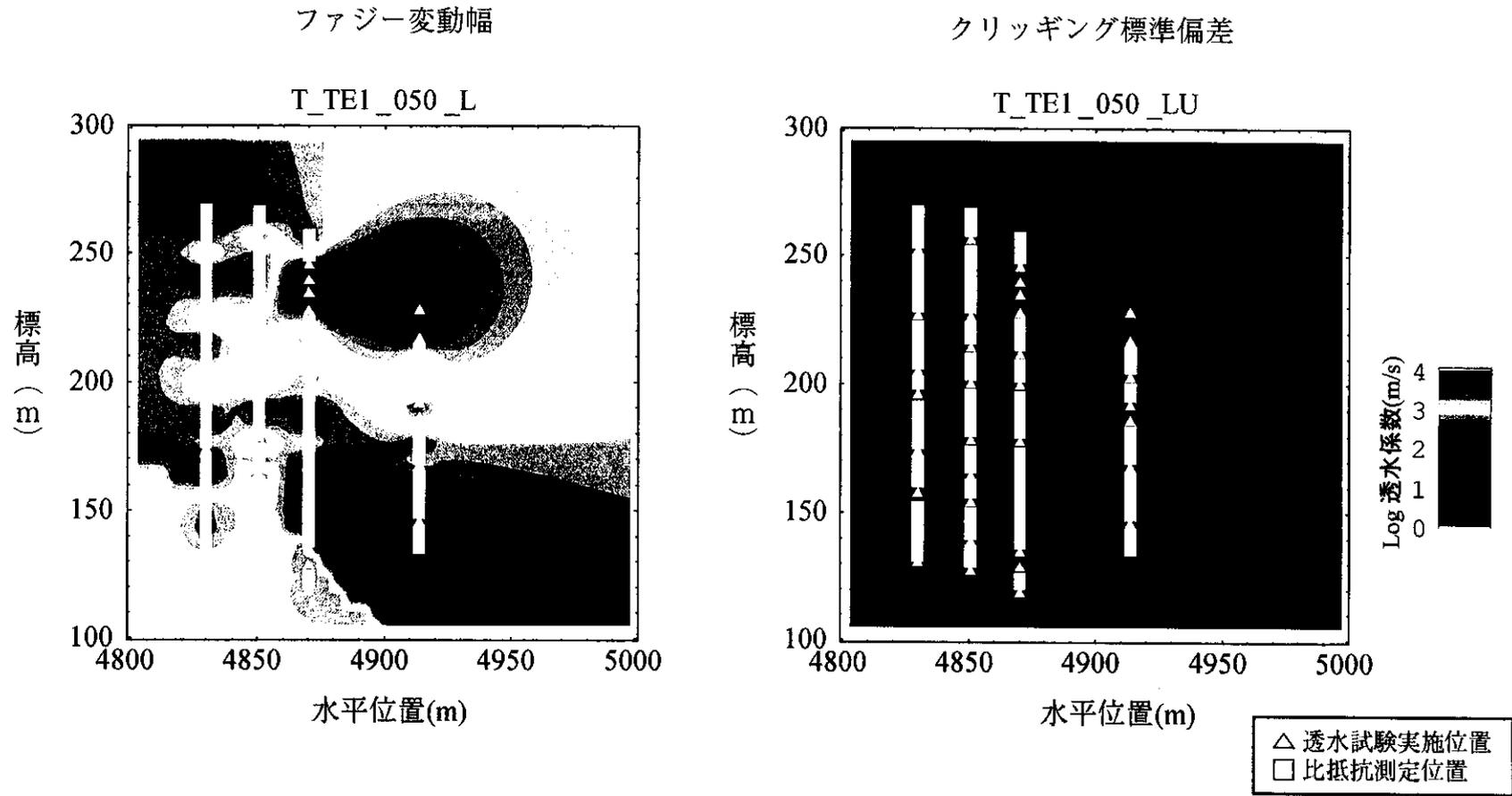


図6-2(3) 透水試験結果および比抵抗値に基づく透水係数分布 (ケース1、メンバーシップ0.5) の
ファジー変動幅 (左) とクリッキング標準偏差(右)

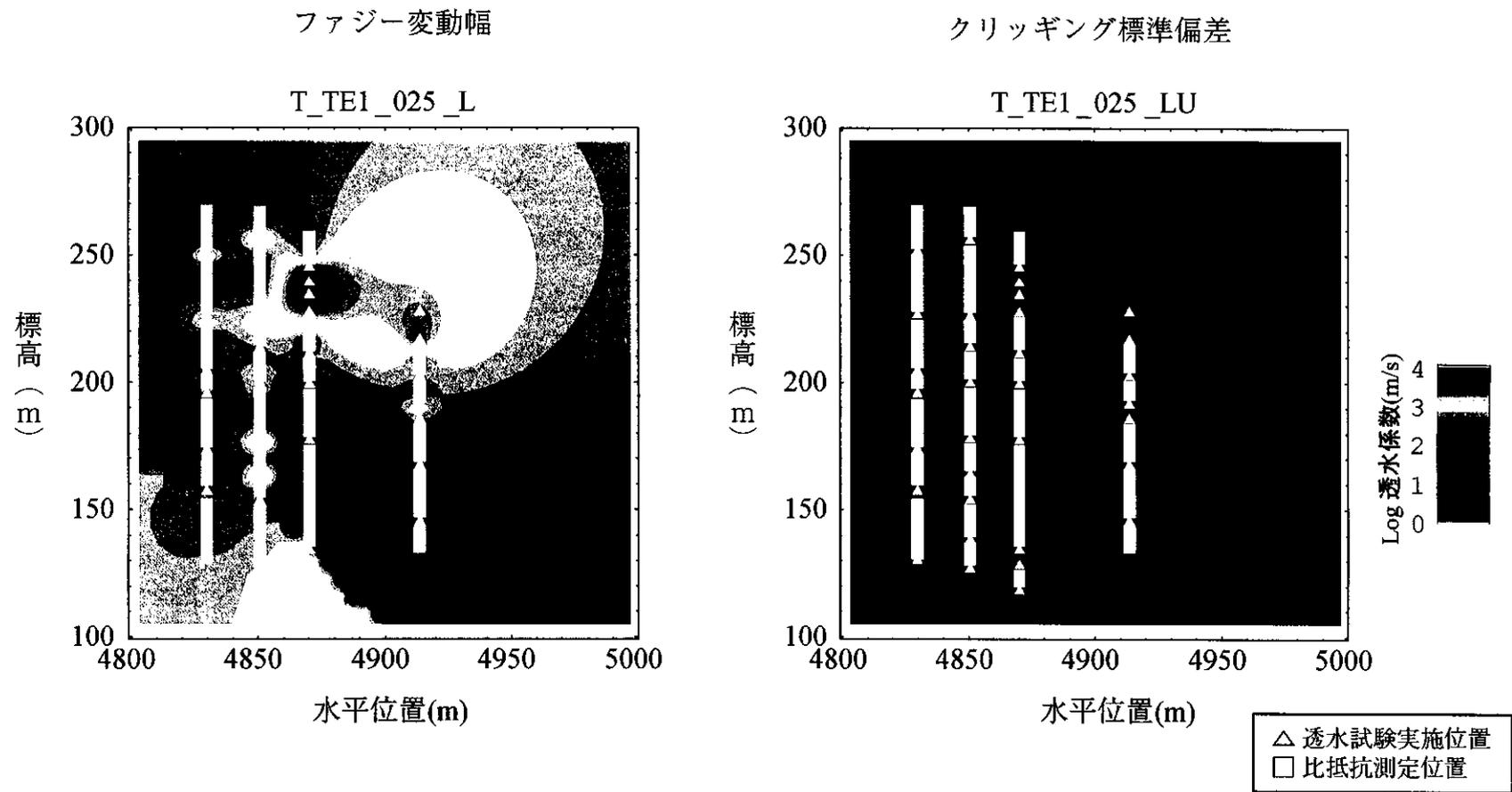


図6-2(4) 透水試験結果および比抵抗値に基づく透水係数分布（ケース1、メンバーシップ0.25）の
ファジー変動幅（左）とクリッキング標準偏差(右)

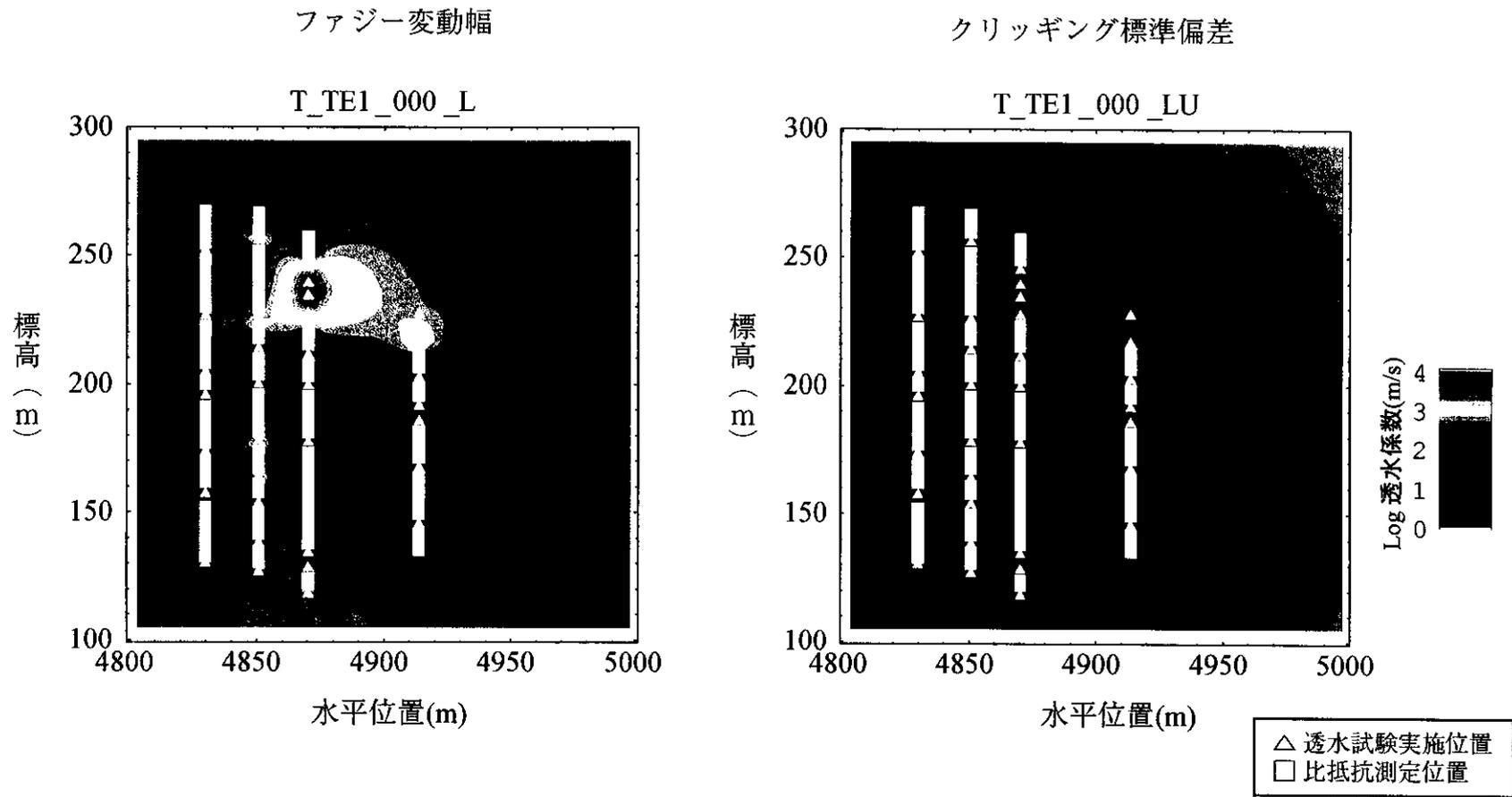


図6-2(5) 透水試験結果および比抵抗値に基づく透水係数分布（ケース1、メンバーシップ0.0）の
ファジー変動幅（左）とクリッピング標準偏差(右)

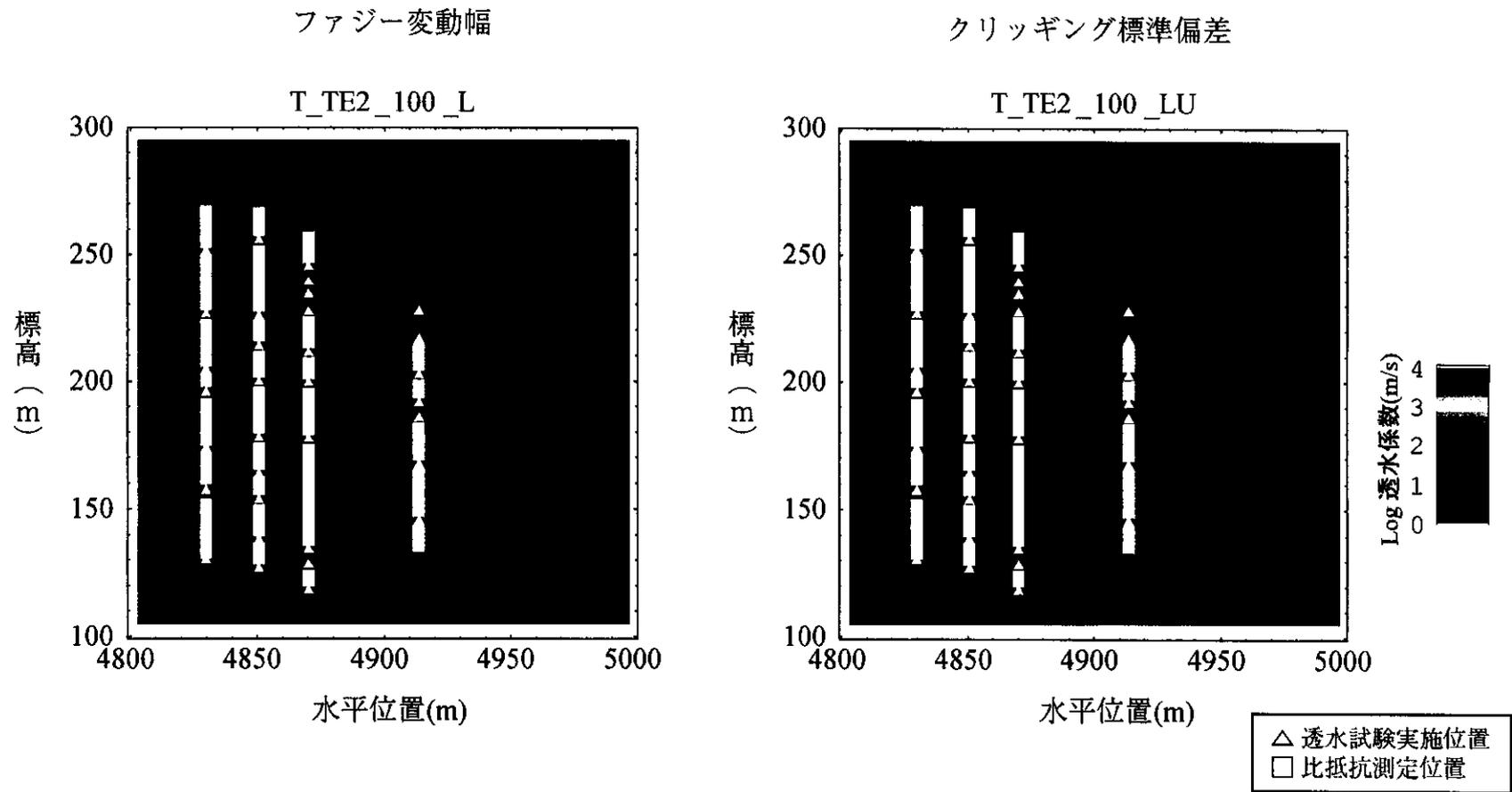


図6-3(1) 透水試験結果および比抵抗値に基づく透水係数分布（ケース2、メンバーシップ1.0）の
ファジー変動幅（左）とクリッピング標準偏差（右）

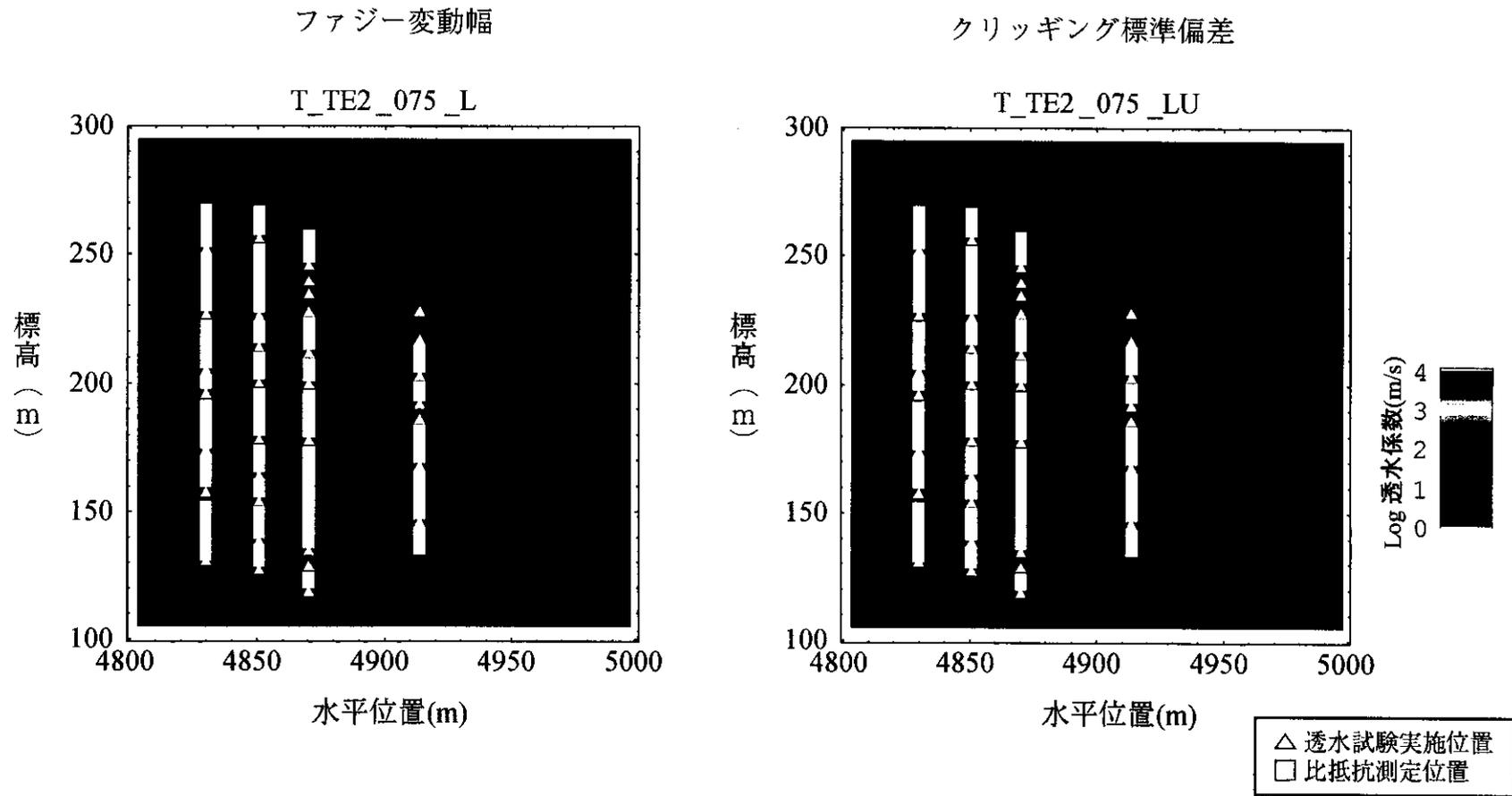


図6-3(2) 透水試験結果および比抵抗値に基づく透水係数分布（ケース2、メンバーシップ0.75）の
ファジー変動幅（左）とクリッピング標準偏差（右）

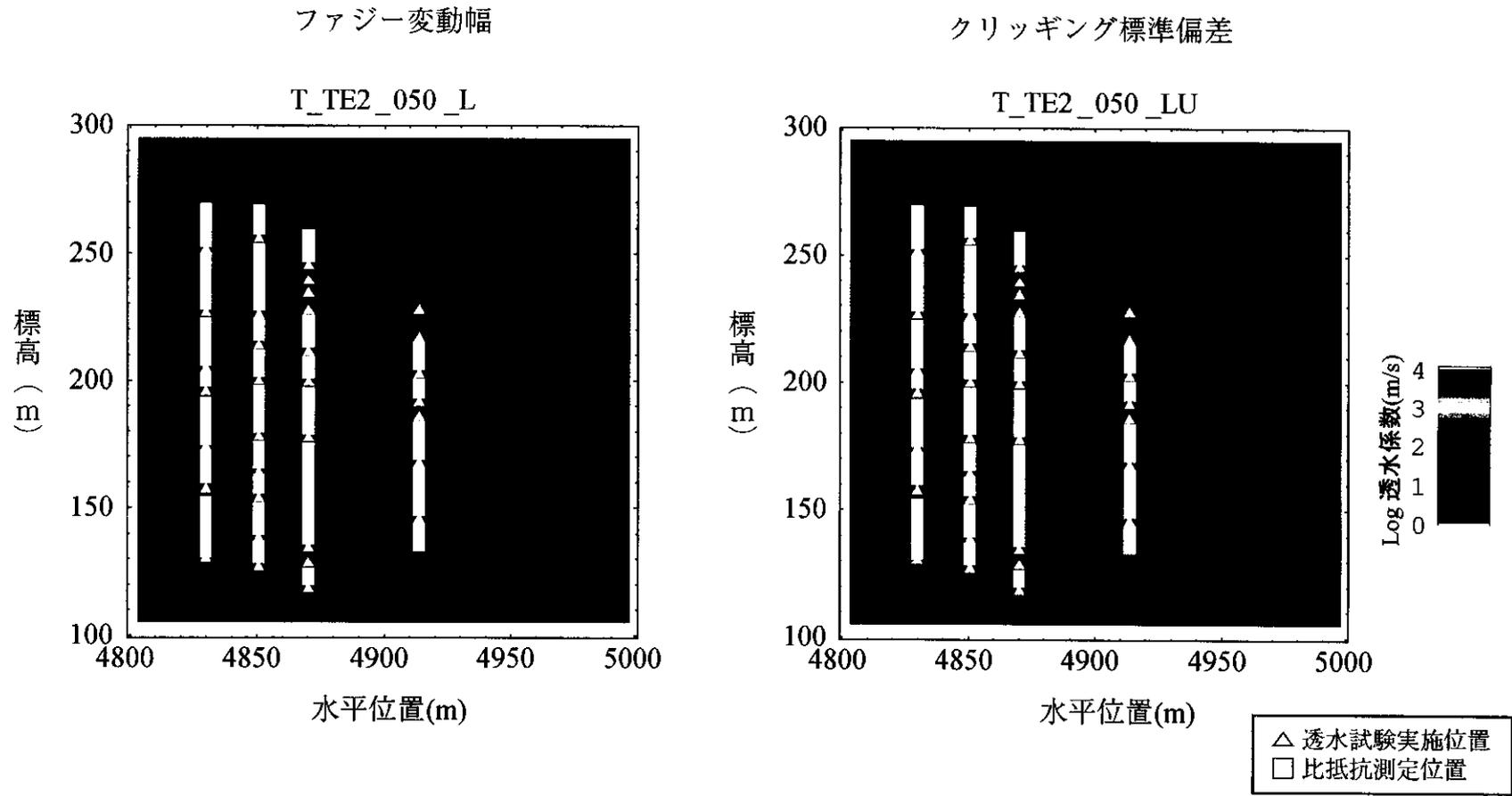


図6-3(3) 透水試験結果および比抵抗値に基づく透水係数分布（ケース2、メンバーシップ0.5）のファジー変動幅（左）とクリッピング標準偏差(右)

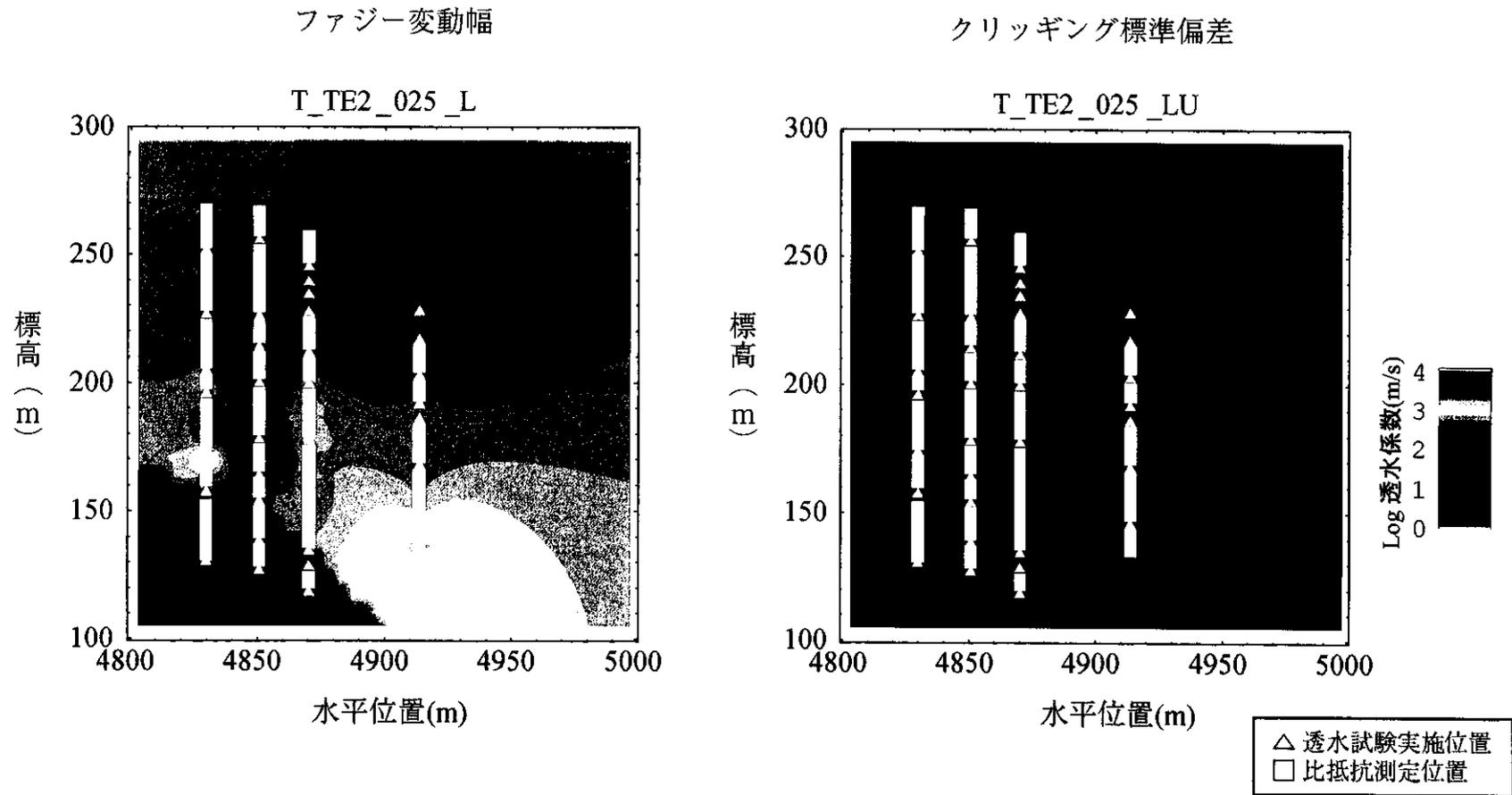


図6-3(4) 透水試験結果および比抵抗値に基づく透水係数分布（ケース2、メンバーシップ0.25）の
ファジー変動幅（左）とクリッキング標準偏差(右)

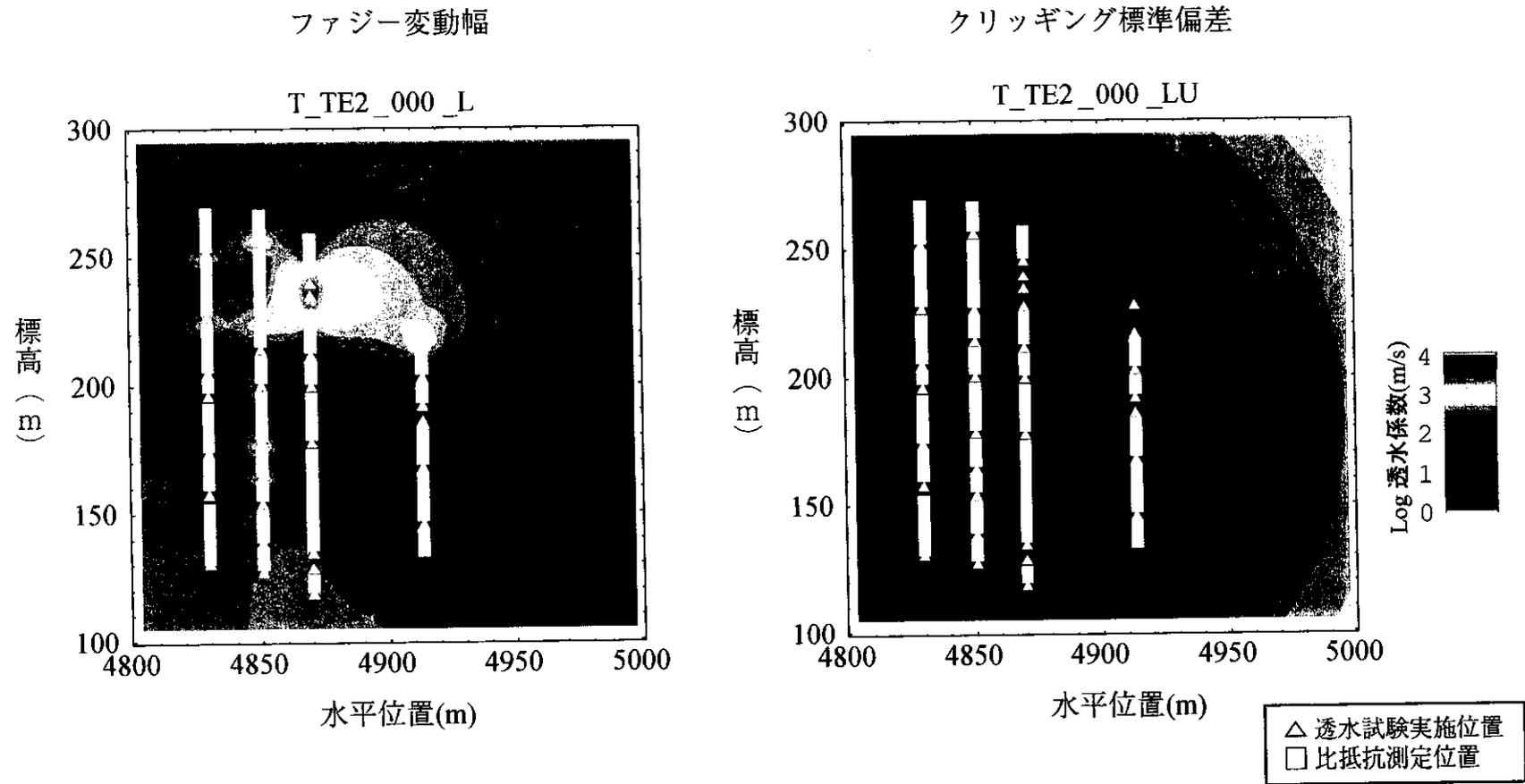


図6-3(5) 透水試験結果および比抵抗値に基づく透水係数分布 (ケース2、メンバーシップ0.0) の
ファジー変動幅 (左) とクリッピング標準偏差(右)

7. 今後の研究課題

前章に述べたように、本手法の有効性を示す結果は得られたものの、今回の全ての例題においてはそれが顕著なものとはならなかった。そこで、以下に、その原因について検討を加えるとともに、本手法を今後適切に適用していくための課題をまとめる。

空間的不均一性について、より不確実性の小さい推定結果を得るためには、ハードデータおよびソフトデータそれぞれの不確実性要因である、ファジー変動幅とクリッキング標準偏差を小さくすることが必要である。このうち、ファジー変動幅を小さくするためには、より精度の高いデータを得ることが求められ、クリッキング標準偏差を小さくするためには、データの取得地点を適切に配置し、データ数を多くすることが求められる。

まず、ファジー変動幅を小さくするための、より精度の高いデータの取得に関して、以下が考えられる。

- ・ 今回の推定では、全ての領域における透水係数データと比抵抗データを用いて相関を算出したが、より相関の良い回帰式の作成のため、類似した領域（地層）毎に透水係数データと比抵抗データの相関関係を導き出すことにより、推定誤差を低減できる可能性がある。
- ・ 今回のソフトデータは比抵抗値のみであるが、例えば弾性波速度などを含む複数のソフトデータを用いて透水係数データとの間の多重相関を考えることにより、推定誤差を減少できる可能性がある。
- ・ ハードデータ、及びソフトデータの両者について、物理量の測定精度の上昇は、ファジー変動幅の減少をもたらすものとなる。

次に、クリッキング標準偏差については、データ取得地点の適切な配置及び多数のデータの取得を行うことが有効であると考えられ、本手法の適用性を高めるための具体策として、以下を挙げることができる。

- ・ 解析対象領域右側には、クリッキング標準偏差が大きい部分が存在している。この領域のデータを得る、つまりデータの不足している領域に試錐孔

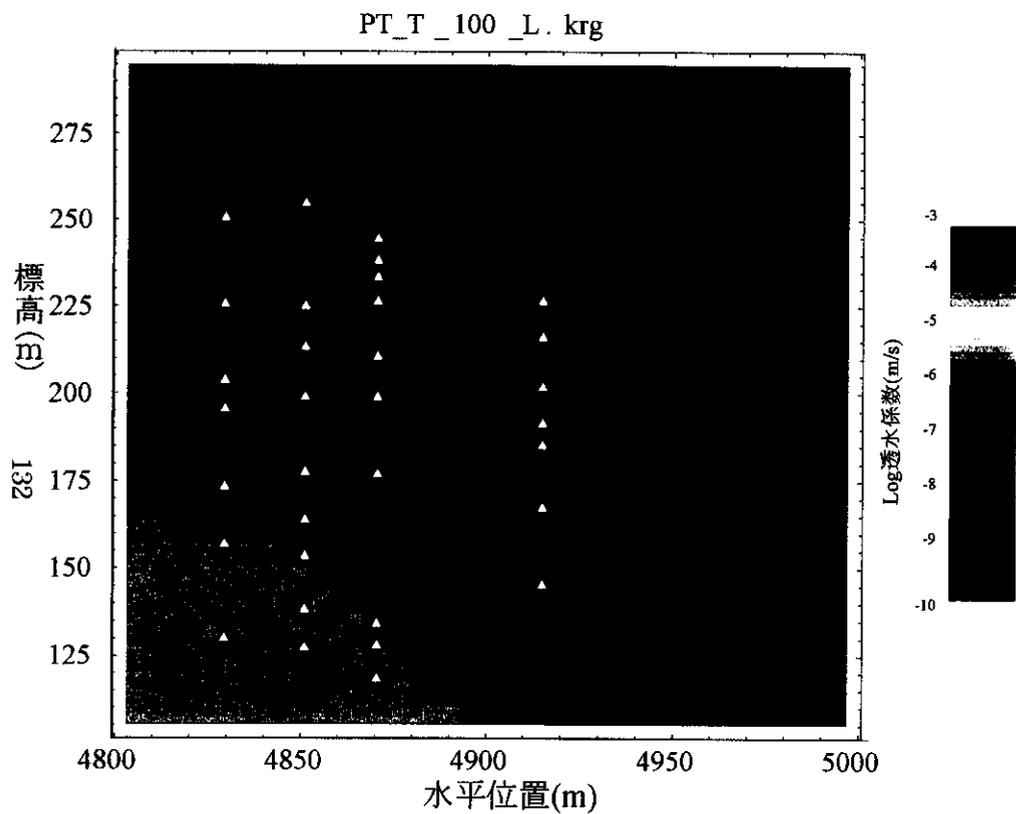
を掘ることで、クリッキング標準偏差の減少を期待することができる。

- ・メンバーシップが低いケースで顕著であるように、試錐孔と試錐孔の間の領域ではクリッキング標準偏差が大きくなっていることから、各試錐孔内での比抵抗値測定に加え、それぞれの試錐孔間での比抵抗値の測定（例えば、比抵抗トモグラフィ）によりデータを増やすことで、クリッキング標準偏差を小さくできるものと考えられる。

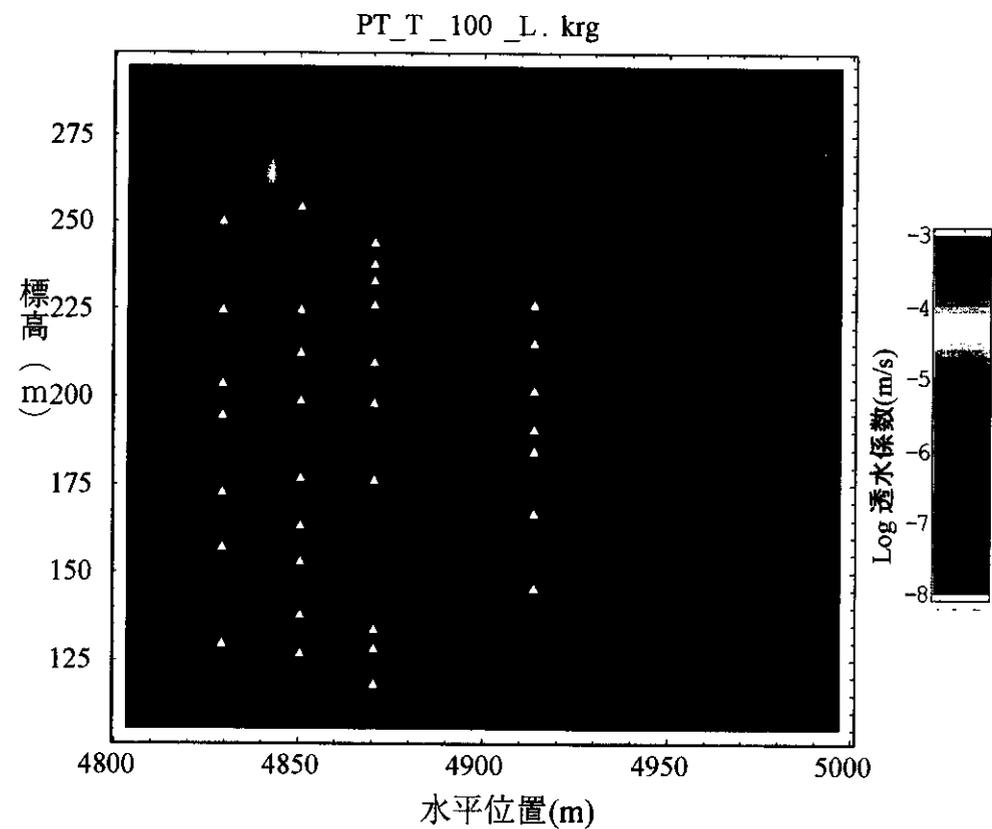
今回はテストケースとして、2つの異なるメンバーシップ関数を設定して計算を行ったが、透水係数分布の推定に関しては、メンバーシップの設定によって結果が大きく変化することが予想される。また、これらのメンバーシップについては高い蓋然性が要求されるものであり、今後はメンバーシップ関数を与える方法や手順の確立を行う必要があると考えられる。

また、本研究では、透水係数値の空間的不均一性についての推定のみを行っているが、今後の研究開発においては、推定された透水係数場に対して地下水流動解析や物質移動解析を行うことが必要になるものと考えられる。このような目的の下では、前述したように、クリッキングによって得られた結果は、当該物理量の最良推定値の分布であり、物理量自体の分布を示しているものではなく、実際の空間分布における不均一性を過小評価する傾向がある、という点に留意する必要がある。参考として、クリッキングによって得られた透水係数の分布と、ファジーシミュレーションを行って得られた透水係数の分布を図7-1～3に示す。クリッキングの結果はファジーシミュレーションの結果に比べて、空間分布の不均一性が過小評価されていることが明らかである。他方、今回開発したファジーシミュレーションの手法は、透水係数場の推定にとどまらず、地下水流動解析や物質移動解析にも適用し、それぞれ、地下水流速場や溶質濃度プロファイル推定結果の不確実性をファジーメンバーシップとして表現することが可能である。

透水係数の不確実性範囲の下限值を使用



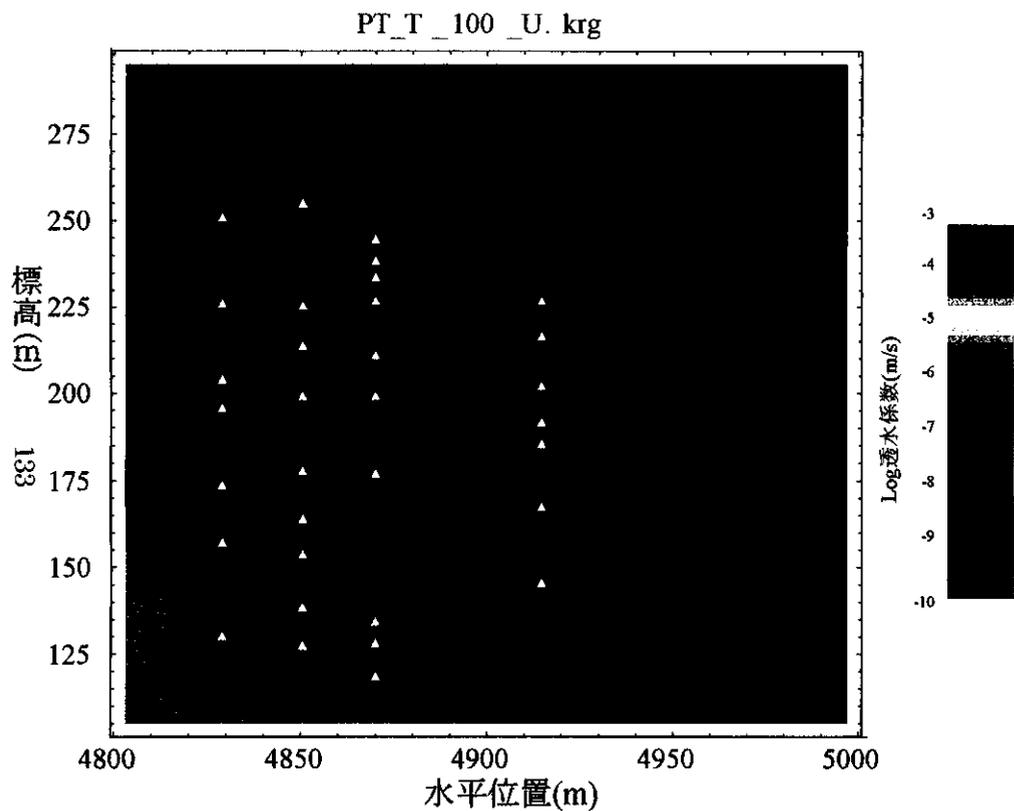
透水係数の不確実性範囲の下限值を使用



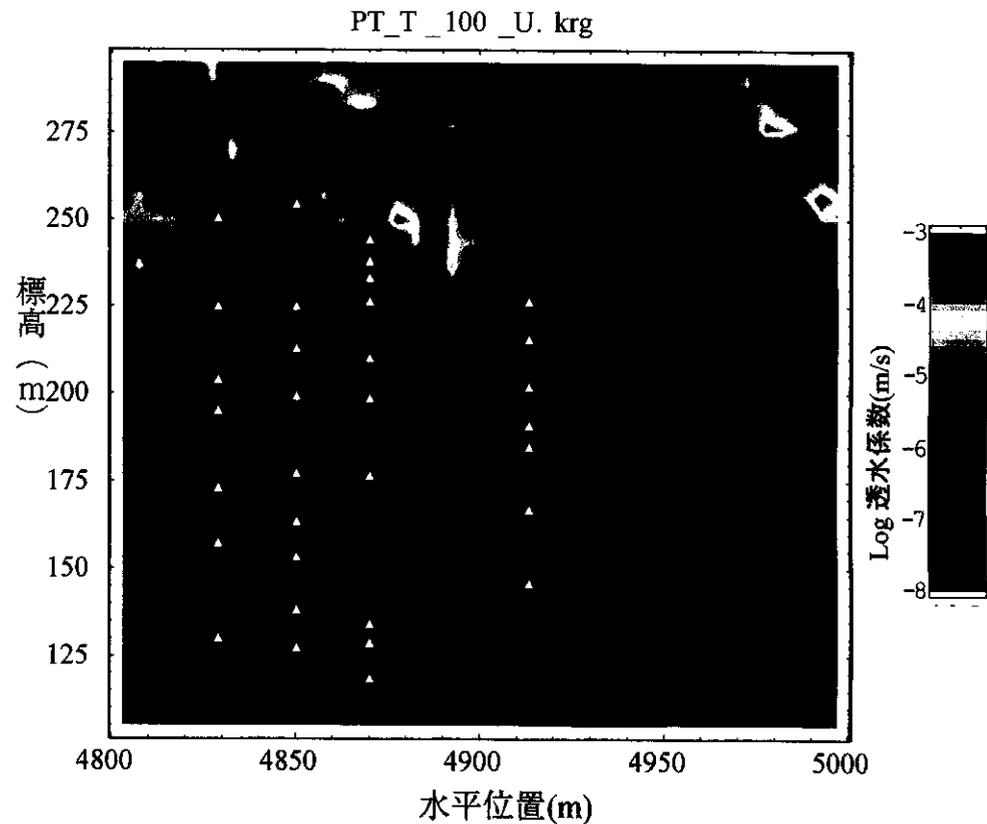
△ 透水試験実施位置
□ 比抵抗測定位置

図7-1(1a) クリッキングによる透水係数分布(左)とファジーシミュレーションによる透水係数分布(右)の比較
(透水試験結果のみによる、メンバーシップ1.0)

透水係数の不確実性範囲の上限値を使用



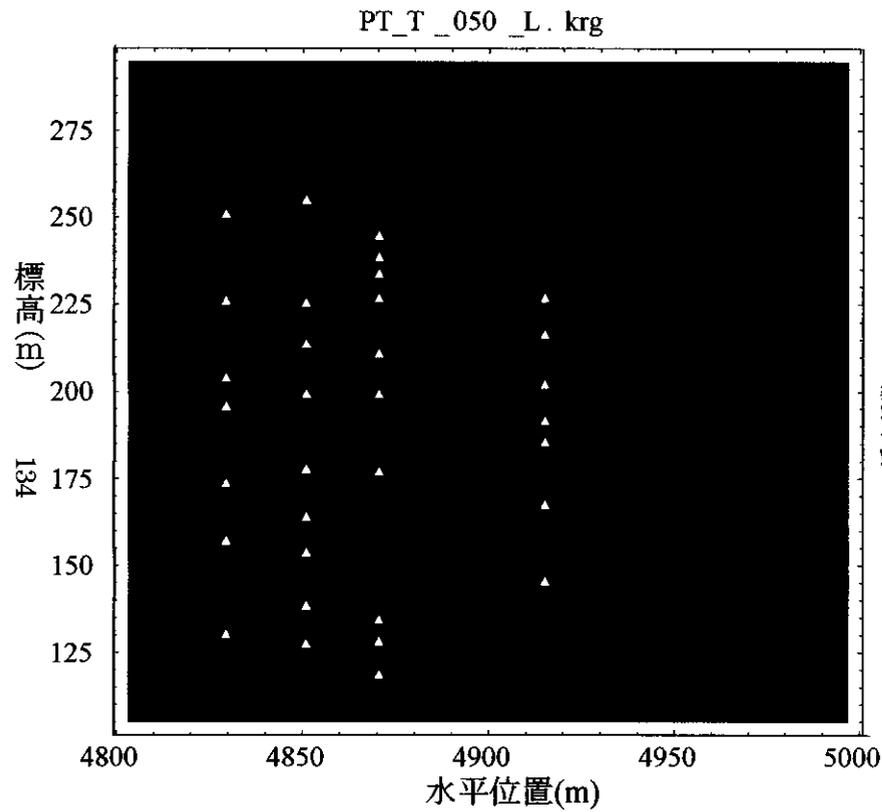
透水係数の不確実性範囲の上限値を使用



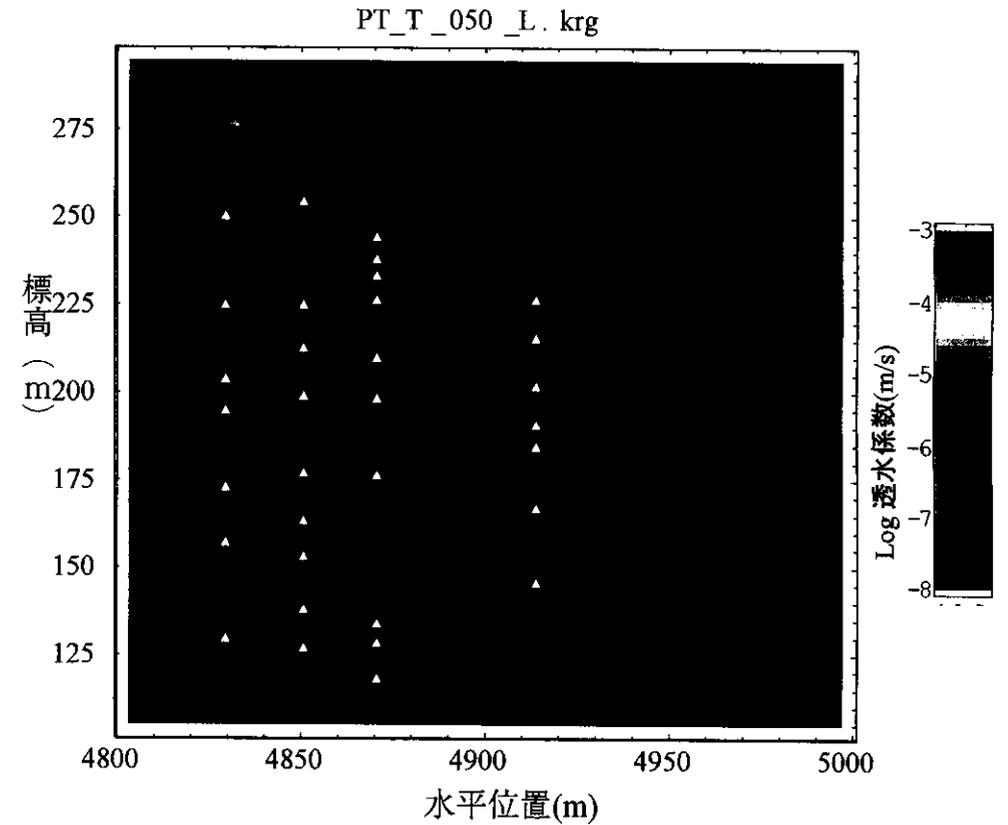
△ 透水試験実施位置
□ 比抵抗測定位置

図7-1(1b) クリックによる透水係数分布(左)とファジーシミュレーションによる透水係数分布(右)の比較
(透水試験結果のみによる、メンバーシップ1.0)

透水係数の不確実性範囲の下限値を使用



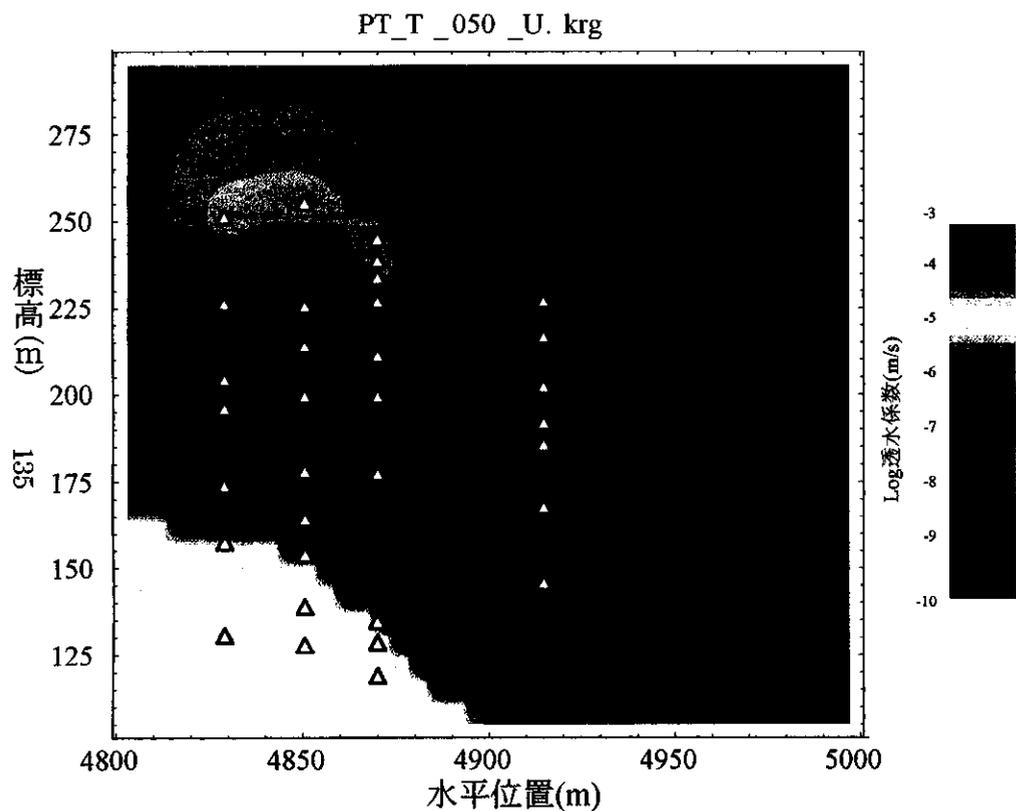
透水係数の不確実性範囲の下限値を使用



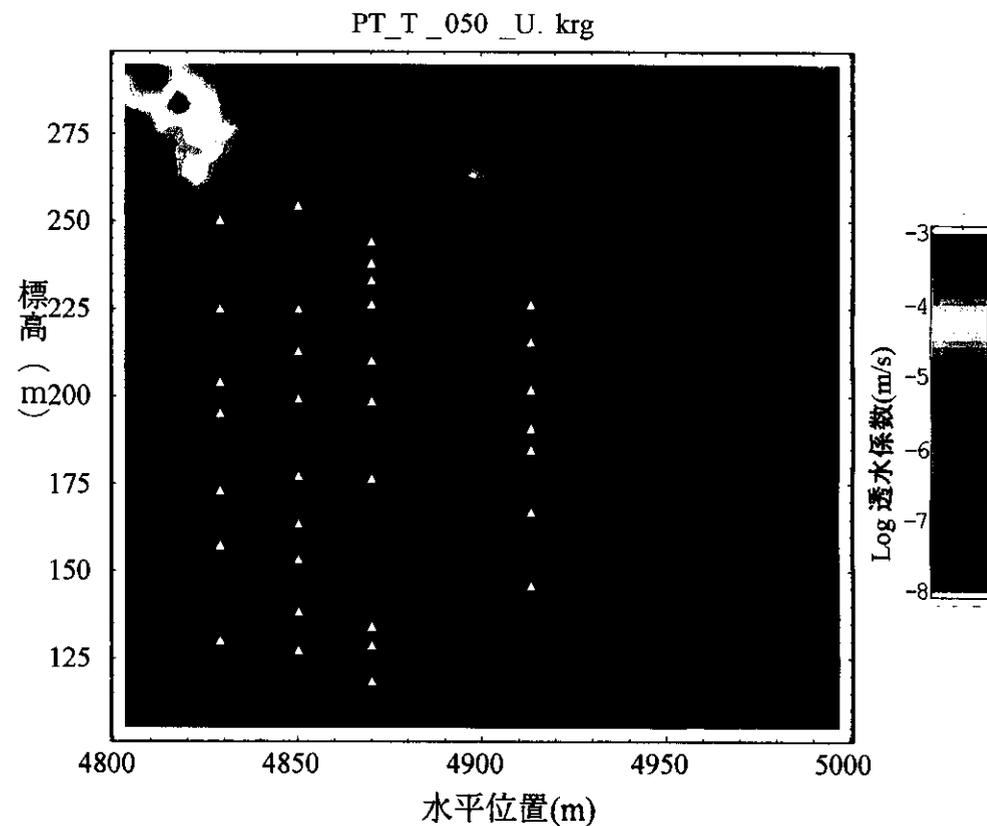
△ 透水試験実施位置
□ 比抵抗測定位置

図7-1(2a) クリックによる透水係数分布(左)とファジーシミュレーションによる透水係数分布(右)の比較
(透水試験結果のみによる、メンバーシップ0.5)

透水係数の不確実性範囲の上限値を使用



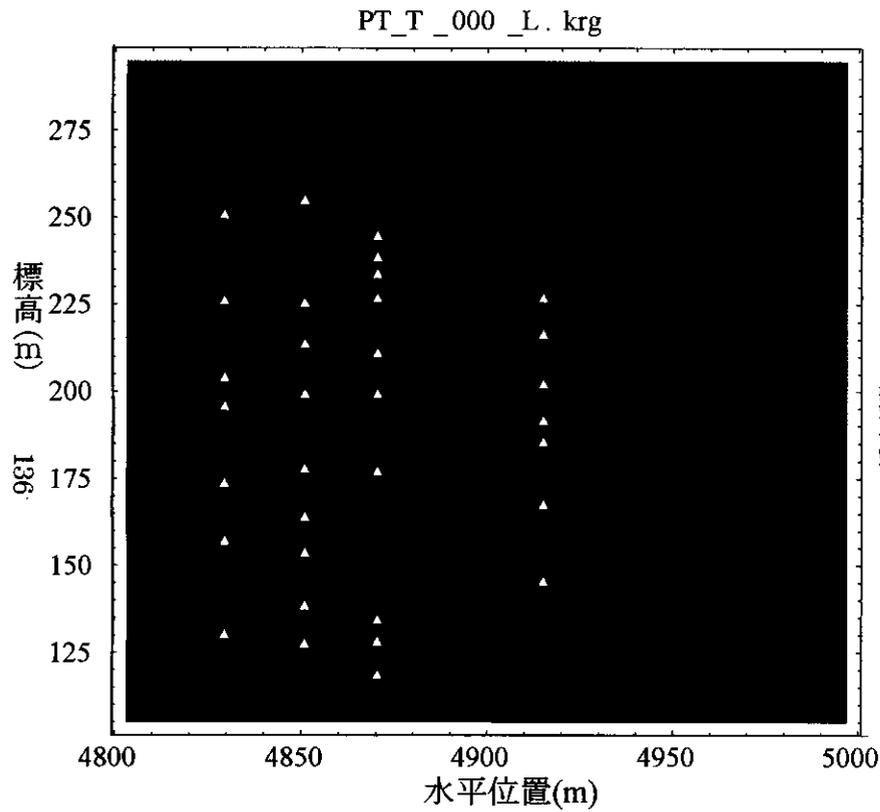
透水係数の不確実性範囲の上限値を使用



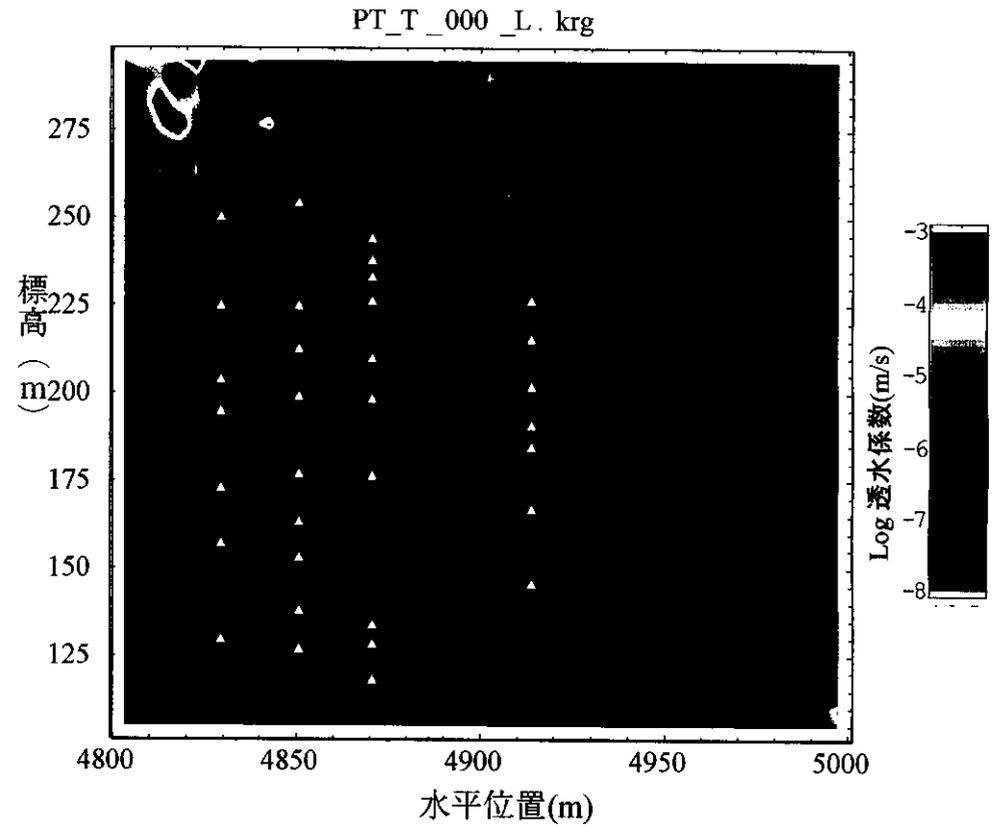
△ 透水試験実施位置
□ 比抵抗測定位置

図7-1(2b) クリッキングによる透水係数分布(左)とファジーシミュレーションによる透水係数分布(右)の比較
(透水試験結果のみによる、メンバーシップ0.5)

透水係数の不確実性範囲の下限値を使用



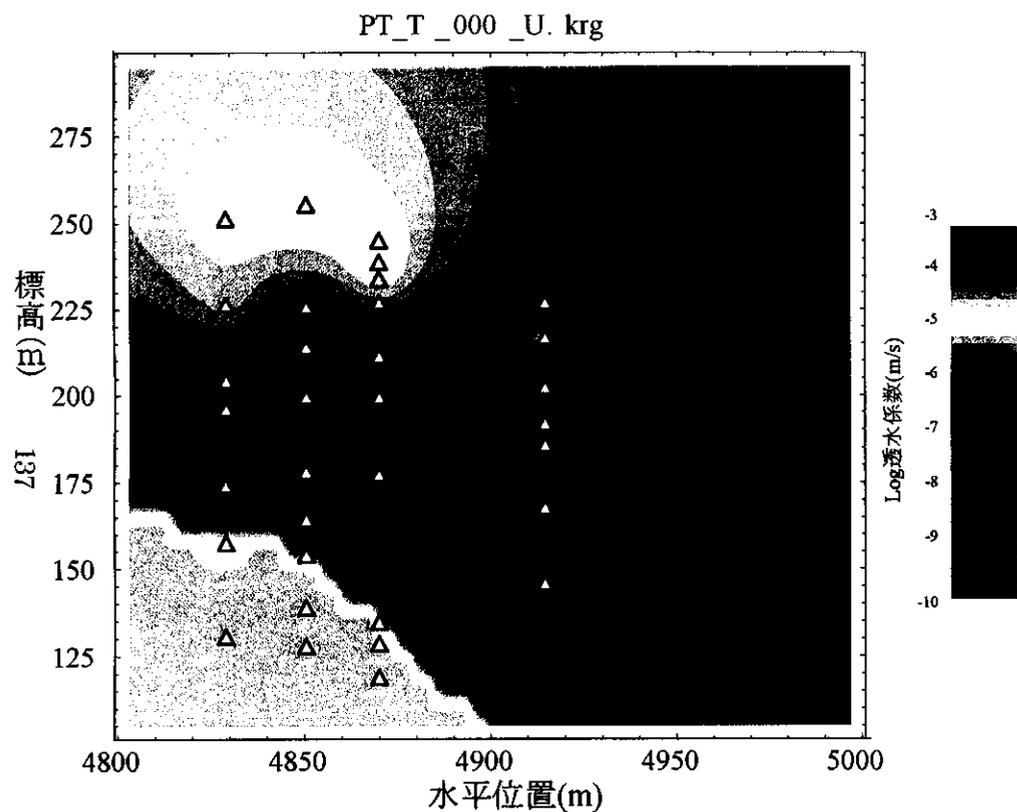
透水係数の不確実性範囲の下限値を使用



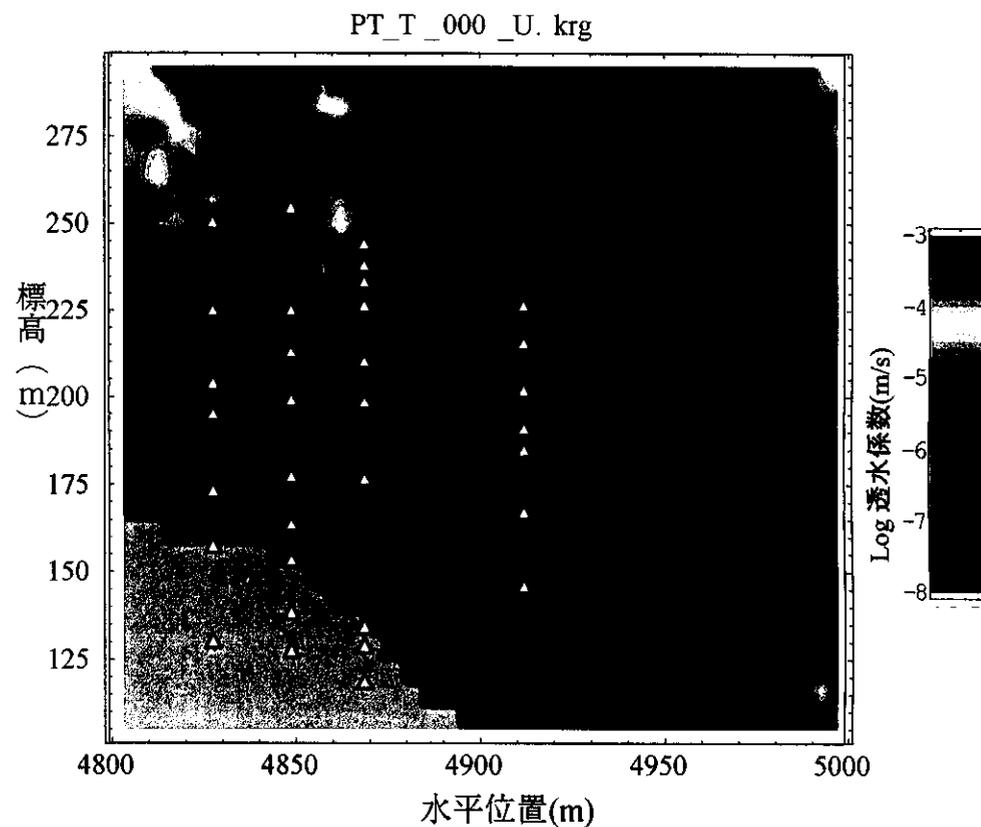
△ 透水試験実施位置
□ 比抵抗測定位置

図7-1(3a) クリックによる透水係数分布(左)とファジーシミュレーションによる透水係数分布(右)の比較
(透水試験結果のみによる、メンバーシップ0)

透水係数の不確実性範囲の上限値を使用



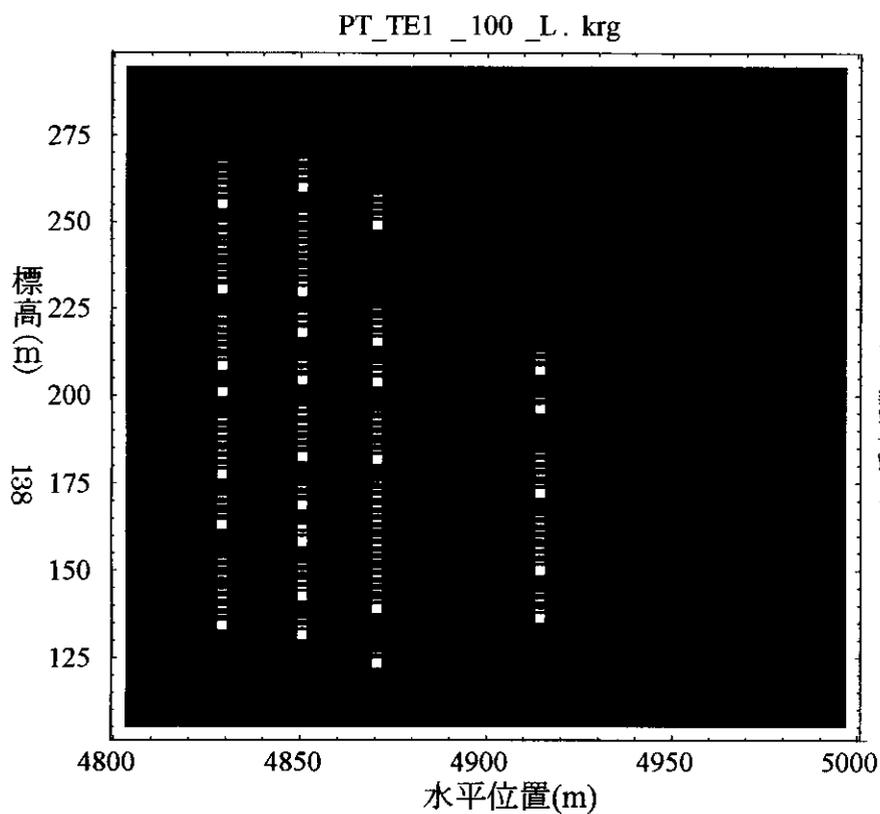
透水係数の不確実性範囲の上限値を使用



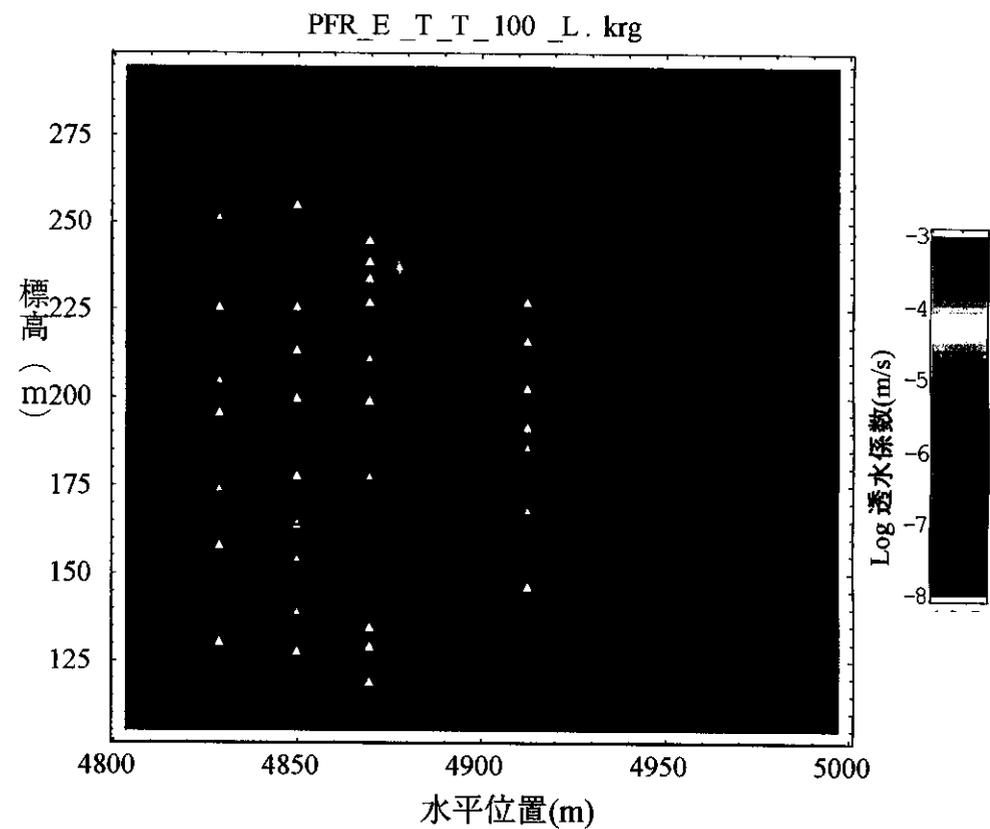
△ 透水試験実施位置
□ 比抵抗測定位置

図7-1(3b) クリックによる透水係数分布(左)とファジーシミュレーションによる透水係数分布(右)の比較
(透水試験結果のみによる、メンバーシップ0)

透水係数の不確実性範囲の下限値を使用



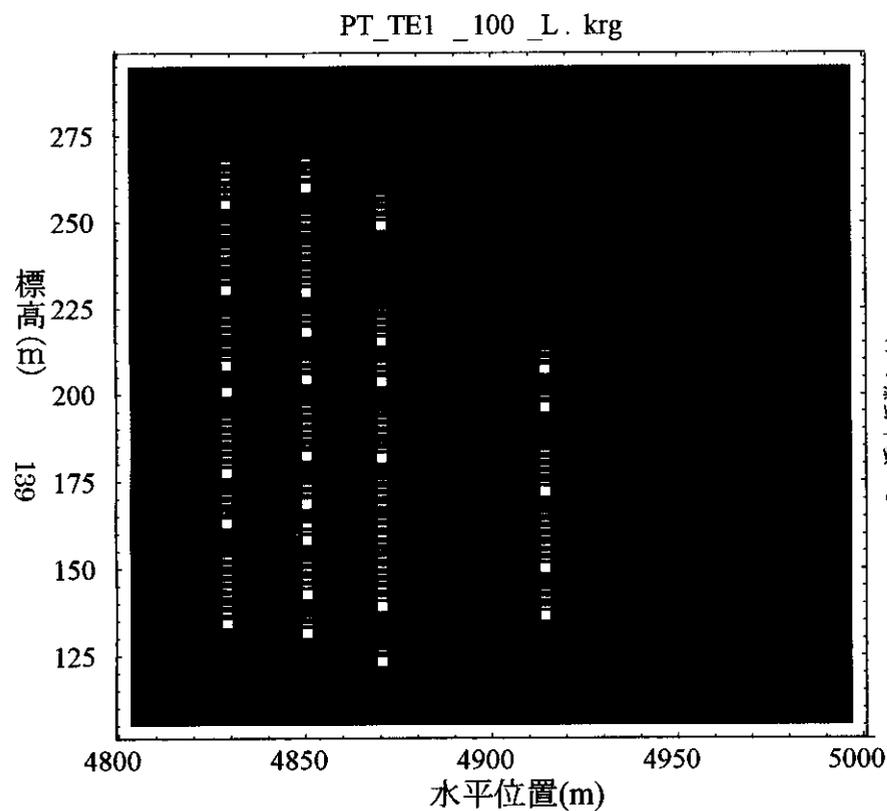
透水係数の不確実性範囲の下限値を使用



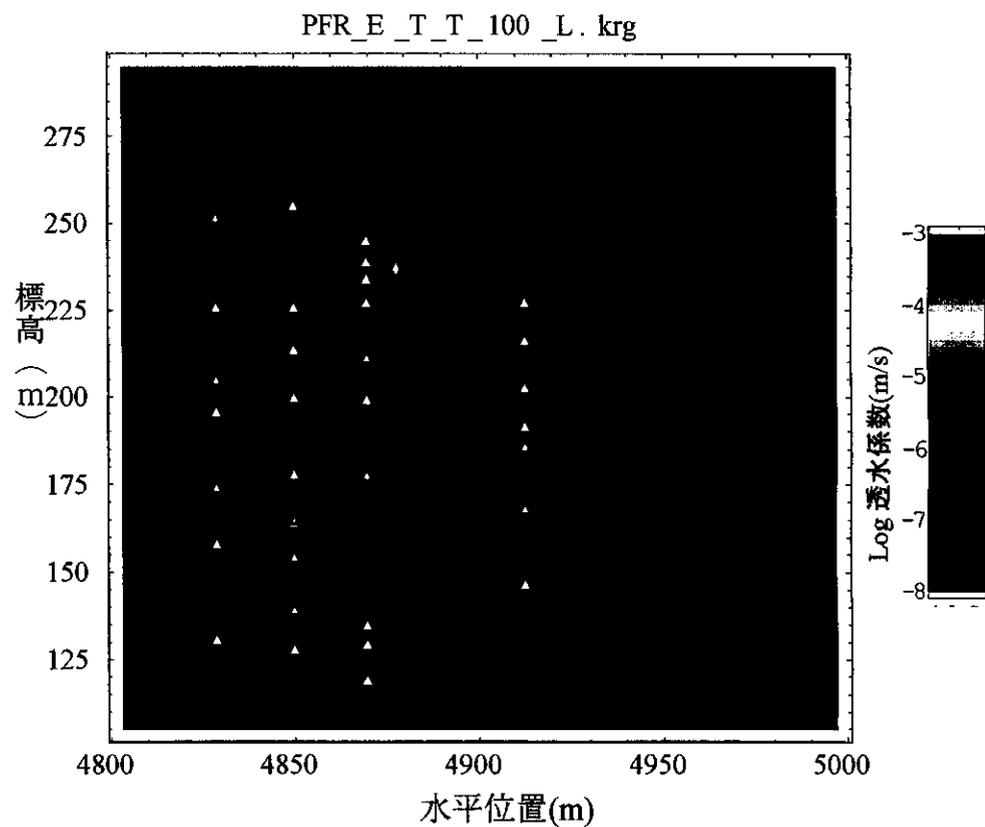
△ 透水試験実施位置
□ 比抵抗測定位置

図7-2(1a) クリックによる透水係数分布(左)とファジーシミュレーションによる透水係数分布(右)の比較
(透水試験結果および比抵抗値による、ケース1、メンバーシップ1.0)

透水係数の不確実性範囲の上限値を使用



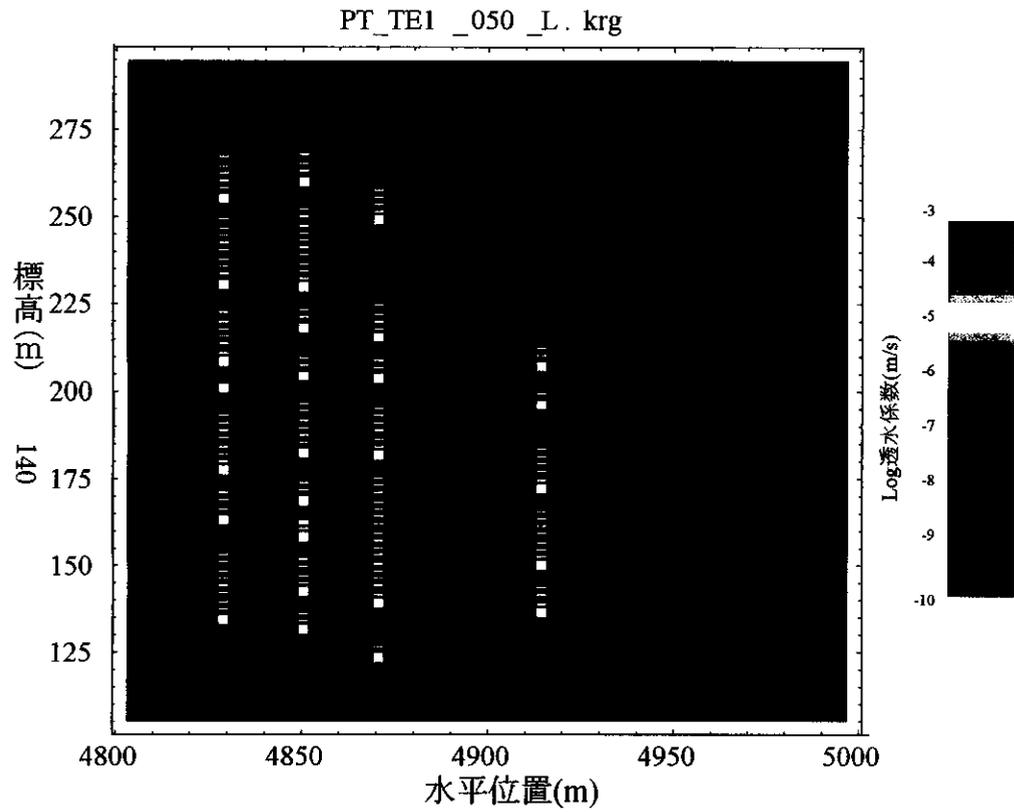
透水係数の不確実性範囲の上限値を使用



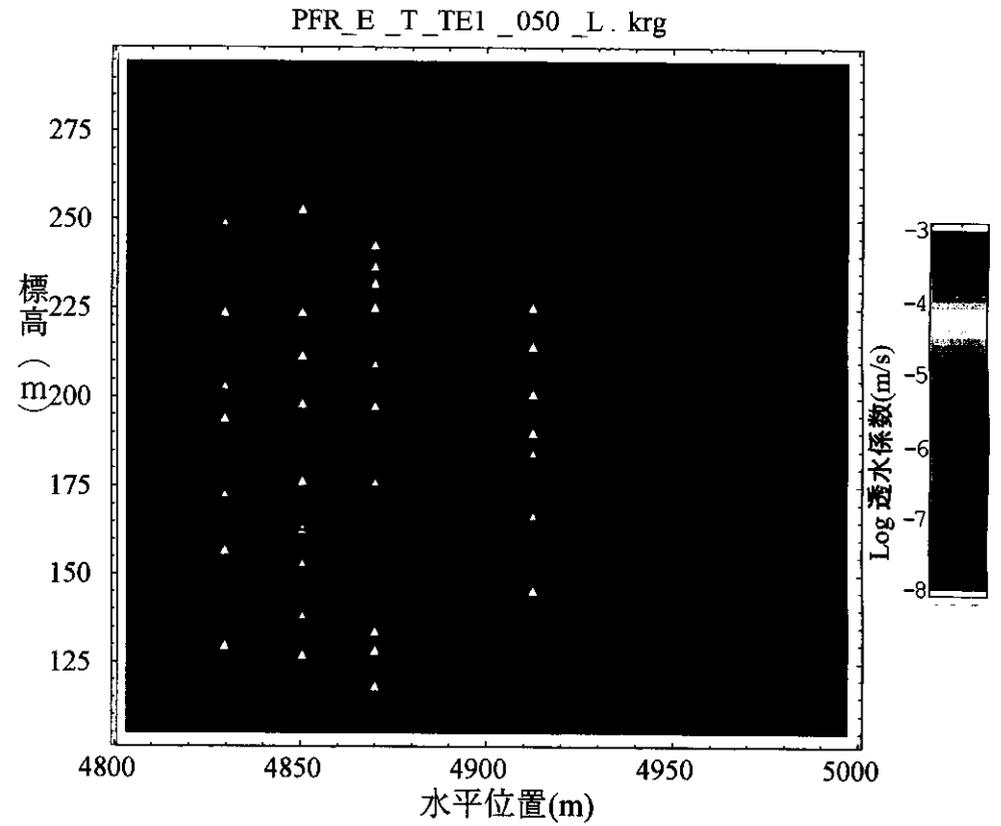
△ 透水試験実施位置
□ 比抵抗測定位置

図7-2(1b) クリックによる透水係数分布(左)とファジーシミュレーションによる透水係数分布(右)の比較
(透水試験結果および比抵抗値による、ケース1、メンバーシップ1.0)

透水係数の不確実性範囲の下限值を使用



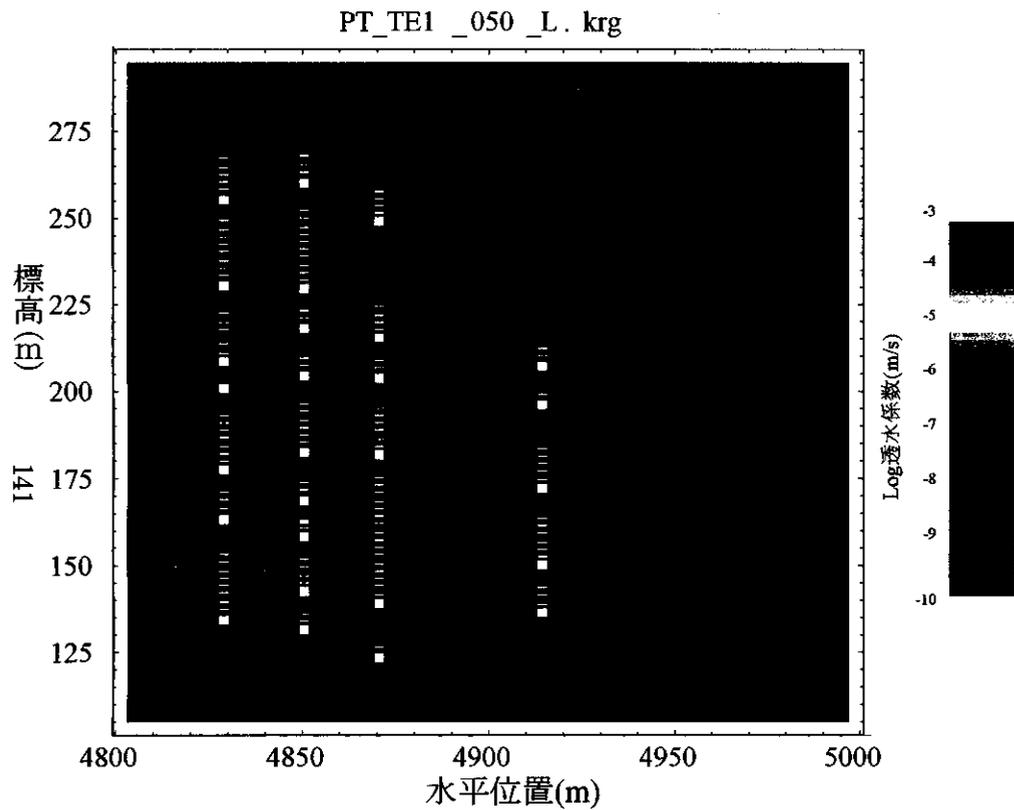
透水係数の不確実性範囲の下限值を使用



△ 透水試験実施位置
□ 比抵抗測定位置

図7-2(2a) クリックによる透水係数分布(左)とファジーシミュレーションによる透水係数分布(右)の比較
(透水試験結果および比抵抗値による、ケース1、メンバーシップ0.5)

透水係数の不確実性範囲の上限値を使用



透水係数の不確実性範囲の上限値を使用

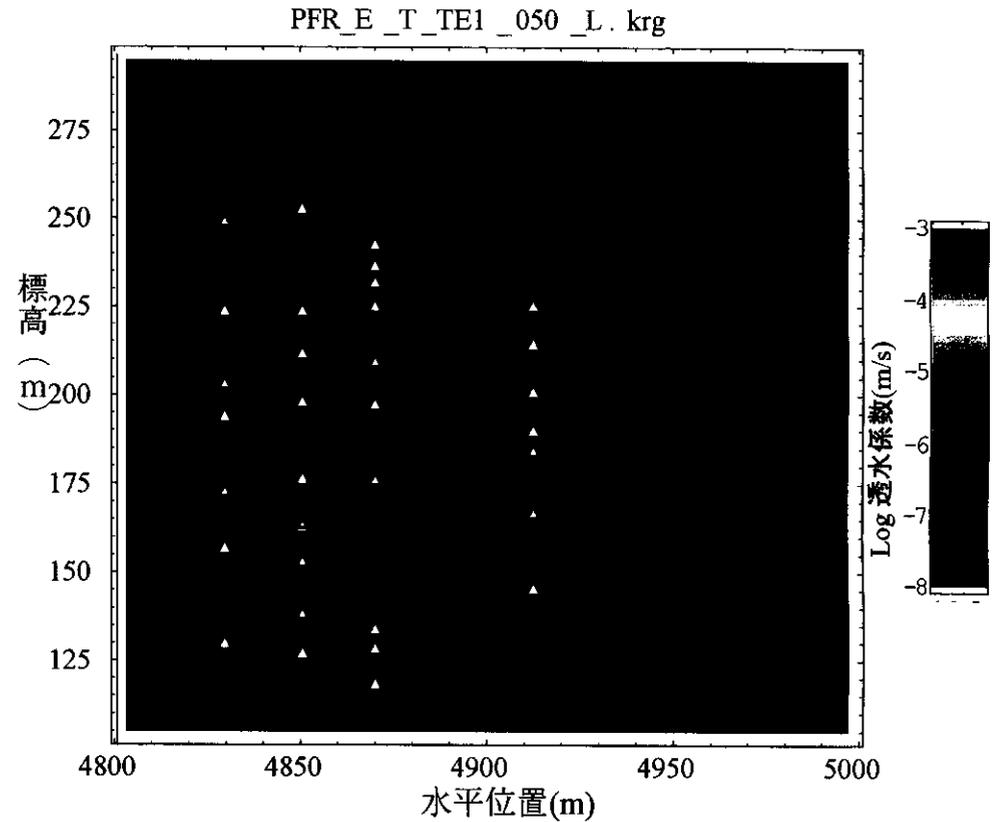
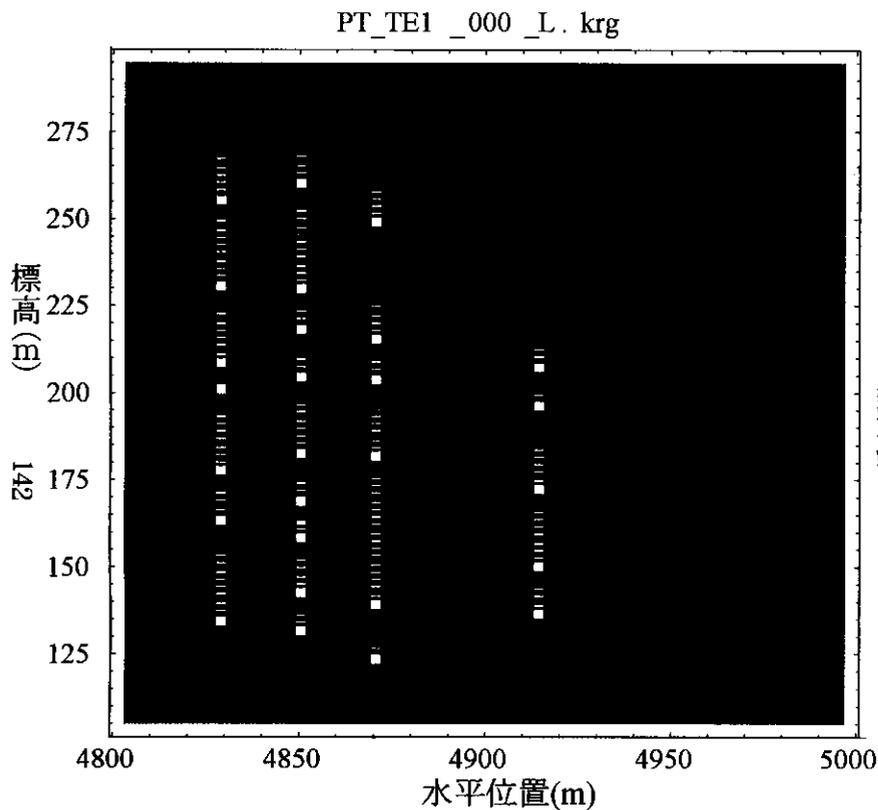
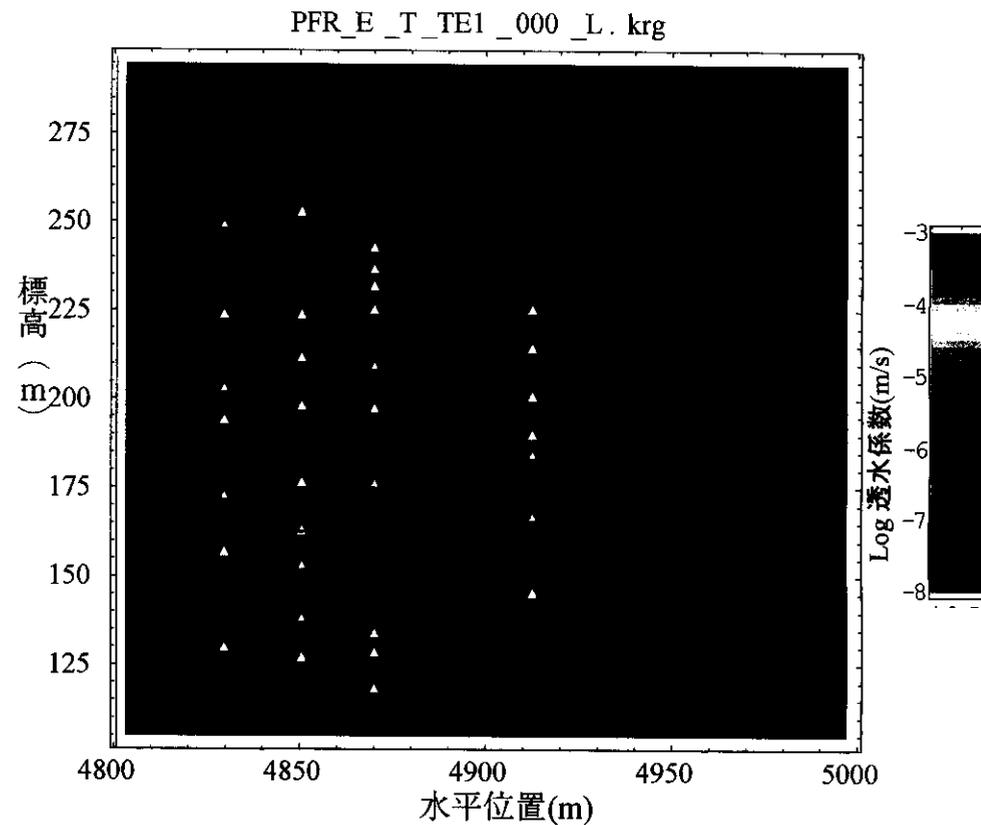


図7-2(2b) クリックによる透水係数分布(左)とファジーシミュレーションによる透水係数分布(右)の比較
(透水試験結果および比抵抗値による、ケース1、メンバーシップ0.5)

透水係数の不確実性範囲の下限値を使用



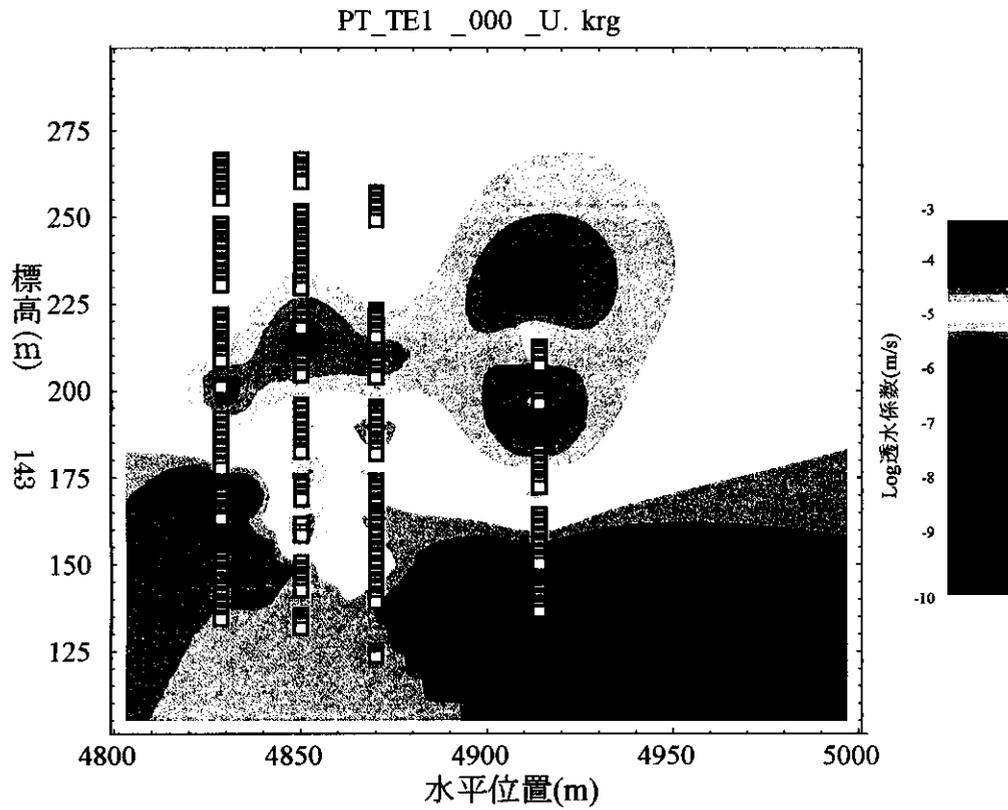
透水係数の不確実性範囲の下限値を使用



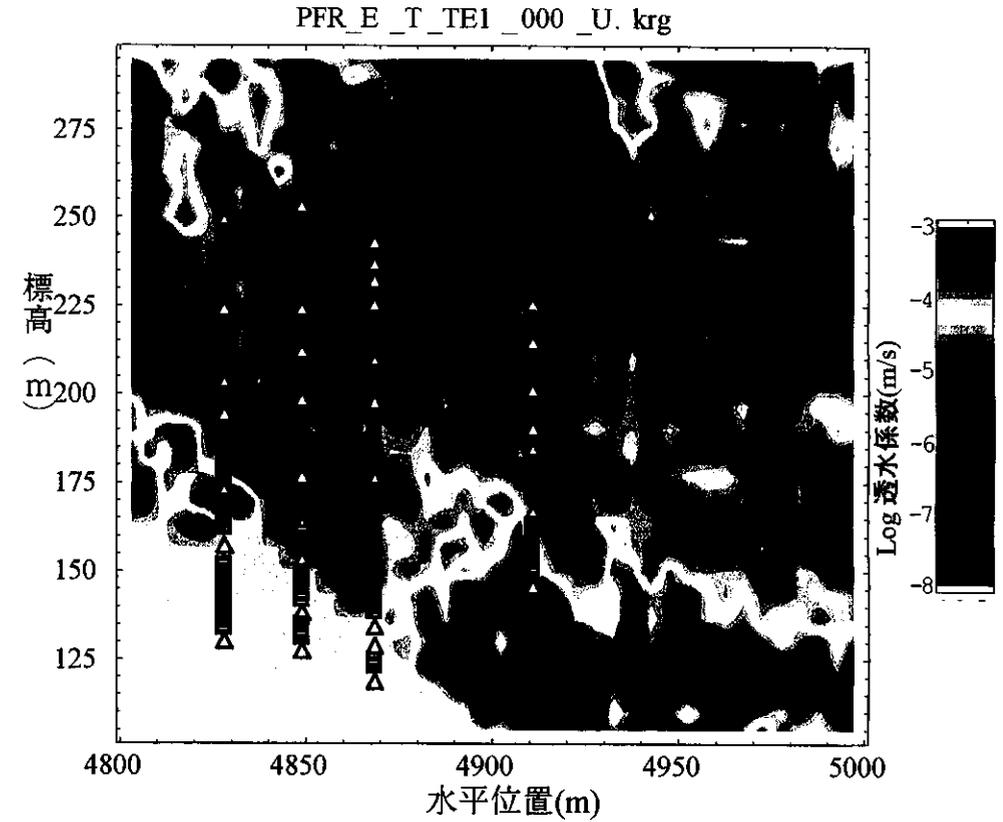
△ 透水試験実施位置
□ 比抵抗測定位置

図7-2(3a) クリッキングによる透水係数分布(左)とファジーシミュレーションによる透水係数分布(右)の比較
(透水試験結果および比抵抗値による、ケース1、メンバーシップ0)

透水係数の不確実性範囲の上限値を使用



透水係数の不確実性範囲の上限値を使用



△ 透水試験実施位置
□ 比抵抗測定位置

図7-2(3b) クリックによる透水係数分布(左)とファジーシミュレーションによる透水係数分布(右)の比較
(透水試験結果および比抵抗値による、ケース1、メンバーシップ0)

透水係数の不確実性範囲の下限値を使用

透水係数の不確実性範囲の下限値を使用

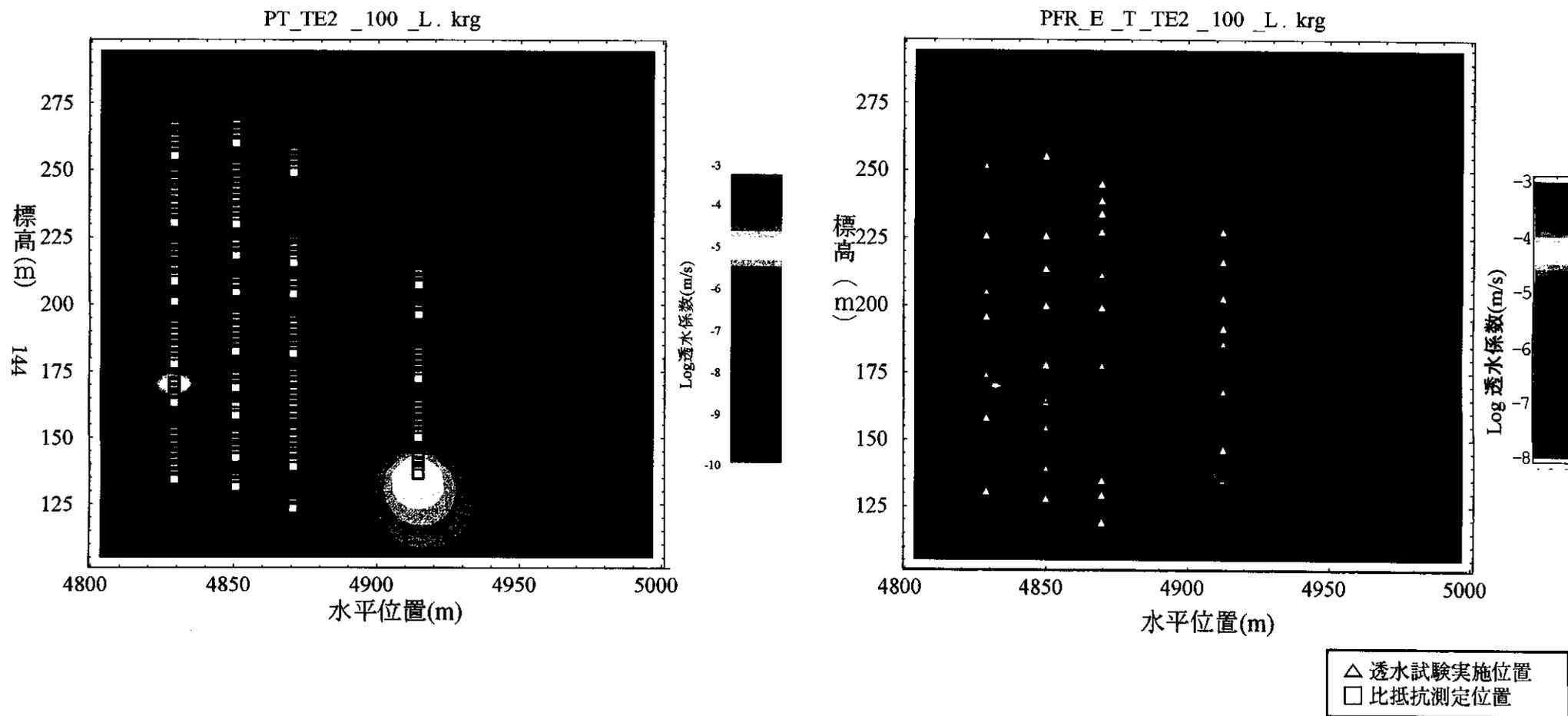
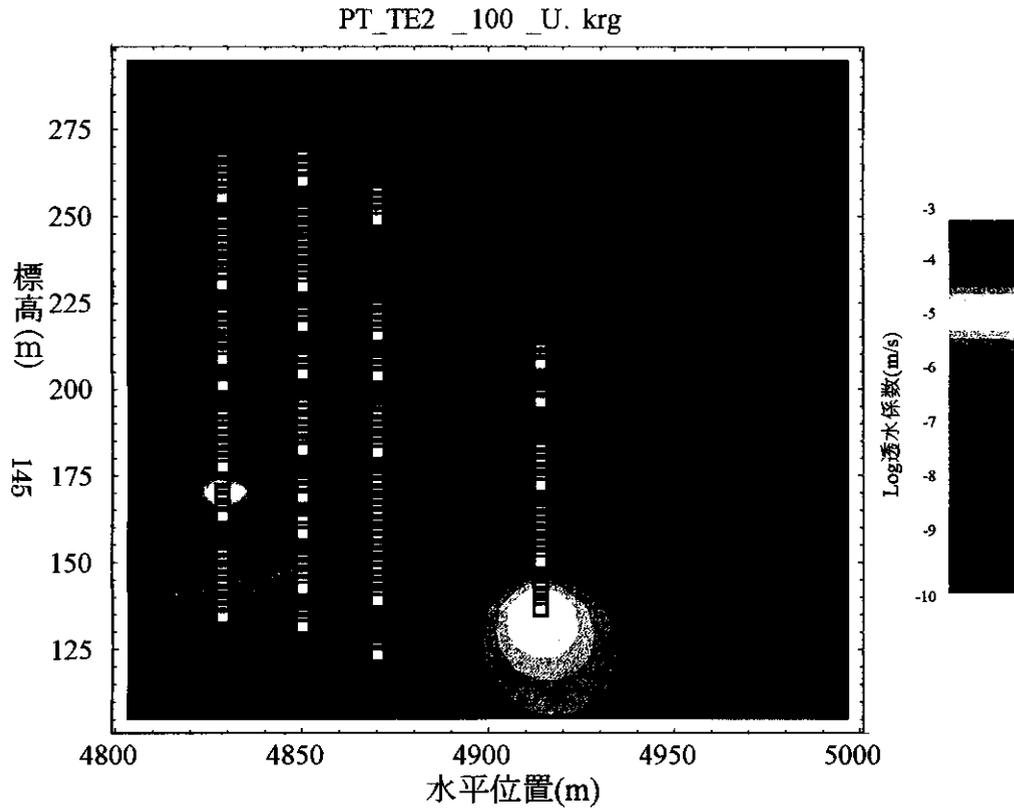
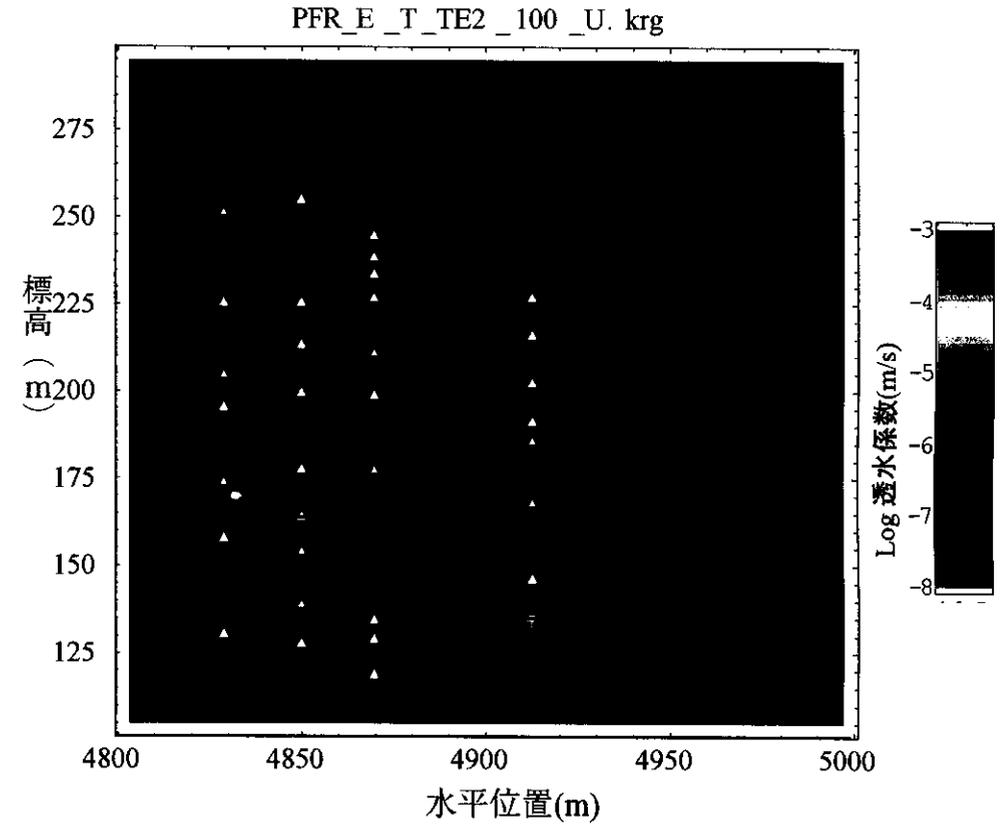


図7-3(1a) クリックによる透水係数分布(左)とファジーシミュレーションによる透水係数分布(右)の比較
(透水試験結果および比抵抗値による、ケース2、メンバーシップ1.0)

透水係数の不確実性範囲の上限値を使用



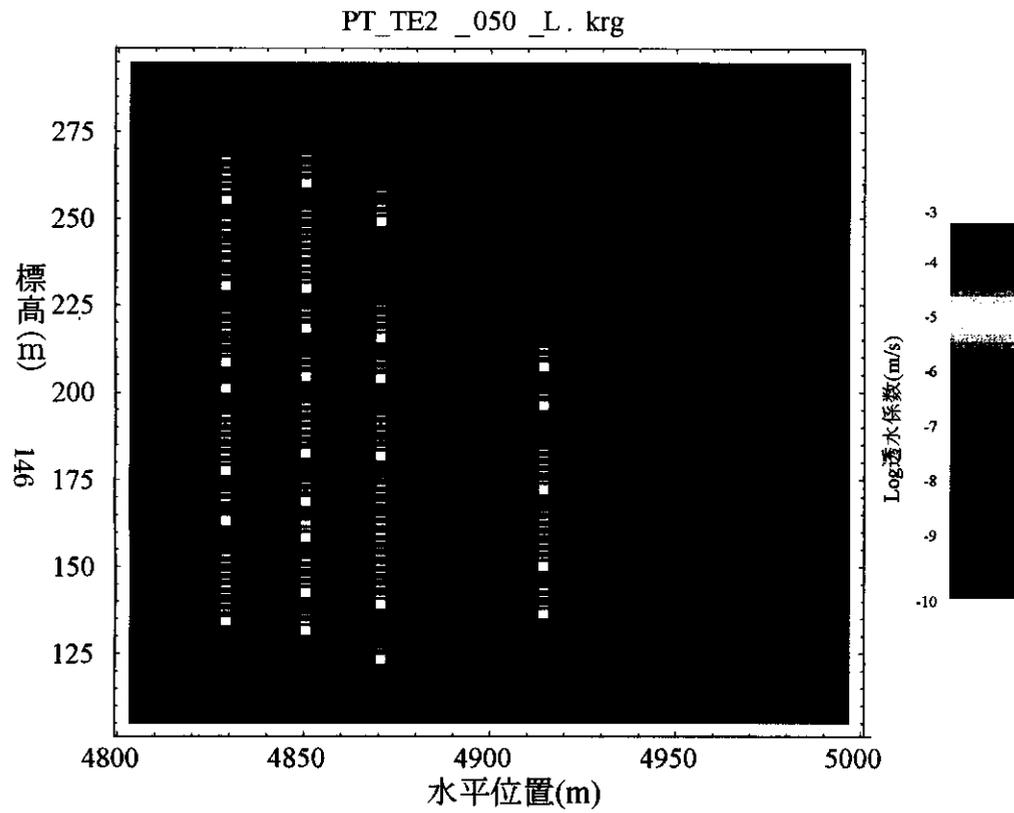
透水係数の不確実性範囲の上限値を使用



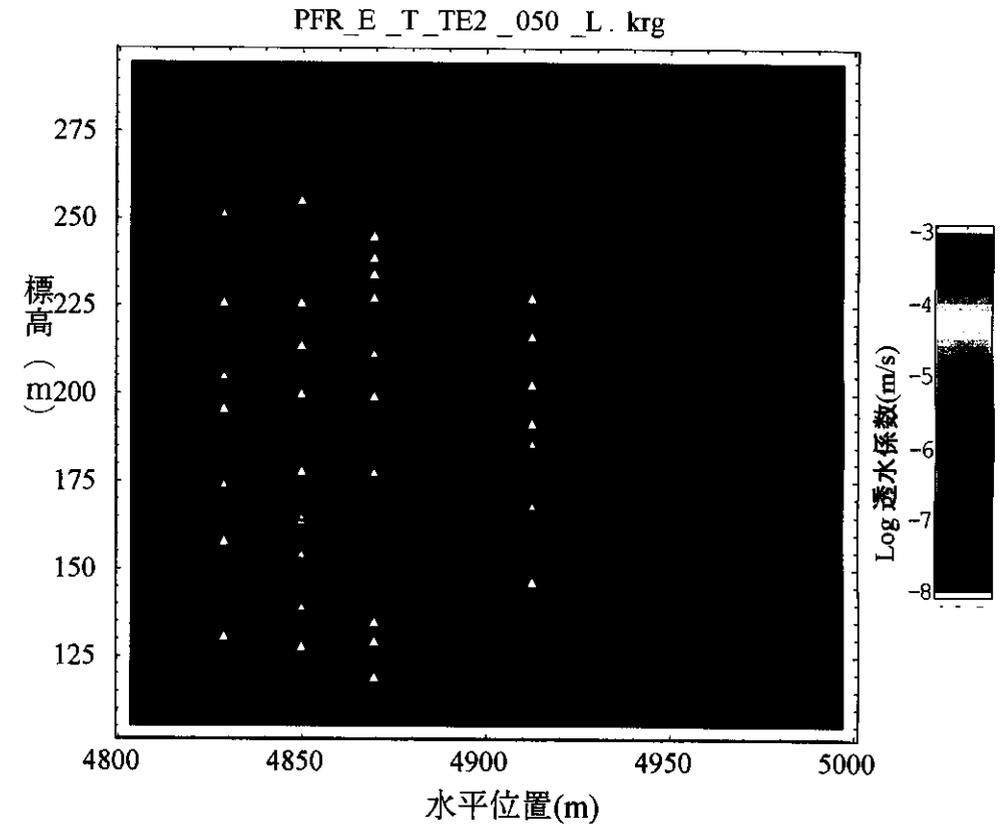
△ 透水試験実施位置
□ 比抵抗測定位置

図7-3(1b) クリックによる透水係数分布(左)とファジーシミュレーションによる透水係数分布(右)の比較
(透水試験結果および比抵抗値による、ケース2、メンバーシップ1.0)

透水係数の不確実性範囲の下限值を使用



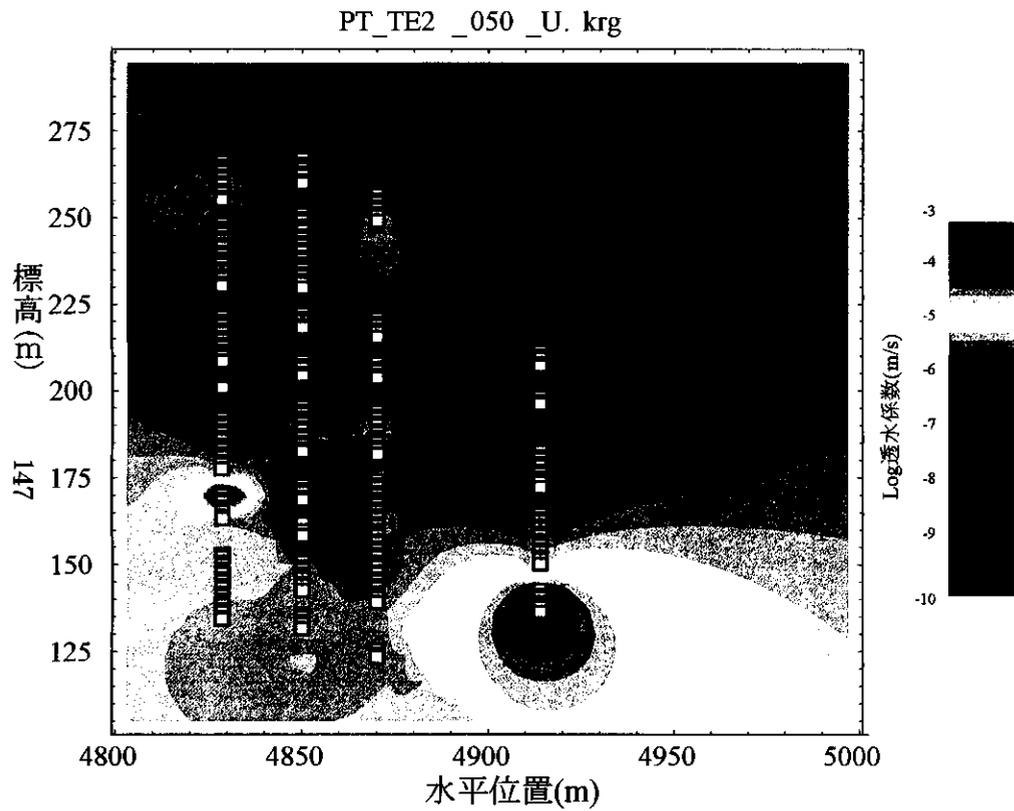
透水係数の不確実性範囲の下限值を使用



△ 透水試験実施位置
□ 比抵抗測定位置

図7-3(2a) クリックによる透水係数分布(左)とファジーシミュレーションによる透水係数分布(右)の比較
(透水試験結果および比抵抗値による、ケース2、メンバーシップ0.5)

透水係数の不確実性範囲の上限値を使用



透水係数の不確実性範囲の上限値を使用

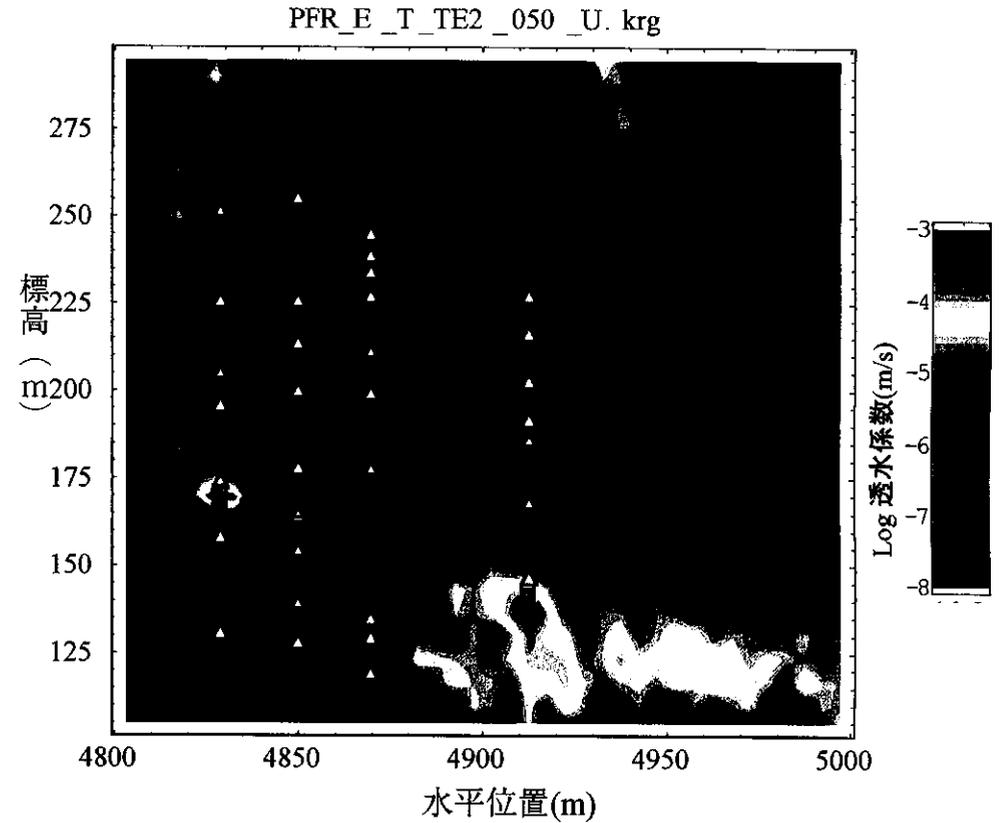
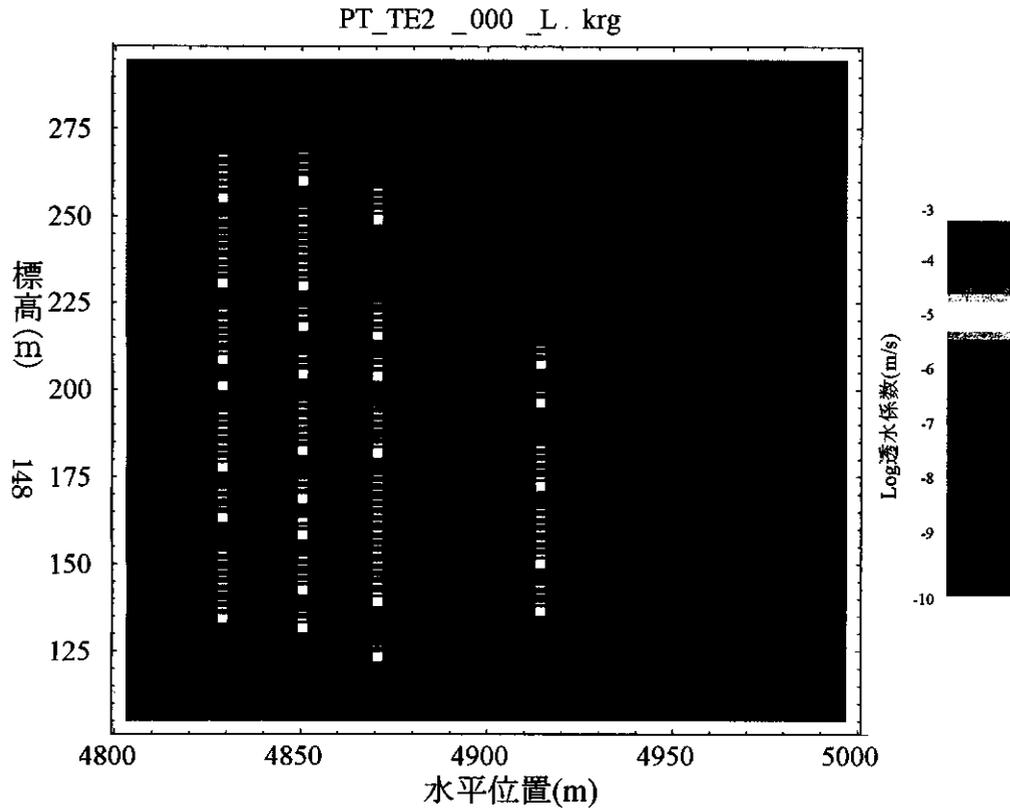


図7-3(2b) クリックによる透水係数分布(左)とファジーシミュレーションによる透水係数分布(右)の比較
(透水試験結果および比抵抗値による、ケース2、メンバーシップ0.5)

透水係数の不確実性範囲の下限値を使用



透水係数の不確実性範囲の下限値を使用

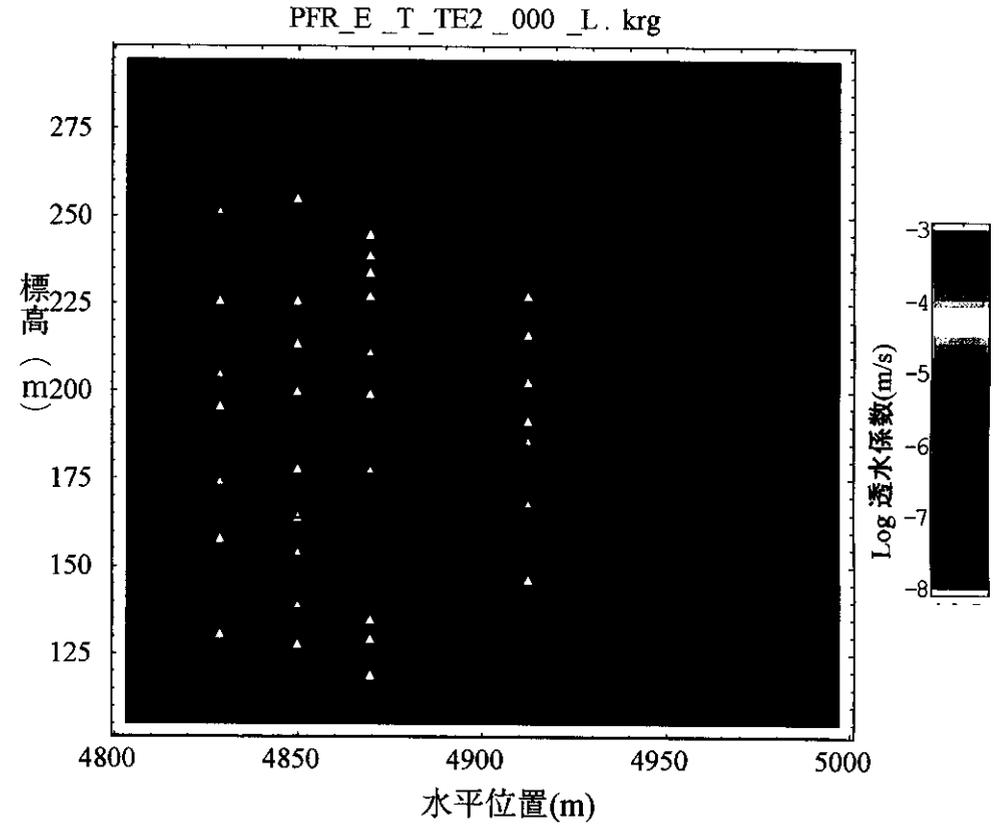
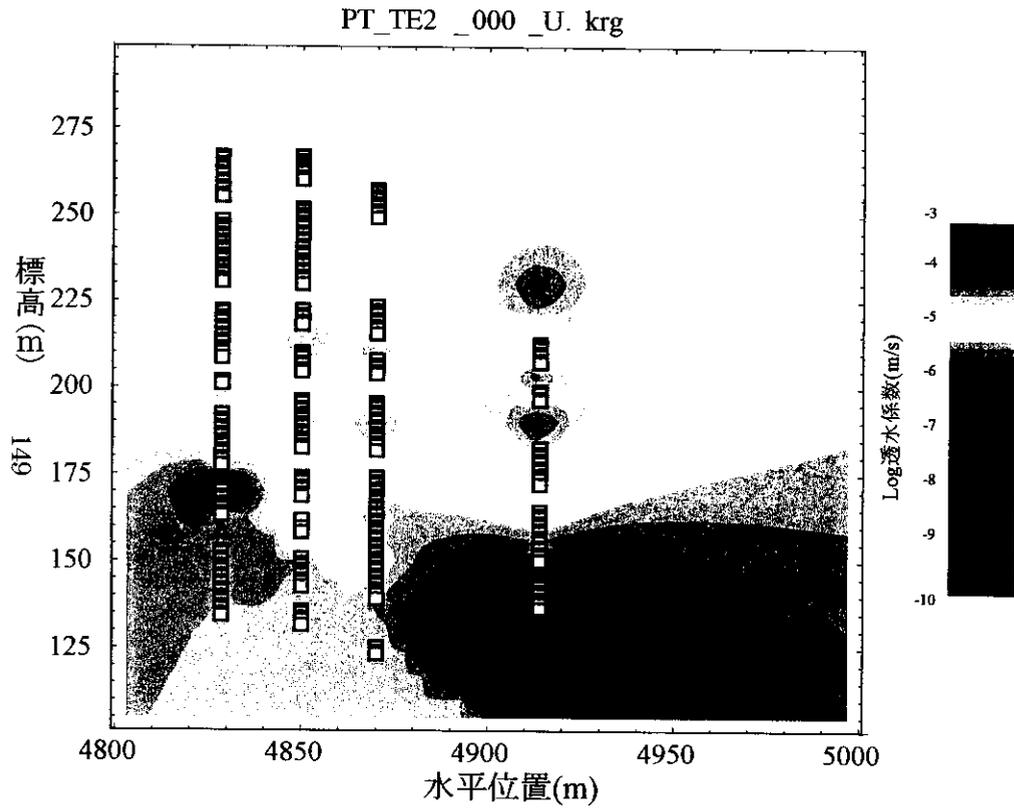


図7-3(3a) クリックによる透水係数分布(左)とファジーシミュレーションによる透水係数分布(右)の比較
(透水試験結果および比抵抗値による、ケース2、メンバーシップ0)

透水係数の不確実性範囲の上限値を使用



透水係数の不確実性範囲の上限値を使用

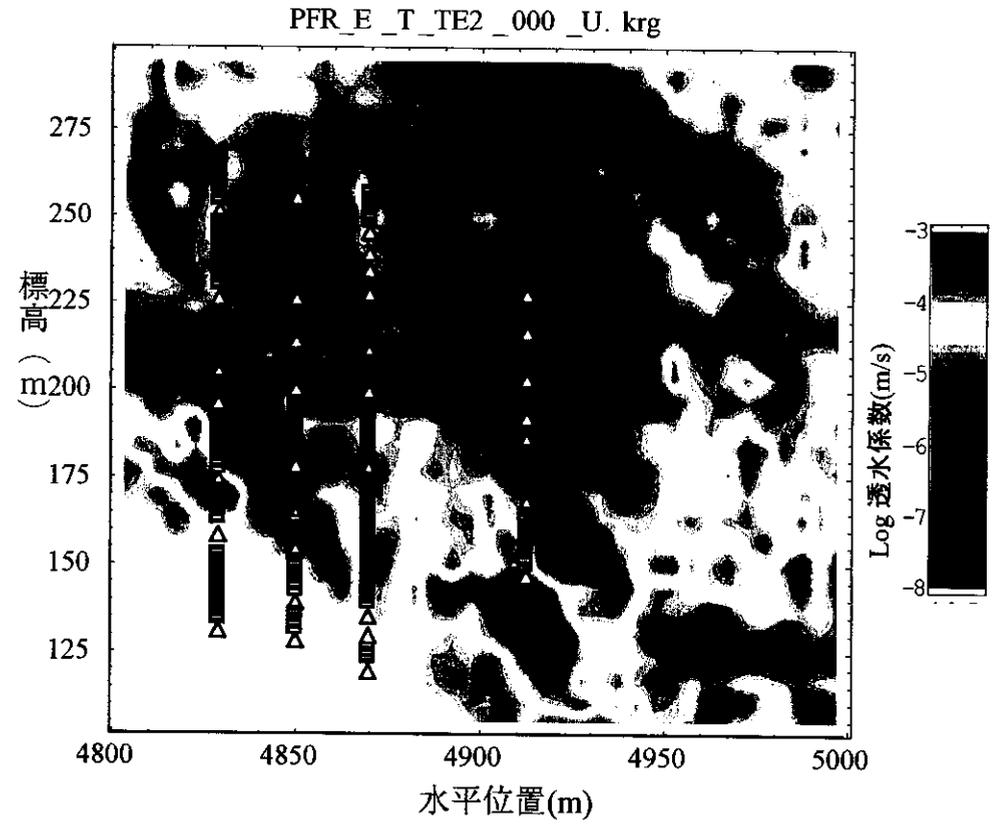


図7-3(3b) クリックによる透水係数分布(左)とファジーシミュレーションによる透水係数分布(右)の比較
(透水試験結果および比抵抗値による、ケース2、メンバーシップ0)

参考文献

Bardossy, A., Bogardi, I., and Kelly, W.E., *Imprecise (Fuzzy) Information in Geostatistics*, *Mathematical Geology*, Vol. 20, No.4, p.287-311, 1988

Chiles, F.P., *How to Adapt Engineering to Nonclassical Problems: Three Case Studies*, in M. Guarascio, M. David and C. Huijbregts (Eds.), *Advanced Geostatistics in the Mining Industry*, D.Reidel, 1976

Chiles J-P., and Delfiner, P., *Geostatistics; Modeling Spatial Uncertainty*, John Wiley and Sons, 1999

Journel, A.G., *Constrained Interpolation and Qualitative Information-The Soft Kriging Approach*, *Mathematical Geology*, Vol.18, No.3, p.269-286, 1986

Robinson, P. and N. Cooper, *Review on development of methodologies for modeling with uncertainty and variability: MUNVAR project*, European Commission, Nuclear Science and Technology, EUR 16174 EN, 1995

「添付資料」インタビュー時の質問事項

インタビューにおいては、当該鉛直断面における透水係数分布に関連する情報を以下の通り区分し、それぞれについてメンバーシップ分布を設定するものとする。

- ・ 透水係数試験結果
- ・ 電気検層結果
- ・ 層序等に基づく知見

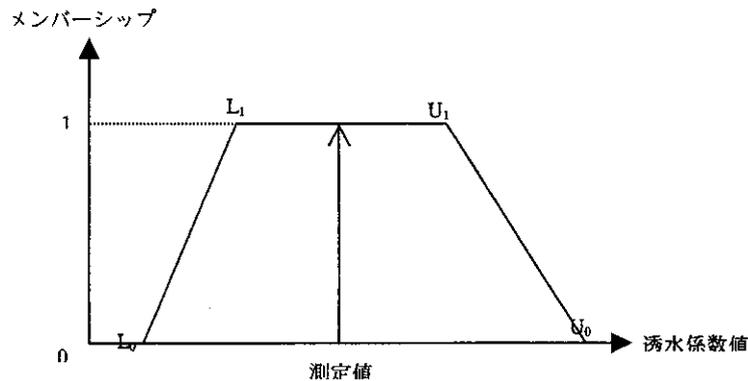
以下に、それぞれの範疇に属する情報について質問事項を挙げる。

(1) 透水試験結果

① 透水試験結果の区分

- (i) 透水試験の方法は複数ありますか？もしあるとすれば、これらによる測定結果の信頼性は異なりますか？
- (ii) 同一の透水試験手法によって得られた測定結果の信頼性は地層区分や数値に依らず一様ですか？もし異なるとすれば、どの様に区分されるべきでしょうか？

② 上記の質問に対する答えによって定義される各区分毎に、透水係数のメンバーシップを下図の通り台形分布*によって定義します。この際、測定結果に対して、下限 L_0 , L_1 及び上限 U_0 , U_1 をそれぞれどのような規則で定義するべきでしょうか？



* L_1 と U_1 が一致する場合には、台形分布の代わりに三角形分布となる。

<追記>

- ・ 動燃式 J F T と低圧ルジオン試験を両方実施している試験孔と測定データの確認
- ・ 1つの透水係数のとり得る幅はどれくらいでしょうか？（地質的要因によってどれくらいばらつくか？ばらつき幅は砂岩・泥岩、れき岩、巨れき、断層によって異なるでしょうか？）

- ・ 透水係数を算出する際のさまざまなファクターを勘案した時の誤差はどれくらいでしょうか？（人の違いによるP Q曲線の解釈の差、現地での水位計を読む時の誤差、パッカーの設置深度の誤差など）

(2) 電気検層結果

① 試験結果の区分

- 電気検層の方法は複数ありますか？もしあるとすれば、どの手法による結果を用いるべきでしょうか？
- 同一の電気検層手法によって得られた測定結果の信頼性は地層区分や数値に依らず一様ですか？もし異なるとすれば、どの様に区分されるべきでしょうか？

- 上記の質問に対する答えによって定義される各区分毎に、透水係数のメンバーシップを台形分布によって定義します。この際、測定結果に対して、下限 L_0 , L_1 及び上限 U_0 , U_1 をそれぞれどのような規則で定義するべきでしょうか？

<追記>

- ・ 電極間隔 25 cm、100 cm の 2 通りの測定結果がある
- ・ 電気比抵抗を透水係数に置き換える際のばらつき幅はどれくらいでしょうか？（地質的要因によってどれくらいばらつくか？ばらつき幅は砂岩・泥岩、れき岩、巨れき、断層によって異なるでしょうか？）
- ・ 電気比抵抗を透水係数に置き換える際の統計処理上のばらつき幅はどれくらいでしょうか？（深度方向に連続した比抵抗データを透水試験区間のデータに置き換える時のばらつきは、どれくらいでしょうか？）
- ・ 電気比抵抗の測定上の誤差はどれくらいでしょうか？（ゾンデの深度誤差など）

(3) 層序等に基づく知見

① 領域分割

- 透水係数分布の観点から当該断面をどのように領域分割するべきでしょうか？
- (i)において、地質学的な層区分を用いる場合、各層間の差異は顕著でしょうか？また、逆に地質学的には単一の層とみなされる領域の中に透水係数の分布状況の異なる部分は含まれていますか？

- 上記の質問に対する答えによって定義される各区分毎に、透水係数のメンバーシップを台形分布によって定義します。この際、各区分の下限 L_0 , L_1 及び上限 U_0 , U_1 をそれぞれ定義して下さい。