



JAERI

2007-028



JP0750245

地盤統計学的手法を用いた
地質環境モデル構築手法に関する研究
(共同研究)

Study on Geological Environment Model
Using Geostatistics Method
(Joint Research)

本多 真* 鈴木 誠* 桜井 英行* 岩佐 健吾* 松井 裕哉

Makoto HONDA*, Makoto SUZUKI*, Hideyuki SAKURAI*, Kengo IWASA* and Hiroya MATSUI

地層処分研究開発部門
堆積岩工学技術開発グループ

Sedimentary Environment Engineering Group
Geological Isolation Research and Development Directorate

April 2007

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAERI
Research

本レポートは日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp/index.shtml>)
より発信されています。このほか財団法人原子力弘済会資料センター*では実費による複写頒布を行つております。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920

* 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4 日本原子力研究開発機構内

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920

地盤統計学的手法を用いた地質環境モデル構築手法に関する研究
(共同研究)

日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門 幌延深地層研究ユニット
本多 真*, 鈴木 誠*, 桜井 英行*, 岩佐 健吾*, 松井 裕哉

(2007年1月24日受理)

本研究は、幌延深地層研究計画における「地上からの調査研究段階（第1段階）」で取得される調査データを利用して、堆積軟岩を対象に地盤統計手法を利用した地質環境モデルの構築手法の確立と情報量とモデルの信頼度の関係を客観的に評価する技術の開発を目的としたものであり、平成15年度～平成17年度の3年間の予定で実施された共同研究である。

3年目となる平成17年度では具体的に、2年目までの検討で用いた調査データに加えて、2,3年目に実施された試錐調査（HDB-9, 10, 11孔）のデータを用いて、1,2年目と同様の水理地質環境モデルの構築を実施した。そして調査のステップに応じたデータおよびモデルの更新を実施し、データ量とモデルの信頼度の関係について検討した。また地下水水質モデルでは、溶存成分毎に比抵抗値との相関関係を基にモデルを構築し、その特徴を明らかにした。

なお、3年目に新たに取得されたデータによるモデル更新結果などについては、次回報告書において記載することとした。

本報告書は、清水建設株式会社と日本原子力研究開発機構との共同研究に基づいて実施したものである。

幌延深地層研究センター（駐在）：〒098-3224 北海道天塩郡幌延町北進 432-2

*清水建設 株式会社

Study on Geological Environment Model Using Geostatistics Method
(Joint Research)

Makoto HONDA*, Makoto SUZUKI*, Hideyuki SAKURAI*, Kengo IWASA*
and Hiroya MATSUI

Horonobe Underground Research Unit
Geological Isolation Research and Development Directorate
Japan Atomic Energy Agency
Horonobe-cho, Teshio-gun, Hokkaido

(Received January 24, 2007)

The purpose of this study is to develop the geostatistical procedure for modeling on geological environments and to evaluate the quantitative relationship between the amount of information and the reliability of the model using the data sets obtained in the surface-based investigation phase (Phase 1) of the Horonobe Underground Research Laboratory Project.

In FY2006 research, the data obtained from the deep boreholes (HDB-9, 10 and 11) which were executed in FY2005, 2006 were newly used in addition to the data sets used in the previous study. And the hydrogeological models were built by using the same geostatistical procedure developed in the previous study. The relationship between the amount of information and the reliability of the model was demonstrated as well through a comparison of the models at each step which corresponds to the investigation stage in each FY.

Furthermore, hydro-chemical modeling was carried out to clarify the three dimensional distribution of major solutes.

The updated model using newly obtained data in FY2006 will be shown in the next FY report.

Keywords: *Horonobe URL Project, Geological Environment Model, Geostatistics Method, Logging Resistivity Data, Deep Borehole*

This work has been performed by Shimizu Corporation and Japan Atomic Energy Agency under contract.

* Shimizu Corporation

目 次

1	はじめに	1
2	研究概要	2
2.1	件名	2
2.2	実施期間	2
2.3	研究方針	2
3	研究内容	5
3.1	モデルの構築および検証段階の設定	5
3.2	新規データ群を加えたモデル化ステップにおける統計量算定	6
3.3	新規検層比抵抗値データによる統合比抵抗値モデルの更新	7
3.4	水質分布および透水係数分布モデルの更新	8
3.5	モデル検証（情報量と精度の関係）	10
3.6	溶存成分毎の水質分布モデルの構築	15
4	まとめと今後の課題	18

CONTENTS

1	INTRODUCTION	.....	1
2	OUTLINE OF RESEARCHES	.....	2
2.1	SUBJECT LINE	.....	2
2.2	TERM	.....	2
2.3	POLICY	.....	2
3	CONTENTS OF RESEARCHES	.....	5
3.1	Stages of modeling and verifying	.....	5
3.2	New data sets and their statistics at the modeling stage	.....	6
3.3	Update the integrated resistivity model using new logging resistivity data	.....	7
3.4	Update the model of water quality distribution and hydraulic conductivity distribution	.....	8
3.5	Verification of the model (Relationship between amount of information and quality of model)	.....	10
3.6	Modeling of each dissolved component of groundwater	.....	15
4	SUMMARY	.....	18

1 はじめに

本研究は、幌延深地層研究計画（研究所設置地区とボーリング孔位置は Fig.1 参照）において文献調査や原位置で取得されたデータを利用し、堆積軟岩を対象とした場合の情報量とモデルの信頼度の関係を地盤統計手法により客観的に評価する技術とそれらを用いた地質環境モデルを構築することを目的として、年度ごとに得られるデータを用いた検討を行なうものである。当初の予定では平成 15 年度～平成 17 年度の 3 年間としていたが、最終年度のデータ整理の遅れもあり、1 年延長して平成 18 年度までの 4 年間としている。

平成 15 年度の研究では、電磁探査による比抵抗値と水質および透水係数との相関性に着目して、比抵抗値データを補助データとしたモデル構築を実施した。また平成 16 年度の研究では、新規に得られた調査データ（ボーリング孔データ HDB-6, 7, 8 孔および詳細地上 AMT 探査データ）を基にモデルの更新を行い、さらにはモデルの妥当性およびデータ量とモデルの信頼度の関係を明らかにした。また地質区分情報を整理し、地質区分と各種調査試験データとの関係を分析した。

平成 17 年度の研究は、主として過去 2 年間で得られた成果について、新規に得られた調査データ（ボーリング孔データ HDB-9, 10, 11 孔）を加えてモデルの更新、妥当性確認を実施することを目的としている。また地下水水質分布モデルについては、溶存成分毎のモデル化について実施し、水質分布の特徴を把握することとした。

2 研究概要

2.1 件名

「地盤統計学的手法を用いた地質環境モデル構築手法に関する研究」

2.2 実施期間

自 平成 17 年 7 月 1 日

至 平成 18 年 3 月 31 日

2.3 研究方針

この研究で用いる地盤統計学 (Geostatistics) は、空間的に分布するデータを互いの空間的な相関性を考慮した統計的な性質をモデル化し、実現象を統計的に推定する手法の一つであり、数少ないデータから全体像を客観的に推定できるため、当初は鉱山工学で発達してきた。現在では、構造物建設時における調査ボーリングの最適配置や基盤面の推定など、適用範囲も広がってきており、地震工学などの分野では、確率過程 (random process) という確率モデルが古くから使われてきたが、地盤統計学で用いられる確率場と同様の概念を空間軸に適用したものであり、最近では、これらを総合して時空間確率場としてモデル化する方法が研究されつつある。

平成 17 年度の検討では、平成 16 年度に実施されたボーリング調査(HDB-9, 10, 11 孔)を加えて、平成 15,16 年度の検討と同様の地盤統計学的手法による地質環境モデル構築を試みる。同時に調査のステップに応じたデータおよびモデルの更新を実施し、データ量とモデルの信頼度との関係を明らかにする。また地下水水質分布モデルについては、溶存成分毎のモデル化を実施して、水質分布の特徴を明らかにする。

平成 17 年度の検討に用いた調査データは以下の通り。

- ボーリング調査 (HDB-1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 : 全 11 孔)
 - 物理検層データ
 - 水理試験データ
 - 採水試験データ
- 物理探査 (電磁探査)
 - 空中電磁探査 (3 次元比抵抗値データ)
 - 地上 M T 探査 (2 次元鉛直断面比抵抗値データ)
 - 詳細地上 A M T 探査 (2 次元鉛直断面比抵抗値データ)

Fig.2 に平成 17 年度の概略検討フロー図を示す。平成 17 年度は基本的に、平成 16 年度実施した「情報量とモデルの信頼度の関係検討」に新たに追加されたボーリング孔データにより新たなモデル化ステップ Id を加えて更新、考察することが主要な検討である。また地下水水質分布モデルについては、これまでの溶存成分の総濃度に加えて、成分毎の濃度分布モデルを構築し、分布の特徴を明らかにすることがもう一つの検討項目である。

以下に各段階の内容・手順を示す。

モデル構築・検証ステップの設定 (3.1 節)

情報量とモデルの信頼度の関係を明らかにするため、実際の調査研究段階に応じて、モデル化に利用するデータを分類して、モデル構築のステップおよびモデル検証のステップを設定する。モデル構築のステップは、「地上からの調査研究段階（第 1 段階）」に対して、平成 13 年度まで(Ia)、平成 14 年度まで(Ib)、平成 15 年度まで(Ib',Ic)、平成 16 年度まで(Id)の段階に分けて、それぞれのモデルを構築・検証することを本研究の目的とする。

モデル化ステップ Id の基本統計量算定 (3.2 節)

平成 17 年度に追加されたデータを用いて、モデル化ステップ Id における、物性値の基本統計量および最適な Box-Cox 変換パラメータの算出を行う。対象は比抵抗値、地下水水質（総溶存成分濃度）および透水係数である。

統合比抵抗値モデル構築 (3.3 節)

モデル化ステップ Id における比抵抗値データを追加して、3 次元の統合比抵抗値モデルを構築する。

水質分布および透水係数分布モデル構築 (3.4 節)

モデル化ステップ Id における比抵抗値との関係を回帰分析によりモデル化した後に、水質分布モデルおよび透水係数分布モデルを構築する。

モデルの検証 (3.5 節)

構築されたモデルの精度を評価（検証）するために、クロスバリデーション（交差検証）による方法を取り入れる。平成 16 年度の検討では、HDB-1～5 孔を検証データとして、Ib, Ib', Ic のモデルの検証を行ったが、今回は検証データ群を全ボーリング孔（HDB-1～11 孔）として、さらに 5 段階のモデル全て（Ia～Id）について検証を実施した。したがって検証にあたっては、それぞれモデル化段階で未利用のデータ群（ボーリング孔）位置を推定する場合には、そのままのモデルを用いて実測値と比較することになるが、取得済みのボーリング孔位置を推定する場合には、

ボーリング孔 1 孔毎のデータを全て除いてモデルを再構築し、実測値と比較するクロスバリデーションを実施することになる。

溶存成分毎の水質分布モデルの構築（3.6 節）

地下水水質分布モデルについて、溶存 6 成分 (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-}) 每に水質分布モデルを構築する。モデル化ステップは最終段階 Id として、まず基本統計量を算出し、最適 BoxCox 変換パラメータを算出する。次に比抵抗値との関係を回帰分析によりモデル化した後、各成分の分布モデルを構築する。

3 研究内容

3.1 モデルの構築および検証段階の設定

情報量とモデルの信頼度との関係評価のためのモデル構築ステップは、平成 16 年度に設定した実際の調査研究段階に応じた、Ia, Ib, Ib', Ic, Id の 5 段階である。

Table.1 は、本研究で用いた電磁探査とボーリング調査について、実際の幌延深地層研究計画における調査研究段階と併せて示したものであり、表の下部には各調査段階に応じたモデル化ステップ (Ia, Ib, Ib', Ic, Id, II) を示している。また Fig.3 は各モデル化ステップにおける調査データの位置関係を図示したものである。平成 17 年度の検討ではステップ Id におけるモデルの構築が主たる目的である。

なお、モデル化ステップ II は、本研究では対象外であるが幌延深地層研究計画の第 2 段階（坑道掘削 [地下施設建設] 時の調査研究段階）により得られるデータを加えたモデル化段階を想定している。

3.2 新規データ群を加えたモデル化ステップにおける統計量算定

平成 17 年度、新たに追加されたデータは HDB-9, 10, 11 孔の 3 本のボーリング孔調査のうち、比抵抗検層データ、水質分析データ、原位置透水試験データである。Fig.4～Fig.6 はそれぞれ HDB-9～11 孔の各データを図示したものである。各図中には地層区分（声問層 or 稚内層）を色分けで示している。

上記の新規データ群を加えたモデル化段階 Id における各物性値の統計量を算出した。モデル構築に必要な統計量は、平均値および分散に加えて物性値間の相関関係を線形モデルとして扱うために導入した Box-Cox 変換のパラメータ λ である。Box-Cox 変換は物性値間の相関関係を線形モデルとして扱うことができるよう、事前に各物性値の分布を正規分布に近似するための変換として導入したもので、次式のようにパラメータ λ の式で表され、定数を無視すると、 $\lambda=0$ のときには対数変換、 $\lambda=-1$ のときには逆数変換、 $\lambda=0.5$ のときには平方根変換、さらに $\lambda=1$ のときには原データと一致する。

$$y = \begin{cases} \lambda^{-1}(x^\lambda - 1) & \lambda \neq 0 \text{ のとき} \\ \ln(x) & \lambda = 0 \text{ のとき} \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 x は原データ、 y は Box-Cox 変換後データである。

検層比抵抗値、水質（総溶存濃度）および透水係数について、上記新規データ群を加えた HDB-1～HDB-11 孔の全データの統計量を算出した結果を Fig.7～Fig.9 に示した。各図の上段に基本統計量および検定結果の一覧を示し、下の図 a)は生データのヒストグラムにカーネル密度関数を実線で示したグラフ、b)のグラフは Box-Cox 変換後データのヒストグラムにカーネル密度関数を実線で示し、また同時に求められた平均、標準偏差での正規密度関数を破線で示したものである。なお上段表に示す Kolmogorov-Smirnov 検定結果は母分布の正規性検定である。

結果から、比抵抗値データの分布は $\lambda=-0.477$ の Box-Cox 変換により最も正規分布に近い分布を示すことがわかったが、検定結果からはデータ数が極めて多いことから正規分布と「有意差あり」となった。新たなデータが加わったこと（ステップ Ic から Id）の各種統計量の変化は殆どなく、既存データとの整合性の高いデータであることが伺える。

水質（総溶存成分濃度）データの分布は $\lambda=0.518$ の Box-Cox 変換により最も正規分布に近い分布を示すことがわかり、検定の結果も「有意差なし」となった。同じく新たなデータが加わったこと（ステップ Ic から Id）の各種統計量の変化は殆どなく、既存データとの整合性の高いデータであることが伺える。

透水係数データの分布は $\lambda=-0.012$ の Box-Cox 変換により最も正規分布に近い分布を示すことがわかり、検定の結果も「有意差なし」となった。パラメータ λ が 0 に近い値となっていることから、透水係数の分布が概ね対数正規分布に近いことを示すことがわかる。また同じく新たなデータが加わったこと（ステップ Ic から Id）の各種統計量の変化は殆どなく、既存データとの整合性の高いデータであることが伺える。

3.3 新規検層比抵抗値データによる統合比抵抗値モデルの更新

3.3.1 新規検層比抵抗値データの整理

新規の HDB-9~11 孔で得られた検層比抵抗値データと各種電磁探査データとの比較を図示したものが Fig.10 である。地上電磁探査との関係は HDB-10, 11 孔について、それぞれ最も近い探査測線（詳細 AMT 探査-測線 3 および広域 MT 探査-測線 L7W）の比抵抗値を示している。ただし 2 孔とも測線上にはなく、水平距離で 150~250m 近く離れている。HDB-10 孔を見ると高比抵抗の浅部で検層比抵抗値との差が大きくなっているのがわかる。

3.3.2 モデル化ステップ Id における統合比抵抗値モデルの構築

モデル化ステップ Id では、ボーリング孔全 11 孔のうち HDB-1, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 11 の 8 孔（データ数 63 サンプル）で地上電磁探査測線と重なり、両者の関係をモデル化する。Fig.11 は両者の関係を線形回帰モデルで表したものであるが、前のステップ Ic からは追加されたデータ（HDB-10, 11 孔）が、地上電磁比抵抗値に対して検層比抵抗値が低い傾向が強く、ステップ Ic と比較して、若干、両者の関係曲線の傾きが小さくなっている。

線形回帰モデルは以下の通り。

- 線形回帰モデル : $\hat{\mu}(\mathbf{u}) = 0.2217 + 0.5170 \cdot y(\mathbf{u}) + e$
- 回帰誤差標準偏差 : $\sigma=0.2407$

上記の線形回帰モデルを組み込んだ単純型クリギングにより 3 種類の比抵抗値を統合した比抵抗値モデルを Fig.12 に示した。図中 a) は推定された比抵抗値分布を示し、図中 b) はモデルの誤差（標準偏差）の分布を BoxCox 変換値として示している（標高 0m の水平断面を例として示す）。

比抵抗値の分布はステップ Ic と比べてもあまり変化は認められず、追加された HDB-9, 10, 11 孔における検層比抵抗値データが、ステップ Ic のモデルに調和していることを示す。

3.4 水質分布および透水係数分布モデルの更新

3.4.1 モデル化ステップ Id における水質（総溶存成分濃度）分布モデルの構築

モデル化ステップ Id において、統合比抵抗値と総溶存成分濃度との関係を示したものが Fig.13 である。HDB-1~11 の 11 孔のボーリング孔で実施された採水試験は計 110 サンプルである。比抵抗値の範囲は 1~31 Ωm で、Box-Cox 変換後は水質（総溶存成分濃度）との間に明瞭な線形関係が認められる。前のステップ Ic から加わった HDB-9, 10, 11 孔のデータは全体からすると若干比抵抗値に対して低い濃度を示しており、ステップ Ic のモデルより多少濃度が低く見積もられる傾向となる。

両者 BoxCox 変換後の線形回帰モデルは以下の通りである。

- 線形回帰モデル : $\hat{\mu}(\mathbf{u}) = 405.89 - 190.39 \cdot y(\mathbf{u}) + e$
- 回帰誤差標準偏差 : $\sigma = 56.838$

上記の線形回帰モデルを組み込んだ単純型クリギングにより推定した水質モデルを Fig.14 に示した。図中 a) は推定された水質分布を示し、図中 b) はモデルの誤差（標準偏差）の分布を示している（先と同様、標高 0m の水平断面を例として示す）。

推定値分布はセンターで見る限りにおいては、前のステップ Ic とほとんど変化がない。また追加されたボーリング孔付近においても推定値分布にあまり変化が認められることから、追加の調査に関わらず推定精度は概ね一定に落ち着いているものと考えられる。

3.4.2 モデル化ステップ Id における透水係数分布モデルの構築

モデル化ステップ Idにおいて、統合比抵抗値と透水係数との関係を示したものが Fig.15 である。HDB-1~11 の 11 孔のボーリング孔で実施された透水試験は全 56 サンプルである。孔内の一定区間の平均的な透水係数として与えられるので、対応する比抵抗値は同じ区間の検層データの平均値とした。比抵抗値の範囲は 1~14 Ωm で、大まかに 5 Ωm 以上の高比抵抗は透水係数も大きいことがわかるが、5 Ωm 以下の低比抵抗においては透水係数との関係は殆ど認められない。したがって全体としては、僅かながら正の相関関係が認められるが、ばらつきは極めて大きいことがわかる。

両者 BoxCox 変換後の線形回帰モデルは以下の通りである。

- 線形回帰モデル : $\hat{\mu}(\mathbf{u}) = -25.448 + 4.985 \cdot y(\mathbf{u}) + e$
- 回帰誤差標準偏差 : $\sigma=4.022$

上記の線形回帰モデルを組み込んだ単純型クリギングにより推定した透水係数分布モデルを Fig.16 に示した。図中 a)は推定された透水係数分布を示し、図中 b)はモデルの誤差(標準偏差)の分布を示している(標高-50m の水平断面を例として示す)。

3.5 モデル検証（情報量と精度の関係）

前述の構築されたモデルの精度を評価するために、クロスバリデーション（交差検証）の手法を取り入れる。クロスバリデーションとは、データ群から各標本値を順次取り除いてその位置を推定し、標本値と比較することで検証するものであるが、ここでは任意のボーリング孔1孔のデータを全て除いてその位置を推定する。

ただし平成16年度の検討では、HDB-1～5の5孔を検証対象としてIb, Ib', Icの3段階のモデルを比較検証したが、今回は全てのボーリング孔（11孔）を検証対象として、Ia, Ib, Ib', Ic, Idの5段階全てのモデルを比較検証することとした。

Table.2に検証対象モデルと対象ボーリング孔との関係を示した。この表に示されるように、各段階のモデル構築に使用しているボーリング孔（表の水色枠内）の位置における評価は、クロスバリデーション法を用いて任意のボーリング孔1孔全てのデータを除いてモデルを再構築し、推定値と実測値を比較した。一方、各段階のモデル構築に使用していないボーリング孔（その段階で未調査のボーリング孔：表の水色枠外）の位置における評価は、モデルを再構築することなく、推定値と実測値を比較した。

クロスバリデーション法を用いる際には、統合3次元比抵抗値モデルおよび比抵抗値との相関関係を表す線形回帰モデルを含めて、全ての統計量について対象孔のデータを除いて再算出することになる。

具体的には、例えばHDB-1孔のデータを除いてその位置を推定する際には、まず、比抵抗値、水質（総溶存成分濃度）および透水係数のデータについて、HDB-1孔のデータを除いて、それぞれ正規分布となる最適なBoxCox変換パラメータ λ を再算出する。次に、線形回帰併用型クリギングの段階的適用により統合比抵抗値モデルを構築するが、その際にも3種類の比抵抗値の相関関係（回帰モデル）をHDB-1孔のデータを除いて再構築する。また水質および透水係数の推定の際には、HDB-1孔を除いて構築した統合比抵抗値モデルを利用して、両者の線形回帰モデルをHDB-1孔のデータを除いて再構築して推定を実施する。

3.5.1 統合比抵抗値モデルの評価

各段階 (Ia, Ib, Ib', Ic, Id) の統合比抵抗値モデルについて、HDB-1～11 孔全ての位置において推定値と実測値の比較により精度の評価を実施した。各モデル化段階で使用しているボーリング孔については当該孔データを除いたモデルを構築した。

Fig.17～Fig.38 は、全ボーリング孔 (HDB-1～HDB-11 孔) 位置での推定値と実測値をモデル化段階毎に示したグラフと、推定値と実測値の残差のグラフ（箱ひげ図（ボックスプロット））を、ボーリング孔毎に示したものである。

各図の紺色実線は電気検層により得られた比抵抗値の実測値、赤色破線が各モデル化段階の推定値を示す。また薄黄色の範囲は、推定誤差標準偏差 $\pm\sigma$ の範囲を示したものである。箱ひげ図は、数値のばらつきを視覚的に分かりやすく把握できる統計的なグラフの一つであり、複数の分布を比較する場合に有用なものである。箱の下端・中央・上端の水平線は、それぞれ 25 パーセンタイル値（第一四分位数）、50 パーセンタイル値（中央値）、75 パーセンタイル値（第三四分位数）を表している。第一四分位数と第三四分位数の間の距離を四分偏差と言うが、箱から 1.5 四分偏差以内で、最も中央値から離れた点までを“ひげ”と呼ばれる線が引かれている。さらに離れた値については、箱から第三四分位偏差までなら一つ一つを○印で示す（外れ値）。

一般的には、調査段階の進展と共に推定精度が向上することが期待される。しかしながら、推定結果を見ると必ずしもそのような傾向であるとは限らず、ボーリング孔毎に異なる結果が得られた。例えば、HDB-1 孔 (Fig.17, 18) を見ると、調査段階が進むに従って高比抵抗を示す低深度部において概ね精度が向上しており、特に Ib→Ib'（詳細電磁探査を追加）の段階で箱ひげ図の下端のひげが短くなり、残差のばらつきが小さくなっていることがわかる。一方で、HDB-10 孔 (Fig.35, 36) では、最初のモデル Ia の精度が最も良く、調査段階が進むと精度が落ちる。特に Ib→Ib'（詳細電磁探査を追加）の段階で精度が悪くなってしまい、前者と逆の傾向を示している。すなわち詳細電磁探査測線の追加 (Ib→Ib' の段階) により前者は精度が向上し、後者は精度が落ちたことになり、詳細電磁探査データの信頼性が HDB-1 孔付近では高く、HDB-10 孔付近では低いことが伺える。このことは HDB-10 孔付近が測線の端に位置することが原因の一つとして考えられる。

このように、必ずしも調査段階の進展と共に推定精度が向上するとは言えず、推定精度は追加調査の精度に依存する。各種電磁探査データの精度（真値からのばらつき）は、各々位置的に一定であるという仮定の下にモデル化を行っているのに対し、実際は精度に位置的なばらつきがあるために、ボーリング孔毎に調査進展に伴う精度の変化に違いが出る結果となった。

Fig.40 は、位置的に離れている HDB-2 孔を除くボーリング孔 10 孔の各推定残差を表すグラフ（箱ひげ図）であり、Fig.39 には各段階の推定分布の例（標高 0m 水平断面）を示している。これを見て判るように、統合比抵抗値モデルに関して、全体として調査の進展に伴う精度向上は顕著な傾向としては認められない。このような結果の理由としては、モ

モデルの精度が、空間において網羅的にデータが得られる空中電磁探査および地上電磁探査のデータ精度に大きく依存しており、ボーリング孔追加による精度向上への影響は限定的であることが考えられる。また電磁探査のデータ精度に位置的ばらつきがある条件下では、ボーリング孔における検層比抵抗値と電磁探査との関係が更新されることで良くも悪くも広域的に影響を及ぼすことになる。したがって、全体として評価するとあまり精度の向上は認められないというのが実情と考えられる。

3.5.2 水質（総溶存濃度）モデルの評価

前項の比抵抗値モデルと同様、各段階（Ia, Ib, Ib', Ic, Id）の水質（総溶存濃度）モデルについて、HDB-1～11孔の位置において推定値と実測値の比較により精度の評価を実施した。各モデル化段階で使用しているボーリング孔については当該孔データを除いたモデルを構築した。

Fig.41～Fig.62は、全ボーリング孔（HDB-1～HDB-11孔）位置での推定値と実測値をモデル化段階毎に示したグラフと、推定値と実測値の残差のグラフ（箱ひげ図（ボックスプロット））を、ボーリング孔毎に示したものである。前節内で示した図と同様、各図の紺色プロットが水質（総溶存濃度）の実測値、赤色破線が各モデル化段階の推定値を示す。また薄黄色の範囲は、推定誤差標準偏差土 σ の範囲を示したものである。

結果を見ると、前述の比抵抗値モデルと同様に、調査段階の進展に伴う推定精度への影響はボーリング孔毎に異なることがわかる。ただし調査進展に伴い精度が概ね向上していると考えられる孔はHDB-3, 4, 5, 8, 9, 10孔などと、比抵抗値モデルよりはその傾向は強い。精度の向上は何れも Ia→Ib→Ib'の段階で顕著であり、データ量が極めて限られる段階（Ia）から広域的な電磁探査の追加による精度向上への影響の大きいことが伺える。

同様に Fig.64は、位置的に離れている HDB-2孔を除くボーリング孔 10孔の各推定残差を表すグラフ（箱ひげ図）であり、Fig.63には各段階の推定分布の例（標高 0m 水平断面）を示している。これを見ても判るように、若干ではあるが調査段階 Ia→Ib→Ib'で残差分布の中央値が0に近づき、精度が向上しているのがわかる。しかし I b' 以降はばらつきは殆ど変化が無く、ボーリング孔の追加に伴う精度向上はあまり認められない。上の推定コンタ一図を見てもわかるように、モデル Ib', Ic, Id では追加されたボーリング孔付近における推定結果に変化がほとんど認められることから、追加データに伴う推定モデルの変化は限定的で、ほぼ固定化されており、推定精度の限界に達していると考えられる。言い換えれば、広域的な電磁探査のデータ精度が向上しない限り、限定的なボーリング孔の追加では領域全体の精度の向上には効果が小さい。

3.5.3 透水係数モデルの評価

水質モデルと同様、各段階 (Ia, Ib, Ib', Ic, Id) の透水係数モデルについて、HDB-1~11孔の位置において推定値と実測値の比較により精度の評価を実施した。各モデル化段階で使用しているボーリング孔については当該孔データを除いたモデルを構築した。

Fig.65~Fig.86 は、全ボーリング孔 (HDB-1~HDB-11 孔) 位置での推定値と実測値をモデル化段階毎に示したグラフと、推定値と実測値の残差のグラフ（箱ひげ図（ボックスプロット））を、ボーリング孔毎に示した。前節内で示した図と同様、各図の紺色線分が区間透水係数の実測値、赤色破線が各モデル化段階の推定値を示す。また薄黄色の範囲は、推定誤差標準偏差 σ の範囲を示したものである。

結果を見るとまず、調査段階 Ia とそれ以降で推定結果の傾向が大きく違うのが判る。モデル Ia では深度方向に対して透水係数が大きくなるのに対して、それ以降のモデルでは深度方向に透水係数が小さくなっている。これは比抵抗値との関係（回帰モデル）が負の相関から正の相間に変化しているためで、調査段階 Ia では透水係数データが極めて少なく、十分なモデル化ができていないことが原因と考えられる。従って Ia→Ib においては殆どのボーリング孔で精度が向上しているが、それ以降は調査進展に伴う精度の向上はあまり顕著ではない。

Fig.88 は、位置的に離れている HDB-2 孔を除くボーリング孔 10 孔の各推定残差を表すグラフ（箱ひげ図）であり、Fig.87 には各段階の推定分布の例（標高-50m 水平断面）を示している。これを見ると、調査段階 Ia→Ib においては残差分布の中央値が 0 に近づき精度が大幅に向上去ており、また Ib→Ib' の段階でも下端の外れ値がなくなり残差のばらつきが小さくなっているのがわかる。Ib' 以降は僅かに中央値が 0 に近づき、ばらつき（ひげの長さ）も小さくなっているがわかる。若干ながら調査の進展に伴う精度の向上が認められた。

一方で、上の推定コンター図を見ると、モデル Ib' で最も濃淡のコントラスト（すなわち透水係数値の空間的な変化）が大きくなった後、Ic→Id と調査段階が進むに従ってコントラストが小さくなっているのがわかる。これは透水係数データが蓄積されるに従って、比抵抗値との相関関係が弱くなっていることを示しており、比抵抗値分布を利用した効果が薄れていることを示す。

3.6 溶存成分毎の水質分布モデルの構築

これまで地下水水質の分布モデルの構築は、主要溶存成分の総濃度を対象として実施してきたが、ここでは各溶存成分 (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-}) それぞれの濃度分布モデルを構築して、分布傾向の分析・比較により地下水環境に資する知見を得ることとした。調査段階は最終段階の Id として HDB-1~11 孔全てのデータを用いることとする。まず基本統計量を算出し、正規分布となる最適な BoxCox 変換パラメータを算出する。次に比抵抗値との関係を回帰分析によりモデル化し、各成分の分布モデルを構築する。

3.6.1 基本統計量の算出

溶存 6 成分毎の基本統計量と算出結果を Fig.89~Fig.94 に示した。これらから、まず最も濃度の高い成分は Na^+ であり、次いで Cl^- と、塩水系の地下水が多くを占めていることがわかる。また最適な BoxCox 変換後のデータ分布は、何れの溶存成分も正規性の検定で「有意差なし」となり、正規分布として扱うことに問題はないものと考えられる。ただし BoxCox 変換パラメータ λ の値を見ると、溶存成分によって大きく違っており、母分布が異なることが伺える。

3.6.2 溶存成分毎の濃度分布モデル構築

(1) 統合比抵抗値との線形回帰モデル

Fig.95～Fig.100 は、それぞれ溶存 6 成分 (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-}) それぞれの濃度と比抵抗値との関係を示し、両軸 BoxCox 変換して線形回帰モデルをあてはめた結果を示したグラフである。各成分の両者 BoxCox 変換の線形回帰モデルをまとめると以下の通りである。

溶存成分 Na^+ (BoxCox $\lambda=0.611$)

- 線形回帰モデル : $\hat{\mu}(\mathbf{u}) = 471.74 - 247.01 \cdot y(\mathbf{u}) + e$
- 回帰誤差標準偏差 : $\sigma=70.836$

溶存成分 K^+ (BoxCox $\lambda=0.054$)

- 線形回帰モデル : $\hat{\mu}(\mathbf{u}) = 7.104 - 2.146 \cdot y(\mathbf{u}) + e$
- 回帰誤差標準偏差 : $\sigma=1.229$

溶存成分 Ca^{2+} (BoxCox $\lambda=0.146$)

- 線形回帰モデル : $\hat{\mu}(\mathbf{u}) = 8.904 - 2.539 \cdot y(\mathbf{u}) + e$
- 回帰誤差標準偏差 : $\sigma=1.700$

溶存成分 Mg^{2+} (BoxCox $\lambda=0.144$)

- 線形回帰モデル : $\hat{\mu}(\mathbf{u}) = 8.755 - 2.874 \cdot y(\mathbf{u}) + e$
- 回帰誤差標準偏差 : $\sigma=1.589$

溶存成分 Cl^- (BoxCox $\lambda=0.461$)

- 線形回帰モデル : $\hat{\mu}(\mathbf{u}) = 199.21 - 112.95 \cdot y(\mathbf{u}) + e$
- 回帰誤差標準偏差 : $\sigma=26.585$

溶存成分 SO_4^{2-} (BoxCox $\lambda=0.140$)

- 線形回帰モデル : $\hat{\mu}(\mathbf{u}) = 11.676 - 0.097 \cdot y(\mathbf{u}) + e$
- 回帰誤差標準偏差 : $\sigma=4.059$

回帰モデルの推定結果から、比抵抗値と最も相関関係の強い溶存成分が Cl^- であり、続いて Na^+ で、何れも負の明瞭な相関を示す。 K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} 濃度は、やはり負の相関を示すものの、相関係数で-0.5 前後とあまり顕著ではない。なお SO_4^{2-} 濃度には、全く相関性は認められず、相関係数の有意性検定でも相関性がない可能性があるとされた。しかがって SO_4^{2-} は、比抵抗値を補助データとしたモデル構築はあまり意味を持たない（1変量の単純クリギングと同様）結果となることが予想される。

(2) 濃度分布モデル

前述の線形回帰モデルを組み込んだ単純型クリギングにより推定した溶存 6 成分 (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-}) の水質モデルをそれぞれ Fig.101～Fig.106 に示した。例として

標高-50m の水平断面の推定値コンターを示している。

比抵抗値との相関関係が明瞭な Na^+ および Cl^- の濃度分布は、濃淡のコントラスト（すなわち濃度の空間的变化）が大きく、統合比抵抗値分布の空間的变化に調和的な分布を示している。一方で、比抵抗値との相関性が全くない SO_4^{2-} の濃度分布は、データの得られているボーリング孔付近で変化が認められる程度の空間的变化の小さい分布となっていることがわかる。

(3) 成分比率分布モデル

前項の溶存成分毎の濃度分布モデルから、ここでは化学成分比の特徴を捉えることを目的として、 $\text{Na}^++\text{K}^++\text{Cl}^-$ の成分比率を求めて分布を求めた。すなわち総溶存濃度に対する Na^+ , K^+ , Cl^- 濃度の比 (%) の分布を各成分分布から作成したものが Fig.107～Fig.118 である。

Fig.107～Fig.112 は水平断面を示し、それぞれ標高 100m, 50m, 0m, -50m, -100m, -200m を示したものである。これを見て判るように深度が深くなるに従って、比率が高くなっているおり、塩分の濃い地下水となっていることが伺える。

Fig.113～Fig.118 は断面図を示したものである。深度方向は元々の空中電磁探査が地上から 100m 以浅までのデータしか得られておらず、それ以深はクリギングによる外挿（結局は座標依存のトレンドに近い値となる）しているため、推定された水質モデルも断面を見ると、深部は深度方向連続した分布を示していることがわかる。

4 まとめと今後の課題

平成 17 年度の研究では、平成 16 年度に実施されたボーリング調査 (HDB-9, 10, 11 孔) を加えて、過去 2 年間（平成 15, 16 年度）の検討と同様、地盤統計学的手法による地質環境モデル構築を試みた。同時に調査ステップに応じたデータ及びモデルの更新を実施し、モデルの更新、妥当性確認を目的とした研究を実施した。データ量をモデルの信頼度の関係について明らかとした。また地下水水質分布モデルについては、溶存成分毎のモデル化を実施して、水質分布の特徴を明らかにした。

以下に検討項目毎の結果をまとめる。

- 新規追加データの基本統計量の算定（3.1 および 3.2 節）

実際の調査研究段階に応じて設定されたモデル構築ステップのうち、今年度新規に追加されたデータを加えた段階 Id について、モデル化に必要な物理量の基本統計量および最適な BoxCox 変換パラメータの算出を行った。

その結果、新規データの追加による各種統計量の変化は、比抵抗値、水質（総溶存濃度）、透水係数共にほとんど無く、既存データとの整合性のよいデータであることがわかった。

- 統合比抵抗値モデルの更新（3.3 節）

新規ボーリング孔検層データを加えて、地上電磁探査との回帰モデルを再構築した。新規の検層比抵抗値データは、地上電磁比抵抗値とのこれまでの関係からは若干低い傾向が示され、両者の関係曲線はステップ Ic と比較して傾きが小さくなつた。

次に、構築された回帰モデルを用いて、統合比抵抗値モデルを構築したところ、比抵抗値分布は平成 16 年度構築したステップ Ic のモデルと比べてあまり変化がなく、追加データがステップ Ic のモデルに調和したものであることがわかった。

- 水質分布および透水係数分布モデルの更新（3.4 節）

新規の水質（総溶存濃度）データを加えて、統合比抵抗値との回帰モデルを再構築した。新たな水質データはこれまでの統合比抵抗値との関係からは若干低い濃度を示し、構築された回帰モデルはステップ Ic のモデルより、同じ比抵抗値であれば多少濃度が低く見積もられる傾向のものとなつた。また、透水係数と統合比抵抗値との回帰モデルについても同様に再構築したところ、両者の相関関係はこれまでよりさらに低くなつた。

構築された回帰モデルを用いて、水質モデルおよび透水係数モデルを構築した。水質分布の傾向は平成 16 年度構築したステップ Ic のモデルと比べて殆ど変化がないことがわかったが、透水係数分布モデルはステップ Ic のモデルと比べて、空間的な変

化が小さくなり、比抵抗値との相関関係が低くなったことにより、その影響が薄れていることがわかった。

● モデルの検証（情報量と精度の関係）

構築されたモデルの精度を評価するためにクロスバリデーション（交差検証）による方法を採用した。ただし今年度は全てのボーリング孔（11孔）を検証対象として、検証モデル化段階も Ia～Id の 5 段階全てを対象に比較検証することとした。このため各モデル化段階で使用しているボーリング孔位置での検証はクロスバリデーション法を用いて評価し、それ以外のボーリング孔位置での検証は実際のモデルを用いて評価を行った。評価結果は箱ひげ図（BoxPlot）と呼ばれる、ばらつきを表す統計的グラフを用いて視覚的に判断した。

一般には調査段階の進展と共に精度が向上することが期待されるが、統合比抵抗値モデルの検証を実施したところ、必ずしもそのような傾向とはならず、ボーリング孔位置毎に異なる結果が得られた。これは追加調査の精度に依存するところが大きく、特に広域的に得られる電磁探査データの精度の位置的なばらつきに起因するモデル化精度のばらつきが考えられた。結果としては全体的に（全ボーリング孔位置で）評価すると、調査段階の進展に伴う精度向上は定量的には見いだせなかった。

また、水質モデルの検証では、比抵抗値モデルと同様、ボーリング孔位置毎にばらつきは見られたが、調査の進展に伴い精度が概ね向上する傾向が比抵抗値モデルよりは大きいと考えられた。特にステップ Ia→Ib→Ib'における精度向上が顕著であり、それ以降のボーリング孔追加による変化は限定的であることがわかった。

最後に、透水係数モデルの検証では、最初の調査段階 Ia でデータ数が極めて限られることにより比抵抗値との関係が負の相関を示したことで、それ以降のモデルと傾向の異なるモデル化がなされた。このためステップ Ia→Ib の精度向上は著しい。それ以降の調査進展に伴う精度向上は、ボーリング孔位置毎にばらつきはあるものの、全体としては若干ながらその傾向が認められた。一方で、比抵抗値との相関関係は調査の進展に伴い小さくなり、透水係数分布の空間的な変化は小さくなる傾向となった。

● 溶存成分毎の水質分布モデルの構築

地下水水質について溶存成分 (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-}) それぞれの濃度分布モデルの構築を行った。

まず、各溶存成分の濃度データについて基本統計量および比抵抗値との相関関係モデルの構築を行った。全体として最も濃度の高い成分は Na^+ 、次いで Cl^- であり、塩水系の地下水が多く占めていることがわかった。また比抵抗値との回帰モデルの算定結果から、 Na^+ , Cl^- が明瞭な負の相関関係を示すのに対して、 SO_4^{2-} は全く比抵抗値とは無関係であることがわかった。

次に、比抵抗値との回帰モデルを利用して各溶存成分の水質分布モデルを構築した。比抵抗値との関係に対応して、相関関係の強い Na^+ や Cl^- の濃度分布は空間的に大きく変化するモデルとなった。一方で相関関係のない SO_4^{2-} の濃度分布は空間的変化の小さい分布となった。

Na^+ , K^+ , Cl^- 濃度の比率を求めて、成分比率の分布モデルを構築したところ、深度が深くなるに従ってその比率が高い傾向を示し、深部ほど塩分の濃い地下水となっていることがわかった。

平成 17 年度の研究成果をまとめると以上の通りである。

本研究は、当初は平成 15 年度～平成 17 年度の 3 年間とし、平成 17 年度が最終年度の予定であったが、新規データの整理の遅れもあり当初予定していた検討の一部（具体的には地質等の質的データを加味したモデル構築手法の検討および地質環境モデル構築技術のまとめ）が未着手となつたため、1 年延長することとして計 4 年間の計画として進めている。

平成 18 年度は本研究の最終年度として、以下のような検討課題を考えている。

1. 質的データを加味したモデル構築手法に関する検討

平成 17 年度までに取得した地質環境データ及び平成 17 年度までに実施した本共同研究の成果に基づき、質的データ（地質構造など）を考慮できるモデル構築手法を検討する。また、その結果に基づき平成 17 年度の地質環境モデルの妥当性について検討する。

2. 地盤統計学的手法を用いた分野間のモデルなどの整合性評価手法の検討

日本原子力研究開発機構が平成 17 年度までに実施してきた調査および解析で得られた情報に基づき、地盤統計学的手法に基づき各研究分野（地質構造、水理、地球化学、岩盤力学）で構築したモデルの整合性を評価するための手法を検討する。

3. 地盤統計学的手法に基づく地質環境モデル構築技術の提案

幌延を事例として実施してきた本共同研究のとりまとめとして、最終的に構築した地盤統計学的手法を用いた地質環境モデル構築技術を提示する。具体的には以下の項目についてその方法論を示すこととする。

- ・ 調査～モデル構築にいたるプロセスと各段階で適用すべき手法
- ・ 構築したモデルの妥当性を新たなデータの追加によって検証・評価する手法
- ・ モデルの信頼性向上の観点からの次段階の調査計画に対するフィードバック手法
- ・ 上記手法の適用上の留意点

Table. 1: 調査研究段階に対応した地質環境モデル構築ステップ

調査研究項目	年度 研究 段階	H12	H13	H14	H15	H16	H17	
		地上からの調査研究段階(第1段階)						坑道調査(地下施設等) 説明時の調査研究段階
		研究所設置地区の選定	研究所設置地区およびその周辺地区における調査研究					
空中電磁探査								
電磁探査	地上電磁探査 (広域・7測線)							
	地上電磁探査 (詳細・3測線)							
試錐調査	HDB-1, 2 (a群)							
	HDB-3, 4, 5 (b群)							
	HDB-6, 7, 8 (c群)							
	HDB-9, 10, 11 (d群)							

地質環境モデル構築 検討ステップ	
モデル化ステップ Ia	空中電磁 + 地上電磁(広域) HDB-1, 2
モデル化ステップ Ib	空中電磁 + 地上電磁(広域) HDB-1, 2, 3, 4, 5
モデル化ステップ Ib'	空中電磁 + 地上電磁(広域) + 地上電磁(詳細) HDB-1, 2, 3, 4, 5
モデル化ステップ Ic	空中電磁 + 地上電磁(広域) + 地上電磁(詳細) HDB-1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8
モデル化ステップ Id	空中電磁 + 地上電磁(広域) + 地上電磁(詳細) HDB-1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11
モデル化ステップ II	空中電磁 + 地上電磁(広域) + 地上電磁(詳細) + (坑道調査データ) HDB-1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11

※(坑道調査データ)は平成18年度以降に取得される

Table. 2: モデル構築段階と検証

試錐孔 データ	Ia群 HDB-1, 2	Ib群 HDB-3, 4, 5	Ic群 HDB-6, 7, 8	Id群 HDB-9,10,11	II群 坑道データ
地質環境モデル Ia	モデル構築 (H16年度)				検証データ群
地質環境モデル Ib		モデル構築 (H15年度)			
地質環境モデル Ib'		モデル構築 (H16年度)			
地質環境モデル Ic		モデル構築 (H16年度)			
地質環境モデル Id		モデル構築 (H17年度)			
地質環境モデル II	検討対象モデル	モデル構築			

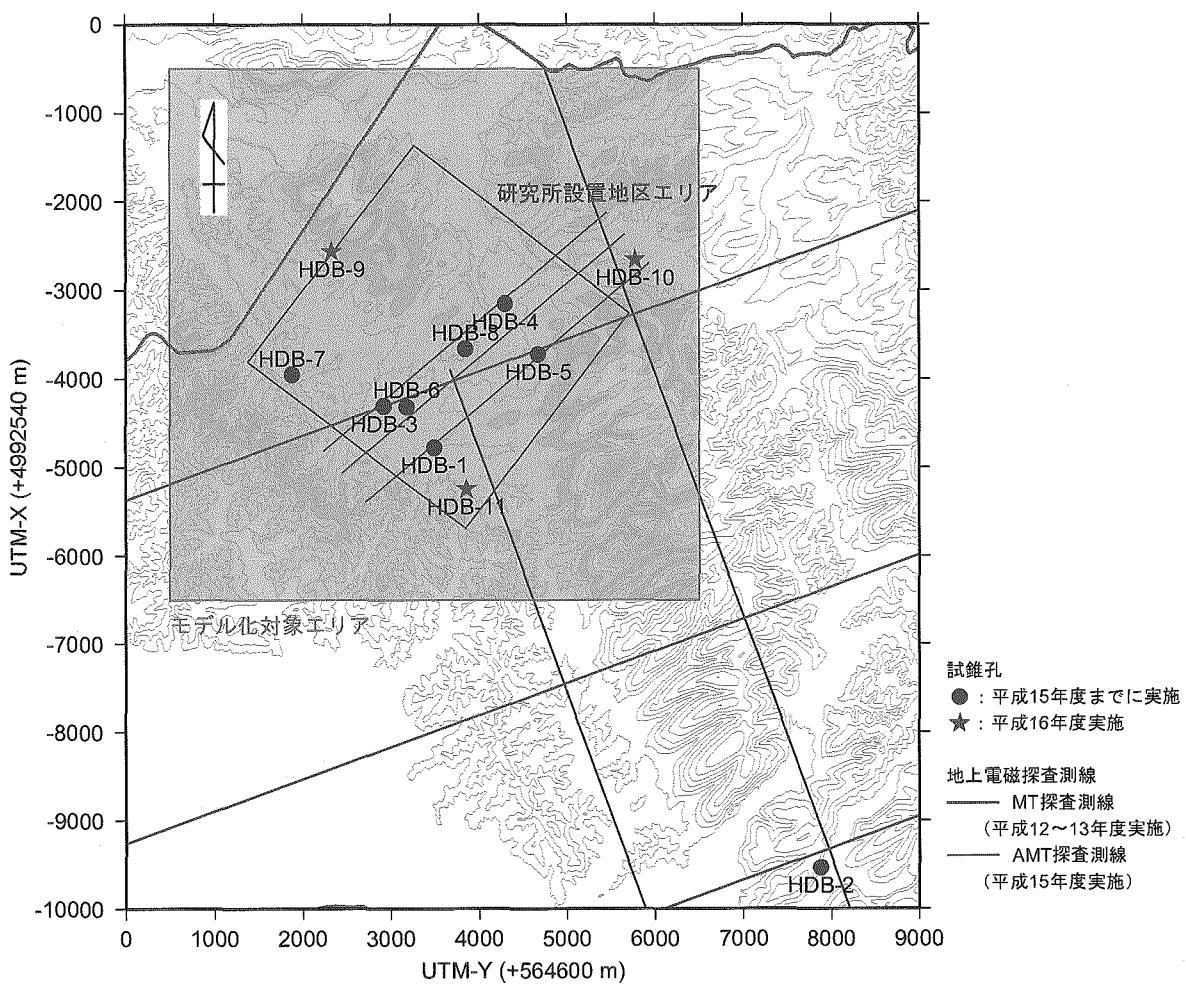
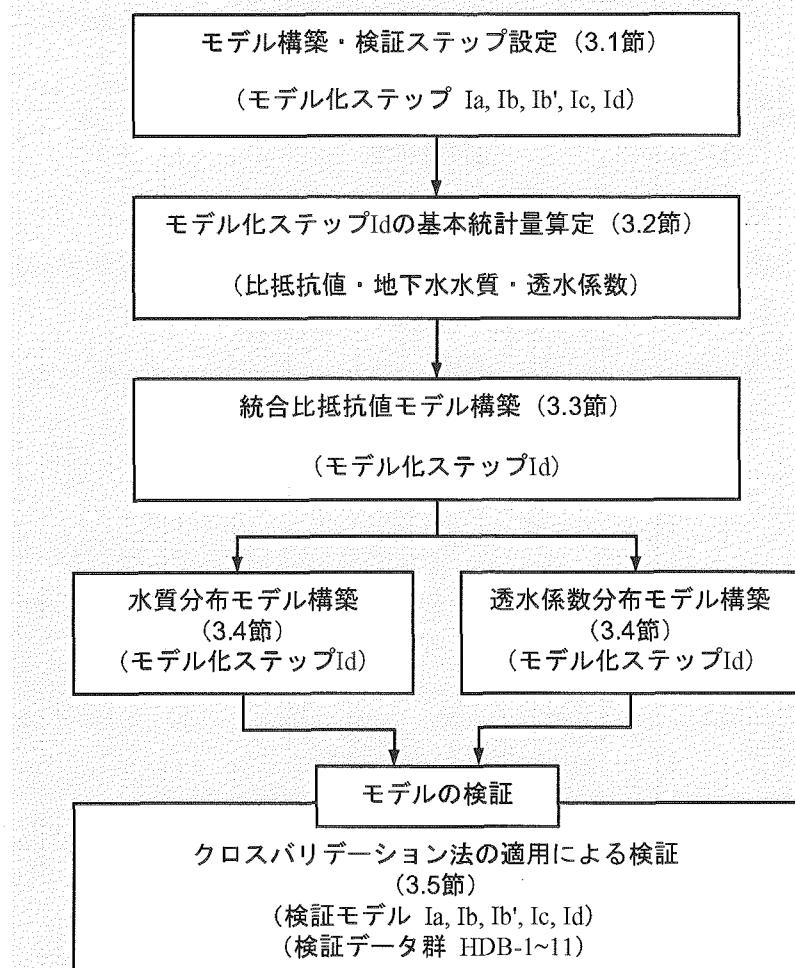


Fig. 1: 研究対象範囲と試錐孔位置

☆ 情報量とモデルの信頼度の関係検討



☆ 溶存成分毎の水質分布モデルの構築

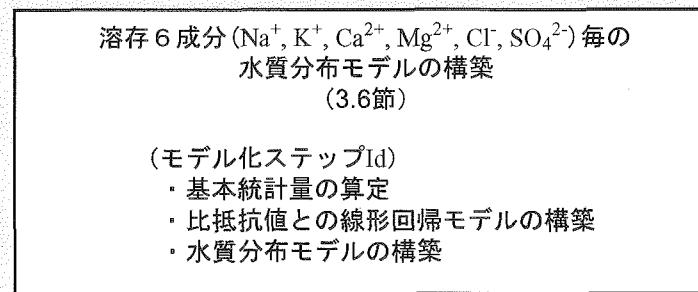


Fig. 2: 平成 17 年度 概略検討フロー

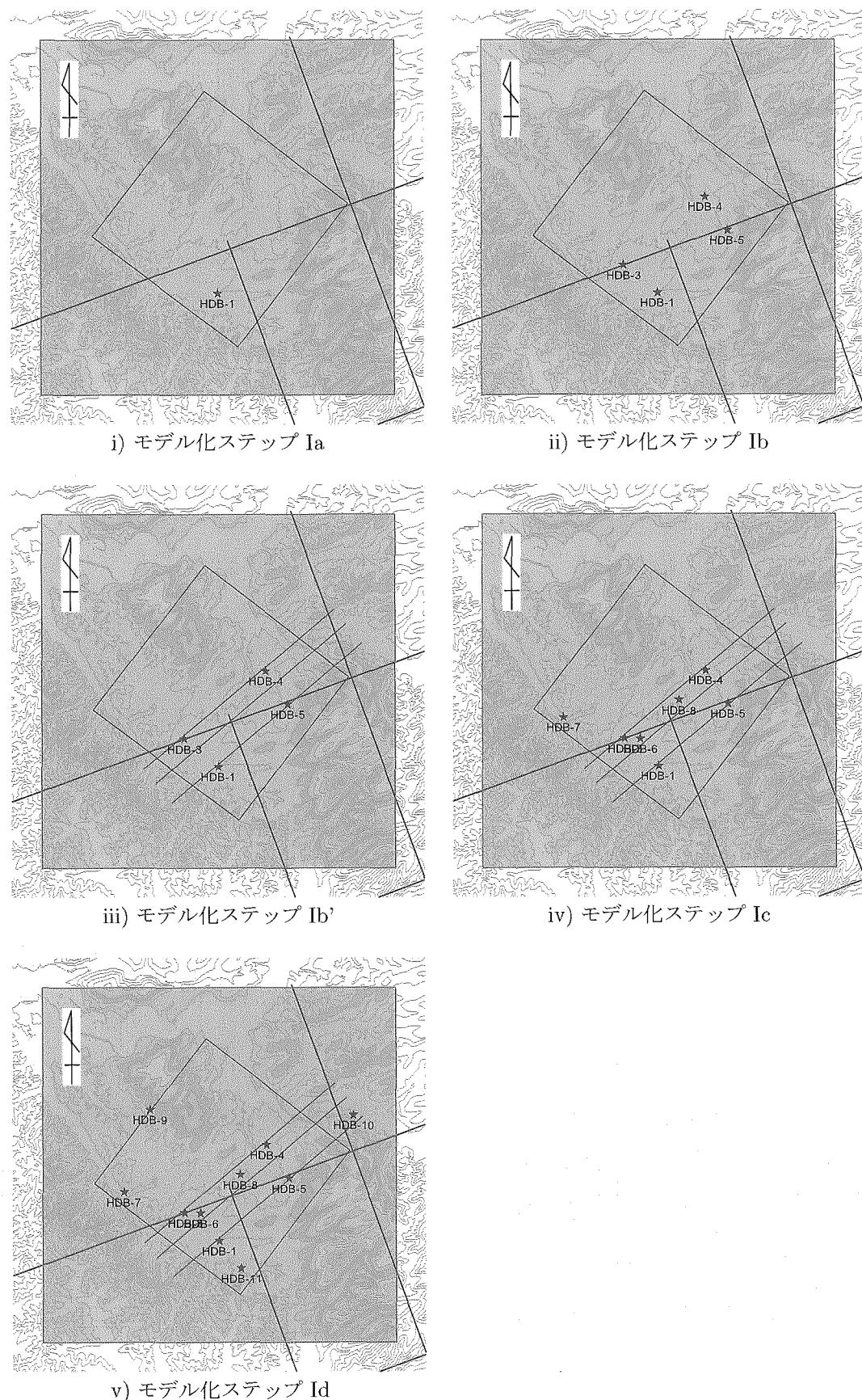


Fig. 3: モデル化ステップと調査データの位置関係

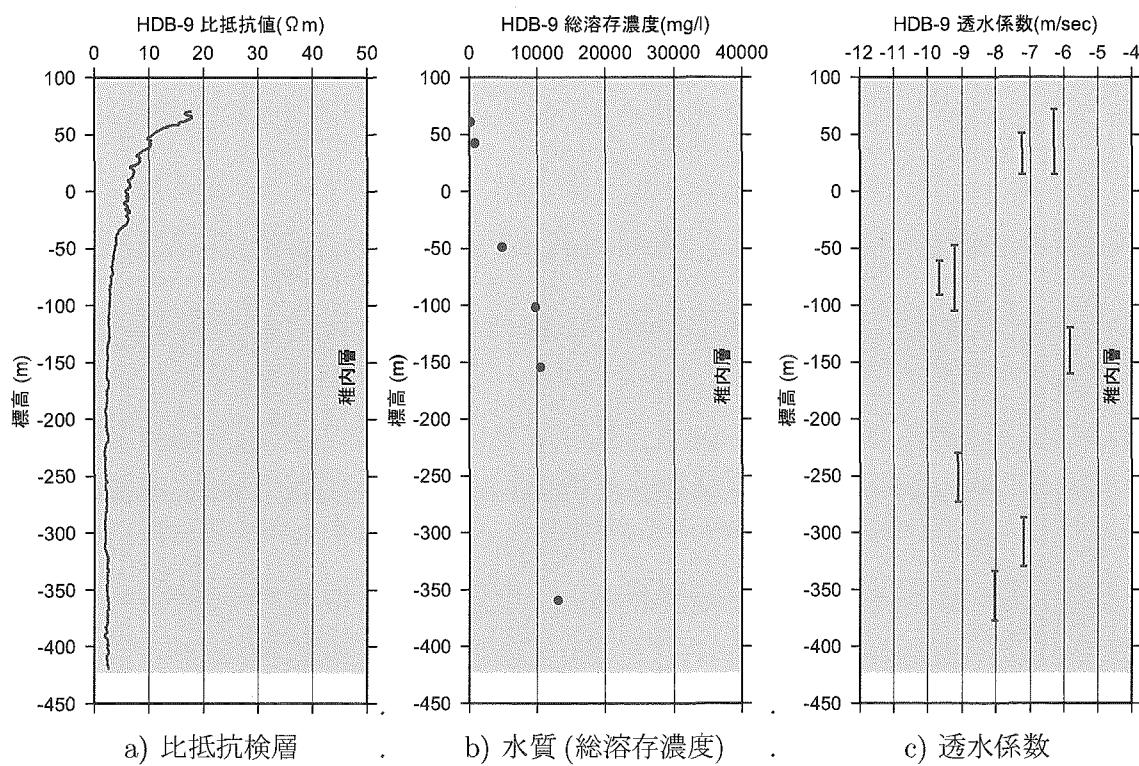


Fig. 4: 今年度新たに検討に利用する試錐孔データ (HDB-9)

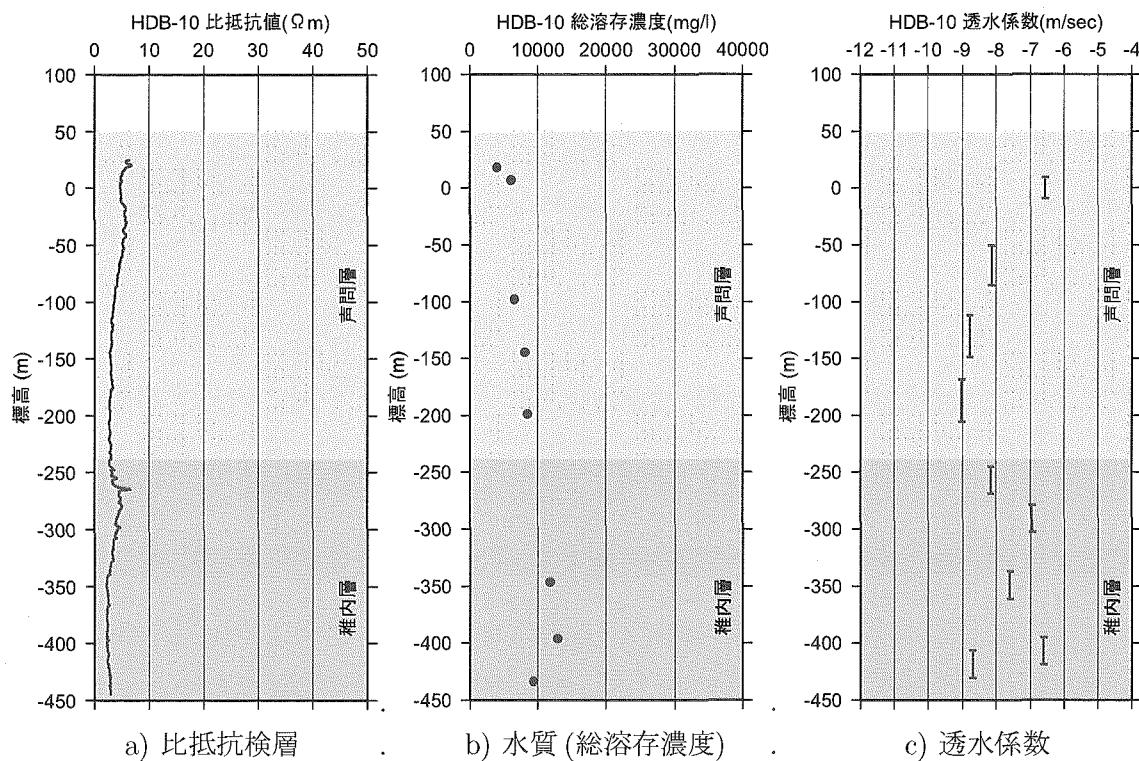


Fig. 5: 今年度新たに検討に利用する試錐孔データ (HDB-10)

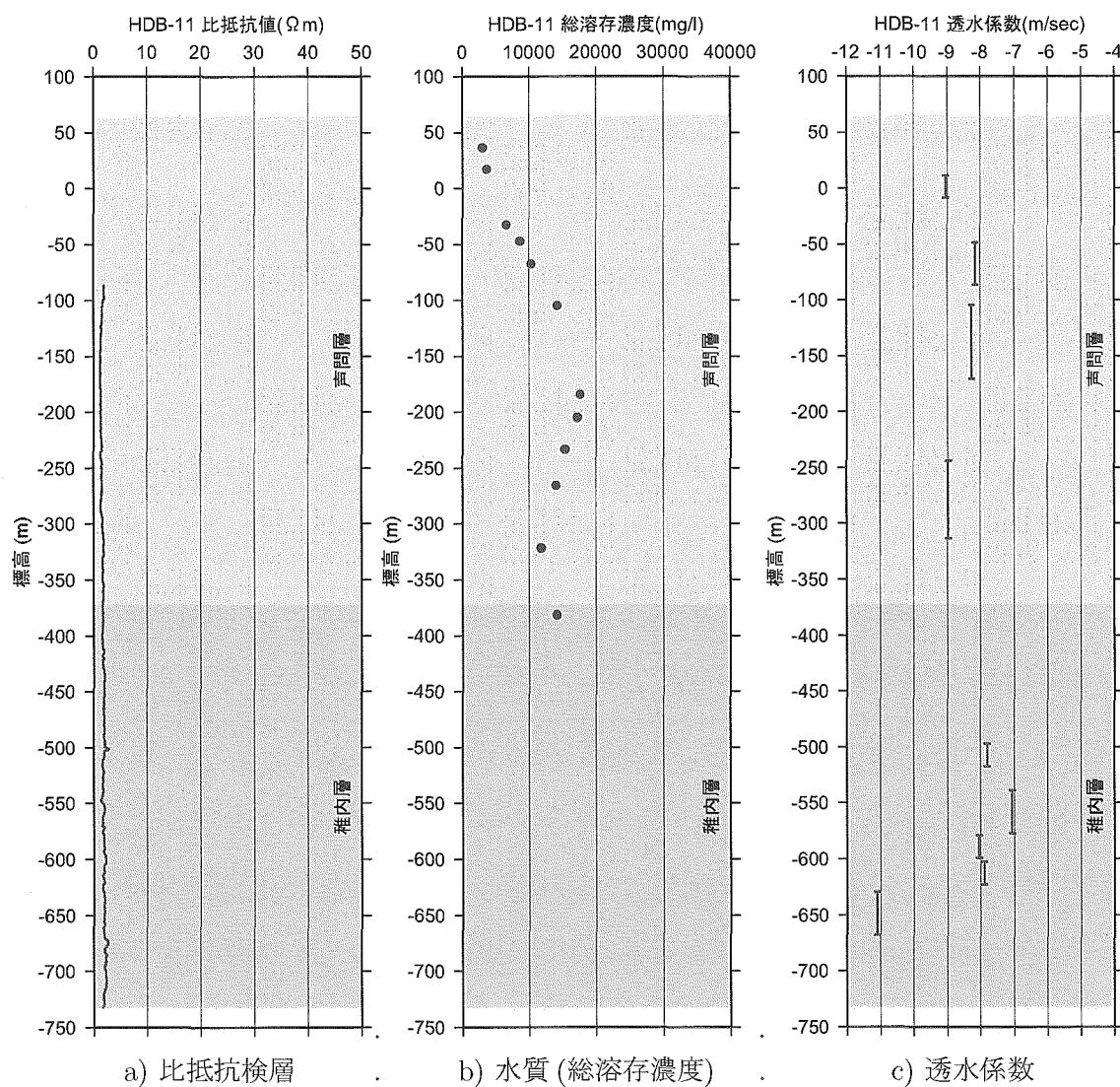


Fig. 6: 今年度新たに検討に利用する試錐孔データ (HDB-11)

対象名	比抵抗検層-深 (Ia, Ib, Ic, Id 群データ)				BoxCox 変換		
標本数	最小値 (Ω m)	最大値 (Ω m)	平均値 (Ω m)	標準偏差 (Ω m)	λ	平均値	標準偏差
58103	0.9218	95.4136	4.7565	5.7382	-0.4769	0.8842	0.3572

Kolmogorov-Smirnov 検定
 D 値: 0.0417 / p 値: 0.0000 ≤ 0.05 補却 (有意差あり)

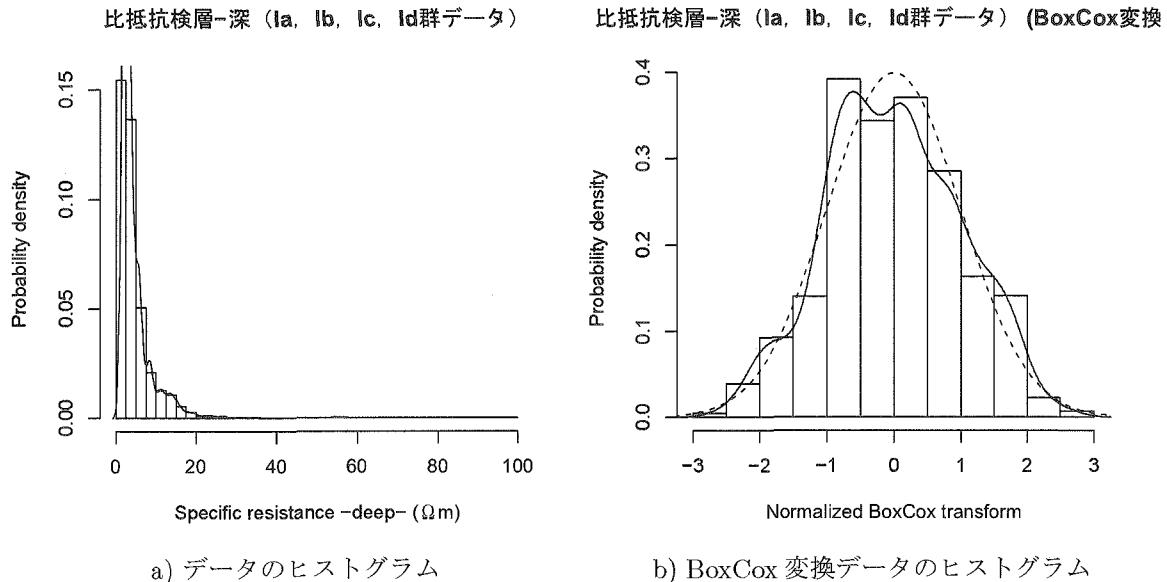


Fig. 7: 基本統計量と分布の正規性検定結果 (比抵抗検層-深 (Ia, Ib, Ic, Id 群データ))

対象名	総溶存成分濃度 (Ia, Ib, Ic, Id 群データ)				BoxCox 変換		
標本数	最小値 (mg/l)	最大値 (mg/l)	平均値 (mg/l)	標準偏差 (mg/l)	λ	平均値	標準偏差
120	189.0000	36900.0000	11967.1000	7831.2579	0.5182	232.7280	90.6696

Kolmogorov-Smirnov 検定
 D 値: 0.0758 / p 値: 0.4961 > 0.05 採択 (有意差なし)

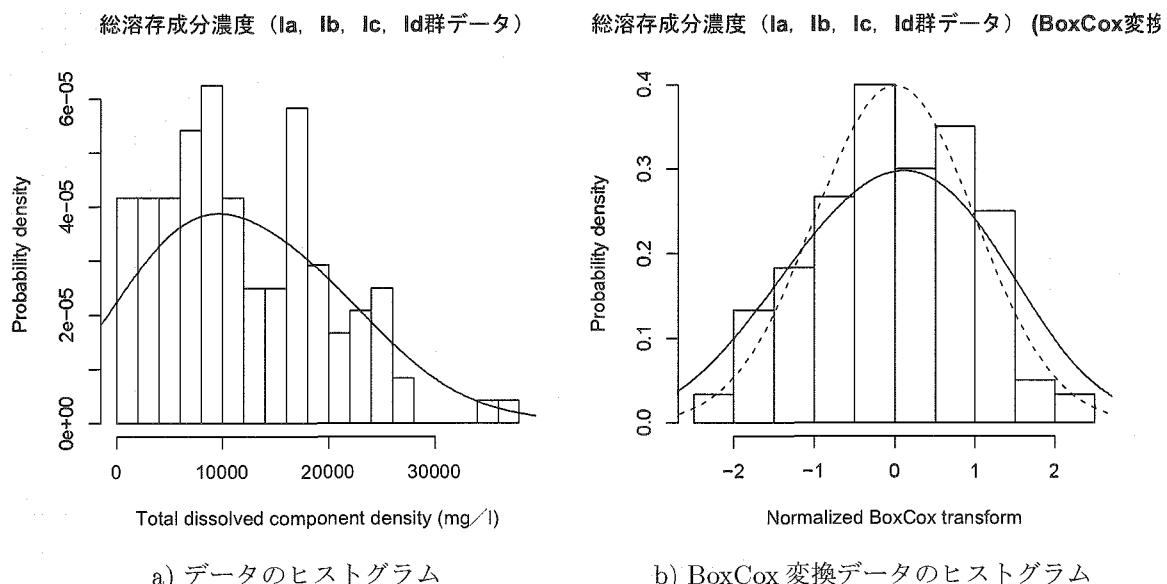


Fig. 8: 基本統計量と分布の正規性検定結果 (総溶存成分濃度 (Ia, Ib, Ic, Id 群データ))

対象名	透水係数 (Ia, Ib, Ic, Id 群データ)					BoxCox 変換		
標本数	最小値 (m/sec)	最大値 (m/sec)	平均値 (m/sec)	標準偏差 (m/sec)	λ	平均値	標準偏差	
58	6.65e-12	8.90e-06	5.06e-07	1.70e-06	-0.0121	-21.1959	4.3224	

Kolmogorov-Smirnov 検定
 D 値: 0.0901 / p 値: 0.7345 > 0.05 採択 (有意差なし)

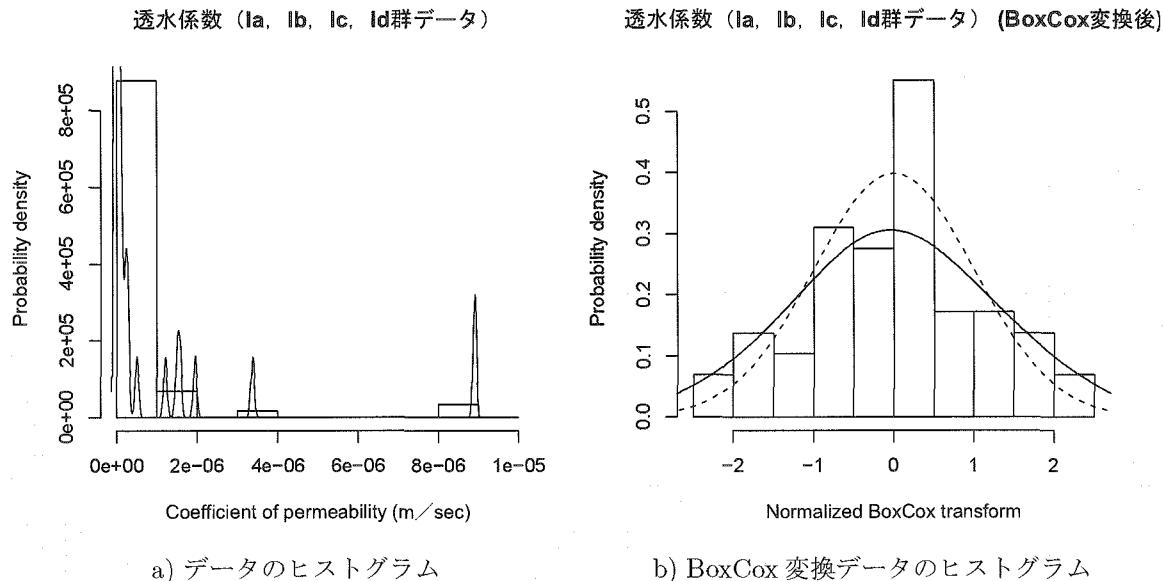


Fig. 9: 基本統計量と分布の正規性検定結果 (透水係数 (Ia, Ib, Ic, Id 群データ))

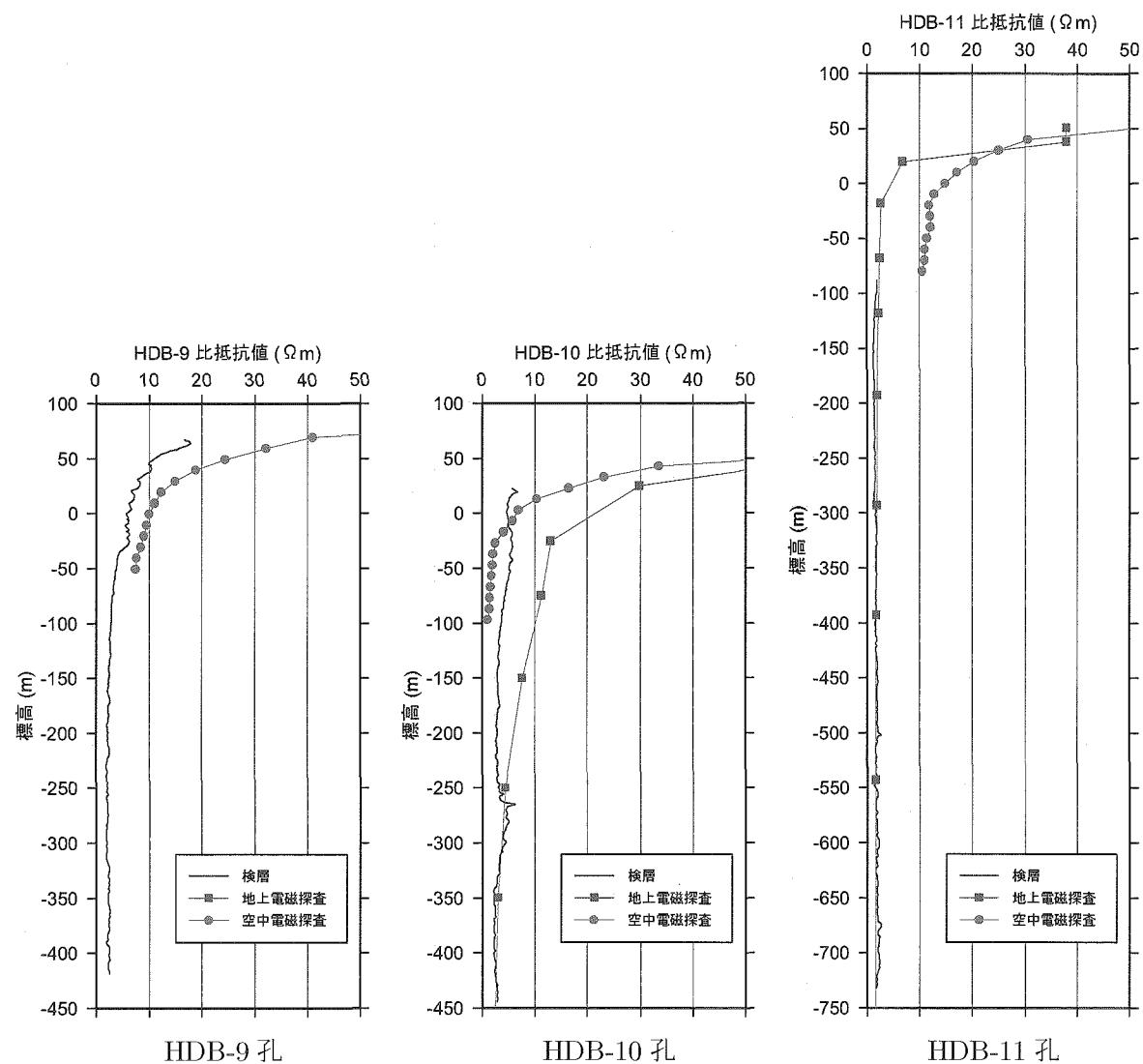


Fig. 10: 比抵抗データの比較（検層・地上電磁探査・空中電磁探査）

回帰式 : $Y = a + bX + \varepsilon$	
Y : 検層-比抵抗値 (Id データ群)	[BoxCox 変換 : $\lambda_Y = -0.47690$]
X : 地上電磁-比抵抗値	[BoxCox 変換 : $\lambda_X = -0.07767$]
回帰係数	$a = 0.2216901, b = 0.5169619$
回帰誤差 & 相関係数	$\sigma = 0.2407100, r = 0.8243746$
相関係数の有意性検定	p 値 : $0 \leq 0.05 \rightarrow$ 棄却 (相関性あり)

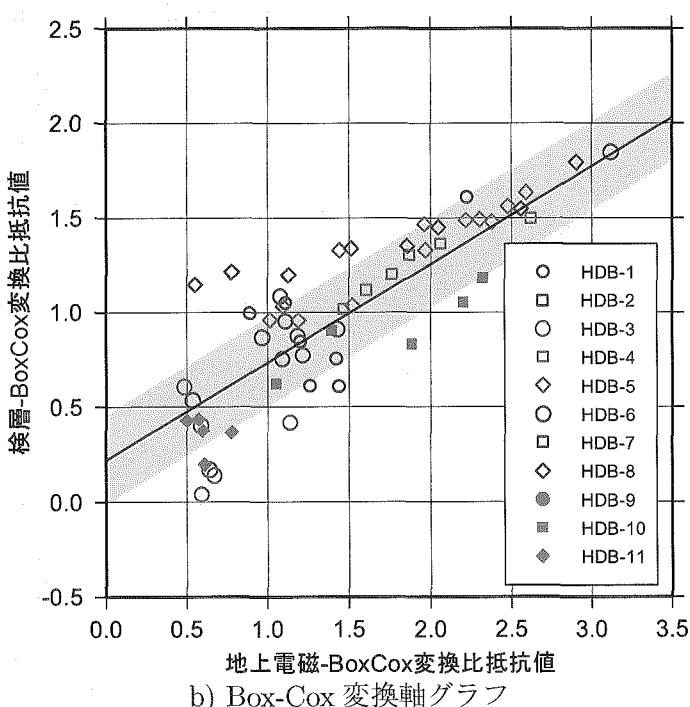
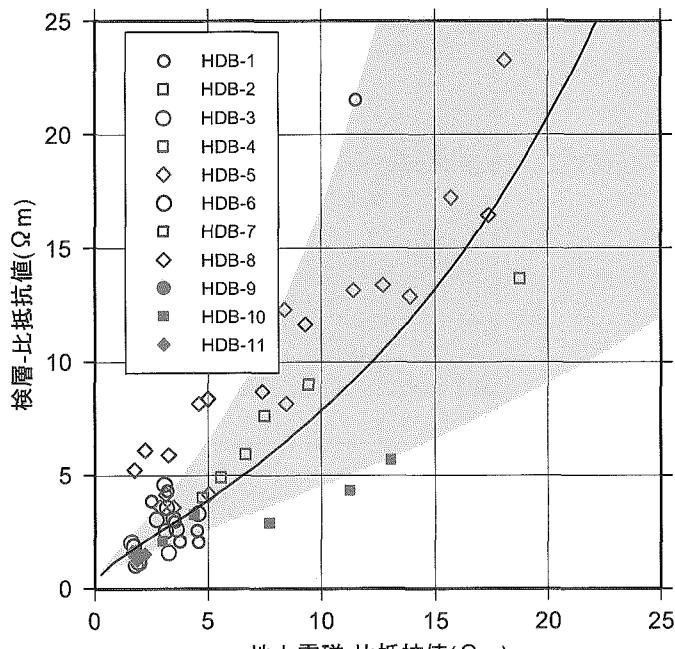


Fig. 11: 比抵抗値の回帰モデル【地上電磁-比抵抗値 v.s. 検層-比抵抗値 (Id データ群)】

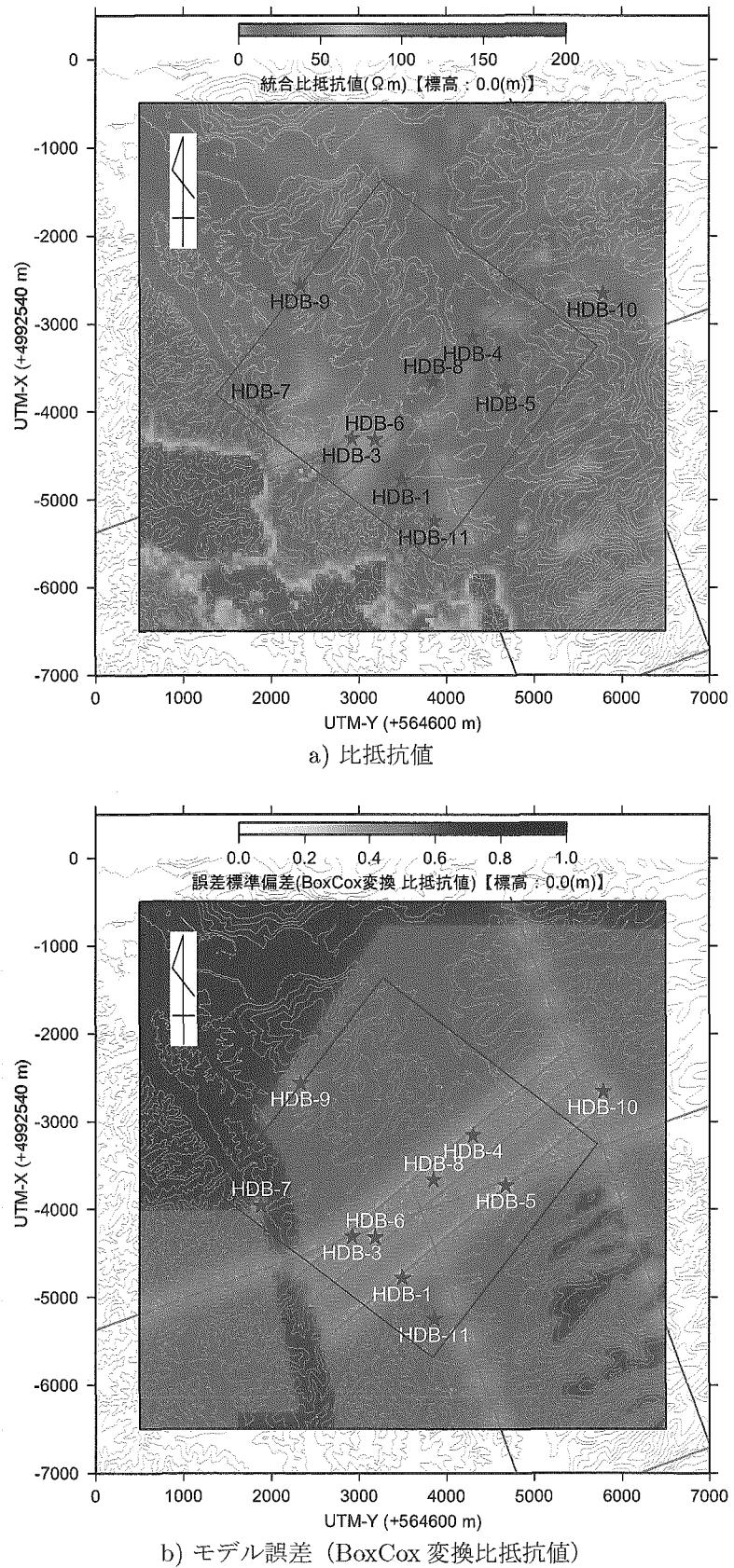


Fig. 12: 統合比抵抗値分布モデル～モデル化ステップ Id～（水平断面 標高 0m）

回帰式 : $Y = a + bX + \epsilon$	
Y : 総溶存成分濃度 (Id データ群)	[BoxCox 変換 : $\lambda_Y = 0.51816$]
X : 検層-比抵抗値 (Id データ群)	[BoxCox 変換 : $\lambda_X = -0.47685$]
回帰係数	$a = 405.8896, b = -190.3858$
回帰誤差 & 相関係数	$\sigma = 56.83839, r = -0.7587233$
相関係数の有意性検定	p 値 : $7.902633e-22 \leq 0.05 \rightarrow$ 葉却 (相関性あり)

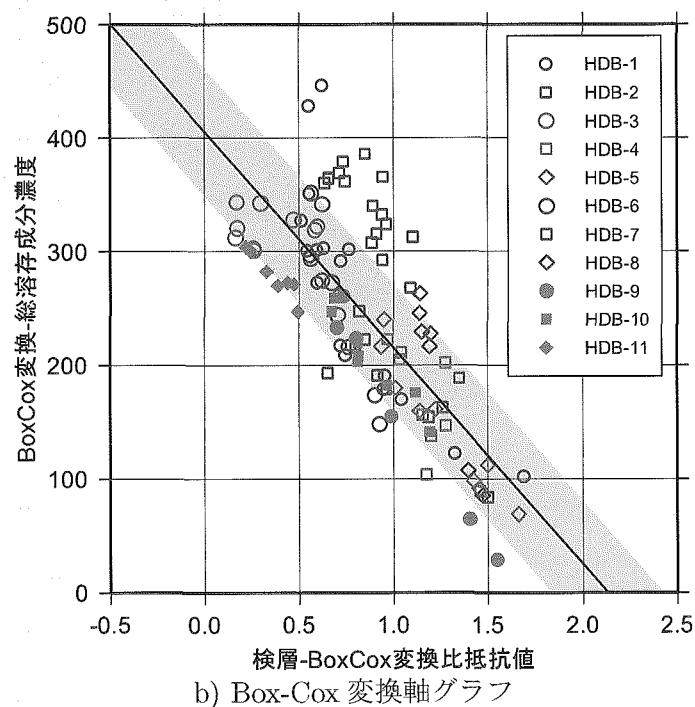
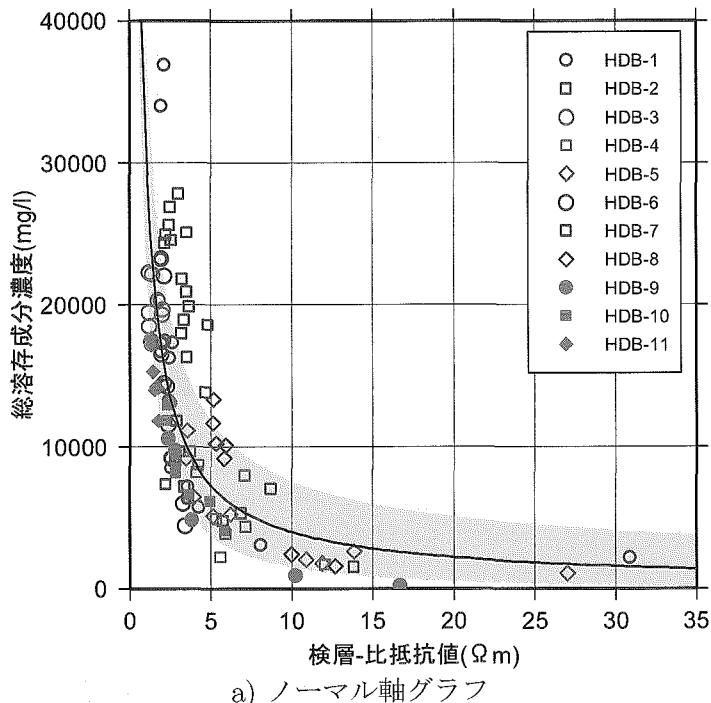
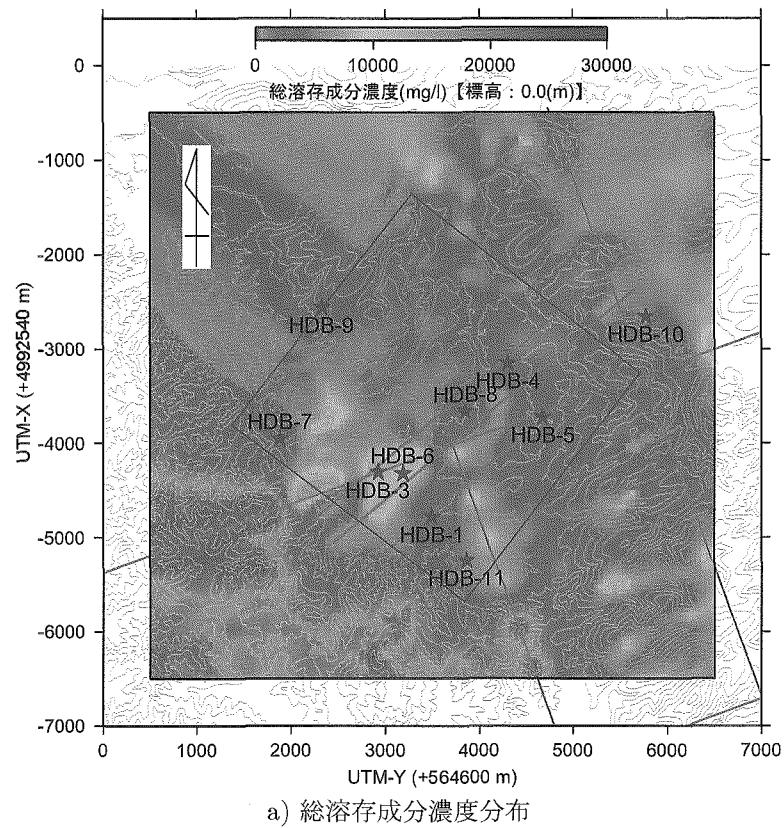
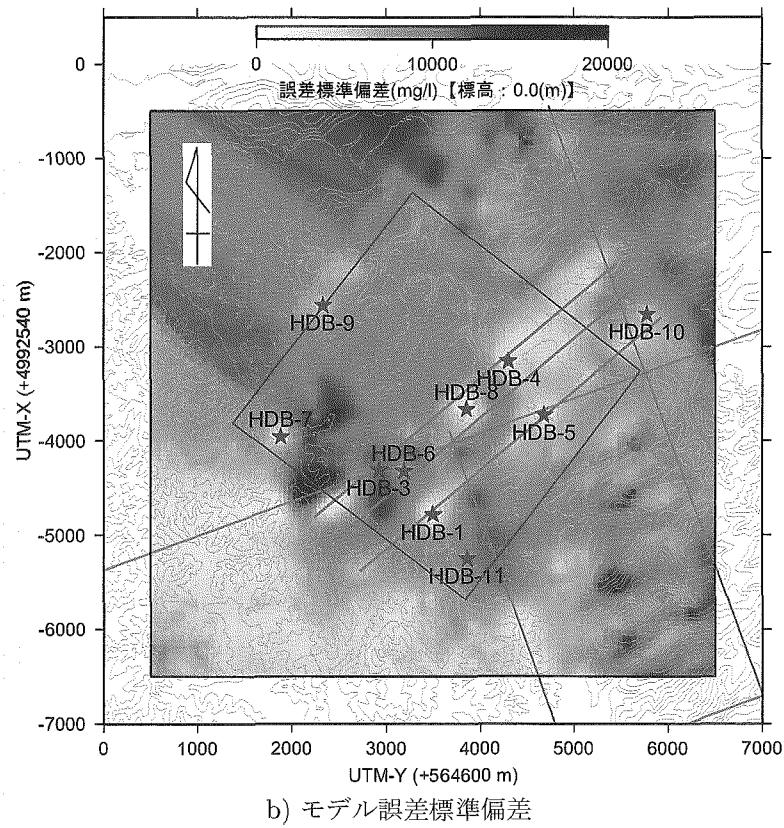


Fig. 13: 総溶存成分濃度 (Id データ群) との回帰モデル



a) 総溶存成分濃度分布



b) モデル誤差標準偏差

Fig. 14: 水質分布（総溶存成分濃度）モデル～モデル化ステップ Id～（水平断面 標高 0m）

回帰式 : $Y = a + bX + \varepsilon$ Y : 透水係数 (Id データ群)[BoxCox 変換 : $\lambda_Y = -0.01210$] X : 検層-比抵抗値 (Id データ群)[BoxCox 変換 : $\lambda_X = -0.47685$]

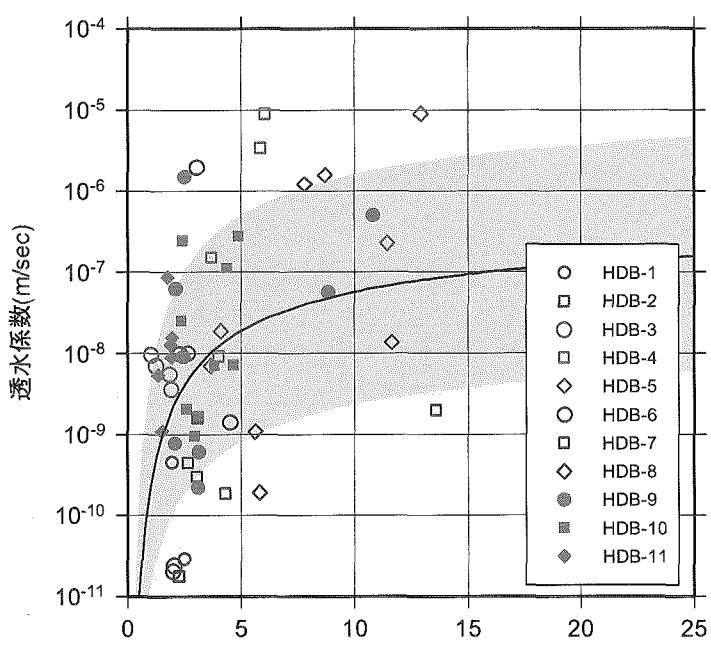
回帰係数

 $a = -25.44755, b = 4.985143$

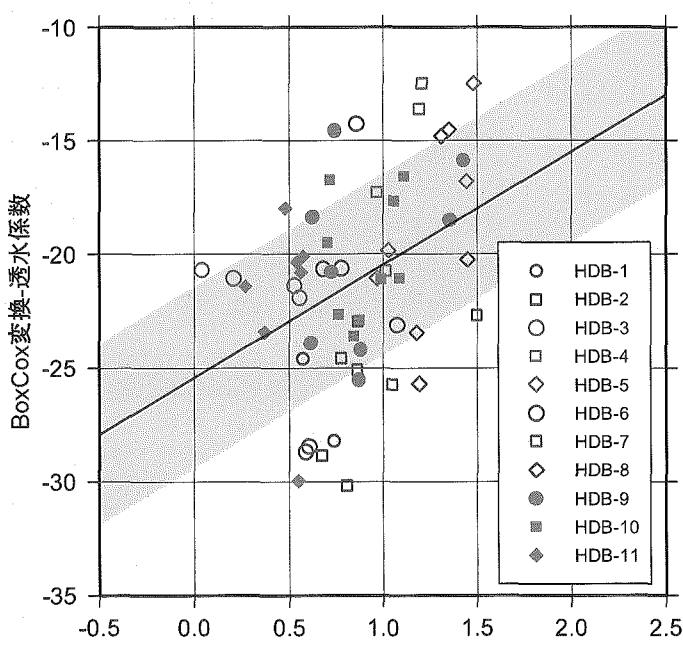
回帰誤差 & 相関係数

 $\sigma = 4.021924, r = 0.3797109$

相関係数の有意性検定

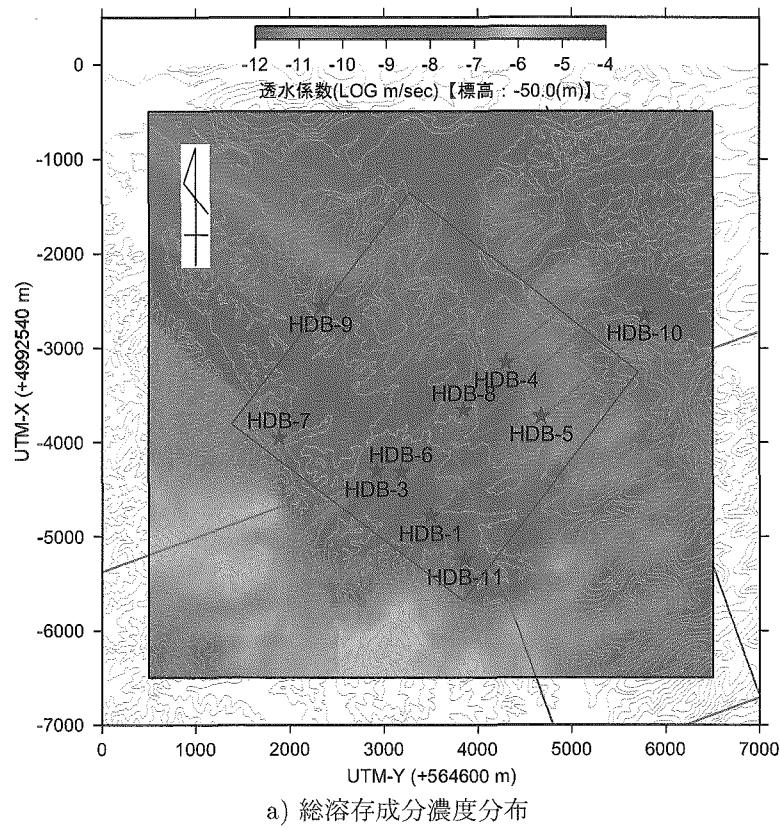
 p 値 : $0.003897223 \leq 0.05 \rightarrow$ 留却 (相関性あり)

a) ノーマル軸グラフ

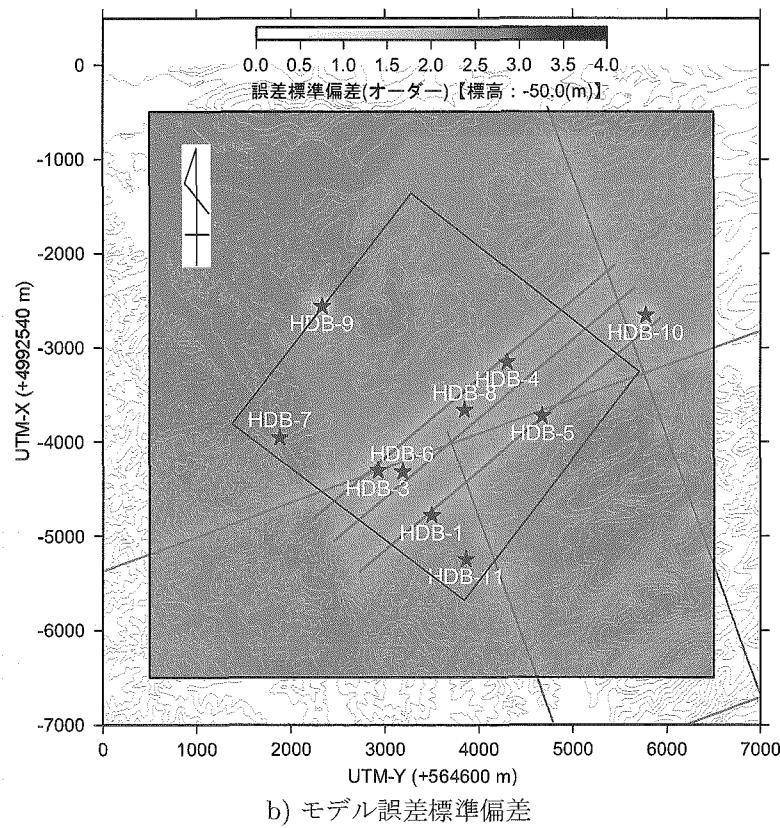


b) Box-Cox 変換軸グラフ

Fig. 15: 透水係数 (Id データ群) との回帰モデル



a) 総溶存成分濃度分布



b) モデル誤差標準偏差

Fig. 16: 透水係数分布モデル～モデル化ステップ Id～ (水平断面 標高-50m)

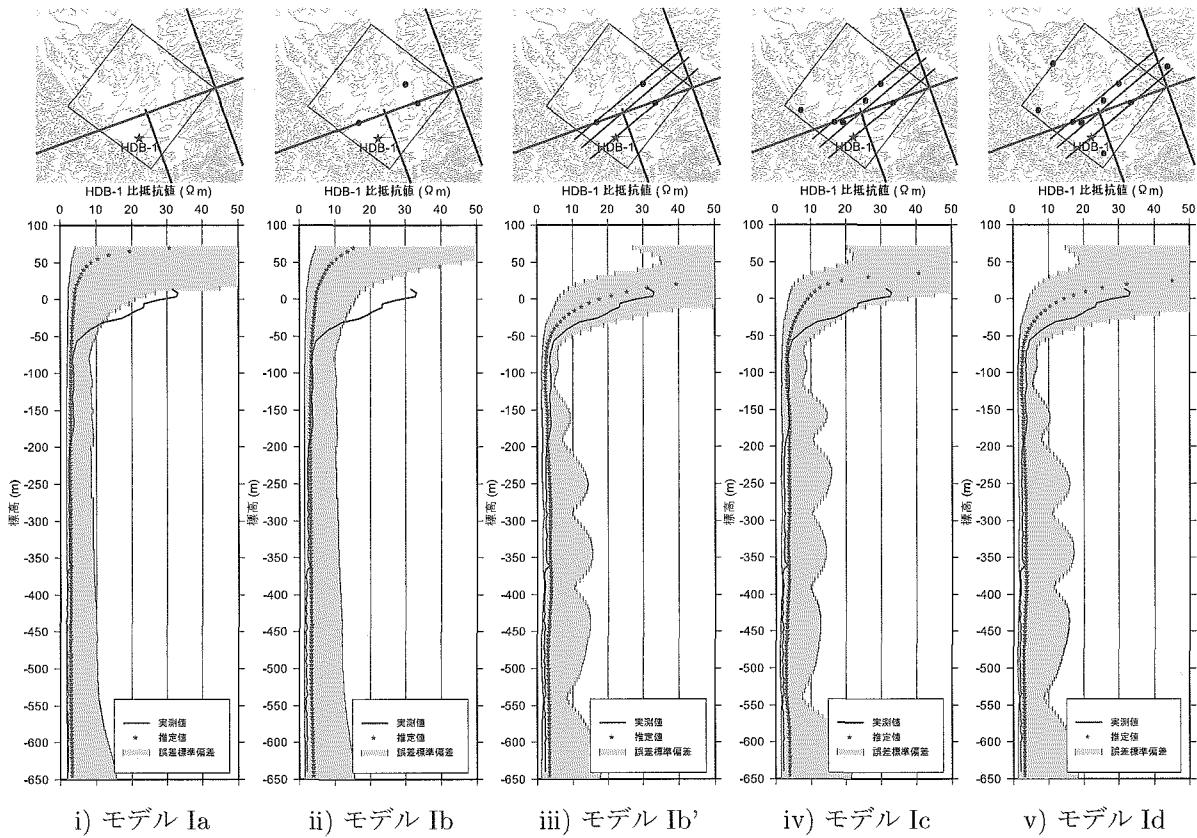


Fig. 17: 比抵抗値の推定結果ブラインド検証～検証孔 HDB-1～

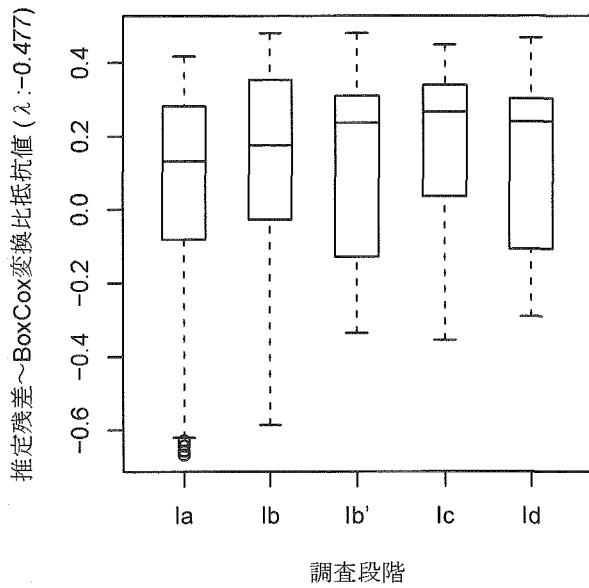


Fig. 18: 箱ひげ図による推定残差の比較～比抵抗値 HDB-1 孔～ (対象孔 Ia～Id 群)

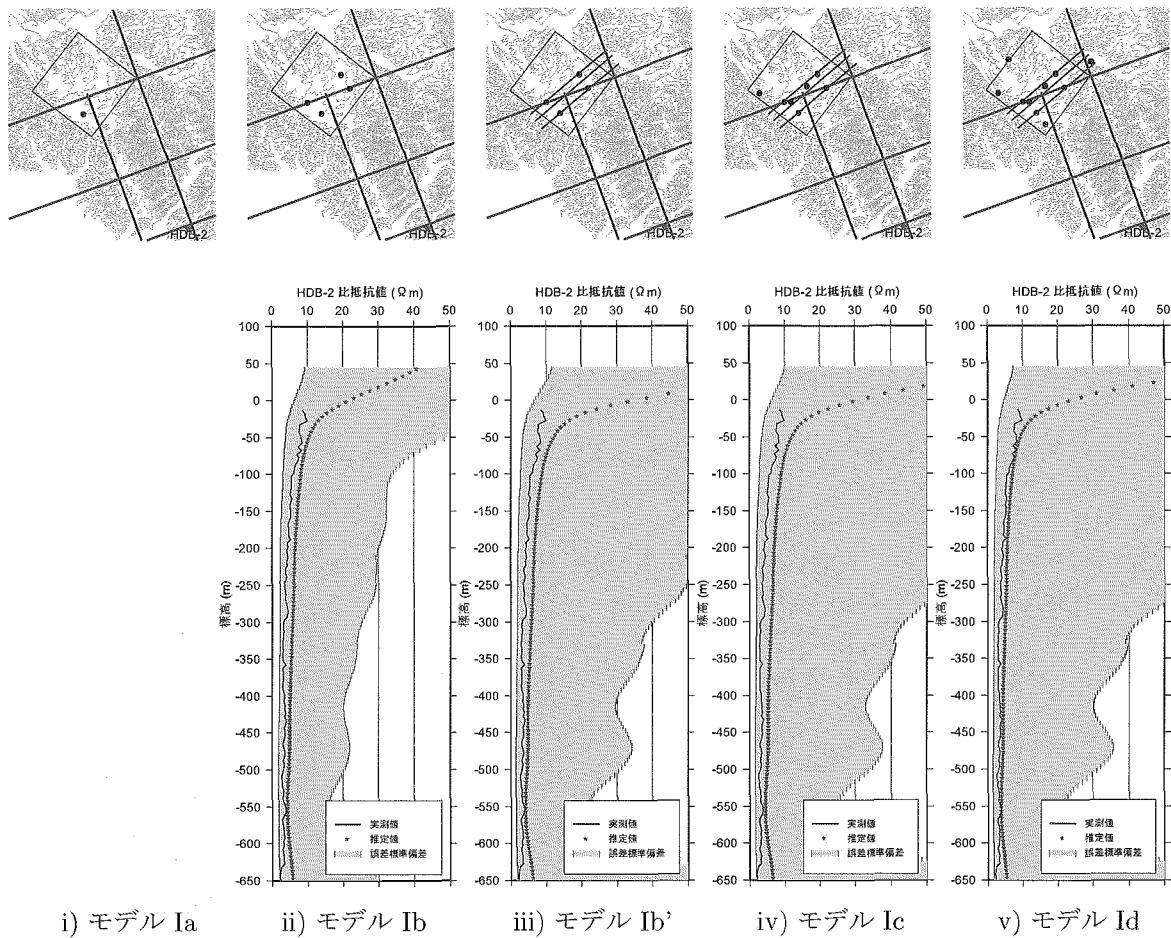


Fig. 19: 比抵抗値の推定結果ブラインド検証～検証孔 HDB-2～

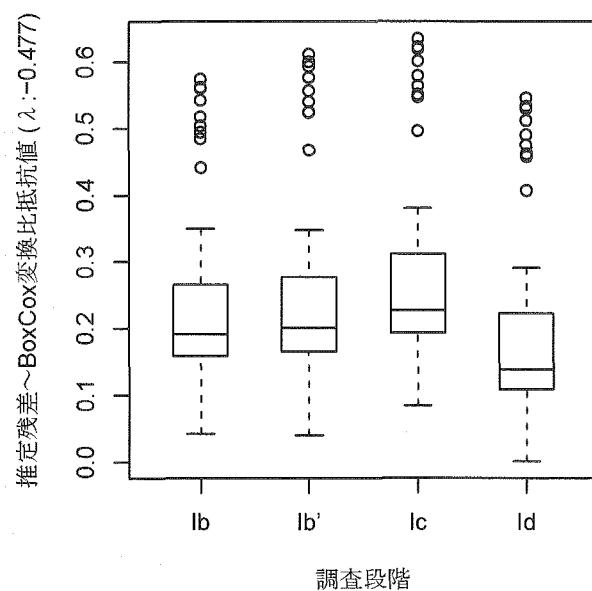


Fig. 20: 箱ひげ図による推定残差の比較～比抵抗値 HDB-2 孔～（対象孔 Ia～Id 群）

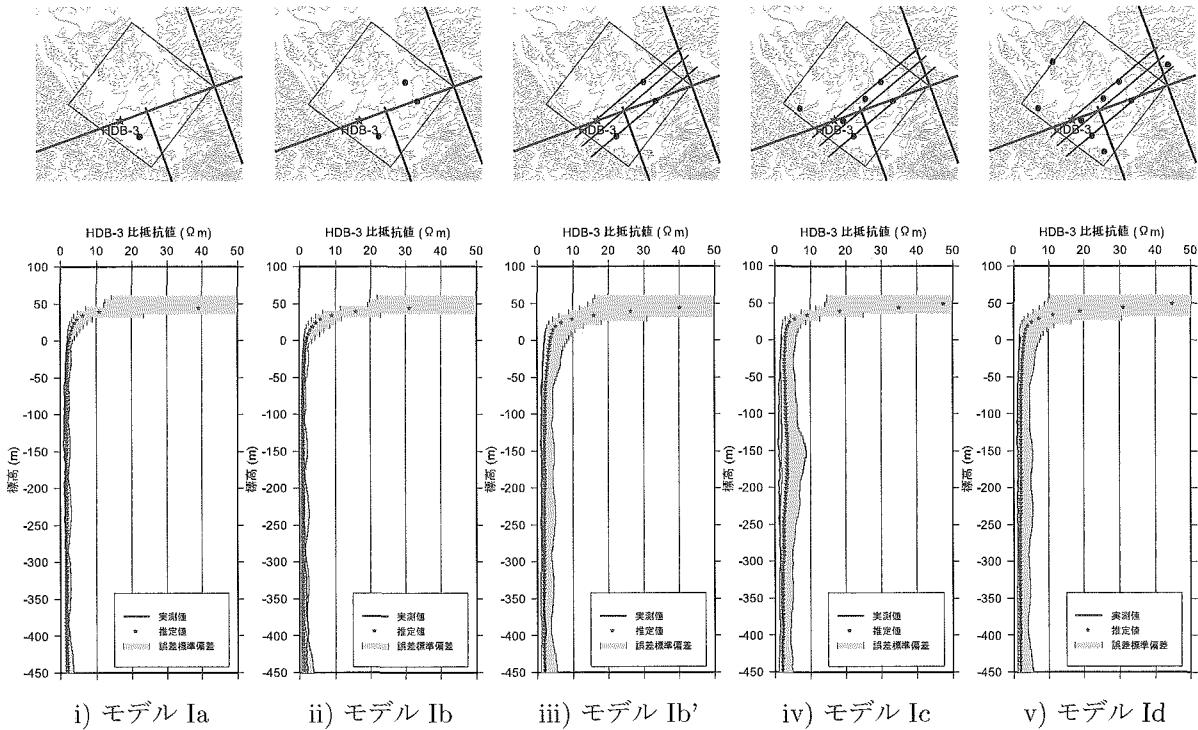


Fig. 21: 比抵抗値の推定結果ブラインド検証～検証孔 HDB-3～

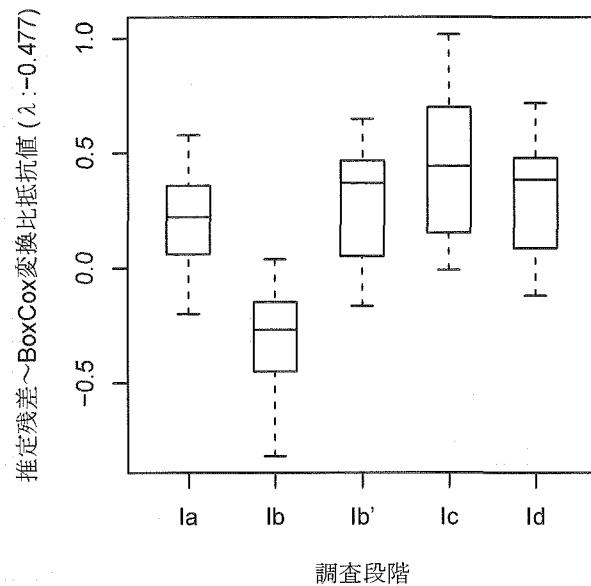


Fig. 22: 箱ひげ図による推定残差の比較～比抵抗値 HDB-3 孔～（対象孔 Ia～Id 群）

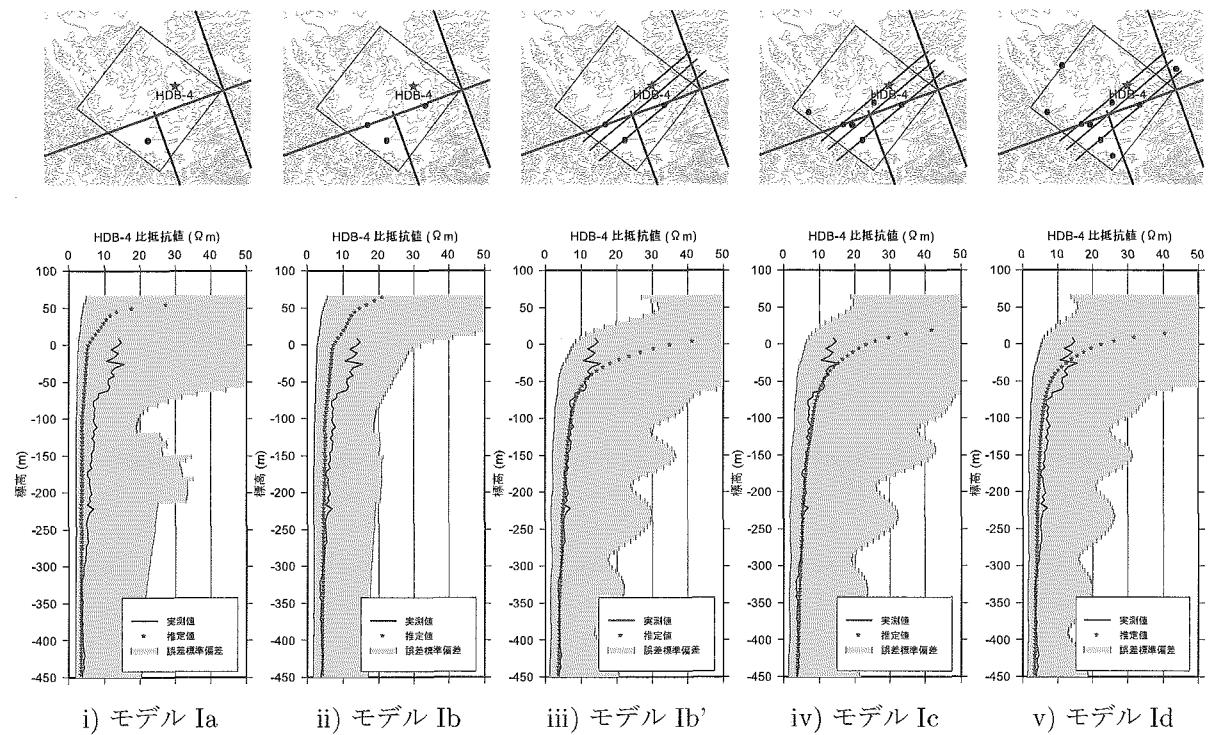


Fig. 23: 比抵抗値の推定結果ブラインド検証～検証孔 HDB-4～

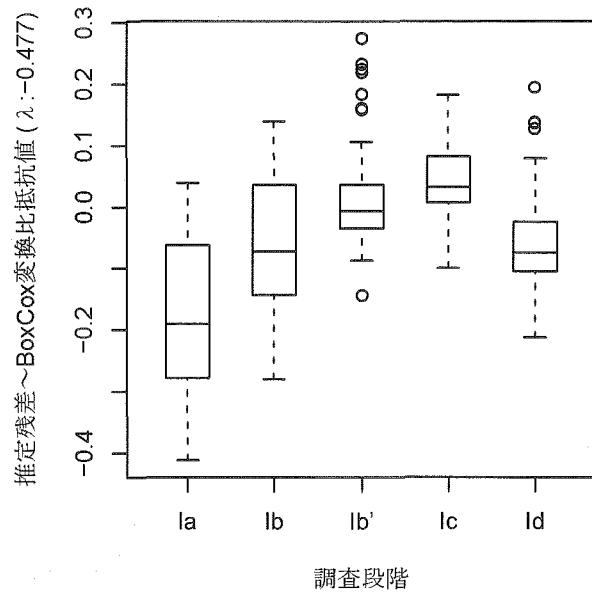


Fig. 24: 箱ひげ図による推定残差の比較～比抵抗値 HDB-4 孔～（対象孔 Ia～Id 群）

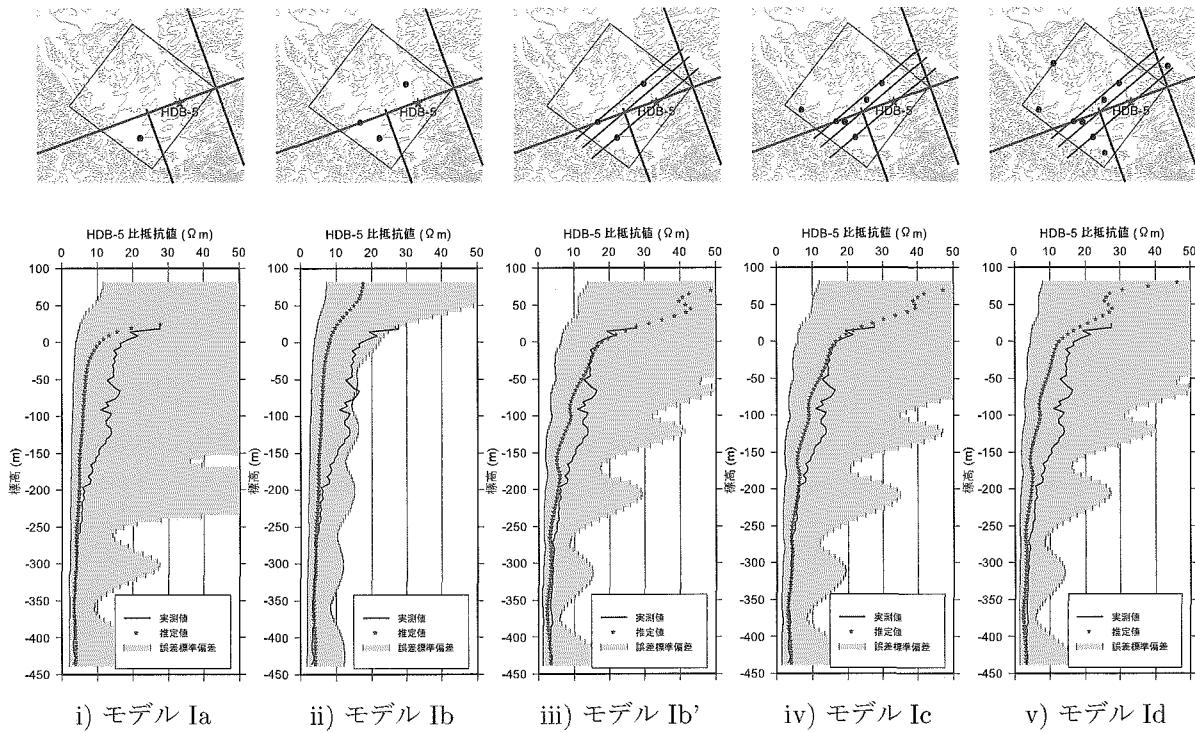


Fig. 25: 比抵抗値の推定結果ブラインド検証～検証孔 HDB-5～

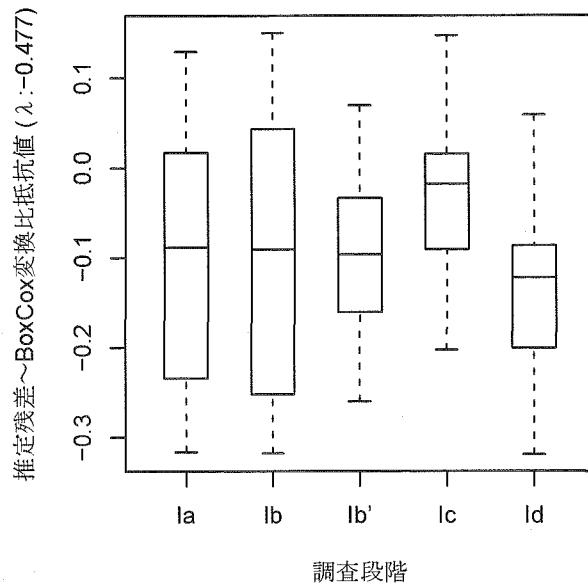


Fig. 26: 箱ひげ図による推定残差の比較～比抵抗値 HDB-5 孔～ (対象孔 Ia～Id 群)

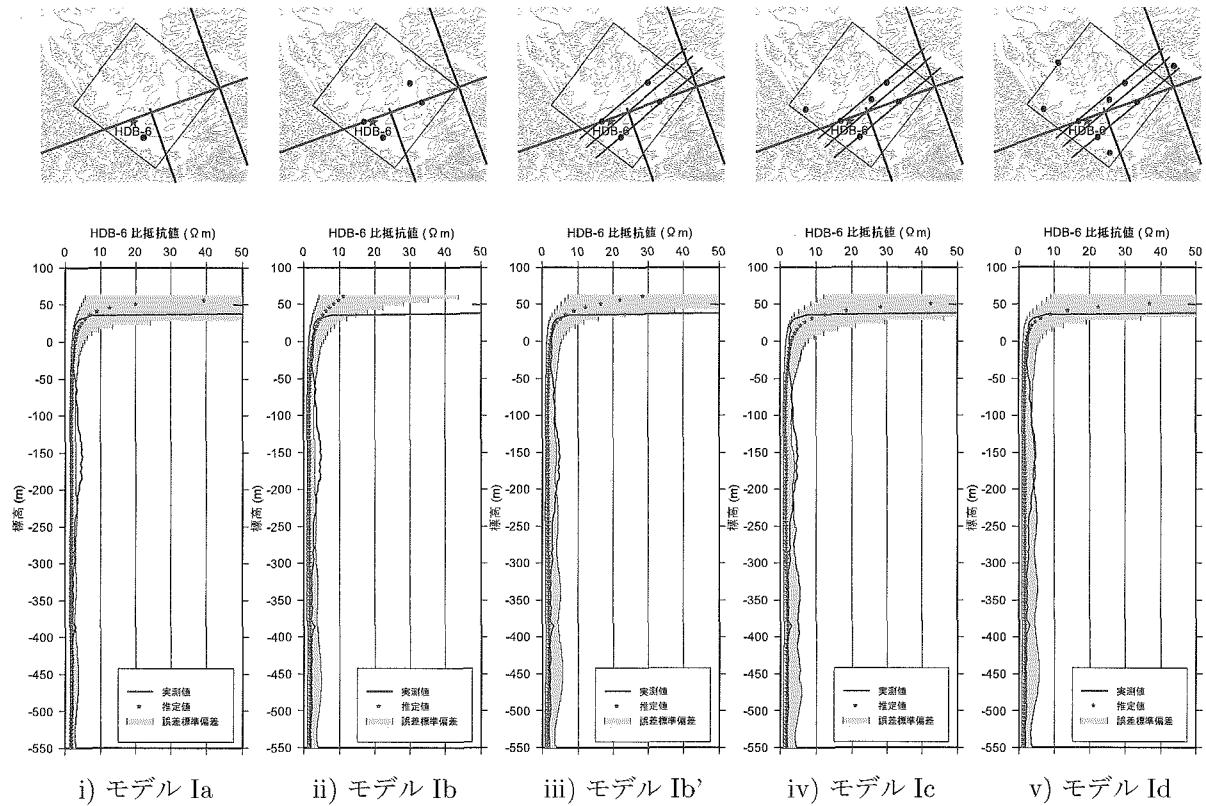


Fig. 27: 比抵抗値の推定結果ブラインド検証～検証孔 HDB-6～

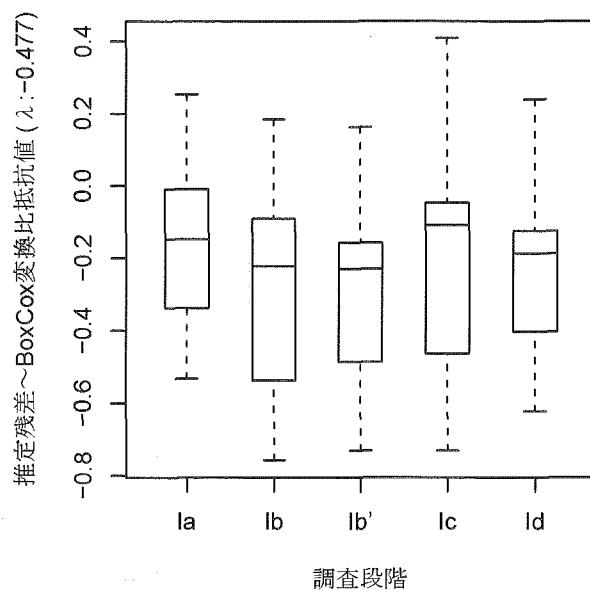


Fig. 28: 箱ひげ図による推定残差の比較～比抵抗値 HDB-6 孔～（対象孔 Ia～Id 群）

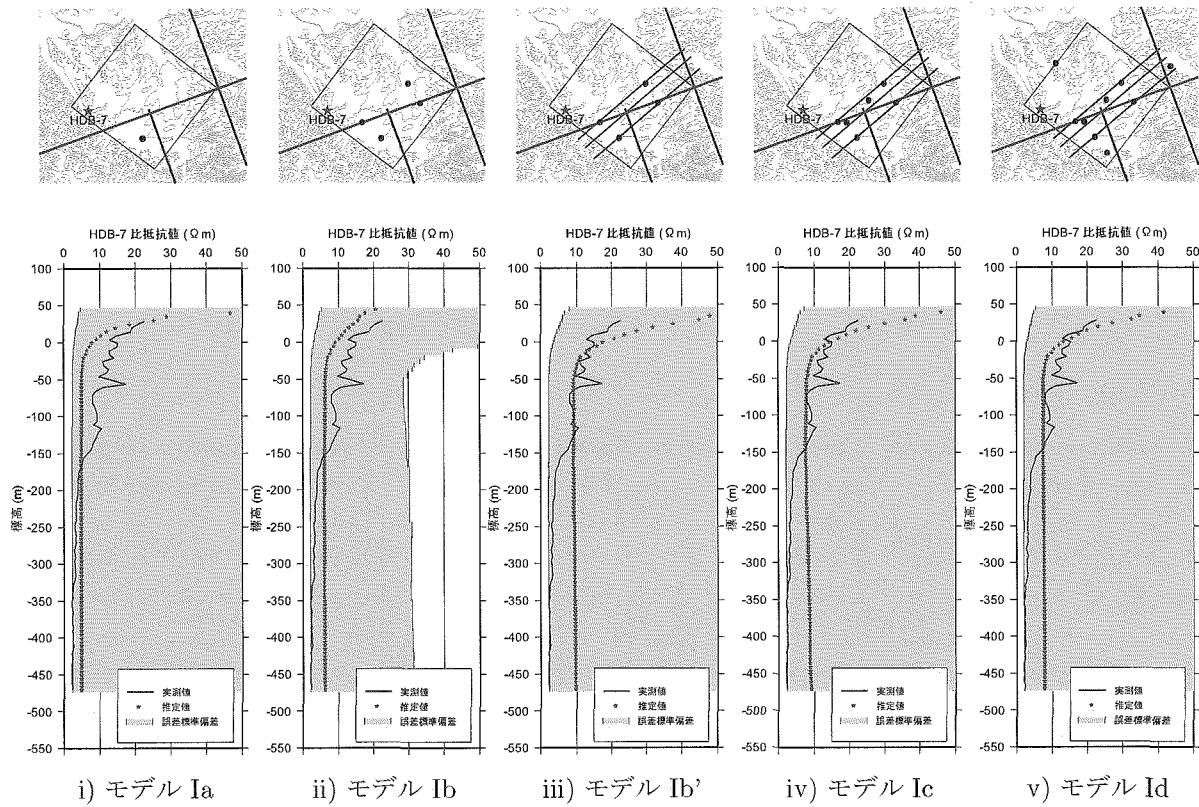


Fig. 29: 比抵抗値の推定結果ブラインド検証～検証孔 HDB-7～

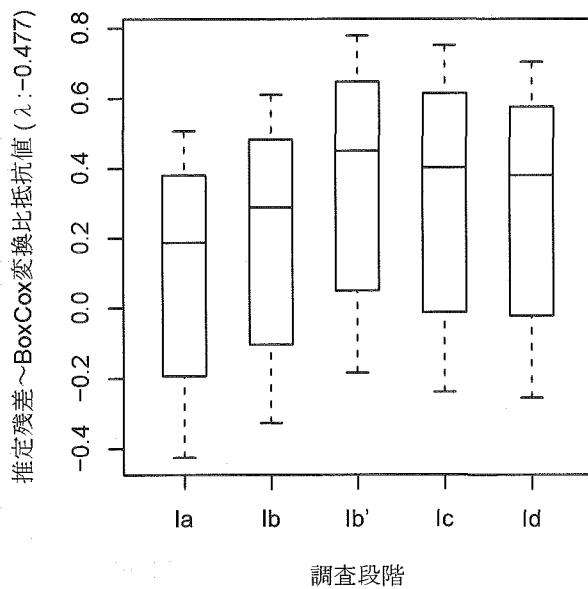


Fig. 30: 箱ひげ図による推定残差の比較～比抵抗値 HDB-7 孔～（対象孔 Ia～Id 群）

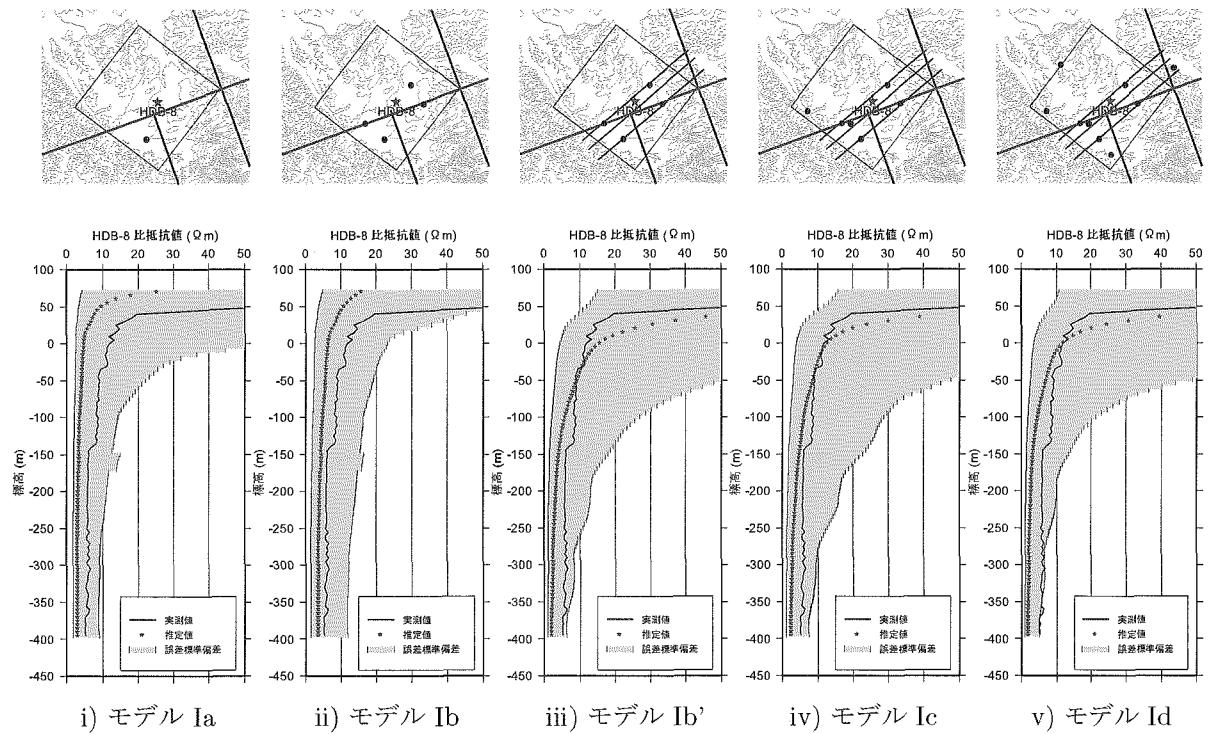


Fig. 31: 比抵抗値の推定結果ブラインド検証～検証孔 HDB-8～

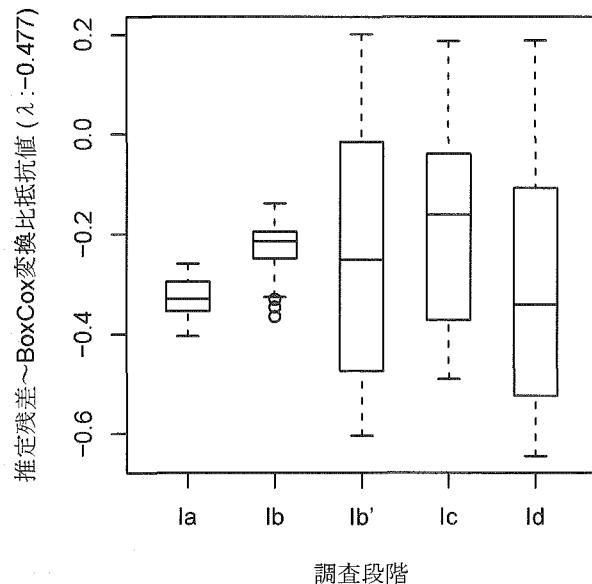


Fig. 32: 箱ひげ図による推定残差の比較～比抵抗値 HDB-8 孔～（対象孔 Ia～Id 群）

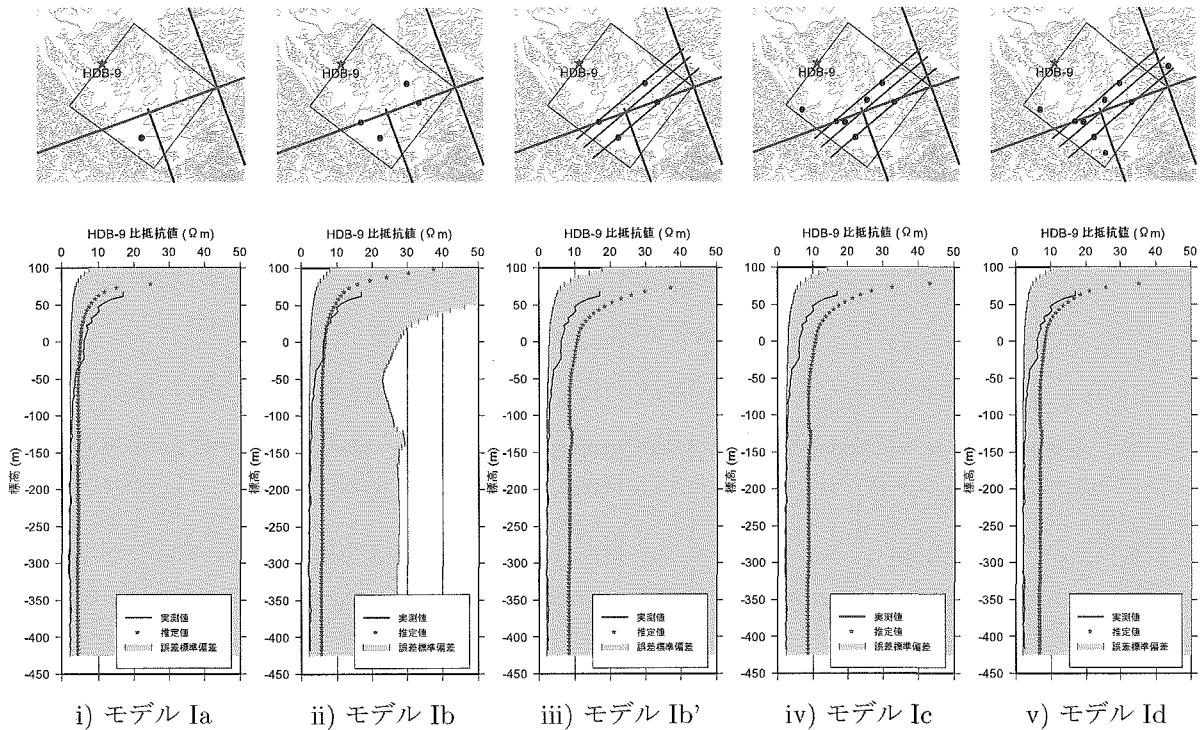


Fig. 33: 比抵抗値の推定結果ブラインド検証～検証孔 HDB-9～

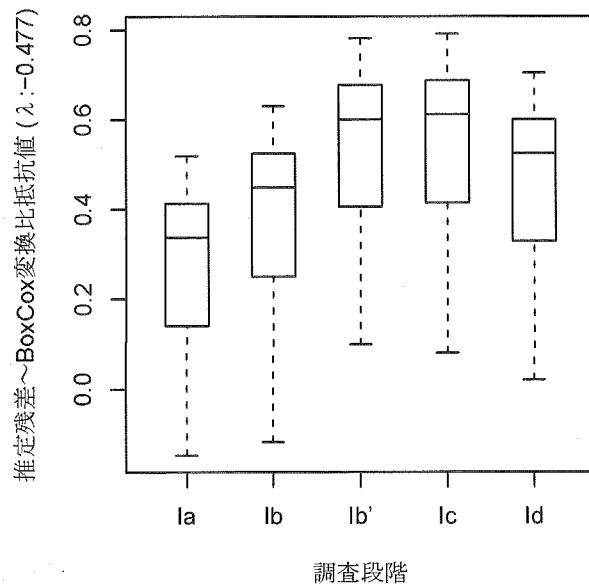


Fig. 34: 箱ひげ図による推定残差の比較～比抵抗値 HDB-9 孔～ (対象孔 Ia～Id 群)

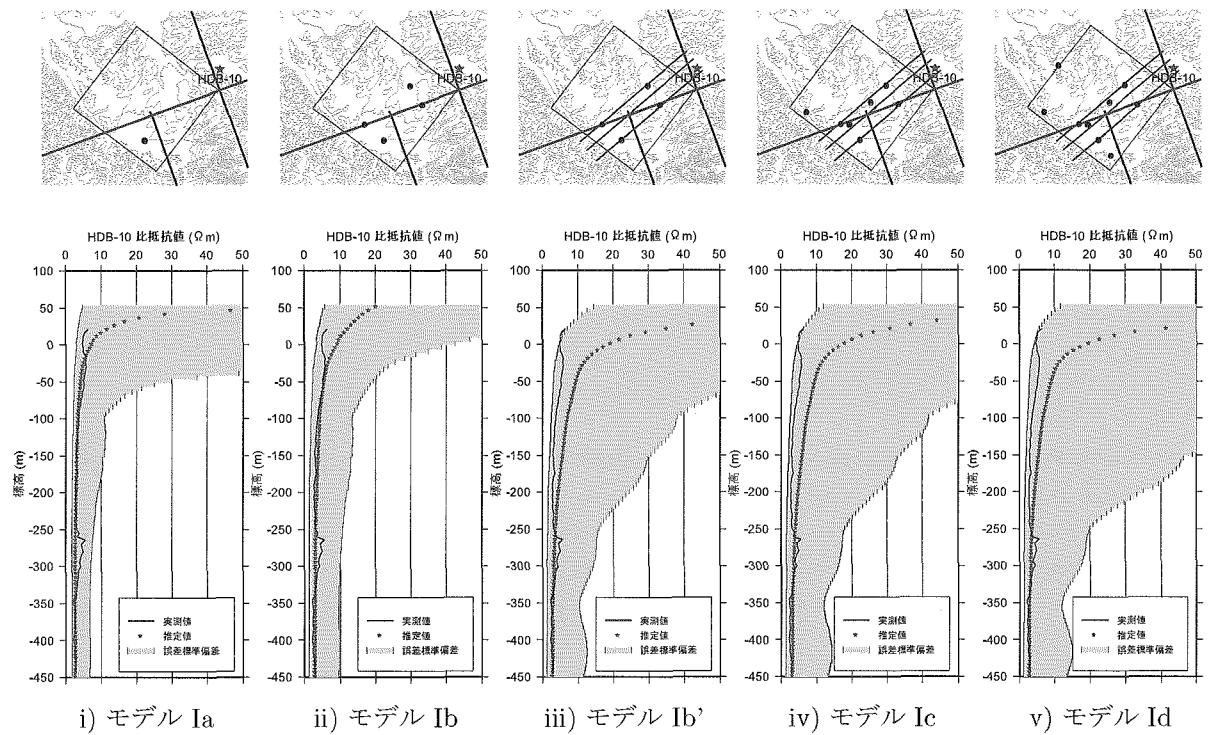


Fig. 35: 比抵抗値の推定結果ブラインド検証～検証孔 HDB-10～

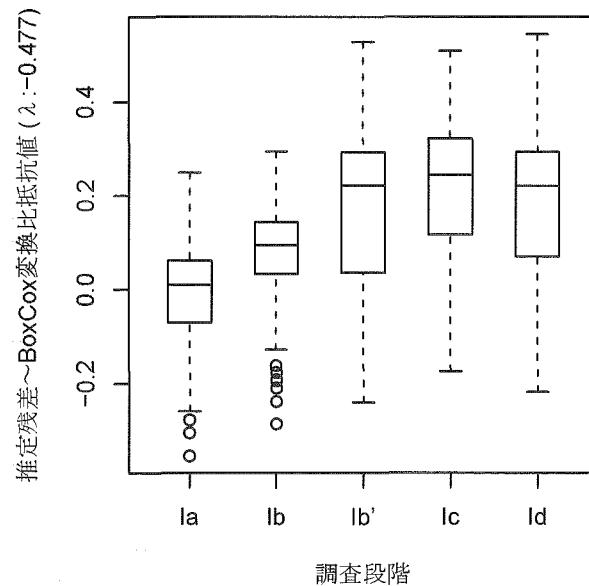


Fig. 36: 箱ひげ図による推定残差の比較～比抵抗値 HDB-10 孔～（対象孔 Ia～Id 群）

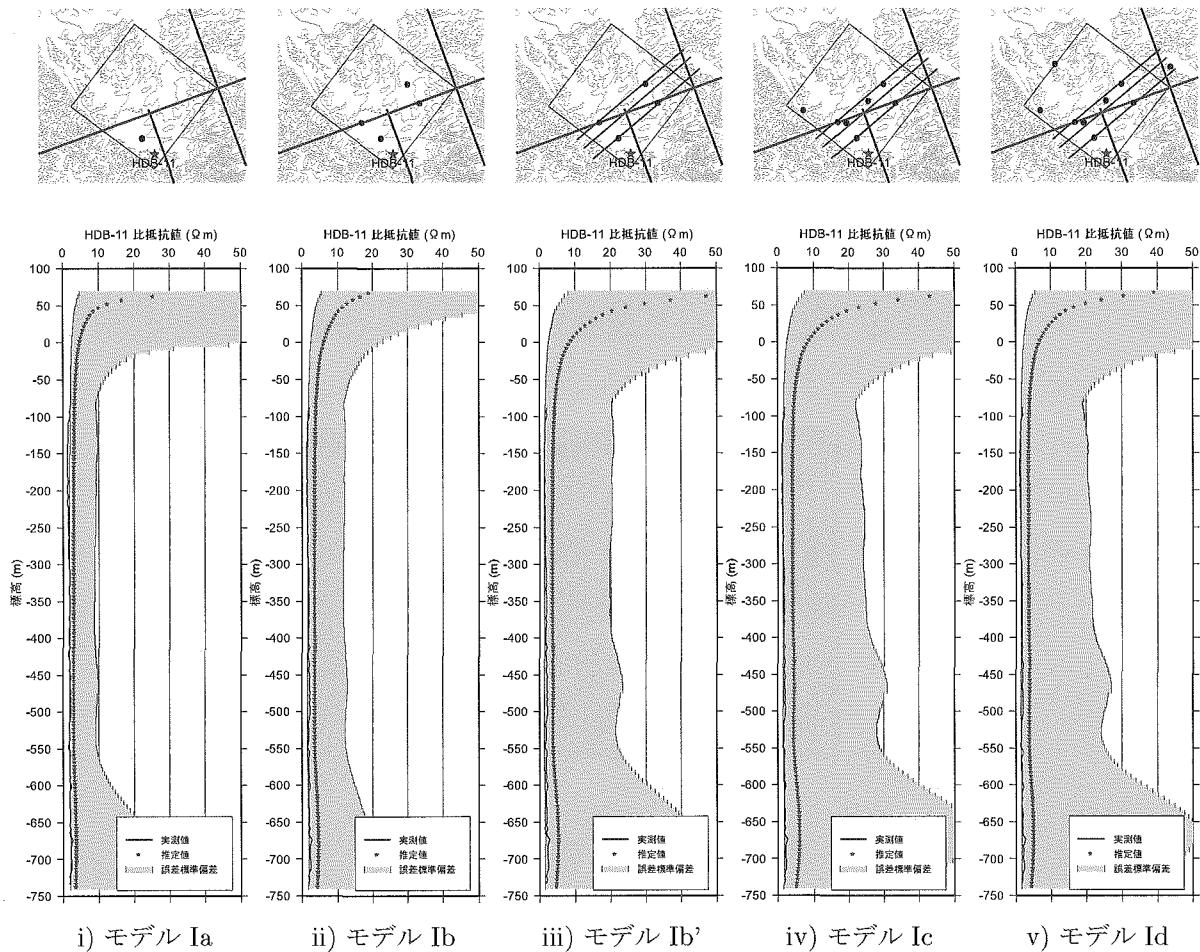


Fig. 37: 比抵抗値の推定結果ブラインド検証～検証孔 HDB-11～

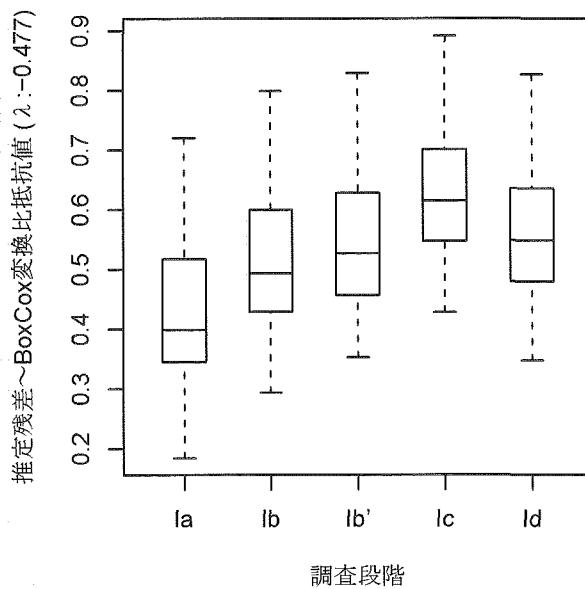


Fig. 38: 箱ひげ図による推定残差の比較～比抵抗値 HDB-11 孔～（対象孔 Ia～Id 群）

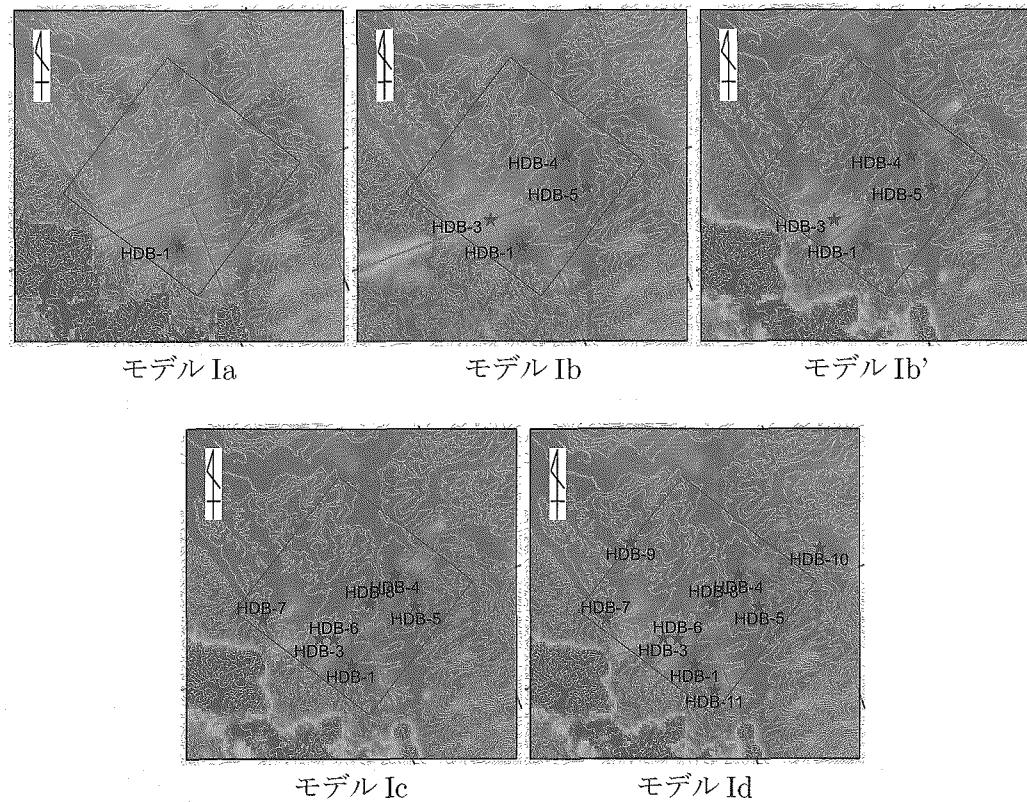


Fig. 39: 推定比抵抗値分布（標高 0m 水平断面）

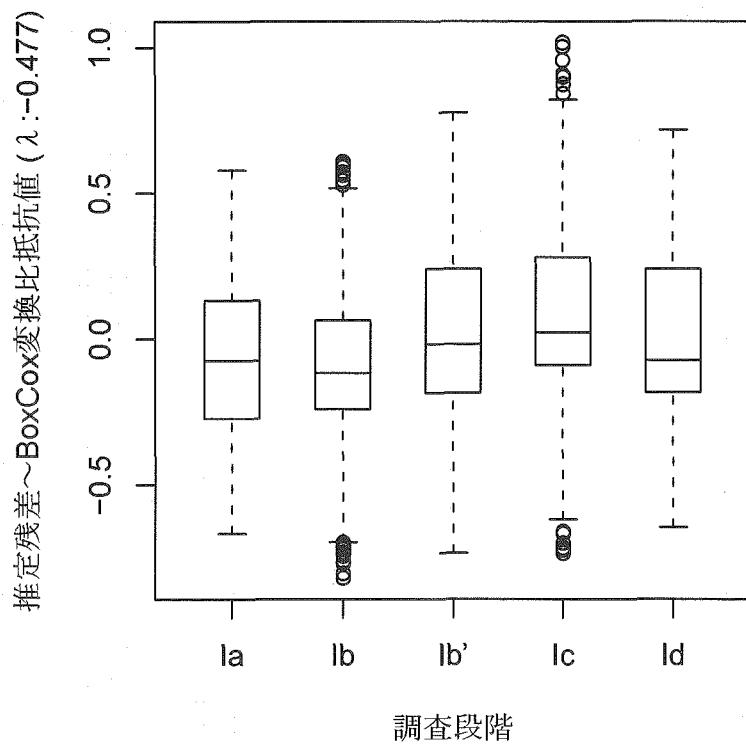


Fig. 40: 箱ひげ図による推定残差の比較～比抵抗値～（対象孔 Ia～Id 群）

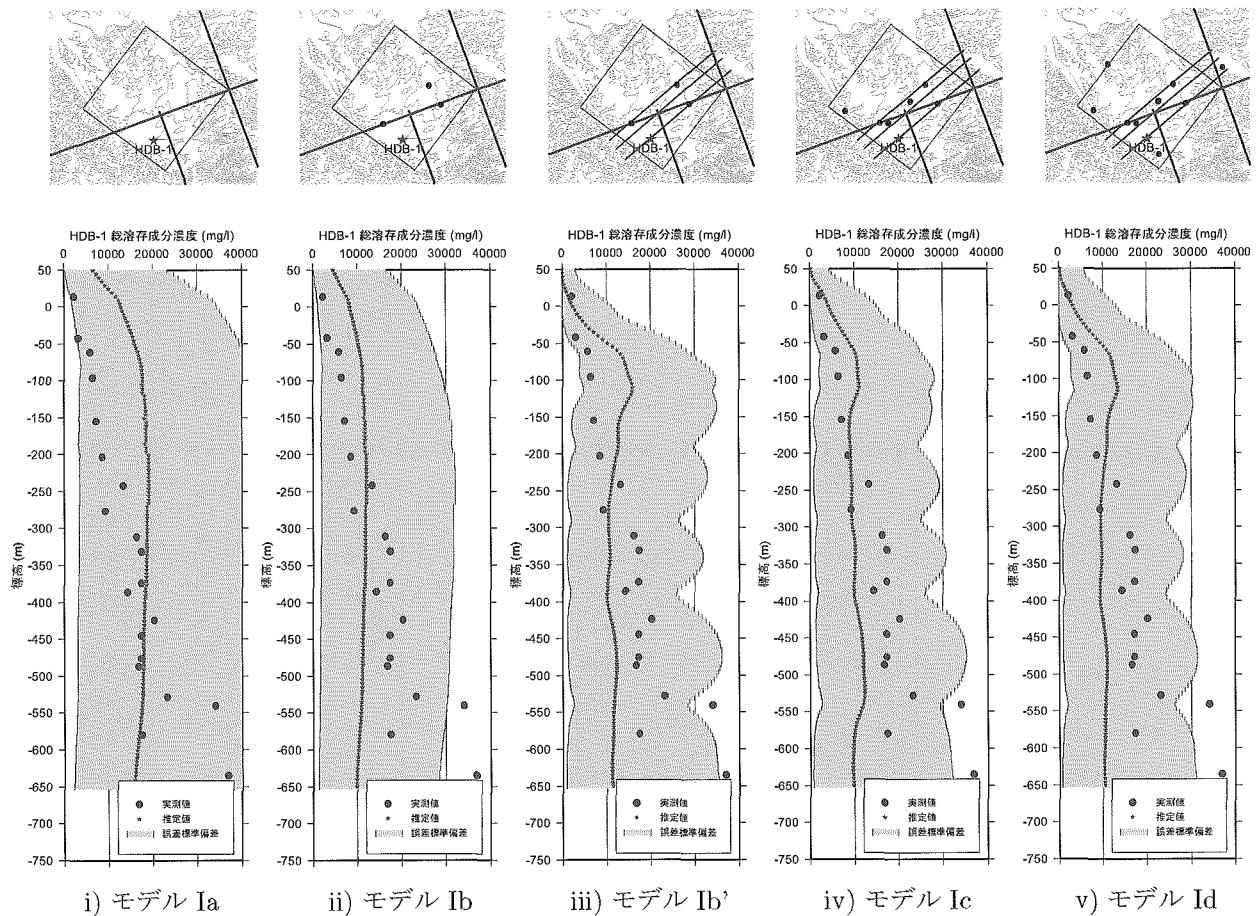


Fig. 41: 総溶存濃度の推定結果ブラインド検証～検証孔 HDB-1～

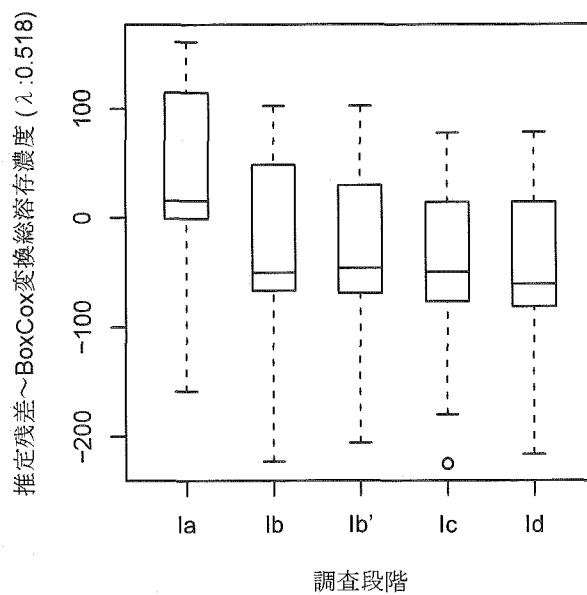


Fig. 42: 箱ひげ図による推定残差の比較～総溶存濃度 HDB-1 孔～（対象孔 Ia～Id 群）

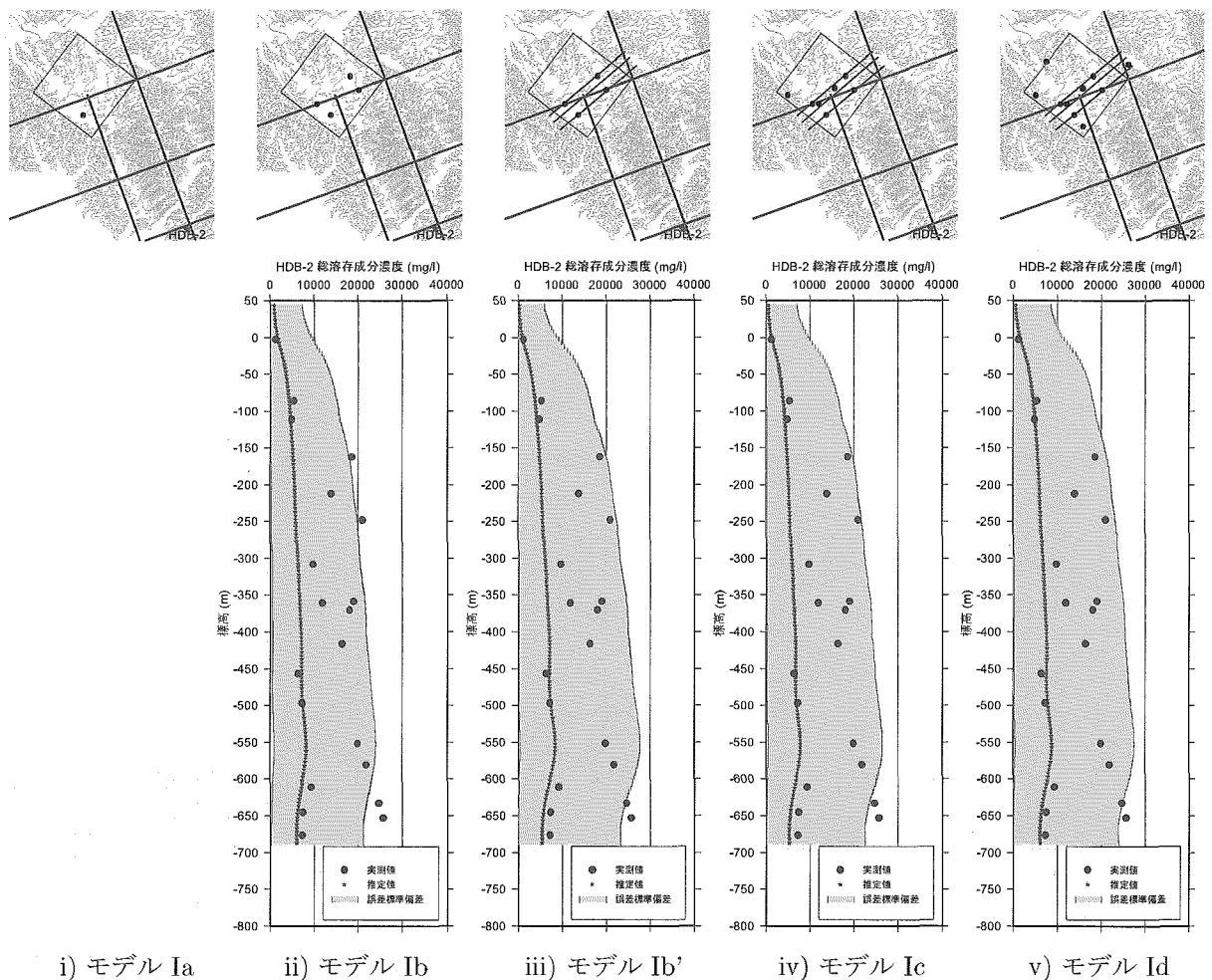


Fig. 43: 総溶存濃度の推定結果ブラインド検証～検証孔 HDB-2～

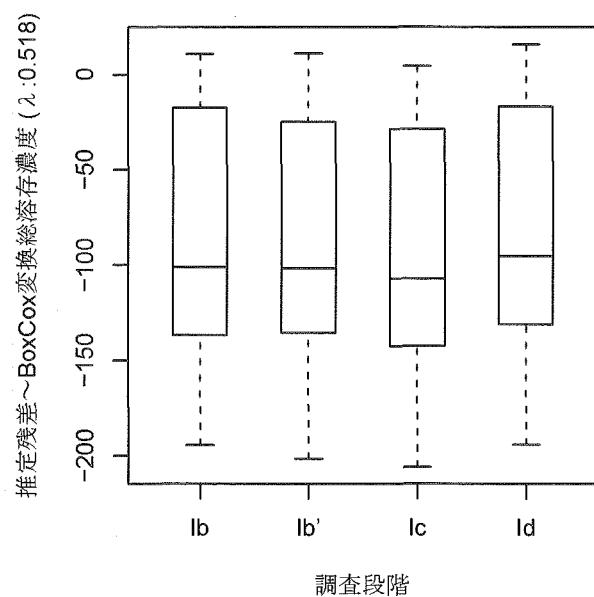


Fig. 44: 箱ひげ図による推定残差の比較～総溶存濃度 HDB-2 孔～（対象孔 Ia～Id 群）

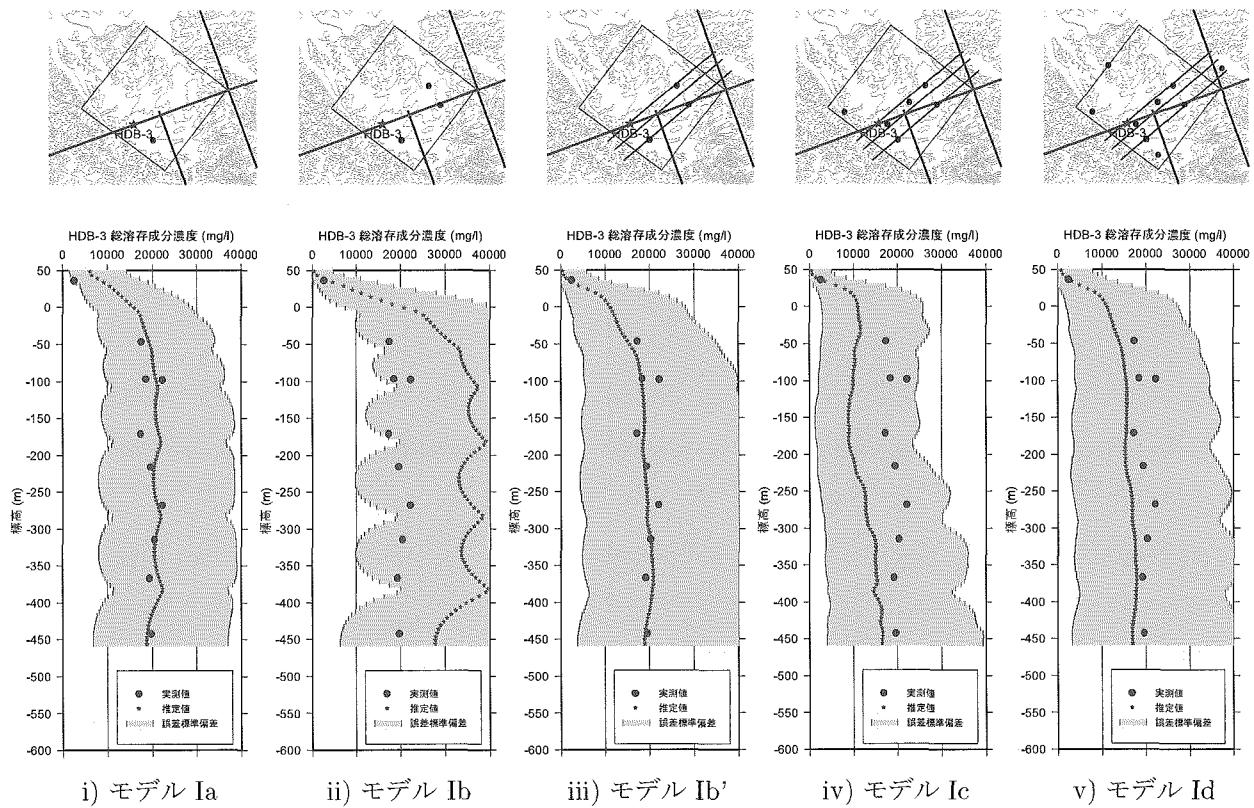


Fig. 45: 総溶存濃度の推定結果ブラインド検証～検証孔 HDB-3～

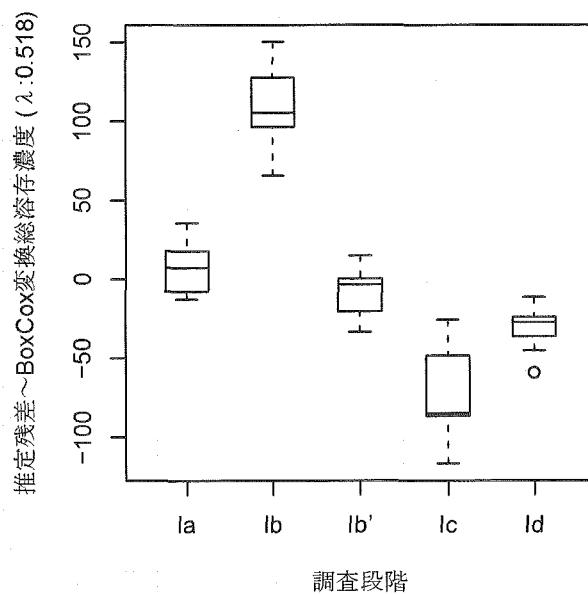


Fig. 46: 箱ひげ図による推定残差の比較～総溶存濃度 HDB-3 孔～（対象孔 Ia～Id 群）

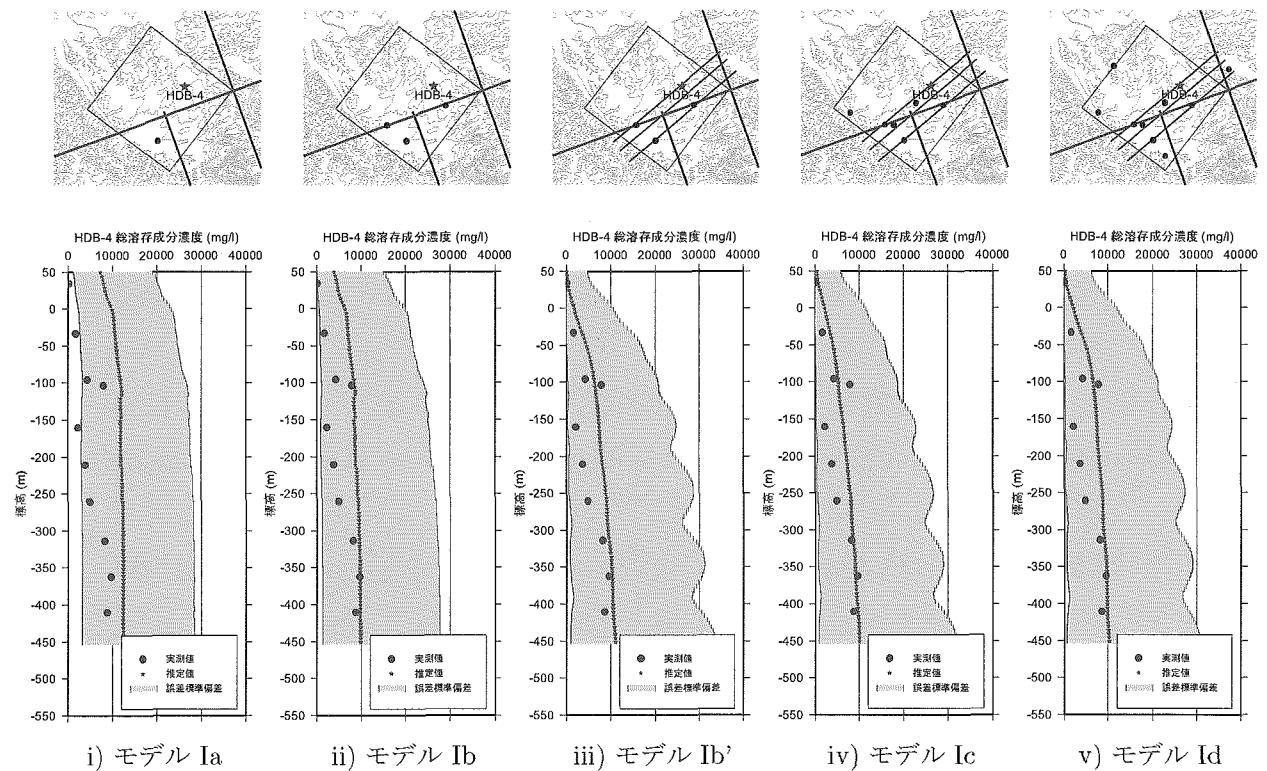


Fig. 47: 総溶存濃度の推定結果ブラインド検証～検証孔 HDB-4～

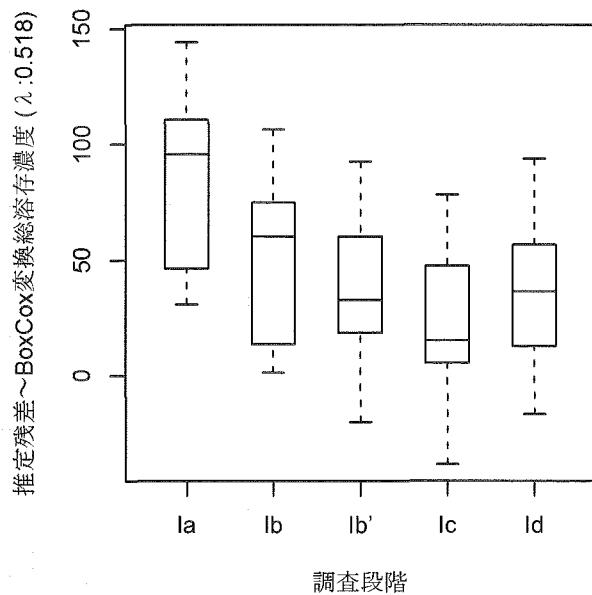


Fig. 48: 箱ひげ図による推定残差の比較～総溶存濃度 HDB-4 孔～（対象孔 Ia～Id 群）

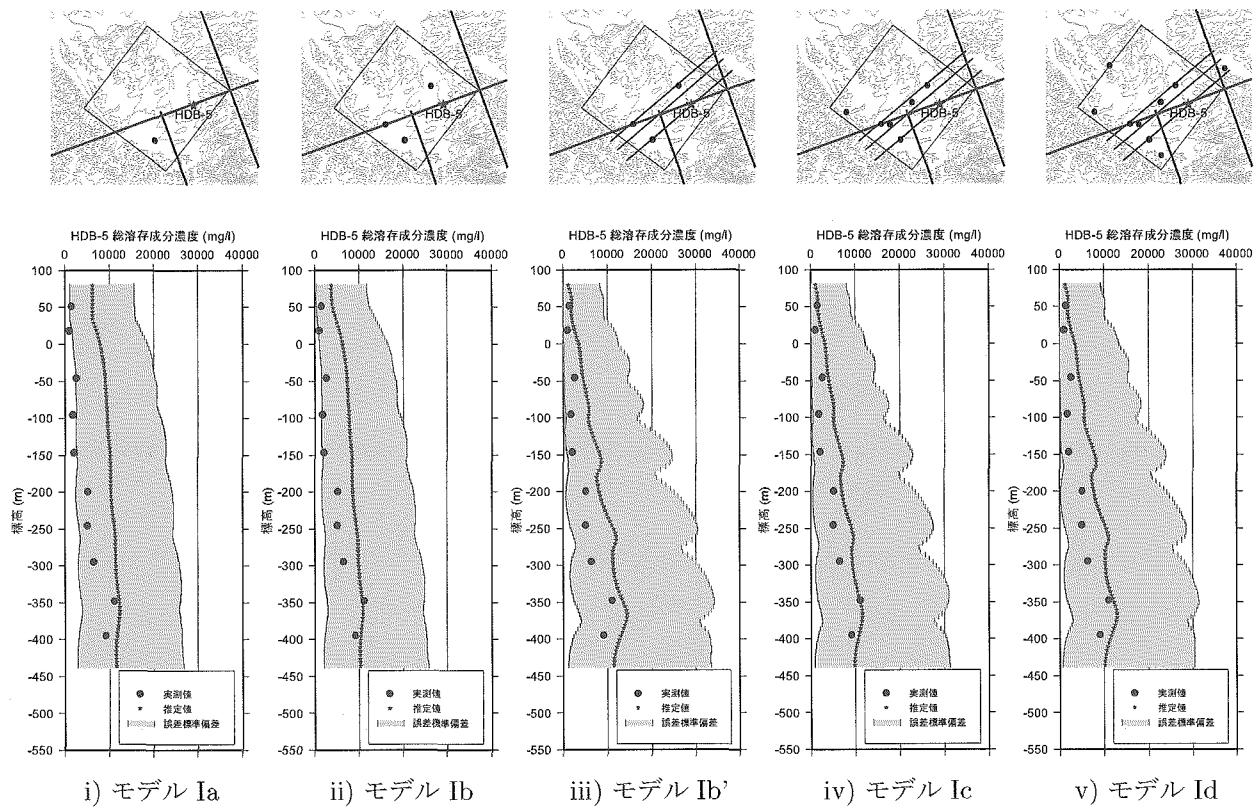


Fig. 49: 総溶存濃度の推定結果ブラインド検証～検証孔 HDB-5～

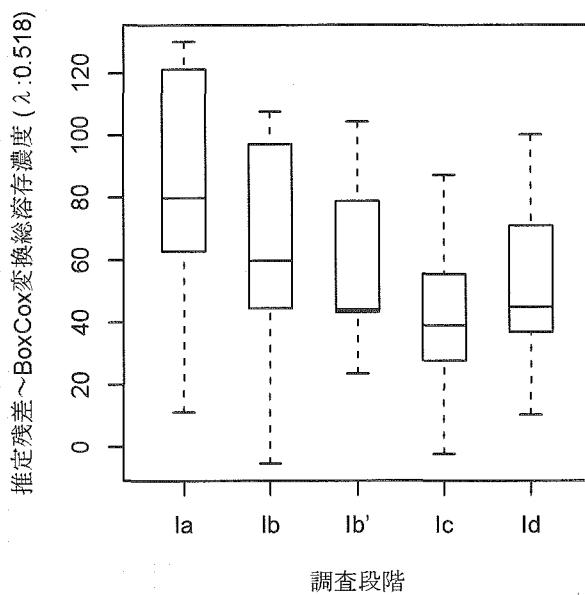


Fig. 50: 箱ひげ図による推定残差の比較～総溶存濃度 HDB-5 孔～（対象孔 Ia～Id 群）

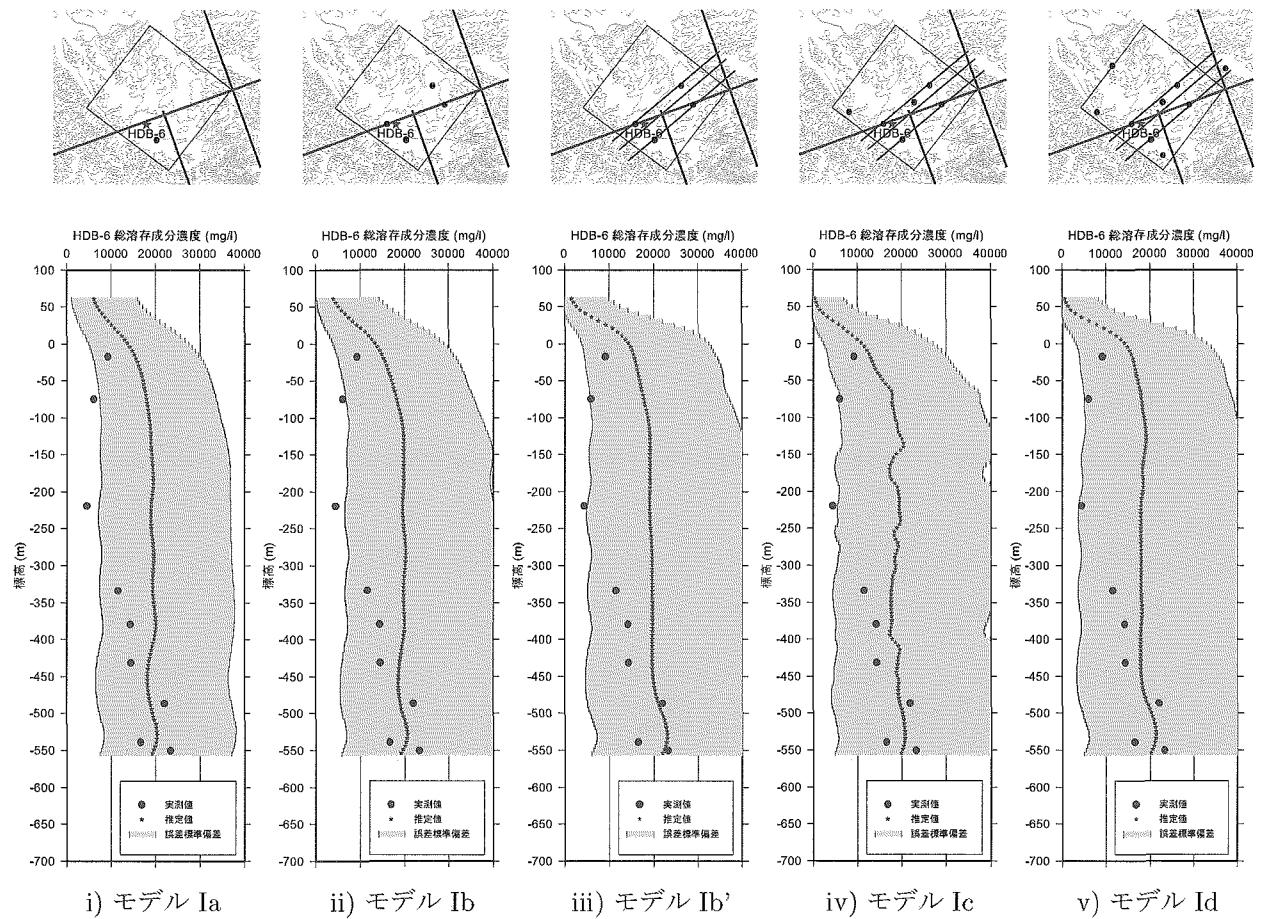


Fig. 51: 総溶存濃度の推定結果ブラインド検証～検証孔 HDB-6～

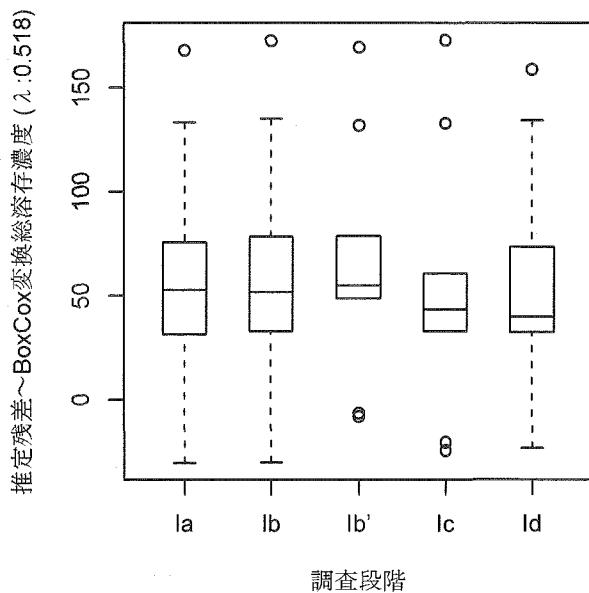


Fig. 52: 箱ひげ図による推定残差の比較～総溶存濃度 HDB-6 孔～（対象孔 Ia～Id 群）

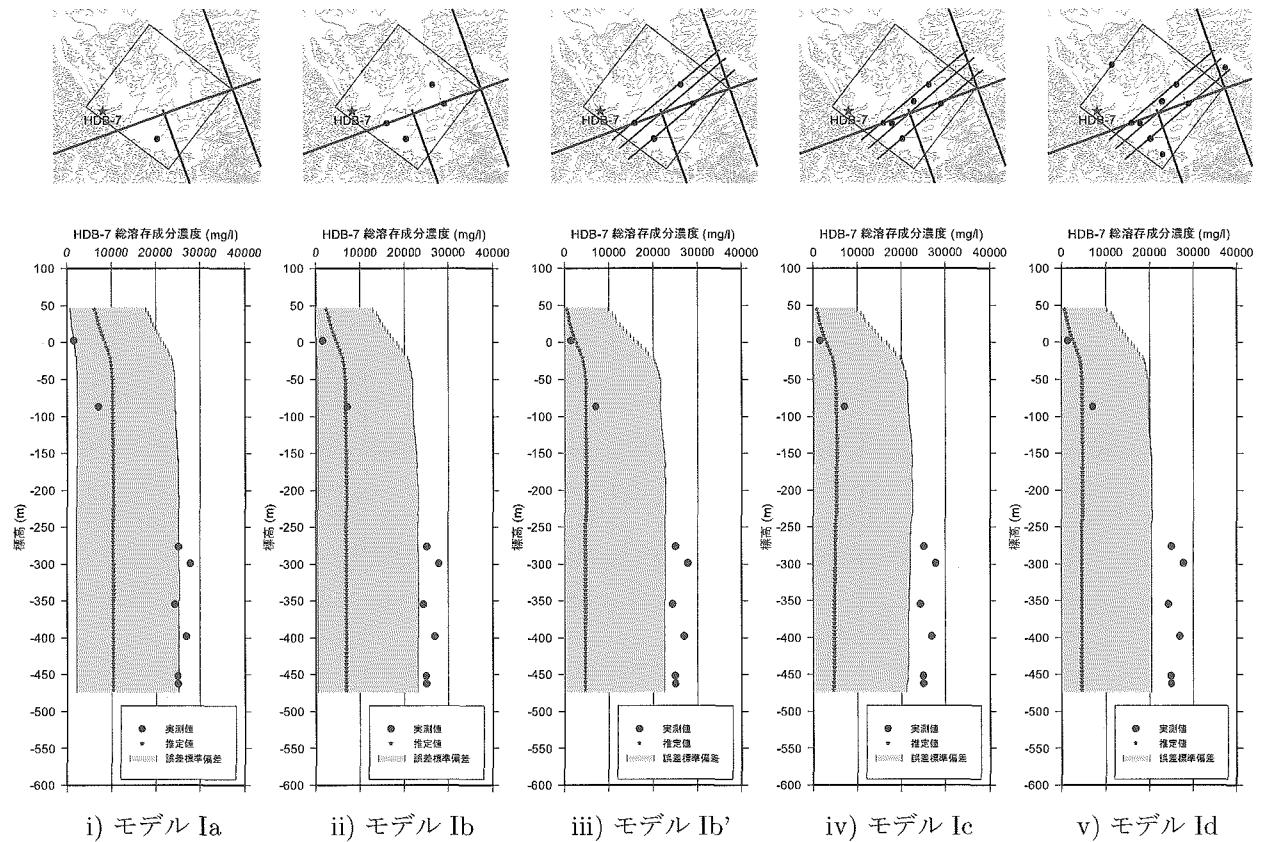


Fig. 53: 総溶存濃度の推定結果ブラインド検証～検証孔 HDB-7～

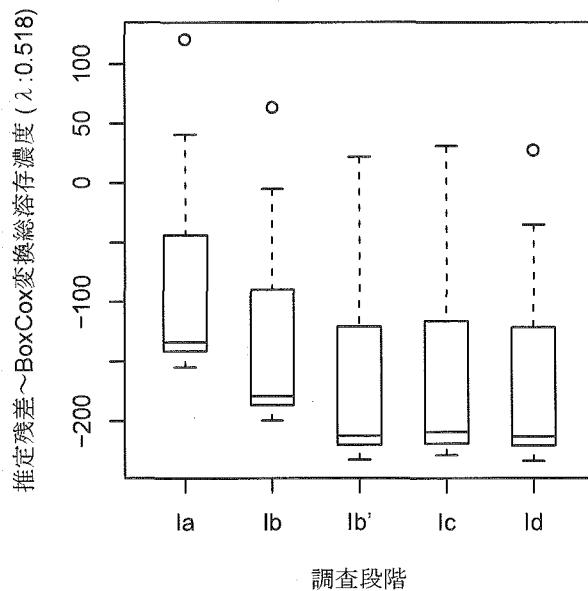


Fig. 54: 箱ひげ図による推定残差の比較～総溶存濃度 HDB-7 孔～（対象孔 Ia～Id 群）

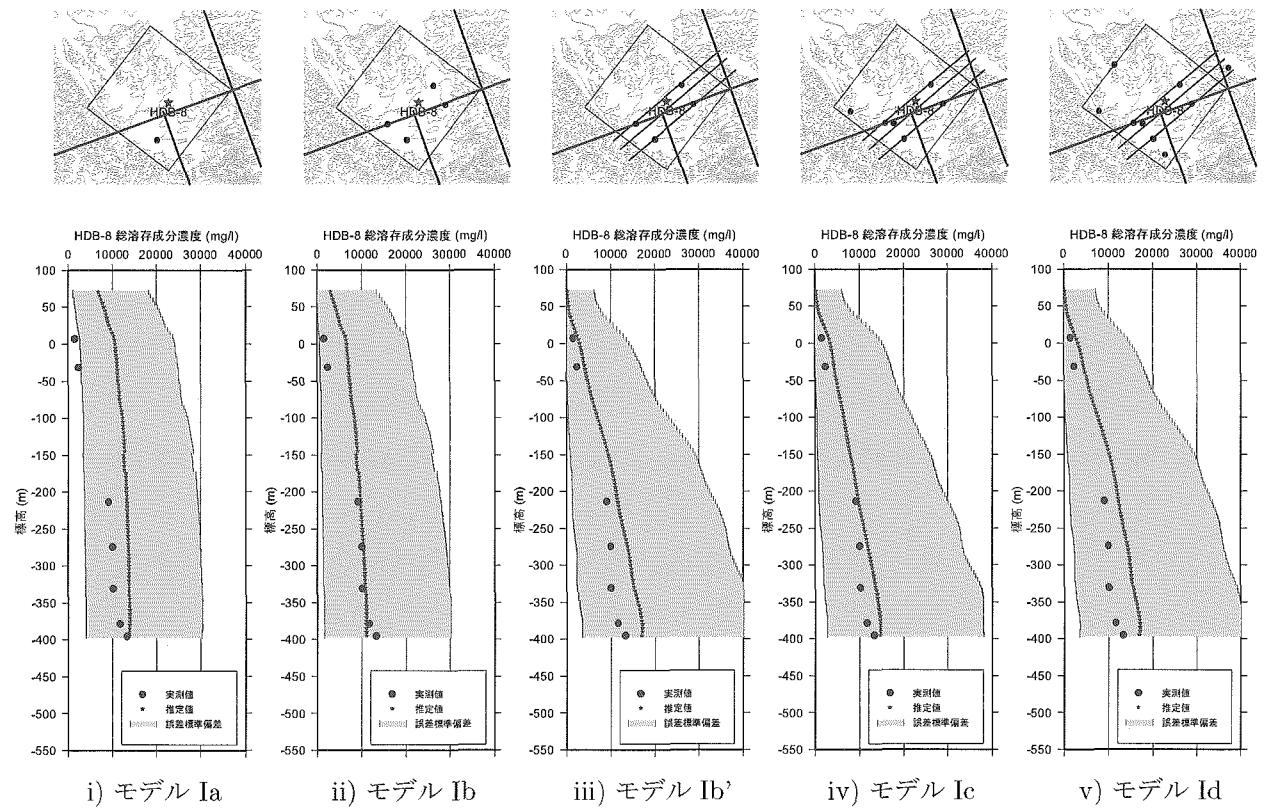


Fig. 55: 総溶存濃度の推定結果ブラインド検証～検証孔 HDB-8～

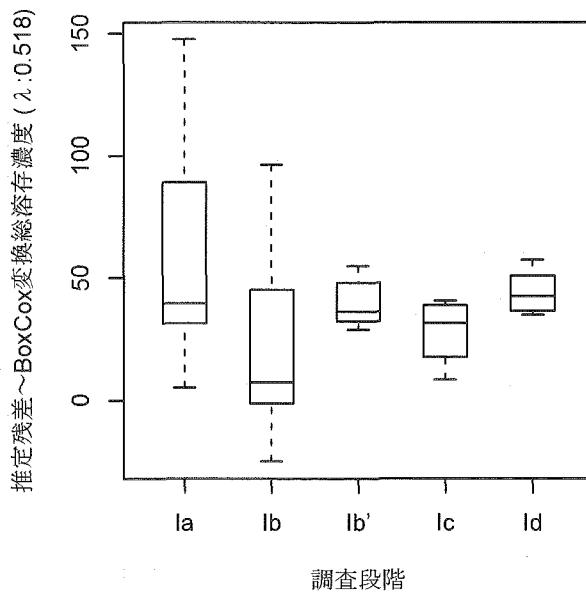


Fig. 56: 箱ひげ図による推定残差の比較～総溶存濃度 HDB-8 孔～（対象孔 Ia～Id 群）

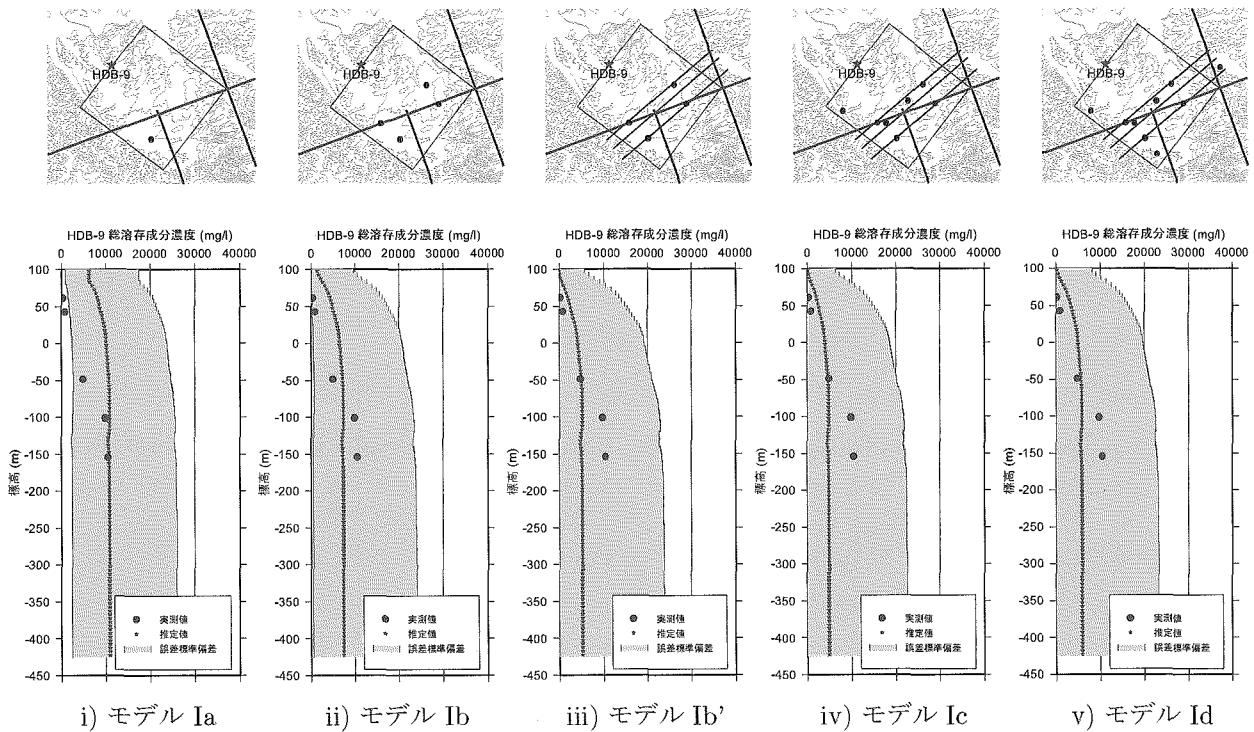


Fig. 57: 総溶存濃度の推定結果ブラインド検証～検証孔 HDB-9～

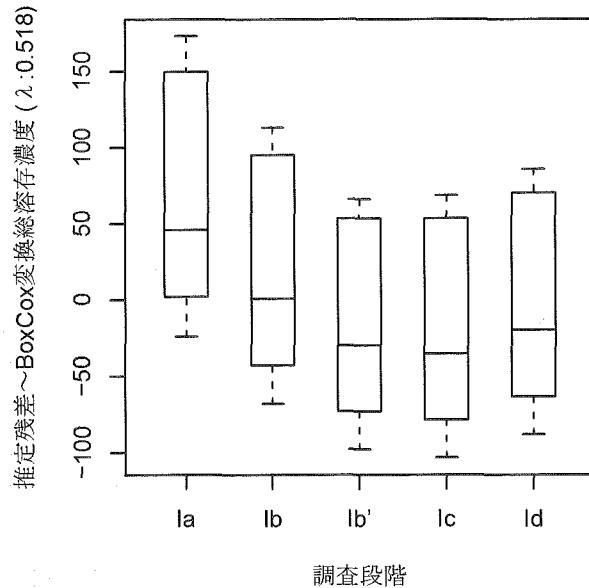


Fig. 58: 箱ひげ図による推定残差の比較～総溶存濃度 HDB-9 孔～（対象孔 Ia～Id 群）

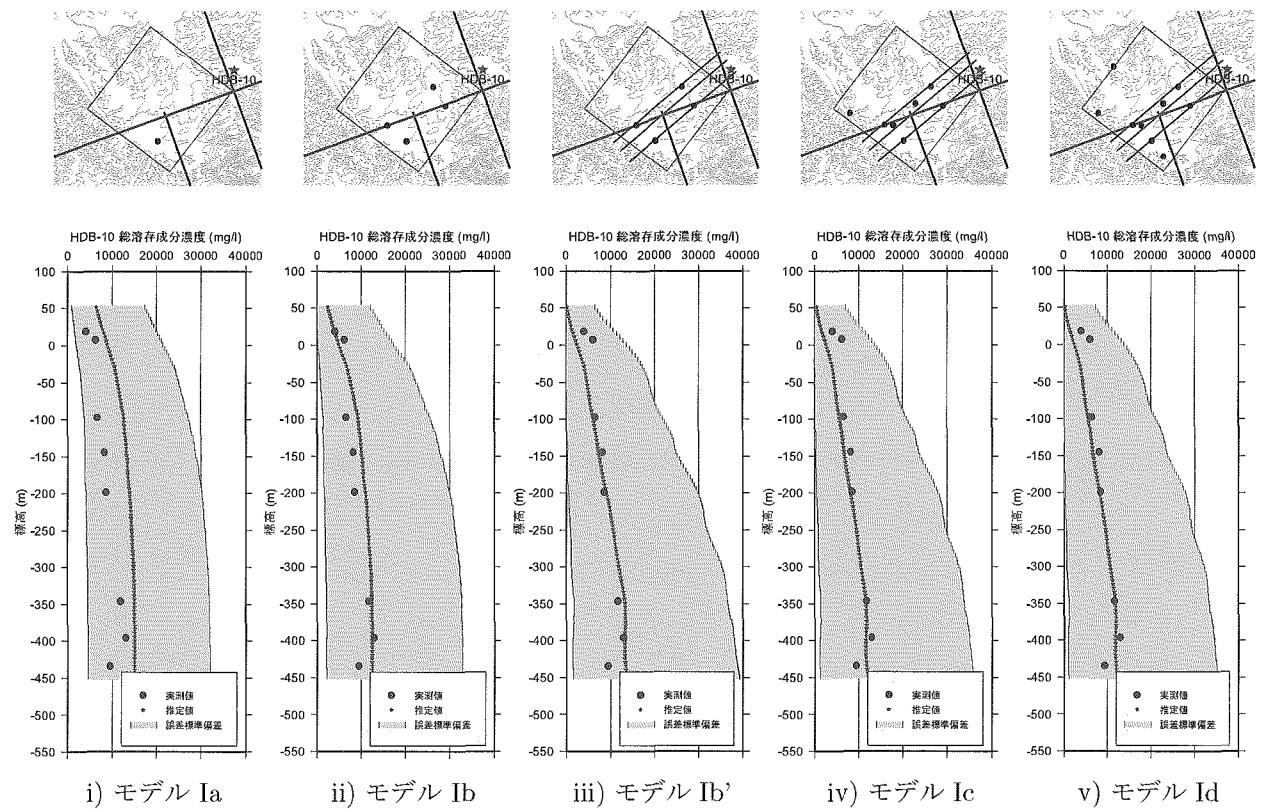


Fig. 59: 総溶存濃度の推定結果ブラインド検証～検証孔 HDB-10～

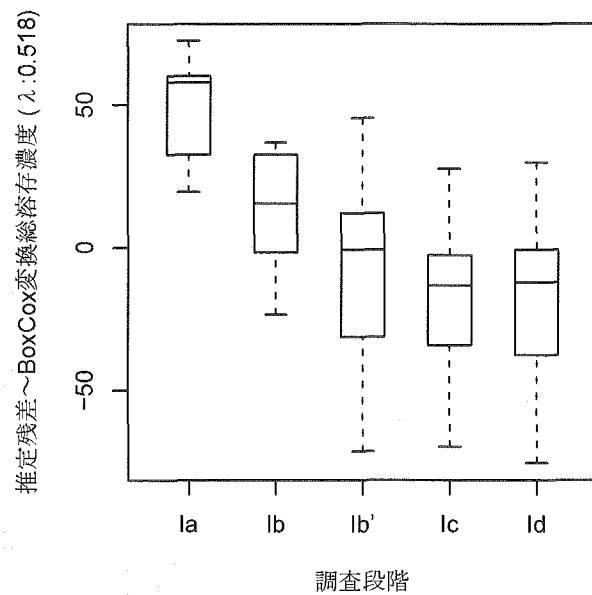


Fig. 60: 箱ひげ図による推定残差の比較～総溶存濃度 HDB-10 孔～（対象孔 Ia～Id 群）

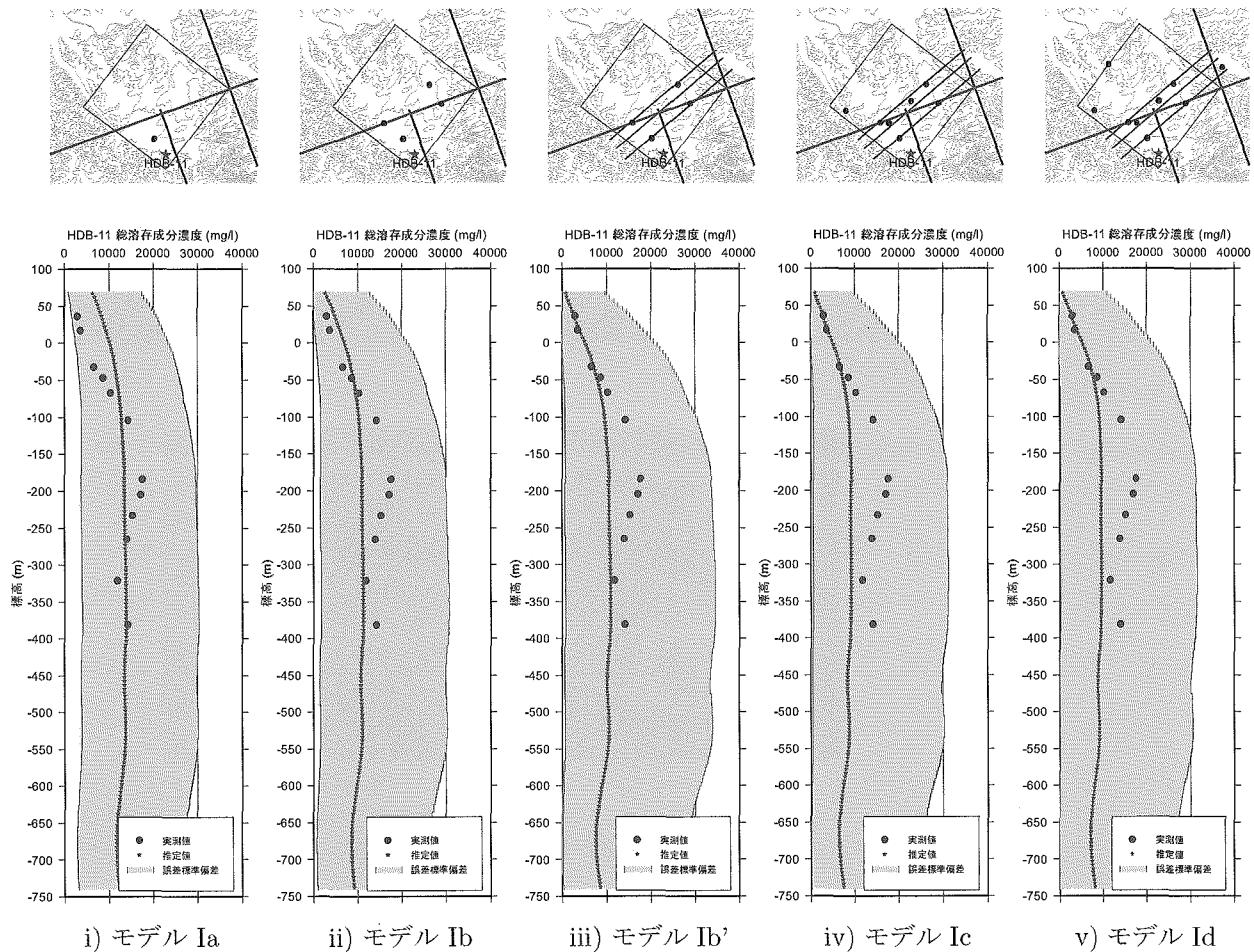


Fig. 61: 総溶存濃度の推定結果ブラインド検証～検証孔 HDB-11～

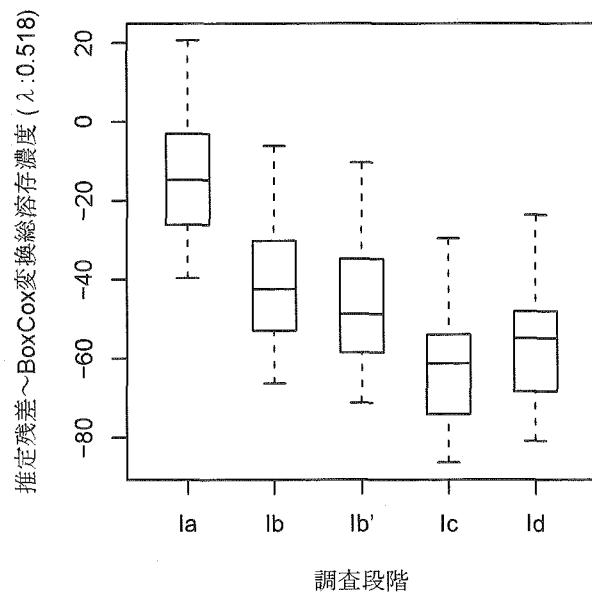


Fig. 62: 箱ひげ図による推定残差の比較～総溶存濃度 HDB-11 孔～（対象孔 Ia～Id 群）

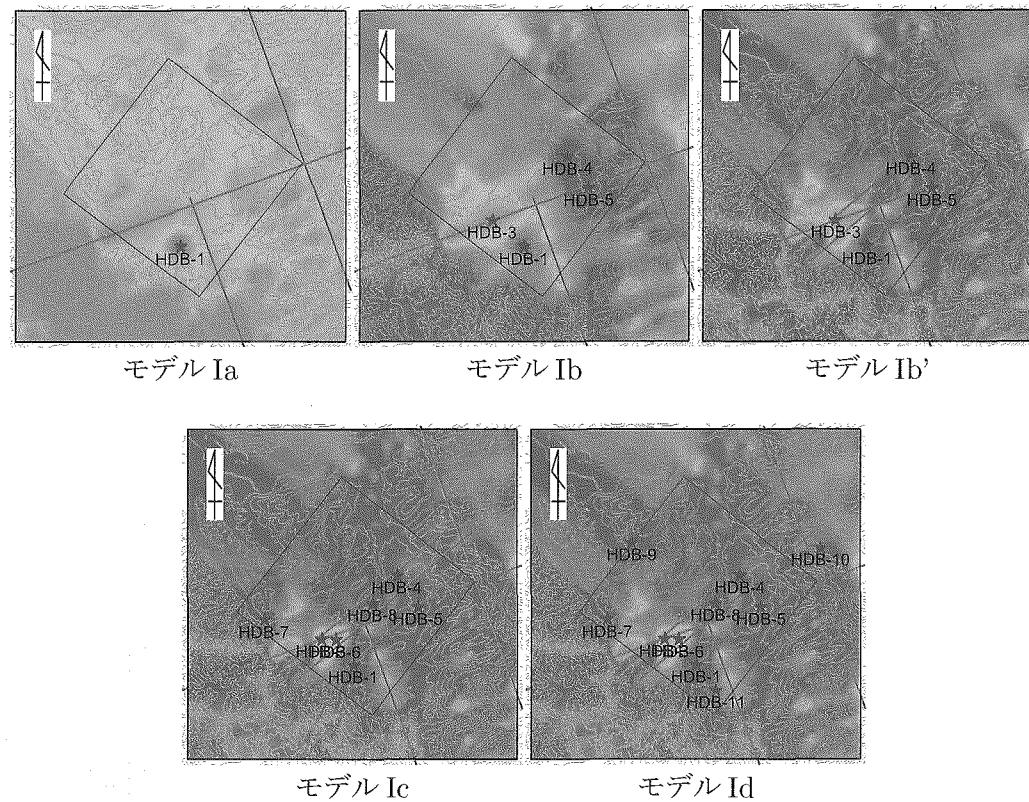


Fig. 63: 推定総溶存濃度分布（標高 0m 水平断面）

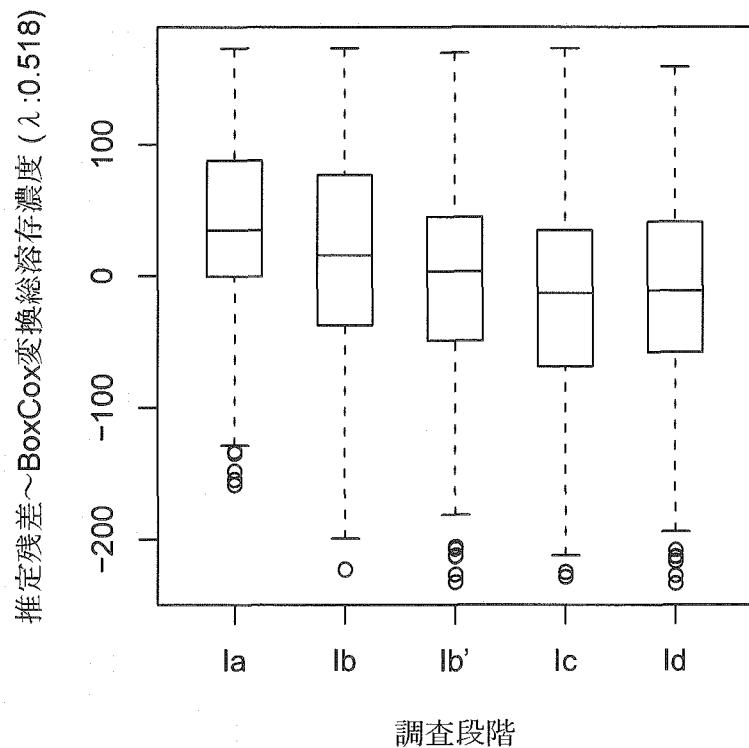


Fig. 64: 箱ひげ図による推定残差の比較～総溶存濃度～（対象孔 Ia～Id 群）

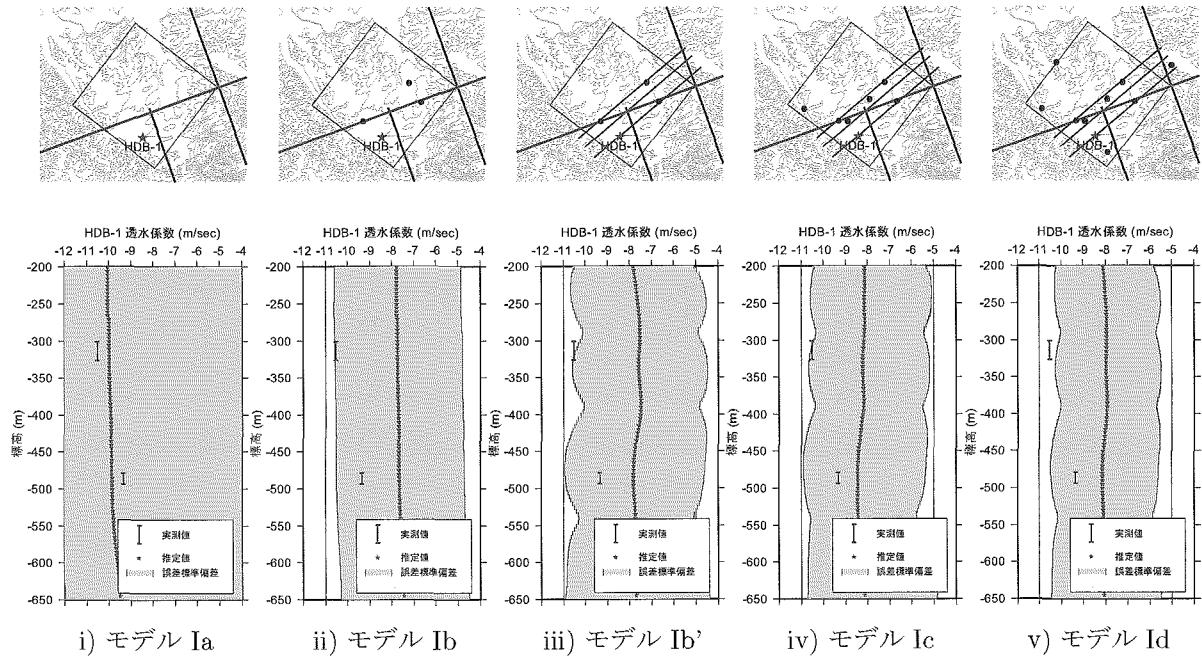


Fig. 65: 透水係数の推定結果ブラインド検証～検証孔 HDB-1～

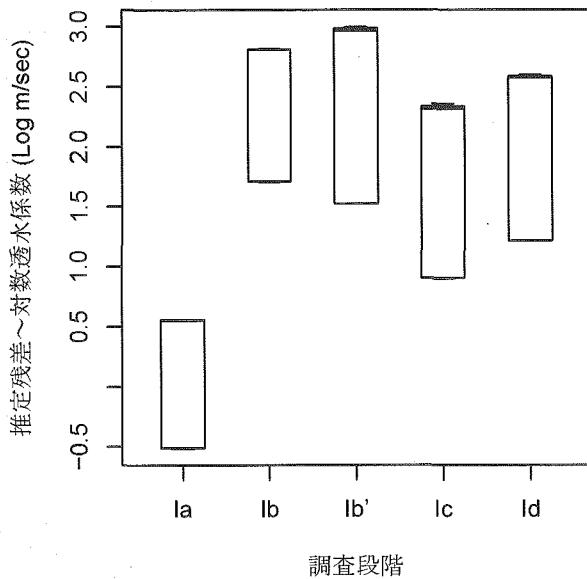


Fig. 66: 箱ひげ図による推定残差の比較～透水係数 HDB-1 孔～（対象孔 Ia～Id 群）

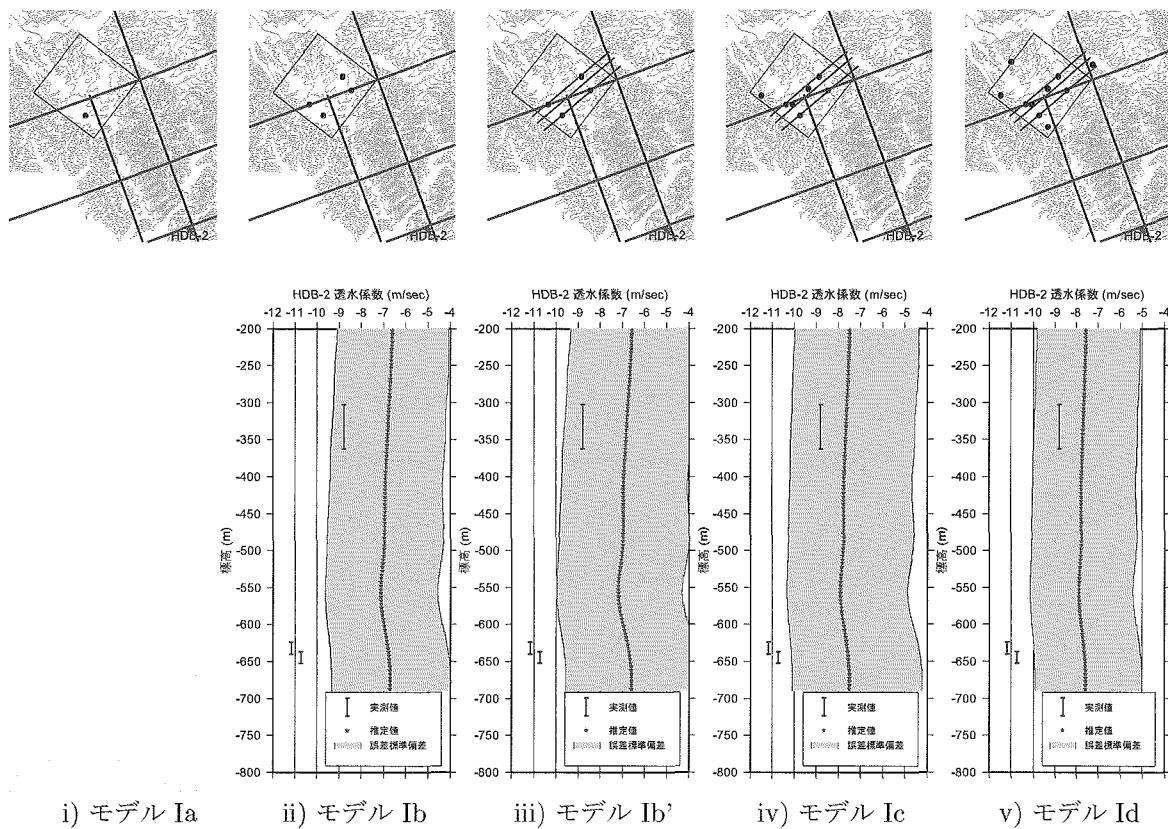


Fig. 67: 透水係数の推定結果ブラインド検証～検証孔 HDB-2～

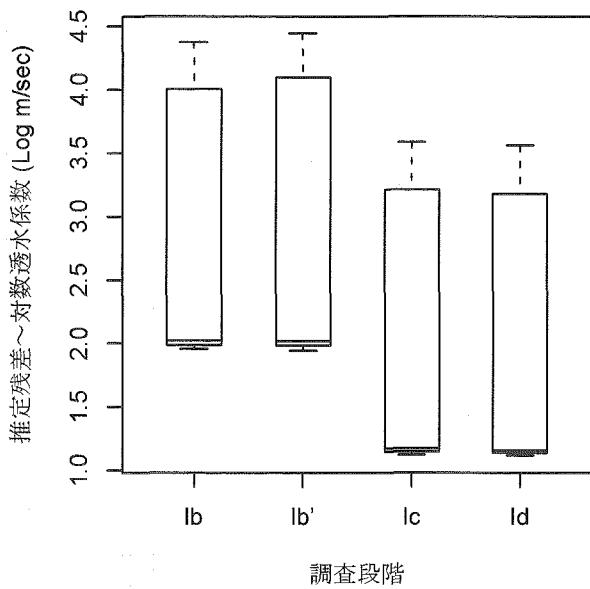


Fig. 68: 箱ひげ図による推定残差の比較～透水係数 HDB-2 孔～（対象孔 Ia～Id 群）

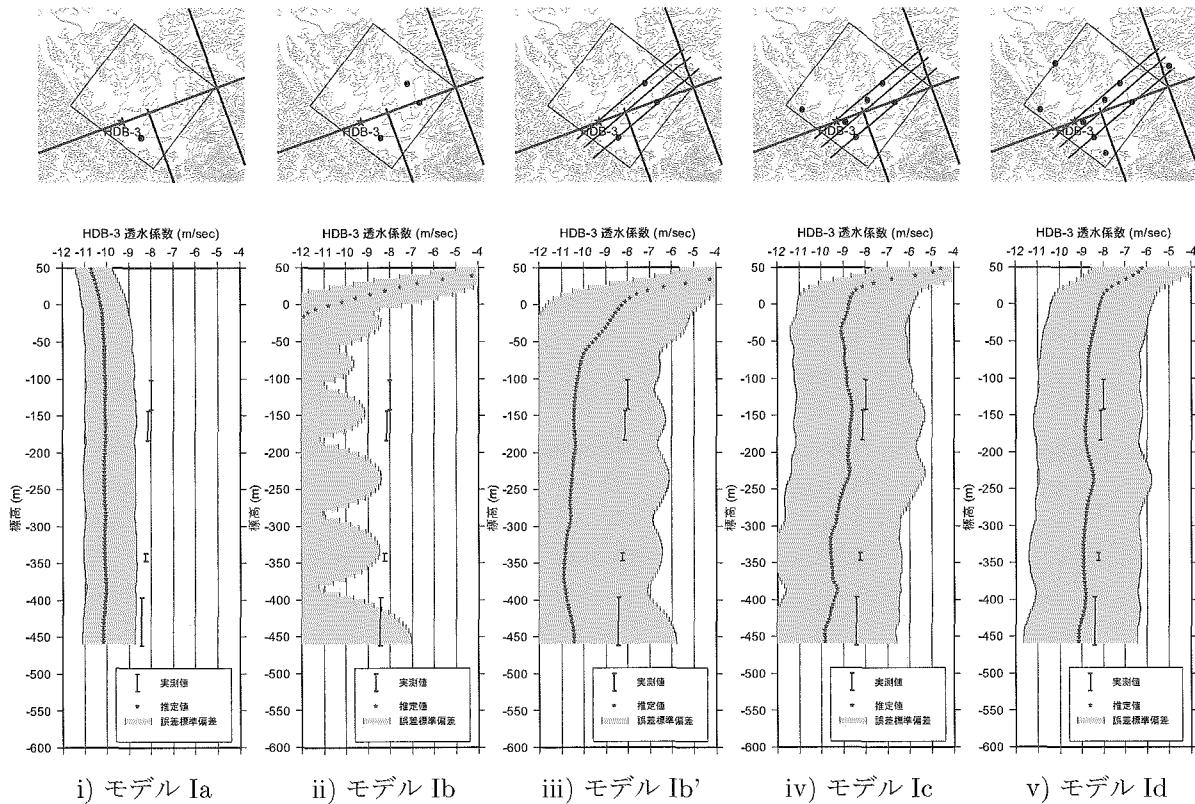


Fig. 69: 透水係数の推定結果ブラインド検証～検証孔 HDB-3～

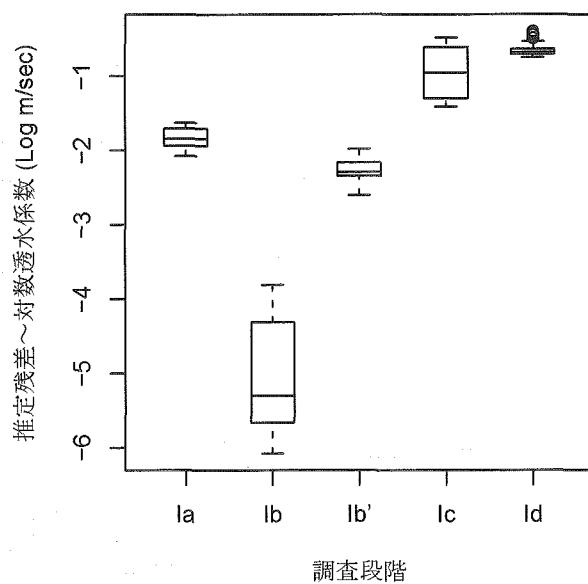


Fig. 70: 箱ひげ図による推定残差の比較～透水係数 HDB-3 孔～（対象孔 Ia～Id 群）

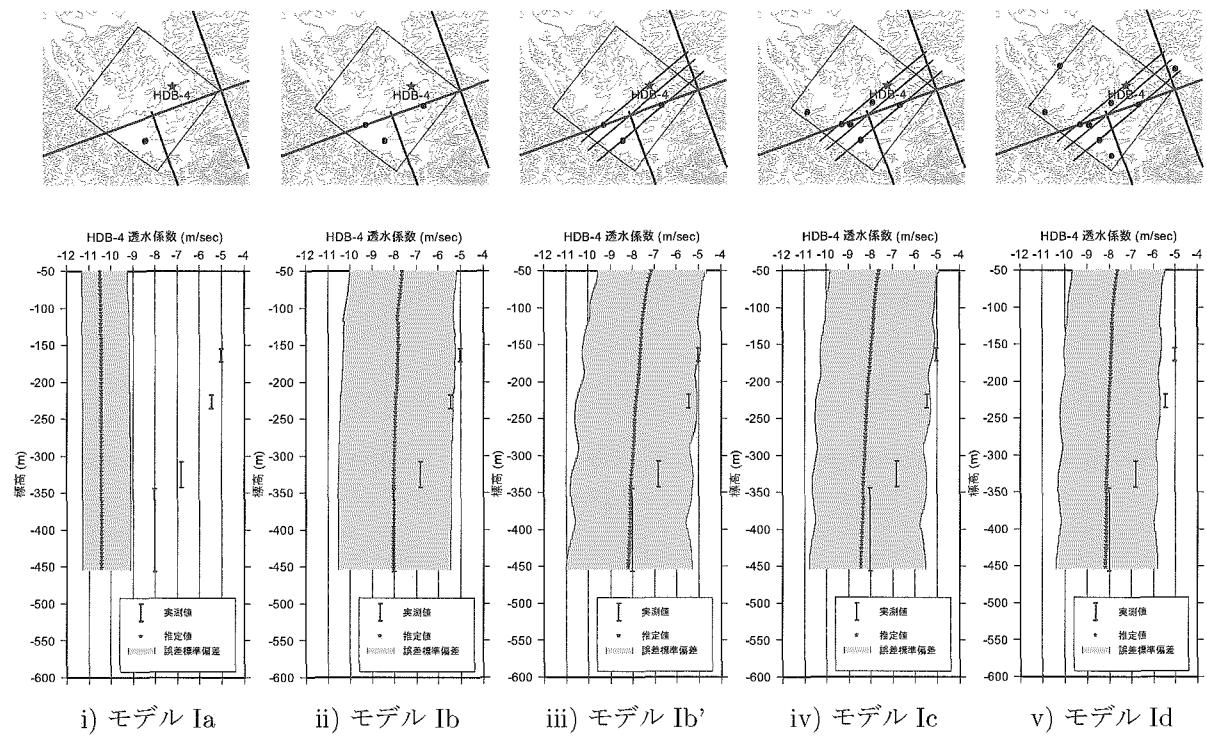


Fig. 71: 透水係数の推定結果ブラインド検証～検証孔 HDB-4～

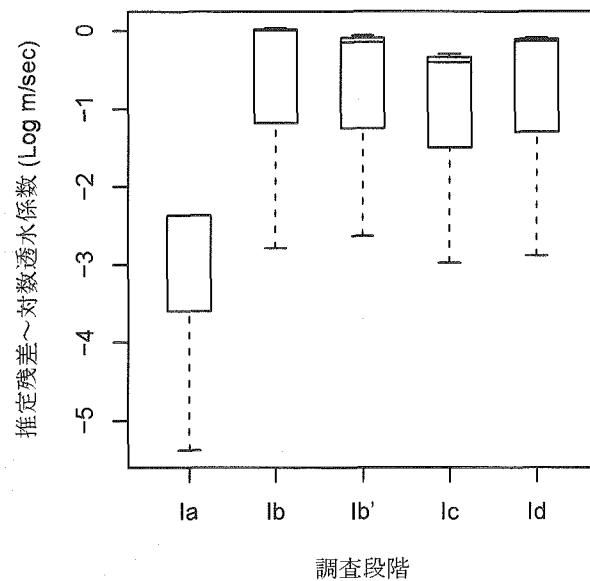


Fig. 72: 箱ひげ図による推定残差の比較～透水係数 HDB-4 孔～（対象孔 Ia～Id 群）

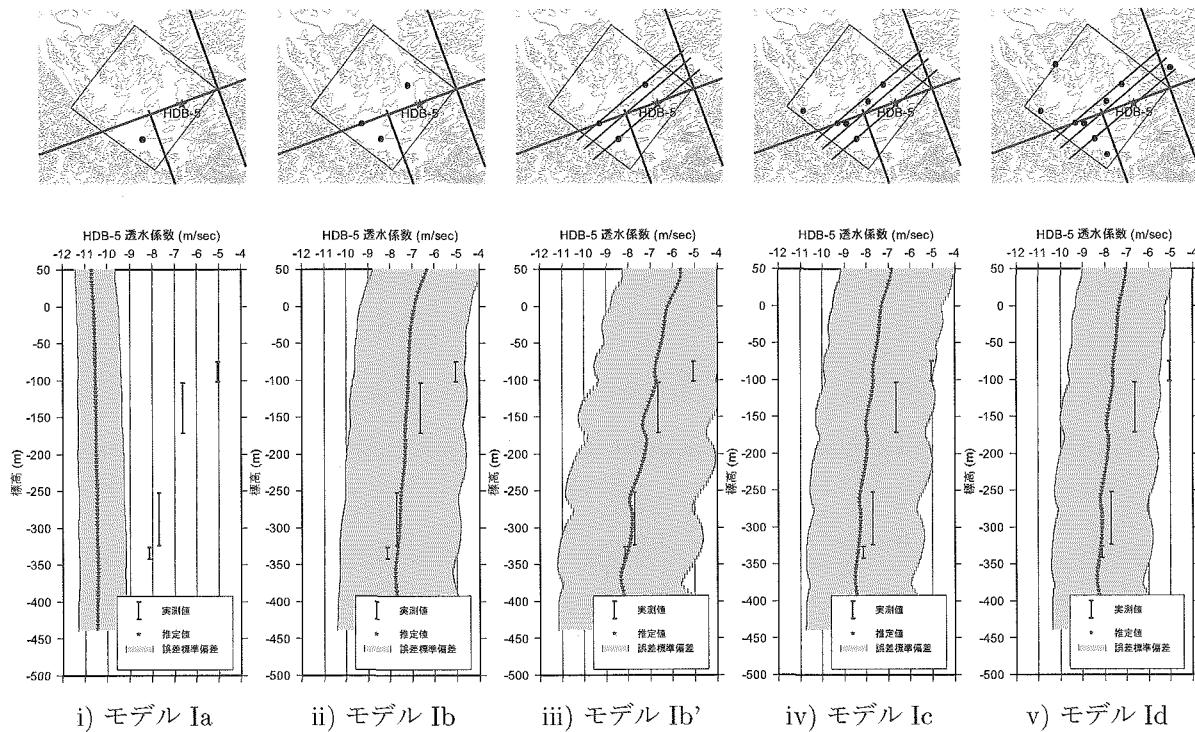


Fig. 73: 透水係数の推定結果ブラインド検証～検証孔 HDB-5～

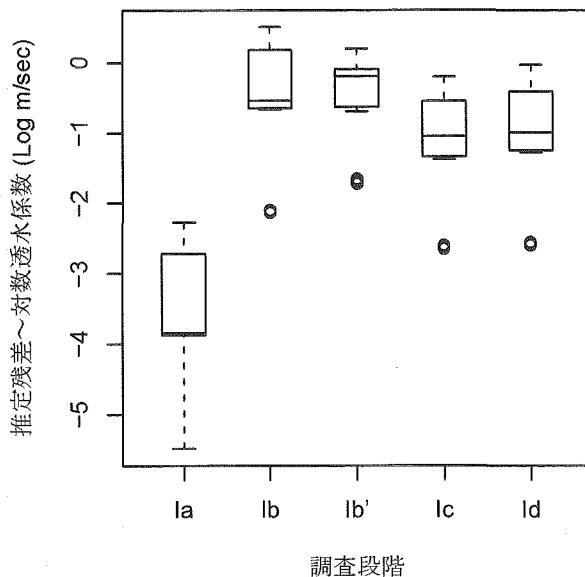


Fig. 74: 箱ひげ図による推定残差の比較～透水係数 HDB-5 孔～ (対象孔 Ia～Id 群)

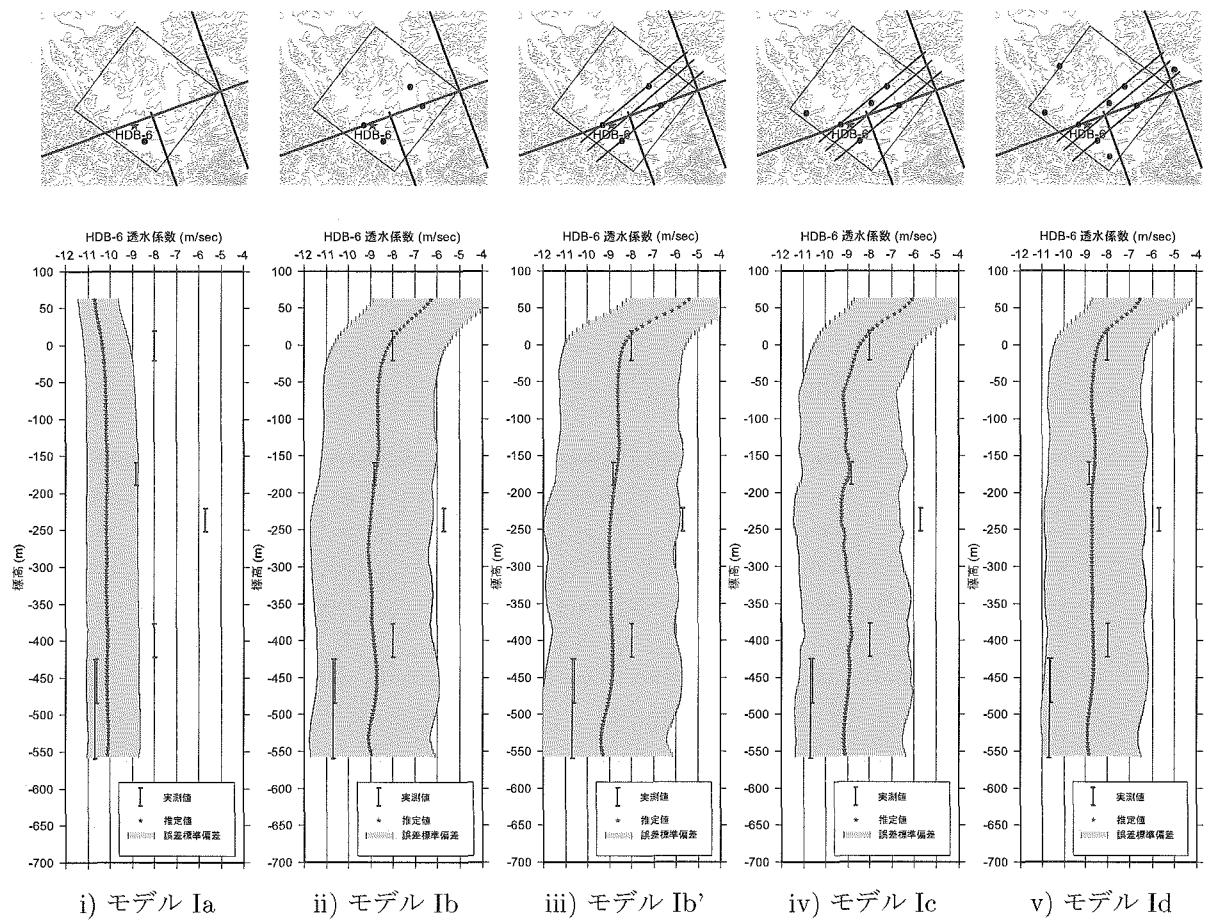


Fig. 75: 透水係数の推定結果ブラインド検証～検証孔 HDB-6～

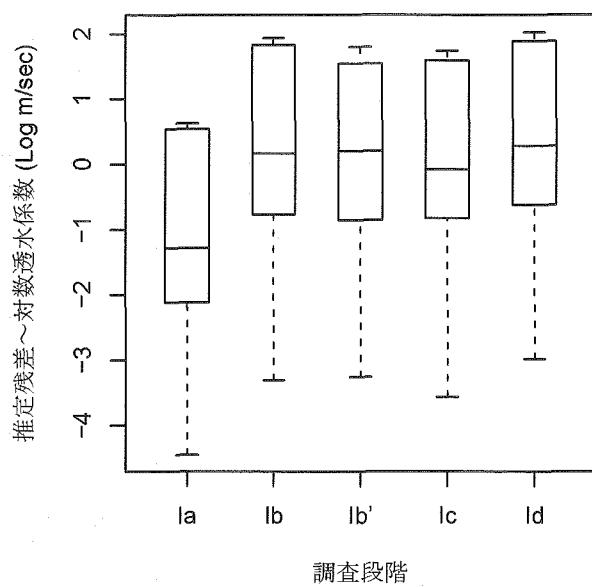


Fig. 76: 箱ひげ図による推定残差の比較～透水係数 HDB-6 孔～（対象孔 Ia～Id 群）

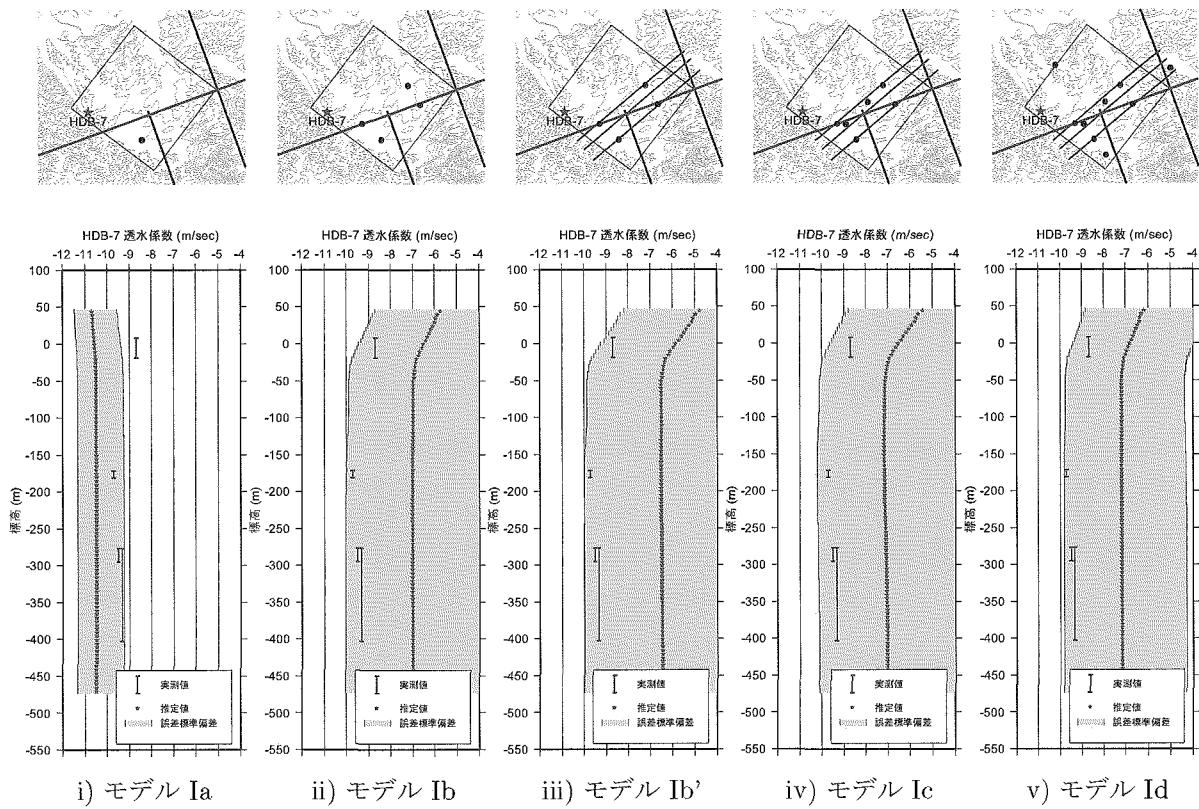


Fig. 77: 透水係数の推定結果ブラインド検証～検証孔 HDB-7～

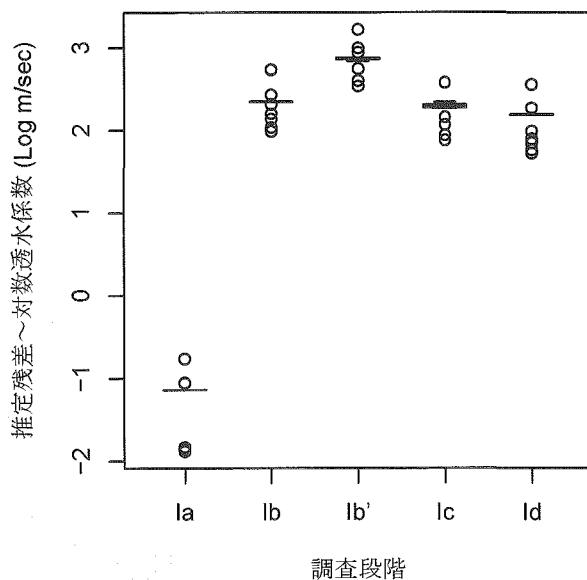


Fig. 78: 箱ひげ図による推定残差の比較～透水係数 HDB-7 孔～（対象孔 Ia～Id 群）

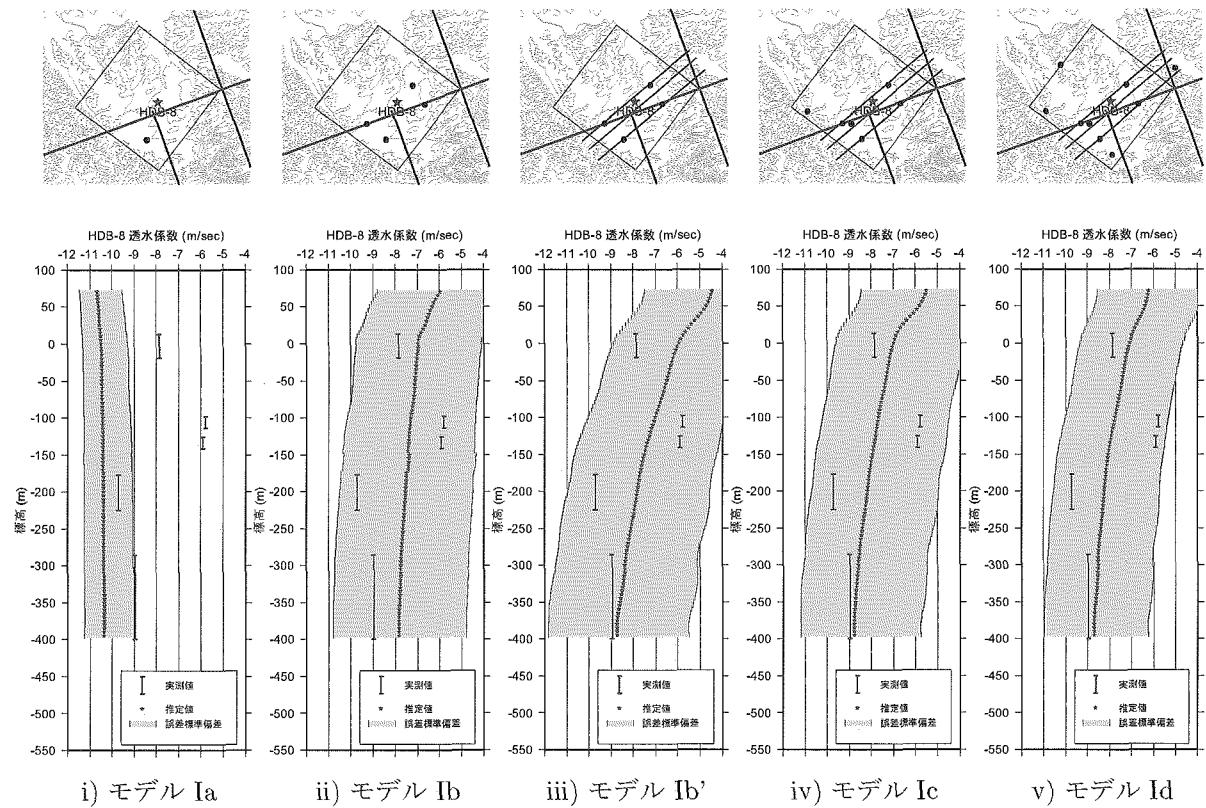


Fig. 79: 透水係数の推定結果ブラインド検証～検証孔 HDB-8～

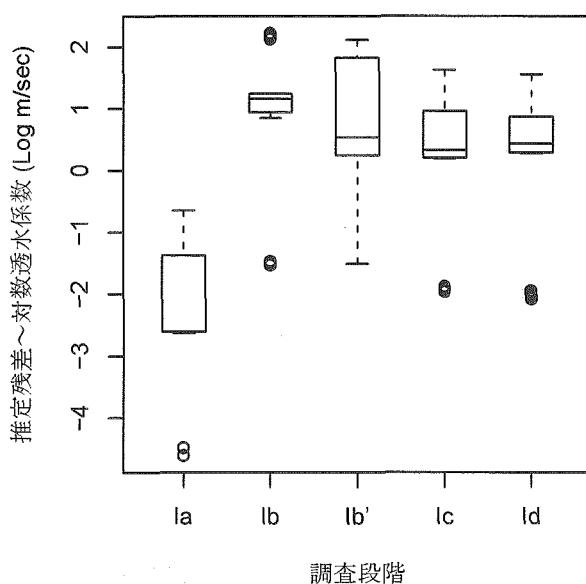


Fig. 80: 箱ひげ図による推定残差の比較～透水係数 HDB-8 孔～（対象孔 Ia～Id 群）

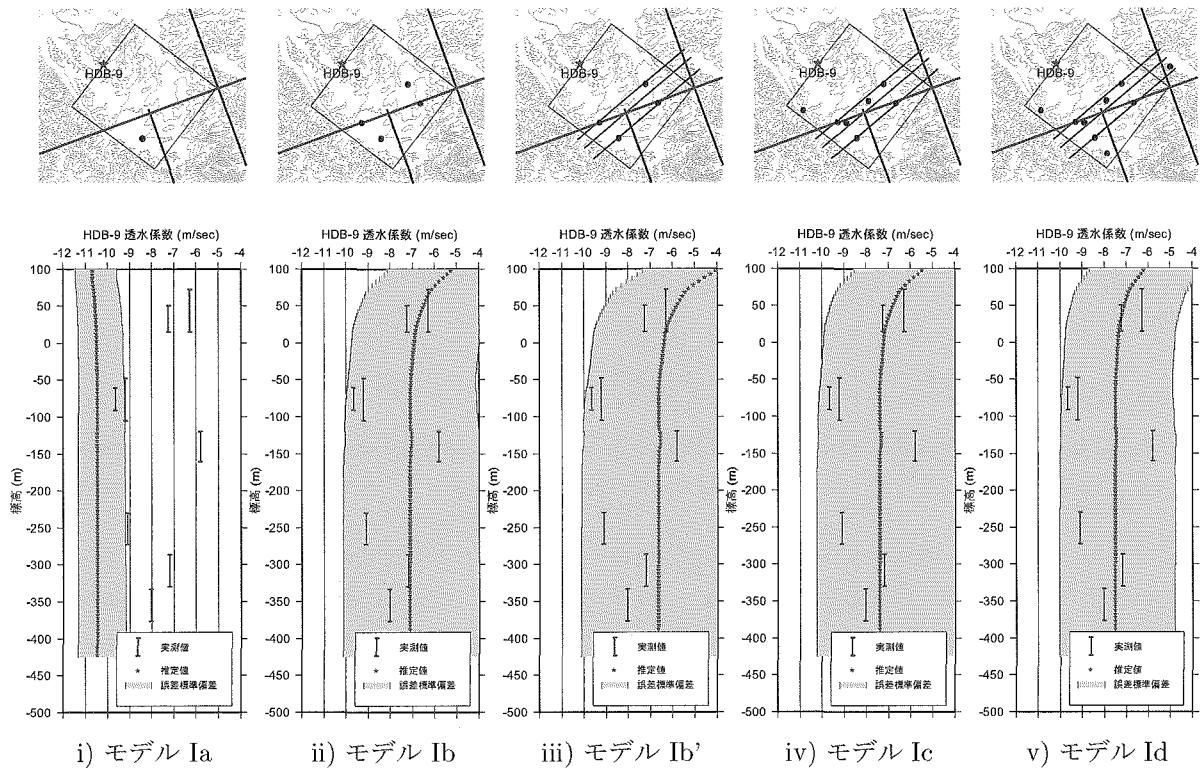


Fig. 81: 透水係数の推定結果ブラインド検証～検証孔 HDB-9～

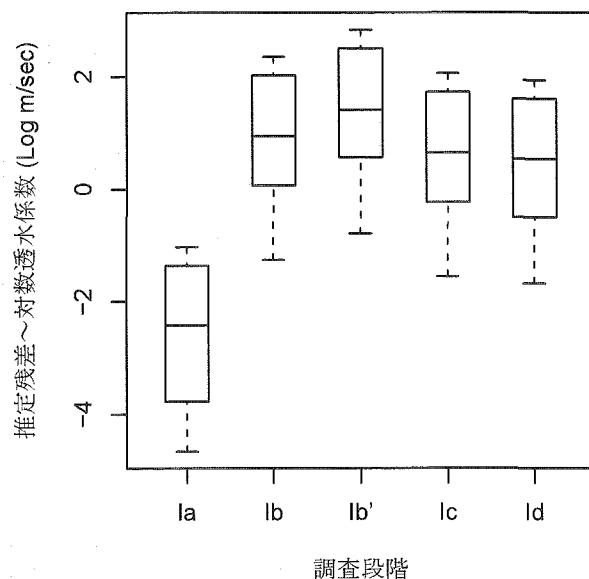


Fig. 82: 箱ひげ図による推定残差の比較～透水係数 HDB-9 孔～（対象孔 Ia～Id 群）

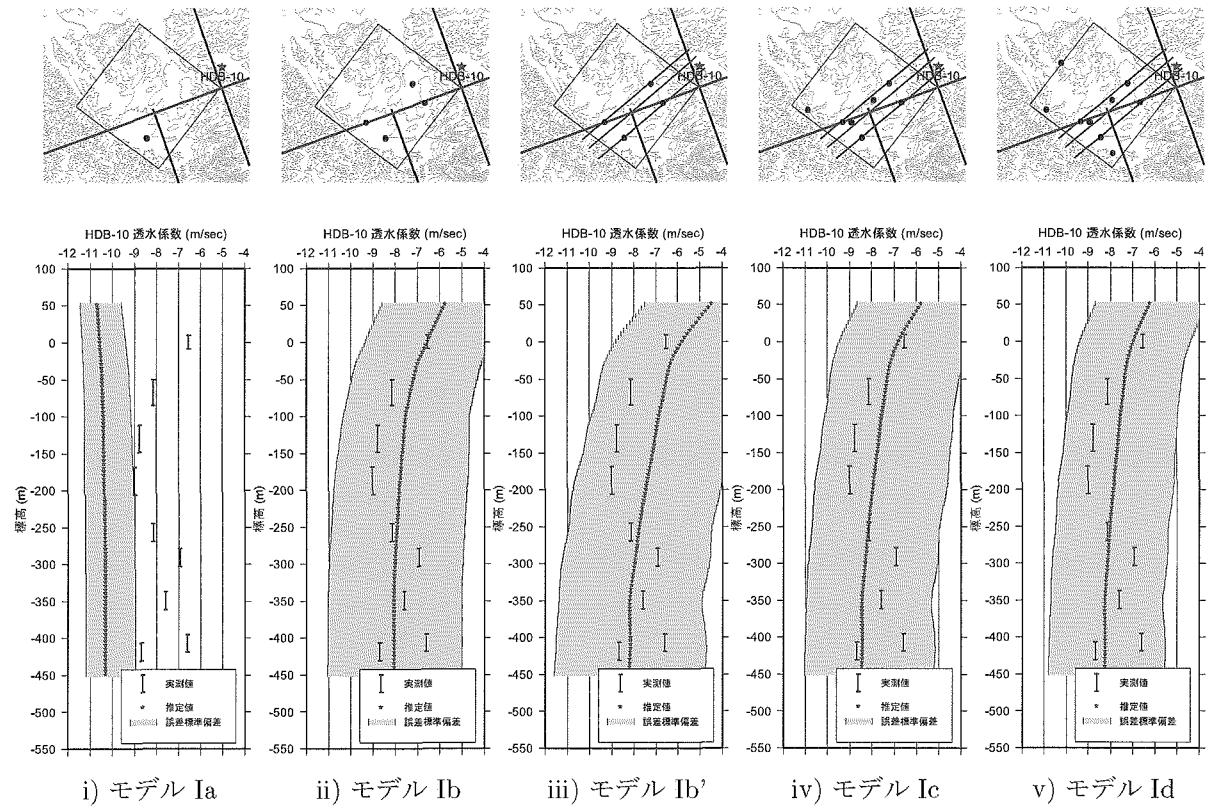


Fig. 83: 透水係数の推定結果ブラインド検証～検証孔 HDB-10～

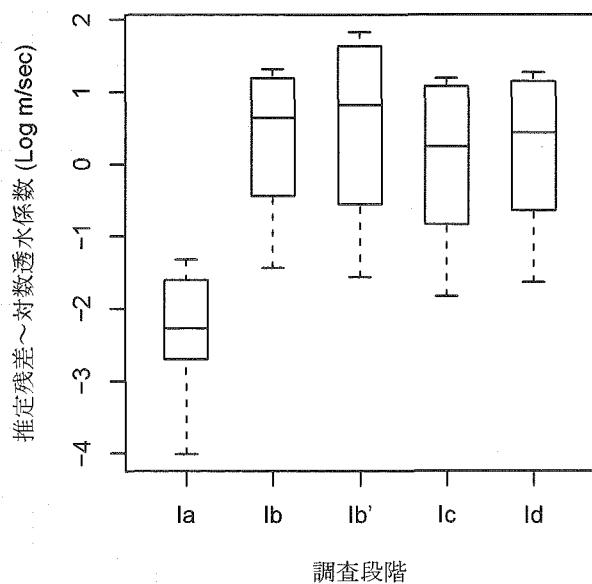


Fig. 84: 箱ひげ図による推定残差の比較～透水係数 HDB-10 孔～（対象孔 Ia～Id 群）

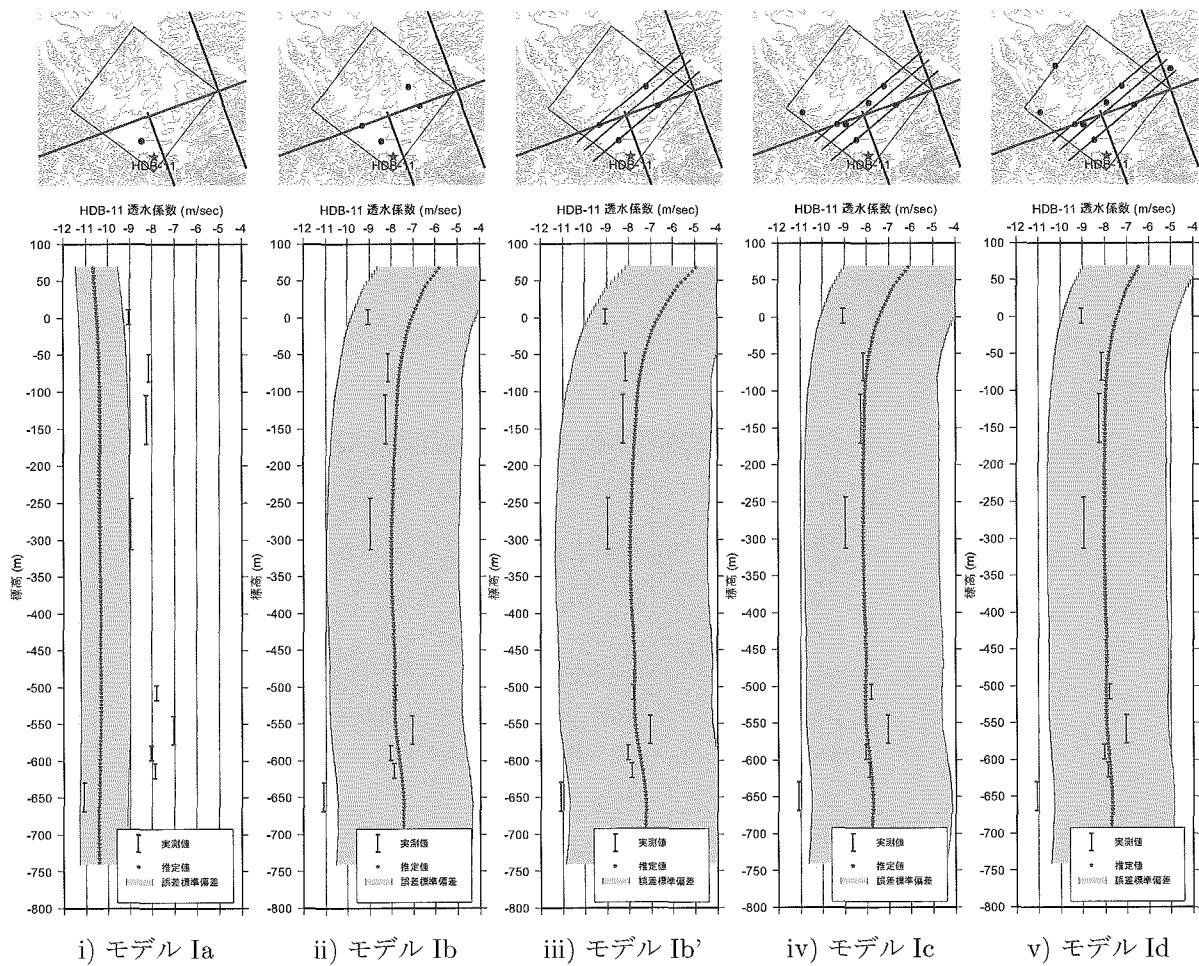


Fig. 85: 透水係数の推定結果ブラインド検証～検証孔 HDB-11～

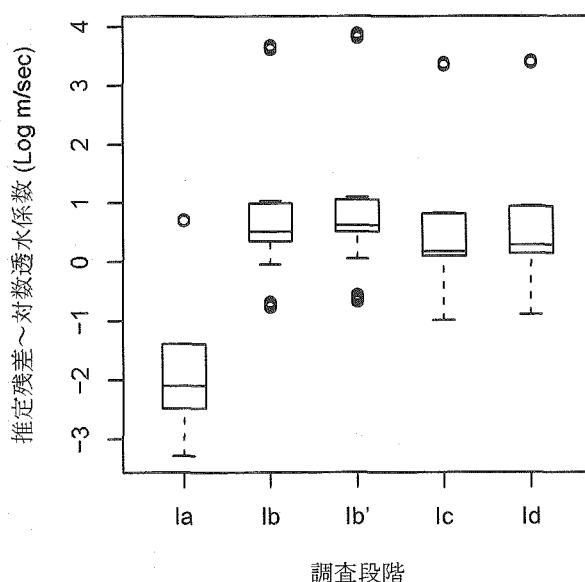


Fig. 86: 箱ひげ図による推定残差の比較～透水係数 HDB-11 孔～（対象孔 Ia～Id 群）

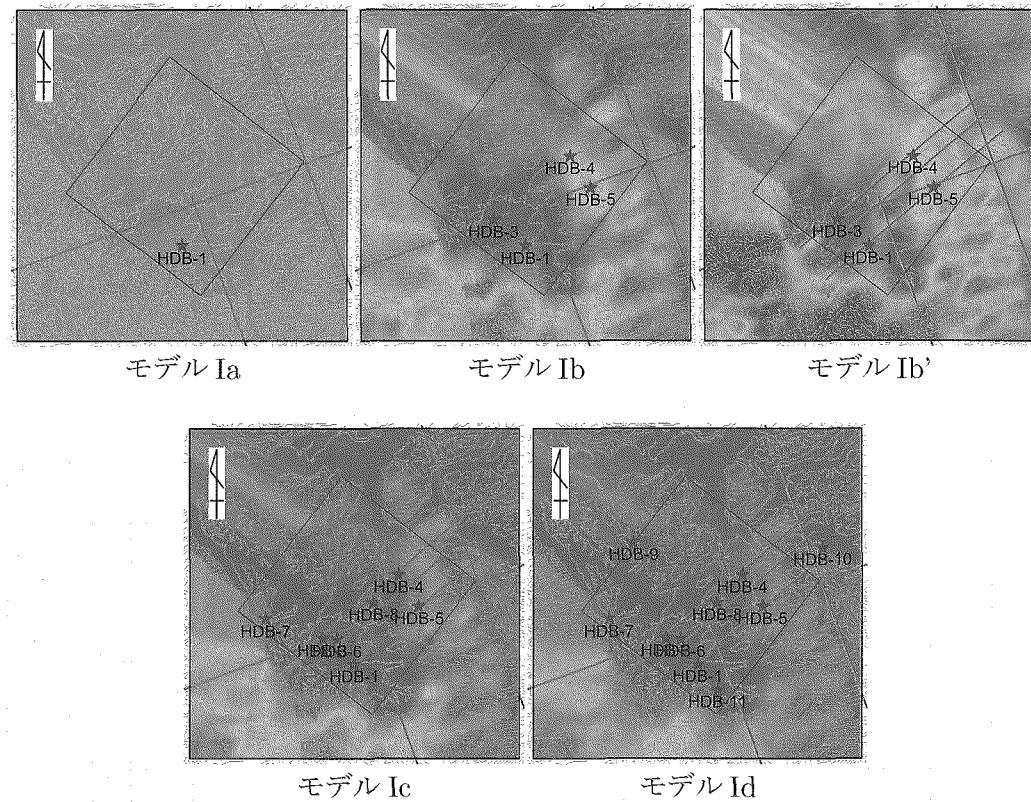


Fig. 87: 推定透水係数分布（標高-50m 水平断面）

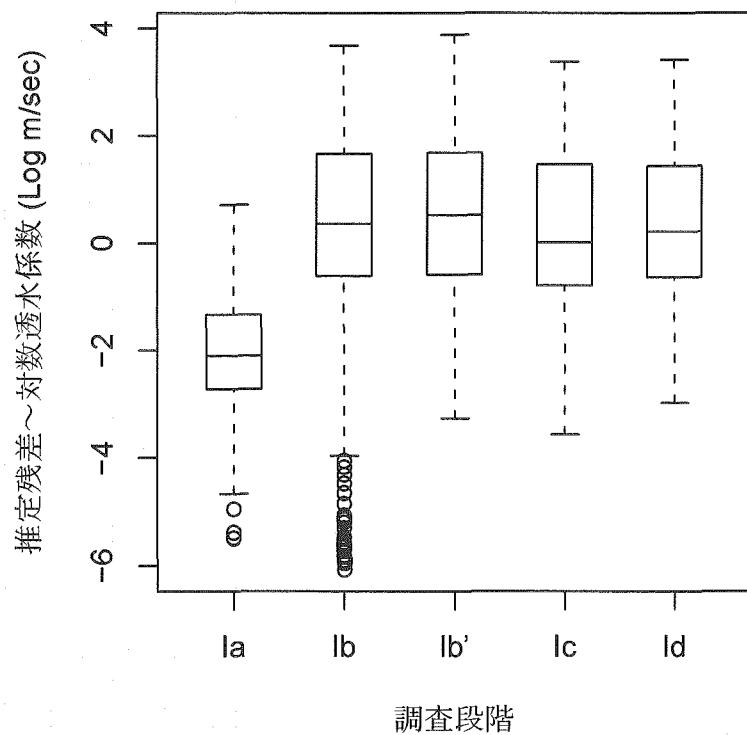
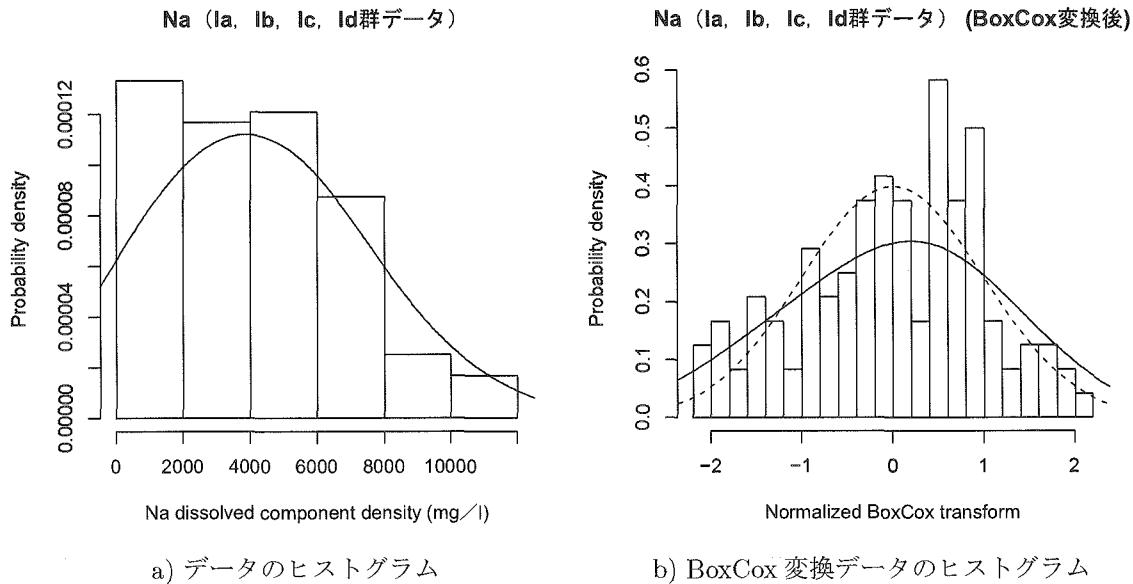
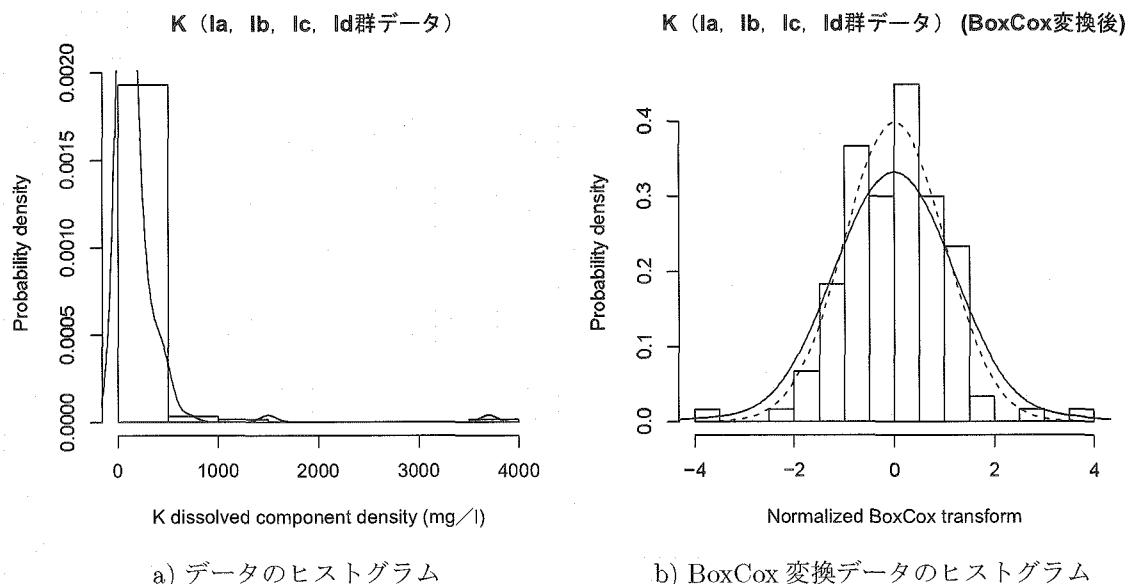


Fig. 88: 箱ひげ図による推定残差の比較～透水係数～（対象孔 Ia～Id 群）

対象名 溶存成分 Na^+ (HDB-1~11 孔データ)					
標本数	最小値 (mg/l)	最大値 (mg/l)	平均値 (mg/l)	標準偏差 (mg/l)	BoxCox 変換
120	39.0000	11000.0000	4168.5600	2684.3584	λ 0.6114 平均値 248.7360 標準偏差 114.4679
Kolmogorov-Smirnov 検定					
D 値: 0.0800 / p 値: 0.4260 > 0.05 採択 (有意差なし)					

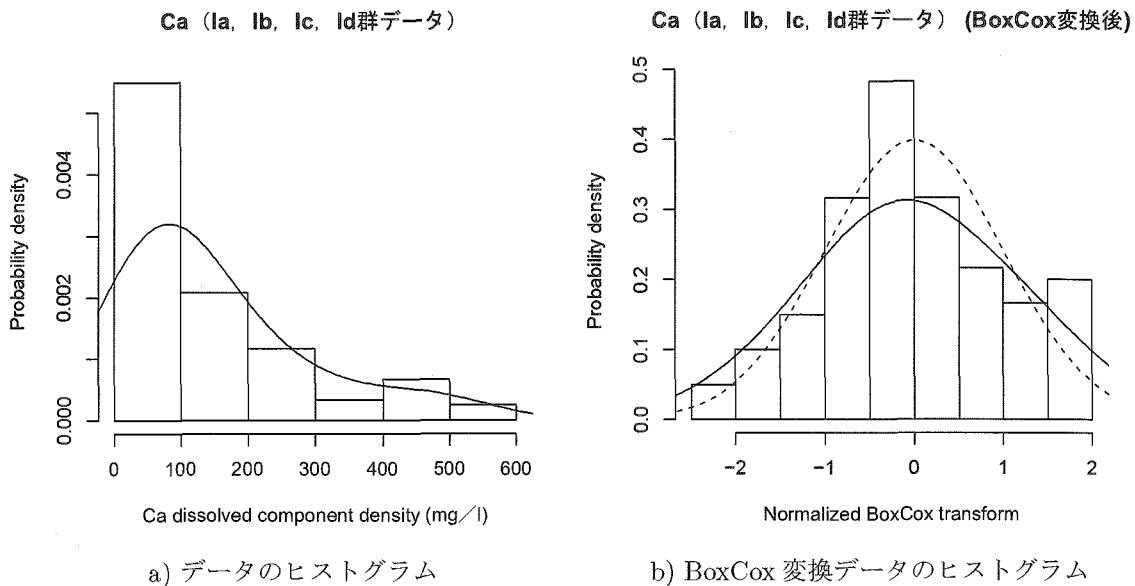
Fig. 89: 基本統計量と分布の正規性検定結果 (溶存成分 Na^+ (HDB-1~11 孔データ))

対象名 溶存成分 K^+ (HDB-1~11 孔データ)					
標本数	最小値 (mg/l)	最大値 (mg/l)	平均値 (mg/l)	標準偏差 (mg/l)	BoxCox 変換
120	1.0000	3700.0000	181.4550	371.3287	λ 0.0537 平均値 5.1926 標準偏差 1.4311
Kolmogorov-Smirnov 検定					
D 値: 0.0649 / p 値: 0.6936 > 0.05 採択 (有意差なし)					

Fig. 90: 基本統計量と分布の正規性検定結果 (溶存成分 K^+ (HDB-1~11 孔データ))

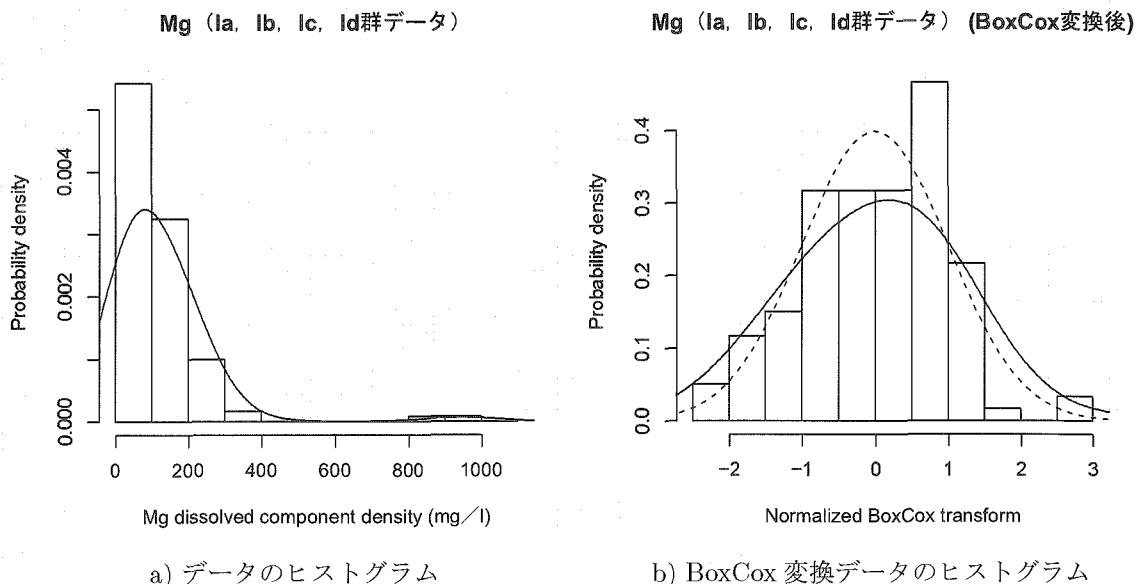
対象名	溶存成分 Ca^{2+} (HDB-1~11 孔データ)					BoxCox 変換		
標本数	最小値 (mg/l)	最大値 (mg/l)	平均値 (mg/l)	標準偏差 (mg/l)	λ	平均値	標準偏差	
120	7.0000	560.0000	145.9780	133.8802	0.1464	6.6141	1.9159	

Kolmogorov-Smirnov 検定
 D 値: 0.0583 / p 値: 0.8088 > 0.05 採択 (有意差なし)

Fig. 91: 基本統計量と分布の正規性検定結果 (溶存成分 Ca^{2+} (HDB-1~11 孔データ))

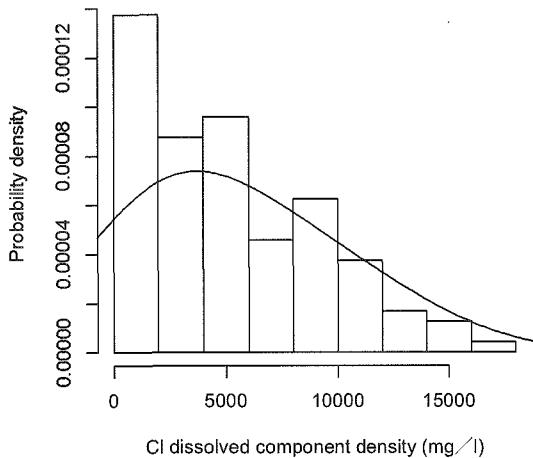
対象名	溶存成分 Mg^{2+} (HDB-1~11 孔データ)					BoxCox 変換		
標本数	最小値 (mg/l)	最大値 (mg/l)	平均値 (mg/l)	標準偏差 (mg/l)	λ	平均値	標準偏差	
120	5.0000	1000.0000	120.0860	134.7282	0.1439	6.1345	1.9005	

Kolmogorov-Smirnov 検定
 D 値: 0.0793 / p 値: 0.4373 > 0.05 採択 (有意差なし)

Fig. 92: 基本統計量と分布の正規性検定結果 (溶存成分 Mg^{2+} (HDB-1~11 孔データ))

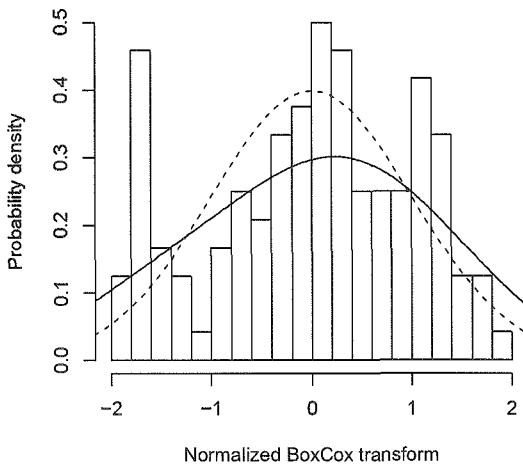
対象名	溶存成分 Cl ⁻ (HDB-1~11 孔データ)				
標本数	最小値 (mg/l)	最大値 (mg/l)	平均値 (mg/l)	標準偏差 (mg/l)	BoxCox 変換
120	28.0000	16037.0000	5264.4000	4176.3501	λ 0.4611 平均値 98.2878 標準偏差 48.1960
Kolmogorov-Smirnov 検定					
D 値: 0.0775 / p 値: 0.4664 > 0.05 採択 (有意差なし)					

Cl (Ia, Ib, Ic, Id群データ)



a) データのヒストグラム

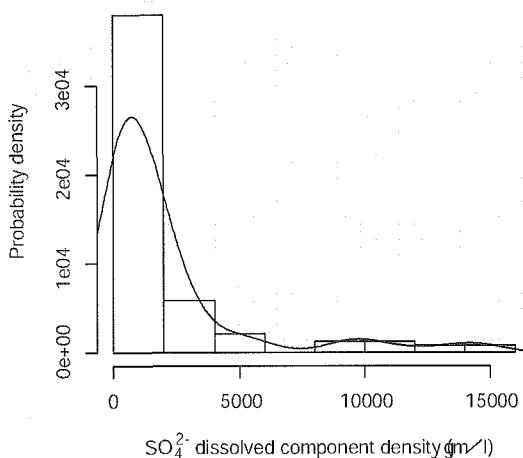
Cl (Ia, Ib, Ic, Id群データ) (BoxCox変換後)



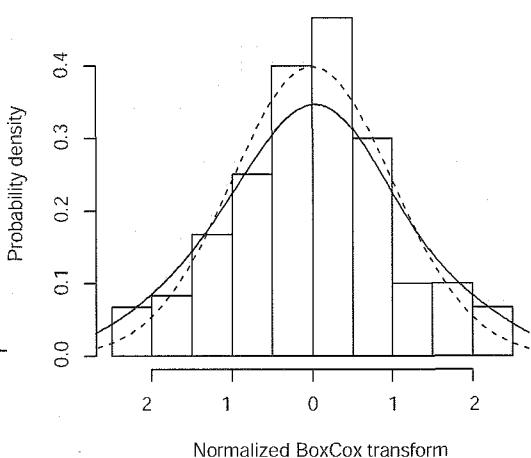
b) BoxCox 変換データのヒストグラム

Fig. 93: 基本統計量と分布の正規性検定結果 (溶存成分 Cl⁻ (HDB-1~11 孔データ))

対象名	溶存成分 SO ₄ ²⁻ (HDB-1~11 孔データ)				
標本数	最小値 (mg/l)	最大値 (mg/l)	平均値 (mg/l)	標準偏差 (mg/l)	BoxCox 変換
120	5.4500	15000.0000	2067.0800	3201.0155	λ 0.1396 平均値 11.3332 標準偏差 4.0374
Kolmogorov-Smirnov 検定					
D 値: 0.0674 / p 値: 0.6471 > 0.05 採択 (有意差なし)					

SO₄²⁻ (Ia, Ib, Ic, Id群データ)

a) データのヒストグラム

SO₄²⁻ (Ia, Ib, Ic, Id群データ) (BoxCox変換後)

b) BoxCox 変換データのヒストグラム

Fig. 94: 基本統計量と分布の正規性検定結果 (溶存成分 SO₄²⁻ (HDB-1~11 孔データ))

回帰式 : $Y = a + bX + \varepsilon$ Y : Na^+ 濃度 (Id データ群)[BoxCox 変換 : $\lambda_Y = 0.61137$] X : 検層-比抵抗値 (Id データ群)[BoxCox 変換 : $\lambda_X = -0.47685$]

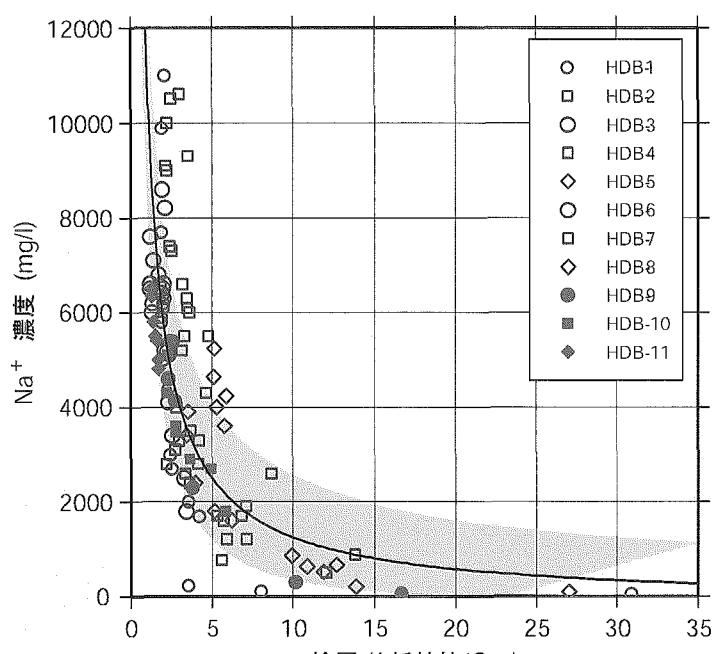
回帰係数

 $a = 471.7376, b = -247.0149$

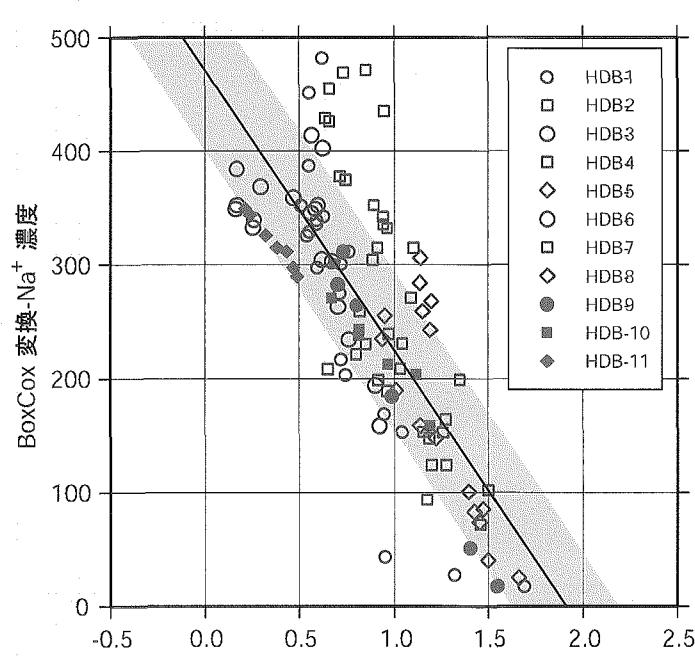
回帰誤差 & 相関係数

 $\sigma = 70.83593, r = -0.7714867$

相関係数の有意性検定

 p 値 : $6.105465e-23 \leq 0.05 \rightarrow$ 棄却 (相関性あり)

a) ノーマル軸グラフ



b) Box-Cox 変換軸グラフ

Fig. 95: Na^+ 濃度 (Id データ群) との回帰モデル

回帰式 : $Y = a + bX + \epsilon$ Y : K^+ 濃度 (Id データ群)[BoxCox 変換 : $\lambda_Y = 0.05368$] X : 檢層-比抵抗値 (Id データ群)[BoxCox 変換 : $\lambda_X = -0.47685$]

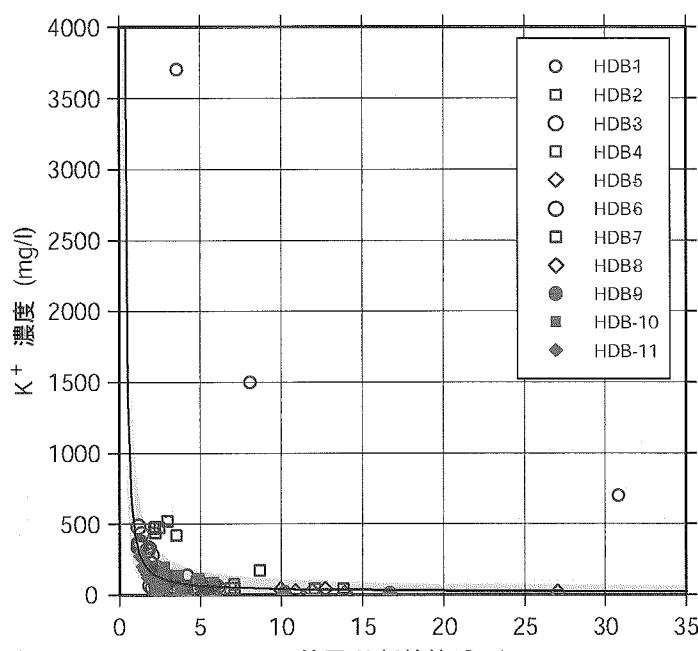
回帰係数

 $a = 7.103916, b = -2.145955$

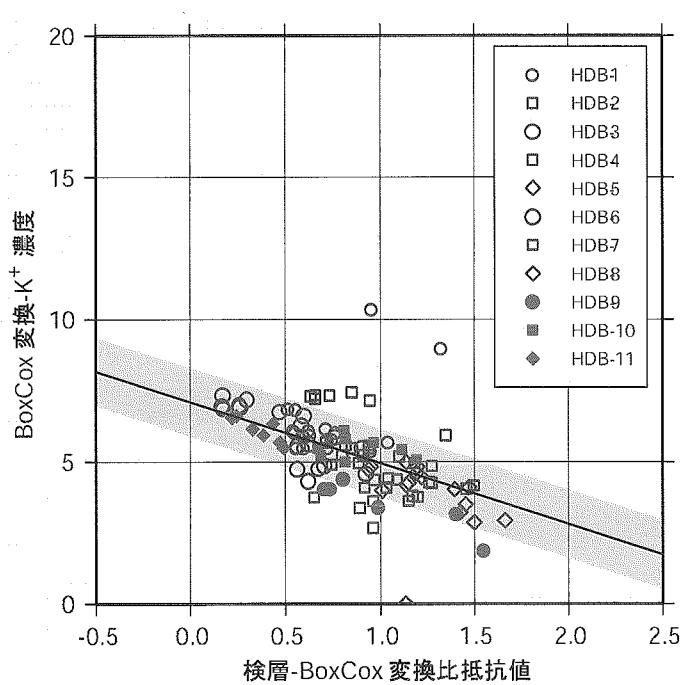
回帰誤差 & 相関係数

 $\sigma = 1.228613, r = -0.5191078$

相関係数の有意性検定

 p 値 : $6.240296e-09 \leq 0.05 \rightarrow$ 棄却 (相関性あり)

a) ノーマル軸グラフ



b) Box-Cox 変換軸グラフ

Fig. 96: K^+ 濃度 (Id データ群) との回帰モデル

回帰式 : $Y = a + bX + \varepsilon$ Y : Ca^{2+} 濃度 (Id データ群)[BoxCox 変換 : $\lambda_Y = 0.14639$] X : 検層-比抵抗値 (Id データ群)[BoxCox 変換 : $\lambda_X = -0.47685$]

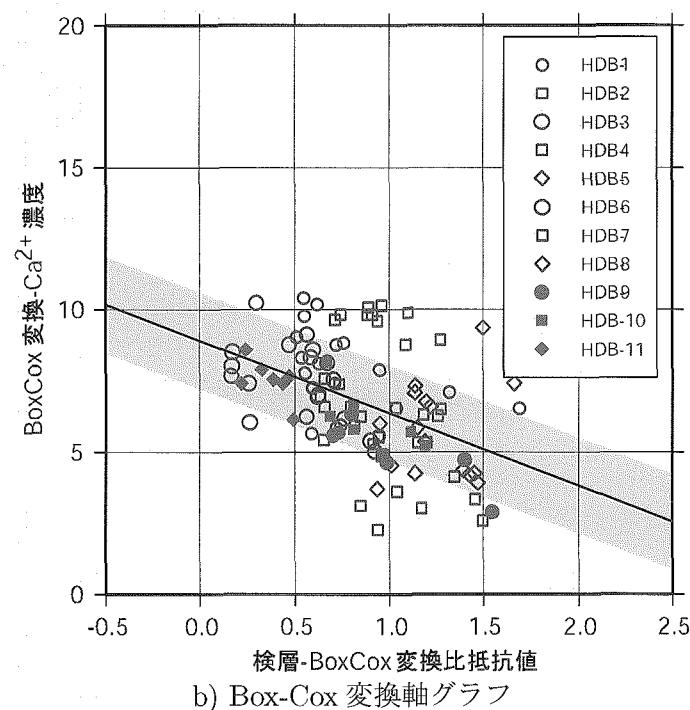
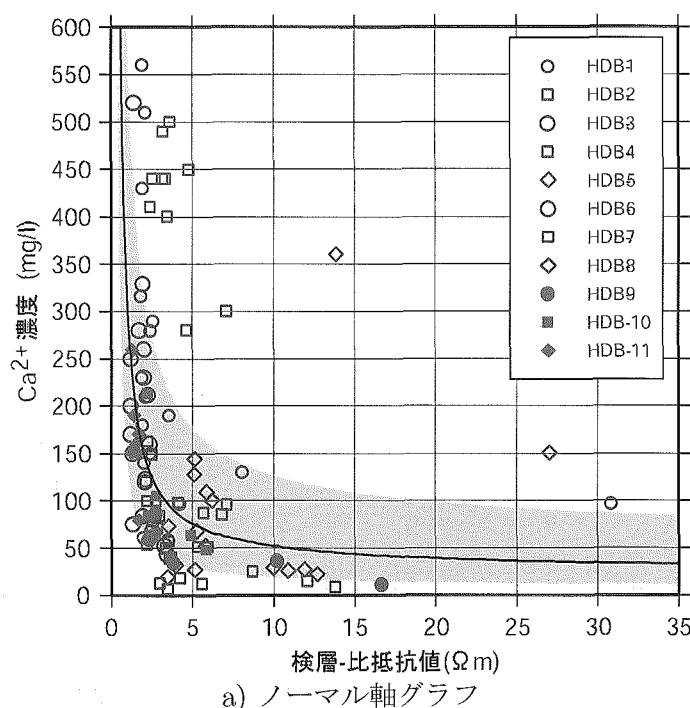
回帰係数

 $a = 8.904021, b = -2.538606$

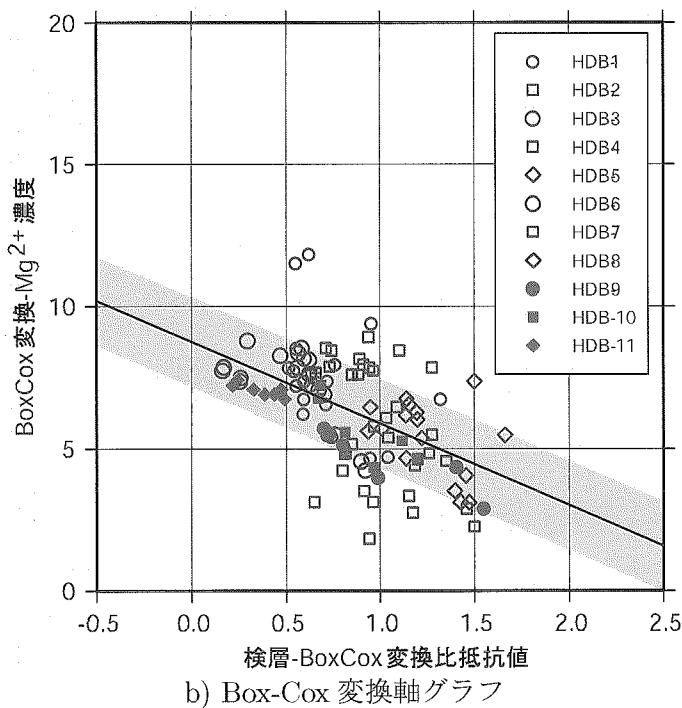
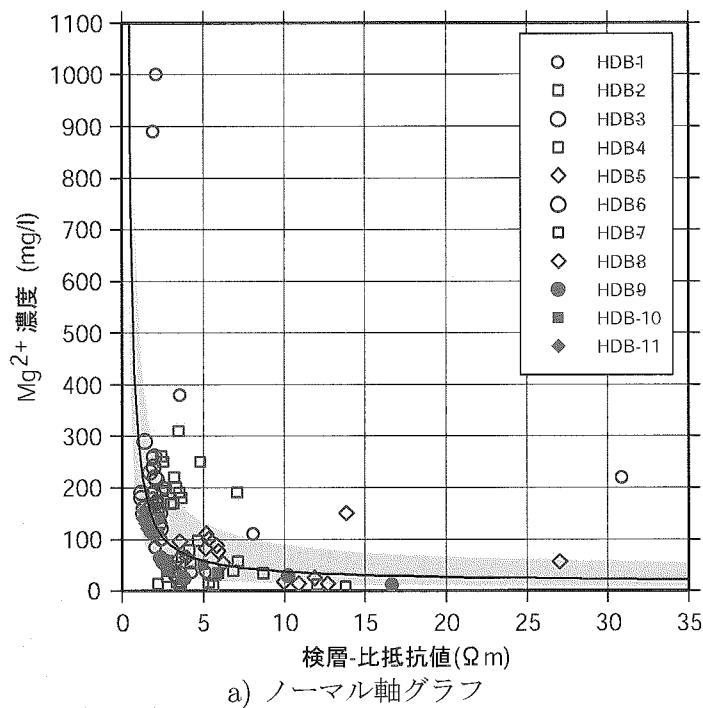
回帰誤差 & 相関係数

 $\sigma = 1.700097, r = -0.4608114$

相関係数の有意性検定

 p 値 : $4.066173e-07 \leq 0.05 \rightarrow$ 棄却 (相関性あり)Fig. 97: Ca^{2+} 濃度 (Id データ群) との回帰モデル

回帰式 : $Y = a + bX + \varepsilon$	
Y : Mg ²⁺ 濃度 (Id データ群)	[BoxCox 変換 : $\lambda_Y = 0.14389$]
X : 検層-比抵抗値 (Id データ群)	[BoxCox 変換 : $\lambda_X = -0.47685$]
回帰係数	$a = 8.755141, b = -2.873613$
回帰誤差 & 相関係数	$\sigma = 1.589378, r = -0.5322422$
相関係数の有意性検定	p 値 : $2.174948e-09 \leq 0.05 \rightarrow$ 棄却 (相関性あり)

Fig. 98: Mg²⁺ 濃度 (Id データ群) との回帰モデル

回帰式 : $Y = a + bX + \varepsilon$ $Y : \text{Cl}^-$ 濃度 (Id データ群)[BoxCox 変換 : $\lambda_Y = 0.46112$] $X : \text{検層-比抵抗値}$ (Id データ群)[BoxCox 変換 : $\lambda_X = -0.47685$]

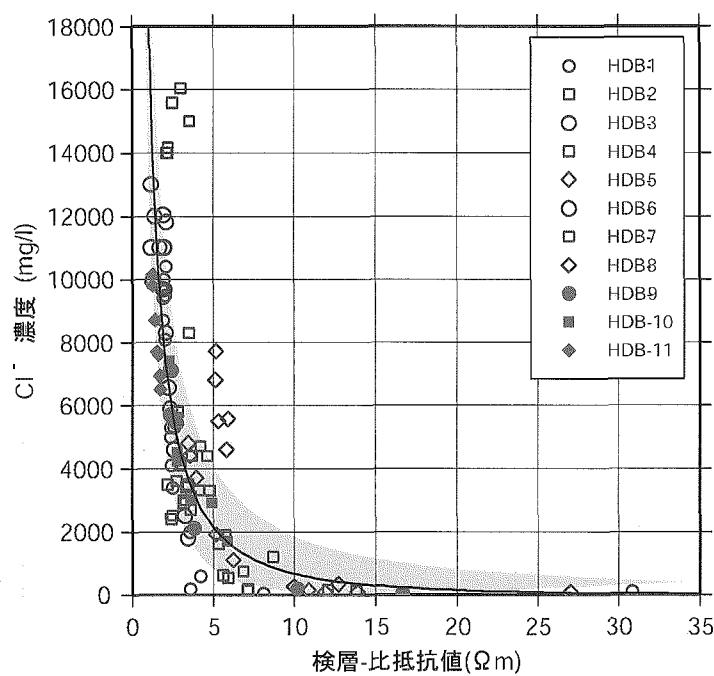
回帰係数

 $a = 199.2141, b = -112.9500$

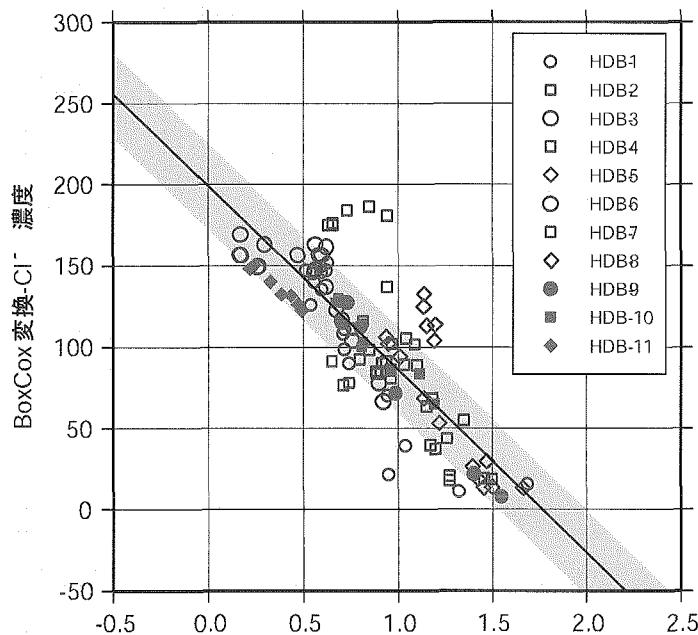
回帰誤差 & 相関係数

 $\sigma = 26.58469, r = -0.8281262$

相関係数の有意性検定

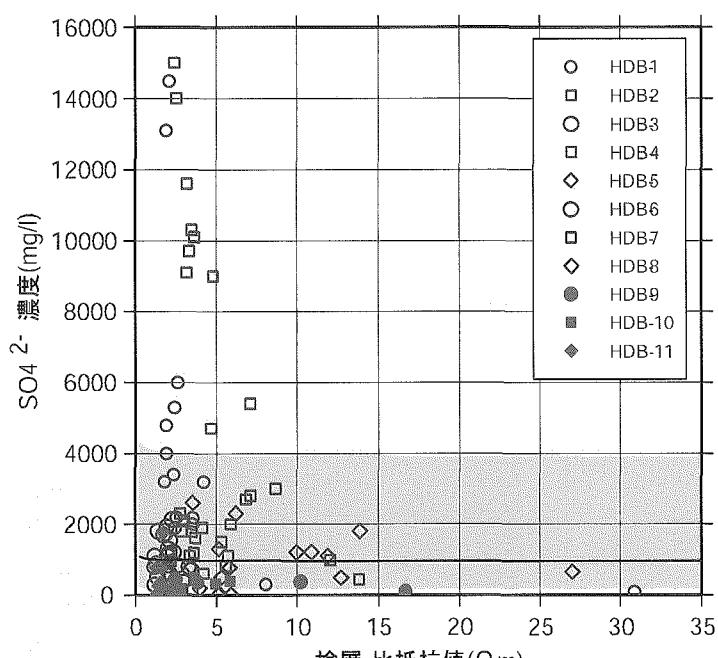
 p 値 : $6.516133e-29 \leq 0.05 \rightarrow$ 棄却 (相関性あり)

a) ノーマル軸グラフ

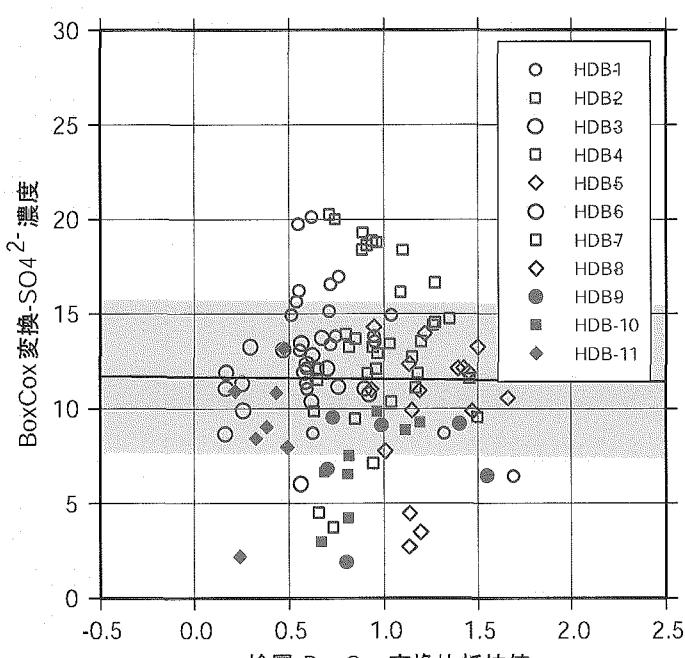


b) Box-Cox 変換軸グラフ

Fig. 99: Cl^- 濃度 (Id データ群) との回帰モデル

回帰式 : $Y = a + bX + \varepsilon$ $Y : \text{SO}_4^{2-} \text{ 濃度 (Id データ群)}$ [BoxCox 変換 : $\lambda_Y = 0.13959$] $X : \text{検層-比抵抗値 (Id データ群)}$ [BoxCox 変換 : $\lambda_X = -0.47685$]回帰係数 $a = 11.67566, b = -0.09748267$ 回帰誤差 & 相関係数 $\sigma = 4.059167, r = -0.008350441$ 相関係数の有意性検定 p 値 : $0.9310044 > 0.05 \rightarrow$ 採択 (相関性がない可能性がある)

a) ノーマル軸グラフ



b) Box-Cox 変換軸グラフ

Fig. 100: SO_4^{2-} 濃度 (Id データ群) との回帰モデル

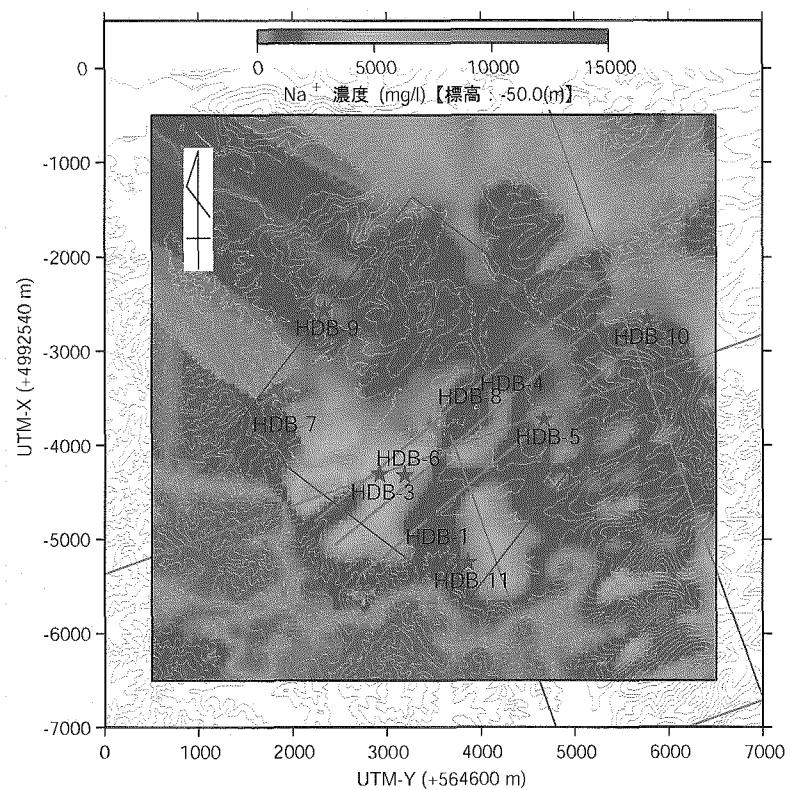


Fig. 101: 水質分布 (Na⁺ 濃度) モデル～モデル化ステップ Id～ (水平断面 標高-50m)

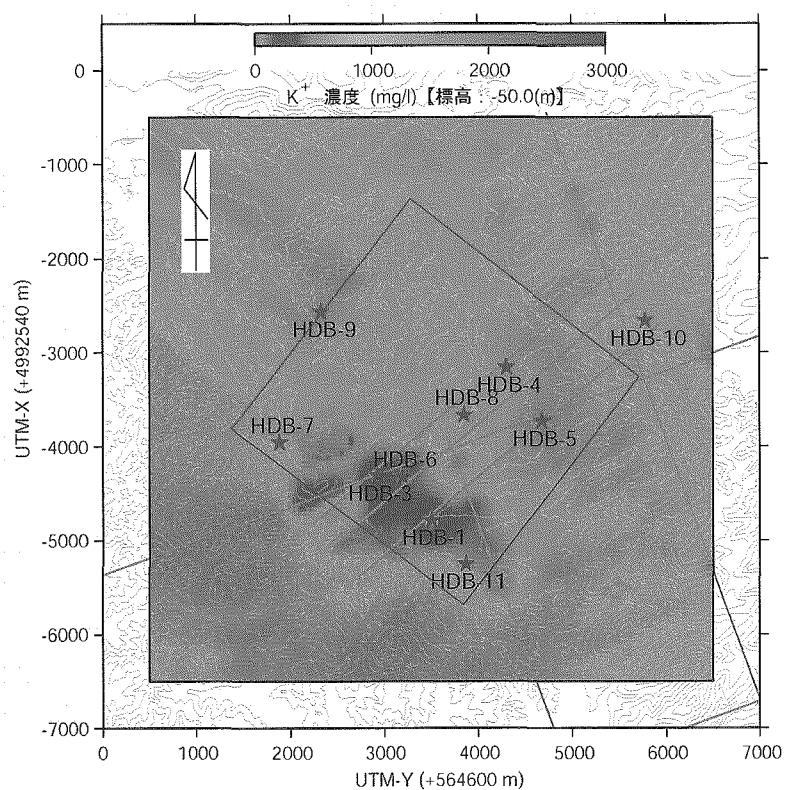


Fig. 102: 水質分布 (K^+ 濃度) モデル～モデル化ステップ Id～ (水平断面 標高-50m)

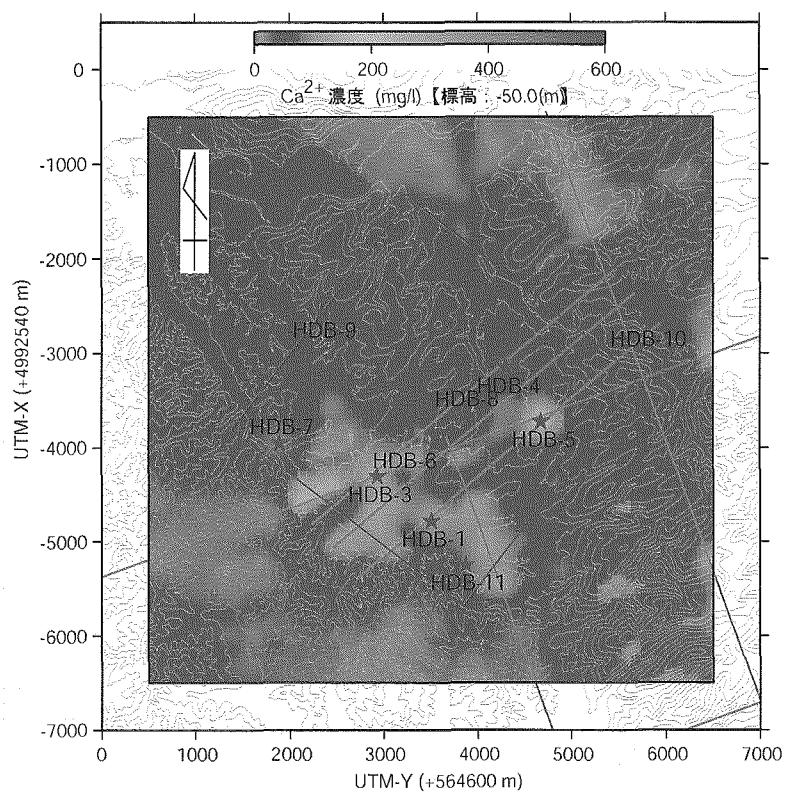


Fig. 103: 水質分布 (Ca^{2+} 濃度) モデル～モデル化ステップ Id～ (水平断面 標高-50m)

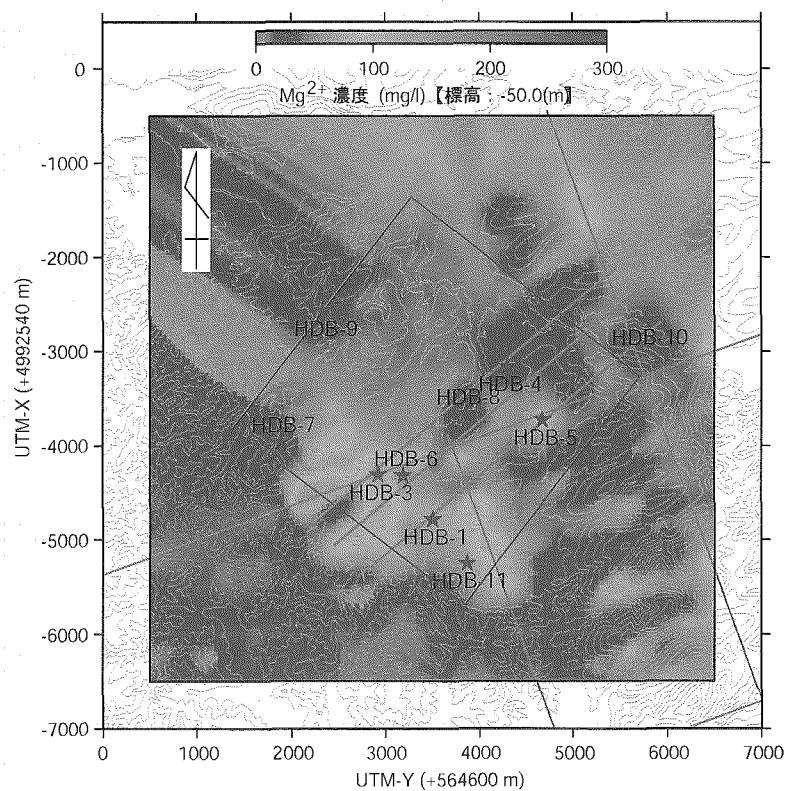


Fig. 104: 水質分布 (Mg^{2+} 濃度) モデル～モデル化ステップ Id～ (水平断面 標高-50m)

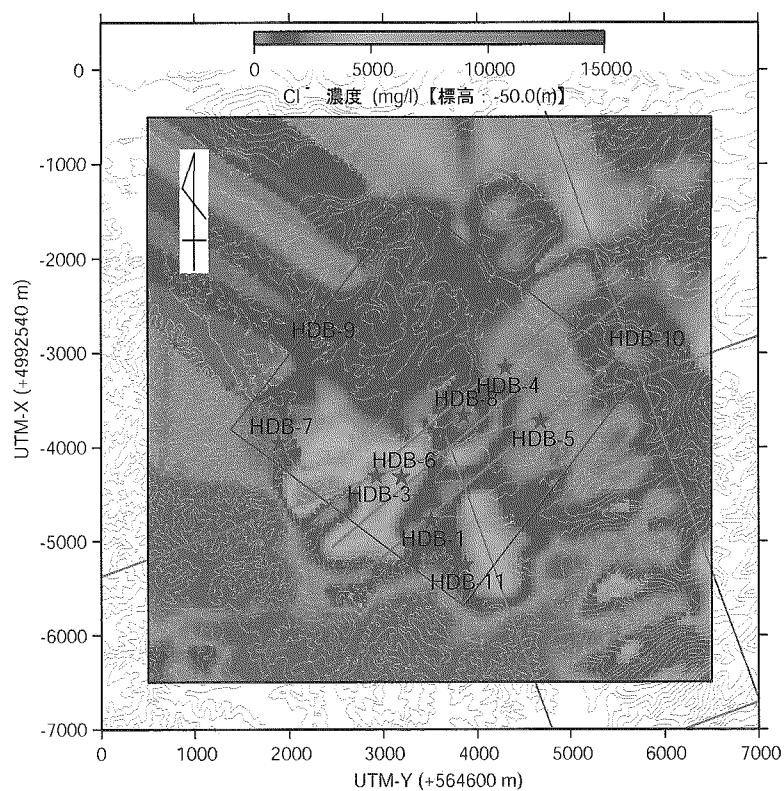


Fig. 105: 水質分布 (Cl^- 濃度) モデル～モデル化ステップ Id～（水平断面 標高-50m）

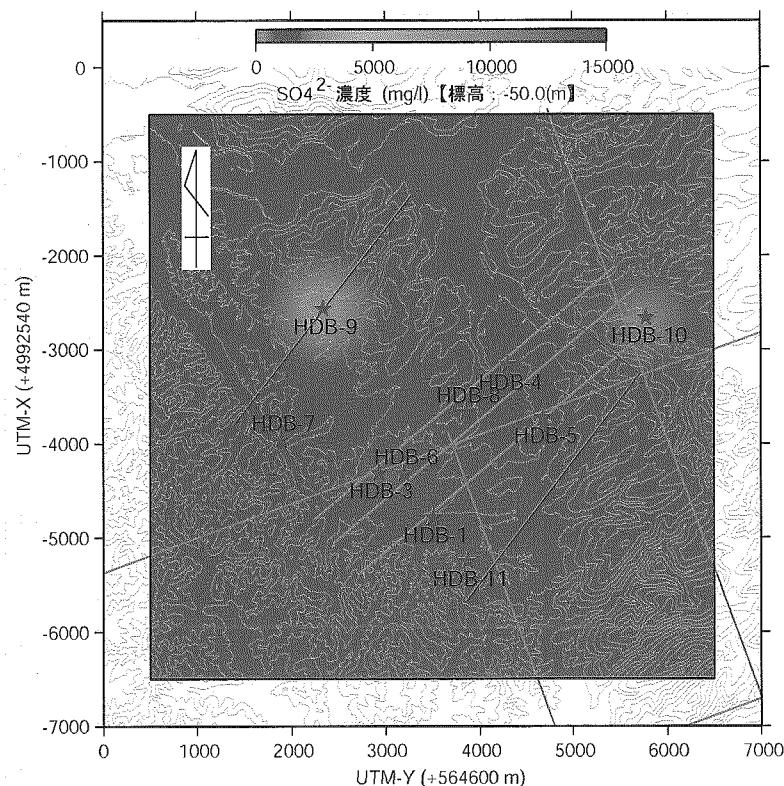


Fig. 106: 水質分布 (SO_4^{2-} 濃度) モデル～モデル化ステップ Id～（水平断面 標高-50m）

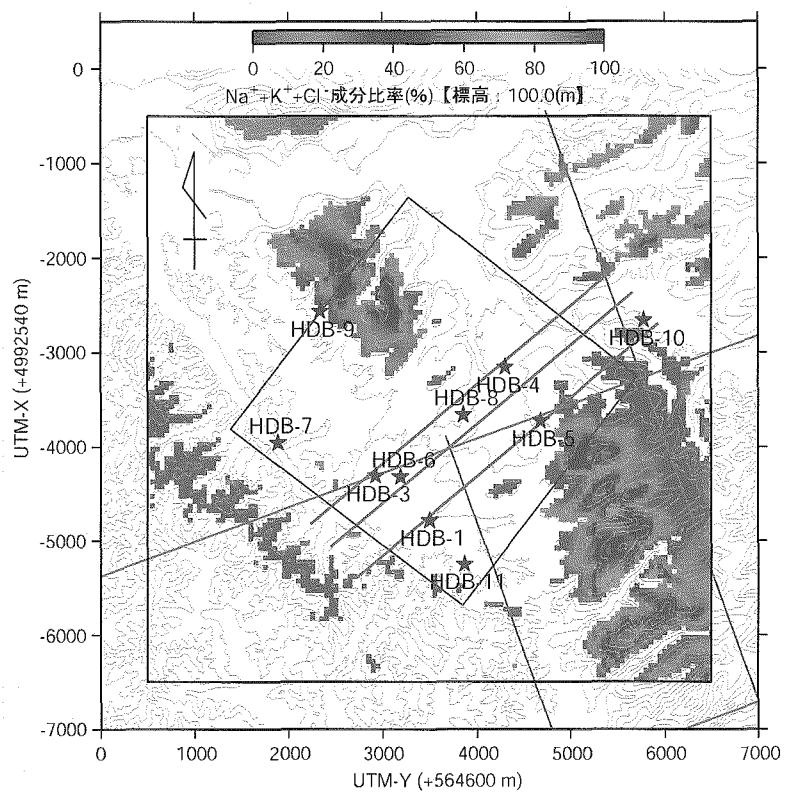


Fig. 107: 水質溶存成分比率分布 ($\text{Na}^+ + \text{K}^+ + \text{Cl}^-$ 成分) ~モデル Id~ (水平断面 標高 100m)

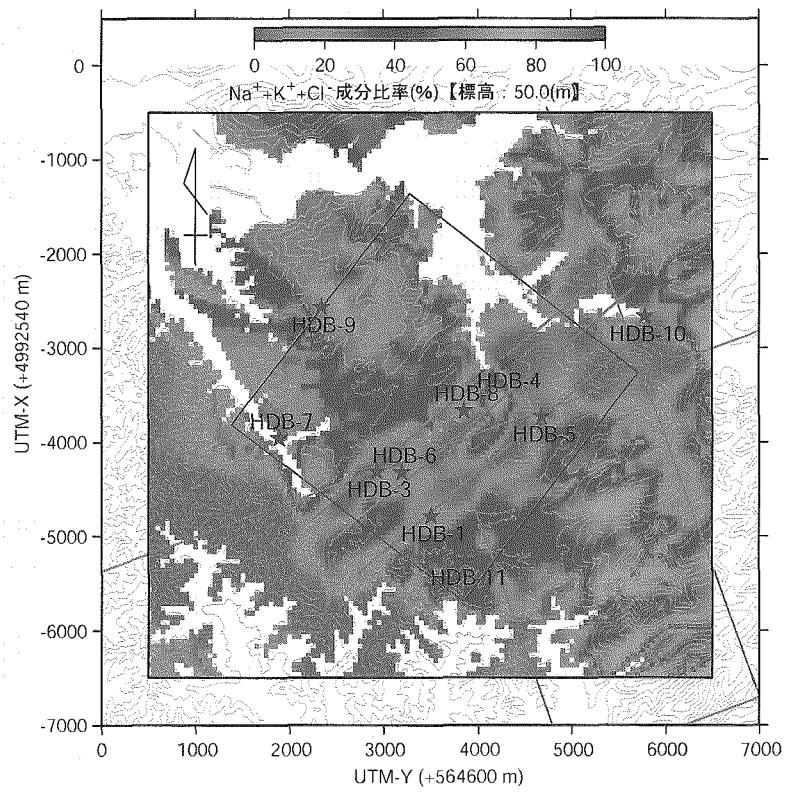


Fig. 108: 水質溶存成分比率分布 ($\text{Na}^+ + \text{K}^+ + \text{Cl}^-$ 成分) ~モデル Id~ (水平断面 標高 50m)

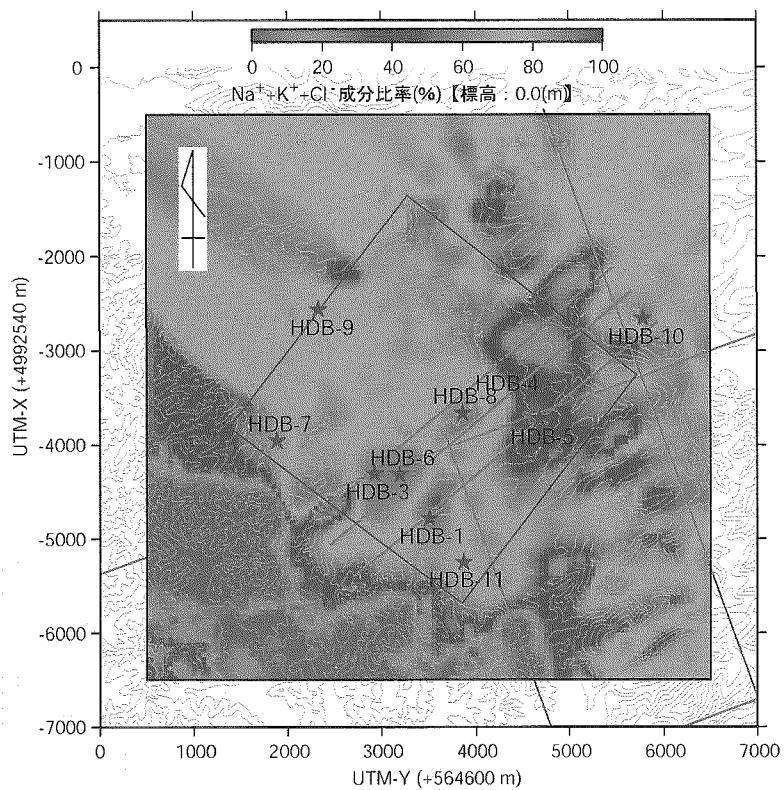


Fig. 109: 水質溶存成分比率分布 ($\text{Na}^+ + \text{K}^+ + \text{Cl}^-$ 成分) ~モデル Id~ (水平断面 標高 0m)

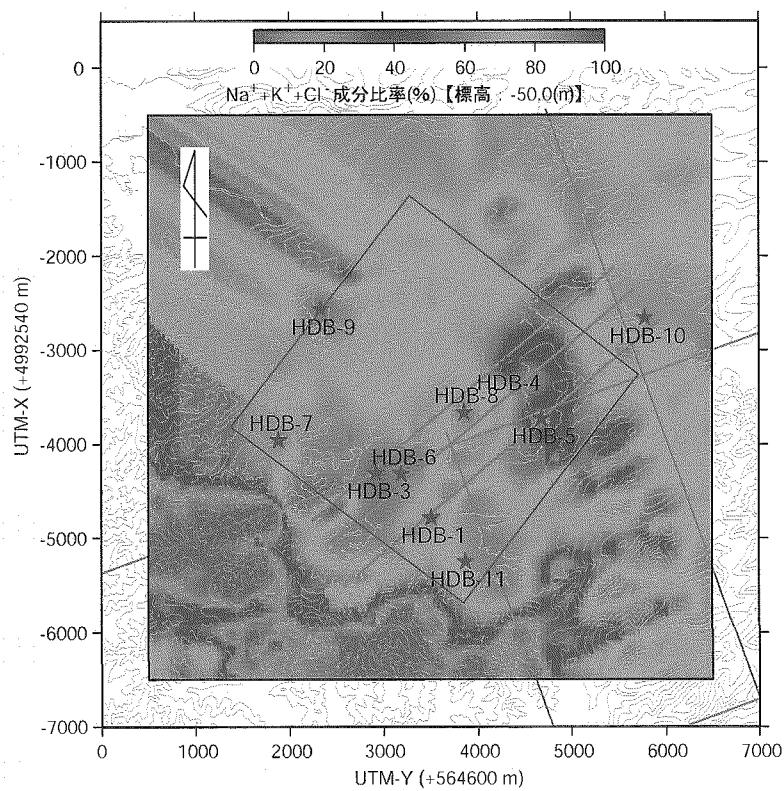


Fig. 110: 水質溶存成分比率分布 ($\text{Na}^+ + \text{K}^+ + \text{Cl}^-$ 成分) ~モデル Id~ (水平断面 標高-50m)

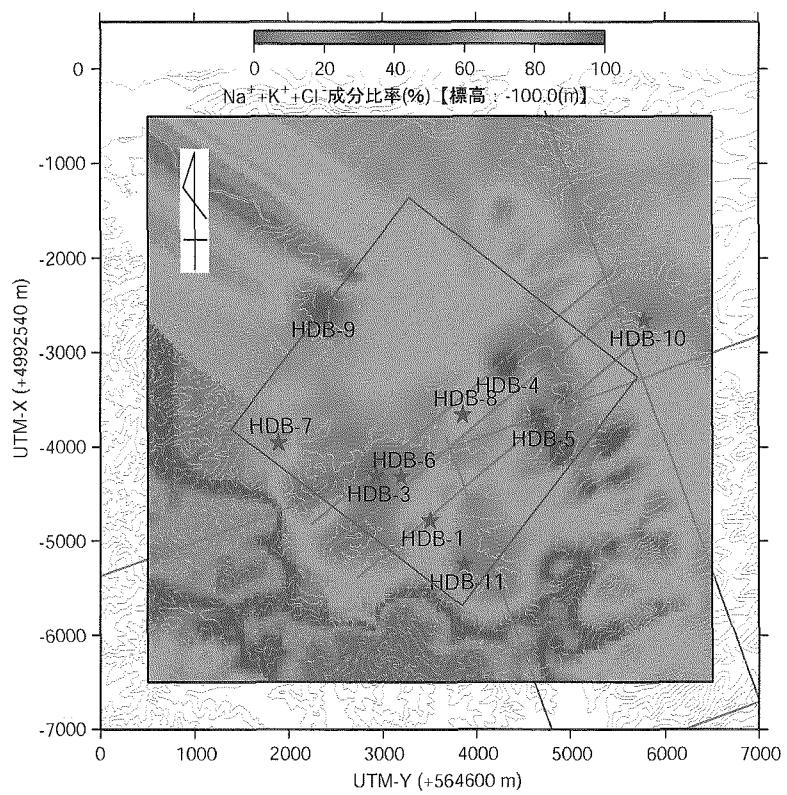


Fig. 111: 水質溶存成分比率分布 ($\text{Na}^+ + \text{K}^+ + \text{Cl}^-$ 成分) ~モデル Id~ (水平断面 標高-100m)

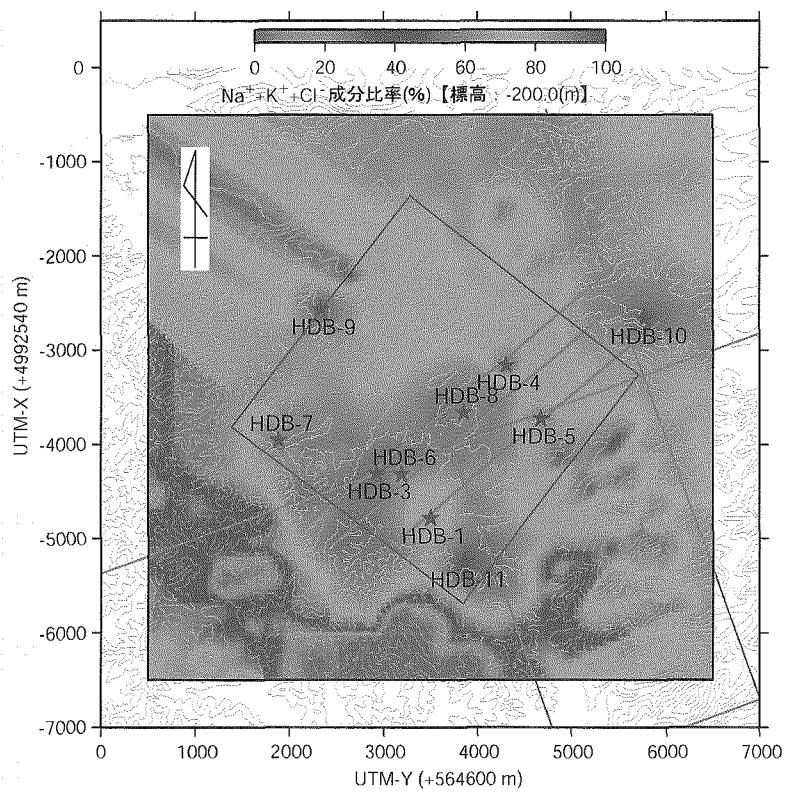


Fig. 112: 水質溶存成分比率分布 ($\text{Na}^+ + \text{K}^+ + \text{Cl}^-$ 成分) ~モデル Id~ (水平断面 標高-200m)

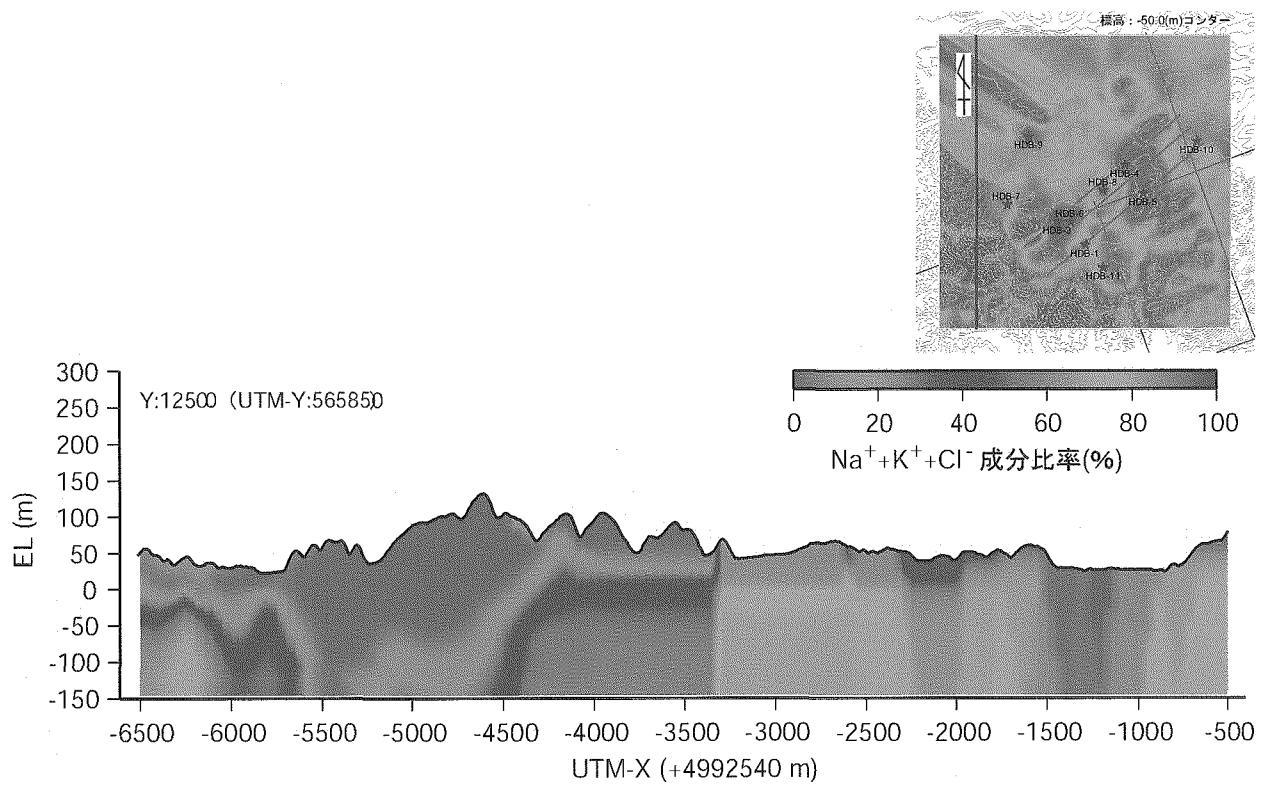


Fig. 113: 成分比率分布 ($\text{Na}^+ + \text{K}^+ + \text{Cl}^-$ 成分) の推定結果 (鉛直 XZ 断面／UTM-Y=565850)

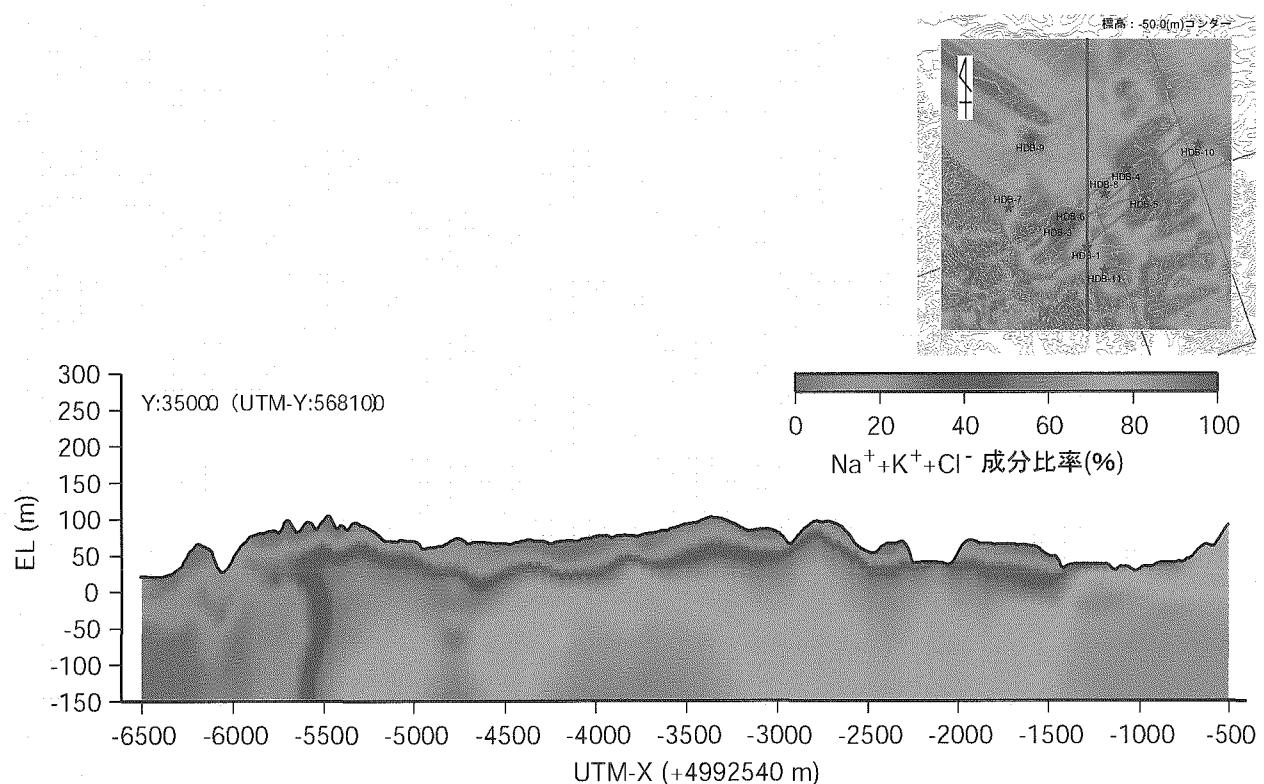


Fig. 114: 成分比率分布 ($\text{Na}^+ + \text{K}^+ + \text{Cl}^-$ 成分) の推定結果 (鉛直 XZ 断面／UTM-Y=568100)

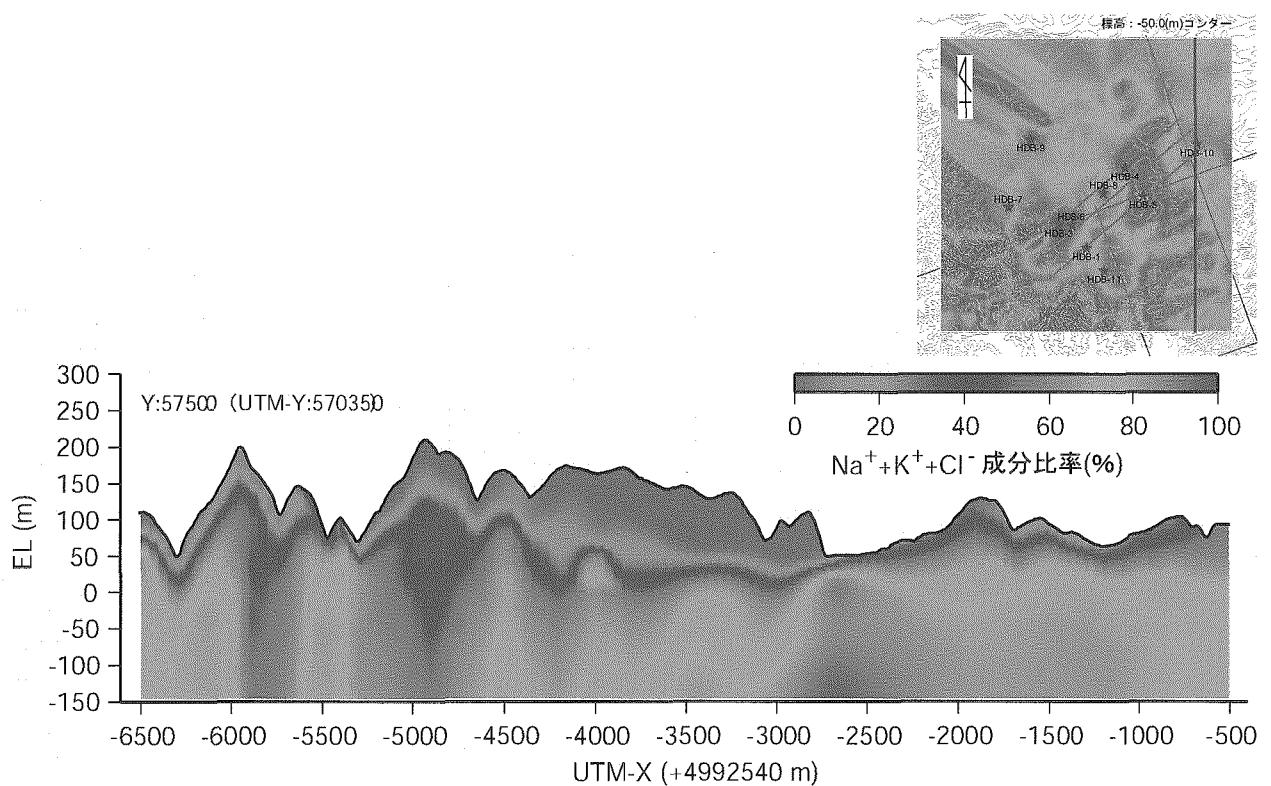


Fig. 115: 成分比率分布 ($\text{Na}^+ + \text{K}^+ + \text{Cl}^-$ 成分) の推定結果 (鉛直 XZ 断面／UTM-Y=570350)

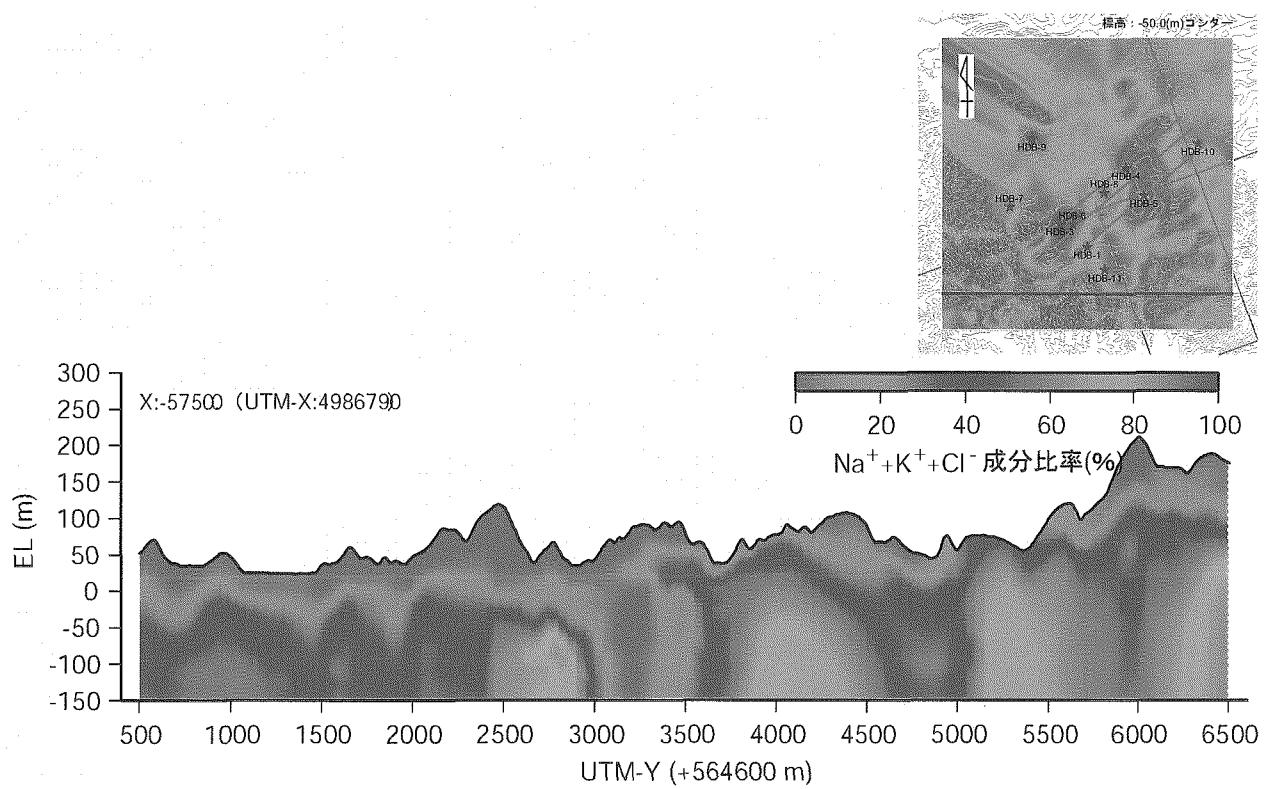


Fig. 116: 成分比率分布 ($\text{Na}^+ + \text{K}^+ + \text{Cl}^-$ 成分) の推定結果 (鉛直 YZ 断面／UTM-X=4986790)

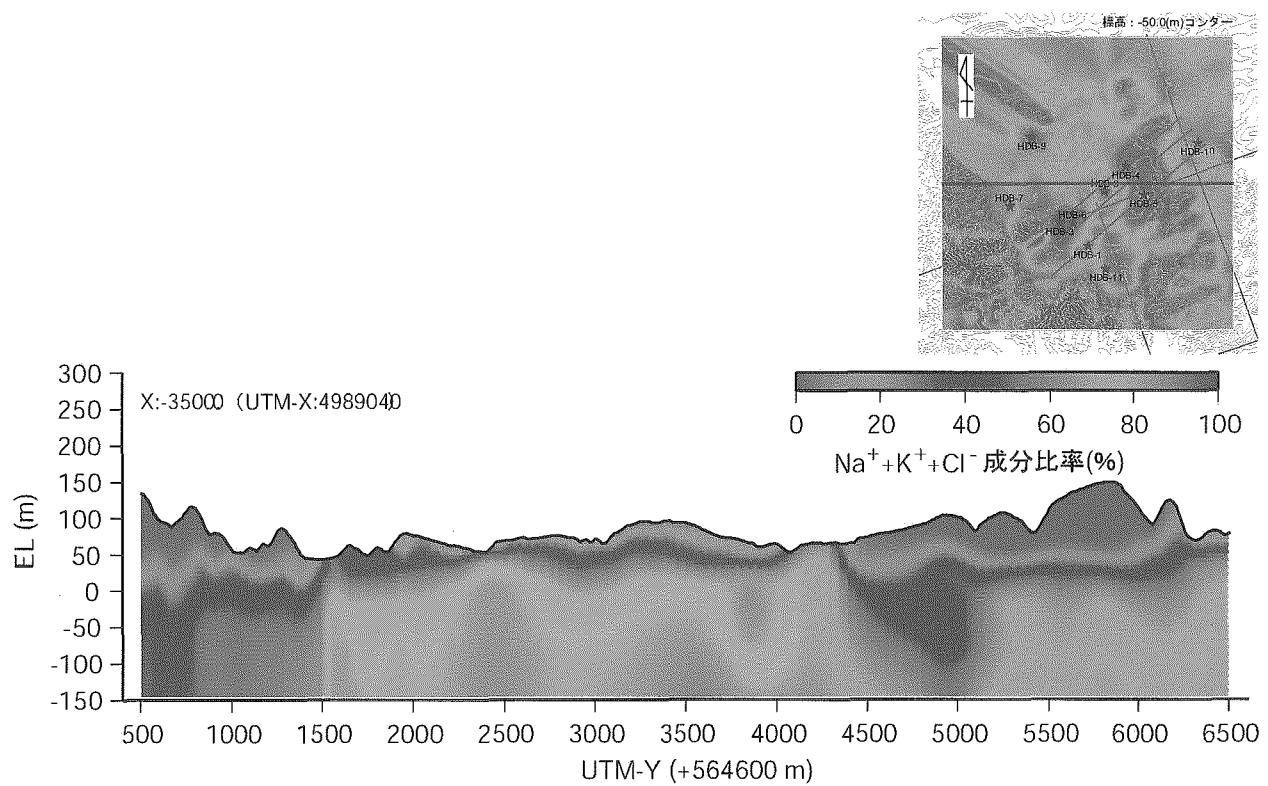


Fig. 117: 成分比率分布 ($\text{Na}^+ + \text{K}^+ + \text{Cl}^-$ 成分) の推定結果 (鉛直 YZ 断面／UTM-X=4989040)

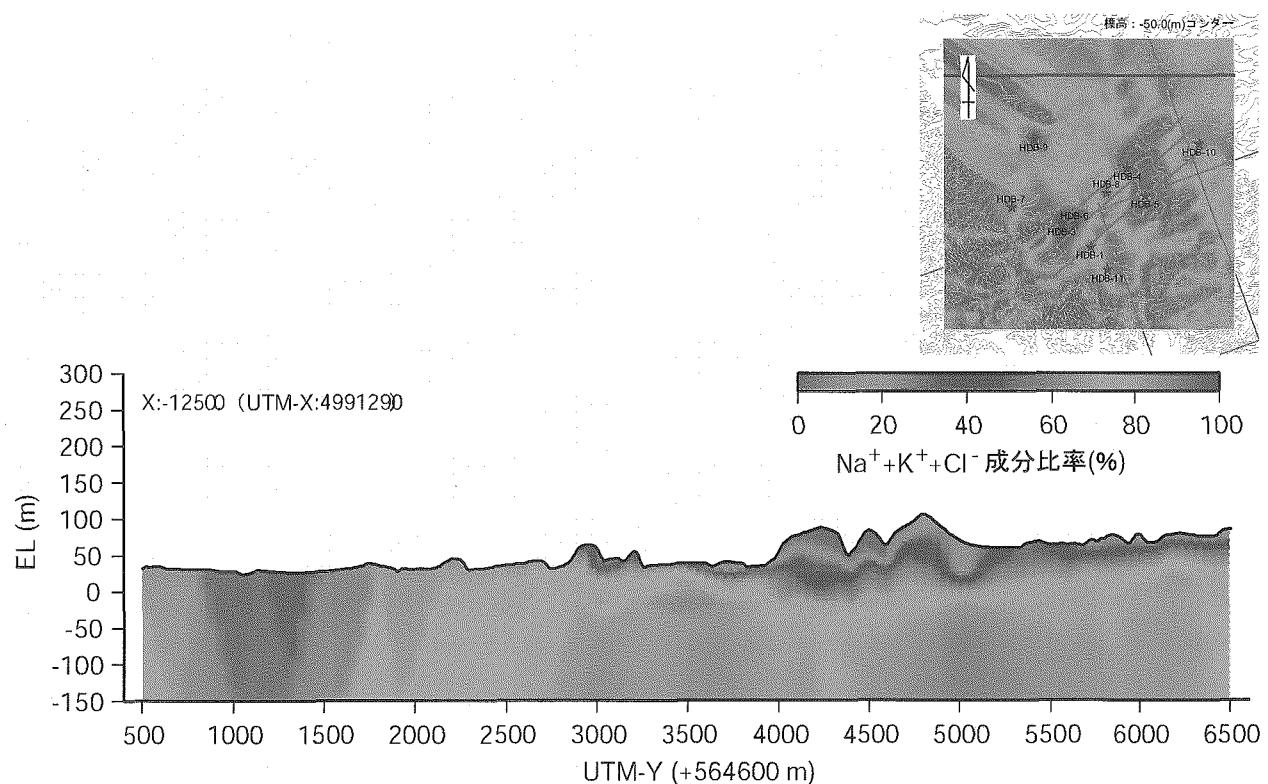


Fig. 118: 成分比率分布 ($\text{Na}^+ + \text{K}^+ + \text{Cl}^-$ 成分) の推定結果 (鉛直 YZ 断面／UTM-X=4991290)

This is a blank page.

国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
密度(質量密度)	キログラム毎立法メートル	kg/m ³
質量体積(比体積)	立法メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
(物質量の)濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率	(数の)1	1

表3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	他のSI単位による表し方
平面角	ラジアン ^(a)	rad	$m \cdot m^{-1}=1^{(b)}$
立体角	ステラジアン ^(a)	sr ^(c)	$m^2 \cdot m^{-2}=1^{(b)}$
周波数	ヘルツ	Hz	s^{-1}
力	ニュートン	N	$m \cdot kg \cdot s^{-2}$
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m^2
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	$N \cdot m$
功率、放熱	ワット	W	J/s
電荷、電気量	クーロン	C	$s \cdot A$
電位差(電圧)、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	コラード	F	$m^2 \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
電気抵抗	オーム	Ω	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$
磁束	クラインス	S	A/V
磁密	テスラ	T	Wb/m^2
インダクタンス	ヘンリ	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度 ^(d)	°C	$kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
光度	ラントル	lm	$m^2 \cdot m^{-2} \cdot cd=cd$
(放射性核種の)放射能吸収線量、質量エネルギー分与、カーマ	ベクレル	Bq	$1m^2 \cdot m^{-4} \cdot cd=m^{-2} \cdot cd \cdot s^{-1}$
線量当量、周辺線量当量、方向性線量当量、個人線量当量、組織線量当量	グレイ	Gy	J/kg
	シーベルト	Sv	$m^2 \cdot s^{-2}$

(a)ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なる性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときのいくつかの用例は表4に示されている。

(b)実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号“1”は明示されない。

(c)測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。

(d)この単位は、例としてミリセルシウス度m°CのようにSI接頭語を伴って用いても良い。

表4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘度	パスカル秒	Pa·s	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-1}$
表面張力	ニュートンメートル	N·m	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}=s^{-1}$
角加速度	ラジアン毎平方秒	rad/s ²	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-2}=s^{-2}$
熱流密度、放射照度	ワット毎平方メートル	W/m ²	W/m^2
熱容量、エントロピー	ジュール每ケルビン	J/K	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量熱容量(比熱容量)	ジュール每キログラム	J/(kg·K)	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量エネルギー	エントロピー	J/K	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
(比エネルギー)	ジュール每キログラム	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
熱伝導率	ワット每メートル每ケルビン	W/(m·K)	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot K^{-1}$
体積エネルギー	ジュール每立方メートル	J/m ³	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
電界の強さ	ボルト每メートル	V/m	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
体積電荷	クーロン每立方メートル	C/m ³	$m^{-3} \cdot s \cdot A$
電気変位	クーロン每平方メートル	C/m ²	$m^{-2} \cdot s \cdot A$
誘電率	ファラード每メートル	F/m	$m^{-3} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
透磁率	ヘンリー每メートル	H/m	$m \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^2$
モルエネルギー	ジュール每モル	J/mol	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot mol^{-1}$
モルエンタル比	ジュール每モル每ケルビン	J/(mol·K)	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$
モル熱容量	クーロン每キログラム	C/kg	$kg^{-1} \cdot s \cdot A$
照射線量(X線及びγ線)	クーロン每キログラム	C/kg	$kg^{-1} \cdot s \cdot A$
吸収線量	グレイ每秒	Gy/s	$m^2 \cdot s^{-3}$
放射強度	ワット每ステラジアン	W/sr	$m^4 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3}=m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
放射輝度	ワット每平方メートル每ステラジアン	W/(m ² ·sr)	$m^2 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3}=kg \cdot s^{-3}$

表5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10^{24}	ヨタ	Y	10^{-1}	デシ	d
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	c
10^{18}	エクサ	E	10^{-3}	ミリ	m
10^{15}	ペタ	P	10^{-6}	マイクロ	μ
10^{12}	テラ	T	10^{-9}	ナノ	n
10^9	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	p
10^6	メガ	M	10^{-15}	フェムト	f
10^3	キロ	k	10^{-18}	アト	a
10^2	ヘク	h	10^{-21}	ゼット	z
10^1	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	y

表6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h =60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	$1^\circ=(\pi/180) rad$
分	'	$1'=(1/60)^\circ=(\pi/10800) rad$
秒	"	$1''=(1/60)'=(\pi/648000) rad$
リットル	L	$1L=1 dm^3=10^{-3} m^3$
トン	t	$1t=10^3 kg$
ネーベル	Np	$1Np=1$
ベル	B	$1B=(1/2) ln10(Np)$

表7. 国際単位系と併用されこれに属さない単位でSI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	$1eV=1.60217733(49) \times 10^{-19} J$
統一原子質量単位	u	$1u=1.6605402(10) \times 10^{-27} kg$
天文単位	ua	$1ua=1.49597870691(30) \times 10^{11} m$

表8. 国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里	里	1海里=1852m
ノット	ト	1ノット=1海里毎時=(1852/3600)m/s
アーチル	a	$1a=1 dm^2=10^2 m^2$
ヘクタール	ha	$1ha=1 hm^2=10^4 m^2$
バル	bar	$1 bar=0.1 MPa=100kPa=1000hPa=10^5 Pa$
オンストローム	Å	$1 Å=0.1 nm=10^{-10} m$
バーン	b	$1 b=100 fm^2=10^{-28} m^2$

表9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エルグ	erg	$1 erg=10^{-7} J$
ダイナ	dyn	$1 dyn=10^{-5} N$
ボアズ	P	$1 P=1 dyn \cdot s/cm^2=0.1 Pa \cdot s$
ストップス	St	$1 St=1 cm^2/s=10^{-4} m^2/s$
ガウス	G	$1 G=10^{-4} T$
エルステッド	Oe	$1 Oe=(1000/4\pi) A/m$
マクスウェル	Mx	$1 Mx=10^{-8} Wb$
スチール	sb	$1 sb=1 cd/cm^2=10^4 cd/m^2$
ボルト	ph	$1 ph=10^4 lx$
ガル	Gal	$1 Gal=1 cm/s^2=10^{-2} m/s^2$

表10. 国際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリ	Ci	$1 Ci=3.7 \times 10^{10} Bq$
レントゲン	R	$1 R=2.58 \times 10^{-4} C/kg$
ラド	rad	$1 rad=1 cGy=10^{-2} Gy$
レム	rem	$1 rem=1 cSv=10^{-2} Sv$
X線単位	IX unit	$1 IX unit=1.002 \times 10^{-4} nm$
ガンマ	γ	$1 \gamma=1 n=10^{-9} T$
ジャンスキー	Jy	$1 Jy=10^{-26} W \cdot m^{-2} \cdot Hz^{-1}$
フェルミ	fm	$1 fermi=1 fm=10^{-15} m$
メートル系カラット	Torr	$1 metric carat=200 mg=2 \times 10^{-4} kg$
標準大気圧	atm	$1 Torr=(101325/760) Pa$
カリ	cal	$1 atm=101325 Pa$
ミクロ	μ	$1 \mu=1 \mu m=10^{-6} m$