JAEA-Research
2007-036

JAEA-Research

幌延深地層研究計画における地下水流動解析

ー平成17年度までの調査結果を踏まえた再解析ー

Groundwater Flow Analysis in the Horonobe Underground Research Laboratory Project
-Recalculation Based on the Investigation until Fiscal Year 2005-

操上 広志

Hiroshi KURIKAMI

地層処分研究開発部門
堆積岩地質環境研究グループ

Sedimentary Environment Research Group
Geological Isolation Research and Development Directorate

March 2007

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

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っております。

〒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

© Japan Atomic Energy Agency, 2007

幌延深地層研究計画における地下水流動解析
-平成17年度までの調査結果を踏まえた再解析-

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
操上 広志

(2007年1月31日受理)

日本原子力研究開発機構幌延深地層研究センターでは，地層科学研究の一環として岩盤の水理に関する調査研究・モデル構築を実施している。岩盤の水理モデルについては，調査の進展とともに更新し，その不確実性の低減を目指している。

本報告書は，平成17年度までの調査結果を踏まえて既存の岩盤の水理モデルを更新し，地下水流動解析を実施したものである。声問層，稚内層の透水係数のデータが増え，それに伴ってそれらの地層の透水係数の深度依存性の見直しを行い，また，大曲断層の透水係数についても再検討を行った。更新された透水係数データを基にまず感度解析を実施し，その後感度解析を踏まえた最適化を試みた。

今回のモデルでは，前モデルよりも実測の全水頭分布をより良く表現できたと言えるが，HDB-4孔，7孔などの浅い箇所やHDB-10孔での低い水圧，HDB-1孔，11孔の深部での高い水圧などを表現できなかった。今後，支配方程式などの条件の見直しも考慮しつつ精度の高いモデル化を進めていく予定である。

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

Groundwater Flow Analysis in the Horonobe Underground Research Laboratory Project -Recalculation Based on the Investigation until Fiscal Year 2005-

Hiroshi KURIKAMI

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

(Received January 31, 2007)

Horonobe Underground Research Laboratory of Japan Atomic Energy Agency has been conducting hydrogeological investigations and modeling works as a geoscientific research. Hydrogeological model has been revised and groundwater flow has been recalculated according to the progress of the investigations to decrease its uncertainty.

This report contains the revision of hydrogeological model and recalculation of groundwater flow based on the investigations until fiscal year 2005. The depth dependency of hydraulic conductivities in Koetoi and Wakkanai formation and Omagari fault was reevaluated. Based on the renewed database of hydraulic conductivity, firstly, sensitivity analyses were performed. Then the optimization was tried.

Although the revised model showed better agreement with measured hydraulic pressure distribution than the previous model, the hydraulic pressure distribution at shallower part of HDB-4 and 7, relatively lower pressure at HDB-10 and relatively high pressure at deeper part of HDB-1 and 11 were not able to be reproduced. Hereafter, more accurate modeling by considering revision of the governing equations will be performed.

Keywords: Horonobe Underground Research Laboratory, Groundwater Flow Analysis, Recalculation

目次

1. はじめに 1

2. 追加データの概要 1

3. 解析方針および解析条件 1

4. 解析結果および考察 3
4.1. 感度解析結果 3
4.2. 感度解析を踏まえた最適化 4
4.3. 前モデルとの比較 5

5. おわりに 6

参考文献 6

付録 35

Contents

1. Introduction 1

2. Additional data description 1

3. Strategy and condition for analysis 1

4. Results and discussion 3
4.1. Results of sensitivity analyses 3
4.2. Optimization based on the sensitivity analyses 4
4.3. Comparison with the previous model 5

5. Conclusions 6

References 6

Appendix 35

This is a blank page.

1. はじめに

日本原子力研究開発機構幌延深地層研究センターでは，地層科学研究の一環として岩盤の水理に関する調査研究・モデル構築を実施している。岩盤の水理モデルについては，調査の進展とともに更新し，その不確実性の低減を目指している。

これまでに，平成15年度までの調査結果に基づいた地下水流動解析を実施し，その結果をまとめた[1]。平成16年度から17年度にかけては，深層ボーリング調査(HDB-9孔から11孔)が実施され，新たな透水試験のデータが取得されるとともに，水圧の長期モニタリングによる水圧データや，表層水理調査による涵養量のデータが蓄積されてきた。本報告では，平成17年度までに取得されたこれらのデータに基づいて，操上ほか[1]の作成した岩盤の水理モデル(以下，前モデル)を更新し，地下水流動解析を実施した結果を示す。

2. 追加データの概要

Table 2.1に平成17年度までに実施した深層ボーリングを利用した水理試験により取得された透水係数および全水頭の一覧を示す。また，Figure 2.1には透水係数を深度に対してプロットした結果を示す。同図には，透水係数の対数が深度に比例すると仮定した場合の最小二乗近似線を併せて示す。平成15年度までの調査結果では，声問層，勇知層の透水係数は比較的ばらつきが小さい結果であった[1]が，データの追加(HDB-9，10，11孔)により，声問層においても透水係数の深度依存性やばらつきが無視できないことがわかってきた。一方，稚内層についてはこれまでに認められている透水性の深度依存性とばらつきでほぼ説明できる。ただし，深度依存の近似線の勾配は緩やかに(深度に対する透水係数の変化率は小さく)なっている。

3. 解析方針および解析条件

地下水流動解析の目的のひとつは，透水係数などの水理に関する物性値分布(水理地質構造)と河川や海岸線での全水頭や降水量などの境界条件を与えてダルシー則などの構成条件を仮定した連続式を解き，解析結果として得られる全水頭ないし水圧分布をボーリング孔などで得られている実測値と比較して検証することにより，対象とする地下水流動系を総合的に解釈することである。本来，地質(地層)区分と水理地質(水理物性)区分は1対1に対応するものではないが，幌延地域においては地質区分と間隙率などの物性値に良い相関があることなどから，これらを同一に扱ってきた。しかし，詳しく見るとひとつの水理地質区分の中でも第2章で示したように透水係数には深度との相関などの空間的な相違が存在すると考えられ，物性値を一定とすることは適当でない。したがって，透水係数の値に深度依存性を与えた解析やばらつきを与えた解析，感度解析，逆解析(最適化)などを実施して解析の精度を高めることとなる。また，透水係数のような物性値の空間的なばらつきだけでなく，境界条件や構成条件にも不確実性が存在しており，それらに対しても同様の検討が必要である。

ここでは，まず各水理地質区分の透水係数に対して第2章で示した実測値の平均的な値や文献などから推定した値を用いた順解析を基本ケースとして，

- 降雨強度
- 稚内層の透水係数
- 声問層の透水係数
- 大曲断層の透水係数

の全水頭に対する感度解析を実施した。その後，感度解析結果と実測の水圧分布を比較して考察し，実測の水圧分布を表現できるよう，想定しうる範囲で透水係数などの入力条件を最適化する試みを行った。また，前モデルとの比較を行った。

Table 3.1 に各ケースで設定した透水係数を示す。なお，表中 FY16 (Case-003) は，前モデルのうち最も実測の全水頭と近いケース (Case-003) [1] の設定値である。

基本ケース (Case0) では下記のように設定した。稚内層，声問層，勇知層の透水係数については，原位置水理試験結果の解釈により得られた深度依存性を考慮した最小二乗近似線 (第 2 章の Figure2.1) を与えた。各水理地質区分の透水係数の深度依存の上限値は各地層の原位置水理試験結果の最大値とし，下限値は室内透水試験結果により求められた基質部の透水係数の対数平均値とした。また，大曲断層については試験データが 2 点と少ないが，これについても深度依存性を考慮した。大曲断層の深度依存の勾配は，稚内層と同一とし，全体的に稚内層より透水係数を 1 オーダー高く設定した。また，その他の水理地質区分については，測定データがないため，既往の検討結果 [2] ならびに推定値を用いた。なお，これらの透水係数設定は下茂ほか [3] に準拠しているが，HDB-11 孔のデータを新たに追加している。

降雨強度は降水量から蒸発散量を引いたもの (解析上) であるが，現在表層水理調査で取得している降水量，蒸発散量はデータ量が少ないことから，感度解析を行うこととした。また，稚内層，声問層については主な研究対象の地層であること，大曲断層については大規模な地質構造であることから感度解析の対象とした。

さらに，HDB-1 孔や 11 孔の深部では，水理地質構造と地表面での境界条件だけでは説明できないような高い水圧が認められていることから，深部に高い水圧の供給源があることを想定し，底部境界条件に高い水圧を与えた感度解析も実施した。

Case1 は降雨強度に注目したケースであり，単純に 2 倍ないし 2 分の 1 とした。Case2，Case3，Case4 はそれぞれ稚内層，声問層，大曲断層の透水係数に注目したケースである。稚内層については大曲断層からの距離，および深度によって稚内層を 3 領域 (断層近傍かつ上部，断層遠くかつ上部，下部) に分割したケース (Case2-1) と，稚内層中の小断層帯の走行が東西に卓越しているという概念 [1] を考慮して透水係数に異方性を与えたケース (Case2-2) を設定した。稚内層を 3 領域に分割した根拠については付録に記す。声問層については，透水係数を高く設定したケース (Case3-1) と低く設定したケース (Case3-2) を解析した。大曲断層については，透水係数を高く与えたケース (Case4-1) と，低透水性の断層核があることを想定して透水係数に異方性を与えたケース (Case4-2) を設定した。Case5-*は底部境界条件に注目したケースである。底部境界は深度およそ 5000m であり，研究所設置地区およびその周辺の標高約 100m 程度に対して，1%および 10%程度高い値として，150m (=100m+5000m×1%，Case4-1) および 600m (=100m+5000m×10%，Case4-2 の全水頭 (masl) を設定した。

解析に利用するメッシュ，解析コード，水理地質区分，境界条件とも，前モデルと同じとした (境界条件については，Case-5 で異なる)。すなわち，解析コードとして有限要素プログラム Dtransu-3D・EL[4] を使用し，水理地質区分は，増幌層より下位，増幌層，稚内層，声問層，勇知層，更別層，表層 (更別層より上位)，大曲断層，幌延断層 (N1 断層) とした。Figure 3.1 に解析領域を，Figure 3.2 に解析メッシュを示す。ただし，水理地質区分を割り当てるための地質構造は，層厚や断層の位置などを若干修正している。また，Figure3.3 には稚内層を 3 領域に分割したケース (Case2-1) の解析メッシュを示している。

4. 解析結果および考察

4.1. 感度解析結果

Figure 4.1～4.5 に，それぞれ Case1 から Case5 の感度解析により得られたボーリング孔位置での全水頭分布を示す。実測値として，水理試験および／または水圧の長期モニタリングによって取得された水圧から全水頭に換算した値を併せて示した。使用した長期モニタリングのデータの取得日を Table 4.1 に示す。

Figure 4.6～4.10 には，全水頭分布を 2 次元断面で示した。Figure 4.6 は 500m 坑道に近い標高 -400m の水平断面である。Figure 4.7 は HDB-3，4 孔を通る鉛直断面であり，大曲断層を直交する断面である。また，清水川流域とペンケエベコロベツ川流域を横断する断面でもある。Figure 4.8 は HDB-4，5 孔を通る断面であり，HDB-5 孔から HDB-4 孔に向かう高い動水勾配が特徴的である。Figure 4.9 は HDB-6，7 孔を通る断面であり，地下施設のある清水川流域の上流から下流に向かう流れを表現している。Figure 4.10 は HDB-7，9 孔を通る断面であり，HDB-9 孔近傍の山から HDB-7 孔側に向かう動水勾配が存在する。また，図中には実測値から次式で推定した全水頭分布も示した。

$$\tilde{h} = \frac{\sum_{i=1}^{N} w_i h_i}{\sum_{i=1}^{N} w_i} \quad \text{ただし，} \quad w_i = \frac{1}{D^{3.5}}$$

ここで，$\tilde{h}$ は推定点の全水頭，w_i，h_i はそれぞれ観測点 i の重みと全水頭，D は観測点 i と推定点の距離である。

以下に感度解析で対象となるパラメータの各々が全水頭分布に与える影響についてまとめる。

- **降雨強度：Case1-1 (降雨が少ないケース)，Case1-2 (降雨が多いケース) (Figure 4.1)**

  降雨強度の大きさは標高の高い場所の地下水位に大きく影響している。特に降雨強度が低い Case1-1 では，標高の高い山での地下水位が顕著に低下していることが Figure 4.7，4.9 ①などから確認できる。Figure 4.1 において HDB-9 孔で特に降雨強度による影響が認められるが，この孔が他の孔に比べて標高が高いために敏感に反応しているものと考えられる。

  降水量は基本ケースよりも低いほうが実測値に近づく傾向が見られる。

- **稚内層：Case-2-1 (稚内層を 3 領域に区分したケース)，Case2-2 (稚内層の透水異方性を考慮したケース) (Figure 4.2)**

  Figure 4.2 を見ると，稚内層の透水係数の設定の違いにより全水頭は大きく変化していることが認められる。これは，HDB-7 孔を除く全てのボーリング孔において稚内層が認められていることが要因のひとつと考えられる。

  稚内層を 3 領域に区分したケースでは，基本ケースに比べ，標高の比較的低い HDB-1，3，6，10 孔で稚内層中の全水頭が高くなり，一方，標高の比較的高い HDB-5，9 孔では逆に低くなり，稚内層中の全水頭は大曲断層を中心とした広範囲でほぼ 80m～90m に均一化している。これは，稚内層の上部に透水性の大きい領域を与えたために生じたものと想定される。稚内層中で全水頭が均一化している状況は Figure 4.6 ②に明瞭に現れている。

  透水異方性を考慮したケースでは，HDB-9 孔では基本ケースより高く，HDB-10 孔では低くなっている。Figure 4.6 ③を見ると HDB-10 孔では全水頭の低い西側からの影響を受けていることが読み取れる。一方，HDB-9 孔では東側の山に影響を受けているようである (Figure 4.6④)。

  実測値と比較すると，基本ケースないし透水異方性を与えたケースがより適したものと考えることができる。

- **声問層：Case-3-1 (声問層の透水性を高く設定したケース)，Case3-2 (声問層の透水性を低く設定したケース) (Figure 4.3)**

  Figure 4.3から，声問層の透水係数についても稚内層の透水係数と同様，HDB-7孔以外のボーリング孔において全水頭に大きな影響を与えている。

  声問層の透水性を高く設定したケースでは，Figure 4.7，4.9 ⑤に見られるように，声問層中の全水頭が低くなっている。これは，標高の低い南西側の影響を受けているためである。

  透水性を低く設定したケースでは，Figure 4.9，4.10 ⑥に見られるように，稚内層の全水頭が高くなり，声問層がキャップロックの効果を示していることが確認される。

- **大曲断層：Case-4-1 (大曲断層の透水性を高く設定したケース)，Case4-2 (大曲断層の透水異方性を考慮したケース) (Figure 4.4)**

  Figure 4.6 ⑦を見ると，大曲断層の透水性を変化させたケースでは全水頭が大曲断層によって東西に分断されていることがわかる。

  Figure 4.4において実測値と比較すると，基本ケースに比べHDB-4，6孔などは実測値に近づいているが，HDB-5，9孔などは乖離している。

- **底部境界：Case-5-1 (1%の異常高圧を考慮したケース)，Case5-2 (10%の異常高圧を考慮したケース) (Figure 4.5)**

  底部境界に高い水圧を与えたケースでは，Figure 4.7 ⑧などに見られるように増幌層以深において高い圧力が保持されている様子が認められるが，稚内層以浅では圧力が抜けていることがわかる。Figure 4.5を見てもボーリング孔における全水頭にはほとんど影響していない。

  これは稚内層の透水係数に深度依存性を与え，また増幌層以深の透水係数を低く設定しているために水圧が遮蔽されているものと考えることができる。

4.2. 感度解析を踏まえた最適化

ここでは，上記の感度解析を踏まえ，実測の水圧分布をより良く表現できるように，想定しうる範囲で透水係数などの入力条件を最適化する逆解析的な試みを行った。

逆解析は，本来であれば実測値と計算値の偏差などの指標を用いて定量的に実施するのが良いが，ボーリング孔毎に観測点数が異なり，データ量による重み付けなどの課題が残ることから，ここでは定性的な判断基準を用いて試行錯誤的に最適化を行うこととした。判断基準としては，下記を設定した。

- 実測で認められている流出域，涵養域などの大局的な傾向を表現すること
- 全水頭の値が実測値に近似していること
- HDB-5孔の相対的に高い全水頭を表現すること (HDB-5孔の高い全水頭は主な涵養域と考えられる清水川上流域の水圧を受けていると想定され，重要と考えられるため)
- HDB-10孔の相対的に低い全水頭を表現すること (HDB-10孔は谷に位置し，地形的に被圧される環境であるにも関わらず，低い全水頭を示しており，重要と考えられるため)

また，前提として下記を設定した。

- 水理地質区分は基本ケース (Case0) に基づくこと
- 入力条件のうち，稚内層，声問層，勇知層の透水係数などの調査結果が得られている地層については，それらと整合する条件とすること
- 感度解析で検討したパラメータのみを変動パラメータとする。

感度解析結果から，大曲断層の透水性を変化させたケースでは，いずれもHDB-9孔において全水頭が深度とともに低くなる涵養域の傾向となり，実測とは逆となっていることから，大曲断層は基本ケースのままとした。声問層については，HDB-10孔での実測値との差異が大きいことや透水係数

の実測値との整合性を考慮して，基本ケースの値を使用した。底部境界については，高い圧力は全水頭の実測値が得られている深度には影響を与えていないことから，やはり基本ケースを踏襲することとした。

稚内層の透水係数については，3 領域に分割したケース(Case2-1)では HDB-10 孔の実測値と差異が見られることや HDB-5 孔の水圧が表現できていない。一方，透水異方性を考慮したケース(Case2-2)は HDB-9 孔において基本ケースよりも実測値との整合性は低いものの，HDB-5 孔の高い水圧や HDB-10 孔の低い水圧が相対的に良く表現されている。

上記のことから，透水係数設定については Case2-2 を採用することとし，降雨強度を変更することで，実測の全水頭をより良く表現することを試みた。降雨強度は，Case2-2 の 0.365m/year (1mm/day) に対して，0.7mm/day，0.5mm/day，0.3mm/day とした。

Figure 4.11 に解析結果を示す。降雨強度の低下とともに HDB-5 孔，9 孔の全水頭が低下している。降雨の低下により HDB-9 孔は実測値に近づいているが，一方で HDB-5 孔の深度 100m 程度の箇所では実測値から遠ざかっている。この 2 つの孔の全水頭分布を同時に表現することはできない原因としては地質構造が正確でないことや，地層毎に透水係数を設定していることの限界などが想定されるが，現状では降雨強度 0.3～0.7mm/day 程度が妥当な値であると考えることができよう。なお，他の孔では降雨強度による影響はほとんど認められない。Table 4.2 に最適化プロセスにより得られたパラメータを示す。

4.3. 前モデルとの比較

4.2 で示した解析のうち，降雨強度 0.5mm/day のもの(以下，今回のモデル)について，前モデルとの比較を行った。

前述の Figure 4.11 には各ボーリング孔における全水頭分布を，Figure 4.12 には標高-400m の水平断面での透水係数分布と全水頭分布を，Figure 4.13，4.14 にはそれぞれ HDB-3 孔，HDB-4 孔を通る鉛直断面，HDB-6 孔，7 孔を通る鉛直断面での透水係数分布と全水頭分布を示す。また，Figure 4.15 には HDB-4，6，7，8，9，10，11 孔の標高 0m，-200m，-400m，-600m を通る地下水の流線を，Figure 4.16 には地表面における全水頭分布および流入出量を示す。Figure 4.16 中の P-1～5 流域は，水文調査(表層水理調査)における河川流出観測の対象流域であり(現在は P-3～5 流域が観測対象)，図中には解析により得られた各流域の平均の涵養／流出量も示した。

図より，全水頭は全体的に前モデルの方が低い値となっている。特に HDB-5，9 孔での高い全水頭は表現できていなかったことがわかる。これは，前モデルにおいて稚内層の浅い箇所の透水係数が高く(Figure 4.14，4.15①)，標高の高い箇所で地下水位が低下していることが原因である。すなわち，稚内層の透水係数の深度依存性の近似曲線の勾配が前モデルにおいては急であった(深度に対する透水係数の変化率が大きかった)ために，浅い箇所で透水係数が高く設定されていたことが原因である。

なお，Figure 4.11 より，今回のモデルは 4.2 に示した観点からは前モデルに比べて実測の全水頭(水圧)分布をより良く表現できたと言える。しかし，深いところでは実測値に近くなっているが，浅い箇所では実測値との整合性が低い。これは，メッシュの粗さにより地形を十分に正確に考慮できていないことや，透水係数のばらつきを考慮していないことなどが主な原因と想定される。

Figure 4.15 の流線を見ると，前モデルでは標高-400m 程度を境として上部では清水川流系，ペンケエベコロベツ川流系といった局所流動系に支配された流動となり，下部では天塩川流系という広域流動系に支配された流動となっていた。しかし，今回のモデルでは局所流動系がより深部まで影響を及ぼしているような傾向を示した。この原因も，高い標高の全水頭が保持されることで地形のコントラストが前モデルに比べて大きくなったためと想定される。

涵養／流出量は，水文調査から試験的に算定されている涵養量100mm/year (約0.27mm/day)[6]と比較して，前モデルではやや高かったものが，今回のモデルではかなり小さい値となった。これは解析における表層の取り扱いなどが要因として考えられるが，今後の課題として残されるものであろう。一方，定性的にはP-3流域の上流が主な涵養源となっていることやP-4流域が流出域となっていること，大曲断層沿いに流出域があることが推察され，これらの解析結果から逆に調査位置の再検討を計画することが有益である。

5. おわりに

本報告では，平成17年度までに新たに取得されたデータに基づいて既存の岩盤の水理モデルを更新し，地下水流動解析を再実施した。

本報告で更新したモデルは，4.2 に示した観点からは前モデルに比べて実測の全水頭(水圧)分布をより良く表現できたと言えるが，浅い箇所やHDB-10孔での低い水圧，HDB-1孔，11孔の深部での高い水圧などを表現できなかった。これは，前モデルと今回のモデルにおいて，モデル構築の前提のうち，支配方程式や境界条件が同じであり，また水理地質区分もほとんど同じことに起因していると想定される。現在では，岩盤中の割れ目分布が水理地質構造を支配していることが解明されつつあり，また，メタンガスの生成などによる水圧の上昇や溶存成分濃度の違いが滞留を起こし地下水流動に与える影響も想定される。今後は，このような現象を表現するようなモデル化も検討しつつ，精度の高いモデル化を進めていく予定である。

第2段階以降では，地質環境に対して地下施設建設という大きなインパクトを与える。このようなインパクトは透水係数分布や割れ目のネットワークを明らかにするなどの効果が期待できることから，観測結果を利用した検証を行うことが今後のモデル化では特に重要になる。

また，実測値を表現するモデルは唯一ではないことから，代替モデルの構築とそれらの比較を行うことがモデルの信頼性を確保するために有益である。

参考文献

1) 操上広志，竹内竜史，瀬尾昭治：幌延深地層研究計画における地下水流動解析，核燃料サイクル開発機構技術資料，JNC TN5400 2005-003，(2005)
2) 今井久，前田信行，塩崎功，雨宮清，千々松正和：幌延深地層研究計画における地下水流動解析に関する検討，核燃料サイクル開発機構技術資料，JNC TJ1400 2004-004，(2002)
3) 下茂道人，山本肇，熊本創，井尻裕二：幌延深地層研究計画における水理地質構造モデル・地球化学計算モデルの構築について，日本原子力研究開発機構 委託研究報告書，(2006)
4) 菱谷智幸，西垣誠，橋本学：物質移動を伴う密度依存地下水流の3次元数値解析手法に関する研究，土木学会論文集，No.638/III-49，pp.59-69，(1999)
5) 今井久，福留和人，粥川幸司，佐々木肇，千々松正和，茂呂吉司：幌延深地層研究計画における地下水流動に関する研究，核燃料サイクル開発機構技術資料，JNC TJ5400 2003-009，(2004)
6) 瀬尾昭治，竹内竜史，操上広志，原稔：幌延深地層研究計画における水収支法による地下水涵養量の推定-2003年8月～2004年7月-，核燃料サイクル開発機構技術資料，JNC TN5400 2005-005，(2005)

Table 2.1 Hydraulic conductivity obtained by hydraulic tests in the deep boreholes (HDB-1 to 8)

Borehole	Packer depth (GL-m)		Mean depth (mabl)	Mean depth (masl)	Interval (m)	Geology	Hydraulic conductivity (m/s)	Coefficient of storage (1/m)	Hydraulic head (masl)
	Upper	Lower							
HDB-1	370.00	395.00	382.50	-313.40	25.00	Wk	9.70E-10	1.00E-06	65.10
HDB-1	548.00	568.18	558.09	-488.99	20.18	Wk	3.29E-10	1.00E-06	69.80
HDB-2	344.90	404.90	374.90	-332.37	60.00	Wk	3.50E-09	5.40E-05	85.53
HDB-2	679.50	695.69	687.60	-645.07	16.19	Wk	3.61E-11	-	157.60
HDB-2	666.50	682.69	674.60	-632.07	16.19	Wk	2.45E-11	1.00E-08	189.53
HDB-3	160.50	200.45	180.48	-122.28	39.95	Kt	3.35E-08	5.17E-07	59.56
HDB-3	201.95	241.90	221.93	-163.73	39.95	Kt	7.03E-09	7.96E-08	61.50
HDB-3	394.98	405.00	399.99	-341.80	10.02	Kt	8.46E-09	6.00E-07	65.47
HDB-3	454.50	520.00	487.25	-429.06	65.50	Wk	3.60E-09	1.42E-04	66.63
HDB-4	218.45	236.53	227.49	-163.88	18.08	Wk	1.41E-05	4.36E-19	60.33
HDB-4	281.45	299.53	290.49	-226.88	18.08	Wk	9.35E-06	4.54E-42	72.48
HDB-4	371.90	406.43	389.17	-325.56	34.53	Om	5.36E-07	5.24E-40	74.73
HDB-4	407.90	520.00	463.95	-400.34	112.10	Om	3.14E-08	-	73.45
HDB-5	154.05	180.46	167.26	-88.49	26.41	Wk	6.47E-07	7.46E-15	96.77
HDB-5	182.05	250.46	216.26	-137.49	68.41	Wk	8.48E-07	1.90E-23	98.81
HDB-5	331.22	402.23	366.73	-287.96	71.01	Wk	4.39E-08	6.48E-09	90.26
HDB-5	404.74	420.19	412.47	-333.70	15.45	Wk	7.01E-09	-	87.57
HDB-6	41.54	84.59	63.07	-2.85	43.05	Kt	1.80E-08	5.19E-05	58.07
HDB-6	218.95	250.00	234.48	-174.26	31.05	Kt	1.52E-09	1.63E-05	66.39
HDB-6	280.95	312.00	296.48	-236.26	31.05	Wk	1.83E-06	6.34E-14	67.79
HDB-6	437.95	483.00	460.48	-400.26	45.05	Wk	7.32E-09	7.05E-07	62.86
HDB-6	363.95	409.00	386.48	-326.26	45.05	Wk	1.64E-06	-	67.83
HDB-6	484.95	545.00	514.98	-454.76	60.05	Wk	2.61E-11	8.34E-06	73.58
HDB-6	484.95	620.00	552.48	-492.26	135.05	Wk	2.17E-11	1.29E-05	70.37
HDB-7	36.36	62.91	49.63	-5.88	26.55	Yc	2.76E-09	1.77E-07	43.80
HDB-7	36.36	178.00	107.18	-63.43	141.64	Yc	4.02E-09	3.32E-06	42.94
HDB-7	216.30	225.42	220.86	-177.11	9.12	Yc	3.35E-10	1.08E-05	59.93
HDB-7	256.66	287.71	272.19	-228.43	31.05	Yc	3.34E-10	2.36E-05	64.31
HDB-7	321.21	338.86	330.04	-286.28	17.65	Yc	2.75E-10	2.05E-05	62.62
HDB-7	321.21	447.00	384.11	-340.35	125.79	Yc+Kt	4.47E-10	2.33E-05	60.22
HDB-8	57.50	89.05	73.27	-3.22	31.55	Kt	9.54E-09	1.01E-05	62.67
HDB-8	168.01	184.06	176.04	-105.98	16.05	Wk	2.86E-06	1.23E-14	63.25
HDB-8	196.01	212.06	204.04	-133.98	16.05	Wk	1.18E-06	-	63.21
HDB-8	247.01	295.06	271.04	-200.98	48.05	Wk	2.69E-10	-	68.15
HDB-8	303.97	362.02	333.00	-262.94	58.05	Wk	5.67E-09	-	69.81
HDB-8	355.97	414.02	385.00	-314.94	58.05	Wk	2.71E-10	-	74.04
HDB-8	355.97	470.00	412.99	-342.93	114.03	Wk	1.99E-09	4.13E-10	68.83

Wk :Wakkanai formation Kt :Koetoi formation

Yc :Yuchi formation Om :Damage zone of Omagari fault

Table 2.1 Hydraulic conductivity obtained by hydraulic tests in the deep boreholes (continued)
(HDB-9 to 11)

Borehole	Packer depth (GL-m)		Mean depth (mabh)	Mean depth (masl)	Interval (m)	Geology	Hydraulic conductivity (m/s)	Coefficient of storage (1/m)	Hydraulic head (masl)
	Upper	Lower							
HDB-9	46.37	82.60	64.49	32.70	36.23	Kt/Wk	5.68E-08	-	70.80
HDB-9	25.50	82.60	54.05	43.14	57.10	Kt/Wk	5.00E-07	-	74.72
HDB-9	144.97	202.02	173.50	-76.31	57.05	Wk	6.02E-10	8.78E-05	75.66
HDB-9	157.90	187.95	172.93	-75.74	30.05	Wk	2.18E-10	1.67E-08	76.59
HDB-9	216.90	257.50	237.20	-140.01	40.60	Wk	1.50E-06	-	76.88
HDB-9	326.97	370.02	348.50	-251.31	43.05	Wk	7.62E-10	1.13E-06	79.60
HDB-9	383.97	427.02	405.50	-308.31	43.05	Wk	6.25E-08	-	80.29
HDB-9	430.97	474.02	452.50	-355.31	43.05	Wk	8.91E-09	-	81.74
HDB-10	41.33	59.88	50.61	0.22	18.55	Kt	2.53E-07	-	50.21
HDB-10	101.33	136.00	118.67	-67.84	34.67	Kt	7.09E-09	-	52.43
HDB-10	219.34	256.39	237.87	-187.04	37.05	Kt	9.48E-10	1.30E-06	55.65
HDB-10	162.84	199.89	181.37	-130.54	37.05	Kt	1.65E-09	1.30E-07	54.31
HDB-10	295.91	319.96	307.94	-257.11	24.05	Kt/Wk	6.91E-09	-	52.19
HDB-10	329.91	353.96	341.94	-291.11	24.05	Wk	1.12E-07	-	52.15
HDB-10	387.91	411.96	399.94	-349.11	24.05	Wk	2.49E-08	-	52.37
HDB-10	445.84	469.89	457.87	-407.04	24.05	Wk	2.44E-07	-	56.05
HDB-10	457.34	481.39	469.37	-418.54	24.05	Wk	2.04E-09	-	51.45
HDB-11	55.50	75.55	65.53	1.32	20.05	Kt	1.38E-09	3.26E-05	65.87
HDB-11	115.58	153.00	134.29	-67.44	37.42	Kt	6.96E-09	1.21E-05	66.74
HDB-11	171.00	237.05	204.03	-137.18	66.05	Kt	2.07E-09	7.68E-05	66.99
HDB-11	311.00	380.05	345.53	-278.68	69.05	Kt	2.03E-09	6.74E-06	70.64
HDB-11	704.00	724.05	714.03	-647.18	20.05	Wk	6.25E-12	4.60E-06	81.64
HDB-11	670.00	690.05	680.03	-613.18	20.05	Wk	1.25E-08	1.55E-06	71.93
HDB-11	646.00	666.05	656.03	-589.18	20.05	Wk	8.78E-09	2.38E-06	72.61
HDB-11	564.00	584.05	574.03	-507.18	20.05	Wk	1.53E-08	2.26E-05	72.36
HDB-11	697.00	735.05	716.03	-649.18	38.05	Wk	4.22E-12	1.28E-03	78.06
HDB-11	606.00	644.05	625.03	-558.18	38.05	Wk	2.26E-08	4.34E-05	72.42
HDB-11	812.00	828.05	82003	-753.18	16.05	Wk	1.22E-12	4.86E-05	104.27
HDB-11	923.00	1000.10	961.55	-894.70	77.10	Wk	2.61E-10	-	108.84

Table 3.1 Hydraulic conductivity settings

Parameter of sensitivity analysis	FY16 (Case-003)	FY17 Case0 Base case	Case1-1 Precipitation	Case1-2 Precipitation	Case2-1 Wakkanai Fm	Case2-2 Wakkanai Fm	Case3-1 Koetoi Fm	Case3-2 Koetoi Fm	Case4-1 Omagari fault	Case4-2 Omagari fault	Case5-1 Bottom boundary	Case5-2 Bottom boundary
Hydraulic conductivity (m/s)												
Surface	1.00E-07	1.00E-06										
Sarabetsu Fm	1.00E-06	1.00E-06										
Yuchi Fm	$\log_{10}k=-0.0034z-8.3665$	$\log_{10}k=-0.0034z-8.3665$ Upper limit : 4.00E-09 Lower limit : 2.50E-10										
Koetoi Fm	9.07E-09	K1					K2	K3	K1			
Wakkanai Fm	$\log_{10}k=-0.0105z-3.9118$	W1			W2	W3	W1					
Masuporo Fm	5.00E-10	5.00E-11										
Lower than Masuporo Fm	1.00E-11	5.00E-12										
Damage zone of Omagari fault	1.30E-07	01							02	03	01	
N1 fault	1.00E-07	1.00E-07										
Eastern part from N1 fault	1.00E-10	1.00E-10										
Boundary condition												
Intensity of precipitation (m/year)	0.365	0.365	0.365/2	0.365*2	0.365							
Bottom boundary	No flow	No flow									Fixed head (+150m)	Fixed head (+600m)

Description

W1 $\log_{10}k=-0.0059z-5.6359$, Upper limit : 1.40E-05, Lower limit : 3.60E-12
W2 Domain 1 : 1.88E-06, Domain 2 : 2.09E-08, Domain 3 : 1.17E-09
W3 $\log_{10}kx=\log_{10}kz=-0.0059z-5.6359$, $\log_{10}ky=-0.0059z-6.6359$ (Hydraulic conductivity of y-direction is lower than those of the other directions by 1 order.)
where domain 1 is upper part of the Wakkanai formation and near the Omagari fault, domain 2 is upper part and far from the fault, and domain 3 is lower part of the Wakkanai formation.

K1 $\log_{10}k=-0.0043z-7.5468$, Upper Upper limit : 2.50E-07, Lower limit : 1.70E-10
K2 $\log_{10}k=-0.0043z-6.5468$, Upper Upper limit : 2.50E-07, Lower limit : 1.70E-10 (Higher than K1 by 1 order)
K3 $\log_{10}k=-0.0043z-8.5468$, Upper Upper limit : 2.50E-07, Lower limit : 1.70E-10 (Lower than K1 by 1 order)

01 $\log_{10}k=-0.0059z-4.6359$, Upper limit : 1.00E-06, Lower limit : 3.60E-11
02 1.00E-05
03 kx=1.00E-11, ky=kz=1.00E-05

Table 4.1 Date when the used data of long-term monitoring is measured

Borehole	Date
HDB-1	October 1, 2006
HDB-3	April 1, 2006
HDB-4	October 10, 2006
HDB-6	December 1, 2006
HDB-7	April 1, 2006
HDB-8	October 1, 2006
HDB-9	October 1, 2006
HDB-10	August 1, 2006

Table 4.2 Optimized parameters

Hydraulic conductivity (m/s)	
Surface	1.00E-06
Sarabetsu Fm	1.00E-06
Yuchi Fm	$\log_{10}k$=-0.0034z-8.3665 Upper limit : 4.00E-09 Lower limit : 2.50E-10
Koetoi Fm	$\log_{10}k$=-0.0043z-7.5468 Upper limit : 2.50E-07 Lower limit : 1.70E-10
Wakkanai Fm	$\log_{10}kx$= $\log_{10}kz$=-0.0059z-5.6359 $\log_{10}ky$=-0.0059z-6.6359 Upper limit : 1.40E-05 Lower limit : 3.60E-12
Masuporo Fm	5.00E-11
Lower than Masuporo Fm	5.00E-12
Damage zone of Omagari fault	$\log_{10}k$=-0.0059z-4.6359 Upper limit : 1.00E-06 Lower limit : 3.60E-11
N1 fault	1.00E-07
Eastern part from N1 fault	1.00E-10
Boundary condition	
Intensity of precipitation	0.110-0.256 m/year (0.3-0.7 mm/day)
Bottom boundary	No flow

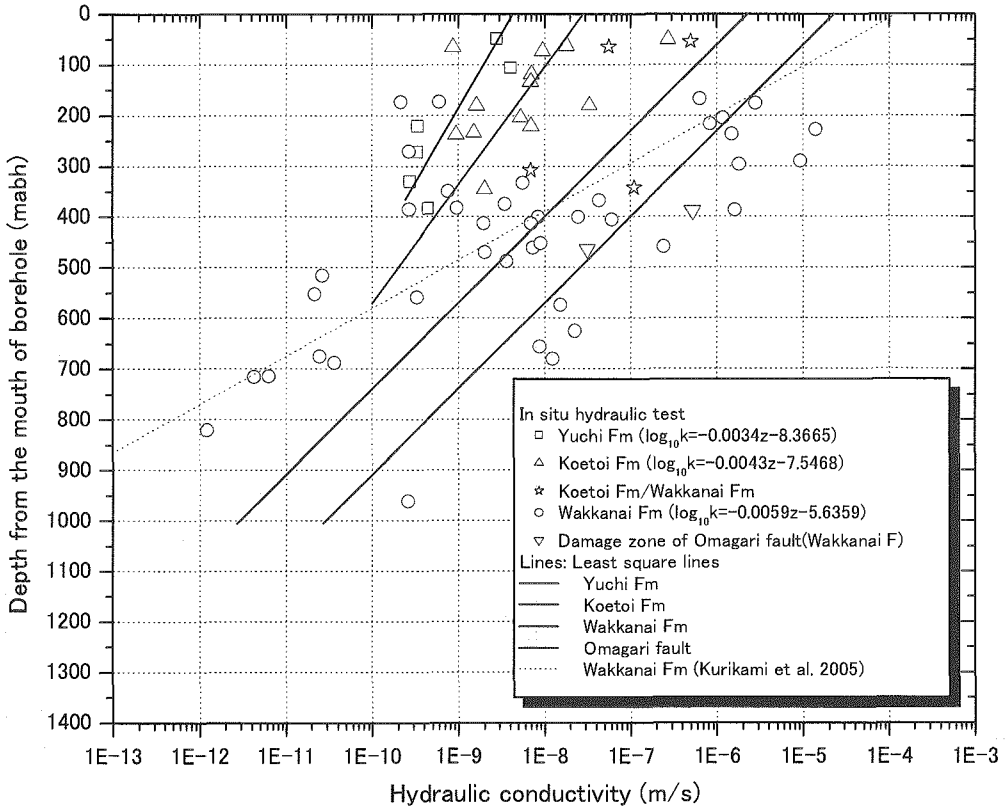
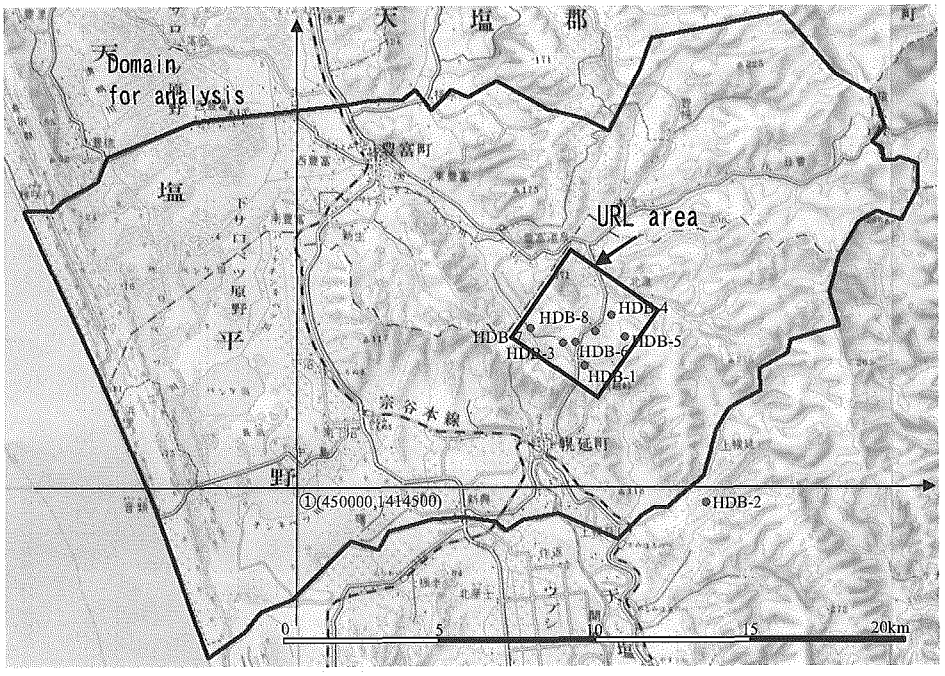


Figure 2.1 Vertical distribution of hydraulic conductivity



(Added to 1:200,000 Scale Regional Maps (Teshio, Esashi) issued by GSI)

Figure 3.1 Domain for analysis

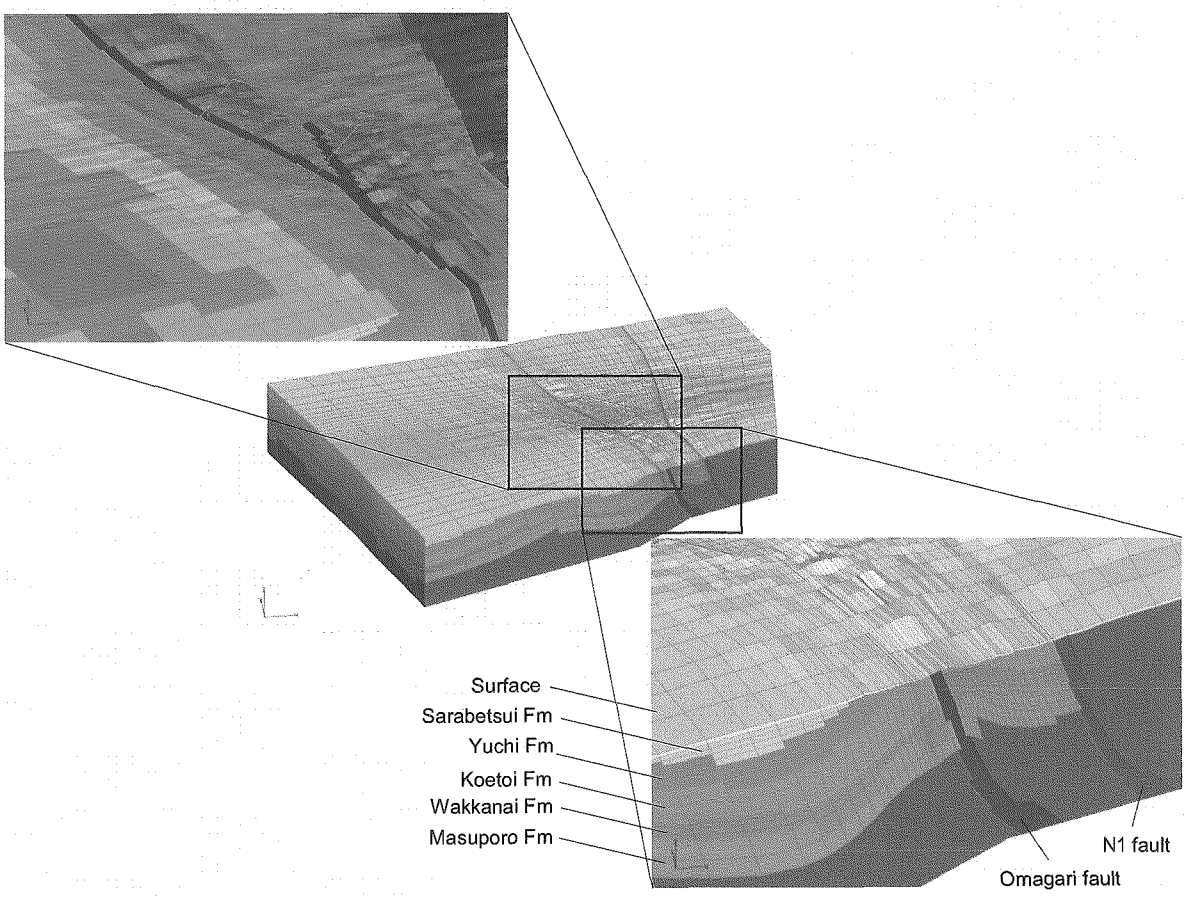


Figure 3.2 Finite element mesh

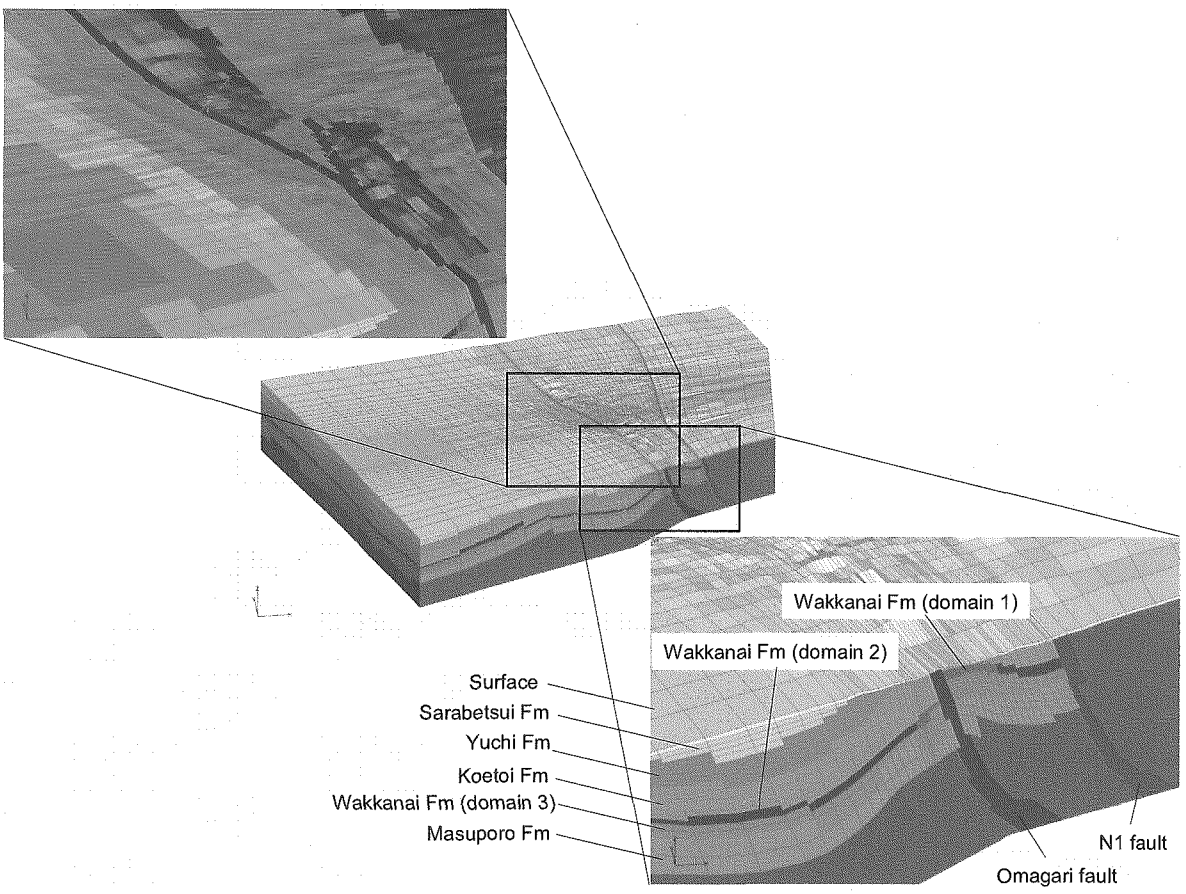


Figure 3.3 Finite element mesh for Case2-1

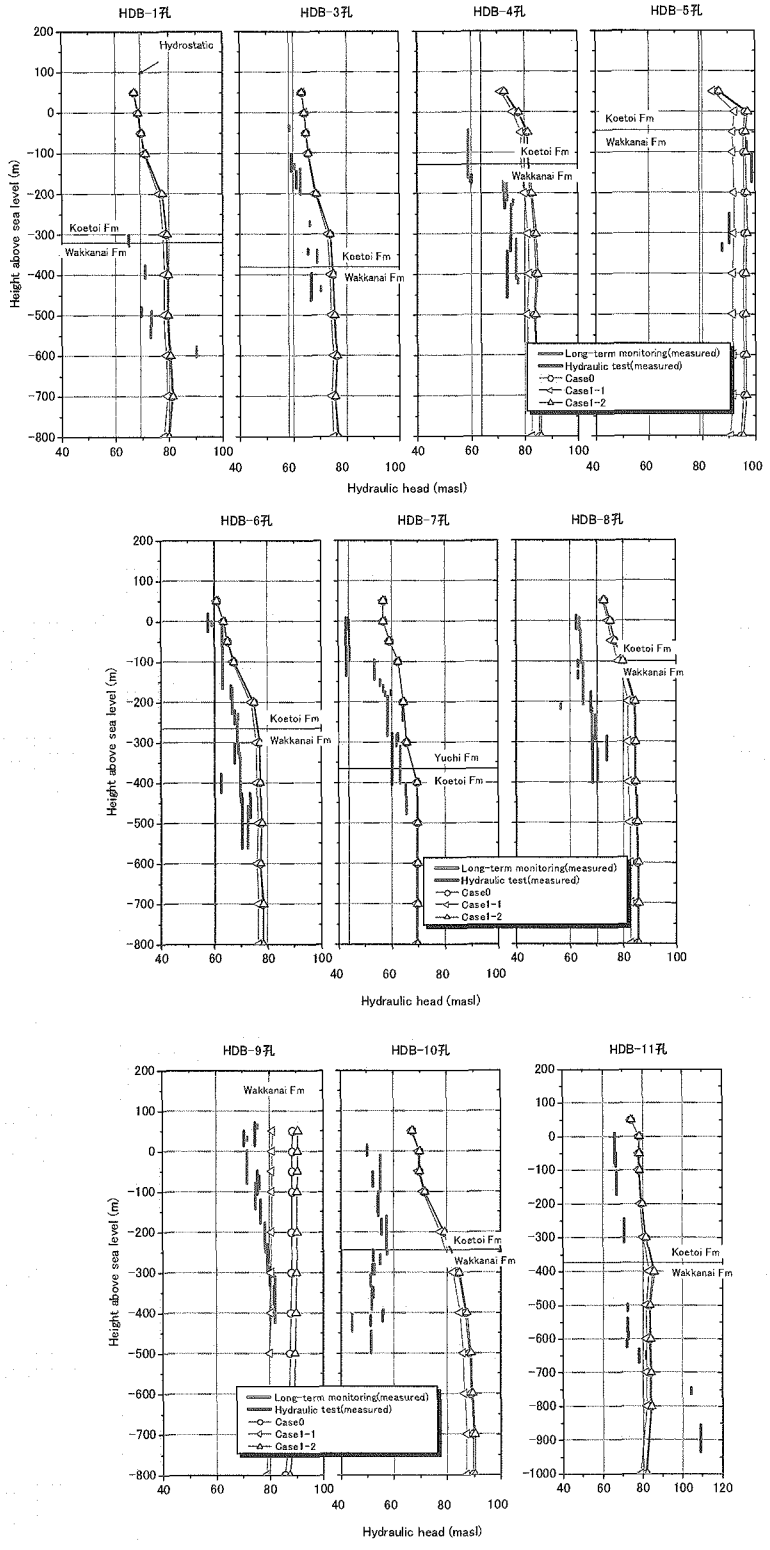


Figure 4.1 Comparison between the simulation and measurement
(Sensitivity analyses of Case1 (precipitation))

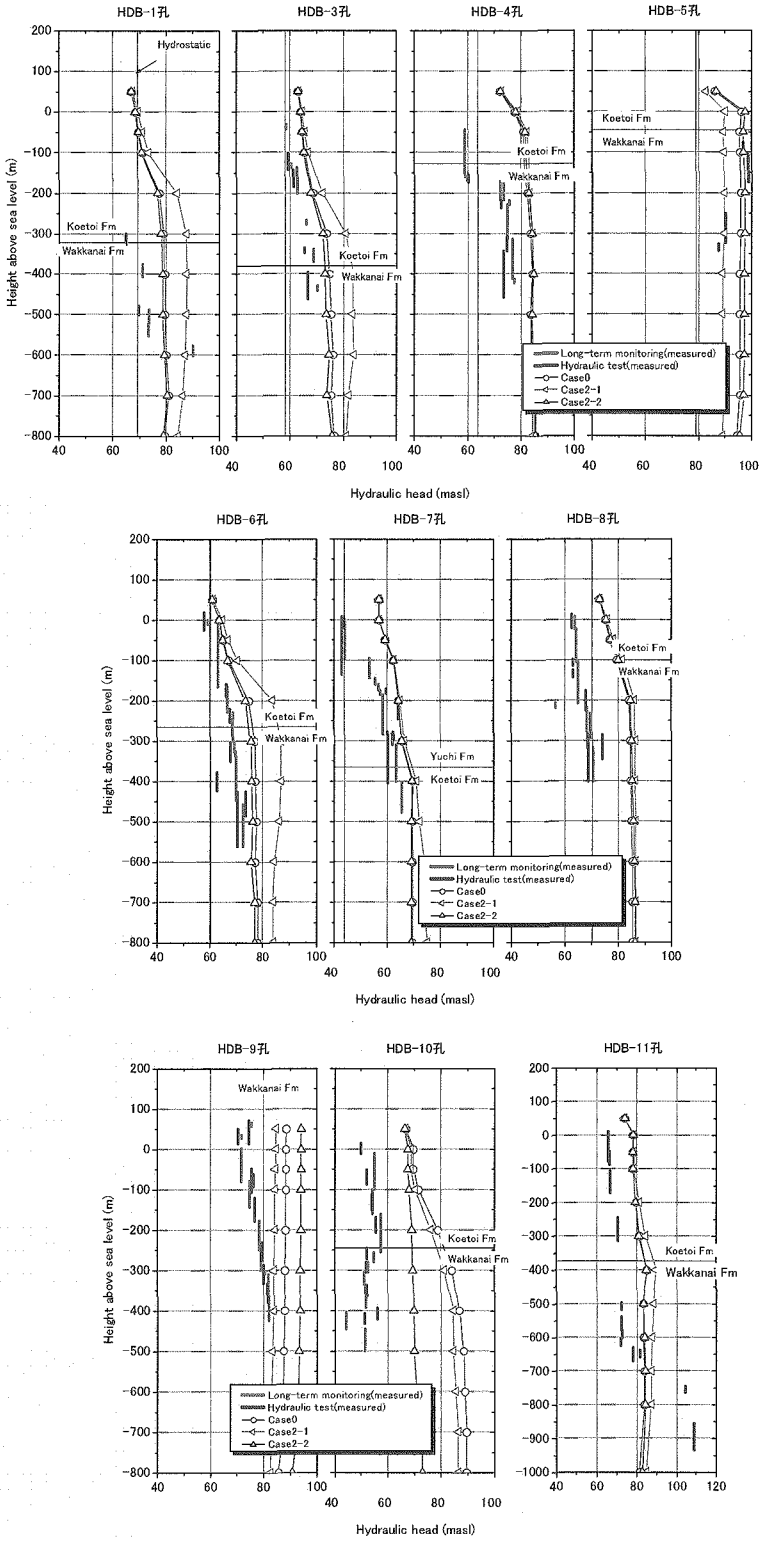


Figure 4.2 Comparison between the simulation and measurement
(Sensitivity analyses of Case2 (hydraulic conductivity of Wakkanai formation))

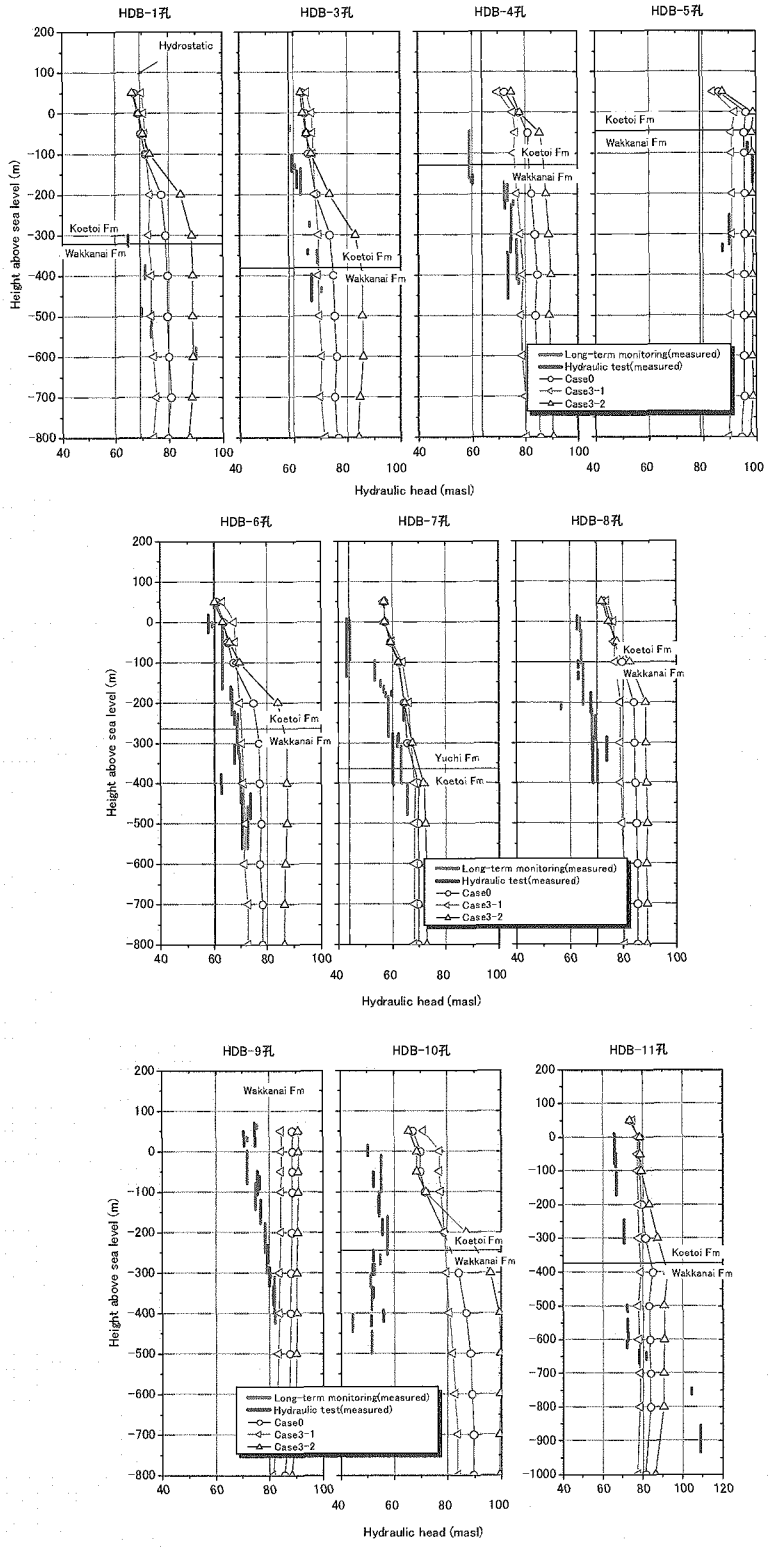


Figure 4.3 Comparison between the simulation and measurement
(Sensitivity analyses of Case3 (hydraulic conductivity of Koetoi formation))

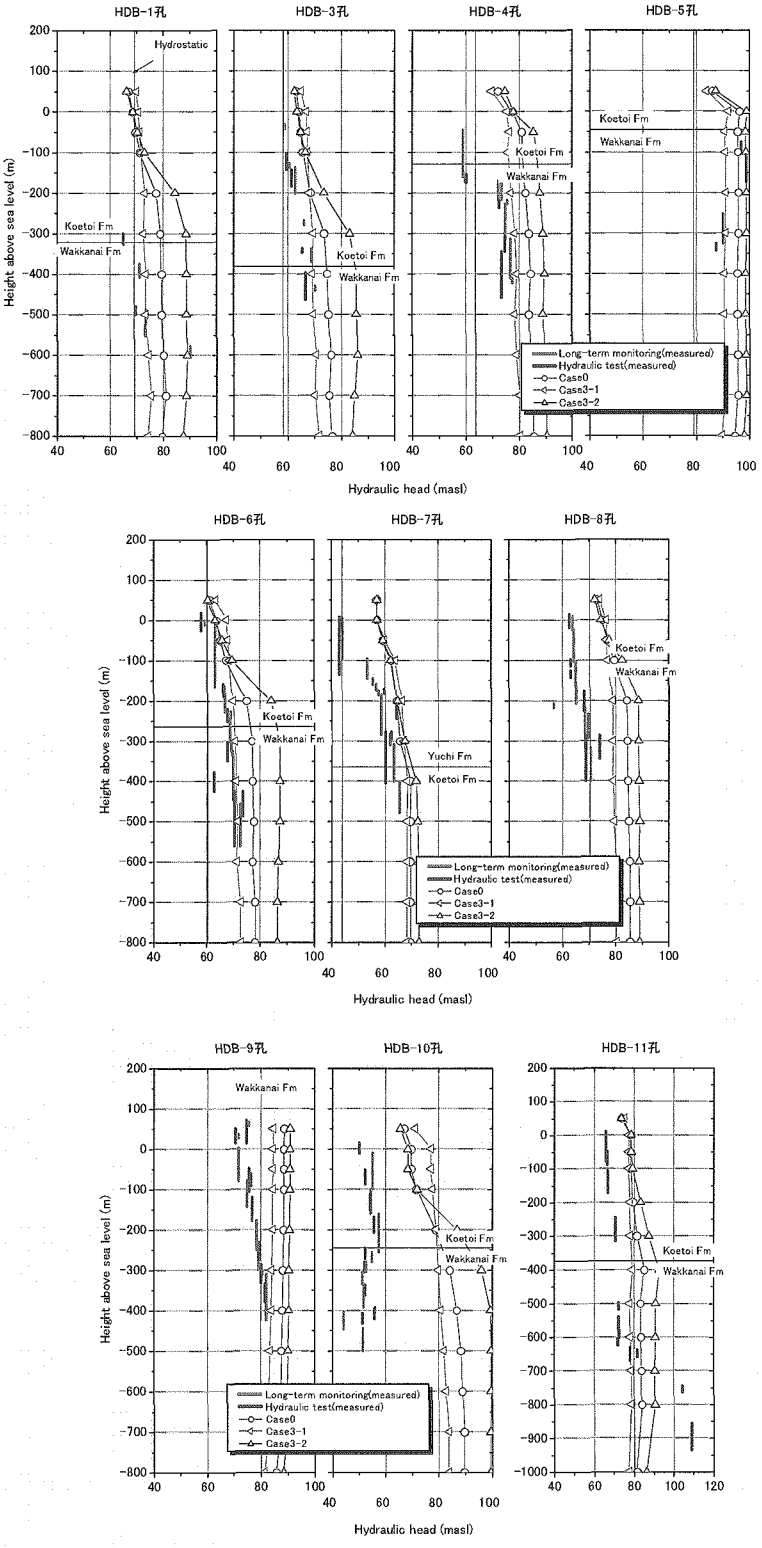


Figure 4.4 Comparison between the simulation and measurement
(Sensitivity analyses of Case4 (hydraulic conductivity of Omagari fault))

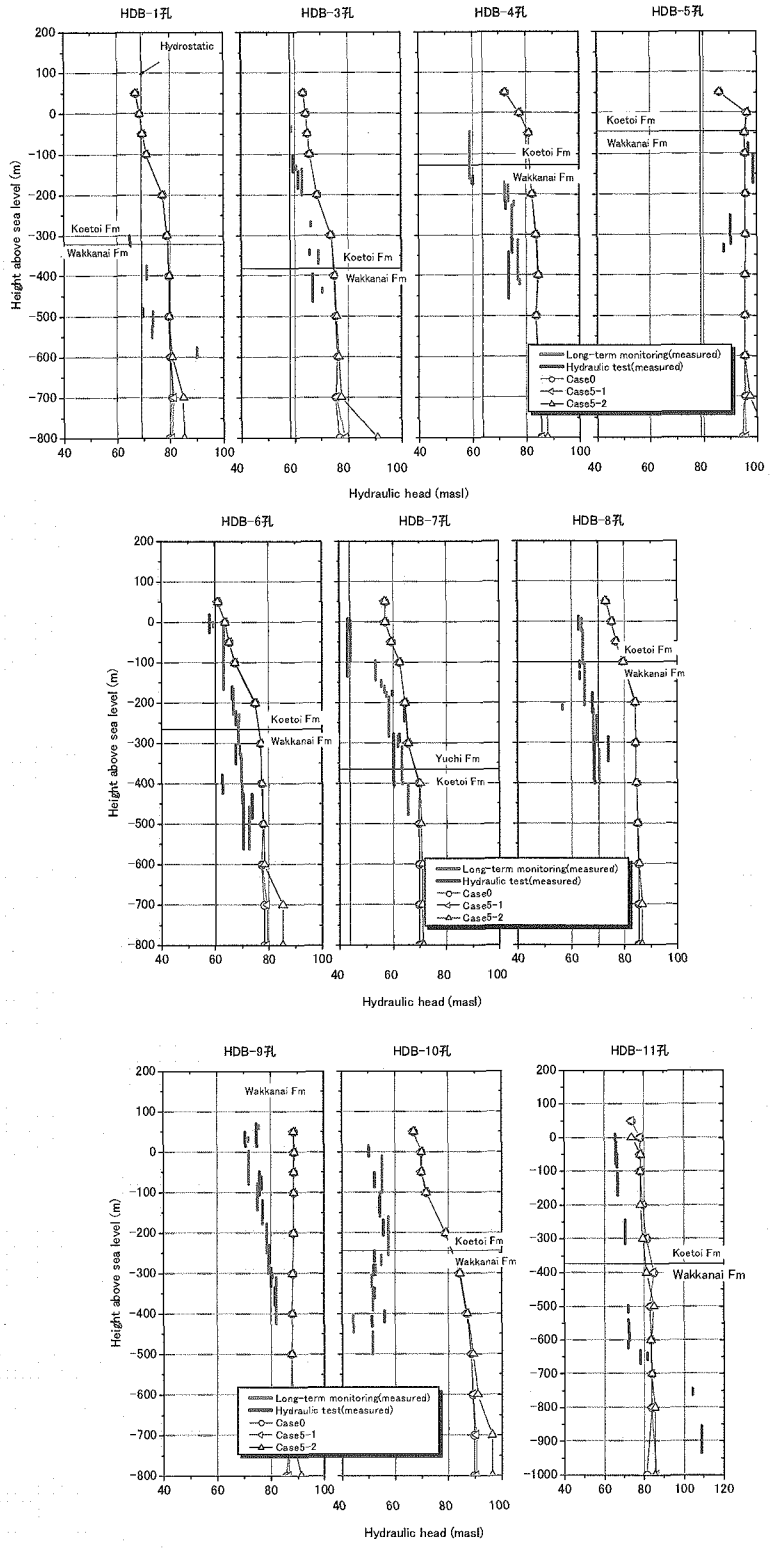
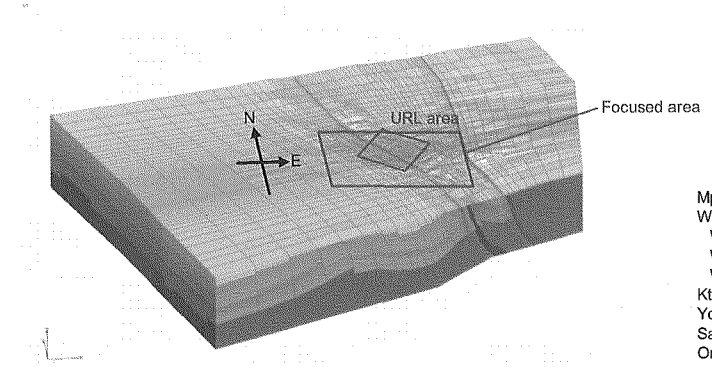
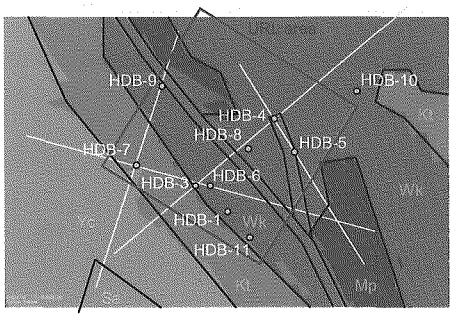


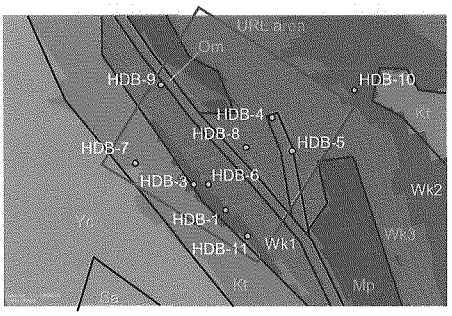
Figure 4.5 Comparison between the simulation and measurement
(Sensitivity analyses of Case5 (bottom boundary))



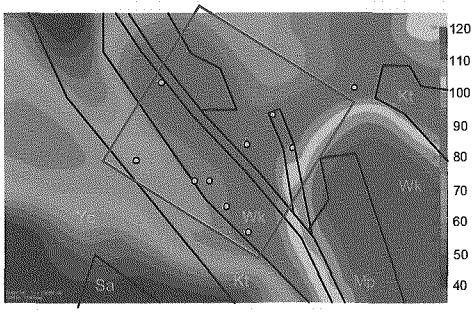
Mp : Masuporo formation
Wk : Wakkanai formation
Wk1 : Upper part and near Om
Wk2 : Upper part and far from Om
Wk3 : Lower part
Kt : Koetoi formation
Yc : Yuchi formation
Sa : Sarabetsu formation
Om : Omagari fault



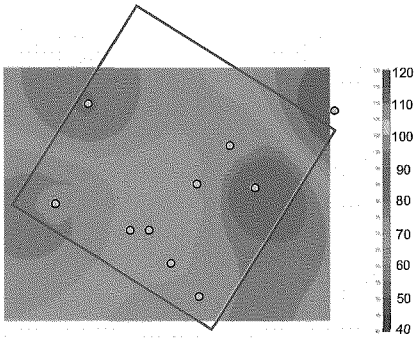
Mesh



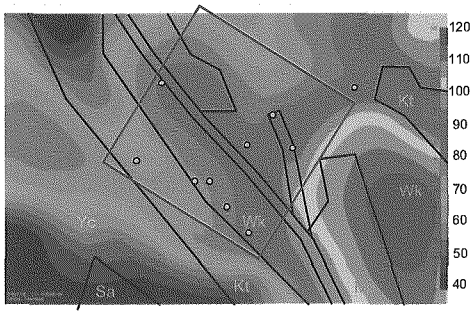
Mesh for Case2-1



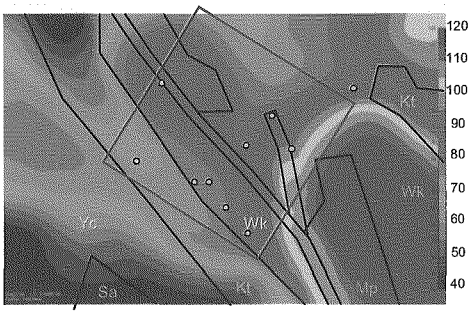
Case0



Inter/extrapolated head distribution

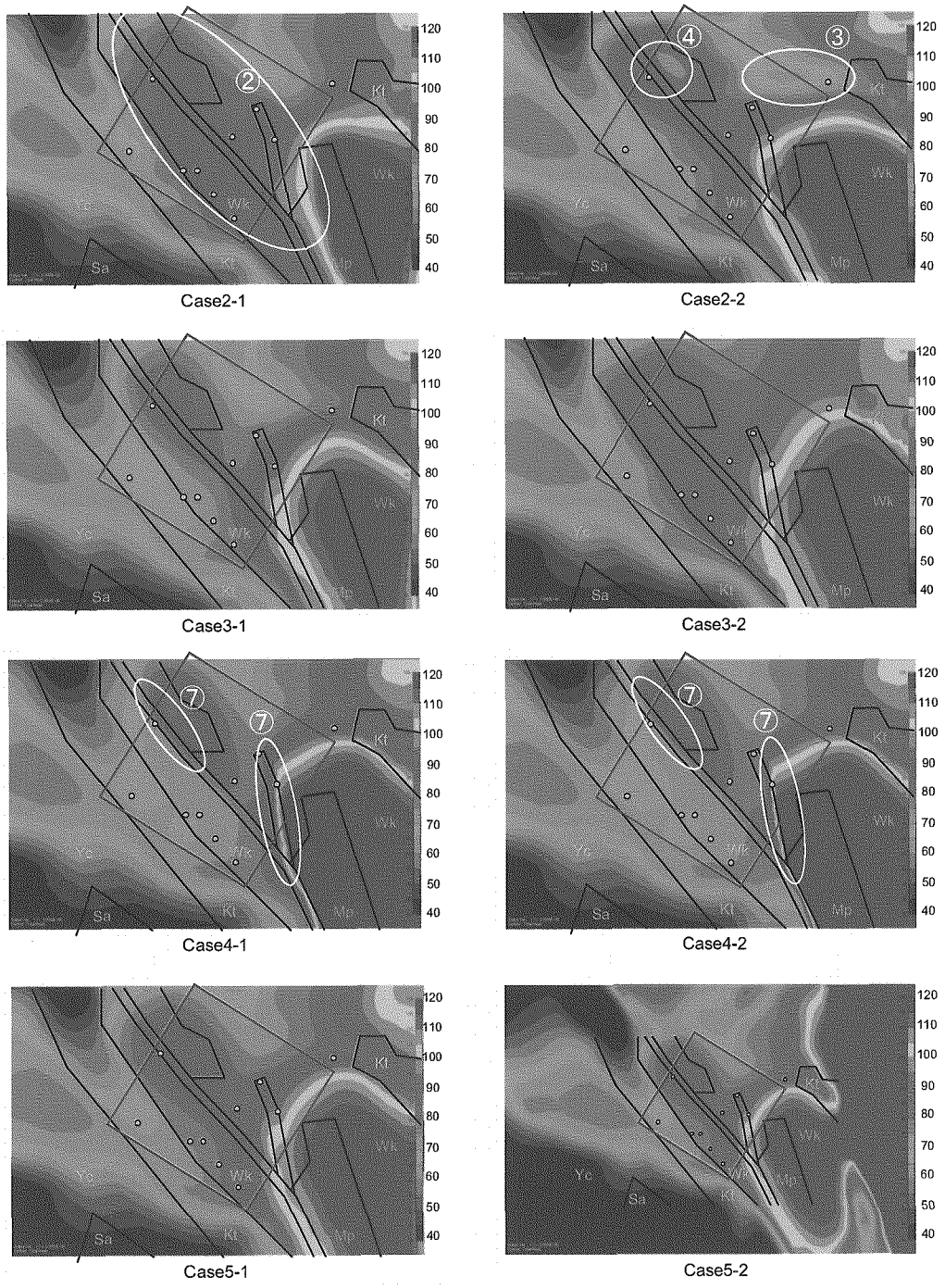


Case1-1



Case1-2

Figure 4.6 Distribution of hydraulic head at the horizontal section of EL-400m



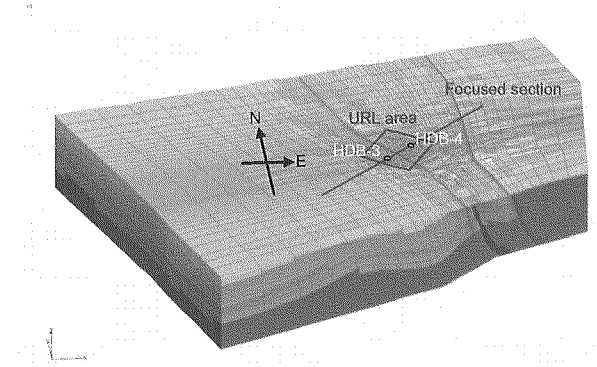
Case2-1　Case2-2

Case3-1　Case3-2

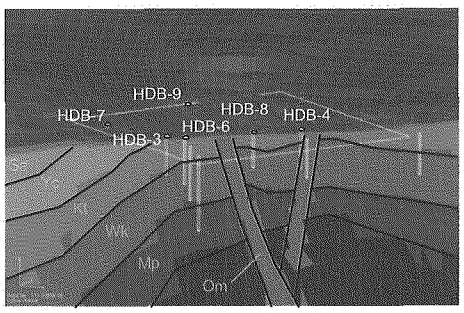
Case4-1　Case4-2

Case5-1　Case5-2

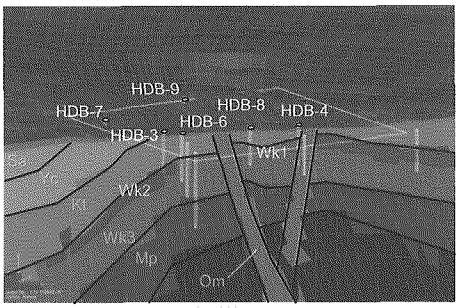
Figure 4.6 Distribution of hydraulic head at the horizontal section of EL-400m (continued)



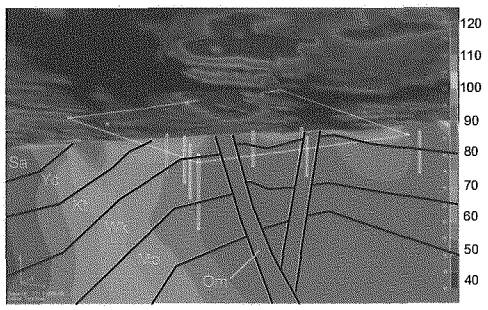
Mp : Masuporo formation
Wk : Wakkanai formation
Wk1 : Upper part and near Om
Wk2 : Upper part and far from Om
Wk3 : Lower part
Kt : Koetoi formation
Yc : Yuchi formation
Sa : Sarabetsu formation
Om : Omagari fault



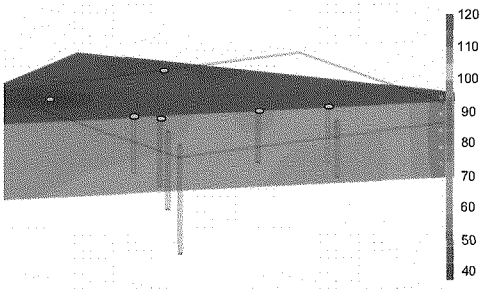
Mesh



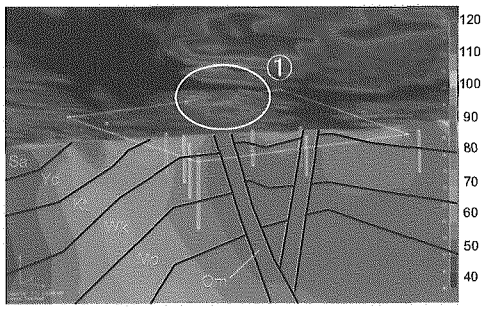
Mesh for Case2-1



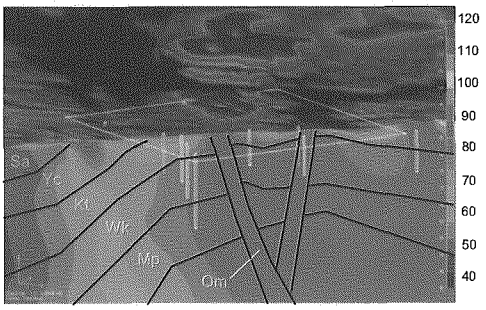
Case0



Inter/extrapolated head distribution



Case1-1



Case1-2

Figure 4.7 Distribution of hydraulic head at the cross section through HDB-3 and HDB-4

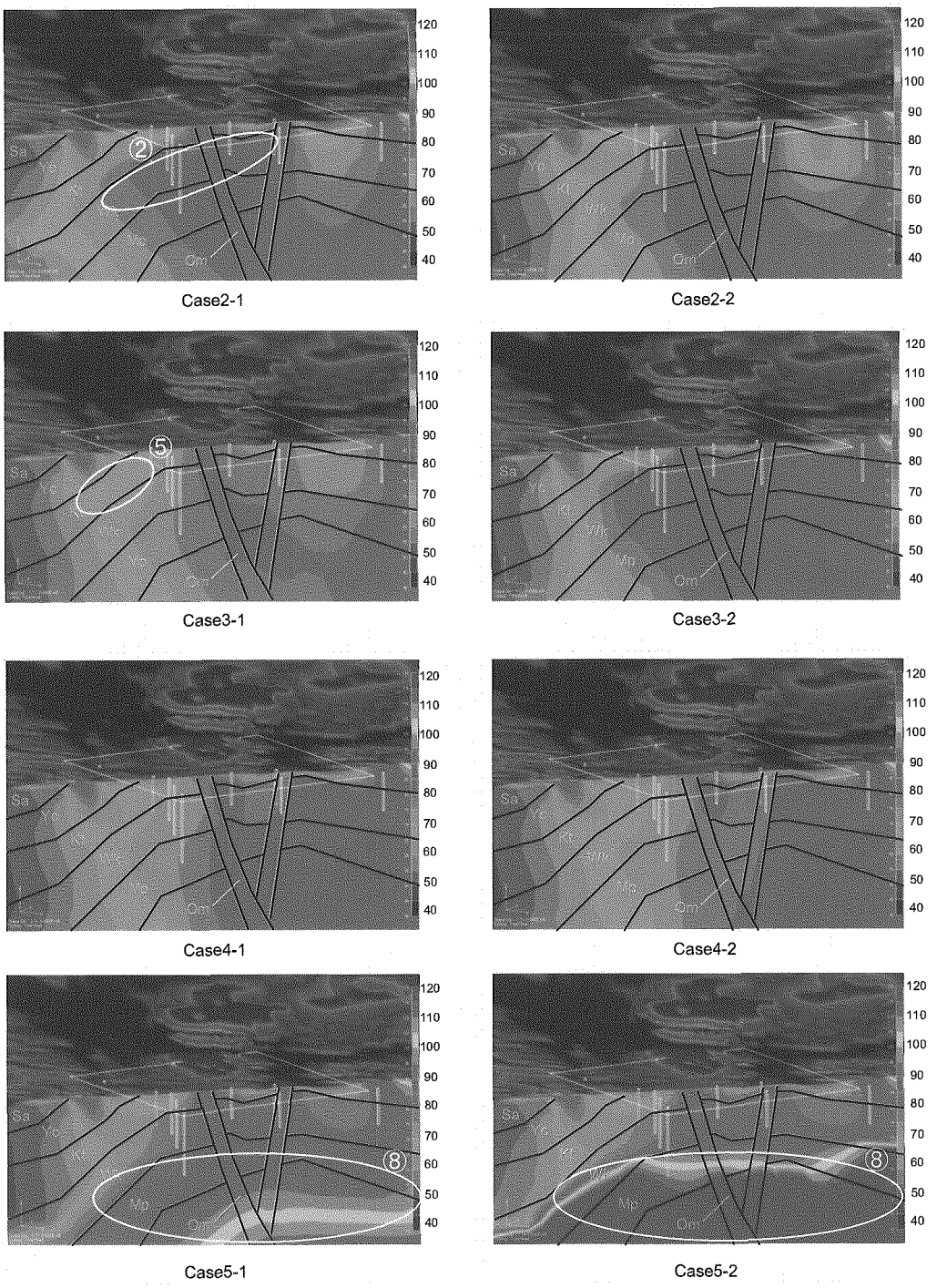


Figure 4.7 Distribution of hydraulic head at the cross section through HDB-3 and HDB-4 (continued)

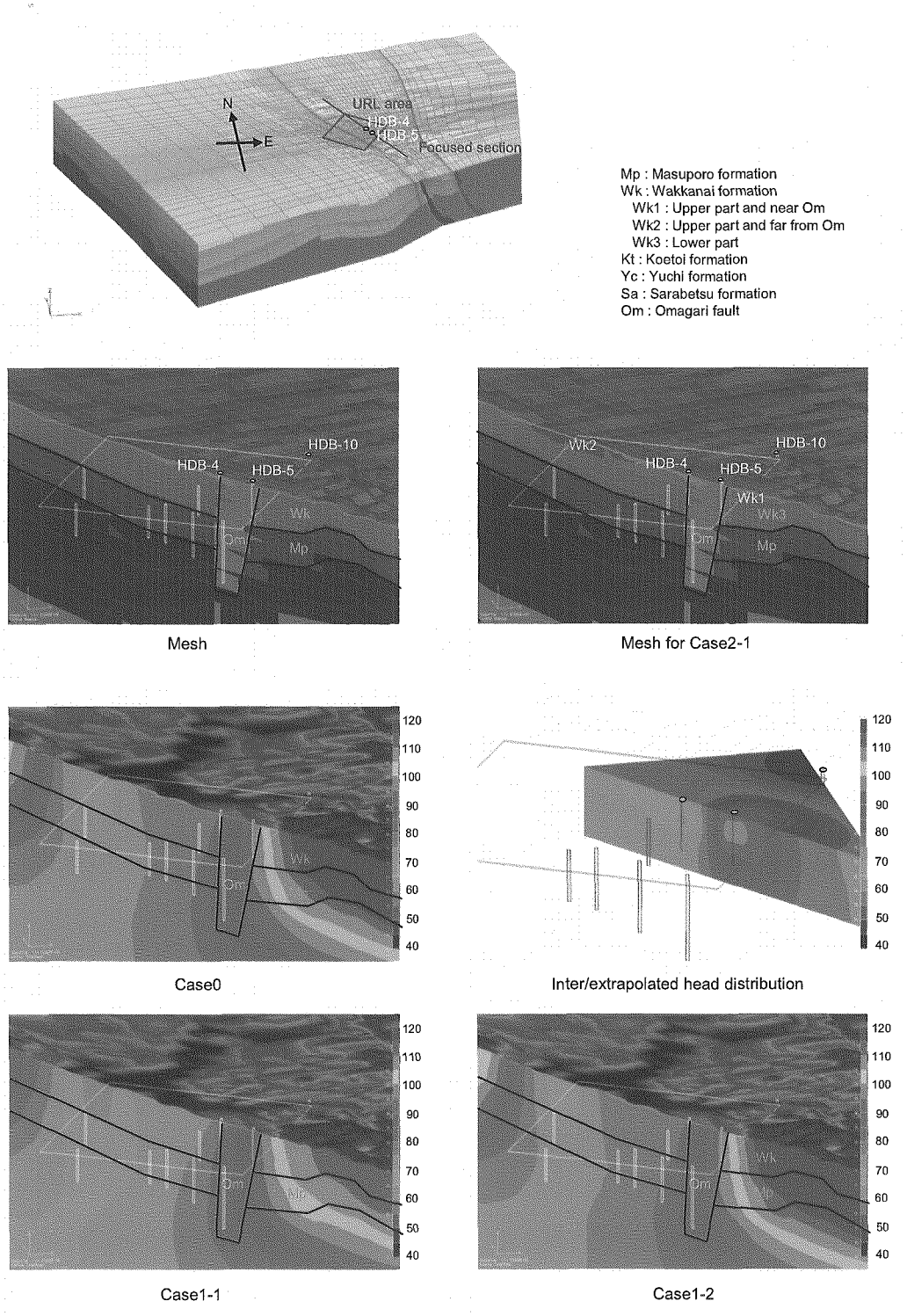


Figure 4.8 Distribution of hydraulic head at the cross section through HDB-4 and HDB-5

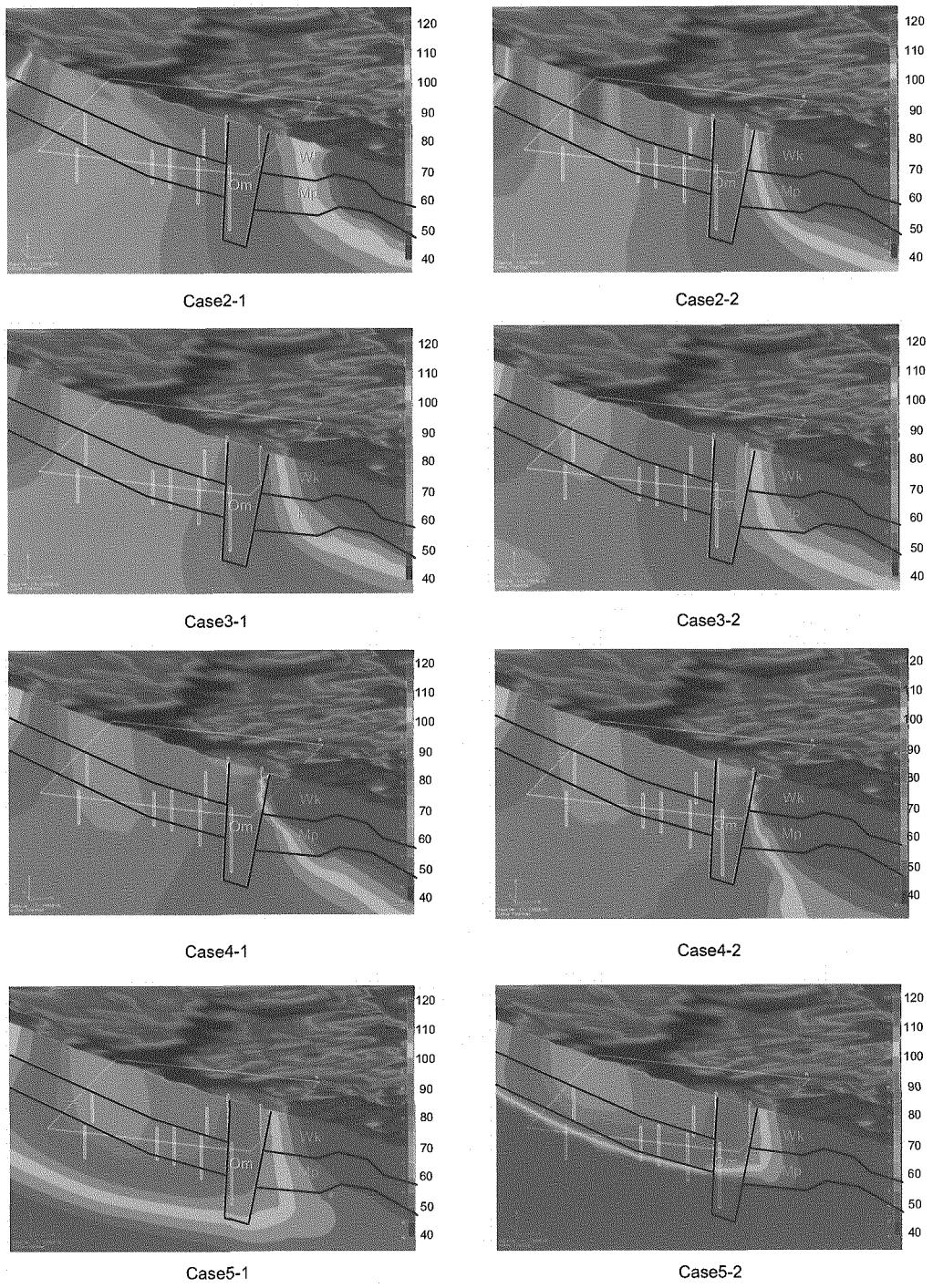
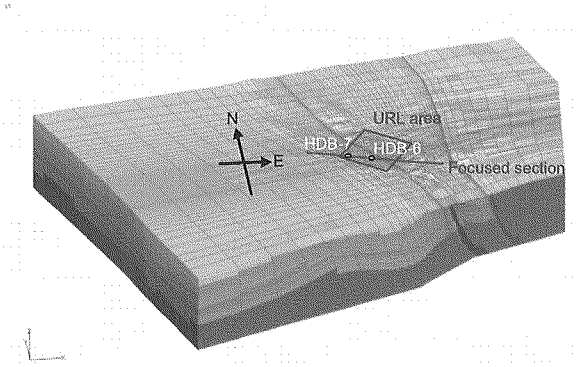
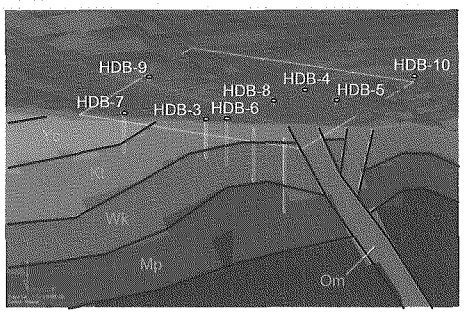


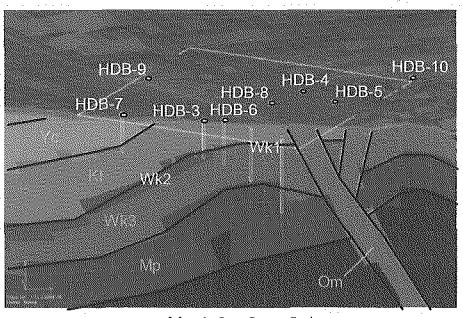
Figure 4.8 Distribution of hydraulic head at the cross section through HDB-4 and HDB-5 (continued)



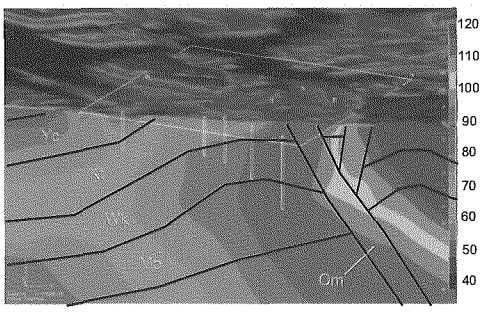
Mp : Masuporo formation
Wk : Wakkanai formation
Wk1 : Upper part and near Om
Wk2 : Upper part and far from Om
Wk3 : Lower part
Kt : Koetoi formation
Yc : Yuchi formation
Sa : Sarabetsu formation
Om : Omagari fault



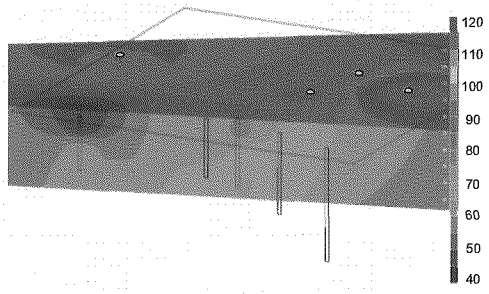
Mesh



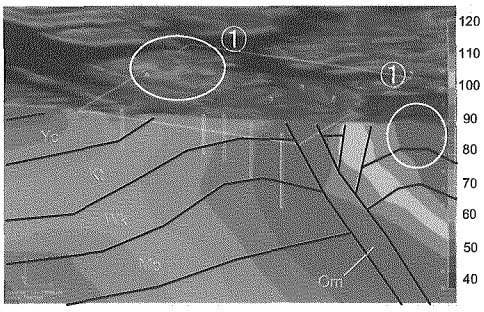
Mesh for Case2-1



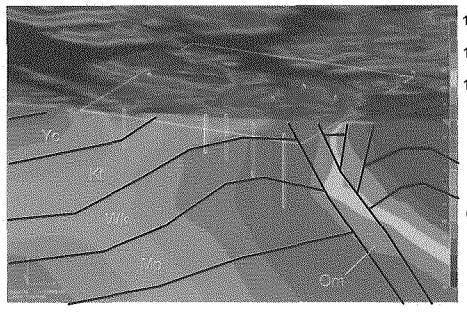
Case0



Inter/extrapolated head distribution



Case1-1



Case1-2

Figure 4.9 Distribution of hydraulic head at the cross section through HDB-6 and HDB-7

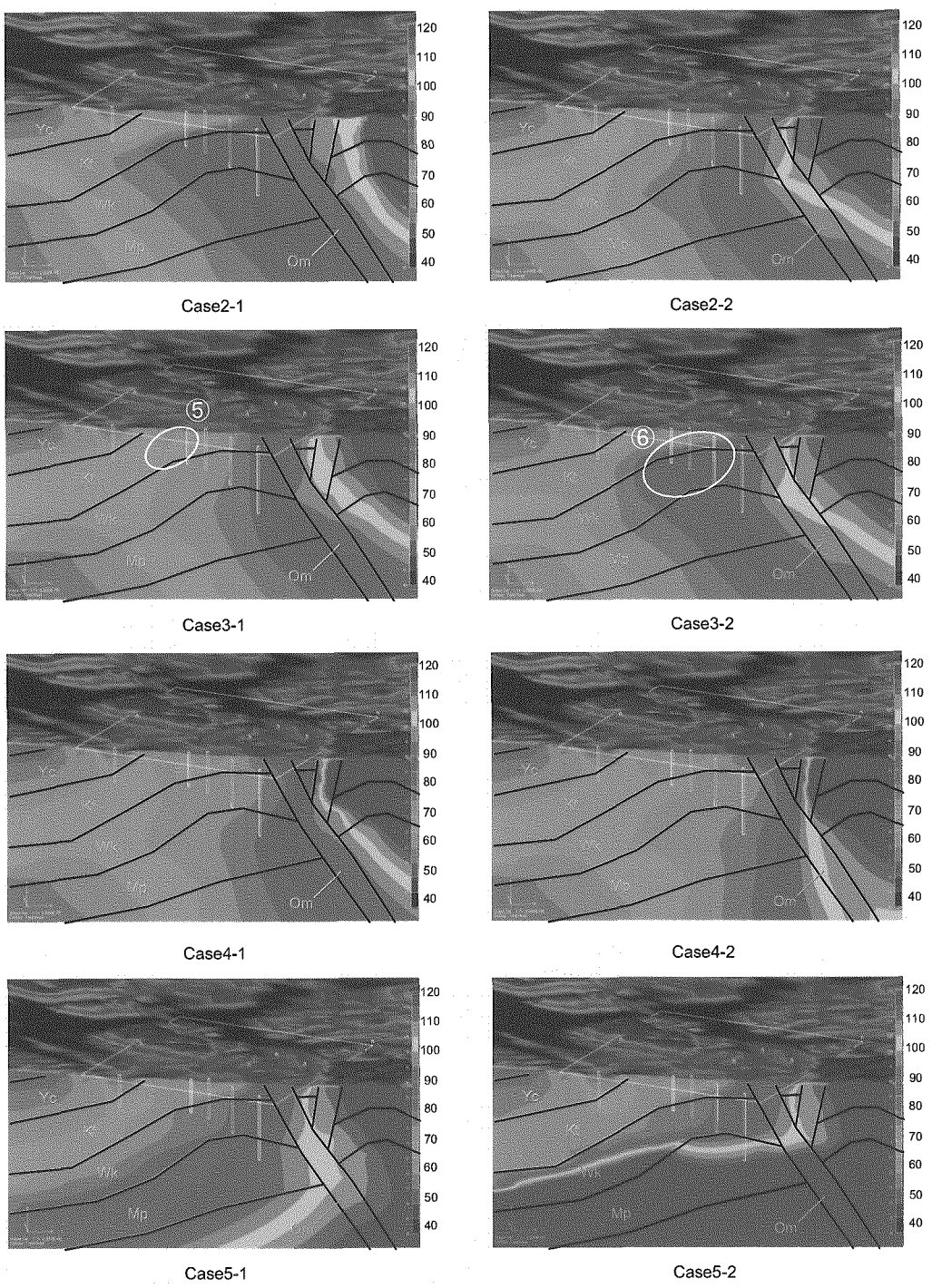
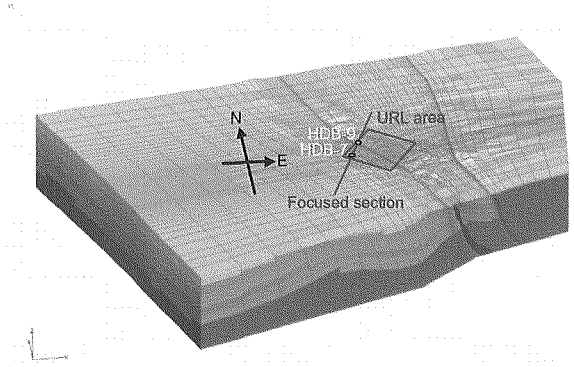
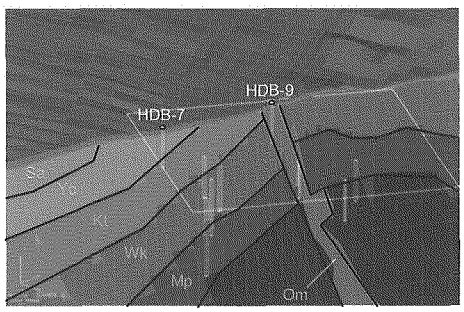


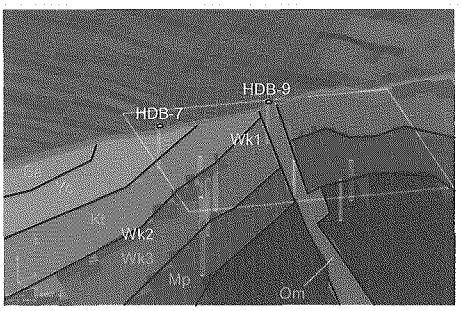
Figure 4.9 Distribution of hydraulic head at the cross section through HDB-6 and HDB-7 (continued)



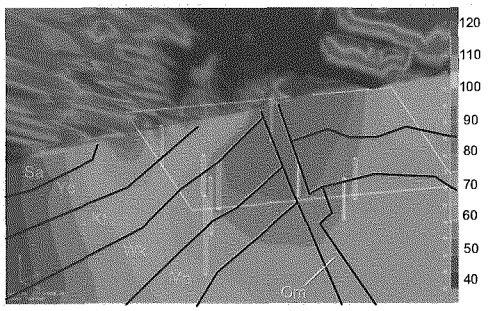
Mp : Masuporo formation
Wk : Wakkanai formation
Wk1 : Upper part and near Om
Wk2 : Upper part and far from Om
Wk3 : Lower part
Kt : Koetoi formation
Yc : Yuchi formation
Sa : Sarabetsu formation
Om : Omagari fault



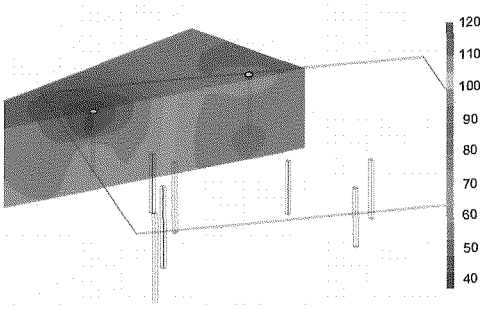
Mesh



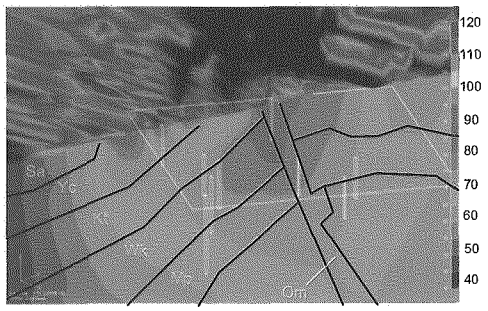
Mesh for Case2-1



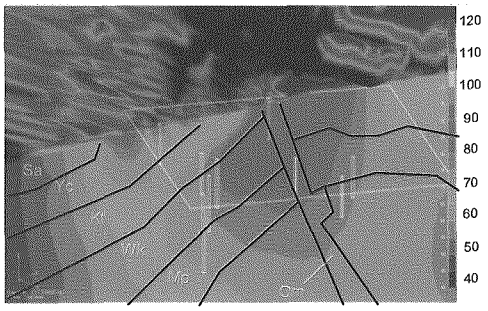
Case0



Inter/extrapolated head distribution



Case1-1



Case1-2

Figure 4.10 Distribution of hydraulic head at the cross section through HDB-7 and HDB-9

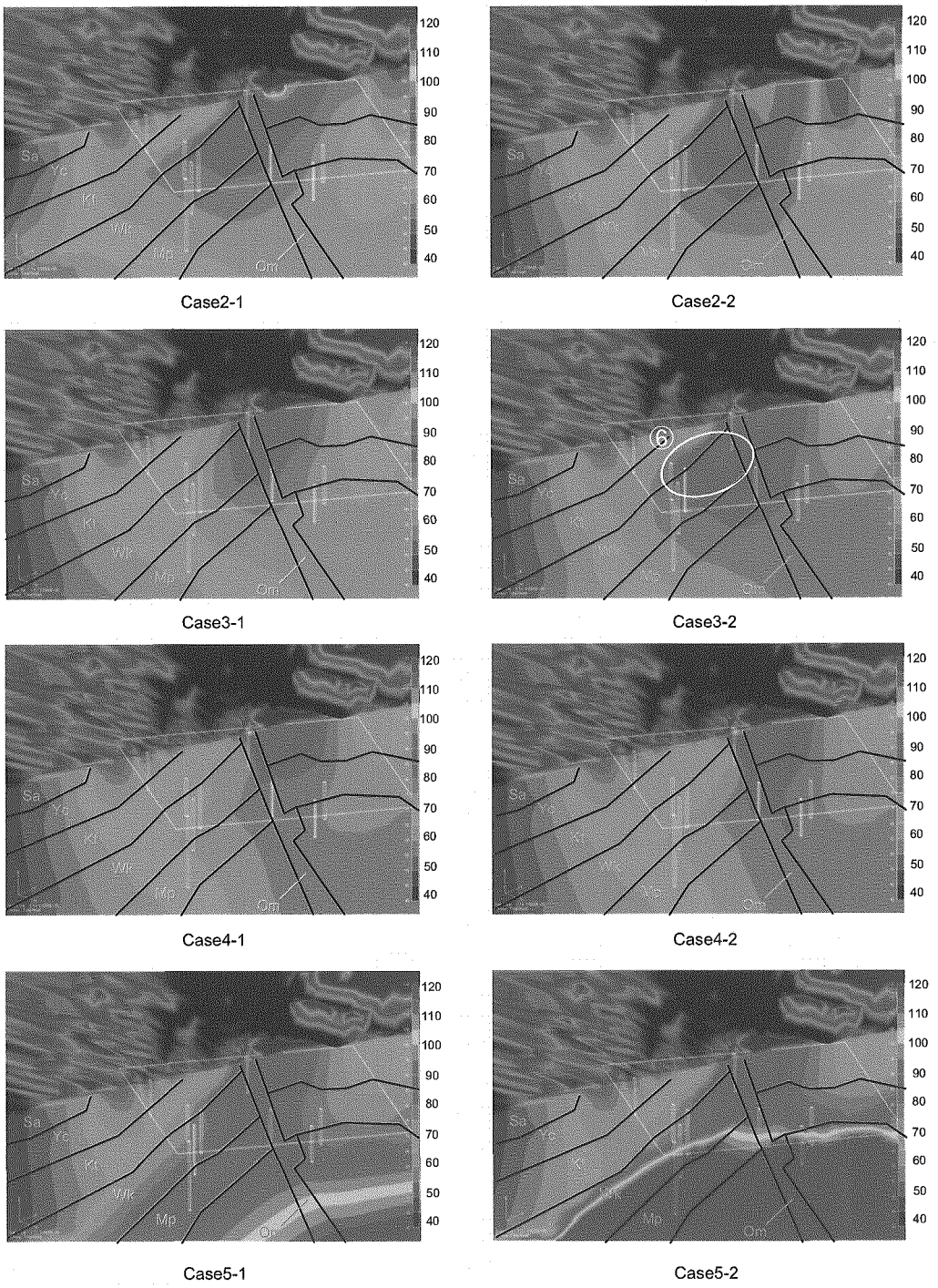


Figure 4.10 Distribution of hydraulic head at the cross section through HDB-7 and HDB-9 (continued)

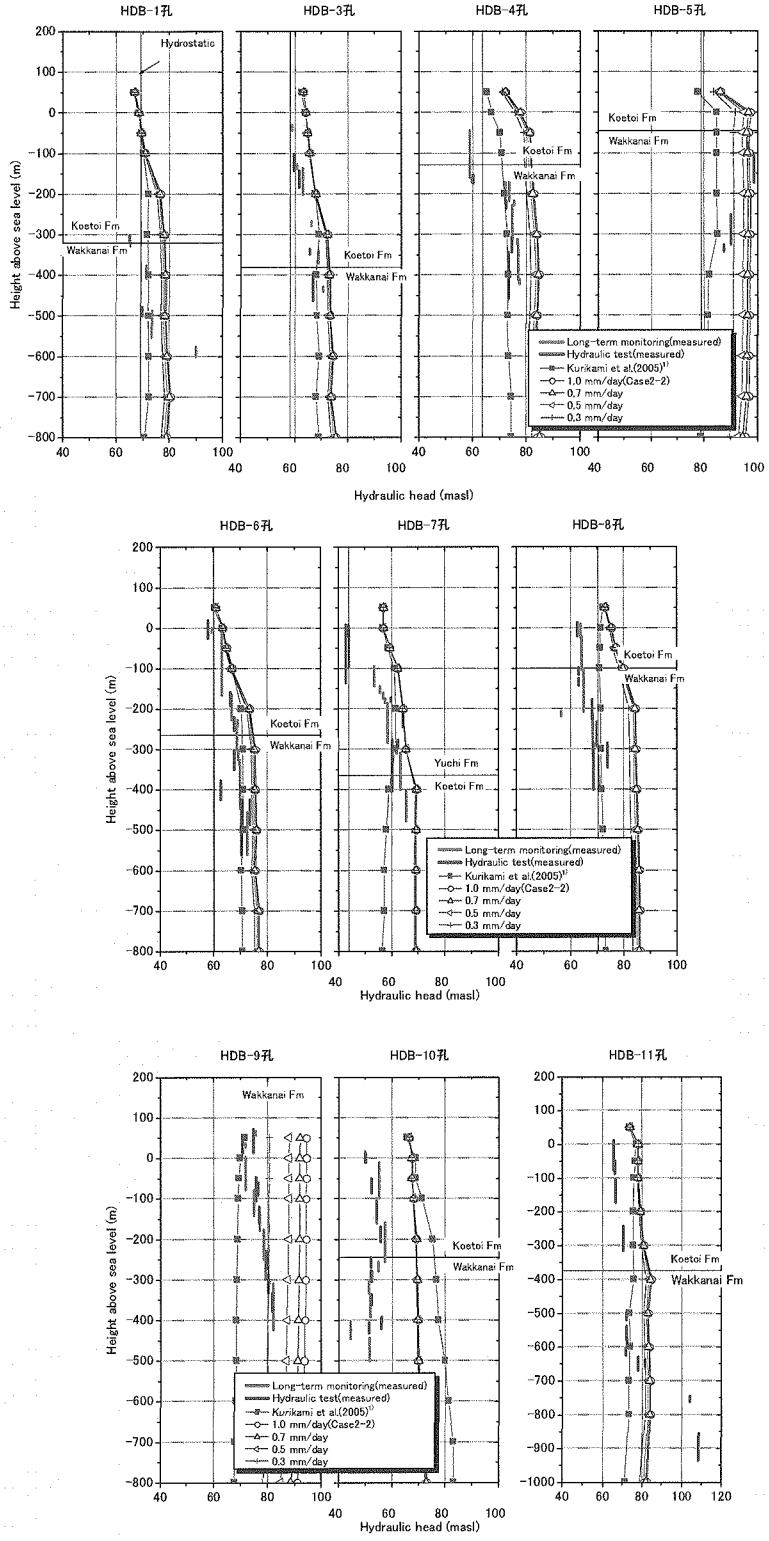


Figure 4.11 Comparison between the simulation and measurement (Optimization analysis)

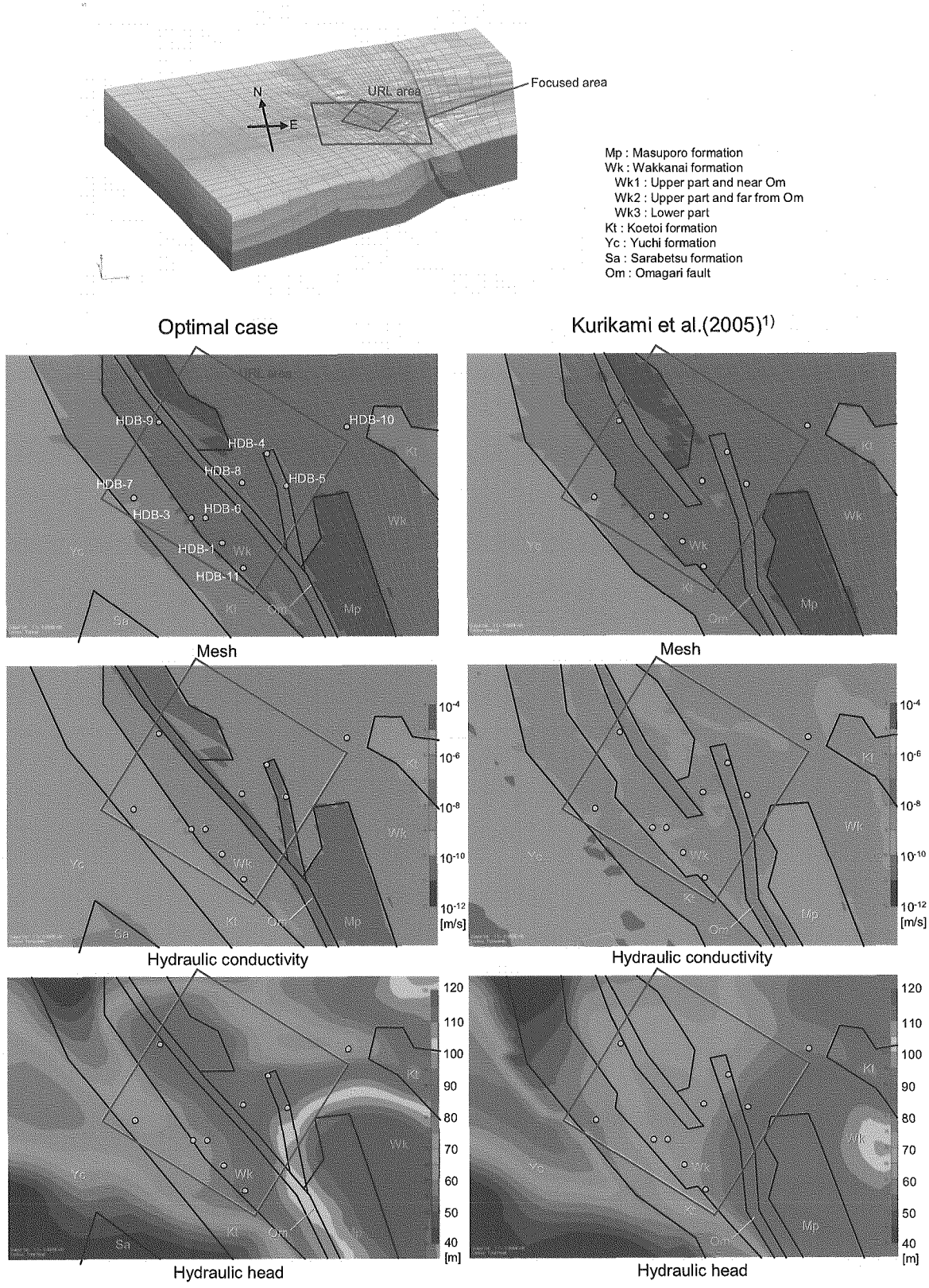


Figure 4.12 Comparison between the latest model and the last model
(Distribution of hydraulic head at the horizontal section of EL-400m)

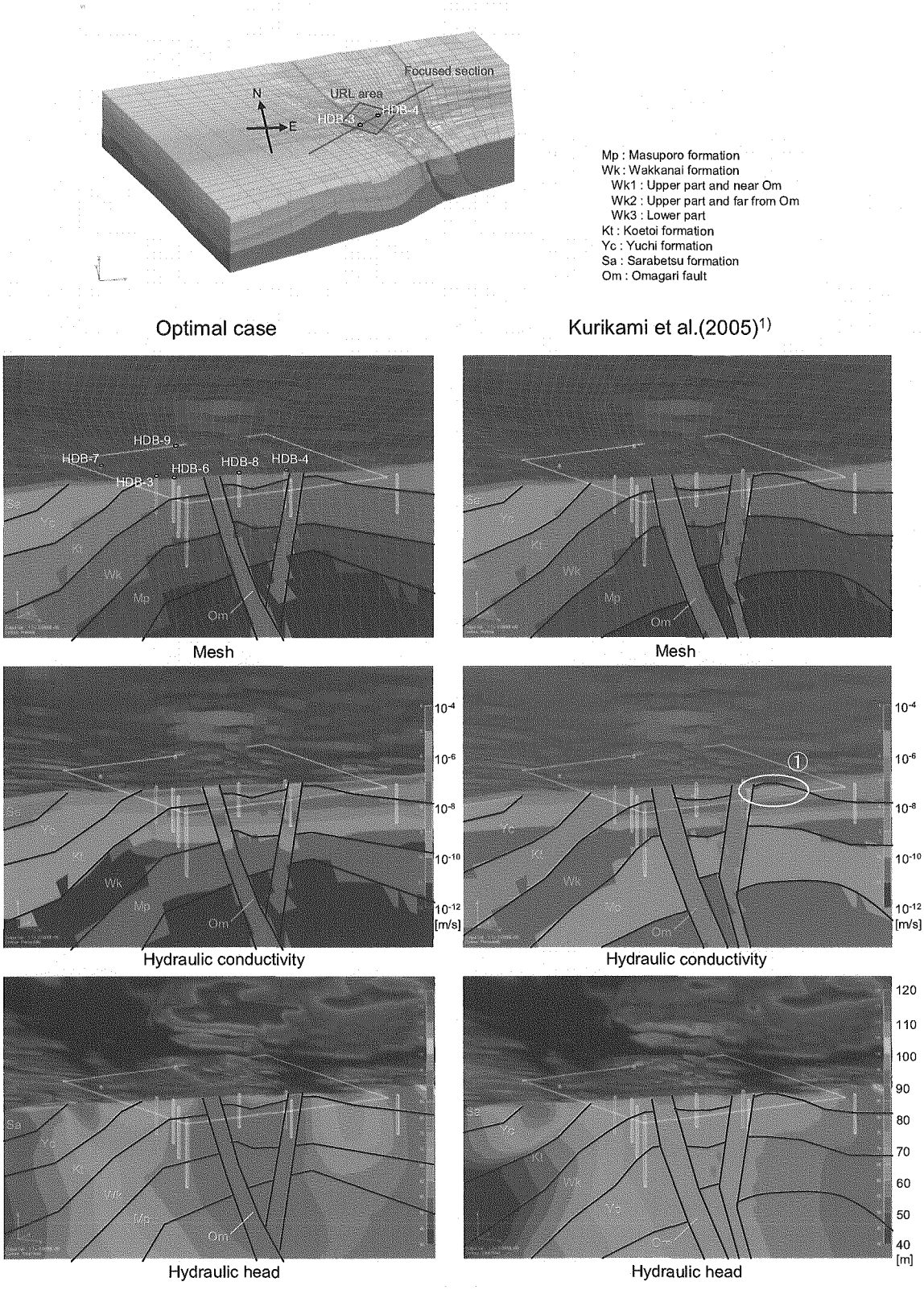
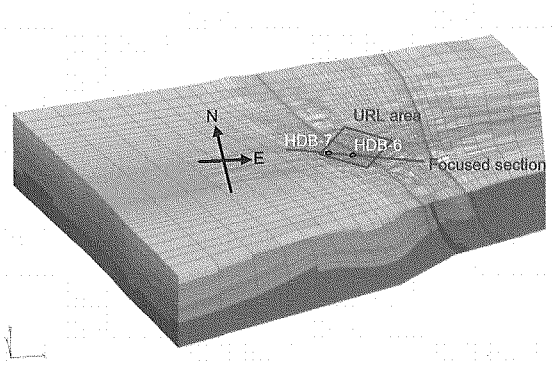


Figure 4.13 Comparison between the latest model and the last model
(Distribution of hydraulic head at the cross section through HDB-3 and HDB-4)



Mp : Masuporo formation
Wk : Wakkanai formation
Wk1 : Upper part and near Om
Wk2 : Upper part and far from Om
Wk3 : Lower part
Kt : Koetoi formation
Yc : Yuchi formation
Sa : Sarabetsu formation
Om : Omagari fault

Optimal case

Kurikami et al.(2005)[1)]

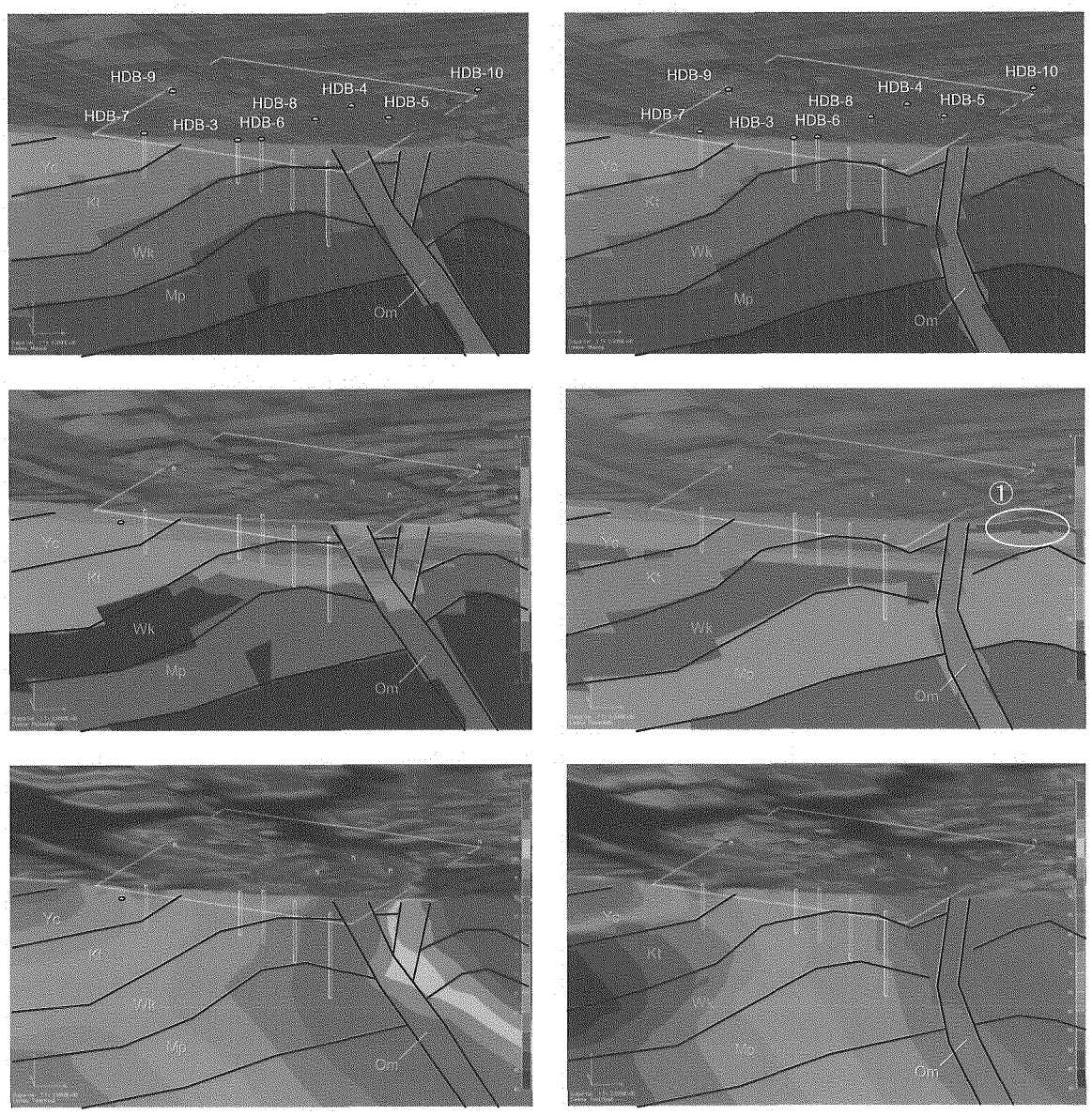


Figure 4.14 Comparison between the latest model and the last model
(Distribution of hydraulic head at the cross section through HDB-6 and HDB-7)

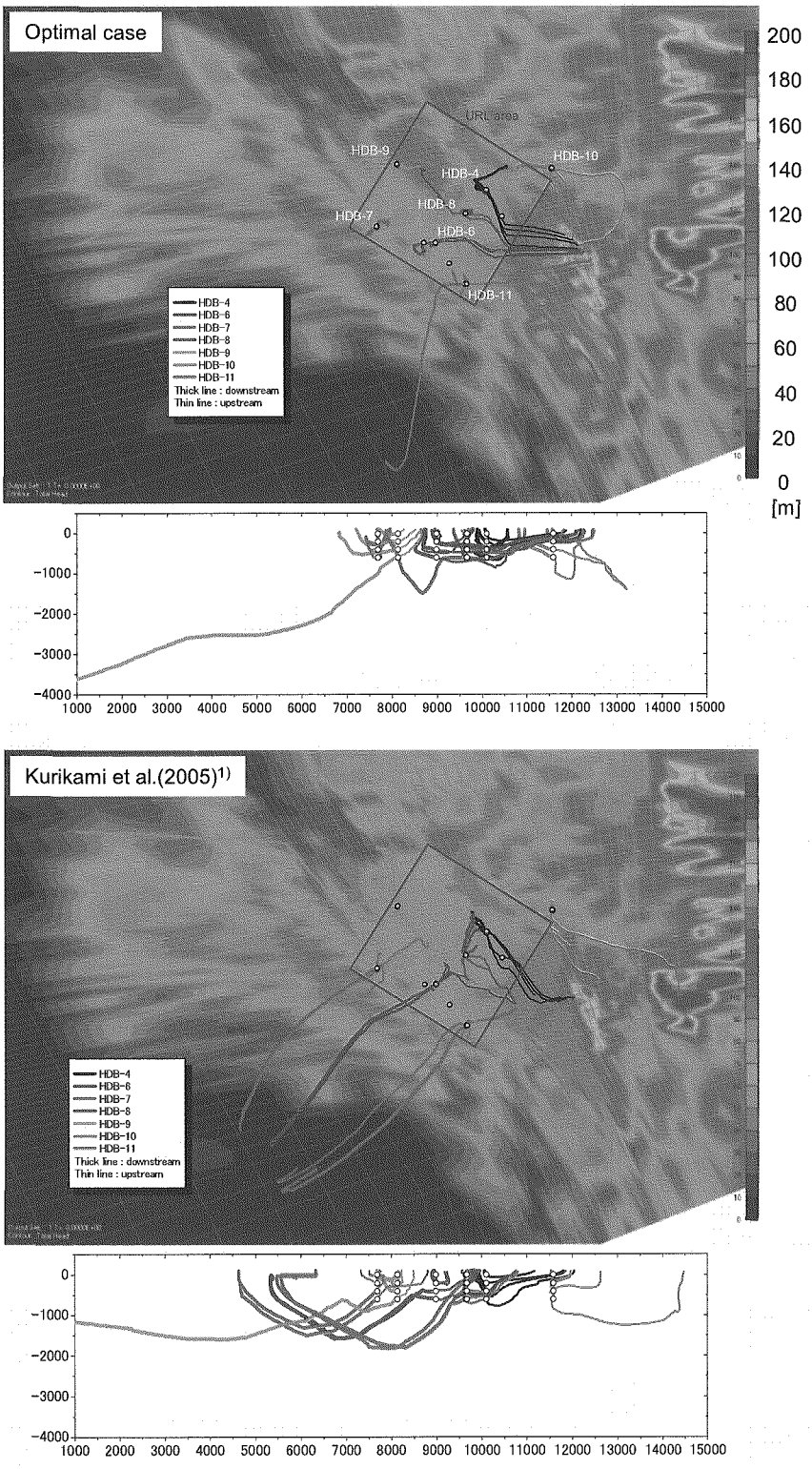
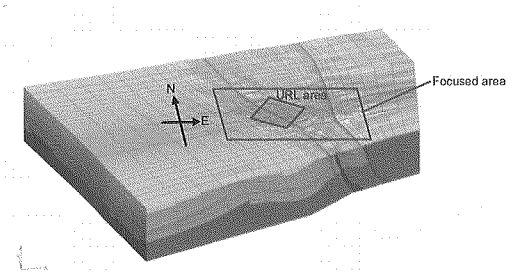
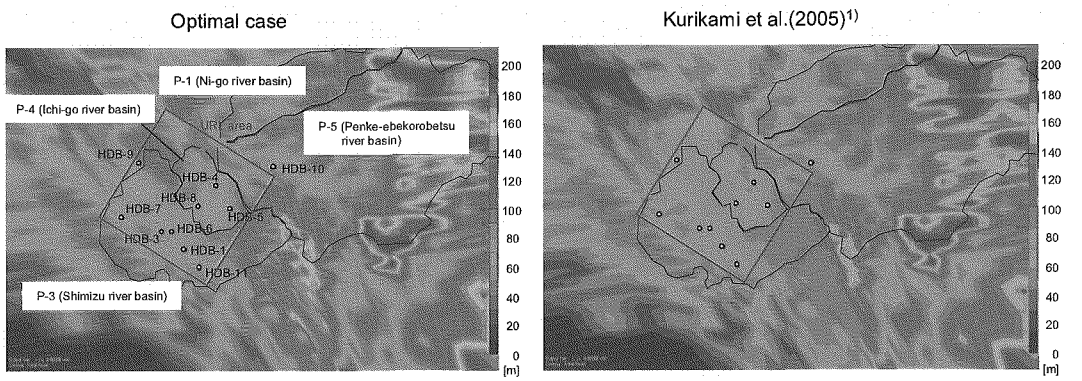
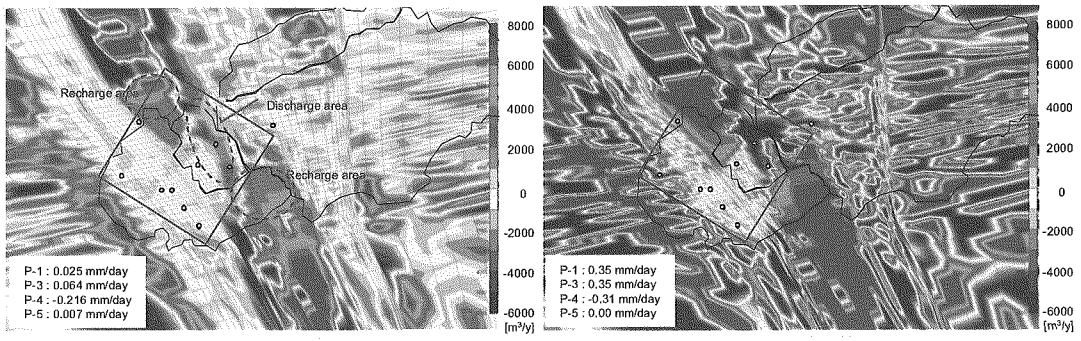


Figure 4.15 Comparison between the latest model and the last model
(Groundwater flow paths through HDB-4, 6, 7, 8, 9, 10, 11)





Hydraulic head distribution at surface



Discharge/recharge distribution at surface

Figure 4.16 Comparison between the latest model and the last model (Distribution of discharge/recharge flux at surface)

付　録

1.　概要

稚内層については，これまでひとつの地層として捉え，その透水係数の分布を深度依存性によって表現してきた。しかし，本報告書における地下水流動解析の解析領域(広域スケール)においては，大規模な地質構造である大曲断層や褶曲軸からの距離や東西(あるいは上下)といった位置関係に支配された大局的な透水性の特徴があるのではないかという仮定のもと，まずは稚内層について地質構造と水理地質構造の再評価を進めている。これは，「地質環境調査・物質移行評価に関する研究」[1]の一環として，幌延深地層研究センターと瑞浪超深地層研究所が中心となって実施しているものである。

2.　稚内層の広域的な透水係数分布

稚内層の透水係数について，研究所設置地区およびその周辺において最も大規模な構造と想定される大曲断層を基準として，下記の観点からの分類を実施した。

- 孔口からの深度
- 稚内層-声問層境界からの深度
- 大曲断層の東西
- 大曲断層からの距離

なお，水理試験のうち，試験区間に大規模な断層を含まない箇所は広域的な透水係数に対する影響が小さいとみなして除外している。また，研究所設置地区選定時に掘削したHDB-1，2孔および勇知層の調査を目的としたHDB-7孔を除くHDB-3，4，5，6，8，9，10，11孔を対象とした。Table A.1に，稚内層の透水係数と断層の有無の関係を示す。

Figure A.1，A.2にそれぞれ孔口からの深度，稚内層-声問層境界からの深度で透水係数の分布を示した。図中において，大曲断層の東西(東：HDB-4，5，8，9，10孔，西：HDB-3，6，11孔)に分類している。また，Figure A.3，A.4には，大曲断層推定位置からの距離によって分類(近い：HDB-4，5，6，8，9孔，遠い：HDB-3，10，11孔)したときのグラフを示した。

Figure A.1(またはFigure A.3)を見ると，孔口からの深度に対して透水係数は低下することがわかる。この深度依存性は，本文においても基本ケースとして示してきたものである。一方，Figure A.2(またはFigure A.4)からは，稚内層-声問層境界からの深度による相関は小さい。しかし，透水係数が高い箇所を見ると，稚内層-声問層境界からの深度が200mまでのところ(稚内層の上部200m)に限定的に相関が存在していることがわかる。

Figure A.1，A.2において大曲断層の東西に注目すると，東側の方が相対的に透水性は高い傾向が認められる。また，Figure A.3，A.4において大曲断層からの距離に着目すると，大曲断層に近いほうがやや透水性が高い。

深度と大曲断層との関係を同時に考慮すると，Figure A.4に示したように，大曲断層からの距離が近く，かつ稚内層-声問層境界からの深度が小さいことは，透水係数が高い(10^{-7}m/s以上)ための十分条件とみなすことができる。また，大曲断層からの距離が遠く，かつ稚内層-声問層境界からの深度が大きい箇所では，大曲断層からの距離が近い箇所に比べて透水性はやや低くなっている。

このことから，広域的なスケールにおける稚内層は，透水係数分布の観点から，

- 大曲断層からの距離が近く，かつ稚内層の上部200m
- 大曲断層からの距離が遠く，かつ稚内層の上部200m

・ 稚内層の下部

の3つに区分するという概念を構築している。

参考文献

1) 前川恵輔，澤田淳，太田久仁雄，操上広志，國丸貴紀，舟木泰智，濱克宏，竹内真司，天野健治，三枝博光，牧野仁史，中野勝志，石丸恒存，瀬尾俊弘，清水和彦：地質環境調査・物質移行評価に関する研究の基本的な方針，JAEA-Review 2007-011，(2007)

Table A.1 Hydraulic conductivity and large fault in the Wakkanai formation

Borehole	Packer depth (GL-m)		Packer depth from the Wakkanai-Kootoi boundary		Large fault	Hydraulic conductivity (m/s)
	Upper	Lower	Upper	Lower		
HDB-3	454.50	520.00	18.57	61.34	Yes	3.60E-09
HDB-4	218.45	236.53	100.79	116.18	Yes	1.41E-05
HDB-4	281.45	299.53	154.41	169.80	Yes	9.35E-06
HDB-4	371.90	406.43	231.41	260.80	Yes	5.36E-07
HDB-4	407.90	520.00	262.05	357.48	Yes	3.14E-08
HDB-5	154.05	180.46	42.55	63.32	Yes	6.47E-07
HDB-5	182.05	250.46	64.57	118.38	Yes	8.48E-07
HDB-5	331.22	402.23	181.90	237.75	Yes	4.39E-08
HDB-5	404.74	420.19	239.72	251.87	No	7.01E-09
HDB-6	280.95	312.00	13.57	36.05	Yes	1.83E-06
HDB-6	437.95	483.00	127.24	159.85	No	7.32E-09
HDB-6	363.95	409.00	73.66	106.28	Yes	1.64E-06
HDB-6	484.95	545.00	161.26	204.74	Yes	2.61E-11
HDB-6	484.95	620.00	161.26	259.04	Yes	2.17E-11
HDB-8	168.01	184.06	56.87	70.77	Yes	2.86E-06
HDB-8	196.01	212.06	81.12	95.02	Yes	1.18E-06
HDB-8	247.01	295.06	125.29	166.90	No	2.69E-10
HDB-8	303.97	362.02	174.62	224.90	Yes	5.67E-09
HDB-8	355.97	414.02	219.66	269.93	No	2.71E-10
HDB-8	355.97	470.00	219.66	318.42	Yes	1.99E-09
HDB-9	46.37	82.60	37.25	66.36	No	5.68E-08
HDB-9	25.50	82.60	20.49	66.36	Yes	5.00E-07
HDB-9	144.97	202.02	116.47	162.31	No	6.02E-10
HDB-9	157.90	187.95	126.86	151.00	No	2.18E-10
HDB-9	216.90	257.50	174.26	206.88	Yes	1.50E-06
HDB-9	326.97	370.02	262.69	297.28	No	7.62E-10
HDB-9	383.97	427.02	308.49	343.07	Yes	6.25E-08
HDB-9	430.97	474.02	346.25	380.83	Yes	8.91E-09
HDB-10	329.91	353.96	7.33	25.44	Yes	1.12E-07
HDB-10	387.91	411.96	51.01	69.12	Yes	2.49E-08
HDB-10	445.84	469.89	94.64	112.75	Yes	2.44E-07
HDB-10	457.34	481.39	103.30	121.41	Yes	2.04E-09
HDB-11	704.00	724.05	191.81	207.59	No	6.25E-12
HDB-11	670.00	690.05	165.04	180.82	Yes	1.25E-08
HDB-11	646.00	666.05	146.14	161.93	Yes	8.78E-09
HDB-11	564.00	584.05	81.58	97.37	Yes	1.53E-08
HDB-11	697.00	735.05	186.29	216.25	No	4.22E-12
HDB-11	606.00	644.05	114.65	144.61	Yes	2.26E-08
HDB-11	812.00	828.05	276.84	289.47	Yes	1.22E-12
HDB-11	923.00	1000.10	364.23	424.93	Yes	2.61E-10

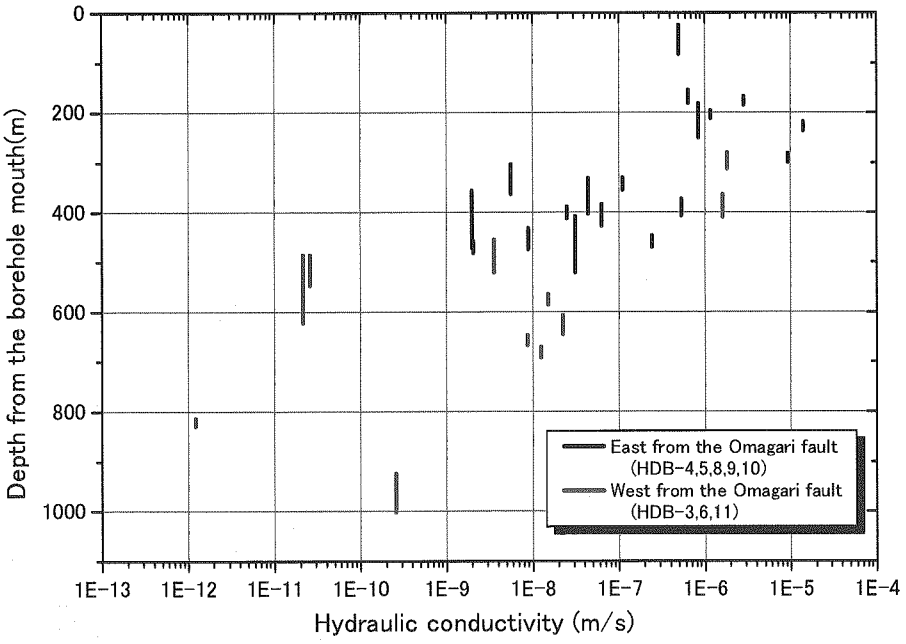


Figure A. 1 Relationship between hydraulic conductivity, depth from the borehole mouth and the location against the Omagari fault

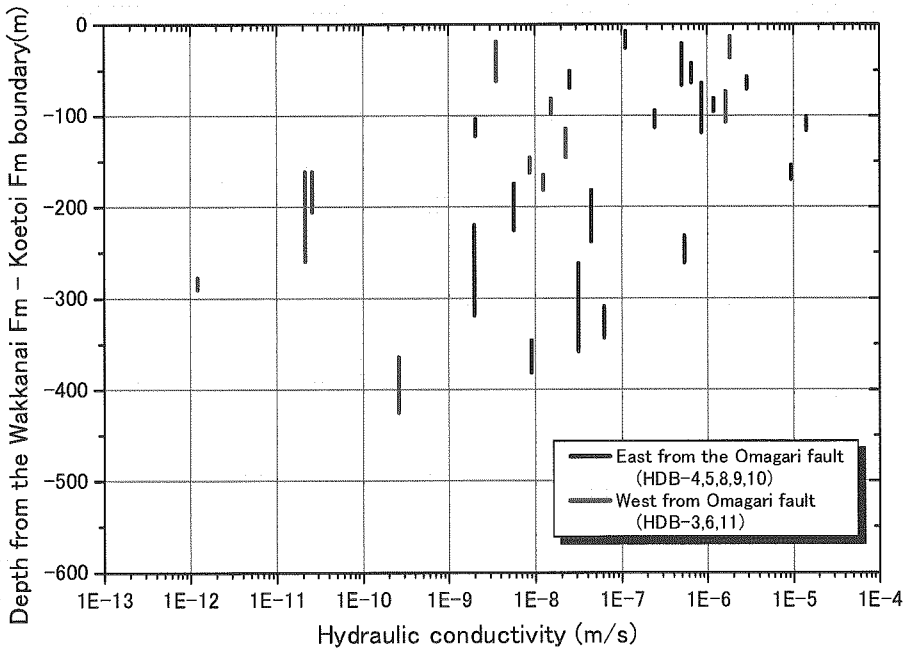


Figure A. 2 Relationship between hydraulic conductivity, depth from the Wakkanai-Koetoi boundary and the location against the Omagari fault

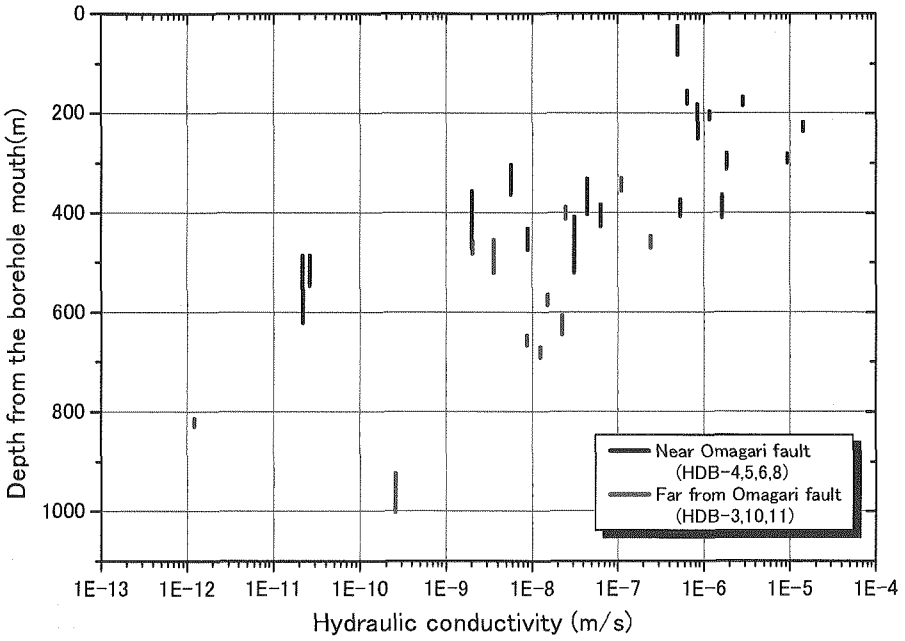


Figure A. 3 Relationship between hydraulic conductivity, depth from the borehole mouth and distance to the Omagari fault

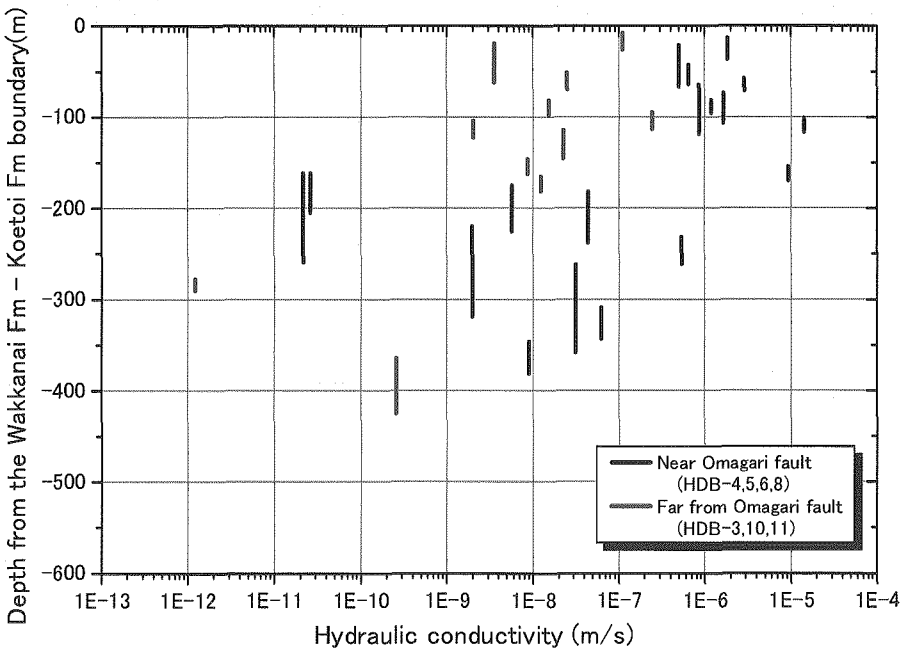


Figure A. 4 Relationship between hydraulic conductivity, depth from the Wakkanai-Koetoi boundary and distance to the Omagari fault

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	立法メートル	m^3
速さ，速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s^2
波数	毎メートル	m^{-1}
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}	ヘクト	h	10^{-21}	ゼプト	z
10^{1}	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	y

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	SI基本単位による表し方
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	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
エネルギー，仕事，熱量	ジュール	J	N・m	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
工率，放射束	ワット	W	J/s	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
電荷，電気量	クーロン	C		s・A
電位差（電圧），起電力	ボルト	V	W/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^3 \cdot A^2$
磁束	ウエーバ	Wb	V・s	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
磁束密度	テスラ	T	Wb/m^2	$kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
セルシウス温度	セルシウス度(d)	℃		K
光束	ルーメン	lm	cd・sr(c)	$m^2 \cdot m^{-2} \cdot cd=cd$
照度	ルクス	lx	lm/m^2	$m^2 \cdot m^{-4} \cdot cd=m^{-2} \cdot cd$
（放射性核種の）放射能	ベクレル	Bq		s^{-1}
吸収線量，質量エネルギー分与，カーマ	グレイ	Gy	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2}$
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	シーベルト	Sv	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2}$

(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った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℃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	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-1}$
力のモーメント	ニュートンメートル	N・m	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	$kg \cdot s^{-2}$
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	$kg \cdot s^{-3}$
熱容量，エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量熱容量（比熱容量），質量エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg・K)	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量エネルギー（比エネルギー）	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m・K)	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot K^{-1}$
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m^3	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
体積電荷	クーロン毎立方メートル	C/m^3	$m^{-3} \cdot s \cdot A$
電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m^2	$m^{-2} \cdot s \cdot A$
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	$m^{-3} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	$m \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot mol^{-1}$
モルエントロピー，モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol・K)	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$
照射線量（X線及びγ線）	クーロン毎キログラム	C/kg	$kg^{-1} \cdot s \cdot A$
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	$m^2 \cdot s^{-3}$
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3}=m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2 \cdot sr)$	$m^2 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3}=kg \cdot s^{-3}$

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°=(π/180) rad
分	’	1’=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	”	1”=(1/60)’=(π/648000) rad
リットル	l、L	1l=1 $dm^3=10^{-3}m^3$
トン	t	1t=10^3 kg
ネーパ	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		1海里=1852m
ノット		1ノット=1海里毎時=(1852/3600)m/s
アール	a	1 a=1 $dam^2=10^2m^2$
ヘクタール	ha	1 ha=1 $hm^2=10^4m^2$
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=1000hPa=10^5Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=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
ダイン	dyn	1 dyn=10^{-5}N
ポアズ	P	1 P=1 dyn・s/cm^2=0.1Pa・s
ストークス	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 ^(1000/4π)A/m
マクスウェル	Mx	1 Mx ^10^{-8}Wb
スチルブ	sb	1 sb =1$cd/cm^2=10^4cd/m^2$
ホト	ph	1 ph=10^4lx
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
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10^{10}Bq
レントゲン	R	1 R = 2.58×10^{-4}C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10^{-2}Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10^{-2}Sv
X線単位		1X unit=1.002×10^{-4}nm
ガンマ	γ	1γ=1 nT=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		1 fermi=1 fm=10^{-15}m
メートル系カラット		1 metric carat = 200 mg = 2×10^{-4}kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリー	cal	
ミクロン	μ	1 μ =1μm=10^{-6}m

（第７版，1998 年改訂）