

JNC TJ7400 2005-080

# 岩盤の傾斜量を用いた水理地質構造要素の 推定に関する解析業務

(核燃料サイクル開発機構 契約業務報告書)

2004年3月

株式会社 大和地質研究所

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

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49  
核燃料サイクル開発機構  
技術展開部 技術協力課  
Tel: 029-282-1122 (代表)  
Fax: 029-282-7980  
e-mail: jserv@jnc.go.jp

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

© 核燃料サイクル開発機構

(Japan Nuclear Cycle Development Institute) 2005

岩盤の傾斜量を用いた水理地質構造要素の推定に関わる解析業務

新井孝志<sup>\*</sup>・葛木建大<sup>\*</sup>・大村一夫<sup>\*</sup>

要 旨

我々は、瑞浪超深地層研究所用地を含む領域を対象とし、地質環境の簡易なモデルに基づき揚水試験に伴う傾斜量を算出した。また、算出した傾斜量による逆解析は、水理地質構造の推定に高い有効性を示した。この解析を通じて、我々は揚水地点に対する Tiltmeter の最適な配置、設置数を評価した。その結果は、以下のように要約される。

- (1) 総揚水量 86.4m<sup>3</sup> (揚水量 20 リットル/分で揚水時間は 72 時間) とした場合、順解析で得られた傾斜量は、最大 11.5 ナノラジアン程度であり、揚水時間が 72 時間以上であれば傾斜量は感知可能である。
- (2) 未知領域における流体体積変化分布の逆解析を行った結果、モデルの水理地質構造を示唆する良好な再現性を示した。なお、体積変化の中心 (揚水地点) は、モデルより 200m 程度浅い深度に分布する傾向を示した。このような傾向はあるものの、水理地質構造を反映した逆解析結果が理論上得られる可能性が高い。
- (3) 研究所用地における最適な傾斜計の配置及び設置数は、断層を横切ってほぼ直線上に配置した 4 地点である。なお、研究所用地全範囲を対象とした場合、4～8 地点の設置数が望ましい。

---

本報告書は、株式会社大和地質研究所が、核燃料サイクル開発機構との契約により実施した業務成果に関するものである。

契約番号：1506A01121

機構担当課室：東濃地科学センター 瑞浪超深地層研究所 超深地層研究グループ

<sup>\*</sup> 株式会社 大和地質研究所

March 2004

THE ANALYSIS ABOUT PRESUMPTION OF THE ELEMENT  
OF THE HYDROGEOLOGICAL STRUCTURE USING  
SURFACE TILT DATA OF THE ROCK MASS

Takashi Arai\*, Takehiro Katsuragi\* and Ohmura Kazuo\*

ABSTRACT

We calculated the deformation of surface tilt followed by pumping tests around the Mizunami Underground Research Laboratory site, on the basis of the simple model in geo-environment. The inversion analysis of the surface tilt data showed high validity on the presumption of hydrogeological structures. Through this research, we evaluated the optimal installation points and arrangement of the Tiltmeters for the pumping point. The results are summarized as follows:

(1) The surface tilt data by the forward analysis show 11.5 nanoradians at its maximum, assuming that the total pumping rate was 86.4 m<sup>3</sup> (20 l/min for 72 hours). Where the pumping time is about 72 hours and more, therefore, we can certainly detect surface tilts.

(2) We carried out the inversion analysis of the distribution of fluid volume change on the unknown domain. The analytical result indicates the good reproducibility and also enables us to interpret hydrogeological structures on the model. The center of volume change as pumping point tends to be distributed among approximately 200 m shallower in depth than the model. It is high possibility that we obtain theoretically the good results reflecting hydrogeological structures by the inversion analysis, whereas the results still include such an above tendency.

(3) We concluded that the optimal installation points and arrangement for the Tiltmeters are 4 points and mostly straight array across the faults in the Laboratory site. We recommend the installation array of 4 to 8 points, when the research area is expanded to all range of the Laboratory sites.

---

This work was performed by Daiwa Geological Laboratory Inc. under contract with Japan Nuclear Cycle Development Institute.

Contract Number : 1506A01121

JNC Liaison : Underground Research Group, Mizunami Underground Research Laboratory, Tono Geoscience Center

\* Daiwa Geological Laboratory Inc.

# 目 次

|   |    |
|---|----|
| はじめに  | 1  |
| 1. 業務概要   | 2  |
| 1. 1 件 名  | 2  |
| 1. 2 目 的  | 2  |
| 1. 3 作業範囲   | 3  |
| 1. 4 業務内容   | 3  |
| 1. 5 納 期  | 3  |
| 1. 6 実施担当   | 3  |
| 2. 簡易な地質環境モデルの構築                                    | 4  |
| 2. 1 地質環境のモデル化領域の設定                                 | 4  |
| 2. 2 使用データ及び構造要素の設定                                 | 4  |
| 2. 3 地質環境モデルの解析条件の設定                                | 4  |
| 2. 4 揚水地点及び流体体積変化の影響範囲の設定                           | 7  |
| 2. 5 総揚水量及び流体体積変化量の設定                               | 7  |
| 2. 6 解析の手順  | 11 |
| 3. 傾斜量の算出   | 13 |
| 3. 1 傾斜量測定点の設定                                      | 13 |
| 3. 2 傾斜量の感度解析結果                                     | 13 |
| 3. 2. 1 3km 四方の範囲の感度解析結果                            | 13 |
| 3. 2. 2 500m 四方の範囲の感度解析結果                           | 14 |
| 3. 2. 3 総揚水量 86.4m <sup>3</sup> の場合の領域②における感度解析結果   | 15 |
| 4. 主要な水理地質構造の抽出及び傾斜計設置孔の検討                          | 19 |
| 4. 1 研究所用地に設置可能な4地点での検討                             | 19 |
| 4. 1. 1 体積変化量及び総揚水量に対する再現性の評価                       | 19 |
| 4. 1. 2 配置の違いによる R <sup>2</sup> 値の大きさ及び回帰直線に対する評価   | 20 |
| 4. 1. 3 体積変化中心（揚水地点）のモデルに対する再現性の評価                  | 21 |
| 4. 1. 4 総揚水量 86.4m <sup>3</sup> とした場合の領域②における再現性の評価 | 21 |
| 4. 1. 5 逆解析評価結果                                     | 22 |
| 4. 2 研究所用地全範囲を対象とした検討                               | 40 |
| 4. 2. 1 体積変化量及び総揚水量に対する再現性の評価                       | 40 |
| 4. 2. 2 配置の違いによる R <sup>2</sup> 値の大きさ及び回帰直線に対する評価   | 40 |
| 4. 2. 3 体積変化中心（揚水地点）のモデルに対する再現性の評価                  | 41 |
| 4. 2. 4 逆解析評価結果                                     | 41 |

|                         |    |
|-------------------------|----|
| 5. 解析結果のまとめ             | 52 |
| 5. 1 順解析結果              | 52 |
| 5. 1. 1 傾斜量の感知可能性       | 52 |
| 5. 1. 2 体積変化影響範囲の予測について | 52 |
| 5. 2 逆解析結果              | 52 |
| 5. 2. 1 水理地質構造要素の抽出     | 52 |
| 5. 2. 2 傾斜計設置点数及び配置について | 53 |
| 6. 傾斜計設置に関する注意事項        | 55 |
| おわりに                    | 57 |

## 図表目次

|            |   |    |
|------------|---|----|
| 図 1-1      | 瑞浪超深地層研究所用地                                     | 2  |
| 図 2-1      | 傾斜量測定範囲   | 5  |
| 図 2-2      | 流体体積変化領域と断層の分布                                  | 9  |
| 図 2-3      | 楕円体の流体体積変化量の設定                                  | 9  |
| 図 2-4      | 流体体積変化量分布モデルの水平断面図                              | 10 |
| 図 2-5      | 本解析の手順フロー                                       | 12 |
| 図 3-1      | 流体体積変化の分布に応じた地表傾斜量の感度解析結果 (3km 四方)              | 16 |
| 図 3-2      | 流体体積変化の分布に応じた地表傾斜量の感度解析結果 (研究所用地を含む<br>500m 四方) | 17 |
| 図 3-3      | 総揚水量 86.4m <sup>3</sup> の場合の地表傾斜量の感度解析結果 (領域②)  | 18 |
| 図 4.1-1    | 研究所用地に設置可能な 4 地点の配置                             | 23 |
| 図 4.1-2    | 傾斜量データ数及び配置に応じた逆解析結果 (領域①→①) の水平断面図<br>(1)      | 24 |
| 図 4.1-2    | 傾斜量データ数及び配置に応じた逆解析結果 (領域①→①) の水平断面図<br>(2)      | 25 |
| 図 4.1-3    | 傾斜量データ数及び配置に応じた逆解析結果 (領域②→②) の水平断面図<br>(1)      | 26 |
| 図 4.1-3    | 傾斜量データ数及び配置に応じた逆解析結果 (領域②→②) の水平断面図<br>(2)      | 27 |
| 図 4.1-4    | 傾斜量データ数及び配置に応じた逆解析結果 (領域①→②) の水平断面図<br>(1)      | 28 |
| 図 4.1-4    | 傾斜量データ数及び配置に応じた逆解析結果 (領域①→②) の水平断面図<br>(2)      | 29 |
| 図 4.1-5    | 逆解析による総揚水量の再現性                                  | 30 |
| 図 4.1-6(1) | 逆解析計算値のばらつき                                     | 31 |
| 図 4.1-6(2) | 逆解析計算値のばらつき                                     | 32 |
| 図 4.1-6(3) | 逆解析計算値のばらつき                                     | 33 |
| 図 4.1-7    | 垂直断面による体積変化中心 (揚水地点) の再現性の比較                    | 34 |
| 図 4.1-8    | 傾斜量データ数及び配置に応じた逆解析結果 (領域②→②) の水平断面図<br>(1)      | 35 |
| 図 4.1-8    | 傾斜量データ数及び配置に応じた逆解析結果 (領域②→②) の水平断面図<br>(2)      | 36 |
| 図 4.1-9    | 逆解析による総揚水量の再現性                                  | 37 |
| 図 4.1-10   | 逆解析計算値のばらつき                                     | 38 |

|            |                               |    |
|------------|-------------------------------|----|
| 図 4.1-11   | 垂直断面による体積変化中心（揚水地点）の再現性の比較    | 39 |
| 図 4.2-1    | 研究所用地付近の傾斜量測定位置及び断層位置         | 43 |
| 図 4.2-2    | 傾斜量データ数に応じた逆解析結果（領域①→①）の水平断面図 | 44 |
| 図 4.2-3    | 傾斜量データ数に応じた逆解析結果（領域②→②）の水平断面図 | 45 |
| 図 4.2-4    | 傾斜量データ数に応じた逆解析結果（領域①→②）の水平断面図 | 46 |
| 図 4.2-5    | 逆解析による総揚水量の再現性                | 47 |
| 図 4.2-6(1) | 逆解析計算値のばらつき                   | 48 |
| 図 4.2-6(2) | 逆解析計算値のばらつき                   | 49 |
| 図 4.2-6(3) | 逆解析計算値のばらつき                   | 50 |
| 図 4.2-7    | 垂直断面による体積変化中心（揚水地点）の再現性の比較    | 51 |
| 図 5-1      | 研究所用地外に設置する場合の配置              | 54 |
|            |                               |    |
| 表 2-1      | 岩石室内試験結果                      | 6  |
| 表 2-2      | 地層境界深度一覧                      | 6  |
| 表 2-3      | 解析モデルの設定条件                    | 11 |
| 表 4-1      | 各評価における最適な配置                  | 22 |
| 表 4-2      | 各評価における必要な設置数                 | 42 |



はじめに

超深地層研究所計画における、地表から地下深部に至る水理地質構造のモデル化には、地下水流動を規制するような断層や割れ目の分布を推定することが必要である。その手段の一つとして、揚水試験や研究坑道掘削等に伴う地下水位の変動や地下水流動によって生じる地盤（岩盤）の体積歪変動・変化パターンを地表付近の微小な傾斜量の変化を用いて、逆解析的に抽出する方法がある。この微小な傾斜量の変化を検討する手法として、現在高精度の Tiltmeter（ピナクル社製）の適用が考えられているが、その計測データから逆解析により断層や割れ目の分布を推定する手法は十分には確立されていない。

本業務では、瑞浪超深地層研究所用地を含む領域を対象として、簡易な地質環境モデルを構築し、これに基づいて揚水試験に伴う傾斜量の変化を算出し、得られた傾斜量の変化から逆解析的に水理地質構造を推定する手法の有効性の確認を行った。

さらに、逆解析により水理地質構造を推定する際、揚水位置に対する最適な Tiltmeter の設置位置、点数等についての検討を行った。

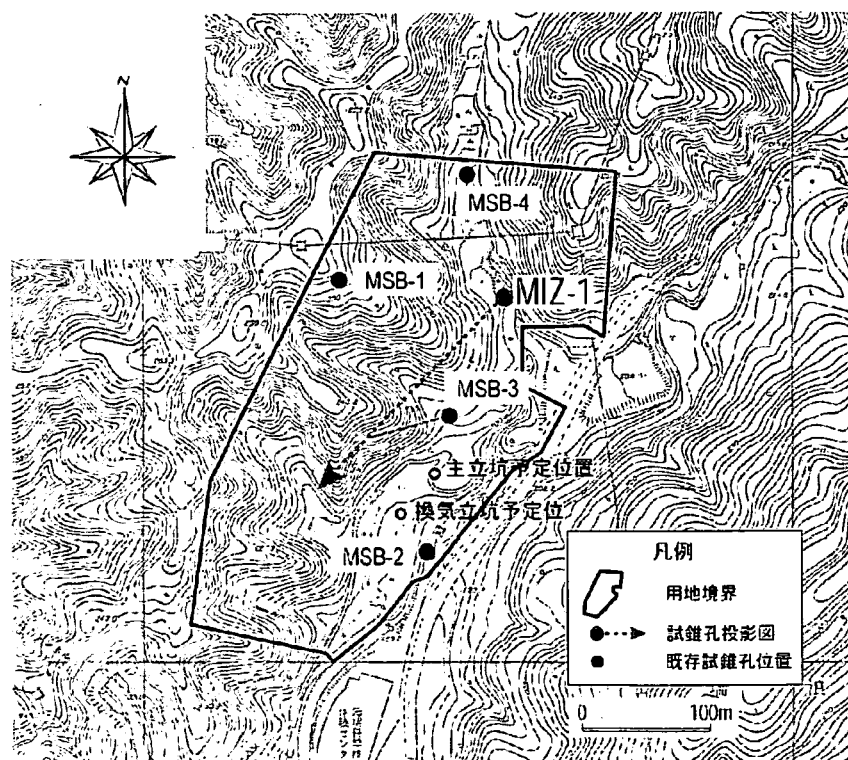
## 1. 作業概要

### 1.1 件名

岩盤の傾斜量を用いた水理地質構造要素の推定に関わる解析業務

### 1.2 目的

本業務は、簡易な地質環境モデルを構築し、これに基づいて揚水試験等に伴う傾斜量の変化を算出し、さらに傾斜量の変化から逆解析的に水理地質構造を推定する手法の有効性を確認することを目的とする。具体的には瑞浪超深地層研究所用地（以下、研究所用地、図1-1）を含む領域を対象として、逆解析により水理地質構造を推定する際、揚水位置に対する最適な Tiltmeter の設置位置、点数等についての検討を実施した。



瑞浪市 都市計画基本図 1/2,500

図1-1 瑞浪超深地層研究所用地

### 1.3 作業範囲

- (1) 傾斜量の算出
- (2) 主要な水理地質構造要素の抽出
- (3) 傾斜計の設置孔の検討
- (4) 報告書の作成

## 1. 4 業務内容

### (1) 傾斜量の算出

研究所用地を含む領域を対象とした3次元の地質環境モデルを構築し、揚水試験等によって得られる揚水量等のデータから、地表部で観測される傾斜量を解析により求めた。解析は、流体体積変化分布をインプットデータとした。

なお、解析に用いる地質環境モデルは、堆積岩と花崗岩を考慮したモデルとするが、モデル構築や解析作業に必要な地質構造、揚水地点、揚水の影響範囲及び断層形状等の条件については、サイクル機構と協議の上決定した。また、傾斜量を求めるにあたり、境界条件の影響を顕著に受けないように、モデル構築範囲を考慮した。

### (2) 主要な水理地質構造要素の抽出

(1)で求められた傾斜量を用いて、逆解析により岩盤の体積歪分布を求めた。また、この結果から、推定される水理地質構造要素の抽出を行った。

### (3) 傾斜計の設置孔の検討

(2)で抽出した水理地質構造要素が、研究所用地のどの地点での傾斜量測定により抽出が可能となるかについて、感度解析を実施し、最適な傾斜計設置位置と点数等について検討を行った。

### (4) 報告書の作成

(1)～(3)までの作業内容について取りまとめ、サイクル機構技術資料作成マニュアル(2003)に従って報告書を作成した。

## 1. 5 期 間

平成16年1月27日～平成16年3月12日

## 1. 6 実施担当

実施責任者

大村 一夫 (理学博士、技術士：応用理学部門)

実施担当者

新井 孝志 (理学博士)

葛木 建大

## 2. 簡易な地質環境モデルの構築

### 2. 1 地質環境のモデル化領域の設定

解析を行う上で地質環境をモデル化する領域は、地表部は研究所用地及び2本の断層を含む0.6km×1.2kmの範囲(図2-1の赤線)とし、座標は東西-南北方向の直交座標を基準とした(図2-1の黒線)。また、深度方向は、解析に必要な深度を考慮し1.6kmまでの領域とした。

### 2. 2 使用データ及び構造要素の設定

揚水試験による地表傾斜量変化に影響を及ぼすと考えられる地質構造要素を以下の様に抽出し、地質・地質構造・揚水量及び解析に必要な係数を以下のように設定した。ポアソン比及び層厚の平均値は、表2-1及び表2-2に示した値に基づいて設定した。

- 基盤花崗岩(白亜紀の花崗岩:土岐花崗岩)

- ポアソン比:0.33(研究所用地のボーリングコアによる室内試験結果の平均値)

- 層厚:1440m(設定した最大影響範囲の深度までの層厚)

- 被覆堆積岩(新第三紀の瑞浪層群)

- ポアソン比:0.3(東濃鉱山のボーリングコアによる室内試験結果の平均値)

- 層厚:160m(研究所用地のMSB-1~MSB-4孔のボーリングデータによる堆積岩の下限深度の平均値)

- 地質構造

- a.断層IF\_SB1\_004:走向・傾斜N19.3W・87.6W、標高-772.9mでMIZ-1号孔と遭遇

- b.断層IF\_SB1\_005:走向・傾斜N15W・79E、標高-526.45mでMIZ-1号孔と遭遇

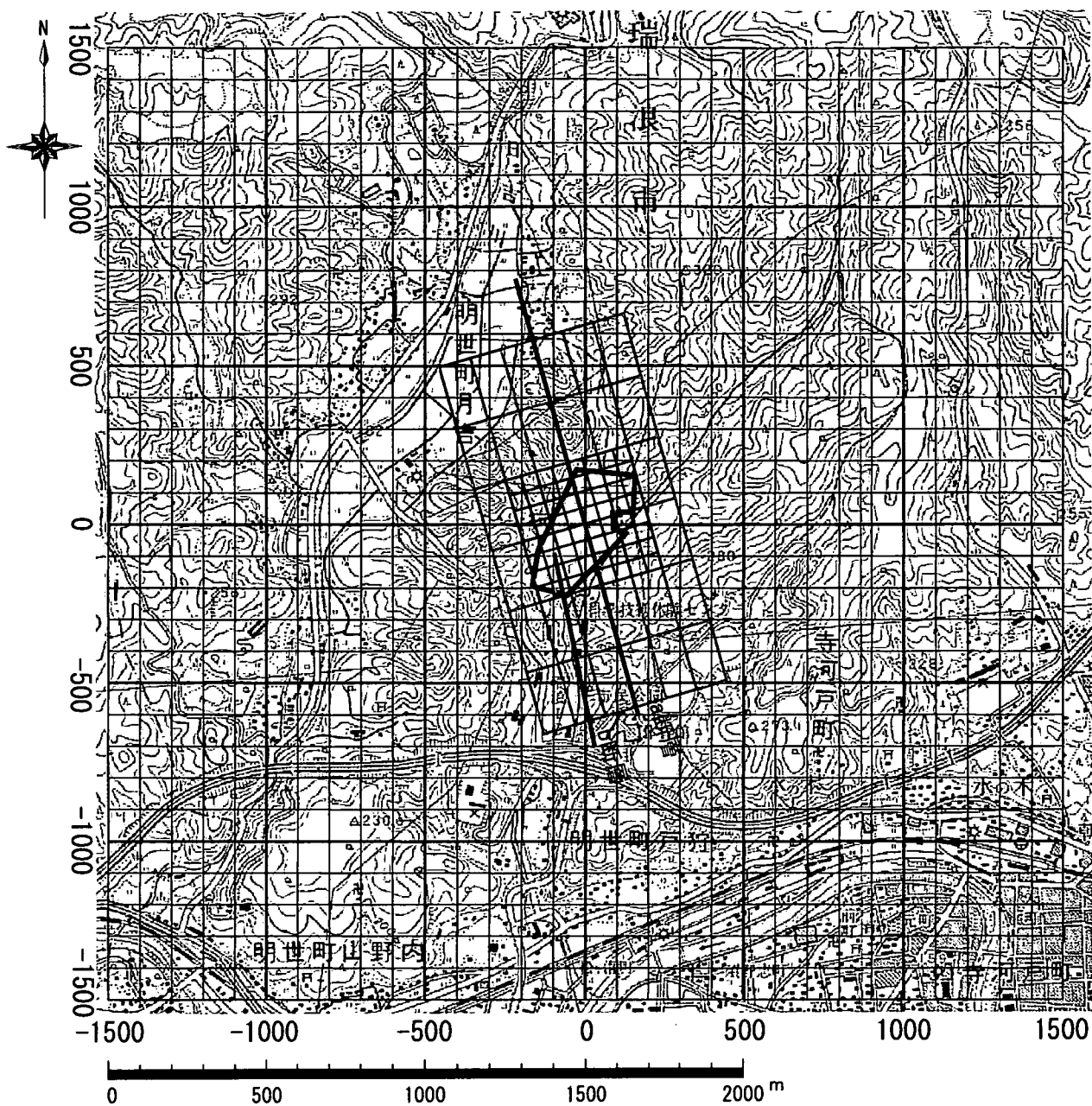
- 揚水量:20リットル/分

- スケンプトン間隙圧係数:断層及び断層沿いの高透水部では1.0、それ以外は0.5

### 2. 3 地質環境モデルの解析条件の設定

解析の条件として、解析領域を半無限・等方均一弾性体として取り扱っているため、抽出した地質データのうちポアソン比について平均化を行った。前述の堆積岩類の層厚(160m)と花崗岩の層厚(1440m)に、それぞれの岩石のポアソン比を掛け合わせ、両者の合計を両者の全層厚で割った数値(0.32)を解析領域全体のポアソン比とすることにより、解析領域の地質の平均化を図った。

一方、スケンプトン間隙圧係数については、前述の設定値を用い、領域内を切断するa・b両断層分布域の不均質性を考慮した。



\* 国土地理院発行1:25,000地形図「土岐」及び「瑞浪」を使用

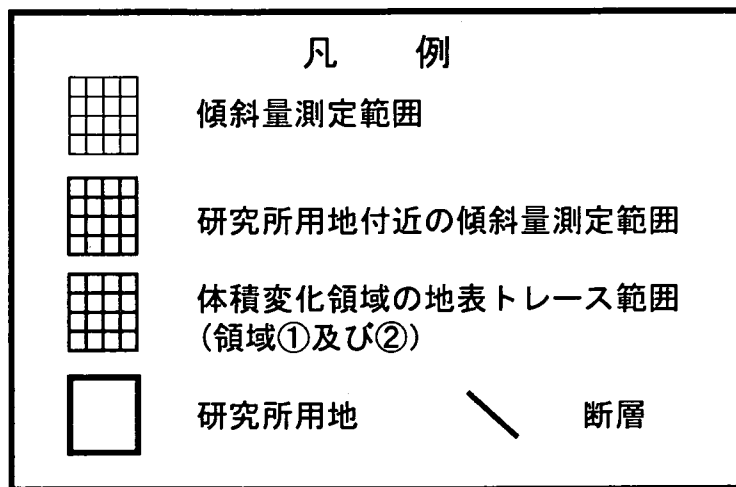


図2-1 傾斜量測定範囲

また、揚水による流体の体積変化の影響を受ける断層は、それぞれ1枚の平面として取り扱い、a断層の走向・傾斜を N19W・90、b断層の走向・傾斜を N15W・80Eと設定した。

表 2-1 岩石室内試験結果

| 岩相                   |        | 試料採取深度<br>(m) | ポアソン比   | 一軸圧縮強度<br>(MPa) | 弾性係数<br>(MPa) |      |
|----------------------|--------|---------------|---------|-----------------|---------------|------|
| 瑞浪層群<br>(*東濃鉱山)      | 明世累層   | 砂岩            | 22-25   | 0.31            | 7.52          | 3070 |
|                      |        | 泥岩            | 41-44   | 0.29            | 5.56          | 2160 |
|                      | 土岐夾炭累層 | 凝灰質泥岩         | 68-73   | 0.37            | 3.03          | 540  |
|                      |        | 含礫砂岩          | 90-96   | 0.27            | 6.43          | 2070 |
|                      |        | 砂岩            | 108-111 | 0.33            | 8.42          | 3530 |
|                      |        | 砂岩            | 132-137 | 0.30            | 7.42          | 1500 |
| 土岐花崗岩<br>(研究所用地の平均値) |        | 170-490       | 0.33    | 117             | 58000         |      |

\* 東濃鉱山堆積岩室内試験結果(杉原他、2000)より抜粋

表 2-2 地層境界深度一覧

| 孔名        | MSB-1 | MSB-2  | MSB-3           | MSB-4  |       |
|-----------|-------|--------|-----------------|--------|-------|
| 生俵累層      | 8.52  | -      | -               | -      |       |
| 明世累層      | 主要部   | 117.10 | 69.30           | 72.50  | 63.40 |
|           | 基底礫   | 131.32 | 77.54           | 88.70  | 76.60 |
| 土岐夾炭累層    | 主要部   | 179.48 | 132.10          | 140.90 | 93.90 |
|           | 基底礫   | 195.33 | 170.95          | 177.70 | -     |
| 花崗岩<br>孔底 | 風化部   | 195.60 | 173.35          | 190.60 | -     |
|           |       | 201.00 | 180.00          | 199.00 | 99.00 |
| 断層*       | -     | -      | 87.50<br>~92.20 | -      |       |

地層境界は全て下限深度(単位:mabh)

\*)断層については区間深度(上限深度~下限深度)を表す

## 2. 4 揚水地点及び流体体積変化の影響範囲の設定

揚水地点は、前述の a 断層と MIZ-1 号孔との交差部で、a 断層の東側（深度で 1000m）に設定した。

揚水による流体体積変化は、① a 断層の東側に限った場合と、② a 断層の東側・西側とも影響がある場合の 2 ケースとした。なお、a 断層は、b 断層に対して遮水性が高く、b 断層は上記 2 ケースとも透水性の高い断層とした。

また、揚水による流体体積変化の最大影響範囲は、ケースごとに以下の様な領域を設定した。それぞれの領域と断層の分布を図 2-2 に示す。

領域①：揚水地点を起点として深さは上下 600m（総延長 1200m）、揚水地点を起点として a 断層面に沿って南北両側に水平 600m（総延長 1200m）、断層面に直交し東側に水平 300m の領域。

領域②：上下方向の距離及び南北方向の水平距離は領域①と同様とし、a 断層面を挟んだ東西両側に水平 300m（総延長 600m）の領域。

## 2. 5 総揚水量及び流体体積変化量の設定

揚水量（20 リットル/分）の総量は、感度解析可能な量として揚水時間を 24 時間と仮定し、 $28.8\text{m}^3$  とした。

この値を流体体積変化の総量（ $V_0$ ）とし、流体体積変化分布の形状は、揚水地点付近を中心とする楕円体を想定した。想定した流体体積変化分布の形状は、a 断層に斜交する b 断層付近にも流体体積変化の影響があるため、実際は単純な楕円体でなく、b 断層に沿って局所的に突起があるような形状をしていると考えられる。しかし、突起部の影響が少ないと仮定し、単純な楕円体分布で近似した。

したがって、領域②の流体体積変化分布の形状は楕円体とし、領域①の形状は領域②の楕円体を半割した半楕円体と設定した。

流体体積変化量を設定するにあたり、体積変化量（ $\Delta v$ ）で表される領域内の楕円体等高面の分布を想定した。領域内の流体体積変化分布の楕円体は、 $x$  方向の大きさを  $x_m$ （南北方向の長さの半分）、 $y$  方向の大きさを  $y_m$ （東西方向の長さの半分）、 $z$  方向の大きさを  $z_m$ （深度方向の長さの半分）とした場合、 $\Delta v$  の等高面が相似な楕円体面（ $r=0\sim 1$ ）で与えられると仮定すると、

$$\frac{x'^2}{(rx_m)^2} + \frac{y'^2}{(ry_m)^2} + \frac{z'^2}{(rz_m)^2} = 1, \quad (2-1)$$

と表せる。等高面の  $\Delta v$  は同一であるので、等高面の  $\Delta v$  の大きさが  $r$  に比例すると仮定すると、次式の関係で表される。

$$\Delta v = a_0(1-r), \quad (2-2)$$

また、非線形分布の場合として  $(1-r)^{2n}$  で表される関係を想定した。

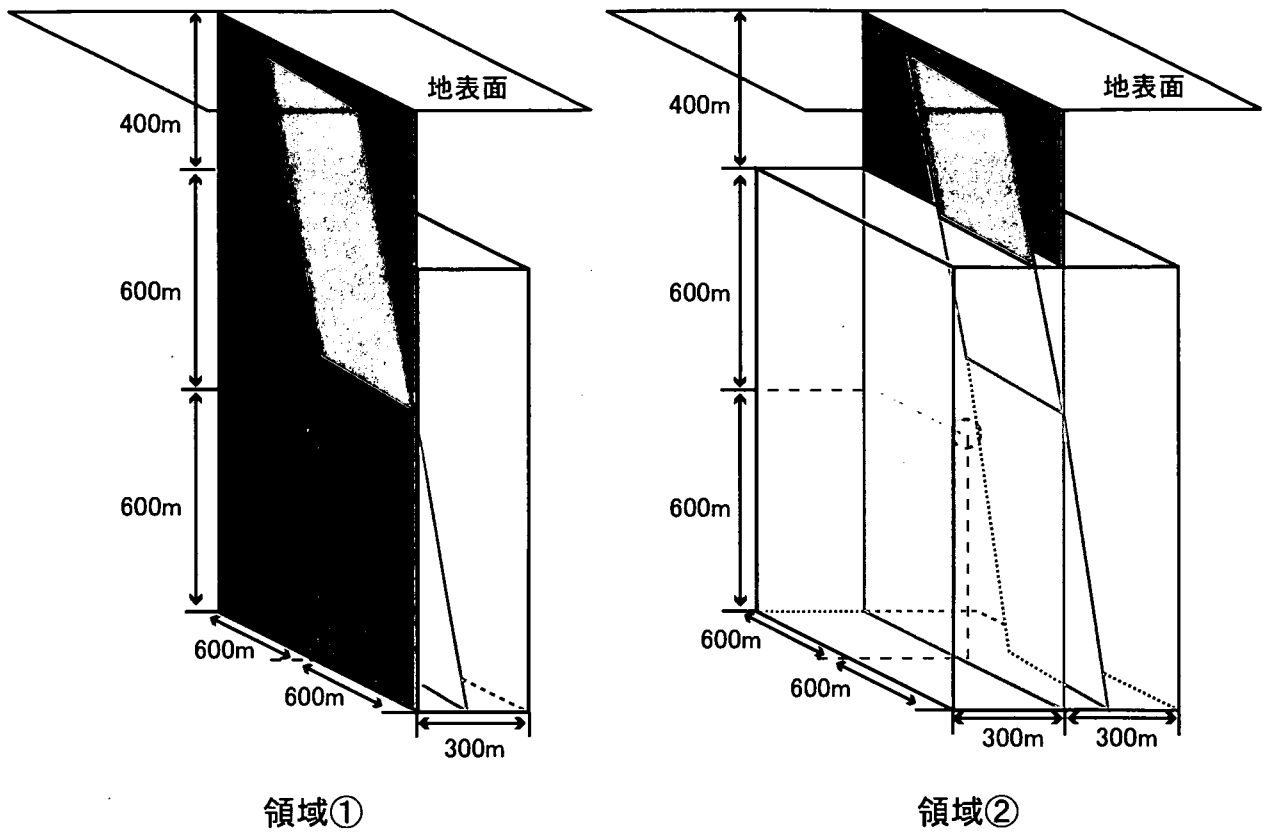
以上のことから、2 次元的には、図 2-3 のグラフで示したように、等高面が一次

関数で変化する線形分布の場合（図2-3左）と、2乗（図2-3中）及び4乗で変化する非線形分布の場合（図2-3右）の3通りを想定した。

3通りの流体体積変化量のうち、線形分布で変化するモデルに基づいて、流体体積変化量の分布を設定し、各領域内の流体体積変化量の水平断面を作成した（図2-4）。水平断面は、100m深度ごとに7断面作成し、断面1から7に向かうほど浅部の断面を表すように配置した。断面4は体積変化の中心（揚水地点）を通る水平断面である。計算上、領域①の揚水地点では、約  $5.1 \times 10^{-7} \text{m}^3$  の体積変化量を示す。また、領域②の揚水地点では、約  $2.55 \times 10^{-7} \text{m}^3$  の体積変化量を示す。

図2-4では、流体体積変化量を2次元平面で表現しているが、領域①及び領域②ともに、流体体積変化量を積分した総量が、総揚水量  $28.8 \text{m}^3$  と等しくなるように設定されている。





\* 解析を行う際、断層面沿いはB(スケンプトン間隙圧係数)を1.0とし、他の部分ではBを0.5としている。

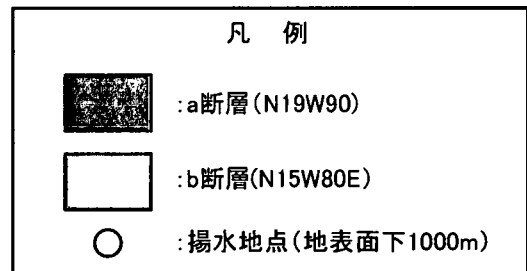
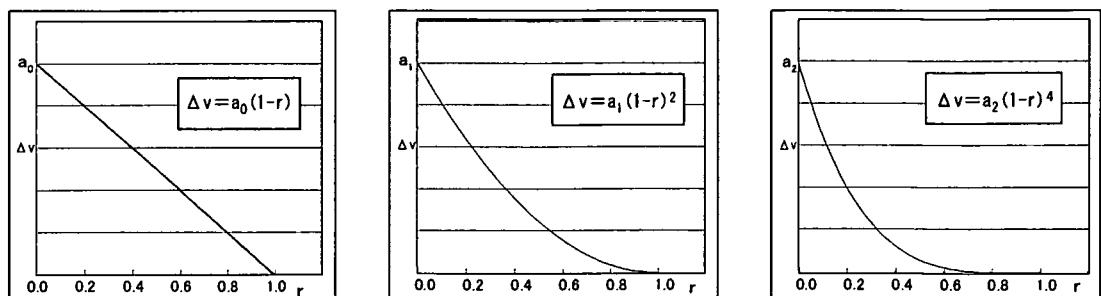
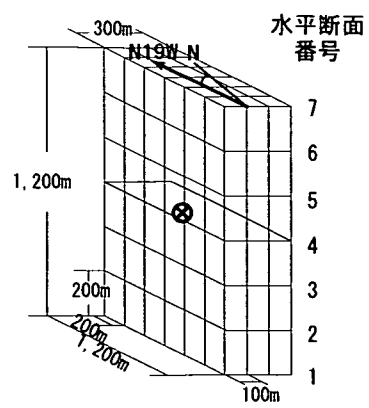


図2-2 流体体積変化領域と断層の分布

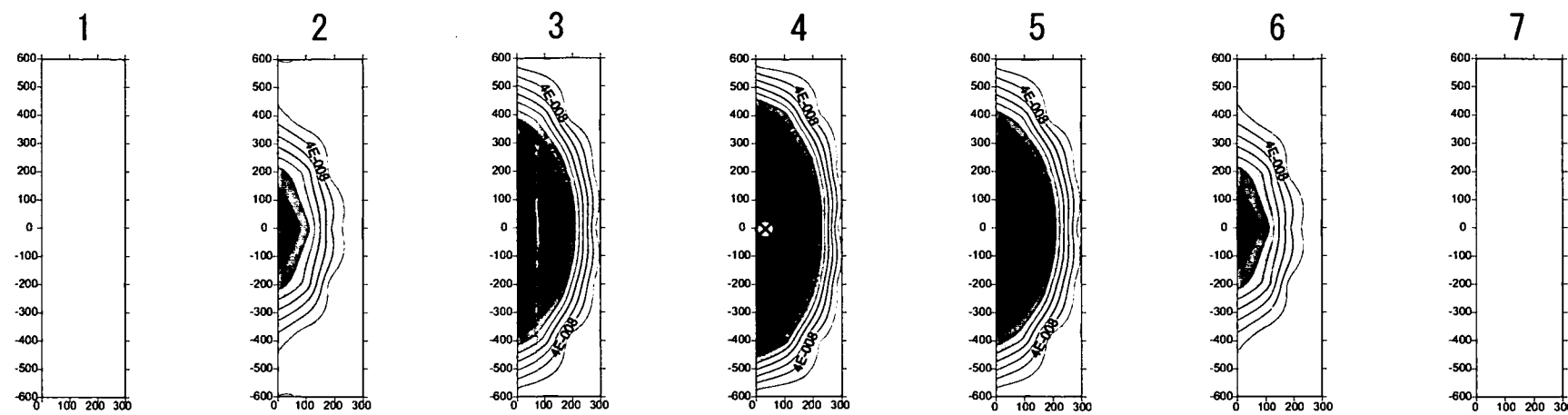


$\Delta v$ : 各節点における体積変化量  
 $a_0, a_1, a_2$ : 楕円体の中心点における体積変化量  
 $r$ :  $\Delta v$ の大きさを表せる楕円体等高面の係数(範囲: 0~1)

図2-3 楕円体の流体体積変化量の設定

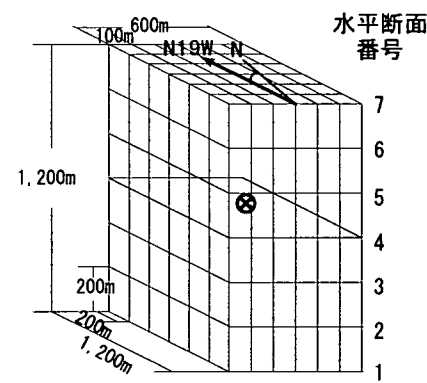


⊗ : 揚水地点

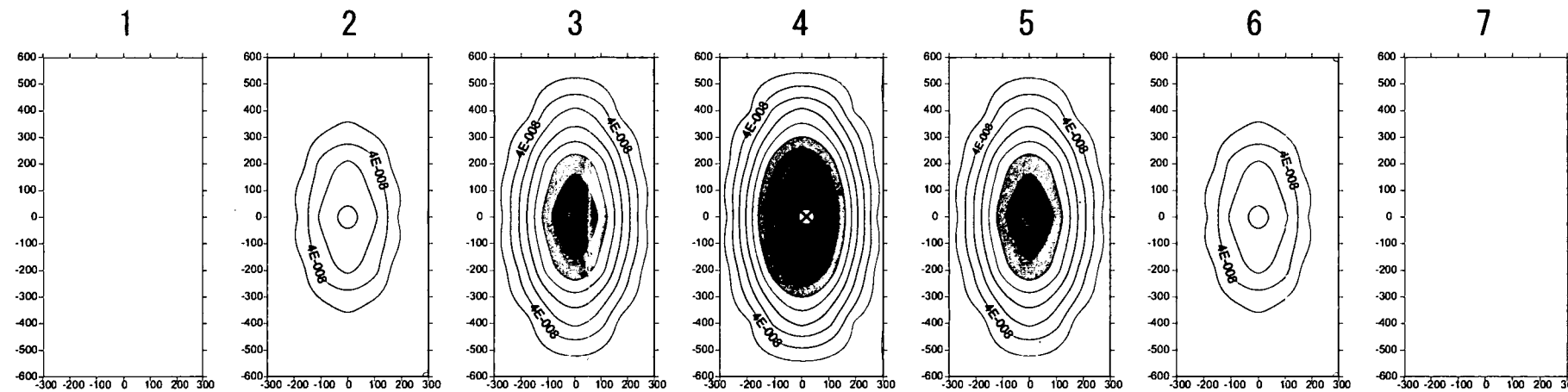


領域①

揚水量 : 20 l/min  
 揚水総量 : 28.8m<sup>3</sup>  
 体積変化量 :  $\Delta v = a_0(1-r)$

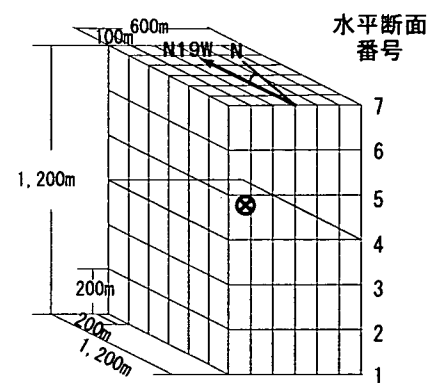


⊗ : 揚水地点

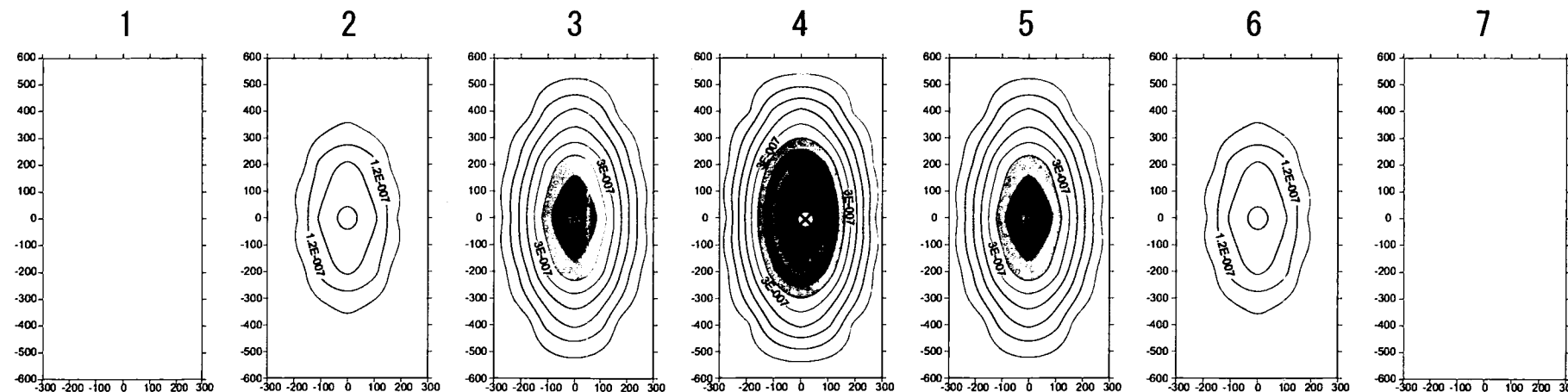


領域②

揚水量 : 20 l/min  
 揚水総量 : 28.8m<sup>3</sup>  
 体積変化量 :  $\Delta v = a_0(1-r)$



⊗ : 揚水地点



領域②

揚水量 : 20 l/min  
 揚水総量 : 86.4m<sup>3</sup>  
 体積変化量 :  $\Delta v = a_0(1-r)$

図2-4 流体体積変化量分布モデルの水平断面図

## 2. 6 解析の手順

簡易な地質環境モデルの構築にあたり、2. 1～2. 5で設定した内容をまとめて表2-3に示す。また、図2-5に簡易な地質環境モデルに基づいて行った解析の手順フローを示す。

表 2-3 解析モデルの設定条件

| 設定項目               | 設定条件  |
|--------------------|---|
| モデル化領域の範囲          | ・ 研究所用地を含む東西 600m×南北 1200m×深度 1600m   |
| 岩相                 | ・ 一層構造に平均化  |
| ポアソン比              | ・ 0.32  |
| スケンプトン間隙圧係数        | ・ 断層及び断層沿いの高透水部で 1.0、それ以外は 0.5  |
| 領域を切断する断層          | ・ 2断層   |
| 断層の走向・傾斜           | ・ a断層：N19W・90<br>・ b断層：N15W・80E   |
| 揚水地点               | ・ a断層の東側<br>・ 深度 1000m  |
| 揚水による流体体積変化の最大影響範囲 | ・ 領域①：1200m（断層の走向方向）×1200m（深度方向）×300m（断層面の東側）<br>・ 領域②：1200m（断層の走向方向）×1200m（深度方向）×600m（断層面を挟んで片側 300m）<br>・ a断層の走向方向と平行 |
| 総揚水量               | ・ 28.8m <sup>3</sup> （揚水時間は 24 時間）  |
| 流体体積変化の分布モデル       | ・ 楕円体近似（領域①では回転楕円体を半割にした形状。領域②では回転楕円体）<br>・ 線形変化  |

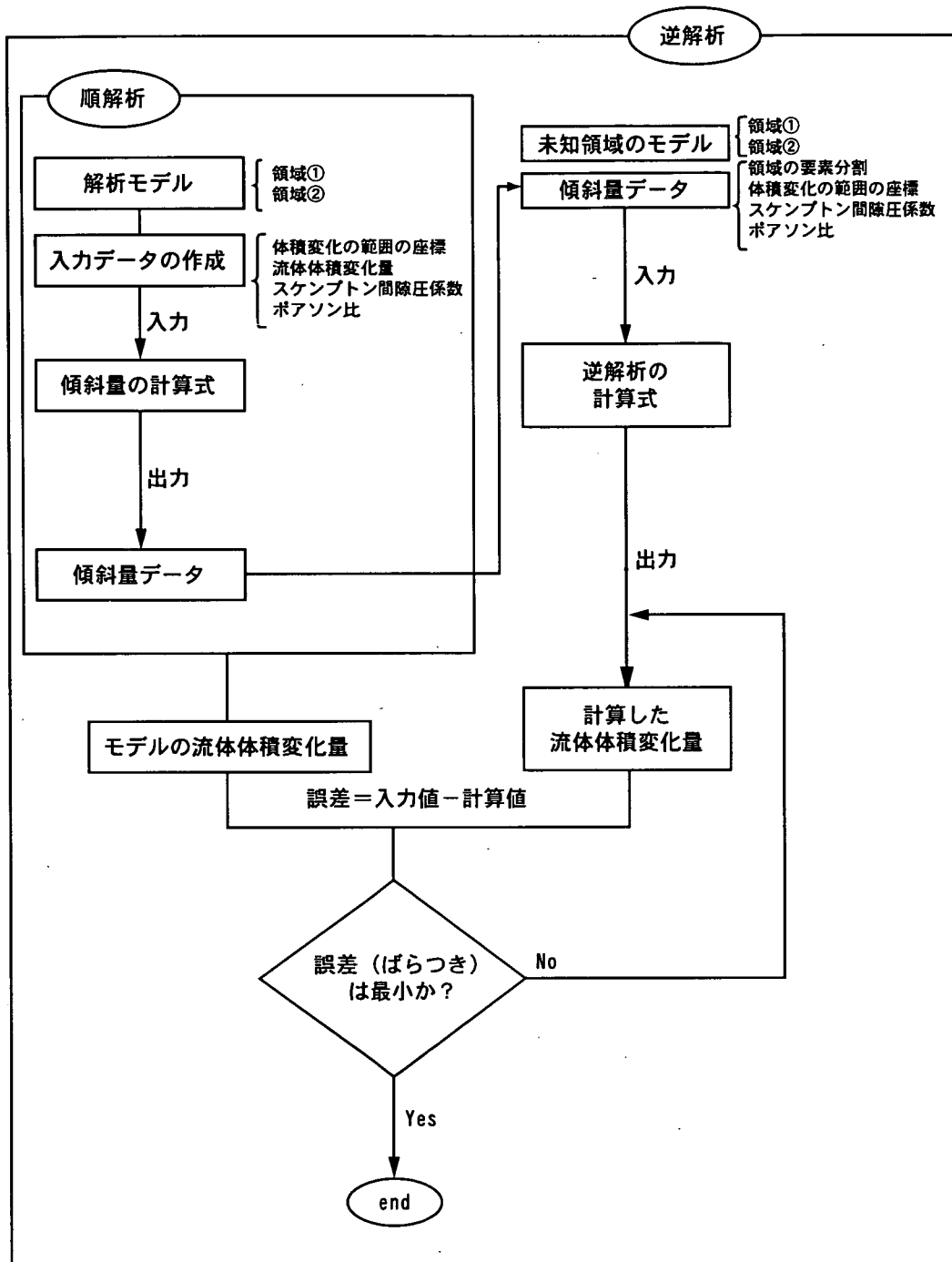


図2-5 本解析の手順フロー

### 3. 傾斜量の算出結果

#### 3. 1 傾斜量測定点の設定

揚水にともなう地表傾斜量の変化を算出するにあたり、3km 四方の範囲（図 1-1 に示されている黒線で囲まれた範囲）を 100m メッシュで分割し、 $31 \times 31 = 961$  地点の傾斜量測定点を設定した。

また、後述する傾斜計設置孔検討のために、研究所用地内の設置可能な 4 地点及び研究所用地付近（図 1-1 に示されている青線で囲まれた範囲）を 50m メッシュで分割した  $9 \times 9 = 81$  地点の計 85 地点の傾斜量測定点を設定した。

#### 3. 2 傾斜量の感度解析結果

2章で設定した解析モデルに基づいて、順解析の入力データを作成した。入力データは、ポアソン比、スケンプトン間隙圧係数、流体体積変化量、体積変化の影響範囲の座標データ及び地表傾斜量測定点の座標データからなる。

作成した入力データから、領域①及び領域②のケースについて、前述の 3 通りの流体体積変化分布に応じた地表傾斜量を算出した。順解析の計算結果は、測定点ごとに x 成分（東方向を正とする傾斜）及び y 成分（北方向を正とする傾斜）の直交する 2 成分の傾斜角（ラジアン）が出力される。傾斜量の大きさを表すために、各測定点の x 成分と y 成分の傾斜角を次式により合成した。

$$\text{合成傾斜量 (rad)} = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (3-1)$$

得られた合成傾斜量データを z 軸方向の大きさとしてプロットし、ワイヤーフレーム図及び等高線図を作成した（図 3-1～図 3-3 参照）。

##### 3. 2. 1 3km 四方の範囲の感度解析結果

961 地点の合成傾斜量データを使用し、3km 四方の範囲の感度解析結果を図 3-1 に示す。領域①と領域②の等高線図を比較すると、等高線の中心の位置が異なっている。すなわち、設定した体積変化中心（揚水地点近傍）直上の地表点を基準点（図 2-1 の座標で (0,0) の地点）とすると、領域①では傾斜量の中心が基準点より東北東方向にずれており、領域②では基準点と一致している。感度解析結果について以下に述べる。

##### (1) 流体体積変化量が線形分布である場合（図 3-1 上段）

算出された傾斜量は、領域①（図 3-1 上段左側）及び領域②（図 3-1 上段右側）ともに、最大 2.7 ナノラジアンである。

感知可能な傾斜量の測定範囲は、領域①では、基準点から北へ約 1250m、南へ約 1200m、東へ約 1250m、西へ約 1100m の距離を通る等高線を最大範囲とする。同様に、領域②では、基準点から北へ約 1250m、南へ約 1250m、東へ約 1200m、西へ

約 1200m の距離を通る等高線を最大範囲とする。

(2) 2乗で変化するような非線形分布の場合 (図3-1 中段)

算出された傾斜量は、領域① (図3-1 中段左側) では最大 2.7 ナノラジアンであり、領域② (図3-1 中段右側) では最大 2.8 ナノラジアンである。

感知可能な傾斜量の測定範囲は、領域①では、基準点から北へ約 1280m、南へ約 1220m、東へ約 1280m、西へ約 1160m の距離を通る等高線を最大範囲とする。同様に、領域②では、基準点から北へ約 1280m、南へ約 1300m、東へ約 1230m、西へ約 1250m の距離を通る等高線を最大範囲とする。

(3) 4乗で変化するような非線形分布の場合 (図3-1 下段)

算出された傾斜量は、領域① (図3-1 下段左側) では最大 3 ナノラジアンであり、領域② (図3-1 下段右側) では最大 3.1 ナノラジアンである。

感知可能な傾斜量の測定範囲は、領域①では、基準点から北へ約 1380m、南へ約 1360m、東へ約 1360m、西へ約 1280m の距離を通る等高線を最大範囲とする。同様に、領域② (図3-1 の下段右側) では、基準点から北へ約 1350m、南へ約 1380m、東へ約 1340m、西へ約 1340m の距離を通る等高線を最大範囲とする。

以上のことから、領域①と領域②では、最大傾斜量の範囲は、概ね基準点を中心とする半径 350~500m の円内の範囲にある。また、最大傾斜量の顕著な差は認められず、流体体積変化の分布が非線形の場合であっても、傾斜量の大きな変化は得られなかった。なお、感知可能な傾斜量の測定範囲は、領域①と領域②を合わせると、半径 1100m の円内とみなすことができる。

### 3. 2. 2 500m 四方の範囲の感度解析結果

領域①と領域②では、傾斜量中心の位置が異なっているため、傾斜量の感知不可能な位置も異なっている。したがって、研究所用地付近の傾斜量感知可能地点を検討するために、研究所用地を含む 500m 四方の拡大図を作成した (図3-2)。

図3-2は、81地点の合成傾斜量データを使用し、研究所用地を含む 500m 四方の範囲の感度解析結果を示している。図3-1と同様に3通りの流体体積変化分布についてそれぞれ図示した。等高線図を見ると、領域①及び領域②ともに、等高線の最大伸長方向が断層の走向方向と一致しており、地質構造を反映した傾斜量分布が得られていると判断できる。感度解析結果について以下に述べる。

(1) 流体体積変化量が線形分布である場合 (図3-2 上段)

算出された傾斜量は、領域① (図3-2 上段左側) では最大 2.7 ナノラジアンであり、領域② (図3-2 上段右側) では最大 2.5 ナノラジアンである。

感知可能な傾斜量の測定範囲は、領域①では、基準点から北へ約 120m、南へ約 25m、東へ約 165m、西へ約 10m の距離を通る等高線の外側の範囲である。領域②

では、基準点から北へ約 100m、南へ約 130m、東へ約 90m、西へ約 95m の距離を通る等高線の外側の範囲である。

(2) 2 乗で変化するような非線形分布の場合 (図 3-2 中段)

算出された傾斜量は、領域① (図 3-2 の中段左側) では最大 2.6 ナノラジアンであり、領域② (図 3-2 の中段右側) では最大 2.4 ナノラジアンである。

感知可能な傾斜量の測定範囲は、領域①では、基準点から北へ約 110m、南へ約 50m、東へ約 150m、西へ約 25m の距離を通る等高線の外側の範囲である。領域②では、基準点から北へ約 100m、南へ約 120m、東へ約 90m、西へ約 95m の距離を通る等高線の外側の範囲である。

(3) 4 乗で変化するような非線形分布の場合 (図 3-2 の下段)

算出された傾斜量は、領域①では最大 2.7 ナノラジアンであり、領域②では最大 2.6 ナノラジアンである。

感知可能な傾斜量の測定範囲は、領域①では、基準点から北へ約 100m、南へ約 60m、東へ約 135m、西へ約 40m の距離を通る等高線の外側の範囲である。領域②では、基準点から北へ約 90m、南へ約 100m、東へ約 90m、西へ約 90m の距離を通る等高線の外側の範囲である。

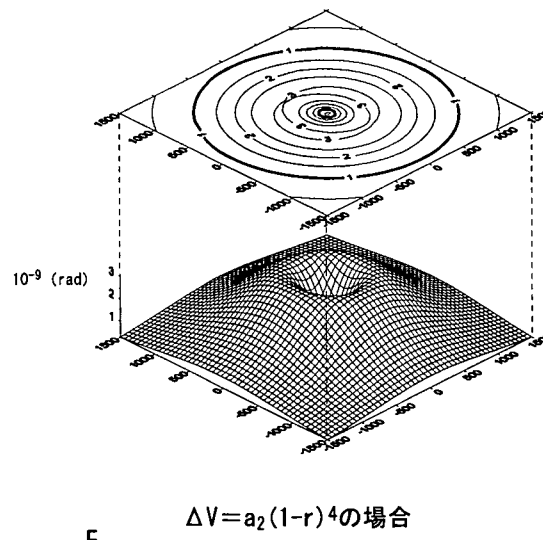
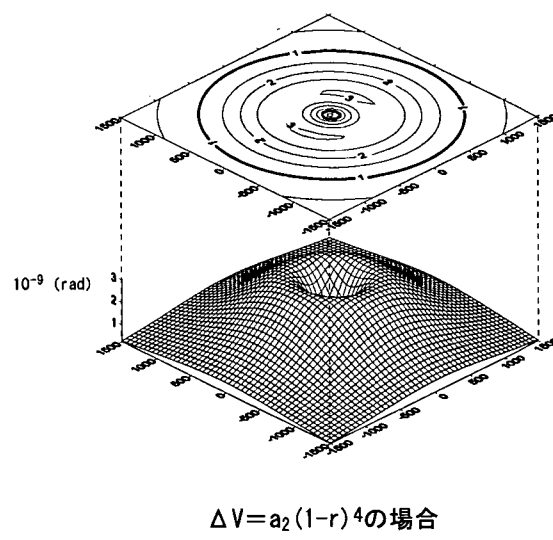
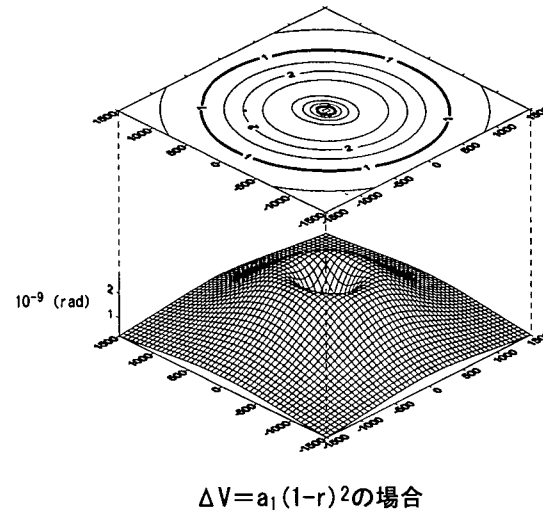
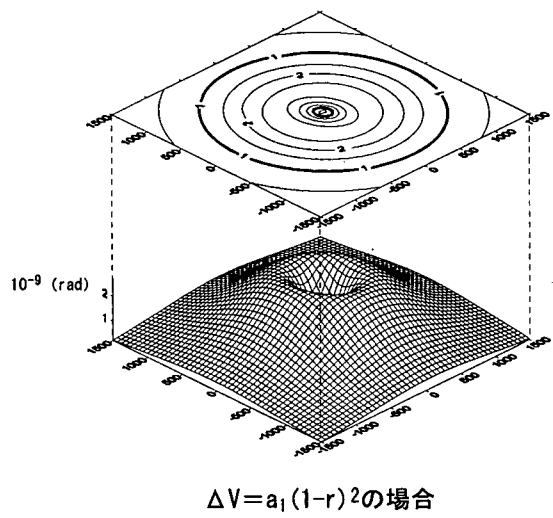
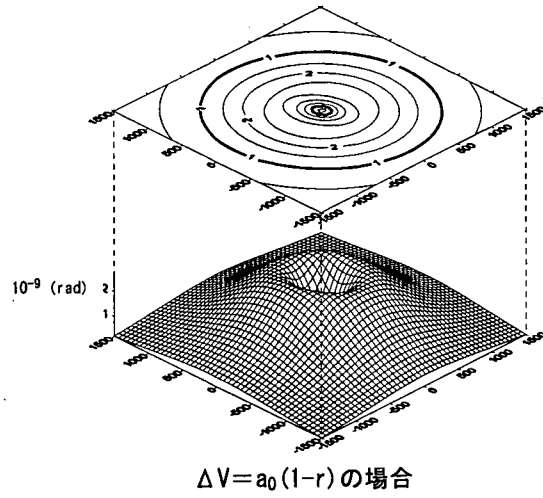
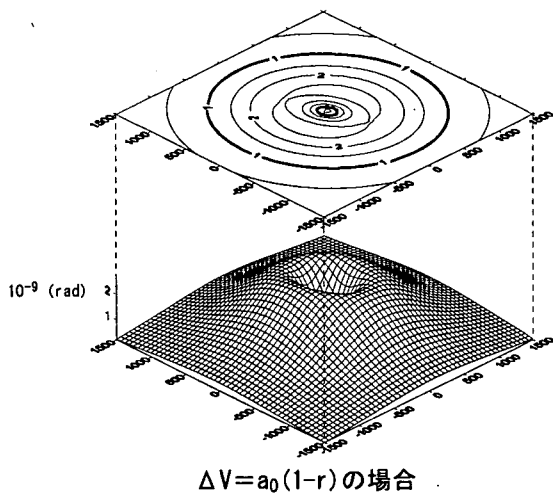
以上のことから、傾斜量中心付近では、領域①と領域②を合わせると、基準点から北へ 120m、南へ 130m、東へ 165m、西へ 95m の距離を通る円、すなわち東へ 30m の地点を中心とする半径 130m の円内は、感知不可能とみなすことができる。

### 3. 2. 3 総揚水量 86.4m<sup>3</sup> の場合の領域②における感度解析結果

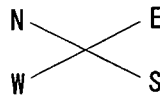
後述する、研究所用地内で傾斜計の設置可能な 4 地点 (図 4. 1-1 参照) が、傾斜量感知可能範囲にあるか確認を行った。その結果、領域①の場合、4 地点全てにおいて感知可能な位置であった。一方、領域②の場合、a 断層近傍の 2 つの設置地点が、総揚水量 28.8m<sup>3</sup> では傾斜量を感知できない位置にあった。そのため、総揚水量を増加した条件で感度解析を実施し、4 地点全てが傾斜量の感知可能範囲となるには、最低総揚水量 86.4m<sup>3</sup> が必要であることを確認した。

総揚水量 86.4m<sup>3</sup> の場合について、領域②における流体体積変化量の水平断面を作成した (図 2-4 下段)。また、得られた合成傾斜量データから、ワイヤーフレーム図及び等高線図を作成した (図 3-3)。揚水量を 3 倍にした場合、計算上、揚水地点では約  $7.64 \times 10^{-7} \text{m}^3$  の体積変化量を示す。

算出された傾斜量は、3km 四方の範囲では最大 11.5 ナノラジアン、500m 四方の範囲では最大 7 ナノラジアンであった。感知可能な傾斜量の測定範囲は、基準点から北へ約 25m、南へ約 45m、東へ約 25m、西へ約 25m の距離を通る等高線内の範囲を除き (図 3-3 右側)、基準点を中心とした半径約 2000m の円内にある (図 3-3 左側)。



領域①



領域②

図3-1 流体体積変化の分布に応じた地表傾斜量の感度解析結果(3km四方)



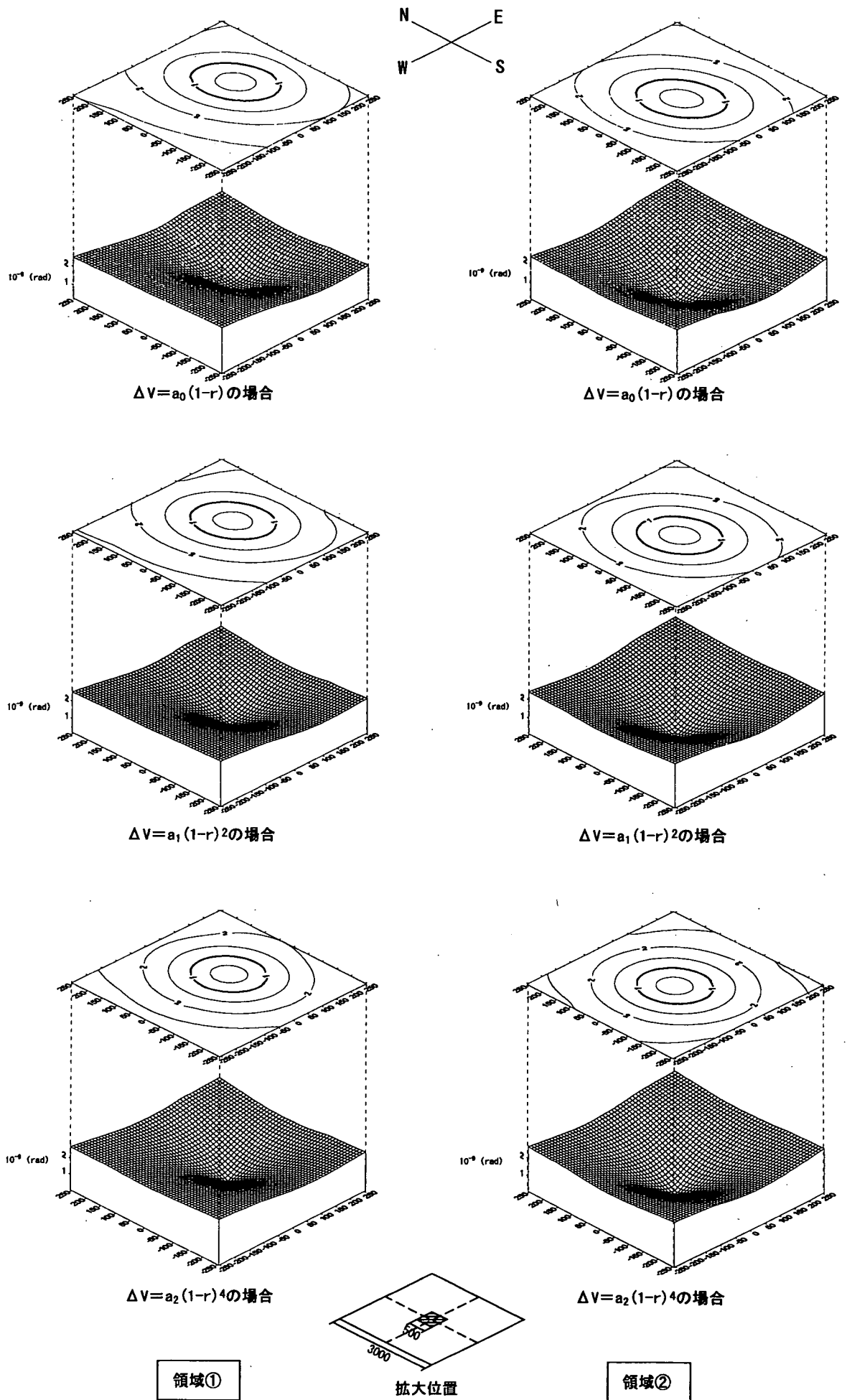


図3-2 流体体積変化の分布に応じた地表傾斜量の感度解析結果 (研究所用地を含む500m四方)

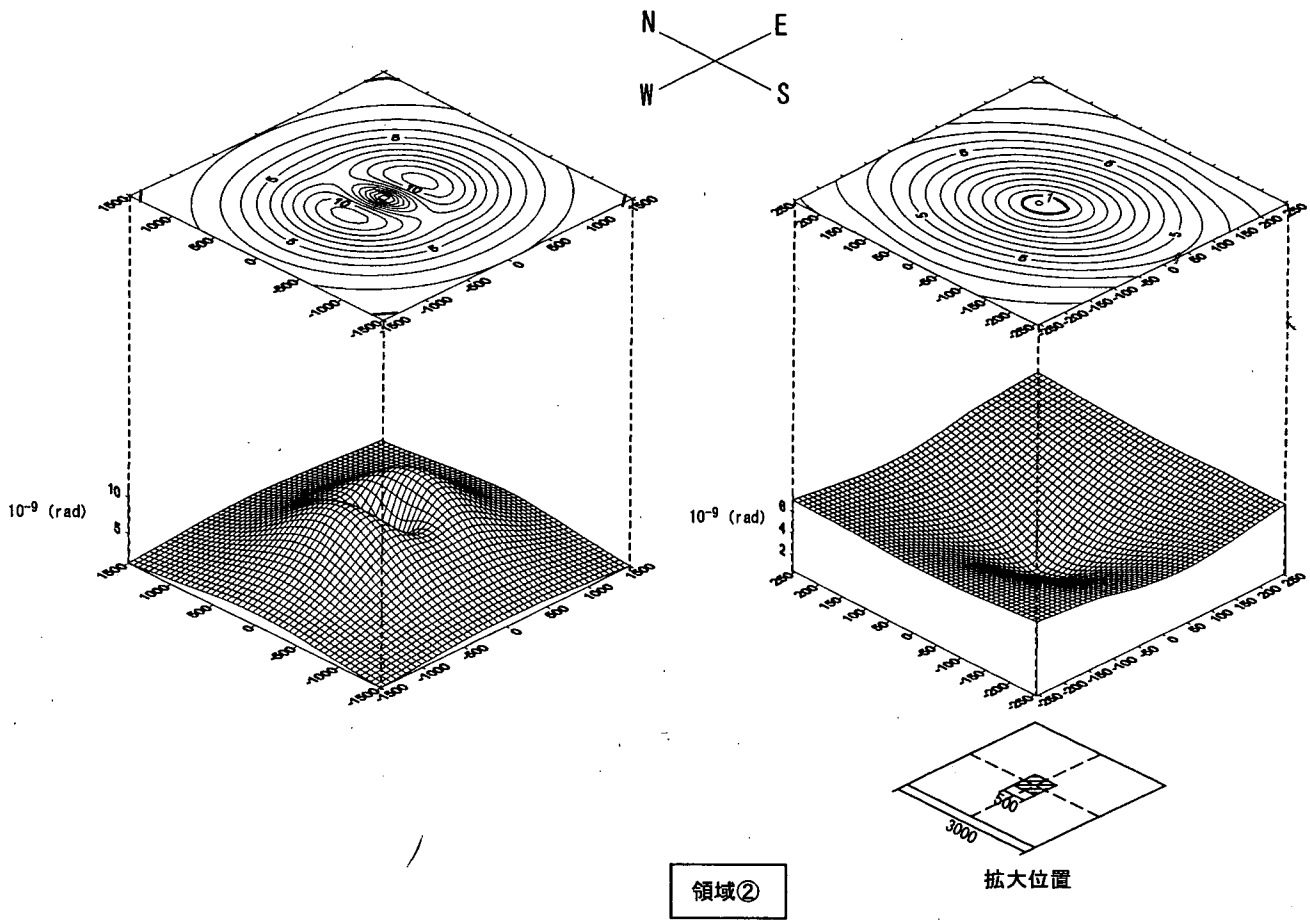


図3-3 総揚水量86.4m<sup>3</sup>の場合の地表傾斜量の感度解析結果(領域②)

#### 4. 傾斜計設置孔の検討

逆解析の手順は、フロー図（図2-5参照）に示したように、未知領域のモデルを設定し、順解析で算出された傾斜量データを入力データとして体積変化量を求める。すなわち、設定した解析モデルを再現し水理地質構造要素を抽出することとなる。

未知領域のモデルは、領域①及び領域②を使用した。入力データは、感度解析において傾斜量が一番少なく見積もられた、線形分布の場合の傾斜量データを使用した。

逆解析のデータセットは、（1）傾斜量データを領域①・未知領域を領域①とした場合、（2）傾斜量データを領域②・未知領域を領域②とした場合及び（3）傾斜量データを領域①・未知領域を領域②とした場合の3通りとした。

研究所用地内の配置・設置数の最適な組み合わせに対する評価は、逆解析した体積変化量の再現性、総揚水量の再現性、回帰直線の比較、決定係数  $R^2$  値の大きさ及び体積変化中心（揚水地点）の再現性に基づいて行った。

体積変化量の再現性は、逆解析した体積変化量の水平断面図を作成し検証を行った。

総揚水量の再現性は、逆解析した体積変化量から総揚水量を算出し検証を行った。

回帰直線の比較は、体積変化量入力値と逆解析した体積変化量計算値との相関を直線で回帰し、直線の方程式の比較により評価を行った。

ただし、回帰直線はデータのばらつき程度の平均値を表しているので、データのばらつきが小さい場合は、平均値による代表性が高くなるが、ばらつきが大きければ平均値の代表性は低くなる。そのため、回帰直線がデータのばらつきを良く代表しているかどうかを判断するために、 $R^2$  値を求め評価を行った。 $R^2$  値は、回帰直線のまわりにデータがどれくらい集中しているかを評価する指標である。

体積変化の中心（揚水地点）の再現性は、逆解析した体積変化量分布について、設定した揚水地点を通る垂直断面を作成し検証を行った。

##### 4. 1 研究所用地に設置可能な4地点での検討

研究所用地内で、傾斜計の設置可能な地点を4地点設定した（図4. 1-1）。4地点の配置は、研究所用地内で2断層を2地点で挟むように、かつ4地点が断層を横切る直線上にあるように考慮した。また、解析領域は、水平な表面を有する半無限体と仮定しており、地形の凹凸は考慮していないため、地形の高度差の影響が無いように、研究所用地内の平地で高度的に概ね同様な地点を選択した。

4地点の設置数を変えた配置は11通りあり、それぞれの配置について、3通りのデータセットに対する体積変化量の逆解析を行った。なお、設置数が1地点の場合は、逆解析によって適切な解を得ることができないため、検討から除外した。

##### 4. 1. 1 体積変化量及び総揚水量に対する再現性の評価

逆解析した体積変化量の水平断面図を図4. 1-2～4. 1-4に、総揚水量の再

再現性を図4. 1-5に示す。体積変化量及び総揚水量に対する再現性の評価は、以下のとおりである。

(1) 傾斜量データを領域①・未知領域を①とした場合

設定した流体体積変化量の水平断面(図2-4参照)と比較すると、全ての配置で断面の対称性は崩れているが、体積変化量の再現性にほとんど変化がなかった。また、配置1・設置数4地点、配置4・設置数3地点及び配置8~9・設置数2地点で総揚水量の高い再現性を示した。

(2) 傾斜量データを領域②・未知領域を領域②とした場合

全ての配置で断面の対称性は崩れているが、配置1・設置数4地点及び配置3~5・設置数3地点で、体積変化量の高い再現性を示した。また、同様の配置で、総揚水量の70%程度の再現性を示した。

(3) 傾斜量データを領域①・未知領域を領域②とした場合

全ての配置で断面の対称性は崩れているが、配置1・設置数4地点及び配置3~5・設置数3地点で、高い体積変化量の再現性を示した。全ての配置で領域内の流体体積変化分布が東側に片寄っており、特に断面6では未知領域内の西側1/3に体積変化が起こっていない部分が現れた。また、配置1・設置数4地点及び配置3・設置数3地点で、総揚水量の80%程度の再現性を示した。

#### 4. 1. 2 配置の違いによる $R^2$ 値の大きさ及び回帰直線に対する評価

入力値を横軸に、逆解析計算値を縦軸に取り、両者の相関関係を図4. 1-6(1)~(3)に示す。相関関係は、逆解析計算値のばらつきを示す $R^2$ 値、計算値のばらつきを平均化した回帰直線及び回帰式によって表現した。配置の違いによる $R^2$ 値の大きさ及び回帰直線に対する評価は、以下のとおりである。

(1) 傾斜量データを領域①・未知領域を領域①とした場合

$R^2$ 値は0.94~0.95の範囲にあり、配置の違いによる大きな差はなかった。配置10~11・設置数2地点で、入力値に近い傾きを示した。

(2) 傾斜量データを領域②・未知領域を領域②とした場合

配置1・設置数4地点、配置3~5・設置数3地点で高い $R^2$ 値、入力値に近い傾きを示した。

(3) 傾斜量データを領域①・未知領域を領域②とした場合

配置1・設置数4地点、配置3~4・設置数3地点で高い $R^2$ 値、入力値に近い傾きを示した。

#### 4. 1. 3 体積変化中心（揚水地点）のモデルに対する再現性の評価

体積変化中心（揚水地点）のモデルに対する再現性を検証するため、設定した揚水地点を通る垂直断面を作成し、図4. 1-7に示した。再現性の評価は、以下のとおりである。

##### (1) 傾斜量データを領域①・未知領域を①とした場合

体積変化の中心は、配置6及び配置7を除いた設置数2地点以上において高い再現性を示した。配置6及び配置7は100m程度浅い深度に分布する。

##### (2) 傾斜量データを領域②・未知領域を領域②とした場合

体積変化の中心は200m程度浅い深度に分布し、全ての配置において再現性に大きな違いはなかった。

##### (3) 傾斜量データを領域①・未知領域を領域②とした場合

体積変化の中心は、配置1・設置数4地点、配置3・設置数3地点で、200m程度浅い深度に分布し、高い再現性を示した。他の配置は、300~400m程度浅い深度に分布する。

#### 4. 1. 4 総揚水量 86.4m<sup>3</sup>とした場合の領域②における再現性の評価

前述の傾斜量感度解析結果から、領域②の場合、a断層付近の2設置地点が感知可能範囲外であったため、総揚水量 86.4m<sup>3</sup>とした場合の逆解析を行った。逆解析結果は、体積変化量の水平断面（図4. 1-8）、総揚水量の再現性（図4. 1-9）、回帰直線の比較と決定係数 R<sup>2</sup> 値の大きさ（図4. 1-10）及び体積変化分布の垂直断面（図4. 1-11）に示し、それぞれの再現性に基づいて評価を行った。

##### (1) 体積変化量及び総揚水量に対する再現性の評価

逆解析した体積変化量の水平断面（図4. 1-8）は、全ての配置で断面の対称性は崩れているが、配置1・設置数4地点及び配置3~5・設置数3地点で、体積変化量の高い再現性を示した。また、同様の配置で、総揚水量の70%程度の再現性を示した（図4. 1-9）。

##### (2) 配置の違いによる R<sup>2</sup> 値の大きさ及び回帰直線に対する評価

回帰直線は、配置1・設置数4地点、配置3~5・設置数3地点で高い R<sup>2</sup> 値及び入力値に近い傾きを示した（図4. 1-10）。

##### (3) 体積変化中心（揚水地点）のモデルに対する再現性の評価

体積変化の中心は、200m程度浅い深度に分布し、全ての配置において再現性に大きな違いはなかった（図4. 1-11）。

以上の評価結果は、前述の総揚水量 28.8m<sup>3</sup>とした場合の領域②における評価と同様の結果となった。

#### 4. 1. 5 逆解析評価結果

以上の評価結果から、各評価における最適な配置を表 4 - 1 に示す。

表 4-1 各評価における最適な配置

| 評価内容                 | 領域①→①                     | 領域②→②          | 領域①→②          |
|----------------------|---------------------------|----------------|----------------|
| 体積変化量に対する再現性         | 全て                        | 配置 1<br>配置 3～5 | 配置 1<br>配置 3～5 |
| 総揚水量に対する再現性          | 配置 1<br>配置 4<br>配置 8～9    | 配置 1<br>配置 3～5 | 配置 1<br>配置 3   |
| R <sup>2</sup> 値の大きさ | 全て                        | 配置 1<br>配置 3～5 | 配置 1<br>配置 3～4 |
| 回帰直線の再現性             | 配置 10～11                  | 配置 1<br>配置 3～5 | 配置 1<br>配置 3～4 |
| 揚水地点のモデルに対する再現性      | 配置 1<br>配置 2～5<br>配置 8～11 | 全て             | 配置 1<br>配置 3   |
| 総合評価                 | 配置 1                      |                |                |

研究所用地内 4 地点での配置・設置数の最適な組み合わせは、配置 1・設置数 4 地点及び配置 3～4・設置数 3 地点であると判断される。したがって、配置により異なるが、少なくとも 3 地点の設置数は必要である。しかし、揚水地点直上の地表点に近い設置地点では、観測する傾斜量の変化が小さく感知不可能となる場合もあるため、設置点数を多くすることで逆解析による再現性が高くなることを考慮すると、総合評価では配置 1・設置数 4 地点が最も適していると判断した。

ただし、4 地点であっても研究所用地内に限った場合では、体積変化量の再現性の向上に限界があるため、設置地点を研究所用地外に広げ、設置数を増加することで再現性の向上を図ることが望ましい。

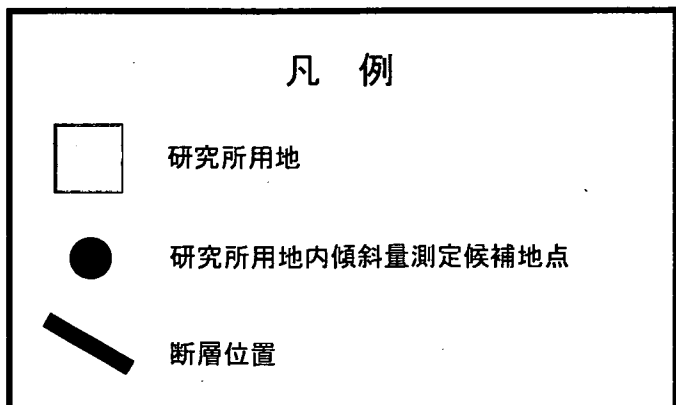
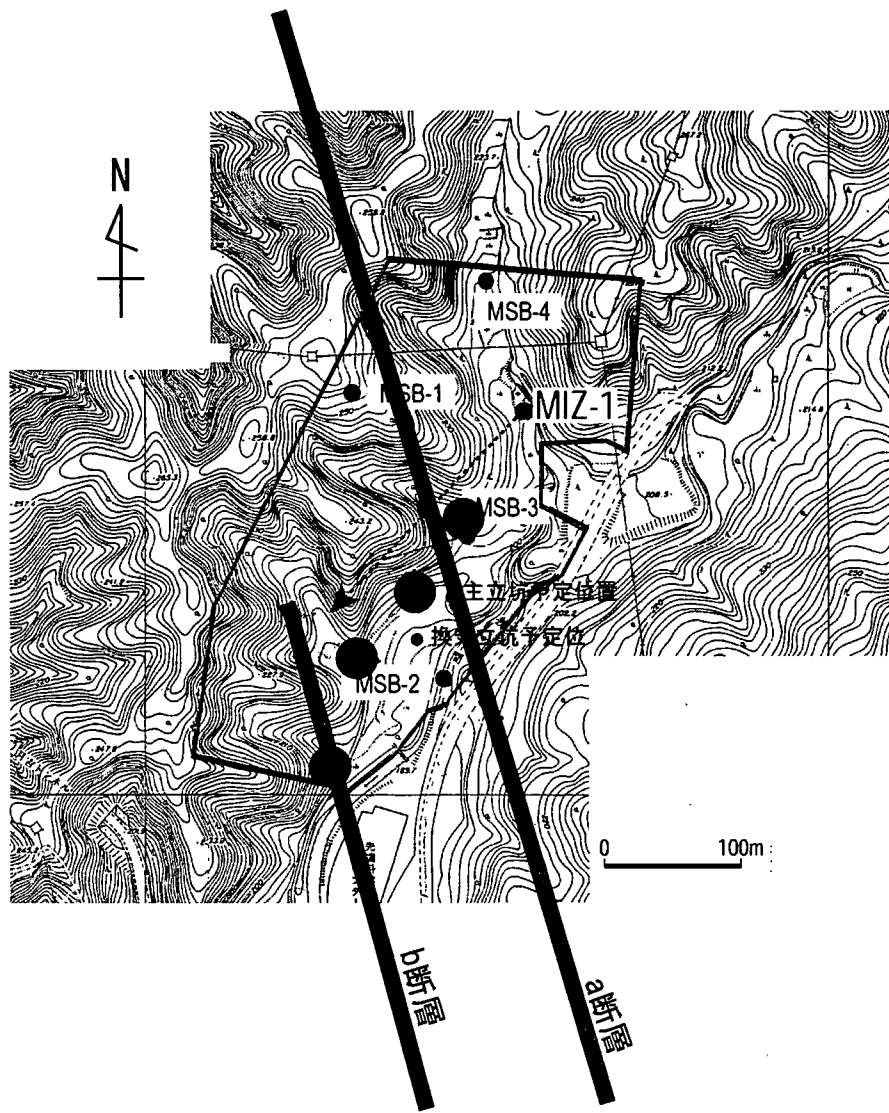


図4.1-1 研究所用地に設置可能な4地点の配置

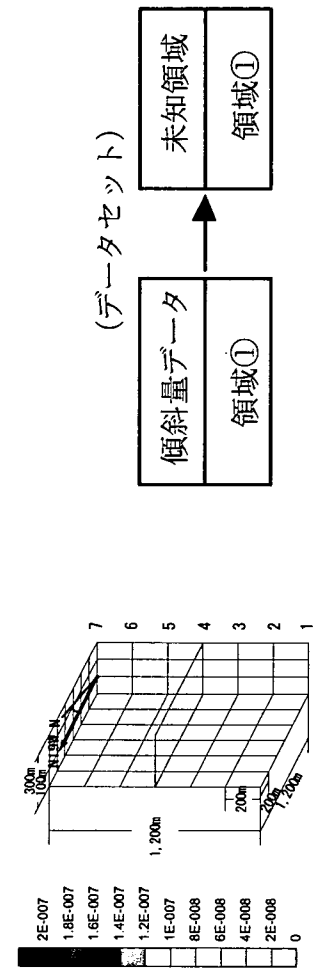
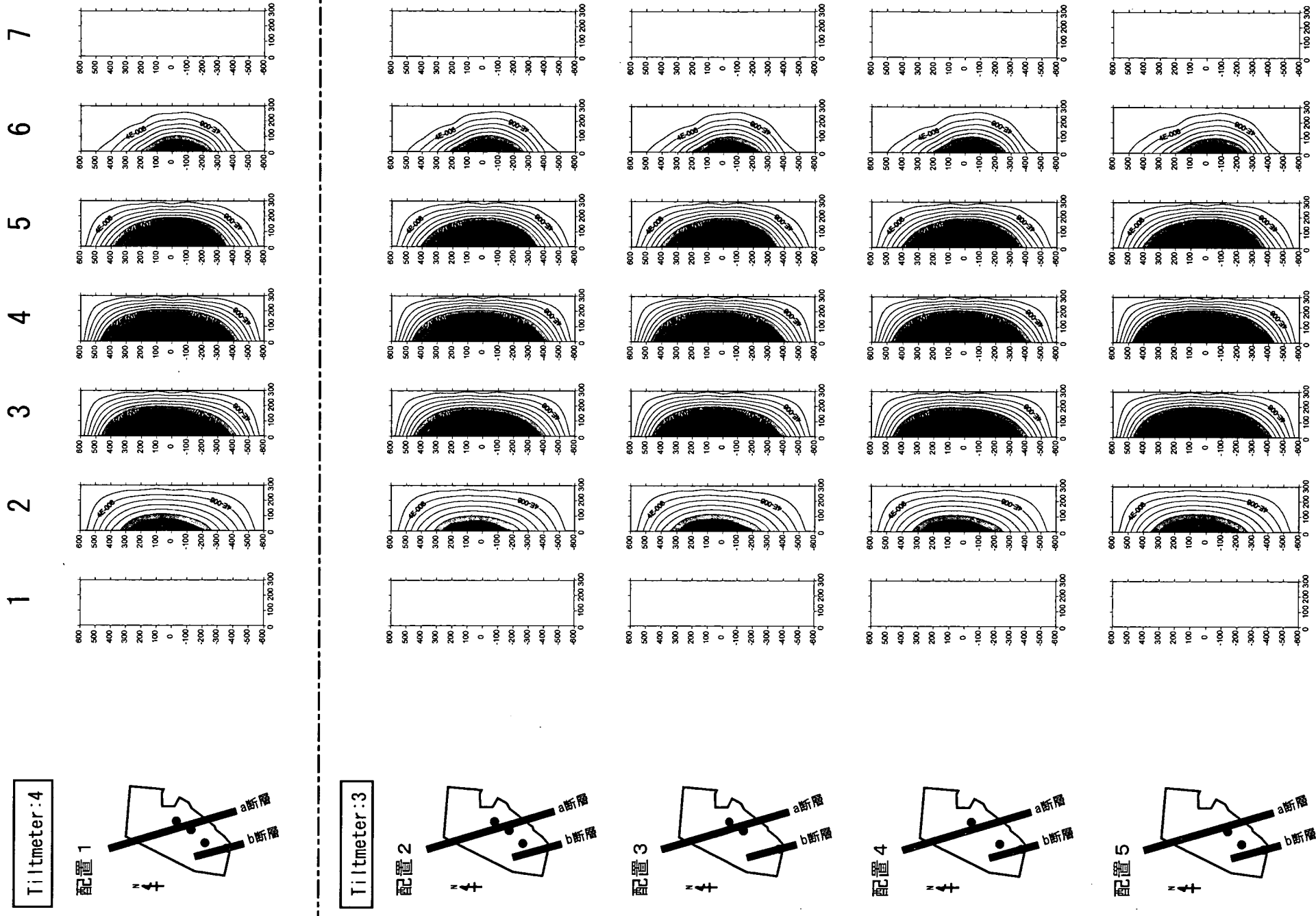
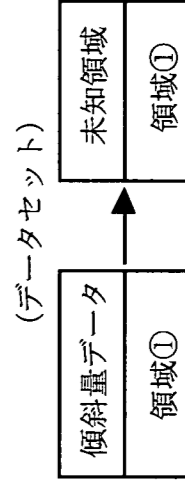
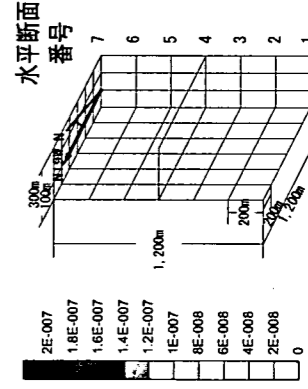
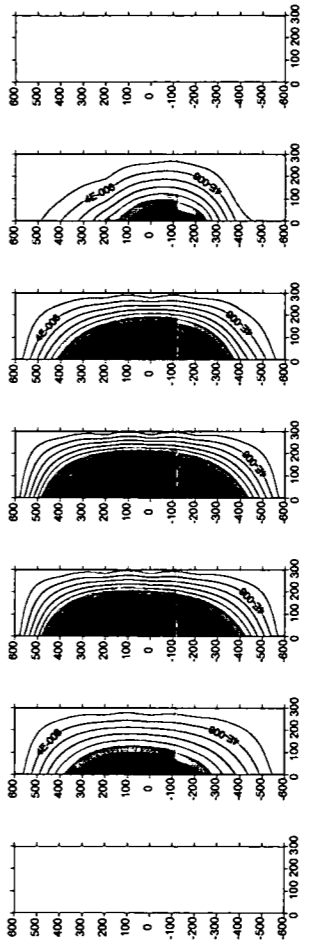
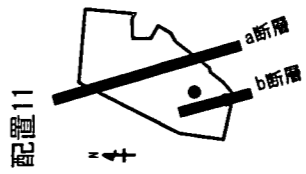
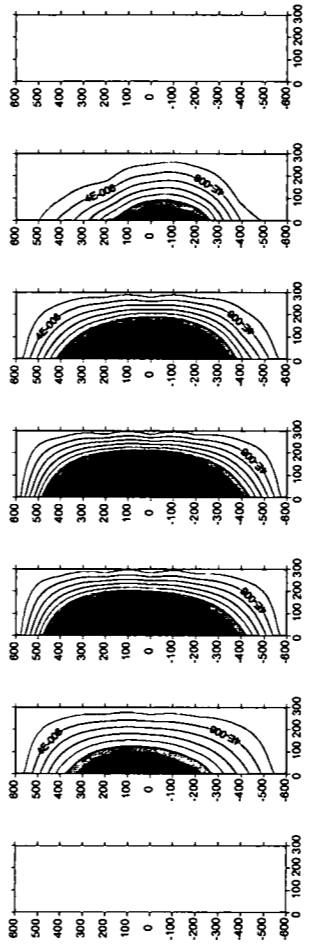
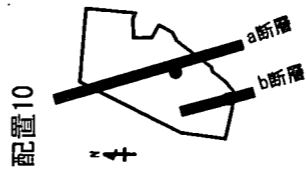
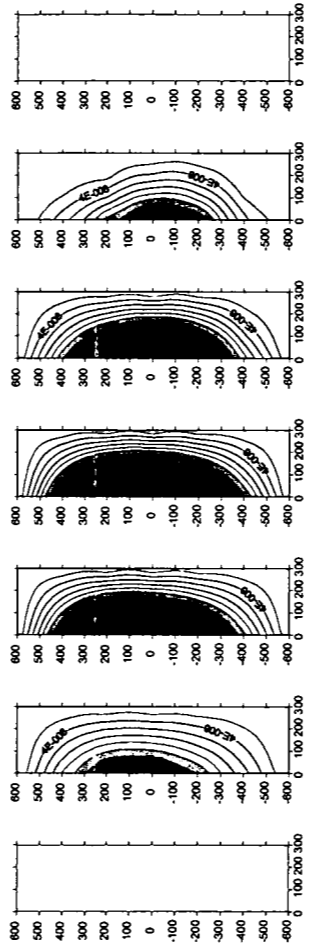
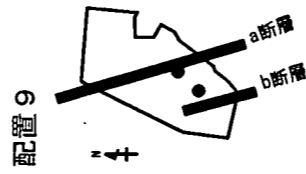
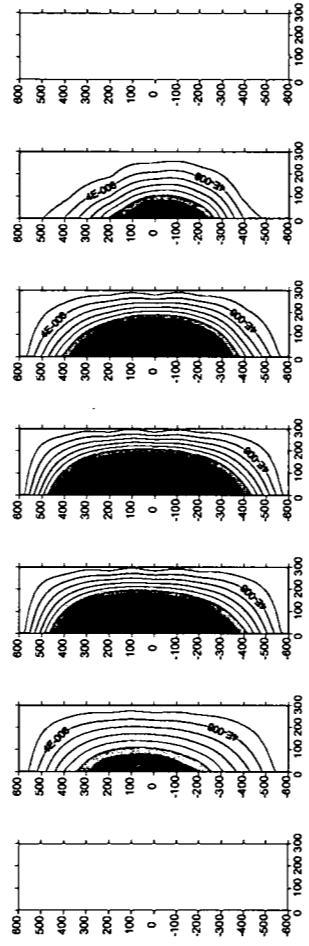
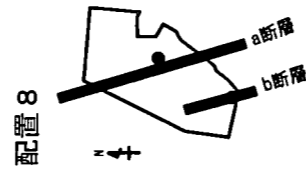
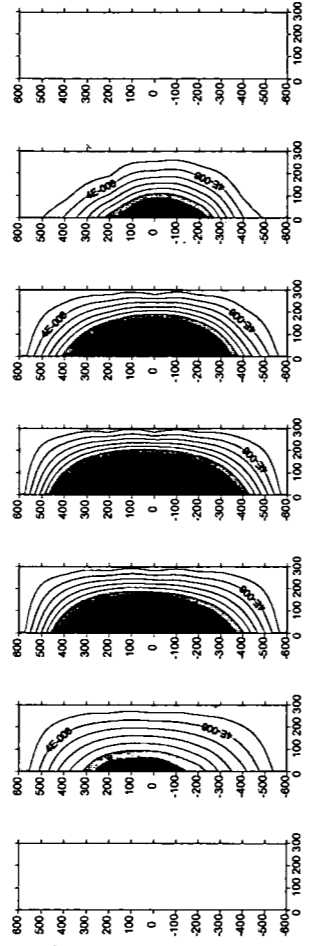
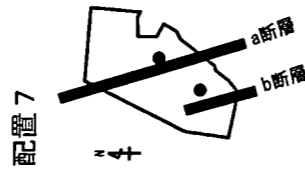
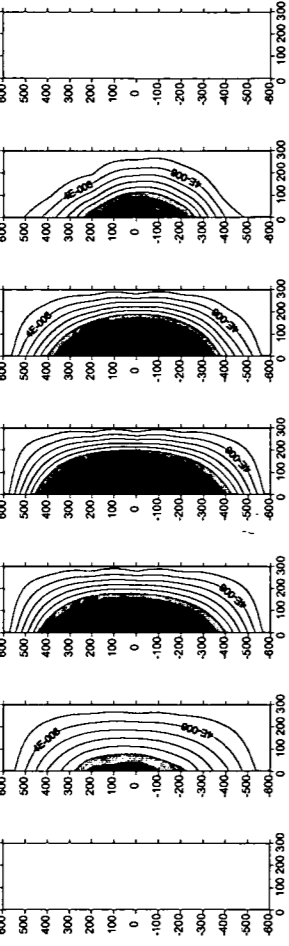
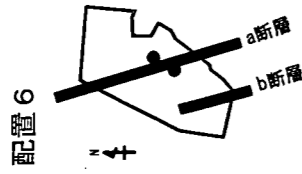


図4.1-2 傾斜量データ数及び配置に応じた逆解析結果(領域①→①)の水平断面図(1)



Tiltmeter: 2



(データセット)

図4.1-2 傾斜量データ数及び配置に応じた逆解析結果(領域①→①)の水平断面図(2)

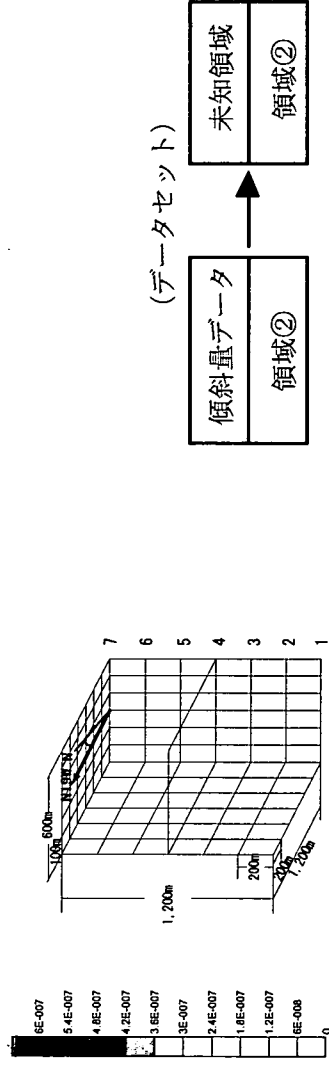
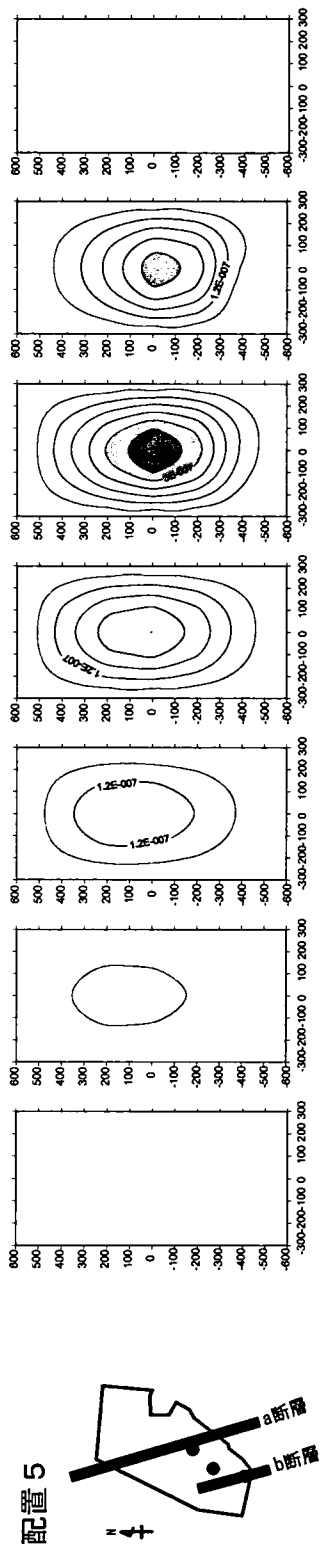
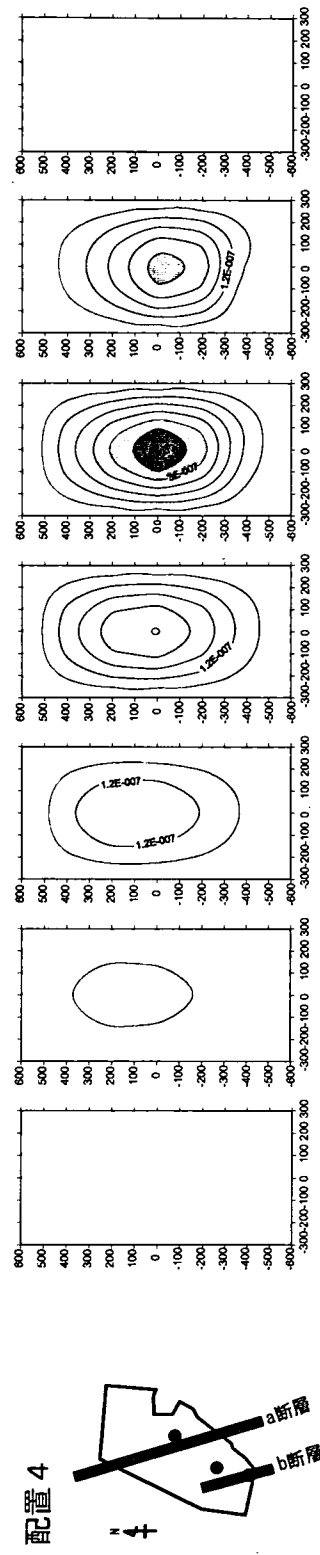
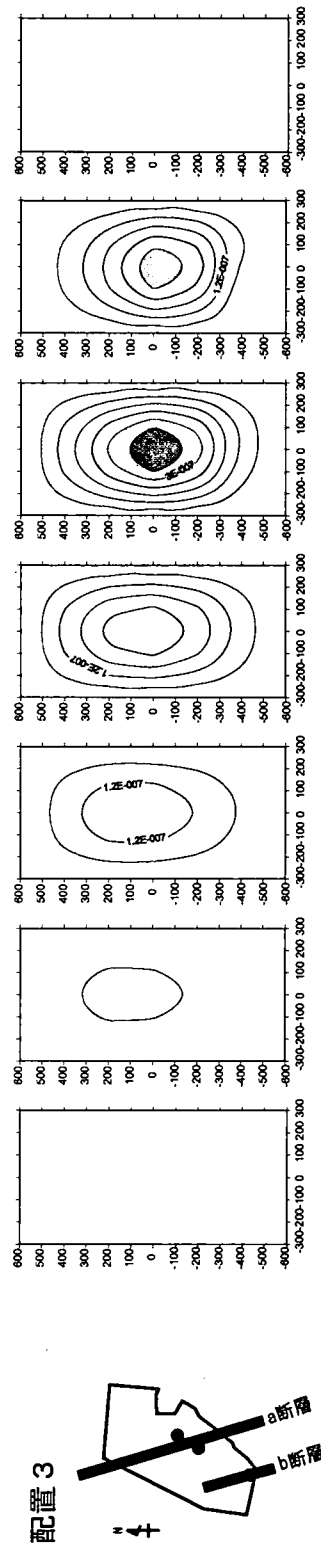
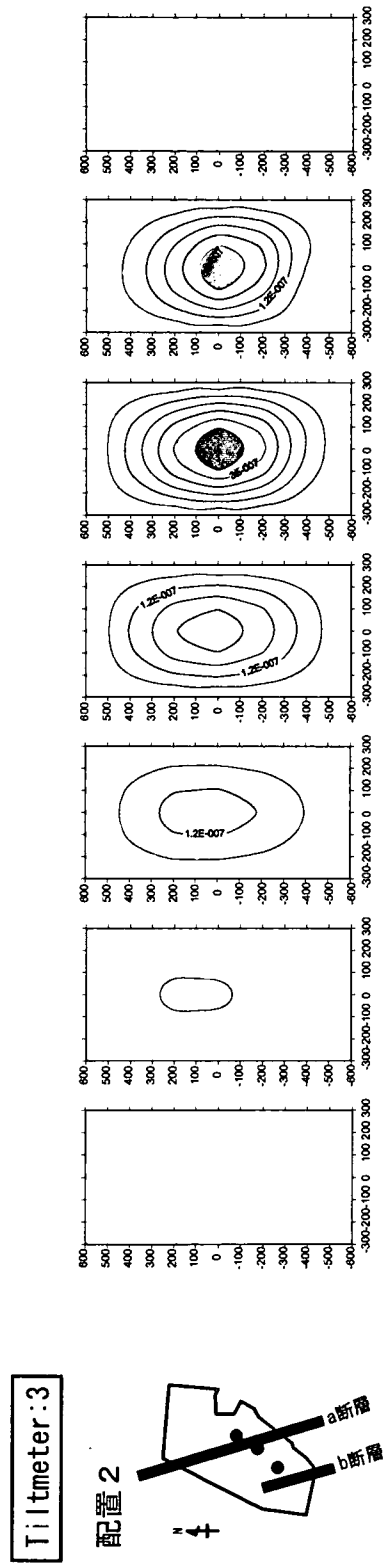
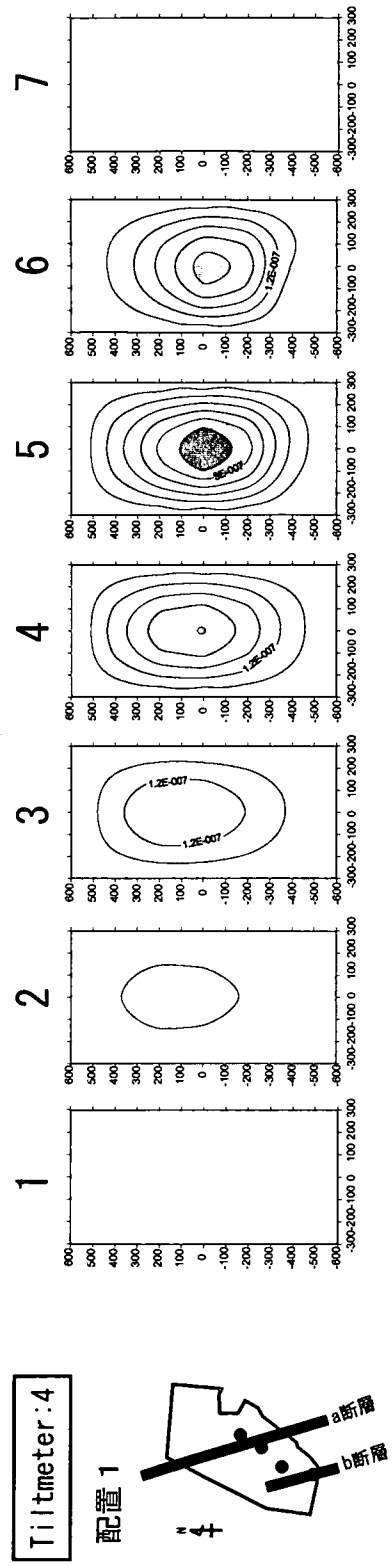


図4.1-3 傾斜量データ数及び配置に応じた逆解析結果(領域②→②)の水平断面図(1)

Tiltmeter:2

1 2 3 4 5 6 7

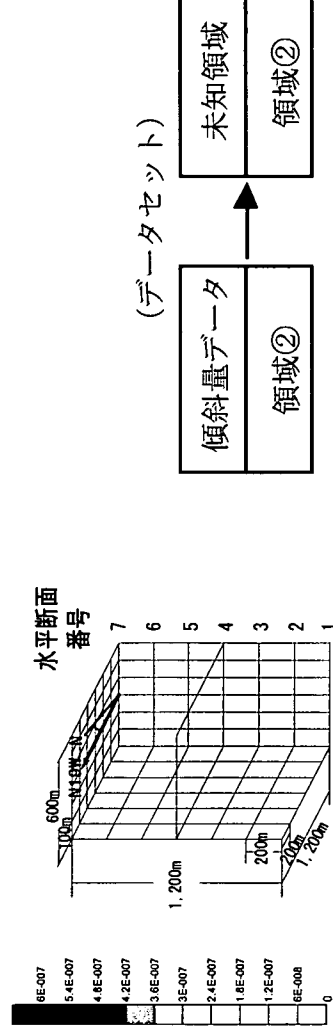
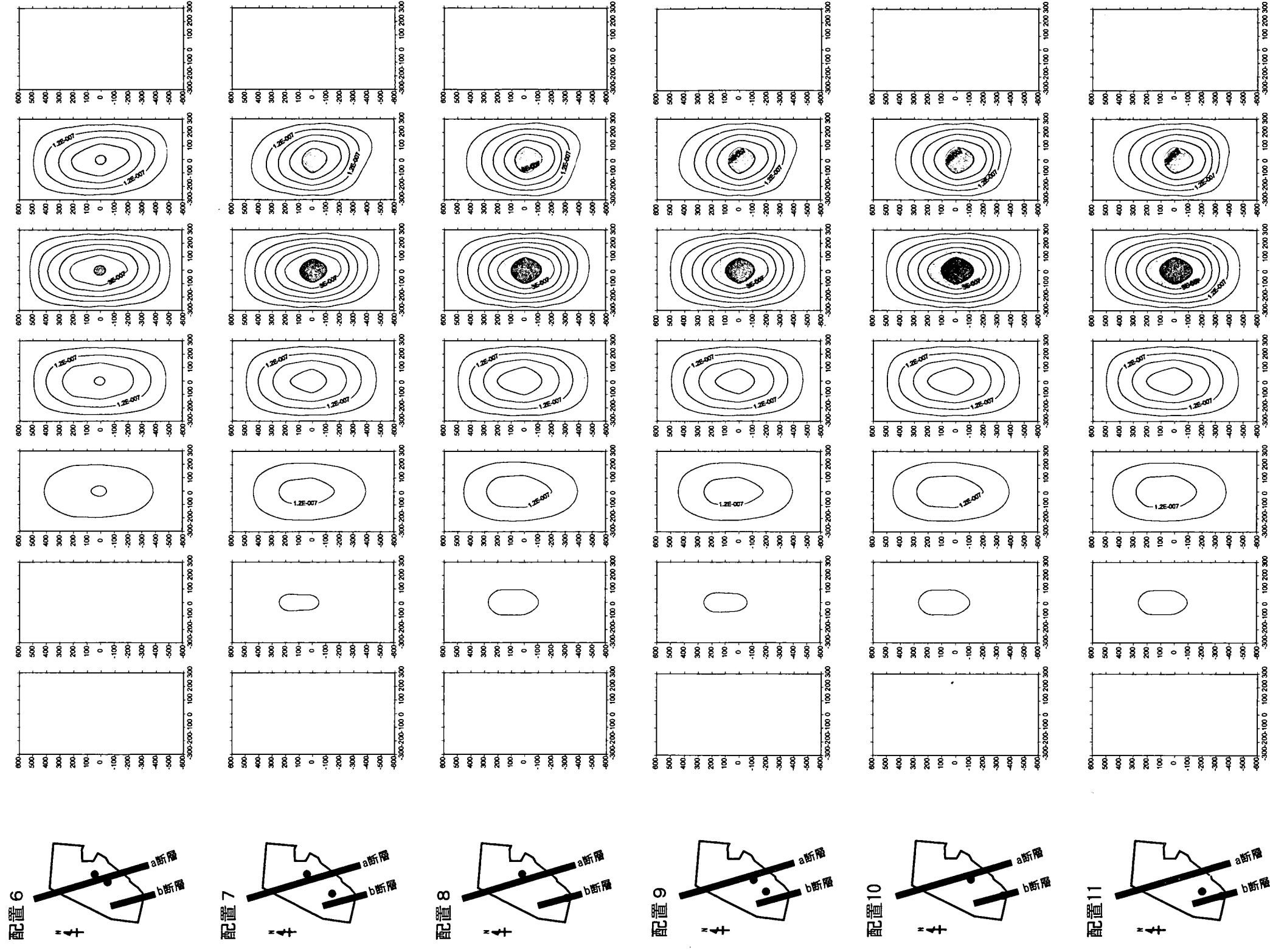


図4.1-3 傾斜量データ数及び配置に応じた逆解析結果(領域②→②)の水平断面図(2)

1 2 3 4 5 6 7

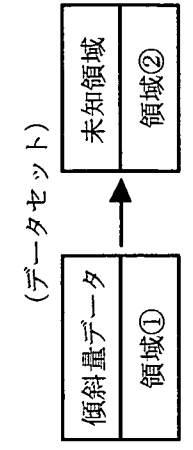
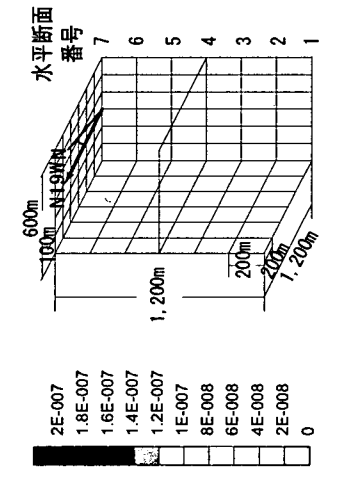
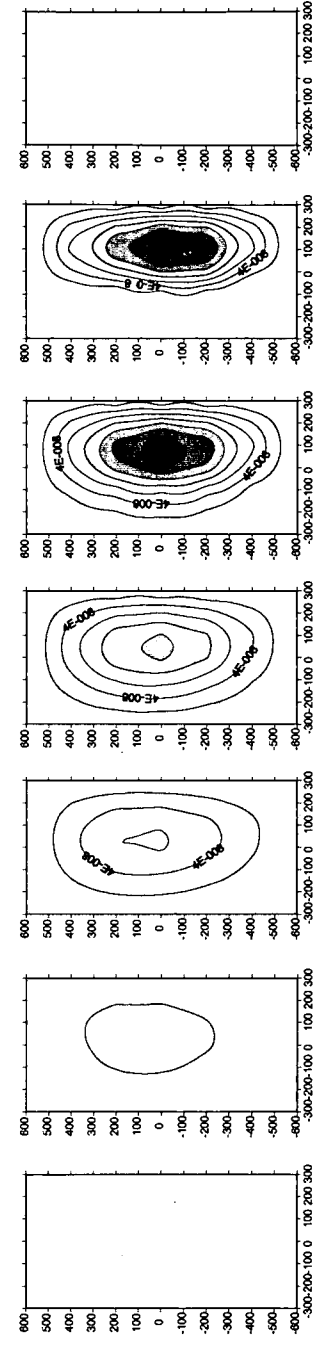
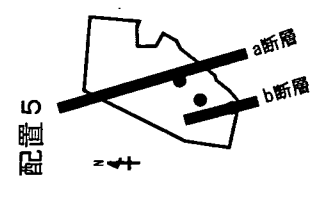
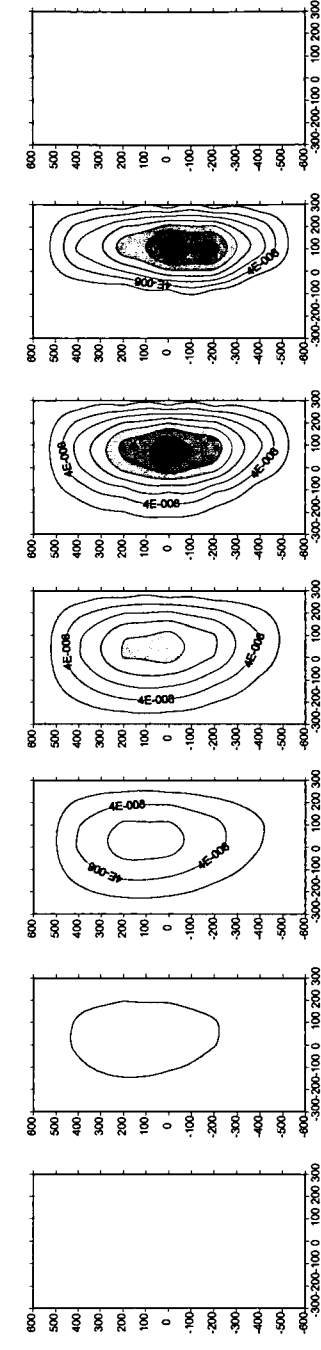
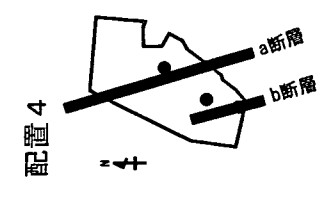
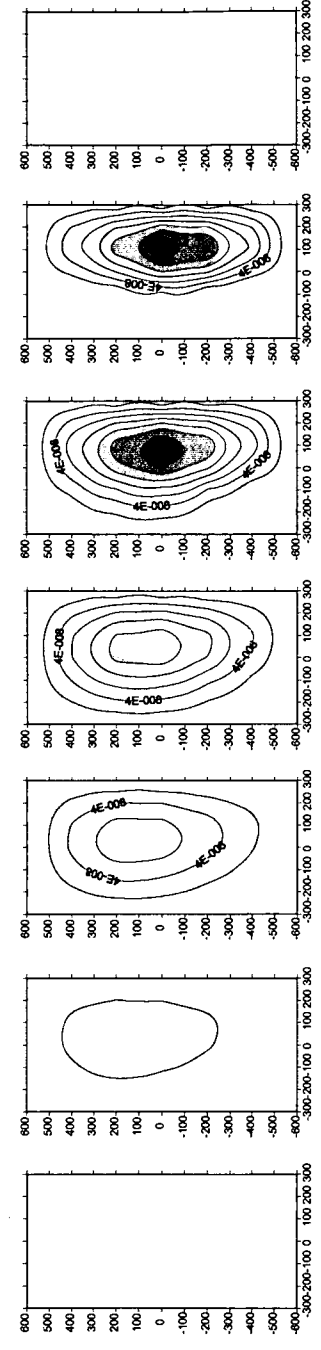
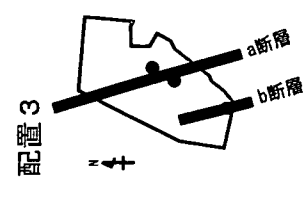
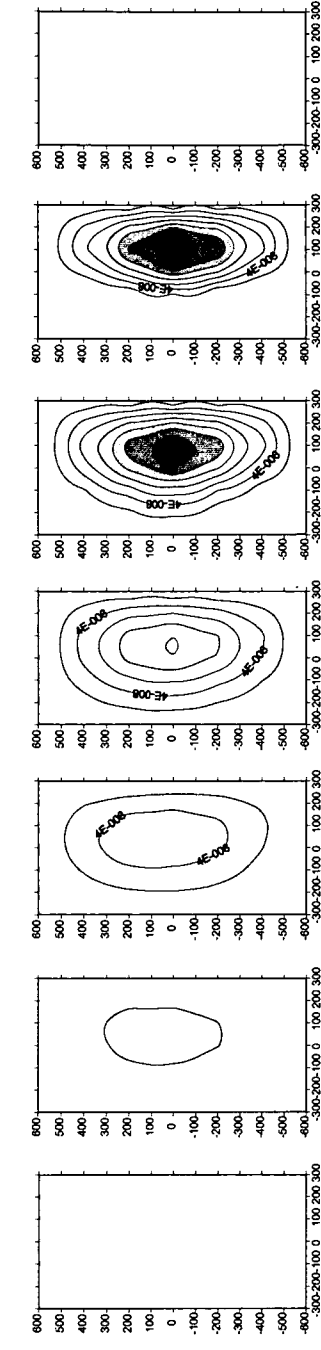
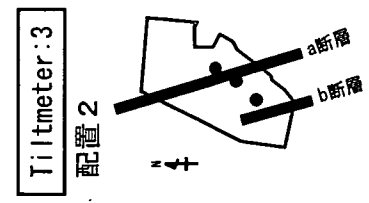
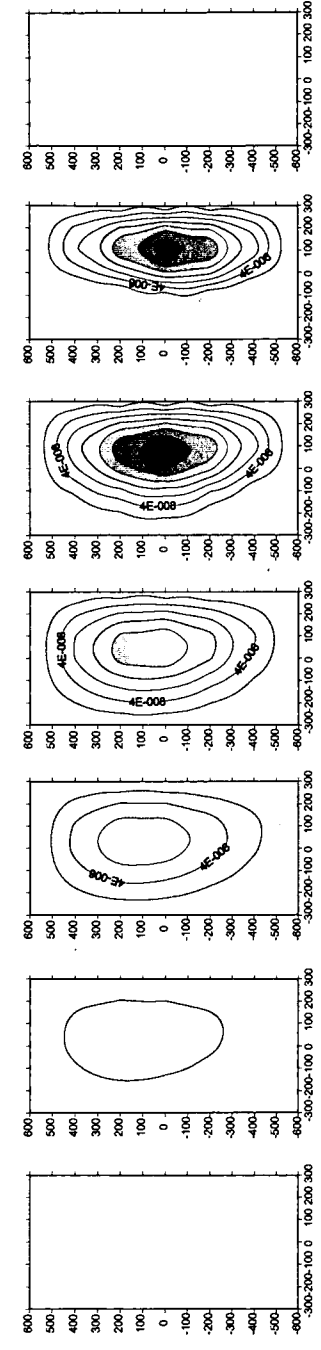
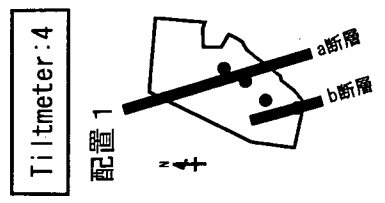


図4.1-4 傾斜量データ数及び配置に応じた逆解析結果(領域①→②)の水平断面図(1)

Tiltmeter:2

1 2 3 4 5 6 7

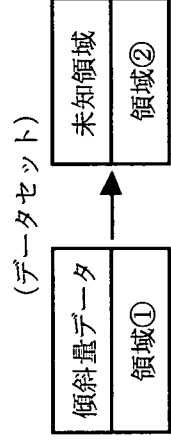
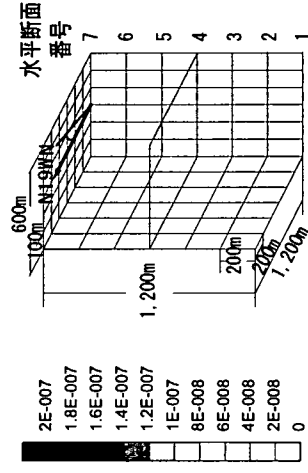
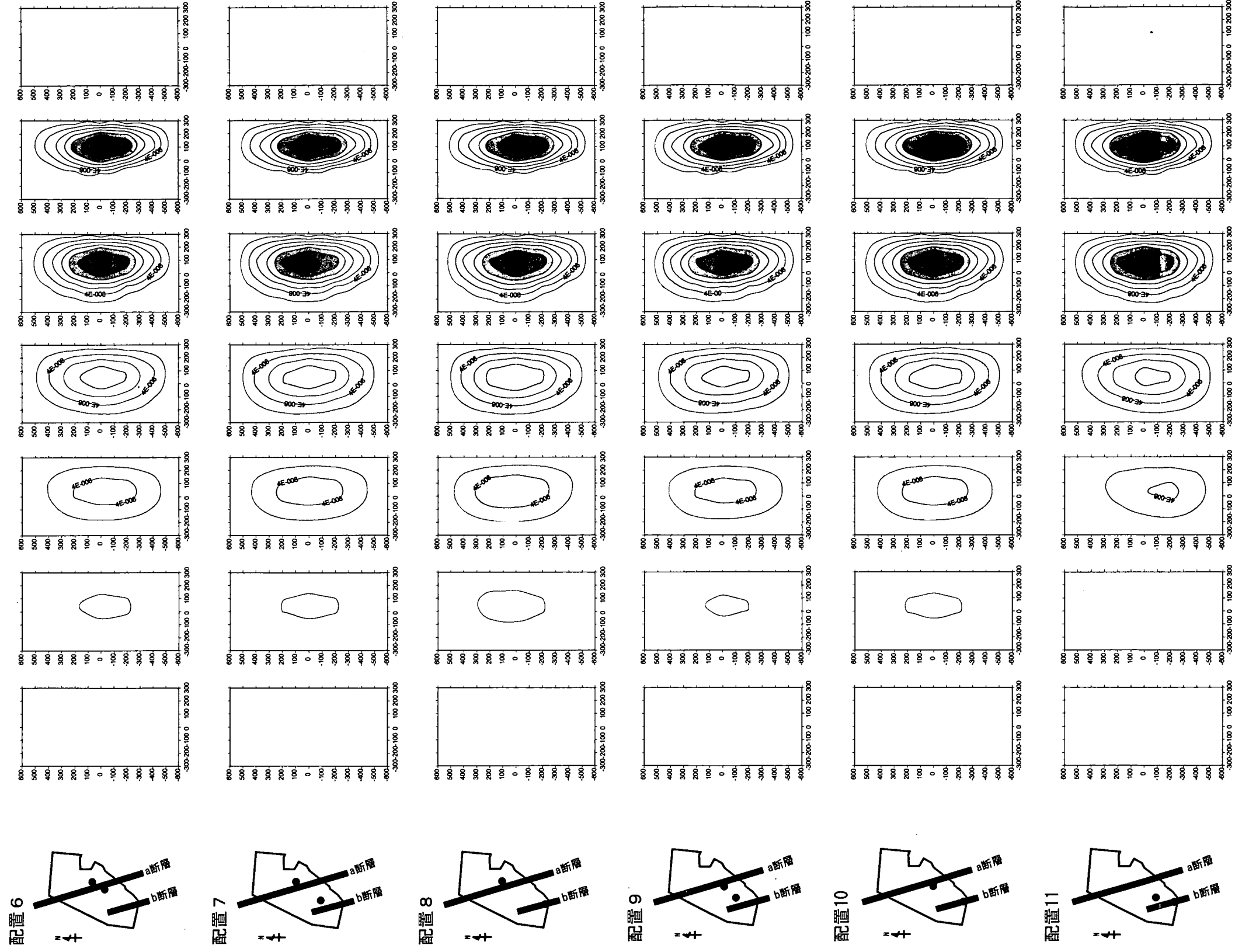
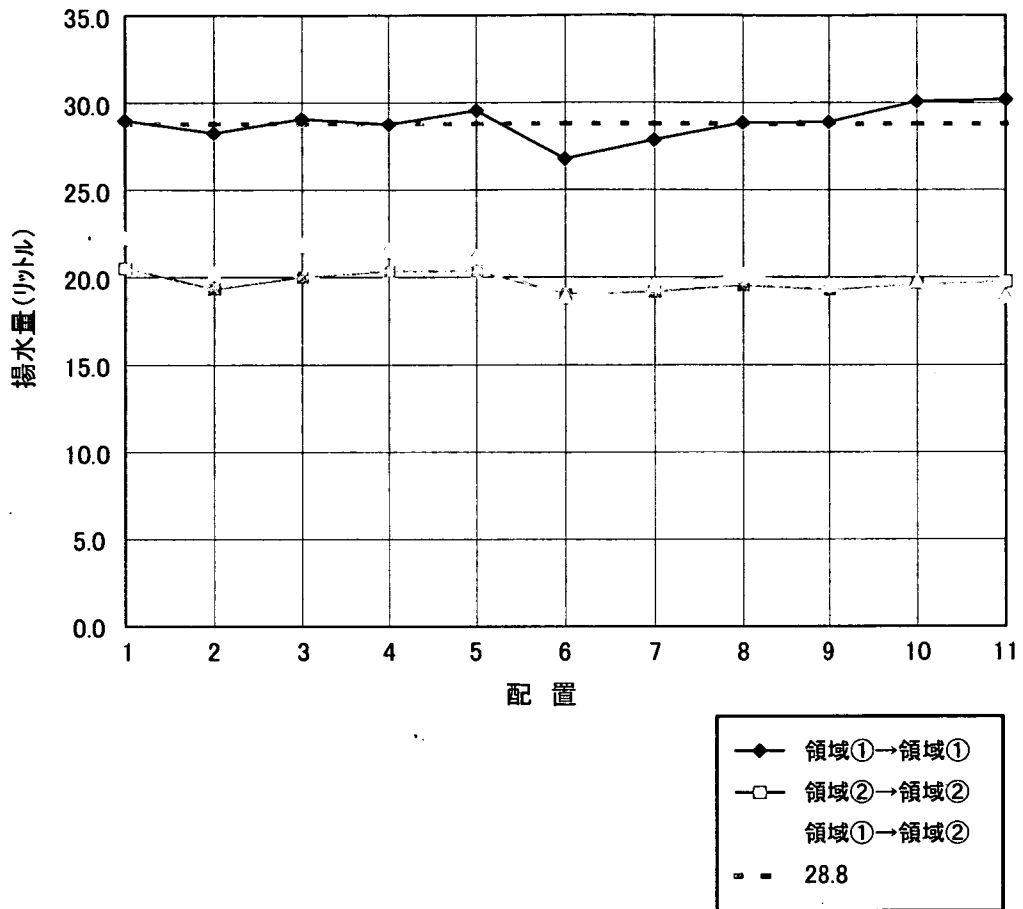


図4.1-4 傾斜量データ数及び配置に応じた逆解析結果(領域①→②)の水平断面図(2)



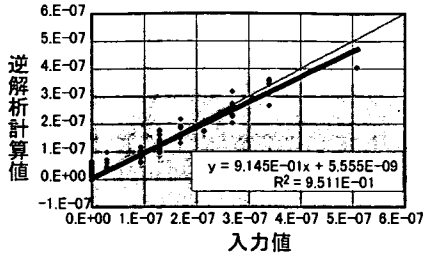
| 配置 | 領域①→領域①                        |                       | 領域②→領域②                        |                       | 領域①→領域②                        |                       |
|----|--------------------------------|-----------------------|--------------------------------|-----------------------|--------------------------------|-----------------------|
|    | 揚水量* (m <sup>3</sup> )<br>(Vt) | 100 ×<br>(Vt/28.8)(%) | 揚水量* (m <sup>3</sup> )<br>(Vt) | 100 ×<br>(Vt/28.8)(%) | 揚水量* (m <sup>3</sup> )<br>(Vt) | 100 ×<br>(Vt/28.8)(%) |
| 1  | 29.0                           | 100.6                 | 20.5                           | 71.2                  | 22.2                           | 77.2                  |
| 2  | 28.3                           | 98.1                  | 19.3                           | 67.1                  | 20.2                           | 70.1                  |
| 3  | 29.1                           | 100.9                 | 20.0                           | 69.5                  | 21.8                           | 75.7                  |
| 4  | 28.8                           | 99.9                  | 20.3                           | 70.6                  | 21.5                           | 74.7                  |
| 5  | 29.6                           | 102.6                 | 20.3                           | 70.6                  | 21.1                           | 73.4                  |
| 6  | 26.8                           | 93.0                  | 19.0                           | 66.1                  | 18.9                           | 65.5                  |
| 7  | 27.9                           | 96.8                  | 19.2                           | 66.6                  | 19.5                           | 67.7                  |
| 8  | 28.9                           | 100.2                 | 19.5                           | 67.8                  | 20.1                           | 69.7                  |
| 9  | 28.9                           | 100.3                 | 19.3                           | 67.0                  | 19.6                           | 68.0                  |
| 10 | 30.1                           | 104.4                 | 19.6                           | 68.1                  | 19.7                           | 68.5                  |
| 11 | 30.2                           | 104.8                 | 19.8                           | 68.6                  | 18.8                           | 65.4                  |

\*逆解析で計算された揚水量

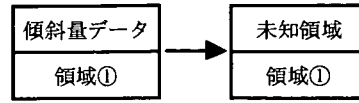
図4.1-5 逆解析による総揚水量の再現性

配置1

Tiltmeter:4

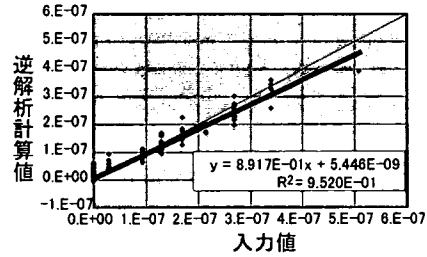


(データセット)



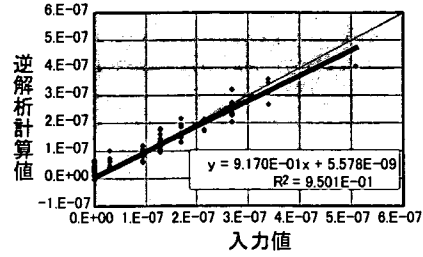
配置2

Tiltmeter:3,case1



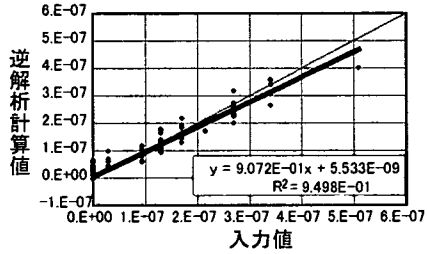
配置3

Tiltmeter:3,case2



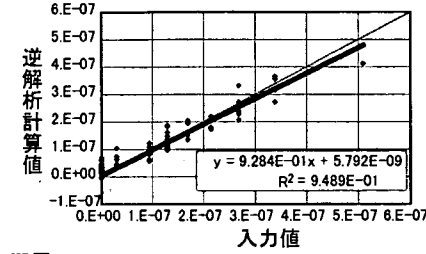
配置4

Tiltmeter:3,case3



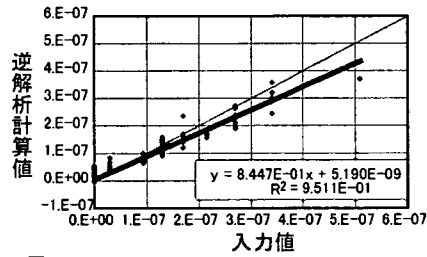
配置5

Tiltmeter:3,case4



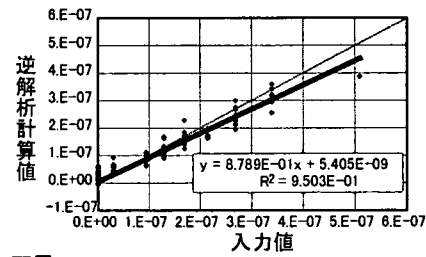
配置6

Tiltmeter:2,case1



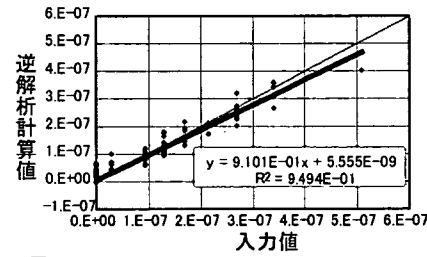
配置7

Tiltmeter:2,case2



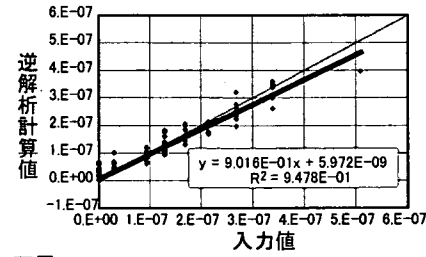
配置8

Tiltmeter:2,case3



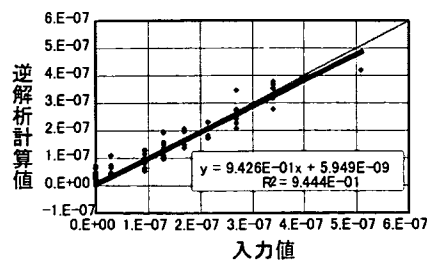
配置9

Tiltmeter:2,case4



配置10

Tiltmeter:2,case5



配置11

Tiltmeter:2,case6

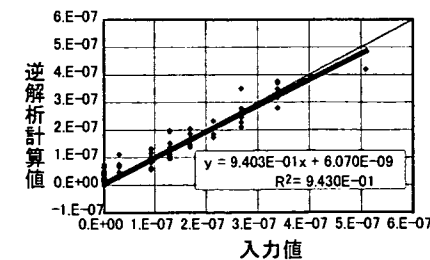
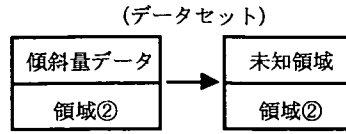
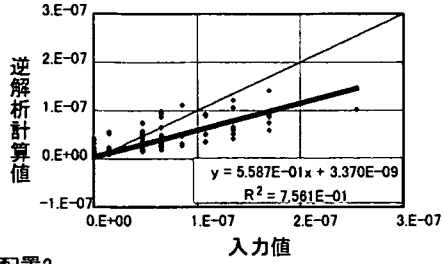
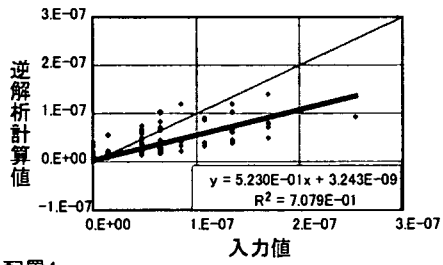


図4.1-6(1) 逆解析計算値のばらつき

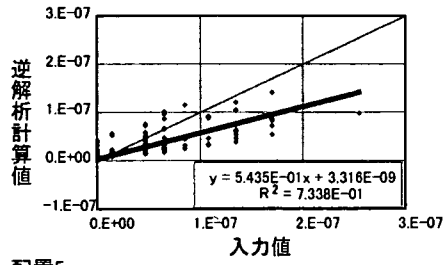
配置1  
Tiltmeter:4



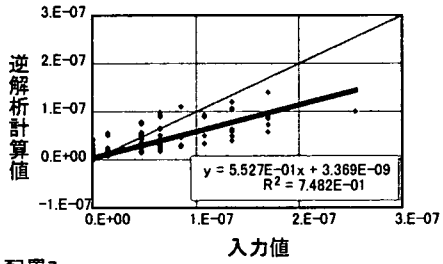
配置2  
Tiltmeter:3,case1



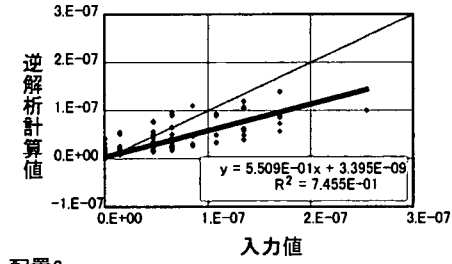
配置3  
Tiltmeter:3,case2



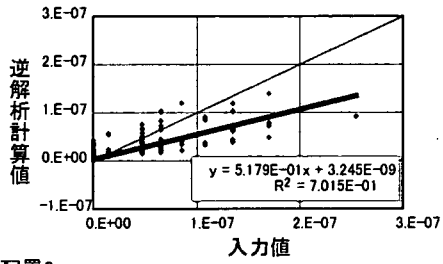
配置4  
Tiltmeter:3,case3



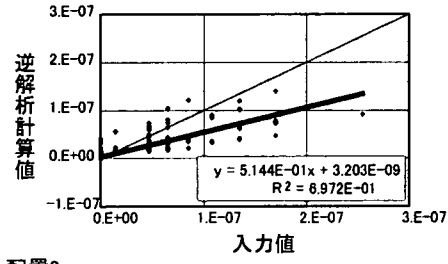
配置5  
Tiltmeter:3,case4



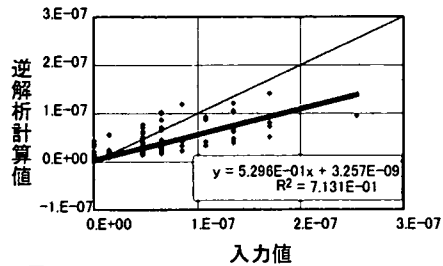
配置7  
Tiltmeter:2,case2



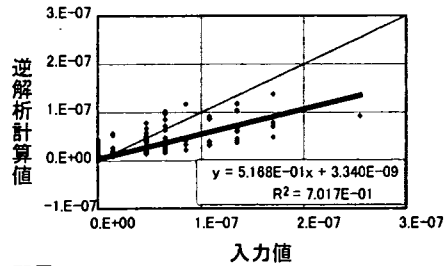
配置6  
Tiltmeter:2,case1



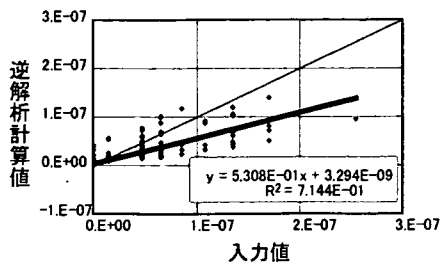
配置8  
Tiltmeter:2,case3



配置9  
Tiltmeter:2,case4



配置10  
Tiltmeter:2,case5



配置11  
Tiltmeter:2,case6

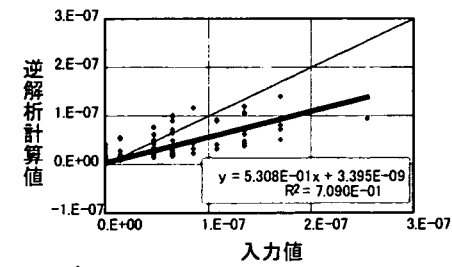
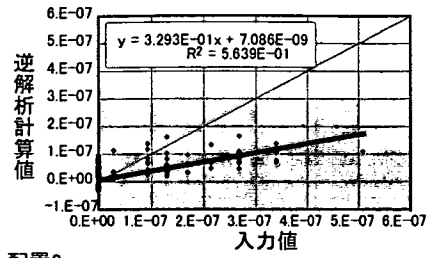


図4.1-6(2) 逆解析計算値のばらつき

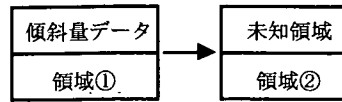


配置1

Tiltmeter:4

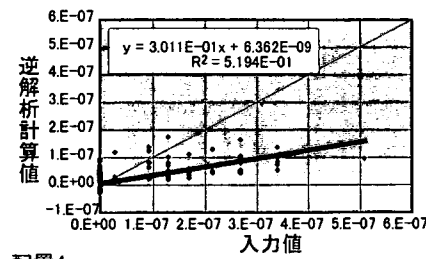


(データセット)



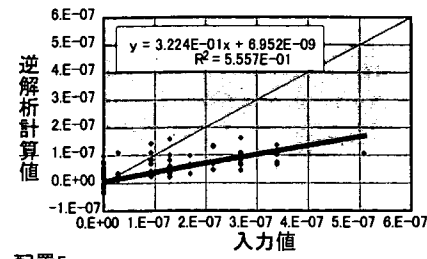
配置2

Tiltmeter:3,case1



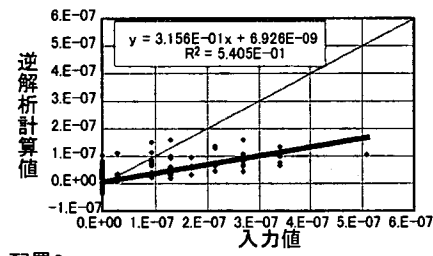
配置3

Tiltmeter:3,case2



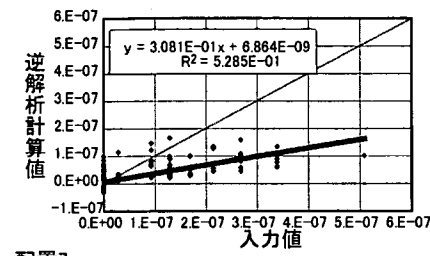
配置4

Tiltmeter:3,case3



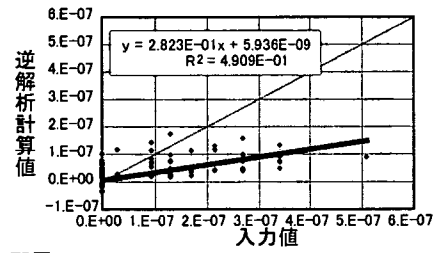
配置5

Tiltmeter:3,case4



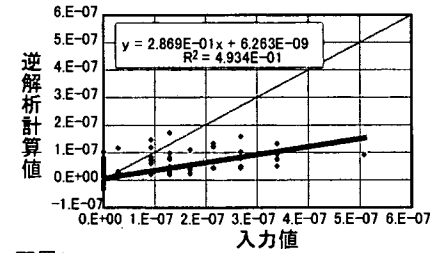
配置6

Tiltmeter:2,case1



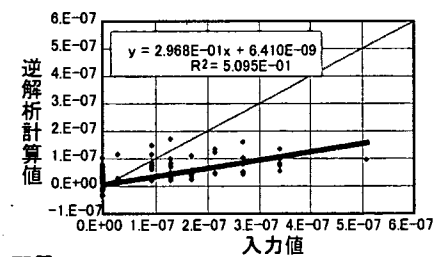
配置7

Tiltmeter:2,case2



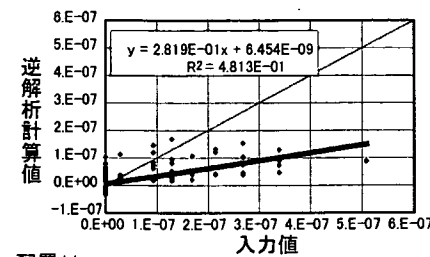
配置8

Tiltmeter:2,case3



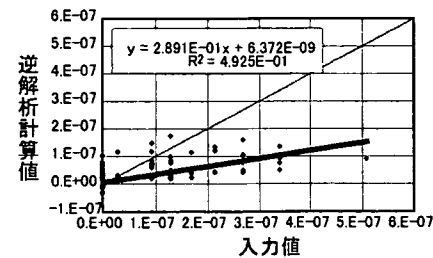
配置9

Tiltmeter:2,case4



配置10

Tiltmeter:2,case5



配置11

Tiltmeter:2,case6

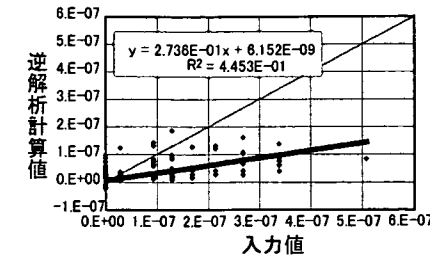


図4.1-6(3) 逆解析計算値のばらつき

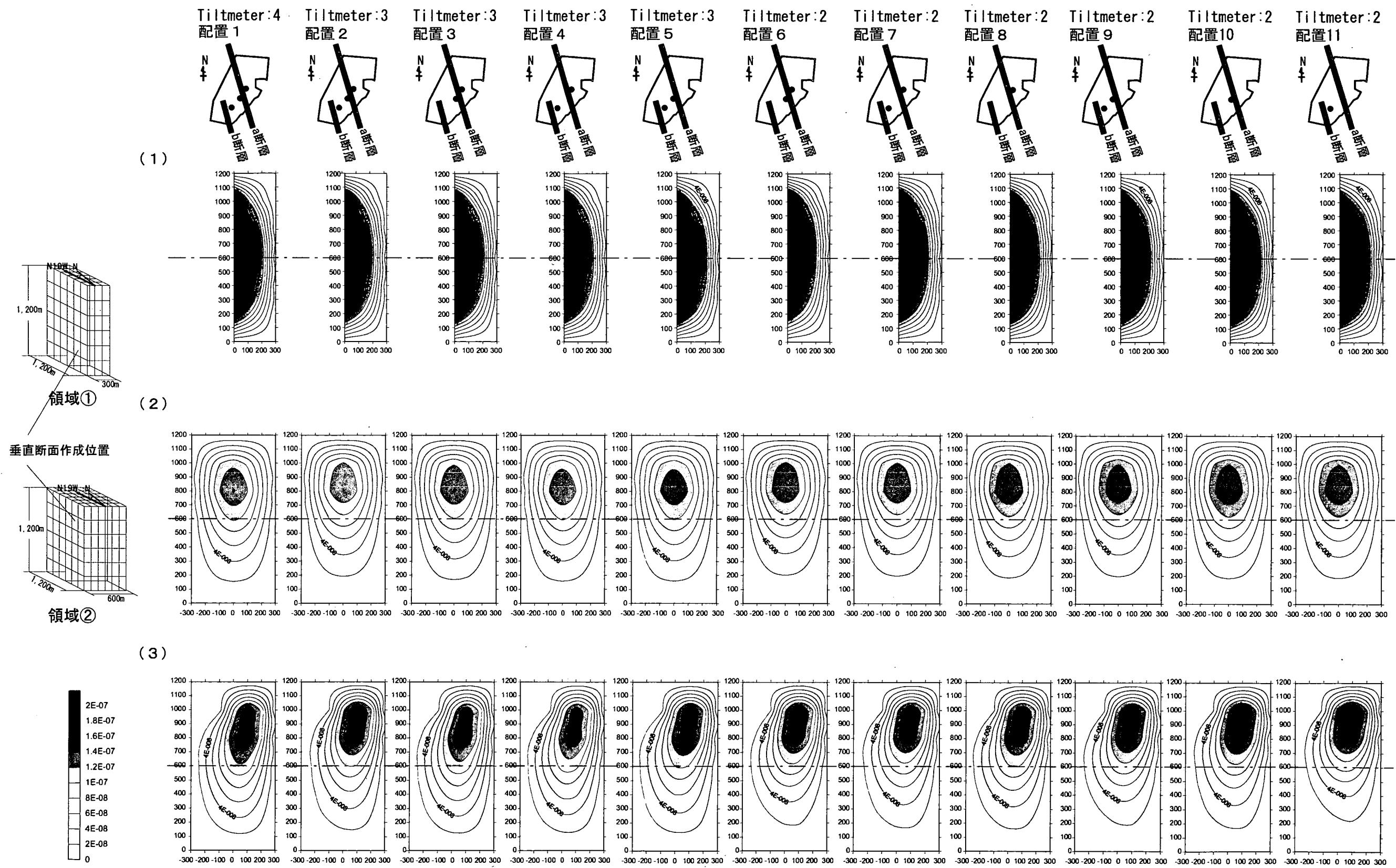


図4.1-7 垂直断面による体積変化中心（揚水地点）の再現性の比較

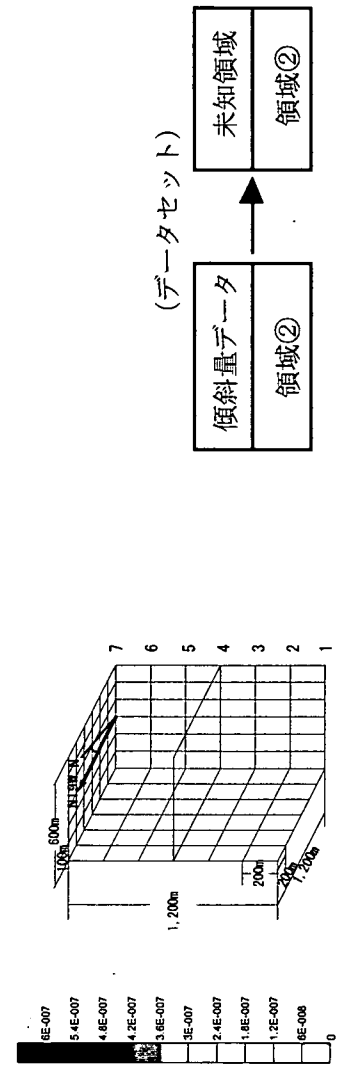
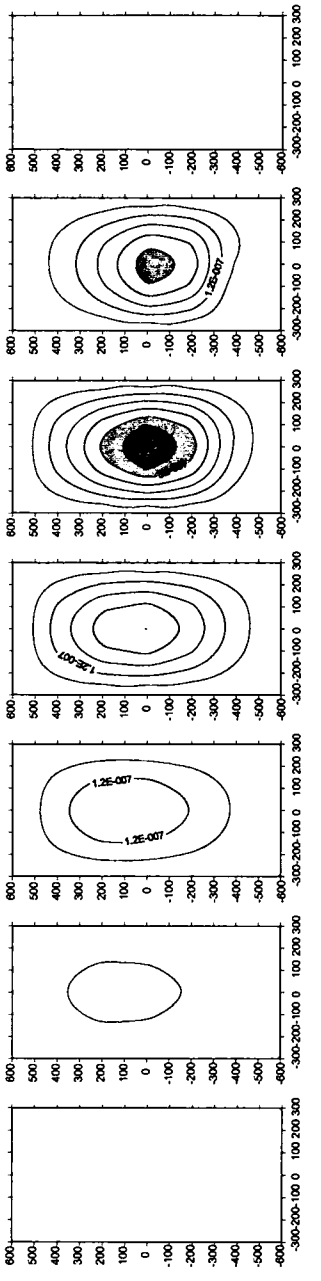
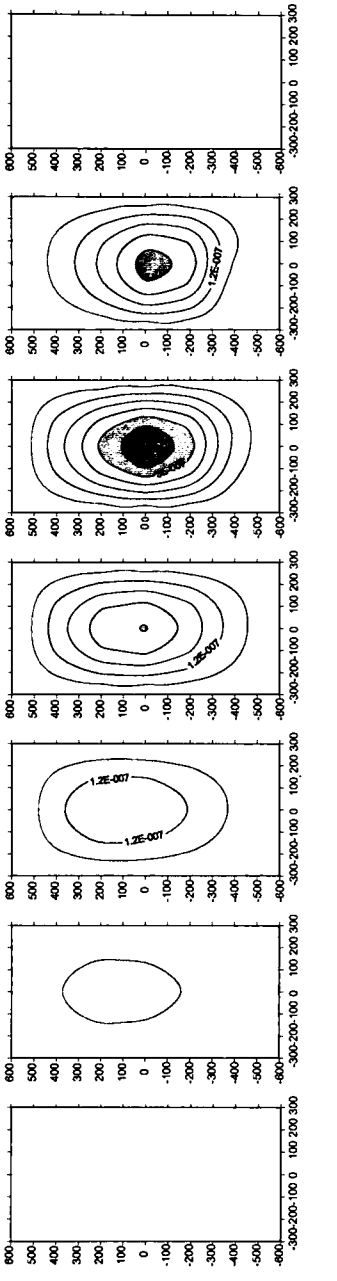
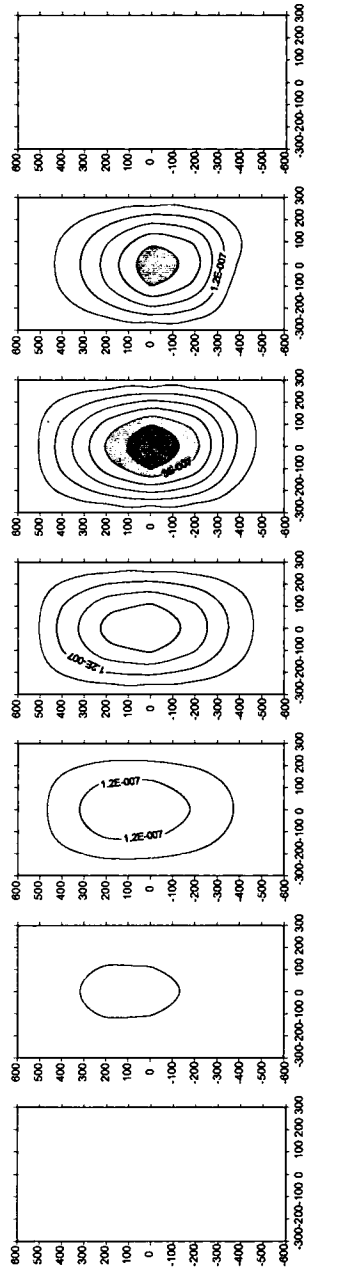
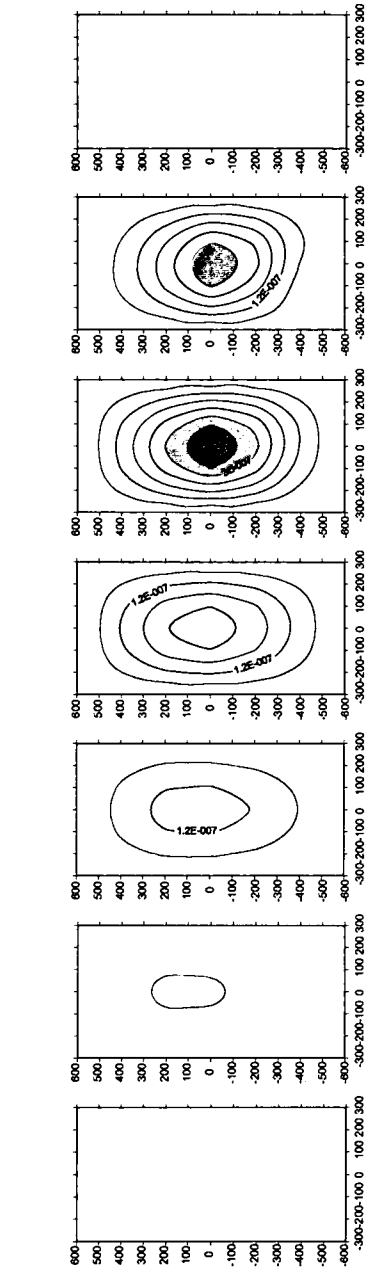
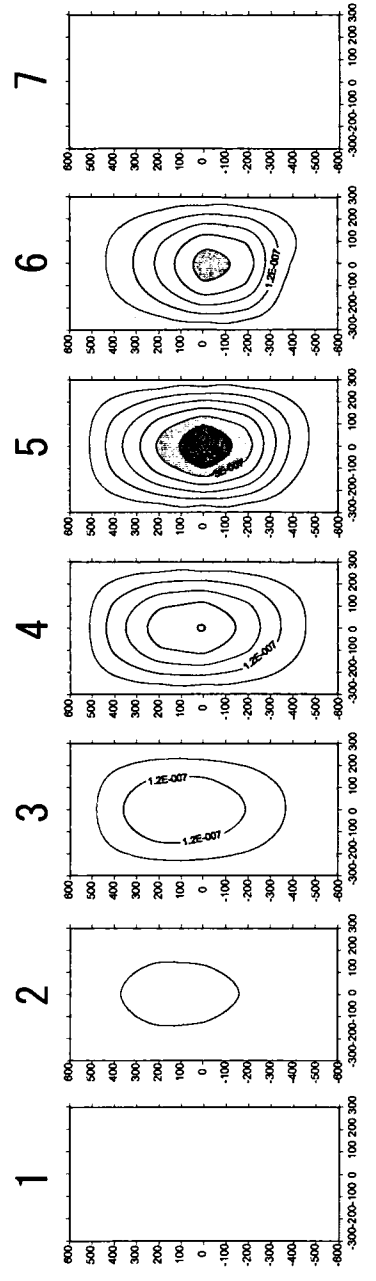
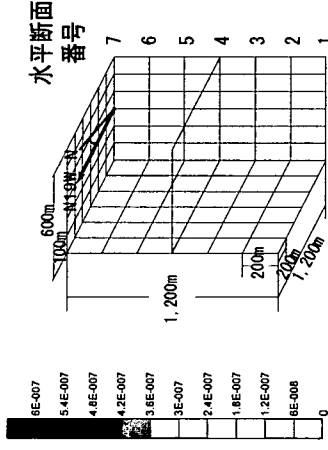
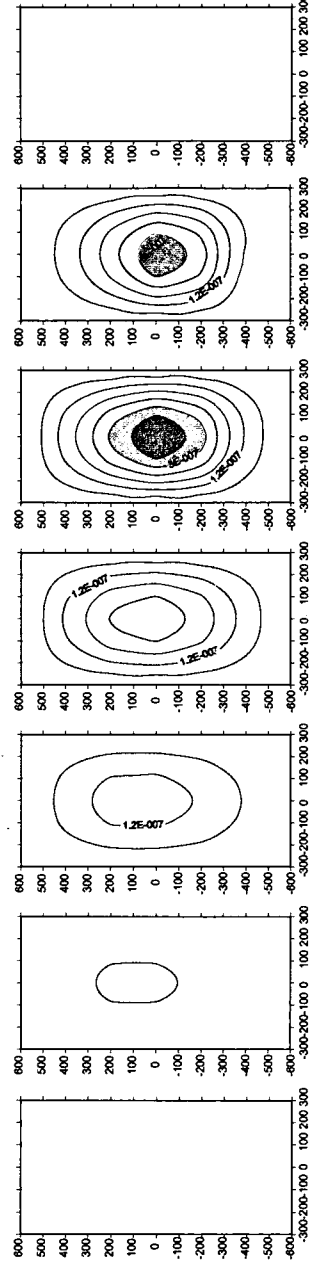
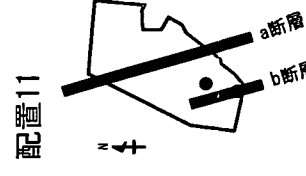
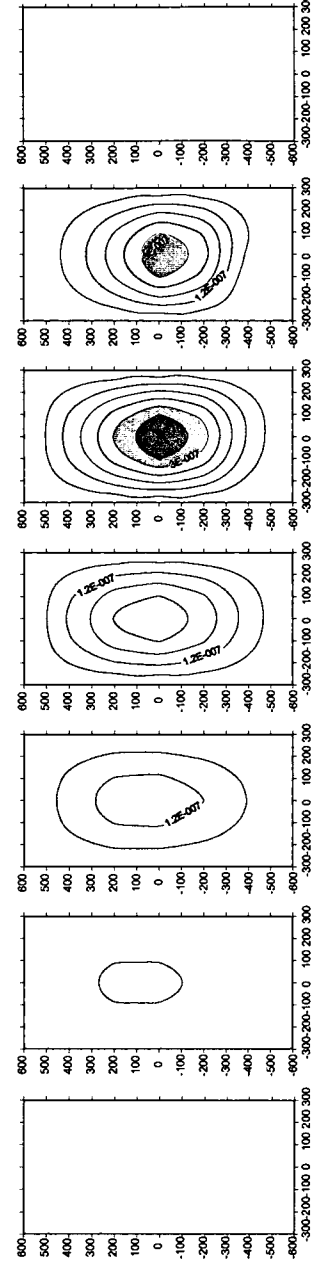
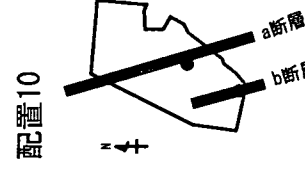
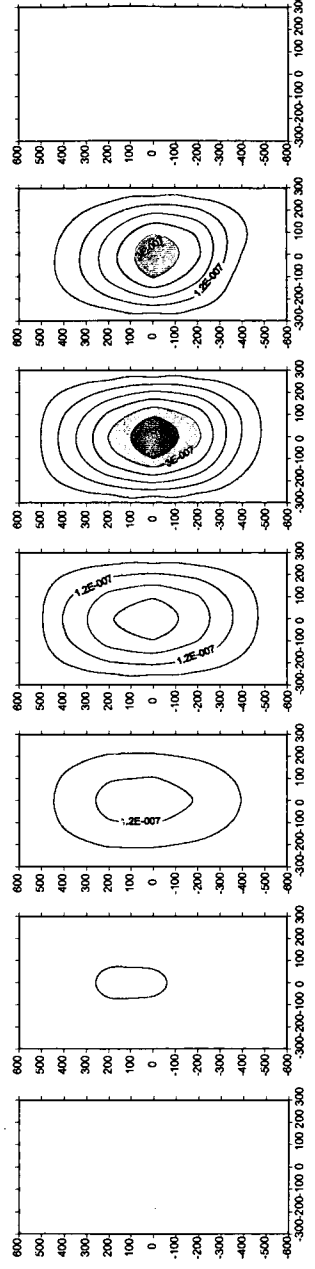
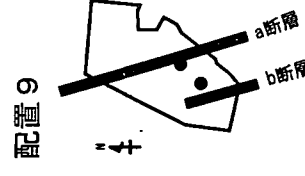
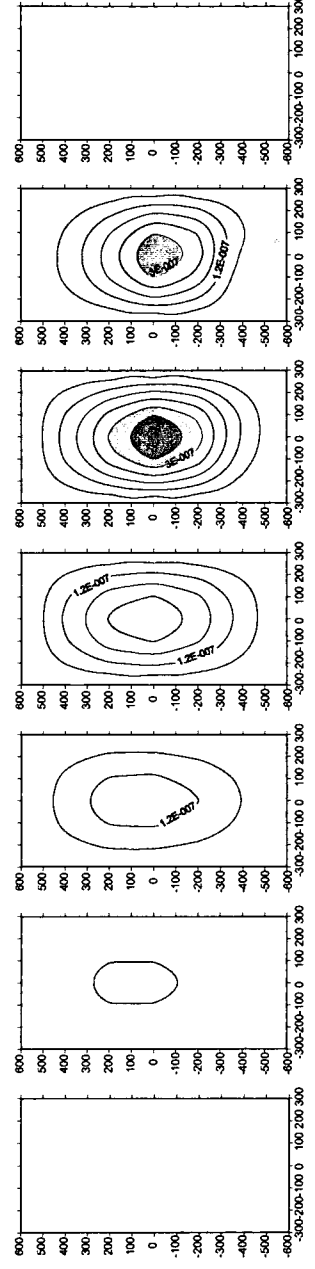
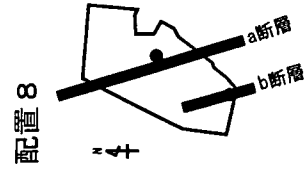
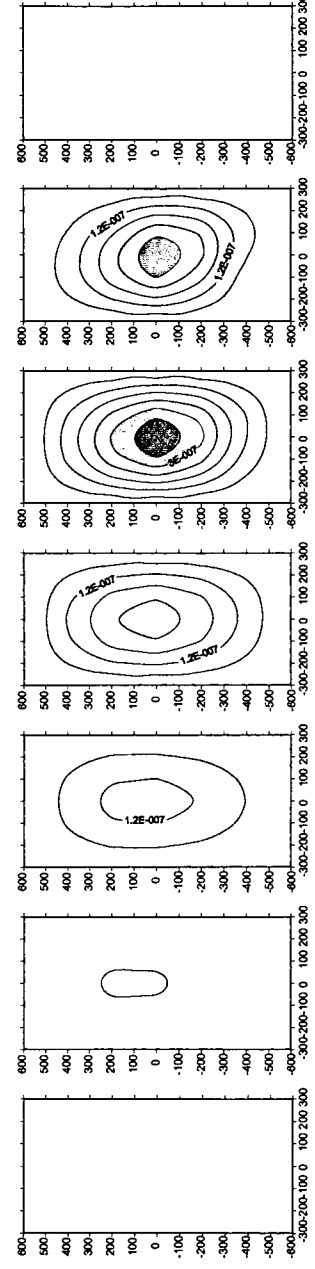
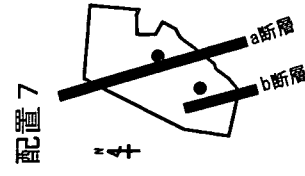
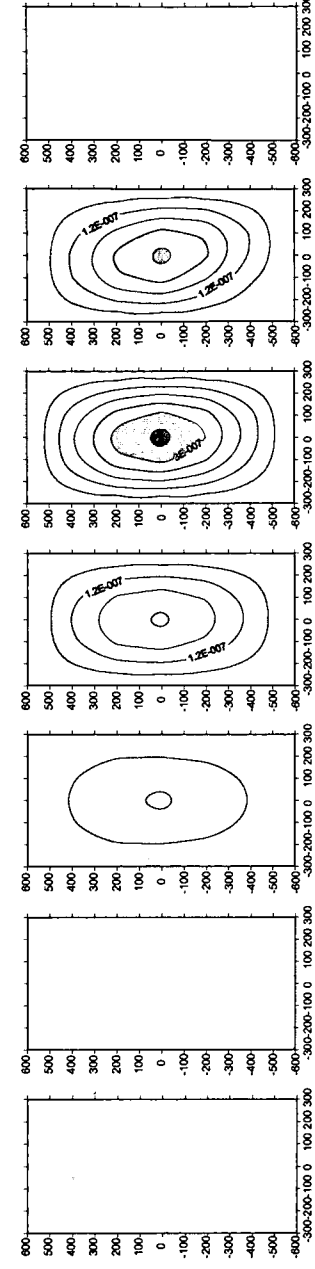
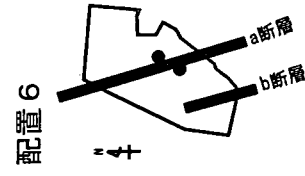


図4.1-8 傾斜量データ数及び配置に応じた逆解析結果(領域②→②)の水平断面図(1)

Tiltmeter:2

1 2 3 4 5 6 7



(データセット)

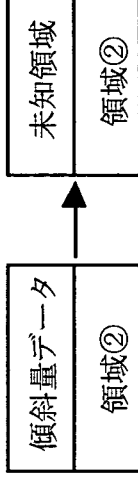
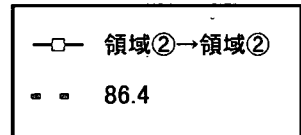
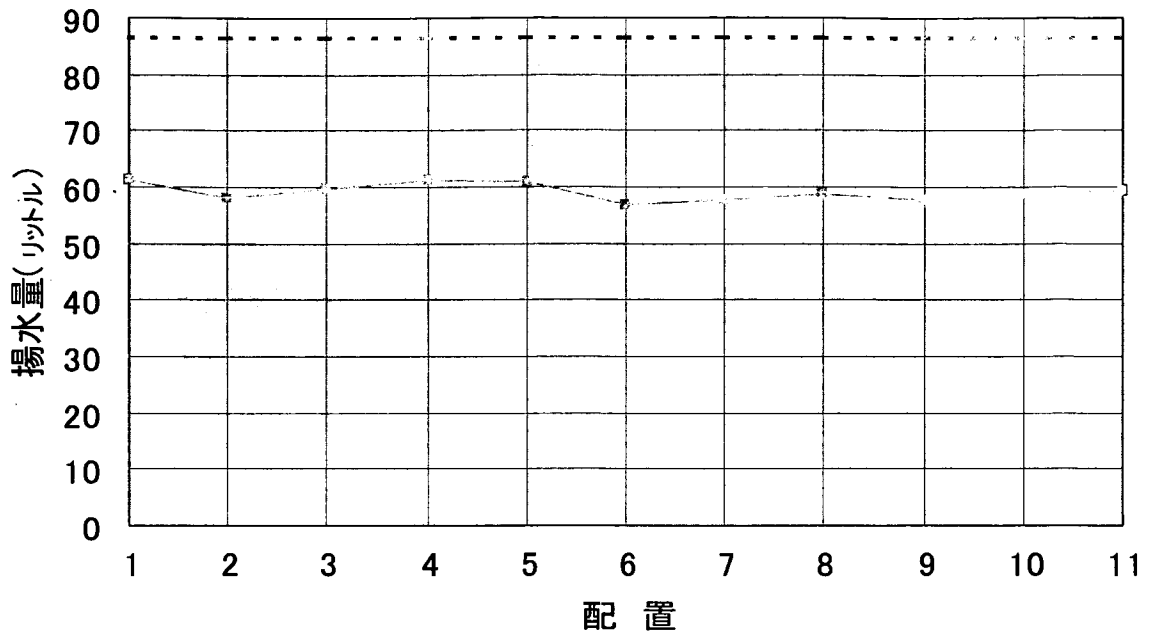


図4.1-8 傾斜量データ数及び配置に応じた逆解析結果(領域②→②)の水平断面図(2)



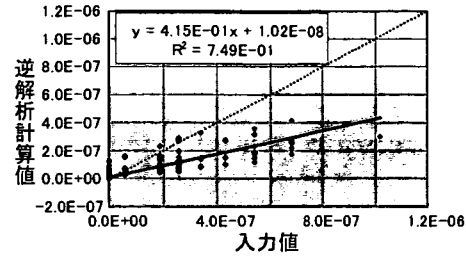
| 配置 | 領域②→領域②                       |                       |
|----|-------------------------------|-----------------------|
|    | 揚水量*(m <sup>3</sup> )<br>(Vt) | 100 ×<br>(Vt/86.4)(%) |
| 1  | 61.2                          | 70.9                  |
| 2  | 58.0                          | 67.1                  |
| 3  | 59.8                          | 69.3                  |
| 4  | 61.3                          | 70.9                  |
| 5  | 60.8                          | 70.4                  |
| 6  | 56.8                          | 65.8                  |
| 7  | 57.8                          | 66.9                  |
| 8  | 58.8                          | 68.1                  |
| 9  | 57.9                          | 67.0                  |
| 10 | 58.9                          | 68.1                  |
| 11 | 59.3                          | 68.6                  |

\*逆解析で計算された揚水量

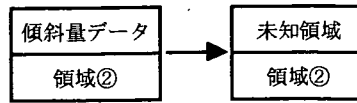
図4.1-9 逆解析による総揚水量の再現性

配置1

Tiltmeter:4

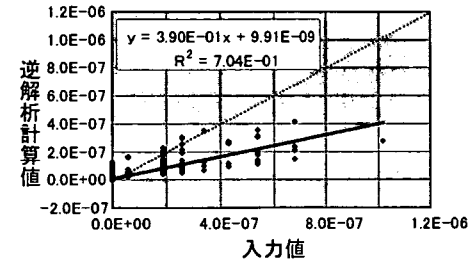


(データセット)



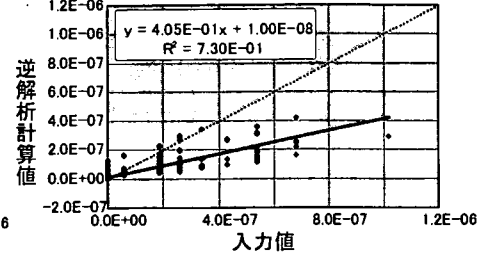
配置2

Tiltmeter:3,case1



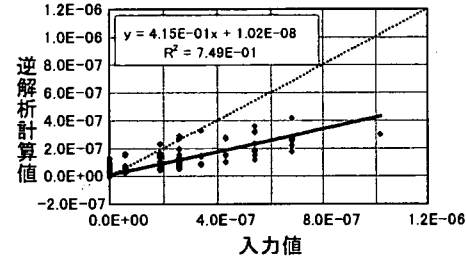
配置3

Tiltmeter:3,case2



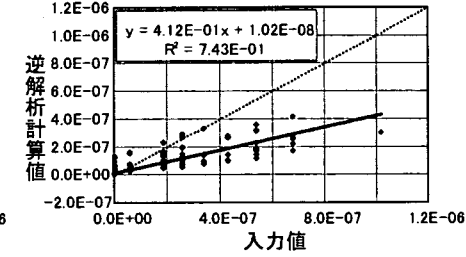
配置4

Tiltmeter:3,case3



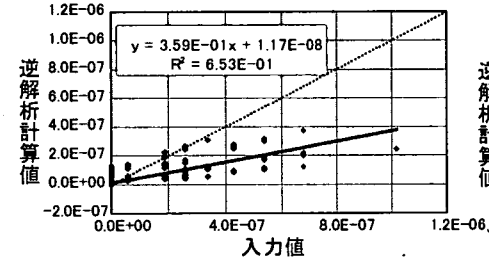
配置5

Tiltmeter:3,case4



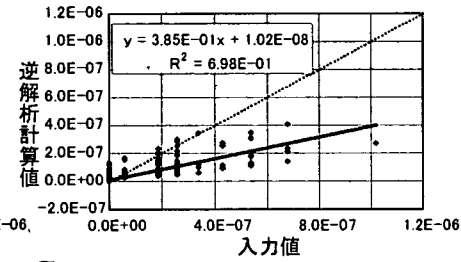
配置6

Tiltmeter:2,case1



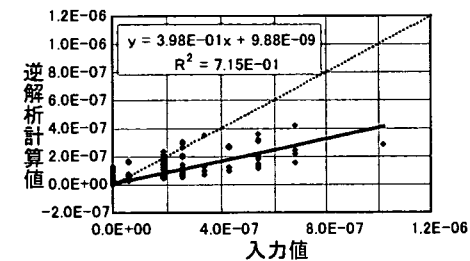
配置7

Tiltmeter:2,case2



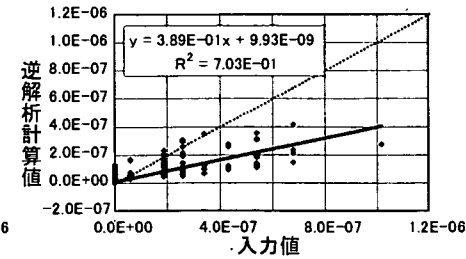
配置8

Tiltmeter:2,case3



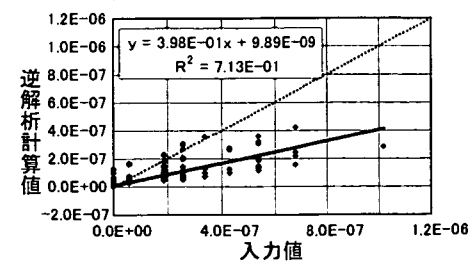
配置9

Tiltmeter:2,case4



配置10

Tiltmeter:2,case5



配置11

Tiltmeter:2,case6

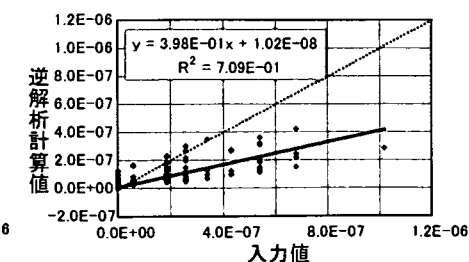
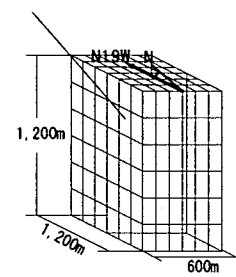


図4.1-10 逆解析計算値のばらつき

垂直断面作成位置



領域②

(2)

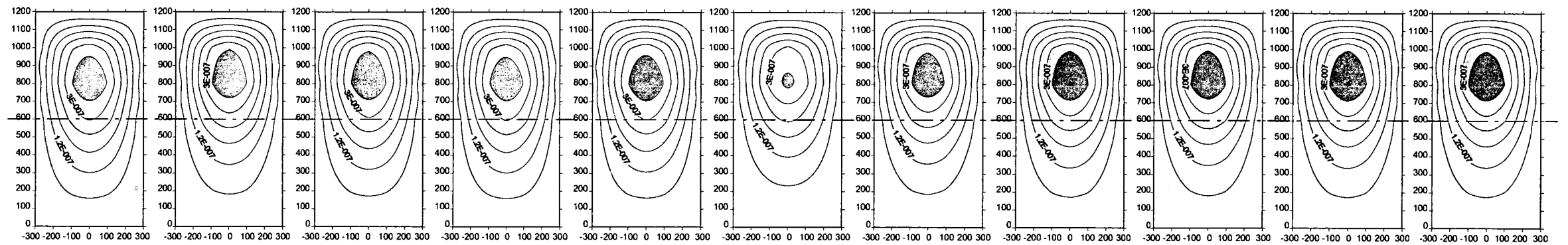
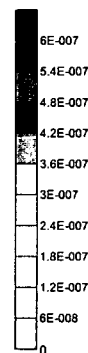
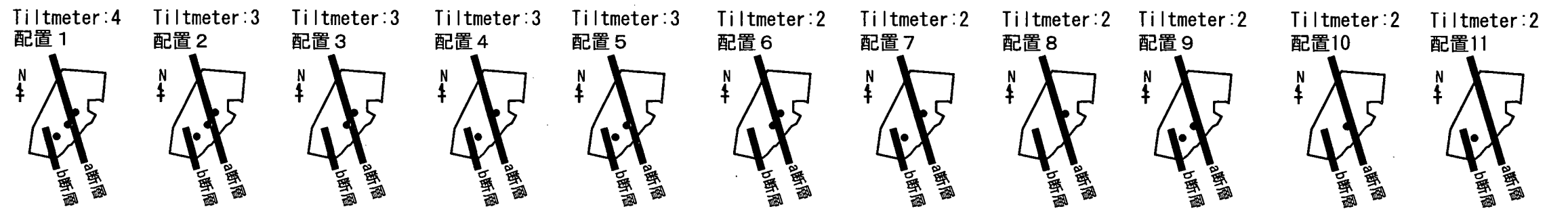


図4.1-11 垂直断面による体積変化中心（揚水地点）の再現性の比較（2）

#### 4. 2 研究所用地全範囲を対象とした検討

研究所用地内の設置可能地点数は4地点であるが、研究所用地全範囲を対象とした場合を想定し、設置点数の増加と逆解析の再現性の向上との相関について、概略的な検討を行った。

研究所用地範囲を50mメッシュで区切り、43地点の傾斜測定点を設定した(図4. 2-1)。したがって、隣接する傾斜測定地点間の間隔は、最小50mである。この43地点のなかから、地形高度等は考慮せず無作為に選択した2、3、4、8、12、16及び43地点の傾斜量データを使用し、9通りの設置数について逆解析を行った。配置は、図4. 2-2の緑で塗色した地点である。

##### 4. 2. 1 体積変化量及び総揚水量に対する再現性の評価

逆解析した体積変化量の水平断面図を図4. 2-2～4. 2-4に、総揚水量の再現性を図4. 2-5に示す。設置数に対する体積変化量及び総揚水量の再現性は、以下のとおりである。

###### (1) 傾斜量データを領域①・未知領域を①とした場合

設定した流体体積変化量の水平断面(図2-4参照)と比較すると、全ての設置数で断面の対称性は崩れているが、設置数4地点以上では体積変化量の再現性及び総揚水量の再現性にほとんど変化がなかった。ただし、設置数4地点以上では、総揚水量の約5%増の再現性を示した。

###### (2) 傾斜量データを領域②・未知領域を領域②とした場合

全ての設置数で断面の対称性は崩れているが、設置数8地点以上で体積変化量及び総揚水量の再現性にほとんど変化がなく、総揚水量の90%程度の再現性を示した。

###### (3) 傾斜量データを領域①・未知領域を領域②とした場合

全ての設置数で断面の対称性は崩れているが、水平断面3に着目すると、領域の西側への広がりが小さくなるのは8地点以上であり、体積変化量の再現性にほとんど変化がなかった。また、設置数8地点以上で総揚水量の再現性にほとんど変化がなく、総揚水量の85～87%程度の再現性を示した。

##### 4. 2. 2 配置の違いによる $R^2$ 値の大きさ及び回帰直線に対する評価

入力値を横軸に、逆解析計算値を縦軸に取り、両者の相関関係を図4. 2-6(1)～(3)に示す。相関関係は、逆解析計算値のばらつきを示す $R^2$ 値、計算値のばらつきを平均化した回帰直線及び回帰式によって表現した。設置点数に対する $R^2$ 値の大きさ及び回帰直線に対する評価は、以下のとおりである。



(1) 傾斜量データを領域①・未知領域を領域①とした場合

設置数 8 地点で最も高い  $R^2$  値を示すが、設置数 3 地点以上で大きな違いはなかった。また、設置数 4 地点以上で回帰式に大きな違いはなかった。

(2) 傾斜量データを領域②・未知領域を領域②とした場合

設置数 12 地点で最も高い  $R^2$  値を示すが、設置数 8 地点以上で大きな違いはなかった。また、設置数 8 地点以上で回帰式に大きな違いはなかった。

(3) 傾斜量データを領域①・未知領域を領域②とした場合

設置数 4 地点で最も高い  $R^2$  値を示し、設置数 4 地点以上で大きな違いはなかった。また、設置数 4 地点で回帰式の  $y$  切片は最も大きい、設置数 4 地点以上で回帰式に大きな違いはなかった。

#### 4. 2. 3 体積変化中心（揚水地点）のモデルに対する再現性の評価

体積変化中心（揚水地点）のモデルに対する再現性を検証するため、設定した揚水地点を通る垂直断面を作成し、図 4. 2-7 に示した。揚水地点を通る水平断面 4 の位置を一点鎖線で示した。設置点数に対する揚水地点の再現性の評価は、以下のとおりである。

(1) 傾斜量データを領域①・未知領域を領域①とした場合

設置数 4 地点以上で体積変化の中心はほぼ一致し、体積変化の中心の再現性に変化がなかった。

(2) 傾斜量データを領域②・未知領域を領域②とした場合

体積変化の中心は 150m~200m 程度浅い深度に分布し、設置数 8 地点以上で再現性に変化がなかった。

(3) 傾斜量データを領域①・未知領域を領域②とした場合

体積変化の中心は 200m 程度浅い深度に分布し、設置数 8 地点以上で再現性に変化がなかった。

#### 4. 2. 4 逆解析評価結果

以上の評価結果から、概ね必要な設置数を、表 4-2 に示す。

揚水試験に伴う体積変化の影響範囲は、実際の計測では水位観測などの情報から、ある程度予想される可能性はあるが、領域①及び領域②の体積変化領域の変化を捉え逆解析の再現性を高くするためには、総合評価として 8 地点必要であると判断した。設置数 8 地点（図 4. 2-2 参照）を考慮すると、隣接する傾斜測定地点間の間隔は、

150m 程度必要であると考えられる。

ただし、設置数に対する体積変化量の再現性の評価結果から、傾斜測定点を研究所用地内に限定した場合、8 地点以上の設置数を増加しても、逆解析の再現性の向上は得られないと判断した。

したがって、逆解析による体積変化量の再現性をさらに向上させるためには、前述の設置可能地点 4 地点以外に、設置地点を研究所用地外に広げ、少なくとも 4 地点以上の設置点数の増加が望ましい。

表 4-2 各評価における必要な設置数

| 評価内容                           | 領域①→①  | 領域②→② | 領域①→② |
|--------------------------------|--------|-------|-------|
| 体積変化量及び総揚水量に対する再現性             | 4 地点   | 8 地点  | 8 地点  |
| R <sup>2</sup> 値の大きさ及び回帰直線の再現性 | 3～4 地点 | 8 地点  | 8 地点  |
| 揚水地点のモデルに対する再現性                | 4 地点   | 8 地点  | 8 地点  |
| 総合評価                           | 8 地点   |       |       |

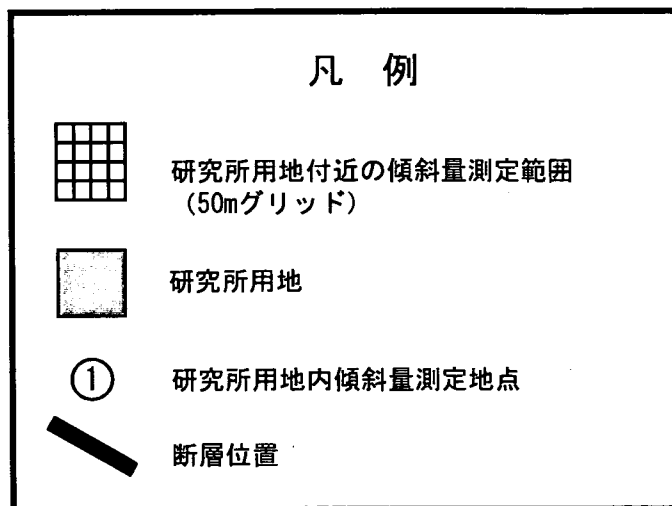
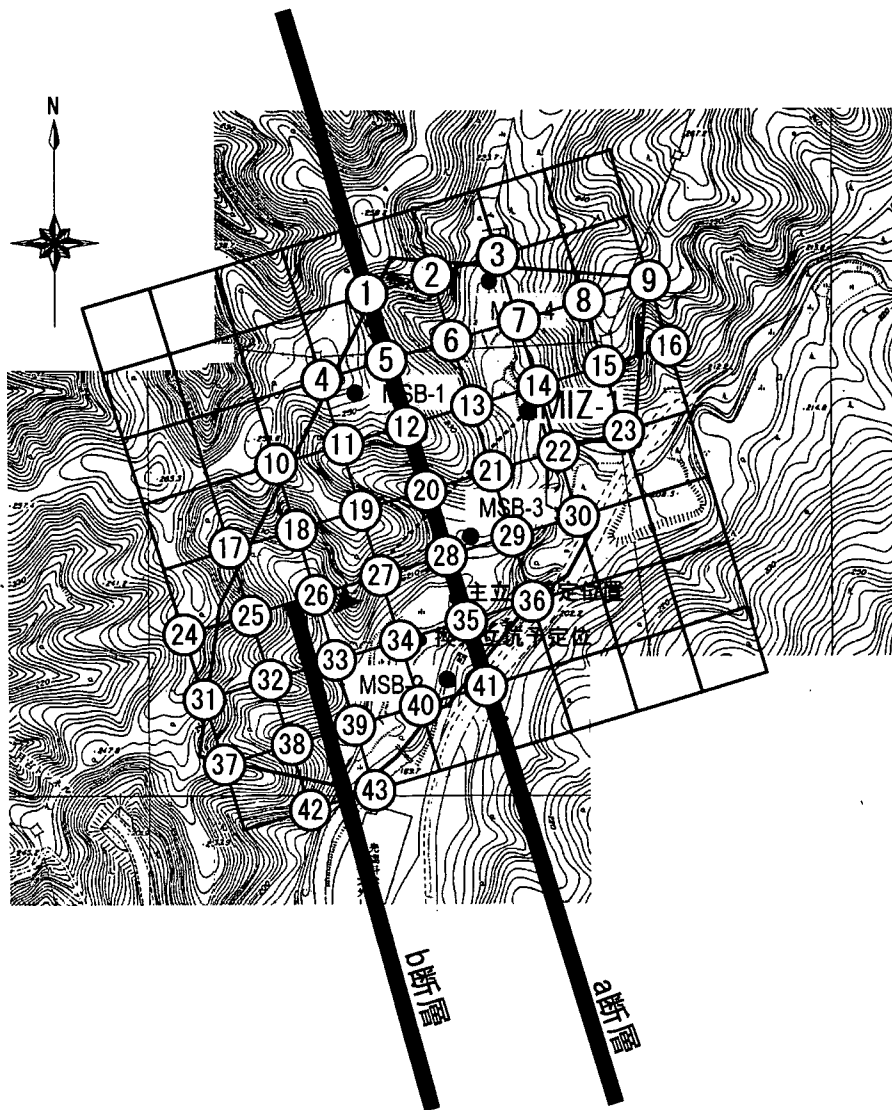


図4.2-1 研究所用地付近の傾斜量測定位置及び断層位置

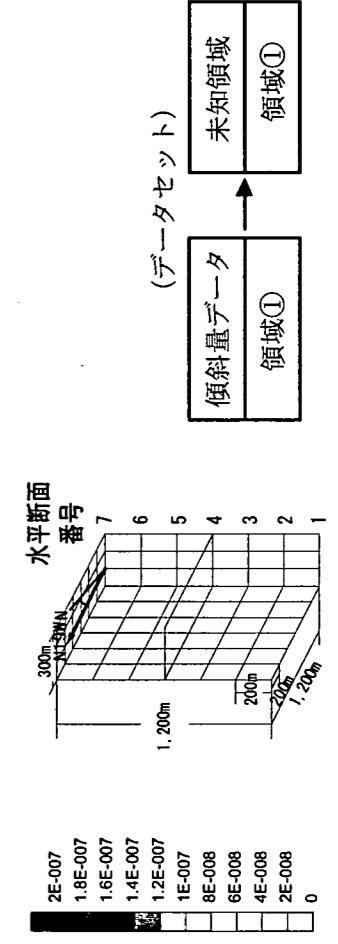
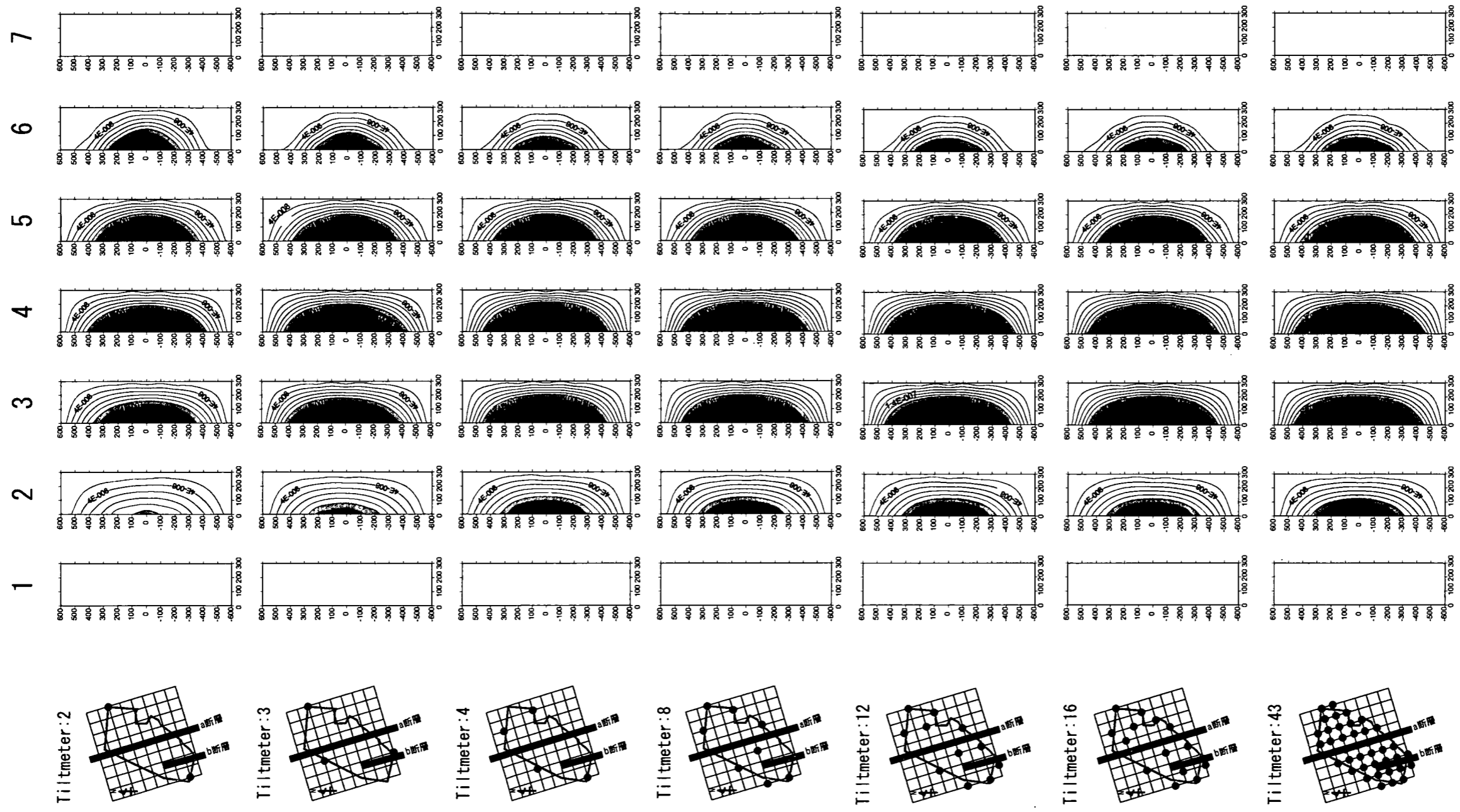


図4.2.2 傾斜量データ数に応じた逆解析結果(領域①→②)の水平断面図

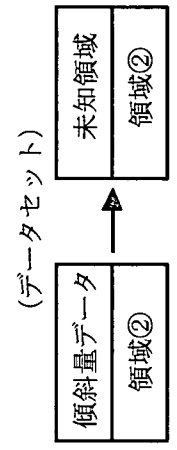
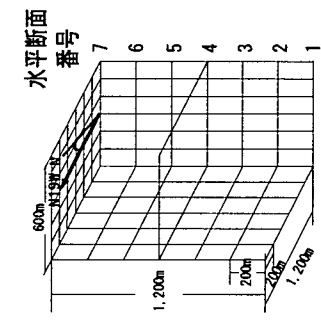
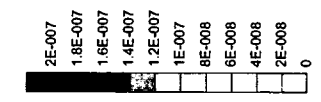
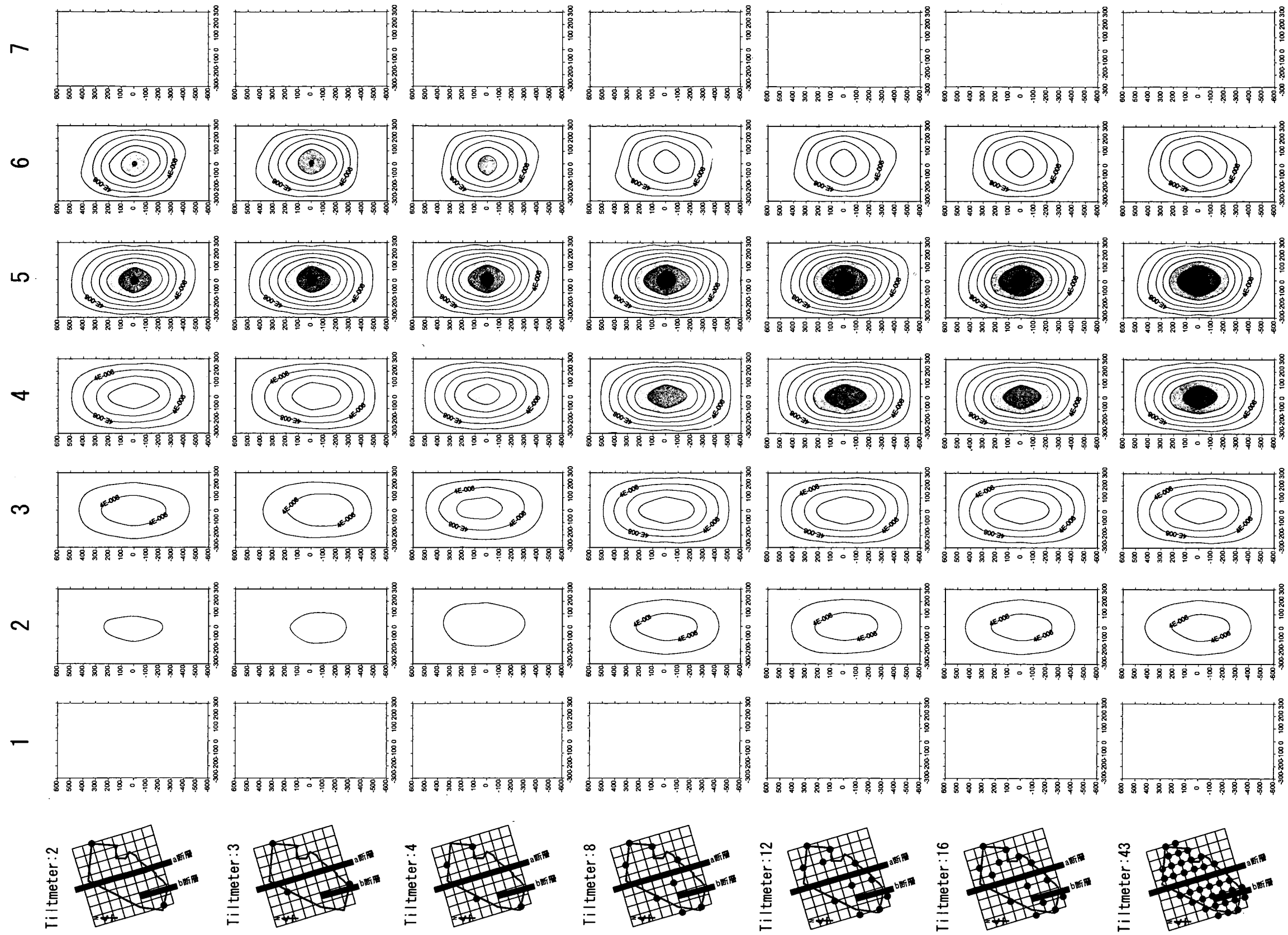


図4.2-3 傾斜量データ数に応じた逆解析結果(領域②→②)の水平断面図

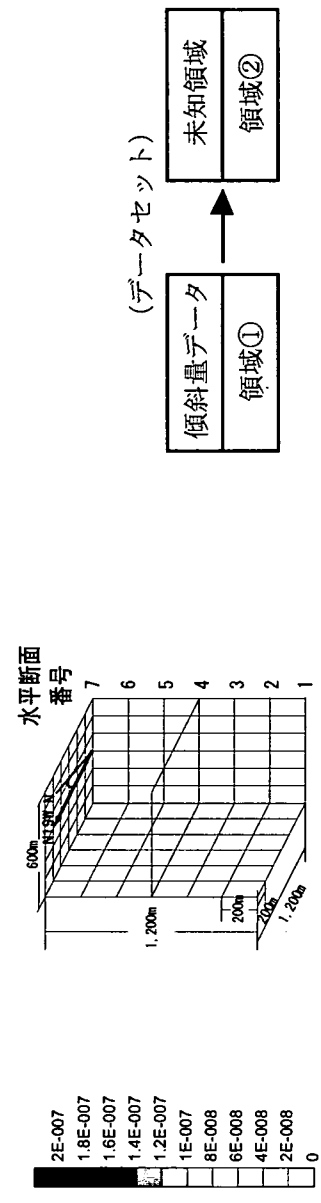
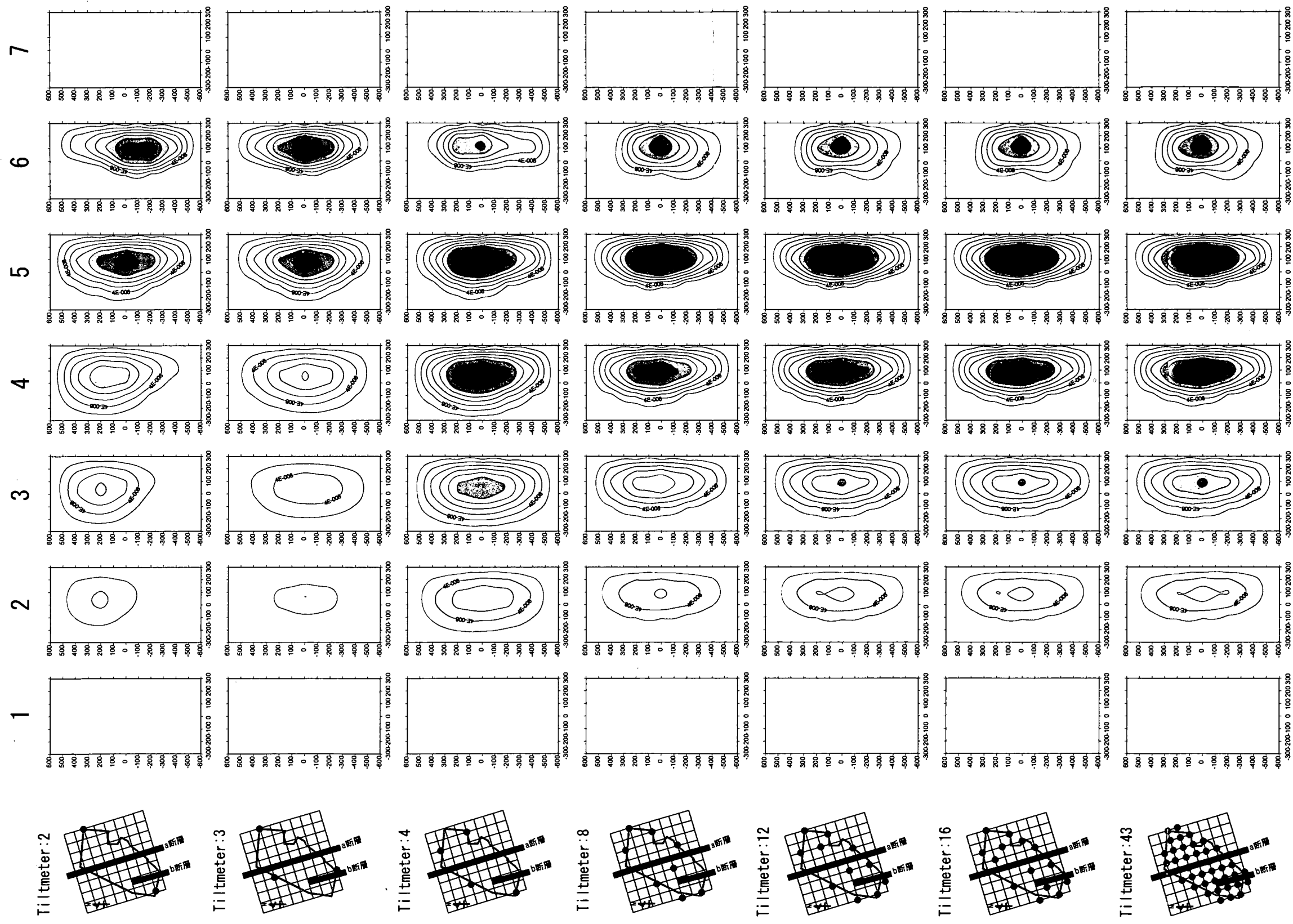
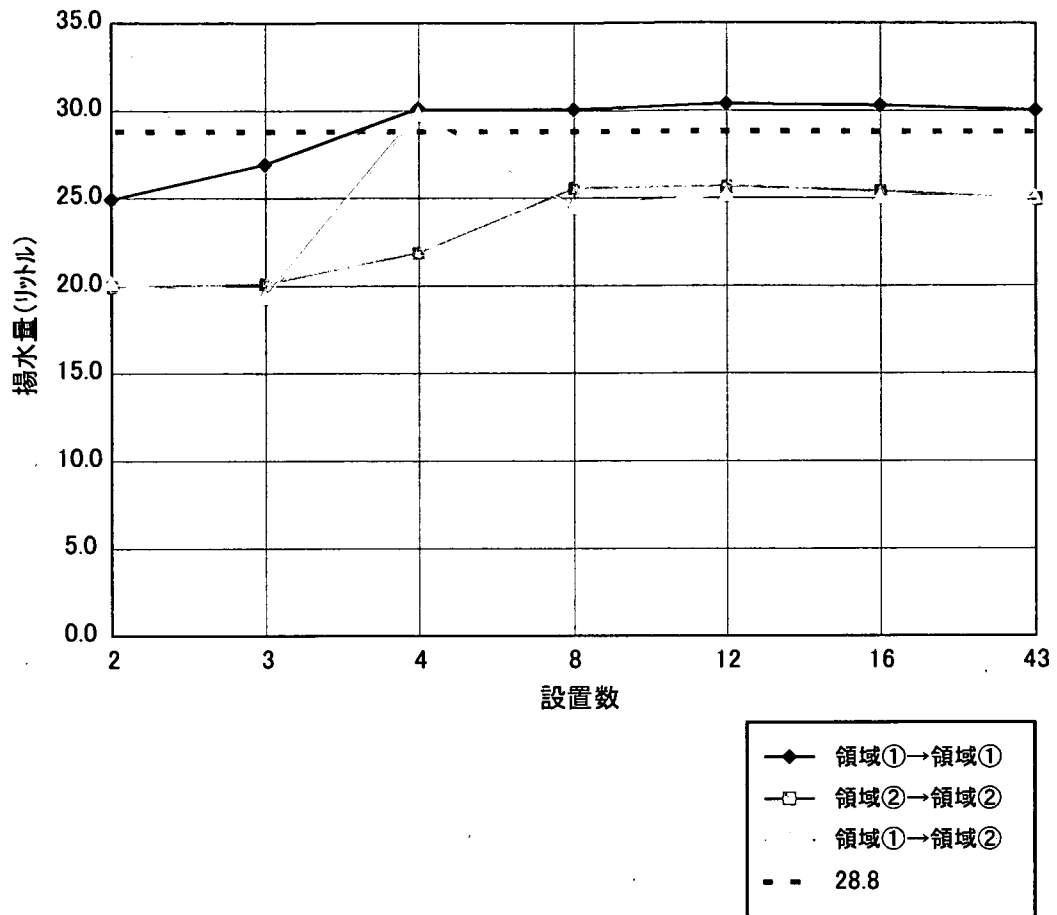


図4.2-4 傾斜量データ数に応じた逆解析結果(領域①→②)の水平断面図

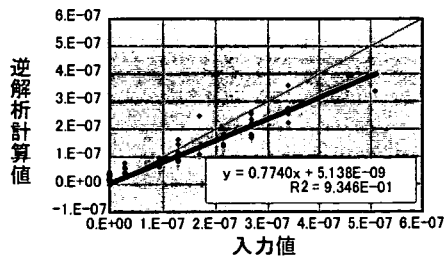


| 設置数 | 領域①→領域①                     |                    | 領域②→領域②                     |                    | 領域①→領域②                     |                    |
|-----|-----------------------------|--------------------|-----------------------------|--------------------|-----------------------------|--------------------|
|     | 揚水量* (m <sup>3</sup> ) (Vt) | 100 × (Vt/28.8)(%) | 揚水量* (m <sup>3</sup> ) (Vt) | 100 × (Vt/28.8)(%) | 揚水量* (m <sup>3</sup> ) (Vt) | 100 × (Vt/28.8)(%) |
| 2   | 24.9                        | 86.5               | 19.9                        | 69.2               | 20.1                        | 69.8               |
| 3   | 26.9                        | 93.5               | 20.1                        | 69.8               | 19.3                        | 67.1               |
| 4   | 30.1                        | 104.4              | 21.9                        | 76.0               | 29.8                        | 103.4              |
| 8   | 30.1                        | 104.4              | 25.6                        | 88.7               | 24.5                        | 84.9               |
| 12  | 30.4                        | 105.5              | 25.7                        | 89.2               | 25.2                        | 87.4               |
| 16  | 30.3                        | 105.2              | 25.4                        | 88.2               | 25.1                        | 87.0               |
| 43  | 30.0                        | 104.3              | 25.0                        | 86.6               | 25.0                        | 86.9               |

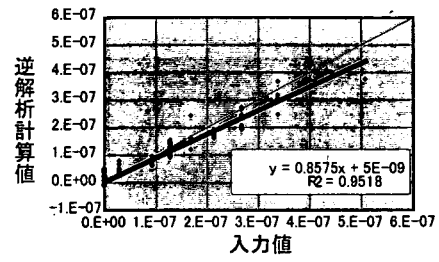
\*逆解析で計算された揚水量

図4.2-5 逆解析による総揚水量の再現性

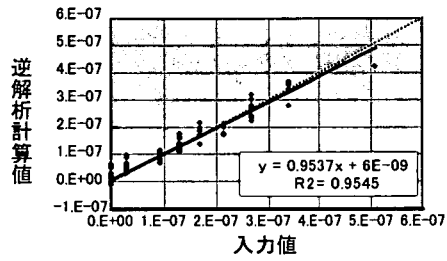
Tiltmeter:2



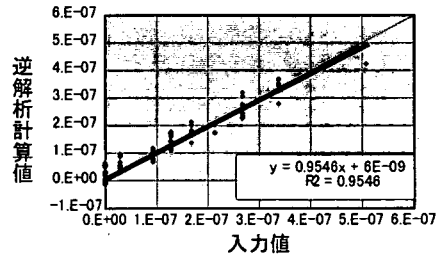
Tiltmeter:3



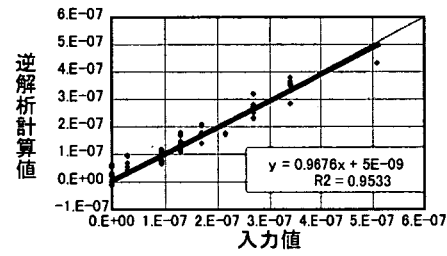
Tiltmeter:4



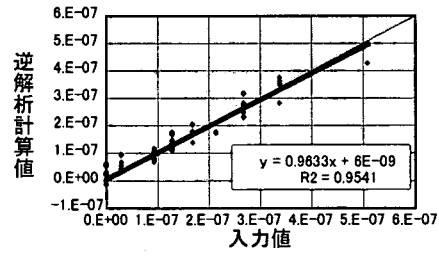
Tiltmeter:8



Tiltmeter:12



Tiltmeter:16



Tiltmeter:43

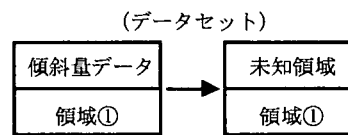
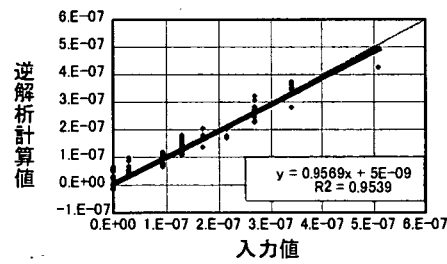
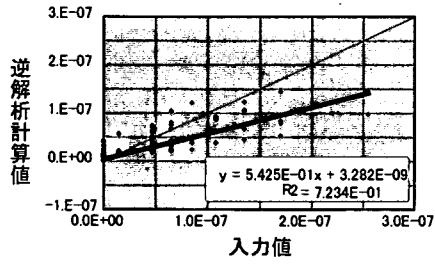


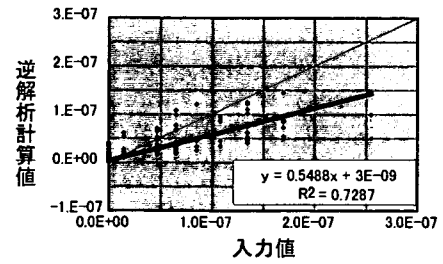
図4.2-6(1) 逆解析計算値のばらつき



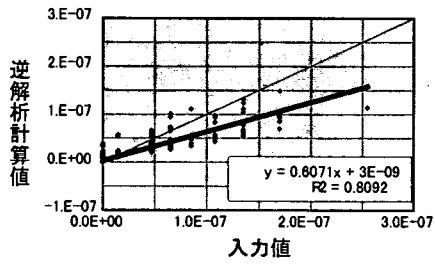
Tiltmeter:2



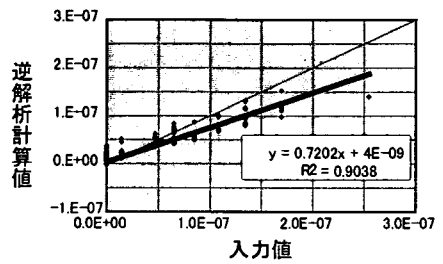
Tiltmeter:3



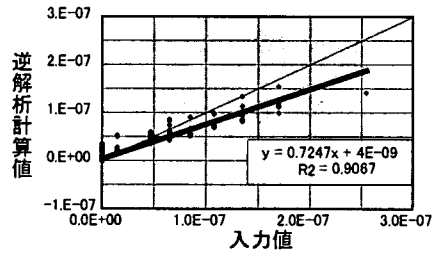
Tiltmeter:4



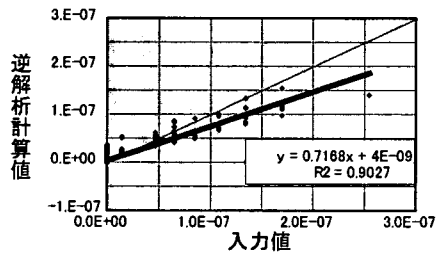
Tiltmeter:8



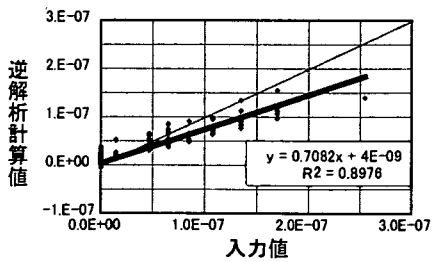
Tiltmeter:12



Tiltmeter:16



Tiltmeter:43



(データセット)

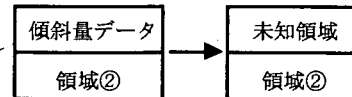
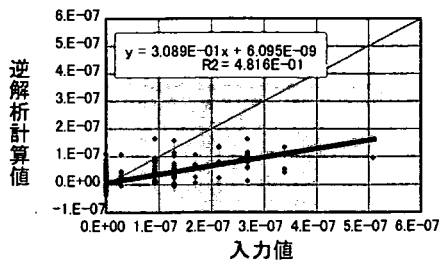
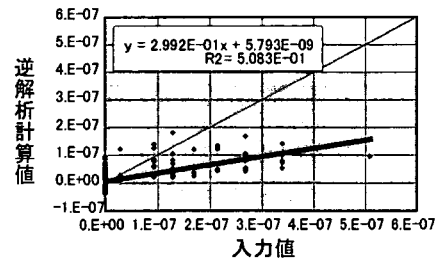


図4.2-6(2) 逆解析計算値のばらつき

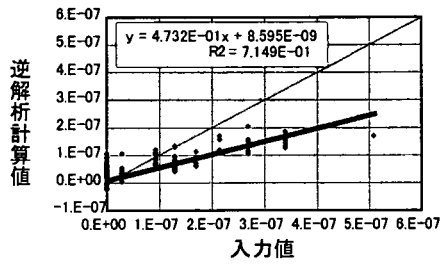
Tiltmeter:2



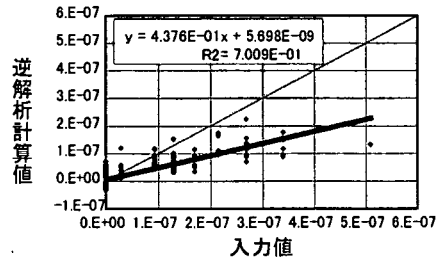
Tiltmeter:3



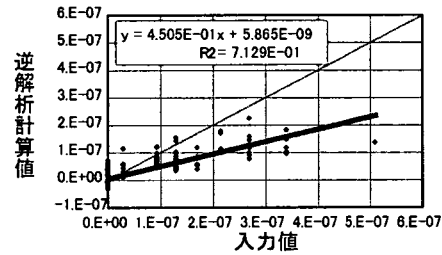
Tiltmeter:4



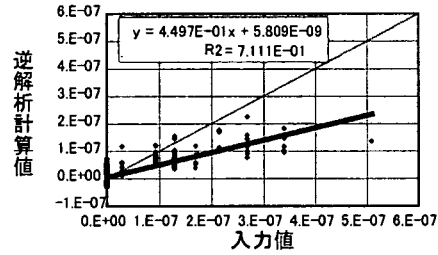
Tiltmeter:8



Tiltmeter:12



Tiltmeter:16



Tiltmeter:43

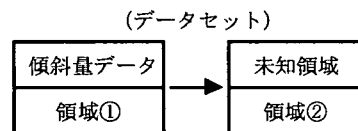
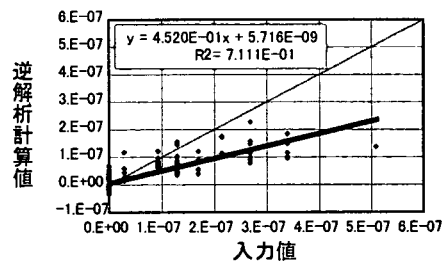


図4.2-6(3) 逆解析計算値のばらつき

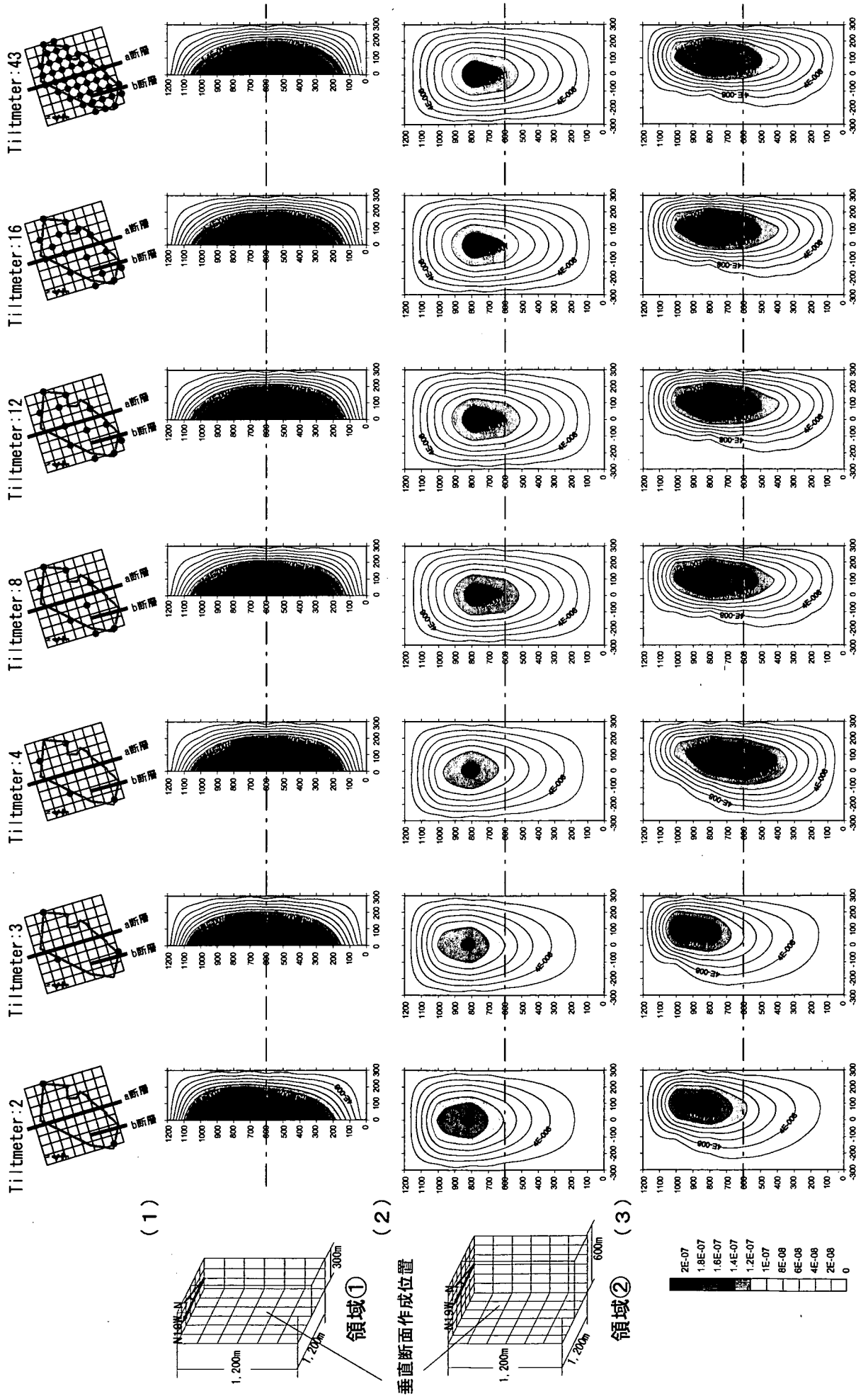


図4.2-7 垂直断面による体積変化中心（揚水地点）の再現性の比較

## 5. 解析結果のまとめ

### 5. 1 順解析結果

#### 5. 1. 1 傾斜量の感知可能性

感度解析の結果、傾斜量の分布を元にして描いた等高線の最大伸長方向と、断層の走向方向とがよく一致しており、地質構造を反映した結果が得られた。

体積変化量を線形分布と設定した場合、領域①および領域②を満たし、設置可能4地点において地表傾斜量を Tiltmeter で感知するためには、20 リットル/分で72時間以上の揚水時間が必要である。なお、揚水地点が地下1000mで総揚水量28.8m<sup>3</sup>の場合、Tiltmeterは揚水地点直上の地点から東へ30mの地点を中心とする半径130mの円外に設置するのであれば、傾斜量が感知可能となる。

しかし、総揚水量の増加や、研究所用地内に設置可能地点が望めない場合、a断層近傍の2地点は、研究所用地外に設置するなどの検討が必要である。その際、最大傾斜量を示す地点は、基準点を中心とする半径350~500mの範囲にあることから、この範囲内に2地点を移動することを提案する(図5-1参照)。

#### 5. 1. 2 体積変化影響範囲の予測について

領域①のモデルに基づいて算出された傾斜量の中心は、設定した体積変化の中心(揚水地点)直上の地表点と一致せず、東北東方向にずれている。その理由として、体積変化の中心が領域の端の方にあることや、b断層部付近のスケンプトン間隙圧係数の高い領域が、領域②に比較して東側に片寄っているなどの影響が考えられる。一方、領域②では、領域の中心に体積変化の中心(揚水地点)があるため、傾斜量の中心のずれが認められないと考えられる。

したがって、傾斜量データ数に非常に依存するが、実際の観測では、傾斜量の中心が実際の体積変化の中心(揚水地点)と一致していない場合、体積変化の影響範囲が予測できる可能性がある。しかし、何らかのプログラム上の特性である可能性もあり、総揚水量の設定や解析モデルなどを変更した検討が今後必要である。

### 5. 2 逆解析結果

#### 5. 2. 1 水理地質構造要素の抽出

領域②を未知領域と仮定し、領域①で得られた傾斜量データをもとに、流体体積変化分布の逆解析を行った。その結果、流体体積変化分布の水平断面2~6を見ると、領域内で流体体積変化分布が東側に片寄っており、特に断面6では未知領域内の西側1/3の部分に体積変化が起こっていない部分が現れている(図4. 1-4、配置1~配置11参照)。このことから、揚水の影響を少なくするあるいは遮断するような構造が領域内に存在する可能性を読み取ることができる。

したがって、簡易な地質環境モデルをもとにした解析であるが、理論上は、水理地

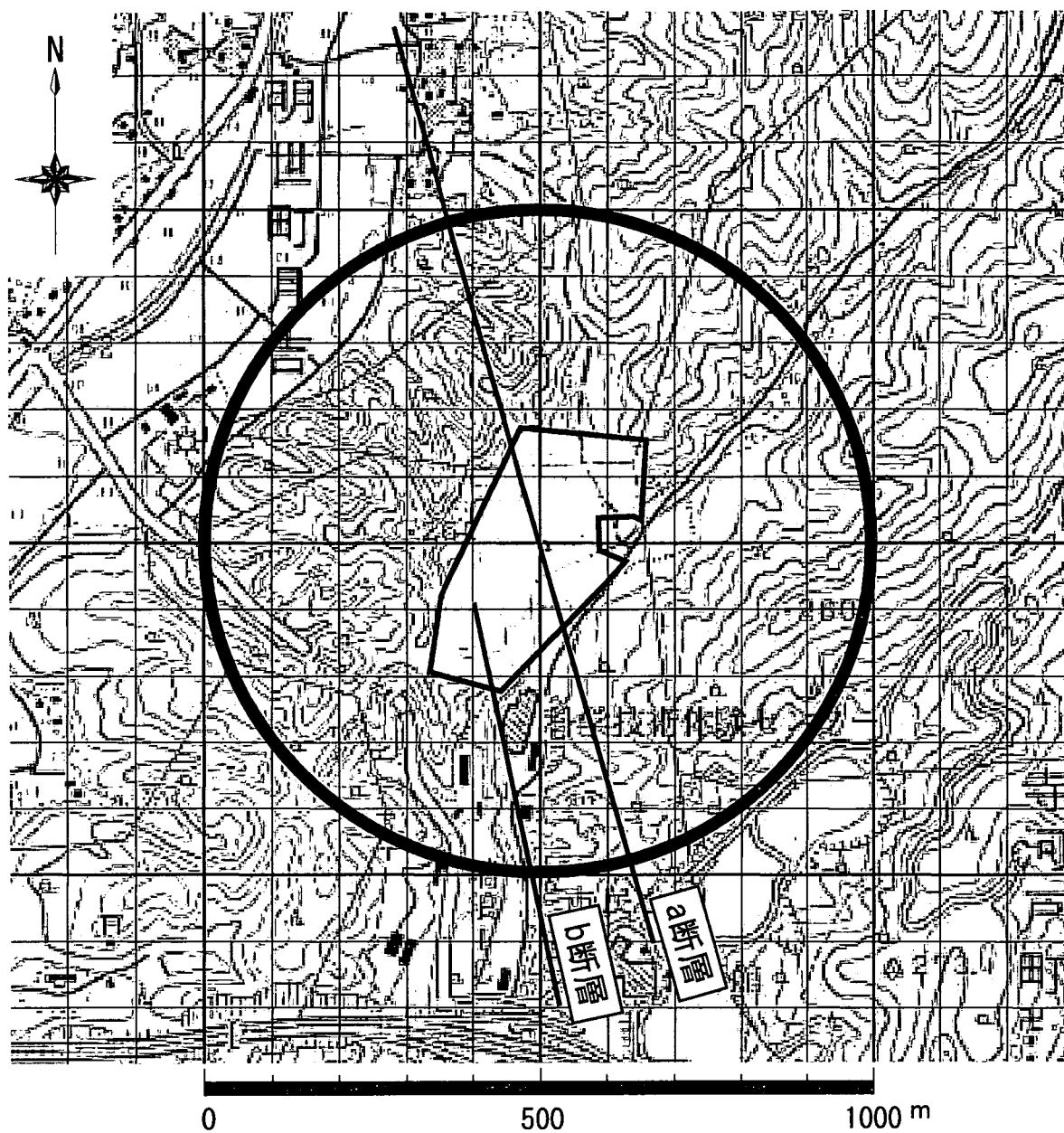
質構造を反映した逆解析結果が得られる可能性が高いと判断され、今回の逆解析は実用的であると考えられる。

前述のように、体積変化の中心（揚水地点）が、モデルより 200m 程度浅い深度に分布する傾向が見られた（図 4. 1-7、配置 1 参照）。このような傾向は、体積変化の影響範囲に対して、研究所用地内の狭い範囲の傾斜量データのみを使用し逆解析を行ったことによる影響と考えられる。また、逆解析の解析モデルの設定や、何らかのプログラム上の特性である可能性も考えられる。

今後の課題として、逆解析の再現性を向上させるためには、解析モデルの設定の変更（解析深度、要素分割の大きさ等）による検討が必要である。さらに、プログラム上の特性を検討し、改良を加えていく必要があると考えられる。

#### 5. 2. 2 傾斜計の配置及び設置数について

設置可能な 4 地点の 11 通りの組み合わせによる逆解析結果から、傾斜計の配置及び設置数は、研究所用地内の平地で、断層を横切ってほぼ直線上に配置した 4 地点（図 4. 1-1 参照）が最適であるという結論を得た。また、研究所用地全範囲を対象とした場合では、少なくとも 8 地点以上設置数を増加しても、逆解析の再現性の向上は得られないと判断した。したがって、設定した地質環境モデル及び解析領域モデルの条件下では、4~8 地点の設置数が望ましいと考えられる。ただし、逆解析による体積変化量の再現性を向上させるためには、揚水地点直上の地表点を中心とする 500m の円内で設置点数を増加し、研究所用地外に設置することが望ましい（図 5-1 参照）。



\* 国土地理院発行1:25,000地形図「土岐」及び「瑞浪」を使用

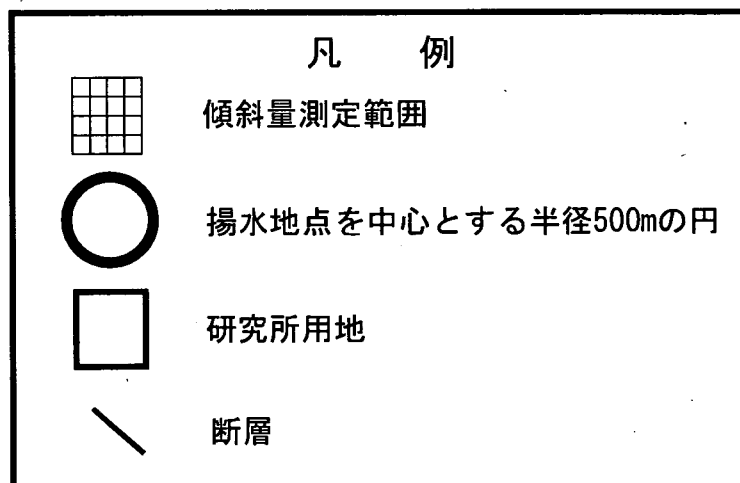


図5-1 研究所用地外に設置する場合の配置

## 6. 傾斜計設置に関する注意事項

本解析は、プログラム上、解析領域の地質構造を平均化し、地表面に凹凸のない水平面を有する半無限弾性体として取り扱っている。実際には地表面は水平ではなく、地形的な高度差があり、解析対象とする地質は不均一である。

限定された範囲の中であってもよりよい解析データを得るためには、多くの傾斜計を設置する必要があるが、設置位置の地形高度差の影響、地山自体の変形の影響を補正する方法は確立されていない。また、不均一な地質を平均化せずに逆解析する方法は確立されていない。その意味では、傾斜計設置高度の差が大きい場合や非常に地質構造が複雑な場合には、逆解析は精度的に問題となる可能性が考えられる。

設置位置の高度差の問題を解決するためには、何らかの補正手段の開発が必要であり、地質の平均化には、物性値として地層のヤング率等を考慮するなど、理論としている基本式を改良する必要がある。したがって、ナノラジアン単位の変化量を取り扱うための理論式の改良や、新たな理論を確立するための研究が必要である。将来的に地形の影響が考慮できるようになれば、さらに地層境界面の凹凸の影響についても取り扱うことが可能であると考えられる。

傾斜計設置に関しては、現在のところ、設置位置の高度差がなるべく少なくなるような平地を選択することなど、設置高度を統一するような工夫が必要である。

その他、試験開始前の設置期間、測定データのノイズ処理について挙げておく。

### (1) 試験開始前の設置期間について

掘削後は設置孔が安定しないため、1～2週間程度は傾斜データの異常変動が大きいことがあり、設置後の機械の安定性も考慮すると、1ヶ月程度は安定期間が必要である。また、試験開始前のバックグラウンドデータを取ることで、対象とする試験期間以前の傾斜変動の特性を取り除くことが可能となる。したがって、試験による応答の計測を開始する前に、1ヶ月程度のバックグラウンド計測期間を設けることが望ましい。以上のことから、試験期間の前に最大2ヶ月程度の測定準備期間（安定期間及びバックグラウンド測定期間）が必要である。

### (2) 測定データのノイズ処理について

応答の計測を開始する前のバックグラウンド測定は、様々なノイズの影響を除去する上でも必要である。傾斜測定時に捉えられるノイズとしては以下のことが考えられる。

- ・ 設置孔掘削後の掘削孔の変形に伴う影響
- ・ 設置孔近傍の工事に伴う振動の影響
- ・ 地球潮汐と海洋潮汐加重に伴う地殻の変形
- ・ 気圧変化（低気圧、台風等）による地表加重の変化に伴う地層の変形

- ・外気温の変化による傾斜計への熱的影響
- ・降雨の影響

これらのノイズの内、潮汐のような周期的なノイズ（潮汐では周期 12 時間、24 時間、半月）は概ね識別可能であり、潮汐解析プログラム（Baytap-G）により傾斜量データから除去できる。工事に伴う振動などの人工的なノイズは、デジタルフィルタ（ハイカットフィルタなど）により除去できる。ただし、地下深部のナノラジアン単位の体積変化に対して、浅部の地層の変形が十分大きい場合、目的とする傾斜データが抽出できない可能性がある。

低気圧や台風の影響がある場合は、気象台の気圧測定データを並行観測データとして用いれば、気圧応答係数が得られ、その結果得られた比例係数を気圧変動データに乗じる事により、気圧変化による傾斜変動の補正値を求めることが可能と考えられる。

また、外気温の影響、降雨の影響、地表面の振動の影響は、地表下 10m に設置することで影響は少ないと判断している。

計測データのノイズ処理により傾斜量を抽出するためには、現場に応じた適切なデジタルフィルタの摘要や開発が必要である。



おわりに

本業務では、研究所用地を含む領域を対象とした3次元の地質環境モデルを構築し、揚水試験による体積変化にともなう地表傾斜量を算出した。体積変化がおこる領域の大きさは、領域①（断層の走向方向1200m×深度1200m×断層面の東側300m）及び領域②（断層の走向方向1200m×深度1200m×断層面を挟んだ600m）の2ケースと仮定した。また、算出した傾斜量を用いて、逆解析により岩盤内の流体体積変化分布を求めた。逆解析では、研究所用地内の傾斜計設置可能な4地点について、研究所用地のどの地点での傾斜量測定により水理地質構造要素の抽出が可能となるかを検討し、最適な傾斜計設置位置と点数の提案を行った。その結果は、以下のように要約される。

#### (1) 地表傾斜量の感度解析結果

傾斜量に基づいて描いた等高線の最大伸長方向は、断層の走向方向とよく一致しており、地質構造を反映した結果が得られた。

仮定した体積変化分布に基づき、総揚水量28.8m<sup>3</sup>（揚水量20リットル/分で揚水時間は24時間）とした場合、領域①では、設置可能な4地点全てにおいて傾斜量は感知可能であった。しかし、領域②の場合、4地点全てにおいて傾斜量を感知するためには、3倍以上の総揚水量が必要であった。したがって、揚水試験の影響を感知するためには、総揚水量を86.4m<sup>3</sup>（揚水量20リットル/分で揚水時間は72時間）以上とする必要がある。ただし、総揚水量の増加が得られない場合は、敷地外に設置することが望ましい。

#### (2) 水理地質構造要素の抽出

領域②を未知領域と仮定し、領域①で得られた傾斜量データをもとに、流体体積変化分布の逆解析を行った。その結果、体積変化の中心（揚水地点）が、モデルより200m程度浅い深度に分布する傾向が見られた。このような傾向があるものの、領域内の流体体積変化分布は東側に片寄っており、特に西側1/3に体積変化が起こらない部分が現れている。このことから、揚水の影響を少なくするあるいは遮断するような構造が領域内に存在する可能性を読み取ることができる。したがって、簡易な地質環境モデルをもとにした解析であるが、理論上、水理地質構造を反映した逆解析結果が得られる可能性が高いと判断され、今回の逆解析は実用的であると考えられる。

#### (3) 傾斜計の配置及び設置数について

逆解析による再現性が高くなる最適な傾斜計の配置及び設置数は、研究所用地内の平地で、断層を横切ってほぼ直線上に配置した4地点である、という結論を得た。なお、研究所用地全範囲を対象とした場合では、少なくとも8地点以上設置数を増加しても、逆解析の再現性の向上は得られず、設定した地質環境モデル及び解析領域モデルの条件下では、4～8地点の設置数が望ましいと考えられる。