

## 掘削直後の孔径変化を利用した浅部地殻応力方位測定手法の課題の整理： 地下水等総合観測施設（愛知県～四国）における測定実験結果から

On some problems of a method for shallow crustal stress orientation measurement by using borehole deformation: Results of in-situ measurements at AIST integrated groundwater observation stations, southwestern Japan

木口 努<sup>1</sup>・桑原保人<sup>1</sup>・小泉尚嗣<sup>1</sup>

Tsutomu Kiguchi<sup>1</sup>, Yasuto Kuwahara<sup>1</sup> and Naoji Koizumi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 活断層・地震研究センター (AIST, Geological Survey of Japan, Active Fault and Earthquake Research Center, kiguchi.t@aist.go.jp)

**Abstract:** Measurements of in-situ stress orientations at shallow depths were conducted with a newly developed method at three sites of the integrated borehole observation stations, southwestern Japan. A principle of the method is to monitor creep deformation of a borehole just after drilling in an anisotropic stress field. The orientation of the maximum horizontal compressive stress ( $S_{Hmax}$ ) is determined from a minor axis of a curve of  $\cos 2\theta$  fitted to a deformed shape of borehole cross section. The measurements were successful at four depths at Toyota City, Aichi Prefecture, and at one depth for the other two sites at Anan City (Tokushima Pref.) and Tsu City (Mie Pref.), respectively. At the site in Toyota City, the orientations of  $S_{Hmax}$  are estimated at four depths as ESE-WNW, NNE-SSW and extensional stress field, which show considerably large variations in the interval of only several meters. We thus cannot evaluate an orientation of tectonic stress around this site from the measurement. As for the other two sites, Anan City and Tsu City, both the data show the extension of the borehole radius in whole direction, i.e., tensional stress. However, only one data at the respective site does not seem to give a definitive evaluation of the tectonic stress, because the stress orientations should inherently have certain variability due to fractures or inhomogeneity of rock mass near the measurement points. We also discussed about topography effects on the measurement results and some technical problems found during operations of the new method.

**キーワード:** 地殻応力方位測定, レーザー変位計, クリープ変形, 地形効果, 地下水等総合観測施設  
**Keywords:** crustal stress orientation measurement, laser displacement sensor, creep deformation, topography effect, AIST integrated groundwater observation stations

### 1. はじめに

産総研では、2006年度から、東南海・南海地震の予測精度向上のため、愛知県～紀伊半島～四国の周辺に地下水変化・地殻変動・地震などを観測する多機能の地下水等総合観測施設の整備を進めている。2010年度までに14カ所の整備を順次行ない、2012年度も新たな2カ所（愛媛県新居浜市と愛知県西尾市）を整備中である（例えば、小泉ほか、2009；小泉ほか、2012）。各観測施設では、基本的に深さ600 m, 200 m, 30 mの3つの孔井を掘削し、孔井内に設置した水位計・水温計・地震計・歪計・傾斜計によりリアルタイムで各種の観測を実施している。また、各観測地点の応力状態の情報はその地域のテクトニクスを理解するために基本となる重要なデータと考えられることから、可能な限り水圧破砕や応力解放法、その他の方法で応力測定も実施している。一方、我々は地殻浅部の応力方位を簡便に測定す

る手法と装置を開発し、国内の様々な場所や中国の活断層周辺で本手法を適用することによって手法の実証と各地域の応力場の評価を行ないその有効性を示してきた（例えば、木口ほか、2010；木口・桑原、2010；Kuwahara *et al.*, 2012）。ここでは、上記観測地点の浅部応力場を把握することを目的として、14の観測施設のうち、応力測定に適した地質である愛知県豊田市内の観測点（以下、豊田神殿地点）、徳島県阿南市内の観測点（阿南桑野地点）及び三重県津市内の観測点（津安濃地点）の3観測施設において、応力方位測定を実施した。処理・解析が可能となる測定データは、豊田神殿地点で4深度、阿南桑野及び津安濃の両地点で各1深度取得できた。これらの測定データから各地点・各深度の応力方位をそれぞれ求めた。また、浅部で応力測定する場合にノイズの一因となる地形効果の影響を3次元有限要素法により評価した。

しかし、今回の解析においては、同一地点の数 m の深度区間で応力方位が大きく変化することや、測定データが引張り応力場を示唆することがあり、各地点でテクトニックな応力場を求めることは困難であった。また、3つの深度の測定作業中に孔内水が懸濁し、測定を中止したことがあった。このように、今回の測定では必ずしもテクトニックな応力方位を得るまでには至らなかったと考えるが、本手法による測定に限らず、今後一般的に応力測定を実施する上で著者以外にも共有すべき経験も含まれていると考え、3地点で得られた結果を示すとともに、本手法の問題点や応力方位を求める際の課題などをまとめておく。

## 2. 応力方位測定

### 2.1 測定手法

用いた手法については、桑原・木口 (2006) や木口ほか (2010) に詳しく述べられている。以下、要点をまとめると次のようになる。1) 異方的な応力場の岩盤に孔井を掘削すると、岩石の粘性の効果によって、掘削直後から孔井は異方的にクリープ変形をする。2) 孔井断面の楕円状の異方的な変形を直接計測することにより、断面形状の短軸方向から最大水平圧縮応力 ( $S_{Hmax}$ ) の方位を求める。本手法を用いる利点の1つは、水圧破碎法や応力解放法などの既存の手法に比べて非常に簡便で安価に測定できることである。なお、浅部の応力場は地形の影響や地殻表面から受ける熱応力などによる擾乱が大きい可能性が指摘されている (例えば、Engelder and Sbar, 1984)。しかし、地形による影響は4章で述べるように理論的に検討可能であり、また地表面から受ける熱応力の擾乱も Sbar *et al.* (1984) が示すように深さ 6 m 程度で深ならば、その影響は無視できるほど小さいと言える。

本手法で用いる装置は掘削直後の孔井のクリープ変形を測定するために開発され、その概念図 (木口ほか, 2010) を第1図に示す。孔井内に挿入する地中装置は、主に、レーザー変位計とその回転機構、装置の固定機構、傾斜計付きの方位測定機構からなる。レーザー変位計はモーターにより孔軸を中心に連続回転し、円周上 360° にわたる孔径を非接触で連続的に測定し、掘削直後のクリープ変形を計測する。レーザー変位計は1秒で1°の角速度で連続的に回転し、1周するのに6分かかる。木口ほか (2010) は、室内試験により本測定装置全体の分解能が約 0.7  $\mu\text{m}$  であり、この分解能により浅部の岩盤及び応力場の条件から期待されるクリープ変形の測定が可能であることを示している。測定深度は最大 27 m 程度、測定時間は掘削直後から数時間程度以上としている。最小の測定深度については、木口ほか (2010) は、Sbar *et al.* (1984) の結果を参考に、深度 10 m 以深を

基準として測定するとしている。また、測定される応力方位は測定場所近傍の様々な大きさの亀裂や物性の不均一によって影響を受け、測定深度によってある程度のばらつきがあると予想され、できるだけ多くの深度でデータを取得することが重要であると考えている。本装置を適用する孔井の掘削径は、できるだけ掘削費用を抑えるために小口径が望ましいことやレーザー変位計の大きさと測定可能な焦点距離、国内の標準的な掘削ビット径等を考慮し、116 mm または 123 mm とした。本研究の測定において、豊田神殿地点の掘削径は 123 mm であり、阿南桑野と津安濃の2地点は 116 mm である。

### 2.2 測定地点の選定

応力方位測定を実施した観測施設、すなわち、豊田神殿地点 (愛知県豊田市)、阿南桑野地点 (徳島県阿南市)、津安濃地点 (三重県津市) の位置を第2図に示し、3地点の座標値を第1表にまとめる。また、各地点周辺の地形の特徴については、第4章で詳しく説明する。第2図には、測定を実施しなかった観測施設の位置も示している。3地点とも、観測施設の3本の孔井のうち、最も浅い (深度 30 m または 50 m) 孔井を掘削するときに測定を行った。

観測施設は全部で 14 地点ありその中から上記3地点で測定を実施したのは、深度約 10 m 程度から硬質で亀裂の少ない基盤岩が出現することが掘削前に予想されていたからである。軟岩や風化層、破碎帯などでは、テクトニックな応力蓄積が期待できないため、地表付近の浅部から測定に適した硬岩が出現することが測定を行う条件となる。一方、測定を行わなかった 11 地点のうち5地点では、当初、浅部から基盤岩が出現することが期待され測定を予定していたが、施設敷地内で先に別の孔井を掘削した際に浅部では軟岩や破碎区間等が連続することが判明したため、測定を実施しなかった。

### 2.3 測定

掘削と測定の作業は原則として以下の手順に従った。まず深度 10 m よりも深く掘削し、その深度から回収したコア試料を観察して亀裂が少ないなど応力測定に適した岩盤か否か判断する。適した岩盤であれば、その深度で応力方位を測定する。測定を終了した後、測定装置を孔井から回収し、さらに 1 m 以上掘進を行なう。掘進後のコア観察において、岩盤が測定に適しないと判断した場合には、その深度での測定は行わず掘進を続ける。このような掘削と測定を繰り返し、1孔井の複数の深度で測定を行う。本手法によるこれまでの測定の経験から、応力方位を求めるためには2~3時間の測定で十分であることがわかっており (例えば、木口・桑原, 2006; 木口・桑原, 2010)、本研究でも日中の測定時間は2~3時間とした。なお、夕方から測定を開始した場合には、

夜間は掘削作業を行わないため測定を翌朝まで継続して行い、測定時間は12時間以上である。掘削直後のクリープ変形を測定するために、掘削が終了したら可能な限り速やかにコア観察と測定装置の降下を行い、測定を開始した。測定のための現地作業は、豊田神殿地点では2008年2月23～24日、阿南桑野地点では2008年1月10～11日、津安濃地点では2009年5月20～22日に実施した。

豊田神殿地点の地質は、コア掘削を開始した深度約4mから、新鮮で亀裂の少ない領家花崗岩類のトータル岩であり、いくつかの深度で貫入岩(アプライト)が見られる(北川ほか, 2009)。深度13.40m, 14.35m, 15.72m, 16.55mの4深度で測定したが、このうち深度15.72mは貫入岩であり、残りの3深度はトータル岩であった。阿南桑野地点は、四万十帯北帯の砂岩と頁岩の互層であり、深度9m付近から硬岩が出現した。測定した2深度のうち、深度14.70mは砂岩、深度18.16mは頁岩に相当する(木口ほか, 2009)。津安濃地点の孔井地質は、領家変成帯を構成する花崗閃緑岩と片麻岩からなり、深度約10m以深で硬質となり、測定した3深度のうち21.85mは花崗閃緑岩、他の2深度(23.85mと26.22m)は泥質片麻岩である。3地点で測定した深度のコア写真の例を第3図に示す。

応力方位測定の前記録の例として、豊田神殿地点の深度13.40mで3時間連続して測定した結果の一部を第4図に示す。図(a)では1周, 5周, 10周, 20周, 30周で測定した値をそれぞれ重ねて表示している。また、図(b)～(d)に、1周, 10周, 30周の各周の値を参考のために示す。30周目が3時間後に相当する。各周回における2°間隔の測定値は、レーザー変位計が1.5°回転する間に7500回測定した孔壁までの距離をスタックした値である。第4図の半径方向の座標軸の値は58～64mmとしており、孔井断面図を直接示しているのではないことに注意されたい。また、孔井と地中装置の中心が一致せず0.5mm程度偏心していることがわかる。第4図(a)に示した5つの周回分のデータは、このスケールだとほぼ重なることになり、安定した測定が行われたことを意味している。

### 3. 測定結果

#### 3.1 直径データの経時変化の特徴

応力方位を求める解析を行なう前に、測定データの連続的な時間変化を確認するために、孔径値を用いて、方位30°毎の孔井直径の経時変化のグラフを作成した。3地点の各深度における結果を第5図(a)～(h)に示す。第5図の各図中の実線は、点で示す測定値の移動平均を表している。移動平均を求める時に、始点は0に固定し2番目(2周目)の値を求める時は3個、それ以降は5個のデータを用いて、

移動平均を3回繰り返した。まず、第5図(a)に示す豊田神殿地点の深度13.40mの測定結果を見ると、各方位の直径データの時間変化にばらつきがあるが、測定開始から方位毎に異なる縮みまたは若干の伸びを示すとともに、測定の初期段階で相対的に大きく変形する特徴が確認できる。また、N90°E方向に最も縮み、その方位から離れるに従い縮み量は小さくなり、それと直交するNS方向に少しの伸びを示すことから、孔井断面は楕円状の変形をしていると予測できる。

第5図(b)～(f)は、豊田神殿地点のその他の結果である。なお、(b)は深度14.35mの全15時間、(c)は図(b)の最初の2時間の結果、(d)は深度15.72m、(e)と(f)は16.55mにおける全記録と最初の2時間の結果を示してある。これらの図から、深度14.35mと16.55mは、深度13.40mと同様に、概ね方位毎に異なる縮みまたは若干の伸びの変形を示していることがわかる。なお、図(b)では、特に測定から3時間程度のところと10時間程度のところで、また図(e)では9時間程度のところで、経時変化の傾向が大きく変化するように見えるが、この変化の原因は現在明らかでない。図(d)では、上記の3深度の結果と異なり、全方位の直径が時間とともに伸びを示しており、孔井断面が全体に拡大することを示している。

第5図(g)、(h)は、阿南桑野地点の深度14.70m、津安濃地点の深度26.22mの結果であり、これらは図(d)と同様、全方位の直径が時間とともに伸びを示している。なお、阿南桑野地点の深度14.70mでは約210°の方位範囲のみでの測定となったため、図(g)に示した直径データの方位は、30°間隔でなく、表示可能な方位を選んでいる。

#### 3.2 各地点の応力方位

ここではまず測定データから応力方位を求める際のデータ処理方法を説明する。孔径の相対変化量を求めるために対象とするデータは、掘削直後に測定を開始した時の孔径値と、測定開始から2時間経過した時の孔径値との差を取ることとする。豊田神殿地点の3深度(13.40m, 14.35m, 16.55m)における測定時間は2時間以上あるが、第5図に示す全測定時間中の直径データの変化を見ると、測定から2時間程度では各方位の変形の傾向は概ね一定であるが、それ以上では場合によっては、原因不明の変動が見られることから、孔井断面の変形を解析するデータとして2時間程度が適切であるとした。原則として、測定開始時の孔径値は測定の最初の3週の平均値とし、2時間経過時の孔径値は最後の5週の平均値とした。本手法の原理では、孔径の相対変化の方向依存性は、 $S_{Hmax}$ 方位と孔径のなす角度を $\theta$ とすると、 $\cos 2\theta$ に比例する。従って、次に、孔径の相対変化量に $\cos 2\theta$ の関数の曲線を最小二乗法で近似する。

近似した曲線の短軸方向が  $S_{Hmax}$  の方位となる。本手法において、測定の絶対値ではなく初期測定値からの相対的な変化量を用いる理由は、掘削の過程で孔井そのものが楕円になる可能性があることや、測定装置が孔井に対して傾斜して設置される可能性があり、その場合の初期測定による孔井断面は楕円となることなどを考慮したためである。

豊田神殿地点の深度 13.40 m の測定 2 時間での相対変化量を第 6 図 (a) に示す。この相対変化量を見ると、方位角  $10\sim 20^\circ$  程度の短波長の変動も含まれるが、楕円状の変形が比較的顕著である。孔径の相対変化量に  $\cos 2\theta$  の曲線を近似した結果を第 6 図 (b) 中の青色の曲線で示す。近似した曲線の短軸の方向から、この深度の応力方位はおおよそ ESE-WNW であると考えられる。また、応力方位の信頼性の指標として、木口・桑原 (2010) や Kuwahara *et al.* (2012) と同様に、近似した曲線の扁平率と、最小二乗法により求めた方位の誤差の 2 つのパラメータを用いることにする。扁平率は、長軸の長さ  $a$ 、短軸の長さ  $b$  として、 $(a-b)/a$  で定義される。すなわち、扁平率が大きいほど、また方位決定の誤差が小さいほど結果の信頼性が高いと言える。扁平率と方位誤差は各図の右下に記入し、同時に  $S_{Hmax}$  の方位、その誤差と扁平率を第 1 表にまとめる。他の深度や測定値点の結果についても、それぞれ同様に第 6 図 (c)~(g) に示す。

豊田神殿地点の深度 14.35 m (第 6 図 (c)) の結果は NNE-SSW と得られた。この図をよく見ると南側の孔径の変化量は少ないが、北側の孔径が扁平に変化する様子を示し、扁平率や方位決定誤差は同地点の 13.4 m の場合と有意な差は無いようである。第 6 図 (d) に示す深度 15.72 m の孔径変化は、第 5 図 (d) の直径の経時変化のグラフからもわかるように全周方向で拡大している。従ってこの深度は引張り応力場と解釈されるため、このような場合には短軸方向を点線で示すことにした。なお、この深度での扁平率は他の深度に比べ非常に小さい値であり、ほぼ等方的な引張りの場であると言える。深度 16.55 m では、第 6 図 (e) に示すように相対変化量に近似した曲線の短軸方向はおおよそ ESE-WNW 方向となり、深度 13.40 m の結果と同じく応力方位は ESE-WNW と求められる。ただし、深度 16.55 m の結果は、深度 13.40 m の結果に比べて短波長の変動が大きく、方位決定誤差が大きくなっている様子がわかる。

以上、豊田神殿地点の 4 深度の測定から推定された応力方位は、ESE-WNW、NNE-SSW やほぼ等方的な引張りの応力場等、数 m の深度区間で大きく異なることがわかる。ちなみに、圧縮場が得られた 3 深度の  $S_{Hmax}$  の方位について、楕円の扁平率と誤差によるデータの信頼度を考慮した表示として、それぞれ、第 7 図 (a), (b) に赤線で重ねて示す。(a) と (b) のそれぞれの線分の長さは、扁平率に比例、方位誤差に反比例している。この図から、圧縮方位として

は ESE-WNW と NNE-SSW の 2 つの方位が卓越することが分かるが、2 つの方位の信頼性に有意な差を求めることは困難であると考えられる。なお、第 7 図中の黒点線は、次章で説明する各測定点の地形効果による理論的な  $S_{Hmax}$  の方位である。

第 6 図 (f) に示す阿南桑野地点の深度 14.70 m の測定では、孔内装置のセントライザが間違っただけで掘削孔井よりも大きい孔径に対応する設定となっていたために、孔井と装置との偏心が大きくなり、約  $210^\circ$  の範囲のみの測定となった。この孔径変化の特徴は、測定された約  $210^\circ$  の範囲全体で孔径が約  $40\ \mu\text{m}$  拡大しており、引張りの応力場を示す。また第 6 図 (g) に示す津安濃地点の深度 26.22 m でも、全周方向で孔径が拡大する形状であり引張りの応力場を示している。一方、第 4 章で説明する地形効果による影響はこれらの地点では圧縮応力場となるなど、引張り応力場となる原因は明らかではない。またこれらの地点ではそれぞれ 1 深度での測定結果しかなく、そのみで信頼性を議論することは不可能と考える。

#### 4. 地形効果による浅部応力場への影響

浅部で応力測定する時には、測定地点周辺の起伏のある地形の自重による応力の擾乱である地形効果が測定結果に影響を与える可能性が指摘されている (例えば、中島, 1982 ; Liu and Zoback, 1992)。ここでは、3 つの測定地点周辺の実際の地形を用いて、3 次元有限要素法によりこれらの地形効果の影響を評価する。測定地点周辺の地形データとして、地球観測衛星センサ ASTER により取得された全球 3 次元地形データ (ASTER GDEM) の約 30 m グリッド間隔の DEM (数値標高モデル) を用いた。その DEM から計算に用いる任意の領域を切り出して地形を含む有限要素モデルを作成し、有限要素法コード「Soil Plus」(伊藤忠テクノソリューションズ (株) 製) を用いて応力場の計算を行った。モデルの作成や応力場の計算方法の詳細については、木口・桑原 (2010) と同じ手法を用いたのでこれを参照されたい。

測定地点近傍の谷や山の斜面などの特徴的な地形ユニットが含まれるように、モデル化の領域は測定地点を中心とする  $4 \times 4\ \text{km}$  とし、深さは 4 km とした。有限要素法の境界条件は、モデルの 4 つの側面と底面は面外方向の変位成分を固定し、地形面である上面は全成分が自由である。モデルの要素分割について、深度方向にモデルを 5 層に分割し、各層の深度区分は浅部から順に、 $0\sim 25\ \text{m}$ ,  $25\sim 75\ \text{m}$ ,  $75\sim 225\ \text{m}$ ,  $225\sim 975\ \text{m}$ ,  $975\sim 4000\ \text{m}$  とした。このうち、第 1 層では深度方向に要素を 5 等分し、それ以外の各層は 3 等分した。また、水平方向の要素は 50 m 間隔の等分割である。従って、モデルを  $80(\text{縦}) \times 80(\text{横}) \times 17(\text{深さ})$  の約 11 万要素に分割した。3 地点のモ

デルの各要素の物性値として、第2表に示すP波速度、ポアソン比、密度を与えた。P波速度について、深度600mまでは各観測施設の孔井で実施した速度検層の結果を参照し、それ以深は次第に速くなる値とした。浅部の密度を除いて、ポアソン比と密度は一定と仮定した。

3地点において計算する領域を第8図に、その領域のDEMから作成した3地点のモデル形状を第9図に、それぞれ示す。第9図のモデルを用いて自重による応力場を計算した結果の例として、豊田神殿地点で地表からの深度17.5mにおける $S_{xx}$ ,  $S_{yy}$ ,  $S_{xy}$ (せん断応力)の分布を第10図に示す。図中の色分布で寒色系は圧縮を、暖色系は引張りを意味する。第10図に見られる典型的な地形における応力の特徴として、谷筋に直交及び平行方向の応力場が共に引張りとなり、絶対値は直交する方向が大きいということが挙げられる。また、山地の傾斜地では傾斜方向に圧縮場となっている。谷部で水平方向の引張り応力が生じることは、これまで解析解によって予測されており(例えば、Savage *et al.*, 1985), また、Amadi and Stephansson (1997)は、谷表面付近に見られる岩盤緩みや開口性節理などの実例が谷の引張り応力を示唆するとしている。

3地点の深度17.5mにおける $S_{xx}$ ,  $S_{yy}$ ,  $S_{xy}$ の応力値を計算し、それらから地形効果による $S_{Hmax}$ の値と方位、 $S_{Hmin}$ の値をそれぞれ算出した結果を第3表にまとめる。また、水平主応力の方位を第8図に示す。図中の方位を示す線分の長さは応力の絶対値に比例する。3地点とも2つの主応力がともに圧縮である。この結果は、3地点の周辺地形の特徴に対応して、傾斜面による地形効果が現れていると考えられる。つまり、3地点とも傾斜面に位置し、その傾斜方向に $S_{Hmax}$ が生じ、傾斜面の勾配の大きさに比例して $S_{Hmax}$ も大きな値となると考えられる。豊田神殿、阿南桑野、津安濃地点の地形効果の $S_{Hmax}$ の値は、被り圧( $S_{zz}$ )に比べて、それぞれ1.15倍、0.5倍、0.88倍である。また、 $S_{Hmax}$ の方位は、それぞれ、およそESE-WNW, ENE-WSW, ENE-WSWとなる。

## 5. 議論

ここでは、本手法による現地でのデータ取得上の問題点について整理し、次に、測定データから応力方位を推定する際の課題である、方位のばらつき及び引張り応力場を示唆するデータに関して考察を行なう。また、地形効果が測定から求めた応力方位または近似曲線の短軸方向に与える影響について議論する。

### 5.1 データ取得における問題点

ここでは、今回の測定のうち、データの処理と解析が可能となる品質の測定ができなかった事例について説明する。使用する地中装置は孔内水がある孔

井内に降下し、レーザー変位計により孔径を測定する。孔内水が懸濁していると、レーザーは懸濁水を透過することができず孔径を測定することができない。また、懸濁水中の浮遊物でレーザーが反射する場合には正しく孔径値を測定できない。このため、孔井を掘削する時には泥水ではなく清水を使用し、さらに、測定する前に孔内に清水を循環することにより洗浄を行っている。本手法によるこれまでの測定において、清水による掘削と孔内洗浄により、正常に孔径を計測している。しかし、阿南桑野地点の深度18.16m、及び津安濃地点の21.85mと23.85mの測定において、測定開始直後は孔径が正常に測定できたが、数十分後から徐々に孔径が測定できなくなる現象が見られた。測定から1時間以内に孔径値が全く測定できなくなった場合もあった。測定開始から徐々に測定ができなくなることや地上に回収した装置にスライム状の泥や粘土、微粒子の砂などが多く付着していたことから、測定不能となった原因は孔内の沈殿物による孔内水の濁りであると推測した。これらの測定深度の上部に破碎や亀裂の多い区間があったため、孔内洗浄を行った後でもこれらの区間から泥や粘土などが孔内に出て、測定深度付近に沈殿または浮遊したと考えられる。孔径が測定できなくなったデータを第11図に例示する。第11図(a)~(d)は、津安濃地点の深度23.85mの測定において、2, 4, 6, 8周目の方位 $N4^{\circ}E$ から $N5.5^{\circ}E$ の $1.5^{\circ}$ の範囲で7500回測定した孔径をそれぞれ示している。第11図(a)の2周目では7500個のデータが取得できているが、周回が増えるにつれて測定できるデータが減少している様子がわかる。

通常は、このような浮遊物や沈殿物を取り除くために測定前の孔内洗浄を行っているが、破碎区間の孔壁内部にある泥や粘土などは洗浄を長時間継続しても取り除くことは困難な場合があると思われる。今回の豊田神殿地点やこれまでの測定では孔内水の懸濁の問題は生じていなかった。測定区間の上部に破碎区間等が存在する場合にはケーシングで孔壁を保護することにより、孔内水の懸濁の問題は生じないと考えられる。ケーシングによる保護の作業が困難な時の対策として、浮遊物は孔底から浅い方へ順に沈殿し孔内の懸濁濃度も孔底付近から浅い方へ時間の経過に従い高くなると推定できることから、測定深度よりも数m深く掘削し、孔底付近に浮遊物が沈殿する区間を設けることが有効であると考えられる。実際に、津安濃地点の深度26.22mの場合では、測定深度よりも約3m深く掘削することによって、沈殿物による濃度の高い懸濁が測定深度に達する前に2時間の測定を行うことができた。

### 5.2 測定結果のばらつきと引張りの応力場について

本手法により豊田神殿地点の4深度で求めた応力方位が数mの深度区間で大きく異なった。これまで

に本手法を適用した木口・桑原 (2010), Kuwahara *et al.* (2012)においても, 1本の孔井の数 m の深度間隔で複数の深度で測定しており, 実際に求められる応力方位が大きく異なる場合もあった. 短い深度区間で応力方位が変化することには, 例えば, 測定深度付近の亀裂の存在などによる岩盤の不均質が考えられるが, 応力方位の変化と不均質の関係を明らかにすることは今後の課題である. 木口・桑原 (2010) や Kuwahara *et al.* (2012) は, 1地点で複数の深度で応力方位を求めた時には, 今回と同様に, 孔径の相対変化量に近似した曲線の扁平率や求めた方位の標準偏差などを用いて得られた応力方位の信頼性を評価し, 信頼性を考慮することによりその地点のテクトニックな応力方位を推定している. 本論文においても得られた方位の信頼性を考慮して複数の深度の応力方位を重ねて表示したが (第7図), 豊田神殿地点では, ESE-WNW と NNE-SSW のどちらも同程度の信頼性であると思われる. テクトニックな応力方位を決定できなかった. 応力方位がばらついて求められることについては, これまで適用した結果も含めて, コアで観察される既存亀裂や地層境界と測定深度の位置関係などを検討し, 得られる方位の解釈について考察を進める必要がある.

本手法から応力方位を求める時のもう一つの課題は, 孔径の相対変化量から得られる孔井断面図がほぼ全周で拡大し引張り応力場がデータから示唆された場合に, 求めた応力方位とテクトニックな応力場の関係が明らかでなく, 測定からテクトニックな応力方位を推定することが困難となることである. これまでの適用例では, 木口・桑原 (2010) が1地点で4深度測定したときに, 1つの深度で引張り応力場が示唆されたことがあった. その深度で求めた方位は, 他の深度の圧縮応力場から得られた方位と整合するという結果であった. 今回の阿南桑野と津安濃地点では, 1深度の測定だけであるので, 応力方位を求めることができなかった. 3地点で測定データが引張り応力場を示すのは, 地形効果の影響によるものではないことは有限要素法の計算により明らかとなったが, その原因の特定は現時点ではできていない. なお, 3深度の測定において, 地中装置内の傾斜計の値が測定中に変動していないことから, 孔井内の装置の固着の問題による見掛け上の孔径拡大を示すものではないと考える.

### 5.3 地形効果の影響について

最後に, 実際の地形を用いて計算した地形効果が, 測定から得られた  $S_{Hmax}$  の方位に及ぼす影響について考察する. 豊田神殿地点では, ESE-WNW と NNE-SSW の2つの応力方位が得られたが, このうち, ESE-WNW 方位と地形効果による方位である  $N120^{\circ}E$  との方位差は約  $5\sim 15^{\circ}$  と小さい. また, 地形効果による  $S_{Hmax}$  の値は, 被り圧の 1.15 倍 (約 0.6 MPa) で

あり, 国内 100 点以上から得られた浅部の最大水平応力が被り圧の 0.8~1.5 倍程度であること (Yokoyama *et al.*, 2003) を考慮すると, この地点の地形効果はテクトニックな応力と同程度の大きさを持つ可能性がある. 地形効果による影響が無視できない場合, テクトニックな応力の方位は, 測定から得られた ESE-WNW より, 地形効果による方位から離れるような反時計回りに回転したものであるはずである. 本測定による  $S_{Hmax}$  の絶対値は現時点では得られていないが, 第5図に示す直径の異方的な経時変化のデータに粘弾性体モデル (例えば, Cristescu, 1989) を適用することにより主応力値を推定することができる. この主応力値を用いれば, 測定した応力方位から地形効果の影響を取り除いたテクトニックな応力の方位を定量的に求めることが可能となる. 一方, 豊田神殿地点の応力方位を NNE-SSW とする場合には, 地形効果による応力方位と約  $70^{\circ}$  異なることから, 地形効果の影響は無視できるくらい小さいと言える. また, 阿南桑野と津安濃の地点では, 測定から得られた近似曲線の短軸の方向と地形効果による  $S_{Hmax}$  の方位はいずれも  $50^{\circ}$  以上異なっていることと, 地形効果による応力の絶対値が小さいことから, 2地点で得られた方向に地形効果が与える影響は非常に小さいと推測される.

## 6. まとめ

産総研で整備を進めている愛知県～紀伊半島～四国周辺の地下水等総合観測施設のうち, 愛知県豊田市内, 徳島県阿南市内, 三重県津市内の3地点において, 我々が開発してきた手法を用いて深度 20 m 程度までの浅部応力方位測定を実施した. 阿南市の地点の1深度と津市の地点の2深度では, 孔内水の懸濁によって測定が不可能になったが, 豊田市で4深度, 阿南市と津市で各1深度の合計6深度で解析が可能な品質のデータを取得することができた. 豊田市では, 4深度の測定結果から得られた応力方位は数 m の深度区間で大きく変化する結果となった. 阿南市と津市では引張り応力場を示唆する測定データが得られたが, それぞれ1深度でのデータしかないためテクトニックな応力方位については確定的な結論は得られなかった.

謝辞 浅部応力方位測定を実施するに際して, 観測施設の担当者である活断層・地震研究センター北川有一博士, 高橋 誠氏, 及び観測施設工事を実施した株式会社日さく, 株式会社エオネックスに協力していただきました. 浅部応力方位測定作業は応用地質株式会社に依頼しました. 調査地域周辺の DEM データは, ASTER GDEM サイト (<http://gdem.ersdac.jspacesystems.or.jp/>) からダウンロードして使用しました. 査読者である活断層・地震研究センター増田

幸治博士からは有益な助言を頂き本稿を改善することができました. ここに記して深く感謝します.

## 文 献

- Amadei, B. and Stephansson, O. (1997) *Rock Stress and its Measurement*, Chapman & Hall, London, 490p.
- Cristescu, N. (1989) *Rock Rheology*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 336p.
- Engelder, T. and Sbar, M.L. (1984) Near-surface in situ stress: Introduction, *J. Geophys. Res.*, 89, 9321-9322.
- 木口 努・桑原保人 (2006) 掘削直後の孔径変化を利用した浅部応力方位測定法の警固断層周辺への適用, *活断層・古地震研究報告*, No.6, 153-161.
- 木口 努・高橋 誠・小泉尚嗣・南澤正幸・村中英寿・香月 誠・赤澤司史・遠田 涉 (2009) GSJ コア阿南桑野観測点資料, *地質調査総合センター研究資料集*, 507.
- 木口 努・桑原保人・佐藤凡子・横山幸也 (2010) 浅部応力方位測定のためのレーザー式孔径変化測定装置の開発, *地質調査研究報告*, 61, 337-350.
- 木口 努・桑原保人 (2010) 松本盆地東縁断層北部周辺の浅部地殻応力方位測定, *活断層・古地震研究報告*, No.10, 43-64.
- 北川有一・佐藤 努・小泉尚嗣・中山伸朗・伊藤健二・鈴木悠爾 (2009) GSJ コア豊田下山観測点資料, *地質調査総合センター研究資料集*, 513.
- 桑原保人・木口 努 (2006) 地殻応力測定法, *検査技術*, 11, No.3, 28-33.
- Kuwahara, Y., Kiguchi, T., Lei, X., Ma, S., Wen, X. and Chen, S. (2012) Stress state along the Anninghe-Zemuhe fault zone, southwestern China, estimated from an array of stress orientation measurements with a new method, *Earth Planets Space*, 64, 13-25.
- 小泉尚嗣・高橋 誠・松本則夫・佐藤 努・大谷 竜・北川有一・板場智史・梅田康弘・武田直人・重松紀生・桑原保人・佐藤隆司・今西和俊・木口 努・関 陽児・塚本 斉・山口和雄・加野直巳・住田達哉・風早康平・高橋正明・高橋 浩・森川徳敏・角井朝昭・下司信夫・中島 隆・中江 訓・大坪 誠・及川輝樹・干野 真 (2009) 東南海・南海地震予測のための地下水等総合観測点整備について, *地質ニュース*, 662, 6-10.
- 小泉尚嗣・佐藤隆司・北川有一・佐藤 努・高橋 誠・松本則夫・板場智史・梅田康弘・武田直人・桑原保人・今西和俊・木口 努・山口和雄 (2012) 愛媛県新居浜市と愛知県西尾市における東南海・南海地震予測のための地下水等総合観測点整備, *GSJ 地質ニュース*, 1, 188-190.
- Liu, L. and Zoback, M. (1992) The effect of topography on the state of stress in the crust: Application to the site of the Cajon Pass scientific drilling project, *J. Geophys. Res.*, 97, 5095-5108.
- 中島 健 (1982) 地殻応力場に及ぼす地形の影響 (I), *地震*, 35, 591-606.
- Sbar, M.L., Richardson, R.M., Flaccus, C. and Engelder, T. (1984) Near-surface in situ stress, 1. Strain relaxation measurements along the San Andreas fault in southern California, *J. Geophys. Res.*, 89, 9323-9332.
- Savage, W.Z., Swolfs, H.S. and Powers, P.S. (1985) Gravitational stresses in Long Symmetric Ridges and Valleys, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 22, 291-302.
- Yokoyama, T., Kanagawa, T., Ishida, T., Tanaka, M. and Ogawa, K. (2003) Regional in-situ stress states in Japan based on measurements, *Proc. of the 3rd International Symposium on Rock Stress*, 335-341.

(受付: 2012年10月29日, 受理: 2012年11月5日)

第 1 表. 応力方位測定的位置及び測定結果.

Table 1. Summary of site parameters and measurement results.

| Site           | Latitude (N)  | Longitude (E)  | Elevation above sea level (m) | Measurement Depth (m) | SHmax orientation | Error of the orientation | Flattening of the fitted curve (%) | Remarks for incomplete measurement | Stress field indicated from measurement |
|----------------|---------------|----------------|-------------------------------|-----------------------|-------------------|--------------------------|------------------------------------|------------------------------------|---|
| Toyota-Shinden | 35°02' 29.23" | 137°21' 27.52" | 480                           | 13.40                 | N115.3°E          | 4.4°                     | 1/81.0                             | —                                  | compressive                             |
|                |               |                |                               | 14.35                 | N10.3°E           | 2.7°                     | 1/108.4                            | —                                  | compressive                             |
|                |               |                |                               | 15.72                 | —                 | —                        | —                                  | —                                  | tensional                               |
|                |               |                |                               | 16.55                 | N104.0°E          | 12.5°                    | 1/150.0                            | —                                  | compressive                             |
| Anan-Kuwano    | 33°51' 57.59" | 134°36' 16.51" | 35                            | 14.70                 | —                 | —                        | —                                  | —                                  | tensional                               |
|                |               |                |                               | 18.16                 | —                 | —                        | —                                  | Borehole water was muddy           | —                                       |
| Tsu-Anou       | 34°47' 13.66" | 136°24' 06.45" | 162                           | 21.85                 | —                 | —                        | —                                  | Borehole water was muddy           | —                                       |
|                |               |                |                               | 23.85                 | —                 | —                        | —                                  | Borehole water was muddy           | —                                       |
|                |               |                |                               | 26.22                 | —                 | —                        | —                                  | —                                  | tensional                               |

第 2 表. 有限要素法の計算モデルの各要素に与えた物性値. (a) 豊田神殿地点, (b) 阿南桑野地点, (c) 津安濃地点.

Table 2. Physical constants applied to each element of the finite element method. (a) for the Toyota-Shinden site, (b) for the Anan-Kuwano site, (c) for the Tsu-Anou site.

(a)

| Depth (km)  | Vp (km/s) | Poisson's ratio | Density (g/cm <sup>3</sup> ) |
|-------------|-----------|-----------------|------------------------------|
| 0 ~ 0.025   | 3.0       | 0.25            | 2.6                          |
| 0.025 ~ 0.2 | 4.0       | 0.25            | 2.7                          |
| 0.2 ~ 1     | 4.5       | 0.25            | 2.7                          |
| 1 ~ 2       | 5.0       | 0.25            | 2.7                          |
| 2 ~ 4       | 5.5       | 0.25            | 2.7                          |

(b)

| Depth (km)  | Vp (km/s) | Poisson's ratio | Density (g/cm <sup>3</sup> ) |
|-------------|-----------|-----------------|------------------------------|
| 0 ~ 0.025   | 3.0       | 0.25            | 2.6                          |
| 0.025 ~ 0.1 | 4.0       | 0.25            | 2.7                          |
| 0.1 ~ 0.2   | 4.5       | 0.25            | 2.7                          |
| 0.2 ~ 1     | 5.0       | 0.25            | 2.7                          |
| 1 ~ 2       | 5.5       | 0.25            | 2.7                          |
| 2 ~ 4       | 6.0       | 0.25            | 2.7                          |

(c)

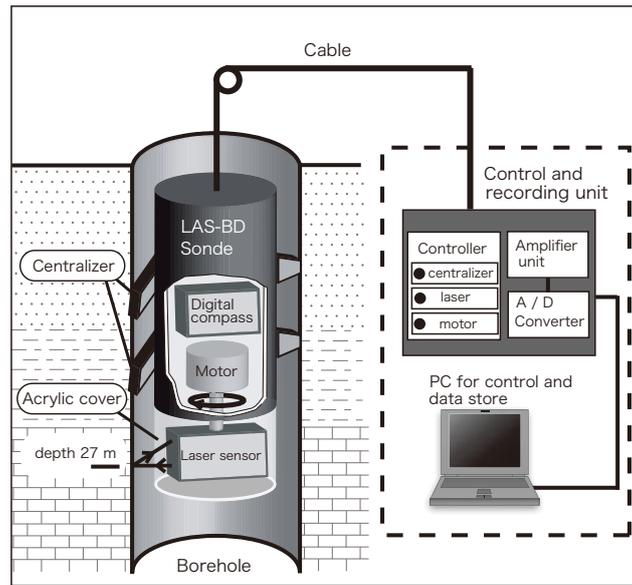
| Depth (km)  | Vp (km/s) | Poisson's ratio | Density (g/cm <sup>3</sup> ) |
|-------------|-----------|-----------------|------------------------------|
| 0 ~ 0.025   | 3.0       | 0.25            | 2.6                          |
| 0.025 ~ 0.2 | 4.0       | 0.25            | 2.7                          |
| 0.2 ~ 1     | 4.5       | 0.25            | 2.7                          |
| 1 ~ 2       | 5.0       | 0.25            | 2.7                          |
| 2 ~ 4       | 5.5       | 0.25            | 2.7                          |

第3表. 有限要素法で計算した3地点の, 深度17.5 mにおける地形効果による最大水平主応力の値と方位及び最小主応力の値.

Table 3. Stresses and the orientations of  $S_{Hmax}$  and  $S_{Hmin}$  at a depth of 17.5 m calculated from FEM models at 3 sites.

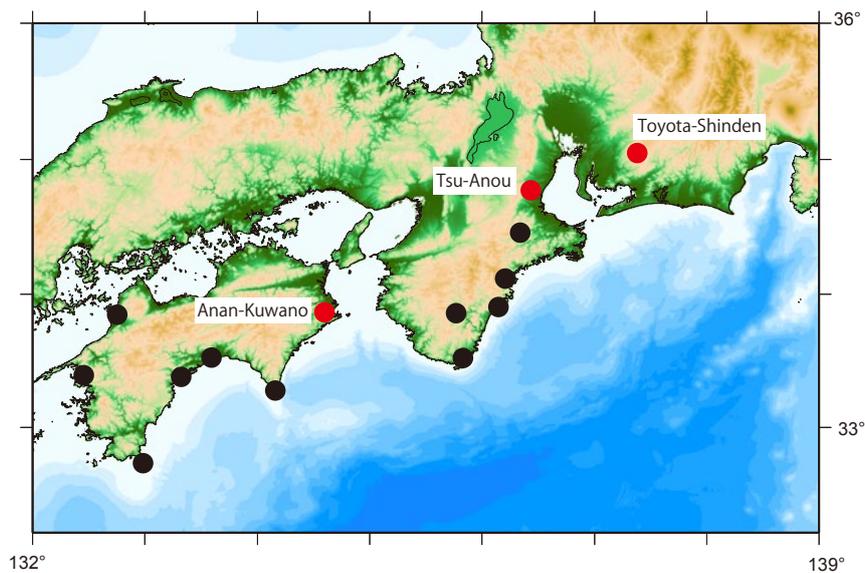
| Site           | $S_{zz}$ (MPa) | $S_{Hmax}^*$ (MPa) | $S_{Hmin}^*$ (MPa) | $S_{Hmax}$ orientation |
|----------------|----------------|--------------------|--------------------|------------------------|
| Toyota-Shinden | 0.537          | 0.619              | 0.229              | N120.0°E               |
| Anan-Kuwano    | 0.464          | 0.226              | 0.169              | N81.0°E                |
| Tsu-Anou       | 0.510          | 0.445              | 0.171              | N78.3°E                |

\* Positive : compression



第1図. 応力方位測定装置の概念図 (木口ほか (2010) より引用).

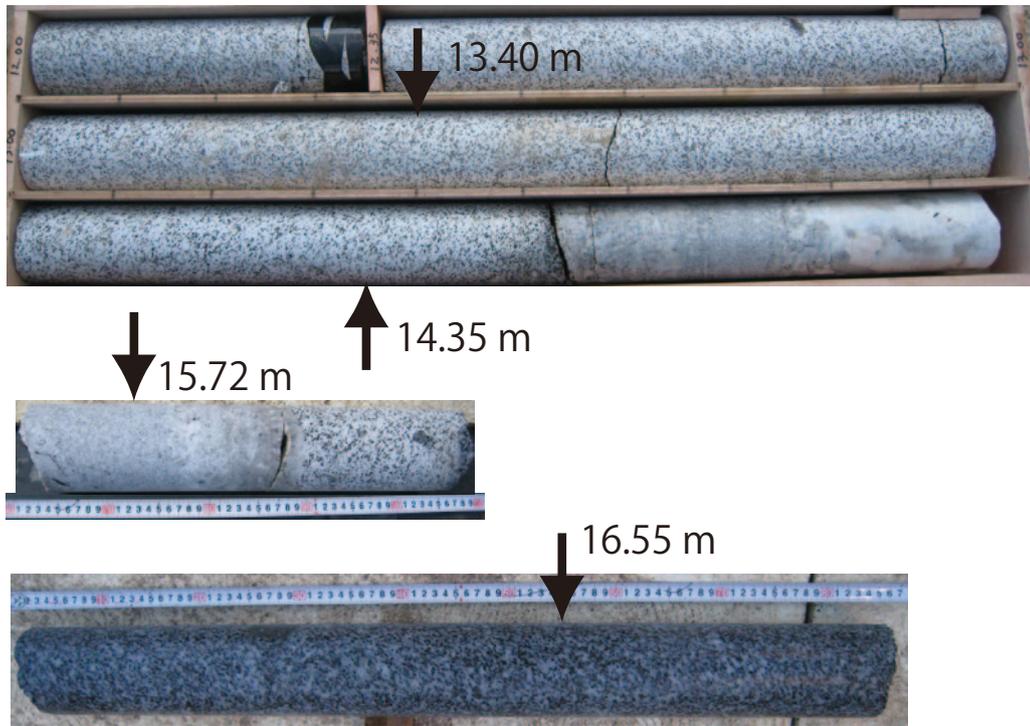
Fig. 1. System diagram of a tool for stress orientation measurements (from Kiguchi *et al.*, 2010).



第2図. 応力方位測定の位置図. 14地点の観測施設のうち, 測定した3地点を赤丸で示す. 測定しなかった残りの観測施設を黒丸で示す.

Fig. 2. Locations of the sites for stress orientation measurements. Red dots indicating station name show the site locations for the measurement. Black dots show the observation stations where the measurement was not conducted.

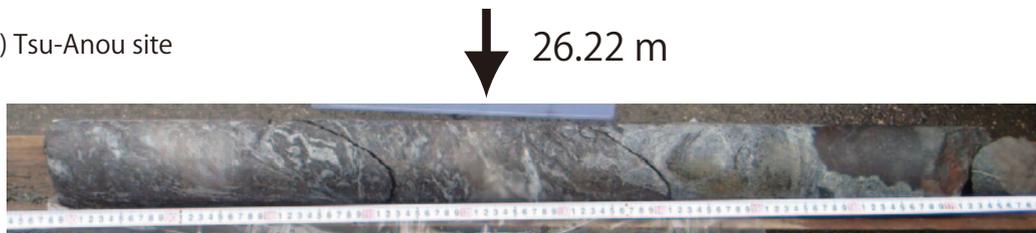
(a) Toyota-Shinden site



(b) Anan-Kuwano site

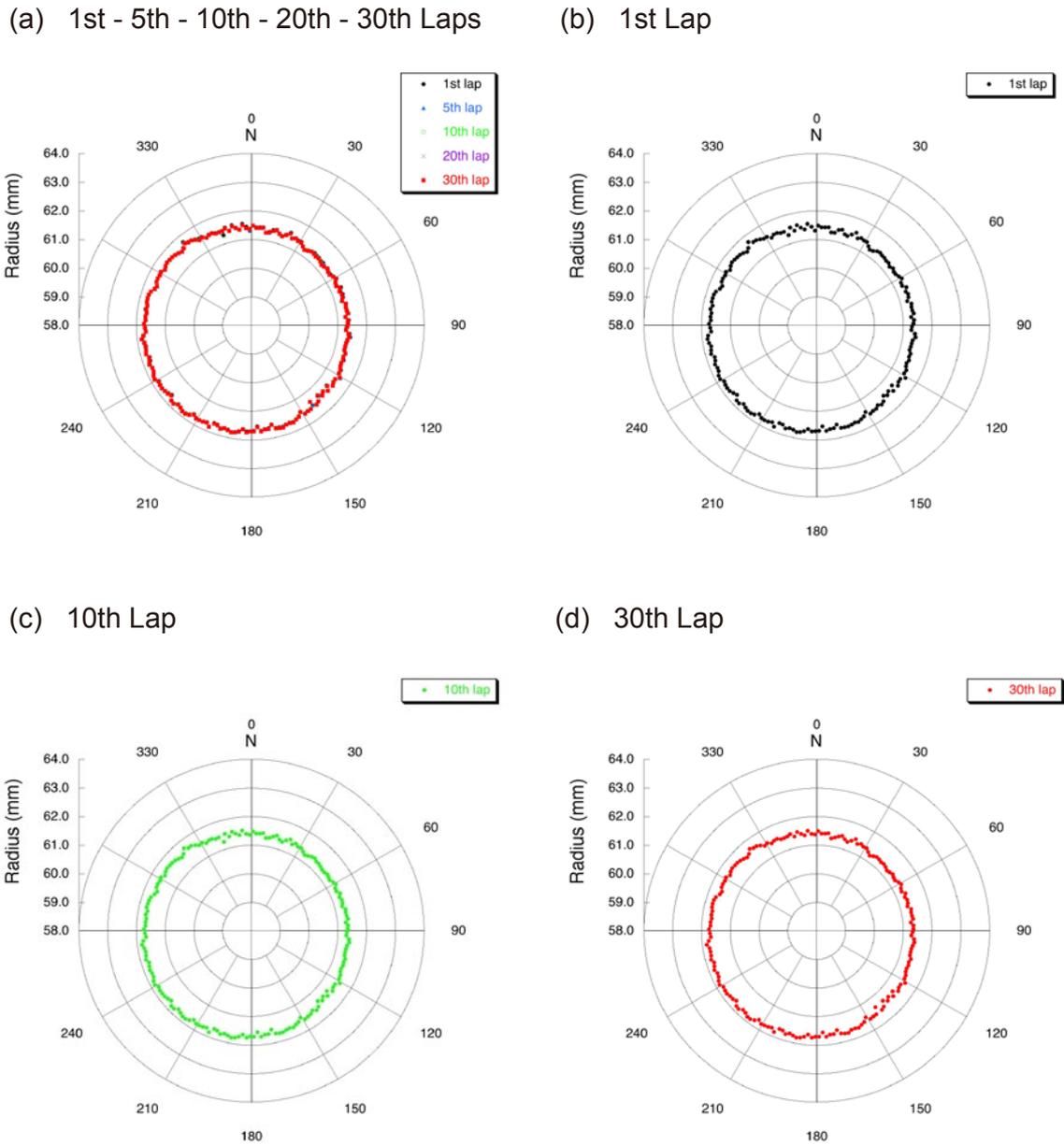


(c) Tsu-Anou site



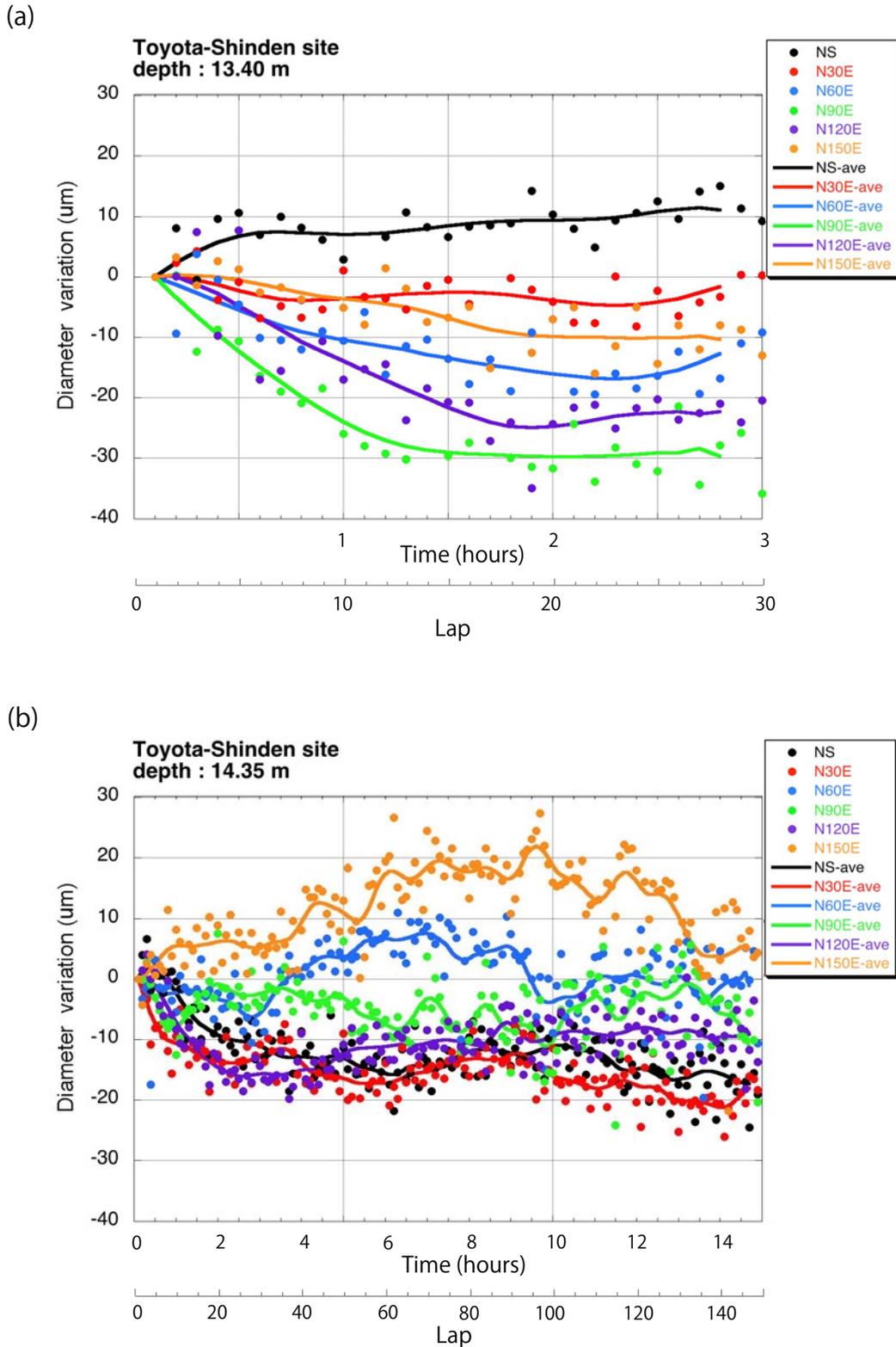
第3図. 測定深度付近のコア写真. 矢印は測定深度を示す. (a) 豊田神殿地点 (測定深度: 13.40 m, 14.35 m, 15.72 m, 16.55 m), (b) 阿南桑野地点 (測定深度: 14.70 m), (c) 津安濃地点 (測定深度: 26.22 m).

Fig. 3. Photographs of core samples at measurement depths. Arrows indicate measurement depths. (a) for the Toyota-Shinden site at a depth of 13.40 m, 14.35 m, 15.72 m and 16.55 m, (b) for the Anan-Kuwano site of 14.70 m, (c) for the Tsu-Anou site of 26.22 m.



第4図. 豊田神殿地点の深度 13.40 m で測定した孔径の原記録の例. (a) 1 周, 5 周, 10 周, 20 周, 30 周で測定した孔径値を重ねて表示している. (b) 1 周目の孔径値, (c) 10 周目, (d) 30 周目. このスケールでは 5 つの周回分のデータはほぼ重なり, データ品質が良いことを意味する.

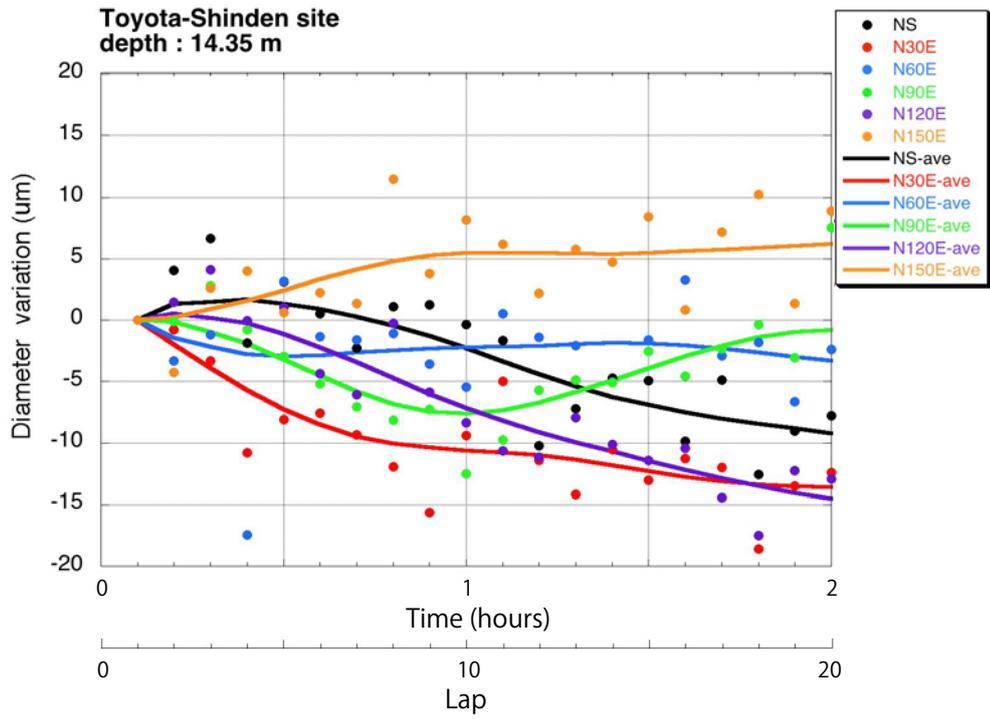
Fig. 4. An example of original data of borehole shape measured at a depth of 13.40 m at Toyota-Shinden site. (a) The data of the first, the 5th, the 10th, the 20th, and the 30th lap are overlaid. (b) data of the first lap, (c) the 10th lap, (d) the 30th lap. The data are almost overlapped at the same points, indicating a good data quality in this scale of the figure.



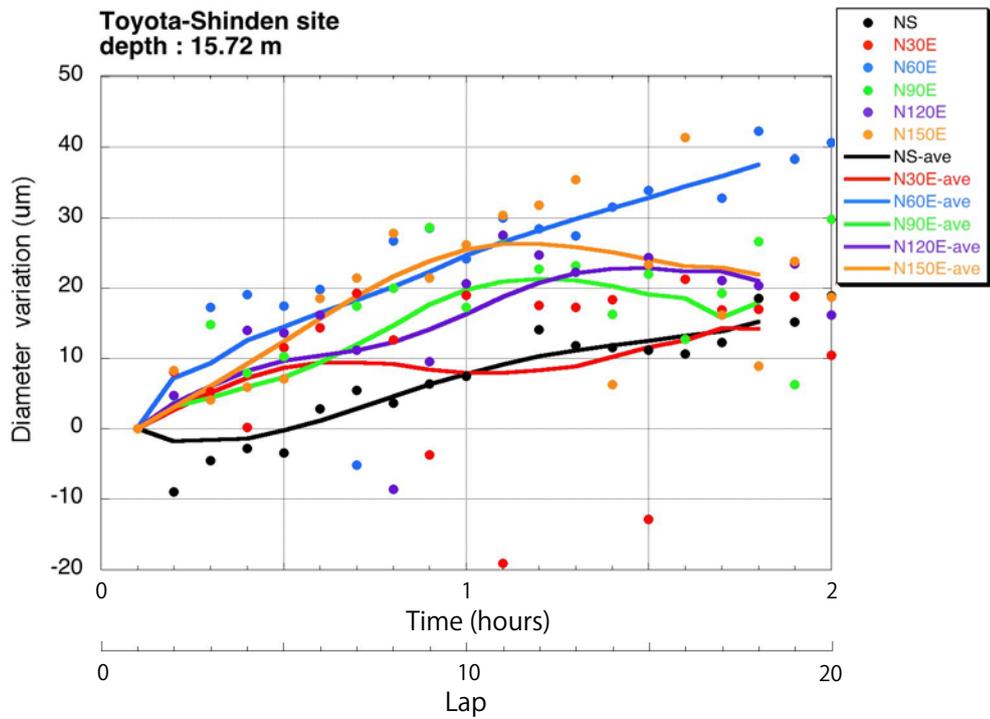
第 5 図. 測定中の孔井直径の時間変化. 図中の実線は測定値の移動平均を示す. (g) を除き, 直径の値を南北から 30° 方位毎に示す. (a) 豊田神殿地点の深度 13.40 m. (b) 豊田神殿地点の深度 14.35 m. (c) 図 (b) の最初の 2 時間の測定を拡大した図. (d) 豊田神殿地点の深度 15.72 m. (e) 豊田神殿地点の深度 16.55 m. (f) 図 (e) の最初の 2 時間の測定を拡大した図. (g) 阿南桑野地点の深度 14.70 m. (h) 津安濃地点の深度 26.22 m.

Fig. 5. Time variations of borehole diameters relative to the initial ones in the measurement. Solid lines indicate moving averages of measurement data. Except (g), diameters for each 30 degrees orientation from N-S direction are plotted. (a) for the Toyota-Shinden site of 13.40 m, (b) for the Toyota-Shinden site of 14.35 m, (c) for the magnified view of the first two hours in Fig. (b), (d) for the Toyota-Shinden site of 15.72 m, (e) for the Toyota-Shinden site of 16.55 m, (f) for the magnified view of the first two hours in Fig.(e), (g) for the Anan-Kuwano site of 14.70 m, (h) for the Tsu-Anou site of 26.22 m.

(c)

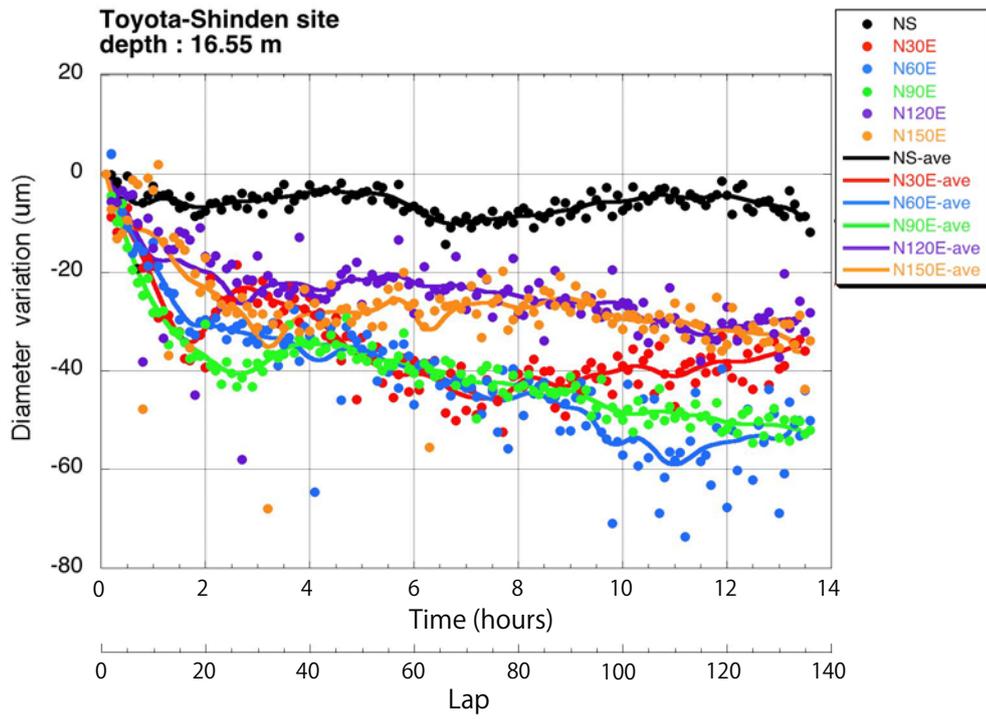


(d)

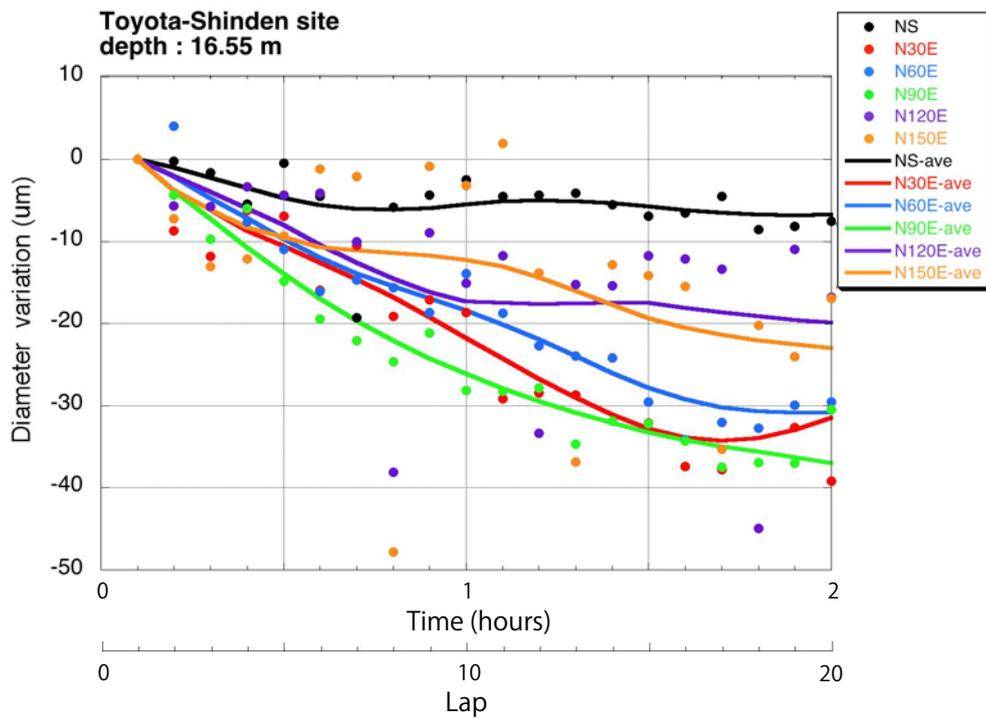


第5図. 続き.  
Fig. 5. Continued.

(e)

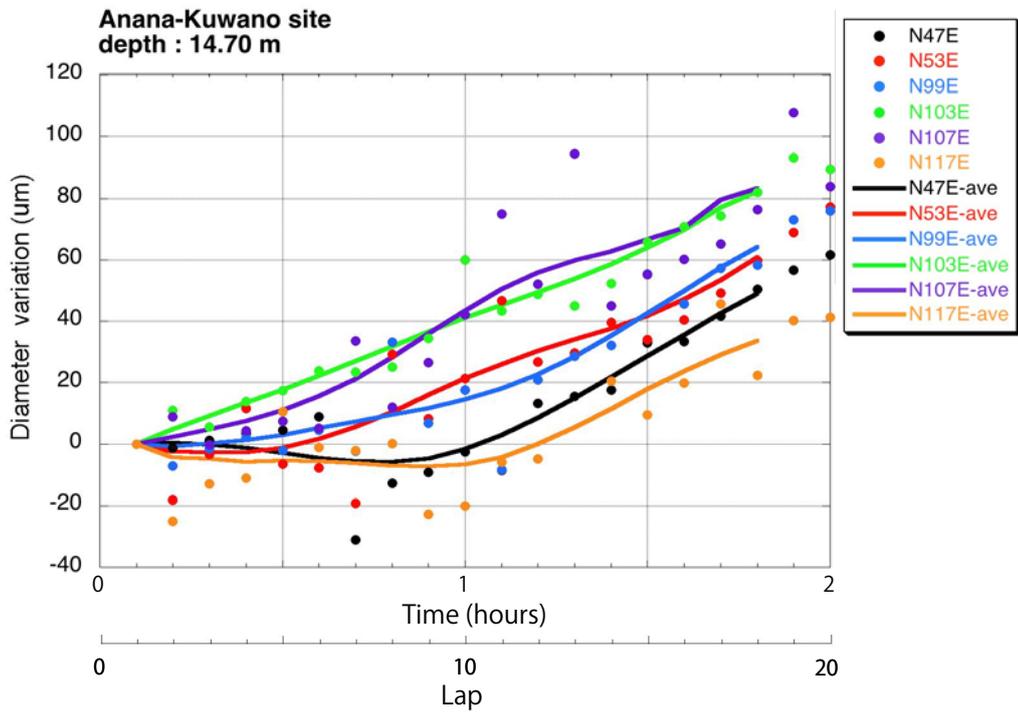


(f)

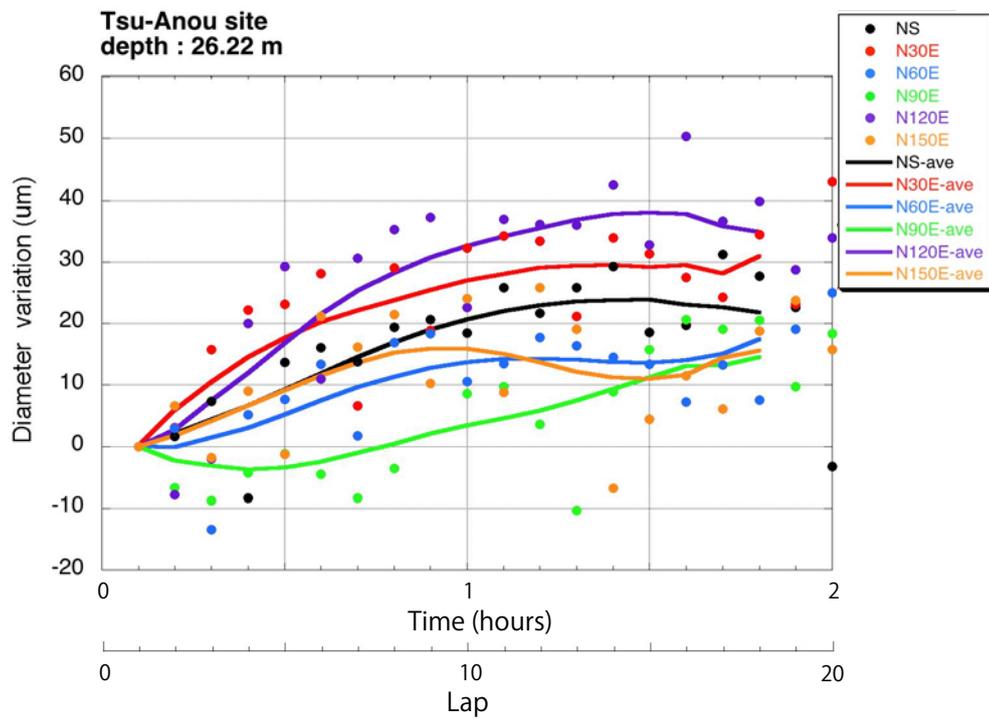


第5図. 続き.  
Fig. 5. Continued.

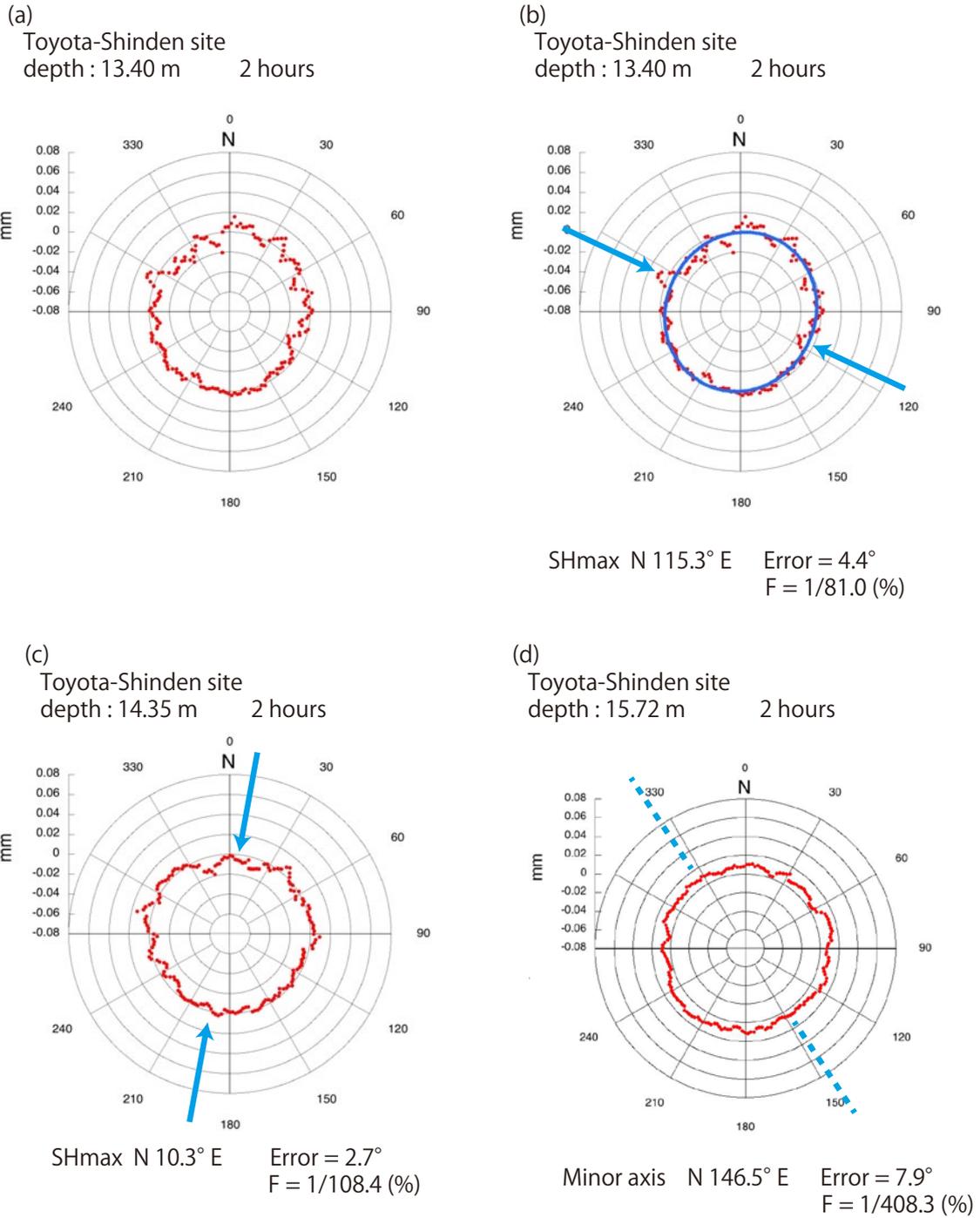
(g)



(h)

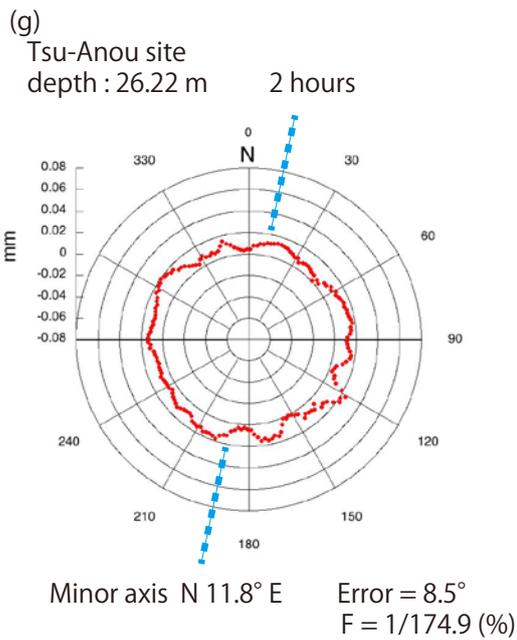
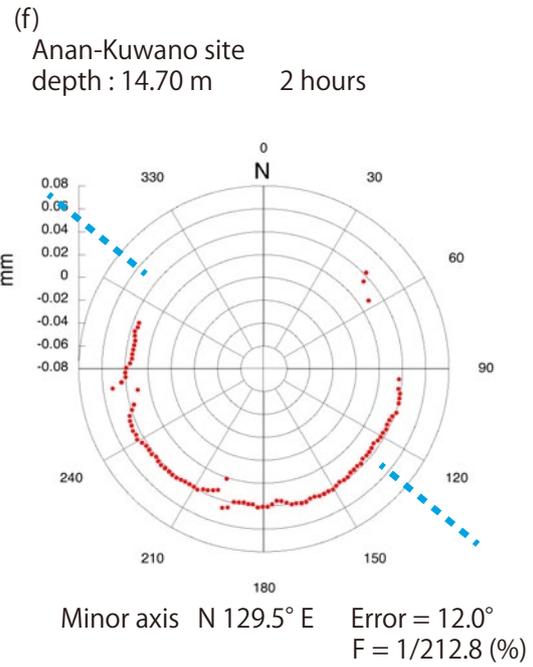
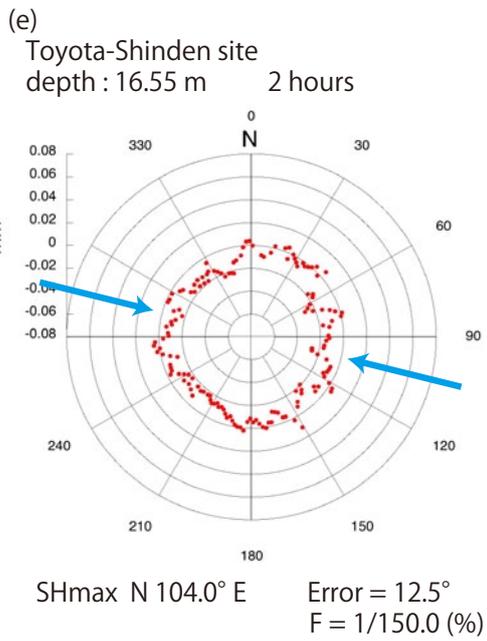


第5図. 続き.  
Fig. 5. Continued.

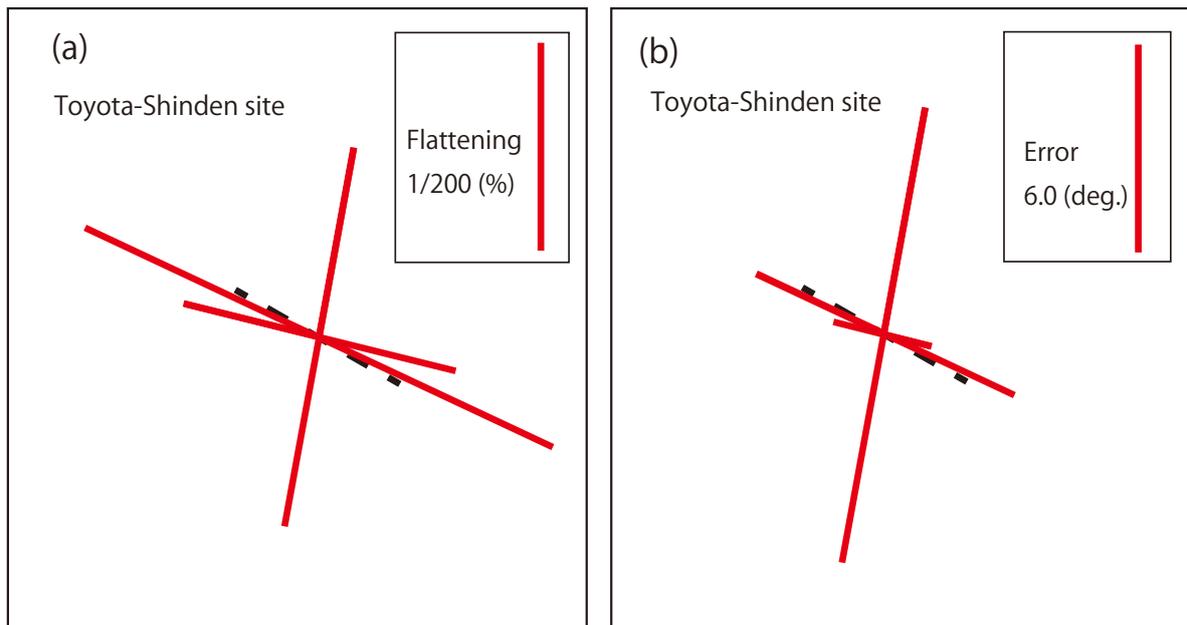


第 6 図. (a) 豊田神殿地点の深度 13.40 m における孔径の相対変化量 (赤点). 方位 10° の範囲で移動平均を取っている. (b) この変化量に  $\cos 2\theta$  の曲線 (青線) を近似して求めた最大水平圧縮応力  $S_{Hmax}$  の方位 (青矢印). (c)~(g) 同様に, 孔径の相対変化量 (赤点) を示す. (c) と (e) では  $S_{Hmax}$  の方位も示す. (d), (f), (g) は孔径が全体に拡大し引張り応力場を示すため, 近似曲線の短軸方向を点線で示す.

Fig. 6. (a) Relative change of the borehole shape (red dots) at a depth of 13.40 m at Toyota-Shinden site. Moving average for 10 degrees is applied to the data. (b)  $S_{Hmax}$  orientation (blue arrow) is determined from the minor axis of the curve (blue) of  $\cos 2\theta$  fitted to the deformed shape. (c)–(g) The same results as (a) for the other measurements. (c) and (e) show the orientation of  $S_{Hmax}$ . (d), (f) and (g) indicate tensile stress field, therefore direction of minor axis of fitted curve is showed as blue dotted line.



第 6 図. 続き.  
Fig. 6. Continued.

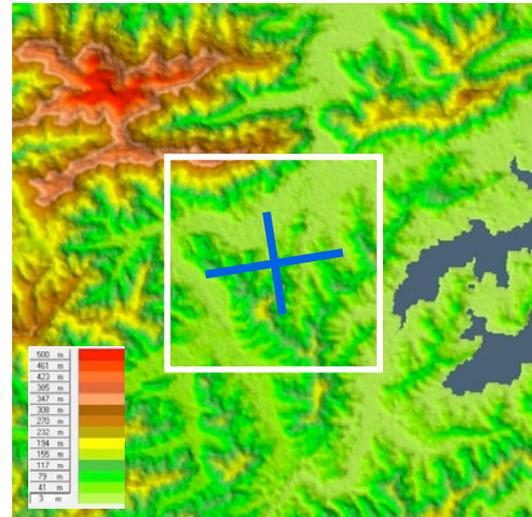
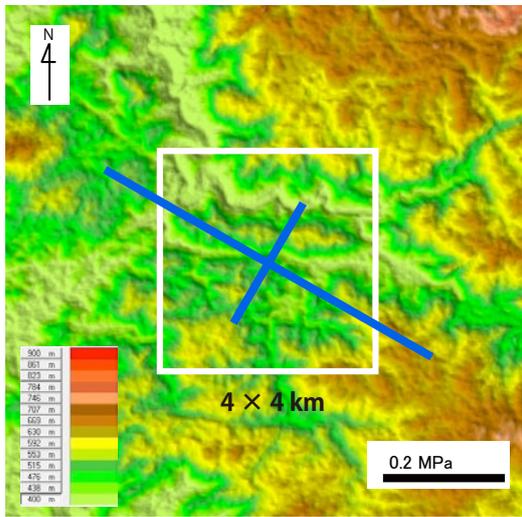


第 7 図. 豊田神殿地点の 13.40 m, 14.35 m, 16.55 m の 3 深度で求めた  $S_{Hmax}$  の方位 (赤線). 3 深度の結果を重ねて表示している. 赤線の長さは, 近似した曲線の扁平率に比例 (図 (a)), または求めた方位の誤差に反比例 (図 (b)) している. 扁平率が 1/200 (%) の場合及び誤差が  $6.0^\circ$  の場合の線分の長さを図中に示す. 黒点線は, 計算から求めた地形効果による最大圧縮方位である.

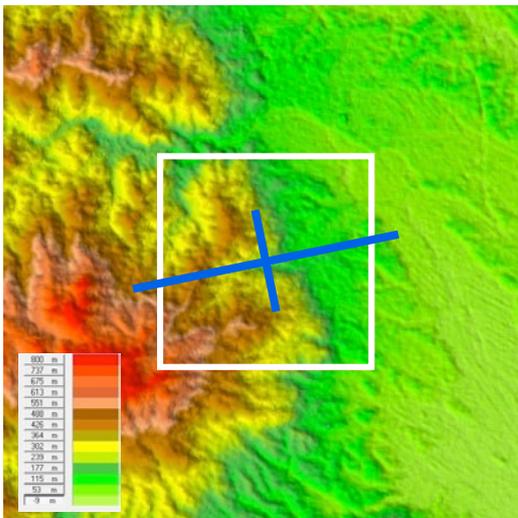
Fig. 7.  $S_{Hmax}$  orientations (red bars) at Toyota-Shinden site. The orientations estimated at 3 depths are overlaid in the figure. The length of the bar is (a) proportional to a parameter of flattening of the fitted curve and (b) inversely proportional to a value of an error of the estimated orientation. A scale of flattening = 1/200 (%) and error = 6.0 (deg.) are shown in the upper right. Black dotted line denotes theoretically calculated orientation of the maximum compressive stress due to topography effect.

(a) Toyota-Shinden site

(b) Anan-Kuwano site

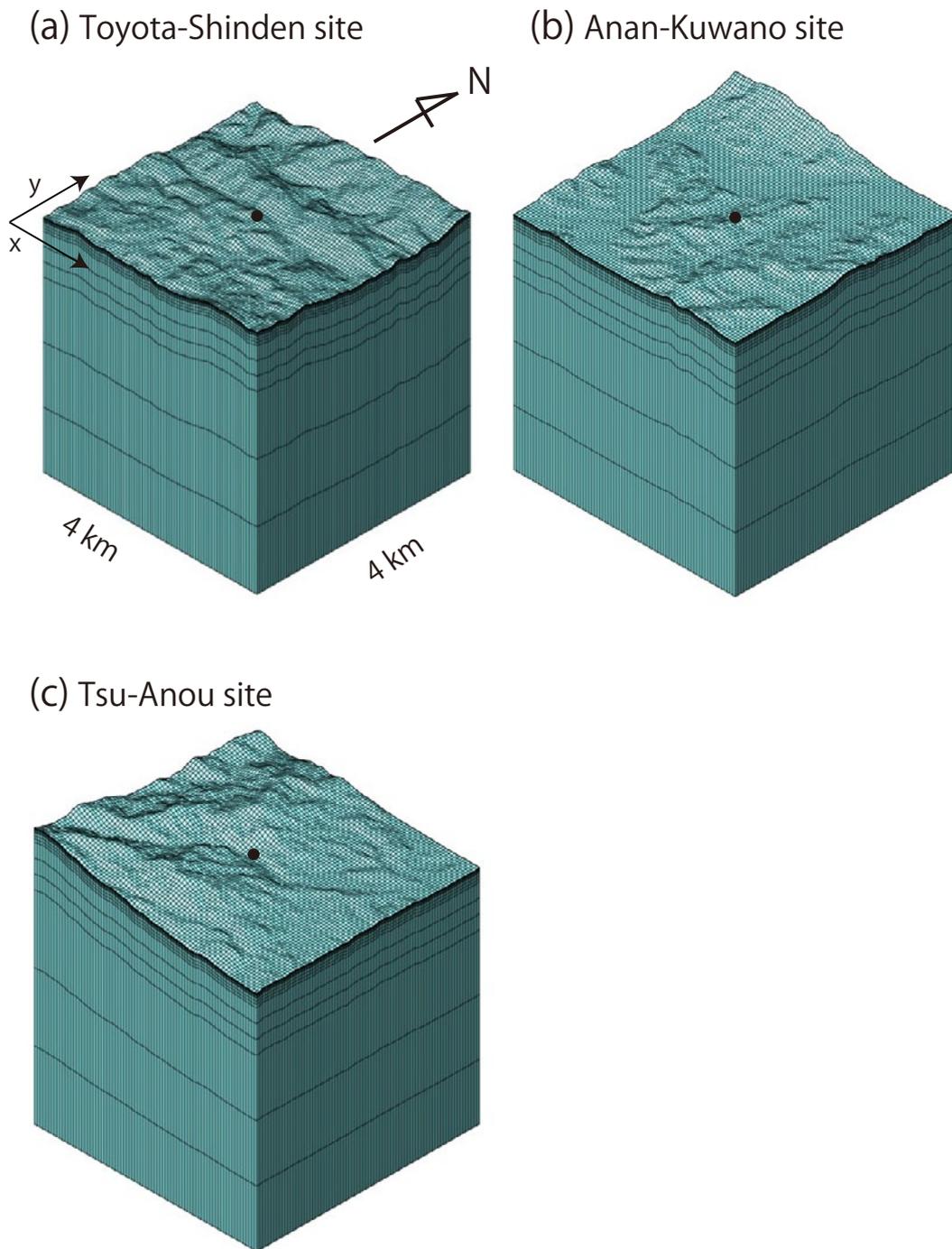


(c) Tsu-Anou site



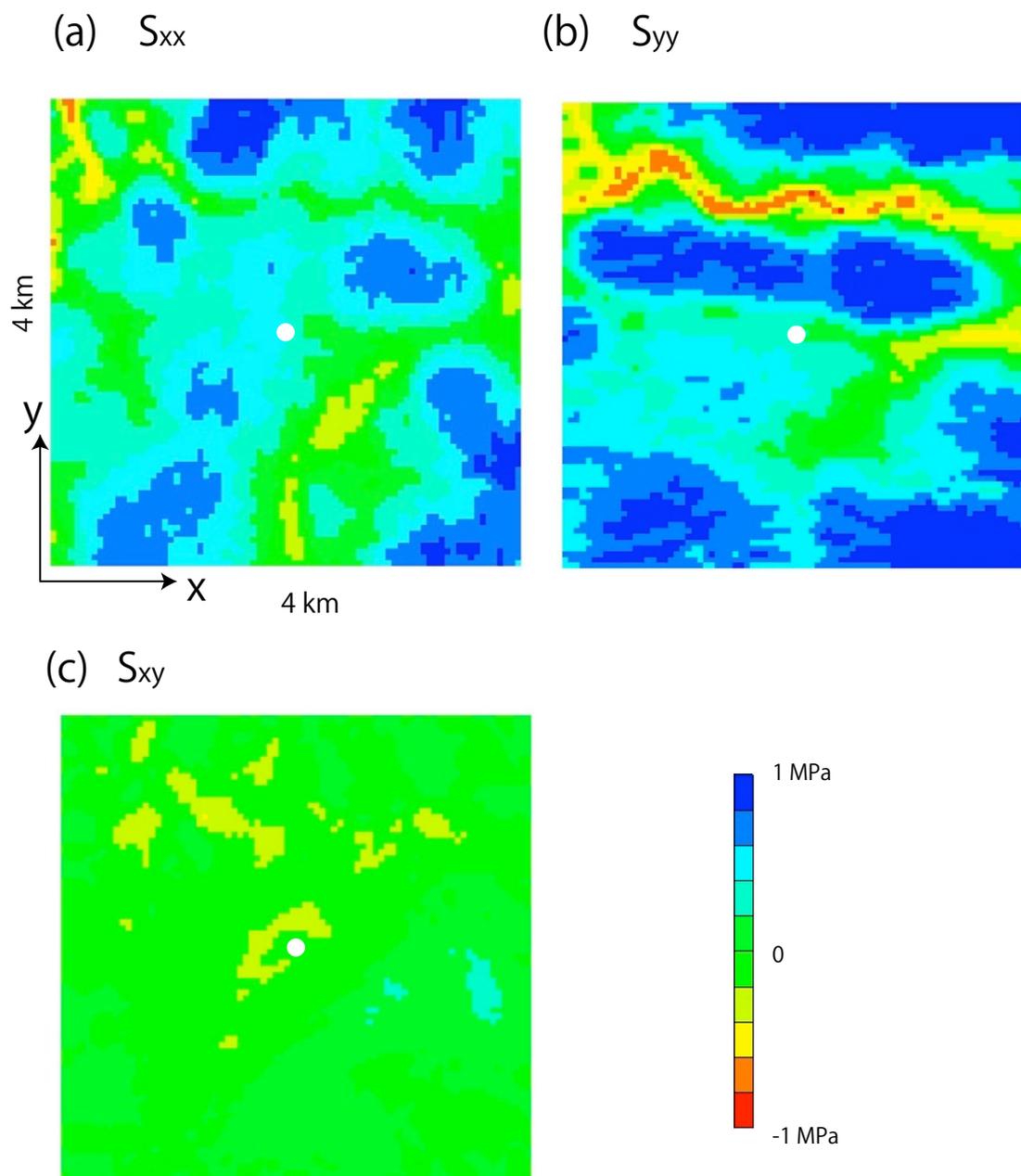
第 8 図. 有限要素法により地形効果を計算する領域. 4 km 四方の領域を白線四角で示す. 青線は, 有限要素法で求めた深度 17.5 m における地形効果による水平主応力の方位を示す. 方位を示す線分の長さは応力の絶対値に比例する. (a) 豊田神殿地点, (b) 阿南桑野地点, (c) 津安濃地点.

Fig. 8. Region for the calculation of the FEM. The model size is 4 x 4 km, which is indicated as white square. Orientation of the horizontal principal stress caused by gravitational effect of topography at a depth of 17.5 m is shown by blue bar. The length of the bar is proportional to an absolute value of stress. (a) Toyota-Shinden site, (b) Anan-Kuwano site, (c) Tsu-Anou site.



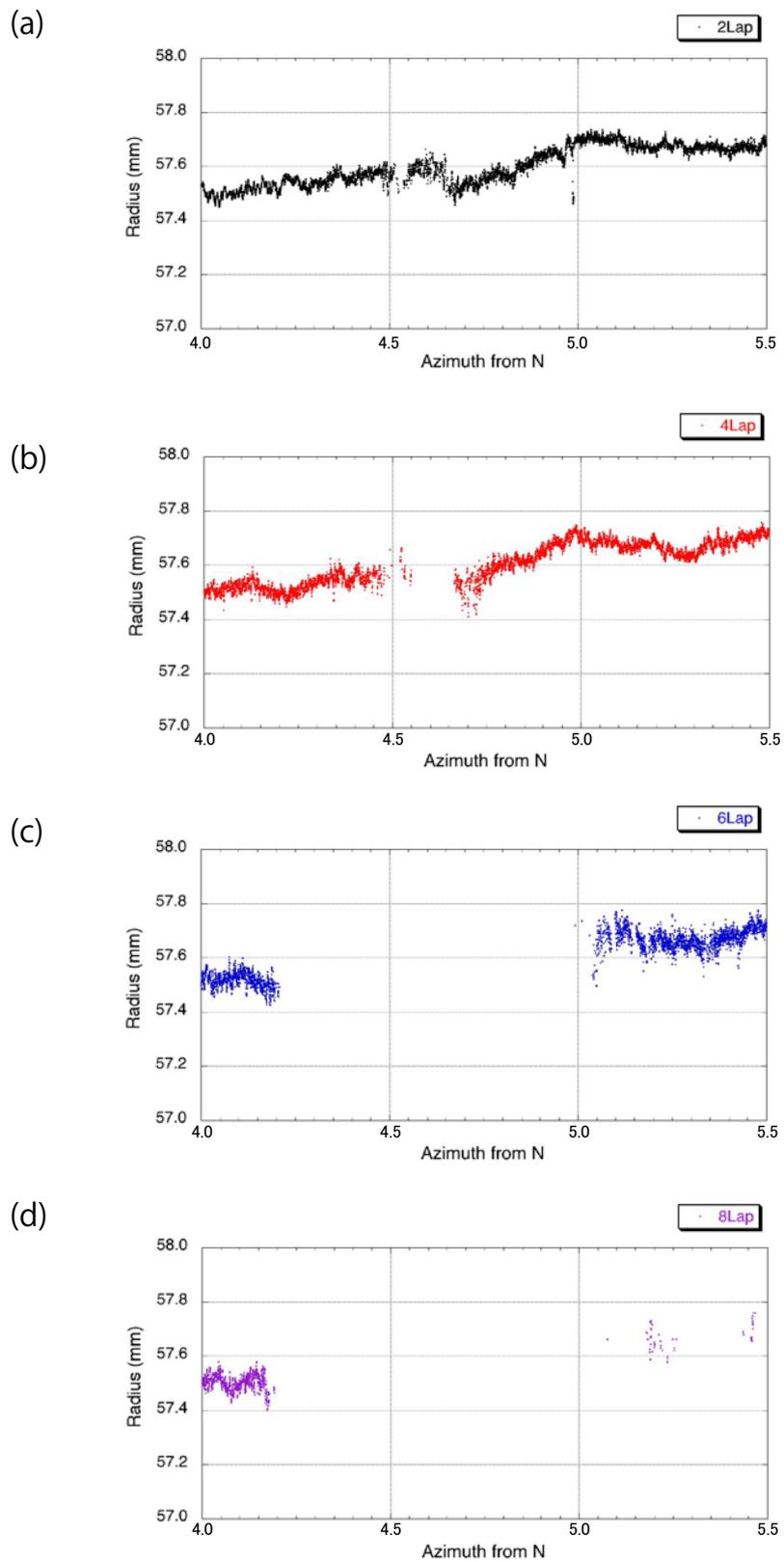
第9図. 地形効果を計算するための有限要素法のモデル. 測定地点を黒丸で示す. (a)豊田神殿地点, (b)阿南桑野地点, (c)津安濃地点.

Fig. 9. Model of the FEM for calculation of topography effect. Closed dot indicates the position of measuring site. (a) Toyota-Shinden site, (b) Anan-Kuwano site, (c) Tsu-Anou site.



第 10 図. 豊田神殿地点の 4 km 四方の領域の地形効果の計算結果. 地表から深度 17.5 m における応力値の分布を示す. 正の値は圧縮を意味する. (a)  $S_{xx}$  (垂直応力の x 成分), (b)  $S_{yy}$  (垂直応力の y 成分), (c)  $S_{xy}$  (せん断応力の xy 成分).

Fig. 10. Results of the calculated stresses of the topography effect at a depth of 17.5 m from surface for Toyota-Shinden site. Positive value means compression. (a)  $S_{xx}$ , (b)  $S_{yy}$ , (c)  $S_{xy}$ .



第 11 図. 津安濃地点の深度 23.85 m の測定における, 方位  $N4^{\circ}E$  から  $N5.5^{\circ}E$  の範囲で 7500 回測定した孔径値. (a) 2 周目, (b) 4 周目, (c) 6 周目, (d) 8 周目.

Fig. 11. 7500 data of radius measured in the azimuth between  $N4^{\circ}E$  and  $N5.5^{\circ}E$  at a depth of 23.85 m at Tsu-Anou site. (a) for the second lap, (b) for the 4th lap, (c) for the 6th lap, (d) for the 8th lap.