

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

Stress orientation measurements around the Kego fault: Application of a new technique of a borehole deformation measurement

木口 努¹・桑原保人²

Tsutomu Kiguchi¹ and Yasuto Kuwahara²

^{1,2} 地質情報研究部門 地震発生機構研究グループ (Seismogenic Process Research Group, Institute of Geology and Geoinformation, GSJ/AIST, kiguchi.t@aist.go.jp)

Abstract: Stress field around the Kego fault in Fukuoka Prefecture was measured with a new technique of a stress orientation measurement. The first principle of the new technique is to measure creep deformation of a borehole just after drilling in anisotropic stress field at shallow depths. The second one is that perturbation of the stress orientation field around fault edges indicates a degree of a present effect of stress release due to a former earthquake on the fault. We chose three locations for the measurement around the southern edge of the Kego fault to measure a far field stress and the effect of the former stress release. The measurements were conducted at three depths with 1 – 3 m intervals in each location. The measurements were successful in two locations, while the third one was not perfect because of an unexpected thick weathering layer where the measurement was difficult. The orientations of the maximum horizontal compressive stress (SHmax) were determined to be NE to ENE for the locations with distances of 2 km and 4 km, respectively, from the fault. Data scatter even in one location was about 20°, which is too large to evaluate the perturbation of the stress orientation field around fault edges due to a former earthquake. The average orientation of SHmax is about N60°E for the both locations. The estimated orientation is found to be unfavorable for a strike slip on the Kego fault. One of possibilities of tectonic meanings of the present result is a considerable component of reverse faulting on the fault. However, further studies on various data such as geodetic measurement and stress at large depths are necessary.

キーワード: 応力方位, クリープ変形, 警固断層

key word: stress orientation, creep deformation, Kego fault

1. はじめに

2005年3月20日に福岡県西方沖地震 (Mj 7.0) が発生し, 最大震度6弱が観測された. この地震による震源断層周辺への影響が静的クーロン応力変化 (ΔCFS) のマッピングによって推定された (遠田・堀川, 2005). その結果, 震源域の南東に位置する警固断層 (第1図) では断層運動を促進する応力変化となり, 警固断層の次の地震発生を1000年程度早めた可能性があるとして指摘されている. 警固断層は, 福岡市から筑紫野市に至る全長約22 km, 西側隆起を伴う北西-南東走向の左横ずれ断層である (活断層研究会, 1991). これまでに実施されたトレンチ調査では, 警固断層の活動間隔は約15000年, 最新活動期は10000年前以前とされている (下山ほか, 2005). 一方, 音波探査により博多湾内で推定された警固断層の延長部についての活動履歴調査では, トレンチ調査結果よりも短い活動間隔と現在により近い最新活動時期が報告されている (岡村ほか,

2006). また, 警固断層の運動の横ずれ成分と逆断層成分の割合などはまだ明らかではない.

我々は活断層の長期予測精度を向上させるために, 過去の活動履歴データのみに基づく統計的手法から一歩進め, 活断層の応力状態などを基にした地震発生予測のための物理モデルの構築を目指している. そのため, 産総研が開発している浅部応力方位測定法を警固断層の南端部周辺に適用し, 警固断層周辺の応力方位測定を実施した.

2. 掘削直後の孔径変化測定による応力方位測定法

異方的な応力がかかった岩盤に孔井を掘削した場合, 岩石のもつ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することが期待できる. 我々はこの異方的変形を直接計測することにより, 岩盤にかかる応力方位を測定する手法を開発している (木口ほか, 2005; 桑原・木口, 2006). このクリープ変形の測定を実現するために, ゾンデ内に組み込

んだレーザー変位計を孔軸を中心に 360° 連続的に長時間回転し、ゾンデを固定した深度の孔径を非接触で連続測定できる装置を開発した (第 2 図)。測定装置の仕様を第 1 表に示す。レーザー変位計は 6 分で 1 回転する。既存の応力測定手法よりも簡便で比較的安価に測定することを目指し、測定深度は最大 20 m 程度、測定時間は掘削直後から数時間～半日程度としている。この手法による応力方位の測定と、水圧破砕法や応力解放法などの他の手法による地殻応力測定との整合性を調べるために、跡津川断層近傍の坑道内で掘削直後の孔径変化測定を実施している (桑原ほか, 2006)。

桑原 (2004) は、断層周辺の応力方位と地震発生サイクルとの関係に着目し、次のような地震発生の切迫性評価手法を提案している。断層面上の応力は地震発生時に応力解放により低下し、時間の経過とともに回復し、遠方応力と同程度まで回復すると次の地震が発生すると考えられる。この考え方に基くと、前回の地震による応力解放がどの程度残っているかということから、前回の地震と次の地震までの時間サイクルのどこに現在が位置するか評価できる。一方、ある地震により断層上のせん断応力が例えば、100% 解放された場合には、応力場の計算から断層周辺の応力方位は遠方の応力方位とは大きく異なることが示される。応力解放が小さい場合や応力が充分回復した場合には、遠方の応力方位とほぼ同じになる。従って、実際の断層周辺の応力方位の分布と応力解放量の割合をいくつか仮定したモデル計算との比較から、現在の断層上の応力解放量が推定できることとなり、地震発生の切迫性の評価につながる。

3. 応力方位測定地点の選定

今回の応力方位の測定において、警固断層で前回の地震による応力解放がどの程度残っているか評価することが可能となるような測定地点の選定を試みた。まず、モデル計算による警固断層の南端部周辺の応力方位の分布を求めた。第 3 図 (a) に 10 km 四方の計算領域を示す。警固断層に遠方応力を与え、警固断層面上におけるせん断応力の解放量を変化させた。第 3 図 (b, c, d) に応力解放量がそれぞれ、100%, 70%, 30% の場合の応力方位の分布を示す。遠方の応力方位は、Imanishi *et al.* (2006) が福岡県西方沖地震後の博多湾内及び周辺の余震のメカニズム解から求めた N80°E を採用した。第 3 図 (b) に示す 100% の応力解放の場合の応力方位は、断層の南西側近傍では断層面にほぼ平行であり、北東側近傍では断層面にほぼ直交し、断層端周辺の応力方位は遠方応力の方位とは大きく変化することがわかる。一方、(d) の 30% 解放された場合は、断層周辺の応力方位の変化は小さい。これらの計算例から、断層

上の応力解放量に対応する応力方位の変化は断層端の周辺で顕著であり、また、断層に近いほど変化量が大きく断層から遠ざかるに従い遠方応力に近くなるという特徴がわかる。よって、警固断層の南端周辺で、断層からの距離と応力方位の関係が得られれば、モデル計算と比較することによって、断層上の応力解放量を推定できる。

上記の考察により、測定地点を選定する際には、断層南端周辺で断層からの距離が 1~10 km の範囲でそれぞれ異なる 3 地点を選ぶこととした。さらに、P 波速度で 3 km/s 程度の硬い岩盤が深度 10 m 程度以浅に期待できることや急峻な地形が近傍にないことなどを条件として、土木工事などの既存の掘削資料を参照し、現地踏査を行った。その結果決定した 3 つの測定地点を第 1 図に示す。測定地点の No. 1 と 2 は筑紫野市大字山口、No. 3 は大野城市大字牛頸に位置し、断層からの距離は、それぞれ、およそ 1 km, 2 km, 4 km である。

4. 警固断層周辺の応力方位測定

応力方位測定の仕様を第 2 表に示す。1 つの測定地点で約 1~3 m 間隔の 3 つの深度で応力方位測定を行った。測定地点での作業は、孔井掘削と測定作業を繰り返すことになるので、全体の作業効率を向上するために、測定は掘削を行わない夜間の 2 回と昼休みを挟んだ昼間の 1 回とした。孔井掘削は 2 班で並行して実施し、3 地点で各 3 深度の応力方位を測定するために要した現地作業総日数は 13 日であった。3 地点の孔井地質は、約 4 m の表土以深で、No. 1 は風化花崗岩、No. 2 と No. 3 は新鮮な花崗岩である。

測定結果は以下の通りである。それぞれの測定深度において、測定開始直後の 3 周の平均値と、測定終了前の 10 周 (または 5 周) の平均値との差をとり、孔径の相対変化量を求めた。この相対変化量に楕円を近似することにより、楕円の短軸方向を決定した。この方向が最大水平圧縮応力 (SHmax) の方向になる。第 4 図に、No. 2 と No. 3 のそれぞれ 3 深度における孔径の相対変化量と SHmax の方位を示す。

このように、孔径変化量への楕円近似により求めた SHmax の北からの方位は、No. 2 地点の 3 深度で、それぞれ、83.2°, 57.0°, 42.7° である。また、No. 3 地点の結果は、それぞれ、50.9°, 79.7°, 44.7° である。つまり、断層から 2 km 及び 4 km 離れた地点の SHmax の方位は、北東~東北東の範囲であり、その平均値はともにおおよそ N60°E となる (第 5 図)。

2 つの地点で得られた孔径変化量の特徴として、1) 単純な楕円状の変形ではなく、10~20° 程度の短波長の変動があり、2) 楕円状の変形量が小さいことがあげられる。これらの特徴は楕円の近似により応力方位を求めるときの誤差の要因となる。短波長の変

動の影響なども含めて、誤差の評価手法を検討する必要がある。

No. 1 の孔井地質は風化花崗岩であり、地点選定したときに想定した硬い岩盤とは異なった。掘削径の拡大による測定装置の固着の問題など風化地盤に起因すると思われる測定データの不安定さがあった。風化層における測定結果が地殻応力を反映しているか否かの考察も含めて、断層から 1 km の地点の測定データについては現在検討中である。

5. 測定結果のまとめと考察

警固断層の南端周辺の浅部花崗岩中で、掘削直後の孔径変化を計測する応力方位測定を行った。断層から 2 km 及び 4 km 離れた測定地点の、それぞれ 3 深度で得た SHmax の方位は、ともに北東～東北東の範囲であり、その平均値はおよそ N60°E となる。2 地点の応力方位に明瞭な差は認められない。この応力方位は、警固断層の北西－南東の走向に対して約 75° の高角となる。

同一測定地点における異なる深度の測定結果には標準偏差で 20° 程度のばらつきがあることと、各深度で得られた応力方位に誤差が含まれることを考慮すると、モデル計算との比較による警固断層の応力解放量の推定は困難である。しかし、得られた SHmax の方位は 20° 程度の誤差を考慮しても、警固断層の走向に対して高角となることがわかった。この結果から、警固断層が単純な左横ずれを生じにくい応力場と推定でき、逆断層成分をかなり含む可能性がある。また、孔径の楕円状の変化量が小さいことは、水平方向の差応力が小さいことを意味するかもしれない。今後、左横ずれ成分と逆断層成分の割合などの断層運動様式の検討を含め、GPS などの測地データやより深部の応力に関する情報などとあわせて総合的な解析を行っていく必要がある。

文 献

- Imanishi, K., Kuwahara, Y. and Haryu, Y. (2006) Off-fault aftershocks of the 2005 West Off Fukuoka Prefecture Earthquake: Reactivation of a structural boundary?, *Earth, Planets, Space*, 58, 81-86.
- 活断層研究会 (1991) 新編日本の活断層—分布図と資料. 東京大学出版会, 437p.
- 木口 努・桑原保人・佐藤凡子 (2005) 応力場評価のためのレーザ式孔径変化測定装置の開発. 物理探査学会第 112 回学術講演会講演論文集, 51-54.
- 桑原保人 (2004) 内陸活断層応力場の新しい評価手法の確立に向けて. *地質ニュース*, No. 597, 10-16.
- 桑原保人・木口 努 (2006) 地殻応力方位測定法. *検査技術*, 11, No. 3, 28-33.
- 桑原保人・小村健太郎・木口 努・山下 太 (2006) 掘削直後のボアホール孔径変化を利用した応力測定法の開発—跡津川断層への適用. *地球惑星科学関連学会 2006 年合同大会予稿集*, S117-011.
- 岡村 眞・松岡裕美・島崎邦彦・千田 昇・中田 高・平田和彦 (2006) 博多湾における警固断層延長部の活動履歴. *地球惑星科学関連学会 2006 年合同大会予稿集*, S107-P011.
- 下山正一・磯 望・松田時彦・市原季彦・千田 昇・岡村 眞・茂木 透・鈴木貞臣・落合英俊・長沢新一・今西 肇・川畑史子・矢ヶ部秀美・樗木政昭・松浦一樹 (2005) 警固断層, 薬院地区 (福岡市) でのトレンチ調査報告. *活断層研究*, No. 25, 117-128.
- 遠田晋次・堀川晴央 (2005) 福岡県西方沖地震による福岡市直下警固断層への影響. *地球惑星科学関連学会 2005 年合同大会予稿集*, x113p-025.

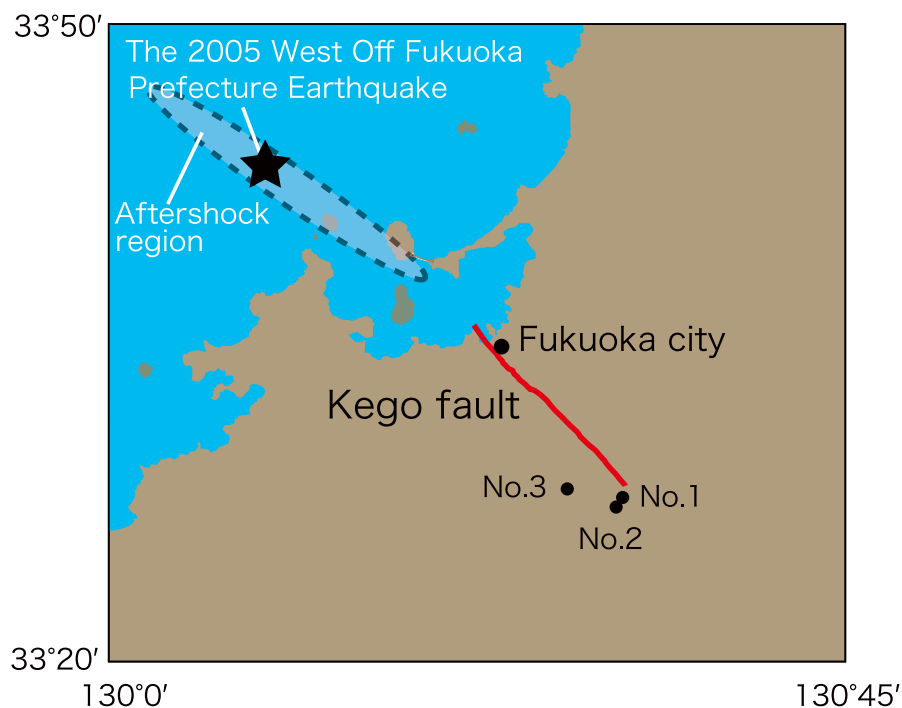
(受付 : 2006 年 7 月 3 日, 受理 : 2006 年 8 月 10 日)

第 1 表. 浅部応力方位測定装置の地中装置の仕様.
Table 1. Specification of the downhole tool.

Tool length	1500 mm
Tool diameter	100 mm
Tool weight	25 kg
Applicable hole size	116 or 123 mm
Maximum depth	20 m
Rotation speed of sensor	1 degree / s
Resolution of sensor unit	0.1 μ m

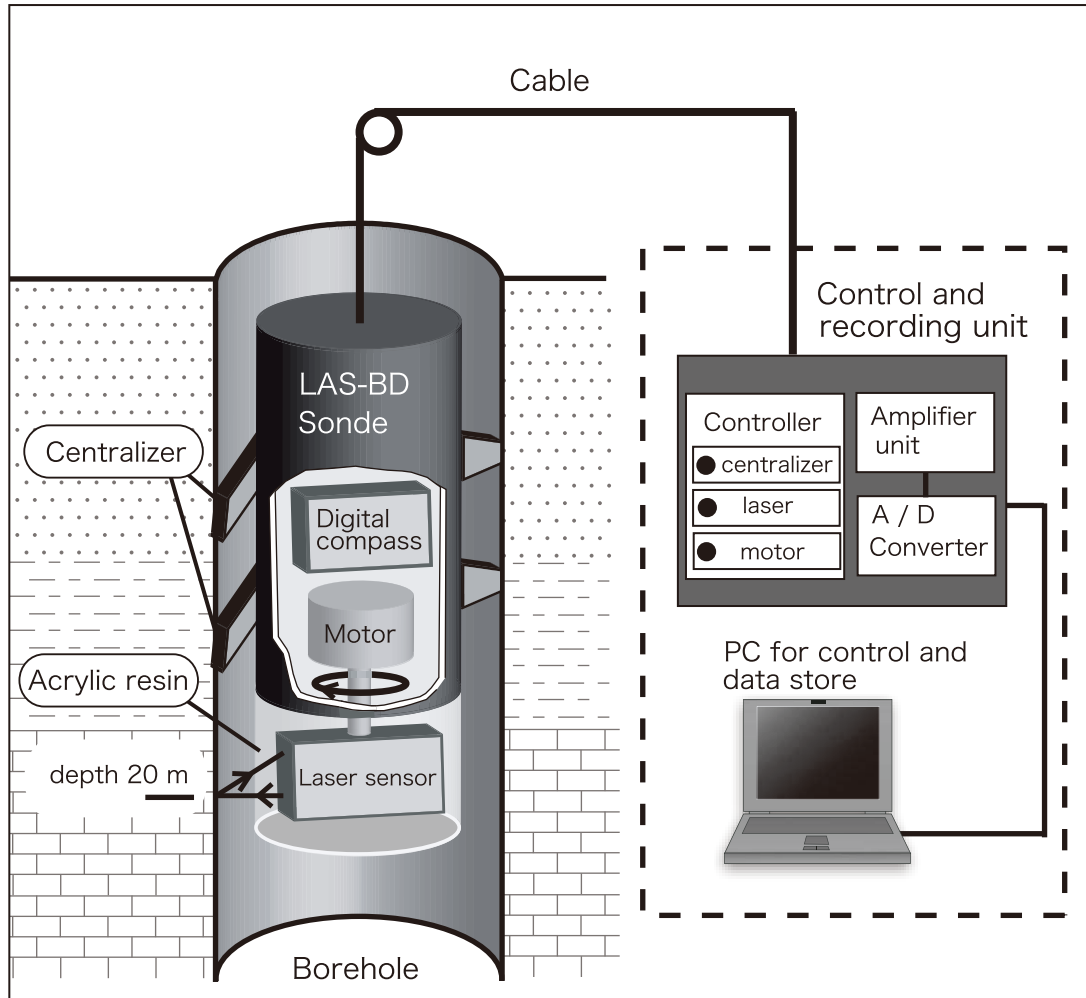
第2表. 浅部応力方位測定作業の仕様.
Table 2. Specification of stress orientation measurement.

Measurement location	No.1	N33° 28' 07" ; E130° 30' 56"
	No.2	N33° 27' 48" ; E130° 30' 42"
	No.3	N33° 29' 06" ; E130° 27' 39"
Measurement depth (m)	No.1	16.24, 19.85, 21.50
	No.2	11.08, 12.50, 13.20
	No.3	12.71, 13.80, 14.96
Measurement time	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 2~2.5 hours in daytime measurement. ▪ about 15~17 hours in nighttime measurement. 	
Measurement lap	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 20~25 laps in daytime measurement. ▪ about 150~170 laps in nighttime measurement. 	
Borehole diameter (mm)	116	



第1図. 福岡県西方沖地震の震央と余震域, 警固断層及び応力方位測定地点 (3地点) の位置図.

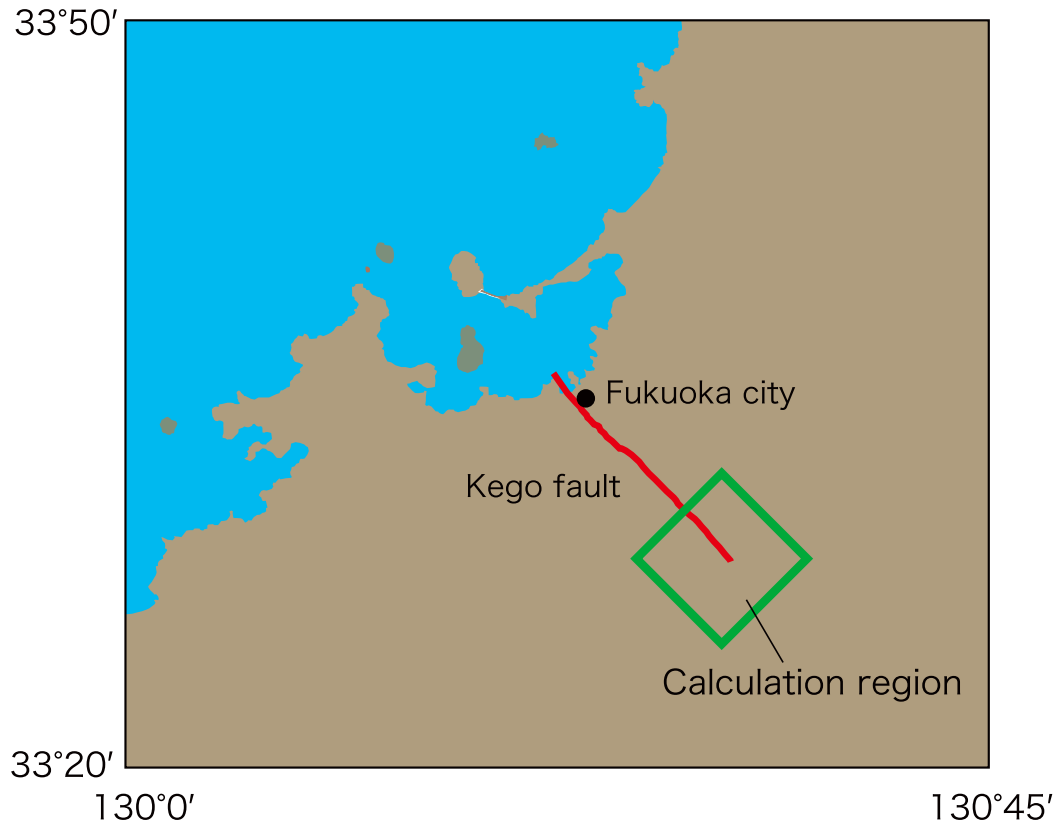
Fig. 1. Location of The 2005 west off Fukuoka Prefecture earthquake, aftershock region, Kego fault and three locations for stress orientation measurement.



第2図. 浅部応力方位測定に使用する孔径変化測定装置の概念図. 地中装置はレーザ変位計, 変位計の回転機構, 装置全体の固定機構, 方位測定機構からなる. 測定データは地上装置とパソコンに転送される.

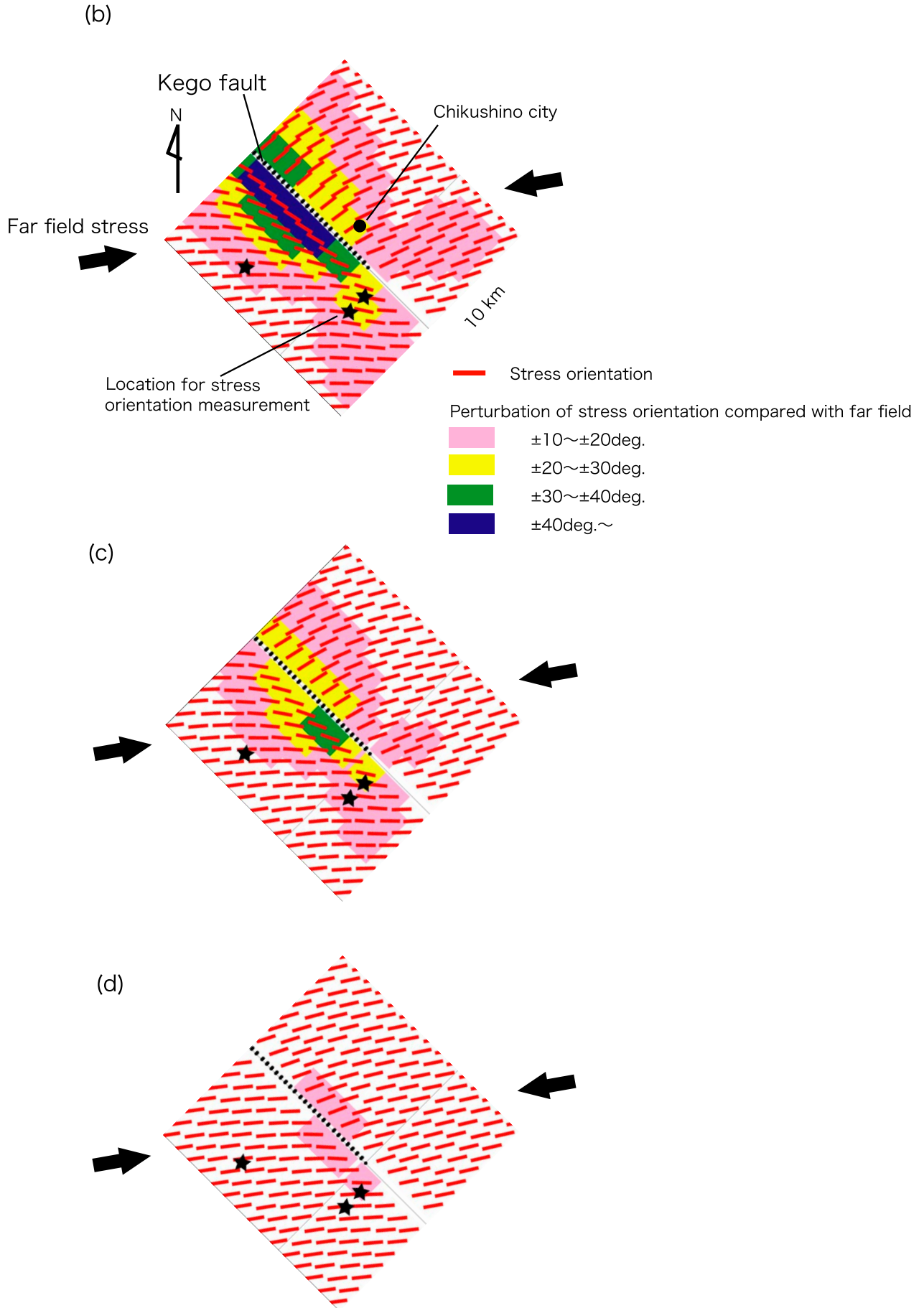
Fig. 2. System diagram of the new tool of the laser scanner for borehole deformation. The downhole tool is composed of a laser sensor with rotary mechanism, a digital compass for tool direction measurement and centralizer. The data is transferred to the control and recording unit and the PC for data store and tool control.

(a)

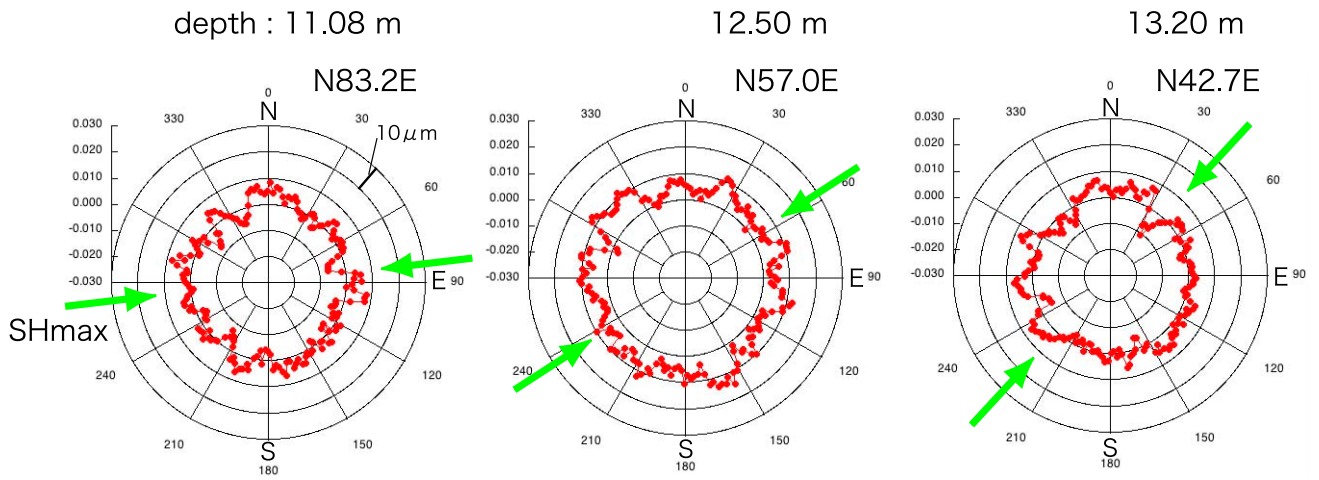


第3図. 警固断層南端部周辺の応力場計算結果の例. (a) 計算対象領域. 警固断層南端部周辺の10 km×10 kmの領域である. (b) 警固断層でせん断応力を100%解放した場合の応力方位の分布. 図中の色分けされた領域はその場所の応力方位と遠方応力方位との差を表す. 断層近傍の応力方位は遠方応力方位と大きく異なる. (c) 70%のせん断応力解放の場合. (d) 30%のせん断応力解放の場合. 遠方応力の方位との変化は小さい.

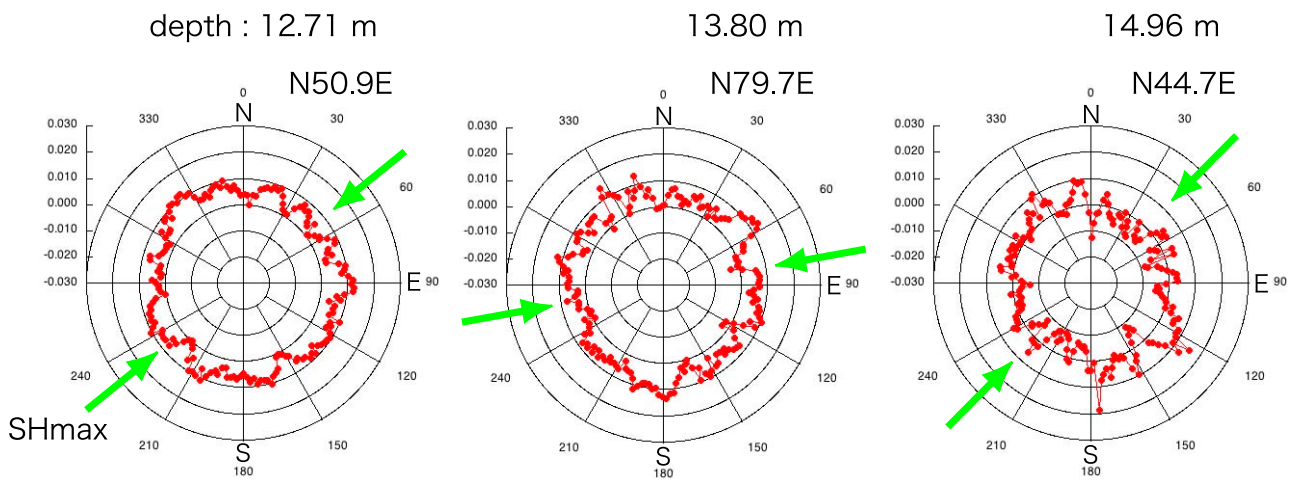
Fig. 3. Example of stress field calculation around the southern edge of the Kego fault. (a) Calculation region of 10 km square. (b) Distribution of stress orientation for the case of 100 % stress relief on the fault. The classified area corresponds to the perturbation of stress orientation compared with far field. There is quite a large perturbation near the fault. (c) The same as (b) for 70 % stress relief. (d) The same as (b) for 30 % stress relief.



No.2

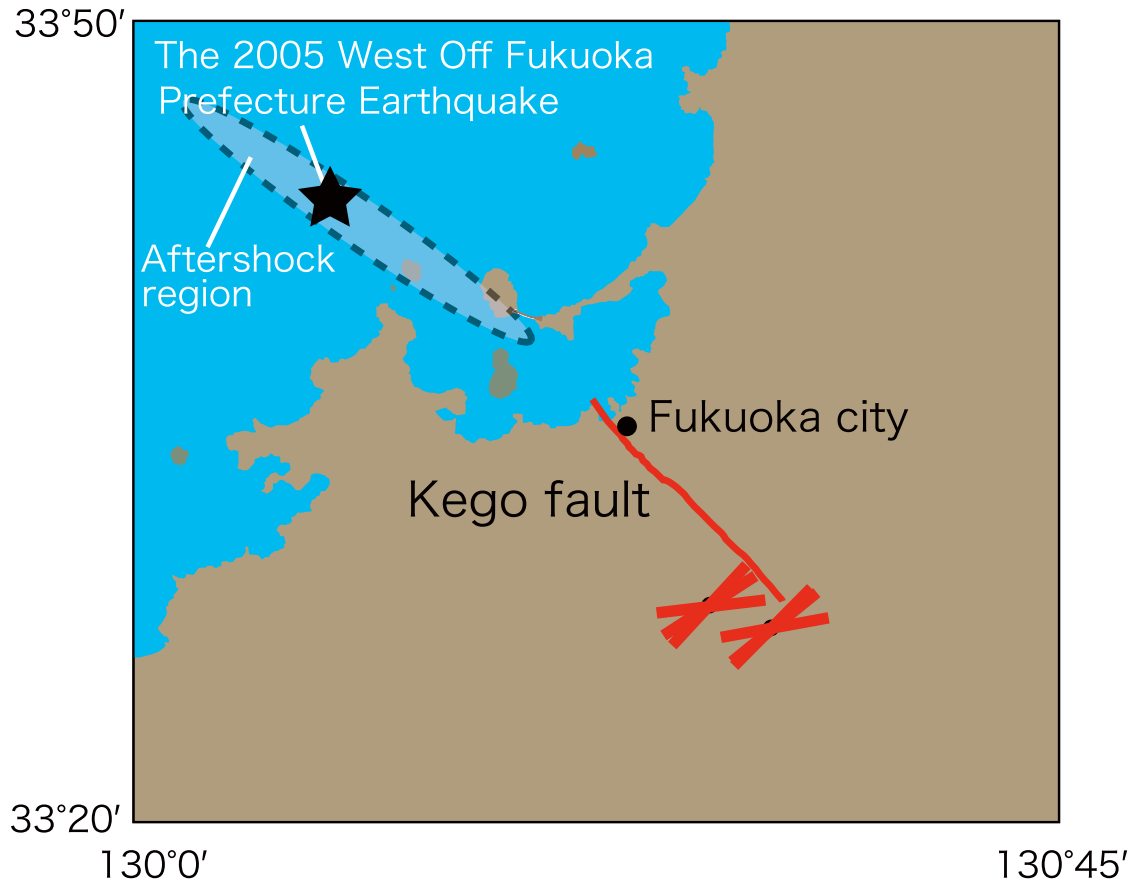


No.3



第4図. No. 2 と No. 3 の孔井の各3 深度で得られた孔径の相対変化量. 10° の範囲で移動平均を行っている. 半径方向の目盛りは $10\mu\text{m}$. この変化量を用いた楕円近似によって求めた短軸の方向が最大水平圧縮応力 (SHmax) の方向 (図中の矢印) となる. 3 深度で得られた方位の平均値は, No. 1 と No. 2 とともに約 $N60^\circ\text{E}$ である.

Fig. 4. The relative changes of the borehole shape obtained at No. 2 and No. 3 locations. Moving average for 10 degrees is applied to this data. Radial axis tick is a $10\mu\text{m}$ interval. The maximum horizontal compressive stress (SHmax) orientation (arrows in figure) is determined from the minor axis of the ellipse fitted to the deformed shape of borehole cross section. The average orientation of SHmax is about $N60^\circ\text{E}$ for the both locations.



第5図. No. 2 と No. 3 の孔井で得られた最大水平圧縮応力(SHmax)の方位(図中の赤直線). 各3深度で得られた方位を重ねて表示している. SHmax の方位は警固断層の走向に対して高角となる.

Fig. 5. SHmax orientation (red lines in figure) at No. 2 and No. 3. The orientation estimated at 3 depths in each location is overlaid on the map. Estimated orientation has a large angle to the strike of the Kego fault.