

孔井内歪計で観測される長期トレンドデータの解析と地殻応力測定結果の比較

Analysis of long-term trends of borehole strainmeter data and its comparison with crustal stress measurements

木口 努¹・桑原保人¹・松本則夫¹

Tsutomu Kiguchi¹, Yasuto Kuwahara¹ and Norio Matsumoto¹

¹ 活断層・火山研究部門 (AIST, Geological Survey of Japan, Research Institute of Earthquake and Volcano Geology, kiguchi.t@aist.go.jp)

Abstract: We analyzed anisotropic long-term trend of strain data observed by 4-component borehole strainmeters at 16 AIST borehole observation sites near the Nankai Trough, southwestern Japan. A stress relaxation process around the borehole in an anisotropic stress state is a plausible mechanism of the long-term trends for several years just after borehole drilling. Time-varying orientations of the maximum principal strain were estimated for 4- to 10-year data. The obtained orientations at 13 sites are nearly constant in time within a standard deviation of 15 degrees. We examined data qualities of the 4-component borehole strains by analyzing the long-term trend so that validities in analysis are confirmed at 8 sites. At 6 sites of these 8 sites, we compared the present result of principal strain orientations with crustal stress measurements such as the hydraulic fracturing tests at the same boreholes, indicating that the orientations of the maximum principal strain estimated by this analysis are generally consistent with the stress measurements at 5 sites. It is suggested that careful analyses are necessary to interpret the long-term trend of the borehole strainmeter data.

キーワード: 孔井内歪計, 長期トレンド, 地殻応力測定, 応力緩和過程, 南海トラフ

Keyword: borehole strainmeter, long-term trend, crustal stress measurement, stress relaxation process, the Nankai trough

1. はじめに

掘削孔井を利用して原位置で地殻応力を測定する既存の手法として, パッカーにより密閉された孔井内区間に水圧をかけて亀裂を生成する水圧破碎法(例えば, Haimson, 1978), 孔底に設置した計器が周囲の岩盤から切り離されたときに生じる歪や変位を測定する応力解放法(例えば, Kanagawa *et al.*, 1986)や孔井を掘削することで孔井近傍に生じた応力集中により孔壁面が崩壊するブレイクアウトを利用する方法(例えば, Zoback *et al.*, 1985)などが広く用いられている。これらの手法はそれぞれの特徴に基づいて選択され実際に現場で適用されているが, 既存の応力測定手法はいずれも, 原理的・技術的ないくつかの問題を抱えており, 課題を解決すべく様々な提案をなされているのが現状である(例えば, Ito *et al.*, 2006, 2013)。また, 新たな測定手法として, 孔井掘削直後の異方的なクリープ変形による孔径変化を利用した応力方位を測定する試みもあるが, 一つの孔井内で深度による測定値のばらつきが無視できない場合があるなどの報告もありその原因は必ずしも明らかではない(木口ほか, 2010; Kuwahara *et al.*, 2012)。これら測定上の問題に加え, 地殻応力は, 周辺に存在する断裂の影響により, わずかな位置の違

いで顕著なばらつきを示す場合もあり(例えば, Yale, 2003), 応力測定そのものの信頼性ともあいまって, 測定された応力がどの程度広域の応力場を反映しているのかの考察が難しい場合がある。

一方, 孔井内歪計で観測される長期的な歪変化のトレンドが応力方位を示す可能性が指摘されている(Gladwin *et al.*, 1987; 木口ほか, 2004; Day-Lewis, 2007)。これは, 深さ数 100 m 以上の孔井内に設置された多成分歪計の設置後数ヶ月以上に渡って見られる歪の異方的な変化をみるものである。その異方的歪変化の原因は, 異方的な地殻応力のもとでの孔井周辺岩盤の粘性によるクリープ変形かあるいは流体を含む岩石の多孔質弾性体としての振る舞いを原因として起こるものとの説がある。いずれの原因にせよ理論的には最大圧縮軸方向が最大主歪方向と一致する。

我々は, 上記の応力測定に関わる問題意識に基づき, 愛知県から紀伊半島, 四国周辺の産業技術総合研究所の 16 の地点で測定された歪計の長期トレンドと同観測点で実施された各種応力測定の結果の比較を行った。長期トレンドデータについては, データの品質を評価し応力方位を求めることの妥当性について検討しつつ観測期間中の最大主歪方位を連続的

に求めた。ここでは、歪計の長期トレンドに関する先行研究、解析の原理、歪計の観測データ、データ処理と結果、観測データへモデルを適用することの妥当性の検討、他の応力測定法から得られた応力方位との比較について報告する。

2. 孔井内歪計の長期トレンドに関するこれまでの研究

孔井内歪計は地下岩盤を掘削した孔底に設置され、セメントを主成分とするグラウトにより歪計と孔壁面を密着させた状態で連続観測を行なうものであり、体積歪計 (Sacks *et al.*, 1971) や、水平多成分歪計 (例えば, Gladwin, 1984; Ishii *et al.*, 2002) がある。一般に、歪計を孔井内に設置した直後の数ヶ月間程度に観測される歪データには、歪計と孔壁の間のグラウトの固化作用や温度変化などにより比較的大きな振幅の変動が含まれる。この初期変動の後、歪データには気圧変化、地球潮汐、海洋潮汐やテクトニックなイベントなどに対応する短周期の信号と長期のトレンドが含まれる (Gladwin *et al.*, 1987)。

孔井内歪計で観測される長期トレンドには、観測機器のドリフト特性、孔井内に歪計を設置する際のグラウトや地下水等の諸条件、孔井周辺の岩盤の異方性・不均質性などによる影響もあると考えられるが、長期トレンドの主要部分は、粘性の特性を持つ岩盤に孔井を掘削することによる応力擾乱の緩和過程を反映したものであるとするモデルがある (例えば, 坂田, 2002; Sakata, 2005)。このモデルによれば、水平歪の各方向の成分の長期トレンドの差は孔井周辺の異方的な応力場により生じ、その結果、孔井は最大水平圧縮方向に最も縮むことになる。この応力の緩和過程における歪データは、指数関数的に変化量は減少しながら数年以上の長い期間、緩やかな変化が継続することが期待される。Gladwin *et al.* (1987) は孔井内歪計で観測された長期間の変形を孔井掘削による岩盤の粘弾性変形の反映であるとしている。坂田 (2002) は歪計データの長期トレンドの主要部分を圧縮場の中に孔井を掘削することによる岩石のクリープ現象として解釈し、体積歪成分に対して Maxwell の粘弾性体モデルを適用することにより岩石の粘性係数を求める試みを行なった。また、異方的な応力下にある岩盤に孔井を掘削した場合の歪の時間変化は、粘弾性体モデルを用いて、Cristescu (1989) などにより計算されており、木口ほか (2004) は、これらのモデルに基づいて、1995年兵庫県南部地震後に旧地質調査所によって歪計が設置された兵庫県の宝塚観測点と育波観測点の応力方位の推定を行なっている。

その他、歪計の長期トレンドの原因として多孔質弾性体のモデルを適用した例があり、アメリカ西海岸の地殻変動をモニタリングするプロジェクト Plate

Boundary Observatory (PBO) のネットワークで観測されたデータを Day-Lewis (2007) が解析している。Day-Lewis (2007) は、歪計の長期トレンドを岩盤の掘削で生じる孔井近傍の応力集中の再平衡化過程とみなして、多孔質弾性体モデルを用いて、応力方位や歪計周辺の岩盤の物理特性の推定を試みた。多孔質弾性体では固体の変形は孔隙の流体圧力と関係付けられ、長期トレンドの変形速度は、主に岩盤の透水係数に支配される。Day-Lewis (2007) によると、多孔質弾性体モデルを適用する際の問題の1つは、観測データにモデルを近似して得られる岩盤の透水係数が 1×10^{-12} darcy (1×10^{-24} m²) となる場合があり、原位置水理試験やコア試験から推定される岩盤の透水係数よりも非常に小さい値を示す傾向となることである。なお、Brace (1980) は、結晶質岩の原位置で得られる透水係数の範囲を $1 \times 10^{-9} \sim 1 \times 10^{-1}$ darcy としている。また透水係数を 1×10^{-11} darcy に仮定した Day-Lewis (2007) の計算例では、観測開始から約 100 日で歪変化がほとんど見られないとしている。従って、通常岩盤に相当する透水係数を用いた多孔質弾性体モデルでは、応力の緩和過程が非常に短時間で収束することになり、観測データを説明できないと考えられる。

実際には、岩盤の粘性を原因とするにせよ、あるいは多孔質弾性体の透水性の効果の原因とするにせよ、いずれの場合も歪計で観測される長期トレンドは孔井掘削により孔井近傍に生じた応力集中の緩和過程であると考えられ、孔井は最大水平圧縮方向に最も縮むことになるので、観測データから求めた最大主歪方位から応力方位が得られることになる。当然ながら、長期トレンドに影響を与える可能性がある歪計設置時の不均一の影響や岩盤の異方性などは無視できるとした場合の結果である。本論文では、歪計で観測される長期間の変形の主要部分は岩盤の粘弾性変形によると解釈し長期トレンドの説明を試みるが、応力方位の結果についてはモデルに依存するものではない。

3. 粘性による異方的応力緩和と応力方位の決定法について

歪計で観測される長期トレンドのメカニズムとして前章で説明したように粘弾性体モデルを用いることにする。第1図の概念図に示すように、最大水平圧縮応力 S_{Hmax} と最小水平圧縮応力 S_{Hmin} が作用する岩盤中に、鉛直に孔井が掘削されたことによる孔井近傍の水平面内の弾性的な応力場は、2次元問題を仮定し極座標を用いた Kirsch の解として知られている (例えば, Cristescu, 1989; Jaeger *et al.*, 2007)。粘弾性体の2次元問題を仮定した場合の歪の時間変化の問題は、Cristescu (1989) により、岩盤内のトンネル掘削の安定性の問題として解析されている。粘弾性

として標準線形モデルを用いることにより、孔径方向の歪の時間変化は次式のように表せる (Cristescu, 1989).

$$\begin{aligned} \varepsilon_{rr} = & \left[\left(\frac{1}{2G} - \frac{1}{2G_0} \right) \exp(-kt) + \frac{1}{2G_0} \right] \left[\left(p - \frac{1}{2}(S_{Hmax} + S_{Hmin}) \right) \frac{a^2}{r^2} \right. \\ & \left. - \frac{1}{2}(S_{Hmax} - S_{Hmin}) \left(\frac{2a^2}{r^2} - \frac{3a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \right] - [B_1 \exp(\lambda_1 t) + B_2 \exp(\lambda_2 t)] \\ & + \frac{1}{2G_0 + 6K_0} \frac{1}{2} (S_{Hmax} - S_{Hmin}) \frac{6a^2}{r^2} \cos 2\theta \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 θ は S_{Hmax} の方位からの角度、 a は孔径、 r は孔井の中心からの距離、 t は孔井掘削からの時間、 p は孔井内の圧力、 K_0 と G_0 はそれぞれ、岩盤の静的体積弾性率と静的剛性率、 G は動的剛性率、 k は岩盤の応力緩和の時定数の逆数、 B_1 、 B_2 、 λ_1 、 λ_2 は岩盤の体積弾性率、剛性率と応力緩和の時定数から求められる係数である。

(1) 式から、孔径方向の歪の時間変化 ε_{rr} は、

$$\varepsilon_{rr} = A \cdot \cos 2\theta + C \quad (2)$$

の形で表すことができ、 $\cos 2\theta$ の方位依存性を持つことがわかる。ここで、係数 A と C は方位 θ に依存しない係数であり、掘削からの時間、孔径、岩盤の弾性定数と応力緩和時定数から決められる量である。歪計の観測からは S_{Hmax} の方位が未知であるからその方位を B と置くと、 ε_{rr} は、(2) 式を用いて、

$$\varepsilon_{rr} = A \cdot \cos(2(\theta - B)) + C \quad (3)$$

となり、測定データから係数 A 、 B 、 C を求める問題となる。なお (3) 式は B について非線形であるが、三角関数の性質を利用して、 $\varepsilon_{rr} = a \cdot \sin 2\theta + b \cdot \cos 2\theta + c$ の式に変換できる。ここで、係数 a 、 b 、 c は A 、 B 、 C の関数であり、3 方向以上の観測データを用いて、線形最小二乗法で a 、 b 、 c を求めることができる。

4. 歪計データとデータ処理方法

産業技術総合研究所は、2006 年から、南海トラフで発生する巨大地震に関連する地下水位変化、地殻変動や地震活動などの研究を進め地震発生の予測精度の向上を図ることを目的とし、愛知県から紀伊半島、四国周辺において多機能の地下水等総合観測点の整備を順次行ない、2013 年までに 16 地点を構築した (小泉ほか, 2009; Itaba *et al.*, 2010; 小泉, 2013)。第 2 図と第 1 表に 16 地点の名称、位置と座標、観測開始の年月などを示す。地殻歪は各地点に掘削した孔井の孔底に設置した多成分の歪計により観測

されている。16 地点のうち 12 地点で設置した歪計は、石井式歪計 (水平 4 成分、鉛直 2 成分) (Ishii *et al.*, 2002; Asai *et al.*, 2009) であり、残りの 4 地点 (ITA, ANK, KOC, MAT の各地点) では Gladwin 式歪計 (水平 4 成分) (Gladwin, 1984) を設置した。第 2 図と第 1 表に各地点の歪計の種類も記入している。石井式歪計の設置深度は約 600 m、Gladwin 式歪計は約 200 m を基本としており、正確な設置深度は第 1 表に示されている。いずれの歪計も、歪センサーの水平方向は、隣り合うセンサーと 45° の間隔に固定されている。また、歪計の原データは、岩盤中の亀裂、埋設に使用するグラウトや歪計のケースなどの影響を受けるため、岩盤の歪値とは異なる。このため、Matsumoto *et al.* (2010) の方法を用いて、観測による歪値とモデル計算による理論潮汐や遠地地震の表面波の振幅とを比較することによりキャリブレーションを行ない補正された歪データを用いた。なお、注意すべきこととして、キャリブレーションによる補正は全地点で問題なく行われたわけではなく、特に ANK と KOC の 2 地点ではキャリブレーションの信頼性が低かった。また各地点により観測を開始した年月が異なるため、用いる歪データの日数も異なっている。

歪データは 20 Hz のサンプリングレートで取得されているが、本解析では、長期トレンドの変化が大きく、日周変化の影響は相対的に小さく無視できることから、1 日間隔の日値と呼ばれるデータを用いた。日値は、その日の 6 時 0 分の前後それぞれ 30 秒間で 1σ (σ : 標準偏差) 範囲内のデータを平均することから求めている。降雨、潮汐や大気圧による影響も小さいと考えられるのでそれらの補正も行っていない。ただし、2011 年東北地方太平洋沖地震時に各地点で明瞭なステップ状の歪変化が見られたので、この歪ステップを解消するための補正を行った。

孔井内歪計で観測された水平 4 成分の長期トレンドのデータの概要を説明するため、例として、TSS の約 8 年間の記録である第 3 図 (A) を用いることにする。歪の伸びを正で示している。図中に、北を上向きとした 4 つの成分の方位図を含んでいる。この図の水平 4 成分のうち 2 成分で縮みを示し 2 成分で伸びを示すが、各成分とも観測の初期段階で相対的に急激に変形し、また縮みや伸びの速度は各成分により異なるという特徴を示す。歪計の N246 成分 (北から時計回りに 246° の向きの成分) と N336 成分は互いに直交する方向であり、N246 成分が最も大きい縮みを示し N336 成分は最も大きい伸びを示す。

歪計記録に示された長期間の変形から最大主歪方位を求めるために、以下に示すデータ処理を行なった。まず、異方的な応力場のみ注目するために、各成分の歪値から 4 成分の平均歪を差し引く (第 3 図 (B))。これにより、データに含まれる温度変化などによる等方的な歪成分が除去される。図では、

最大主歪方位を求める解析を開始する日からデータを表示し、解析開始日の歪値をゼロとしている。

次に、第3図(B)を見ると、数年以上に渡って長期的なトレンドの傾向が変わらないように見えることから、このトレンドから最大主歪方位がどの程度安定なのかを見ることにする。そのためここでは最大主歪を求める期間として各成分の90日間の歪値の差を用いた。90日の期間内の4方向の歪の相対変化量を求め、(3)式を最小二乗法で解くことにより最大主歪方位を求める。さらに90日の期間を1日ずつ移動させて、順次、方位の変化を連続的に求める(第3図(C))。90日の期間を順次移動して最大主歪方位を求めることで、歪変化の長期トレンドから応力方位を求めることの妥当性の検討も可能になると考える。なお、歪の相対変化量を求める期間として90日の他に、30日や180日などいくつかの期間を用いたデータ処理を同時に行なったが、30日と180日を用いた場合の解析結果は90日の期間を用いて得られた方位とほぼ同じであった。この程度の期間であれば本手法で得られる方位に与える影響は小さいと考える。

最大主歪方位を求める観測期間については、多くの観測データを見た結果、歪計設置後180日以内の観測データはグラウトの固化や温度変化の影響が極度に大きいと考えられるので、原則として、最大主歪方位を求める解析には使用しなかった。この期間はトレンドの伸び縮みの傾向が急激に変わる場合も多い。また、地点によって歪データが180日以降も設置作業などの歪計の設置状態に関係すると思われる異常な変動が顕著な場合は、これが継続する期間を除いて解析した。歪計設置後180日より長い期間を除いて解析した地点は、NSZ、ANO、ANK、SSKの4地点であり、例えば、ANOでは300日以降のデータを解析対象とした。

5. 結果

16地点における歪計で観測された長期トレンドのデータ、各成分の歪データから平均歪を差し引いたデータ及びそれらから求めた最大主歪方位の3つの結果を、第3図のTSS地点の再掲も含め、それぞれ、第4図(a)~(p)に示す。なお、(a)から(p)は東から順に並べている。各図の上部の横軸は観測開始以後の西暦年を示している。第4図(a)~(p)のそれぞれの(B)に示す平均歪を除いた歪値は、直交する2つの歪成分において正負が異なり絶対値が等しい値を示しており、 $\cos 2\theta$ の方位依存性の特徴を表している。

第4図(a)~(p)の各地点の最大主歪方位の結果である(C)図を見ると、観測期間中に方位が変動しており、その変動の様子は各地点によって異なることがわかる。第4図(p)に示すUWA地点では約7.8

年の全観測期間を通じて方位はほぼ一定であり、観測期間中の方位の標準偏差は第1表に示すように1°と小さい。一方、第4図(n)TSS地点の最大主歪方位は観測期間中の短周期の変動は小さいが、詳細に見ると観測の初期で方位が約10°回転している。また、第4図(o)MAT地点では、特に2011年後期より最大主歪方位が短周期の大きな変動を示している。(B)図を詳しく見ると歪データにも短周期の変動が見られ、この原因として、歪計の各成分の近くの岩盤中に透水性亀裂が存在し、テクトニックな活動とは関係しない降雨などの影響により亀裂中の間隙圧が変化することなどが考えられる。本研究では、観測期間中の方位の平均値を求め、その値を各地点の最大主歪方位とすることにする。

また興味深い点として、例えばKSTでは2011年東北地方太平洋沖地震によると思われる顕著な影響が見られたので、この地震前後の拡大図を第5図に示す。図で地震前のデータを黒色、地震後を赤色で表している。第5図(A)、(B)を見ると、地震直後から約110日間、歪データのトレンドが変化し、その後は地震前のトレンドにほぼ戻っていることがわかる。第5図(C)に示す方位もこの期間の歪の変化に対応して最大で約10°反時計回りに回転し、また元の方角に戻っている。なお、解析期間が90日間で方位のプロット位置がその開始点のため、最大主歪方位の変化が地震前から現れたように見えている。KST以外にMYMでも、2011年東北地方太平洋沖地震と関係付けられる大きな変動が見られる。

6. データの品質について

孔井内歪計が設置後から数年の間にもどのような変動を記録し、それがどのような品質であるのかについて整理するために、ここでは、4成分観測であることの冗長性の利点を活かした観測データの評価と、3章で説明した粘性による単純な応力緩和モデルがどの程度実際のデータを再現できるのかの確認を行った。

まず、4成分観測の冗長性の利点を活かした観測データの評価については以下のような方法とする。5章で示した結果は、4成分の歪変化を用いて3つの係数を未知数として最小二乗法で最大主歪方位を求めているが、4成分歪計のうち任意の3成分のデータがあれば方位を求めることができる。従って、3つの成分の4通りの組み合わせの歪変化を用いてそれぞれ求めた4つの方位と4成分から求めた方位が整合するかを確認することで、等方均質弾性体の仮定が成り立っているか、つまり各センサーからの直接の出力が媒質の局所的な不均質や媒質の異方性の影響をどの程度受けているかを評価できると考える。

また3成分の歪データを使用して解析する場合には、その3成分に対応して求められたキャリブレーション

ション係数を用いて歪値を補正することとする。ここで、ANKとKOCの2地点では、前述のように、そもそも4成分のデータによるキャリブレーションに関して、遠地地震の表面波を用いた観測値と理論値の比較で振幅・位相ともに異なり、その信頼性が低い。そのため3成分歪データを用いたキャリブレーションでも同様に信頼性が低く、3成分と4成分による解析の比較は無意味と考え、3成分でのキャリブレーション係数を求めなかった (Matsumoto *et al.*, 2010)。このようにそもそも4成分データのキャリブレーションの信頼性が低いANKとKOCは、データの品質が良くないものとして整理することにする。4成分でのキャリブレーションの信頼性が低くなった原因は現在のところ明らかでない。

ANKとKOCの2地点を除いた14地点における4成分及び4通りの3成分の組み合わせからそれぞれ求めた最大主歪方位の時間変化を第6図(a)~(n)に示す。各図ではそれぞれ得られた最大主歪方位を、解析に使用した成分の組み合わせで色分けしている。まず、それぞれの解析方位が全解析期間を通じて整合的な観測点としては、第6図の(b), (c), (f), (g), (k)~(n)に示すNSZ, ANO, ICU, KST, SSK, TSS, MAT, UWAの8地点が挙げられる。これらは、各組み合わせによる方位のばらつきが小さく、4成分の解析による方位は4通りの3成分解析による方位の平均付近に位置することがわかる。また、全期間整合的ではないが、MYM(第6図(e))では、観測を開始して約800日以降における4成分及び3成分の組み合わせで得られる方位は大きくばらつきが、約800日までは各方位はほぼ整合している。長期トレンドの解析においては歪変化が相対的に大きくなる観測開始に近いデータが重要であると考え、MYMでは、800日までの観測データのみを用いることとし、3成分と4成分の解析は整合することとした。さらに、HGMは、第4図(h)の原記録に示されるように、観測期間の前半では不連続な変動をするなど不安定な状態が続いたが、2009年頃に一時安定した時の方位と2012年11月以降に歪データが安定した時の方位はほぼ一致し、2012年以降も応力緩和状態の傾向を示すと思われるので、2012年11月以降(観測開始から2000日以降)のデータを解析することとした。第6図(h)でも分かるようにHGMの2012年11月以降の3成分と4成分の解析は整合する。

一方、各成分組み合わせによる結果が整合していない観測点としては、第6図(i)のMURでは、3通りの3成分の組み合わせで求めた最大主歪方位の観測期間中の平均値が、4成分から求めた方位の平均値(N117°E)から40°以上異なった。(j)のNHKについてもその差は大きく、(a)TYSと(d)ITAではともに観測の前半と後半で方位の傾向が大きく異なり、方位のばらつきが大きい。3成分の各組み合わせにより求められる方位が大きく異なる原因として

は、歪計の各成分は約25cm間隔で設置されているため、ある歪成分の近傍の岩盤やグラウトに不均質が存在し等方均質弾性体の仮定が成り立っていない可能性が考えられる。

以上から、各成分の組み合わせにより最大主歪方位が大きく異なったMUR, NHK, YYS, ITA及び3成分による解析を行わなかったANK, KOCの合計6地点の結果は参考に止める程度とし、それ以外の10地点では、3通り以上の3成分の組み合わせから求めた解析期間中の平均の方位が4成分から求めた方位と10°以内の差であり、3成分の組み合わせによる解析と4成分の解析に整合性があると言える。なお、前述の通り、MYMは観測開始から800日までのデータのみを使用し、HGMは観測開始から2000日以降のデータのみを使用することとした。

次に、3章で説明した単純な粘性緩和モデルがどの程度実際のデータを再現できるのかの確認については、歪の時間変化率が、観測初期で相対的に大きく、時間が経過するとともに小さくなるかを見ることにする。なお、多孔質弾性体のモデルの場合でも、歪の時間変化率は同様の傾向を示す (Day-Lewis, 2007)。16地点における、平均歪を差し引いた後の各成分の90日間の変化率を第7図(a)~(p)に示す。第7図(n)や(p)に示すように、TSSやUWAの歪4成分全ては観測の経過とともに概ね指数関数的に歪の変化率の絶対値が小さくなっている。しかし、第7図(c)ANOのN173とN263の歪成分は、観測初期において時間とともに歪の変化率の絶対値が増加している。これは明らかに粘性による応力緩和のモデルや多孔質弾性体モデルが適用できない例であり、たとえ最大主歪方位が安定的に求まっていたとしても、その方位の結果が何を示すものか明らかではない。ANOと同様の現象は、第7図の(a)TYS, (b)NSZ, (d)ITA, (j)MUR, (k)KOCでも見られ、これら6地点の方位の結果については以後議論しない。一方、この6地点以外の10地点は、概ね問題のない振る舞いをしていると考えられる。

なお、第4図(A)の原記録や(C)の方位の結果を見ると、上記6地点のうち、特に(a)TYSでは、歪計設置後約900~1100日において歪計ケーブル切断の障害の発生があり、その障害発生前後で長期トレンドが大きく異なっている。現状ではトレンドが変化した理由は明らかでなく、観測初期の段階でも500日前後に見られるような不連続な変動がある。(d)のITAは、観測当初から歪データの変動が続き、不連続な変化も継続し、また、約2000日以降に大きくトレンドが変化する。(k)のKOCでも原因が明らかでないが観測期間を通じて長期トレンドが不安定に変動し、それに対応して最大主歪方位も著しく変化している。このためTYS, ITA, KOCの3地点では、最大主歪方位の結果を採用せず、その平均値は求めないこととする。

これまで述べてきたことを総合し、データの品質も考慮した最大主歪方位の結果を第1表と第8図に示す。第1表には解析期間中の方位の標準偏差も記した。この標準偏差は、方位を求めた13地点では15°以内であり概ね解析期間を通じて安定していると言える。一方、歪データの長期トレンド解析を行う際に、データの質が等方均質弾性体と粘弾性による応力緩和の2つの仮定を行う上で必要な条件を満たしていると判断できたのは、16地点中、MYM, ICU, KST, HGM, SSK, TSS, MAT, UWAの8地点のみであった。この2つの条件を満たさない、またはキャリブレーションの信頼性が低い8地点の方位は、第1表においてかっこ付き、あるいは特に方位を求めなかった3地点はN/Aと表示している。また第8図では2つの条件を満たし解析モデルの適用が妥当であると判断した8地点の方位を赤色の太い実線で示し、参考までに方位を求めた5地点については破線で示している。解析モデルの適用が妥当である8地点だけで見ても最大主歪方位は、北～東～南東の範囲に広くばらついていることがわかる。

7. 応力測定データとの比較及び測定された応力場について

歪計のデータを用いた16の地点では、それぞれ深度が約600 m, 200 m, 30 mの3本の孔井が掘削されている。このうち11地点では、深度約600 mと200 mの2本の掘削孔井でボアホールブレイクアウト及び掘削に伴う泥水圧によって生成された縦亀裂が物理検層の孔壁画像により観察され、これら縦亀裂の方位の分布から各観測地点の応力方位が求められている(Satoh *et al.*, 2013)。また、16地点のうち6地点では、Satoh *et al.* (2013)と佐藤ほか(2013)が深度約600 mまたは200 mの孔井で水圧破砕法による応力測定を実施し、応力方位を求めている。一方、KSTとHGMの2地点ではいずれの応力測定法でも応力方位は求められていない。彼らによれば、孔壁画像の観察から検出された縦亀裂の方位は、各地点で多くの深度において求められており、各地点で深度による方位のばらつきは、標準偏差で10～25°程度ある。また、水圧破砕法は各地点で2～13深度(平均7深度)で実施され、得られた応力方位の標準偏差は約5～35°である。概ね、応力方位は安定的に求められていると言える。

そこで我々は、各地点で孔壁面の縦亀裂の観察及び水圧破砕法により求められた応力方位の平均値と、今回の歪計の長期トレンドから求めた最大主歪方位との比較を行なった。第8図に、Satoh *et al.* (2013)と佐藤ほか(2013)の結果から求めた14地点の平均の応力方位を黒色実線で示す。最大主歪方位と応力方位を比較できた6地点のうち、MYM, ICU, TSS, MAT, UWAの5地点では両者の方位の差は5°から

20°程度で概ね整合しており、歪計の長期トレンドはその場の応力場と粘性緩和を示していると考えて矛盾がないようである。一方、SSK地点では両者の方位が約50°異なっており、この地点の応力測定による方位のばらつきが標準偏差で約20°あることを考慮しても、両者の違いは有意である。SSK地点の長期トレンド解析による方位が応力測定による結果と整合しなかった原因は明らかでない。

なお、今回の解析で得られた各地点の最大主歪方位は北～東～南東の範囲に分布している。この方位の分布と、フィリピン海プレートが南海トラフ付近で沈み込む方向であるN55°W (Miyazaki and Heki, 2001)と比較すると、KSTとHGMを除き、沈み込みの方向と大きく異なる方位を示していることがわかる。Terakawa and Matsuura (2010)のFig.10によると、この地域の30 kmより浅い地殻浅部の地震のメカニズム解から推定された最大主圧縮軸方位の分布は、四国南西端の足摺岬のTSS周辺で東西方向、紀伊半島南端付近のKST周辺で北西～南東方向となり、最大主歪方位と概ね一致し興味深い。紀伊半島南東部のICUとMYM周辺では最大主圧縮軸方位のばらつきが大きく、最大主歪方位との比較が難しい。なお、四国東部や紀伊半島中央部では、歪計による応力方位が求められていない。四国西部のUWAやMAT周辺では地殻浅部で地震が起こっていないため最大主圧縮軸方位が求められないなどの理由で比較ができないと考える。

8. まとめ

産業技術総合研究所が愛知県から紀伊半島、四国の各地点において整備した16の孔井内多成分歪計で観測された数年以上の長期トレンドを、岩盤中に孔井を掘削することによる応力緩和過程を反映したものとして解析し、地殻応力測定結果との比較を行った。各地点で長期トレンドは様々な特徴を有することが明らかとなり、16地点のうち8地点で、等方均質弾性体及び岩盤の粘性による応力緩和現象の仮定が成り立つ条件を満たし、その他の地点では、それ以外の何らかの現象を考える必要があることがわかった。この8地点のうち6地点では、水圧破砕法や孔壁画像の縦亀裂の検出により応力方位が求められており、5地点でそれらの方位と最大主歪方位は概ね整合した。孔井内歪計のデータに見られる長期トレンドは観測地点の応力場を反映した変動を示している場合もあると考えられるが、それでは説明できない場合もあり、データの品質を様々な観点から確認するなど、データ解析の際には注意が必要である。

謝辞 産業技術総合研究所の地下水等総合観測点を整備するプロジェクトの責任者である小泉尚嗣博士

(現所属:滋賀県立大学) 及び多くの関係者の方々に、孔井内歪計で観測された長期トレンドを解析する機会を与えて頂きました。査読にあたっては産業技術総合研究所の今西和俊博士から有益なコメントを頂き、本稿の改善に大きく役立ちました。ここに記して感謝いたします。

文 献

- Asai, Y., Ishii, H. and Aoki, H. (2009) Comparison of tidal strain changes observed at the borehole array observation system with in situ rock properties in the Tono region, central Japan. *Journal of Geodynamics*, 48, 292-298.
- Brace, W.F. (1980) Permeability of crystalline and argillaceous rocks. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr.*, 17, 241-251.
- Cristescu, N. (1989) *Rock Rheology*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 336pp.
- Day-Lewis, A. D. F. (2007) Characterization and modeling of in situ stress heterogeneity. Ph.D. thesis, Stanford University, 196pp.
- Gladwin, M. T. (1984) High precision multicomponent borehole deformation monitoring. *Rev. Sci. Instr.*, 55, 2011-2016.
- Gladwin, M. T., Gwyther, R. L., Hart, R. and Francis, M. (1987) Borehole tensor strain measurements in California. *J. Geophys. Res.*, 92, 7981-7988.
- Haimson, B. C. (1978) The hydrofracturing stress measuring method and recent field results. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr.*, 15, 167-178.
- Ishii, H., Yamauchi, T., Matsumoto, S., Hirata, Y. and Nakano, S. (2002) Development of multi-component borehole instrument for earthquake prediction study: some observed examples of precursory and co-seismic phenomena relating to earthquake swarms and application of the instrument for rock mechanics. In Ogasawara, H., Yanagidani, T. and Ando, M., ed., *Seismogenic Process Monitoring*, A.A. Balkema Publishers, Rotterdam, 365-377.
- Itaba, S., Koizumi, N., Matsumoto, N. and Ohtani, R. (2010) Continuous observation of groundwater and crustal deformation for forecasting Tonankai and Nankai earthquakes in Japan. *Pure Appl. Geophys.*, 167, 1105-1114.
- Ito, T., Igarashi, A., Kato, H., Ito, H. and Sano, O. (2006) Crucial effect of system compliance on the maximum stress estimation in the hydrofracturing method: Theoretical considerations and field test verification. *Earth Planets Space*, 58, 963-971.
- Ito, T., Funato, A., Lin, W., Doan, M.-L., Boutt, D. F., Kano, Y., Ito, H., Saffer, D., McNeil, L. C., Byrne, T. and Moe, K.-T. (2013) Determination of stress state in deep subsea formation by combination of hydraulic fracturing in-situ test and core analysis – A case study in the IODP expedition 319-. *J. Geophys. Res.*, 118, 1203-1215.
- Jaeger, J. C., Cook, N. G. W. and Zimmerman, R. W. (2007) *Fundamentals of Rock Mechanics* Fourth Edition. Blackwell Publishing, Massachusetts, 475pp.
- Kanagawa, T., Hibino, S., Ishida, T., Hayashi, M. and Kitahara, Y. (1986) In situ stress measurements in the Japanese island: Overcoring results from a multi-element gauge used at 23 sites. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr.*, 23, 29-39.
- 木口 努, 桑原保人, 佐藤凡子 (2004) 掘削後の孔径変化を用いた応力場の推定. *物理探査学会第111回学術講演会講演論文集*, 153-156.
- 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.
- 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, 干野 真 (2009) 紀伊半島～四国周辺における地下水等総合観測施設による短期的ゆっくり滑りと東南海・南海地震のモニタリング. *日本地球惑星科学連合 2009 年大会予稿集*, S-156-004.
- 小泉尚嗣 (2013) 地下水観測による地震予知研究, *シンセシオロジー*, 6, 24-33.
- Kuwahara, Y., Kiguchi, T., Lei, X.-L., 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.
- Matsumoto, N., Kamigaichi, O., Kitagawa, Y., Itaba, S. and Koizumi, N. (2010) In-situ calibration of borehole strainmeter using Green's functions for surface point load at a depth of deployment. *Eos, Trans. AGU, Abstract G11A-0626*.
- Miyazaki, S. and Heki, K. (2001) Crustal velocity field of southwest Japan: Subduction and arc-arc collision. *J. Geophys. Res.*, 106, 4305-4326.
- Sacks, I. S., Suyehiro, S., Evertson, D. W. and Yamagishi, Y. (1971) Sacks-Evertson strainmeter, its installation in Japan and some preliminary results concerning strain steps. *Pap. Meteor. Geophys.*, 22, 195-207.
- 坂田正治 (2002) 坂田式三成分ひずみ計による長期連続観測結果から推定される地殻岩石の粘性係数. *地震予知連絡会会報*, 67, 138-146.

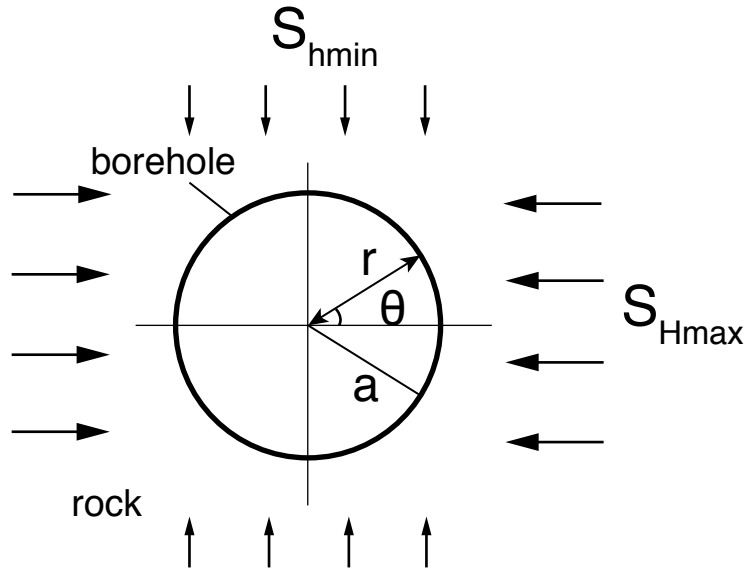
- Sakata, S. (2005) In situ measurement of rock viscosities by Sakata-type three-component strainmeters. 5th U.S.-Japan Natural Resources Meeting and Parkfield, California Field Trip, 55-56.
- Satoh, T., Kitagawa, Y., Shigematsu, N., Takahashi, M., Tsukamoto, H., Kiguchi, T., Itaba, S., Umeda, Y., Sato, T., Seki, Y. and Koizumi, N. (2013) Shallow crustal stress around Shikoku and Kii region, SW Japan, inferred from hydraulic fracturing tests and borehole wall observations. Proc. of 6th Int. Symp. on In-Situ Rock Stress, 661-666.
- 佐藤隆司, 北川有一, 高橋 誠, 佐藤 努, 小泉尚嗣 (2013) 愛媛県新居浜市および愛知県西尾市における水圧破砕法地殻応力測定—地下水等総合観測施設整備に伴う—. 日本地震学会 2013 年秋季大会講演予稿集, 227.
- Terakawa, T. and Matsu'ura, M. (2010) The 3-D tectonic stress fields in and around Japan inverted from centroid moment tensor data of seismic events. Tectonics, 29, TC6008.
- Yale, D.P. (2003) Fault and stress magnitude controls on variations in the orientation of in situ stress. In Ameen, M., ed., Fracture and In-Situ Stress Characterization of Hydrocarbon Reservoirs. Geological Society, London, Special Publications, 209, 55-64.
- Zoback, M.D., Moos, D., Mastin, L. and Anderson, R.N. (1985) Well bore breakouts and in situ stress. J. Geophys. Res., 90, 5523-5530.

(受付：2017 年 8 月 8 日，受理：2017 年 9 月 8 日)

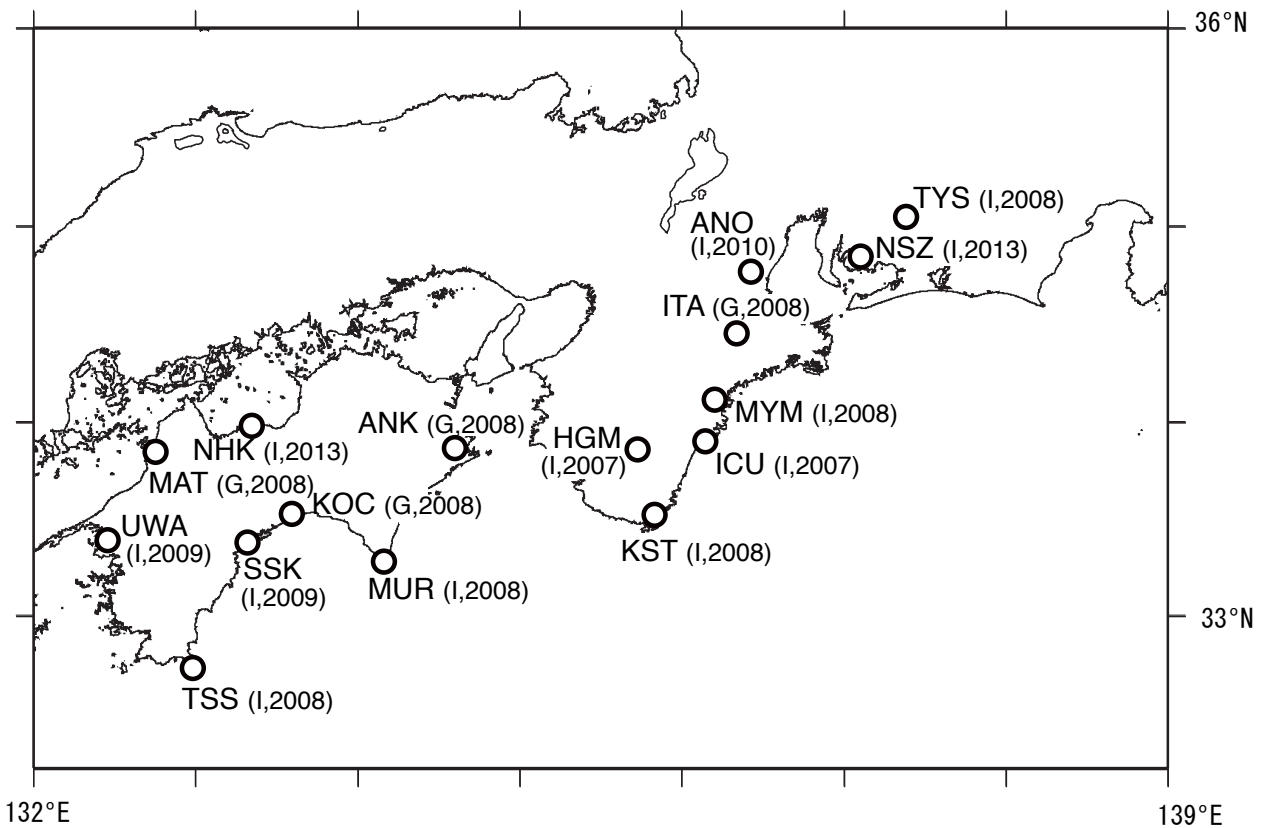
第 1 表. 観測地点の名称, 位置, 歪計の種類と設置深度及び最大主歪方位の推定結果. I は石井式歪計, G は Gladwin 式歪計を意味する. S.D. は, 最大主歪方位の標準偏差である. N/A は, 歪データの長期トレンドが不安定なため, 方位を求めなかったことを意味する. *1 は, 歪 4 成分のキャリブレーションの信頼性が低い場合, *2 は, 歪計周辺の等方均質弾性体の仮定を満たさなかった場合, *3 は, 岩盤の粘性による応力緩和現象の仮定を満たさなかった場合をそれぞれ意味する.

Table 1. Summary of site parameters and the estimated orientations of the maximum principal strain. I : Ishii-type strainmeter, G : Gladwin-type strainmeter. S.D. : Standard deviation of orientation. N/A: The orientation is not estimated due to unstable trend of strain data. *1: The result of calibration for 4-component strain data has lower reliability. *2: The assumption of isotropic homogeneous elasticity around the strainmeter is not satisfied. *3: The assumption of the relaxation process of stress disturbance due to a viscous property of the rock mass is not satisfied.

Site	Type	(°N)	(°E)	depth (m)	Installation (year,month)	Orientation of max. principal strain	S.D. (deg.)
TYS	I	35.0405	137.3578	588	2008.6.	N/A *2,*3	N/A
NSZ	I	34.8442	137.1057	583	2013.5.	(N66°E) *3	(4)
ANO	I	34.7870	136.4019	590	2010.6.	(N146°E) *3	(9)
ITA	G	34.4534	136.3129	182	2008.4.	N/A *2,*3	N/A
MYM	I	34.1123	136.1815	591	2008.6.	N62°E	1
ICU	I	33.9001	136.1379	589	2007.4.	N31°E	5
KST	I	33.5201	135.8363	591	2008.8.	N133°E	6
HGM	I	33.8675	135.7318	373	2007.6.	N170°E	5
ANK	G	33.8661	134.6045	167	2008.4.	(N39°E) *1	(7)
MUR	I	33.2856	134.1563	588	2008.9.	(N117°E) *2,*3	(4)
KOC	G	33.5505	133.5990	202	2008.5.	N/A *1,*3	N/A
NHK	I	33.9904	133.3423	482	2013.1.	(N104°E) *2	(6)
SSK	I	33.3896	133.3229	577	2009.12.	N20°E	4
TSS	I	32.7357	132.9757	588	2008.8.	N84°E	3
MAT	G	33.8422	132.7393	202	2008.5.	N70°E	14
UWA	I	33.3859	132.4823	591	2009.1.	N120°E	1

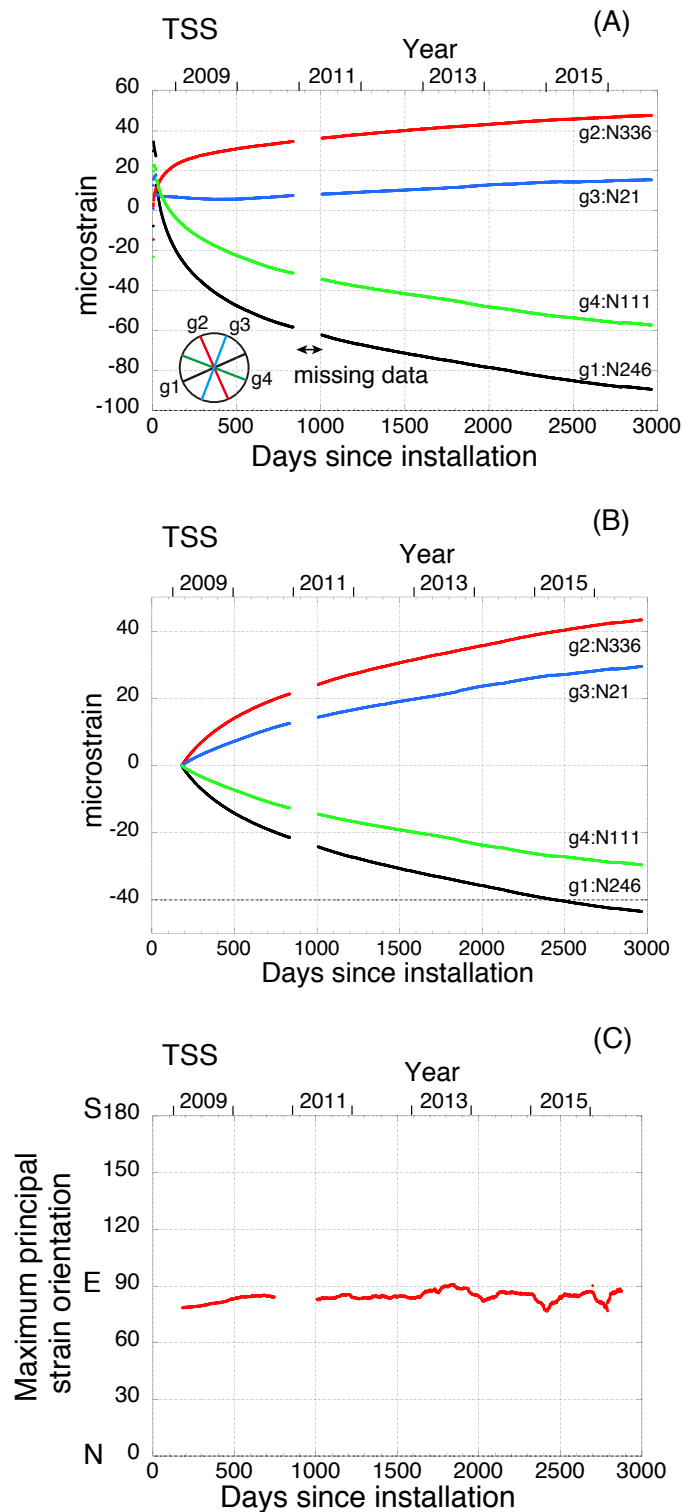


第1図. 岩盤中に鉛直方向に掘削された孔井を横切る水平面内に最大及び最小水平圧縮応力 (S_{Hmax} , S_{hmin}) が作用する場合の模式図.
 Fig. 1. Schematic illustration of a horizontal cross-section through a vertical borehole drilled in rock mass loading maximum horizontal compressive stress (S_{Hmax}) and minimum horizontal compressive stress (S_{hmin}).



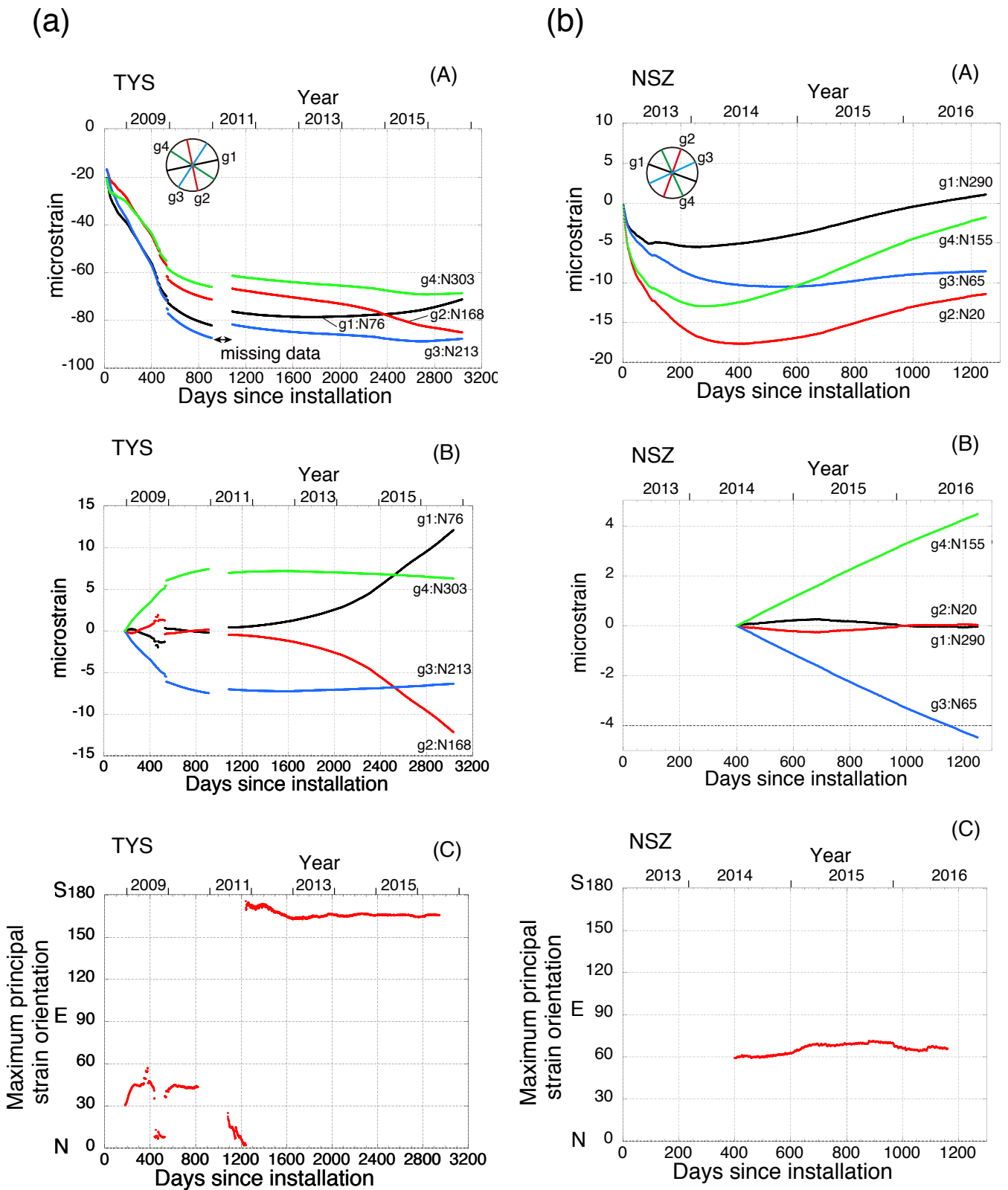
第2図. 産業技術総合研究所の16の地下水等総合観測点の位置図. 地点名と歪計の種類, 観測開始年を示す. Iは石井式歪計, GはGladwin式歪計を意味する.

Fig. 2. Locations of 16 sites for AIST integrated groundwater observation sites, southwestern Japan. Site name, type of strainmeter (I: Ishii-type, G: Gladwin-type) and installation year are denoted.

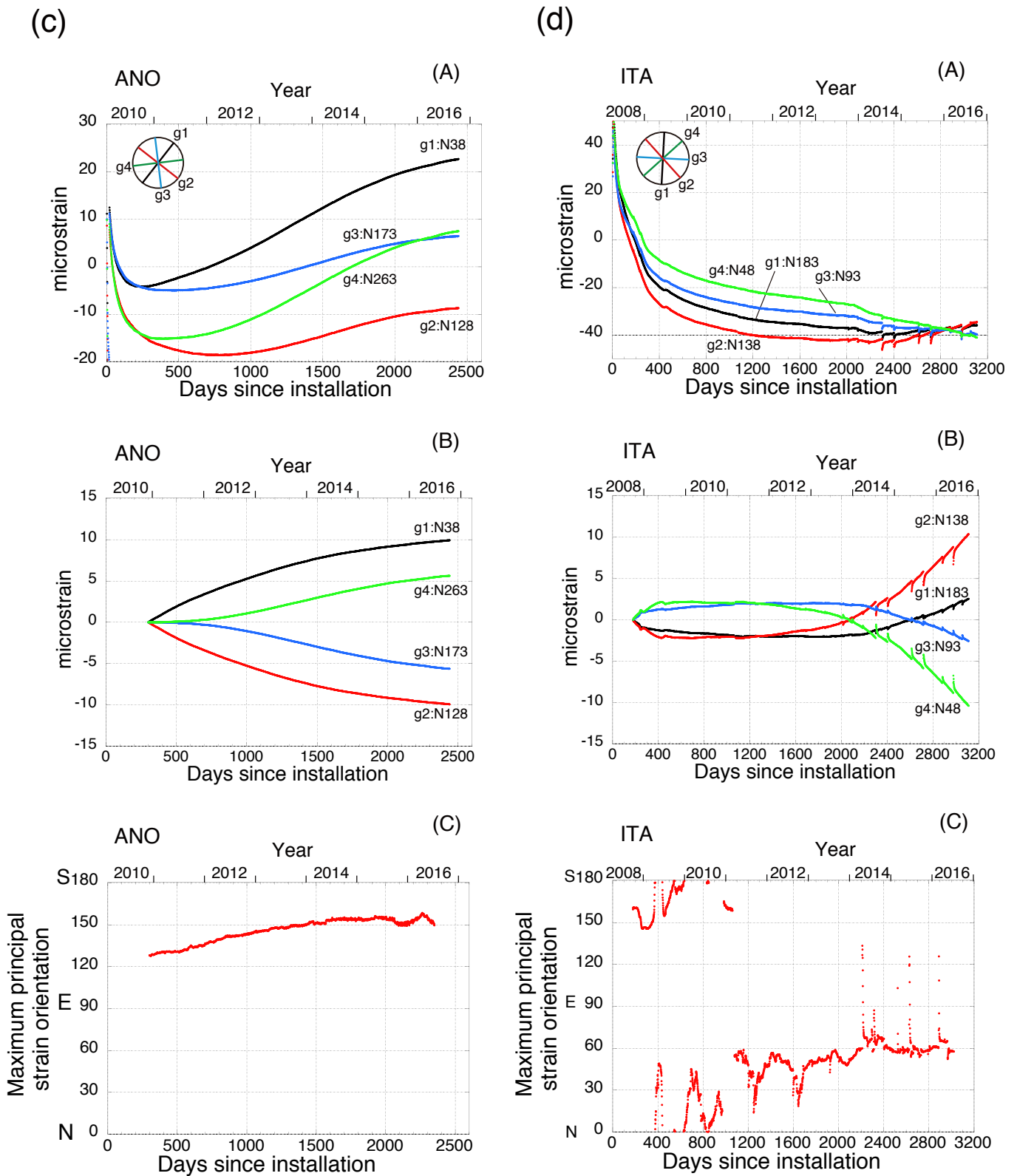


第3図. TSS 地点における歪データと最大主歪方位. (A) 4成分歪計で測定された半径方向の歪. 北を上向きとした4つの歪成分の方位図を含む. (B) 各成分の歪値から平均歪を差し引いた値. データは最大主歪方位を求める解析を実施した日から表示する. (C) 解析期間中の最大主歪方位.

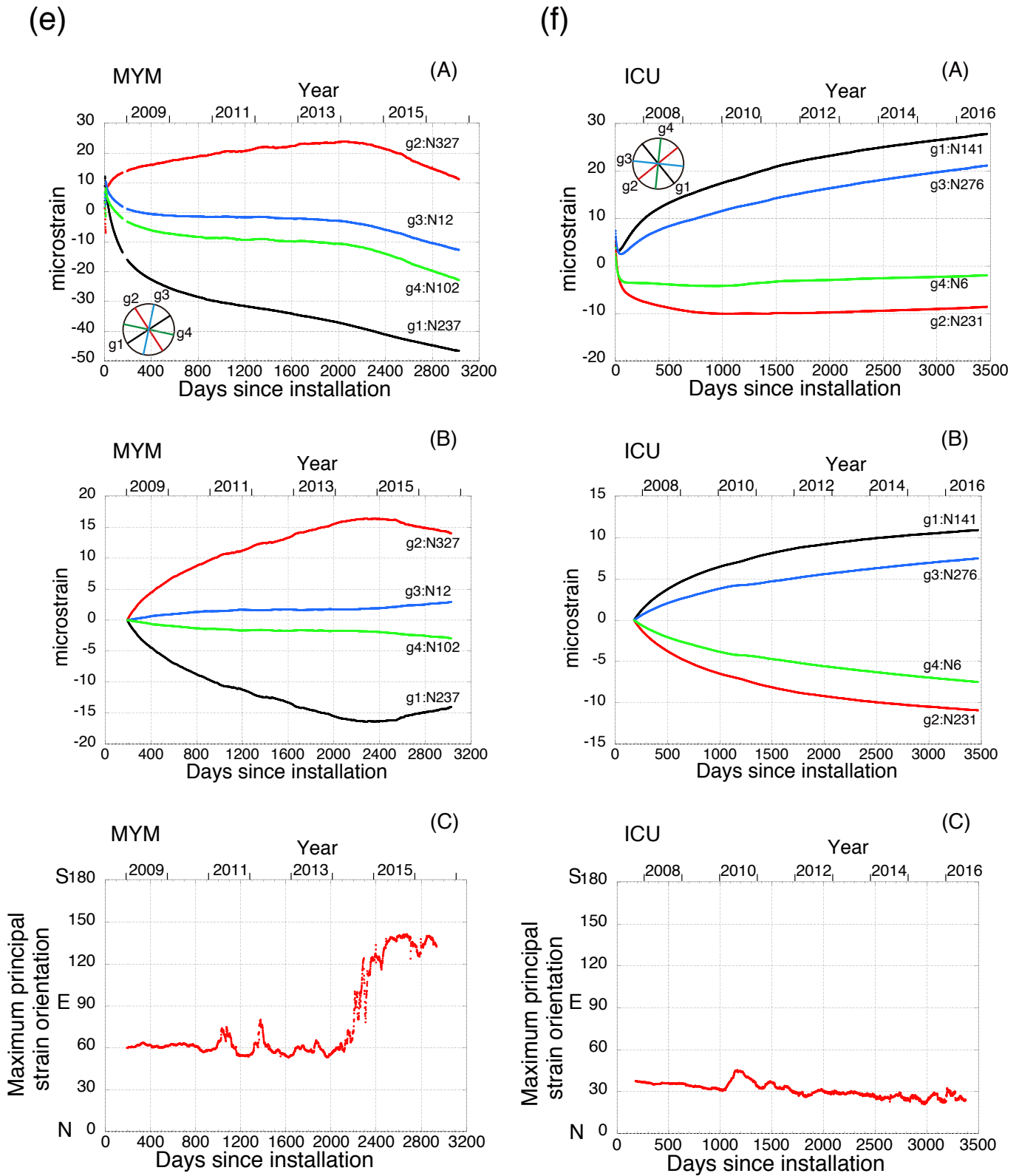
Fig. 3. Strain data and orientation of the maximum principal strain at TSS site. (A) Radial strain measured by a 4-component borehole strainmeter. Relative strain gauge orientations are also shown in the figure with north up. (B) Radial strain data after removal of the average strain. The data are plotted from the time when the analysis is performed. (C) Time-varying orientation of the maximum principal strain.



第4図. 16地点における歪データと最大主歪方位 ((a) ~ (p)). 地点名を各図の上部に示す. 図の見方は第3図と同様.
 Fig. 4. Strain data and orientation of the maximum principal strain at 16 sites ((a) ~ (p)). Site name is shown in top of figure.
 Explanations are the same as those in Fig. 3.

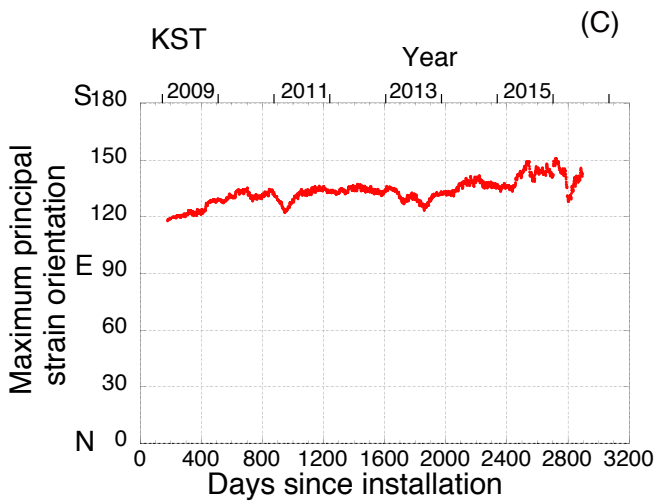
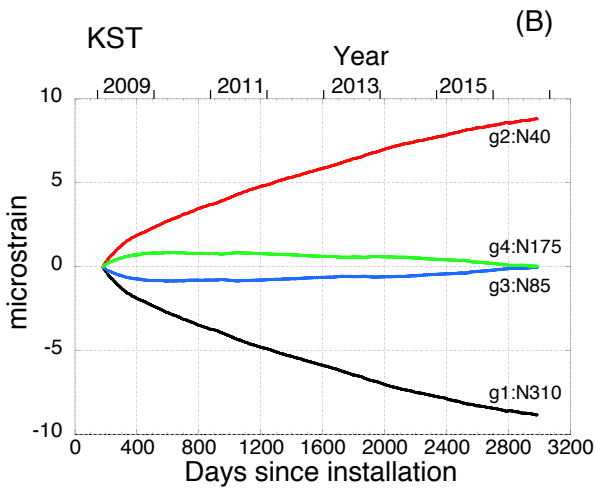
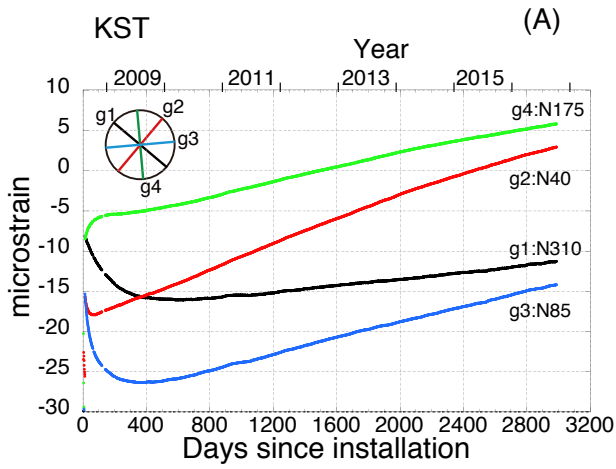


第4図. (続き)
Fig. 4. (continued)

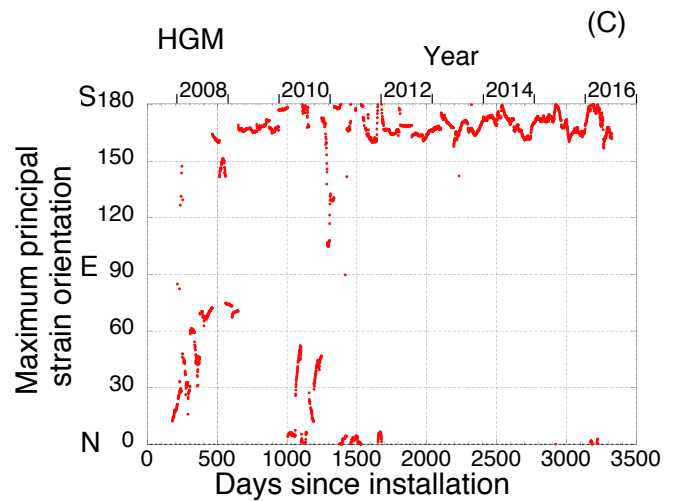
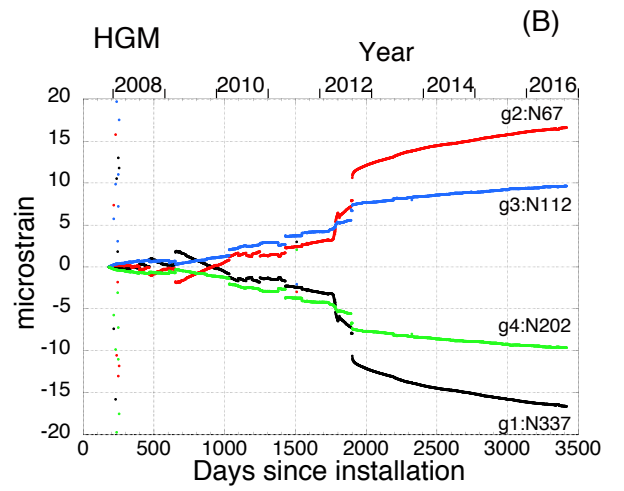
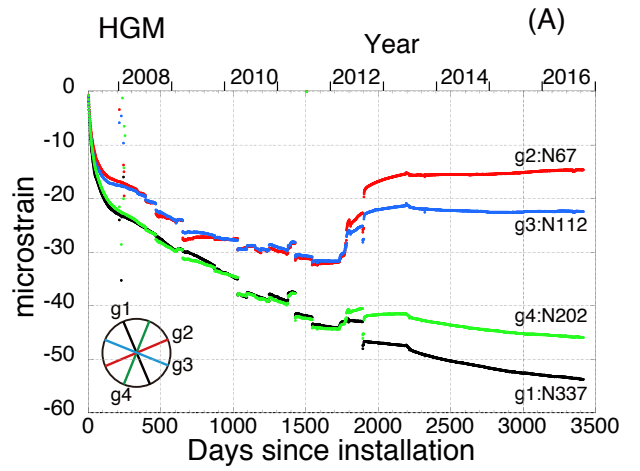


第4図. (続き)
Fig. 4. (continued)

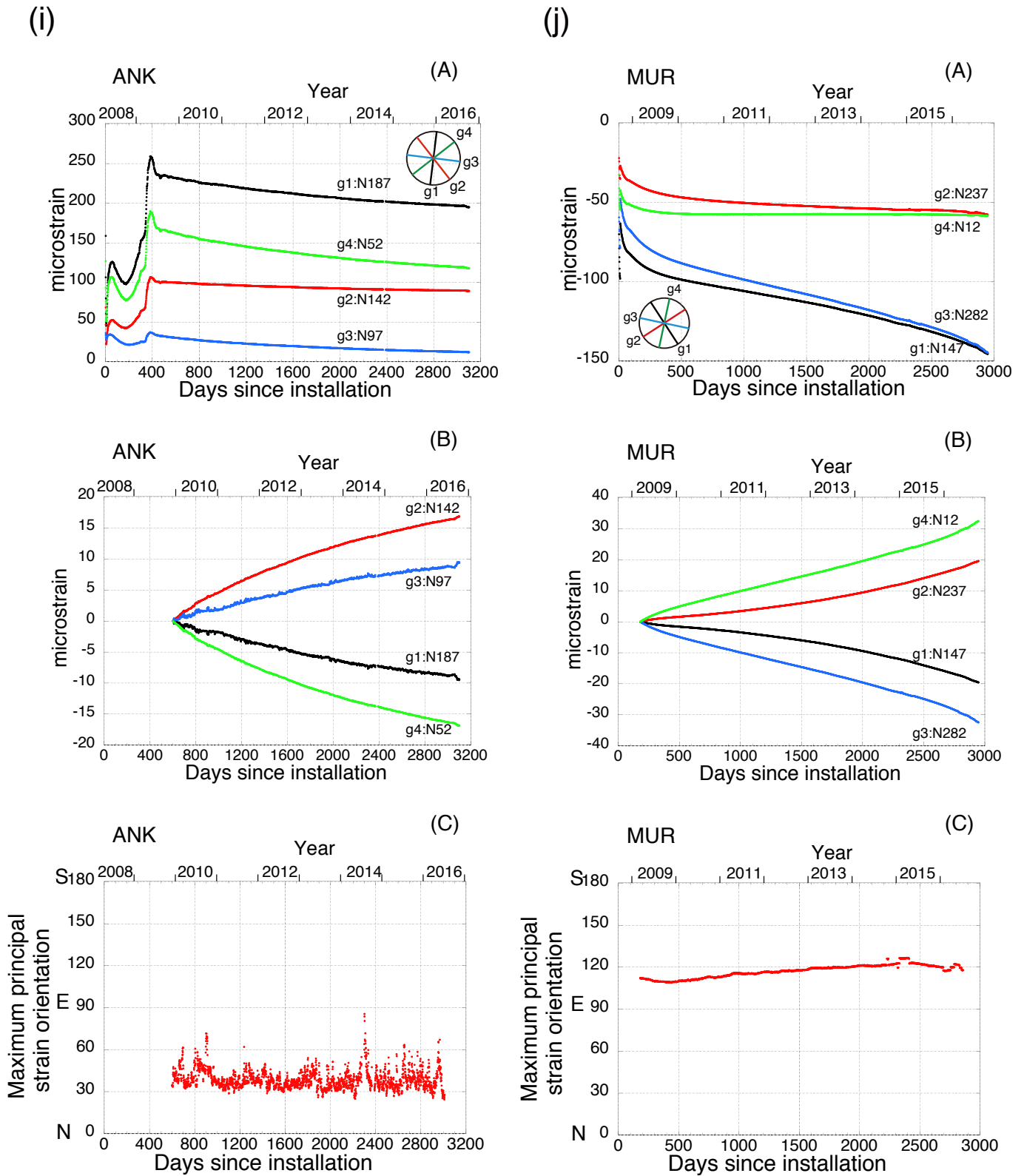
(g)



(h)

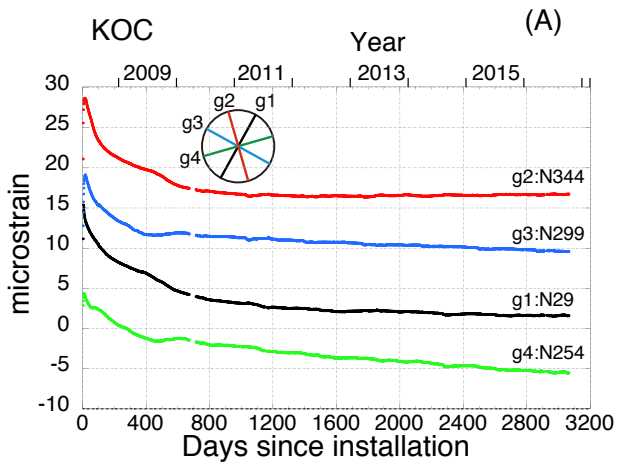


第4図. (続き)
Fig. 4. (continued)

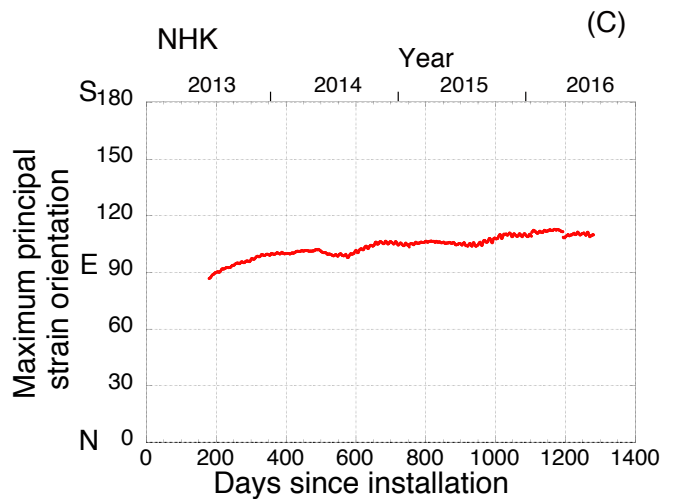
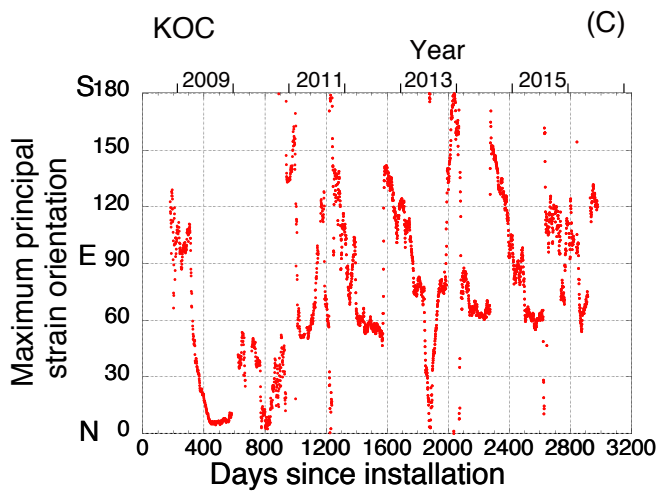
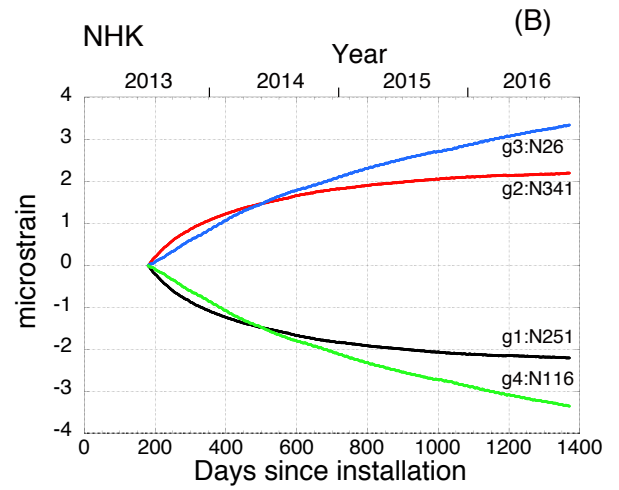
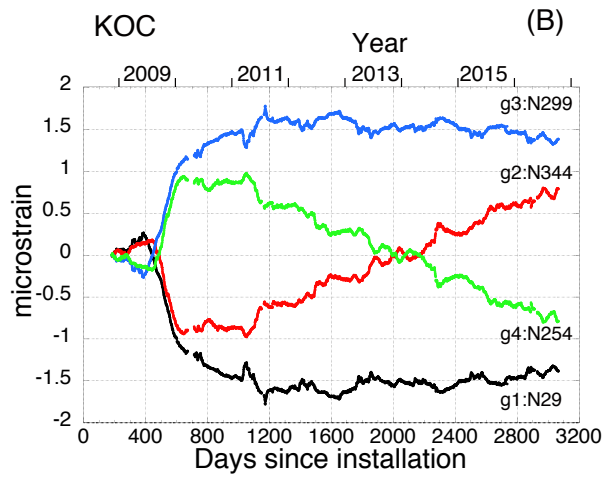
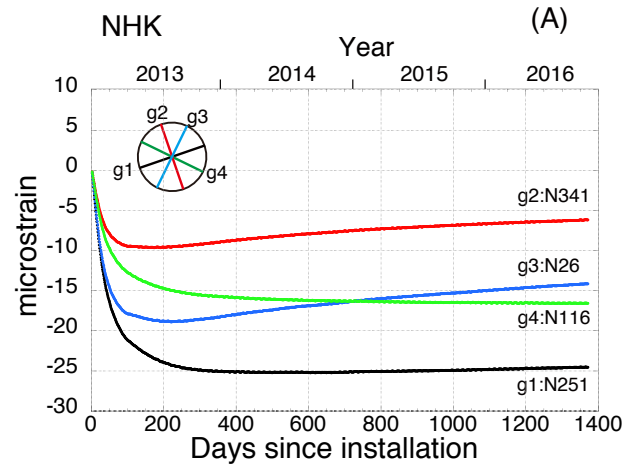


第4図. (続き)
Fig. 4. (continued)

(k)

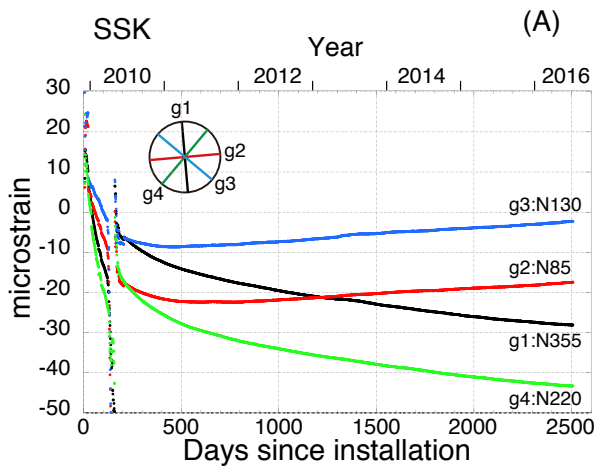


(l)

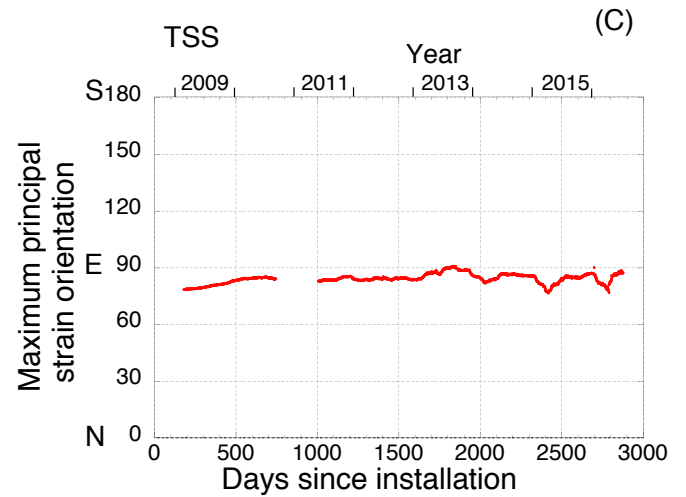
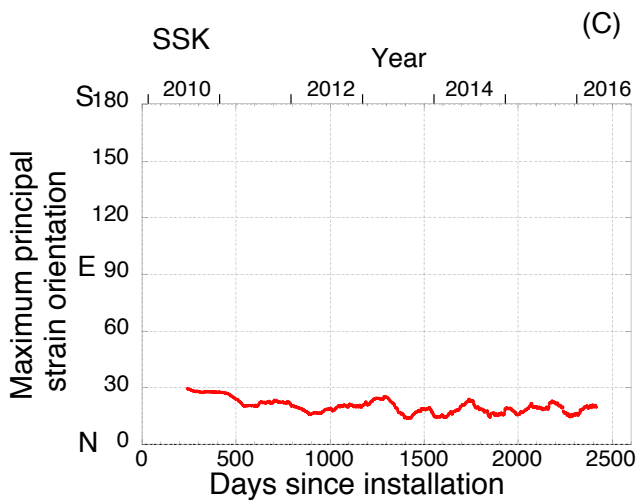
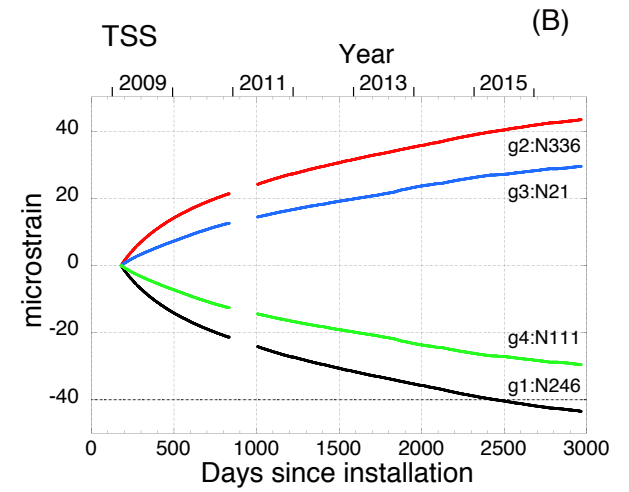
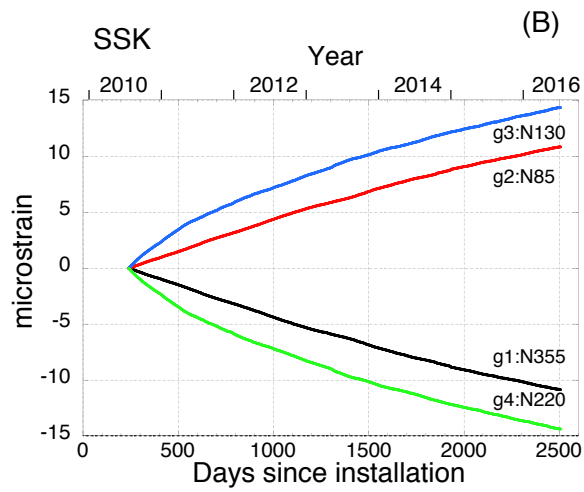
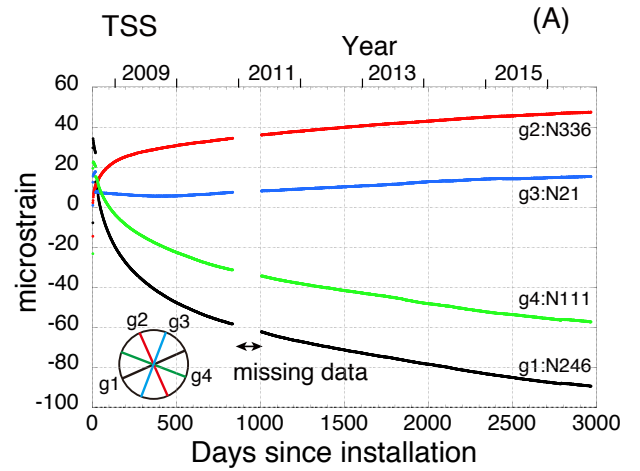


第4図. (続き)
Fig. 4. (continued)

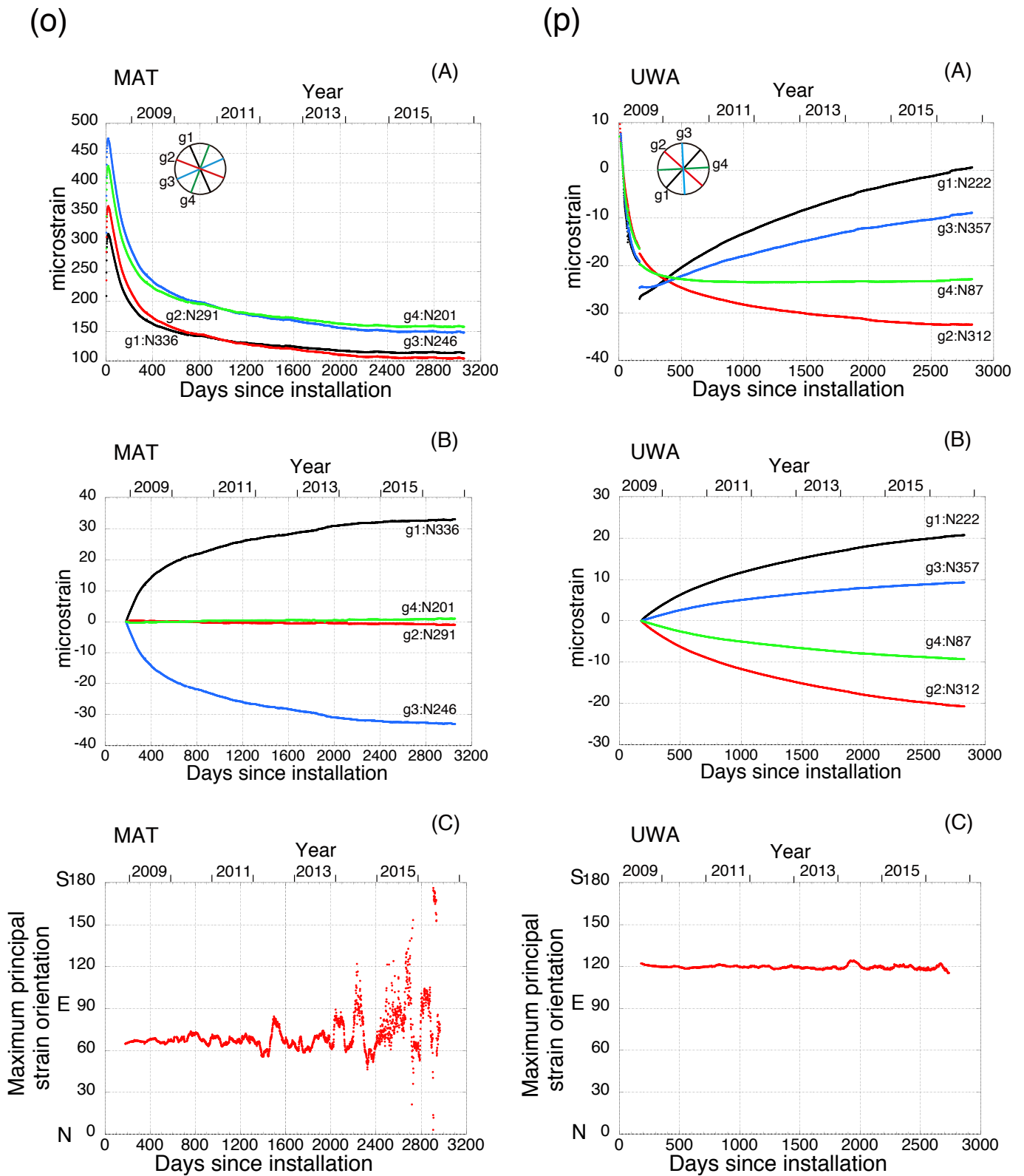
(m)



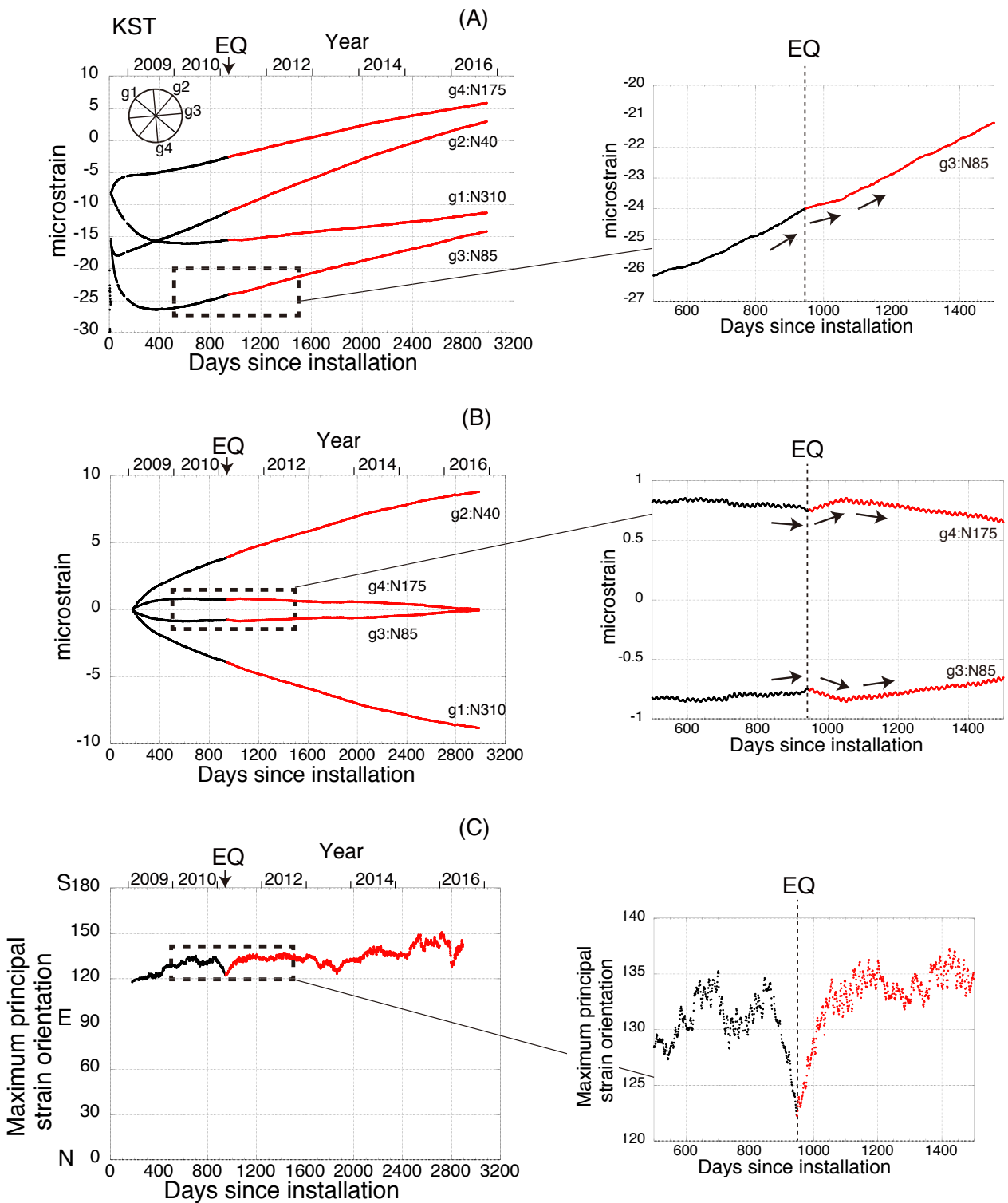
(n)



第4図. (続き)
Fig. 4. (continued)

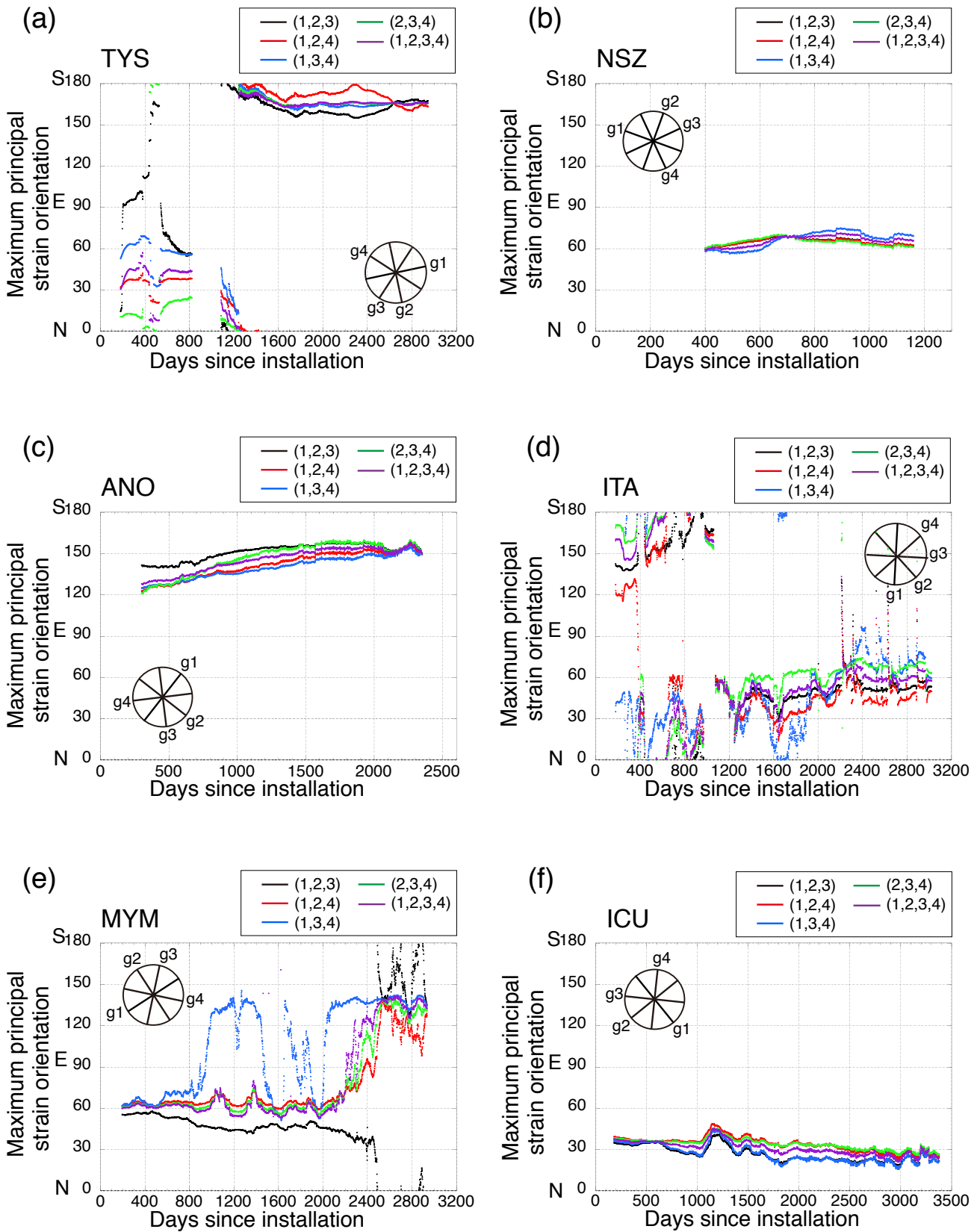


第 4 図. (続き)
Fig. 4. (continued)



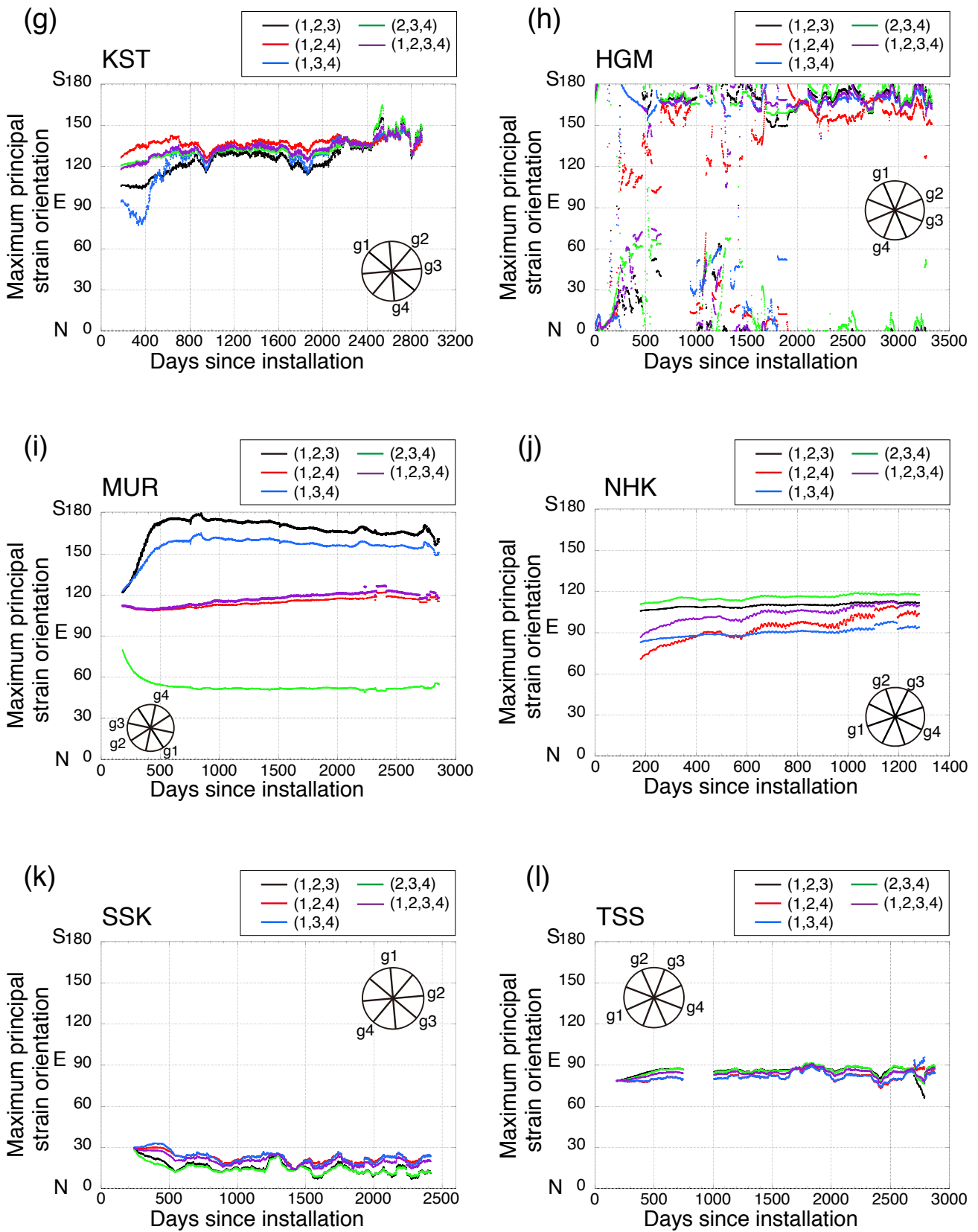
第 5 図. KST 地点の歪データ, 平均歪を差し引いたデータ及び最大主歪方位と, 2011 年東北地方太平洋沖地震前後の拡大図. 地震前は黒色, 地震後は赤色でデータを示す. 地震直後から約 110 日間, 歪データのトレンドが変化し, その後に地震前と同じトレンドに戻ることがわかる.

Fig. 5. Radial strain, strain data after removal of the average strain and orientation of the maximum principal strain at KST site. Enlarged figures around the 2011 Tohoku Earthquake are also shown. Data before and after the earthquake are denoted in black and red, respectively.

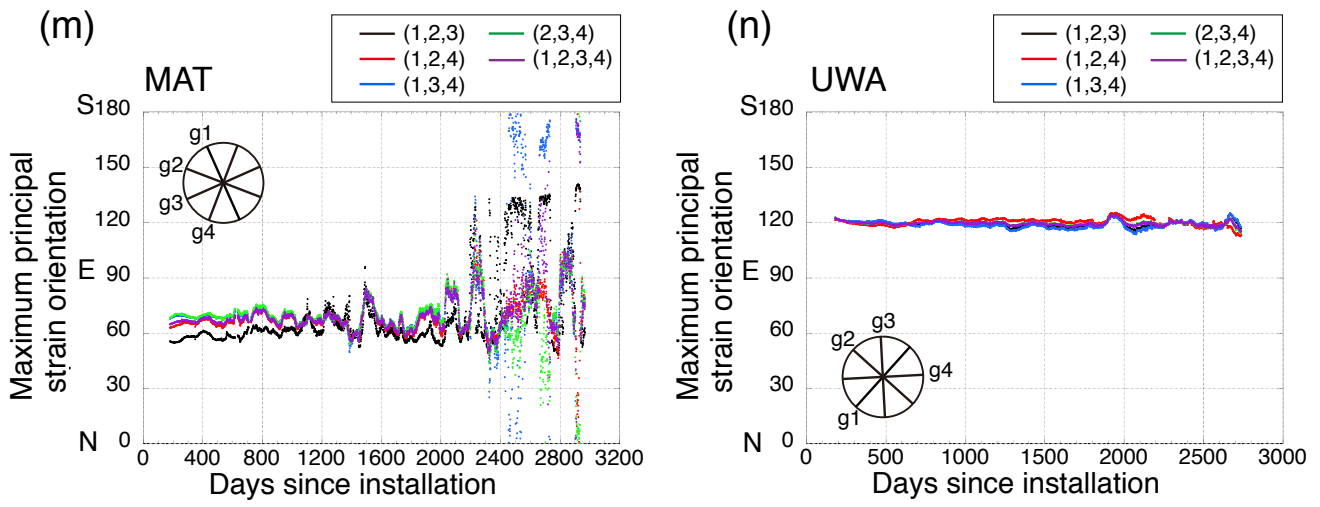


第 6 図. 14 地点における, 歪計の 4 成分及び 4 通りの 3 成分の組み合わせからそれぞれ求めた最大主歪方位の比較 ((a)~(n)) (ANK と KOC 地点を除く).

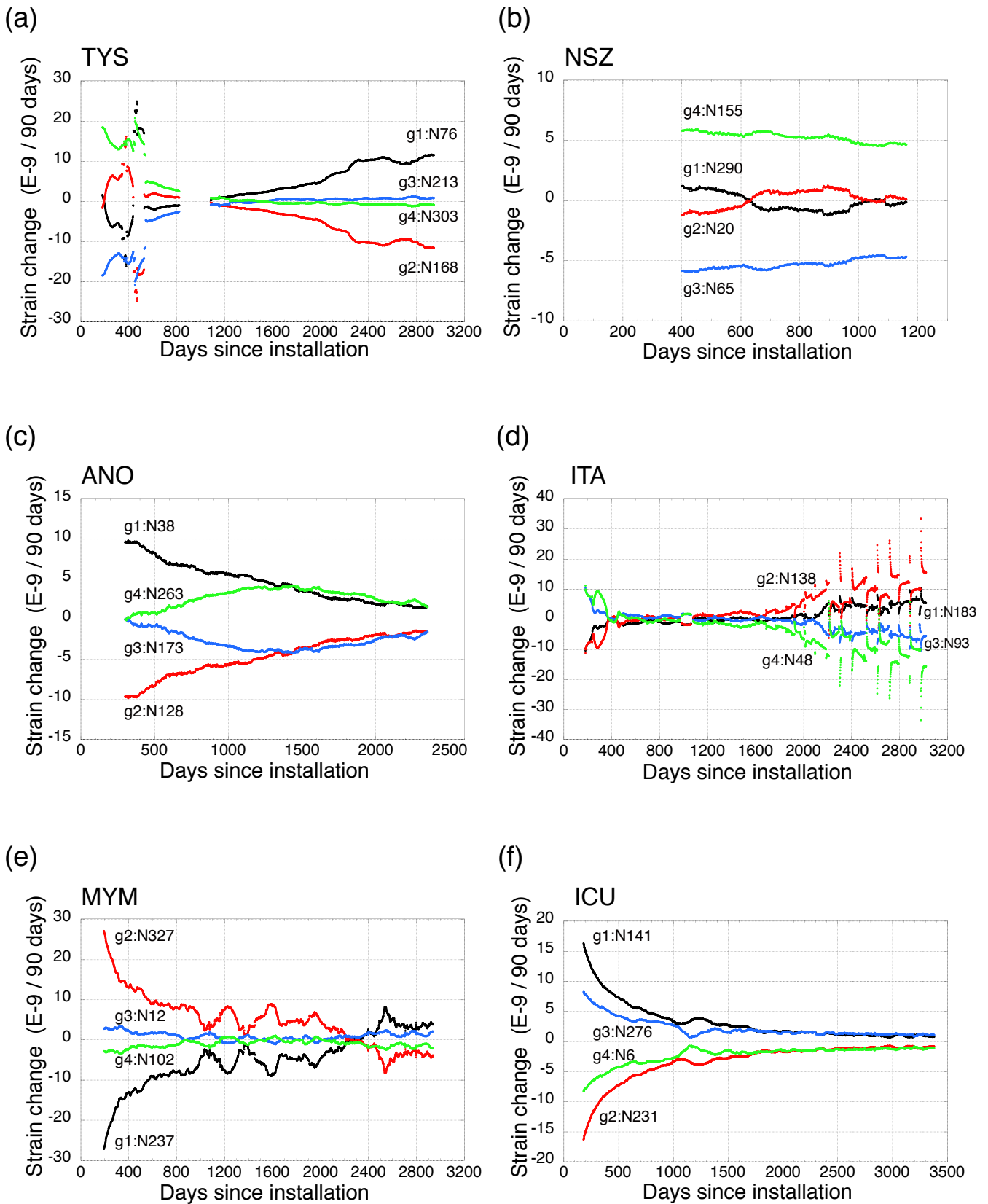
Fig. 6. Comparison of the time-varying orientations of the maximum principal strain estimated by using each set of combinations of strain components for 14 sites, except for ANK and KOC sites ((a)~(n)).



第 6 図. (続き)
Fig. 6. (continued)

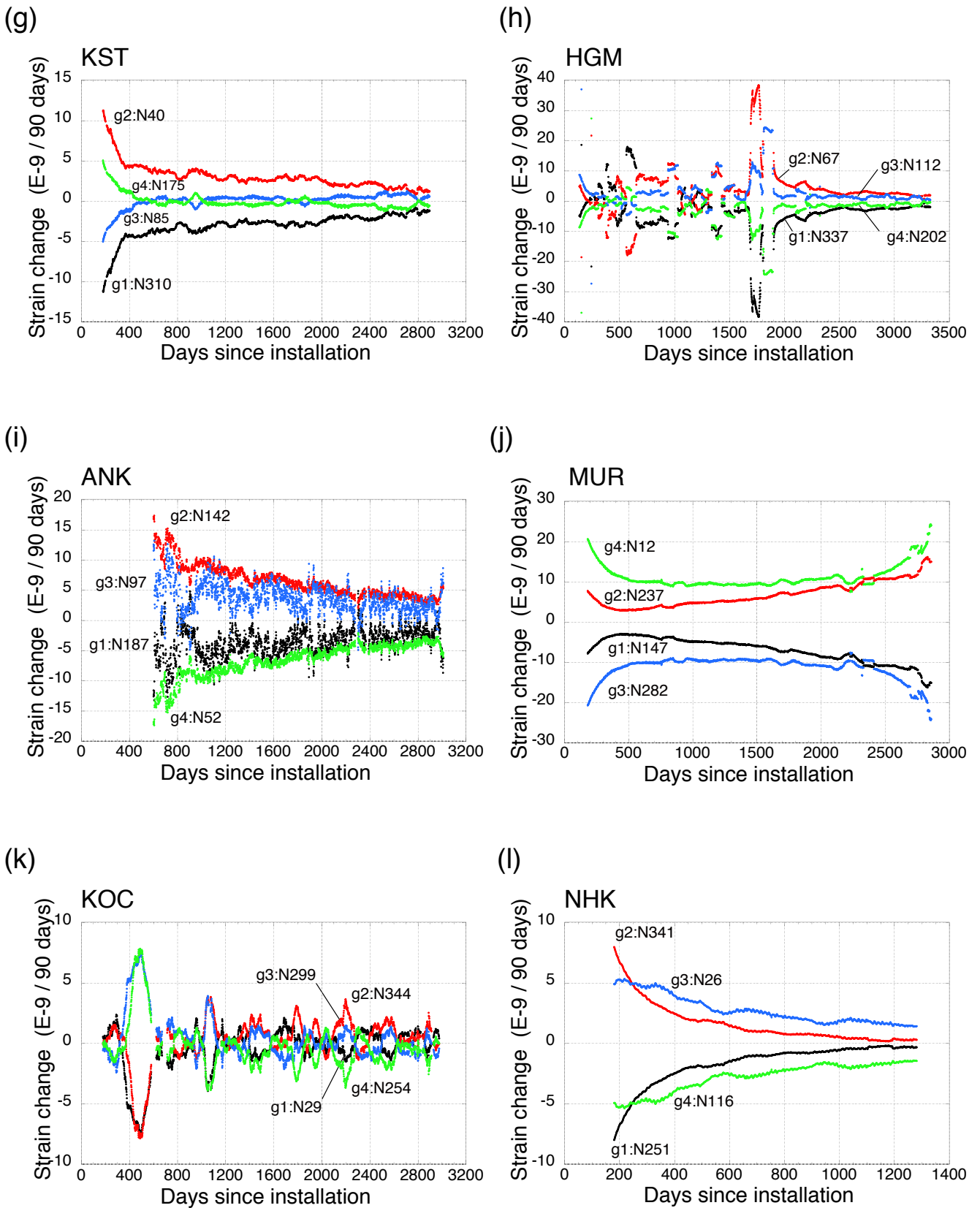


第 6 図. (続き)
Fig. 6. (continued)

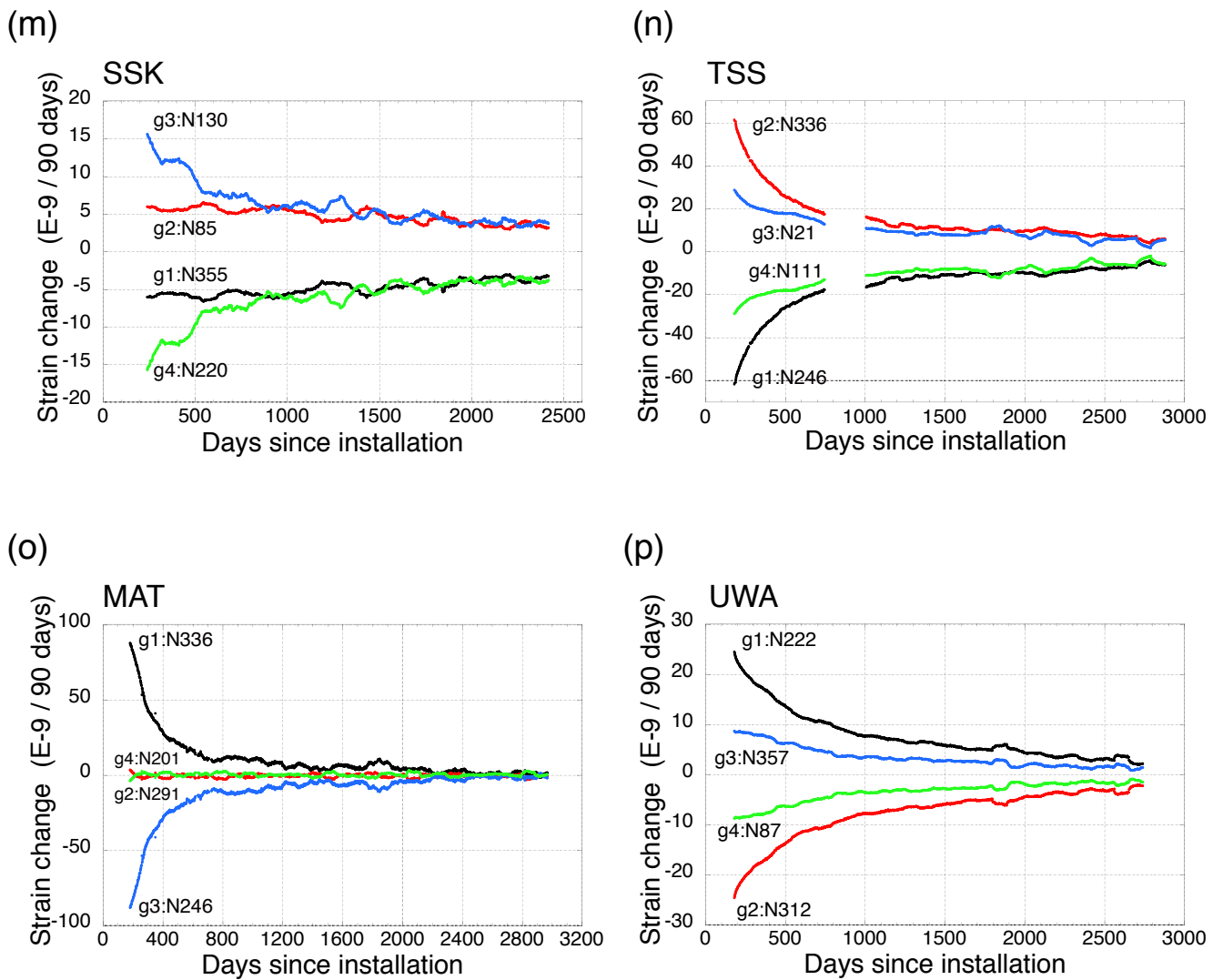


第7図. 16地点における、解析期間中の歪計の各成分の90日間の変化率 ((a)~(p)).

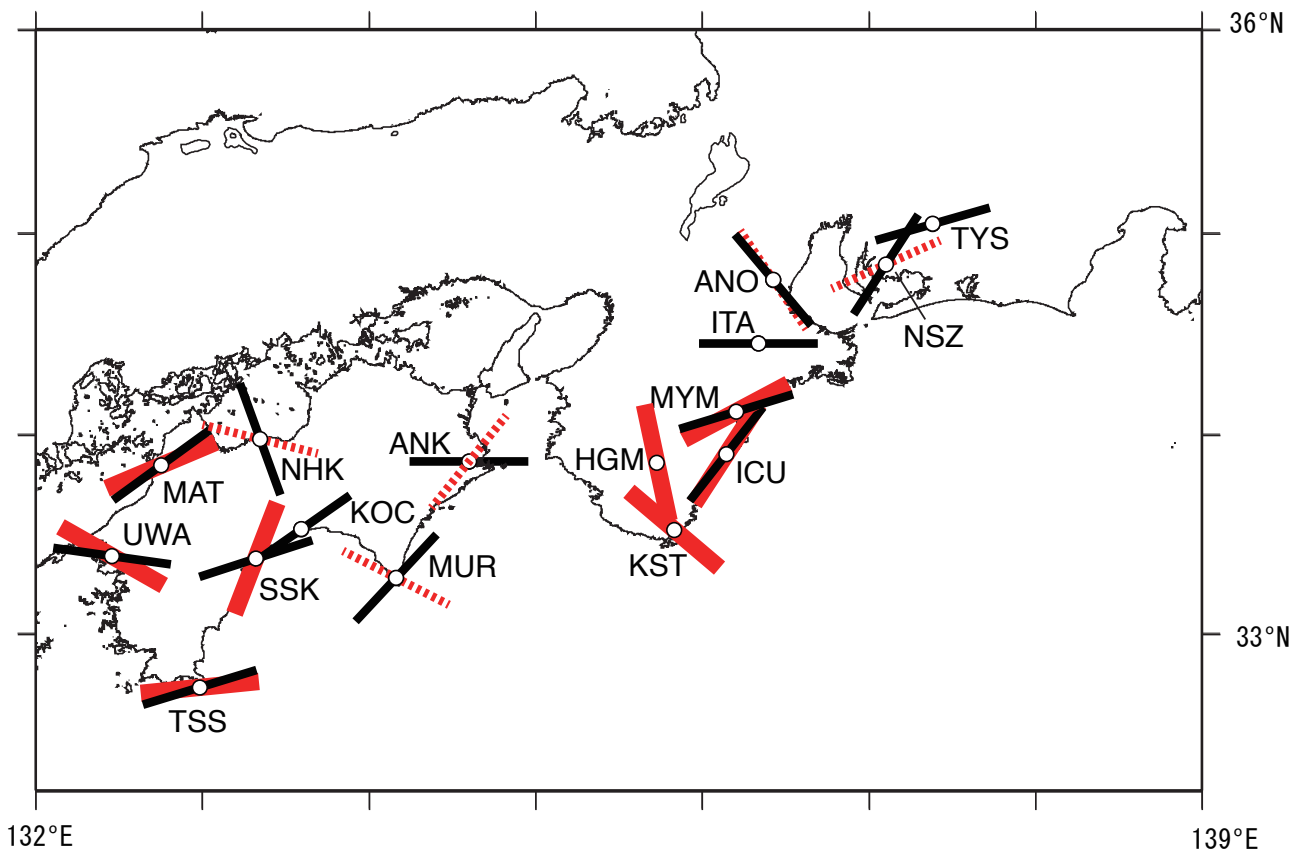
Fig. 7. Time-varying rate of strain change for the period of 90 days in each component at 16 sites ((a)~(p)).



第7図. (続き)
 Fig. 7. (continued)



第7図. (続き)
 Fig. 7. (continued)



第 8 図. 最大主歪方位及び最大主応力方位の分布図. 解析モデルの適用が妥当であると確認できた 8 地点の最大主歪方位の平均を赤色実線で示す. 妥当性を確認できなかったが参考までに方位を求めた 5 地点については赤色破線でその方位を示す. Satoh *et al.* (2013) により水圧破碎法と孔壁面の縦亀裂の観察から求められた 14 地点の応力方位の平均を黒色実線で示す.

Fig. 8. Map of orientations of the maximum principal strain and stress. Red solid bars at 8 sites, where the validity of applying analysis model to strain data is confirmed, denote the orientations of the maximum principal strain. The orientations denoted as red broken ones at 5 sites are for reference purposes only because the validity is not confirmed. Black ones show the averaged stress orientations obtained by using hydraulic fracturing tests and borehole wall observations from Satoh *et al.* (2013) at 14 sites.