

多成分歪計の地磁気補正 Geomagnetic Correction of Multi-component Strain Meters

宮岡 一樹¹

Kazuki MIYAOKA¹

(Received July 21, 2010 : Accepted November 15, 2010)

Abstract : Japan Meteorological Agency has installed five multi-component strainmeters around the source region of the Tokai Earthquake since 1997. For these instruments, data fluctuation caused by barometric pressure change and precipitation are less significant due to the vessel structure more resistant against the vertical loading than that of volumetric strainmeter.

On the other hand, the multi-component strainmeter adopts magnetic sensors to measure the radial deformation of the cylindrical vessel, and are affected by geomagnetic disturbances. The amplitude of the data fluctuation due to geomagnetic disturbance sometimes becomes 10E-8 to 10E-7 strains, which are not negligible and should be removed for an accurate strain observation.

In this study, we introduced the correction formula for geomagnetic disturbance.

$$E = e - \text{Magne}(\theta) \times \alpha$$

,where E and e denote corrected and raw strain data. Magne(θ) denotes a geomagnetic amplitude change in the sensor azimuth θ , and alpha denotes the correction coefficient. Magne(θ) is represented by the following formula,

$$\text{Magne}(\theta) = \text{magX} \times \sin \theta - \text{magY} \times \cos \theta$$

,where magX and magY denotes geomagnetic amplitude change of X(North-South) and Y(East-West) components observed at Kakioka Geomagnetism Observatory, and θ is an apparent sensor azimuth optimized so that the fluctuation amplitude of corrected strain becomes minimum in frequency range from tens of minutes to a few hours.

By using the correction formula, the amplitude of strain fluctuation caused by geomagnetic disturbance can be reduced to 10E-9 strains or less.

1 はじめに

気象庁では想定東海地震の本震の前に発生するであろうプレスリップを捉えるために、愛知県から静岡県にかけて 19 点のボアホール型歪計を設置している。さらに静岡県が設置した 2 点を含めた 21 点が地震防災対策強化地域判定会招集を行うかどうかの判断に用いられる観測点となっている。このうちの 5 点は 1997 年以降に設置された石井式三成分歪計(石井他, 1992. 以下では多成分歪計)と呼ばれる歪計で、従来の体積歪計(末廣, 1979)に比べてより大深度(深さ 500~700m)への設置が可能であり、また鉛直荷重変化の影響を受けにくい構造であることから気圧変化や降水等によるデータの乱れが少なく、精度の高い観測データが得られている。

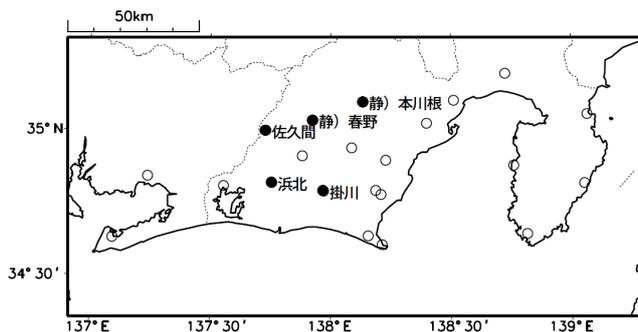


図 1 東海地域の歪計配置図。●は多成分歪計を、○は体積歪計を示す。

その一方で、多成分歪計は地磁気など、周辺磁場の影響を受け、監視に影響を及ぼす程度のノイズの生じることが、観測データから判明した。

¹ 地震火山部地震予知情報課, Earthquake Prediction Information Division, Seismological and Volcanological Department

多成分歪計は、円筒容器の直径方向の変形量を計測し、その変形量を円筒容器の直径で除算したものを線歪（以下、単に歪）として観測している。この円筒容器の直径方向の変形量検出にはマグネセンサー（マコメ研究所，1997）を用いているために、地磁気の日変化や擾乱の影響を受け、それによる見かけ上の歪変化が観測データに現れる。この見かけ上の歪変化は、プレスリップによる歪変化の検出のためには大きなノイズとなる。

しかしこれらの地磁気の影響は、気象庁地磁気観測所（茨城県石岡市柿岡）で観測された地磁気データ（以下、柿岡地磁気データ）を用いることで除去可能である。本稿では多成分歪計における地磁気補正の方法について報告する。

2 歪計の各種補正について

体積歪計および多成分歪計は地盤に掘削された縦坑に埋設し、モルタルで固着することで周囲の岩盤の歪を観測している。周囲の岩盤はテクトニックな歪変化の他に、気圧変化や地球・海洋潮汐、降水などによっても歪変化が生じる。これらは歪観測にとってはノイズであるが、種々の方法で除去（補正）することが可能である。

檜皮ら（1983）は榛原観測点で歪計に併設された気圧計データを用いて東海地域の歪計データの気圧補正が可能であることを示している。気圧変化の空間的な広がりを考えると、ある1地点の代表データで補正することは問題があるが、1時間サンプリングのデータには実用的であるとした。現在では全歪観測点に気圧計が併設されており、1分サンプリングのデータの EPOS（地震活動等総合監視システム：尾崎，2004）におけるリアルタイム補正が可能となっている。地球固体潮汐および海洋潮汐の影響は、Baytap-G（石黒ら，1984）を用いてリアルタイムでの補正を行っている。また体積歪計における降水の影響については石垣（1995）等の方法により、数日間以下の短期間のデータに対する降水補正をリアルタイムで行なっている。

3 地磁気の影響について

多成分歪計では機械式の歪拡大機構で円筒容器の直径方向の変形量を10～20倍に拡大し、マグネセンサーを用いてその量を測定している。このマ

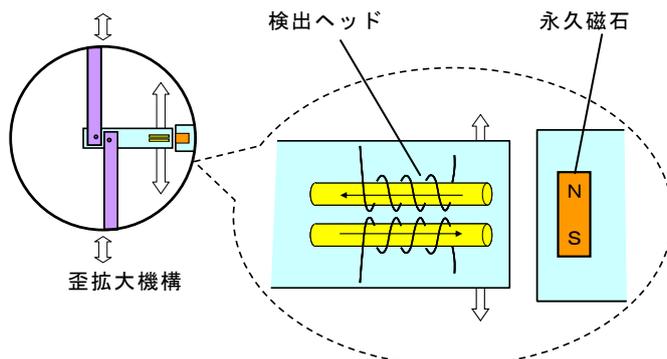


図2 歪拡大機構およびマグネセンサーによる変化量検出概念図

グネセンサーは検出ヘッドおよび永久磁石からなり、固定された永久磁石が作り出す静磁場内に置かれた検出ヘッド（過飽和コイル）のインピーダンスが磁場の強さに応じて変化し、それに比例した直流電圧を出力する。磁場の強さは永久磁石と検出ヘッドの位置関係に依っており、円筒容器の直径方向の変形に伴う検出ヘッドの移動を磁場の強さとして測定していることになる。

図2にはその変化量検出の概念図を示した。この図において、歪拡大機構が紙面上下方向の圧縮の力を受けた場合、検出ヘッドは上方向、すなわち永久磁石のN極の方向へ動く。この場合、紙面左向きの磁場の強さが増し、縮みの歪変化があったものとする出力が得られる。

ここで、このマグネセンサーが正しく変化量を測定するために、このマグネセンサー周辺の磁場が時間的に変化のないことが前提となっている。ところが、実際は永久磁石と地磁気による磁場の合成であ

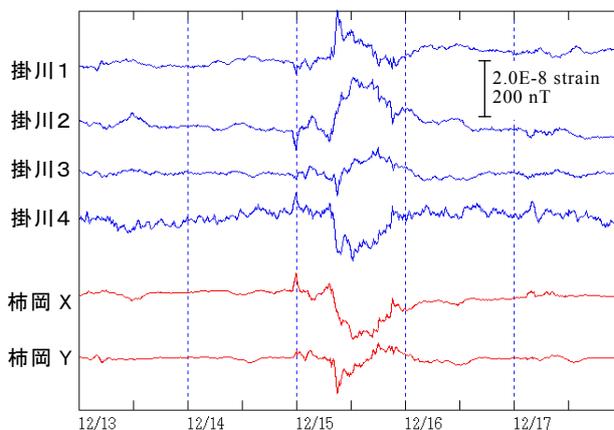


図3 地磁気擾乱（柿岡 X, Y）と見かけの歪変化（2006年12月掛川、潮汐補正、気圧補正済み）。

り、もし地磁気変化によってこの検出ヘッド周囲で紙面左向きの磁場の強さが増した場合、実際の歪変化が無いにもかかわらず、見かけ上の縮み変化がノイズとして観測データに重畳する。

図3は太陽活動に伴う地磁気擾乱が発生した際の、掛川観測点の多成分歪計データ（掛川1～4、紙面上向きが伸びの歪変化）と柿岡地磁気データ（柿岡X：南北成分、柿岡Y：東西成分、いずれも上向きが正）の時系列変化である。用いた柿岡地磁気データは、高感度3軸フラックスゲート磁力計で観測された毎秒サンプリングデータ（源，2010）を、EPOSにおいて1分値としたものである。この例の場合では概ね $3E-8$ strain P-P の見かけ上の歪変化であり、成分によっては東海地震監視のための60分階差のレベル2（東海地震注意情報発表の目安となる「有意な変化」）に相当する。この程度の地磁気擾乱は、ここ10年間では、年に2～3回程度発生しており、東海地震予知の誤判断を避けるため、これを補正することは必須の課題であった。

また地磁気変化にはこのような擾乱の他、地球の自転に伴う日変化もあり、 $1E-8$ strain 相当の歪変化として記録される（図4）。

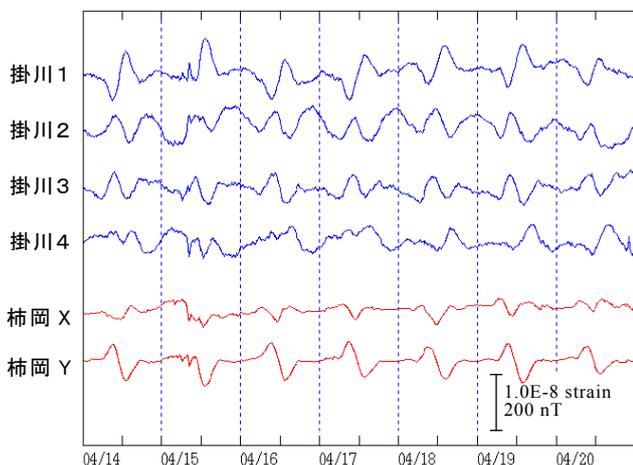


図4 地磁気日周変化（柿岡X，Y）と見かけの歪変化。（2010年4月掛川，潮汐補正，気圧補正済み）

4 地磁気補正について

多成分歪計における地磁気補正は(1)式に示すように、観測された「歪変化」から地磁気の影響によ

る「見かけ上の歪変化」を差し引いて「真の歪変化」を求めることで行う。

$$E[\text{strain}] = e[\text{strain}] - \text{Magne}(\theta)[\text{nT}] \times \alpha \quad \dots (1)\text{式}$$

ここで、Eは真の歪変化、eは観測された歪変化（地磁気の影響による見かけ上の歪変化を含む）、Magneは歪受感方位θ（北を0°として時計回り）の歪拡大機構が検知する地磁気変化、αは補正係数（strain/nT）である。ここで検出ヘッドの磁場受感方位が歪拡大機構の歪受感方位と同じ方向であるとすると、

$$\text{Magne}(\theta) = \text{magX} \times \cos \theta + \text{magY} \times \sin \theta$$

となる。ここで、magX，magYはそれぞれ南北（北が正）、東西（東が正）方向の柿岡地磁気データである。しかし、検出ヘッドの磁場受感方向は、図2に示す様に紙面上の左右方向であり、歪拡大機構の歪受感方向とは直交している。そこで歪拡大機構の歪受感方向から反時計回りに90°ずらした方向を磁場変化の正にとると、上記式は以下のように書き直すことができる。（Appendix CD-ROM 参照）。

$$\text{Magne}(\theta) = \text{magX} \times \sin \theta - \text{magY} \times \cos \theta \quad \dots (2)\text{式}$$

この(1)式、(2)式におけるθとαを求める必要がある。このうちθは、製作報告書および埋設報告書から知ることが可能である。しかし、埋設方位の測定誤差や、マグネセンサー取り付けの僅かな誤差があり、報告書からだけでは検出ヘッドの磁場受感方位の正確な値を得ることは困難である。

以上のことから、歪拡大機構の歪受感方位θにおける地磁気変化Magne(θ)と、歪計で観測された地磁気による見かけ上の歪変化eの相関が最も良い方向を探し、その方位をθとした。

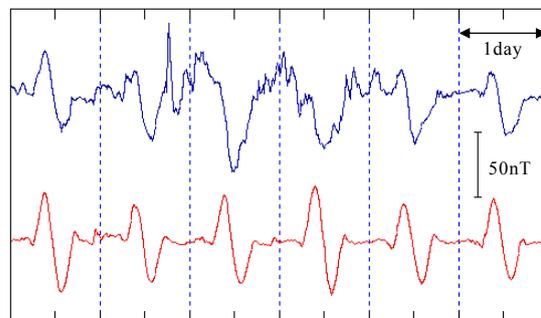


図5 擾乱発生時の地磁気変化（上）と通常の日変化（下）の例（いずれも柿岡地磁気データのY成分）

なお、歪変化には潮汐変化による影響がふくまれており、これらは日周変化や半日周変化が主な成分となっている。また、地磁気にも日変化があり、近接した周波数成分を持つデータの比較は容易ではない。そこで、両者の波形比較には、日周、半日周などとは異なる、より周期の短い周波数成分を含む地磁気擾乱時の変化データ（図5参照）を用いることとした。波形比較のための周波数帯を選択する場合、経験的に数十分から数時間程度のバンドパスフィルターを用いることが適当である。

比較のための地磁気データは柿岡地磁気観測所のデータを用いることとした。地磁気擾乱は地球全体を取り巻く規模の大きな現象であることから、観測場所の違いによる位相ずれは数秒程度であり、また地磁気の変化傾向は極地方を除いて地球表面上は同様であることから、分オーダーの成分であれば、歪観測点のある東海地域と、地磁気観測点である茨城県の柿岡との距離の違いは問題にならないと考えられる。

図6には地磁気補正前の歪データ(a)とともに、柿岡地磁気データの東西成分(d)、南北成分(e)を併せて示した。また(2)式を用いて求めた最適な θ 方向の地磁気変化を(c)に示した。歪変化(a)から地磁気変化(c)の波形に適切な係数 α を乗じたものを(a)の波形から差し引くことで、真の歪変化が得られる。このようにして得られた地磁気補正済みデータを

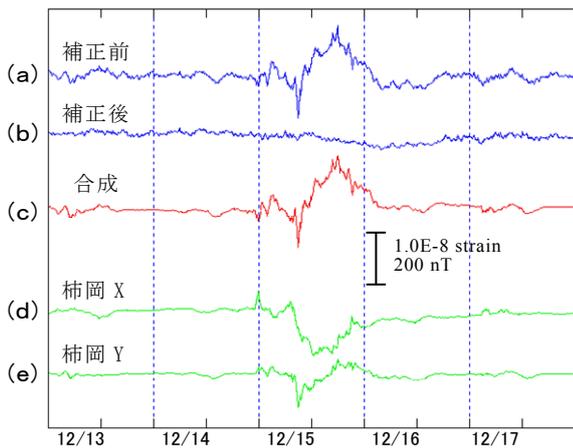


図6 補正前後の時系列図(2006年12月掛川3)。

- a) 地磁気補正前 (気圧, 潮汐補正済)
- b) 地磁気補正後 (気圧, 潮汐補正済)
- c) 補正用データ (地磁気合成)
- d), e) 柿岡地磁気データ (南北, 東西成分)

(b)に示した。その結果、 $2E-8$ strain P-P程の地磁気擾乱による見かけ上の歪変化が $1E-9$ strain以下にまで軽減されていることがわかる。

また3項で述べたような地磁気の日変化に伴う $0.5\sim 1E-8$ strain程度の見かけ上の歪変化についても同様に補正を行うことができる。

なお、 θ 、 α の算出にあたっては、 θ を 0° から 360° まで変化させて、歪データとこの地磁気変化の相関が最も良くなる方位を探し、その後歪変化と θ 方向の地磁気変化の回帰式から係数 α を求める方法が簡便である。

ここでひとつの指摘をしておきたい。上述のように地磁気には日変化があり、12時間周期、もしくは24時間周期の成分を持っている。これらは地球潮汐の一日潮、半日潮と同じ周波数帯であり、潮汐補正係数を求める際に影響を与えているであろうことが想像出来る。図7には、予め地磁気補正を施したデータで求めた潮汐補正係数と地磁気補正を行う前のデータで求めた潮汐補正係数による補正残差の違いを示した。①は地磁気補正を施したデータを用いて潮汐補正パラメータを計算し、その値を用いて潮汐補正と地磁気補正を施した歪変化データであり、一方②③は地磁気補正を施していないデータを用いて求めた潮汐補正パラメータを用いて潮汐補正を施したデ

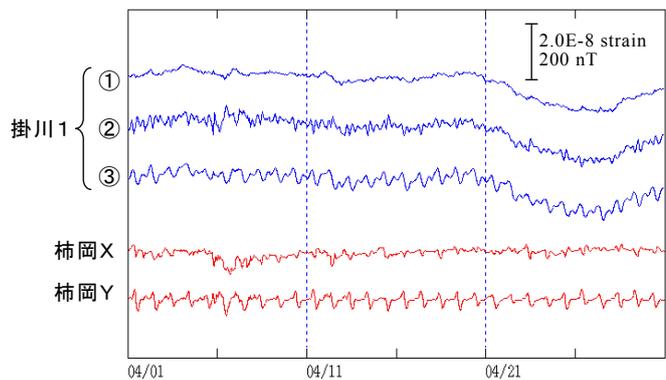


図7 補正順序による補正残差の違い

- ① : 地磁気補正済みデータを基に求めた潮汐補正パラメータで潮汐補正し、さらに地磁気補正して表示
- ②③ : 地磁気補正をしていないデータを基に求めたパラメータで潮汐補正し、②は地磁気補正したもの、③は地磁気補正をしていないものを表示

ータである。また③は②に、さらに地磁気補正を施したデータである（上記、いずれも気圧補正済み）。②、③いずれも①に比べて大きな補正残差が見られているが、これは潮汐補正パラメータ推定の際に、データに含まれる地磁気応答成分によって、潮汐応答成分の見積もりが正しく行われなかったことを示していると考えられる。

したがって、予め地磁気補正を施したデータに対して潮汐補正係数を求めるという手順が必要となる。

表1には現在用いられている地磁気補正パラメータを示した。

表1 地磁気補正パラメータ

観測成分	α (strain/nT)	θ (°)
掛川 1	1.30E-10	348
掛川 2	1.20E-10	265
掛川 3	9.00E-11	211
掛川 4	1.00E-10	125
春野 1 *	1.20E-10	182
春野 2	1.00E-10	99
春野 3	1.10E-10	49
春野 4	1.40E-10	317
佐久間 1	6.00E-11	338
佐久間 2	5.00E-11	255
佐久間 3	6.00E-11	197
佐久間 4	4.00E-11	110
本川根 1 *	5.00E-11	190
本川根 2	6.50E-11	332
本川根 3	5.00E-11	287
本川根 4	7.00E-11	45
浜北 1	9.50E-11	-2
浜北 2	9.00E-11	268
浜北 3	7.00E-11	223
浜北 4	1.00E-10	133

* 春野、本川根は静岡県が設置した観測点

5 EPOSにおける地磁気補正について

気象庁の歪計には気圧計や雨量計が併設されており、これらのデータも歪データと共に伝送され、EPOSにおいてリアルタイムでの気圧補正、潮汐補正が行われている。

一方で、地磁気補正に必要な柿岡地磁気の電文データの伝送は当初、約12分遅れであったため、リアルタイムで補正を行うことはできなかった。EPOSでの自動監視を行うためにはリアルタイムで地磁気データを得る必要があった。そこで、柿岡地磁気観測所内で地磁気データのアナログ分岐を受け、サン

プリングしたデータを、FR回線網を通じてEPOSに取得し、リアルタイムでの補正および自動監視を行うシステムを2005年に構築した。

6 地磁気の影響低減の試み

地磁気データを用いた地磁気補正を行う一方で、センサーそのものが受ける地磁気変化の影響を低減させる試みも行ってきた。

1998年に佐久間観測点に設置された気象庁での石井式三成分歪計2号機では、周囲の磁場の影響を低減させる目的で、センサー部分をアモルファスシートでシールドを施す試みを行った。地磁気変化に対する応答は掛川に設置された1号機に比べて半分程度に減少した。

しかし、用いたセンサーは極微小な変位を検出するための高感度のものであり、遮断しきれない地磁気変化によっても地殻変動監視に影響が出る程の応答がある。このことから、地磁気データを用いた補正が必要であり、かつ有効であることがわかった。

おわりに

気象庁において多成分歪計を掛川に導入したのは1997年度であった。埋設後、データが安定し始めた1998年の夏に激しい地磁気擾乱が発生し、歪データに大きな変化が現れた。このことから地磁気変動によるノイズレベルの低減を目的に考案したのがこの地磁気データを用いた補正方法である（宮岡他、1999）。

その際にきちんとこの補正手法について記録することなく、既に十余年が経過してしまった。ここに至り、新たに6地点の多成分歪計が新設され、また他の機関からも同型歪計データを提供いただくことになり、地磁気補正を行う機会が増えたことから、ようやく本稿をまとめるに至った次第である。

本手法を開発するにあたり、地磁気観測所の関係各位には多くの技術的な助言をいただいた。また匿名の査読者の方には、本稿を改善するための有益な助言をいただいた。記して感謝いたします。

文献

石井紘, 松本滋夫, 平田安廣, 山内常生, 高橋辰利, 鈴木喜吉, 渡辺茂, 若杉忠雄, 加藤照之, 中尾茂(1992):

- 新しい小型多成分ボアホール歪計の開発と観測, 地球惑星科学関連学会 1992 年合同大会予稿集, C22-03.
- 石垣祐三 (1995) : 埋込式体積歪データの精密補正及び異常識別について, 験震時報, 59, 7-29.
- 石黒真木夫, 佐藤忠弘, 田村良明, 大江昌嗣 (1984) : 地球潮汐データ解析プログラム BAYTAP-G の紹介 - , 統計数理研究所彙報, 32, 71-85.
- 尾崎友亮 (2004) : 新 EPOS(Earthquake Phenomena Observation System : 地震活動等総合監視システム)の紹介, 験震時報, 68, 57-75.
- 末廣重二 (観測部地震課) (1979) : 地殻変動連続観測と埋込式歪計 (I), 測候時報, 46, 9-25.
- 檜皮久義, 佐藤馨, 二瓶信一, 福留篤男, 竹内新, 古屋逸夫 (1983) : 埋込式体積歪計の気圧補正, 験震時報, 47, 91-111.
- マコメ研究所 (1997) : 非接触型直線ポテンシオメータ仕様書.
- 源泰拓 (2010) : 東京/柿岡における地磁気観測の歴史と現状, 地磁気観測所テクニカルレポート, 7, 1-8.
- 宮岡一樹, 小久保一哉, 吉田明夫 (1999) : 石井式三分歪計で観測された磁気擾乱に伴う歪み変化とその補正, 地球惑星科学関連学会合同大会予稿集, Dd-011.