

石井式傾斜計の地磁気補正 Geomagnetic Correction of the Ishii Type Tiltmeters

甲斐 玲子¹
Reiko KAI¹

(Received June 19, 2018; Accepted September 21, 2018)

1 はじめに

気象庁では、南海トラフ及びその周辺の地域における地殻活動の常時監視及び南海トラフ地震に関連する情報の発表のために国立研究開発法人産業技術総合研究所（以下、産総研）から地下水総合観測ネットワーク（産総研，2018）のひずみ計と傾斜計のデータ提供をうけている。このうち、ひずみ計のデータは気象庁のひずみ計のデータと同様に地殻活動の常時監視に用いている。傾斜計のデータについては地殻変動ではないノイズの除去が十分に行えていないため、常時監視には用いておらず、ひずみ計で異常が見られたときの参考情報として利用している。産総研では短期的ゆっくりすべり（SSE）の断層モデルの推定にひずみ計のデータとともに傾斜計のデータを使用している（例えば、産総研・防災科学技術研究所，2018 など）。産総研と同じように気象庁でも傾斜計のデータを利用することで、気象庁の観測点がない紀伊半島や四国における監視能力が向上する可能性があると考えられる。

産総研の地下水総合観測ネットワークの傾斜データには 2 種類あり、1 つは石井らによって開発された傾斜計（Ishii et al., 2002 ; 以下、石井式傾斜計）の傾斜データ、もう 1 つは高感度加速度計の傾斜データである。これらの傾斜データは気圧や潮汐の影響を受けているため、気象庁では気圧補正（檜皮ほか，1983）と BAYTAP-G（石黒ほか，1984）を用いた潮汐補正を行いそれらの影響を除いている。しかし、石井式傾斜計は傾斜量の検出に磁気センサーが用いられているため、気圧や潮汐の他、地磁気の日変化や、磁気嵐等の地磁気擾乱の影響も受けている。

地磁気擾乱の影響によるノイズが大きいため、常時監視に用いることができる精度の高い観測は困難である。そこで本稿では、石井式傾斜計の地磁気変化による影響を補正する方法について報告する。

2 地磁気補正の計算式

石井式傾斜計と同じ機構である磁気センサーが石井式多成分ひずみ計（石井ほか，1992）でも使われていて、これについては地磁気補正の方法が宮岡（2011）により報告されている。

石井式多成分ひずみ計の磁気センサーが地磁気の影響を受ける仕組みは以下の通りである。永久磁石が作り出す磁場の中を磁気センサーが移動することにより、磁気センサーが受ける磁場の強さが変わり、移動距離に応じたその強さの変化を電圧変化として出力する。この時、永久磁石が作り出す磁場に变化がない限りにおいては、磁気センサーと永久磁石の相対位置が変わらなければ電圧に変化は生じない。しかし、これらを取り巻く外部磁場（地磁気）が変化した場合には磁気センサーが受ける磁場の強さが変わり、電圧に変化が生じる。これが見かけ上のひずみ変化として観測されることになる。この地磁気の変化に対する見かけ上のひずみ変化量を求めることで、この地磁気の影響を除去することが可能となる。

石井式多成分ひずみ計において、水平面（X-Y 平面）内のある方位 θ （北を基準に時計回り）の線ひずみを検出する場合、ひずみセンサーの機構からその方位とは直交する方向の磁場の変化量に比例した見かけ上のひずみ変化が現れる。N-S 方向、E-

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

W 方向の磁場の変化量をそれぞれ $magX$, $magY$ (それぞれ北, 東が正) とした場合, このひずみセンサーが影響を受ける磁場の変化量 $Magne(\theta)$ は以下のように求められる.

$$Magne(\theta) = magX \times \sin\theta - magY \times \cos\theta \quad (1)$$

ひずみ計で観測された変化量 e [strain] からこの見かけ上のひずみ変化を除いた, 真のひずみ変化量 E [strain] は以下のように表される.

$$E = e - Magne(\theta) \times \alpha \quad (2)$$

ここで α は地磁気補正係数 [strain/nT] であり, 磁場およびひずみの観測からこれを求めることができる.

石井式傾斜計は, 図 1A に示すように傾斜計の容器に固定されている磁気センサーと, 振り子の先端にある永久磁石の相対位置の変化を電圧の変化として出力する. 傾斜計周辺の地盤が傾くと, 図 1B のように傾斜計の容器は傾斜するが, 傾斜計の中にある振り子は傾斜せずに静止したままとなる. このとき, 磁気センサーと永久磁石の相対位置が変わることによって, 磁気センサーが受ける磁場の強さが変化し, それに対応した電圧の変化が出力されることで, 傾斜の変化量を観測している. 傾斜計でもひずみ計と同様に地磁気の変化の影響を受けるため, ひずみ計と同じ考え方で地磁気補正を行う.

図 1B の破線のように Z 軸を鉛直下向き, X 軸を傾斜計容器の傾斜方向にとり, 傾斜の変化量 θ_T は Z 軸から X 軸の正の向きへの回転を正とすると, 傾斜計の磁気センサーは X-Z 平面内の磁場の変化の影響を受ける. 傾斜計の真の傾斜変化量 E_T [radian] は, 傾斜計で観測された変化量を e_T [radian], 地磁気補正係数を α_T [radian/nT] とし, (2)式と同じ

$$E_T = e_T - Magne(\theta_T) \times \alpha_T \quad (3)$$

と表される. 傾斜計の磁気センサーの受感方向と傾斜計の変化方向は同じため, (3)式の $Magne(\theta_T)$ は θ_T 方向の磁場変化で, 磁場データの Z 軸方向の変化量を $magZ_T$ [nT], X 軸方向の変化量を $magX_T$ [nT] とすると,

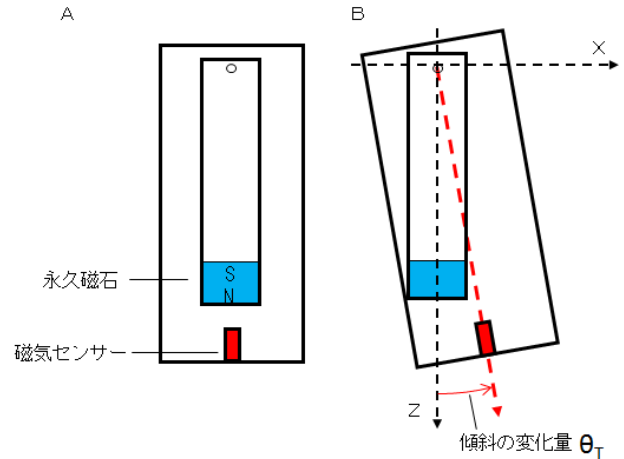


図 1 傾斜計の磁気センサーの概念図

A は磁気センサーの概念図. B は傾斜が生じたときの磁気センサーの概念図. 黒破線は座標軸, 赤破線は傾斜計の向き, 赤矢印は傾斜の変化の向きを表す.

$$Magne(\theta_T) = magZ_T \times \cos\theta_T + magX_T \times \sin\theta_T \quad (4)$$

と表すことができる. 傾斜計で観測される変化量は大きくても 10^{-5} radian のオーダーであることから, $\theta_T \approx 0$ で近似すると

$$Magne(\theta_T) = magZ_T \quad (5)$$

と書き換えられる. (3)式, (5)式から,

$$E_T = e_T - magZ_T \times \alpha_T \quad (6)$$

が得られる.

3 地磁気補正の効果

地磁気補正係数は観測点毎の固有値となるはずだが, 磁気センサーの感度や取り付け状況が成分によって微妙に異なるため, この違いを反映するために, (6)式から得られる E_T と磁場の鉛直成分 $magZ_T$ の相互相関が最も小さくなる地磁気補正係数 α_T を各観測点, 成分毎に求めた.

地磁気補正の有無の比較として, 図 2 に 2017 年 5 月 28 日の磁気嵐が発生したときの産総研の豊橋多米観測点の石井式傾斜計データを示す. 豊橋多米観測点では磁場の観測を行っていないため, 地磁気補正には近くの観測点である豊田神殿の磁場の観測デー

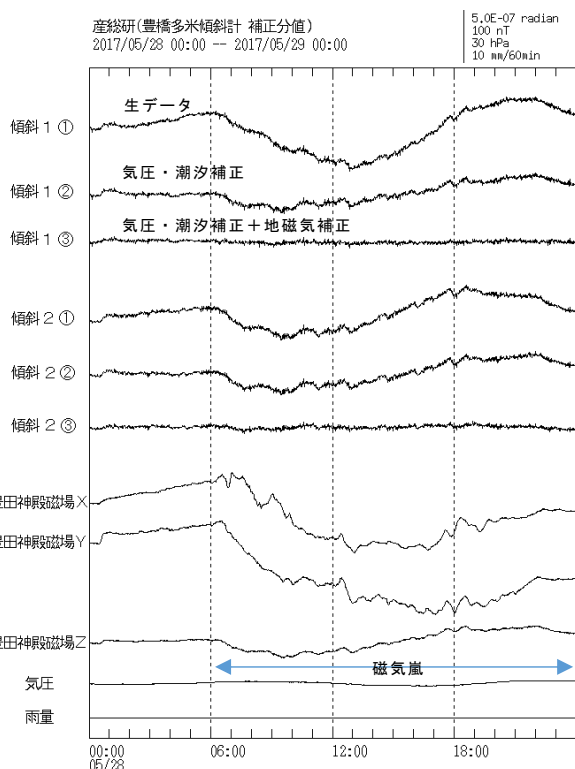


図 2 豊橋多米観測点の石井式傾斜計で観測された磁気嵐
 ①は補正を行っていない傾斜データ. ②は潮汐補正と気圧補正を行った傾斜データ. ③は潮汐補正と気圧補正, 地磁気補正を行った傾斜データ.

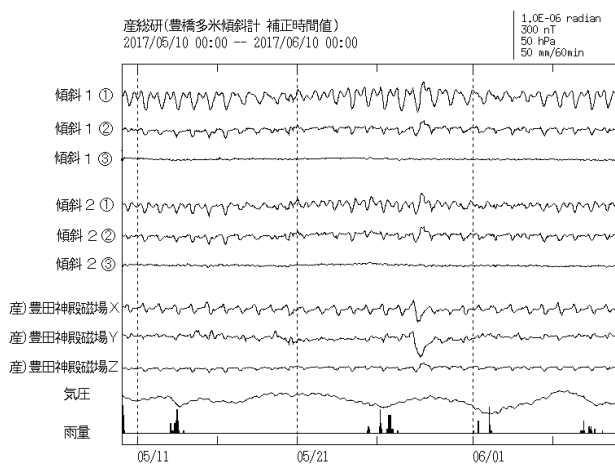


図 3 豊橋多米観測点の石井式傾斜計で観測された地磁気の日変化
 ①は補正を行っていない傾斜データ. ②は潮汐補正と気圧補正を行った傾斜データ. ③は潮汐補正と気圧補正, 地磁気補正を行った傾斜データ.

表 1 産総研の石井式傾斜計の地磁気補正係数

傾斜計	傾斜計 センサー方位	磁場データ	地磁気補正係数 α_i [radian/nT]
豊橋多米傾斜計1	N356E	豊田神殿磁場Z	5.63E-09
豊橋多米傾斜計2	N86E	豊田神殿磁場Z	5.53E-09
豊田神殿傾斜計1	N78E	豊田神殿磁場Z	-8.23E-09
豊田神殿傾斜計2	N168E	豊田神殿磁場Z	-7.74E-09
西尾善明傾斜計1	N290E	西尾善明磁場Z	-2.24E-09
西尾善明傾斜計2	N20E	西尾善明磁場Z	-2.00E-09
津安濃傾斜計1	N38E	津安濃磁場Z	-9.43E-09
津安濃傾斜計2	N128E	津安濃磁場Z	-8.49E-09
紀北海山傾斜計1	N237E	紀北海山磁場Z	-7.38E-09
紀北海山傾斜計2	N327E	紀北海山磁場Z	-9.26E-09
熊野磯崎傾斜計1	N141E	熊野磯崎磁場Z	-6.37E-09
熊野磯崎傾斜計2	N231E	熊野磯崎磁場Z	-6.88E-09
串本津荷傾斜計1	N310E	串本津荷磁場Z	-5.25E-09
串本津荷傾斜計2	N40E	串本津荷磁場Z	-5.97E-09
新居浜黒島傾斜計1	N251E	新居浜黒島磁場Z	-2.78E-09
新居浜黒島傾斜計2	N341E	新居浜黒島磁場Z	-2.91E-09
西予宇和傾斜計1	N222E	西予宇和磁場Z	-5.46E-09
西予宇和傾斜計2	N312E	西予宇和磁場Z	-3.75E-09
室戸岬傾斜計1	N147E	室戸岬磁場Z	-8.80E-09
室戸岬傾斜計2	N237E	室戸岬磁場Z	-8.88E-09
須崎大谷傾斜計1	N355E	須崎大谷磁場Z	-7.33E-09
須崎大谷傾斜計2	N85E	須崎大谷磁場Z	-8.54E-09
土佐清水松尾傾斜計1	N246E	土佐清水松尾磁場Z	-6.18E-09
土佐清水松尾傾斜計2	N336E	土佐清水松尾磁場Z	-5.21E-09

ータを用いた. グラフの傾斜 1 は南北方向, 傾斜 2 は東西方向に設置された傾斜計である. なお, 期間中に発生した 2017 年 5 月 27 日の若狭湾の地震に伴いステップ状の変化が見られたため, 地震の前後のデータを除外し, 地震によるステップをつなげたデータを使用した. グラフの①の生データに, 気圧補正と潮汐補正を行ったものが②のデータになるが, 5 月 28 日に発生した磁気嵐に伴うノイズ波形が観測されている. この波形は豊田神殿の磁場 Z 成分の波形に類似している. 傾斜データを磁場 Z 成分データを用いて地磁気補正を行うことで, グラフの③に示すように磁気嵐に伴うノイズが低減されたことがわかる.

図 3 に磁気嵐を含む 1 ヶ月間の豊橋多米観測点の石井式傾斜計データを示す. グラフの②の気圧補正と潮汐補正を行ったデータには磁気嵐以外にも地磁気の日変化に伴う日周期の変動が観測されている. 地磁気補正を行うことで, ③に示すように日周期の変動によるノイズが低減された.

表 1 に, 今回求めた産総研の各観測点各成分の石井式傾斜計の地磁気補正係数を示す.

これらの地磁気補正の効果について, 確認を行った. 気象庁ではノイズレベルの評価には 24 時間階差の変化量 (小林・松森, 1999, 小林, 2000) や 24 時間階差の標準偏差 (木村ほか, 2015) などが用いられるが, 図 3 で見るような地磁気の日変化による

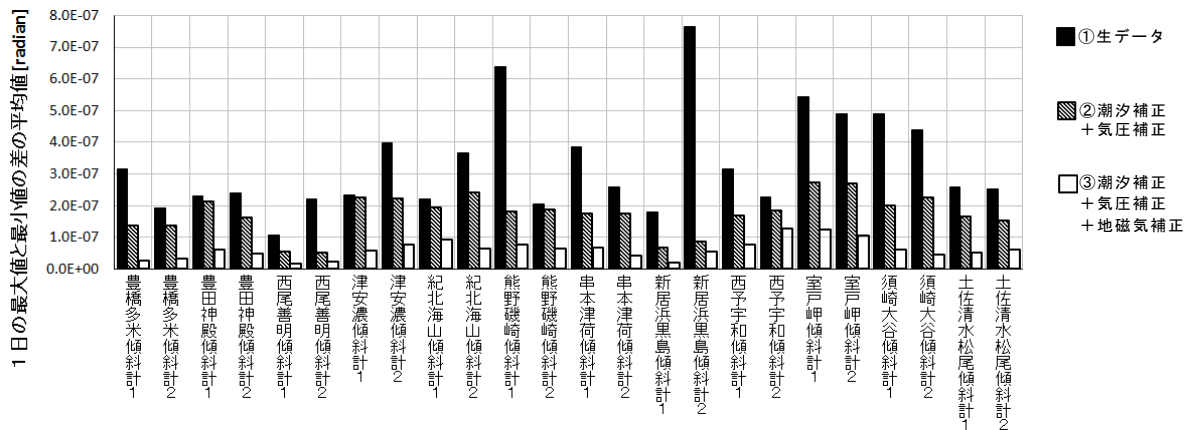


図 4 産総研石井式傾斜計データの 1 日のノイズの比較

①黒色の棒グラフは補正を行っていない傾斜データの 1 日の最大値と最小値の差の平均値，②斜線の棒グラフは潮汐補正と気圧補正を行った傾斜データの 1 日の最大値と最小値の差の平均値，③白色の棒グラフは潮汐補正と気圧補正，地磁気補正を行った傾斜データの 1 日の最大値と最小値の差の平均値。

影響は 24 時間階差では変動が打ち消されて小さくなるため地磁気補正の効果を評価する方法には適さない。ここでは，データの 1 日の最大値と最小値の差の平均値をノイズの大きさとし，これらの比較を行った。ノイズの計算にはあらかじめ直線トレンドを除去した（露木ほか，2017）時間値データを使用した。調査期間の i 日目のデータの最大値を $Xmax_i$ ，最小値を $Xmin_i$ とすると，ノイズ $Xaverage$ は

$$X_{average} = \frac{\sum_{i=1}^n (Xmax_i - Xmin_i)}{n} \quad (7)$$

となる。ここで， n はデータ期間中の日数を表す。

ノイズの計算には，2017 年 5 月 10 日から 6 月 10 日までの①石井式傾斜計の補正を行っていない生データ，②潮汐補正と気圧補正を行ったデータ，③潮汐補正と気圧補正，地磁気補正を行ったデータを使用し，比較を行った（図 4）。なお，2017 年 5 月 27 日の若狭湾の地震に伴いステップ状の変化が見られたため，地震の前後のデータを除外し，地震によるステップをつなげたデータを使用した。

3 つのデータのノイズを比較すると，生データに潮汐補正と気圧補正を行うことで 1 日の最大値と最小値の差の平均値が小さくなるが，さらに地磁気補正を行うことで 1 日のノイズがより小さくなっている。②のデータと比較して，③のデータのノイズは 20～70%に低減している。このことから，地磁気補

正を行うことでデータのノイズが小さくなり，精度の高い観測ができることが確認された。

以上のことから，磁気センサーが使われている石井式傾斜計には地磁気補正が必要であり，かつ有効であることがわかった。

4 おわりに

石井式傾斜計は，石井式多成分ひずみ計と同じ手法で地磁気補正を行うことができ，地磁気補正によってノイズが低減されることがわかった。今後，気象庁では，南海トラフ及びその周辺地域における地殻活動の監視のために傾斜データの利用を検討していきたい。

謝辞

本調査には産総研の傾斜計のデータを使用した。気象庁地震火山部の宮岡一樹氏と木村久夫氏には本稿を作成するにあたって有益な助言を頂いた。産総研の松本則夫氏には本稿を改善するために有益な助言を頂いた。査読者の菅沼一成氏には有益なご指摘を数多く頂いた。記して感謝の意を表する。

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.

木村一洋, 露木貴裕, 菅沼一成, 長谷川浩, 見須
裕美, 藤田健一 (2015): タンクモデルによる体
積ひずみ計データの降水補正について, 験震時
報, **78**, 93-158.

小林昭夫 (2000): 体積歪計観測網による東海地
震の前兆すべりの検知能力, 験震時報, **63**, 17-33.

小林昭夫, 松森敏幸 (1999): 埋込式体積歪計のノ
イズレベル調査及び異常監視処理, 験震時報,
62, 17-41.

産業技術総合研究所 (2018): 産業技術総合研究
所地下水総合観測ネットワーク【概要】,
[https://gbank.gsj.jp/wellweb/GSJ/kaisetsu/gaiyou/
gaiyou.html](https://gbank.gsj.jp/wellweb/GSJ/kaisetsu/gaiyou/gaiyou.html), (参照 2018-06-19).

産業技術総合研究所, 防災科学技術研究所
(2018): 東海・紀伊半島・四国における短期的
スロースリップイベント (2017年5月～
2017年10月), 地震予知連絡会会報, **99**,
243-257.

露木貴裕, 長谷川浩, 近澤心, 木村久夫, 棚田理
絵, 沼野あかね (2017): 新しい地震活動等総合
監視システム (EPOS) における地殻変動監視
手法の改善, 験震時報, **81**:5.

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.

宮岡一樹 (2011): 多成分歪計の地磁気補正, 験震
時報, **74**, 29-34.

Ishii, H., T. Yamauchi, S. Matsumoto, Y. Hirata and
S. Nakao (2002): Development of
multi-component borehole instrument for
earthquake prediction study: some observed
example of precursory and co-seismic phenomena
relating to earthquake swarms and application of
the instrument for rock mechanics, in Seismogenic
Process Monitoring, edited by Ogasawara, H., T.
Yanagidani, and M. Ando, Balkema, Rotterdam,
Netherlands, 365-377.

(編集担当 上野寛)