

箱根周辺で観測された地震時の傾斜ステップに関する考察

本多亮^{*1}

On coseismic tilt changes observed at Hakone volcano

by

Ryou HONDA^{*1}

1. はじめに

傾斜計やひずみ計の観測記録には、近地あるいは遠地地震の地震波によって地盤が揺らされた直後に生じるステップ的な変動が記録されることがある。このような地震時の傾斜ステップに関する報告は、岡田 (1975)、McHugh and Johnston (1977)、小向・石井 (1978)、岡田 (1980)、佐藤ほか (1980)、Wyatt (1988)、Wyatt *et al.* (1994)、鶴川・熊谷 (1994)、Bonaccorso *et al.* (1996)、Gambino (2002)、Gambino *et al.* (2007)、Gambino (2016) など、傾斜計の黎明期から近年に至るまで多く存在する。また、傾斜の計測方法もボアホール型 (ばね式、気泡式)、水管傾斜計など様々である。

傾斜計記録にステップを生じる理由として、1) 地震を起こした断層運動による静的なひずみ変化、2) 地震後に断層面上で発生した非地震性の滑り (after slip) によるひずみ変化、3) 観測点周辺の経年的な傾斜変化の加速 4) 地震動による応力変化にトリガーされた、観測点近傍の微小なクラックや断層の活動によるひずみ変化、5) 観測点近傍に存在する流体の移動によるひずみ変化、6) 機械的な不具合などが考えられる (例えば Wyatt *et al.* 1994)。

温泉地学研究所 (以下、温地研) が箱根火山に展開する傾斜観測網においてもコサイスミックな傾斜ステップが観測されることがあるが、火山活動が活発な時期における数十日~数か月間の変動や水蒸気噴火直前に観測された数分間の傾斜変動以外についてはこれまで特に注意を払ってこなかった。しかしながら 2019 年 5 月 19 日に芦ノ湖付近で発生した M2.6 (温地研のルーティン観測による。以後、温地研によるマグニチュードを M_{onk} 、気象庁マグニチュードを M_{jma} と表記。) の地震では、地震波到達と同時にクラックの収縮とも解釈されるような傾斜変動が観測され、一見、地震波によって地下のクラックの活動が誘発されたようにも見える (図 1、2)。図 1 に観測された傾斜記録、図 2 に地震時に観測された傾斜ステップの方向と、グリッドサーチで推定した開口クラックの位置を示す。この解析では裾野観測点のデータは使用していないが、裾野観測点は明らかにこのクラックの活動による変動よりも大きなステップを記録している。したがって、おそらくこの時の傾斜ステップは開口クラックによるものではないと推定される。しかし、仮にこのような現象が実際に発生しているとする、箱根の火山活動・火山防災を考える上で重要な現象である。

そこで本研究では、箱根火山で観測される傾斜計のコ

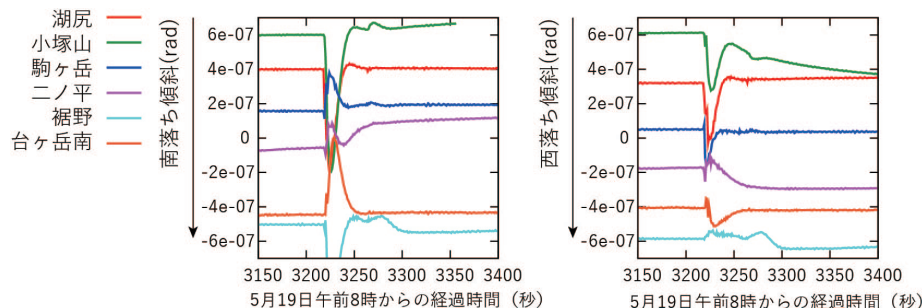


図 1 2019 年 5 月 19 日に発生した M2.6 の地震による傾斜記録。3100 秒から 3200 秒の平均値と 3350 秒から 3400 秒の平均値の差からステップ量を推定。

^{*1} 神奈川県温泉地学研究所 〒250-0031 神奈川県小田原市入生田 586

報告, 神奈川県温泉地学研究所報告, 第 51 巻, 17-23, 2019

サイスミックな変動記録に改めて着目し、その特徴と原因について考察した結果を報告する。

2. 傾斜計の概要

温地研が管理する箱根周辺の地震・傾斜観測点は、5か所（駒ヶ岳、湖尻、小塚山、裾野、塔の峰）で、1989年から1994年にかけて整備された。使用している機器はミットヨ製 JTS-33 で、傾斜計として水平2成分の加速度センサーを搭載するほか、速度計、孔底温度計を備える。これらのセンサーは、耐水耐圧容器に収納されており、耐水耐圧容器の上部および下部にある固定

器によって、孔底にセメンチングされているステンレス製のケーシングパイプ内に固定される。傾斜計の出力感度は $20\text{mV}/\mu\text{radian}$ 、分解能は $1 \times 10^{-9}\text{radian}$ 以下である。傾斜計出力は30秒のローパスフィルターをかけたうえでテレメータ装置に渡され、1秒サンプリングでデジタル化される。なお、本研究では気象庁が設置・管理する二ノ平観測点および台ヶ岳南観測点のデータも使用する。二ノ平観測点の観測機器は温地研と同じミットヨ社製のボアホール傾斜計で、出力感度 ($5\text{mV}/\mu\text{radian}$) 以外は、温地研が管理する観測点との違いはほぼない。台ヶ岳南観測点は、ピナクル社製の気泡式傾斜計である。

3. 傾斜変動の特徴

3.1. 使用した地震について

本研究では、箱根を震源とする地震のうち、 $M_{\text{onk}}1.5$ 以上で箱根の地震観測点で数ガル程度以上の強震動を観測した地震および神奈川県内とその周辺で発生した $M_{\text{onk}}3$ 以上の地震の中からいくつかを選び出し（図3）、地震時の傾斜ステップについて調べた。（群発地震活動中で単発の地震によるステップが分離できないものは除いた）。なお、震源とマグニチュードは温地研のルーティン解析によるものを使用した。ほとんどの場合、地震波の到達時に変位応答とみられる変動が記録され（小久保、2003）、その後数十秒程度かけて 10^{-8} から 10^{-6} ラジアン程度の静的な傾斜変化が記録されている。傾斜計出力には30秒のローパスフィルターがかけられているため、実際にはほぼ階段関数的な傾斜変化であると考えられる。

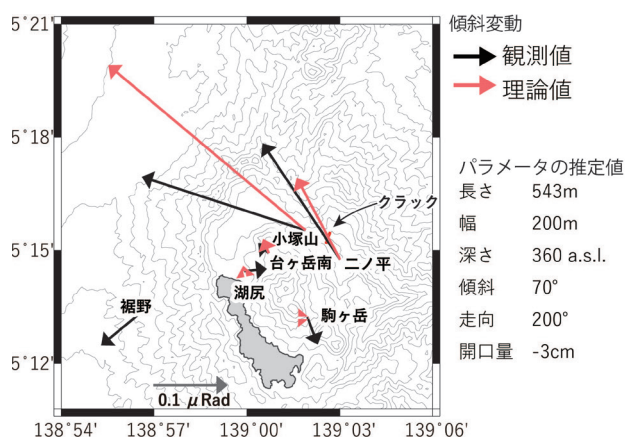


図2 黒の矢印で、2019年5月19日に発生したM2.6の地震の際に観測された傾斜ステップの方向と傾斜量を示し、赤の矢印でグリッドサーチにより推定した開口クラックによる傾斜方向と傾斜量の推定値を示す。推定されたクラックの位置と推定されたパラメータも図中に示す。

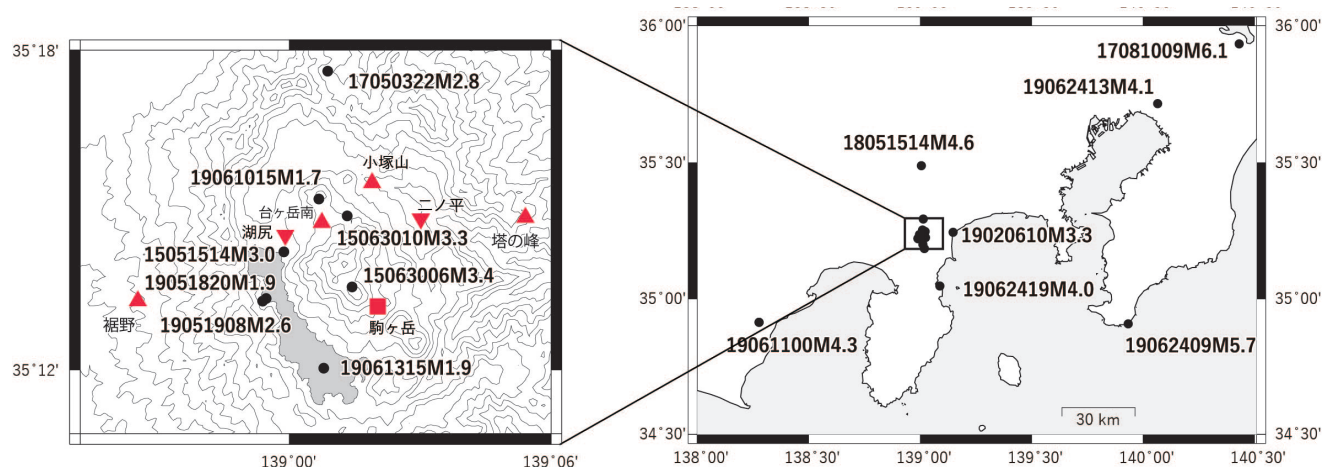


図3 本研究の解析に使用した地震の震源。●が震源、日付とマグニチュードを示してある。赤い△、▽、□は観測点の位置であり、△は傾斜計、▽は傾斜計と強震計、□は傾斜計、強震計、広帯域地震計が設置されていることを示す。台ヶ岳南と二ノ平は気象庁、そのほかは温地研が管理する観測点である。数字は地震の発生時 (yyymmddhh) を示す。マグニチュードは M_{onk} である。

3.2. 理論値との比較

傾斜ステップの原因としてまず考えられるのは、震源断層のずれによる静的な傾斜変動である。そこで、それぞれの地震による静的な傾斜変動を計算し、観測値と比較した。理論値の計算には断層モデルが必要であるが、ここでは震源位置と滑り量を固定して傾斜角、走向、滑り方向をランダムに変化させ、Okada (1992) の式を用いて各観測点位置における最大の傾斜変動量を見積もった。滑り量については、佐藤 (1989) による気象庁マグニチュードと地震モーメント (M_o) の関係式 (式 1) を用いてマグニチュードからモーメントに変換し、次に Nadeau and Johnson (1998) による変換式 (式 2) を用いて地震モーメントから滑り量 (d) に変換した。ただし $M_{jma}=M_{onk}$ と仮定した。

$$\text{Log } M_o = 1.5 M_{jma} + 16.2 \quad (1)$$

$$\text{Log}(d) = -2.36 + 0.17 \text{ log}(M_o) \quad (2)$$

ここで、 M_o および d の単位は $\text{dyne} \cdot \text{cm}$ と cm である。図 4 にそれぞれの観測点について傾斜の観測値と理論値の比較を示す。観測された振幅は、ほぼすべての観測点において計算値の数倍から 10 数倍程度大きい。このような傾向は、岡田 (1980) や McGarr *et al.* (1982)、Wyatt (1988)、Bonaccorso *et al.* (1996) などでも報告されている。

理論値と観測値との違いを after slip の影響であると解釈する場合もある (例えば、Takemoto, 1995 など)。サンプリングレートが低い (例えば 30 分間隔) 記録の場合、地震の直後から数十分間のゆるやかな変動があってもステップにみえてしまうので、このような解釈も可能かもしれない。しかし 1 秒サンプリングのデータで

見る限り、変化に要する時間は数十秒程度であり、30 秒のローパスフィルターの影響を考えると実際のステップはほぼ階段関数的であろうと考えられる (例えば、小久保, 2013) ので、after slip を記録しているとは考えにくい。

3.3. 観測点ごとの傾斜方向の比較

観測点ごとに地震時に観測された傾斜方向をプロットしたものを図 5 に示す。地震波到達時に、近傍のクラックや断層などが非地震性の滑りを起こすのであれば、それによる傾斜方向は観測点ごとに一定の傾向が見えるこ

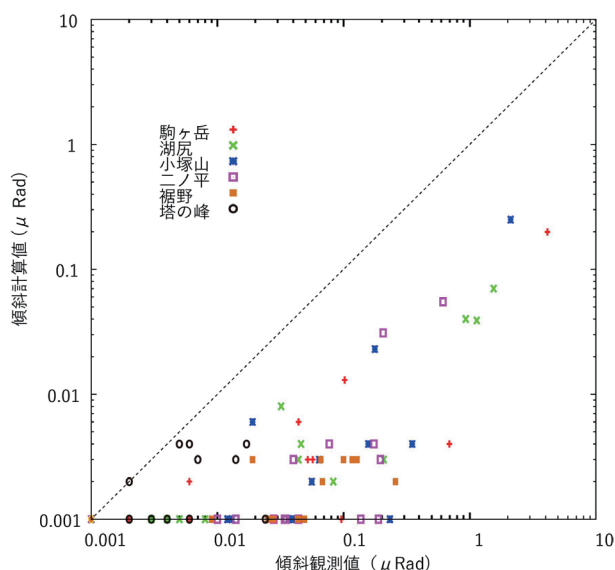


図 4 震源断層による傾斜変動の計算値と観測値の比較。横軸は傾斜の観測値、縦軸は傾斜の計算値 (対数軸)。

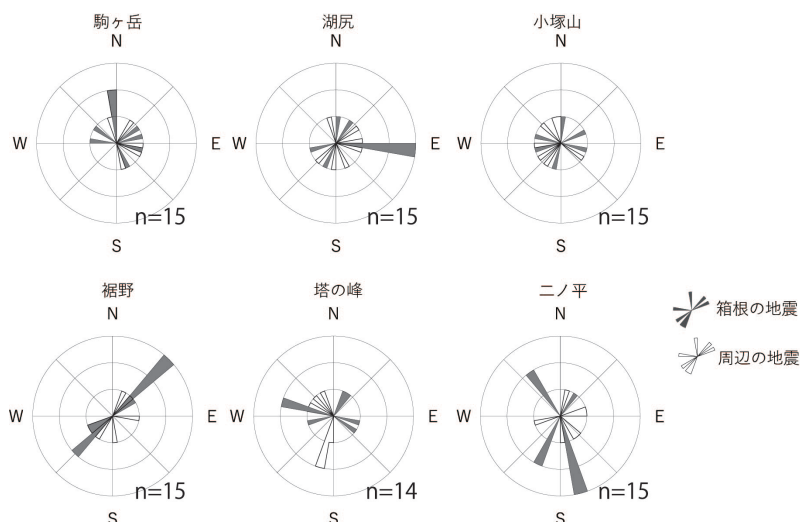


図 5 観測点ごとに、地震時の傾斜ステップの方向を 10 度ごとにプロットした。また、箱根の地震によるステップをグレーで、周辺の地震によるステップを白抜きで表現した。データ数を右下に示す。

とが期待される。しかし図5からは、箱根の地震、周辺の地震いずれについてもほぼすべての観測点で傾斜ステップの方向には規則性は見られない（裾野だけは北東—南西方向に偏りが見られる）。また、遠地の地震であればある程度の範囲内で同じような傾斜変動が生じることが期待されるが、図5からは傾斜方向がばらついていることがわかる。

3.4. 強震動との関係

地震・傾斜観測点のうち駒ヶ岳、湖尻、二ノ平観測点では地表に加速度計（明星電気製 KI-03A）を設置して強震観測を実施している。そこでこの3観測点について、地表の強震動と傾斜ステップ量の関係を調べた。図6に最大加速度の大きさおよびその方向と傾斜ステップの大きさと方向との関係を示す。図6からは震源位置や観測点によらず最大加速度が大きいほど大きな傾斜変動が記録される傾向が読み取れる。特に、比較的大きめの加速

度が記録された箱根を震源とする地震の場合には、明瞭な相関関係が認められる。一方、最大加速度の方向と傾斜ステップの方向には、相関関係は認められない。

強震動と傾斜ステップに言及した論文もいくつかあり、Gambino *et al.* (2007) は強震動と傾斜ステップの関係を調査し、観測点の加速度が 0.1m/s^2 を超える地震では、傾斜ステップが記録されたと述べている。また傾斜ステップの大きさや方向は、観測点周辺の地面の圧密度や微小なクラックの存在、地質によって影響を受けるだろうと述べている。Wyatt (1988) も同様に強震動との相関があることを報告しており、ローカルな地盤の影響だろうと述べている。

3.5. 地表と地下の傾斜ステップ量の違い

傾斜計で記録された傾斜ステップが、観測点周辺のローカルな地盤の変動を記録しているものかどうかを考えるために、地表と地下で観測された傾斜量を比較してみ

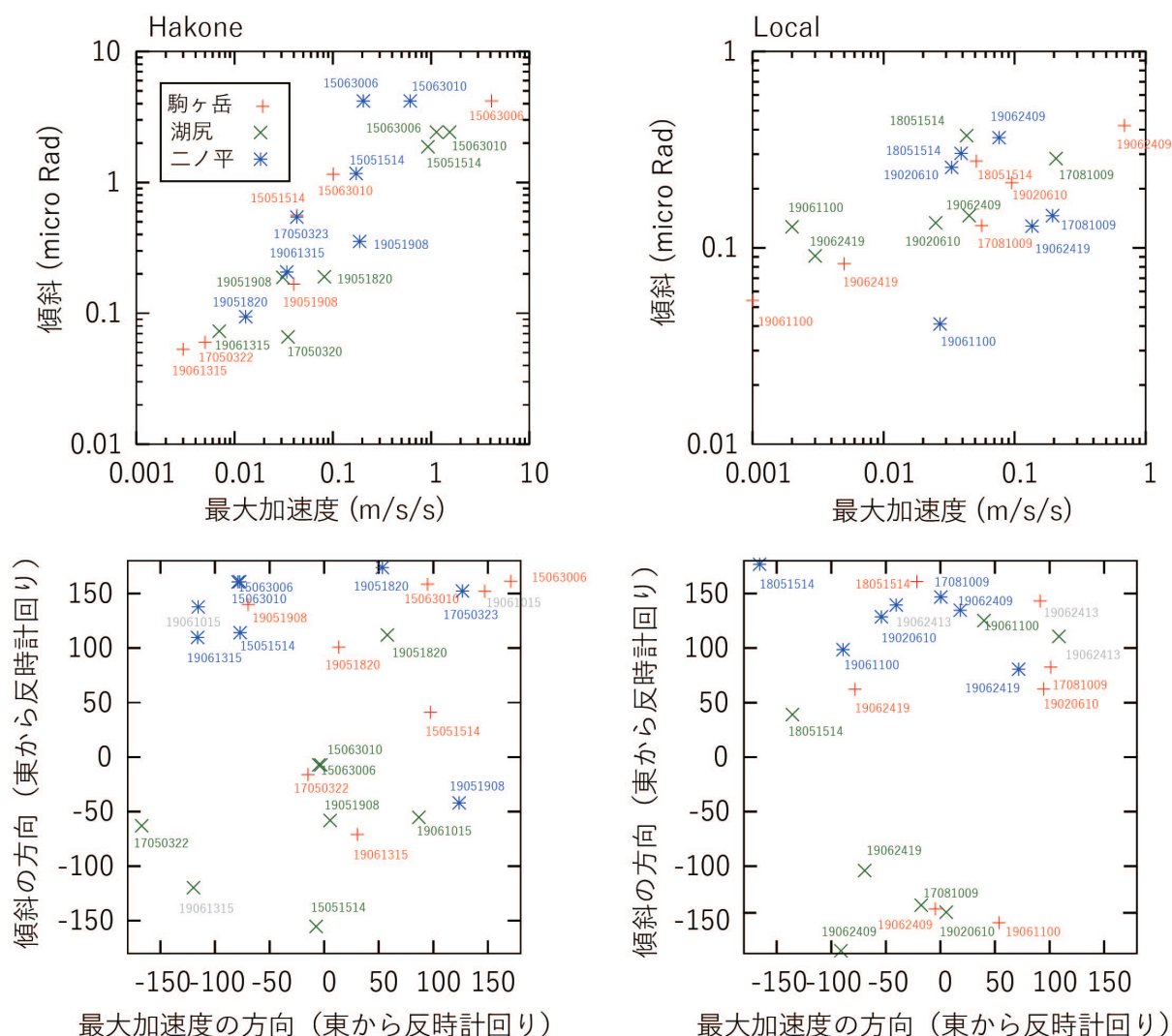


図6 傾斜ステップを最大加速度およびその方向と比較。上段が傾斜ステップと最大加速度の比較、下段が傾斜方向と最大加速度の方向の比較。左の列は箱根の地震について、右の列は周辺の地震について比較した結果を示す。

る。

地表と地下に傾斜計が設置されている観測点は存在しないが、広帯域地震計で記録される固有周期より長い見かけの変位は、地面の傾斜に対する応答であることが知られている（青山、2008）。そこで、地表に広帯域地震計（Nanometrics 製 Trillium Compact120s）が設置されている駒ヶ岳観測点のデータを用いて検討する。図7に駒ヶ岳観測点の傾斜記録と広帯域地震計の記録を積分して得られた見かけの変位記録を示した。変位記録には地震計の説明書に記載してあるポールとゼロの数値から計算した傾斜との変換係数をかけてある（Honda et al. 2018）。これらを見ると、上下動にはほとんど静的な変位がなく水平動にのみ表れているため、静的変位は地面の平行運動ではなく傾斜を反映していると解釈できる（Townsend、2014）。いずれの場合でも、傾斜計で記録されたステップよりも地表の広帯域地震計のステップのほうが大きく、2019年6月24日9時11分の地震を除くと地表と地下で傾斜方向も大きく異なることがわかる（図7）。原因として考えられるのは、それぞれのセンサーが自身のごく近傍の傾斜変動を記録していて、その変動の仕方が地上と地下で異なる、あるいは、一方もしくは両方が地殻変動をきちんと記録していない（センサー自身のがたつきなど）、などがあげられる。

3.5. 考察

以上のことから、はじめに傾斜ステップの原因の候補として挙げた項目についてまとめる。

1. 地震断層のずれによる静的な傾斜変化の可能性。

理論値に比較して明らかにステップ量が大きく（図4）、距離の離れた地震に対して観測点ごとに傾斜方向が大きくばらつく（図5）こと、強震動に比例してステップ量が大きくなること（図6）などから、断層のずれを反映したステップとは考えにくい。

2. 地震後の after slip による変動の可能性。

1と同様に断層メカニズムから推定される変動方向とは一致しないこと、また、傾斜ステップの継続時間が数十秒程度で、フィルターの効果を考慮すれば入力された傾斜変化はほとんど階段関数的な変化であると考えられることから、after slip によるものとは考えにくい。

3. 局地的・経年的な傾斜が加速された可能性。

地震によって傾斜変動の方向がばらばらなので、経年的な傾斜変動が加速されたとは考えられない。

4. 観測点近傍のクラックもしくは断層の非地震性滑りによる傾斜変化

ありうるが、毎回同じクラックなどが動くのであれば、地震によらず変動方向が同じになると考えられる。しかし変動方向に一定の傾向は見えず、共通のソースで説明するのは難しい。たくさんのソースがあり、毎回異なるソースが動くとするれば説明できるかもしれないが判定は困難。

5. 観測点近傍の流体の拡散

ほとんどの傾斜ステップは、ほぼ階段関数的な傾斜変化であると考えられる。継続時間から考えると、流体の拡散によるものとは考えにくい。

6. 観測点の機械的な不具合

地表と地下でも傾斜ステップの傾向が異なることか

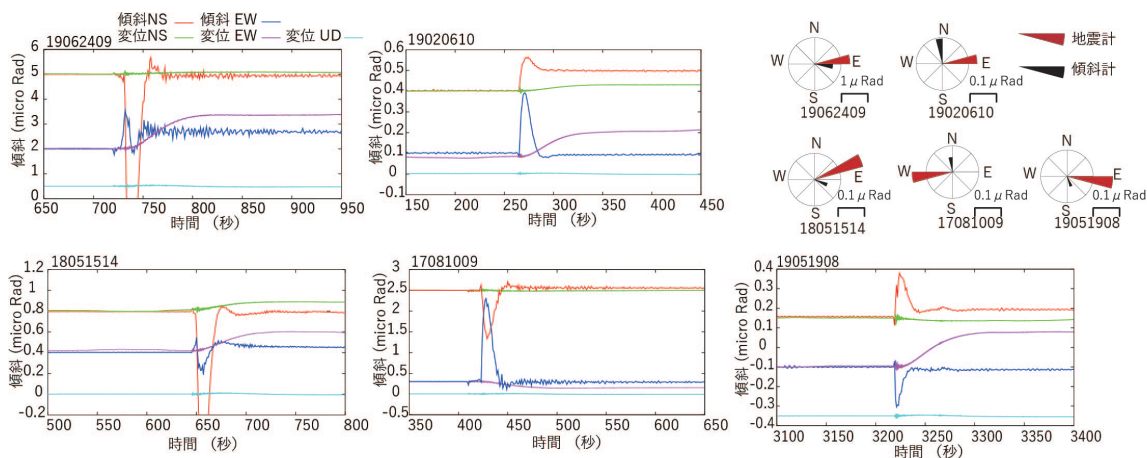


図7 駒ヶ岳観測点に設置されている広帯域地震計の変位記録と傾斜記録の比較。5つの地震について比較した。グラフの左肩の数字は地震の日付である。変位記録には傾斜との変換係数をかけて、静的変異が傾斜ステップと比較できるようにしてある。静的変位にいたるまでの間は、並進運動と傾斜の両方の応答が混ざっていることに注意。右上に、広帯域地震計と傾斜計それぞれの記録から計算した、ステップ量と傾斜方向を示す。

ら、傾斜ステップはセンサーのごく近傍もしくはセンサーそのものの傾斜を反映していると考えことに無理はない。また、強震動との相関があることについても、強い力でたたかれたときに、傾斜計を納めた耐水耐圧容器の固定にわずかなずれが生じることは考えられる。

ここまで検討してきた傾斜ステップはほぼ階段関数的な変化であった。しかし、数は少ないが地震波到達後に 1000 秒程度の継続時間を持つ傾斜変動が観測された事例もある(図 8)。特定の観測点(湖尻)でしか観測されないことから、その観測点周辺におけるひずみ変化によるものである。このような長い継続時間をもつひずみ変化の原因の候補としては、地下の流体の移動が考えられる。例えば、地震波到達時の応力変化によって多孔質媒体中の流体の拡散が誘発され、観測点周辺のひずみ変化が引き起こされたのかもしれない。(McHugh and Johnston, 1977)。

4. まとめ

本研究で見てきた地震時の傾斜ステップは、ほとんどの場合地殻変動のシグナルではない、という結論に至った。先行研究を見ても、McHugh and Johnston (1977)、McGarr *et al.* (1982) は、地震時の傾斜ステップは断層運動による地殻変動ではなく、地震波による機器とサイトの非線形な応答を見ているのではないかと述べている。また、佐藤ほか(1980)は、コサイスマックな傾斜変動については地震動に起因する耐水耐圧容器のがたつきであると述べている。佐藤ほか(1980)で使用している傾斜計の設置方法は、ほぼ温地研の傾斜計と同じである。

一方で、断層運動による地殻変動をとらえたと考えられる観測もある。例えば Fukuyama (2015) は、2007 年新潟県中越沖地震の際に断層直上の観測点で記録された傾斜記録や加速度記録から、地震時の傾斜変動を読み取り、断層モデルの検討を行っている。ただし、これは大地震の震源断層近傍で観測された傾斜記録で、本研究で扱った記録より 3 桁ほど大きい傾斜の場合である。また、岡田(1980)はたくさんの地震時の傾斜変動を詳細に調べ、多くは理論値とは一致しないが、極性のみ注目した場合には断層運動による地殻変動と矛盾しないと考えられるものも存在することを示した。ただしこの研究でも扱った地震は M6 ~ 7 クラスで、いずれの例でも本研究で扱った地震よりも規模がかなり大きい。

本研究で示した傾斜ステップは、McHugh and Johnston (1977) や佐藤ほか(1980) が述べているような、地盤の非線形応答や機器のがたつきを反映していると考えるのがもっとも理解しやすい。しかし、傾斜計に記録される地震ステップが地殻変動によるものでないとしても、ステップの現れ方に何らかの傾向を見出すことができれば、それを補正することは可能である。特に、群発地震活動の際に記録される傾斜変動には、多くの地震によるステップが含まれる。多くは、今回示したような階段関数的なステップである。これにたいして補正を行うことができれば、群発地震の中に隠れた傾斜変動を見つけ出すことができる可能性もある。今後はそのような観点で本研究の結果を応用できないか考えていきたい。

また、まれにはあるが、観測点周辺の流体移動を反映したとも解釈できる傾斜変動が記録されることがある。地震時の応力変化などで流体の拡散が起これば、さらに地震が誘発される可能性も考えられるので、このよ

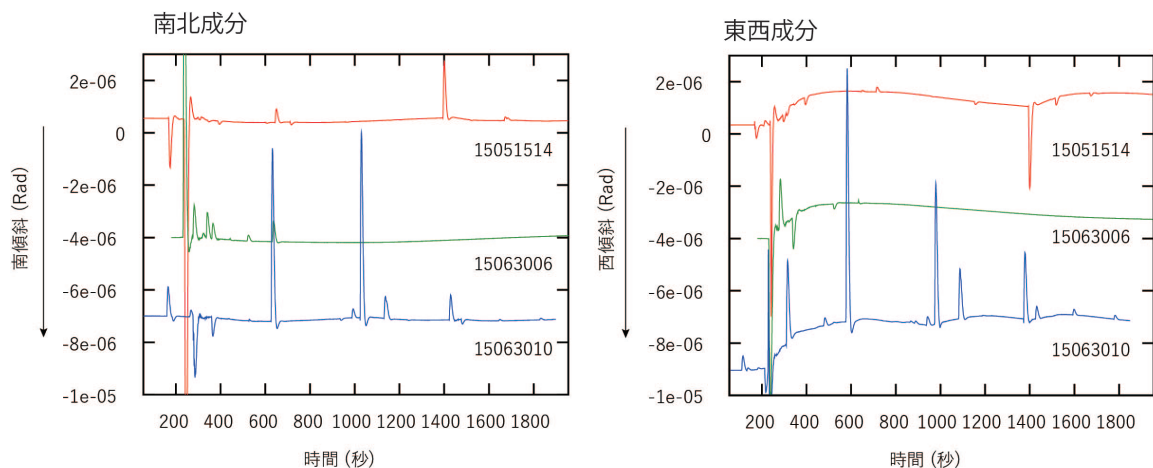


図 8 湖尻観測点で記録された、1000 秒程度の継続時間を持つ傾斜変動の例。いずれも箱根で発生した地震による。震源は図 3 参照。

うな現象についても引き続き調査をしていく必要がある。

謝辞

本研究では気象庁の二ノ平観測点および台ヶ岳南観測点の傾斜データを使用しました。本研究の一部は文部科学省「次世代火山研究・人材育成総合プロジェクト」による支援を受けて実施しました。記して感謝いたします。

参考文献

- 青山裕 (2008) CMG40T 地震計の傾斜応答に関する簡易試験, 火山, 53, 35-46.
- Bonaccorso, A., Ferrucci, F., Patane, D., Villari, L. (1996) Fast deformation processes and eruptive activity at Mount Etna (Italy), J. Geophys. Res., 101, B8, 17467-17480.
- Fukuyama, E. (2015) Dynamic faulting on a conjugate fault system detected by near-fault tilt measurements, Earth Planets and Space, DOI 10.1186/s40623-015-207-1.
- Gambino, S. (2002) Coseismic and Aseismic Tilt Variations on Mount Etna, Pure appl. Geophys., 159, 2751 – 2762.
- Gambino, S. (2016) Tilt offset associated with local seismicity : the Mt. Etna January 9, 2001 seismic swarm, Open Geosci., DOI 10.1515/geo-2016-0045.
- Gambino, S., Campisi, O., Falzone, G., Ferro, A., Guglielmino, F., Laudani, G. Saraceno, B. (2007) Tilt measurements at Vulcano Island, Annals of Geophysics, 50, 233-247.
- Honda R., Yukutake, Y., Morita, Y., Sakai, S., Itadera, K., Kokubo, K. (2018) Precursory tilt changes associated with a phreatic eruption of the Hakone volcano and the corresponding source model, Earth Planets, and Space, 70, 1, 117.
- 小向洋一郎・石井紘 (1978) 東北大学における地震・地殻変動の検知能力について, 地震, 31, 445-455.
- 小久保一哉 (2013) 火山の短周期成分を含む地殻変動モデルに対する傾斜計の応答, 験震時報, 77, 1-14.
- McHugh, S., Johnston, M. (1977) An analysis of coseismic tilt changes from an array in central California, J. Geophys. Res., v82, 5692-5698.
- McGarr, A., Sacks, I.S., Linde, A.T., Spottiswoode, S.M., Green, R.W.E. (1982) Coseismic and other short-term strain changes recorded with Sacks-Evertson strainmeters in a deep mine, South Africa, Geophys. J. R. astr. Soc. 70, 717-40.
- Nadeau, M. R., Johnson, L. (1998) Seismological Studies at Parkfield VI: Moment Release Rates and Estimation of Source Parameters for Small Repeating Earthquakes, Bull. Seis. Soc. Am., 88, 790-814.
- 岡田義光 (1975) 八丈島東方沖地震—1972 年 2 月 29 日、12 月 4 日に伴った Strain-, Tilt-Step について, 地震, 28, 387-413.
- 岡田義光 (1980) 1974 年伊豆半島沖地および 1978 年伊豆大島近海地震に伴った歪・傾斜ステップについて, 地震, 33, 525-539.
- Okada, Y. (1992) Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space, Bull. Seism. Soc. Am., 82, 1018-1040.
- 佐藤春夫・高橋博・山本英二・福尾信平・上原正義・寺沢康夫 (1980) 坑井用傾斜計による地殻傾斜観測方式の開発, 地震, 33, 343-368.
- 佐藤良輔 (1989) 日本の地震層パラメータハンドブック, 鹿島出版会, 390.
- Takemoto, S. (1995) Recent Results Obtained from Continuous Monitoring of Crustal Deformation, J. Phys. Earth, 43, 407-420.
- Townsend, B. (2014) Symmetric Triaxial Seismometers, Encyclopedia of Earthquake Engineering, DOI 10.1007/978-3-642-36197-5_194-1.
- 鶴川元雄・熊谷貞治 (1994) 富士鳴沢火山活動観測施設における傾斜変動観測, 防災科学技術研究所研究報告, 53, 35-50.
- Wyatt, K. (1988) Measurements of Coseismic Deformation in Southern California; 1972-1982, J. Geophys. Res., 93, 7923-7942.
- Wyatt, K., Agnew, D. Gladwin, M. (1994) Continuous measurements of crustal deformation for the 1992 Landers earthquake sequence, Bull. Seismol. Soc. Am., 84, 768-779.

