

伊豆半島東部における地殻の上下変動と関連する地磁気全磁力変動

笹岡雅宏¹, 大和田毅¹, 有田 真¹, 山崎 明², 田口陽介³, 小河 勉⁴

¹地磁気観測所, ²気象庁気象研究所, ³横浜地方気象台, ⁴東京大学地震研究所

2013年10月31日受領, 2014年2月28日改訂, 2014年3月3日受理

要 旨

伊豆半島東部では, 群発地震活動・異常地殻活動に関連する地磁気変化を検出するために地磁気全磁力連続観測が行われている。2010~2012年の期間について, 地磁気全磁力とGPS(汎地球測位システム)を用いて測定された測地高度の日々変動を比較することにより, 磁場変動と地殻の上下変動との関連について調査した。全磁力連続データについては外部磁場変動を除去する解析を施した上で利用した。その結果, 期間中の地殻の上下変動については季節変化が示されたが, 全磁力については, 2010年の地震活動が静穏な期間と2011年の地震活動が比較的活発な期間では季節変化が示される一方, 2012年の地震活動が静穏な期間では有意な変化は示されていないことが分かった。2009年12月のマグマ貫入に伴う群発地震に関連する熱水活動がその後2年近く継続し, 地殻の上下変動に関連して地下の熱水が変位することにより地磁気全磁力の季節変動が2010年から2011年にかけて観測されたと推論した。観測された全磁力変化については, 地殻隆起に伴って期待されるピエゾ磁気変化が有意に確認されなかったため, 岩石の応力変化よりはむしろ地下の熱変化が原因で生じた結果である可能性が高いと考えられる。伊豆半島東部における全磁力連続観測には, 群発地震活動の経過の見通しを立てる際に監視の優位性があると見込まれる。

1. はじめに

1970年代半ばから伊豆半島東部地域では, 地震の群発活動と地殻の隆起を伴う異常な地殻活動が活発化した。顕著な地殻の隆起については1990年代半ば過ぎには終息したかに見えるが, その後も比較的小規模な地震の群発活動と地殻の隆起は継続的に発生している。この地域の群発地震は, 主にマグマの貫入に伴って発生すると考えられている。マグマ貫入に伴う火山性の群発地震の場合は, 岩石の持つ磁気強さが岩石の温度や応力に応じて増減するため地磁気に変化する。また, 地殻の隆起に伴う岩石の応力についても同様に地磁気に変化する。伊豆・東海地域において, 異常な地殻活動に関連した地磁気変化を検出するためにプロトン磁力計による全磁力観測網が大学等研究機関により整備され, 地磁気全磁力の連続及び繰り返し観測並びに自然電位観測が実施されてきた(例えば, 笹井・石川, 1977, 1978, 1980, 1982, 1985; Sasai, 1986; Sasai and Ishikawa, 1980, 1991, 1997; Oshiman et al., 1997, 2001; 石川ほか, 2001; 小河, 2005; 大志万ほか, 2009; 小河

ほか, 2010)。先行研究における観測結果及びモデルによる検討により, 群発地震活動・異常地殻活動と地磁気変化との因果関係について観測及び理論的知見が蓄積されたが, 一方で地磁気変化の物理的解釈については現在もなお不明な点が多い。気象庁地磁気観測所(以下, 地磁気観測所)でも, 伊豆及び東海地域の地球電磁気的手法による地震予知のための観測として, 1980年代前半には松崎(伊豆)と御前崎(東海)において全磁力連続観測が実施され, 地磁気永年変化に地域によって大きな相違があることが指摘された(原田ほか, 1984)。しばらくおいて1990年代末からは伊東市と熱海市の境界付近の御石ヶ沢において地磁気全磁力の連続及び繰り返し観測を実施して, 地震と異常な地磁気変化の関連について調査してきた。その後2010~2012年にかけて, 御石ヶ沢から伊東市の市街地に近い玖須美元和田に連続観測点を移設し, 地殻変動と火山性地震に伴う地下の熱変化を捉えるために全磁力観測を継続した。玖須美元和田は, 2009年12月に発生した伊豆半島東方沖地震の震央に近い。玖須美元和田での観測

期間中、主なイベントとして2011年3月の東北地方太平洋沖地震に伴う地殻変動やその後7月と9月に伊豆半島東方沖で発生した小規模な群発地震がある。

本稿では、2010～2012年の期間を対象に地磁気観測所及び東京大学地震研究所（以下、地震研）の地磁気全磁力連続観測データから磁気嵐等の外部変動磁場の影響を除去するための解析を行い、得られた結果について地震及び地殻変動との関連性を考察する。期間中に利用した地磁気観測所と地震研の観測点配置を図1に示す。各全磁力観測点のうち市街地に近い湯川（YKW）、玖須美元和田（KSM）、与望島（YOB）の3地点については、気象庁の指定する伊豆東部火山群の「海上や陸上に影響を及ぼす噴火が発生する可能性のある範囲」の中に位置している（気象庁、2013）。

2. 主な地震活動

調査期間（2010～2012年）の前年2009年12月17日から伊豆半島東方沖を震源とする群発地震活動が活発化し、翌18日にはM 5の地震が発生し、2010年2

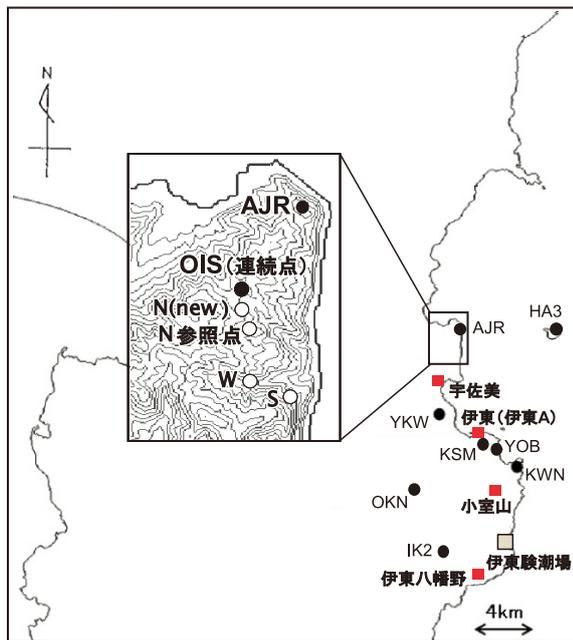


図1 伊豆半島東部における地磁気全磁力連続観測点（●）の配置図。地磁気観測所の観測点：玖須美元和田（KSM）、東京大学地震研究所の観測点：初島（HA3）、網代（AJR）、湯川（YKW）、与望島（YOB）、川奈（KWN）、奥野（OKN）、池2（IK2）。同図にGPS連続観測電子基準点〔宇佐美、伊東（伊東A）、小室山、伊東八幡野〕の位置（■）を示す。伊東と伊東Aは隣接していることに注意。また図中に、御石ヶ沢（OIS）の全磁力連続観測点及び繰り返し観測点〔N（new）、N参照点、W、S〕の配置についても示す。

月頃まで小規模な地震が続いた。この群発地震はマグマがダイク状に貫入したため発生したが、マグマ貫入先端で発生した地震は、内陸部でも震源が分布していた（気象庁、2009）。このとき陸上で全磁力の磁化構造の変化が観測されたことから、陸上での噴火の可能性が示唆された（小河ほか、2010）。2010年早々には地震活動は静穏化したが、2011年3月11日に東北地方太平洋沖地震（M 9）が発生し、小規模な地震の発生頻度が増加した。7月中旬～下旬と9月中旬～下旬にも伊豆半島東方沖を震源とした地殻変動を伴う小規模な群発地震活動が発生したが、その後地震活動は静穏化し2012年まで静穏な状態は継続した（気象庁、2010、2011、2012）。

また期間中は、火山性微動が観測されなかったこと、傾斜計やGPSによる地殻変動観測では火山活動によるとみられる変動は認められなかったことなどから、2011年の群発地震は断層のずれによるもので、マグマ貫入に伴うものではないと考えられている。地震活動が比較的活発であった2011年の震央分布図を図2に示す。図2を見ると全磁力観測点付近の内陸にも震源が多数あることが分かる。

3. 地殻の上下変動

1980年以降の定期的な実施されてきた水準測量の結果によると、伊東駿潮場付近の地殻隆起が最も大きく、それより南側は地点間の地殻変動差が緩やかに推移しているのに比べ、北側では伊東・玖須美元和田と小室山の間で地殻変動差にギャップがあることが示されている（国土地理院、2013）。また、御石ヶ沢から宇佐美にかけての地域では地殻の顕著な上下変動は殆ど見られない。地盤の上下変動の推移

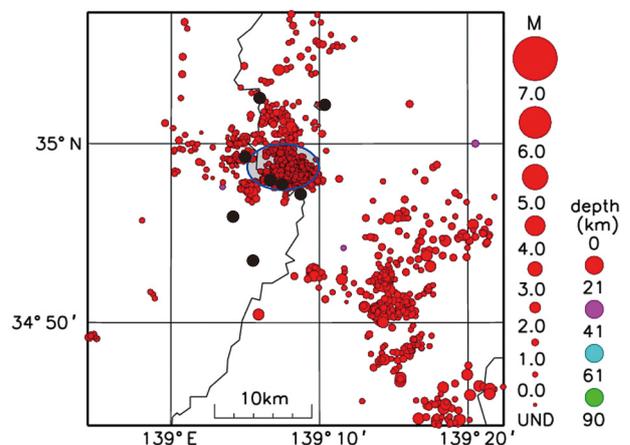


図2 2011年の震央分布図。全磁力連続観測点の位置を●で示す。青線で囲んだ領域は、2回の小規模な群発地震（7月中旬～下旬及び9月中旬～下旬）の主な発生域を示す。

から、2006年以降、御石ヶ沢・宇佐美の地域ではほぼ横ばいであり、伊東・玖須美和田よりも小室山・伊東八幡野の方が上下変動は大きい。国土地理院が実施するGPS（汎地球測位システム）の連続観測による電子基準点位置の垂直成分を用いて、水準測量よりも高分解能で地殻の上下変動と地震活動との対応について考察する。GPS地殻変動観測では、プレート運動に起因する永年変化のほか、積雪深等の気象要素に起因する季節変化が見出される（Heki, 2007）。図3は、2006～2012年の電子基準点の高さの時系列を示す。図中に主な地震イベントの発生時期を示す。宇佐美が地殻の年周変化を特に確認しやすいのは、御石ヶ沢・宇佐美の地域の地盤は地震の影響が小さいためではないかと思われる。2006年1～5月に発生した伊豆半島東部の群発地震により小室山・伊東八幡野では顕著な隆起があったが、宇佐美・伊東では見られない。これは水準測量

電子基準点の高さ(楕円体高): 2006-2012

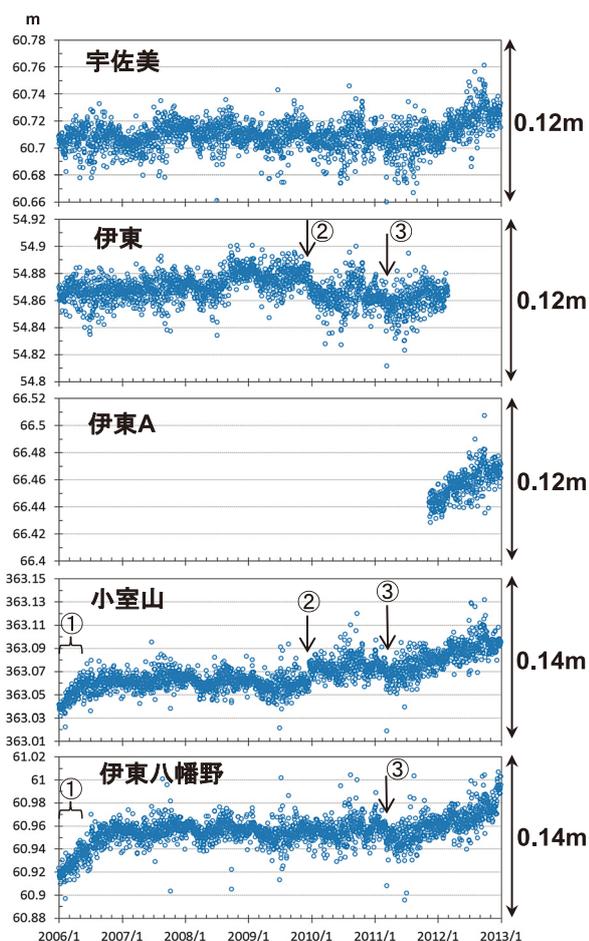


図3 GPS連続観測による電子基準点の高さ(2006.01.01-2012.12.31)。図中に示すイベント：
①伊豆半島東部の群発地震(2006年1月～5月)、
②伊豆半島東方沖地震(2009年12月18日)、
③東北地方太平洋沖地震(2011年3月11日)。

の結果と整合的である。2009年12月18日の伊豆半島東方沖地震後に伊東では沈降したが、小室山では隆起した。また、2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震後には、伊東、小室山、伊東八幡野では沈降が確認される。この地震発生以降、余効変動の影響と思われる地殻の上昇トレンドが各電子基準点で見られる。この上昇トレンドは、伊豆地方周辺域及び東海地域の東北東～東方向への地殻変位に伴うものである（防災科学技術研究所, 2013）。

次に、2010～2012年における南北の各地点間の地殻変動差(比高)を求め、見掛けの年周変化(電波の水蒸気遅延による測位誤差などの残差)とトレンド成分を差し引いた変動成分について地震活動との関連を考察する。図4左には、北側基準の南側の比高(青印)とその日々変動の偏差を評価するための10日移動平均(赤線)、並びに最小自乗フィッティングにより求めた見掛けの年周変化とトレンド成分の和(緑線)をプロットしている。図4右には、東北地方太平洋沖地震後の余効変動の影響と思われる地殻のトレンド成分等を除去し短期的上下変動のみ抽出するために、図4左に示した見掛けの年周変化とトレンド成分の和を差し引いた比高とその10日移動平均について求めた。図4右によると、伊東と伊東Aを基準とした小室山の比高の短期的上下変動については正の偏差が有意であり、水準測量の結果と同様に伊東と小室山の間に地殻変動のギャップがあることが示されている。この偏差は概ね地殻の季節変動を示すように見える。一方、図4右の伊東を基準とした小室山の比高によると、2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震発生前には沈降しており発生後に隆起したので、地震発生前後の地殻の上昇が確認される。同年に発生した群発地震の活動期間(7月中旬～下旬と9月中旬～下旬)にも比高の上下変動が見られるが、季節変動と時期が重なるため区別できない。また、2011年の10日移動平均のピークは、この群発地震の活動期間には対応していないため、地殻の季節変動の方が群発地震の影響より大きかったと思われる。

4. 伊豆半島東部における地磁気全磁力観測

玖須美和田の地磁気全磁力観測点は住宅街に隣接しており、全磁力観測は生活圏の様々なノイズに晒された。代表的な人工擾乱として市街地を走るJR伊東線の電車の運行が挙げられる。人間活動に伴う人工擾乱の全磁力観測への影響を避けて、主として夜間データが監視に利用されてきた。2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震による災害の影響から、連続観測地点付近のJR伊東線がしば

比高(2010-2012)

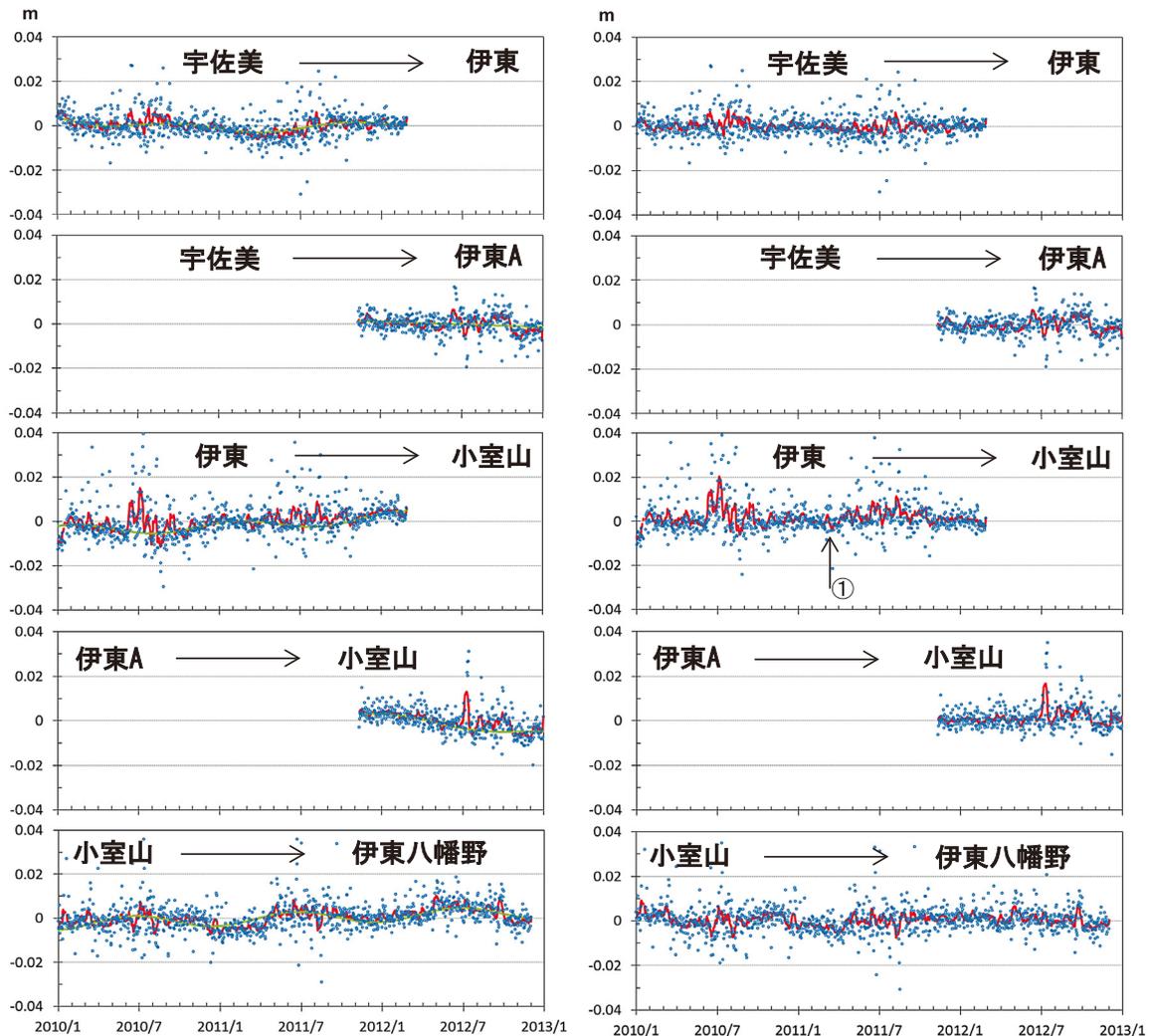


図4 GPS連続観測による電子基準点の比高(2010-2012)。(左)青点:北側観測点を基準とした南側観測点の比高,赤線:10日間移動平均,緑線:年周変化とトレンド成分との和。(右)青点:年周変化とトレンド成分を除いた比高,赤線:10日間移動平均。矢印①は東北地方太平洋沖地震の発生を示す。

らく不通になった。その後伊東線は復旧したが、復旧前後で全磁力日変化のノイズに相違が確認された。図5は、国際5静穏日から選んだJR線復旧前後の日変化の比較を示す。伊東線復旧作業中の全磁力日変化では、12時から17時までの時間帯における人工擾乱は夜中から朝の内までと同程度にまで抑えられているが、伊東線復旧後には増加している。この時間帯における人工擾乱の主な要因が電車の運行であることが示された。この観測点における電車ノイズは主として正のバイアスを示した。また、5時から12時までの時間帯及び17時以降については、電車ノイズ以外の人工擾乱の影響が残ることが分かった。玖須美元和田と柿岡との全磁力差についてもノイズの大きさには同様な傾向が見られた。笹井・石川(1985)は、夜間平均値を用いると潮汐磁場のエイリアシング効果により見掛けの潮汐変動が現れ、

日平均値を用いるとこの見掛け変動は無視できると指摘した。また、日平均が調査に適さない主な理由を電車ノイズの混入と想定していたが、実際には電車以外の生活ノイズも無視できない大きさであることが分かった。本稿では、このような生活ノイズを避けて夜間平均を2~4時の時間帯で求める。

伊豆半島東部では局所的な磁気異常による見掛けの全磁力の異常減少が指摘されてきた(小河ほか, 2005; 大志万ほか, 2009)。これを踏まえ玖須美元和田における局所的な磁気異常の有無を確認するために、2011年8月3日14:00に2mのセンサー高度でFT型磁気儀を用いて伏角測定を実施した。センサー高度での伏角測定のために1mの高さの立ち台が用意された。測定の結果から、地磁気観測所の3観測点(柿岡, 女満別, 鹿屋)と緯度の違いによると推測される相違が見られるだけで、特に伏角異

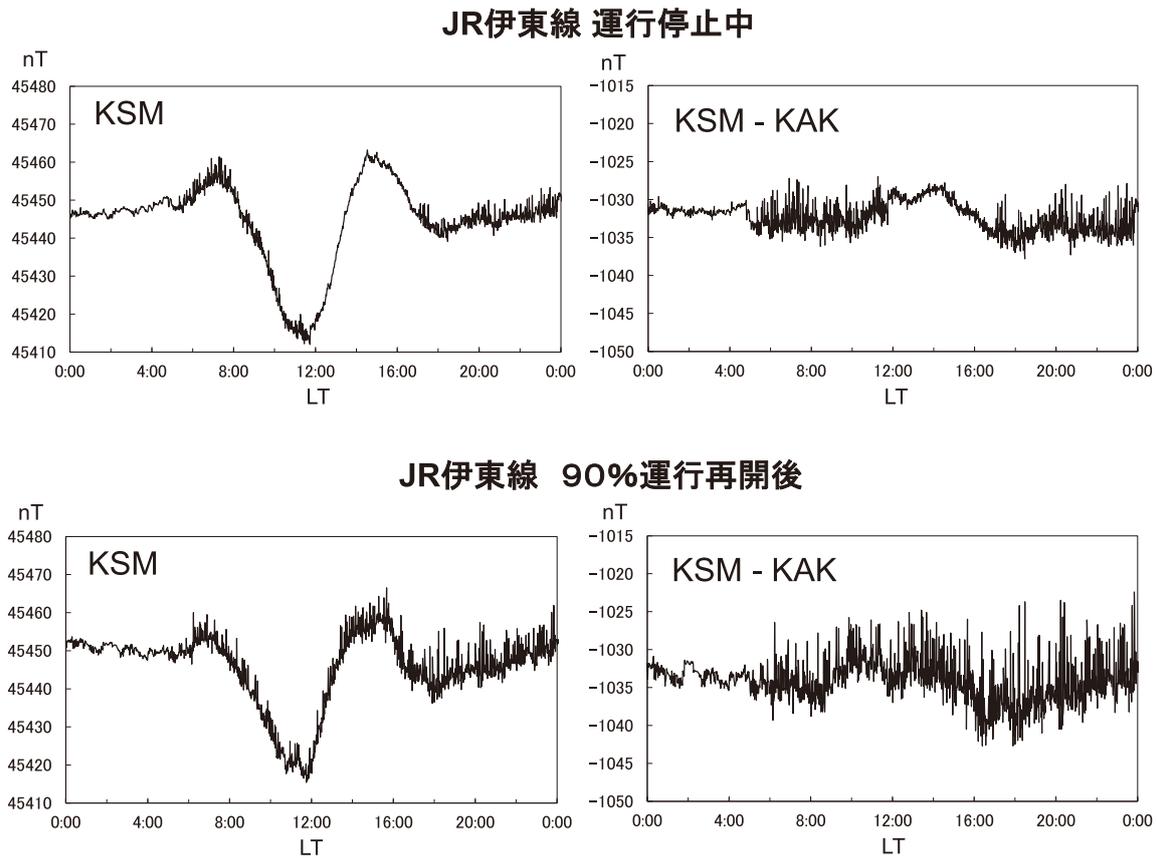


図5 玖須美元和田観測点 (KSM) へ及ぼす電車ノイズの影響. (上段左) JR 伊東線復旧作業中の玖須美元和田の全磁力日変化 (3月15日), 及び (上段右) 玖須美元和田と柿岡 (KAK) の全磁力差. (下段左) JR 伊東線復旧後の玖須美元和田の全磁力日変化 (3月27日), 及び (下段右) 玖須美元和田と柿岡の全磁力差. 3月15日及び27日はともに国際5静穏日である.

常はないことが分かった.

ところで地震研の伊東周辺に設置した全磁力観測点は図1に示すより実際にはもっと多く展開されているが, 欠測, 観測機器の老朽化による計測エラー, 観測環境の悪化に伴う人工擾乱などにより実際に利用できたデータは限られた.

5. 地磁気全磁力データの解析

地殻内の消磁・帯磁に起因する地磁気全磁力変化を検出するために, 観測点からある程度距離を置く参照点との単純全磁力差が求められる. 参照点との全磁力差の結果, 見掛けの潮汐変動を地殻変動による地磁気変化と誤認した事例がある (笹井・石川, 1985). このように, 単純全磁力差では磁気嵐や潮汐等の外部変動磁場がうまく相殺されず, 全磁力と地殻変動・地震活動との対応を調べるのが困難となる場合がある. 本稿では, 柿岡の F , H , Z 成分を用いて伊豆半島東部の観測点における磁気嵐等の外部変動磁場成分を除去する補正を行う. 柿岡は潮汐の影響をほぼ受けないので, この補正により見掛けの潮汐変動は除かれない. 見掛けの潮汐変動については, 移動平均などの簡単なフィルターを用いて小

さくする. これにより単純全磁力差では取りきれないような潮汐成分を地殻変動による地磁気変化と誤認されるような事態を避ける. 柿岡の地磁気成分を用いた外部変動磁場成分の見積もりについては, DI補正を参考にしている (例えば, 笹井・石川, 1976; 加藤, 1985).

柿岡の地磁気3成分 (F^{KAK} , H^{KAK} , Z^{KAK}) の各ベースライン (F_{BL} , H_{BL} , Z_{BL}) を用いて, 差分 ($\delta H = H^{KAK} - H_{BL}$, $\delta Z = Z^{KAK} - Z_{BL}$) を求め, 以下のように残差成分 (Δ^{KSM}) を導出することで, 玖須美元和田の全磁力 (F^{KSM}) に含まれる外部変動磁場成分 (δF^{KSM}) を除去する補正を行った.

$$\begin{aligned} \Delta^{KSM} &= F^{KSM} - F_{BL} - \delta F^{KSM}, \\ \delta F^{KSM} &= C_H \cdot \delta H + C_Z \cdot \delta Z, \quad C_H = a \cdot \cos(I_0), \\ C_Z &= b \cdot \sin(I_0), \quad I_0 = 48.38 [48^\circ 23']. \end{aligned}$$

係数 a 及び b については, Δ^{KSM} のばらつきが最小になるように月別に最小自乗法で求めた. I_0 は前節で述べた伏角測定の結果である. 玖須美元和田の両係数は2011年3月から2012年12月までの平均を採用した. 地震研の各観測点についても上記と同様に

KSMと同じ伏角を採用して係数 a 及び b を求めたが、2010~2012年の各年平均はほぼ一致したので、調査期間中は同じ係数を用いた。例として、玖須美元和田の a 及び b について以下に示す。

$$a=1.05\pm 0.024, \quad b=1.28\pm 0.15$$

外部磁場変動成分が玖須美元和田では柿岡と比較してH成分で5%, Z成分で28%大きい。係数 b の分散のほうが大きいのはZ成分がH成分よりも全磁力への寄与が小さいためと考えられる。加藤(1985)は、地磁気3成分を用いて伏角や偏角の違いを補正するDI補正について、Y成分が全磁力への寄与が最も小さいためY成分の係数の分散がやはり大きいことを示した。地震研の各観測点の係数 a 及び b は玖須美元和田に比べ共に $\pm 4\%$ (伏角換算では $\pm 2^\circ$ 相当)以内の違いがあったが、この違いは計算誤差の範囲内であり各観測点に伏角異常があるかどうかについては特定できないと思われる。

補正に用いる各成分のベースラインの算出にあたり以下のように検討した。ベースラインの推定に2通りの方法を試みた。まず、過去5年間の国際5静穏日の年平均を基にパラボラフィッティングして算出するというDst指数算出時に用いられるH成分のベースライン算出方法(Sugiura and Hendricks, 1967)を用いて補正を行った。図6中の上と中に、玖須美元和田について柿岡基準の単純全磁力差、上記ベースラインを用いた補正結果(残差成分)についてそれぞれ示す。両者は、2011年はほぼ同じトレンドで推移したが、2012年春頃から補正結果については単純全磁力差より減少トレンドが -1 nT強増

加したため、補正により減少傾向が強まった。次に、2012年春頃以降の補正結果と全磁力差との減少トレンドの差について検証した。柿岡の地磁気H成分について夜間偏差の月別標準偏差(σ)が外部磁場擾乱成分に相関することについては報告されている(笹岡・山崎, 2012)。また、擾乱の大きさを示す指数であるDst指数を用いて、地磁気データから外部磁場擾乱の影響を除去することについても報告されている(例えば、加藤, 1985; Stening et al., 2007)。この σ とDst指数を併用して静穏の磁場の大きさ(以下、静穏レベル)を推定した。静穏レベルは、過去5年間のデータに対して、Dst指数と σ により擾乱成分を軽減したのち多項式近似曲線でフィッティングして求められた。図7は、柿岡F成分については、推定した静穏レベルは2012年春頃からベースラインより増加する傾向を示し、H成分についても推定した静穏レベルは緩やかな増加トレンドとなることを示す。一方、Z成分については余り目立った違いは見られない。その上F及びH成分については、2012年の国際5静穏日の月別平均のトレンドはベースラインより推定した静穏レベルに近い。また、 σ をDst指数と併用する効果は、2011年には確認されるが2012年はDst指数のみの効果と殆ど変わらないことから限定的であった。この静穏レベルを用いた補正結果を図6中の下に示す。単純全磁力差に見られる顕著な外部変動磁場成分が除去されたので、静穏レベルを用いた補正結果には見掛けの減少トレンドが目立たなくなったと思われる。2012年春以降については国際5静穏日に基づくベースラインの採用は適当ではなかったため、見掛けの全磁力の減少が生じたのではないかと推測する。Dst指

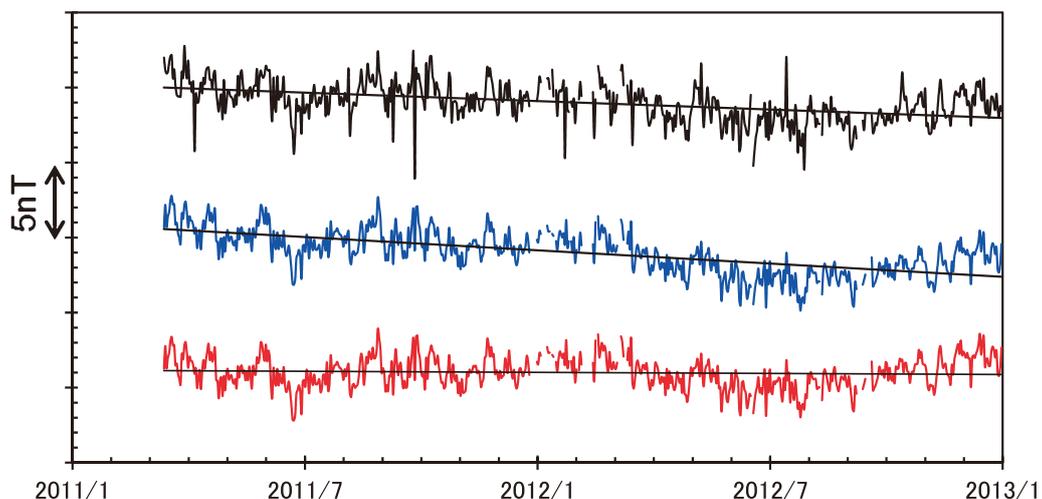


図6 玖須美元和田観測点(KSM)の外部変動磁場の補正結果の比較例(2011.3.14-2012.12.31)。上から順に、柿岡基準の単純全磁力差、国際5静穏日に基づくベースラインを用いた外部変動磁場の補正結果、Dst指数と夜間偏差の月別標準偏差(σ)に基づいて推定された静穏レベルを用いた外部変動磁場の補正結果。それぞれに期間中のトレンド(直線)を付加。

数のベースライン算出方法は数年にわたり単調に地磁気が増減する場合には適当であるが1年の期間中に増減する場合には、補正結果に見掛け変化が含まれるかもしれないので検証の必要があると思われる。本補正に用いる各成分のベースラインは、上記の静穏レベルを採用した。

次に、この補正結果から年周変化とトレンドを差し引いて地磁気全磁力の変動成分を導出する。図8は、地磁気観測所及び地震研の観測点について、柿岡基準の単純全磁力差（黒線）、Dst 指数及び夜間偏差の月別標準偏差 (σ) に基づいて推定された静穏レベルを用いた補正の結果（赤線）、年周変化（緑

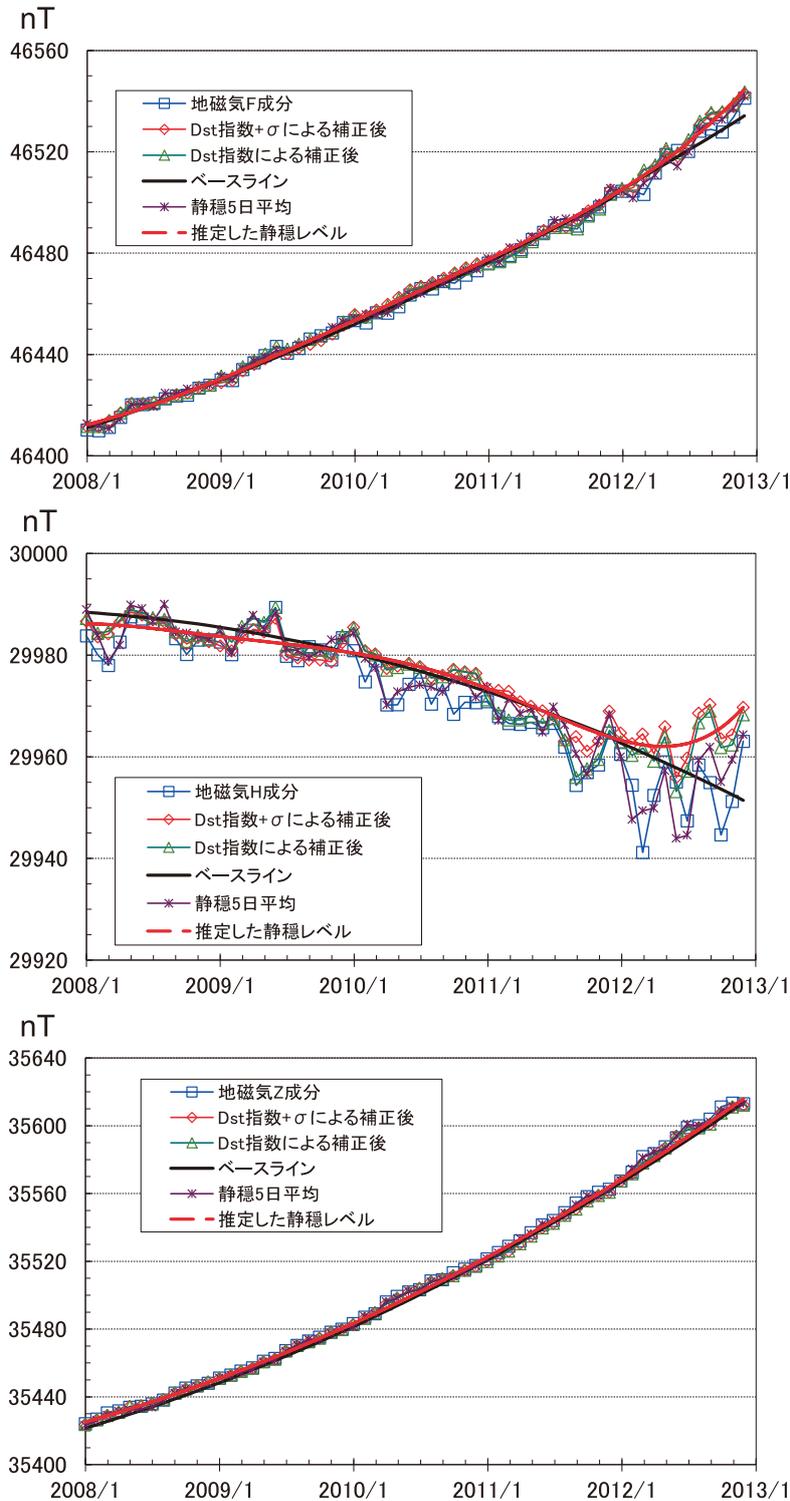


図7 柿岡の各地磁気成分の静穏レベルと国際5日静穏日に基づくベースライン等との比較（2008.01-2012.12）。上から、F、H、そしてZ成分を示す。

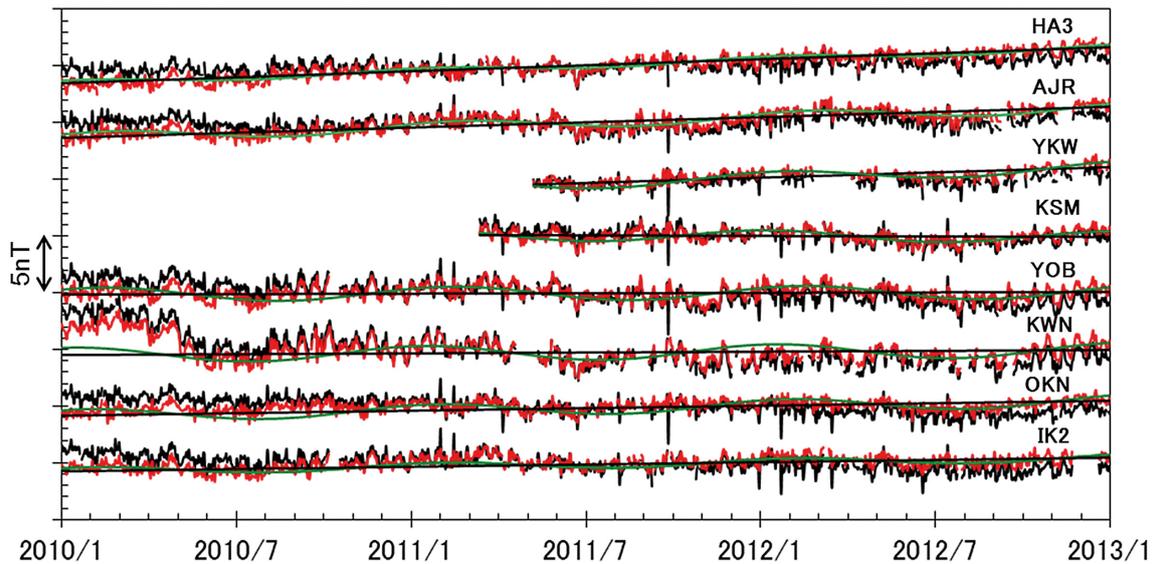


図8 地磁気観測所観測点 (KSM) と地震研観測点 (HA3, AJR, YKW, YOB, KWN, OKN, IK2) の解析結果比較 (2010.01.01-2012.12.31). 柿岡基準の単純全磁力差 (黒線), Dst 指数及び夜間偏差の月別標準偏差 (σ) に基づいて推定された静穏レベルを用いた補正結果 (赤線), 年周変化 (緑線). それぞれにトレンド (黒直線) を付加. KWN については 2010年5月4日に人工擾乱によるギャップあり.

線), 並びにそれぞれのトレンド (黒直線) を示す. 年周変化は, 期間中年周変化の位相が比較的是っきり認められる AJR を除いて, 2012年3月~12月までの補正結果から周期関数を最小自乗フィッティングにより求めた. 図9は, 図8中の年周変化とトレンドを差し引いた各観測点の全磁力変動のプロットを示す. 青線は見掛けの潮汐周期を無視するための15日間移動平均を示す. また, 図8及び図9において KWN は2010年5月4日に人工擾乱による -2 nT 程度のギャップが生じている.

6. 地磁気全磁力変動の特徴

図8の各観測点のトレンド (黒直線) を見ると, 2010~2012年で KSM 以南ではほぼ横ばいであるのに対し, YKW 以北では $+2 \sim +3$ nT の増加傾向であった. 図9を見ると, 各観測点では欠測が多いため必ずしも変化が明瞭ではない期間もあるが, 15日程度の周期を持つ見掛けの潮汐変動が認められ, 15日間移動平均からは以下の特徴を挙げられる. ひとつは, ほぼ同相的な変化が各観測点で散見され, 特に KSM, YOB, KWN 及び OKN では目立った全磁力変動が見られる. もうひとつは, 2011年10月中旬~11月中旬にかけて KSM, YOB 及び KWN では全磁力の顕著な減少とその後の回復が見られる.

6.1 全磁力の長期トレンドと地磁気永年変化

笹井・石川 (1985) は, 観測された地磁気全磁力変動とモデルによるピエゾ磁気効果の見積りに齟齬があるため, 伊豆半島東部地域に見られる継続的な

異常地殻隆起に伴うピエゾ磁気効果は, 地磁気全磁力の緩やかな増減 (長期トレンド) として観測されるのではないかと提案した. 一方, 原田ほか (1984) が指摘したようにこの地域は地磁気永年変化が観測点によりかなり異なる可能性があるため, 全磁力の長期トレンドと永年変化を区別するのが困難になることが懸念された (笹井・石川, 1985). 全磁力の長期トレンドを考察した先行研究として, 伊豆半島東部地域における群発地震活動と全磁力変化に関連が見られなかったという結論 (Sasai and Ishikawa, 1991) に対し, 震央分布図で見ると御石ヶ沢に震央が近いことから御石ヶ沢で観測された全磁力の異常減少のトレンドが地下の熱消磁を反映している可能性があり群発地震活動と関連するという見解 (Oshiman et al., 2001) があった. Oshiman et al. (2001) が示した見解と同様な解釈は本稿の解析結果からも得られる. 図8において, KSM 以南では全磁力の減少傾向はないが YKW 以北の全磁力の増加傾向が, 1989年に噴火した手石海丘が位置する伊東市沖に集中する震央分布 (図2) をもたらす火山性地震に伴う熱消磁に関する北側の帯磁を示す, という解釈は真らしく思われる. しかし, 期間中火山性地震は無かったと判断されているので, この解釈は否定される. 御石ヶ沢において地下の応力変化及び熱活動が監視できる期待があったため, 地磁気観測所も1999年以降全磁力連続及び繰り返し観測を実施した. 各研究機関が御石ヶ沢で展開した各観測点間の距離は高々数100mである.

地磁気観測所が御石ヶ沢 (OIS) において実施し

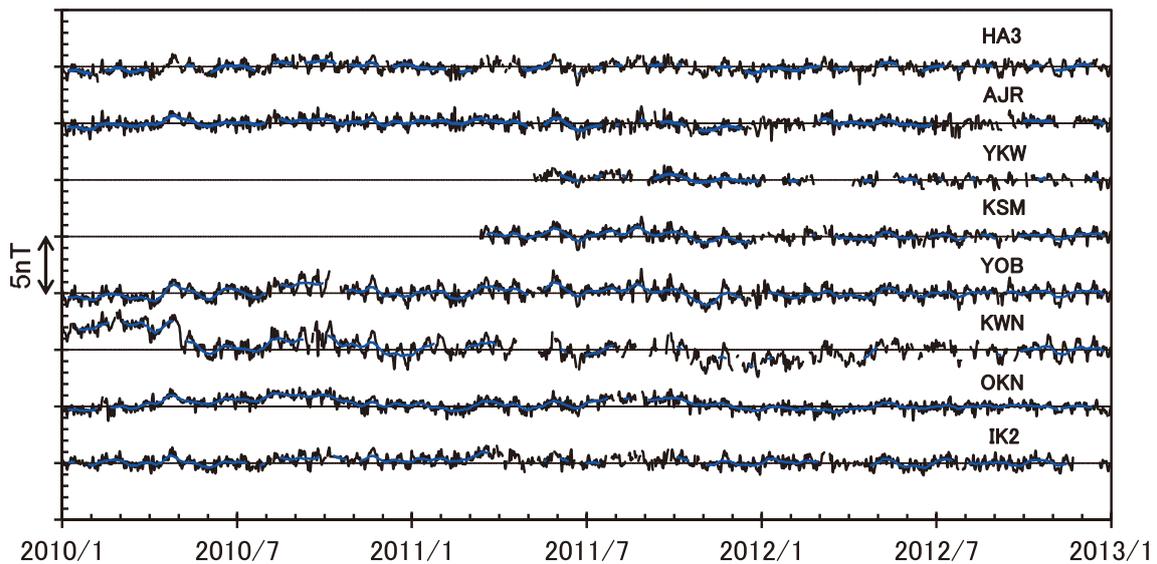


図9 地磁気観測所観測点 (KSM) と地震研観測点 (HA3, AJR, YKW, YOB, KWN, OKN, IK2) の地磁気全磁力の日々変動比較 (2010. 01. 01-2012. 12. 31). 各観測点について、図8中の補正結果から年周変化とトレンドを差し引いてプロット (黒線). 青線は潮汐周期を無視するための15日間移動平均を示す. KWN については2010年5月4日に人工擾乱によるギャップあり.

た全磁力連続観測及び繰り返し観測について、柿岡基準の全磁力差として図10に示す。連続観測値については旬平均をプロットしている。連続観測点では、2006年4月下旬以降、人工擾乱（連続観測点の西側に置かれたコンクリートブロック作成用鉄製型枠）のために約 -2.7nT の不連続が発生したと推察される（但し、算出量が妥当かどうか判断できないため補正は行わない）。御石ヶ沢連続観測点の全磁力については観測開始以来減少傾向を示したが、2005年以降ほぼ横ばい傾向に変わった（図10上）。この結果は、2005年以降全磁力変動の傾向が増加に変わった柿岡と異なる。第4節で述べた伏角測定と同様にして、地磁気観測所の御石ヶ沢連続観測点においても2009年にセンサー高度での伏角測定を実施した。伏角測定の結果は $49^{\circ}17'$ であり、大志万ほか（2009）が調査した観測点の伏角と比べても同程度となり伏角の異常が無いことを確認した。繰り返し観測結果については、N参照点及びN（new）点は連続点と同様に2005年以降ほぼ横ばいに推移したが、連続点から南に離れたW点とS点については全磁力の減少傾向が継続的に見られる（図10下）。2009年には繰り返し点のうちW点についてのみ高さ 1.2m における伏角を測定した。伏角測定の結果は $43^{\circ}57'$ であり、連続点より伏角が浅いために全磁力変動の傾向が異なった可能性がある。また、これら御石ヶ沢における全磁力変動は、上述したYKW以北で見られる全磁力の増加傾向とは、同じ地域のトレンドとして見れば整合性がないように思われる。このように御石ヶ沢の地域においては、観測点

を比較すると同様な全磁力の永年変化を示す場所もあれば、高々数 100m 離れただけで異なる永年変化を示す場所もあることから、ローカルな磁場環境の違いが存在することが示唆される。一方、御石ヶ沢で観測された全磁力の異常減少は、観測点が強磁気異常帯に隣接しているため、伏角や偏角の違い（DI異常）により生じる見掛けの変化である可能性が指摘された（小河ほか、2005）。大志万ほか（2009）は、御石ヶ沢に設置した異常な全磁力減少を示す連続観測点で伏角測定を行い他の地域の観測点と比べて 3° 程度浅いことを示した。そして国土地理院の鹿野山観測所のH及びZ成分を用いてDI補正を施した結果、全磁力の減少トレンドが残ったことから、やはり何らかの地殻変動の影響を受けている可能性が指摘された。しかし、第2節で述べたように御石ヶ沢から宇佐美にかけての地域では顕著な地殻変動は殆ど見られない。水準測量において地殻の隆起が比較的確認された1993～1994年の期間についても、大志万ほか（2009）が示した全磁力変動には、特徴的な変化は見られなかった。

以上のことから、御石ヶ沢から宇佐美にかけての地域では全磁力変化がローカルに食い違う特徴が見られる。このような磁場環境の違いが生じている原因については不明である。御石ヶ沢付近では、永年変化にローカルな違いが見られる可能性が高いことから、長期に亘って地下の応力変化や熱活動を評価するには不向きかもしれない。少なくとも全磁力の長期トレンドについては地震活動に伴う地殻変動が影響する可能性は殆ど無いのではないと思われる。

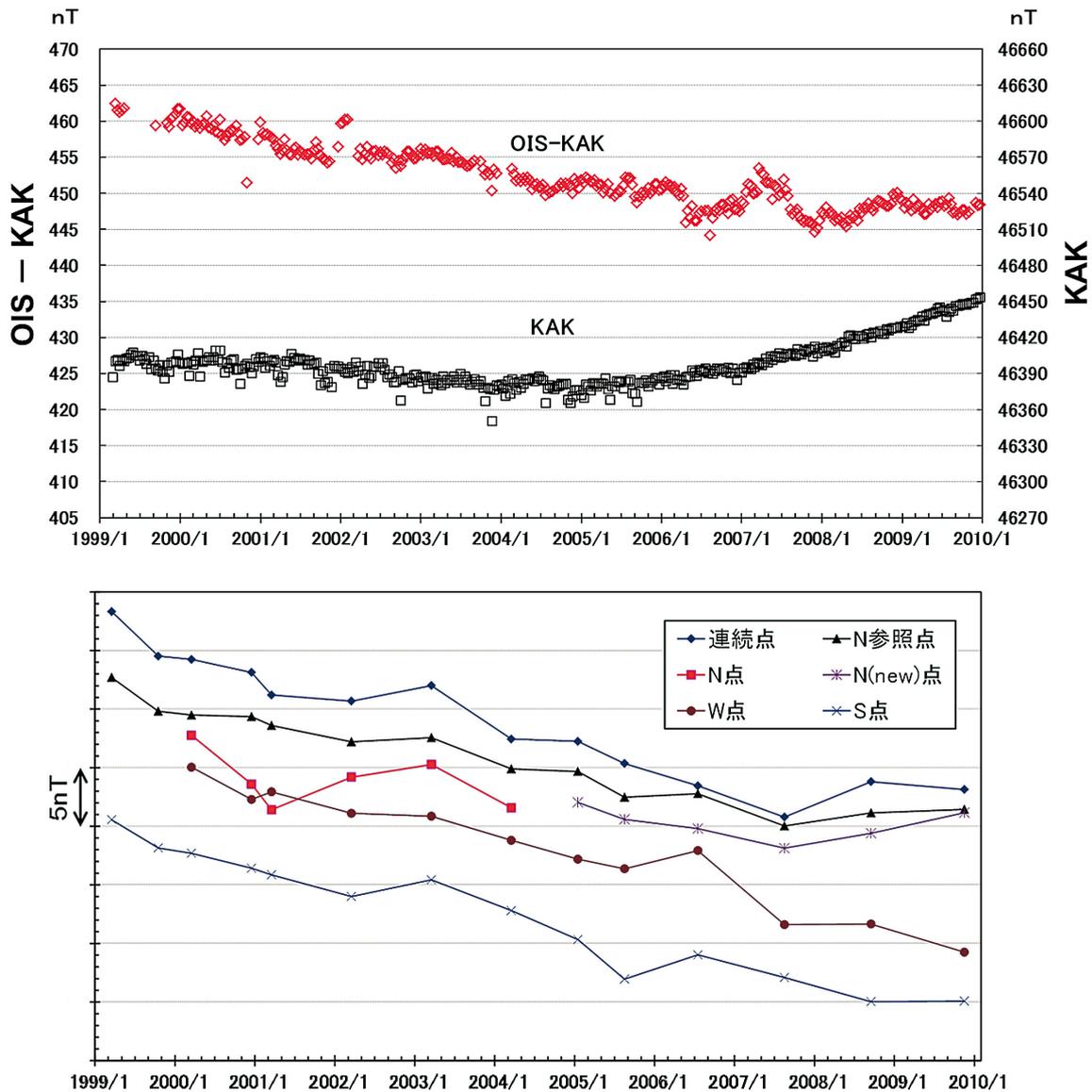


図10 地磁気観測所が御石ヶ沢 (OIS) において実施した全磁力連続観測及び繰り返し観測 (1999. 01. 01-2009. 12. 31). (上) 全磁力連続観測結果の旬平均比較: 柿岡基準の御石ヶ沢 (赤線) と柿岡 (黒線). (下) 柿岡を基準とした全磁力繰り返し観測結果の比較. 旧観測点 N については N (new) の近傍に位置していた.

ので、トレンド成分を除いた解析結果の図9に基づいて地殻変動との関連性について考察する。

6.2 年周変化

地中温度の季節変化によって帯磁が変化し、全磁力の年周変化として観測されることが指摘されている (Utada et al., 2000). 第5節で年周変化を除去しているが、この年周変化の主な原因はこの地中温度の季節変化と考えられる。石川ほか (2001) は、伊豆半島東部地域におけるほぼ全ての観測点で全磁力の年周変化のピークが冬季に観測されることを指摘した。Utada et al. (2000) によると、全ての観測点で年周変化のピークが冬季に観測されるには、全ての観測点のセンサーがローカルな空間磁気異常のプラスの異常領域に位置している必要がある。全て

のセンサーが同様な異常領域に設置されたとは考えにくいので、おそらく全磁力差を求めるために基準とした参照点のセンサーが強いマイナスの異常領域に位置していたのではないかと考えられた (石川ほか, 2001). 図8における各観測点の年周変化のピークはやはり冬季 (1~3月) に見られ、上記の先行研究と同様な結果が得られた。本稿では柿岡を基準にしたので、各観測点にマイナスの磁気異常の影響が及ぶことは考えにくい。各観測点のセンサーはローカルな空間磁気異常のプラスの異常領域に位置している可能性があることになる。第6.1節中の全磁力の異常減少の原因にも関係するので、センサー周辺の全磁力分布を詳細に調査する必要がある。しかし、第6.1節で述べた永年変化のローカルな相違が観測開始当時には認識されていなかった

たこと、また観測点が広い平坦な場所に設置されなかったことも一因となっており全磁力分布については殆ど調査されていない。このためセンサー位置の空間磁気異常に関する検証はなされていない。

7. 地殻の上下変動と全磁力変動との関連

笹井・石川(1977)は、膨張源を仮定する茂木モデルを拡張して、隆起に伴うピエゾ磁気効果により定性的には隆起の北側では全磁力は減少し南側では増加すると予想した。観測事実は、隆起の北側では全磁力は増加するなど、期待される見積もりとは整合しなかった。そこで、マグマのダイク状貫入により表層地殻に微小割れ目が多数発生するモデル(Sasai, 1986)を用いて観測で検出可能な変化が得られるなど検討がなされたものの、ピエゾ磁気効果に基づいた考察では観測事実を十分説明するには至らなかった(笹井・石川, 1985)。また、地震に伴う応力解放により地殻の帯磁が変化する地震地磁気効果を用いても変化の見積もりが観測値より小さいなど、観測事実とは整合しなかった(笹井・石川, 1978, 1980)。ここで、図4右の伊東基準の小室山の比高の季節変動に伴うピエゾ磁気効果が全磁力観測に影響すると仮定すると、隆起の北側では全磁力は減少するので、IK2を除く観測点では減少するはずである。しかし各観測点では全磁力の増加が見られるので観測事実と合わない。また、東北地方太平洋沖地震発生後の余効変動の影響がGPS地殻変動観測には上昇トレンドとして表れているが、これに対応した全磁力変化は確認されない。

図4右の伊東基準の小室山の比高と図9の全磁力の日々変動とを比較すると、以下の類似点が見出せる。両者は、2010~2011年にかけては、特に夏季(5~9月)において正の偏差を示す。小室山の比高の日々変動と、小室山北側のYOB, KWN及びOKNにおける全磁力変動は、共に地震活動が比較的活発であった2011年よりも静穏であった2010年の方が顕著である。また、第3節で述べたように2011年7月と9月に発生した群発地震に伴う地殻変動がその季節変動ほど目立たなかったのと同様に、全磁力変動についても群発地震前後で目立った変化は見られない。そのほか、地殻変動が殆ど見られない御石ヶ沢・宇佐美の地域と同程度の緯度に位置する観測点(HA3, AJR, YKW)の全磁力変動は小さく、図4右の小室山基準の伊東八幡野の比高と小室山以南に位置するIK2の全磁力変動も共に小さい。このため期間中の地震活動に伴う地殻変動に対して、HA3, AJR, YKW, 及びIK2の全磁力変動を関連付けて言及するのは困難であろうと思われる。地殻変動

に伴い有意な全磁力の変化を示す観測点は、KSM, YOB, KWN 及び OKN ではないかと想定される。伊豆半島東部地域の広範囲に亘る全磁力増加については、これまでも度々報告されてきた(例えば、笹井・石川, 1978; Sasai, 1980; 小河ほか, 2009)。この全磁力増加の原因として、観測点の地球磁場方向への地殻伸縮に係る岩石の可逆的ピエゾ磁気変化の可能性について議論された(笹井・石川, 1978; Sasai, 1980)。即ち、南北方向の地殻圧縮力の増加が全磁力増加をもたらす。もし南北方向の地殻圧縮力が季節変化として夏季に全磁力を増加させるのなら、2012年にだけ全磁力が殆ど増加しないのは不合理である。一方、小河ほか(2009)は自然電位観測により2009年12月末に発生した伊豆半島東方沖の群発地震発生前から、IK2以北での自然電位の系統的な増加傾向を示した。この地電位差の増加(正電荷の輸送)は地下の熱水上昇を示唆するので、熱による岩石帯磁の変化が広域的な全磁力増加の原因である可能性がある。逆に、小室山の比高と全磁力の日々変動には、以下の相違点も見出せる。2011年10月中旬からKSM, YOB, 及びKWNでは全磁力の減少とその後の回復が見られるが、小室山の比高にはこれに対応した目立つ増減が見られない。OKNには、上記3観測点ほどの全磁力減少が見られない。また、図4右の伊東A基準の小室山の比高では2012年には地殻の季節変動が見られるが、図9においては有意な全磁力変動はほぼ見られない。

以上を踏まえて、伊豆半島東部地域において観測された全磁力変動の定性的な理解が可能な物理的解釈について以下のように推論する。まず、2009年12月末に発生した伊豆半島東方沖の群発地震に伴う地下の熱水活動が、地震活動の静穏化にもかかわらず2011年10月頃まで継続したと思われる。第3節で述べたようにこの地震発生後に小室山の北側では地盤が沈降し南側では隆起したため、熱水活動の中心は小室山以南に移行した。小河ほか(2009)によると、地震発生後にYOB付近で帯磁のダイポール構造を示す全磁力変化が見られたことから、小室山より北側での熱活動は地盤沈下と共に終息したと思われる。この熱水活動は、熱水の上昇に伴い地殻を隆起させるほどの勢いはなく、逆に地殻が季節変化により膨張するタイミングで上昇することにより熱消磁を引き起こし、小室山北側の観測点(KSM, YOB, KWN 及び OKN)で全磁力の増加をもたらした。熱水上昇に伴い地殻の隆起も増したが、2010年から2011年にかけて熱水活動は徐々に衰弱したため、地殻の季節変動と全磁力変動とは共に2010年より2011年の方が小さくなった。2011年7月と9月の

群発地震に伴う地殻変動は、地殻の季節変動より小規模であったため、全磁力には群発地震に対応した目立つ変化はなかった。さらに、2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震の前後で地殻の上昇に熱水上昇が伴ったことで小室山北側の観測点(YOB, KWN 及び OKN)の全磁力が増加傾向を示した。2011年10月以降には熱水活動は終息に向かい帯磁の構造へと移行したため、小室山北側の観測点(KSM, YOB, 及び KWN)においては全磁力の減少が見られた。但し、内陸では海岸に近い地域とは別の熱源があり、急な熱変化が生じなかったため OKN では目立った全磁力減少が見られなかったと思われる。そして、2012年には地下の熱活動を伴わないため地殻が季節変動する時期に全磁力変動は見られなくなった。地下の熱活動は、2010~2011年の期間で強化されることなく衰弱し、2011年10月以降の熱供給の途絶に伴う温度降下による帯磁をもって終結した。

8. 考察と結論

第1節で述べたように伊豆半島東部の群発性の地震活動は主にマグマのダイク貫入に伴って発生すると考えられている。しかし2011年の全磁力観測に関しては、3月の東北地方太平洋沖地震の発生と、その後の余効変動の影響並びに7月と9月の群発地震活動などはマグマ貫入が原因ではなかったため、観測された全磁力変動は断層のずれによるピエゾ磁気効果が原因である可能性が疑われた。地震発生頻度の高い領域に近い観測点では全磁力は増加し、特に震央に近い観測点では2011年9月の群発地震の終息後に全磁力の減少が認められた。このような特徴的な全磁力変化が2012年には見られなくなり年周変化が目立ち始めたことと、2012年に地震活動が静穏化していることとは調和的であった。また、2011年9月の群発地震の終息後の KSM, YOB, 及び KWN の全磁力の減少はほぼ同位相の変化であり、2009年の群発地震終息時のような帯磁のダイポール構造(小河ほか, 2010)は観測されなかったことも地下の熱活動の影響を否定する理由となった。

ところが、地震活動が静穏な期間における全磁力変動の議論を補完するために2010年の地震研のデータを解析した結果、地震活動が2012年と同様に静穏化しているにもかかわらず、観測点によっては地震活動が比較的活発化していた2011年よりも大きな全磁力変動が確認された。先行研究では、火山性地震の発生後に季節変化による地殻の上下変動に伴い増減する全磁力変動に関する報告はなかった。本稿では、観測点の近くに単純全磁力差を求めるための参

照点を取らずに柿岡を基準に解析したので、潮汐変化と同様に相殺されずに目立つのではないかと思われる。そこで、GPSによる地殻変動観測も考慮して地磁気全磁力変動の原因について検討し直した。そして、2009年12月のマグマ貫入に伴う群発地震により活発化した熱水活動が、地震の群発活動の終息後は、次第に衰弱しながらも継続したため、2011年10月頃まで全磁力変動と地殻の上下変動に関連性が認められたと推論した(第7節)。結局、観測された全磁力変化は地震(断層のずれ)と直接には関係なく、岩石の応力変化よりはむしろ地下の熱水活動が原因で生じた結果であると推論される。

先行研究においては、伊豆半島東部地域での全磁力変化に対する物理的解釈のために様々な議論が行われてきたが、電車ノイズや潮汐等による全磁力の見掛け変動の理解が進んでから再検討されることも多かった(笹井・石川, 1980, 1985)。第3節で述べたように1980年以降の水準測量では伊東駿潮場付近の地殻変動が最も大きく、そこから南北方向へ離れるほど地殻変動は小さくなる。この地殻の上下変動の地域差は、震央分布には依存しないと思われる。つまり伊豆半島東部地域において何処に地震が発生しても、伊東駿潮場付近が地殻の上下変動が最も大きいという地域差は変わらない。地震発生前に地殻変動の大きな地域において地下の熱水活動が活発化すると仮定すると、地震の発生場所が何処であっても伊東市では広い範囲で全磁力が増加するので、第7節で述べた広域での全磁力増加について説明することができる。今のところこのような熱水活動の存在を示す観測事例はないが、伊豆半島東部は主に火山性地震が発生する地域なので地下の熱変化の影響を考慮するべきと考える。第7節で述べた先行研究における観測事実がピエゾ磁気効果で十分に説明できなかった理由の一つとして、地殻隆起に伴う熱水上昇による地下の熱変化を考慮しなかったことがあるのではないかとと思われる。また、伊豆半島南東部において数ヶ月かけて徐々に減少し地震発生後に急増するような全磁力変化をピエゾ磁気効果で説明した事例(Sasai and Ishikawa, 1980, 1997)についても、過去に噴火した火口が分布している地域(気象庁, 2013)に全磁力連続観測点が位置していることから地下の熱水活動が関与した可能性があるのではないかと考える。

本稿では、データ解析により全磁力の見掛け変動を排除した上で、地殻変動の影響が有意に反映される可能性のある観測点として、小室山北側の KSM, YOB, KWN 及び OKN に注目した。伊豆半島東部の火山性地震は、2006年1~5月の群発地震活動(東

京大学地震研究所, 2006) においても見られたように, マグマ貫入に伴うひずみ等が原因となって別のマグマ貫入が発生し, 地震の群発活動を誘発することがあるため, 群発活動の経過の見通しを立てるための観測は監視の上で重要である. 2009年12月の伊豆半島東方沖の群発地震活動は翌2010年早々には終息する気配が見られたが, 地殻変動及び地下の熱水活動の上昇下降に起因すると思われる磁場変動が2011年10月頃まで継続したことが, 本稿の地磁気全磁力連続観測網により捉えられたと考えられる. 小室山より北側の観測点における全磁力連続観測は, 地下の熱活動の経過を評価するのに有効であると考えられ, 伊豆半島東部地域における火山性地震や必ずしも地震活動を伴わない水蒸気爆発などの表面現象を監視する手段として優位性があると見込まれる.

謝辞

国土地理院の白井宏樹氏には, 玖須美元和田での地磁気全磁力連続観測点の設置場所を探す際に, 有益な情報提供及びご助言等様々にご協力いただいた. また, 国土地理院がwebサービスで提供している電子基準点の位置データを利用させていただいた.

参考文献

防災科学技術研究所, 伊豆地方・駿河湾西岸域の国土地理院と防災科研のGNSS観測網による地殻変動観測(2011年3月~2012年12月), 地震予知連絡会会報, 89, 155-159, 2013.

原田 朗, 中島只一, 大地 洸, 桑島正幸, 藤田 茂, 角村 悟, 徳本哲男, 福井史雄, 山本哲也, 伊豆・東海地域の地磁気変化(1980年5月~1983年12月), Conductivity Anomaly研究会論文集, 121-128, 1984.

Heki, K., Secular, transient and seasonal crustal movements in Japan from a dense GPS array: implication for plate dynamics in convergent boundaries, in *The Seismogenic Zone of Subduction Thrust Faults* edited by T. Dixon and C. Moore, 512-539, Columbia University Press, 2007.

石川良宣, 上嶋 誠, 小山 茂, 伊豆半島東部地域における全磁力観測, 東大地震研技術研究報告, 7, 58-63, 2001.

加藤詮司, 阿蘇火山の地磁気観測(1), 地磁気観測所要報, 21, 1, 31-46, 1985.

気象庁, 伊豆東部火山群の火山活動解説資料(平成21年12月), 2009.

気象庁, 伊豆東部火山群の火山活動解説資料(平成22年12月), 2010.

気象庁, 伊豆東部火山群の火山活動解説資料(平成23年12月), 2011.

気象庁, 伊豆東部火山群の火山活動解説資料(平成24年

12月), 2012.

気象庁, 伊豆東部火山群, 日本活火山総覧(第4版), 2, 883-908, 2013.

国土地理院, 伊豆地方の地殻変動, 地震予知連絡会会報, 90, 197-221, 2013.

小河 勉, 地磁気永年変化とローカルな地磁気がつくる全磁力差のローカルな時間変化について, 第118回地球電磁気・地球惑星圏学会予稿集, A31-P004, 2005.

小河 勉, 小山 茂, 上嶋 誠, 大志万直人, 長尾年恭, 伊豆群発地震活動に伴う自然電位・全磁力変化: 2006, 2009年, 日本地球惑星科学連合2010年大会予稿集, SEM031-P09, 2010.

Oshiman, N., Y. Sasai, Y. Honkura, Y. Ishikawa and Y. Tanaka, Geomagnetic changes correlated with crustal movement in the north-eastern part of the Izu Peninsula, Japan, *Annali di Geofisica*, 40, 479-494, 1997.

Oshiman, N., Y. Sasai, Y. Honkura, Y. Ishikawa and S. Koyama, Long-term geomagnetic changes observed in association with earthquake swarm activities in the Izu Peninsula, Japan, *Annali di Geofisica*, 44, 261-272, 2001.

大志万直人, 本蔵義守, 伏角を用いた全磁力地点差変化の補正に関して一東伊豆で観測された地磁気変化を例として一, 第126回地球電磁気・地球惑星圏学会予稿集, A003-P021, 2009.

笹井洋一, 石川良宣, 房総半島における地磁気全磁力くり返し測量: 1968-1976, 震研彙報, 51, 83-113, 1976.

笹井洋一, 石川良宣, 伊豆半島東部地域の異常地殻活動に伴う全磁力変化(第一報), 震研彙報, 52, 173-190, 1977.

笹井洋一, 石川良宣, 伊豆半島東部地域の異常地殻活動に伴う全磁力変化(第二報), 震研彙報, 53, 893-923, 1978.

Sasai, Y., Application of the elasticity theory of dislocations to tectonomagnetic modeling, *Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo*, 55, 387-447, 1980.

Sasai, Y., and Y. Ishikawa, Tectonomagnetic event preceding a M5.0 earthquake in the Izu Peninsula - a seismic slip of a buried fault?, *Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo*, 55, 895-911, 1980.

笹井洋一, 石川良宣, 伊豆半島東部地域の異常地殻活動に伴う全磁力変化(第三報) — 1980年伊豆半島東方沖地震一, 震研彙報, 55, 1101-1113, 1980.

笹井洋一, 石川良宣, 伊豆半島東部地域の異常地殻活動に伴う全磁力変化(第四報) — 1981年伊豆半島北東部の異常変化一, 震研彙報, 57, 739-757, 1982.

笹井洋一, 石川良宣, 伊豆半島東部地域の異常地殻活動に伴う全磁力変化(第五報) — 1982-1984年川奈崎沖群発地震と地殻隆起一, 震研彙報, 60, 147-177, 1985.

Sasai, Y., Multiple tension-crack model for dilatancy: surface displacement, gravity and magnetic change, *Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo*, 61, 429-473, 1986.

Sasai, Y., and Y. Ishikawa, Tectonomagnetic signals

- related to the seimo-volcanic activity in the Izu Peninsula, *J. Phys. Earth*, 39, 299-319, 1991.
- Sasai, Y., and Y. Ishikawa, Seismomagnetic models for earthquakes in the eastern part of Izu Peninsula, Central Japan, *Annali di Geofisica*, 40, 463-478, 1997.
- 笹岡雅宏, 山崎 明, 火山における地磁気全磁力観測に影響する磁場擾乱の統計的特長, *Conductivity Anomaly 研究会論文集*, 15-21, 2012.
- Stening, R., T. Reztsova, and L.H. Minh, Variation of Sq focus latitudes in the Australian/Pacific region during a quiet sun year, *J. Atmos. Solar Terr. Phys.*, 69, 734-740, 2007.
- Sugiura, M., and S. Hendricks, Provisional hourly values of equatorial Dst for 1961, 1962 and 1963, NASA Tech. note D-4047, 1967.
- 東京大学地震研究所, 2006年伊豆半島東方沖の地震活動, 地震予知連絡会会報, 76, 210-212, 2006.
- Utada, H., M. Neki, and T. Kagiya, A study of annual variations in the geomagnetic total intensity with special attention to detecting volcanomagnetic signals, *Earth Planets Space*, 52, 91-103, 2000.

Geomagnetic total intensity variations associated with vertical crustal movements in the eastern part of the Izu Peninsula

by

Masahiro SASAOKA¹, Takeshi OWADA¹, Shin ARITA¹, Akira YAMAZAKI²,
Yosuke TAGUCHI³ and Tsutomu OGAWA⁴

¹Kakioka Magnetic Observatory

²Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency

³Yokohama Local Meteorological Observatory

⁴Earthquake Research Institute, University of Tokyo

Received 30 October 2013; received in revised form 28 February 2014;

accepted 3 march 2014

Abstract

Earthquake swarms and anomalous crustal activities took place in the eastern part of the Izu Peninsula from 2010 to 2012; to detect the geomagnetic changes associated with these disturbances, we continuously measured geomagnetic total intensity and removed the effects of external magnetic fields. The daily variations in the geomagnetic field were associated with daily variations in the vertical crustal movements revealed by the geodetic height measured by GPS (Global Positioning System). Although we observed no significant seasonality in geomagnetic total intensity during the quiet seismic period of 2012, daily variations of vertical crustal movements changed seasonally during 2010-2012, as did the daily variations of the geomagnetic total intensity during both the quiet seismic period of 2010 and during the relatively active seismic period of 2011. We infer that hydrothermal activity related to the December 2009 earthquake swarm (caused by magma injection) persisted for less than two years and that hydrothermal movements associated with vertical crustal movements caused the seasonal changes in geomagnetic total intensity during 2010-2011. The implication is that the observed variations of the geomagnetic total intensity were not directly associated with seismic faulting. Continuous observations of geomagnetic total intensity are expected to facilitate prediction of the course of earthquake swarm activity in the eastern part of the Izu Peninsula.