

(1) 実施機関名：

東京大学地震研究所

(2) 研究課題（または観測項目）名：

東海地方における地殻活動モニタリングの高度化

(3) 最も関連の深い建議の項目：

1. 地震・火山現象予測のための観測研究の推進

(1) 地震・火山現象のモニタリングシステムの高度化

ウ. 東海・東南海・南海地域

(4) その他関連する建議の項目：

2. 地震・火山現象解明のための観測研究の推進

(1) 日本列島及び周辺域の長期・広域の地震・火山現象

ウ. 広域の地殻構造と地殻流体の分布

(5) 本課題の5か年の到達目標：

これまでの観測研究の結果は、東海地域における観測研究の継続的実施の重要性を如実に示している。そこで、今次5か年計画においても東海地域における地殻変動、電磁気及び重力の観測を継続実施し、この地域の地殻活動を連続的にモニタリングする。特に GPS 及び電磁気観測においてはテレメータ方式を増設し、モニタリングの高度化並びに観測にかかる労力の軽減を実現して、データのより高度な数理解析への展開を計る。

1) 東海地方において稠密 GPS アレイ観測を実施し、詳細な地殻変動をモニタリングする。

東海地方に設置されている高密度 GPS 観測網の観測を継続し、GEONET データと併合処理することにより東海地方の地殻変動を詳細にモニタリングする。また、テレメータ化した観測点では 10Hz の高頻度サンプリング観測を実施し、地震波等の高速の現象が検出できるか試験的な研究観測を実施する。得られたデータに基づき沈み込むフィリピン海プレートの固着の時間変化を明らかにする。相良においては地殻活動総合観測装置による観測を継続し、富士川観測所などの石英管伸縮計、水管傾斜計およびボアホールひずみ計などの連続観測から得られるひずみ・傾斜変化と比較し、地殻活動の時間変化を連続的にとらえる。

2) 東海地方において電磁気変化をモニタリングする。

東海地方において、広域的応力場変化、地殻内流体の移動をモニターするための、全磁力、3成分磁場連続観測を実施する。観測点項目ないし配置の見直しにより、地殻活動に関連した電磁気現象の検知能力を高める。

3) 東海地方において重力観測を実施する。

東海地方の複数点で絶対重力観測を年間3回程度繰り返すとともに、その周辺域で相対重力観測を同時に実施して、重力値の時間変化を面的に捉える。

4) 地殻変動・地磁気及び重力変化を統合した東海地域のプレート運動とそれに伴う各種現象のモデル化の試みにチャレンジする。

(6) 本課題の5か年計画の概要：

平成21年度においては以下の観測研究を実施する：

1) GPS 観測の継続実施

高頻度サンプリング GPS 観測の導入

相良におけるボアホール連続観測の継続実施

観測データの整理・解析と解析処理によるプレート固着変化及び短期スローイベントの検出

2) 地磁気観測の継続実施

観測データの整理・解析と東海地方の地磁気活動の解明

3) 絶対及び相対重力観測の継続実施

観測データの整理・解析とプレート運動に伴う重力変化の検出とモデル化

4) フィリピン海北縁部（東海・東南海・南海）で実施している観測網のデータの総合的解析とモデル化を推進するため、関連研究者による研究集会を実施する。

平成22年度においては以下の観測研究を実施する：

1) GPS 及び連続観測の継続実施

観測データの整理・解析と解析処理によるプレート固着変化及び短期スローイベントの検出

2) 地磁気観測の継続実施

観測データの整理・解析と東海地方の地磁気活動の解明

3) 絶対及び相対重力観測の継続実施

観測データの整理・解析とプレート運動に伴う重力変化の検出とモデル化

4) フィリピン海北縁部（東海・東南海・南海）で実施している観測網のデータの総合的解析とモデル化を進める。また、関連研究者による研究集会を実施する。

平成23年度においては以下の観測研究を実施する：

1) GPS 及び連続観測の継続実施

観測データの整理・解析と解析処理によるプレート固着変化及び短期スローイベントの検出

2) 地磁気観測の継続実施

観測データの整理・解析と東海地方の地磁気活動の解明

3) 絶対及び相対重力観測の継続実施

観測データの整理・解析とプレート運動に伴う重力変化の検出とモデル化

4) フィリピン海北縁部（東海・東南海・南海）で実施している観測網のデータの総合的解析とモデル化を進める。関連研究者による研究集会を実施する。

平成24年度においては以下の観測研究を実施する：

1) GPS 及び連続観測の継続実施

観測データの整理・解析と解析処理によるプレート固着変化及び短期スローイベントの検出

2) 地磁気観測の継続実施

観測データの整理・解析と東海地方の地磁気活動の解明

3) 絶対及び相対重力観測の継続実施

観測データの整理・解析とプレート運動に伴う重力変化の検出とモデル化

4) 関連研究者による研究集会を実施し、フィリピン海北縁部（東海・東南海・南海）で実施している観測網のデータの総合的解析とモデル化を推進すると共に次期計画に向けての課題を洗い出す。

平成25年度においては以下の観測研究を実施する：

1) GPS 及び連続観測の継続実施

観測データの整理・解析と解析処理によるプレート固着変化及び短期スローイベントの検出

2) 地磁気観測の継続実施

観測データの整理・解析と東海地方の地磁気活動の解明

3) 絶対及び相対重力観測の継続実施

観測データの整理・解析とプレート運動に伴う重力変化の検出とモデル化

4) 関連研究者による研究集会を実施し、5年間の研究を総括すると共に成果をとりまとめる。

## (7) 計画期間中(平成21年度~25年度)の成果の概要:

### 1) GPS観測

「GPS大学連合」は2004年頃より、当時進行中であった東海地方直下の長期スローリップイベント(SSE)の発生機構解明と東海地震の前兆的異常の検出を目的として静岡県内に50点以上のGPS観測点を設置して観測を開始した。その後この観測研究は主として東京大学地震研究所・静岡大学・東海大学を中心とするGPS研究グループで実施されてきた。今次の5か年計画では多くの成果が挙げられたがそれらの中の主たる成果を概観する。

平成25年度においては稠密アレイ観測を継続したほか、これまでに得られたデータに基づきひずみ解析を実施した。また、前年度までに実施した長期スローイベントに関する研究結果をとりまとめて国際誌に印刷公表した。その他、GNSS観測の応用研究として50Hzサンプリングによるデータを取得してきたが2013年9月20日の福島県浜通り地震に伴う地震動を検出することに成功した。

(1) ひずみ解析: 本地域のひずみの進行は継続して監視が行われてきた。とりわけ、東海地方のひずみ変化が地震活動とよい相関があり、これをてがかりにプレート固着変化が監視可能との考え方が提唱され(松村他, 地震, 2008), この観測網の重要性が認識された。SSEは2005年頃に終息したため、その前後2004年~2006年頃のひずみ解析によってSSE発生時期と静穏期のひずみ変化の違いなどについて考察が行われた。また、高密度アレイの有効性についてチェッカーボードテストなどを行うことでスローイベントなどの検出可能性が向上することが確かめられた。図1はこれまでに取得されたデータ(大学連合+GEONET)によって推定された東海地方のひずみ変化を示す。

(2) 短期スローイベントのGPSによる検出: 短期スローイベント(短期SSE)の発生過程を明らかにするため、GPS観測データから短期SSEが検出できるか検討した。観測点の時系列から地域全体の平均的な変動を除去し各観測点固有の変動を算出した。そのうえで、7日間の移動平均の操作を行って時系列を平滑化し、短期SSE前後の平均値を比較した。この解析を2006年の観測データに適用した。結果を図2に示す。この期間には1月16-22日と8月27日-9月1日の二回SSEが発生しているが、時系列上では両方のSSEによると思われる2~3mm程度のステップが検出された。インバージョン解析を行って滑り領域を推定したが、1月のSSEについては推定滑り領域が低周波微動発生域よりもやや南西に発生したと推定された。また、8月のSSEについては低周波微動発生域に適合するような滑り領域は見いだせなかった。いずれにせよ、GPSデータから短期スローイベントによる2mm程度の変位が確認されたことは特筆に値すると思われる。

(3) 長期スローイベントの新解釈: 2000-2005年に発生したいわゆる“東海スローイベント”について、Ochi and Kato (JGR, 2013)はGPSと水準測量を用いたインバージョン解析を行ってこのイベントの実態がどのようなものであったのか、詳細な検討を行った。これまで1996-1999年のドリフトを定常的固着とみて時系列から除去してきたが、本研究では元の時系列をそのまま使い、プレート間固着と滑りを直接推定することを試みた。1996-2009年のGEONETデータと水準測量データを用い、1年ずつずらした2年毎の時系列データから各期間の変位速度を求めて入力データとし、曲面近似したプレート境界面上の固着点滑りをいわゆるバックスリップインバージョンによって推定した。図3に2000-2005年の従来のやり方によるスローイベント発生域と、本研究による発生域を比較して示す。スローイベントの領域が、本研究の方が深い方にずれていることが分かる。図3(右)には本研究による滑りに深部低周波微動も重ねてあるが、スローイベントの中心部で発生していることがわかる。この領域は半年くらいの間隔で短期スローイベントが発生している領域でもあり、2000年から発生した長期スローイベントはこの短期スローイベントが巨大化したものであることが判明した。

### (4) その他の成果

(4a) 2009年駿河湾の地震: 2009年8月11日に駿河湾内でM6.3の地震が発生した。この地震は沈み込むフィリピン海プレート内部で発生した地震であったと考えられている。この地震による想定東海地震断層面上の応力変化を推定した。まず、東海地域のGPS観測点(大学連合+GEONET)のデー

タ解析から地震時変位を算出し、これに基づいてインバージョン解析を行って断層滑り分布を算出した(図4左)。推定した断層滑り分布から想定東海地震断層面上の $\Delta$  CFF分布を算出した(図4右)。この結果から推定するとプレート境界面に置かれたアスペリティで数十 KPa 程度の $\Delta$  CFF変化があったと考えられる。この値は潮汐などによる変化量の十倍くらいに相当している。なお、本地震の発生後、本課題によって開発されたGPSデータのリアルタイム解析の手法を適用し、実時間で基線変化を監視する作業を臨時に実施した。

(4b) 高頻度サンプリングによる地震波解析：平成23年度にはGPSが地震計として活用できるかについて、シミュレータを用いた実験を行い、高頻度サンプリング時における受信機の周波数特性と地震波の再現性の調査を行った(Ebinuma and Kato, EPS, 2012)。また、静岡における観測網のうち3か所(芳川小, 知波田小, 気田小)で20Hz, 別の3か所(川奈, 静大観測棟, 相良)で50Hzの観測を開始した。これらのうち川奈, 相良観測点はその後房総・茨城の観測網へと移設され平成25年9月20日の福島県いわき地方の地震による地震波動の検出に成功した(課題1410も参照)。

## 2) 地磁気観測

今期の予知計画では磁場三成分観測に力を注いだ。その結果をまとめたものを次に示す。

観測点は、今期計画以前から三成分磁力計を設置していた俵峰(TAW, 安倍川中流部), 相良(SAG, 御前崎付近)に加え、2009年度から富士宮(FJM), 2012年度から舟ヶ久保(FNK, 藤枝市最北集落)の4観測点になる。観測点を図5に示す。FNKの磁力計は東海大との協力で設置した。相良の磁力計は鉛直成分が長周期では不安定である。また舟ヶ久保の磁力計は設置後のドリフトが落ち着く前にトラブルで再設置を余儀なくされている。

八ヶ岳基準で各成分の2009年1月以降の変化を見たものをx(北向き成分), y(東向き成分), z(下向き成分)それぞれを図6に示す。

数年のスパンで一瞥すると、北向き成分に着目すると、FJMでは減少傾向、TAWでは増加傾向の一方、下向き成分ではFJMで激増、TAWで減少という空間パターンを持っている。観測点分布の東側で経年的に全磁力が八ヶ岳基準で増加傾向が顕著である原因は、鉛直成分の増加の空間分布に起因していることが示せたと考えている。東向き成分に着目すると、間欠的に、また多くの場合TAWとSAGとで同期した、数ヶ月規模で緩慢な減少と急激な回復、という変化を繰り返すことが見て取れる。最近では2013年8月頃にこの種の変化が、特にSAGで顕著に見えた

(TAWはこの期間の一部は欠測)。この期間、愛知県新城市付近で8月3日、M4.9、深さ約34kmの地震があった。同じ地域で翌4日には低周波地震も、M4.9、深さ約37kmであった。東向き成分に顕著に見える磁場データの異常は、北向き、下向きにも同時に現れるが、同様の変化は2009年8月の駿河湾地震の後にも見られ、2009年9月30日のM5.0の愛知県内の長周期地震へ向けて緩慢に変化し、長周期地震が終わると急激に回復する。

このような磁場データの異常は、ベクトルとして考えると定性的には北向き・西向き・上向きの変化とその回復を示している。これは地磁気の主要な成分である北向き・下向きに対しておおむね直交する向きのため、元々の地磁気ベクトルを主要には回転させるだけでベクトルの大きさを効率的に変えるものではなく、したがって全磁力変化を生じにくい磁場変化に対応する。このような磁場データの異常が機器の異常が原因ではない限りは、従来見ていた全磁力変化には見えにくい磁場変化を見ている可能性がある。

またこの磁場データの異常は、SAGとTAWで同時に見えるだけでなく、変化の傾向も

- ・三成分の変化の極性
- ・負の変化を見せる東西成分、鉛直成分の大小関係
- ・変化量が最大な成分が東西成分であること

などに両観測点で、かつ毎回の変化で共通点がある。

長周期地震の発生や大きさと磁場データの異常との対比を磁場データの東向き成分を抜き出して示した図が図7である。長周期地震は北緯34度から36度、東経137度から139度30分までの範囲で起きているものを、M3からM5まで抽出している。このようにしてみると、大きな長周期地震のたび

に必ず磁場データの異常が現れるわけではない。東向き成分に現れる磁場データの異常の時期の三成分の変化と長周期地震の発生及びその空間分布をまとめた図が図8である。2009年駿河湾地震直後の1枚目の図と2013年8月の5枚目の図とは長周期地震との対応がありそうに見える図になっているが、それ以外の3枚は必ずしもそのように見えないかもしれない。

以上をまとめると、今期の地震予知計画で三成分観測とデータ処理を進めたことにより、従来の全磁力観測とデータ処理だけでは見えない地磁気データの異常が繰り返し見えるようになった。地磁気データの大きな異常は2観測点で同時に見えるため、東海地方での多点での安定な三成分観測の展開が地磁気変化の有無や、地殻活動との関連の解明に寄与できると考えている。

### 3) 重力観測

平成25年9月2日から9月7日に御前崎及び菊川において、絶対及び相対重力測定を実施した。御前崎の絶対重力値は平成24年9月の観測結果に対して、3マイクロガル増加した。この変化はこれまでの長期的な重力増加の傾向と一致している。地殻流体の挙動を電磁気・重力の統合観測により捉えることを目的として、相良及び俵峰の磁気観測点において相対重力測定を初めて実施した。今後の観測により時間変動が求まることが期待される。平成26年3月1日から3月6日に豊橋及び菊川で絶対及び相対重力測定を行った。現在、解析を進めている。

平成21年度から25年度までの観測により、御前崎・菊川・豊橋の絶対重力変化の傾向が明らかになった(田中ほか, 2012)。これらと相対重力測定の結果は、プレートの定常的な沈み込みの影響と、2000年に開始した東海地方の長期的スロースリップに伴う地殻流体の移動の影響の重ね合わせにより定量的に解釈可能であることを示した(Tanaka et al., 2010)。

## (8) 平成25年度の成果に関連の深いもので、平成25年度に公表された主な成果物(論文・報告書等) :

Ochi, T. and T. Kato, Depth extent of the long-term slow slip event in the Tokai district, central Japan: A new insight, *J. Geophys. Res.*, 118, 1-14, doi:10.1002/jgrb.50355, 2013

Kato, T., A. Fujita, M. Satomura, R. Ikuta, and Y. Harada, Analysis of detailed crustal strains due to the dense GPS array in the Tokai region, central Japan, Abstract No.:S503PS.12, presented at Joint Assembly IAHS-IAPSO-IASPEI, 22-26 July 2013, Gothenburg, Sweden, 2013.

加藤照之, GPS: 次の“夢”に向けて～「GPS 大学連合」の視点から～, *測地学会誌*, 59(3), 87-97, 2013.

国土地理院・東京大学地震研究所, 2013, 第202回地震予知連絡会資料2013, 御前崎における絶対重力変化.

田中愛幸・張新林・付広裕・菅野貴之・松本滋夫・古家正人・孫文科・大久保修平, 2012, *地震研究所彙報*, 87, 1-6.

Tanaka, Y., A. Kato, T. Sugano, G. Fu, X., Zhang, M. Furuya, W. Sun, S. Okubo, S. Matsumoto, M. Honda, Y. Sugawara, I. Ueda, M. Kusaka and M. Ishihara, Gravity changes observed between 2004 and 2009 near the Tokai slow-slip area and prospects for detecting fluid flow during future slow-slip events, *Earth Planets Space*, 62, 905-913, 2010

国土地理院・東京大学地震研究所, 2012, 第197回地震予知連絡会資料2012, 御前崎における絶対重力変化.

## (9) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

東京大学地震研究所 加藤照之・上嶋誠・小河勉・小山茂・大久保修平・田中愛幸

他機関との共同研究の有無 : 有

静岡大学 里村幹夫

東海大学 長尾年恭

## (10) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名：東京大学地震研究所 地震火山噴火予知研究推進センター  
 電話：03-5841-5796  
 e-mail：teru@eri.u-tokyo.ac.jp  
 URL：

(11) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：加藤照之

所属：東京大学地震研究所 地震火山噴火予知研究推進センター

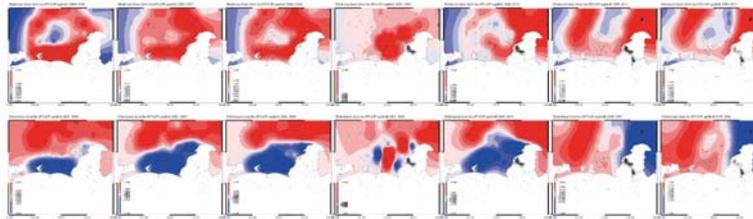


図 1

GPS 稠密アレイに基づく東海地方のひずみの時間変化. 上段：最大ずりひずみ，下段：面積ひずみ. 1 年ずつずらした 3 年間のデータに基づいて速度場を算出し，それに最小二乗予測法（e.g., El-Fiky and Kato, 1999）を適用した. 期間中に発生した 3 つの地震，2004 年 9 月紀伊水道沖地震（Mw7.2/7.4），2009 年 8 月駿河湾地震（Mw6.3）及び 2011 年 3 月東北地方太平洋沖地震の影響に注意. 解析期間中に発生した地震の震央を示す. カラースケールが図ごとに異なることにも注意.

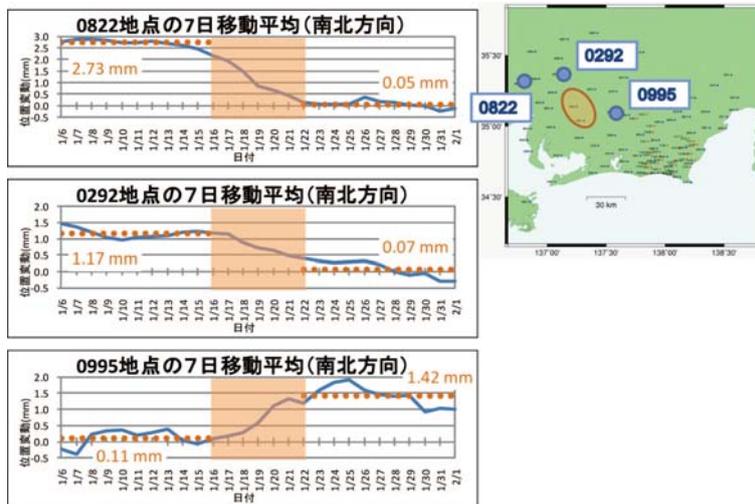


図 2

2006 年 1 月 16-22 日に発生した短周期スローイベント前後の GPS 時系列（7 日移動平均操作後）. オレンジ色で示した部分は低周波微動発生時期. 右図は東海地域の地図と GPS 観測点分布. 時系列で示した観測点を示す. 右図オレンジ色の楕円は低周波微動発生領域.

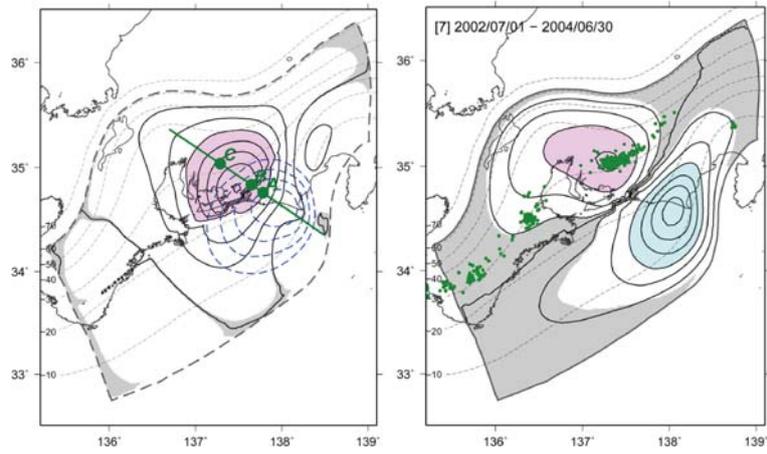


図 3

2002年7月1日2004年6月30日の期間における（左）従来の手法による“東海スロースリップ”，と（右）本研究によるスロースリップと固着の領域．従来の手法より本研究によるスロースリップの領域が深い方によっていることがわかる．同期間の深部低周波微動（緑点）の分布も示す．

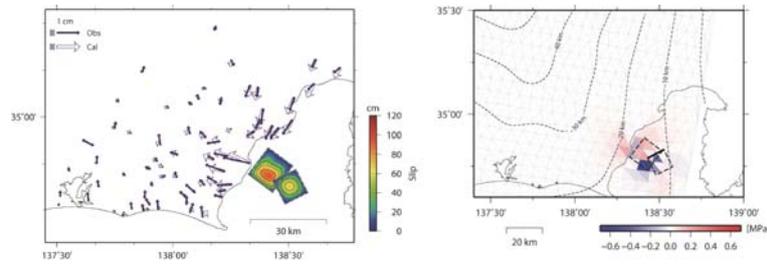


図 4

（左）GPS 観測データに基づく 8 月 11 日駿河湾の地震の推定滑り分布．（右）推定滑り分布に基づく想定東海地震震源域の  $\Delta$  CFF 分布．

# observation network

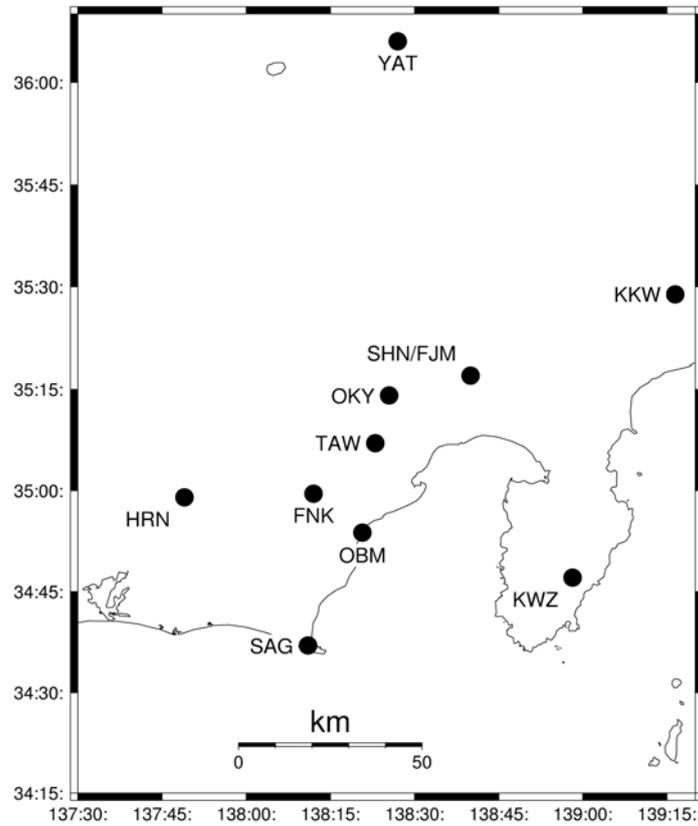


図 5

東海地方の地球電磁気連続観測点分布. 全観測点で全磁力を, また KWZ, SHN/FJM, TAW, SAG, YAT で地磁気 3 成分も観測している. FNK で 2012 年 5 月から地磁気 3 成分の観測を開始した.

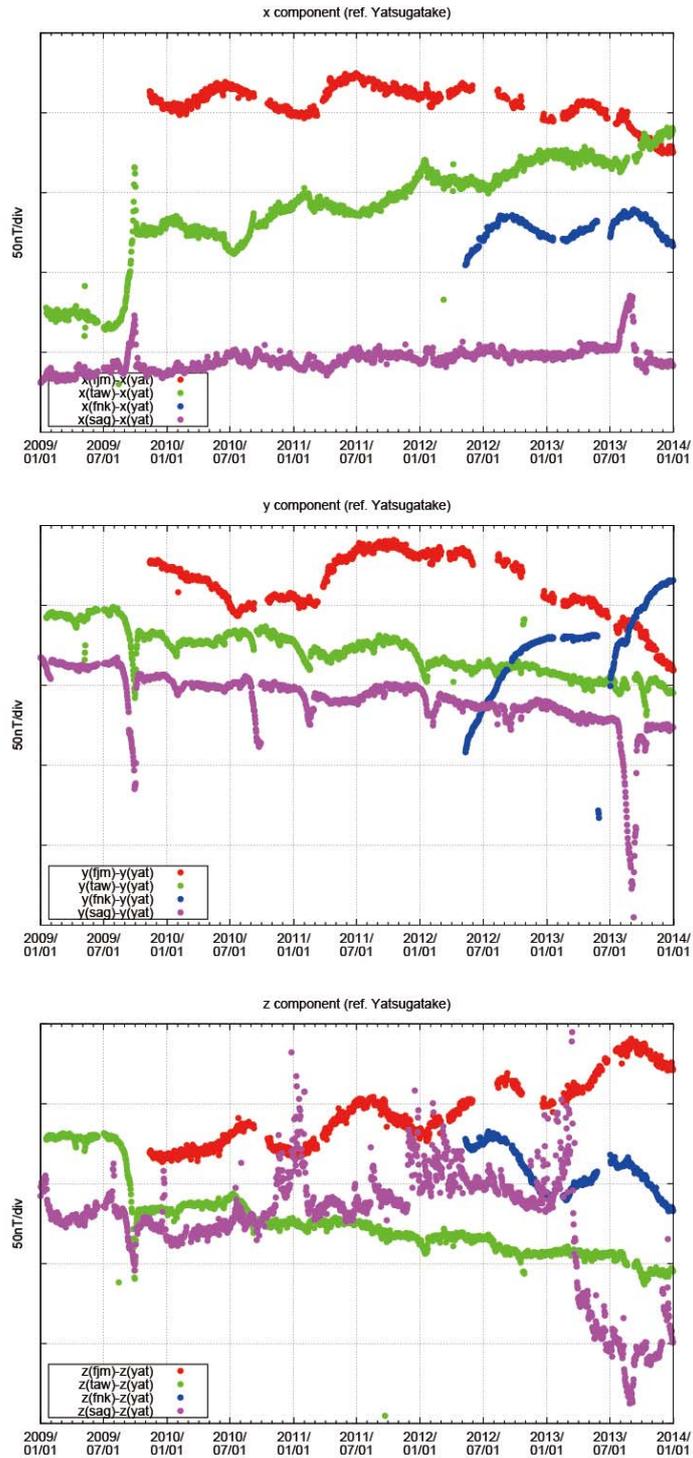


図6

八ヶ岳 (YAT) を基準とした 2009 年 1 月から 2013 年 12 月までの磁力変化. 上から x 成分, y 成分, z 成分. 各図中の観測点は赤色が富士宮 (FJM), 緑色が俵峰 (TAW), 青色が船ヶ久保, 紫色が相良 (SAG)

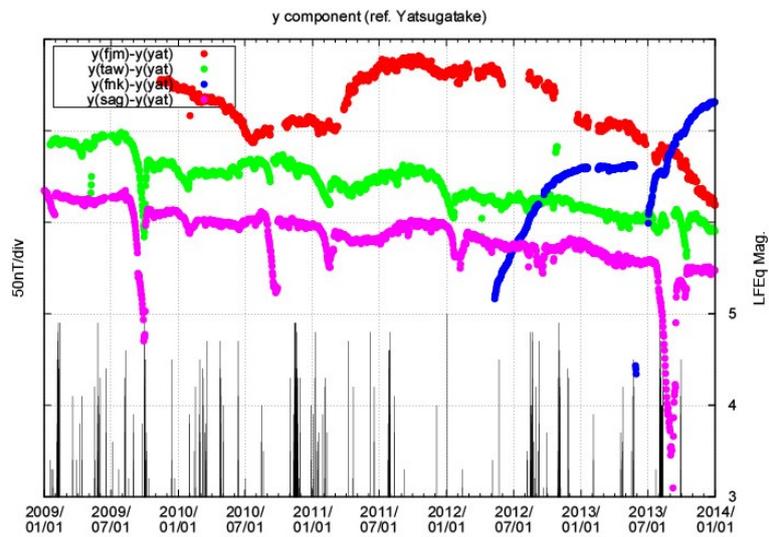


図7  
 図6のy成分と長周期地震の発生（黒線で示す）の対比。

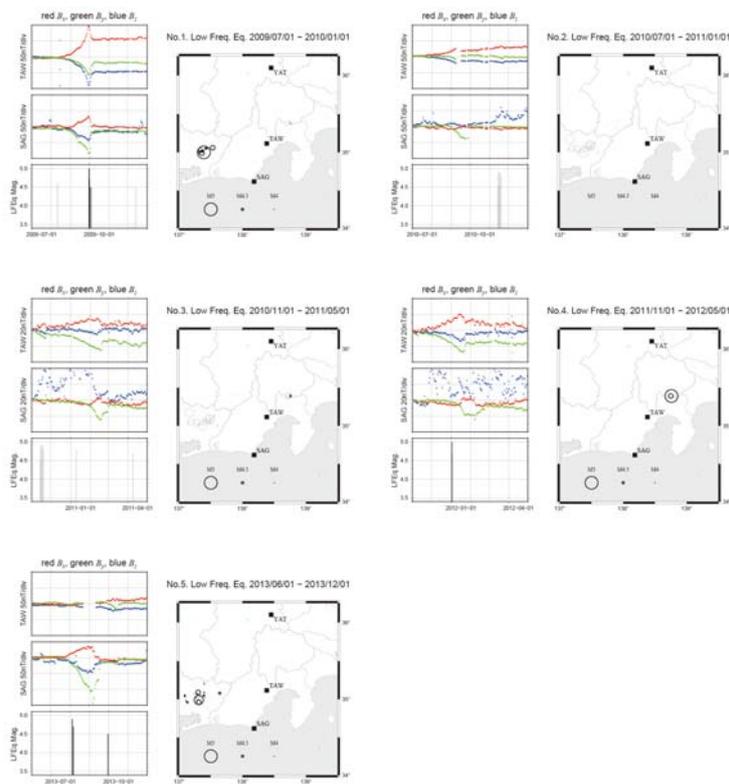


図8  
 磁力計の3成分に現れた変化と長周期地震発生を比較した5つの事例。地震の空間分布も示す。