

2.5 樽前山

2.5.1 樽前山における地殻変動および地磁気観測データを組み合わせた解析

2.5.1.1 はじめに

特別研究「火山活動評価手法の開発研究」において力学的シミュレーション手法を用いた地殻変動等の火山活動評価手法の開発とそしてそれを具体的な火山で適用する観測的研究を2本の柱として研究を進めた。観測的研究においてはシミュレーション手法の検証用の地殻変動，地磁気観測データを取得することを目指して，霧島山に観測網を新設するとともに，本研究開始前から実施していた樽前山，浅間山，伊豆大島における地殻変動観測を継続した。

樽前山では樽前山ドーム周辺部におけるGPS繰り返し観測を実施した。また，札幌管区气象台により，通常行われる地震観測や熱観測以外に地磁気繰り返し観測，自然電位繰り返し観測などが行われている。本節ではこれらGPS，地磁気繰り返し観測データから樽前山の火山活動に関連した変動を解析した結果について述べる。特に，地殻変動，地磁気，火口温度が同期して変動を示した1999年から2000年にかけてのデータを有限要素法を利用した解析や火山用地殻活動解析支援ソフトウェアに組み込まれた地殻変動と地磁気データを組み合わせて解析する新しい手法を活用して得られた成果を詳しく述べる。

気象庁（2005），札幌管区气象台（1988），古川（1998）に基づいて樽前山の地形，火山活動を概観する。樽前山は，支笏カルデラの南東壁に生じた火山で，標高600m以上の部分は斜度20～30度の急傾斜の火砕丘で，その頂部に南北1.2km，東西1.5kmの外輪山がある。この内部に扁平な中央火口丘があり，さらにその中央部に溶岩円頂丘（以下，ドームと記す）がある（photo 2.5.1）。有史以来，300年間で大小約70回の活動が記録されており，大規模な噴火がしばしば発生している。1804～1817年の活動の際，ドームが形成されたが，1874年の活動で崩壊し飛散した。現在あるドームは1909年に形成されたものである。ドーム上や周辺にはA火口など，色々な場所から高温の火山ガスを放出している。Fig. 2.5.1(c)にドーム周辺を拡大した地図を示す。図中のアルファベットが噴気孔で，この中でA火口の噴煙活動が最も活発で，B（南西噴気孔群），E（ドーム上南西噴気口），F（北東亀裂下部噴気孔）などがこれに続く。1984年頃からの約10年間地震活動や噴気活動など低調な状態であったが，1994年末頃から地震活動が活発化し，しばしば地震が群発するようになった（Fig. 2.5.2）。ドーム周辺の噴気活動などにも変化がみられ，1999年1月にはドーム南西の火口（E火口）から1995年3月以来の噴煙が再開し，また同火口内壁の雪面には新鮮な硫黄の付着が確認された。さらに，2003年10月に監視カメラで発光現象が観測され，その直後に行われた現地観測で，B噴気孔周辺で噴出物の堆積や硫黄の燃焼が確認されるなど，噴火には至らないまでも活発な火山活動を続けている。

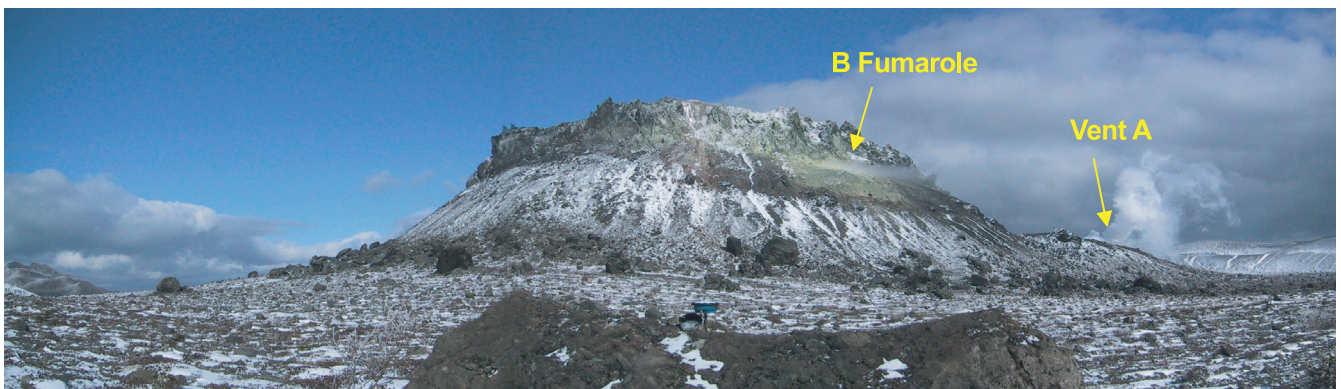


Photo 2.5.1 Lava dome of Tarumae volcano. This photo was taken from the GPS point W2.

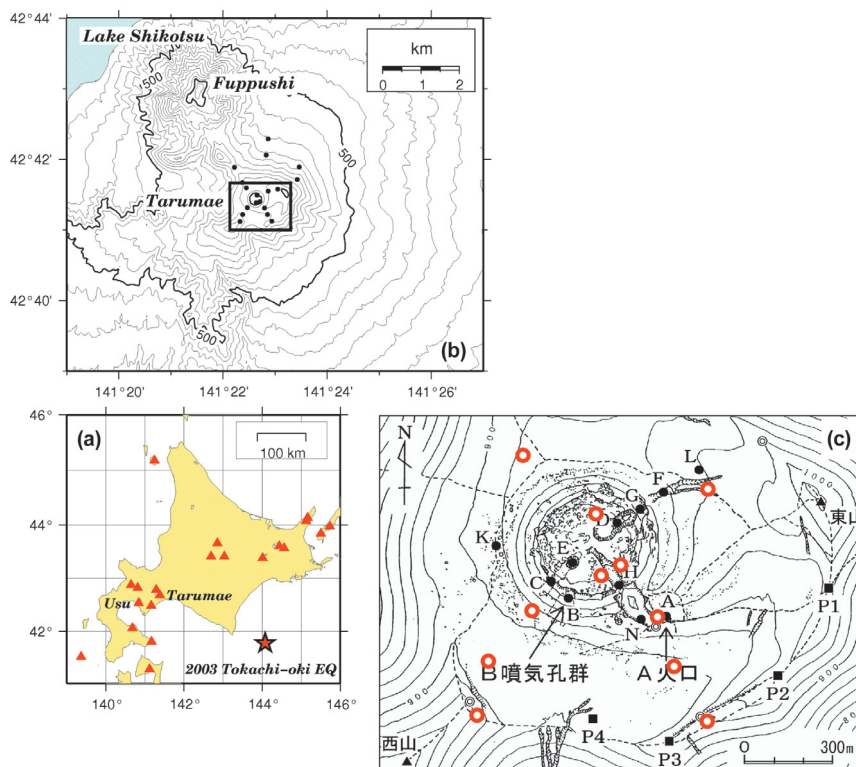


Fig. 2.5.1 (a) Locations map of Tarumae volcano and other active volcanoes in Hokkaido. The epicenter of the 2003 Tokachi-Oki earthquake is denoted by a star. (b) Topographic map of Tarumae volcano. The dots indicate the campaign GPS observation points. The rectangle in the center represents the area of Fig. (c). (c) Detailed map of the Tarumae lava dome. A-H, K, L, and N are fumaroles. The red circle indicates the campaign GPS observation sites.

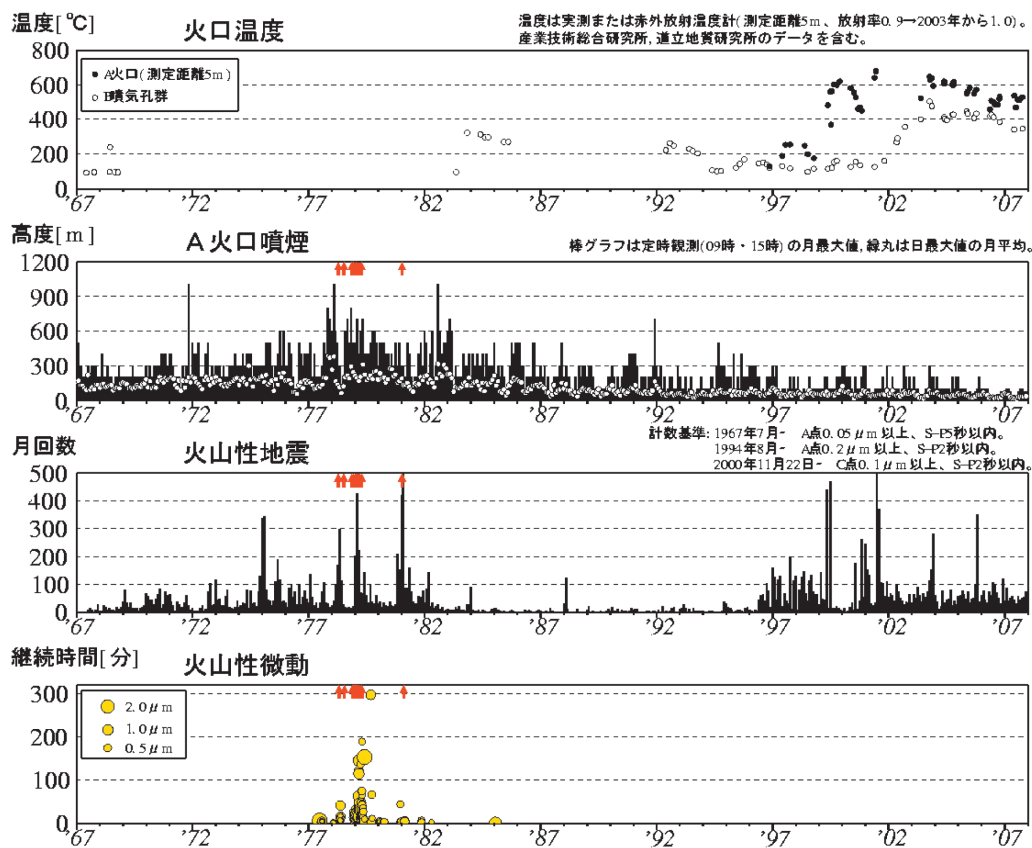


Fig. 2.5.2 Outline of the activity of Tarumae volcano (according to the SDMO). From top to bottom, the temperature of vent A, monthly maximum and mean height of the volcanic plume from vent A, monthly number of volcanic earthquakes, and a diagram of amplitude and duration time of volcanic tremors.

2.5.1.2 樽前山における GPS 繰り返し観測

(1) 観測方法

気象研究所では、1999年7月に樽前山山頂部に GPS 観測網 (Table 2.5.1の W0, S0を除く16点, Fig. 2.5.3) を設け、(株)古野電気社製1周波型GPS受信機MG2110による繰り返し測量を開始した。観測は7月頃および10月頃の年2回(2002年は6, 9, 11月の3回)、2005年までに合計15回実施した(Fig. 2.5.4)。観測点はドーム上に3点設けるとともに、ドームを中心として放射状に配置した。2001年6月にはドームの麓のW0, S0観測点を追加した。FE2, FE1観測点は長さ2mの金属パイプを打ち込み、その上端にねじを切った真鍮棒を固着

Table 2.5.1 Location of campaign GPS and geomagnetic observation points on Tarumae volcano. The geomagnetic points were prepared by the Sapporo District Meteorological Observatory (SDMO).

Station Name	Latitude [deg E]	Longitude [deg N]	Height [m]	Remarks
Campaign GPS observation points				
FE2	42.69822	141.39108	687	Pipe
FE1	42.69525	141.39047	794	Pipe
E2	42.69297	141.38422	972	
E1	42.69250	141.38114	949	
S1	42.68691	141.38092	897	
S2	42.68536	141.38225	918	
W1	42.68694	141.37294	894	
W2	42.68530	141.37211	942	
N1	42.69328	141.37414	920	
N2	42.69450	141.37283	895	
N3	42.69811	141.37028	822	
FN1	42.70097	141.38047	666	
FN2	42.70486	141.38108	602	
D1	42.68978	141.37731	1024	
D2	42.69158	141.37750	1013	
D3	42.69003	141.37844	1014	Installed by Hokkaido Univ.
W0	42.68858	141.37444	907	Since Jun. 2001
S0	42.68847	141.38000	941	Since Jun. 2001
Campaign geomagnetic observation points				
REF	42.7022	141.3858	625	
1	42.7034	141.3791	626	
2	42.6995	141.3824	709	before Oct. 2003
3	42.6952	141.3770	903	
4	42.6935	141.3767	930	
5	42.6969	141.3719	841	
6	42.6926	141.3721	891	
7	42.6880	141.3726	893	
8	42.6864	141.3733	890	
9	42.6873	141.3776	896	
10	42.6851	141.3769	879	
11	42.6763	141.3801	619	before Oct. 2003
12	42.6822	141.3815	809	before Oct. 2003
13	42.6860	141.3810	896	
14	42.6881	141.3815	930	
15	42.6927	141.3806	944	
16	42.6895	141.3816	967	Since Jun. 2001
17	42.6909	141.3822	969	Since Jun. 2001
18	42.6821	141.3708	917	Since May 2004
19	42.6797	141.3736	803	Since May 2004
20	42.6931	141.3749	928	Since May 2004

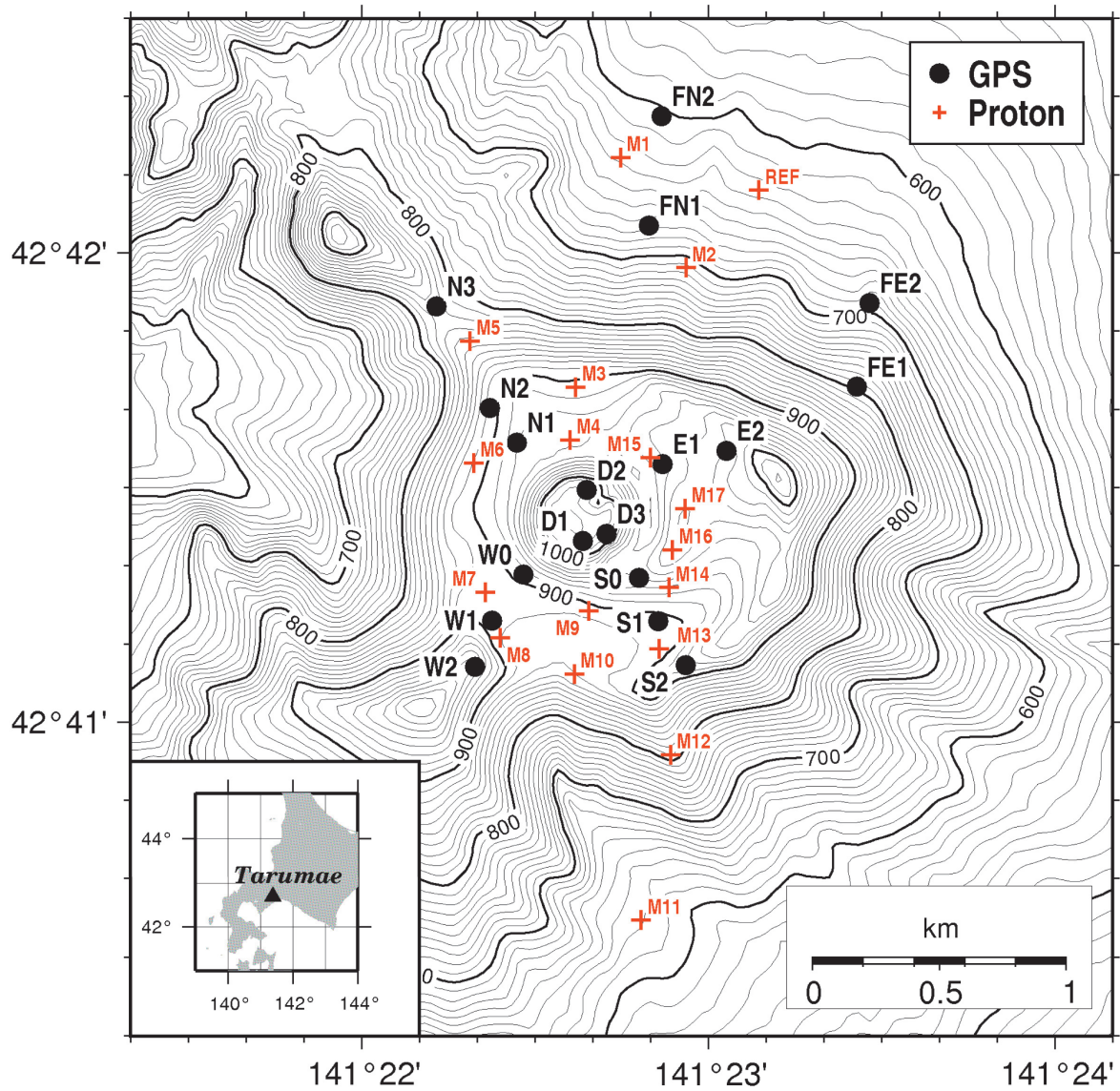


Fig. 2.5.3 Location map of campaign GPS observation points (black circle) and magnetic observation points (red cross) on Tarumae volcano.

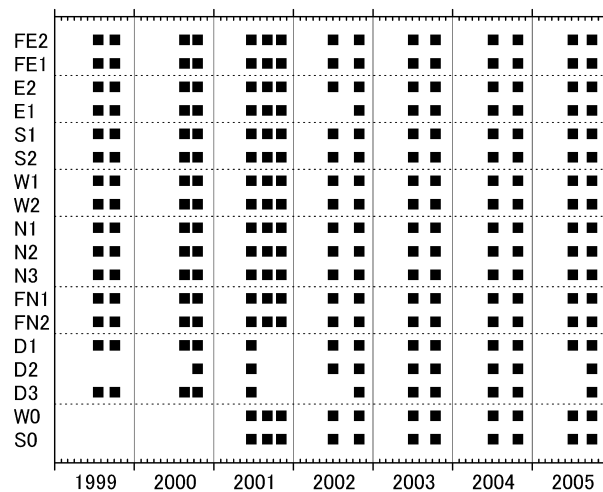


Fig. 2.5.4 Historical table of GPS observations at Tarumae volcano.

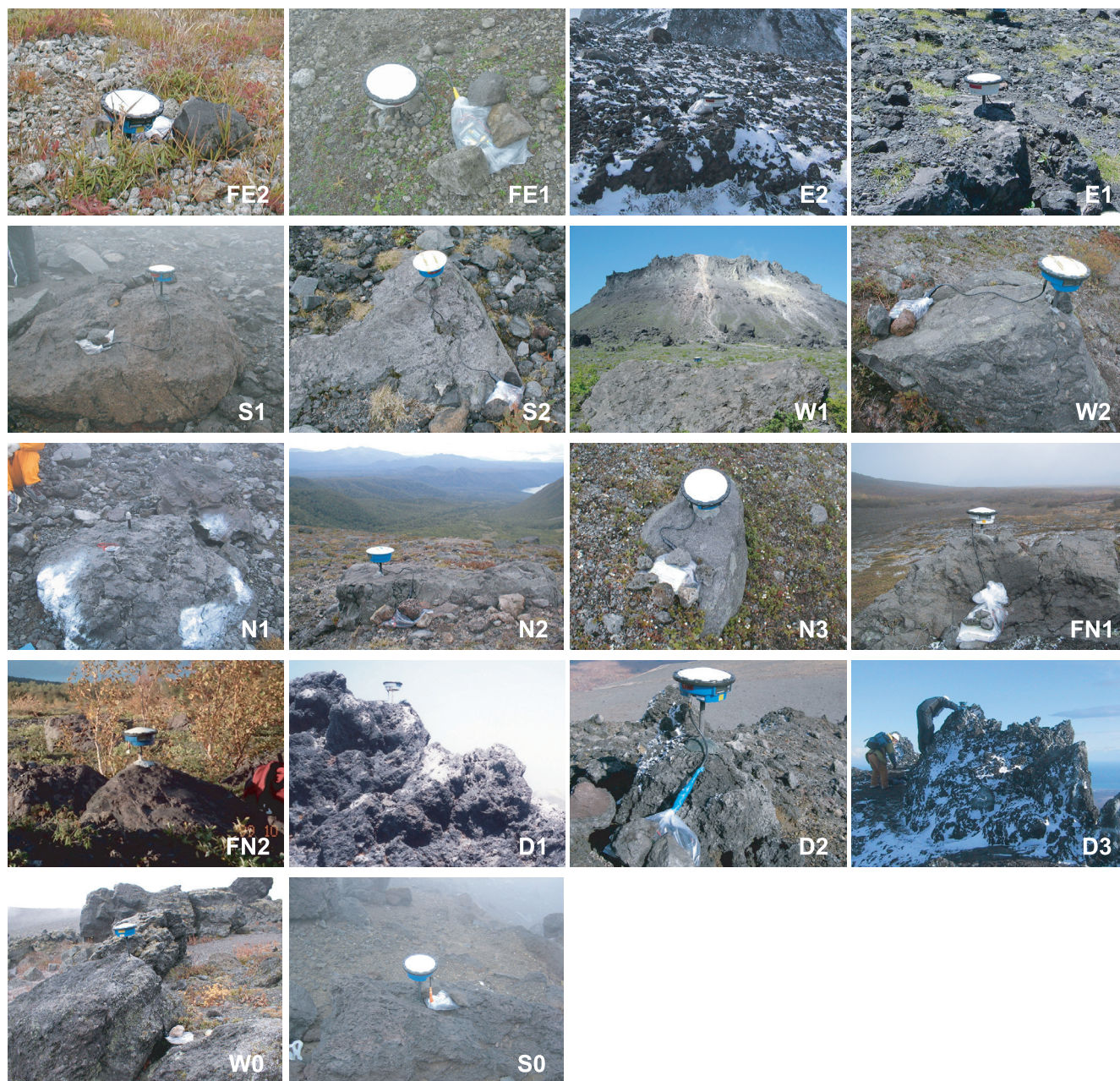


Photo 2.5.2 Campaign GPS observation points on Tarumae volcano.

させたものであり、他の観測点は岩塊にドリルで穴を開け、上部にねじを切った真鍮棒を差し込み、エポキシ系接着剤とセメントで固着させたものである（Photo 2.5.2）。D3観測点は北海道大学有珠火山観測所が設営した観測点を利用した。D1観測点はドーム南東亀裂の西側に位置しており、設置した岩塊の底部から噴気が出ていた。D3観測点は南東亀裂の東側壁の上にある（Fig. 2.5.1参照）。S0はA火口の西側にあり、噴煙に包まれることもある。今回構築した観測網はドーム中心から約2kmの範囲に観測点を展開している。1.1.1項でも述べられているように、火山活動に伴う地殻変動のモデリングにしばしば利用される茂木モデル（茂木，1957；Mogi，1958）によると、マグマの貫入などに伴う膨張圧力源によって生じる水平変位はその深さの約0.7倍の距離離れた地点で最大値をとる。このため圧力源が3kmよりも深くに存在する場合、茂木モデルの距離-水平変位グラフにおいて、単調増大する区間のみに観測データが存在することになり、圧力源深さの推定精度は悪くなる。

繰り返し観測は全点同時に約2日間のデータが得られるように計画し、繰り返しサンプリング周期は30秒、マスク角は15度とした。基線解析には（株）古野電気社製基線解析ソフトウェアCAP-Win2を使用し、1時間毎に処理した結果から異常値を取り除いた上で平均化した。

(2) 観測結果

Fig. 2.5.5にFE2を基準点として基線解析した東西 (a 図), 南北 (b 図), 上下方向の変位 (c 図), 基線長変化 (d 図) の時系列を示す。

上下変位には夏より秋に2～4 cm 高くなる年変化が見えるが, 水平変位には顕著な季節変化は見えず, 水平変位を用いれば異なる季節の観測データからモデル推定を行っても問題はないであろう。東西, 南北方向の変位時系列を見ると観測開始当初から2000年にかけて, 山体膨張を表す系統的な変動が見える。量は小さいものの2003年の1回目と2回目の観測の間にも同様の傾向が見える。1999年7月20～22日と2000年8月18～22日および2003

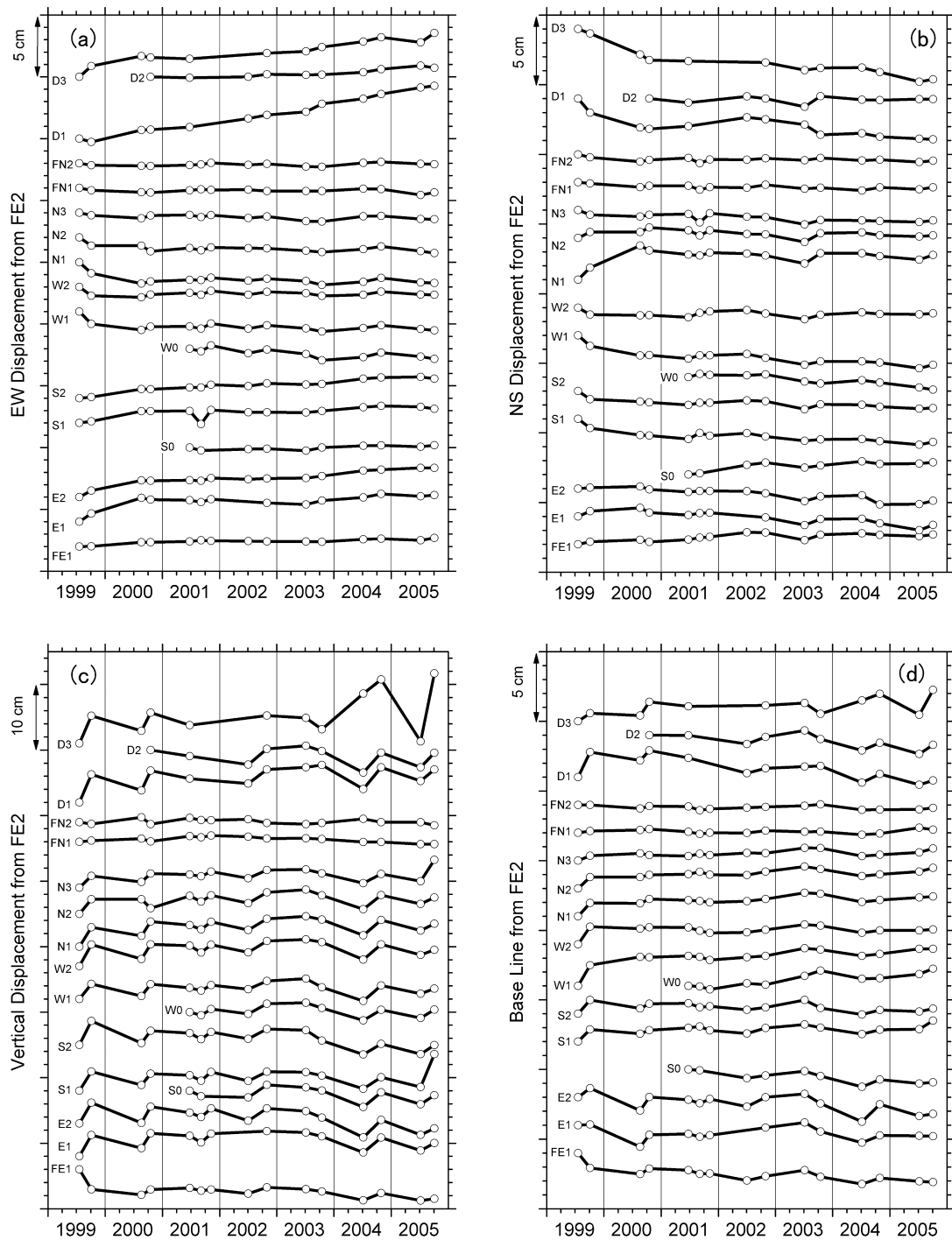


Fig. 2.5.5 Time series of the change of (a) east-west components, (b) north-south components of horizontal distance, (c) vertical distance, and (d) baseline lengths observed by campaign GPS observations from July 1999 to October 2005. The reference point is FE2.

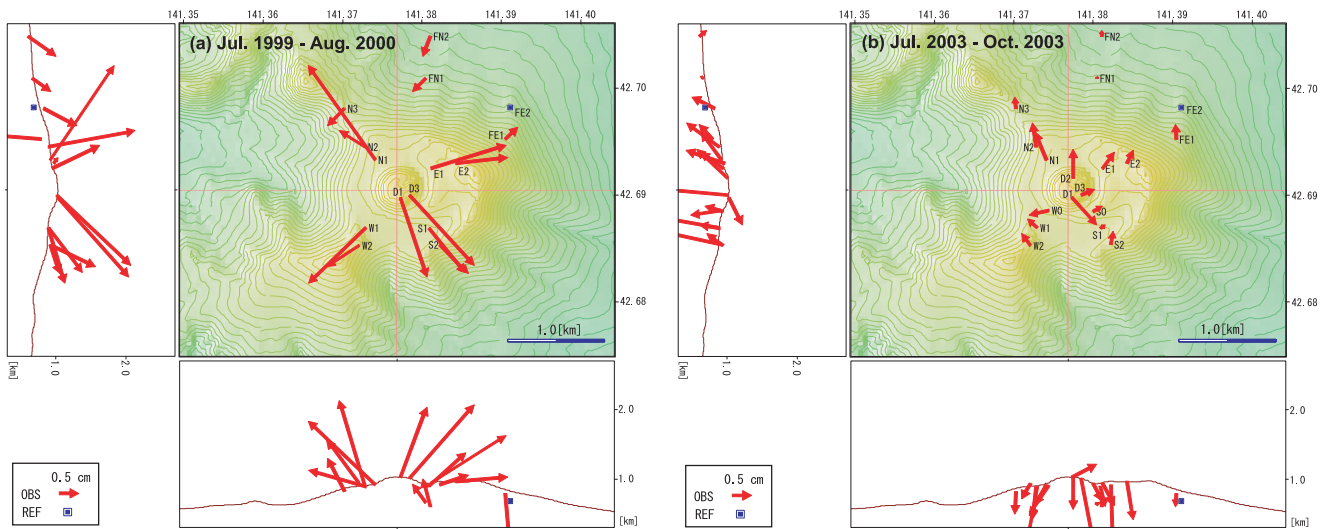


Fig. 2.5.6 Displacement vectors detected by campaign GPS measurements. (a) from July 1999 to August 2000. (b) from July to October 2003. A square mark designates the fixed site.

年7月5～7日と10月15～17日の観測から北東の観測点FE2を基準点として求めた変位ベクトルの分布をFig. 2.5.6(a) および (b) に示す。前者では北方の観測点を除き、上下成分を含め、ドーム直下を中心として放射状に変位しており、ドーム直下に膨張源が存在することが分かる。後者では季節が異なる時期の観測であるため、上下変位に季節変動成分が乗っており解析には使えないが、水平変位分布で見ると、最も変位量が大きなD1でも9mmと観測誤差の範囲とも言えるが、概ねドームを中心として放射状に変位している様子が見える。

ドーム上の観測点D1、D3は他の観測点に比べ、経年的な変動量大きい。前述したように、これらの観測点はドーム南東亀裂のそばに位置しており、地形的な影響を受けている可能性もある。あるいは、これらの観測点のごく近傍に変動源が存在する可能性がある。

(3) 1999～2000年の地殻変動を説明する圧力源モデル

1999年7月と2000年8月の観測から求められた水平変位ベクトルの分布を標高補正茂木モデル(1.4節)に当てはめ変動源の位置、大きさを推定した。求められた変動源をFig. 2.5.7の桃色の円で、推定されたモデルによって算出される変位ベクトルを青色の矢印で示す。赤色の矢印は観測された変位ベクトルである。変動源はドーム中心、標高 $h=730\text{m}$ (ドーム頂部から約310m)、体積変化量 $\Delta V=1.9\times 10^4\text{m}^3$ と求められる。標高補正茂木モデルで求められる変動源の大きさに関するパラメータは体積変化量 $\Delta V=\pi a^3\Delta P/\mu$ (a は圧力源半径、 ΔP は圧力源に加えられた圧力変化量、 μ は剛性率)であるが、 ΔP 、 μ を次のように仮定して球状圧力源の半径を求め、この大きさを用いてFig. 2.5.7の変動源を表示している。 ΔP は推定された深さにおける静水圧(密度は火山表層における一般的な値 $2.3\times 10^3\text{kg/m}^3$ とする)とし、 μ は札幌管区気象台(1999)によって推定されたP波速度 2.5km/s 、密度は前述した値、ポアソン比は0.25と仮定して求めた4.6GPaを用いた。このような仮定のもとで与えられる圧力源半径は約160mとなる。

北部の観測点はこの変動源によって生じる変動とは異なる動きをしている。変動量が小さく確かなことは言えないが、樽前山の北方にも膨張源が存在する可能性がある。森・鈴木(2002)によれば1997年と2001年に実施した樽前山北東登山道の水準測量によって山頂部の変動源とともに、樽前山の北東6.9km、深さ700mに、4年2ヶ月で $8\times 10^4\text{m}^3$ の体積増加をもたらす圧力源が推定されている。北部の観測点にこの圧力源に関連した変動が見えているのかもしれない。

(4) 2003年7～10月に観測された地殻変動を説明する圧力源モデル

Fig. 2.5.6(b)は、2003年9月26日に発生した気象庁マグニチュード8.0の十勝沖地震を挟む2003年7月5～

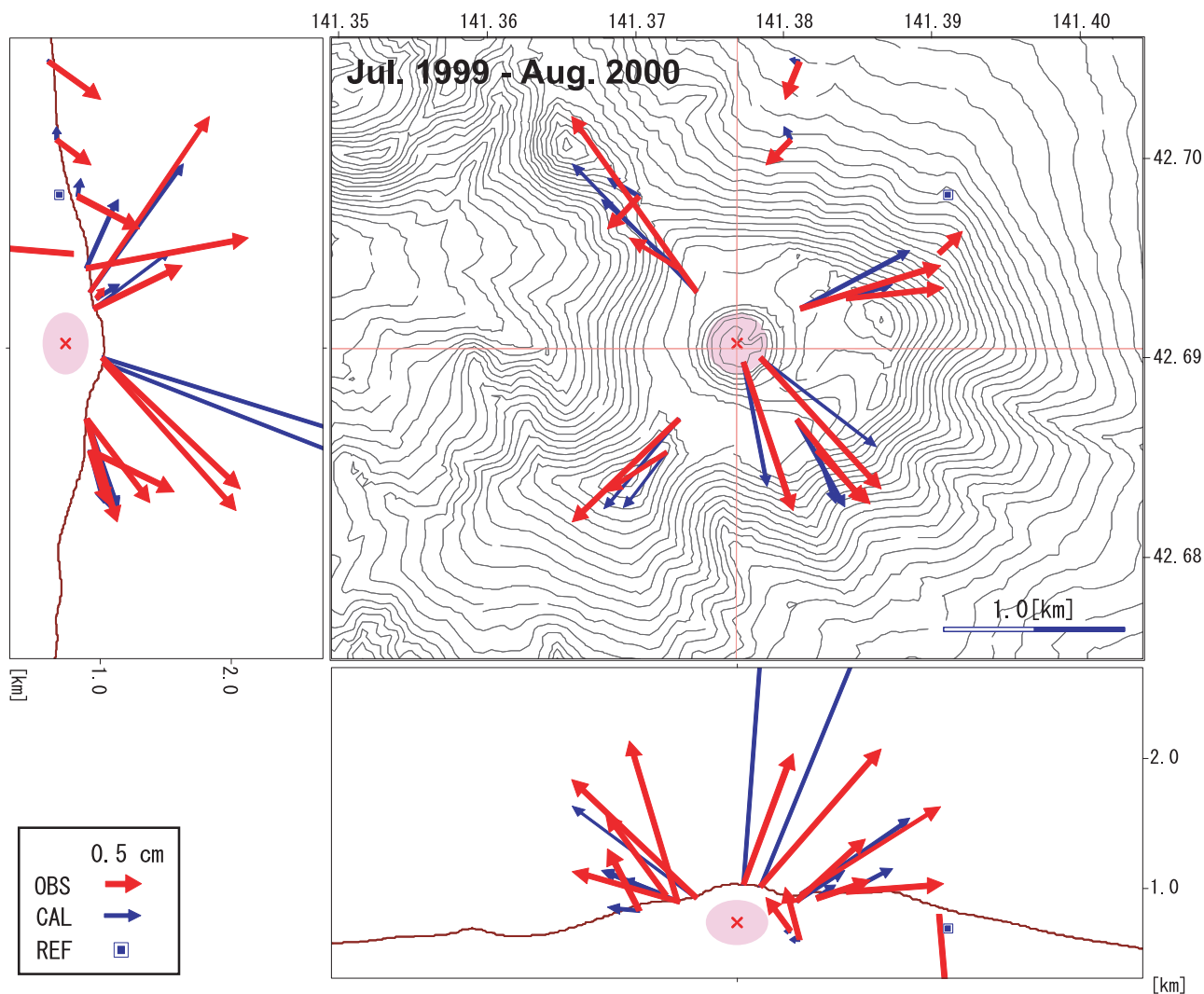


Fig. 2.5.7 Comparison of calculated displacement vectors (blue arrow) and observed vectors (red arrow) on Tarumae volcano from July 1999 to August 2000. Pink circles indicate the pressure source (depth = 730 m asl (310 m from the top of dome), $\Delta V = 1.9 \times 10^4 \text{ m}^3$), estimated by the modified Mogi model (see section 1.4 in this report) from the horizontal vectors. The radius of the pressure source was calculated from $\mu = 4.6 \text{ GPa}$, $\Delta P = 7 \text{ MPa}$ (hydrostatic pressure at source depth, $\rho = 2300 \text{ kg/m}^3$) in $\Delta V = \pi a^3 \Delta P / \mu$.

7日と10月15～17日に行われた観測から求められた。この地震に伴って国土地理院のGPS観測網GEONETによって水平方向では最大98cm、鉛直方向では最大28cmにのぼる大きな変動が観測され、震源断層モデルが推定された(国土地理院, 2004)。この断層(断層パラメータ: 東経144.64度, 北緯42.05度, 深さ15.7km, 長さ92.0km, 幅90.0km, 走向角241°, 傾斜角23°, すべり量4.84m, すべり角度124°)によって、樽前山で南東方向に約13cm, 下向きに約1.2cmの変位が生じる。FE2基準にして見た時の各観測点におけるこの断層運動によって生じる水平変位の分布をFig. 2.5.8(a)に示す。変動量は大きい観測点でも高々2mmであるが、この期間の観測値をモデル化するには無視し得ない量である。

前述したようにD1観測点を設置している岩からは噴気が出ていたことや経年的な変動量が多いこともあり、この点を除いたデータに標高補正茂木モデルを当てはめて圧力源を推定すると、単一の圧力源ではうまく説明できず、ドーム中心直下海拔760mでの膨張($\Delta V = 3.0 \times 10^3 \text{ m}^3$)と樽前山の北東方FE2観測点付近海水面での収縮($\Delta V = -1.6 \times 10^4 \text{ m}^3$)とで説明可能である(Fig. 2.5.8(b))。桃色、水色の×印は各々膨張源、収縮源の位置)。モデル推定の際には、岡田モデルで推定した十勝沖地震断層によって生じる地殻変動量も考慮している。このようにして推定したドーム直下の圧力源の位置は1999～2000年に見られた変動源とほぼ一致し、体積増加量は数分の1である。なお、D1を含めてモデリングした場合、推定される二つの圧力源の水平位置はほとんど変

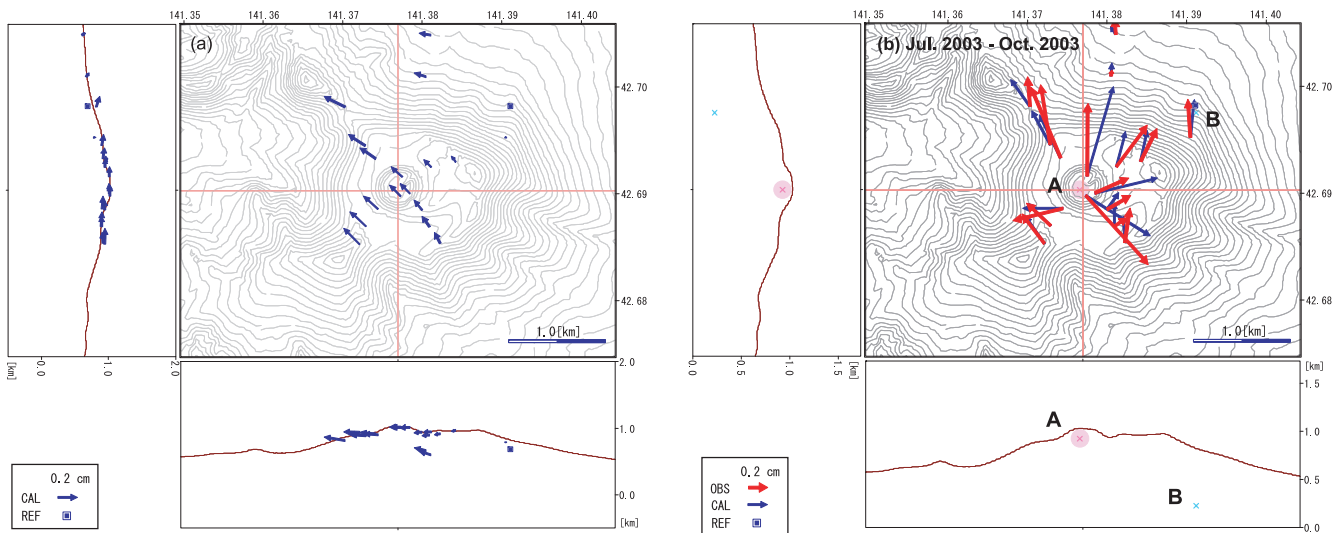


Fig. 2.5.8 (a) Displacements to the site FE2 calculated for a model fault of the 2003 Tokachi-Oki earthquake. (b) Comparison of the observed horizontal displacements (red arrow) and calculated displacements by the pressure sources and by the fault of the 2003 Tokachi-Oki earthquake (blue arrow) on Tarumae volcano from July to October 2003. Pink and light blue cross marks indicate the pressure sources, estimated by the modified Mogi model from the horizontal vectors except site D1. A: inflation source, depth = 760 m asl, $\Delta V = 3.0 \times 10^3 \text{ m}^3$. B: deflation source, depth = -0 m asl, $\Delta V = -1.6 \times 10^4 \text{ m}^3$.

わらず、標高は約230m 高く、体積変化量は約半分となる（各々、 $h = 990 \text{ m}$, $\Delta V = 1.2 \times 10^3 \text{ m}^3$, $h = 230 \text{ m}$, $\Delta V = -8.8 \times 10^3 \text{ m}^3$ ）。

2.5.1.3 樽前山における地磁気繰り返し観測

(1) 観測方法

地磁気繰り返し観測は札幌管区気象台により1998年7月から年1回ないし2回行われている（札幌管区気象台, 1999, 2001, 2002, 2003, 2004a, 2004b, 2005a, 2005b；札幌管区気象台火山監視・情報センター, 2006, 2007）。札幌管区気象台（1999）他によると観測方法は以下の通りである。

繰り返し観測点はドームを中心に南北約3 km, 東西約1 km の範囲に予備的な観測で磁場傾度が20nT/m 以内の15点が選定され、プラスチック製標識杭が設置されている。また、日変化など火山活動とは関係がない外部擾乱の影響を補正するためドーム中心から北東約1.4km の北側山麓（Fig. 2.5.3の REF）に参照点を選定されている。参照点では国際電子工業製 PMP-701型プロトン磁力計により繰り返し観測期間中の全磁力毎分値が測定された。繰り返し観測点では国際電子工業製 PMP-502型プロトン磁力計を用い、観測ごとに標石からの高さ2.20m にセンサーの中心がくるようにを設置し、10秒間隔で5分間の測定が行われた。携帯型の磁力計を用いることや、観測点の環境が必ずしも万全ではないことから、繰り返し観測のそれぞれの測定データは、参照観測点に比べると大きなばらつきを伴うことがある。そのため、ばらつきの影響を小さくするために、各分の00秒を中心とする前後30秒間、計1分間の測定値を平均し、各分00秒の観測値とする。次に、この値と参照点における毎分の観測値との差を求め、5分間平均し最終的な観測値（全磁力相互差）とする。2001年6月にはドーム付近の詳細な全磁力分布を把握するため繰り返し観測点が2点（M16, M17）追加され、2004年5月には、地形が険しい3地点（M2, M11, M12）での測定が中止され、新たに M18～M20の3地点が追加されている。

(2) 観測結果

Fig. 2.5.9に全磁力相互差の時間変化を示す。図の上部に赤線で示したものはドーム北側での測定、下部に黒線で示したものはドーム南側での測定、緑色で示したものはドーム東側での測定である。1999年7月から2000年10月にかけて、M15を除く北側の測点で増加、南側で減少という、系統的な変化が現れている。Fig. 2.5.10(a)

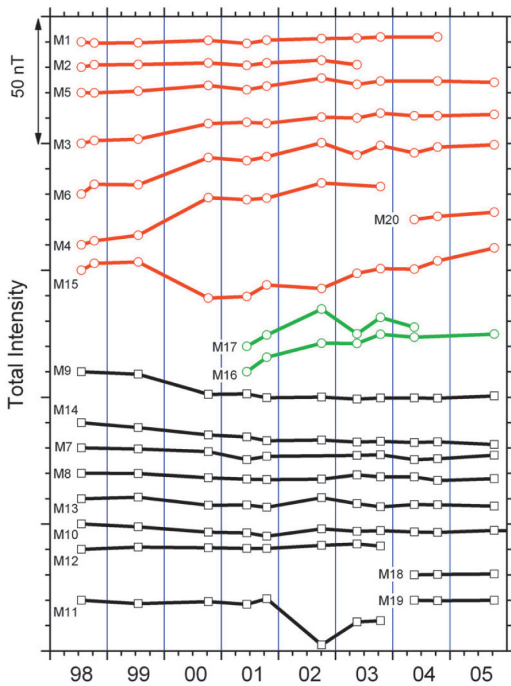


Fig. 2.5.9 Total intensity variation at each observation point determined by repeated geomagnetic observations on Tarumae volcano. The red lines indicate the values on the north side of the Tarumae lava dome, the black lines indicate the values on the south side, and the green lines indicate the values on the east side. These observations were carried out by the SDMO.

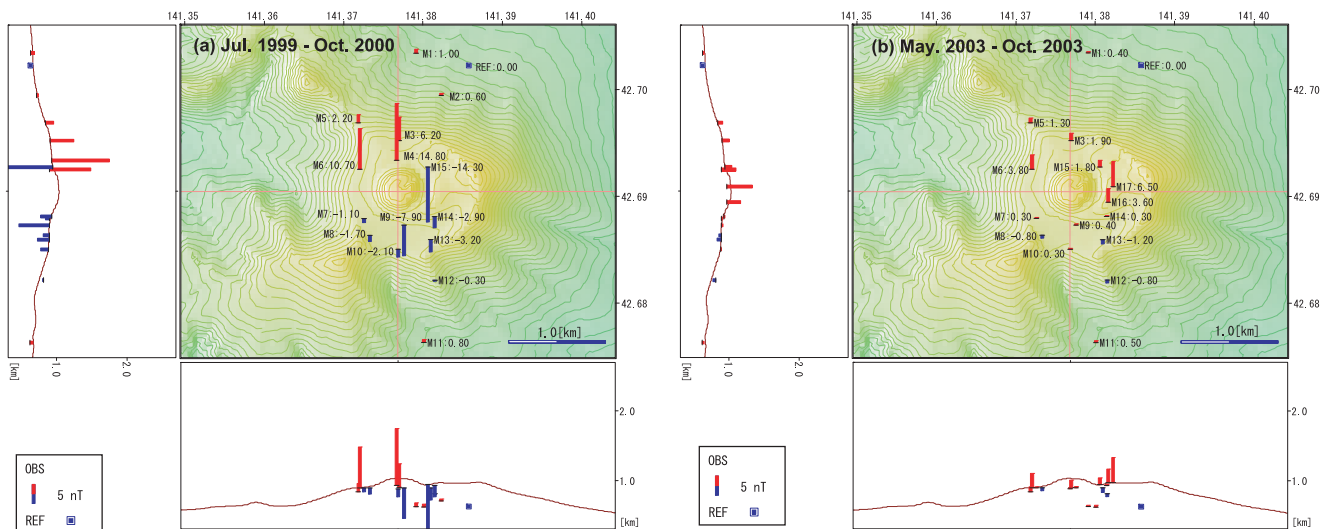


Fig. 2.5.10 Distribution of total intensity measured from July 1999 to October 2000 (a), and from May to October 2003 (b).

にこの期間の全磁力変化量の分布を示す。ドーム北側の M 4 で 14.8 nT 増加，南側の M 9 で 7.9 nT 減少している。この変化はドームの地下で岩石が磁化を失った時，すなわち消磁した時に期待される分布である。

Fig. 2.5.10 (b) に 2003 年 5 月 16～19 日と 2003 年 10 月 16～18 日の間の全磁力変化量の分布を示す。ドームが消磁した時に一番大きな変化が期待される M 4 での測定値がないため，明瞭ではないが，微小な消磁パターンが見えている。

2000 年以降，M 4 で 2.3 nT/年の増加，M 9 で 0.5 nT/年の減少と長期的に消磁傾向の変化を示している。M14, M15 で大きな変動を示すが，M14 は A 火口の，M15 は北東噴気 (Fig. 2.5.1 の F) の近くに位置し，高温の火山ガスによる熱消磁など，ごく近傍の岩石の磁化変化の影響を受けているためと思われる。M16, M17 も大きな全磁力変化を示す。これらの地点は M14, M15 よりも噴気孔からは遠く，また，ドーム直下に消磁域が存在する場合，ドームの北麓や南麓の観測点よりも地磁気変化は小さくなる地域にあたり，このように大きな変動が現れ

た原因は現時点では不明である。

(3) 1999～2000年の地磁気変化を説明する消磁モデル

1999年7月から2000年10月の観測で得られた地磁気変化を説明するため、球形の領域が消磁したとして、その位置と大きさを推定した結果を Fig. 2. 5. 11(a) に示す。縦棒の左側に観測値、右側に求めたモデルによる計算値を示す。桃色の領域が消磁域である。消磁域の位置はドームの北西部、海拔670m、消磁によって失われた磁化モーメントは $8.7 \times 10^6 \text{ Am}^2$ と求められる。岩石の磁化を 1 A/m と仮定し、この磁化がすべて失われるとすると球の半径は約130m となる。図の円はこの大きさを描かれている。Fig. 2. 5. 11(b) は (a) 図の中心の南北線に沿った線上の地表面における地磁気変化と、観測値をこの線上に投影した位置にプロットした図である。M15を除き、このモデルで観測値を非常によく説明できることが分かる。消磁域が円柱であるとして推定しても、その中心の水平位置は変わらない。海拔は700mと若干浅くなり、円柱の半径は160m、高さは100mで、消磁域の体積は浅くなった分、小さくなる。推定パラメータが多くなる分、球状の消磁域を仮定するよりも残差は小さくなっている。この円柱の半径はドーム頂部の平坦な部分の大きさに近く、興味深い。

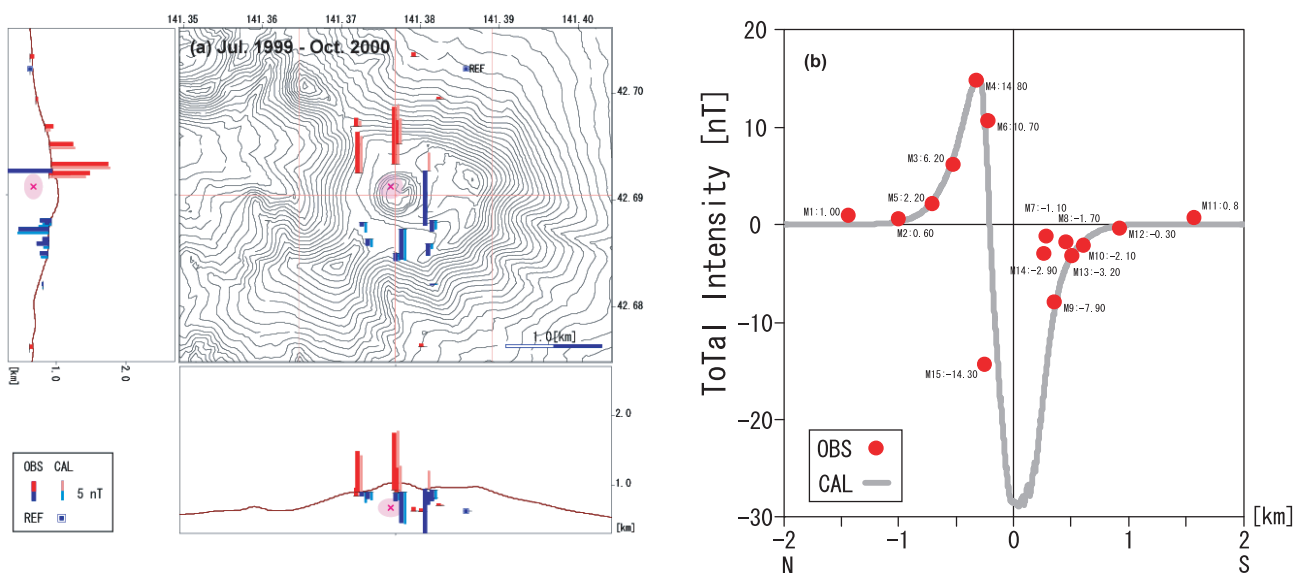


Fig. 2.5.11 (a) Comparison of calculated total intensity determined by the demagnetized model (right side bar) and observed ones (left side thick bar). The pink circle indicates the demagnetized source, estimated as a magnetic dipole (depth = 670 m asl., dipole moment = $8.7 \times 10^6 \text{ Am}^2$). (b) The north-south cross section along the red vertical line in Fig. 2.5.11(a).

(4) 2003年5～10月の地磁気変化

Fig. 2. 5. 10(b) に微小な消磁パターンが見えることを述べた、しかし、この変動を消磁モデルに当てはめるとドーム北西の M6 観測点に引きづられて、消磁域が求まる。Fig. 2. 5. 8(b) で示したドーム直下の圧力源が消磁したとして、その時生じる全磁力変化量の分布を求めると、Fig. 2. 5. 12のようになる。この図で各観測点の右側の縦棒が計算値、左側のが観測値である。観測値がない地点の計算値も表示している。このモデルで求められる全磁力変化量は M6 よりも東側観測点で大きくなり、ドームの南麓の観測点でも小さいものの増加となる。これらのパターンは観測値と比較的合っていると言えなくもない。しかし、変化量が小さな測点が多く、ドーム直下で消磁があったかどうかの結論は出せない。

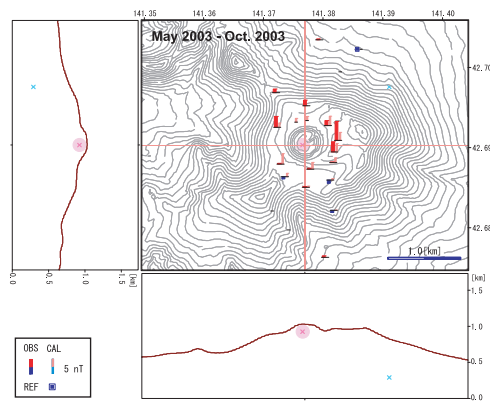


Fig. 2.5.12 Comparison of calculated total intensity by the demagnetized model (right side bar) and observed ones (left side thick bar). Pink circle indicates the demagnetized source given as the same region as the pressure sources presented in Fig. 2.5.8 (b).

2.5.1.4 有限要素法を用いた地殻変動源の検討

1999～2000年のGPS繰り返し観測値に標高補正茂木モデルを当てはめて推定した圧力源の深さは地表面下300 m程度で、圧力変化量を静水圧と置いて推定した圧力源半径は160mであった。樽前山におけるGPS繰り返し観測網はドーム中心から2 kmの範囲にあり、基線解析の基準点としたFE2とドーム上の観測点との標高差は300mほど、仰角にして22度にもなる。また、比高約100m、直径約500mのドーム上にも観測点を配置している。このように観測点が分布する範囲に比して、標高差が大きく、特異な地形上に位置する観測点もあり、また、圧力源も深さに比して十分小さいとは言えず、標高補正茂木モデルでは変動量を精度よく表現できないと想像される。このため、樽前山の地形を組み込んだ三次元有限要素モデルを作成し、山体内の種々の位置に種々の大きさの球状圧力源を配置した時に生じる地殻変動量を求め、これらと観測量とを比較することで、観測された地殻変動分布を最も良く説明できる最適な圧力源の大きさと位置を推定した。

1.1.1項で述べた、有限要素モデルによる計算精度とモデルサイズとの関係から、圧力源深さDと同程度の距離まで上下変位を1%の精度で求めるにはDの15倍程度のモデルサイズで良く、この時3Dの距離では92%の精度で上下変位が求められる。想定される圧力源の深さに海水面までを想定したとしても、ドーム頂部からの深さは1 kmであることから、モデル領域は一辺12km、高さ15kmの六角柱とした。地形は国土地理院50mメッシュ数値標高データを用いて1.1.2項の方法で、中心部50m、中間部150m、周辺600 mの正三角形メッシュで表現した。但し、支笏湖の湖底地形はモデル化していない。モデル底面は半径方向1 kmで分割し、地表面、圧力源表面に向けメッシュサイズが次第に小さくなるように四面体十節点要素(1.1.1項参照)でメッシングし、要素数を約10万におさえた。Fig. 2.5.13はこのようにして作成した有限要素モデルである。圧力源表面に加わる圧力は13 MPa、剛性率は4 GPa、ポアソン比は0.25とした。有

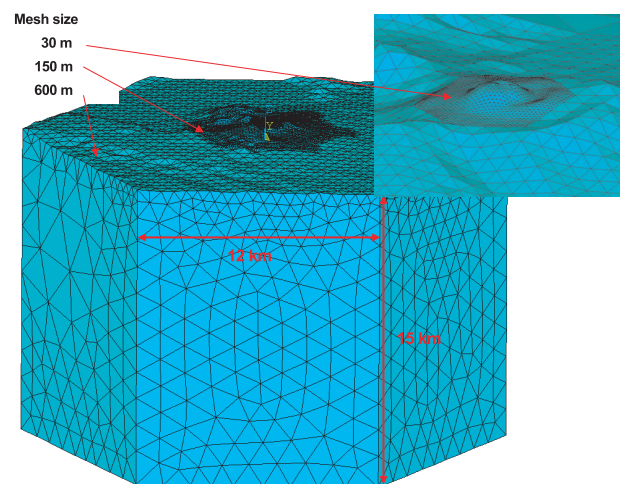


Fig. 2.5.13 3D FE model to simulate the deformation generated by a pressure source on Tarumae volcano. The region of the model is a hexagonal column with a side of 12 km and a height of 15 km. The topography is generated from 50 m mesh DEM of the GSI. The mesh size on the center part of the volcano is 50 m, that on the surrounding region of Tarumae is 150 m, and that on the top surface is 600 m. The bottom and lateral boundary conditions are fixed.

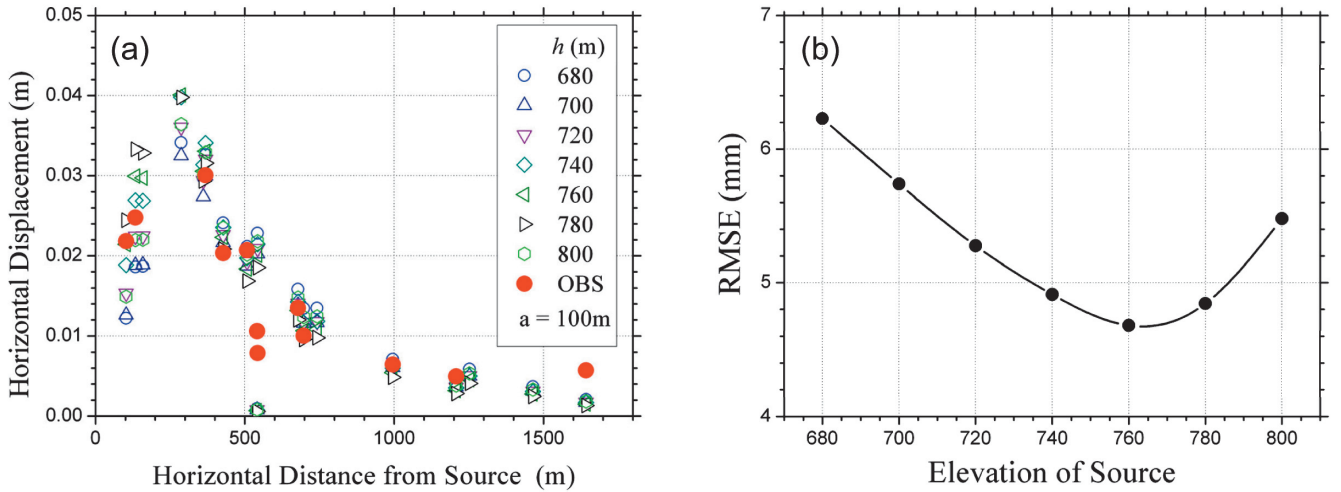


Fig. 2.5.14 (a) Relationship between the horizontal displacements and the horizontal distance from the pressure source. The displacements simulated by using the 3D FEM model placed at various depths (elevation(h) = 680 to 800 m asl.) with a radius of the pressure source (a = 100 m). (b) The root mean square error between the simulated horizontal displacements for various depths and observed ones.

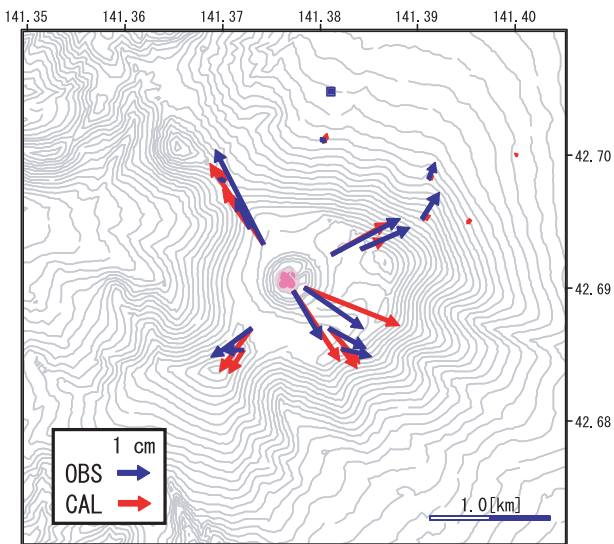


Fig. 2.5.15 Comparison of simulated displacement vectors by the pressure source (red arrow) and observed ones (blue arrow) on Tarumae volcano from July 1999 to August 2000. The pink circles with a cross indicate the pressure sources, chosen as the best-fit model ($h = 760\text{ m}$, $a = 100\text{ m}$) from the simulated model with various depths and radii.

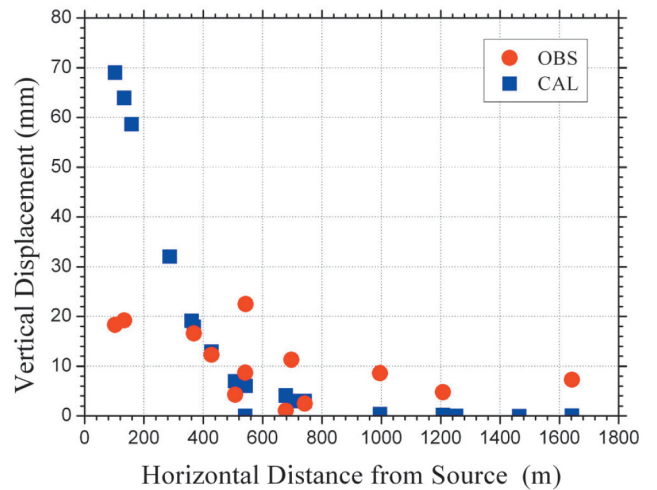


Fig. 2.5.16 Relationship between the vertical displacements and horizontal distance from the same pressure source as used in Fig. 2.5.15.

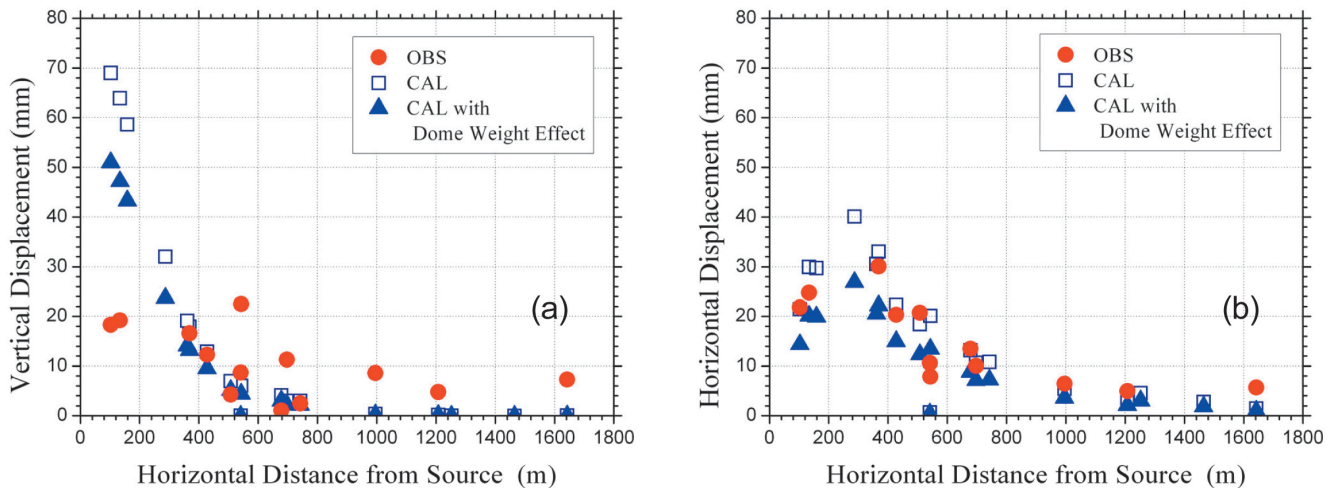


Fig. 2.5.17 Relationship between (a) the vertical displacements and horizontal distance, and (b) horizontal displacements. The weight of the dome (height = 100 m, radius = 150 m, density = 3000 kg/m³) is added to the pressure source (h = 760 m, a = 100 m, $\Delta P = 13$ Mpa).

限要素モデルの作成，解析には ANSYS Inc. の ANSYS を用いた。

圧力源はドーム中心の下にあるとし，深さを海拔680～800m，半径を40～100mの範囲で各々20m毎に圧力源を置いたモデルを作成し，地表面の変位量を計算した。計算値と観測値との比較にはFE 2からの水平変動量を用いた。地表面変動量は圧力源表面に加える圧力の大きさに比例していることから，圧力は一定として計算し，観測値と比較する際，残差が最小となるよう倍率をかけた。Fig. 2. 5. 14(a) は半径100mの圧力源を標高680mから780mに置いた場合の，水平変動量と圧力源からの距離との関係である，Fig. 2. 5. 14(b) は圧力源標高と残差二乗和との関係である。半径と残差との関係の図は省略するが，最適な圧力源モデルの半径は100m，標高は760mと推定された。結果的に標高補正茂木モデルによって推定された標高より若干浅いものの，ほぼ一致していた。最適モデルによる水平変動量分布を Fig. 2. 5. 15に示す。Fig. 2. 5. 16は有限要素法で求めた上下変動と圧力源からの水平距離との関係である（赤印は観測値）。ドーム上の2点の観測値は計算値の1/3以下となっている。上下変動量が小さくなる原因の一つとして考える，ドーム荷重の影響を有限要素解析によって評価した。球状圧力源による荷重に加え，半径150m，高さ100m，密度3000kg/m³の円柱の荷重をドーム底面に加えたときの地表面の変形量を計算した。Fig. 2. 5. 17(a)，(b) はこのようにして求めた，水平，上下変位量と圧力源からの水平距離との関係である（青三角印）。上下変位の観測値との差は小さくなったものの計算値はまだ観測値の2倍以上の大きさである。ドームの荷重の効果は無視できないものの，観測されたドーム上の上下変位量はこれだけでは説明できない。大気遅延量など観測値に含まれる問題，あるいはドームの物性値の与え方などドーム荷重の効果について評価が不十分であったことなどが想定される。今後，樽前山の三次元構造に関する情報を加え，再評価する必要がある。

2. 5. 1. 5 地殻変動，地磁気観測データを組み合わせた解析

Fig. 2. 5. 18にドームを挟む東西の観測点E 1とW 1間および南北の観測点N 1とS 1間の基線長の時間変化，ドームの北および南の地磁気観測点M 4，M 9の全磁力の変化を，A火口の温度観測データ，火山性地震の日回数（棒グラフ）とともに示す。1999年から2000年にかけて山体膨張と同時に消磁に伴う全磁力の変化が生じていたことが明瞭に示されている。この前にはA火口の温度が200℃前後から600℃前後にと高温化した。残念ながらこれらの観測は膨張，消磁変化が始まってから観測が開始され，いつからこの変化が始まったのかは分からない。これら一連の減少は地下の熱水流体などが関与した同じ変動源によって生じていることを伺わせる。

地殻変動データ，地磁気データを個別に解析して得られた各々の変動源の位置，観測値と計算値とを1枚にまとめた図を Fig. 2. 5. 19に示す。桃色の丸印が消磁域であり，赤色の×印が圧力源の中心位置（標高補正茂木モ

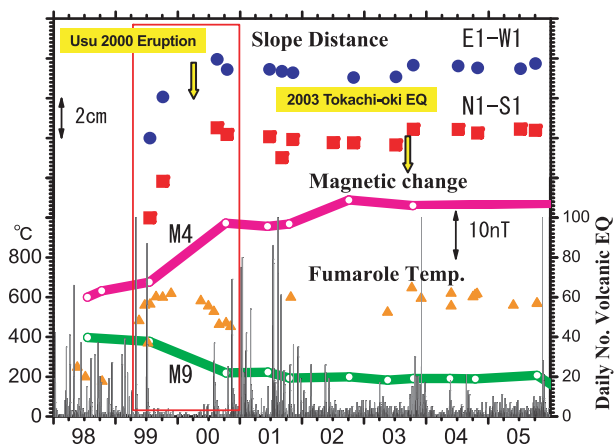


Fig. 2.5.18 Time variation of the change of the baseline across the dome (blue circles east to west (E1-W1), red squares north to south (N1-S1)), changes of total intensity at the most sensitive site (M4 north of dome, M9 south of dome) against a demagnetized region under the dome. The daily number of volcanic earthquakes (bar graph) and the temperature of vent A (orange triangle).

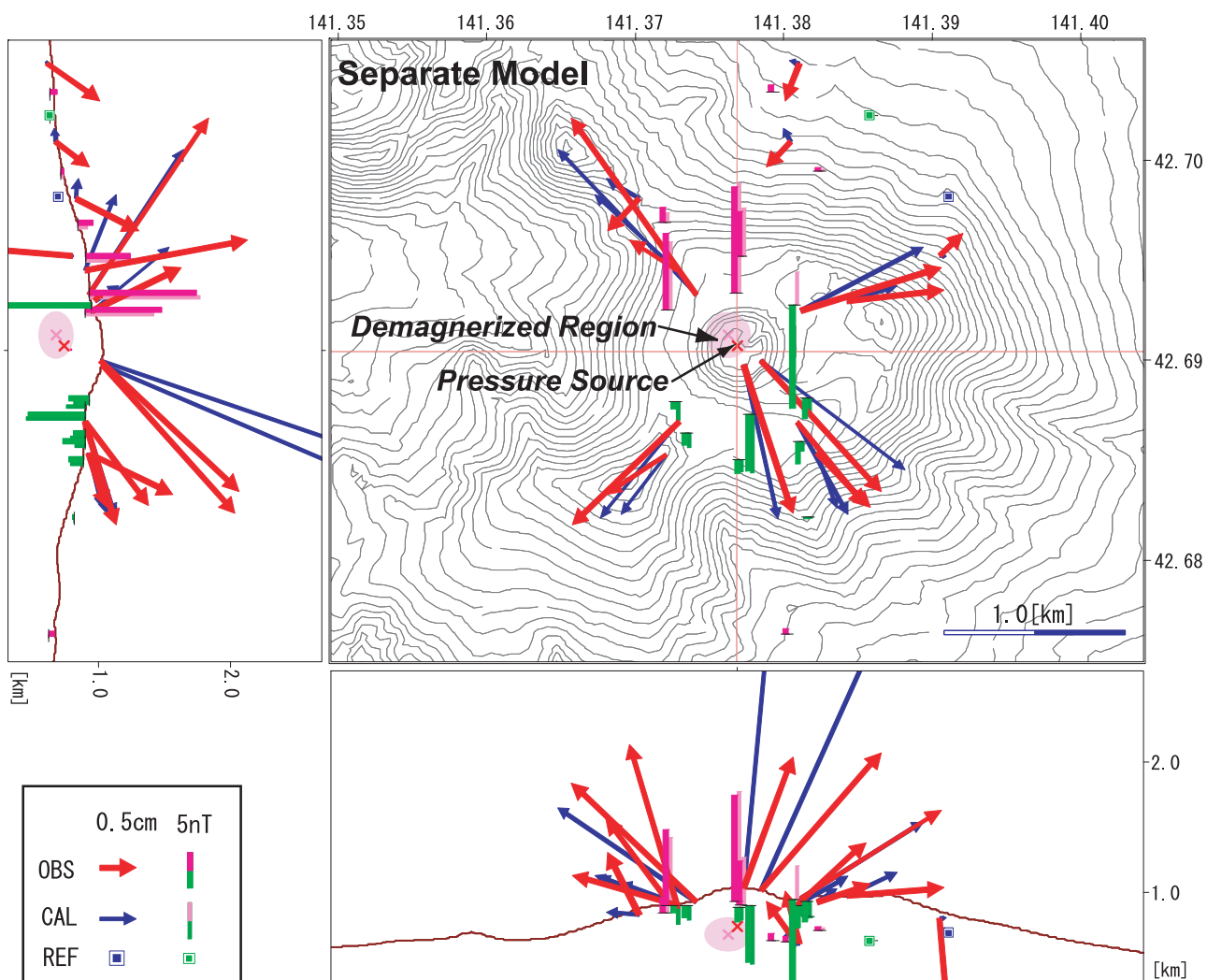


Fig. 2.5.19 Displacements and total intensity calculated by the separate models of deformation and geomagnetic data (same as Fig. 2.5.7 and Fig. 2.5.11(a)).

デルによる結果)である。圧力源はドーム中心直下海拔730m, 体積増加量 $1.9 \times 10^4 \text{ m}^3$, 消磁域はドームの北西部海拔670m, 半径130m と, 圧力源と熱消磁域はほぼ同じ位置に推定され, 上記の想像を裏付けていると見ることができよう。そこで, 地殻変動と地磁気変化が同じ変動源によって生じていると考えてモデル推定を行う。このために, 1.5節で紹介した火山用地殻活動解析支援ソフトウェアに組み込まれた, 地殻変動, 地磁気データ統合解析機能を利用する。このソフトウェアでは, 剛性率や岩石磁化率を仮定することで, 地殻変動データと地磁気データを組み合わせて変動源の位置, 大きさ, 圧力変化量を推定することができる。あるいは, 既知パラメータの組み合わせを変え, 例えば剛性率と圧力変化量を仮定して岩石磁化率を推定するということも可能である。ここでは, 剛性率として地震波速度などから推定した4 GPaを採用し, 岩石磁化率は安山岩の典型的な値1 A/m とするとドーム直下標高730m, 半径120m の領域で13MPa の圧力変化と熱消磁が生じたと推定される (Fig. 2.5.20)。この推定において, GPS 観測データ (ここでは水平変位を利用) と全磁力相互差それぞれの相対誤差が同じになるように重み与えている。密度を 2300 kg/m^3 とすると, 標高730m における静水圧は7 MPa となり, ここで求められた圧力変化量は静水圧の2倍となっている。剛性率は地震波速度構造などからある程度推定できる値であるが, 消磁が熱消磁で生じている場合, 岩石磁化率は温度に依存した値であり, また, その領域内の岩石がすべて消磁するとは限らないため, 不確定な要素が大きい。また, 圧力変化量はどのような値をとるかは定かではない。今回の事例の場合, 例えば, 磁化係数を0.5 A/m と仮定すると, 変動源の標高は730m, 半径は151m, 圧力変化量は7 MPa と推定され, 静水圧と等しくなった。磁化係数をもっと小さくすると, 変動源の半径は大きくなり, 圧力変化量は小さくなる。このため, どのような物理現象で, 消磁と体積膨張が生じているかを想定し, 岩石磁化率と圧力変化量のバランスを取ることになる。また, 例えば, 熱水流体によって体積膨張をもたらす圧力源の場合, 熱水流体が周辺に放出, 散逸する際に膨張源周辺部であらたな消磁域が発生すると考えると, 磁化率を小さく置いて, 変動源の大きさを推定することが想定される。

2.5.1.6 樽前山で観測された地殻変動, 地磁気変化と火山活動

前述したように1999年から2000年にかけて, 樽前山ドームが膨張する地殻変動と, ドーム下で消磁する地磁気変化が同時に観測された。このような山頂ドーム直下を力源とする地殻変動は, 2000年8月までは膨張傾向にあったが, 2000年8月と10月の間では膨張が停滞もしくは収縮に変わってきているようにみえる。一方, ドーム下での消磁をあらわす北側観測点で全磁力の増加, 南側で減少というパターンは2002年頃まで継続している。また, ドーム南東部にあるA火口の温度観測によれば, 1998年10月には約 200°C であった温度が1999年5月には 500°C 程度まで急上昇し, さらに同年11月には 619°C を観測した。しかし, 2000年の観測では, 5月に 582°C を観測以降次第に温度が低下し, 10月の観測では 471°C であった。このように地殻変動と地磁気変化, A火口の温度の時間的な変化にはよく似た傾向がみられる。前項で述べたように, 地殻変動と地磁気変化は同じ変動源を起源として発生していると考えられ, その変動源はドーム直下標高730m 付近にあることが分かった。これらのことから, ドームの下部に注入された熱水あるいは過熱蒸気などによって地下の圧力が増大し地殻変動を引き起こすとともに, 岩石が加熱されて消磁し, 注入された高温の火山ガスがA火口を通して, 放出されることにより火口温度が上昇したと考えることができる。自然電位観測によってもドーム下で熱水活動が推測されており (宮村, 2004), この考えを支持している。

1999年4月に顕著な群発地震活動があったが, 7月の群発地震活動後は低調となり, 2000年7月から再び地震活動が活発化している。また, 2000年3月31日には樽前山の西南西47km に位置する有珠山が22年ぶりに噴火活動を開始した。

地震活動と比較してみると, これらの変化は-1999年5月以前のGPS 観測データがないこと, 連続観測でないので詳しいことはわからないが-1999年5月1~3日に発生した群発地震活動が契機となって変化し始めたように推察される。一方, 地殻変動とA火口温度の変化が起こっている間の地震活動は低調である。また, A火口温度の時間的推移について, めのこによりピーク時を推定すると2000年3月下旬~4月上旬頃となる。近接する有珠山の噴火が同年3月31日に発生していることと考え合わせると, 北海道南西部の火山の噴火の原動力を解明

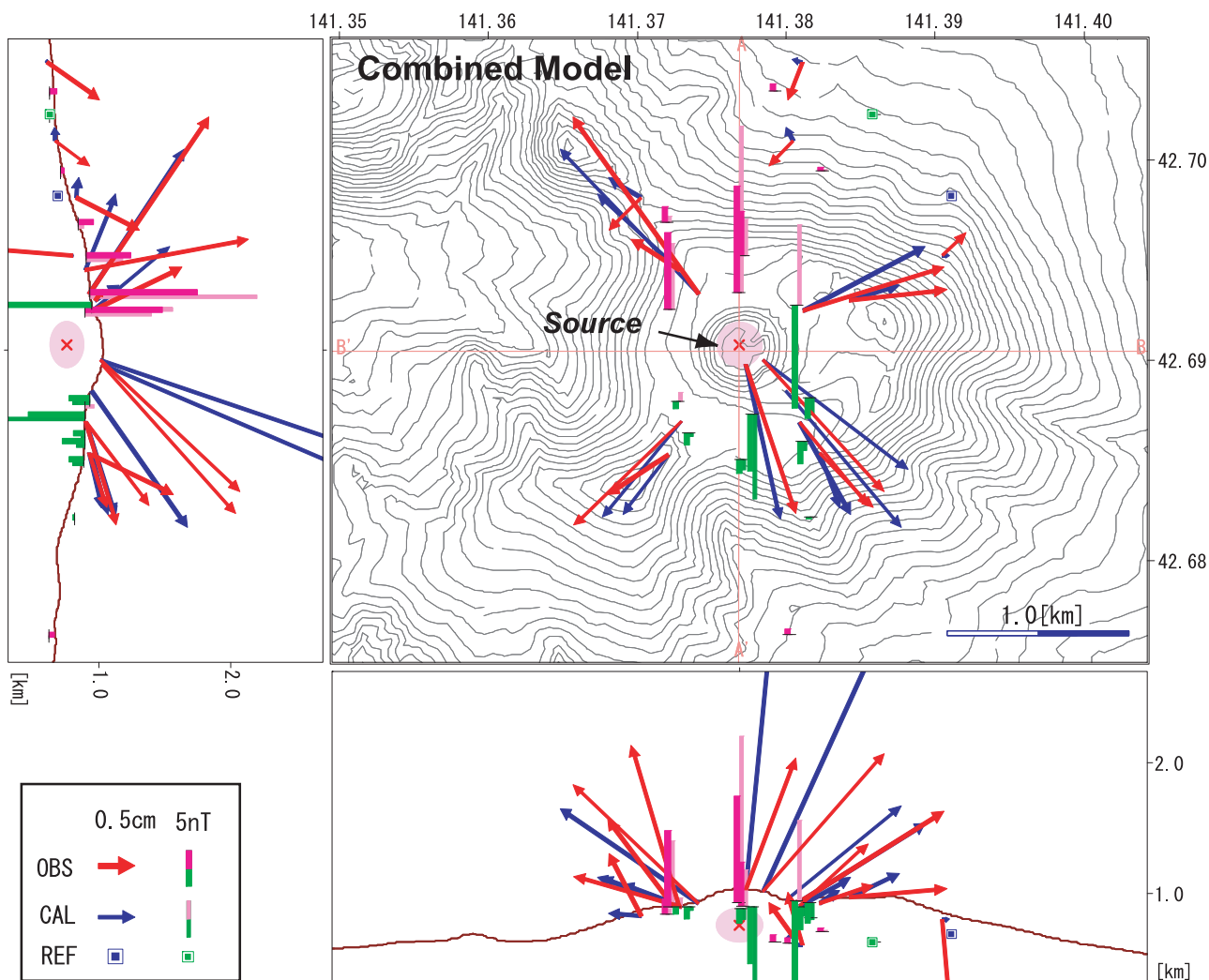


Fig. 2.5.20 Comparison of simulated and observed data. The source is estimated from a combined modeling with the deformation and geomagnetic data.

していく上で着目しておきたい事である。

2003年7月から10月のGPS観測でもドームが膨張する変動が捉えられたが、この期間中の9月26日に気象庁マグニチュード8.0の十勝沖地震が発生している。この時期の地磁気変化についてはドーム北麓のデータが得られなかったこともあり、モデル化できないが、自然電位観測では2003年の観測時も、2000年と同様の異常が観測されており、規模は小さいものの、2000年と同様の変動があったものと思われる。十勝沖地震の直後から群発地震活動が始まるなど地震活動も活発化した。2003年9月26日から10月に監視カメラで発光現象が観測され、その直後に行われた現地観測で、B噴気孔周辺で噴出物の堆積や硫黄の燃焼が確認された(札幌管区気象台火山監視・情報センター, 2003; 寺田・他, 2004)。有珠山の噴火活動が樽前山の活動に影響を与えた可能性があるように、十勝沖地震が樽前山の火山活動に影響を与えた可能性がある。

中禮(2002)は東北地方の火山活動と三陸沖の巨大地震とが関連性して発生していることを統計的に示したが、北海道地方の火山についても同様の傾向があるという(中禮, 私信)。地殻変動と地磁気変化、噴気温度が同期して変動する源であるドーム下での熱水流体系が応力状態の変化に敏感に応答し、有珠山噴火や十勝沖地震に呼応して火山活動に変化が生じたものと想像される。

(福井 敬一)

謝辞

樽前山における GPS 繰り返し観測点網の構築は気象研究所経常研究「火山の噴火機構と活動予測に関する基礎的研究」(平成8~12年)によって中禮正明氏(当時気象研究所地震火山研究部第三研究室室長, 現地磁気観測所)が中心となって行った。GPS 繰り返し観測には札幌管区気象台, 苫小牧測候所の協力を得た。特に, 2001年7月, 9月の観測は苫小牧測候所職員によって実施されたものである。2001年11月以降の観測は(株)古野電気に委託して実施した。また, 2002年からは北海道立地質研究所と共同して実施し, 高見雅三, 田村慎, 岡崎紀俊, 石丸聡各氏のお世話になった。地磁気繰り返し観測データ, 噴気温度データは札幌管区気象台火山監視・情報センターから提供を受けた。D2観測点は北海道大学有珠火山観測所が設営した観測点を利用させて頂いた。ここに記して以上の方々に感謝致します。

参考文献

- 中禮正明, 2002: 東北日本における火山噴火および内陸地震 ($M \geq 6.2$) と三陸沖の巨大地震 ($M8$ クラス) との時間的関連性について. 地学雑誌, **111**, 175-184.
- 古川竜太, 1998: 樽前火山. フィールドガイド日本の火山③北海道の火山(高橋正樹, 小林哲夫編), 築地書館, 77-91.
- 気象庁(編), 2005: 樽前山. 日本活火山総覧(第3版), 気象庁, 72-79.
- 国土地理院, 2004: 北海道地方の地殻変動. 地震予知連絡会会報, 第71号, 18-30, 135-187.
- 宮村淳一, 2004: 樽前山における自然電位繰り返し測定. 北海道大学地球物理学研究報告, **67**, 137-148.
- 茂木清夫, 1957: 桜島の噴火と周辺の地殻変動との関係. 火山, **1**, 9-18.
- Mogi, K., 1958: Relations between the eruptions of various volcanoes and the deformations of the ground surfaces around them. *Bull. Earthquake Res. Inst.*, **36**, 99-134.
- 森済・鈴木敦生, 2002: 樽前山北東登山道水準測量で明らかになった上下変動(1997-2001). 地球惑星科学関連学会2002年合同大会予稿集, V32-007.
- 札幌管区気象台, 1988: 樽前山. 北海道の火山, 77-108.
- 札幌管区気象台, 1999: 樽前山. 北海道地域火山機動観測実施報告, 第20号, 3-64.
- 札幌管区気象台, 2001: 樽前山. 北海道地域火山機動観測実施報告, 第21号, 59-110.
- 札幌管区気象台, 2002: 樽前山. 北海道地域火山機動観測実施報告, 第22号, 3-37.
- 札幌管区気象台, 2003: 樽前山. 北海道地域火山機動観測実施報告, 第23号, 3-34.
- 札幌管区気象台, 2004a: 樽前山. 北海道地域火山機動観測実施報告, 第24号, 65-94.
- 札幌管区気象台, 2004b: 樽前山. 全磁力繰り返し観測結果. 第98回(平成16年6月30日)火山噴火予知連絡会資料.
- 札幌管区気象台, 2005a: 樽前山. 繰り返し観測による全磁力変化. 第100回(平成17年2月23日)火山噴火予知連絡会資料.
- 札幌管区気象台, 2005b: 樽前山. 繰り返し観測による全磁力変化の様子. 第102回(平成17年11月2日)火山噴火予知連絡会資料.
- 札幌管区気象台火山監視・情報センター, 2003: 火山活動解説資料, 樽前山, 平成15年10月号, 5p.
- 札幌管区気象台火山監視・情報センター, 2006: 火山活動解説資料, 樽前山, 平成18年10月号, 6p.
- 札幌管区気象台火山監視・情報センター, 2007: 火山活動解説資料, 樽前山, 平成19年10月号, 6p.
- 寺田暁彦・中川光弘・大島弘光・青山裕・神谷裕幸, 2004: 2003年十勝沖地震(MJMA 8.0)発生直後に樽前山で起きた高感度カメラで明るく見える現象. 地震研究所彙報, **79**, 17-26.