HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	連続および繰返しGPS観測による2006年雌阿寒岳小噴火に伴う地殻変動
Author(s)	岡崎, 紀俊; 高橋, 浩晃; 笠原, 稔; 志賀, 透
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 72, 191-201
Issue Date	2009-03-15
DOI	10.14943/gbhu.72.191
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/38153
Type	bulletin (article)
File Information	13_Okazaki.pdf

Instructions for use

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

北海道大学地球物理学研究報告
Geophysical Bulletin of Hokkaido University, Sapporo, Japan.
No.72, March 2009, pp.191-201

連続および繰返し GPS 観測による 2006 年雌阿寒岳小噴火に伴う地殻変動

岡崎　紀俊
北海道立地質研究所
高橋　浩晃・笠原　　稔
北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター
志賀　　透*
札幌管区気象台*

(2009 年 1 月 9 日受理)

Crustal deformation associated with the small eruption on March 2006 of Meakandake Volcano detected by continuous and repeated GPS observation

Noritoshi Okazaki
Geological Survey of Hokkaido
Hiroaki Takahashi, Minoru Kasahara
Institute of Seismology and Volcanology,
Faculty of Science, Hokkaido University
and
Toru Shiga*
Sapporo District Meteorological Observatory, Japan Meteorological Agency

(Received January 9, 2009)

Continuous and temporary dense GPS network in Meakandake volcano, eastern Hokkaido, operated by Geological Survey of Hokkaido, Japan Meteorological Agency and Hokkaido University, detected co-eruptive crustal deformation due to the 2006 small phreatic eruption. Although no deformation was observed at stations in foot of volcano edifice, large horizontal displacements

* 現所属：気象庁地震火山部火山課
* Present address: Volcanological Division, Seismological and Volcanological Department, Japan Meteorological Agency

with ~5cm were observed at stations in the northern part of Ponmachineshiri summit crater. We estimated crustal deformation models from ten stations data and obtained following findings; (1) stations in the northern part of summit crater indicate relative large horizontal displacement to northward, (2) displacements at stations in the southern part were relatively small, (3) estimated tensile faults were situated just beneath the new fissures on northwestern slope and summit crater in very shallow depth. These facts imply that the 2006 eruption was due to the intrusion of volcanic fluid, such as high pressure gas or supersaturated waters into the shallow part. This agrees with the result of petrological analyses study of eruption products.

Ⅰ．はじめに

2006 年 3 月 21 日の早朝，北海道東部の雌阿寒岳（標高 1,499m）で火山性微動を伴う小規模な噴火が発生した．これは 1998 年 11 月 8 日の小噴火以来 8 年ぶりのことである．この噴火は，これまで最も熱活動が活発であったポンマチネシリ火口南縁の火口群（96-1 火口，第 1 火口および第 4 火口など）からではなく，その北西の赤沼火口およびその外側の北西斜面で発生した．2 ヶ所とも噴火地点の標高は約 1,300m と同じであった．赤沼火口では火口底の北西部を主な噴火地点（赤沼 06 火口群）とする環状の亀裂が形成され，径数 10cm 程度の噴石および火山灰が噴出した．一方，北西斜面では噴火口は形成されず，地表に長さ約 100m の北西－南東走向の亀裂（北西斜面 06 噴気孔列）が形成された．この噴火で噴出した火山灰は約 9,000 トンと推定され (廣瀬ほか, 2007)，1996 年および 1998 年の小噴火の規模とほぼ同程度であった．

北海道立地質研究所，札幌管区気象台および北海道大学地震火山研究観測センター（以後それぞれ地質研，気象台および北大地震火山センターと呼ぶ）は，これまで連携しながら雌阿寒岳の各種観測を実施してきた．それによれば，噴火前の活動状況は以下のように要約できる．96-1 火口の噴気温度は約 700℃（1999 年）から 300℃程度へと 400℃も低下するなど熱的には静穏状態に向かっていた．地震活動では 2004 年以降は火山性地震の発生頻度は月に 20～40 回程度で推移しており，火山性微動は 2003 年 1 月 1 日以降発生していなかった．また，GPS 連続観測および繰返し観測の結果でも火山活動の活発化を示す変化は観測されていなかった．このような状況の中，2006 年 2 月 18 日～19 日および 3 月 11 日～12 日にそれぞれ 2 日間で約 800 回にも及ぶ火山性地震が観測された．火山性微動も 2 月 18 日～20 日にかけて 5 回，3 月 19 日に 1 回観測され，3 月 21 日の小噴火発生となった（札幌管区気象台，2007）．噴火時には，山麓部での GPS 連続観測では観測されなかった地殻変動が山頂部で観測された（岡崎ほか，2007）．さらに，小噴火前から実施していた GPS 繰返し観測の結果，山頂部の観測点において噴火の前後で地殻変動が観測された．ここでは，これらの観測結果から小噴火に伴う地殻変動モデルを推定し噴火過程について検討する．

II．GPS 観測網

地質研と北大地震火山センターは，火山性地殻変動を検出する目的で 1999 年に GPS の機動観測点を雌阿寒岳周辺に 12 点設置し，既存の 2 点と合わせて 14 点（ポンマチネシリ 8 点；ME01～08，ナカマチネシリ 6 点；ME51～56）からなる GPS 繰返し観測網を構築した（高橋ほか，2002）．一方，気象台は 2001 年に雌阿寒岳西麓域の 3 点（茂足寄；MASR，雌阿寒温泉；MAKO，オンネトー；ONNT）で連続観測を開始した．このうち MASR および MAKO では 1 周波受信機（古野電気 MG2110）を，ONNT では 2 周波受信機（Trimble MSAG）を使用し，観測データは電話回線によるテレメータにより 1 日 2 回回収している．さらに，2003 年には山頂部で繰り返し観測を行うために観測点を 3 点（ME21，22，25）追加設置した．

地質研・北大地震火山センターでは，山頂部での地殻変動観測を強化するために 2004 年にポンマチネシリ北側にある西山の ME08 を連続観測点に変更し，翌 2005 年には 96-1 火口の南西 150m 地点にも新たに観測点を設置（ME09）して連続観測を開始した．両観測点ともに 1 周波受信機（古野電気 MG2110）を使用し，観測データは携帯電話を用いたテレメータシステムで 1 日 1 回回収するように設定している．

これにより，2006 年噴火前には気象台・地質研・北大地震火山センターによる連続観測点が 5 点，繰返し観測点が 15 点の合計 20 点からなる観測網となった（Fig.1）．気象台による連続

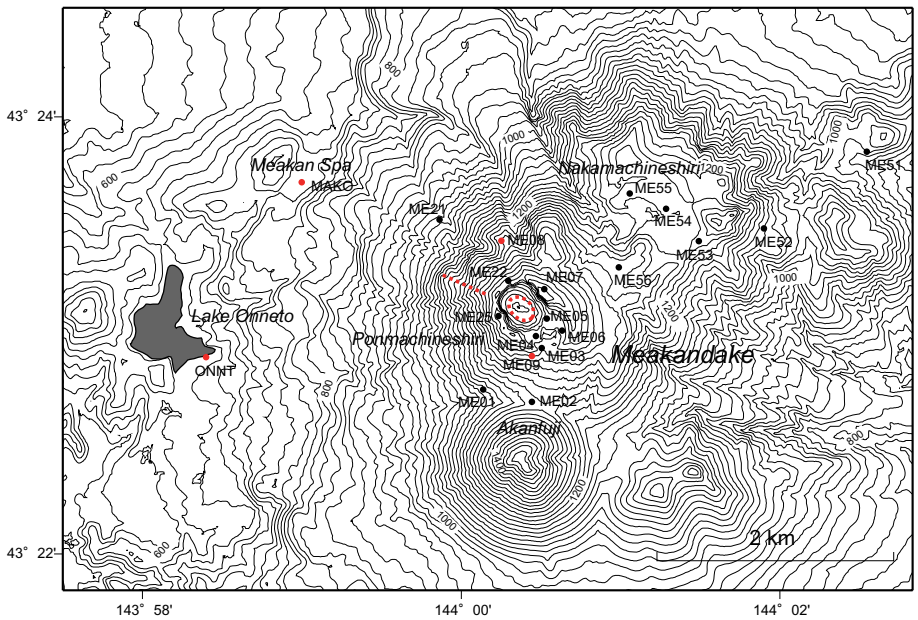

Fig. 1. Map showing the distribution of GPS stations on and around Meakandake volcano. Four-letter code is attached to each station. Red and black solid circles denote the continuous and temporary repeating GPS stations, respectively. Red dashed line and red dashed circle indicate fissure and ring fissure produced by the 2006 eruption, respectively.

観測では，観測当初に MASR が凍上により異常変動したものの，2003 年以降はほぼ順調であった．しかしながら，山頂部 2 点では携帯電話がつながらない，あるいは電源故障などの機器トラブルの発生により連続観測を通年維持することは困難であった．2006 年噴火前には ME09 では受信機が作動停止，ME08 では 2 月 26 日の暴風雪により受信機を覆っていたレドームが破壊され，受信機は作動していたものの固定ボルトから外れてしまった．このため，小噴火後の 4 月 5〜6 日に両観測点の復旧作業を行った（岡崎ほか，2007）．

一方，GPS 繰返し観測（キャンペーン観測）は，2000 年および 2001 年に北大地震火山センター・地質研が 2 周波受信機を使用して実施したのち（高橋ほか，2002），2003 年以降は気象台が 1 周波受信機を使用して年 2 回（春および秋）の頻度で実施している（たとえば火山活動解説資料）．2006 年は，北大地震火山センター・地質研が 4 月に 5 点および 8 月に 4 点で，気象台では 5 月，6 月および 9 月に 9 点で臨時 GPS 観測を実施した．観測の方法は，北大地震火山センター・地質研は高橋ほか（2002）に倣い 2 周波受信機（Topcon HE_GD_3）を使用し，移動観測方式により各点で 15 分以上の観測を行った．気象台は 1 周波受信機（古野電気 MG2110）を使用し，同時観測方式により電源に単 1 電池を使用しそれが消耗するまでの 2〜3 日間観測を行った．

III．観測結果および解析

1．GPS 連続観測

雌阿寒岳西山麓で実施している気象台の GPS 連続観測によれば，2003 年から 2007 年までの間に雌阿寒岳の火山活動に関連した地殻変動は認められなかった（札幌管区気象台，2007）．また，雌阿寒岳から約 9km 東方の阿寒湖畔に設置されている国土地理院の GPS 観測点，阿寒 2（GEONET）においても，2006 年小噴火前後における地殻変動は観測されなかった（国土地理院，2006）．このことから，雌阿寒岳山麓ではこの小噴火に関連した山体全体におよぶような有意な地殻変動はなかったといえる．

山頂部における観測点の変位については，山頂から約 2.5km 離れた山麓にある ONNT 点を基準として基線解析を行った．解析には古野電気 CAP-Win2 を使用し，1 時間ごとの座標値を計算した．Fig.2 に 2005 年 6 月から 2006 年 10 月までの ME08 および ME09 における成分変化グラフを示す．各点のグラフはそれぞれ上から南北，東西および上下成分を示している．上下成分については，基準点と観測点との標高差が約 600m と大きく大気中に含まれる水蒸気量の影響による誤差により変動が大きいため，以後の議論には水平成分のみを使用する．

ME08 では欠測期間のほかに前述のとおり受信機がボルトから外れていた期間がある．しかし，この受信機が外れていた期間の前後において北へ約 4cm，東へ約 1cm 変位しているので，これは噴火に伴う地殻変動であると判断できる．この地殻変動の発生時期については，岡崎ほか（2007）で詳細に検討した結果，3 月 21 日の 6 時〜7 時の間，ちょうど小噴火発生時（6 時 28 分頃発生）であり，変位量は北へ約 4.5cm，東へ約 1.5cm であったことが明らかとなっている．

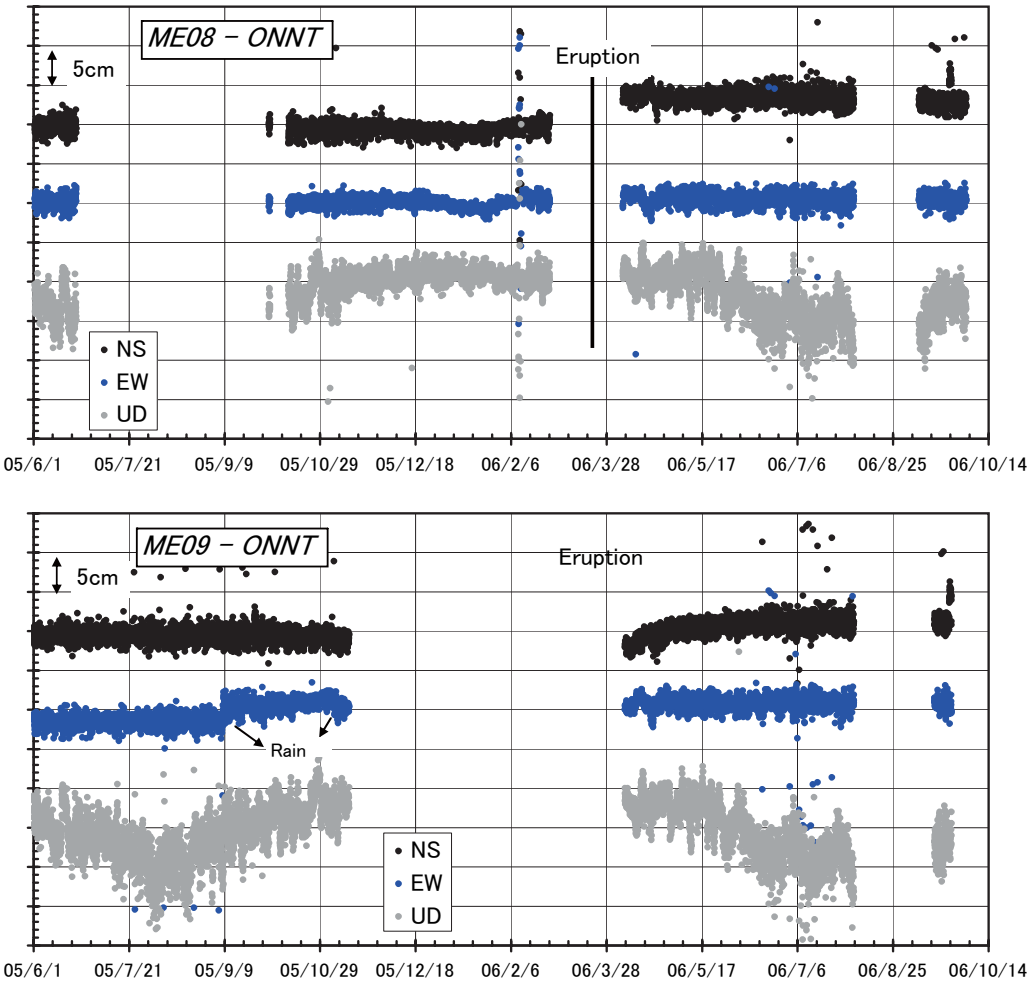

Fig. 2. Time-series of NS, EW and UD coordinates of ME08 (upper) and ME09 (lower) GPS station from June, 2005 to October, 2006 with respect to ONNT GPS station of JMA.

一方，ME09 では 2005 年 11 月から 2006 年 4 月上旬まで受信機の故障により欠測しているが，欠測前の期間において図中に矢印で示す東西成分のみのステップ状変位（2005 年 9 月 8 日に東へ約 2cm，11 月 7 日に西へ約 1cm）がみられる．しかし，これに対応する火山活動の変化はない．一方，阿寒湖畔のアメダス観測点の記録によれば，9 月 7 日から 8 日にかけて 193 mm，11 月 7 日には 70mm もの降水量が観測されているので，雌阿寒岳山頂部においても阿寒湖畔同様に大量の降雨があったと考えられる．2006 年 5 月の現地観測時に岩盤とボルトを再度固定していることから，集中的な豪雨によって岩盤とボルトの接着が緩んだためにこの変位が発生してしまったものと考えられる．このことに留意しながら，2006 年 4 月以降の各成分の座標値を比較すると，東西成分にはほとんど変化はないが南北成分では南へ約 1cm 変位している．降雨に起因する変動は東西成分であったことを考慮すれば，この変動は南北成分のみであるため

噴火による地殻変動の可能性が高い．ME09 点はその後 5 月上旬までにゆっくりと北へ約 2.5cm 変位し，その後はほぼ安定した状態が続いている．

2．GPS キャンペーン観測

小噴火前の GPS 繰返し観測は，前述のとおり 2003 年以降気象台が年 2 回の頻度で実施している．その結果によれば火山活動に関連する地殻変動は観測されていないため（札幌管区気象台，2006），ここでは 2005 年と 2006 年の観測データを解析した．解析方法は連続観測点と同じく ONNT を基準点として，1 周波受信機のデータは CAP-Win2 により 1 時間ごとの座標値を計算し，48 時間の値の平均値をその点の座標値とした．2 周波受信機のデータは観測時間が 15 分程度であるため，1 エポック（本観測では 30 秒）ごとの基線解析が可能な Geodetics RTD Version 3.0 を使用し，その平均値をその点の座標値とした．これらの結果を Table.1 に示す．なお，2006 年 8 月の観測結果は基準点である ONNT 点が欠測であったため表示していない．

各観測点における水平変位を見ると，2005 年は 1cm 以内であることから火山活動に起因した有意な地殻変動はないといえる．しかし，噴火後の観測結果では数 cm の有意な変位が認められる．Fig.3 に，2005 年から 2006 年の間の水平変位分布を示す．観測点数は各キャンペーンで異なり，火口から離れた点での観測頻度は少ない．Fig 3 には 2005 年 9 月～2006 年 5 月および 2005 年 6 月～2006 年 6 月の期間の水平変位を合わせて示す．なお，連続点である ME08 については，2006 年 2 月～4 月の水平変位を，ME09 については他の要因による変動もあるためここでは参考程度として 2005 年 11 月～2006 年 4 月の水平変位を示している．変位の分布はポンマチネシリ北側における ME08 や ME22 の変位量が北～北北東方向へ 3～4cm 程度と相対的に大きく，南側の ME03 や ME06 ではほとんど変動していない．南西側の ME25 や北東

Table 1. Horizontal displacements values at each GPS station between 200 and 2006 with respect to ONNT station of JMA.

Station		Date: 2005/6/7 ～ 2005/6/9		2005/9/27 ～ 2005/9/29		2005/10/12 ～ 2005/10/14		2006/4/6 ～ 2006/4/7		2006/4/19		2006/5/9 ～ 2006/5/11		2006/6/1 ～ 2006/6/2		2006/9/12 ～ 2006/9/14	
		Displacement (Standard deviation) [mm]															
ME02	NS	0.0	(5.3)							−8.5	−			−7.9	(4.4)	−5.0	(6.3)
	EW	0.0	(5.9)							2.2	−			0.9	(4.1)	−2.4	(8.8)
ME03	NS	0.0	(5.3)	−2.4	(8.0)					−19.5	−	−10.2	(5.6)			−10.4	(6.5)
	EW	0.0	(6.3)	−0.5	(5.6)					−2.4	−	0.6	(7.0)			−0.4	(7.8)
ME06	NS	0.0	(5.4)	−3.4	(8.8)					−2.0	−	−4.1	(5.0)			−9.4	(5.8)
	EW	0.0	(5.8)	−0.9	(5.3)					−4.2	−	−1.8	(6.3)			−7.8	(6.7)
ME07	NS	0.0	(6.3)	−1.8	(7.8)							1.6	(5.8)	0.4	(4.2)	5.8	(6.1)
	EW	0.0	(8.1)	−0.4	(5.4)							−12.6	(6.4)	−14.3	(3.7)	−19.6	(7.2)
ME21	NS	0.0	(6.0)											19.8	(4.5)	14.2	(6.5)
	EW	0.0	(6.0)											−1.7	(3.6)	1.5	(6.3)
ME22	NS	0.0	(6.7)	−2.5	(10.2)							31.8	(6.1)			18.2	(6.6)
	EW	0.0	(6.1)	−0.5	(6.0)							−3.3	(6.4)			−2.8	(7.3)
ME25	NS	0.0	(5.7)	0.4	(8.6)							−0.1	(6.9)			0.7	(7.8)
	EW	0.0	(6.3)	1.6	(6.1)							30.1	(6.5)			46.1	(8.8)
ME56	NS	0.0	(5.3)											9.5	(4.6)	9.0	(5.5)
	EW	0.0	(6.5)											2.9	(3.7)	3.5	(6.9)
ME08	NS	0.0	(6.3)			11.0	(9.3)	45.7	(4.6)			40.1	(5.8)	40.0	(5.4)	33.7	(6.0)
	EW	0.0	(6.4)			−5.6	(5.9)	8.5	(3.1)			4.2	(7.4)	1.7	(3.4)	2.4	(6.5)

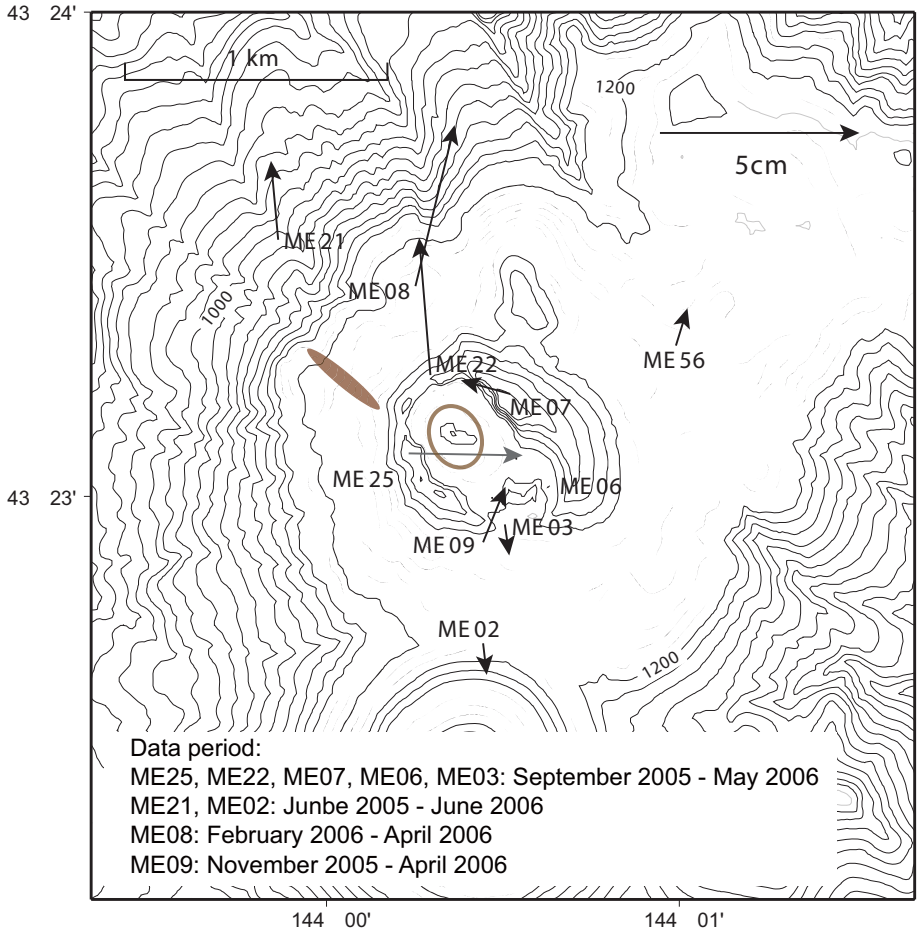

Fig. 3. Co-eruptive horizontal displacement vectors are shown to corresponding GPS stations. Data periods of each station are also indicated. Brown ellipse and circle show fissure and ring fissure produced by the 2006 eruption, respectively.

側の ME07 では放射状ではなく収縮するセンスに変位している．この変動パターンは単純な山体膨張ではないことを示しているので，変動源としては球状ではなく小噴火で形成した亀裂の開口などを考える必要がある．

IV．地殻変動モデルの計算

GPS 連続および繰返し観測で得られた小噴火前後の地殻変動は，ME08 が噴火時の変動を捉えたのみで，ほとんどが噴火後 1〜2 ヶ月程度経過したあとのものである．ME09 点では，噴火後の余効変動を捉えている可能性も否定できないが，2005 年における降雨に対応したステップ状の変動をみるとあくまで参考程度にせざるを得ない．そこで，各点で期間は多少異なるものの，得られた水平変位分布が噴火に伴って発生した地殻変動とみなし，その変動パターン分布を説明

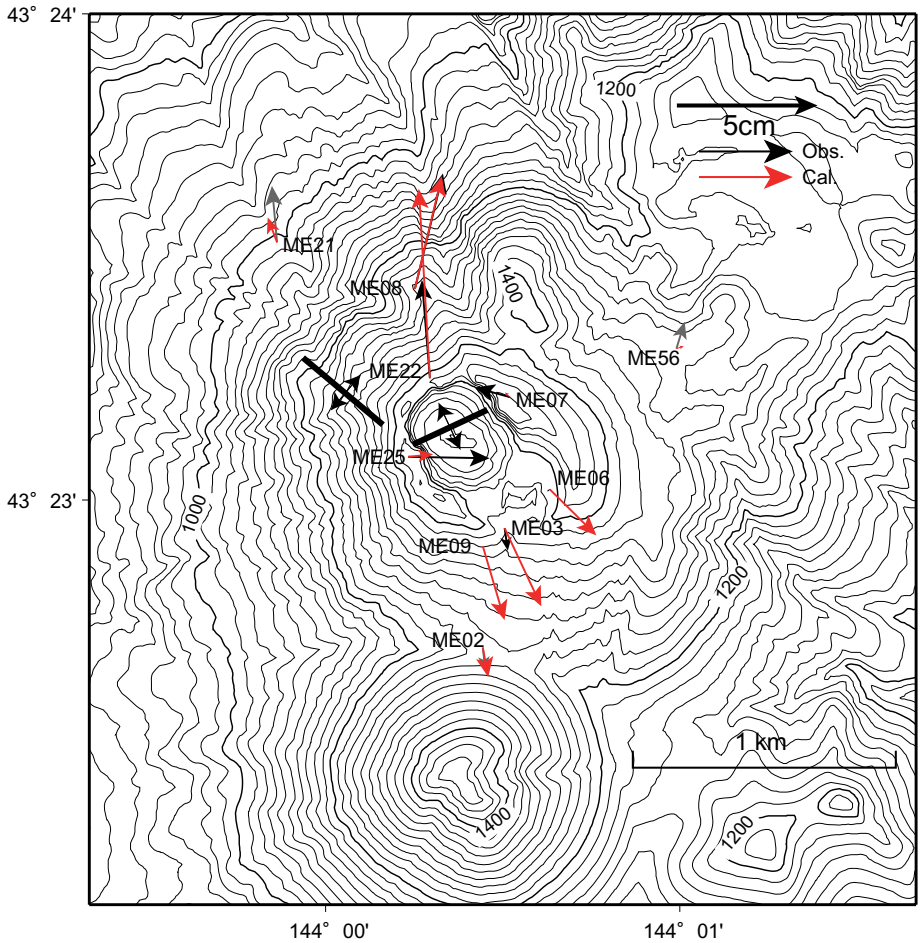

Fig. 4. A crustal deformation model by two open cracks for the 2006 eruption. Black and gray arrows attached to correspondence station codes denote observed horizontal displacements. Red arrows indicate calculated displacements from the model.

できるような地殻変動モデルの計算を行った．地殻変動の理論計算には Okada（1992）をもとにした MICAP-G（内藤・吉川，1999）を使用し，半無限弾性体を仮定して各点の変位を求めた．

地殻変動モデルとして球状力源を仮定すると，水平変位分布を説明することが困難であるため，噴火時に亀裂が開口した場合を考える．噴火地点は赤沼火口と北西斜面であることから，この 2 ヶ所において亀裂が開口したモデルで ME08 の変位を説明するように亀裂のパラメータを試行錯誤で求めた．その一例を Fig.4 に示す．このモデルは北西斜面に北西－南東方向の長さ 400m，地表から深さ 500m までの垂直な亀裂と，赤沼火口内に東北東－西南西方向の長さ 300m，地表から深さ 300m までの垂直な亀裂が，それぞれ 12cm，25cm 開いた場合であり，計算した水平変位を赤い矢印で示している．ME22 と ME25 の変位方向は観測結果と合うものの変位量は異なっており，ME03 や ME06 においても変位量が異なっている．したがって，このモデルを

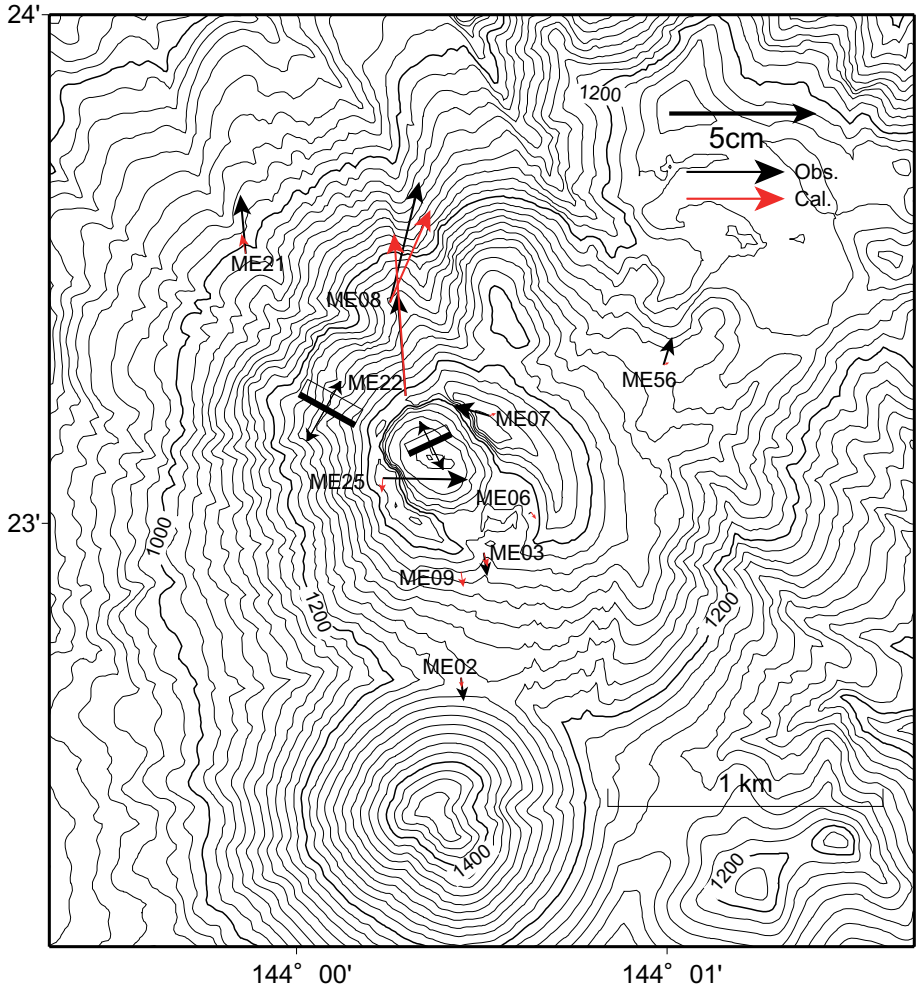

Fig. 5. A revised crustal deformation model for the 2006 eruption. Others are the same in Figure 4.

基にポンマチネシリの北側で変位が大きく，南側でほとんど変位しないようにモデルを修正した．Fig.5 はこのようにして求めたモデルによる計算結果を示している．モデルは北西斜面に北西－南東方向の長さ 230m，地表から深さ 500m までが北東に 80 °傾斜した亀裂と，赤沼火口内に東北東－西南西方向の長さ 165m，地表から深さ 100m までが北北西に 50 °傾斜した亀裂が，それぞれ 20cm，30cm 開いたとしている．これでも ME07 や ME25 の説明は困難であるが，モデル計算にむけての大まかな仮定や観測した水平変位の誤差等を考慮すれば，小噴火の地殻変動イメージングはこれで十分と考える．

V．考　　察

これまでの雌阿寒岳での GPS 連続および繰返し観測の結果を整理すると，1）小噴火前の地震多発期に対応した地殻変動は観測されなかった，2）地殻変動は噴火時に発生した，3）山麓では噴火時における地殻変動は観測されなかった，4）ポンマチネシリ北側では相対的に変位量は大きく，南側では小さいかほとんど変位しなかった，の 4 点が挙げられる．さらに，地殻変動モデルの計算結果から，5）地殻変動源は浅い，6）北西斜面の亀裂の開口が地殻変動の主要因，7）赤沼火口の亀裂の開口は地殻変動にあまり影響しない，ということができる．

これらのことから 2006 年小噴火の過程を推定する．噴火前の地震多発期に対応した地殻変動が観測されなかったことから，地震の原因は地下のマグマの移動に伴うものものではなく，高圧の火山性流体などが地表に向けて上昇し小噴火に至ったと考えられる．地殻変動は噴火時に発生し，しかも山麓では観測されなかったので，変動源の深さは地表か地下浅部でなければならず，モデル計算の結果も開口した亀裂の深さが地表から 500m 程度でありこれを指示する．よって，火山性流体が地表から噴出するときの亀裂形成が地殻変動源であると考えて良さそうである．2 ヶ所で形成された亀裂のうち，ポンマチネシリ南側ではほとんど変位がないため，赤沼火口の亀裂のサイズと開口量は小さくなければならない．北西斜面の亀裂もサイズは決して大きくはないものの，ポンマチネシリ北側の変位を説明するためにはある程度のサイズと開口量が必要である．これらのことから，2006 年小噴火は火山性流体が地下から上昇し，山頂地下浅部から地表にかけて北西－南東方向にメインの亀裂を形成し，それが地表に到達して赤沼火口および北西斜面の 2 ヶ所から噴出した，という過程で説明され，地下でのマグマの貫入はなかったと結論される．このことは，噴出物中から新鮮なマグマ物質が検出されなかったこと（廣瀬ほか，2007）や，噴出している噴気の温度が 100℃以下と低温であることからも支持される．

2004 年 9 月に噴火した浅間山では，GPS 観測等により噴火の数ヶ月前からマグマに起因する地殻変動が検出されており，力源モデルにより噴火の前にマグマの貫入があったことが明らかにされている（高木ほか，2005）．雌阿寒岳でも今後マグマの貫入があれば，現在の稠密な観測網により検出できる可能性が高い．また，噴火には至っていないものの，吾妻山では 2004 年および 2007 年の地震多発期に対応した地殻変動が観測されている（仙台管区気象台，2008）．現在まで，雌阿寒岳ではこのような噴火前の地殻変動は観測されていないものの，この観測を継続することによって地下のマグマの移動あるいは体積増加といった現象が発生すれば，それに対応した地殻変動が観測されるものと考えられる．

VI．ま と め

連続および繰返し GPS 観測によって，2006 年 3 月の雌阿寒岳小噴火に伴う地殻変動が山頂部で観測された．得られた水平変位はポンマチネシリの北側では 3〜4cm 程度と相対的に大きく，南側では小さいかほとんど変位はなかった．これに基づき地殻変動モデルを計算した結果，

地殻変動は噴火時に北西斜面に形成された北西－南東方向の亀裂の開口がその主要因であり，それに赤沼火口に形成された亀裂の開口の影響が加わって発生したことが明らかにされた．今回の変動が山頂部に限られており，かつ，非常に浅い部分での開口亀裂により説明が可能であることから，この小噴火は地下から上昇した火山性流体の噴出であり，直接的なマグマの貫入によるものではなかったと結論される．火山の噴火形態には今回のように，火山浅部での物質移動に伴うものもあり，それらが山体全体にわたる大規模な噴火活動に発展するものもあるから，小規模な噴火であってもそのメカニズムを調査研究することは重要である．

謝辞　解析には札幌管区気象台火山監視・情報センターの方々によるキャンペーン観測データの一部を使用しました．図の一部の作成には GMT ソフトウェア（Wessel and Smith，1995）を使用しました．現地観測では野中温泉別館に大変お世話になりました．深く感謝いたします．

文　献

廣瀬　亘・岡崎紀俊・石丸　聡・長谷川　健・藤原伸也・中川光弘・佐々木　寿・佐藤十一・札幌管区気象台，2007．2006 年（平成 18 年）3 月の雌阿寒岳噴火：噴火の経過および降灰調査結果，地質研究所報告，**78**，37-55．

国土地理院，2006．国土地理院による火山周辺地域における地殻変動観測の概況（2006 年 3 月），国土地理院 HP．

内藤宏人・吉川澄夫，1999．地殻変動解析支援プログラム MICAP-G の開発，地震Ⅱ，**53**，101-103．

Okada, Y., 1992. Internal and surface deformation due to shear and tensile faults in a half space, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **82**, 1018-1040.

岡崎紀俊・廣瀬　亘・石丸　聡・田近　淳・村山泰司・田村　慎・柴田智郎・秋田藤夫・鈴木隆広・垣原康之・野沢潤三・岡　孝雄・高橋浩晃・一柳昌義・山口照寛・笠原稔，2007．2006 年 3 月 21 日に小噴火した雌阿寒岳の観測報告，地質研究所報告，**78**，183-192．

札幌管区気象台，2006．雌阿寒岳，火山活動解説資料（平成 17 年の活動），6pp

札幌管区気象台，2007．雌阿寒岳，火山活動解説資料（平成 18 年の活動），12pp．

仙台管区気象台，2008．吾妻山の火山解説資料（平成 20 年 11 月），火山活動解説資料（平成 20 年 11 月），7pp．

高木朗充・福井敬一・藤原健治・上田義浩・飯島　聖・山本哲也・坂井孝行・菅野智之・潟山弘明，2005．地殻変動から推定される 2004 年浅間山噴火前後の浅部マグマ供給系，火山，**50**，363-375．

高橋浩晃・一柳昌義・岡崎紀俊，2002．雌阿寒岳での GPS による地殻変動観測，北海道大学地球物理学研究報告，**65**，303-309．

Wessel, P. and W.H.F. Smith, 1995. New version of the generic mapping tools released. *EOS, Trans. Am. Geophys. Un., Suppl.*, Aug. 15.