2000年有珠山噴火にともなうマグマモデル GPS連続観測を主とする地殻変動データによる推定

A Model of Magma Movements Associated with the 2000 Eruption of Usu Volcano Inferred by Crustal Deformation Detected by Continuous GPS and Other Geodetic Measurements

地理地殻活動研究センター　村上　亮・小沢慎三郎・西村卓也・多田　堯
Geography and Crustal Dynamics Research Center
Makoto MURAKAMI, Shinzaburo OZAWA, Takuya NISHIMURA and Takashi TADA,

要　旨

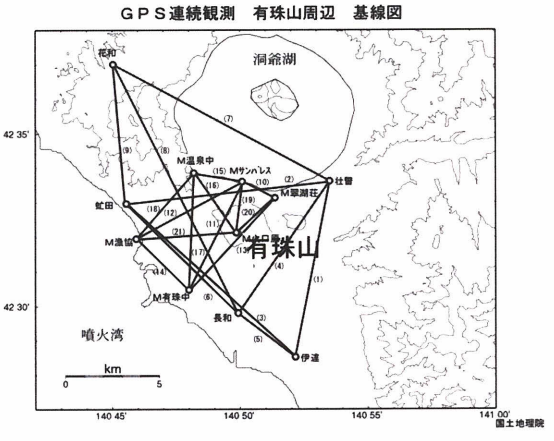
有珠山周辺では，2000年３月27日頃から，地震数が増加に増加し始め，過去の活動形態から判断して短時間のうちに噴火する可能性が高いと予想された。一方，有珠山を囲む基線のGPS連続観測結果にも，地震活動活発化とほぼ同時に変化が現れ，地下のマグマが活動をはじめたことが推定された。GPSでは，最初は基線が伸びる変動が観測されたが，その後，縮みに変化し，継続していた３月31日の噴火を迎えた。今回の有珠山の活動は，GPSによる稠密な網による連続観測が開始された後に発生した初めての本格的な火山活動である。GPS以外にも，国土地理院は他の研究機関等と協力しながら，衛星や空中写真を用いるなど，様々な地殻変動観測を実施した。これらのデータに基づき，今回の有珠山噴火に伴ってマグマがどのように活動したかを紹介する。

1. はじめに

有珠山は北海道南東部の洞爺湖畔に位置する活火山である（図－１参照。この図では，国土地理院のGPS設置もあわせて示してある）。最近では1663年の噴火以来これまでに，30～50年間隔で７回の噴火を繰り返しており，活動の度に大きな地殻変動が観測されている。最近の活動は粘性の高いデイサイト～流紋岩質マグマの活動によるものであり，噴火に伴って明治新山(1910)，昭和新山(1943)，有珠新山(1977)などの溶岩ドームが出現し，場合によっては数10m規模の大きな地殻変動が発生している。前回の噴火は　1977年８月７日に有珠山の噴火とともに始まり，1978年９月まで大小の噴火を繰り返した。噴火による火山灰は北海道全域に降り，有珠山周辺では火山灰による泥流などの被害も多発した。有珠山の最近の噴火の特徴は，比較的規則正しく周期的に噴火が発生してきたことと，噴火前に顕著に地震数が増加することである。前回の噴火から20年以上が経過しており，次の噴火もそう遠いことではないという認識が持たれていた。

有珠山周辺では，今回の噴火以前から各種の観測が行われていたが，噴火後も，各機関により表面現象，地震，地殻変動等様々な観測が実施されている。国土地理院も，広域GPS連続観測（その後観測点数を増加），写真測量，

GPS連続観測　有珠山周辺　基線図

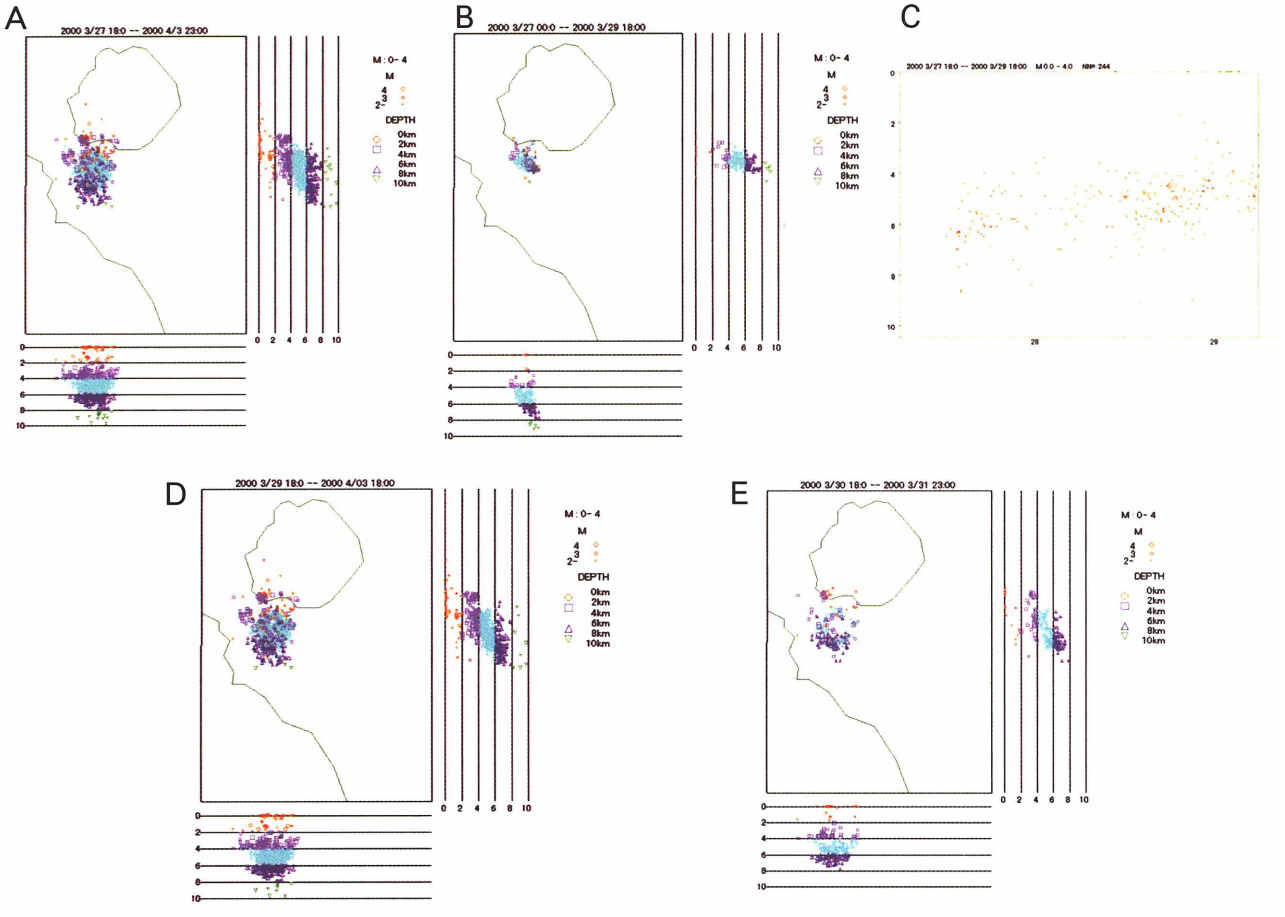


図－１　有珠山周辺の地形
図中には，2001年初頭段階のGPS連続観測点位置も示されている。噴火以前から設置されていた点は，山頂からそれぞれ約５kmの壮瞥，虻田，伊達の３点であり，図中では四角で囲んである。

測距・測角観測，水準測量，人工衛星合成開口レーダー画像マッチングによる観測等の地殻変動観測等を実施した。これらの観測によって明らかとなった地殻変動の様子や他機関のデータも参考にしながら総合的に解析することにより，今回の噴火に伴う地下のマグマの動きを説明するモデルを構築したので以下に紹介する。

2. 有珠山の2000年噴火の概要

2000年有珠山の活動は，３月27日の有珠山周辺の地震数の増加とともに始まった。この日の夕刻から火山性地震の発生数が急増し，過去の噴火との類似性から噴火が間近いことが懸念された。一方，国土地理院のGPS観測は，有珠山周辺では山頂から約５kmの距離に山体を取り巻くように配置された３点において連続観測が実施されていた。これらの観測データから，27日夕刻に地震数が増加したのとほぼ同時に，観測点間の距離の伸びが始まったことが確認された。これは地下のマグマの活動が始まった可能性が高いことを示唆するものである。国土地理院では，マグマの動きを監視するため，通常24時間



図－2　有珠山周辺の地震活動（気象庁データ）　A：3／27－4／3間の地震活動。B：3／27－3／29間の地震活動。C：3／27－3／29間の地震活動の震源の深さの変化。D：3／29－4／3間の地震活動。E：3／3－3／31間の地震活動。表示にはSEIS95（石川・中村，1997）を用いた。

毎に実施している各観測点の位置の解析計算の頻度を高めることとし，6時間分のデータを用いて3時間毎に位置を計算して変動を追跡する緊急的な解析を開始した。

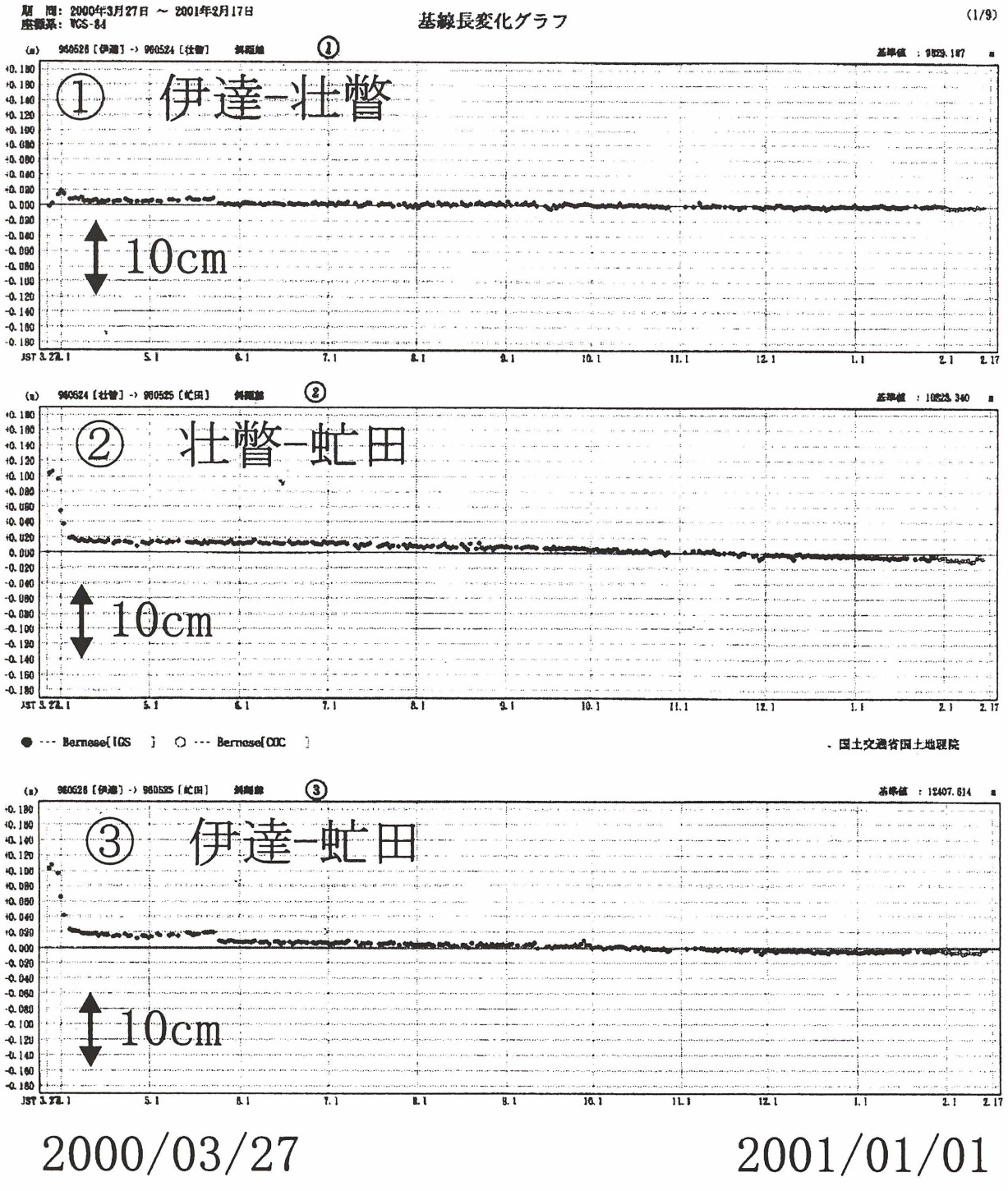
基線の伸びは31日ころまで継続した後，一転して急激な短縮を始めた。この急激な縮みが続いていた31日に，有珠山北西麓において最初の噴火が発生した。この噴火の前から，火口となった西山の西の地域では顕著な地殻変動が発生していた。それは，一日数mという猛烈なスピードで地面が隆起するという激しいもので，顕著な断層群も発生していた。また，大学等による各種の観測により，有珠山の山頂西側付近を中心とする最大3m程度の大きさをもつ隆起も発生していたことが確認されている。この隆起は，噴火の規模が小さくなってから国土地理院が実施した有珠山周辺の水準測量の結果とも整合しており，活動初期の短期間の間に，山体全体が隆起していたことが推測される。その後，次々と小火口が誕生し，大きく分けて最初の噴火が発生した西山西の火口群と，その後誕生したやや北東側の金比羅火口群において間欠的に水蒸気爆発を繰り返す噴火が続いてきたが，その活動度は，次第に低下している。噴火が始まってからは，西山金比羅両火口群を中心とする地域での，地盤の広域的な隆起と側方への拡大が顕著となり潜在溶岩ドームの形成が始まったものと考えられる。5月中旬になって，広域的な変動速度は次第に低下してきたが，西山火口近くでは隆起域の集中化が顕著となり，隆起は最大60m以上に達した。

現在では，両火口群とも活動は次第に低下している。噴火後さらに増強された国土地理院ほかのGPS緩速の結果や，水準測量の結果は，現在は山体が収縮の傾向にあることを示している。

3. マグマ活動モデル

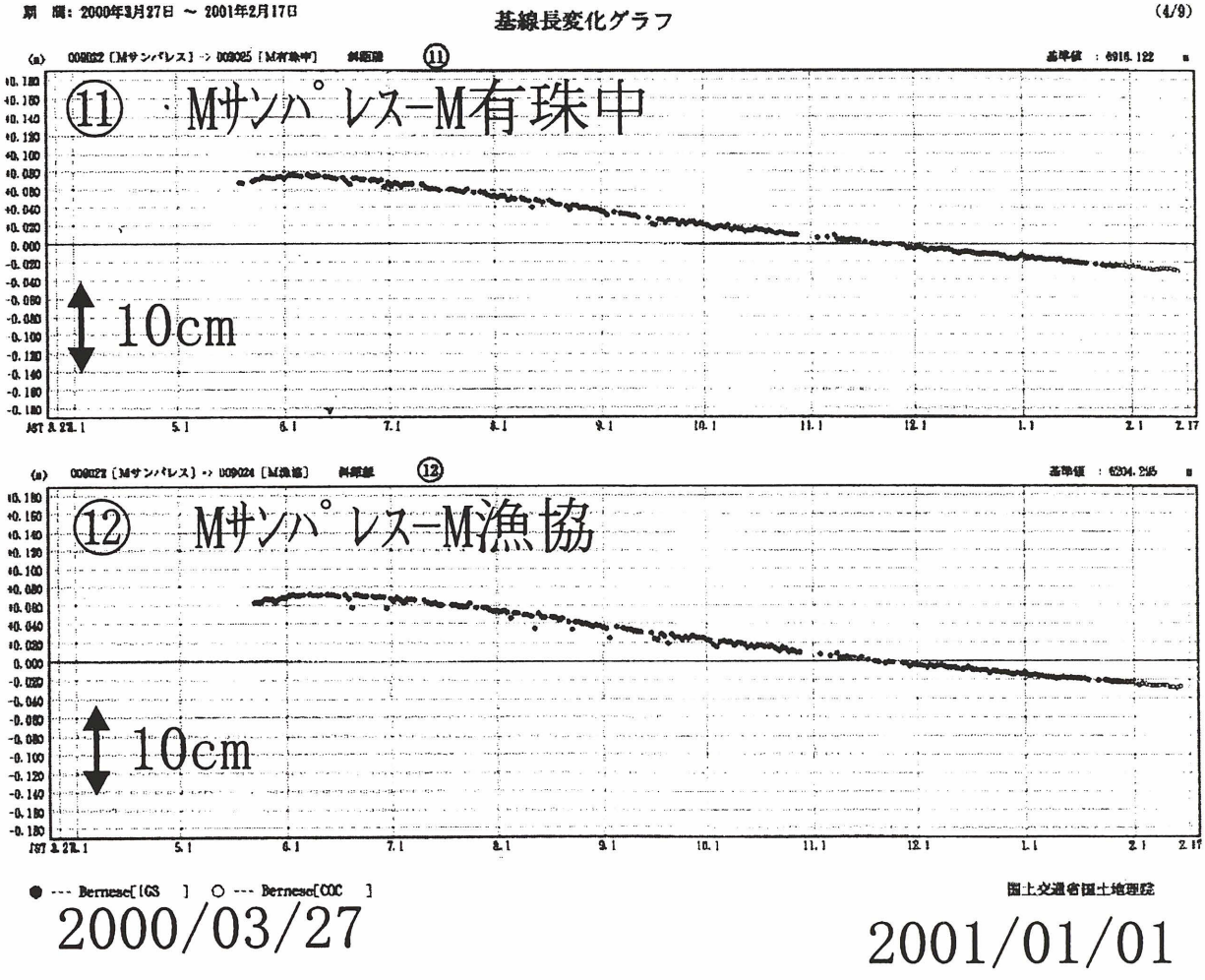
このように有珠山の活動は2000年3月27日夕刻から，顕著な前触れなく突然開始したが，その活動は時間の経過とともにいくつかのステージに分けて考えることができる。

まず，地震活動についてどのように推移していったか紹介する。図－2は，気象庁によって決定された噴火前後



図－3　2000年有珠山噴火に伴う，周辺のGPS基線の変化（横軸の期間：2000／2／27－2001／2／17）。噴火前から観測していた点を結ぶ基線の変化を示した（基線の位置については図－1参照）。

の地震活動の震源分布を，期間毎に区切ってプロットしたものである。図－2－Aは，多数の地震が発生した全期間である3／27から4／3の間の全ての地震を平面および東西，南北断面への投影した図である。全体としては地震が有珠山周辺の地下で固まって発生したこと，南に傾き下がる面上に地震が分布する傾向にあることがわかる。これを3月29日以前と以後に分けて地震の発生の様子をみると興味深い傾向があることに気がつく。図－2－Bは，3／27－3／29間の震源分布であるが，地震が有珠山の地下4km－8kmの北西から南東に傾き下がる垂直に近い傾斜をもつ軸状に分布している。また，図－2－Cは，時間経過に対する地震の深さを表示したものであ



図－4　2000年有珠山噴火に伴う，周辺のGPS基線の変化（横軸の期間：2000／2／27－2001／2／17）。有珠山をはさむ基線で，6月以降，ほぼ一様に縮みが続いている（基線の位置については図－1参照）。

るが，地震が時間とともに浅くなっていることがわかる。この地震分布とその時間変化は，この時期に，地下深くのマグマ溜まり（10km付近）から，上に向かって通り道を形成しながら，浅い場所へマグマが移動していたことを強く示唆するものである。図－2－Dは3／29－4／3間の震源分布であるが，それ以前とは傾向が異なりより広く分布している。特に図－2－Eに示すように，3／30－3／31間は震源がドーナツ状に並ぶ特徴的な分布を見せており，この間のマグマ活動の推移に密接に関連していることが想像される。

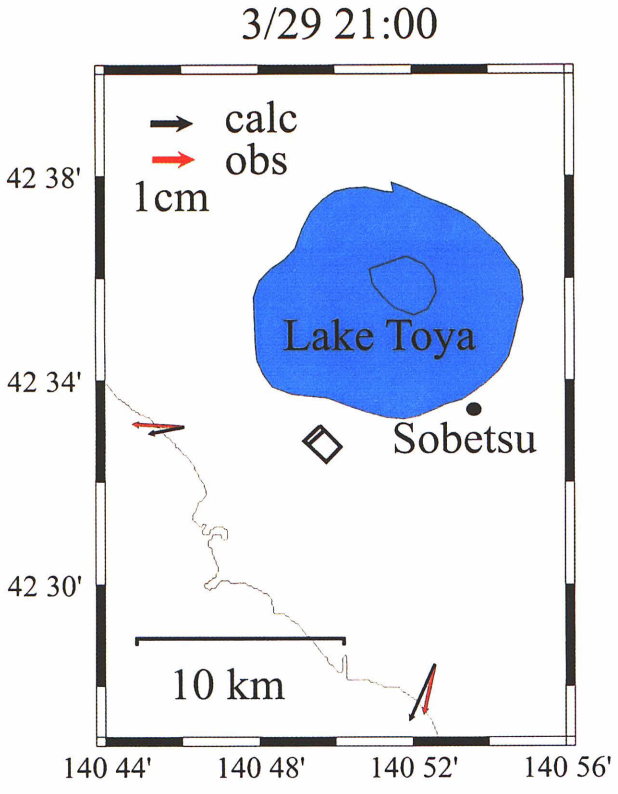
次にGPS観測結果を紹介する。図－1は現在の国土地理院のGPS観測網を示しているが，今回の活動が始まった3月末の時点で，有珠山周辺に設置されていたGPS点は，図の中で四角で囲んだ壮瞥，伊達，虻田の3点であった。図－3は，これらを結ぶ3本の基線の長さが時間とともにどのように変化したかを示している。図の期間は，2000年3月から2001年2月までのほぼ一年間である。いずれの基線も活動の初期に伸びを示している。また，虻田－壮瞥（②），伊達－虻田（③）の2つの基線は，3月29日頃から縮みに転じている。しかし，急激な縮みも4月初旬には鈍化し，その後は安定した傾向が続いている。一方，図－1にあるように，活動後に新たに多数のGPS点が追加され，山体に近い場所のより詳細な地殻変動監視ができるようになった。これらの観測の一例を図－4に示すが，現在は山体の収縮を表す基線の短縮が続いていることがわかる。山体の収縮は，最近の水準測量の結果とも整合するものである。

以上のような，地震観測結果と，地殻変動観測結果を，他機関によるものも含め総合して考察して，マグマの挙動を以下の通り推定した。

1）3／27から3／29午後まで

マグマは27日から活動を開始し，有珠山のほぼ直下の深さ約10kmにあると考えれられるマグマ溜まりから，ダイク（板状のマグマ）を形成し地震を発生させながら29日ころまで上昇し，マグマの通り道が形成された。この期

間は，国土地理院のGPSで伸びが観測された時期でもある。この伸びは上昇してきたマグマが押し広げた地殻中の割れ目の拡張に対応したものと考えられる。（図－５参照）



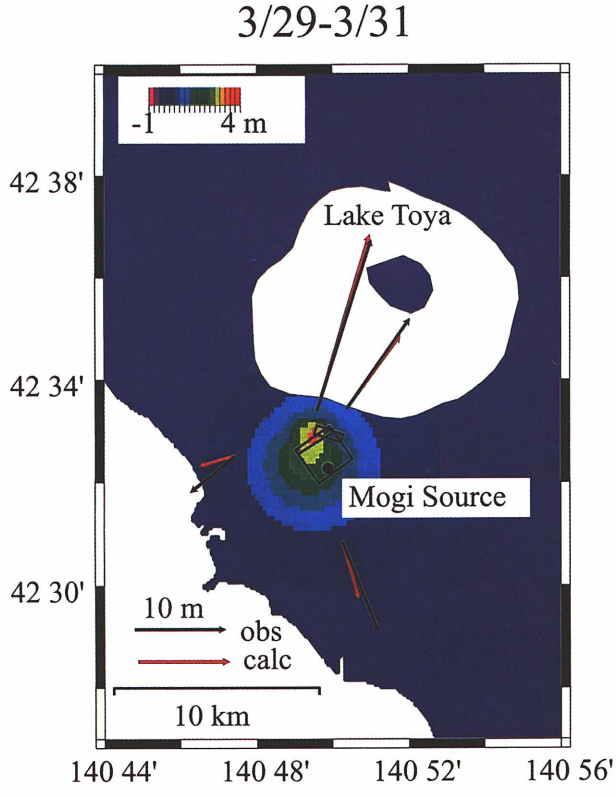
図－５　３／27－３／29間のマグマ活動。有珠山の地下でやや南東に傾き下がるほぼ垂直な面に沿って，マグマが上昇したことによって，周囲のGPS点の位置が変動したと考えられる。赤い矢印が，モデルから計算された変動量，黒い矢印が，観測された変動量である。このとき地震活動も同じ面に沿って活発化した。

2）３／29から４／３頃まで

この期間の地殻変動は，虻田，伊達，壮瞥の　GPS基線がそれまでの伸びから縮みに反転し，有珠山から周囲30kmのやや遠方のGPS点では，有珠山に向かう方向の水平変動がみられた。また，３／31頃まで有珠山山頂西側を中心とする隆起が発生したことが，北海道大学等の観測からわかっているほか，水準測量でも山体全体規模のやや広域的な隆起が発生したことが推測される。一方，地震回数もこの期間は，引き続き活発であったが，それ以前と比較して，南に傾き下がる面状の地震分布をとること，リング状（ドーナツ状）の地震分布がみられたこと，ドーナツの空白部は時間とともに拡大したことなど，29日までの活動とは，明らかに様相が異なっており，地下のマグマ活動も次の段階に移行したことが示唆される。

これらの活動を説明するモデルとして，我々は，有珠山山頂直下の地下約２－３kmにおいて，水平のマグマの板（シル）が形成されそこに**5 ×10^{7}m^3**程度のマグマが流入したこと，また，別途，有珠山北麓地下にダイクが形成され，**1 ×10^{7}m^3**のマグマが貫入したこと，逆にマグマを放出したため，深さ10kmのマグマ溜まりにおいて**2 ×10^{7}m^3**，程度のマグマが流れ出たことを推定している。（図－６参照）

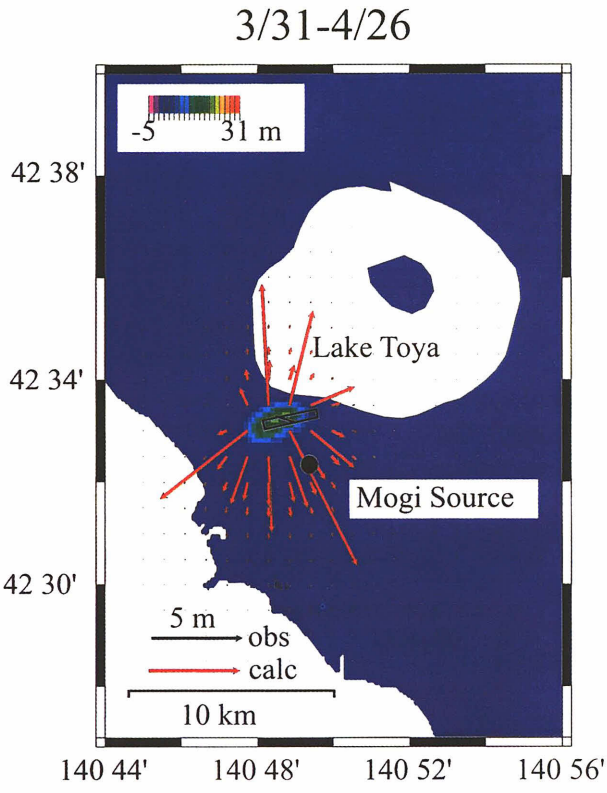
その間，マグマは，山麓西側に出口を求めて上昇し，マグマは有珠山西麓の浅い場所に到達し，西山西と金比羅山近くで噴火した。マグマは豊富な地下水と接触して水蒸気爆発が継続している。また，マグマの本体は地表までは到達しなかったが，地下の浅いところで潜在溶岩ドームが形成され，山麓西側では60mに達する隆起に代表される大きな地殻変動が生じた。



図－６　３／29－３／31間のマグマ活動。有珠山の山頂直下では水平のマグマの板，またその北側では垂直なマグマの板ができたと考えられ，そこにマグマを供給したため，マグマ溜まり（図のMogi Source）では収縮が進んだ。赤い矢印が，モデルから計算された変動量，黒い矢印が，観測された変動量である。

3）４／３日頃から５月下旬

４／３以降は，地震発生回数は顕著に減少した。地殻変動は，周囲では減速したが噴火が発生した有珠山西麓



図－7　3／31－4／26間のマグマ活動。。西山西麓地下のドーム形成に，3×10⁷m³程度のマグマが供給され，一方，10kmのマグマ溜まりでは，5×10⁷m³程度の収縮がさらに進行したことが推定される。赤い矢印が，モデルから計算された変動量である。この推定には，人工衛星観測データ（飛田ほか，2001）を用いた。変動が集中している場所は噴火口群ができた場所と一致する。

では局所的に顕著な隆起が発生し，その変動は周囲への押し出しの形で現れている。この変動については，測角観測，気象庁その他機関のGPS，衛星を用いた解析（飛田ほか，2001），写真測量等，レーザープロファイラ等，各種の手法によって，詳細に観測されている。西山西麓地下のドーム形成に，**3×10⁷m³**程度のマグマが供給され，一方，10kmのマグマ溜まりでは，**5×10⁷m³**程度の収縮がさらに進行したことが推定される。（図－7参照）

4)　5月下旬から現在まで

その後も，地震発生回数は少ない状態が続いている。有珠山西側では隆起が継続したが，9月頃にはほとんど停止した。一方，有珠山を中心とする収縮が進行していることが，GPSや水準測量の結果からわかっており，有珠山地下2－3kmシルの収縮が進んでいることが示唆される。

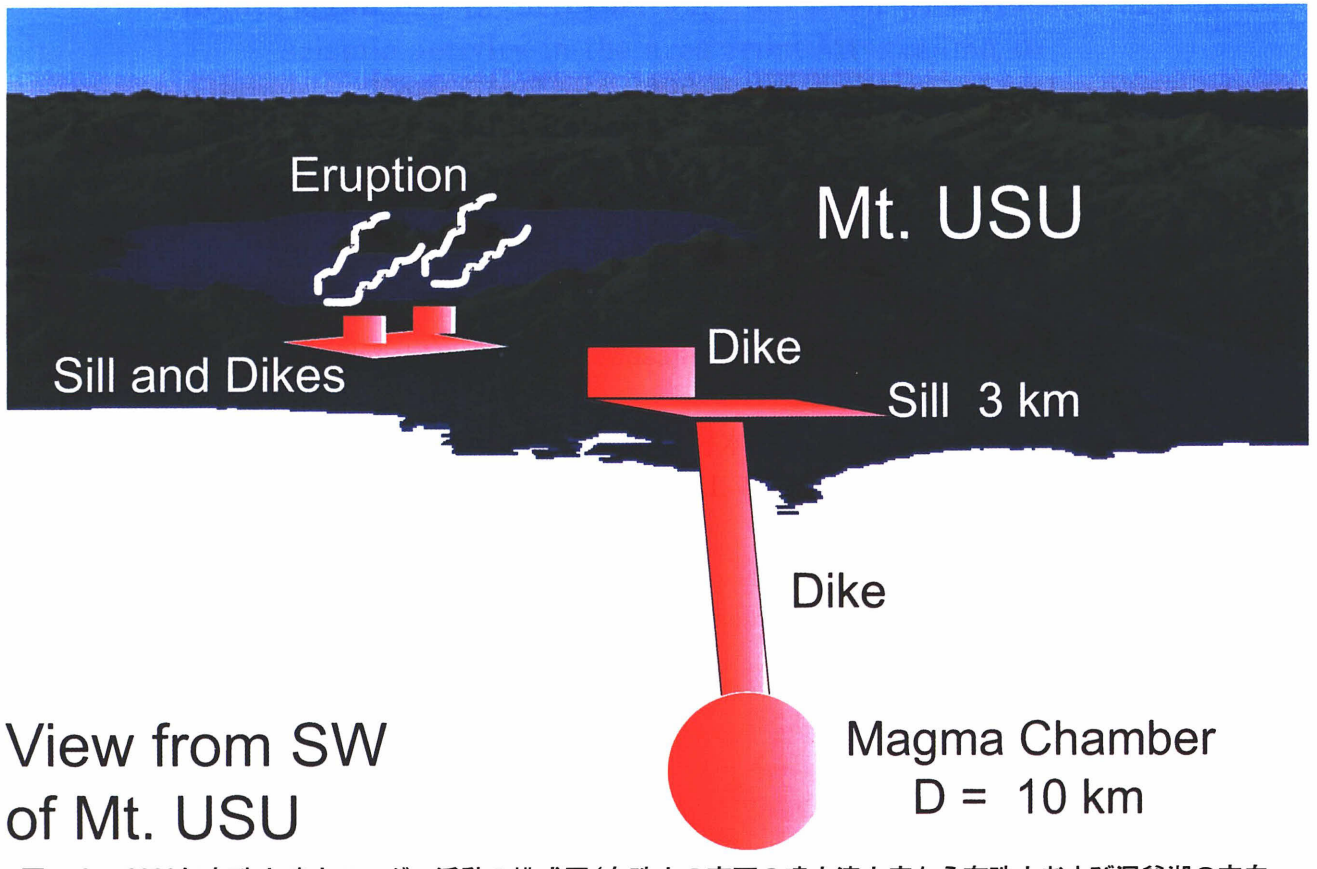
それらをまとめたものが，表－1及び図－8である。

GPSで観測された最初の伸びは，マグマ溜まりからダイクを作りながらのマグマの上昇に対応し，その後の短縮は，マグマ溜まりの収縮と山頂直下のマグマのシートの形成に対応していると考えられる。また，マグマの深所からの移動が集中したと思われる4月前半までの時期には，遠方のGPS点の水平変動は全て有珠山の方向に向いており，地下10kmのマグマ溜まりがマグマを吐き出し（結局その一部が有珠山西麓で溶岩ドームとなった）た結果，収縮してそれが遠方のGPS変動となって観測されている。

このような大きな地殻変動も，4月上旬以降はほぼ収まったが，噴火後に増設したGPS観測点や水準測量などの結果を総合すると，現在は，有珠山山頂の西側を中心とした収縮が進行しており，今回の活動で浅いところまで上がってきたマグマが現在は収縮の過程を歩んでいるようである。このような収縮は今回の噴火に限ったものではなく，前回の1977噴火の後にも同様の収縮が長期間継続していたことが，合成開口レーダーの観測からも確認されている（矢来ほか，2000）。

表－1　2000年有珠山噴火に伴うマグマモデル

phase	期　間	地　　震	地殻変動	model
Phase Ⅰ	3／27から3／29午後まで	地震回数の顕著な増加 南東に傾き下がる，ほぼ垂直に立った地震分布 深さは8kmから3km程度に時間とともに浅くなる傾向	虻田，伊達，壮瞥のGPS基線にわずかな伸び	ほぼ垂直なダイクの貫入 **8* 10⁶m³**
Phase Ⅱ	3／29から4／3頃まで	地震回数の顕著な増加（3／31まで） 南に傾き下がる面状の地震分布 リング状（ドーナツ状）の地震分布 ドーナツの空白部は時間とともに拡大	虻田，伊達，壮瞥のGPS基線が縮みに反転 有珠山から周囲30kmのやや遠いGPS点の有珠山に向かう変動 3／31頃まで有珠山山頂を中心とする変動（大学，道立地質GPS，水準測量） 西山西麓を中心とする隆起，周囲への押し出し（角観測，写真，レーザー，衛星等）	有珠山地下約2－3kmのシル **5* 10⁷m³** 有珠山北麓地下のダイク **1* 10⁷m³** 深さ10kmのマグマ溜まりのデフレーション **－2* 10⁷m³**
Phase Ⅲ	4／3日頃から5月下旬	回数の顕著な減少	GPSはほぼ停滞 西山西麓を中心として顕著な隆起 周囲への押し出し（角，気象庁他GPS，衛星，写真等）	西山西麓地下の浅いダイクおよびシル **3* 10⁷m³** 深さ10kmのマグマ溜まりのデフレーション **－5* 10⁷m³**
Phase Ⅳ	5月下旬から現在	回数の顕著な減少	西側では隆起が継続　変動域の集中化 有珠山を中心とするデフレーション（GPS，水準）	有珠山地下2－3kmシルのデフレーション



図－8　2000年有珠山噴火のマグマ活動の模式図(有珠山の南西の噴火湾上空から有珠山および洞爺湖の方向をみた図)。詳細は本文を参照されたい

4. おわりに

以上のように，今回の有珠山の噴火ではおそらく世界で始めて噴火前からGPSによって克明に地殻変動が観測されていた。他の観測結果とあわせて，マグマの移動の様子がかなり明らかになってきている。今回の活動は，GPSや合成開口レーダーなど新しい観測手段が実用レベルに達していた時期に発生したが，このような新しい観測手段が，火山噴火の気候を解明する上で貴重なデータを提供できるという実績が築かれた意義は大きい。

謝　辞

ここで紹介した解析は，国土地理院ならびに他の機関の観測結果に基づいている。特に記していないものは，火山噴火予知連絡会および同有珠山部会に報告された資料を参照した。関係各位に深く謝意を表する。震源分布の表示にはSEIS95(石川・中村，1997)を用いた。

参 考 文 献

飛田幹男・村上亮・中川弘之・矢来博司：SAR画像のマッチングによる有珠山周辺の面的な三次元地殻変動，変動速度，体積変化，国土地理院時報，95，2001.

矢来博司，村上亮，飛田幹男，中川弘之，小沢慎三郎，鷺谷威，西村卓也，藤原智，JERS－1の干渉SARにより得られた有珠山周辺の2000年噴火以前の地殻変動，日本火山学会講演予稿集2000年度秋季大会，43，2000.

石川有三・中村浩二：SEIS－PC for Windows95,地球惑星科学関連学会，1997年合同大会予稿集,P.78,1997