



Title	広域地震観測網で得られた有珠山2000年噴火に伴う地震活動：手動検測による解析結果
Author(s)	一柳, 昌義; ICHIYANAGI, Masayoshi
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 65, 229-246
Issue Date	2002-03-25
DOI	https://doi.org/10.14943/gbhu.65.229
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/14315
Type	departmental bulletin paper
File Information	65_p229-246.pdf



**広域地震観測網で得られた有珠山 2000 年噴火に伴う地震活動
—手動検測による解析結果—**

一柳 昌義

北海道大学大学院理学研究科附属地震火山研究観測センター

(2002 年 1 月 16 日受理)

**Seismic Activity Related to 2000 Eruption of Usu Volcano
Based on Manual Processing Data
from Regional Seismic Network**

Masayoshi ICHIYANAGI

Institute of Seismology and Volcanology, Hokkaido University

(Received January 16, 2002)

Usu volcano is located in the southwestern part of Hokkaido. New eruption began at the western flank of the volcano on March 31, 2000 after 23-year dormancy. Remarkable seismic activity and crustal deformation occurred before and after the eruption, as in the cases of several previous eruptions. Institute of Seismology and Volcanology (ISV), Hokkaido University and Sapporo District Meteorological Observatory (SMO), Japan Meteorological Agency have deployed regional permanent seismic networks in Hokkaido. In addition, SMO has one permanent station on the south side of USU volcano, and ISV has installed one temporal seismic station just before the beginning of the eruption on the west side. I calculated the hypocenters associated with the 2000 Usu eruption by using the continuous waveform data recorded at these stations from March 28 to April 1. P- and S- phases, and maximum amplitude were manually read for each event, and 1633 hypocenters were determined with high accuracy.

The first earthquake in the observation period was recorded at 0h 44m March 28, and the number of earthquakes had rapidly increased until it peaked in the evening of March 30. The eruption started at 13: 07, March 31, in the course of decreasing number of earthquakes. On March 28, hypocenters were concentrated on the northern side of the summit of Usu volcano at the depth of about 4km, and the hypocentral region gradually extended to the south. Most of the seismic activity had declined by the night of March 30. However, on March 31 the seismicity became active around the new crater.

Observed seismic activity well correlated with the observed crustal deformation by GPS. These observations suggest the movement of magma underneath the Usu Volcano.

I. はじめに

北海道の南西部に位置する有珠山は(Fig. 1), 2000年3月31日13時7分に有珠山の西山の西側山麓から23年ぶりに噴火を開始した(西山火口群). 翌日4月1日には, その北東約1 kmの金比羅山付近にも火口が形成された(金比羅山火口群). 有珠山では, 噴火活動に先行して活発な前兆地震が発生することが知られており, 今回も噴火の4日前の3月27日未明から, 噴火に先行する活発な地震活動が始まった.

北海道大学大学院理学研究科附属地震火山研究観測センター地震活動研究分野(以下ISV)では, 北海道とその周辺の地震活動を把握するため, 北海道内に地震観測網を展開している. また, 同じく札幌管区気象台(以下SMO)も北海道内に地震観測網を展開している. これらのデータは, NTT専用回線を通じて両機関にリアルタイムでデータ交換され, ISVではこれらのデータを用いて震源決定を行っている. この広域地震観測網によって, 今回の有珠山噴火に伴う地震活動が観測されている.

そこで, 一柳・他(2001b)では, 有珠山南部に有珠山の火山性地震活動を観測するためにSMOが設置していた地震観測点JMAA及びISVが地震活動の始まった後に有珠山西麓に設置したMTYD観測点のデータを用いて, 地震の自動判定と自動震源決定を行い, 一連の地震活動について報告した. しかしながら, この研究ではイベントトリガーをかけるしきい値を振幅の短時間平

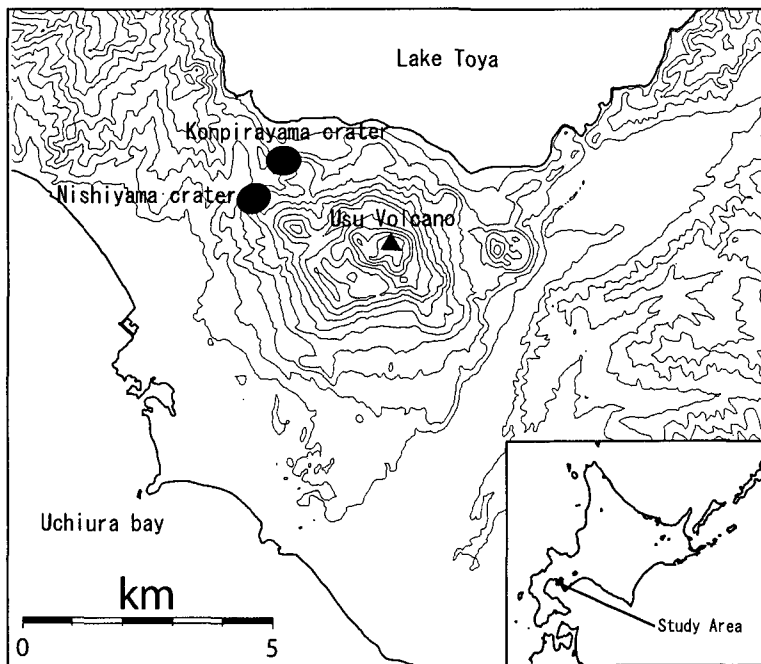


Fig. 1. Location of Usu volcano and new craters opened by the eruption of 2000.

均と長時間平均で設定してあったために、今回の地震活動のように連続的に地震が発生している場合には、イベント判定が適切に行われていない可能性がある [一柳・他 (2001 a)]. また、P 波相や S 波相の検測も自動的に行ったので特に連続的に発生している地震に対して、その読み取りが正確に行われていない可能性があった。

本論文では、これらの問題を解決するため、地震活動が最も活動的な噴火前後の 2000 年 3 月 28 日から 4 月 1 日までの 5 日間について、連続波形データから手動検測によって P 波相や S 波相を検測して、精密な震源を再決定した。その結果から、有珠山噴火に伴う地震活動を明らかにしたので報告する。

II. 観測方法及び震源決定

震源決定に用いた広域地震観測網の観測点分布を Fig. 2 に示す。丸印の観測点は ISV が定常的に運用している観測点、また三角印は気象庁の観測点である。そのうち、MTYD 観測点は地震が発生しはじめてから 2 日後の 3 月 29 日 13 時に急遽臨時に設置した観測点である。それらのデータ処理の流れについては、一柳・他 (2001 b) に詳しく説明したので、ここでは省略する。

Fig. 2 で示した観測点の連続波形データから、地震が最も多く発生した時期にあたる 2000 年 3 月 28 日から 4 月 1 日までの 5 日間のデータについて検測作業を行った。検測作業を行うにあたり、なるべく全期間統一したデータセットを得るために、IMG 観測点で P 波相の検測ができ、必ず有珠山周辺の JMAA 観測点または MTYD 観測点のデータを含む 5 観測点以上の P 波相と 1 観測点以上の S 波相の検測が可能な地震を対象とした。今回検測処理をした期間よりも前の 3 月 27 日のデータもチェックしたが、上記の検測条件を満たす地震はなく、この条件を満たす一番始めの地震は、3 月 28 日 0 時 44 分に発生した。

Fig. 3 に SMO が調べた JMAA 観測点の振幅 $3 \mu m$ 以上の地震と上記の基

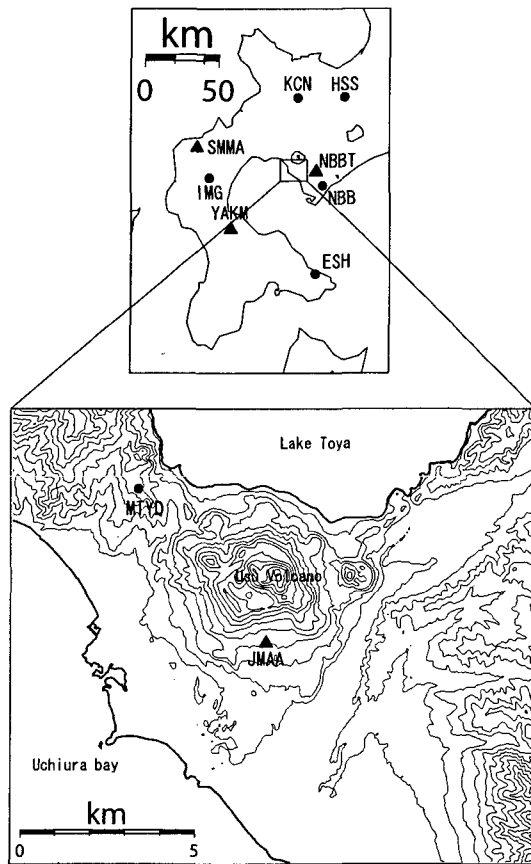


Fig. 2. Location map of seismic stations used in this study. Circle: Hokkaido University, Triangle: Sapporo District Meteorological Observatory (Japan Meteorological Agency).

準で検出した震源データの時間別回数を示す。但し、JMAA 点の時間別地震回数は暫定値である(札幌管区气象台, 私信)。地震が最も多発した 3 月 29 日 16 時から 3 月 30 日 23 時までの期間では、29 日 16 時以降地震数が増加し、30 日 20 時から減少していく傾向が見える。一方、私が検出した地震回数は、16 時以降やや増加するものの、その後横ばいになっている。この期間では、地震が連続的に発生しており、P 波相や S 波相が重なってしまったため、検出が出来なかった地震もあった。このため、見かけ上地震発生回数の増加が現われていないものと考えられる。しかしながら、どのような基準で検出処理を行っても、地震が連続して発生する状況では、地震全ての P 波相や S 波相を見分けることが困難なので、検出処理で地震回数を把握するには限界があるのはやむをえないことである。その他の期間では、検出した地震数は JMAA 点の地震回数より少ないものの、両者は同様の変動傾向を示しているのが見える。

一連の地震活動の中では低周波成分が卓越した地震が頻繁に認められた。このため、そのような特徴を持つ地震にはフラグをつけて分類した。Fig. 4 には、この地震活動で観測された高周波地震(上段)と低周波地震(下段)の MTYD と IMG 観測点の波形の例を示した。低周波地震では、S 波相が不明瞭で読み取りが困難な地震もあったが、今回は低周波地震の活動を把握するため P 波相しか読み取ることができない地震でも検出処理を行って震源を決定した。

検出作業は WIN システム(卜部・東田, 1991)を使用し、震源計算には WIN に付属しているプログラム hypomh(Hirata and Matsu'ura, 1987)を用いた。

Fig. 5 は、JMAA 点の S 波相時刻と P 波相時刻の差(S-P 時間)の時間分布を示す。この図から多くの地震の S-P 時間が 0.7 秒から 1.3 秒の間に分布していることが分かる。震源がこの観測点の真下にあると仮定し、極浅い所の速度を 3 km/s とすると、その深さは 3 km から 5 km となる。しかしながら、Fig. 6 の点線で示した一柳・他(2001 b)の速度構造で震源計算した場合、大部分の地震の深さが 7 km くらいになり、S-P 時間から推定した震源の深さより深くなってしまう。JMAA 点の S-P 時間から推定される深さに近い深さになるように試行錯誤的に深さ 0~10 km のところの速度が速くなるような Fig. 6 の実線で示す速度構造を採用した。また、 V_p/V_s 比は 1.73 と仮定して震源決定作業を行った。Fig. 5 では地震が一番多く発生した 3 月 30 日の地震数が少なく見える。これは JMAA 観測点の地震データ伝送装置のダイナミックレンジが分解能の低い 12 BIT なのに対し、有珠山の極微小な地震活動を監視する必要があり、地震計の入

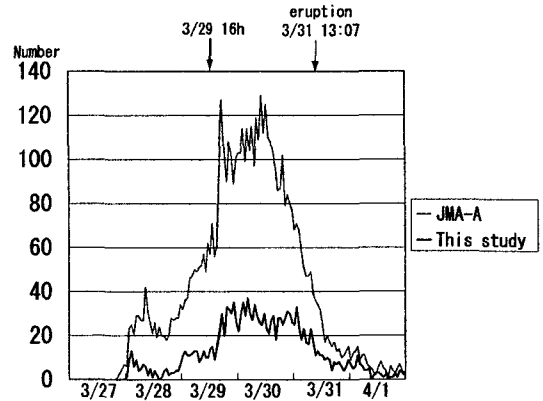


Fig. 3. Hourly number of earthquakes counted at JMAA station in Fig. 2 and that of relocated in this study.

力感度を高くしているため、大きめの地震が発生すると記録が振り切れてしまい、S波相の読み取りができなかったことが影響しているためである。

以上のようにして求められた高周波地震の震源からP波の走時残差0.5秒以内、S波1秒以内、低周波地震からは、S波2秒以内の地震を検出した。その結果1633個の地震が検出された。地震活動最盛期には、なお検出出来なかった地震があるとはいえ、ここで得られた震源データ以上に密で時間的に一様なデータは期待出来ない。以下では、これらの震源データを用いて議論を行う。

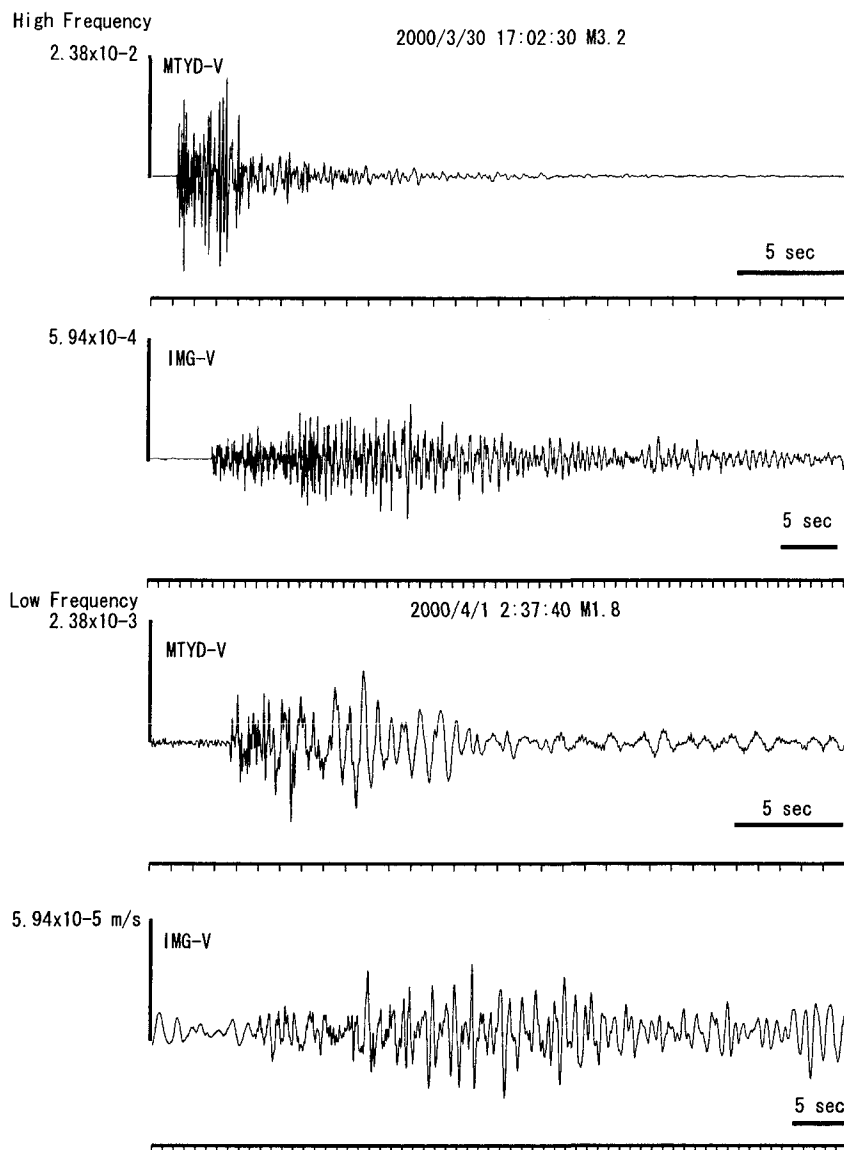


Fig. 4. Seismograms of high- and low- frequency earthquakes recorded at stations MTYD and IMG. Amplitude and time unit are indicated.

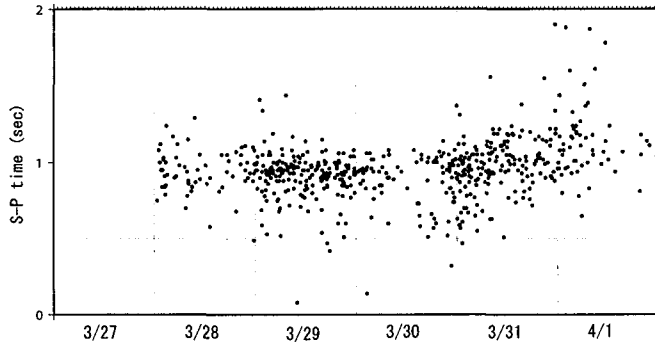


Fig. 5. Time evolution of S-P time distribution at station JMAA.

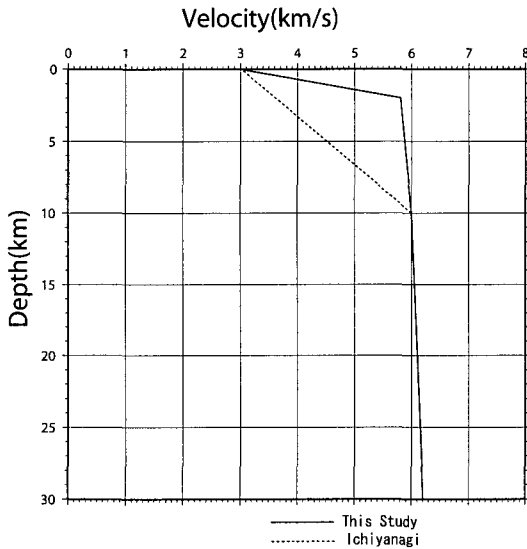


Fig. 6. P wave velocity structure used in the hypocenter determination in this study (solid line) and that in Ichiyanagi et al, (2001b) (dotted line). $V_p/V_s=1.73$ is assumed.

III. 震源分布

地震回数と噴火前後の時期を比較するため7つの期間（3月28日0：00～23：59，3月29日0：00～15：59，3月29日16：00～23：59，3月30日0：00～11：59，3月30日12：00～23：59，3月31日0：00～13：06，3月31日13：07～23：59，4月1日0：00～23：59）に区切った。この期間分けは基本的に3月29日から31日は地震が多いので半日ごとに，3月28日と4月1日は地震が少ないので1日分とした。但し，地震活動が急激に増加した29日と最初に噴火した31日は，その前後を比較するため，その時刻で期間を区切った。Fig. 7 a～Fig. 7 hは3月28日から4月1日までの高周波地震（上段）と低周波地震（下段）の震源分布，また，Fig. 8に上記期間の南北方向と深さ方向に投影した地震の時空間分布を示す。

はじめに高周波地震の活動について見てみる。Fig. 7 aに3月28日の地震の震源を示す。地震

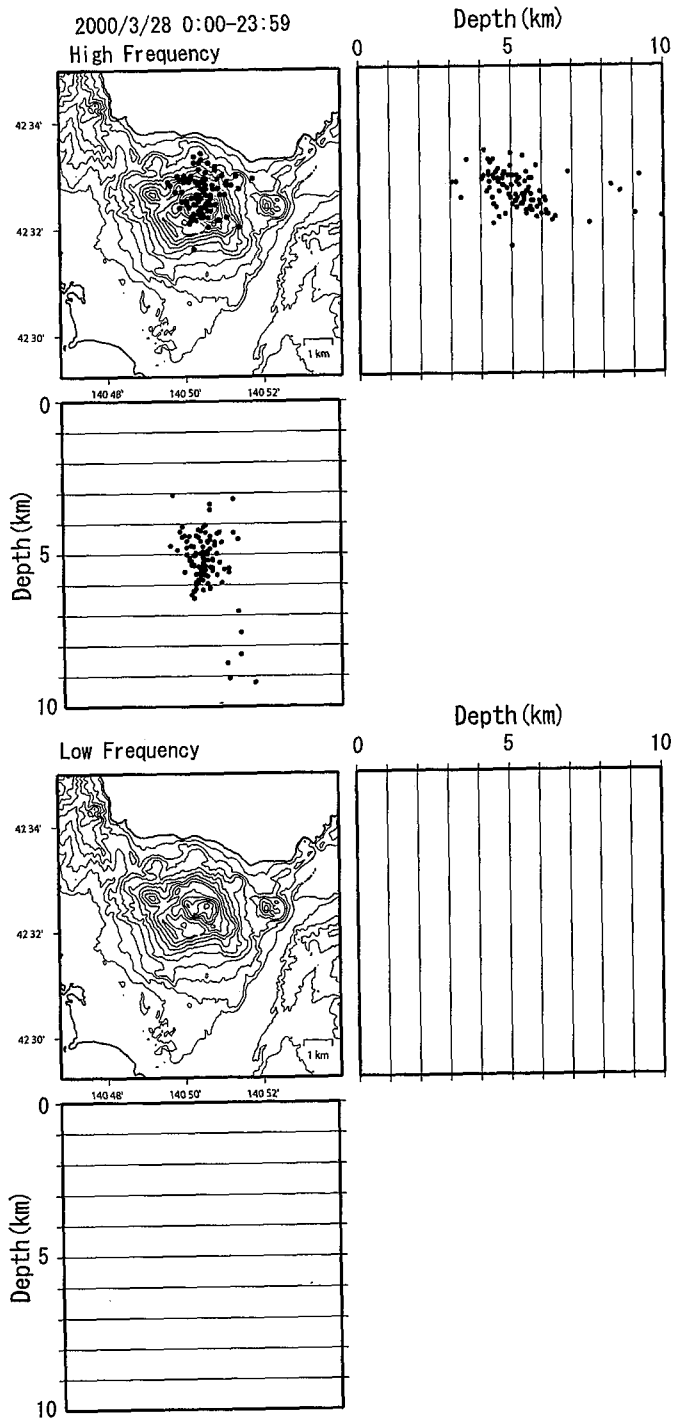


Fig. 7a. Map showing hypocenter distribution of high-frequency earthquakes (upper) and low-frequency earthquakes (lower), respectively for the period from 2000/3/28 0:00 to 3/28 23:59.

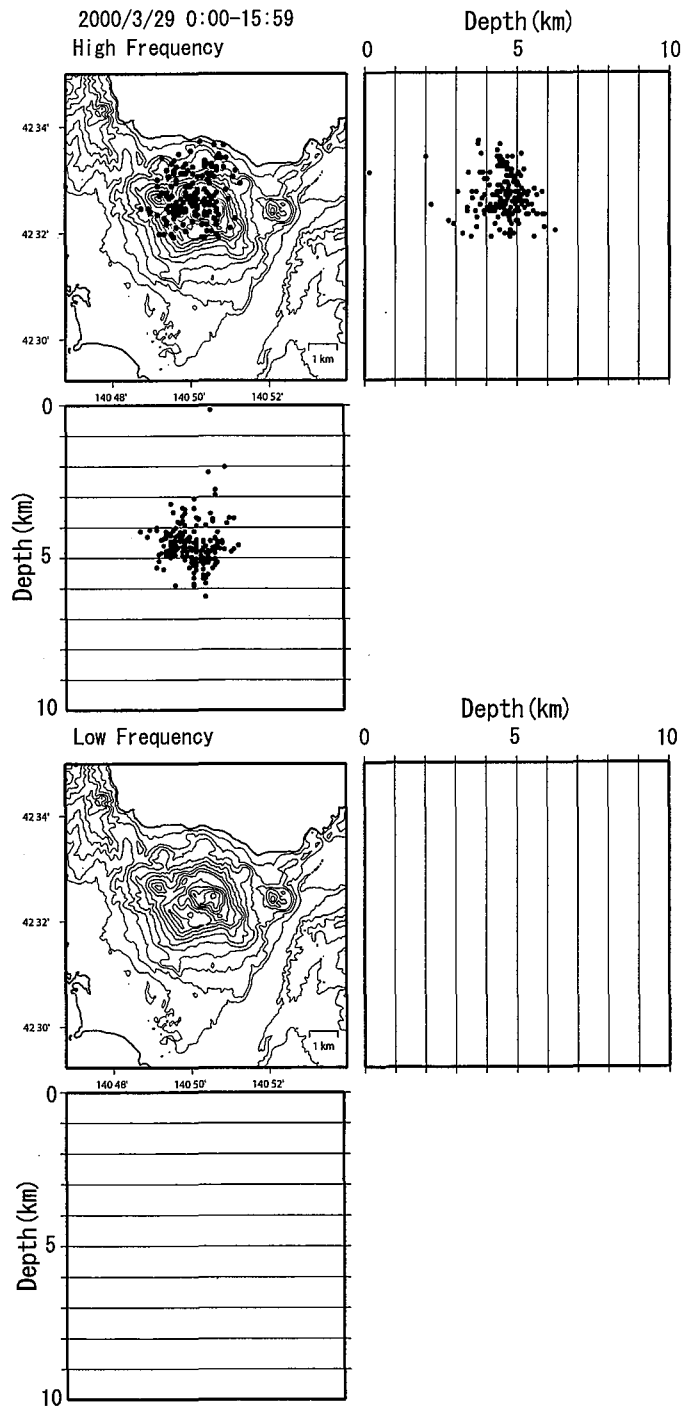


Fig. 7b. For the period from 2000/3/29 0:00 to 3/29 15:59.

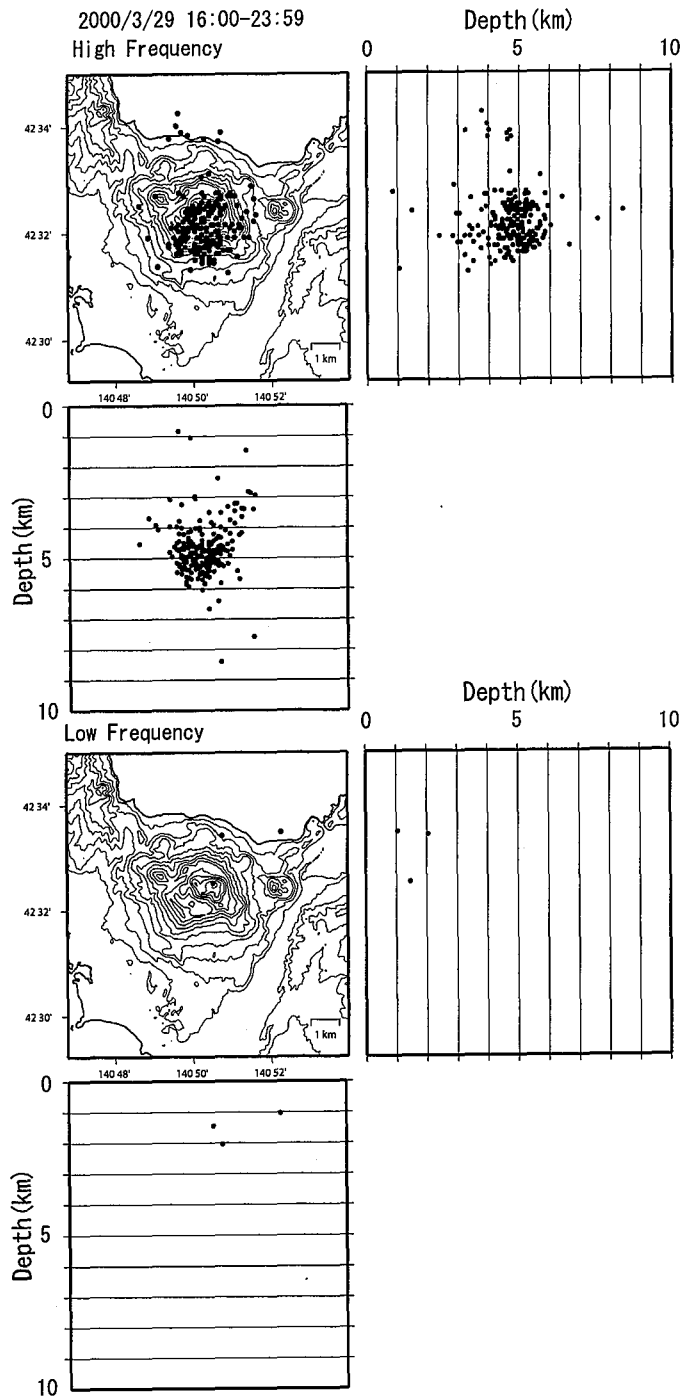


Fig. 7c. For the period from 2000/3/29 16:00 to 3/29 23:59.

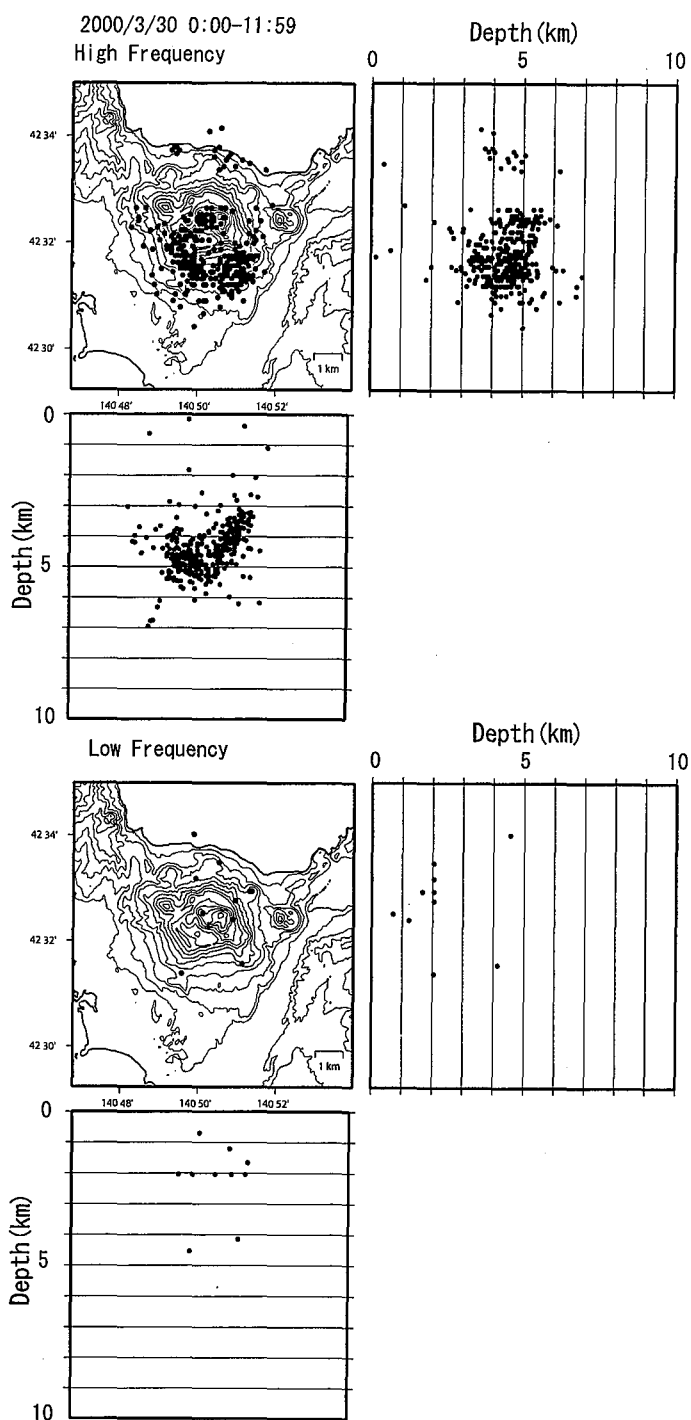


Fig. 7d. For the period from 2000/3/30 0:00 to 3/30 11:59.

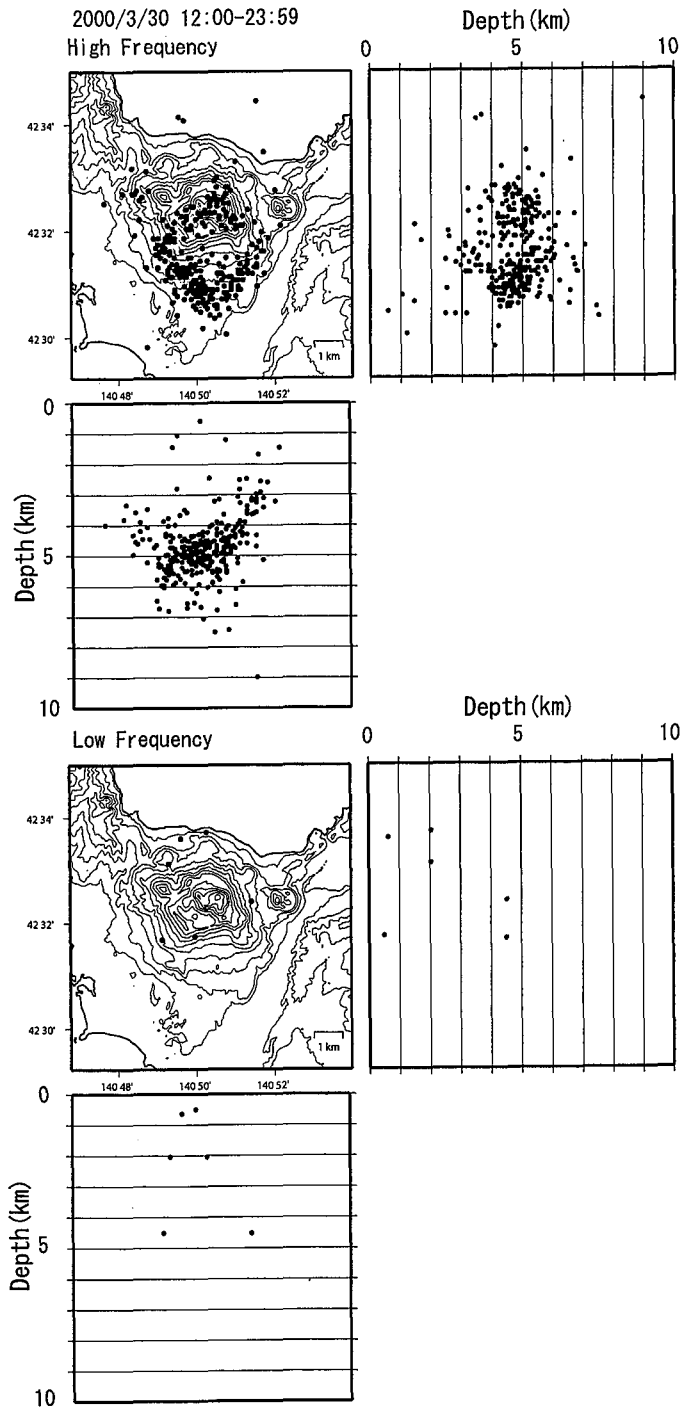


Fig. 7e. For the period from 2000/3/30 12:00 to 3/30 23:59.

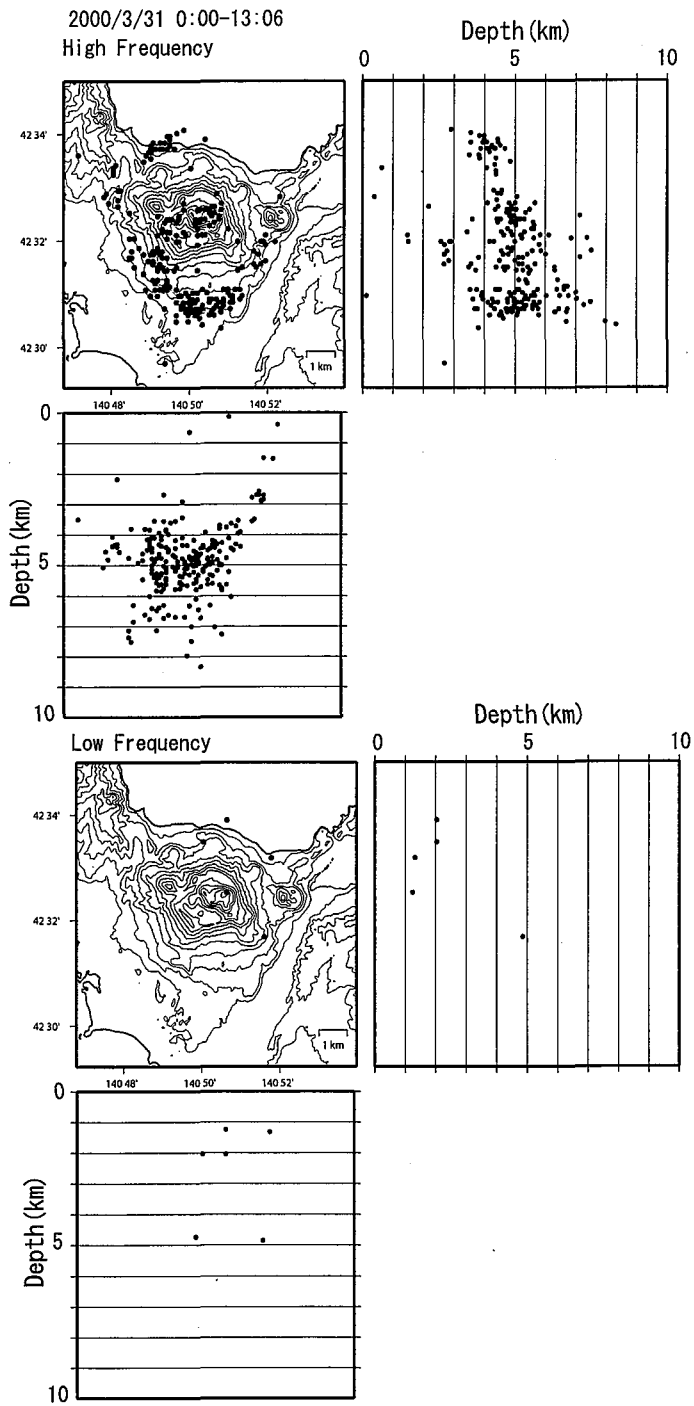


Fig. 7f. For the period from 2000/3/31 0:00 to 3/31 13:06.

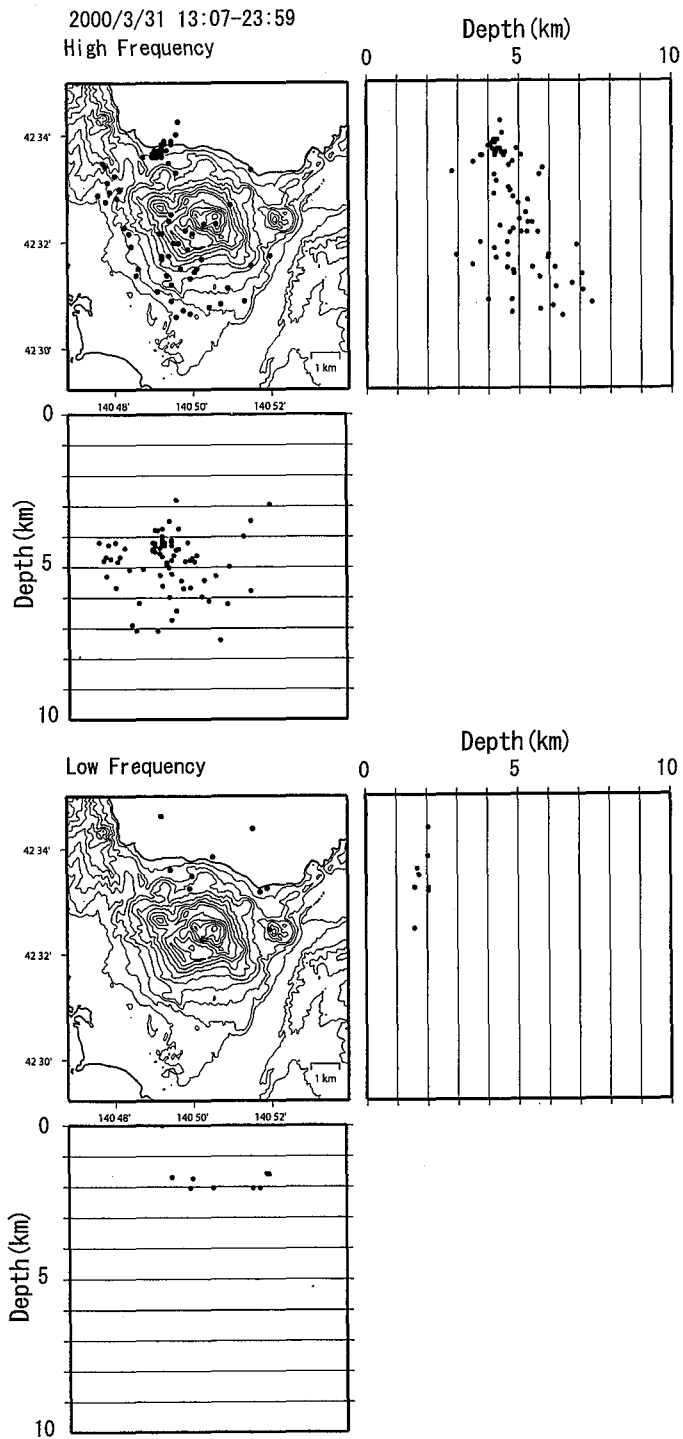


Fig. 7g. For the period from 2000/3/31 13:07 to 3/31 23:59.

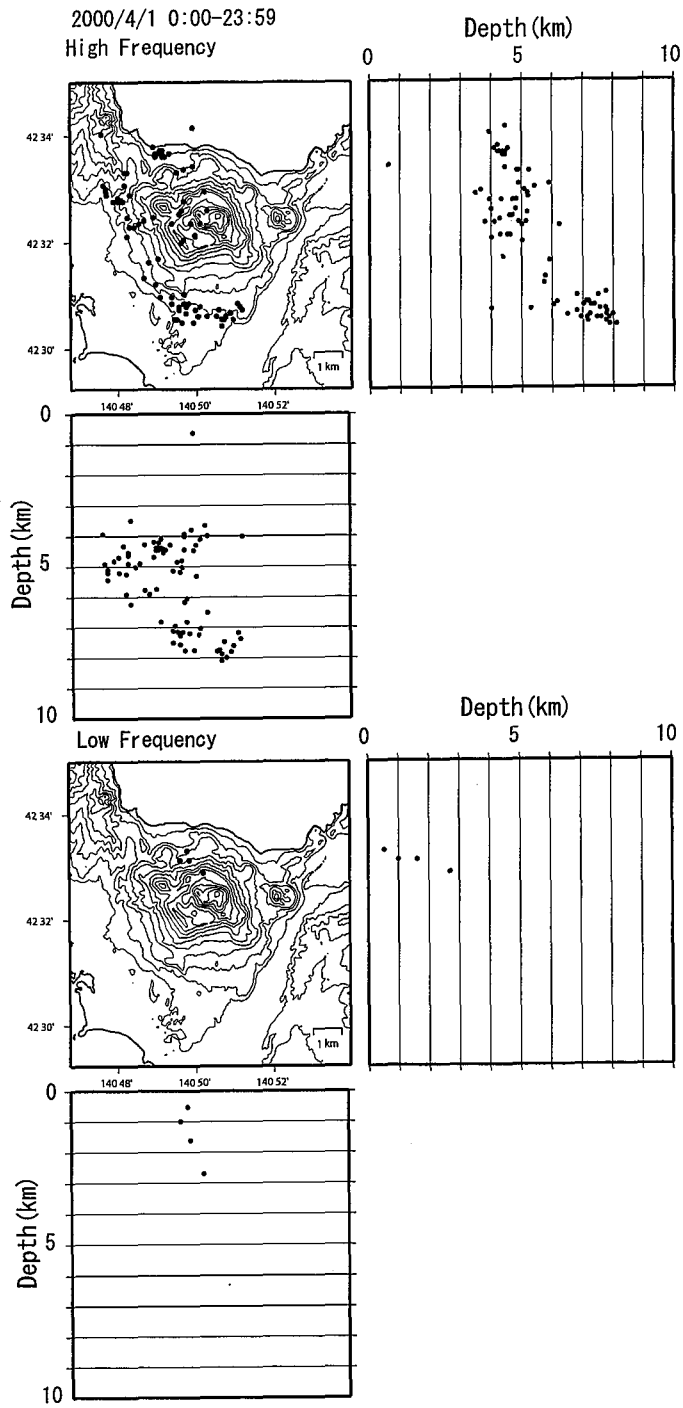


Fig. 7h. For the period from 2000/4/1 0:00 to 4/1 23:59.

の起き始めであるこの時期は、有珠山山頂から北部にかけて深さ4~6 kmに震源が位置している。29日になると震源域が北側と西側にやや拡大し深さもやや浅くなり(Fig. 7 b), 29日6時頃から震源域が南側にも広がり始める。地震が増え始めた29日16時以降も震源域の南への拡大が続き活動の中心も南側に移動するが(Fig. 7 c), 山頂北側の地震活動は少なくなるとともに更に北側にも地震が発生するようになる。また、4 kmよりも浅い地震もこの時期に発生しはじめる。ところで、29日13時からMTYD観測点(Fig. 2)の設置が完了しこのデータも加わったが、Fig. 8の時空間分布を見る限り観測点が多くなったことによって震源位置が変化するなどの影響は見られない。30日になると山頂南側に地震が発生しない領域が現れ、時間と共にその大きさも大きくなり、それと同時に6 kmよりも深い地震が発生する(Fig. 7 d, Fig. 7 e), 31日になると地震発生数も減少し始め、震源域の南への拡大が止まる(Fig. 7 f)。この時期、震源域の南北方向の深さ分布を見ると、震源域が北から南に向かって深くなる傾向がはっきりするようになる。31日13時7分に西山火口から噴火を開始する前には急激な地震発生回数の減少がはじまるが(Fig. 3)、このことは震源分布からも明らかに見て取ることが出来る(Fig. 7 g), 4月1日になると一連の地震で最大の地震(M 4.6)が震源域南側の深さ7 kmで発生するが、この地震の発生後6時間の震源分布を見てみると(Fig. 7 h), その場所で余震が発生していることが分かる。その後は、全域に渡って地震活動は低調に推移した。

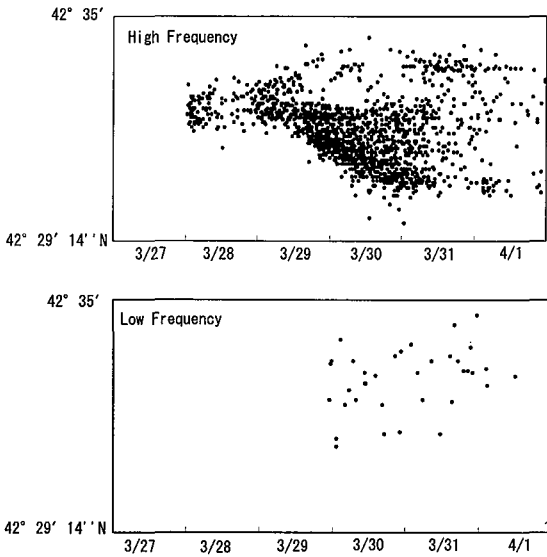


Fig. 8a. Space-time distribution of earthquakes along N-S profile from 42° 29' 14" to 42° 35' N. Map showing those of high-frequency earthquakes (upper diagram) and low-frequency earthquakes (lower diagram), respectively.

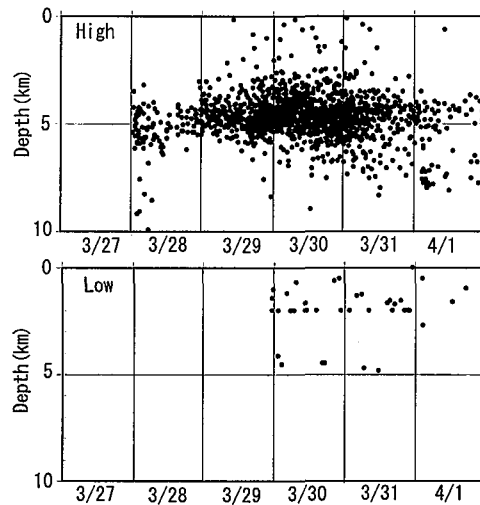


Fig. 8b. Depth-time distribution of earthquakes. Map showing those of high-frequency earthquakes (upper) and low-frequency earthquakes (lower), respectively.

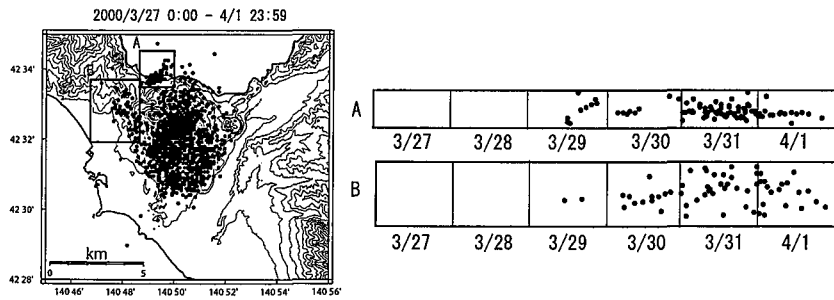


Fig. 9. Map showing two local earthquake clusters, A and B. Space - time distribution of earthquakes in the clusters A and B.

また、震源域の西側と北西側に2つのクラスターが29日12時以降形成される。Fig. 9はこの2つのクラスターの震源を南北方向に投影した時空間分布である。これらの活動は全域での地震活動が低くなる31日以降、それとは逆に活動が高まる。この2つのクラスターの位置は、31日と4月1日に噴火する西山火口と金比羅山火口の位置の近くに分布している。

次に低周波地震について見ていく。29

日23時から、この観測網で震源が決定できる低周波地震が発生しはじめる (Fig. 7c)。その震源位置は山頂より北側に分布し、深さは4 kmよりも浅く、大部分の高周波地震が発生していた領域よりも浅いところに分布している。Fig. 10に高周波の地震と低周波地震の今回震源決定した地震の時間別の地震発生回数分布を示す。この図を見ると、高周波の地震が減少した31日にも、低周波地震の数に大きな変化はなく、数が減少するのは4月1日になってからであり、高周波の地震活動と比べてその活動様式が異なっていることが分かる。

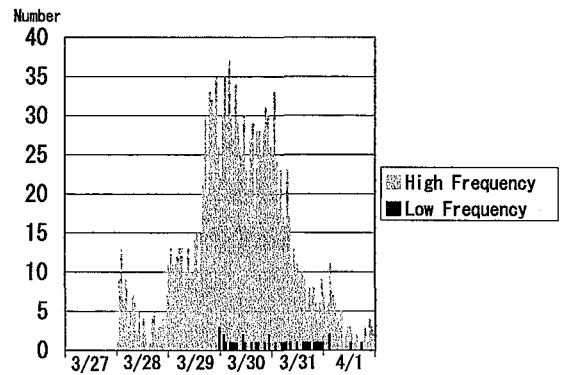


Fig. 10. Hourly number of high- and low-frequency earthquakes relocated in this study.

IV. 議 論

噴火前の3月28日から噴火後の4月1日までの5日間に、震源域の拡大などさまざまな変化が見られた。これは有珠山の噴火に伴うマグマの動きの影響を強く受けていると考えられる。Fig. 3に示したJMAA点の時間別地震回数の急激な増加と震源域の南側への拡大は、ほぼ時間を同じくして進行していたことが今回の解析の結果から示された。高橋・他 (2002) は、有珠山山麓周辺に設置したGPS観測の結果から求められた地殻変動量とJMAA点の地震回数には良い相関があると述べている。また、岡崎・他 (2002) は、有珠山山麓西部の今回噴火した西山火

口周辺から、洞爺湖温泉街にかけての狭い地域において、JMAA 点の地震回数が減少した 31 日以降も顕著な地殻変動が継続されていたことを報告している。これらの結果は、地殻変動量が激しかった時期には地震回数も多くなり、なおかつ震源域の南側への拡大も進行していき、その後、新しく形成される火口周辺に震源や地殻変動が移っていったことを示している。

また、低周波地震は、高周波地震の活動していた時期より遅れて活動が活発化した。高周波地震の活動が低くなった 31 日になっても低周波地震の活動は活発で、4 月 1 日になって、活動が終息した。また、震源の深さは高周波の地震に比較して浅いところで発生していた。吉田・他(2002)は、強震計で観測された低周波地震の波形を用いたフォワードモデリングによってその震源メカニズムを求め、今回発生した地震は、マグマの貫入に伴う開口割れ目の開閉で説明が可能であることが示された。これらのことはマグマが高周波の地震が発生している深さよりも浅いところに 30 日頃から上昇していき、それによる開口運動によって低周波地震が励起された可能性を示している。

V. 結 論

広域地震観測網で観測された連続地震波形データを用いて手動検測を行い、2000 年有珠山噴火活動に伴う地震活動及び震源分布を明らかにした。3 月 28 日 0 時 44 分に有珠山山頂北部で始まった地震は、29 日になるとその数を増し、それと時を同じくして震源域も南側に拡大するとともに、その活動域の中心も南側に移動していった。その後、地震活動は数が減少し 31 日まで続いた。それに伴って、山頂南部に地震が発生しない領域が現れ、震源域の拡大と同時にその領域も広がっていった。それとは別に 29 日午後から後に 2 つの火口が形成される有珠山西部と北西部に地震のクラスターが形成され始めた。この活動は有珠山山頂を中心とした活動が低下し始めた 31 日以降も継続し、4 月 1 日まで続いた。また、今回の地震活動では低周波地震も有珠山山頂北部で観測された。低周波地震は、高周波地震と比べて震源の深さが浅く、活動の開始した時期も高周波地震の活動が開始した時期より遅れて 29 日 23 時に開始した。また、高周波地震の活動が低下した 31 日でも、低周波地震の活動は 30 日と同じ程度の活動があり、この活動は 4 月 1 日まで続いた。

有珠山山頂周辺の高周波地震、新しく形成した火口周辺の地震、低周波地震は、発生位置や発生時刻に特徴があり、GPS 観測によって得られた地殻変動とも時間的に相関がある。これらのデータは今回の有珠山噴火に伴うマグマの移動の影響を強く受けているものと考えられ、今後これらのデータに基づいた総合的な有珠山噴火のプロセスの解明を行う必要がある。

謝 辞 この研究を行うにあたり、北海道大学と気象庁の地震観測点のデータを使用しました。また北海道大学大学院理学研究科附属地震火山研究観測センターの本谷義信助教授と高橋浩晃助手、北海道大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻の笹谷努助教授、北海道立地質研究所の岡崎紀俊氏には、本論文を読んでいただき、議論して頂きました。更に、札幌管区気象台の宮村淳一

氏には JMAA 点の当時の観測状況について詳しく説明して頂きました。感謝いたします。

文 献

- 一柳昌義・笠原稔, 2001 a. 気象庁速報検測データを北海道大学地震データ処理 (WIN) システムの自動処理検測データに自動的に併合するプログラムの開発, 東京大学地震研究所技術研究報告, 7 (印刷中).
- 一柳昌義・田村慎・笠原稔, 2001 b. 広域地震観測網で得られた有珠山 2000 年噴火に伴う地震活動と P 波初動メカニズム解の決定, 北海道大学地球物理学研究報告, 64, 115-131.
- 卜部卓・東田進也, 1991. ワークステーションによる微小地震観測網波形検測支援システム, 日本地震学会講演子稿集, 1, 70.
- 岡崎紀俊・高橋浩晃・笠原稔・石丸聡・森濟・北川貞之・藤原健治・中禮正明, 2002. 高密度 GPS 観測による 2000 年有珠山噴火の地殻変動, 火山, 有珠山特集号 (投稿中).
- 高橋浩晃・岡崎紀俊・石丸聡・森濟・松島健・渡邊篤志・三浦哲・中尾茂・加藤照之・木股文昭・笠原稔, 2002. 2 周波 GPS 受信機による 2000 年有珠山噴火前後の地殻変動観測, 火山, 有珠山特集号 (投稿中).
- Hirata, N. and M. Matsu'ura, 1987. Maximum-likelihood estimation of hypocenter with origin time eliminated using nonlinear inversion technique, *Phys. Earth Planet. Int.*, 47, 50-61.
- 吉田邦一・笹谷努・一柳昌義・大島弘光・田村慎, 2002. 2000 年有珠山噴火に伴う低周波地震, 火山, 有珠山特集号 (投稿中).