



Title	北海道の活動的火山における最近の地震活動 : 樽前山
Author(s)	青山, 裕; AOYAMA, Hiroshi; 大島, 弘光 他
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 67, 111-129
Issue Date	2004-03-15
DOI	https://doi.org/10.14943/gbhu.67.111
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/14337
Type	departmental bulletin paper
File Information	67_p111-129.pdf



北海道の活動的火山における最近の地震活動—樽前山—

青山 裕・大島 弘光・鈴木 敦生・前川 徳光

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

(2004年1月5日受理)

Recent seismic activities at active volcanoes in Hokkaido—Tarumaesan—

Hiroshi AOYAMA, Hiromitsu OSHIMA, Atsuo SUZUKI and Tokumitsu MAEKAWA

Institute of Seismology and Volcanology, Graduate School of Science, Hokkaido University

(Received January 5, 2004)

A reconstruction of the monitoring system for Tarumae Volcano enabled the transmission of real-time monitoring data to Usu Volcano Observatory by December 2002. As a result, seismicity around the volcano in its steady state could now be continuously observed and the temporal and spatial distribution of background seismicity made clear. From the seismic data until December 2003, three focal clusters were revealed, one each in a shallow region beneath the summit lava dome and in the north and south parts of Mt. Fuppushi-dake. The seismicity beneath the summit dome is concentrated at depths shallower than 1 km below sea level and consists mainly of micro-earthquakes of magnitudes of zero or less. The two other clusters locate at depths between 2–3 km below sea level. Earthquakes belonging to these two clusters are classified as A-type earthquakes according to waveform characteristics. After the 2003 Tokachi-oki earthquake on September 26, a remarkable seismic swarm occurred beneath the summit dome and in the south of Mt. Fuppushi-dake. The swarm beneath the summit dome included several low frequency earthquakes such as the BL-type and T-type characteristic to volcanic earthquakes. From October 5, eight days after the swarm in September, steaming activity around the summit dome intensified and fumaroles on the southwestern face of the summit dome brightened simultaneously. It is considered that the movement of crustal fluid relates to the excitation process of BL-type and T-type earthquakes. We estimated the permeability of rocks beneath the summit dome by assuming that the steaming activity was induced by hot water rising from the focal area of low frequency earthquakes. The estimated permeability is equivalent to that of the Tertiary system around Usu Volcano. This result will be valuable as a direct indication of the participation of crustal fluid in the excitation of low frequency earthquakes.

I. はじめに

支笏カルデラの南端に位置する樽前山は、道央圏の主要都市に最も近い活動的な火山である。

最近のマグマ性の大噴火は、現在の山頂ドームを生成した1909年の活動である。1909年の活動のあと1955年頃までは山頂で小規模な噴火活動を繰り返したが、1978年～1982年に小噴火と少量の降灰現象および山頂ドーム西側への地熱域拡大が確認された以外は、表面的には比較的火山活動度の低い状態が続いてきた(北海道大学理学部有珠火山観測所, 1984; 札幌管区气象台, 1999)。

火山性地震の観測は火山の物理観測の中でも最も基本的な項目の1つである。火山性地震の活動度は火山の活動度を示す1つの目安として用いられている。樽前山では1970年代から1980年代初めにかけての噴火活動の後、長い期間地震活動の低い状態が続いていた。しかし最近の札幌管区气象台による観測によって、1996年頃から地震活動度が高まっていることが明らかにされている。また低周波地震、火山性微動、モノクロマティックな地震など、火山特有に観測される特異な波形を持つ地震もしばしば観測され、多様な地震活動も樽前山の特徴と言える。もっとも、最近数年間の高精度の観測により、静穏時には地震活動が少ないと言われていた有珠山や北海道駒ヶ岳においても、定常的に地震活動が見られることが明らかになってきている(例えば、青山ほか, 2004)。

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有珠火山観測所(ISV-UVO)では、2001年度より樽前山において火山観測データ伝送システムの更新作業を開始した。2003年末までに、樽前山の観測データは有珠火山観測所(UVO)へリアルタイム伝送されるようになってきている。新システムによる観測が始まってから約1年が経過し、再び3次元的な震源分布を推定できるようになった。火山活動の盛衰が数年～10年程度の時間スケールを持っていることを考えると、定常的な地震活動を議論するには1年という期間はあまりに短すぎる。しかし、1999年頃から山頂火口原のA火口で600℃近くまでの温度上昇が認められるようになったこと(札幌管区气象台, 2002)、1999年にはドーム南西の噴気孔群においても噴気活動の活発化や地温上昇が認められるようになり(札幌管区气象台, 1999)、2003年10月にもドーム南西の噴気孔群が明るく見える現象が確認されたことなど、樽前山では表面的な熱活動に活発化の傾向が見られている。また重力測量や水準測量の結果からはいずれも山体膨張の傾向が認められており、長期的に見ても山体下部へのマグマの蓄積が進行していると推測されている(前川ほか, 1999)。このような状況を鑑み、地震活動についても現在の状況について報告すべきであると考えた。また、十勝沖地震の直後に低周波地震を含む群発地震活動が発生するなど、特記すべき現象もある。

本論では主として2002年12月以降の地震活動について報告し、樽前山周辺における地震活動の空間分布と、2003年9月26日に発生した十勝沖地震の直後に見られた群発地震活動と表面現象との関係について簡単な考察を行う。

II. 2001年以前の地震活動の推移と地震観測の変遷

樽前山における常時地震観測は、山頂ドームから約1.3 kmの樽前山北東側に気象庁A点が設置された1967年7月より開始された(札幌管区气象台, 1982)。1972年以前の樽前山の活動状況と臨時観測については、北海道防災会議(1972)に詳しくまとめられているので本論では省略す

る。

Fig. 1のグラフは札幌管区気象台によってカウントされた樽前山の月別地震回数と1967年以降の積算地震回数を示す。気象台で樽前山周辺の地震であると判定するための計数基準は1994年8月に変更された。その後樽前山北側にC点が設置されたことを受け、2000年11月22日より基準観測点がC点に変更された。A点の旧基準では変位波形の両振幅で 5×10^{-8} m以上かつS-P時間が5秒以内となる地震をカウントしていたが、1994年8月以降の新基準では条件が厳しくなりA点における変位波形の両振幅で 2×10^{-7} m以上かつS-P時間が2秒以内と、樽前山に近く規模が大きい地震のみをカウントするようになった。2000年11月22日から運用されているC点での基準は、変位波形の両振幅で 1×10^{-7} m以上かつS-P時間が2秒以内とされている。2003年10月までの約36年間で気象台の計数基準を満たす地震の総数は約20000個に達する。

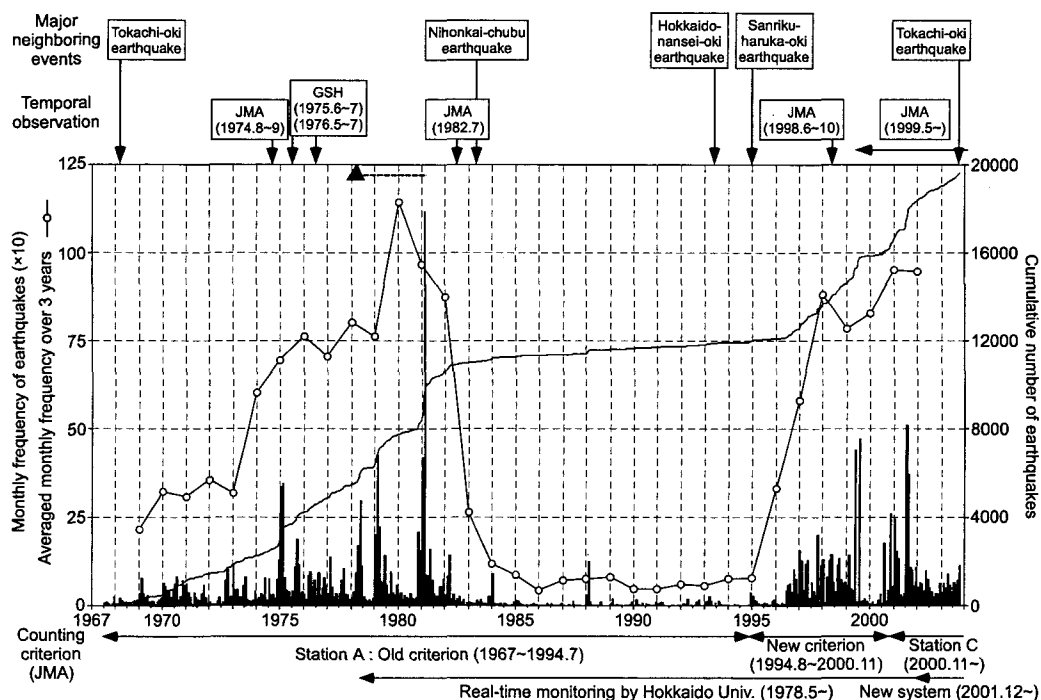


Fig. 1. Monthly frequency (vertical solid bars, ten times left axis) and cumulative number (solid curve, right axis) of earthquakes observed at station JMA-A and JMA-C since 1967. Left axis also shows monthly frequency of earthquakes averaged over 3 years (solid line with open circles, left axis). Original data are provided by Volcano Monitoring and Information Center at Sapporo District Meteorological Agency (JMA). The counting criterion for volcanic earthquakes of JMA was changed on August 1, 1994. The old criterion required peak-to-peak amplitude more than $0.05 \mu\text{m}$ and S-P time shorter than 4.0 s at station JMA-A. The new one required peak-to-peak amplitude of $0.2 \mu\text{m}$ and S-P time shorter than 2.0 s. New station JMA-C was built on the northern slope in November 2000, after which station JMA-A fell into disuse. The present criterion for JMA-C requires peak-to-peak amplitude of $0.1 \mu\text{m}$ and S-P time shorter than 2.0 s. Solid triangle and attached broken line indicate a small eruption and an ensuing active period from the late 70's to the early 80's.

積算地震回数グラフおよび月別地震回数の3年平均値に注目すると、樽前山の地震活動は(1)1960年代～1982年、(2)1983年～1995年、(3)1996年～の3つの時期に区分できる。

(1)の期間は地震活動度が徐々に高くなっていった時期にあたる。1978年5月には小噴火が発生し支笏湖畔で降灰が確認されるなど、表面的な火山活動にも活発化が見られた時期であった。1981年2月には地震活動が活発化し、1118回の地震がカウントされている。小噴火に先立つ1975年と1976年には、北海道立地下資源調査所によって火山性地震の震源分布を推定するためのトリパタイト観測が実施され、山頂火口原北西側の深さ0～2 km付近に震源が推定された(広田・佐久間, 1977)。1981年7月には臨時観測が札幌管区气象台によって行われ、やはり同じく山頂火口原内ドームの北西側に10個の震源が推定された(札幌管区气象台, 1982)。北海道大学理学部による常時地震観測も1978年5月より開始され、梅原ほか(1981)による震源推定の結果でも山頂火口原の西側から北西側に震源が推定された。

その後1982年末から約13年間は(2)の地震活動静穏期に入る。1983年10月にはドーム西麓や南西噴気孔群では熱活動の活発化が認められたが(北海道大学理学部有珠火山観測所, 1984)、月平均の地震回数はそれまでの80回以上から10回以下に落ち込んだ。ときおり樽前山周辺で有感となる地震が観測されたが、表面的な熱活動も次第に衰退していった(札幌管区气象台, 1999)。この間の火山性地震活動については、1984年まで3次元的な空間分布が求められており、いずれも山頂ドームの西側約500 mの海水準付近を活動の中心としていることが示されている(北海道大学理学部有珠火山観測所, 1984)。1988年には複数の相似地震群からなる群発地震活動が観測され、一時的に地震活動度が高まった(北海道大学理学部有珠火山観測所, 1988)。

(3)の期間は、1996年夏から現在に至るまでの地震活動が再び活発化した時期にあたる。1998年頃からは1ヶ月あたりの地震回数が80回前後にまで増加し、ほぼ1982年以前のレベルに戻っている。地震活動の活発化を受け、札幌管区气象台では山頂火口原を中心とした多数の地震計による臨時地震観測を1998年に行った(札幌管区气象台, 1999)。山頂ドームから半径2 km以内に10点の地震観測点を設けたことで、山体の極浅部で発生していると考えられる地震598個が検知され、このうち98個の震源が推定された。この臨時観測で推定された震源分布は梅原ほか(1981)や北海道大学理学部有珠火山観測所(1984)により推定された震源分布に良く一致し、山頂ドームの西側500 m付近を中心とした領域の海水準付近に集中している。引き続き1999年からは山頂火口原を中心とした機動観測が継続的に行われ、山体極浅部での地震活動の時間的変化が捉えられるようになった(札幌管区气象台, 2001)。定常観測点も2000年11月に既存のA点から、より観測条件の良いC点へ移設された(札幌管区气象台, 2002)。

III. 2002年12月以降の常時地震観測

ISV-UVOでは2000年度秋より北海道駒ヶ岳のデータ伝送システムの更新を開始し、有珠山の2000年噴火で中断していたUVOへのリアルタイムデータ伝送を2002年12月より再開した。2001年度から2003年度にかけて常時火山観測点の整備新設作業を重ねた結果、2003年11月現在

では Fig. 2 に示した計 10 観測点に地震計が設置されている。それぞれの観測点の稼働期間は Fig. 3 の通りで、SKH と PRT では NSK, BBR, KTR の観測開始とあわせて 2001 年 10 月に観測を中止した。山頂溶岩ドームから観測点までの水平距離は約 1.2 km (KTR) ~ 約 12.1 km (MRN) である。

北東山腹の TRB には地表設置型地震計と共にボアホール型地震計が併設されており、3 成分速度計(地表深度 100 m, SD-203 BS 型)が稼働している。西村ほか (1997) のボアホール型地震計に関する記述には誤りがあるため、ここで訂正する。その他の地表設置型地震計を用いた観測点では、観測点の新設や実験的観測の実施など研究観測上の必要に応じて地震計を適宜変更しているが、一般に速度型の短周期地震計 (L-4 C-3 D) もしくは広帯域地震計 (STS-2, CMG-40 T) を設置している。一部の観測点では、試験的に加速度計 (JEP-6 A 3, SBPEI) を併設している。2003 年 12 月現在における樽前山周辺の地震観測点座標および設置機器は Table 1 にまとめた。機器更新後の新しいデータ伝送網については Appendix に概略を記した。

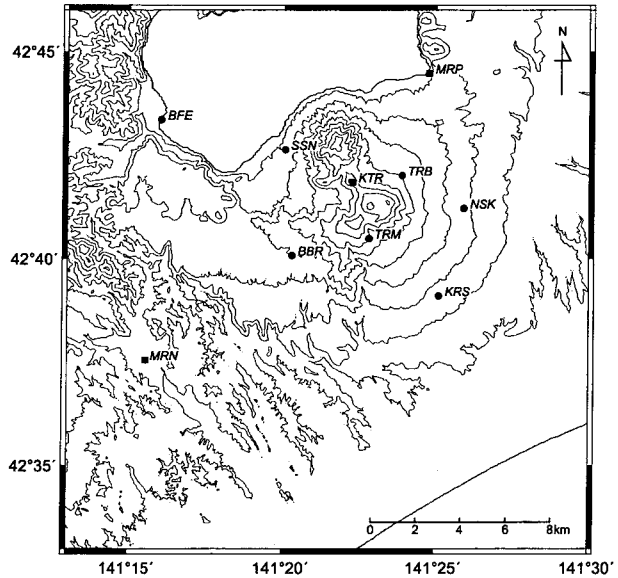


Fig. 2. Location map of seismic stations on and around Tarumae Volcano operated by ISV-UVO as of December 2003. Solid circles and squares correspond respectively to permanent and temporary stations, from which all monitoring data are sent to UVO in real-time.

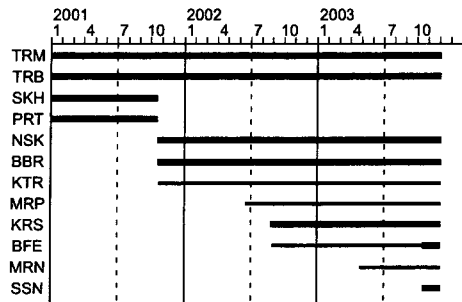


Fig. 3. Operation periods of seismic stations. Operation of a permanent station is expressed by a thick bar. A thin bar shows the period of a temporary station.

IV. 2002 年 12 月以降の地震活動

2002 年 12 月以降に常時地震観測網で検知され、UVO でのルーチン処理によって震源が決定された地震の総数は、2003 年 12 月 17 日までで約 215 個となった。Fig. 4 には 2002 年 12 月以降の樽前山周辺の(a)震央分布, (b)震源分布の東西断面図, (c)震源分布の南北断面図, (d)震源の時間—深さ分布図, (e)震源の時間—緯度分布図および(f)積算地震回数を示す。ここでは(a)の平面図に示

Table 1. Location of and list of instrumentation of seismic stations of Tarumae Volcano as of Dec. 2003.

Station	Lon.(deg)	Lat.(deg)	Alt.(m)	Seismometer	Digitizer	Comm.	Power Supply	Remarks
TRM	141.3804	42.6748	645	STS-2 JEP-6A3	LT8500	RT/RR-48	12VDC(Solar)	Tunnel
TRB	141.3983	42.7002	480 385	CMG-40T SD-203BS	LS7000XT LS8000SH	RT/RR-48	12VDC(Solar)	Borehole
NSK	141.4323	42.6870	325	L-4C-3D	LS8000SH	RM800	12VDC(Solar)	
BBR	141.3383	42.6680	490	CMG-40T	LS7000XT	RT/RR-48	12VDC(Solar)	
KTR	141.3711	42.6975	880	L-4C-3D	LS7000	RT/RR-48	12VDC(Solar)	Temporary
MRP	141.4127	42.7413	260	L-4C-3D	LS8000SH	Analog line	100VAC	Temporary
KRS	141.4186	42.6517	261	CMG-40T	LS8000SH	RM800	12VDC(Solar)	
BFE	141.2672	42.7227	250	L-4C-3D	LS8000SH	Analog line	100VAC	
SSN	141.3343	42.7107	324	L-4C-3D SBEP1	LS7000XT	RM300	12VDC(Solar)	
MRN	141.2594	42.6259	143	L-4C-3D	LS8000SH	Analog line	100VAC	Temporary

された領域内の海面下 0 ~ 13 km に震源が推定された地震のみをプロットした。

樽前山周辺の地震活動は、時空間的に集中して発生し群発地震活動的な様相を示すことが多い。同様の特徴は Fig. 1 の気象庁による計数からも見てとれる。2002 年 12 月以降では、2002 年 12 月 24 日~26 日、2003 年 9 月 26 日~29 日、11 月 13 日~16 日、12 月 5 日に地震活動度の増大が現れた。9 月 26 日からの地震活動は、襟裳岬南東方で十勝沖地震 ($M_{JMA}=8.0$) が発生した後の午前 6 時過ぎから始まった。積算地震回数はこのような群発活動期にステップ的に増加している。

山体周辺には空間的に震源がまとまっている領域が複数認められる。山体近傍で特に明瞭なのは、山頂ドームやや西側の極浅部、風不死岳南側の深さ 3 km 付近、風不死岳北西側の深さ 3 km 付近の 3ヶ所である。この 3つの活動域は、樽前山-風不死岳-恵庭岳を結ぶ線とほぼ平行に、北北西-南南東方向に並んでいるようにも見える。

山頂ドームやや西側の地震活動は、ほとんどがマグニチュード 0 以下の極微小地震である。山頂近傍の 3 観測点と西南西側の BBR のみで検知され、震源決定を行える限界に近い。活動域は東西方向に延び、東側で海水準付近、西側で深さ 1 km 程度と山頂に近いほど浅くなるような震源分布を示す。2003 年 9 月 26 日の地震活動以降この領域での地震活動が活発化しており、2003 年 11 月 13 日~16 日と 12 月 5 日の地震活動もこの領域で発生した。ときおり観測される低周波地震や T 型地震も、この領域で発生しているようである。札幌管区気象台による 1998 年以降の観測では、1998 年には山頂ドームの西側約 600 m に震源が集中していたが、1999 年にはドームの西側約 200 m、2002 年 11 月~12 月にはドーム直下のやや東側へと震源が移動していると報告されている(札幌管区気象台, 1999, 2001, 2003)。我々のデータは 2002 年 12 月以降であるため単純に比較はできないが、札幌管区気象台の震源分布よりも明らかに西側に偏っている。この理由の 1つとして、観測点配置の問題が考えられる。1999 年の気象台の観測結果を見ると、海水準以浅ではドームの西側約 200 m を中心とした領域に震源が集まっているが、海水準以深では西側へ行くほ

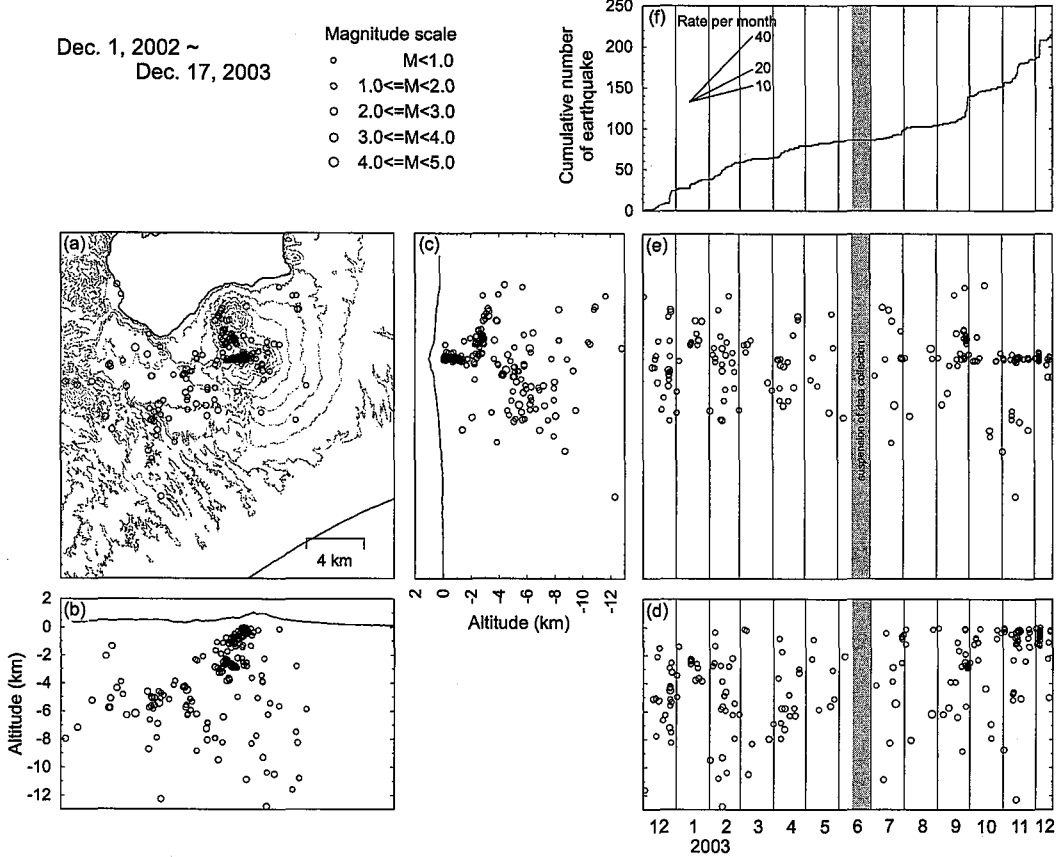


Fig. 4. Space-time distribution of hypocenters and cumulative number of earthquakes recorded since January 2001. (a) Map view of epicenters. (b) Projection of hypocenters on an EW vertical plane. (c) Projection of hypocenter on a NS vertical plane. (d) Depth-time distribution. (e) Latitude-time distribution. (f) Cumulative number of earthquakes. Magnitude scale is given on the upper left corner.

ど深くなる震源分布が得られている。この分布は Fig. 4 に示した震源分布と似た傾向である。この 1999 年の観測と 1998 年および 2002 年の観測の相違点は、山頂ドーム西側の観測点の有無である。1998 年と 2002 年の観測では、山頂の西側にも十分な観測点が配置されていたために、海水準以深の震源分布が西側に広がらなかったのかもしれない。そのような視点で我々の観測点を考えてみると、山頂ドームに近い KTR や TRM ではドームの南北方向に位置し、西側にある観測点 BBR までは約 4 km と距離が遠い。また BBR 近傍は第三系が地表露出している地域であるため、山体東側に比べて地震波速度が速いことも考えられる。地震波速度の水平不均質を考慮していないために、我々の震源決定結果が西側へ引っ張られている可能性もあるだろう。気象台の震源分布との相違は今後さらに検討すべき課題である。

風不死岳南側の深さ 3 km 付近に見られる震源の集中は、主に 2003 年 1 月 14 日と 9 月 28 日の地震活動によるものである。同一の群発活動期間中に発生する地震は、ほとんどが相似地震であ

る。規模が小さくメカニズムの推定はできないが、多くの観測点でS波が明瞭に認められることから火山構造性地震（A型地震）である可能性が高いと考えられる。

風不死岳北西側の深さ3 km付近には、主に2002年12月24日～26日の活動期間や2003年7月に発生した地震の震源が推定されている。やや震源がばらついているように見えるが、観測網の北側の縁に近いこと、地震が発生した時期がとびとびで検測の質が地震によって異なる可能性があることなどが影響していると考えられる。この領域で発生する地震もS波が明瞭に認められることから、火山構造性地震（A型地震）である可能性が高い。これら風不死岳近傍で発生する地震活動は、北海道大学理学部有珠火山観測所（1984）でD-typeとされていた地震活動に対応すると考えられる。

その他、樽前山の西方にも地震活動の集中する領域が複数認められる。山頂ドームの西方約5 km付近では、2002年12月24日～26日に地震活動が高まった。当時はMRN観測点が設置される前で、推定された活動域は観測網の外側となるため、震源の絶対位置については不確定さが残る。1時間半ほどの短い間に地震活動が集中しており、波形の相似性も非常に高い。MRNとBBRの中間付近でも地震活動が確認されている。地震活動の時空間的な集中度合いは他の領域に比べて高くないが、この1年間ほど定常的に発生しているようである。

V. 樽前山で観測された様々な地震

樽前山では様々な波形の特徴を持った地震が観測される。一般的に用いられているA型地震、B型地震という分類だけでなく、波形の特徴によってさらに細かく分類されてきた。例えば札幌管区気象台（2003）では、A型地震、BH型地震、BL型地震、BP型地震という分類を用いている。この分類ではB型地震を3種類に分け、高周波成分に富む地震（BH型）、低周波成分が大きい地震（BL型）、特定の周波数成分に富む単色地震（BP型）としている。BP型地震にはT型（N型）地震も含まれる。ここでは札幌管区気象台（2003）の分類を参考に、樽前山で観測される地震の波形例とランニングスペクトルを示す（Fig. 5）。ランニングスペクトルは1.28秒のウィンドウを0.64秒ずつ移動させながら計算した。コンター間隔は地震の規模に応じて変化させている。

A型地震は火山構造性地震とも呼ばれ、樽前山周辺で広く発生する。S波の到着が明瞭で、初動の極性が押しとなる観測点、引きとなる観測点の両方が現れる。西（1978）では桜島で発生するA型地震の初動極性分布から、断層運動による4象限型のメカニズムを持つとしている。風不死岳近傍の地震活動は深さが3 km程度とやや浅いが、波形の特徴からA型地震と推定される（Fig. 5 a）。地震波に含まれる周波数成分は主に8 Hz以上で、初動付近からコーダ部まで高周波成分に富んでいる。ここで示した例は風不死岳近傍で発生した地震で、観測点までの距離が近いいため振動の継続時間も短い。

BH型地震は山頂ドーム近傍の極浅部で発生する。震源近傍の観測点ではS波と思われる相を識別することができる。A型地震と同様に高周波成分に富み、ここに示した地震は10 Hz～17 Hz付近の振動から構成されている（Fig. 5 b）。

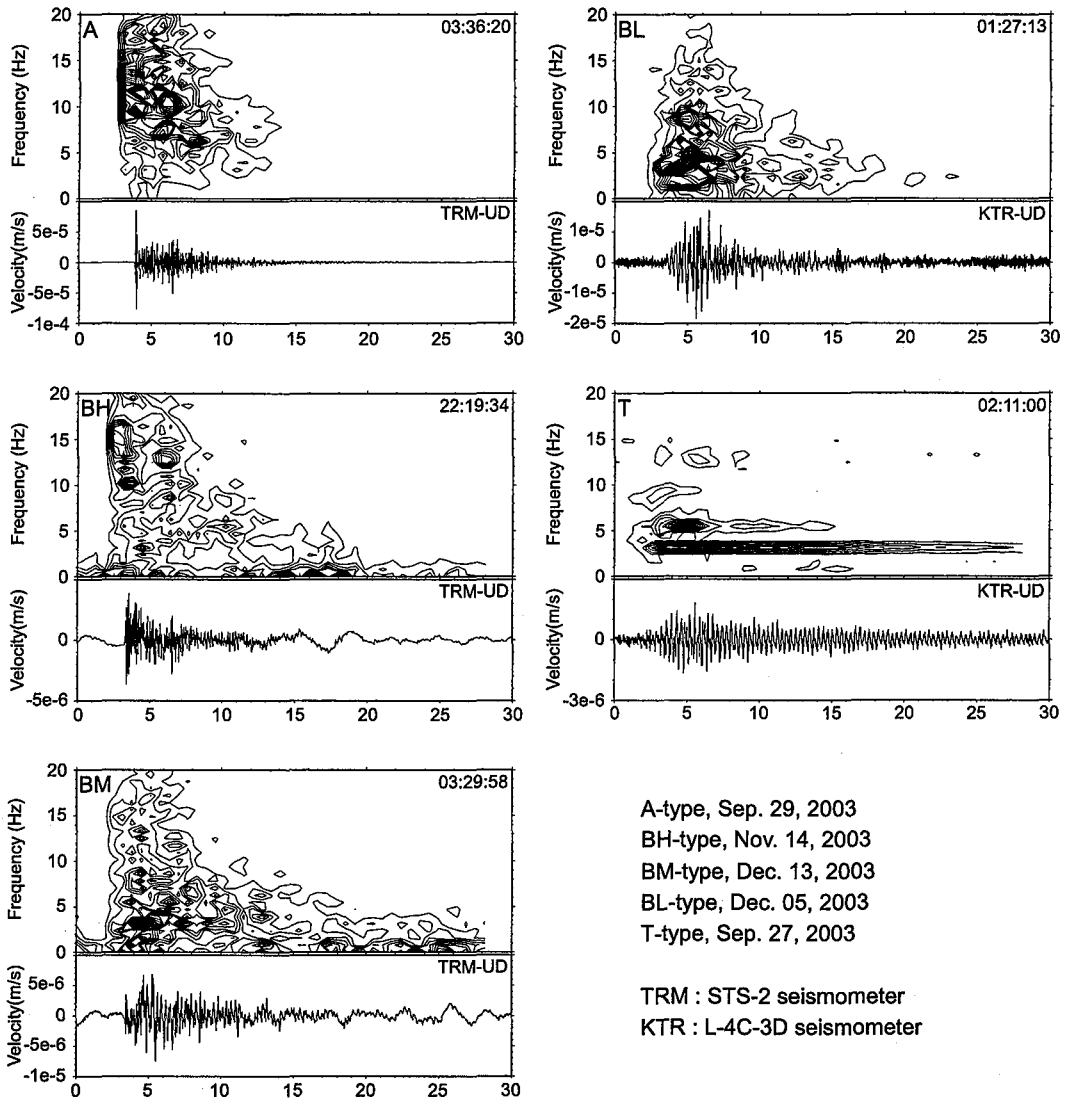


Fig. 5. Velocity seismograms and moving spectra of five types of earthquakes observed at Tarumae Volcano. These spectra are calculated by FFT with 1.28 s time window moving at intervals of 0.64 s. The contour interval of moving spectra is adjusted to the amplitude of seismogram.

BM型地震も山頂ドーム近傍の極浅部で発生する。初動付近はBH型地震と同様に15 Hz付近の周波数成分を含むが、初動到着の約2秒後から3~4 Hzの振動が明瞭に認められるようになる (Fig. 5c)。この3~4 Hzの振動はやや長い時間継続する。このような特徴を持つ地震は他の火山でも確認されており、Hybrid型と呼ばれている (Lahr et al., 1994)。

BL型地震は初動が不明瞭なため震源位置が推定しにくい、山頂ドーム近傍の極浅部で発生すると考えられる。初動部から高周波に乏しく、BM型地震に分類される地震とは異なっている

(Fig. 5 d). P 波の立ち上がりが非常に不明瞭で S 波の同定も難しい. Iguchi (1994) では桜島で発生する BH 型地震と BL 型地震について火道内のマグマの発泡現象と関係していると結論しているが, ここで分類した樽前山の地震は, 桜島の BH 型地震や BL 型地震とは震源深さ, 周波数帯域, 波形の特徴が明らかに異なっており, 同一の現象と考えるてはならない.

BP 型地震も山頂ドーム近傍の極浅部で発生し, BL 型と同様に P 波の立ち上がりが不明瞭である. 初動付近からコーダ部まで

ほぼ一定の周波数の振動から構成される (Fig. 5 e). 尾部が長く振幅が単調減衰を示す特殊な BP 型地震は, 一般には T 型地震もしくは N 型地震と呼ばれる. 道内では十勝岳や雌阿寒岳で, 道外では浅間山, 草津白根山, 桜島など安山岩質の活動的な火山でしばしば観測される (例えば, Aoyama and Takeo, 2001; Fujita and Ida, 1999; 浜田ほか, 1976; 松島ほか, 1987; 西村・山下, 1982). 波形やスペクトルの特徴から, 地震波の放射には火山体内部の共鳴体の振動現象が関係していると考えられているが, いまだ震源像は明確になっていない. ここでは特殊な波形を持つ BP 型地震について, KTR における波形と振動軌跡を示す. Fig. 6 に示した 2 つの地震は, いずれも 9 月 26 日の十勝沖地震後の群発地震活動中に観測された. 震源は山頂ドーム近傍の極浅部と考えられるが, 地震の規模が小さかったため, 通常の方法では震源が推定されていない.

Fig. 6 の最上段の波形は地動速度の 3 成分記録である. 次の 3 つの波形は速度波形に 2.0~4.0 Hz

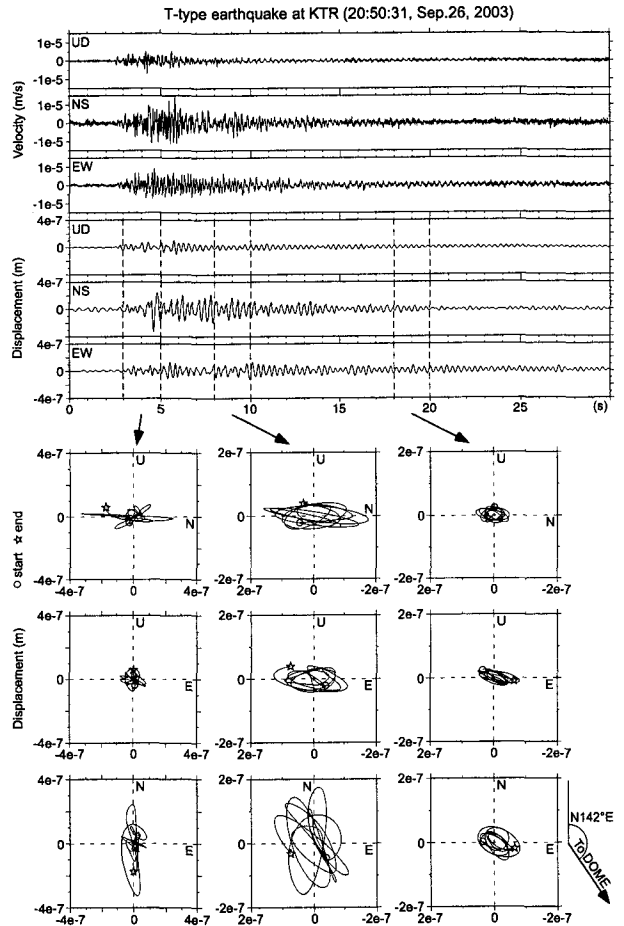


Fig. 6a. Waveform example and particle motions of the T-type earthquake on 20:50 September 26. The upper three traces are original velocity seismograms recorded by the short-period seismometer at KTR. The lower traces are corresponding band-pass filtered displacement waveforms. Pass band of the filter is 2.0–4.0 Hz. Bottom figures are particle motions during three time windows, projected on an UD-NS plane (top), an UD-EW plane (middle) and a NS-EW plane (bottom). Dashed lines in the displacement waveform indicate time windows of particle motion. The arrow on the lower right corner shows the direction to the summit lava dome from KTR.

のバンドパスフィルターを施し積分して求めた地動変位の3成分記録である。図の下段は、左から順に3つのタイムウィンドウ中の振動軌跡を表す。対応するタイムウィンドウは、変位波形中に破線で示した。振動軌跡は上から順に、上下-南北断面、上下-東西断面、南北-東西水平面への投影となっている。Fig. 6 a の9月26日20時50分に発生した地震に比べ、Fig. 6 b の9月27日2時11分に発生した地震の方が、よりT型地震の特徴がきれいに現れている。なお、Fig. 5 e

のランニングスペクトルを求めたデータは、Fig. 6 b の地震の上下動成分である。

Fig. 6 の2つの地震は約5時間の間隔をあけて発生した。スペクトルに現れるピークの最低次の周波数はどちらも3.3 Hz 付近でほぼ同じである。どちらの地震も南北動成分が最も大きく、上下動成分の振幅が小さい。しかし、振動のパターンはやや異なっている。振動軌跡の8~10秒の部分に注目すると、Fig. 6 a は水平面内の振動が大きく乱れているのに対し、Fig. 6 b ではほぼ北北西-南南東方向に直線的な振動を示している。この傾向は18~20秒の振動軌跡でも変わらない。Fig. 6 a のコーダ部では、南北方向より東西方向の振動が大ききようにも見える。卓越周波数がほとんど変わらないにも関わらず振動軌跡がFig. 6 a と Fig. 6 b で異なるという

ことは、震源における地震波放射特性の変化を表していると考えられるが、ここでは地震波の放射機構についてこれ以上の議論はしない。

Fig. 6 a と Fig. 6 b の右下には、KTR から見た山頂ドームの方向を矢印で示した。この方向と Fig. 6 b の水平面内での振動方向を比較すると、振動軌跡はドームの西側を向くようである。また、ドーム方向から振動が到来していると考えた場合、振動軌跡は Retrograde motion を描く。

浅間山で1995年7月に観測されたN型地震の群発活動では、10日間で68個の発生が確認さ

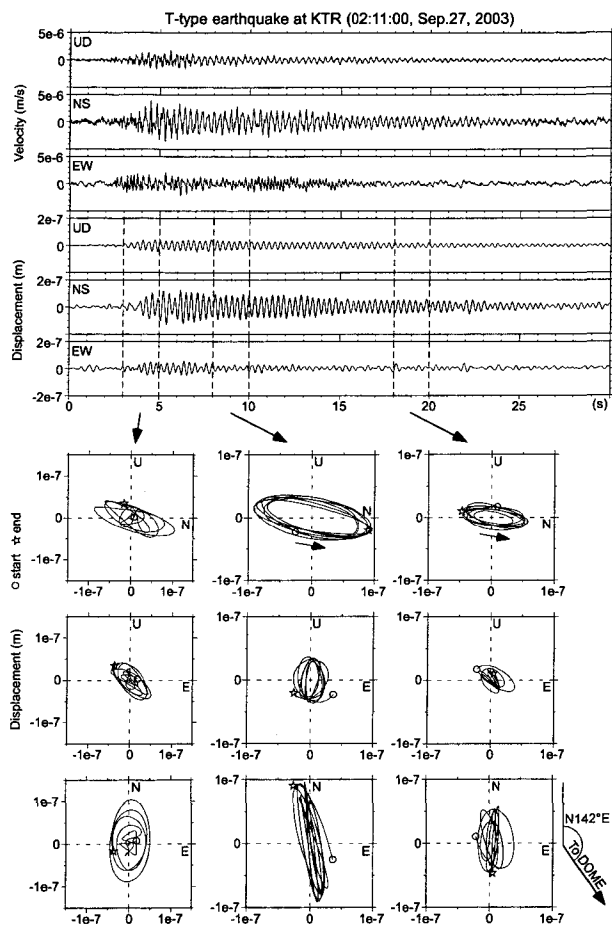


Fig. 6b. Same explanation as Fig. 6a for the earthquake on 02:11 September 27.

れた (Aoyama and Takeo, 2001). 活動初期には N 型地震の周波数が高く振動継続時間は短かったが、活動の後期になるほど周波数が低く振動継続時間も長くなり、より明瞭に N 型地震の特徴が見られるようになった。樽前山の 9 月の活動ではここに示した 2 つの例を含めて数個の T 型地震しか確認できなかったため、時間的な発展を議論するのは難しい。以下の考察に述べるが、T 型地震だけでなく BL 型と考えられるような地震も発生しており、T 型地震と BL 型地震の励起過程には関連があるのかもしれない。

VI. 考 察

1. 樽前山周辺の地震活動について

樽前山周辺では、主に山体の西側から北側にかけて地震活動が見られる。地震活動の空間分布について考えるため、Fig. 7 には樽前山周辺で発生する地震活動の震央分布と、第三系が地表露出している領域、および重力異常を表すコンターを重ねて描いた (広島ほか, 1998; 石田・曾屋, 1980; 佐藤ほか, 1975)。等重力線は樽前山北西の美笛側から樽前山付近へ張り出しており、全体的に北西側で高重力異常、南東側で低重力異常を示す。樽前山近傍では、支笏カルデラの南西の

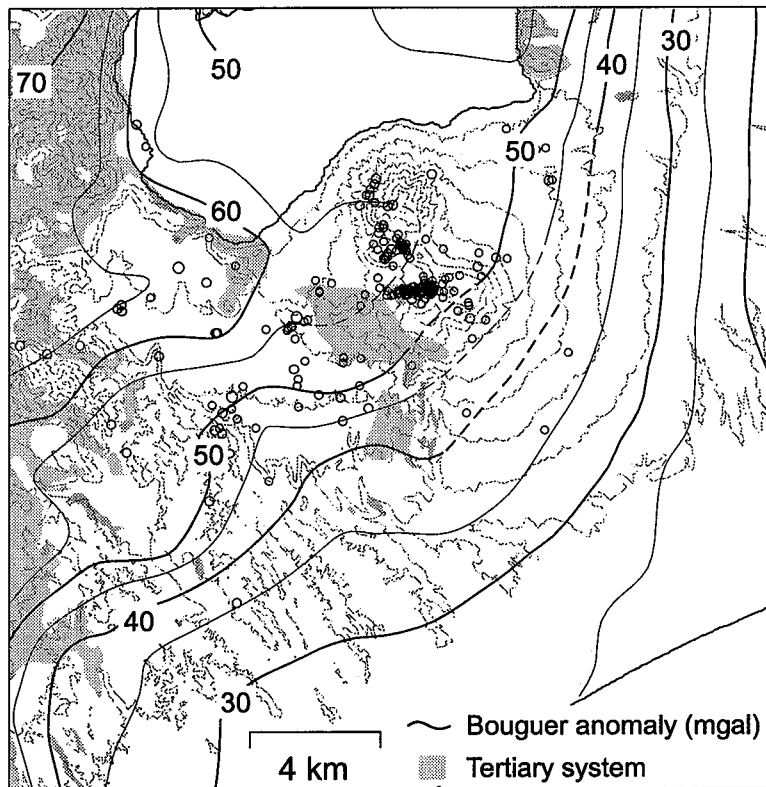


Fig. 7. Composite geologic, earthquake epicenter and Bouguer anomaly map of the Tarumae Volcano area. Light gray zones correspond to the Tertiary system (after Ishida and Soya, 1980; Sato et al., 1975). Bouguer anomaly is expressed in contours of 5 mgal intervals (after Hiroshima et al., 1998).

縁に沿うように、高重力異常域が樽前山の直下まで伸びている。第三系が地表露出している領域も、高重力異常の領域と同様に美笛側から樽前山の西側に分布し、高重力異常域と地表地質との対応は比較的良好。ほとんどの震央は 45 mgal の等重力線よりも内陸側に分布する。山頂ドーム直下の極浅部地震活動を除けば、樽前山の北側から西側に点在する地震活動の集中域は、50~55 mgal の等重力線の張り出しに沿うような位置に分布している。さらに西側の地震活動については観測網の外側になるため震源の決定精度に疑問があるが、等重力線が急激に曲がっている領域付近に分布しているようにも見える。重力異常のコンターは高い密度をもつ基盤層上面の起伏を表していると考えられることから、樽前山周辺の浅部地震活動は地下の地質構造と何らかの関係を持っているのかもしれない。また西側から張り出す高重力異常域のコンターは、樽前山直下で基盤が比較的浅いところまで上昇している可能性を示唆している。樽前山西側での地震活動の特徴を明らかにするには、さらなるデータの蓄積が必要である。

2. 十勝沖地震後の群発地震活動について—BL 型地震, T 型地震の活動—

2003 年 9 月 26 日午前 4 時 51 分頃に、襟裳岬の南東方を震源とした十勝沖地震 ($M_{JMA}8.0$) が発生した。震度 5 弱を記録した樽前山周辺の苫小牧市や白老町では、十勝沖地震の本震直後より最大余震後の午前 6 時 15 分頃にかけて停電となり、樽前山周辺に設置されている全ての観測点からのデータ送信が 1 時間半ほど途絶えた。これまでも述べてきたように、十勝沖地震後まもなく樽前山では群発地震活動が観測され、それ以降 12 月に入っても山体浅部で地震活動度のやや高い状態が続いている。

26 日午前 6 時 47 分に、データ送信の復旧後最初の震源決定可能な火山性地震が発生した。その後 27 日 8 時 11 分までに 15 個、28 日 15 時 58 分から 29 日 0 時 36 分までに 17 個の地震が確認さ

Table 2. Earthquake list for the swarm right after the 2003 Tokachi-oki earthquake.

date	time	hypo	type	remark	date	time	hypo	type	remark	
26	06:49	○	A	Fuppushi	28	15:58	○	A	Fuppushi	
	13:25	○	A	Fuppushi		16:23	○	A	Fuppushi	
	14:31	○	A	Fuppushi		16:33	○	A	Fuppushi	
	18:05		BL			16:39	○	A	Fuppushi	
	20:41	○	T			16:50	○	A	Fuppushi	
	20:50		T			16:56	○	A	Fuppushi	
	21:38	○	BH			17:02	○	A	Fuppushi	
	22:12		BL?			17:14	○	A	Fuppushi	
	23:20	○	BH			17:34	○	A	Fuppushi	
	27	00:32	○	BL			18:38	○	A	Fuppushi
		02:10		T			19:58	○	A	Fuppushi
02:25			BL			20:20	○	A	Fuppushi	
03:31		○	A	near MRP		20:31	○	A	Fuppushi	
07:08			T?			21:12	○	A	Fuppushi	
08:11		T?		22:26		○	A	Fuppushi		
29	00:18	○	A	Fuppushi		00:36	○	A	Fuppushi	

れた。ここに示した地震の個数には、震源が推定できなかったものの、樽前山近傍で発生した可能性が高いと考えられるものを含んでいる。9月26日~29日に検知された地震のリストをTable 2に示した。震源が推定されたものは、○印で示してある。26日の最初の3つの地震と28日以降の地震は、いずれも風不死岳の南側で発生した。27日3時31分頃の地震は、MRP付近の深さ5.6 kmに震源が推定されている。その他の地震はいずれも山頂ドーム近傍で発生したと考えられる。山頂ドーム近傍の活動はBL型地震やT型地震といった低周波地震が多くを占めていた。この時期に発生したBL型地震はT型地震よりさらに低周波の周波数成分を含み、振動の主要部は紡錘形を示す。Fig. 8にはKTRで観測されたBL型もしくはT型と思われる地震のスペクトルと上下動速度波形を発生時間順に並べて示した。3.3 Hzより高い周波数帯に表れるスペクトルピーク同士の対応はあまり良くないようであるが、1.6 Hz付近と3.3 Hz付近のスペクトルピークは異なる地震の間に共通に現れている。これらの地震の波形はそれぞれ違うが、共通のスペクトル構造を持つことから発震機構に何らかの関連があると推測される。

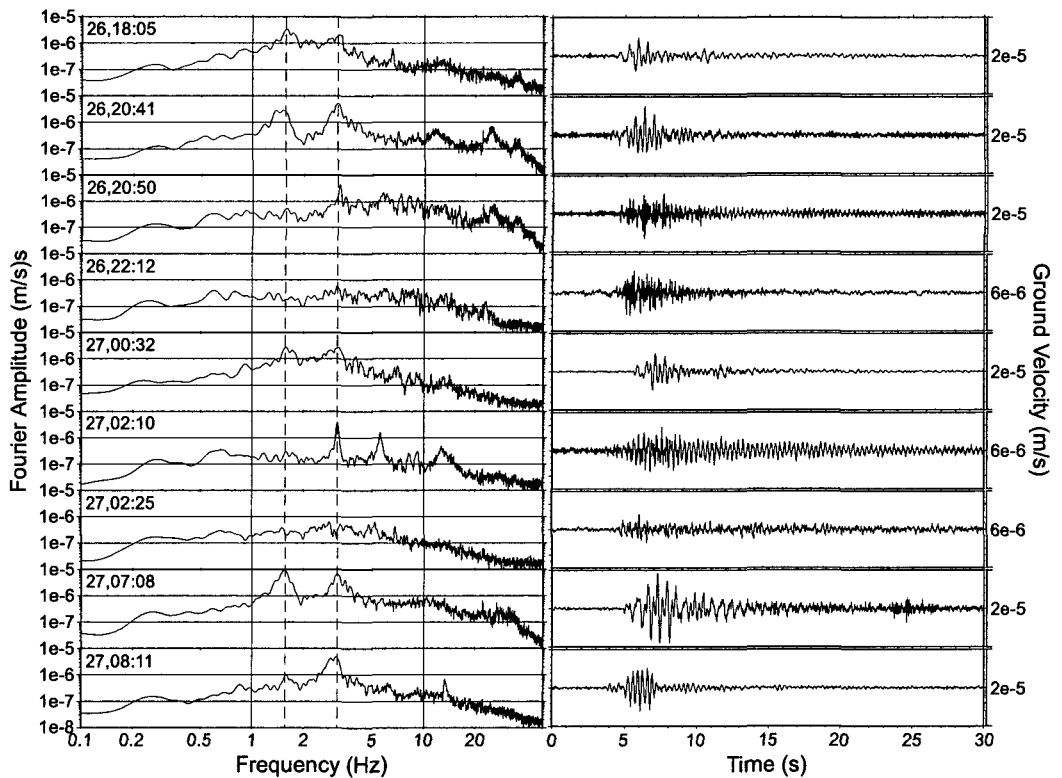


Fig. 8. Fourier spectra and original velocity seismograms of nine BL-type and T-type earthquakes that occurred on September 26 and 27, 2003. Spectral peaks of around 1.6 Hz and 3.3 Hz are commonly appearing.

3. 十勝沖地震後の群発地震活動と噴気活動との関係について

この群発地震活動と前後して、山頂火口原内に設置されている札幌管区気象台の地震計の常時微動レベルが27日0時頃から高くなった（札幌管区気象台火山監視・情報センター、投稿中）。また10月2日以降山頂ドームの南西側に開くB噴気孔群の噴気活動が活発化し、5日から18日頃にかけては夜間に噴気孔周辺が明るく見える現象が確認された（寺田ほか、投稿中）。10月7日には現地調査により少量の噴出物も確認されており、一時的に火山活動が活発化したと考えられる。BL型地震やT型地震といった低周波地震の発生と噴気活動との関連は不明だが、地殻内流体の運動が発生に関与していると考えられている低周波地震の活動のおよそ8日後から噴気活動が活発化したことは非常に興味深い。

ここでは、地震の発生に関与した地殻内流体が主に熱水から構成されるとし、10月5日以降の噴気活動でその熱水が地表に放出されたと仮定する。BL型地震やT型地震の震源を噴気孔から約1000m下の海水準付近とすると、熱水は噴気孔までの約1000mを約8日間で移動したことになる（秒速1.45mm）。

多孔質媒質中を流動する流体の流速は、Darcyの法則によって次のように表現される。

$$u = -\frac{k}{\mu_f} \frac{dp}{dx} \quad (1)$$

ここで、 dp/dx は流路に沿った圧力勾配、 k は固有透過度（intrinsic permeability）、 μ_f は流体の粘性率（dynamic viscosity）である。

地震が発生した深さでの熱水の圧力を lithostatic pressure に等しいとし、震源領域から噴気孔まで鉛直に伸びた多孔質媒質の中に熱水が満ちていると考え、1.45mm/sという速度で上昇する熱水に作用する実効的な圧力勾配は、

$$\frac{dp}{dx} \cong (\rho_s - \rho_f)g \quad (2)$$

と表されるであろう。ここで ρ_s は周囲の岩石の密度、 ρ_f は流体の密度、 g は重力加速度を表す。

10月5日以降の噴気活動の際に噴気孔周辺が夜間に明るく見えたことから、噴気孔周辺の温度は一時的に600°C程度まで高まったのではないかと考えられる。ここでは仮に、地下での熱水の平均温度をそれより高い700°Cであったとし、震源領域から地表まで移動する熱水の平均圧力を深さ500mにおける lithostatic pressure で表すことにする。岩石の密度を $\rho_s = 2700 \text{ kg/m}^3$ と与えると、深さ500mにおける熱水の圧力は $1.32 \times 10^7 \text{ kg/ms}^2$ となる。IAPWS-IF 97による熱水の物性値（Wagner and Kruse, 1998）を参考に、深度500mにおける700°Cの熱水の粘性率 μ_f と密度 ρ_f を求めると、 $\mu_f = 3.73 \times 10^{-5} \text{ Pas}$ 、 $\rho_f = 30.7 \text{ kg/m}^3$ が得られる。これより(2)式で与えられる実効的な圧力勾配は、 $dp/dx \cong 2.62 \times 10^4 \text{ kg/m}^2\text{s}^2$ となる。仮に熱水の温度を500°Cと仮定した場合は、 $\mu_f = 2.91 \times 10^{-5} \text{ Pas}$ 、 $\rho_f = 41.6 \text{ kg/m}^3$ が得られ、圧力勾配は $dp/dx \cong 2.61 \times 10^4 \text{ kg/m}^2\text{s}^2$ となつて大きくは変わらない。

これらの値と(1)式から、樽前山直下を構成する岩石の固有透過度を見積もると、 $k = 2.06 \times 10^{-12}$

m² という値が得られる。Freeze and Cherry (1979) によれば、このような固有透過度の値は一般に透水性の良い玄武岩や破碎された火成岩や変成岩が示す値とされている。また、大島ほか (2000) で推定された有珠山周辺の容水層の有効透水係数より求められる固有透過度と対比すると、ここで得られた約 10^{-12} m² という固有透過度の値は第四系下部の柳原層から新第三系上部の室蘭層に相当することが分かる。これは樽前山近傍の新第三系の分布や高重力異常域の樽前山体下部への張り出しから想像される樽前山直下の地質構造と非常に調和的な結果である。ここでの固有透過度の推定結果は、1000 m の距離を 8 日間で熱水が移動するという最初の仮定が現実に起こりうる現象であることを示している。BL 型地震や T 型地震の発生に関与した熱水が、地震発生後 8 日間かけてゆっくりと山体内部を上昇し、10 月 5 日以降に観測された噴気活動で放出されたという可能性は十分に考えられるだろう。

VII. ま と め

樽前山周辺の常時火山観測網を整備拡充したことにより、2002 年 12 月から樽前山の観測データは UVO ヘリアルタイムで伝送されるようになった。その結果、山体周辺に発生する定常的な地震活動を捉えられるようになり、地震活動の 3 次元的な空間分布が明らかになりつつある。

2003 年 12 月までの地震活動から、樽前山周辺では地震活動が時空間的に近接して発生し、群発地震活動的な様相を示す場合が多いことが明らかになってきた。顕著な地震活動域は、山頂ドーム直下の極浅部、風不死岳近傍および樽前山西方に分布する。風不死岳近傍および樽前山西方で発生する地震は火山構造成地震 (A 型地震) である。一方、山頂ドーム直下の極浅部で発生する地震はマグニチュード 0 未満の小規模なものがほとんどで、BL 型地震や T 型地震など火山特有に発生する特殊な波形を持つ地震もしばしば認められる。山頂ドーム直下と風不死岳の南側では 9 月 26 日の十勝沖地震の直後に群発地震活動が見られ、それ以降山頂ドーム直下では 2003 年 12 月まで地震活動の高い状態が続いている。この十勝沖地震後の群発地震活動では、BL 型地震や T 型地震といった地殻内流体の関与が疑われる地震が多く含まれた。10 月 5 日から 10 月中旬にかけて山頂ドーム周辺でみられた噴気活動が BL 型地震や T 型地震の群発地震活動を引き起こした熱水であると仮定して樽前山直下の固有透過度を見積もったところ、有珠山周辺で見積もられている第四系下部から新第三系上部の地層に相当することが確認された。今回の群発地震活動と噴気活動は、低周波地震の発生に地殻内流体が関与している可能性を観測事実に基づいて示した貴重な 1 例といえるであろう。

謝辞 札幌管区気象台火山監視・情報センターの皆様には、1967 年以降の日別地震回数リストを提供していただいた。また、勉強会や日々の検測処理における問い合わせでは、活発な議論や情報提供をしていただいている。樽前山火山防災会議協議会ならびに苫小牧市、白老町、環境庁支笏湖自然保護官事務所、北海道森林管理局胆振東部森林管理署、同石狩森林管理署には、常時火山観測施設の整備作業に大変便宜を図っていただいた。岩崎メンテナンス (株) には、観測点

の整備拡充作業や保守点検作業で多大な援助をいただいている。記して感謝いたします。

Appendix, 樽前山における常時火山観測データ伝送網

樽前山では 2001 年度より新しい常時火山観測用データ伝送システムの導入を開始した。システムの概要、UVO で使用している地震計、デジタイザ、無線伝送装置の仕様、および検出処理において仮定している 1 次元速度構造については青山ほか (2004) に記したのでここでは省略する。

樽前山は有珠山や駒ヶ岳に比べて山が深く、電源やデータ伝送路の確保が難しい。山体上の観

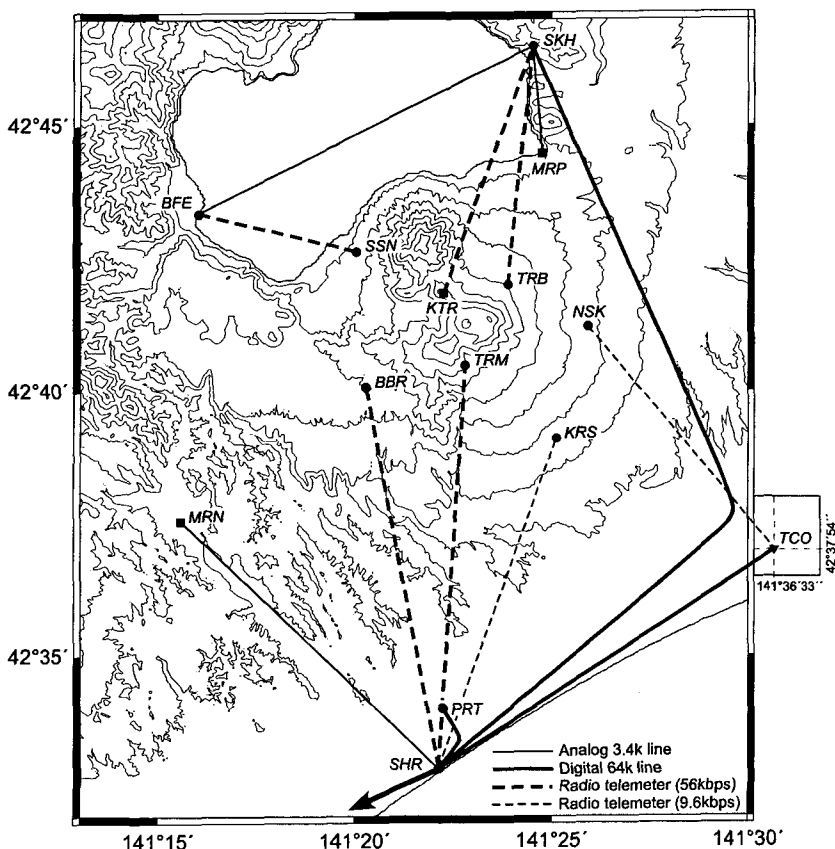


Fig. A1 Location map of the volcano observation network of Tarumae Volcano operated by ISV-UVO as of December 2003. We have a Shiraoui branch (SHR) at the southwestern foot of the volcano for aggregation of monitoring data and relay to UVO. Electric power for the stations on the edifice is supplied by solar panels. Data from these stations are sent to hub stations at the foot of the volcano by a radio telemeter. Hub stations are connected to SHR through exclusive telephone lines. In this figure, thick and thin solid lines represent digital and analog telephone lines, respectively. Thick and thin dashed lines are high-speed (56 kbps) and standard (9.6 kbps) radio telemeters, respectively. Station TCO (Tomakomai city office) is a hub station for station NSK. In each of stations PRT and SKH a visual image capturing system is installed.

測点では、太陽電池パネルおよびバッテリーによって電源を確保し、データ伝送には無線装置を用いている。無線伝送されたデータは山体周辺に配置された4ヶ所の中継点で受信される。例えば、SSNのデータはBFEまで無線伝送されたあと、BFEの観測データと一緒にSKHを経由してSHRに送られている。受信点であるBFEやSKHは地震や可視画像などの観測点を兼ねている。Fig. A1では、太実線がデジタル専用回線、細実線がアナログ専用回線、太破線が高速無線回線(56 kbps)、細破線が通常無線回線(9.6 kbps)を表している。

文 献

- Aoyama, H. and M. Takeo, 2001. Wave properties and focal mechanisms of N-type earthquakes at Asama volcano, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **105**, 163–182.
- 青山 裕, 大島弘光, 鈴木敦生, 前川徳光, 鬼澤真也, 2004. 北海道の活動的火山における最近の地震活動—北海道駒ヶ岳—, 北海道大学地球物理学研究報告, **67**, 89–109.
- Freeze, R. A. and J. A. Cherry, 1979. *Groundwater*, Prentice-Hall, 604pp.
- Fujita, E. and Y. Ida, 1999. Low attenuation resonance of a spherical magma chamber: source mechanism of monotonic volcanic tremor at Asama volcano, Japan, *Geophys. Res. Lett.*, **26**, 3221–3224.
- 浜田信生, 神宮 博, 生本光二, 1976. 減衰の遅い終期微動を伴う火山性地震について, *火山*, **21**, 167–183.
- 広田知保, 佐久間勉, 1977. 樽前山における地震活動の様式, 地下資源調査所報告, **50**, 183–191.
- 広島俊男, 駒沢正夫, 森尻理恵, 牧野雅彦, 村田泰章, 1998. 苫小牧地域重力図(ブーゲー異常), 1:200,000 重力図, **9**, 地質調査所.
- 北海道防災会議, 1972. 樽前山 火山地質・噴火史・活動の現況および防災対策, 北海道における火山に関する研究報告書, **2**, 124 pp.
- 北海道大学理学部附属有珠火山観測所, 1984. 樽前火山観測(1982年7月~1984年3月), 火山噴火予知連絡会会報, **30**, 74–80.
- 北海道大学理学部附属有珠火山観測所, 1988. 北海道の火山活動とその観測報告(1987年10月~1988年4月), 火山噴火予知連絡会会報, **41**, 64–77.
- Iguchi, M., 1994. A vertical expansion source model for the mechanisms of earthquakes originated in the magma conduit of an andesitic volcano: Sakurajima, Japan, *Bull. Volcanol. Soc. Japan.*, **39**, 49–67.
- 石田正夫, 曾屋龍典, 1980. 20万分の1地質図「札幌」, 地質調査所.
- Lahr, J. C., B. A. Chouet, C. D. Stephens, J. A. Power and R. A. Page, 1994. Earthquake classification, location, and error analysis in a volcanic environment: implications for the magmatic system of the 1989–1990 eruptions at Redoubt Volcano, Alaska, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **62**, 137–151.
- 前川徳光, 大島弘光, 植木貞人, 山脇輝夫, 鬼澤真也, 清水 洋, 高山鉄朗, 1999. 北海道の火山およびその周辺地域における精密重力測定, 北海道大学地球物理学研究報告, **62**, 61–77.
- 松島喜雄, 西村裕一, 鈴木敦生, 岡田 弘, 1987. 十勝岳で観測される火山性地震のスペクトル解析—特に単純なスペクトル構造を持つ地震について—, *火山*, **32**, 317–328.
- 西 潔, 1978. 桜島火山に発生するやや深い地震の発生機構, 京大防災研年報, **19**, B-1, 145–152.
- 西村裕一, 山下 済, 1982. 雌阿寒岳における1982年3月の群発地震活動, 北海道大学地球物理学研究報告, **41**, 65–76.
- 西村裕一, 森 済, 前川徳光, 鈴木敦生, 岡田 弘, 1997. 樽前山の新火山観測システム, 北海道大学地球物理学研究報告, **60**, 111–119.
- 大島弘光, 西田泰典, 松島喜雄, 2000. 有珠山および周辺地域の浅部水環境, 文部省科学研究費補助金(基盤研究C-2, 09640498)研究成果報告書「活動的火山における水理構造と特性評価—有珠山と駒ヶ岳—」, 1–17.
- 札幌管区气象台, 1982. 樽前山, 北海道地域火山機動観測実施報告, **3**, 40 pp.
- 札幌管区气象台, 1999. 樽前山・恵山・北海道駒ヶ岳・雌阿寒岳, 北海道地域火山機動観測実施報告, **20**, 118 pp.

- 札幌管区気象台, 2001. 十勝岳・樽前山, 北海道地域火山機動観測実施報告, **21**, 110 pp.
- 札幌管区気象台, 2002. 樽前山・北海道駒ヶ岳, 北海道地域火山機動観測実施報告, **22**, 86 pp.
- 札幌管区気象台, 2003. 樽前山・北海道駒ヶ岳・雌阿寒岳・十勝岳・有珠山, 北海道地域火山機動観測実施報告, **23**, 136 pp.
- 札幌管区気象台火山監視・情報センター. 樽前山の火山活動 (2003年5月～2003年10月), 火山噴火予知連絡会会報, 投稿中.
- 佐藤博之, 山口昇一, 曾屋龍典, 1975. 20万分の1地質図「苫小牧」, 地質調査所.
- 寺田暁彦, 中川光弘, 大島弘光, 青山 裕, 神山裕幸. 2003年十勝沖地震 (Mj 8.0) 発生直後に起きた樽前火山の異常な噴気活動, 東京大学地震研究所彙報, 投稿中.
- 梅原宏之, 山下 濟, 前川徳光, 1981. 樽前山の火山性地震 (1979年3月～1980年3月), 北海道大学地球物理学研究報告, **39**, 47-56.
- Wagner, W. and A. Kruse, 1998. *Properties of water and steam: the industrial standard IAPWS-IF97 for the thermodynamic properties and supplementary equations for other properties*, Springer-Verlag, Berlin, 354pp.