2000年有珠山噴火と浅部水環境

大島弘光

北海道大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻

1 はじめに

2000年3月末に17年の休止期を経て噴火活動を開始した有珠山は1663年の噴火活動を始めとして7回の噴 火記録をもつ北海道でも活動的な火山である。過去の噴火活動はデイサイト質マグマの活動で特徴づけられ、 軽石噴火や水蒸気 – マグマ水蒸気爆発が繰り返し発生し、溶岩円頂丘や潜在円頂丘が形成されている。最近の 1910年、1943–1945年および1977–1982年の噴火活動はいずれも多数の有感地震を含む激しい前兆地震活動 で始まり、著しい地震活動と地殻変動伴いながら、それぞれ北麓に潜在ドーム、東麓に溶岩ドームおよび山頂 に潜在ドームを形成した。また、噴火活動の一時期にはマグマと地下水との接触により発生する水蒸気爆発や マグマ水蒸気爆発も観測されている。

今回の噴火活動もこれらの活動と同様に多数の有感地震を含む活発な前兆地震活動で始まった。明瞭な前兆 地震は3月27日の夜半前から観測され始め、前兆地震活動は3月30日にピークに達し、それが急速に衰退し た3月31日に有珠山西方の西山の西山麓で最初のマグマ – 水蒸気爆発が発生した。翌4月1日には有珠山の 北西側にある金比羅山北西山腹でも水蒸気爆発が始まった。その後、この2つの地域には多数の火口が開口し、 夥しい数の水蒸気爆発が繰り返されるとともに両火口群を結ぶ地域ではマグマの貫入を示唆する地盤の隆起が 続いた。

今回の噴火活動ではマグマ活動と地下水の相互作用を示す現象が顕著に現れ、水蒸気爆発の頻発とともに有 珠山の周辺にある多くの水井戸や温泉井で水位変動が観測された(秋田・他, 2000)。

ここでは有珠山地域における地下浅部の水環境の概要を述べるとともに地震観測グループによる地震観測結 果を主に有珠山の2000年噴火において地下水の関係した2,3の現象について報告する。

2 有珠山および周辺地域の地下浅部の水環境

有珠山および周辺では現河床堆積物から新第三系に地下水や温泉水の貯留が確認されている。地下水は伏在 する主に未固結ないし固結度の低い正規堆積物からなる更新統より浅部から採取され、温泉は火山砕屑岩を主 体とした新第三系から主に採取されている。表1には大島・松島(1999)によるこの地域の帯水層区分といく つかの特性パラメーターを示した。 比湧出量および有効透水係数とも地層の地質年代とともに小さくなる傾向を示し、有効透水係数の変化は6 乗のオーダーにも達する。このうち大きな透水係数を示すのは局在して分布する完新統である。特に、洞爺湖 温泉の温泉貯留層である外輪山溶岩の透水係数は著しく大きい。更新統は完新統に較べて有効透水係数はオー ダーで 1~2 ほど小さい。このうち上部の上長和層は昭和新山から有珠山の南側にかけた地域に、下部の柳原 層は有珠山を含む広い地域に伏在する (八幡, 1987)。新三系の有効透水係数は、上部の室蘭層を除くと、更新 統よりもさらにオーダーで 2~3 ほど小さい。

孔隙率が推定できた地層は限られるが、第四系に較べて新第三系の孔隙率は小さく、さらに新第三系下部の 長流川層の孔隙率は、この上位の鹿の沢・滝の川・荘珠内川荘よりも小さい。

また新第三系の見かけ比抵抗は上位の第四系に較べて小さい。有効透水係数や孔隙率は見かけ比抵抗の高い 第四系のほうが第三系より大きく、必ずしも低比抵抗な地層が水理的に優れているとは言えない。

これらの帯水層のうち比抵抗に明瞭な違いが認められる第四系と第三系について、電気探査および AFMT 探査から求められた比抵抗構造と孔井地質から推定された第四系の基底深度を図1に示した。有珠山の南麓に おける第四系の基底は長流川河口域で深く有珠山に向かって浅くなる傾向がある。洞爺湖に面した北側の基底 深度は – 200m で有珠山方向の変化は描きだせなかったが、南東に向かって浅くなる傾向が認められる。2000 年噴火の活動域となった西山火口地域についてみると、南北両側に基底深度が深くなるように見え、西山火口 地域は第四系の基底の高まりに位置していると考えられる。

3 有珠山の2000年噴火活動

今回の噴火活動の長期的な前兆として数年前から地震発生回数の増加や孔井内水位の上昇傾向が観測されて いたが、山体膨張は前兆地震活動が始まるまで観測されなかった。

前兆地震活動は有珠山北西外輪の直下で始まり、震源移動や顕著な震源域の拡大が認められた。金比羅山に 火口が開口した4月1日以降は次第に地震の発生回数が減少するとともに地震の活動域が限られるようになっ た。その反面、西山火口および金比羅山火口で繰り返された水蒸気爆発に伴い夥しい数の空振が観測された。

3.1 長期的前兆としての水位上昇

気象庁の A 点で観測された月別地震発生回数および有珠山の東麓にある 2 つの孔井 (図 2)の水位変化を図 3 に示した。

1977-1982年の噴火活動消息後、地震の発生回数は少ない状態が続いていたが、1995年頃から地震回数の 増加傾向がみえだし、この傾向は1998年から明瞭になった。

同様に長期的な前兆と見られる水位上昇はGS-R1で観測された。1993年1月15日の釧路沖地震から1994 年11月28日の三陸はるか沖地震まで北海道周辺で発生したM7を越える地震に伴う水位変動はあるが、1994 年以降の水位は1977-1982年噴火活動が消息した後の長期的な水位変動の傾向に較べて、大きな傾きで上昇 しているように見える。

これに対して昭和新山の北麓にある SHO-N では 1997 年に若干の水位上昇があったものの噴火活動以前に 大きな変化は認められない。

逆に噴火活動が始まってからは GS-R1 では水位が低下し、SHO-N では著しく水位が上昇し自噴状態になったことが報告されている (秋田・他, 2000)。

このような噴火活動前後の水位変化パターンの違いは孔井近傍の状態が変化したことにより生じた可能性も あるが、両井のストレーナーが設置されている帯水層の塑・弾性的特性の違いにより説明できるかもしれない。

帯水層についてみると、GS-R1のストレーナーは主に正規堆積物からなる柳原層と砂・礫に富む室蘭層上 部に配置されている。一方、SHO-Nの帯水層はGS-R1よりも深い火山砕屑岩からなる荘珠内川層から長流 川層であり、両帯水層は岩相的に大きく異なる。それらの塑・弾性的特性の違いを示す1例は北海道周辺で発 生した M7 を越える地震に伴う水位変動である。これらの地震に伴ってGS-R1では水位変動が観測されたが、 SHO-N ではほとんど水位変化を示していない。

噴火準備期におけるマグマ溜まりの増圧による地殻応力の僅かな増大に対して、荘珠内川層~ 長流川層は水 位上昇を引き起こす間隙水圧を増大させるまで圧縮されない。しかし、マグマの上昇が始まり地殻内応力が著 しく増大すると、大きく圧縮され間隙水圧が高まり水位が起こる。一方、柳原層~ 室蘭層上部はマグマ溜まり の増圧に伴い容易に圧縮され間隙水圧が増大して水位上昇が現れたが、マグマの上昇に伴い地殻内応力が著し く増大すると、大きな応力に耐えられなくなり帯水層が崩壊して孔隙率が増すことにより間隙水圧が低下し水 位が低下した。このように考えると定性的に噴火前後に両孔井で観測された水位変動パターンを説明すること ができるが、力源との空間的な位置関係によっては帯水層内の応力が圧縮から伸張に反転することもあり (佐 藤・他, 2000)、さらに検討・吟味が必要である。

3.2 前兆地震活動期における震源の移動と拡大

震源の移動と顕著な震源域の拡大が認められた 3月27日から金比羅山に火口が開口した4月1日までの有 珠火山観測所の自動震源処理システムで決定された震源の時空間分布、気象庁A点で観測された地震の時間別 発生回数、国土地理院のGPS測位網で観測された基線長変化および測角による小有珠の比高変化を比較して 図4に示す。

これらの観測結果を比較してみるとこの期間は太波線で示したように大きく4つのステージに区分できるように見える。

第1ステージ (3月27日~3月29日4時ころ) では北西外輪山に地震が集中する。マグマの上昇を示唆する ように震源は深度4~6kmから2~5kmまで上方に移動し、有珠山を囲む3基線もゆっくりとした伸びを示す。

第2ステージ (3月29日4時ころ~3月29日23時ころ)になると震源は北および南方向に広がり、有珠 山南麓で深い地震が起こり始める。3基線の延びは加速し、このステージの終わりには Date-Abuta および Sobetsu-Abuta 基線で基線長の伸びがピークを迎える。 第3ステージ (3月29日23時ころ~3月31日9時ころ) では地震発生回数がピークを迎え、震源はさらに 南東側に広がる。Date-Abuta および Sobetsu-Abuta 基線では基線長が縮みに転じるが、Date-Sobetsu 基 線はこのステージの終わりに伸びのピークに達する。

第4ステージ (3月31日9時ころ~4月1日9時ころ) には西山西麓および金比羅山に火口が開口し有珠山 南麓で最大規模の地震が発生する。金比羅山付近に地震が集中し、虻田付近でも線状に並んで地震が発生する。 Date-Sobetsu 基線は延びの高まりにあるが、小有珠の隆起速度は鈍化し始める。

第1ステージにみられる震源の上方移動はマグマの上昇を強く示唆する。最初のマグマ水蒸気爆発やこれ に続く活動初期の水蒸気爆発の発生深度は火山灰中に含まれる変質鉱物の組成から検討され、新第三紀の長流 川層から更新世の柳原層内で発生し、深度は海水準下 1000m~0m であると想定されている (道立地質研究所, 2000)。浅い地震が精度よく決められないことや震源域の拡大もあって第2ステージ以降の有珠山北西外輪か ら活動域となった西~北西山麓へのマグマの移動や上昇は明らかではないが、図4に示すように第1ステー ジの震源上昇を外挿して初期の噴火が起こった時点でのマグマ頭部の深度を推定すると、震源の下限をマグマ 頭部とした場合には最初の噴火が起こった。3月31日には深さ約2km、4月1日には約1kmの深さにマグマ頭 部があったと推定される。一方、震源の上限にマグマ頭部がある場合には、3月31日のマグマ頭部の位置は海 面下約1km、4月1日には海水準に達していたと考えられる。

震源の上昇から想定されるマグマ頭部の深さは荒い推定だが、地質学的な検討から推定された深度と概ねー 致し、最初の噴火やこれに続く初期の水蒸気爆発は少なくとも深度2000m以浅で発生したと言える。爆発が最 深部で発生した場合には爆発に関与した帯水層は下部新第三紀の長流川層と考えられ帯水層の水理特性は必ず しも良いとはいえない。

水蒸気爆発の発生環境は、多量に蒸気が生成され、その生成に伴う圧力がシールされる、孔隙率が大きく含水 量は多いが透水性の低い場合に形成される。長流川層は孔隙率が低く含水量は多いとは言えないが、透水性は 低くいという条件を満たしており、火口形成を伴う水蒸気爆発はこのような条件下で発生したのかもしれない。

3.3 4月2日以降の地震分布と空振活動

4月2日以降の震源分布は前兆地震活動期に形作られ、震源は主に西山から洞爺湖にかけた地域と有珠山南 麓地域に分布し、大きく二つの地震群をなす。西山から洞爺湖にかけた地域の地震群は北東 – 南西方向、有珠 山南麓の地震群は北東 – 南西方向の走向を持ち、これらの地震群の会合部にあたる西山の南側には地震の空白 域が形成されているように見える。一方、活動域となった西山から金比羅山にかけた地域にはほとんど地震が なく、地震の空白域となっている。

震源の深さは南北断面でみると南に向かって深くなり、有珠山南麓では6km 以深に震源が広がる。東西断面 でも、南北断面ほど明らかではないが、東に向かって深い地震が起こる傾向があり、このような震源分布はこ の地域の地質基盤である先新第三系の構造と調和する。図6には有珠山火口原をとおる北東 – 南西方向の比 抵抗構造に震源を重ねて示した。地震は高比抵抗な先新第三系内で発生し、基盤構造と同様に南に向かって深 くなっていることが分かる。

このような広い範囲にわたる震源分布は 1977-1982 年の活動に伴う地震が山頂火口原内の隆起部周辺で深 さ 3km 以浅の限られた範囲で発生したこと (Okada *et al.*, 1981) と好対照をなし、有珠山東麓を活動域とし広 い範囲で地震が発生した 1943-1945 年の噴火活動 (Minakami *et al.*, 1951) に類似し、山麓噴火の特徴かもし れない。

空振は西山および金比羅山火口群で頻繁にくり返えされる水蒸気爆発に伴って励起された。水蒸気爆発の様 式は時間の経過とともに変化し、4月上旬の水蒸気爆発は高度 100m に達するコックステールジェットを伴っ ていた (写真 1) が、4月中旬からは放出岩塊が斜め方向に放出される炸裂型爆発 (写真 2) に変わった。噴火 活動初期における水蒸気爆発の様式の変遷は中田 (2000) に詳しい。

図 7 にはコックステールジェットを伴う水蒸気爆発が金比羅山火口では続いていたが、西山火口ではジェット を伴う水蒸気爆発から炸裂型爆発へ移行し始めた 4 月 12 日の空振記録例を示した。観測点は火口までの距離 がおよそ 3km の位置にある MIT (図 2) である。 空振は 10 分~15 分にわたって連続的に発生したあと 10~15 分のあいだ休止し、水蒸気爆発が間歇的に発生していることが分かる。空振の正圧パルス振幅は 0.1hPa 以下 であり、空振振幅でみると桜島や十勝岳の爆発的噴火などに較べて有珠山で頻発した水蒸気爆発のの規模は小 さい (図 8)。

4 まとめ

マグマ活動と地下水の相互作用に起因する現象が顕著に現れた有珠山の 2000 年噴火においてこのことを示す 2,3 の現象について報告した。

- 長期的な前兆として数年前から地震活動の活発化し、これに呼応した孔井内水位の上昇があった。この 水位上昇を含め噴火の前後における水位変化が帯水層の弾性的特性に支配されている可能性のあること を指摘した。
- 前兆地震活動期の震源の移動と拡大について地殻変動データと比較し、この活動期が4つのステージに 区分できることを示した。また、噴火活動に伴う震源は広範囲に分布し、山麓噴火であった1943-1945 年の噴火活動でも震源が広い範囲にひろがっていることから、広範囲な震源分布は山麓噴火の特徴であ ることを指摘した。
- 前兆地震活動期の初期に見られた震源の上方移動から推定した最初の噴火の発生深度は地質学的な検討 から想定された深度と概ね一致し、噴火は新第山系下部の長流川層内で発生したと想定された。長流川 層は孔隙率が低く含水量が乏しいが、透水性が低く水蒸気爆発が発生する環境を持つ可能性のあること を指摘した。

今回の噴火活動では、様々な観点から多種・多様なデータが得られていることから、個々の観測データの解析 を進めることはもちろん他のデータと合わせて、これらのことを検討・吟味しなければならない。

参考文献

秋田藤夫・柴田智朗・他, 有珠山噴火に伴う温泉・地下水の変化 (速報), 温泉科学, 50, V-VIII, 2000.

北海道立地質研究所, 2000 年有珠山火山噴火観測速報, pp.53, 北海道立地質研究所, 2000.

Matsushima, N., Oshima, H., Ogawa, Y., Takakura, S., Satoh, H., Utsugi. M., and Nishida, Y., Magma prospecting in Usu volcano, Hokkaido, Japan, by audiomagnetotelluric and magnetotelluric soundings, *J. Volcanol. Geothem. Res.*, 2000 (in press).

Minakami, T., Ishikawa, T., and Yagi, K., The 1944 eruption of volcano Usu in Hokkaido, Japan, Bull. Volcanologique, Ser. II, 11, 45-157, 1951.

中田節也, 第85回噴火予知連絡会資料, 2000.

Okada, Hm., Watanabe, H., Yamashita, H., and Yokoyama, I., Seismological significance of the 1977-1978 eruptions and the magma intrusion process of Usu volcao, Hokkaido, J. Volcanol. Geotherm. Res., 9, 311-334, 1981.

大島弘光・松島喜雄, 有珠山浅部の水環境 - 既存資料の解析 -, 北大地球物理学研究報告, 62, 79-97, 1999.

佐藤努・太田英順・他, 2000年有珠山噴火の直前におきた地下水の自噴, 地質ニュース, 5551, 20-26, 2000.

八幡正弘,カルデラの基盤構造について – 洞爺カルデラを例にして –,後期中生代 ~ 現世における陥没の形態とその発生 機構に関する総合研究, 2,89-97,1987.



図 1: 第四系基底の等深度線。



図 2: 孔井GS - R1およびSHO - N、気象庁A点、三豊 (MIT) 観測点の位置図。ハッチの領域が西山 および金比羅山火口群を示す。



図 3: 気象庁A 点で観測された月別地震回数 (下段) および有珠山東麓の孔井GS - R1 およびSHO - N に おける水位の経年変化。上段の下向き矢印は左から釧路沖地震 (1993 年1 月15 日, M=7.8)、北海 道南西沖地震 (1993 年 7 月23 日, M=7.8)、北海道東方沖地震 (1994 年10 月 4 日, M=8.1) および三陸は るか沖地震 (1994 年12 月28 日, M=7.5) を表す。



図 4: 3月27日から4 月1 日までの気象庁のA 点で観測された時間別地震発生回数、地震の時空間分布、 国土地理院のGPS 観測網による基線長変化および測角による小有珠の比高変化の比較。

04/03 00:00 - 07/01 00:00



図 5: 4月以降の震源分布。



図 6: 山頂火口原にある1977 年新山をとおる北東 - 南西方向のAFMT + MT 探査により推定された比抵 抗構造 (Matsushima et al., 2000) と震源の比較。



図 7: 火口からの距離約 3km の三豊で低周波マイクロフォンで観測された空振の記録例。

	Intensity of Volcanic Infrasound
	0.01 0.1 1 10 h
Sakurajima (Explosive Eruption) D=5.6 km	V = 100 - 200 m/s
Tokachidake (Explosive Eruption) D=3.5 km	V < 120 m/s
Swanosejima (Small Eruption) D=3.3 km	V < 120 m/s
Sakurajima (Small Eruption) D=5.6 km	V < 60 m/s
Usu (Phreatic Eruption) D=3.0 km	(V ?)

図 8: 有珠山の水蒸気爆発で励起された空振と国内の火山で観測された爆発に伴う空震の振幅の比較。



写真 1: 金比羅山火口で発生したジェットを伴う水蒸気爆発 (2000年4月4日16時30分ころ)。



写真 2: 金比羅山KA 火口内で発生した極く小規模な炸裂型爆発 (2000年10月11日)。