



Title	樽前火山A火口の放熱率推定 : Plume Rise法を火山噴煙に適用する注意点
Author(s)	寺田, 暁彦; TERADA, Akihiko
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 67, 327-335
Issue Date	2004-03-15
DOI	https://doi.org/10.14943/gbhu.67.327
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/14352
Type	departmental bulletin paper
File Information	67_p327-335.pdf



樽前火山A火口の放熱率推定

—Plume Rise 法を火山噴煙に適用する注意点—

寺田 暁彦

北海道大学理学研究科附属地震火山研究観測センター

(2004年1月6日受理)

Evaluation of the Heat Discharge Rates from Vent "A" at Tarumae Volcano, Japan: Notes on the Plume Rise Assumption

Akihiko TERADA

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

(Received January 6, 2004)

Plume Rise assumption is useful to estimate rates of heat and water discharge from vents. I applied this assumption to the fumarole at Tarumae volcano to evaluate its current thermo-activity quantitatively. The results indicate that erroneous values one order of magnitude larger than reasonable ones may be obtained. This must be due to the ambient wind that often accelerates vertical movements of fumarole. To obtain reasonable estimates, we should check the correlation between the obtained heat discharge rate and the horizontal wind speed to eliminate the effect of the wind. Based on the above procedure, the heat and water discharge rate from vent "A" at Tarumae volcano were estimated approximately 5 MW and 200 ton/day on October and November 2003. These values are consistent with those obtained by other methods.

I. はじめに

Plume Rise 法とは、映像から定量化した噴煙運動を簡単な噴煙モデルを用いて解析することで、火口から噴気として放出される熱エネルギーや水放出量を推定する方法である (Briggs, 1969; 鍵山, 1978)。本方法によれば、火口に近づくことなく安全に噴気を観測できるばかりでなく、比較的単純な方法で解析が行えるため、これまで多くの火山噴煙に適用されてきた。

Plume Rise 法で用いられている噴煙モデルは、周辺大気についてある理想的な状態を想定している。一方で、噴煙運動は風や湿度等の周辺大気の状態に強く依存し、この影響は噴煙の規模にも依存することが数値計算や観測から指摘されている (例えば Woods, 1993; 寺田・他, 2003)。ところが、Plume Rise 法で想定している理想的な気象条件が整いにくい火山において、本手法を

用いてどの程度妥当な値が得られるのか、また、どうしたらより妥当な値が得られるかについて、これまで十分に議論されてこなかった。噴気観測手法として Plume Rise 法は優れた方法であるが、正しく使いこなすためには解析上の問題点をよく理解しておくことが重要であろう。

樽前火山山頂溶岩ドーム周辺には、温度数 100℃に達する高温噴気孔が存在し、到達高度数 100 m 以下の白色噴煙をほとんど常に上げている（例えば札幌管区気象台，2003）。2003 年 10 月以降には噴気温度の上昇や噴煙量の増加等の変化が見られた（寺田・他，投稿中；札幌管区気象台火山監視・情報センター，投稿中）ことから、樽前火山の熱的活動を定量的化するために、2003 年 10 月および 11 月に樽前火山山頂カルデラリム付近から A 火口付近を撮影し、Plume Rise 法により熱放出率の推定を試みた。この結果、地形的要因による風のために、求められた値には 1 桁以上に及ぶ不確定がある可能性が示唆された。

そこで、本論文では Plume Rise 法の原理と既知の問題点をまとめた後、Plume Rise 法を火山噴煙に適用する上での問題点を議論する。また、別の方法で測定した結果と比較し、より真に近い結果を得るための方法を考える。最後に、これらの議論を踏まえて A 火口における放熱率および放水率を推定する。2003 年 10 月ごろに見られた B 噴気孔群の活動については、（寺田・他，投稿中）で議論した。

なお、本論文では水蒸気を主体とする比較的小規模な噴煙を噴気と呼ぶ。

II. Plume Rise 法に関する既知の問題点

1. Plume Rise 法の原理

一般に大きな熱エネルギー供給により形成された噴気は強い横風を受けても比較的真っ直ぐ上昇できるが、小さな熱エネルギー供給しかない噴気は弱い風でも大きく傾く。Plume Rise 法は、このような経験的事実を簡単な噴煙モデルを用いて定量化したものである。Briggs (1969) によれば、水平方向に一様で定常的な風が吹いているとき、点源として近似可能な単一の噴出口から浮力により定常的に立ち昇る純粋 plume の、噴出口からの高さ h と水平距離 x との関係は、

$$h = \left(C u^{-1} \dot{Q}^{\frac{1}{3}} \right) x^{\frac{2}{3}} \quad (1)$$

と表われる。ここで、 u は水平方向の風速、 \dot{Q} は plume として放出される放熱率、 C は実験的に与えられる定数である。(1) から、水平風速 u における放熱率 \dot{Q} の plume の形状について、高さ h は距離 x の 3 分の 2 乗に比例することがわかる。Plume Rise 法は、ある噴気について(1)式に最もよく合う比例定数を求め、既知の定数 C と別に観測した風速 u を用いて放熱率を計算する手続きを指す。

鍵山 (1978) は、横風と噴煙との相対速度がないと仮定して、 $x = ut$ の関係を用いて(1)式を時間の関数に書き換え、Briggs (1969) と同様の方法で有珠火山における非噴火時の放熱率を見積もった：

$$h = \left(C u^{\frac{1}{3}} \dot{Q}^{\frac{1}{3}} \right) t^{\frac{2}{3}} \quad (2)$$

ここで、 t は噴出から経過した時間である。

さらに鍵山(1978)は、比較的低温の噴気であれば(2)式で見積もられた熱量のほとんどは噴出口付近で凝結した水の潜熱で近似できると考えて、放熱率 Q を単位質量当たりの凝結熱 L で割ることで放水率 M を推定した。ただし、比較的高温の噴気を解析対象とする場合には、水の凝結熱ばかりでなく噴出した火山ガスが持つ熱エネルギーも無視できない。そのような場合は、蒸気表(例えば日本機械学会, 1999)等から与えられる比エンタルピーを用いて放水率に変換するとよい。

2. Plume Rise 法に関する既知の問題点

Plume Rise 法を用いた解析結果には、しばしば大きなばらつきが見られる。例えば気象研究所(2003)が Plume Rise 法を用いて見積もった三宅島火山 2000 年噴火以降の放熱率には、数日程度の短い時間スケールで 1-2 桁に及ぶ変動が見られる。このような大きな変動は、同時期に行われた COSPEC による二酸化硫黄濃度測定結果には見られず、実際の放熱率変動を反映したものでなかったと思われる。この原因のひとつとして、本節では周辺大気的气象的要因に注目して検討する。

本手法で重要な基本仮定として(1)浮力供給が火口のみで行われること(2)噴気が水平方向へ傾く要因は一様で定常的な横風のみであること等が挙げられる。(1)については、運動スケールが 1000 m オーダーに達する噴煙では成立しない場合があることが、数値計算や観測から知られている。例えば Woods (1993) は、周辺大気から噴煙内へと取り込まれた大気中の水蒸気が上昇過程で凝結することで放出される潜熱の効果を数値計算により検討した結果、このような潜熱がしばしば火口から供給された熱エネルギーを凌ぎ、噴煙運動を支配し得ることを示した。このことは、風に流される噴煙の運動が必ずしも(1)式や(2)式を満たさないことや、求められた放熱率には火山活動と無関係の大気に由来する潜熱が含まれ得ることを示唆する。(2)については、特に水蒸気を主体とする噴煙の運動は逆転層に強く影響されることがわかっており(寺田・井田, 2002)、噴煙が水平方向に傾く原因が必ずしも横風ばかりでない事が知られている。

このような周辺大気に由来する水蒸気や逆転層の影響は、比較的小きな噴煙に対しては無視できる場合があるだろう。すなわち、周辺大気から取り込んだ水蒸気が凝結する以前に噴気が上昇を止めたり、逆転層に達する前に噴気が消散したりするためである。従って、周辺大気の影響を避けるため、Plume Rise 法は上昇高度が比較的低い噴気や、高層大気観測データ等を参照して水蒸気や逆転層の影響下が少ないと思われる環境下においてのみ、適用するべきである。

III. 樽前火山 A 火口への適用例

Fig. 1 に樽前火山周辺及び山頂付近の主要な地熱活動場所を示す。山頂溶岩ドーム南東部に位置する A 火口は、1978 年の噴火(例えば勝井・他, 1979)等、過去に火山灰を放出する噴火を繰り返してきたが、1981 年以降は火山ガスのみをほぼ定常的に噴出している(例えば気象庁, 1991)。平成 15 年 9 月 26 日に発生した十勝沖地震(Mj 8.0)の直後に、樽前火山浅部において小規模な群発地震が発生し、その後も地震発生回数の多い状態が続いた。(例えば青山・他, 2004)。この後、A 火口や溶岩ドーム南西噴気孔群(以下では B 噴気孔群と呼ぶ)、E 火口の噴気量増大が観察

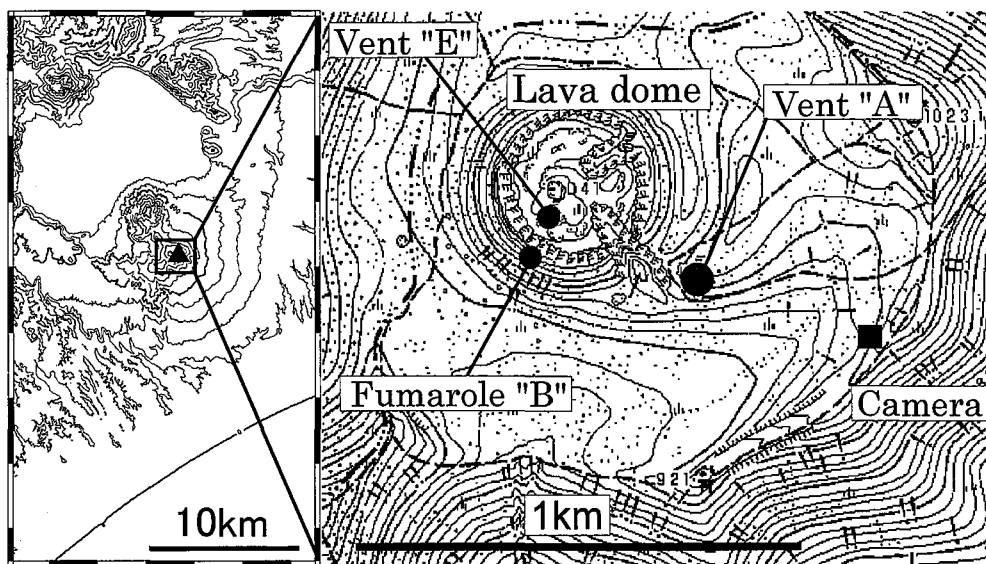


Fig. 1. Location of the video camera, vents and fumarole around the summit of Tarumae Volcano.

されたほか、特に B 噴気孔群では山麓に設置されている高感度カメラにより明るく見える現象等が観測され、同噴気孔群からごく小規模な火山灰噴出も確認された（例えば寺田・他、投稿中）。

このような異常活動に対応して、我々は 2003 年 10 月と 11 月の 2 回にわたり山頂付近の現地調査を行った。10 月 7 日の調査によれば、A 火口の外観に以前と比較して目立った変化は認められなかったが、以前から聞こえていた「ゴー」という低い音（札幌管区気象台、2003）に加えて、「サー」という比較的高い音が数十秒間隔で明瞭に聞こえた。同日行われた気象庁（2003 a）の温度測定によれば、A 火口としては過去最高の 500–650℃が測定された。11 月 11 日に行った調査によれば、A 火口で 10 月 7 日に聞かれた「サー」という比較的高い音は明らかに小さくなっていった。気象庁（2003 b）によれば、この日も A 火口は高い温度を維持していた。

1. 観測方法

Fig. 1 に、本研究で対象とする A 火口とカメラの位置を示す。カメラ設置場所は、視線方向が風向に対して直角になること、噴煙全体をほぼ水平に見込めることを基準に選んだ。使用したカメラは SONY DCR-TRV 20 で、画角は別に計測してある。撮影は、10 月 7 日は午前 10 時頃から約 1 時間、11 月 11 日は午前 09 時 30 分頃から断続的に約 3 時間行った。10 月 7 日の撮影開始時における気温は 9℃、湿度 70%、露点温度は 3℃、11 月 11 日の気温は 1.3℃、湿度 70%、露点温度は -3.5℃であった。噴気到達高度は火口から 100 m 以下であり、両日とも、周辺大気に由来する水蒸気が凝結する前に噴気は上昇を止めていたと考えられる。また、逆転層が原因と思われる噴気の不連続な形状変化は見られなかった。

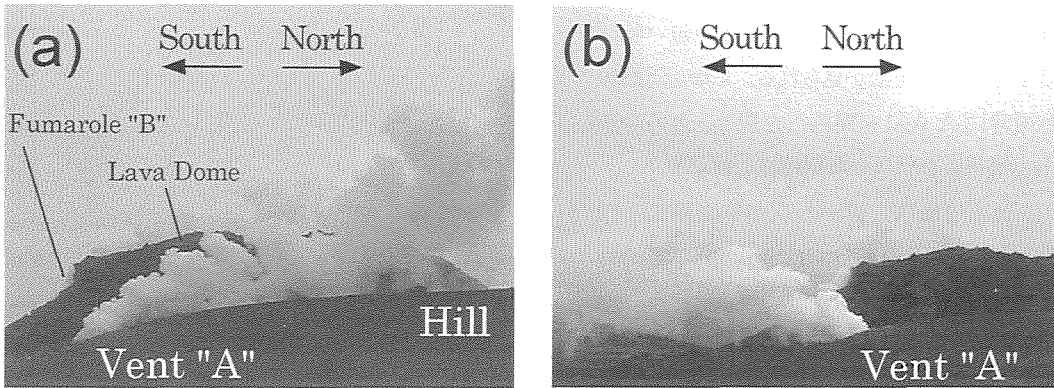


Fig. 2. Examples of fumarole emitted from Vent "A". (a) In the south wind at 10:00 Nov. 11 2003. (b) In the north wind at 12:30 Nov. 11 2003.

なお、樽前火山に存在するB噴気孔群やE火口等の噴煙は規模が小さく、噴煙運動が明らかに山頂溶岩ドームの形状に影響されていたために、本研究では解析対象としない。

2. 観測結果

Fig. 2 に解析に用いた典型的な画像例を示す。本例では、A 火口の火口壁よりも上部の噴気が撮影されている。観察から、噴気が横風の影響を受け始めるのは、火口壁よりも上部であることがわかる。この高さよりも上部の噴気は、顕著な凝結が起きているために白くはっきりと見える。従って、本研究では火口壁よりも上部における噴気運動について、カメラの画角や位置関係を元に寺田・他 (2003) の方法を用いて定量化した。Fig. 2(a)は、風速数 m/s 以下で南風という環境下で撮影された。本図に示すような南風に流される噴煙は、A 火口の北方に位置する緩やかな丘へ向かう。一方、Fig. 2(b)に示すような北風の場合、噴煙は平坦なカルデラ底上を流れる。撮影が行われたほとんどの時間帯は南風であり、安定した北風が観測されたのは11月11日の13時前後のみであった。

Fig. 3 に、10月7日のおよび11月11日の放熱量時間変化を示す。Fig. 3(b)の

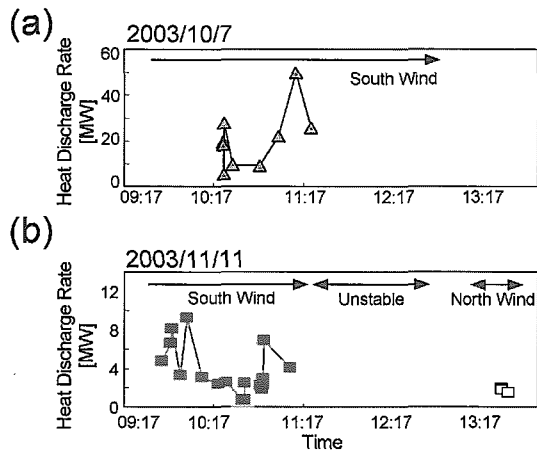


Fig. 3. Time-series of heat discharge rate. (a) On Oct. 7 2003. (b) On Nov. 11 2003.

白四角は、風向が北であったことを示す。両日とも、放熱率には数十分程度の短い時間で1桁に及ぶ変動が見られる。しかし、撮影と同時にA火口を観察した限り、火口や噴煙の様子に目立った変化は見られなかった。

Fig. 4に風速に対する放熱率の関係を示す。ここで風速は、噴煙の特徴的な場所の水平移動速度に一致すると仮定した。10月、11月とも、南風のときに求められる放熱率と風速との間に正の相関が見られる。一方、11月11日の北風(Fig. 4白四角)の場合には、南風のときの風速と放熱率の傾向から予測される値より1桁程度小さい放熱率が求められた。

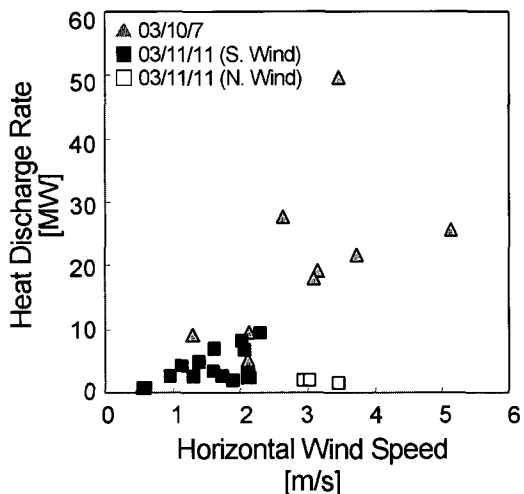


Fig. 4. The correlation between heat discharge rate and horizontal wind speed.

IV. 議 論

1. 風と相関が見られた原因

樽前火山A火口の噴気は単一の火口からほぼ定常的に噴出しており、理想的な定常 Plume に近い。また、当時の噴気到達高度は火口上数10m程度で、当時の気象条件からも周辺大気の水蒸気や逆転層の影響は小さく、Plume Rise法で想定している理想的な状態に近かったと思われる。Fig. 3に示したように、今回の解析では放熱率が10分オーダーの時間スケールで1桁以上も変動していた、という結果が得られた。しかし、火山活動と無関係な風速と放熱率に相関が見られたこと、当時の火口や噴気に目だった変化は見られなかったことから、放熱率の変動は解析方法の問題に起因する見かけ上のものであったと考えられる。ここでは、Plume Rise法で想定している「水平風」という仮定が破綻していた可能性を検討する。

風系が南の場合には、A火口北方に存在する丘を越える風が噴気を持ち上げる。このとき、噴気の運動の鉛直成分は、浮力成分と丘を越える風の鉛直成分との和である。風速が大きくなる程、浮力成分に対して風の鉛直成分が無視できなくなる。このため、噴気の上昇力が全て浮力と仮定されているPlume Rise法では、噴煙の浮力が過大に評価されたと考えられる。すなわち、A火口で南風が吹く場合、風速が大きくなるほど大きな放熱率が見積もられると考えられる。Fig. 4の白四角のように北風の場合には、南風の際に見られる風速と放熱率のトレンドに乗らずに小さな値が見積もられたという結果は、上記議論に矛盾しない。

北風のように、火口が丘の風下に位置する場合でも、風の影響を全く無視することはできないであろう。一般に、水平風において丘や孤立峰が存在する場合には山岳波が発生し、丘や孤立峰のすぐ背後では下降流が形成される場合が多い(例えば Queney, 1948)。このような気象条件下で

Plume Rise 法を適用すると、下降流により浮力が過小評価される結果、実際よりも小さな放熱率が求められると考えられる。Plume Rise 法の風に対する影響は山岳波の波長 λ に強く依存すると思われるが、 λ は地形スケールばかりでなく、火山で定常観測観測が難しい大気安定度や風速鉛直分布等にも依存する（例えば Sawyer, 1960）。従って、山岳波の影響をモデルを用いて補正することは、現状では困難である。

2. 解析方法の工夫

地形に起因する風は、一般的な火山地形においてごく普通に出現する。従って、比較的小規模な噴気に Plume Rise 法を適用する場合には、解析に何らかの工夫を施す必要である。本節では、有効と思われる方法を検討する。

ある噴気について、Plume Rise 法の見積もりに対する地形風の影響の大きさは、風速の鉛直成分と噴気の持つ浮力とのバランスで決まるであろう。従って、風速がより小さければ、より真の値に近い結果が得られることが期待される。Fig. 4 によれば、北風において風速が概ね 2 m/s 以下では風速との相関が不明瞭となることがわかる。そこで、本研究では風速 2 m/s 以下の見積もり結果がより真の値に近いと考える。このとき、10月7日の放熱率は 5–10 MW、11月11日の放熱率は 1–5 MW と見積もられる。

3. 実測値との比較

以上のように推定した放熱率から放水率を推定する。10月7日、11月11日とも、撮影画像における噴気の根元付近では顕著な凝結が起きており、噴気は噴出時の温度 500–650°C よりも十分に温度低下していたと考えられる。鍵山 (1978) と同様に、本研究では Plume Rise 法で求められた放熱率の大部分が凝結熱であったと仮定する。このとき、100°C における凝結熱 $2.25 \times 10^6 \text{ J/kg}$ を用いれば、10月7日の放水率は 80–400 ton/day、11月11日は 40–200 ton/day と見積もられる。

このように推定された放水率と、別の方法で測定した放水率とを比較する。本研究で観測を行った 11月11日の同時刻に、ポータブル測定装置による二酸化硫黄濃度の観測と A 火口で火山ガス採取が行われていた。これらの測定から、A 火口からの放水率として平均 230 ton/day (最大 350 ton/day、最小 50 ton/day) が得られている (篠原・森, 私信)。この値は本研究で求めた放水率 40–200 ton/day に近く、前節で検討した風速との相関を取ることで信頼性の低いデータを除く方法が有効であることが示唆される。

最後に、2003年10月と11月の放熱率変化を比較する。11月11日の放熱率は 1–5 MW であり、10月7日の放熱率 5–10 MW と比較してやや小さい。両日では噴気温度や火口径に変化がなかったから、火山ガス組成にも大きな変化がなければ、放熱量の低下は噴出速度の低下を反映したものと理解される。しかし、A 火口において噴出速度は測定されていなかったため、定量的な検討は難しい。本研究では、10月と11月の放熱率は 5 MW 前後、放水率は 200 ton/day 前後で

ほぼ同じ水準であったと結論する。

V. ま と め

観測事実に基づき、Plume Rise の方法を用いて噴煙解析を行う注意点についてまとめた。火山口周辺の地形等により風が鉛直成分を持つ場合には、見積もられる放熱率に 1 桁以上の不確定が含まれる恐れがある。このような風の効果は、一般的な火山地形において普通に現れる。風の効果をモデルを用いて補正することは現状では困難であるが、より妥当な値を得るためには風と放熱率との相関を調べ、風速に依存する値を除くことが有効である。このような方法で樽前火山 A 火山口の噴煙を解析した結果、放熱率は 5 MW 前後、放水率は 200 ton/day 前後と、直接測定による推定に近い値を得ることができた。

謝辞 札幌管区気象台の宮村淳一氏には、現地調査に際して格別のご配慮を賜ったほか、樽前火山に関する多くの有益な情報を頂きました。独立行政法人産業技術総合研究所の篠原宏志氏、東京大学地球化学実験施設の森俊哉氏には、火山ガス測定データを引用させていただきました。北海道大学地震火山研究観測センターの神山裕幸氏には草稿を読んでいただきました。ここに記して深く感謝いたします。

文 献

- 青山 裕・大島弘光・鈴木敦生・前川徳光, 2004. 北海道の活動的火山における最近の地震活動—樽前山—, 北海道大学地球物理学研究報告, 本報告.
- Briggs, G. A., 1969. **Plume Rise**. Critical Review Series, Rep. TID-25075, At. Energy Comm. Washington, D. C., 81pp.
- 気象研究所, 2003. 三宅島火山からの放熱率時間推移(2000年9月~2002年9月), 火山噴火予知連絡会会報, **83**, 62-63.
- 鍵山恒臣, 1978. 火山からの噴気による熱エネルギーと H₂O の放出量—Plume Rise からの推定—, 火山, **23**, 183-197.
- 勝井義雄・大沼晃助・新井田清信・鈴木建夫・近藤祐弘, 1979. 樽前火山 1978 年 5 月の噴火, 火山, **24**, 31-40.
- 気象庁, 1991. 日本活火山総覧 第 2 版. 483 pp.
- 気象庁, 2003 a. 地震・火山月報. 防災編, **15**, 10, 30-35.
- 気象庁, 2003 b. 地震・火山月報. 防災編, **15**, 11, 32-36.
- 日本機械学会, 1999. 日本機械学会蒸気表, 丸善, 201 pp.
- Queney, P., 1948. The problems of air flow over mountains: A summary of theoretical studies, *Bull. Ame. Met. Soc.*, **29**, 16-26.
- 札幌管区気象台, 2003. 樽前山. 北海道地域火山機動観測実施報告, **23**, 5-34.
- 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.
- Sawyer, J.S., 1960. Numerical calculation of the displacement of a stratified air stream crossing a ridge of small height. *Quatr. J. Met. Soc.*, **86**, 326-345.
- 寺田暁彦・井田喜明, 2002. 三宅島火山の噴煙高度変動と逆転層との関係, 地球, 号外, **39**, 121-129.
- 寺田暁彦・井田喜明・大湊隆雄, 2003. Windows PC を用いた自動撮影システムによる三宅島火山噴煙の観測, 火山, **48**, 445-459.

寺田暁彦・中川光弘・大島弘光・青山 裕・神山裕幸, 十勝沖地震 (Mj 8.0) 発生直後に起きた樽前火山の顕著な噴気活動, 地震研究所彙報, 投稿中.

Woods, A. W., 1993. Moist convection and the injection of volcanic ash into the atmosphere, *J. Geophys. Res.*, **98**, 17627–17636.