

# 薩摩硫黄島硫黄岳の熱活動について

松島喜雄

地質調査所

## Geothermal activities in the summit crater of Iwodake volcano, Satsuma-Iwojima

Nobuo Matsushima

Geological Survey of Japan

### 要旨

Satsuma-Iwojima is located on a northwest edge of Kikai caldera. There is a rhyolite cone of Iwodake, which has an active crater at its summit, in the eastern part of Satsuma-Iwojima. A small degassing vent appeared at the center of the summit crater of Iwodake in 1991 and its area has spread gradually. We measured the surface temperature distribution of the summit crater of Iwodake using infrared thermal camera. The surface temperature was higher than 100 °C in some places, where active fumaroles were present. The fumarole temperature was up to 900 °C in maximum. Even in the places having the surface temperature about 50 °C, the underground temperature became 100 °C at 1m depth. Such areas were distributed widely over the summit crater, indicating that the underground of most of the summit crater was filled with high temperature volcanic gas.

H<sub>2</sub>O flux of 150 kg/sec was estimated from the volcanic gas study in 1993. In this study, H<sub>2</sub>O flux and heat discharge rate from the summit crater were estimated during 1996-1999. Associated with the enlargement of the degassing vent at the summit crater from 1994 to 1997, H<sub>2</sub>O flux and heat discharge rate had increased. H<sub>2</sub>O flux was 2000kg/sec in 1997 and then it had decreased rapidly to 100kg/sec in 1999. The mathematical simulation of hydrothermal convection within porous media indicated that the estimated H<sub>2</sub>O flux could be produced at the surface by the suitable conditions: the vent permeability and the degassing pressure. When the vent permeability was  $10^{-11} \text{ m}^2$  and the degassing pressure was hydrostatic pressure, H<sub>2</sub>O flux at the surface was 100kg/sec. If the vent permeability was  $10^{-10} \text{ m}^2$ , H<sub>2</sub>O flux became 1000kg/sec at the surface. This increase of the vent permeability is one of the possible mechanism of the H<sub>2</sub>O flux increase associated with the development of the degassing vent at the central part of the summit crater.

## 1 はじめに

硫黄島は東 5.5km、南北 4km の火山島で、鬼界カルデラの北西端に位置する (図 1)。島内にはカルデラ壁があり、その内側には、後カルデラ火山の硫黄岳がある。硫黄岳では、直径約 400m の山頂火口内およびその周辺に数多くの噴気孔が存在し、活発な噴気活動が長期にわたり継続している (篠原・他, 1993)。噴気の最

高温度は 800 前後と極めて高温である。この山頂火口原中央部に 1991 年頃からクレーター状の地形が現れ、96 頃にはジェット音を伴いながら激しくガスが噴出する穴となった。同時期には火口南東縁に最大で幅 60mm の割れ目が確認されている (Shinohara *et al.*, 2001)。さらに 97 頃頃からはこの穴からわずかな降灰を繰り返すようになる。穴の大きさは現在に至るまで拡大している。

火山ガスの研究によると (篠原・他, 1993)、火山ガスのほとんどが地下のマグマに由来する。火山ガスの組成とマグマ中のガス組成を比較することにより、脱ガスの深度は海水準程度とかなり浅いと考えられている (Saito *et al.*, 2001)。

本論では、主に赤外熱映像装置によって得られた地表面温度分布から、放熱量と水蒸気の放出量を求め地熱活動の定量化を図った。その結果から山頂火口原での穴の出現などの地表の状況に応じた水蒸気放出量および放熱量の経時変化を明らかにした。また、硫黄岳の地熱活動をモデル化した数値シミュレーションを実施し、観測されたような水蒸気放出量と放熱量をもたらす要因を考察した。

## 2 地表面温度分布と熱活動の概要

山頂火口南縁の観測地点 (図 1 A 点) から火口内の赤外熱映像を撮影した。その結果得られた火口原内の地表面温度分布を図 2 に示す。地表面温度が約 50 より高温な領域が火口原内全域に広がっている。そのような場所では沸点温度の噴気孔が存在するか、または噴気地となっている。地表面温度が 200 より高温な場所では、最高で 900 に達する高温噴気孔が点在している。図 3(a) に地表面温度と地中温度の対応を示す。地表面温度は赤外放射温度計で、地中温度は熱電対を地中に突き刺すことにより測定した。図 3(b) に地表面温度と温度勾配の関係を示す。温度勾配は、地表から 20cm までの深度の温度勾配である。地表面温度が常温から 50 までは、約 3 /cm 温度勾配であるので、地下 20cm の深度の温度は 100 程度であるが、地表面温度 50 を越えると、温度勾配は急激に大きくなり (約 25 /cm)、地下 20cm の温度は数 100 となる。このことから、高温噴気孔の周辺では、たとえ地表面温度が 50 程度でも、地表下には加熱した高温のガスが存在していることを示唆している。このような場所では、火山ガスから析出した硫黄のクラストが地表を覆っている。このクラストが高温のガスを地下に閉じこめ、地表付近では大きな温度勾配を示し熱伝導が卓越している。

硫黄岳火口原では、1961 年に 25cm 深地温 (横山・他, 1966) が 1976 年に 1m 深地温 (地質調査所, 1976) が計測されている。これらの結果は、火口原の地温が最高でも沸点温度程度であり、火口壁を除く火口原には沸点以上の高温の領域がないことを示している。火口原では、1991 年頃からクレータ状の窪地が現れ、それが拡大し穴となったが、これに伴い噴気活動が活発化し地温も上昇したと考えられる。熱画像 (図 2) からこの穴が年々拡大している様子を見ることができる。1997 年 4 月、97 年 11 月、98 年 3 月、98 年 11 月、99 年 11 月にそれぞれ 26.5、27.9、34.9、40.5、64.2m である。熱画像を見ると、初期にはこの穴から高温の噴気が立ち上っているが、1999 年には立ち上る噴気は低温になっている。1997 年以降、噴気には時々粉碎された固形物 (灰) が含まれるようになる。1998 年、1999 年には、穴の周辺にはっきりとした低温域があるが、これは火口周辺に新たに灰がつもったためと考えられる。火口原の穴の形成に伴って、一時、噴気活動は活発化した。

しかし、97年から99年までの地表面温度に推移を見ると、ここ数年は火口原全体での温度が低くなっており、噴気活動が低下していると考えられる。

地表面温度観測と現地での観察から、硫黄岳火口原内の地表付近の地熱活動は、1) 噴気地、2) 温度勾配の急な熱伝導域、3) 最高900 に達する高温噴気、4) 沸点温度の低温噴気、5) 火口原に出現した穴からの噴気に大別される。次節ではそれぞれについて、地表から大気への放熱量および水蒸気放出量の推定を行った。

### 3 放熱量および水蒸気放出量の評価

#### 1) 噴気地

地表面温度が100 より低い領域は噴気地とみなせるので、Sekioka and Yuhara (1976) の方法を用いて放熱量を評価した。放熱量を  $Q_s$ 、噴気地の地表面温度  $T_s$ 、基準温度を  $T_0$ 、温度  $T_s$  を示す面積を  $S$  としたとき、

$$Q_s = K \cdot \sum (T_s - T_0) \times S$$

となる。K は地表付近の風速、湿度や温度等の気象要素ならびに雲量等に依存する係数であるが、ここでは、経験的に得られている値の平均値 40 を用いた。 $T_s$  と  $S$  は図 2 に示した熱画像の地表面温度分布から得られる。このようにして得られた各時期の、噴気地からの放熱量を表 1 に示す。放熱量は 1997 年 1999 年にかけて、徐々に減少している。

#### 2) 熱伝導卓越域

高温噴気孔の周辺で地表付近に硫黄のクラストが形成されている場所 (地表温度が 70 から 200 ) では、図 3 に見られるように温度勾配が大きく熱伝導が卓越している。そこで、得られている温度勾配に熱伝導率を掛けることによって熱伝導による放熱量を評価した。表 1 に示したように、熱伝導による放熱量は、噴気地からの放熱量に比べてかなり小さいことがわかる。また、経年変化もわずかである。

#### 3) 高温噴気孔

高温噴気孔は、地表面温度分布における 200 以上の領域に対応している。1998 年 3 月については、測定条件の問題から、高温の領域の面積は測定されていない。高温噴気孔では、乾燥した砂状の地表一面から、高温ガスが噴出している。その噴出速度をピトー管で測定した。ここで、火山ガスは一様に噴出しているとし、測定値の平均値 25m/sec をその速度とした。速度に、ガス密度、面積を掛け合わせるによって水蒸気放出量が求まる。さらに、その値にガスの比エンタルピを掛けることにより、高温噴気孔からの放熱量が求まる。ただし、火山ガスの物性値を得ることは難しいので、ここでは、800 の水蒸気として評価した。放熱量、水蒸気放出量の結果をそれぞれ表 1、表 2 に示す。高温噴気孔からの放熱量と水蒸気放出量は、噴気地からのそれらより 1 桁大きい。その経年変化は著しく、1996 年から急減している。

#### 4) 低温噴気孔

沸点温度の水蒸気を主体とした低温噴気孔は火口底のいたるところにあるが、地表面温度からその位置と面積を特定することは困難である。ここでは、第一近似として、放熱量および水蒸気放出量を次のように評価した。噴気地からの放熱量は、高温の噴気が上昇過程において冷却することによってまかなわれている。仮に深部から上昇した 800 の水蒸気が 100 の飽和蒸気として地表から放出されるとすると、温度低下によって失われた熱が周囲へ拡散し、噴気地を形成していることになる。そうすると熱量の保存から以下の式が成り立つ。

$$mf \times h(800) - h(100) = Q_s$$

ただし、 $h(800)$ 、 $h(100)$  はそれぞれ 800、100 における水蒸気のエンタルピー、 $mf$  (kg/sec) は水蒸気放出量である。 $h$  と  $Q_s$  を与えることにより  $mf$  が求まる。そして低温噴気による放熱量は  $mf \times h(100)$  となる。その結果を表 1、表 2 に示す。実際には、深部から上昇してきた高温ガスの熱エネルギーの 1 部は、熱伝導や湧泉水として噴気地以外へも拡散していることから、ここでも見積もり値は最大値を示すものである。

#### 5) 火口原に出現した穴からの噴気

火口原に出現した穴からは、かなりの噴気が放出されている。この噴気の噴出速度と温度をピトー管と熱電対で測定した。測定は、窪みにロープをわたし両側で固定した上で、ロープにピトー管と熱電対をつり下げ、窪みを横断させるようにして行った。噴出速度と温度の測定結果を図 4 に示す。噴気の温度は水蒸気の沸点温度より低い場合もある。これは、上昇する噴気が、周囲の空気を取り込み、含んでいるためである。ここでは噴気中の水蒸気は飽和状態にあると仮定した。噴気中の各点での温度からその場所の飽和湿潤空気の密度を計算することができる。その密度と各点で測定した速度から単位面積あたりの飽和湿潤空気と、それに含まれる水蒸気の質量流量の分布を求めた。この分布を積分することにより、穴から上昇する全ての飽和湿潤空気および水蒸気放出量を求めた。飽和湿潤空気の放出量から水蒸気放出量を差し引くと、取り込まれた空気に含まれる乾燥空気の流入量となる。この乾燥空気の流入量と周囲の空気の気圧、温度、湿度から、取り込まれた空気に含まれる水蒸気量を求めることができる。先に求めた水蒸気放出量から取り込まれた空気に含まれる水蒸気量を取り除くことによって、地下から上昇した水蒸気放出量が求められる。これに噴気温度から求めた平均的な比エンタルピーを掛けることにより、放熱量が求められる。その結果を表 1、表 2 に示す。ピトー管を用いた測定は、1998 年 3 月、1998 年 11 月、1999 年 11 月の 3 回行っている。それ以前のものについては熱画像を用いた結果である。実測された噴気の温度と速度には線形関係で近似される (図 5) ので、熱画像から得られる噴気の温度分布から速度分布を求め、実測した場合と同様の手続きで水蒸気放出量と放熱量を求めた。

#### 6) 水蒸気放出量および放熱量の経時変化

個々の領域からの水蒸気放出量と放熱量の推定結果を図 6、図 7 に示す。水蒸気放出量は全体的に減少傾向にある。低温噴気孔からの水蒸気放出量に比べ、高温噴気孔と窪みのからの水蒸気放出量は 1 桁以上大きい。

高温噴気孔からの水蒸気放出量は、1996年から1997年にかけて急減している。これは、1996年からの穴の急激な拡大と水蒸気放出量の増加に対応していると思われる。すなわち、1997年には、あらたに形成された穴から集中的に水蒸気が放出されるようになり、逆に周辺の高温噴気孔からの水蒸気放出量が急減したものと考えられる。ただし、穴からの水蒸気放出量も1997年以降急減している。

放熱量の経年変化も同様である。低温噴気孔と噴気地からの放熱量にくらべ高温噴気孔と窪みからの放熱量は1桁から2桁大きい。地下から上昇してきた高温のガスは大部分が冷却することなく大気へ放出していることを示している。このことは、熱源となる脱ガスの深度が浅いことを示しているのであろう。

すべての測定が同時に行われている時期について、水蒸気量と放熱量を足し合わせたのが図8である。総合的な水蒸気放熱量は2000kg/secから100kg/sec、放熱量は6000MWから100MWである。ともに1997年以降一様に低下する傾向にある。1996年以前について、コスベックによるSO<sub>2</sub>の観測結果と噴気ガスの化学成分から推定される水蒸気放出量は約150kg/secである(篠原・他, 1993)。1996年以前については、水蒸気放出量がそれほど変化していないと仮定すると、1997年には穴の形成に伴い一時的に水蒸気放出量が急増したが、その後減少し、1998年以降に再び増加前のレベルに戻ったとみなすことができる。ただし、1996年から1999年にかけてコスベックの観測も行なわれており、今回の測定値はそれから推定される水蒸気放出量より数倍大きい。その原因は定かではなく、今後の課題として上げられる。

## 4 数値シミュレーション

観測されたような水蒸気放出量はどのような条件によって生じるか検討することにする。硫黄岳山頂火口から放出される水蒸気はマグマから脱ガスしたものであること、脱ガスの深度は極めて浅いことから、図9に示したような領域を設定し、火道の下部に水蒸気が流入するモデルを考えた。そして、水と水蒸気の多孔質媒質中の対流をシミュレーションすることによって、火道の下部に高温の水蒸気が流入したときの地表からの水の放出量を計算した(図10)。境界条件は図9に示したとおりである。火道の透水係数(図9のF1)を変化させるが、周囲の透水係数(図9のF2)は $10^{-12}m^2$ で一定とした。初期条件は地殻熱流量に相当する温度勾配、静水圧に従う圧力勾配を与えた。流入させる水蒸気のソースは、初期圧力を維持するように与えた。その条件で計算することにより、図10に示したように、火道の透水係数が $10^{-10}m^2$ であれば1000kg/secの水蒸気放出量が、 $10^{-11}m^2$ であれば100kg/secの水蒸気放出量が実現されることが明らかになった。放熱量についても100MW、5000MWとなり観測地に近い値となっている。このことは、適切な透水係数で、脱ガス深度での圧力が静水圧であれば、ここで考えたようなモデルによって、測定されるような水蒸気放出量および放熱量が容易に得られることを示している。また、火道の透水係数が1桁拡大することにより、水蒸気放出量も1桁増加している。1996年から1997年にかけての水蒸気放出量の急増は、穴の拡大等により媒質の透水係数が増加し、かつ、脱ガス深度での圧力が静水圧を維持するようにマグマから水蒸気が供給されれば水蒸気放出量の増加は説明できる可能性がある。

## 5 まとめ

薩摩硫黄島硫黄岳の山頂火口での地熱活動を、地表での形態に基づき、噴気地、熱伝導卓越域、高温噴気孔、低温噴気孔、火口原に出現した穴からの噴気に分類し、それぞれからの水蒸気放出量と放熱量を求めた。高温噴気孔および火口原に出現した穴からの噴気による水蒸気放出量がその他にくらべ桁以上大きい。放熱量も同様である。高温噴気孔からの水蒸気放出量は1996年から1997年にかけて急減している。これは、火口原に出現した穴から集中的に水蒸気が放出されたためであろう。ただし穴からの水蒸気放出量も1997年以降減少している。全体的に見ると、水蒸気放出量は1997年に約2000kg/secであったが、その後減少し、1999年には100kg/secになる。1996年より前については、火山ガスの観測から約150kg/secの水蒸気放出量であったと推定されている。従って火口原に出現した穴に伴って、一時的に水蒸気放出量が増加したが、1998年以降に以前のレベルに戻ったと考えられる。数値シミュレーションによれば、火道が $10^{-11}\text{m}^2$ の透水係数であり、脱ガスが静水圧を維持するように行われれば、地表での100kg/secの水蒸気放出量を説明できる。また、透水係数が $10^{-10}\text{m}^2$ になれば水蒸気放出量も1000kg/secになることが確かめられた。穴の形成に伴って透水係数が増加し、また、静水圧を維持するように脱ガス量も増加すれば、地表での水蒸気放出量の増加は説明できる可能性がある。

## 参考文献

Saito, G., Kazahaya, K., Shinohara, H., Stimac, J., and Kawanabe, Y., Variation of volatile concentration in a magma system of Satsuma-Iwojima volcano deduced from melt inclusion analyses, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 2001 (in press).

篠原宏志・風早康平・Hedenquist, J.W., 薩摩硫黄島の火山ガス・温泉・熱水系, *地質ニュース*, 472, 6-12, 1993.

Shinohara, H., Kazahaya, K., Saito, G., Matsushima, N., and Kawanabe, Y., Degassing activity from Iwodake rhyolitic cone of Satsuma-Iwojima volcano, Japan during 1990-1999: Gas eruptions and formation of a new degassing vent, 2001 (in press).

地質調査所, 全国地熱基礎調査報告書, No. 30, pp.90, 1976.

横山泉・清野政明・本谷義信・飯塚進・牧正・青田昌秋, 鹿児島県下硫黄島の地球物理学的調査報告, 北海道大学地球物理学研究報告, 16, 33-50, 1966.

表 1: 各領域からの放熱量、単位は MW。

	噴気地	熱伝導卓越域	高温噴気孔	低温噴気孔	火口原の穴
1996年 10月15日	47	10	2,826	102	
1997年 4月17日	36	7	635	78	5,480
1997年 11月3日	43	4	688	84	2,773
1998年 3月18日	29	1		1,038	1,122
1998年 11月9日	29	1	263	54	2,049
1999年 11月24日	20	1		75	133

表 2: 各領域からの水蒸気放熱量、単位は kg/sec。

	高温噴気孔	低温噴気孔	火口原の穴
1996年 10月15日	38	718	
1997年 4月17日	153	29	1,961
1997年 11月3日	165	32	1,015
1998年 3月18日	20	374	294
1998年 11月9日	2,396	63	20
1999年 11月24日	14	28	42

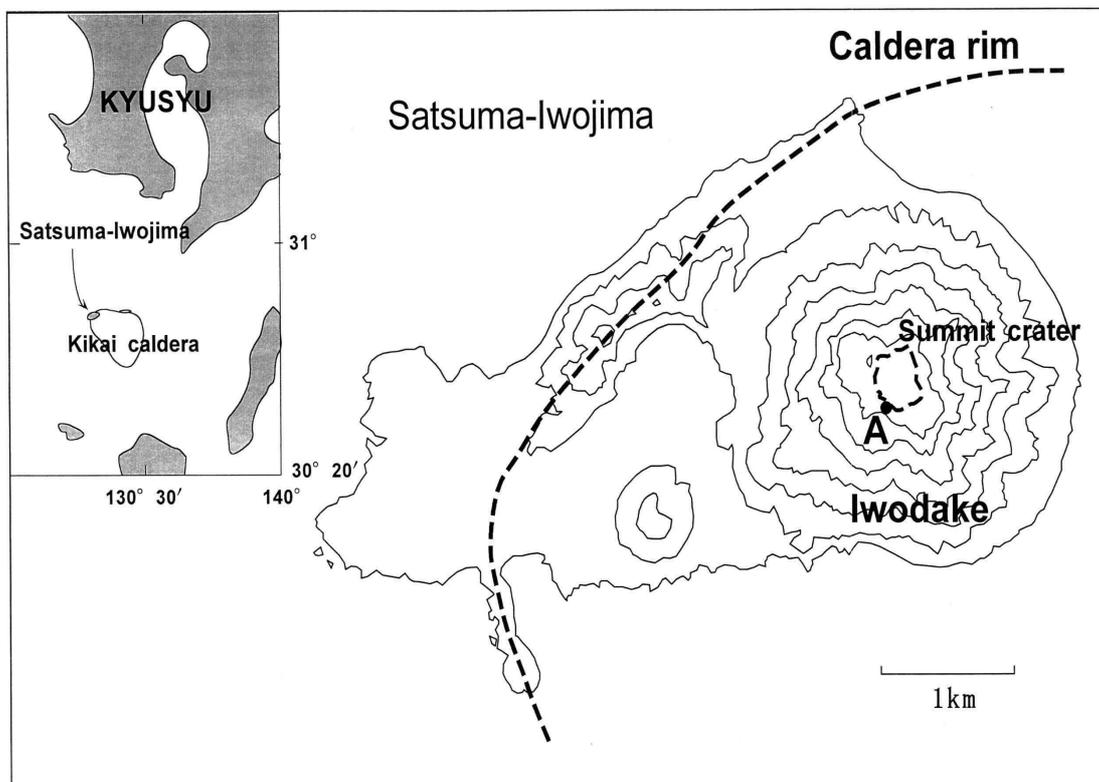
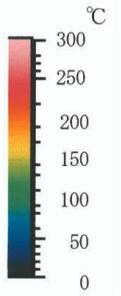
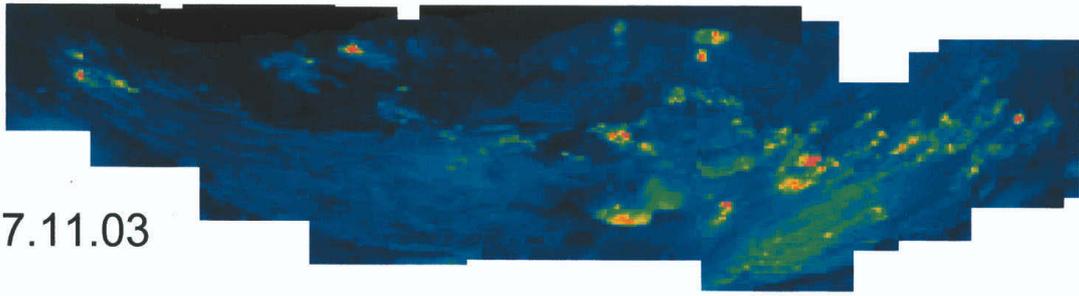
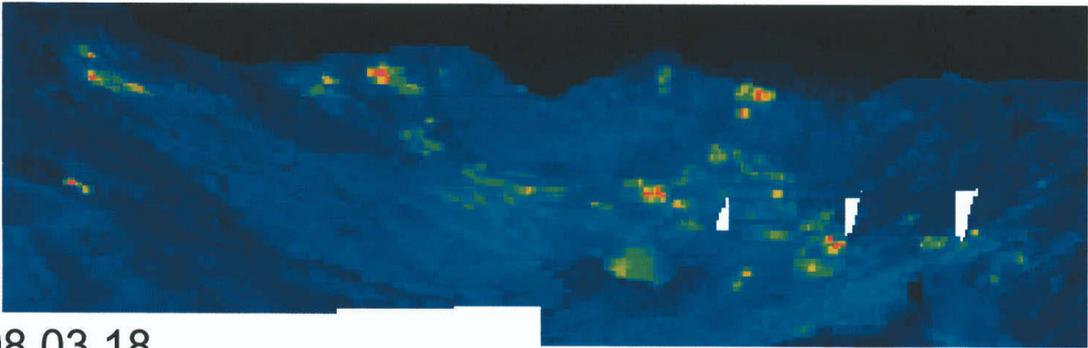


図1: 薩摩硫黄島の地形。図中A 点は硫黄岳山頂火口内の地表面温度分布の観測地点。

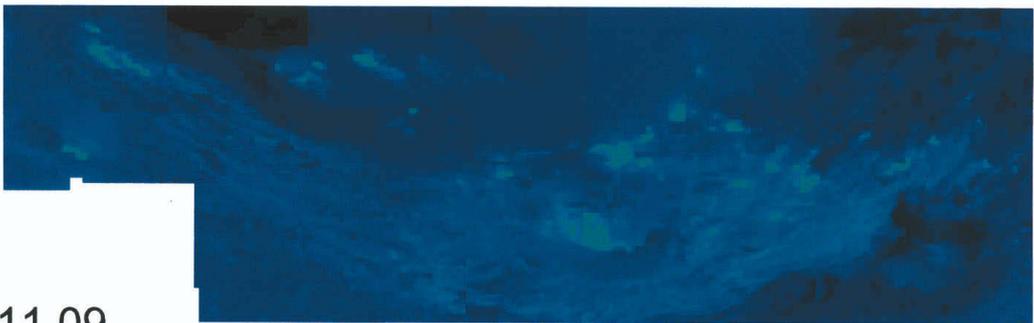
1997.04.17



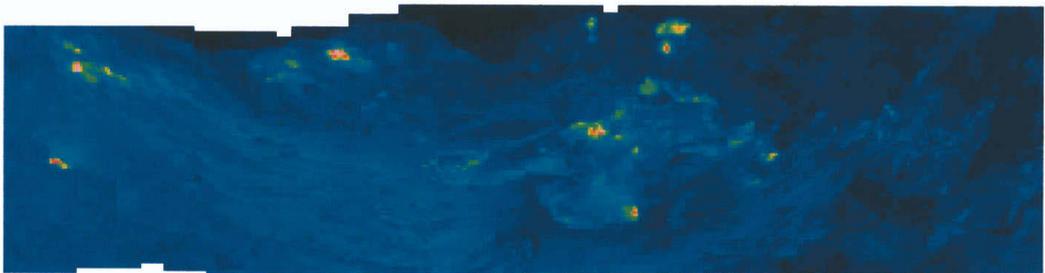
1997.11.03



1998.03.18



1998.11.09



1999.11.24

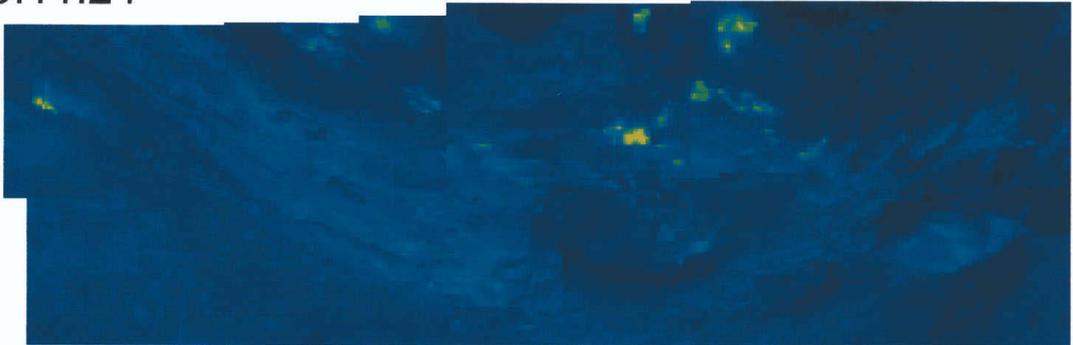


図2: 硫黄岳山頂火口内の地表面温度分布とその経年変化。

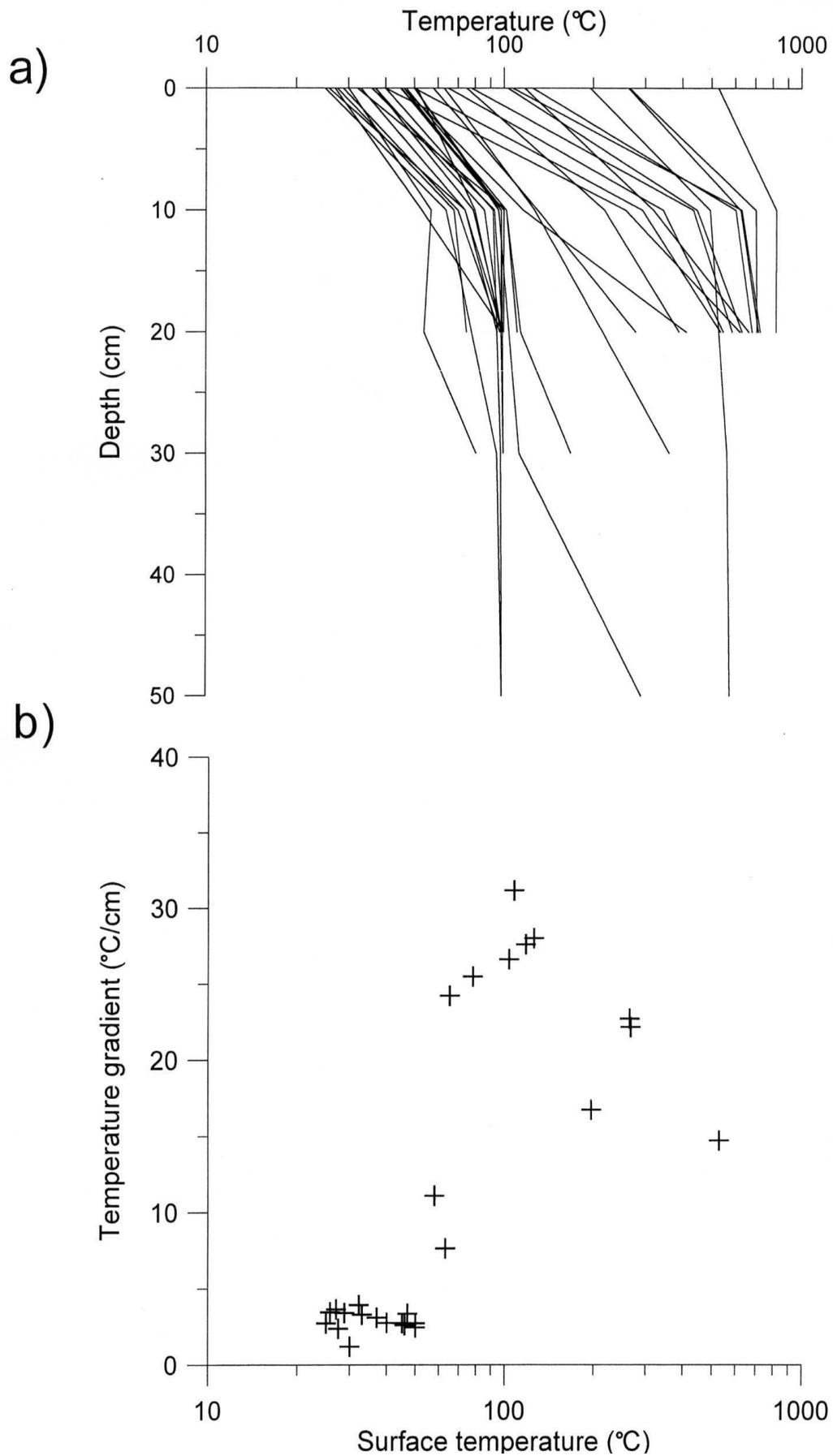


図3: (a): 地表付近の地温の鉛直温度分布。(b): 地表面温度に対する20cm 深度までの地温の温度勾配。

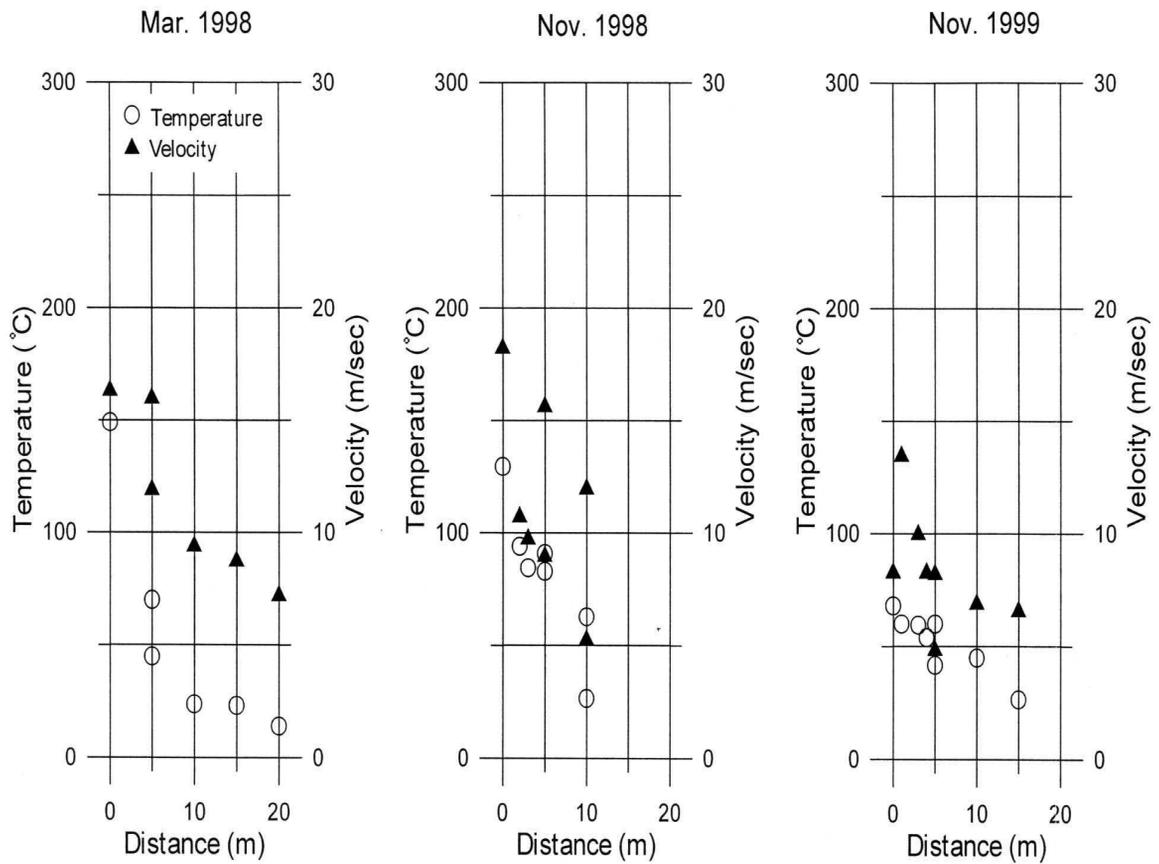


図4: 山頂火口内に形成された穴からの噴気の温度と速度のプロファイル。横軸の原点は噴気中心部。

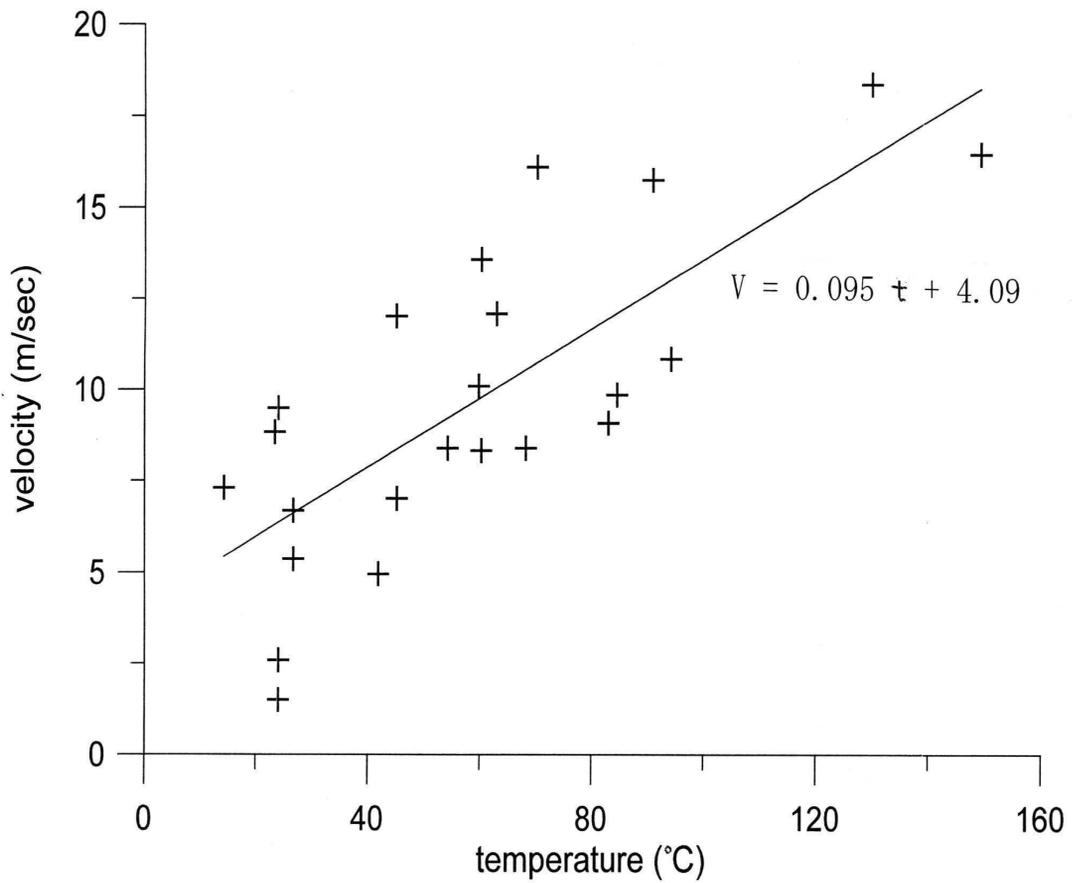


図5: 噴気孔から流出する噴気の温度と速度の関係。

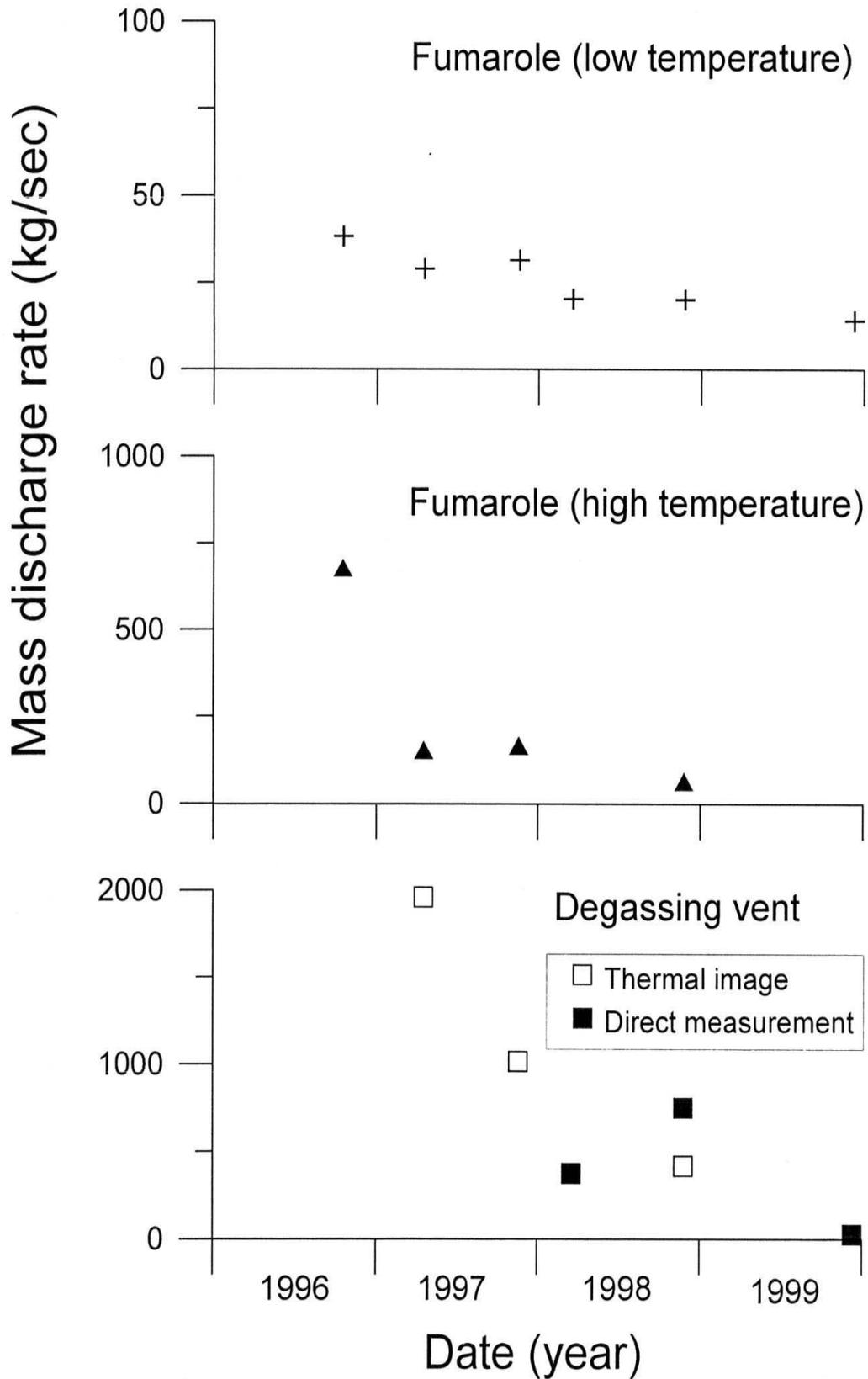


図6: 水蒸気放出量の経年変化。上から、それぞれ、噴気地、高温および低温噴気孔、火口内に形成された穴からの水蒸気放出量。

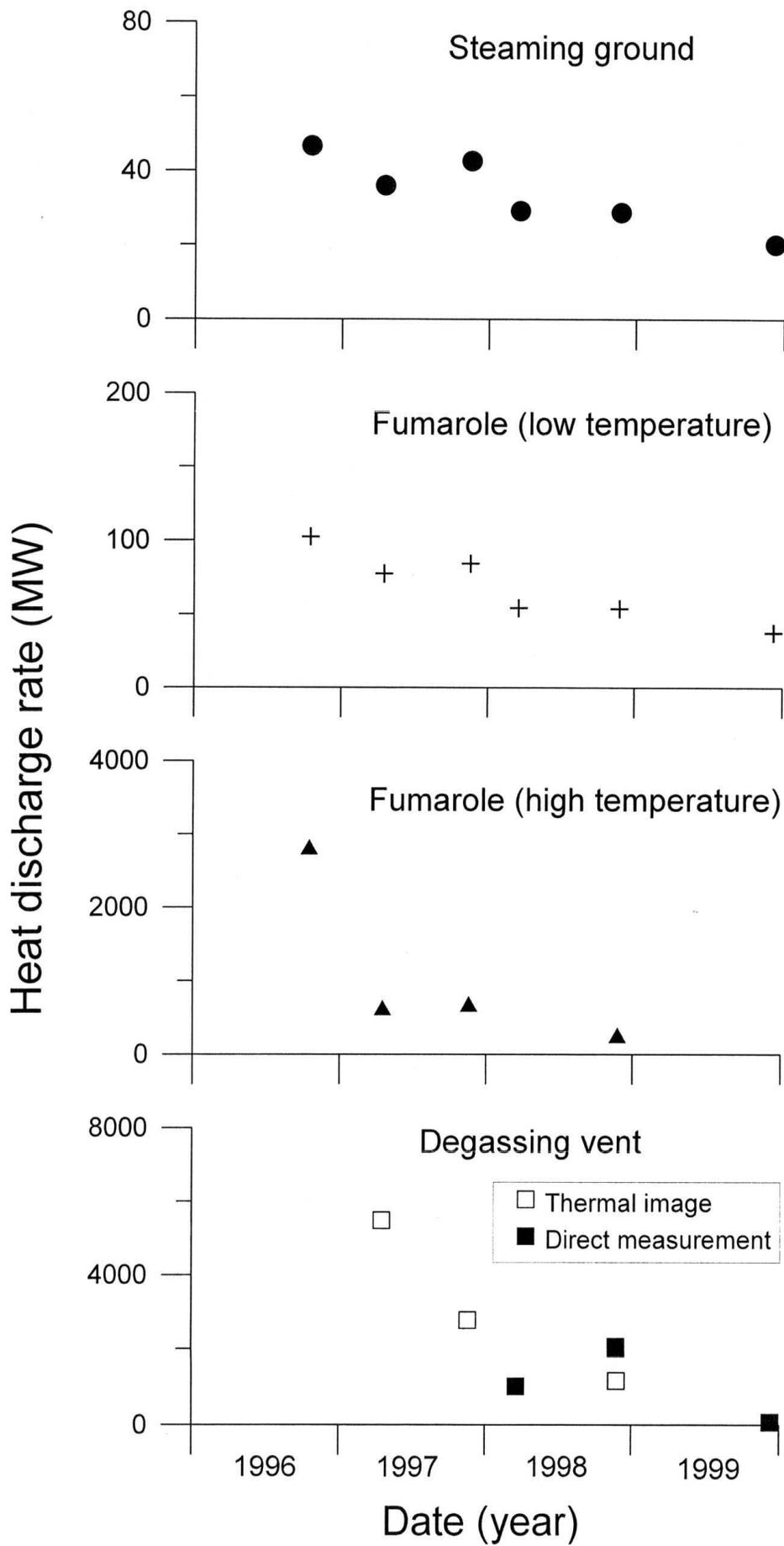


図7: 放熱量の経年変化。上から、それぞれ、噴気地、熱伝導卓越域、高温および低温噴気孔、火口内に形成された穴からの放熱量。

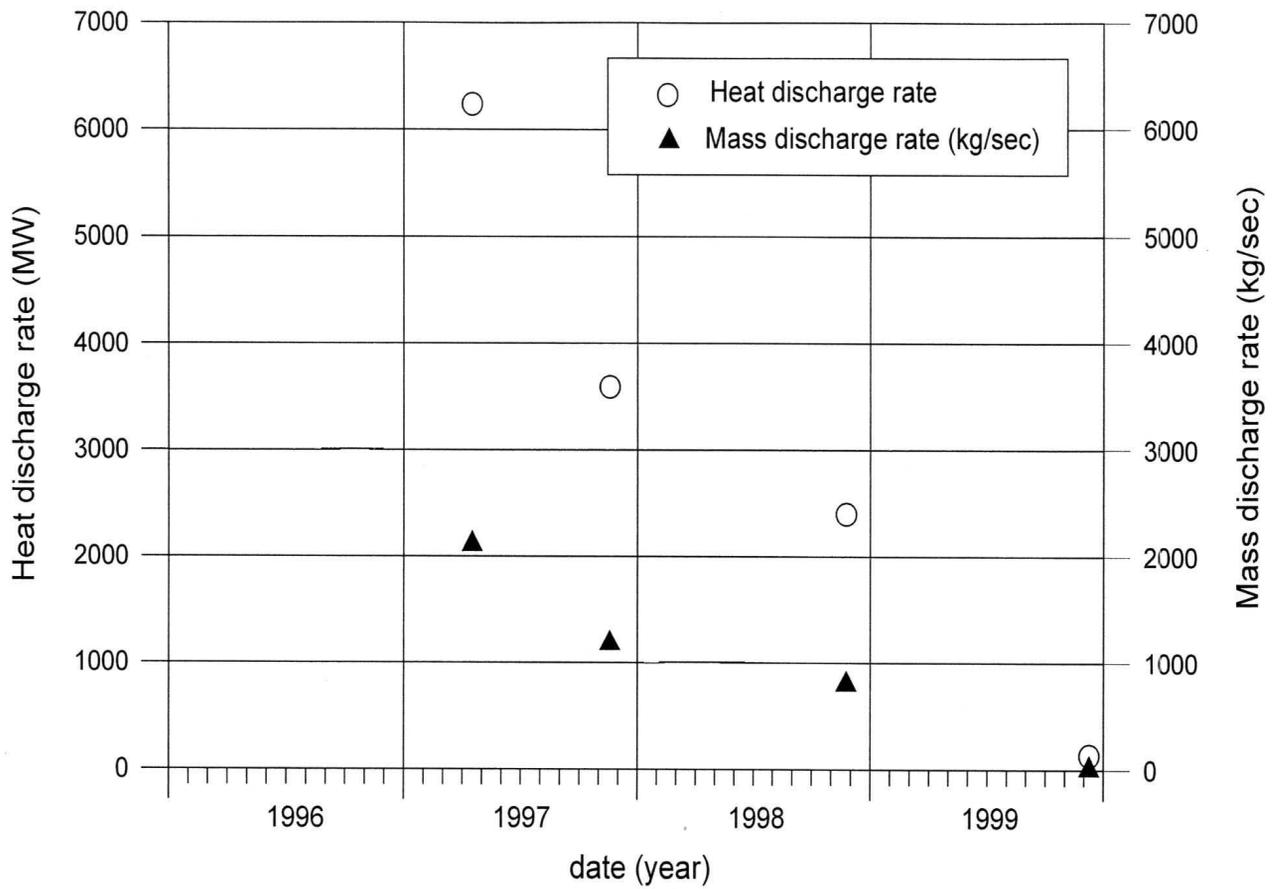


図8: 山頂火口からの全体的な水蒸気放出量および放熱量の経年変化。

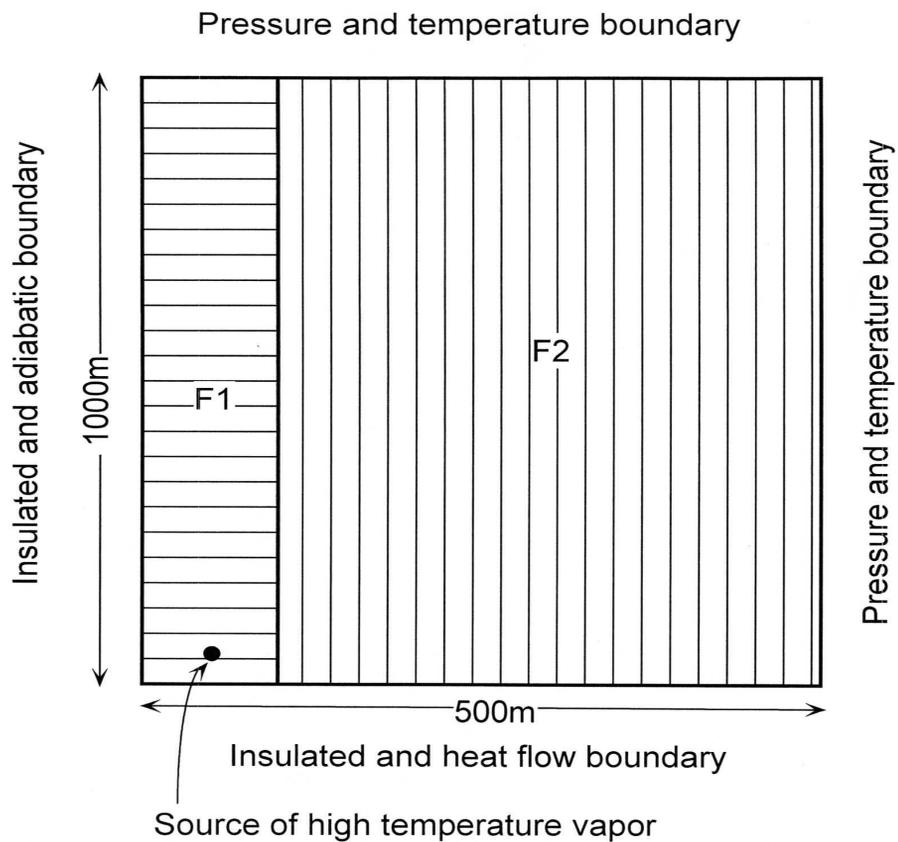


図9: 数値シミュレーションの計算領域の設定と境界条件。

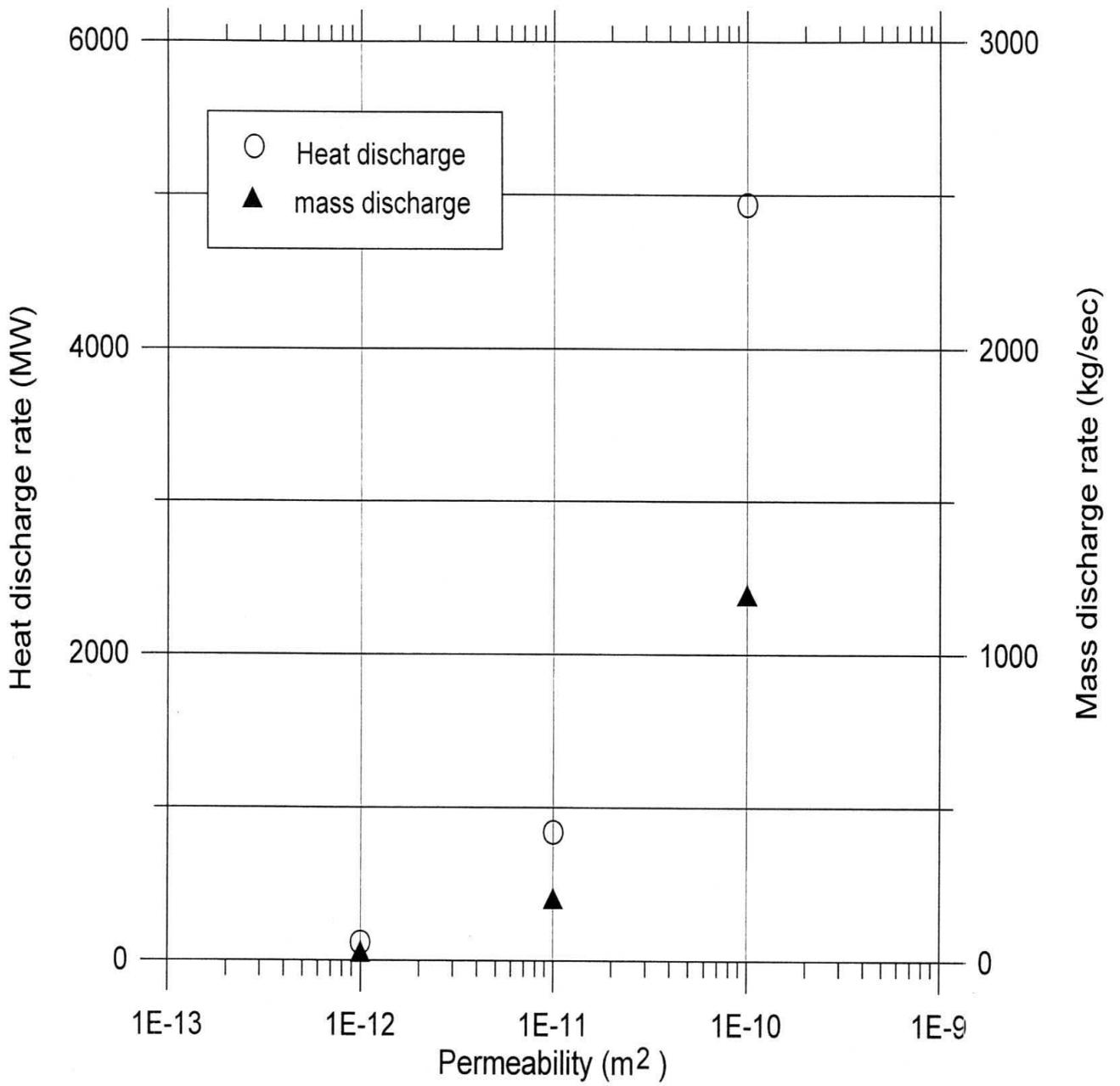


図10: 水蒸気放出量および放熱量の計算結果。