

浅間火山 2004 年噴火に関連した噴煙の時間変動

鍵山恒臣*・小山悦郎**

(2005年4月27日受付, 2006年1月7日受理)

Time Variation of Volcanic Plume Related with the Eruptions of Asama Volcano in 2004

Tsuneomi KAGIYAMA* and Etsuro KOYAMA**

Asama Volcano had a series of eruptions from September 1 to November 14, 2004. We have carried out infrared observation at the eastern foot of the volcano since August 2002, and have succeeded in capturing successive plume imageries. We examined long term and short term variation in volcanic plumes related with the 2004 Eruptions.

We examined long term variation of the plume height from January to November 2004, and found two different kinds of correlation between the plume height and other volcanic activities; the increase in plume height followed by the eruption with a long time delay, and that followed by the eruption promptly. The plume height turned to increase gradually in March and May with the increase of the A-type earthquakes and gradual inflation suggesting supply of magma in the deeper part, and the height increased anomalously from July 25 with rapid inflation suggesting magma migration to the shallower part. These anomalies were followed by the first eruption on September 1 about 40 days after. Erupted products included some juvenile materials, but the major part of the products were lithic materials. The plume height became lower just after the eruption, but turned to increase from September 12 following the increase of A-type earthquakes. The second eruptive stage started from September 14, 2 days after the increase of the plume height. Three small eruptions occurred on September 14, and many small eruptions occurred successively from September 16 to 17. The erupted products were mostly well vesiculated juvenile materials. This evidence suggests that the eruptions in the second stage occurred with much volcanic gas, while the first eruption occurred after degassing from magma.

We examined short term variation of the volcanic plume during the developing stage of the successive minor eruptions; from 00:57 a.m. to 08:00 a.m. on September 16. We got time series data of the average temperature on the certain vertical line segment, which is crossed by moving volcanic plume, and examined spectrums. As a result of analysis, some power peaks were confirmed at the multiples of 0.0025 Hz until 4 a.m. And this peak was found to move to higher frequency according to the eruptive activity; 0.0032 Hz at 7 a.m. One possible reason is that Asama Volcano has some resonance beneath the crater (conduit), and the characteristic length of the conduit changed to be shorter during the successive minor eruptions. Japan Meteorological Agency reported the number of eruptions increased from 4 a.m., and Geographical Survey Institute found a lava cake within the crater about 11 a.m. These evidences suggest that magma ascended within the conduit around 4 or 7 a.m., and may be consistent with our analytical results.

Key words: Asama Volcano, eruption, volcanic plume

1. はじめに

火山の噴煙を描写する時、しばしば「もくもくと上昇

する」という言い方をする。噴火の映像を見ると、蒸気機関車の息づかいのようにもくもくと噴煙が上昇してい

* 〒869-1404 熊本県阿蘇郡南阿蘇村河陽 5280
京都大学大学院理学研究科地球熱学研究施設火山研究センター

Aso Volcanological Laboratory, Graduate School of Science, Kyoto University, Minami-Aso, Aso, Kumamoto 869-1404, Japan.

** 〒389-0111 長野県北佐久郡軽井沢町長倉山
東京大学地震研究所浅間火山観測所

Asama Volcano Observatory, Earthquake Research Institute, University of Tokyo, Nagakura-Yama, Karuizawa, Nagano 389-0111, Japan.

Corresponding author: Tsuneomi Kagiya
e-mail: kagiya@aso.vgs.kyoto-u.ac.jp

る。さらによく観察すると、その息づかいは噴火の勢いが激しいときには、周期が短く、勢いが収まりかけてくると周期が長くなっていくように見える。このような「火山噴煙の時間変動」は、ずっと以前から認識されていたが、感覚的なものであり定量的な検討は行われてこなかった。近年、ビデオカメラの小型化やパソコン上での映像の処理が容易になったことから、この問題を検討する環境が整いつつある。このことは、可視映像に限らず、赤外映像においても同様のことが起きている。赤外装置は、かつては、1枚の映像を取得するのに長い時間を要した。1990年代半ばまで、我々は数枚の映像データを時間をかけて解析し、温度分布や熱異常領域の把握、最高温度や放熱量の推定などを行ってきた（たとえば、Shimozuru and Kagiya, 1978; Kagiya, 1981; 井口・鍵山, 2002）。しかし、近年では1秒間に30画面の映像の記録が可能となり、短時間に変動する現象を研究対象とすることが可能となっている。赤外映像は、可視映像に比べて夜間の観測も容易に行なえるという利点もある。こうした環境の変化を背景に、有珠山2000年噴火では、西山火口の噴煙について、赤外および可視による動画映像が収録された。これらの映像を解析することで、西山火口の噴煙活動に、基本周期12秒程度の時間変動が存在することが明らかにされた（鍵山・他, 2000; 鍵山・他, 2003）。こうしたある種のリズムが、他の多くの火山の噴煙においても普遍的に存在するものか、そして、火山活動の状態に応じて変化するものかはきわめて興味深い問題であるが、この種の検討はまだほとんど行われておらず、できるだけ多くの火山において映像を取得し、解析を試みる必要がある。

浅間山は、2003年4月の微噴火以降、全般として活動が低下していたが、2004年9月1日に噴火した（気象庁, 2004a）。その後も、断続的に噴火が継続し、特に、9月16日から17日にかけては、小規模な噴火がほとんど連続的に発生する「連続微噴活動」となった。著者らは、この一連の噴火の赤外映像を噴火活動期に入る前から収録することに成功した。これらのデータを解析すれば、浅間山の噴煙活動にある種のリズムが存在するか、あるとすれば、それは火山活動の推移によって変化するのか否かを明らかにできるであろう。

また、こうした興味とは別に、一連の噴火活動期に入る前に、噴煙活動がどのように推移したかにも興味もたれる。たとえば、伊豆大島火山では、火山体の比較的深部においてマグマの蓄積が進行した後に、マグマの火山体浅部への上昇に伴って熱的活動の活発化や火山性微動の発生などの異常現象が検知され、噴火へと移行した。マグマの深部における蓄積と浅部への移動とに分け

て考える事で、火山噴火の準備過程を系統的に理解することに成功している（渡辺, 1998）。また、近年、火山噴火が爆発的になるかどうかは、マグマ中の揮発性成分の脱ガスがどの段階で進行したかが重要であると考えられるようになってきている。噴煙活動の消長は、マグマからの揮発性成分の発散の量や揮発性成分と地下水との相互作用の程度を反映していると考えられる。したがって、火山噴火の前に、噴煙活動がどのように時間的に推移したかを、他の前兆現象と関連付けて検討することは、きわめて興味深い。浅間山でも、この問題を明らかにすることで、マグマの蓄積や上昇、揮発性成分の脱ガスなどの噴火に向けてのプロセスがどのように進んでいったかを検討できると期待される。

こうした観点から、本論文では、浅間山の赤外映像を解析し、以下の2つの検討を行う。第1には、浅間山の噴煙高度が、2004年の一連の噴火の前にどのように推移したかを赤外映像の解析から検討する。噴煙高度の変化は、山頂上空の気温や湿度、風速などの気象条件に影響されるが、雨天、曇天を除くさまざまな気象条件下で数多くのデータをとれば、火口から放出される火山ガスの量の変化を大略的に捉えることが可能である。火山ガス放出量は、二酸化イオウの放出量として計測される場合が一般的であるが、2004年の浅間山の噴火の場合には、2003年から噴火直前までの期間に計測が行なわれていないので、噴煙高度からの検討が重要である。第2に、2004年9月16日から17日にかけて発生した連続微噴の噴煙について、第4章に定義する方法で噴煙の噴出率に相当する量の変化を推定し、その周波数解析を行うことで噴煙活動の時間変動を検討する。

なお、噴煙という用語は、狭義には火山灰などを含んだ状態をさすが、含まれる火山灰の量が減少した灰色の状態でも噴煙と呼ばれ、広義には、火山灰が含まれない状態であっても、白色噴煙などと呼ばれている。非噴火時の噴気を噴煙と呼ぶことには疑問が残るが、本論文では、映像解析という単一の手法で捕捉しうる現象という意味で単一の用語、噴煙を使用する。換言すれば、火口から噴出される、一部に固体・液体を含む気体の塊で、火山の麓から認識できる形状をもった状態のものを噴煙と呼ぶことにする。

2. 浅間火山における赤外映像観測の概要

浅間火山の東約4kmに位置する東京大学浅間火山観測所（Fig. 1）では、噴煙活動が活発になった2002年8月以降、敷地内に赤外映像装置（Avio TVS600）を設置し、一定の時間間隔で赤外映像を収録してきた。観測開始当初は、90秒ないし60秒間隔で収録していたが、噴

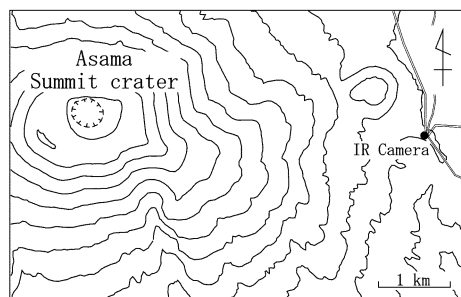


Fig. 1. Map of Asama Volcano and position of the Infrared Camera (solid circle).

Table 1 Specifications of infrared imagery.

| Items | Specifications |
|------------------------|---|
| Spectral range | 8 to 14 μm |
| Field of view | 25.8° (H) 19.5° (V) |
| Detector | 320 (H) \times 240 (V) Uncooled Microbolometer |
| Spatial resolution | 1.4 mrad. |
| Temperature resolution | 0.1°C |

火活動が活発になった 2003 年 9 月 13 日以降は、5 秒間隔で収録した。主要諸元を Table 1 に示す。本映像装置は 10 μm の帯域の赤外線を使用しているため、3 μm の帯域の赤外線を使用している映像装置に比べると太陽光の散乱などの影響がきわめて少ない。たとえば、測定の障害となる太陽光の 10 μm における放射は 3 μm の放射の 100 分の 1 程度であるのに対して、250 K ~ 300 K 程度の温度である測定対象物からの赤外放射は、逆に 200 倍程度となるからである。

得られた赤外映像の一例として、Fig. 2 に、2004 年 3 月 4 日 18 時 41 分に収録された映像を示す。浅間山上空は晴れており、噴煙がおだやかに出ている。図の鉛直線分 1 における温度プロファイルを図 3 に示す。図の右側が、線分の上方向に対応している。ピクセル数 35 よりも上方の温度は、噴煙のない空の部分の温度を示しており、下から上に向かうにつれて -36°C から -40°C 程度に若干低下する傾向が見られる。この温度は、カメラから光学的な深さまでの範囲にある大気の平均的な温度に対応しており、上方ほど低い温度を示している。昼間の映像の場合には、太陽光の散乱の影響が加わった温度となる。ピクセル数 0 から 15 は浅間山の山腹の温度、ピクセル数 16 から 35 は噴煙の温度を示している。これらの部分の温度は、山腹および噴煙が放射する赤外線のうち途中の大気で吸収されなかった部分と途中の大気が放射

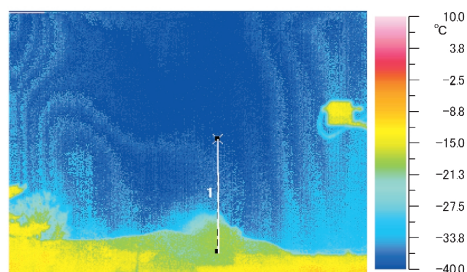


Fig. 2. Infrared imagery of volcanic plume in Asama Volcano (18 : 41, March 4, 2004).

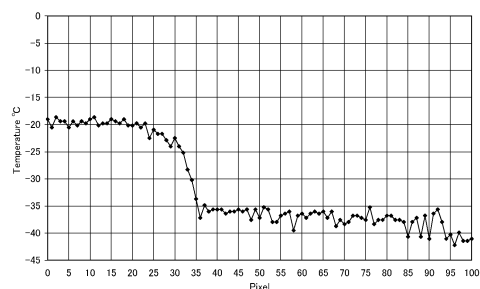


Fig. 3. Temperature profile on the vertical line segment in Fig. 2.

する赤外線の和を反映した温度となる。赤外映像カメラから山頂および噴煙までの距離は、5,000 m 程度あるため、実際の温度よりも低く計測されている。噴煙の最下部と山腹の温度は日没後時間が経過しているためほぼ同じ温度を示しているが、昼間の映像では山腹の温度が高くなっている。噴煙の温度は、最下部で空の温度よりも 15°C 程度高い -20°C 程度を示し、上方に向かうにつれて急速に低下している。これは、噴煙の液滴が蒸発することによって、液滴が放射する赤外線の量が減少し、後方の大気からの赤外線の寄与が大きくなったためである。この例に示すように、噴煙と空は明瞭に区別される。以下の 3 章では噴煙高度の長期的な変化について、4 章では噴煙活動の短期的な変動について議論することとする。

3. 噴火活動期にいたるまでの噴煙高度の長期的変化

浅間山では、2002 年夏に噴煙の量および高度が増大し、火山ガスによって周辺の樹木が枯れるなどの被害がでたが、秋以降は徐々に減り始め、2003 年 4 月の微噴火発生後はさらに減少していた (気象庁, 2004a, b)。このような状態から 2004 年 9 月の噴火まで、噴煙高度はどのように変化したか、そして噴火活動期に入り、どのよ

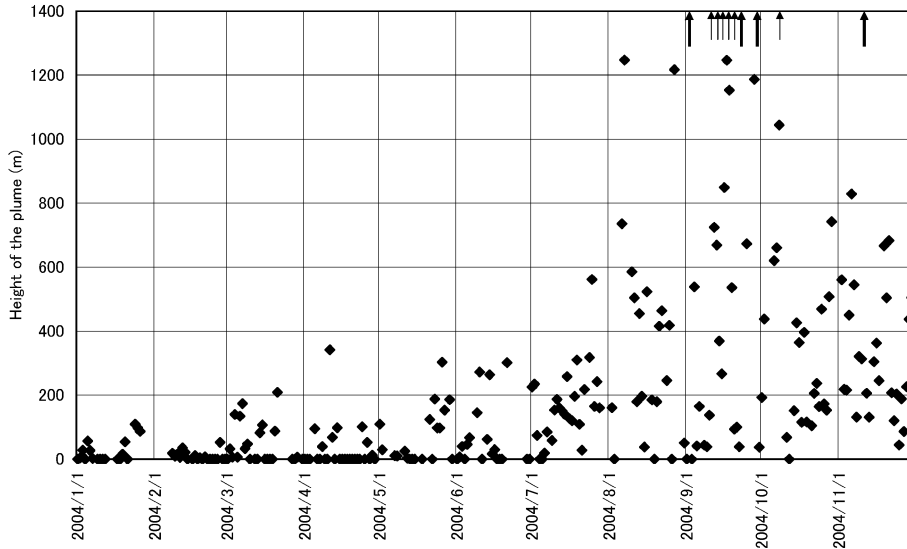


Fig. 4. Daily mean of the plume height of Asama Volcano from January to November, 2004. Large arrows indicate middle size explosions, small arrows indicate minor eruptions.

うに推移したか、大変興味を持たれる。気象庁は噴煙の高さおよび量を毎日 09 時と 15 時に遠望により観測しているが、2003 年の微噴火のように、1 日の中で数分間だけ噴煙が急激に増大することがあるので、よりきめ細かな調査を行う必要がある。本研究では、3 分毎に噴煙の高さを以下の方法で推定し、日平均値から Fig. 4 を作成した。噴煙の高さは、以下の方法で求めた。2 章の Fig. 2, Fig. 3 の例に示したように、噴煙の最高部の位置は比較的容易に読み取りが可能である。赤外映像の 1 画素は仰角 1.4 mrad に対応するので、噴煙の最高部の位置を山頂からの画素数で読み取り、噴煙が火口の直上に上昇していると仮定して計算した。噴煙が火口直上に上昇していると仮定しているので、西風の場合にはカメラ側に噴煙が流れ過大評価となる。しかし、たとえば山頂から上昇することなく水平に観測所方向に流れた噴煙を高さ 1,000 m の噴煙と誤って計測するには、噴煙が消滅することなく、山頂から 2,000 m も観測所方向に流される必要があり、そのような状況は発生していない。2004 年 9 月の噴火最盛期には、噴煙が山頂火口から北東ないし南西方向に数 km 流されており、このような場合には過大評価となる。しかし、本論文では、噴煙の高さをおよそ 200 m より低い、200 m 以上、500 m 以上といった程度に分けて議論するので、論旨に影響することはない。また、気象庁 (2005) に示されている浅間山の南側から計測された噴煙高度の図と比較しても、整合的な結果となっており、Fig. 4 は、噴煙高度の変化をより正確に表わしていると考えられる。

図から、噴煙活動は、噴火活動期に向かって以下のように変化したことがわかる。2004 年 1 月から 2 月にかけては、噴煙の高さはきわめて低い。これは、赤外映像において噴煙と認識されるような噴気がほとんど見られなくなっていたことに対応している。この時期は西風が卓越するので、噴煙が西に流されて山の陰に隠されてしまうことは考えられない。また、上空の気温が低いため通常は噴煙が容易に確認できるにもかかわらず噴煙がほとんど見られなかったことから、噴煙高度は実際に低下していたと考えられる。2004 年 3 月以降、噴煙の高さがやや増加して 200 m に達するようになり、5 月下旬からは、しばしば噴煙の高さが 300 m に達するようになった。また、7 月下旬からは噴煙の高さがしばしば 500 m を越えるようになってきている。気象条件によって噴煙高度が高く見積もられる可能性もあるが、この図で噴煙高度が 500 m を越えている 7 月 25 日には、それまで 200 m 程度であった噴煙高度が 19 時 10 分からおよそ 90 分間にわたって 500 m を越える状況が観測され、4 時間後にもとの高さにもどっていることから、一時的に噴煙高度が異常に高くなる状況は実際に出現していたと考えられる。その後も、一時的に噴煙高度が 500 m を越える状態が 8 月半ばまで継続していたが、8 月末から 9 月 1 日にかけてやや低下した後、9 月 1 日夜に噴火が発生した。噴火そのものの映像は、天候が悪かったために得られなかったが、噴火直後の映像では、噴煙の高さは低い状態であった。9 月 1 日以降の噴煙の高さは時間分解能をあげて Fig. 5 に毎分値で示す。9 月 1 日の噴火後は、天候が

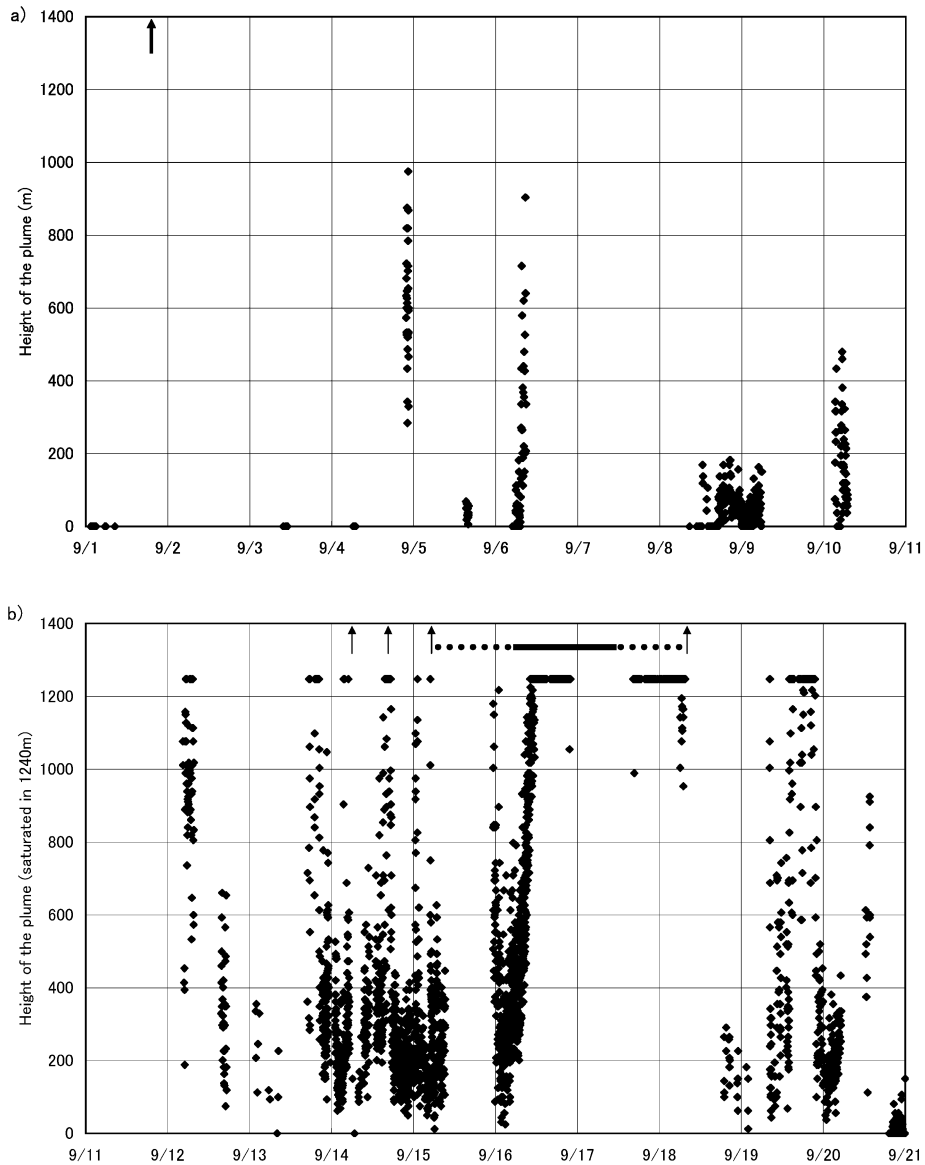


Fig. 5. Variation of the plume height from September 1 to 10 (a) and 11 to 20 (b), 2004. Large arrow indicates middle size explosion, small arrows indicate minor eruptions. Many minor eruptions occurred from 15 to 18 (closed circles).

悪く、断片的にしか映像は得られていないが、9月3日は、噴煙がほとんど出ていなかった。また、9月4日以降も、噴煙がほとんど出ていない状態が続く中で一時的に噴煙高度が増大し、1日の平均としては噴煙の高さは低い状態が続いた。9月12日ころから再び噴煙の高さが増大し、14、15日には、噴火が断続的に発生した。特に、16日未明から17日にかけては、やや小規模な噴火が連続して発生する連続微噴活動の状態となり、噴煙の高さ

は映像上で上方に飽和した状態となった。一般に、連続微噴は、個々の噴火の爆発は微小であるが、連続的に物質とエネルギーを放出し続けているので、火山活動としては最も活発な時期である（たとえば、下鶴・他、1980）。噴火はその後も断続的に続き、噴煙の高さも9月18日の午前中まで上方に飽和した状態が継続した。18日午後には噴煙の高さが減少しているが、これは断続的に発生していた噴火がおさまったことに対応している。そ

の後、浅間山は、間歇的な爆発や小規模な噴火を繰り返しているが(気象庁, 2004c, d), 噴煙の高さは、個々の噴火による噴煙を除けば10月、11月と徐々に低下している(Fig. 4).

以上のことから、浅間山の噴煙高度は、2004年2月に低いレベルであったが、3月および5月下旬に若干高まり、7月下旬に急激に増大し9月1日の噴火に至ったと言える。また、9月1日の噴火後は、噴煙高度は低下していたが、9月12日以降再び増大し、9月16日から18日にかけて、活動のクライマックスを迎えた。その後、噴煙高度は、間歇的爆発の際に一時的に高くなるが、平均としては2004年11月末までの段階では徐々に低下している。

4. 噴煙活動の短周期時間変動

火山活動が変化していくにつれて噴煙活動の短周期変動がどのように推移するかを検討するには、2004年9月16日未明に始まりしだいに活発になっていった連続微噴活動の映像が最も好ましい。9月15日から16日にかけての噴煙の最高高度の変化をFig. 6に示す。一部、9月15日の後半から深夜にかけて雲にさえぎられたため有意な映像が得られていないが、15日から16日0時すぎまで時々小規模な噴火が発生し、噴煙高度も高くなっている。16日1時頃から小規模な噴火が頻繁に発生するようになり、4時頃からはほとんど連続的に噴火が発生するようになった。こうした状況に対応するように噴煙の高度もしだいに高くなり、11時以降は映像の上では飽

和して計測ができない状態になった。本論文では、天候の状態がよくなって明瞭な映像が収録されるようになった16日0時57分から8時までの映像について、解析・検討を行った。以下に、本論文で行った解析の手順とその結果を示す。

4-1 時系列データの抽出

得られた赤外映像の一例として、Fig. 7に、2004年9月16日5時55分35秒、40秒、45秒に収録された映像を示す。図のbの火口直上には噴出したばかりの噴煙が見え、その左(南東側)には、少し前に噴出した噴煙が風に流されているのが確認できる。この噴煙の変動を定量的に議論するのに、第3章で使用した噴煙の最高高度を計測する事は適当でない。その理由は、最高高度を計測した場合、ある瞬間に噴出した大きな噴煙が最高高度として計測される事になり、実際の短周期の変動はすべてカットされてしまうからである。そのため、本章では以下に示す方法で定量化をはかる。

Fig. 7に示す噴煙の流れを縦に切るように鉛直線分1と、この線分のごく近傍で噴煙の風上にあたる線分2における温度プロファイルを図8にそれぞれ示す。図の右側が、両線分の上方向に対応している。線分2の温度は、噴煙のない空の部分の温度を示しており、下から上に向かうにつれて -13°C から -15°C 程度に若干低下する傾向が見られる。しかし、a, b, cの3枚の図を比較すると、ほぼ同じ温度傾向を示し、時間的には安定している。一方、線分1の温度プロファイルは、上方では線分2とほぼ同じ空の温度を示し、下方の噴煙の部分では、

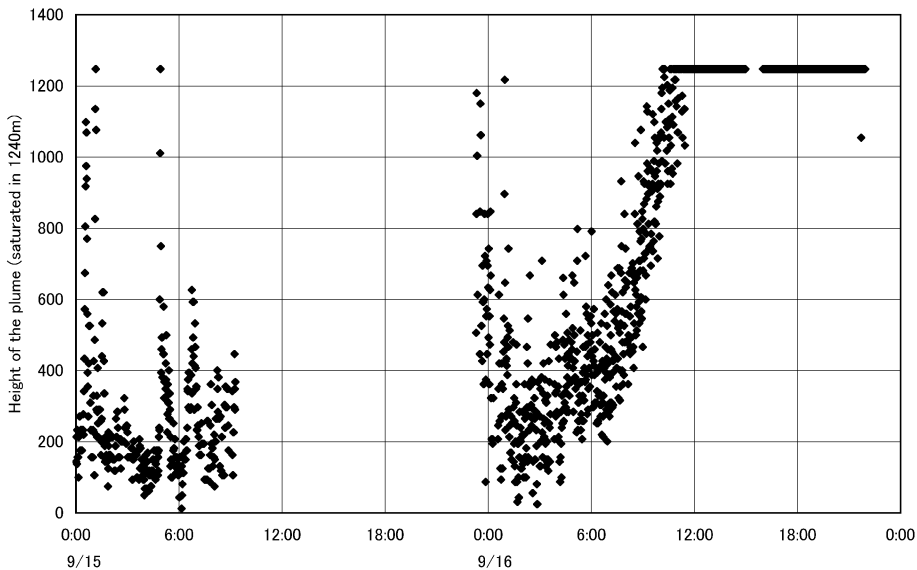


Fig. 6. Variation of the plume height from September 15 to 16, 2004.

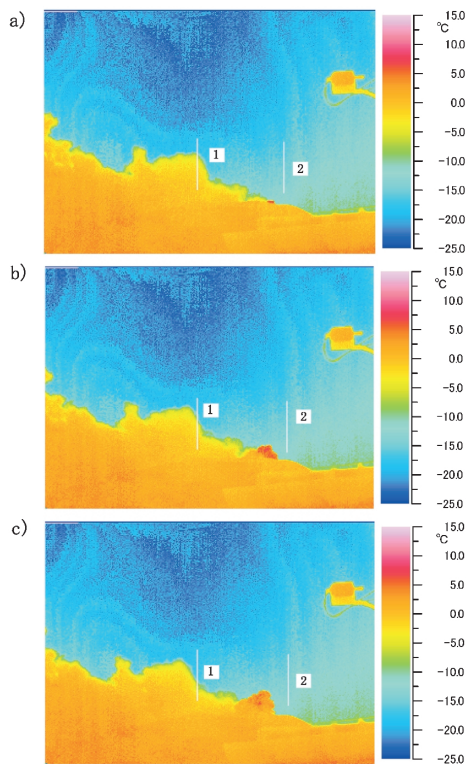


Fig. 7. Infrared imagery of volcanic plume in Asama Volcano on September 16, 2004. a: 05 : 55 : 35, b: 05 : 55 : 40, c: 05 : 55 : 45.

空の温度よりも 10°C 程度高い温度を示している。線分 1 と線分 2 の空の温度は、完全には一致せず 2°C 程度の系統的差が見られる。これは、映像の中心部よりも周縁部のほうが若干高め温度を表示する映像装置固有の問題に起因する系統的な差であり、カメラを固定して相対的な差を議論する本論文には影響しない。両線分の温度の差に注目すると、噴煙と空の境界が明瞭に認識される。図の a, b, c を比較すると、線分 1 を噴煙が通過していくにしたがって、空と噴煙の境界がしだいに下方にシフトしていることがわかる。他の多くの映像を解析した結果、噴煙が火口から放出されるたびにこの境界の位置が上下に変動していることがわかった。一方、噴煙の部分の最高温度は、あまり変化していない。噴出直後の噴煙の温度が、まれに空の温度よりも 20°C 程度高くなるのを除いて、多くの場合は、空の部分の温度に比べて相対的に 10°C 前後高い温度を示すことがわかった。この理由は、第 1 に、火口から噴出した直後の噴煙内部の温度は数 100°C の高温であるが、周囲の空気を取り込んで急速に低下するため、噴煙の表面付近の温度は周囲の気温よりもわずかに高い程度となっていること、第 2 に、赤

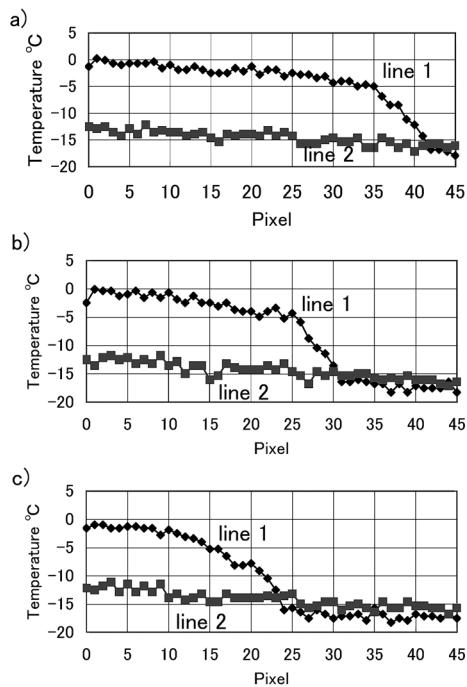


Fig. 8. Temperature profiles on the vertical line segments in Fig. 7.

外映像カメラから噴煙までの距離が 5,000 m 程度あるため、噴煙からの赤外放射は途中の大気によって減衰していることがあげられる。以上の結果を見ると、浅間山から噴出される噴煙活動の短周期変動を捉えるには、線分 1 における最高温度に注目するよりは、線分 1 における噴煙と空の境界の位置に注目するほうが適していると思われる。実際の解析では、大量のデータを扱う必要があり、境界の位置を自動的に正確に決定することは容易ではないので、本論文では、線分 1 における平均温度と線分 2 における平均温度との差を求めることとする。噴煙の部分の温度はほとんど変化していないので、ここで計算される値は、実質的には線分 1 における噴煙の大きさを示すことになる。また、後述するように、線分 1 を通過する風速があまり変わらない条件下では、この値は、線分 1 を通過する噴煙の流量を代表することになる。

9 月 16 日未明の浅間山の噴煙は、Fig. 7 に示した映像のように、南東側（画面の左側）に流れていた。噴煙が 20 秒間に映像上を移動する距離を読み取った結果、解析を行う時間帯においては、風速はほぼ一定であった。また、吉本・他 (2004) によれば、この期間中の噴出物は浅間山の南東側に集中しており、風向の変化はほとんどなかったと考えられる。Fig. 7 に示す鉛直線分 1 および線分 2 の下端は山頂のわずかに上、上端は、解析する時間

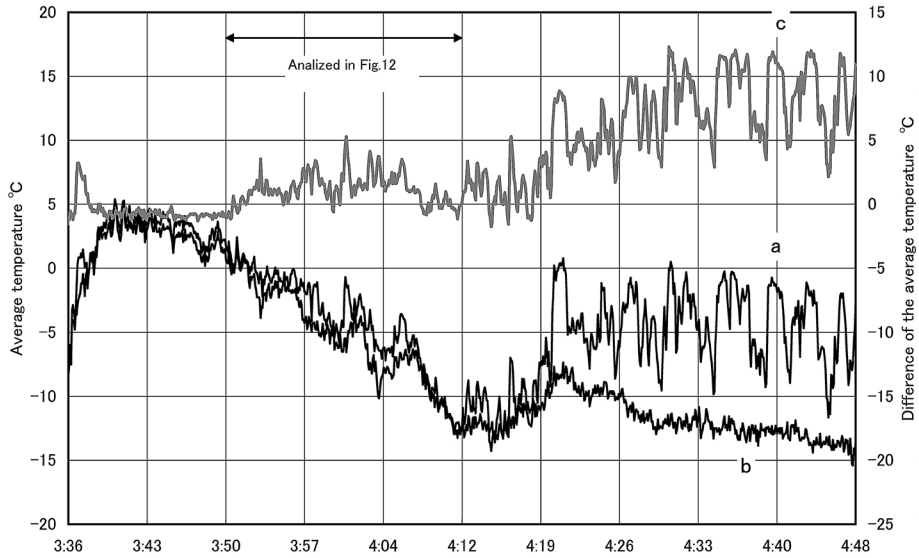


Fig. 9. Variation of the average temperature on the vertical line segments indicated in Fig. 7 from 03 : 36 to 04 : 48 on September 16; a: the average temperature on the line 1, b: average temperature of the line 2, and c: difference of the average temperature between lines 1 and 2.

帯の全てにわたって、噴煙よりも十分高くなるように設定し、それぞれの線分上の平均温度およびその差を全ての画像について算出した。一例として、Fig. 9に午前3時36分から4時48分までの平均温度の変化を示す。図のaおよびbは、線分1および線分2の平均温度の変化を示す。3時36分から4時12分頃までは、うす雲が山頂付近を通過したために、雲から放射される赤外線が加わることで、線分2の平均温度は上昇している。線分1の平均温度も4時12分頃まで同様の変化を示すが、それ以降は、線分2の温度よりも高く、かつ、短周期の変動が個々の噴火に対応して見られるようになっていく。これは、雲が過ぎ去ったことによって、線分1において本来の噴煙の温度が観測されるようになったことを示している。線分1の平均温度から線分2の温度を差し引くと、こうした影響を取り除くことが可能である。Fig. 9のcは、このように補正した温度の変化を示している。補正した温度値を見ると、雲が通過したことによる3時36分から4時12分頃までの緩やかな温度変化は消えている。しかし、噴煙の噴出による短周期の温度変化は、4時19分以降に比べると小さく、特に3時39分から3時50分にかけては、ほとんど変化が見られない。これは、噴煙が雲によって隠されていたために本来の変動が捉えられていないためである。4時12分以降に雲が通過すると、噴煙の噴出による温度変化が捉えられている。同じく、例として4時48分から6時までと6時から7

時12分までの結果をFig. 10およびFig. 11に示す。両図とも個々の噴火に対応した温度の変動が現れているが、Fig. 10に比べFig. 11の時間帯の方が短周期成分が強くなっていることがうかがえる。これは、噴火の発生頻度が実際に高くなったことに対応している。なお、Fig. 11のbにおいて顕著であるが、時々温度が不連続に変化している箇所がある。これは本研究で使用した赤外映像装置固有の問題として、装置内の温度が変動すると、数分おきにキャリブレーションが入り、そのたびに温度値が不連続に変化することによる。このキャリブレーションによって、温度の絶対値は不連続に変化しているが、aおよびbの相対的な温度差はあまり変化していない。したがって、両者の差をとる補正を行なったcの温度では、その影響がほとんど見えなくなっている。

4-2 噴煙の短周期時間変動

以上の操作によって時系列データを得た後に、256個の時系列データ(1,280秒、およそ21分間)からFFTによりパワースペクトルを計算した。一例として、3時50分から4時11分までの温度の時系列データから計算したスペクトルをFig. 12に示す。この時間帯は、Fig. 9の矢印で示すように、山頂付近を雲が通過しているために本来の温度変化が小さくなっている部分に相当しており、パワーの大きいスペクトルは検出されない。一方、Fig. 13は、5時5分から5時26分までの温度変化に対してスペクトルを計算した結果である。この時間帯は、

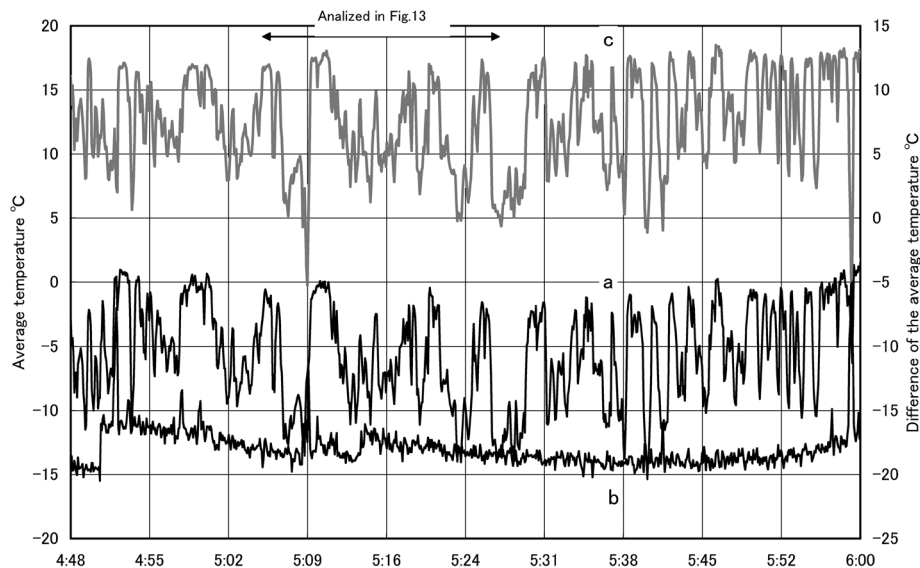


Fig. 10. Variation of the average temperature on the vertical line segments from 04 : 48 to 06 : 00 on September 16. Lines a, b and c indicate the same meanings as Fig. 9.

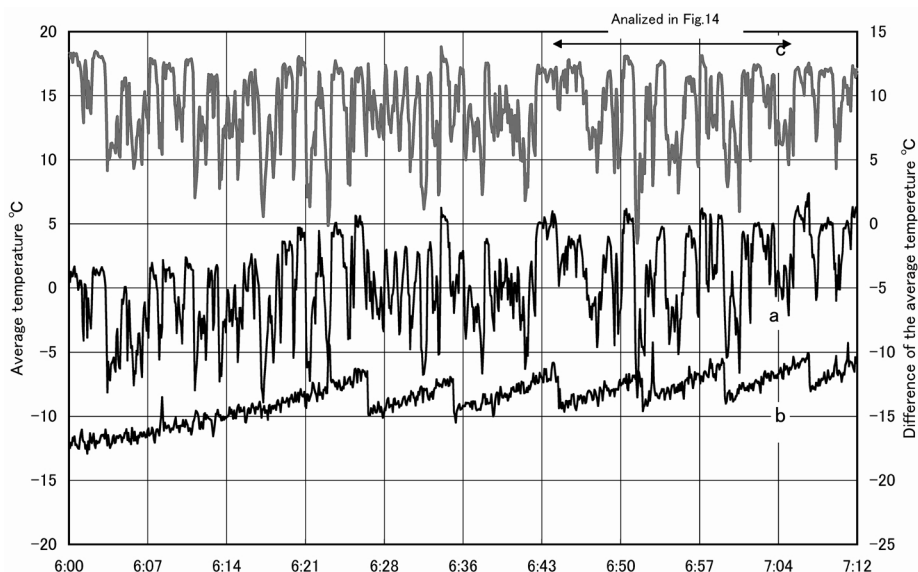


Fig. 11. Variation of the average temperature on the vertical line segments from 06 : 00 to 07 : 12 on September 16. Lines a, b and c indicate the same meanings as Fig. 9.

Fig. 10 の矢印で示すように、線分2の温度の変動が小さいことから雲などの影響がほとんどないことがわかる。補正した温度は、噴煙の噴出による温度変化を精度良く捉えていると思われる。0.0025 Hz (400 秒) とその整数倍の振動数のピークが見えている。以上の2つの例のように、線分2の温度変化を見ることで、雲などの影

響がどの程度であるかをチェックすることが可能である。Fig. 14 は、Fig. 11 の矢印で示す6時45分から7時6分までの温度の時間変動に対するスペクトルである。この時間帯の温度の変動は、Fig. 13 より短周期側の0.0032 Hz (310 秒) とその整数倍の振動数にスペクトルのピークが見られる。

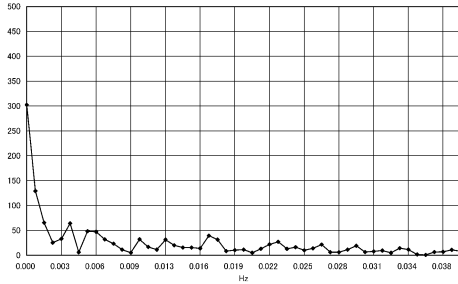


Fig. 12. Power spectrum of the temperature variation from 3 : 50 to 04 : 12. No significant power is found.

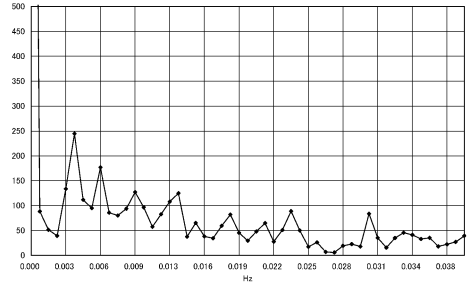


Fig. 14. Power spectrum of the temperature variation from 06 : 45 to 07 : 06. Significant powers are identified at 0.0032 Hz (310 s) and its multiples.

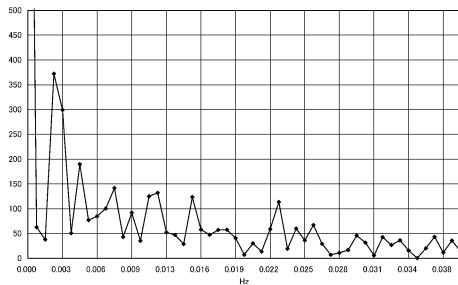


Fig. 13. Power spectrum of the temperature variation from 05 : 05 to 05 : 26. Significant powers are identified at 0.0025 Hz (400 s) and its multiples.

同様の解析を解析区間幅のおよそ半分にあたる 12 分 30 秒間隔で繰り返し行った結果が、Fig. 15 である。午前 4 時ころまでは、周期 400 秒あるいはそれ以上の長周期に定期的にピークが見えているが、それ以降短周期成分が顕著になっている。また、スペクトルの移動を追跡すると、午前 4 時ころに周期 400 秒程度であったスペクトルのピークは、午前 7 時頃に、周期 310 秒程度に、周期 200 秒程度のピークは、周期 150 秒程度に、周期 130 秒程度のピークは周期 100 秒程度に、それぞれ短周期側に移動していることがわかる。なお、午前 8 時以降の噴煙は、Fig. 7 に示す線分 1 を風に流されて横切るよりも鉛直方向に上昇する傾向が強くなっており、同一の線分で解析する事が困難となったため、本論文では議論しない。

5. 考察および今後の課題

上記の解析結果に基づいて、以下に噴煙活動の長期的な変化と短周期変動について考察する。

5-1 噴煙高度の長期的変化から見た 2004 年噴火

噴煙高度の長期的な変化の特徴として、噴火活動期に入る前に明瞭な前兆、すなわち噴火の準備段階があったことが挙げられる。噴煙高度は、3 月および 5 月下旬に段階的に増大し、7 月下旬からは急速に増大した。これに対して、村上 (2004) は、GPS による地殻変動観測から、2004 年 4 月頃から浅間山西方の海拔下 2 km ないし 3 km の深さにおいてマグマの供給と思われるわずかな膨張が認められるようになったこと、7 月下旬にマグマがより浅い部分へ移動したと見られる急激な距離の伸びを検知したこと、9 月 1 日の噴火前後には明瞭なマグマ供給を示唆する地殻変動は見られなかったことなどを明らかにしている。この結果は、噴煙高度の変化と共通する特徴を持っている。3 月からの噴煙のわずかな増加は、深部でのマグマの供給によって火山ガス放出のレベルが少し上がったことを反映し、7 月下旬の噴煙の急激な増大は、マグマの浅部への貫入によって火山ガスないし水蒸気が大量に噴出したものと考えられる。

一方、地震活動は、浅間火山観測所が観測した地震発生頻度 (Fig. 16) と比較すると、以下のような特徴が見られる。図の a に示す浅間山の浅部で発生した地震数を見ると、噴火の数ヶ月前からすでに地震数が増加していくといった明瞭な異常は見られない。噴火直前の 8 月 31 日から 9 月 1 日にかけて地震の増加が認められるが、このような地震の多発は過去にも起きながら噴火に至らなかった例は多い。これに対して、図の b に示す深部で発生する A 型地震の頻度は、3 月および 5 月下旬頃に増加を示す一方、7 月下旬にはそれほど増加していない。A 型地震は、浅間山の火口下から西側にかけての海拔下 1 km 付近で発生しており、GPS によって検知されているダイク状の膨張源の直上にあたる事からマグマの供給に関連して発生していると考えられている (青木・他, 2005) ので、3 月から 5 月にかけて A 型地震の多発を伴

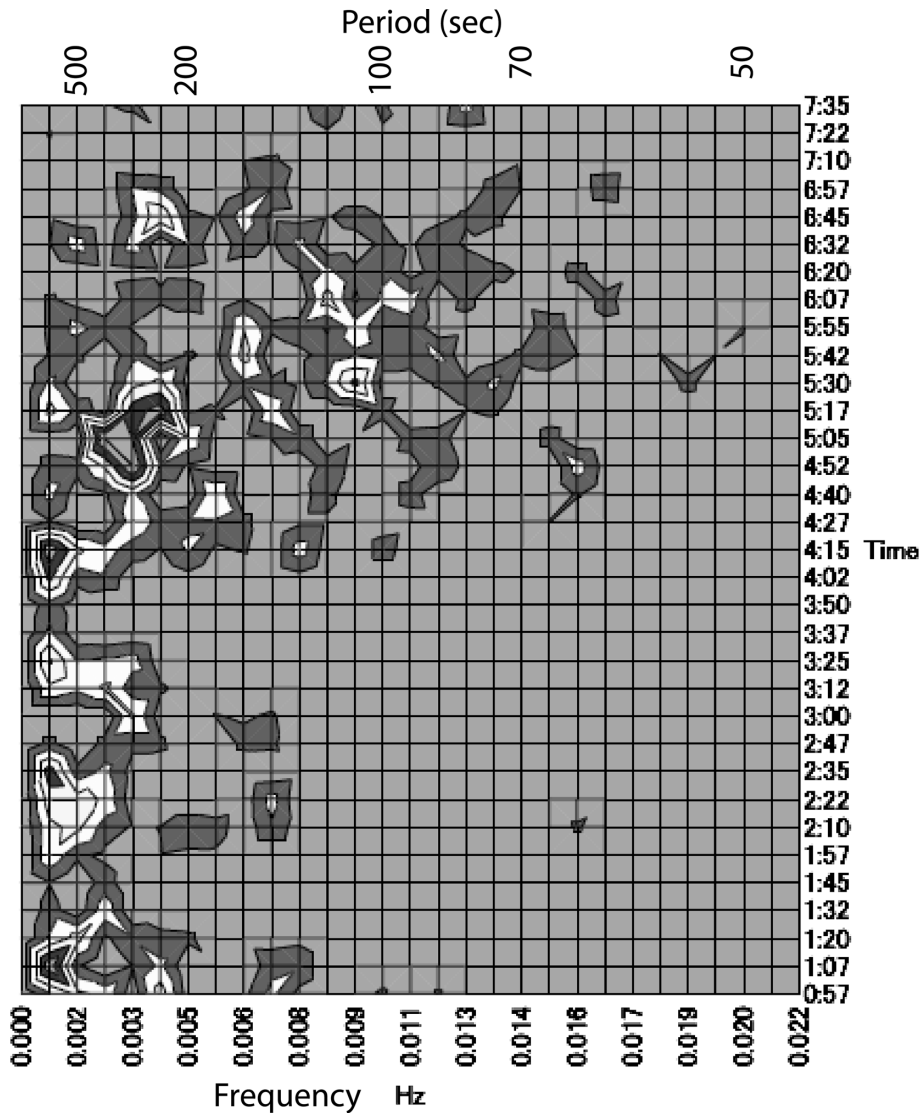


Fig. 15. Change of power spectrum during the evolution stage of the successive minor eruptions from 00 : 57 to 07 : 35 on September 16, 2004.

う深部でのマグマの供給があり、7月下旬にはより浅部へのマグマの貫入があったという考えを支持している。

以上のように、噴煙活動は、地殻変動や深部の地震活動と関連して変動している可能性が高いことがわかった。それに対して、浅部の地震活動とは、あまり明瞭な関係は見出せない。しかし、この結果は、浅部の地震活動の方が、他の現象とよい相関を示していないと考える。これについては、後で若干の考えを述べる。

9月1日の噴火発生前後の噴煙高度は低い状態であったが、およそ10日後に再び増大して次の噴火活動につながった。このことは、9月1日の噴火で噴出可能なガ

ス成分を消費してしまったためのように思える。9月12日からの噴煙高度の増大に続いて、9月14日には噴火が3回発生し(気象庁, 2004b), 9月16日からの連続微噴活動につながっている。仮に9月1日の噴火を第1波、9月14日から19日までの一連の噴火を第2波と考えると、以下のような考察が可能である。すなわち、7月下旬の噴煙高度の増大から第1波に至るまで40日程度を要したのに対して、第2波は、噴煙高度の増大から噴火まで2日程度しかかけていない。また、第1波では、新鮮なマグマに由来した噴出物は噴出しているが、大部分は石質岩片であり(吉本・他, 2004), 噴火直後には火口底

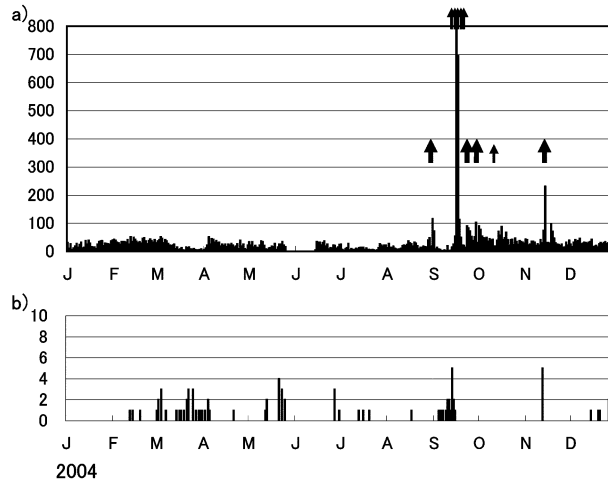


Fig. 16. Daily frequency of the earthquakes in Asama Volcano. a: Number of earthquakes except the A-type, b: number of the A type earthquakes. Large arrows indicate middle size explosions, small arrows indicate minor eruptions.

には孔があいていて、マグマはせり上がってきていないことが確認されている(気象庁, 2004a)。それに対して、第2波では、9月14日、15日の噴出物は主に石質岩片であったが、9月16日以降の噴出物は新鮮なマグマに由来する噴出物が飛躍的に増加したこと(吉本・他, 2004)、9月16日の11時頃には火口底にマグマのせり上がりによる溶岩ケーキが出現したこと(大木・他, 2005)、発泡した透明な火山灰粒子の存在比がしだいに高くなっていったこと(嶋野・他, 2004)が明らかになっている。このことは、第1波では、マグマ本体の上昇に先立って大部分の火山ガスが脱ガスしたのに対して、第2波では両者が共に上昇したことを示しているように思われる。

次に第1波と第2波の地震活動を比較すると、Fig. 16に示すように、第2波の噴火に先立ち、9月初旬にA型地震が多発し、9月13日ころから浅部の地震活動がやや活発になって一連の噴火活動につながっている。1973年以前の浅間山の噴火活動では、噴火前にA型地震を含む地震数が急増し、噴煙活動も活発化するという明瞭な関係が見られている(Minakami *et al.*, 1970; 下鶴・他, 1975)。第2波に先立つ地震活動は、それらに比べると地震の発生数は少ないが、同じ傾向である。それに対して、第1波の場合は、A型地震の多発、浅部の地震数の増加、噴煙活動の活発化がそろって起きてはいない。この傾向は、1982年および1983年の噴火(鍵山・他, 1985)と共通する特徴である。たとえば、1982年の噴火の場合、1982年1月に浅部の地震数の増加と噴煙高度の急増が見られたが、噴火はそれから3ヵ月後の4月に発生して

いる。噴出物も、新鮮なマグマに由来するものはなかった。

こうした推移の違いは、以下のように考える事が可能である。第2波の場合、マグマはあまり脱ガスせずに上昇したので、マグマが周辺の媒質に対して持つ浮力が十分にはたらく、マグマの上昇が早くなった。その結果、噴火は、マグマ上昇に伴って発生した地震活動からあまり遅れることなく発生したので、地震活動と噴火の関係が明瞭に見えることになった。それに対して、第1波では、マグマの上昇に先立って多くの火山ガスが分離して上昇したために、マグマの上昇が遅くなり、浅部の地震発生数の増加や噴煙の増大と噴火との対応を不明瞭にした。なぜこのようなことが起きたか、現段階では明らかではないが、マグマの上昇と脱ガスの関係を明らかにすることにより、浅間山の噴火の特質を明らかにできると期待される。今回の2004年噴火では、噴煙高度や地殻変動の変化に対応して揮発性成分の放出量がどのように変化したかを検討する上で重要な2004年2月から8月にかけての二酸化イオウの放出量の変化が測定されなかった。また、水蒸気や熱の放出量を推定するためのデータも取得できなかった。そのため、本論文では定性的な議論となったが、上記のデータが得られれば、よりの確な議論が可能になると思われる。

なお、2004年9月1日の噴火前である8月末に噴煙高度が低下している。8月下旬は天候が不順で、特に噴火前の8月31日には台風が通過しているため、噴煙高度の低下がいつ起きたかは明らかではない。しかし、山

本・他 (2005) は、噴火の数ヶ月前に特異な波形を持つ地震が山頂近傍で発生していたが、8月下旬に発生しなくなったことを報告し、その理由として特異な振動を発生させる流体がしだいに失われた可能性を指摘している。噴出可能な揮発性成分が8月下旬にほとんど失われていたとすれば、噴煙高度の低下と特異な波形の地震の消滅を説明することが可能である。

5-2 噴煙の短周期時間変動

噴煙活動の短周期変動については、9月16日未明の映像を解析した結果、有珠山と同じように、ある周期を持って噴煙が噴出していることが明らかとなった。特に、Fig. 15 に示すように、午前4時頃まで周期400秒程度で噴煙が出ていたが、それ以降、短周期側にシフトし、午前7時ころには周期310秒程度にまで変化したことが初めて明らかになった。解析を行った9月16日の0時57分から8時の時間帯は、Fig. 6 に示すように、噴煙の高さがしだいに高くなっていく時期にあたる。噴煙高度の増大は、一般的には、熱エネルギー放出率、あるいは揮発性成分の放出率が高くなったと解釈できる。噴煙活動のスペクトルが短周期側にシフトした事は、噴火の間隔が短くなっていったことに対応する。このことは、気象庁 (2004a) による噴火回数のデータでも、9月16日の午前4時までの噴火回数は35回であったのがそれ以降は連続的になったことが報告されている。こうした変化がおきた理由を本論文で明らかにすることはできないが、以下に1つの考えを示す。

火道内でマグマが小規模な噴火を繰り返している状態を考える。マグマの頭位よりも下には液体中に泡を含むマグマが存在し、それよりも上部には、火山ガス中にマグマの液滴や粉碎された火山灰などが浮遊する領域がある。さらに、火口底から上では、大気中に噴煙が放出されているが、自由に膨張することが許されるので、火山ガスや空気に含まれるマグマの液滴や火山灰などの量比は、火道内よりも小さくなっていると考えられる。火山ガス中に火山灰や液滴が含まれる流体中の音波速度は、明らかにされていないが、水と水蒸気による気液2相の流体の音波速度はボイド率が5%から95%の広い範囲にわたって20ないし30 m/s程度であるとされている (日本機械学会, 1987)。したがって、火道内のマグマ頭位より上方の部分の音速は、火道内のマグマ頭位よりも下部の領域や火口底よりも上にある噴煙中に比べて極端に低速になっていることが期待される。こうした状態で、マグマ頭位の部分で小規模な爆発が発生すると、爆発による圧力変化の擾乱は様々な周波数成分を含んでいるが、火道内のマグマ頭位よりも上の部分の流体の共鳴によって特定の周期の圧力変動だけが残ることになる。

その圧力変動に同期して次の噴火がトリガーされると、噴火はある周期性を持って繰り返すことになる。

この考え方は、定性的には起こりうるように思われるが、定量的には課題を残している。観測されている共鳴周期を説明できる流体の長さは、流体中の音速を20 m/s とすれば、周期400秒の場合に4,000 m、周期310秒の場合、3,100 m程度となる。したがって、上記の仮説が正しいとすれば、9月16日午前4時頃に4,000 mの深さにあったマグマの頭位が午前7時頃に3,100 mの深さに移動したことになる。この時期にマグマの頭位がどこにあったかは明らかではないが、この時間帯に上昇したと考えると好都合の事実がいくつかある。9月16日の11時頃に観測された合成開口レーダーによる映像に、それまでは確認されていなかった溶岩ケーキが確認されている。本論文の解析や気象庁の観測では、4時以降に噴火の間隔が短くなって急増しており、嶋野・他 (2004) の火山灰の発泡度の観察結果などを合わせて考えると、16日朝にマグマが火口底にせり上がってきた可能性が高い。このように、マグマの頭位の上昇を示唆する事実があり、噴煙の周期が短周期側にシフトしたことをマグマ頭位の変化と関連付ける上記の考えは定性的には支持される。しかし、浅間山で観測される地震の震源の深さは2,500 m程度であり、マグマの頭位がそれより深いとは考えにくい。仮に、音波速度が10 m/s程度であれば、上記の推定は、9月16日午前4時頃に2,000 mの深さにあったマグマの頭位が午前7時頃に1,500 mの深さに移動したことになり、地震の発生深度などと比較的良好なことになる。現段階では、音波速度が実験で測定されていないので、これ以上の議論は困難である。

本論文では、これまで感覚的に捉えられてきた噴煙の勢いを定量化することを試み、スペクトルの違いとして定量化する事に成功した。しかし、その物理的な意味づけの大部分は定性的である。エネルギーや物質の噴出率などの定量的見積もりをあわせて行うこと、今回は解析を行っていない噴火活動の縮退期や静穏期における噴煙活動を検討することで、より定量的な議論が深まると考えている。

6. ま と め

浅間山の2004年噴火に関連して、2004年1月から11月に東大浅間火山観測所で収録した赤外映像を解析し、噴煙高度の時間的変化を検討した。その結果、2004年3月および5月末に噴煙高度がわずかに増大し、ついで7月25日以降に噴煙高度が急激に増大するなど9月1日の噴火に至る、噴煙高度の長期的変動が明らかとなった。9月1日の噴火前後には、いったん噴煙高度は低下

していたが、9月12日から再び増大し、14日から18日にかけて連続微噴活動を含む噴火活動を行った。こうした噴煙高度の長期的な変化と、深部の地震活動やGPS観測結果との比較から、浅間山西方深部におけるマグマの供給と浅部への移動が火山ガス噴出率に影響を与えたと考えられる。また、9月1日の噴火と9月16日前後の連続微噴活動とを比較すると、後者が、火山ガス成分を伴ったまま噴火に至っているのに対して、前者は、火山ガス成分を失った状態で噴火しているように思われる。

一方短期的な変化に関連しては、9月16日未明の映像を解析し、以下の事が明らかとなった。連続微噴の初期段階であった4時ころまでは、周期400秒程度の基本周期を持つスペクトルが見られたが、時間とともに短周期側に移動し、午前7時頃には周期310秒程度になった。こうした変化がおきた理由として、たとえば、火道内をマグマが上昇することによって、マグマの頭頂と火口底間の気液2相の流体の長さが短くなり、共鳴周期が短周期側にシフトすることによって、噴火間隔が短周期側にシフトしたと考えることが可能かもしれない。本論文には、なお多くの解決すべき課題が残されているが、噴煙活動の変動特性を映像解析によって数値化することに成功し、変動特性がマグマの上昇過程や噴火活動の消長と密接に関連している可能性を指摘した。

謝 辞

本研究を実施するにあたり、京都大学理学研究科の田中良和教授には多大な支援をいただいた。理学研究科研究支援推進員藤岡寿美氏には150万枚を超える赤外映像の読み取り作業を著者とともに行っていただいた。当研究科の関係各位にお礼申し上げる。また、京都大学防災研究所井口正人助教授には、噴煙データの解析において、励ましや議論をいただいた。本研究の遂行には、東京大学地震研究所中田節也教授をはじめ、火山噴火予知研究推進センターの方々から支援を受けた。本研究は、文部科学省平成15・16年度科学研究費補助金、特定領域研究「火山爆発」の公募研究「赤外・可視映像解析による噴煙の時間変動と噴火発生場の応答時間に関する研究」(研究代表者: 鍵山恒臣, 課題番号15038204)の研究成果である。また、研究の一部に、平成16年度科学研究費補助金、特別研究促進費「2004年浅間火山の噴火に関する総合的調査」(研究代表者: 中田節也, 課題番号16800002)を使用した。関係各位に謝意を表したい。本論文の執筆にあたり、東北大学東北アジア研究センターの後藤章夫博士、北海道大学理学研究科の寺田彦彦博士、匿名査読者に多くの有益な助言を受けた。あわせて謝意を表したい。

引用文献

- 青木陽介・渡辺秀文・小山悦郎・及川 純・森田裕一 (2005) 2004-2005年浅間山火山活動に伴う地殻変動。火山, 50, 575-584.
- 井口正人・鍵山恒臣 (2002) 口永良部島における空中赤外熱測定。薩摩硫黄島火山・口永良部島火山の集中総合観測, 137-142.
- Kagiya, T. (1981) Evaluation methods of heat discharge and their applications to the major active volcanoes in Japan. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 9, 87-97.
- 鍵山恒臣・行田紀也・小山悦郎・辻 浩 (1985) 浅間火山小規模噴火の地学的背景と前駆的現象。科学研究費報告自然災害特別研究(1) 59020001「火山体の物理的場の比較研究による噴火災害予測」, 92-101.
- 鍵山恒臣・金子隆之・宗包浩志・平林順一 (2000) 赤外映像により観測される有珠火山噴煙の短周期変動。日本火山学会講演予稿集, 35.
- 鍵山恒臣・松山洋平・金子隆之・平林順一 (2003) 赤外映像によって捉えられた有珠火山噴煙の短周期変動。地球惑星科学関連学会2003年合同大会予稿集(CD-ROM), V055-007.
- 気象庁 (2004a) 浅間山2004年噴火の概要。地震・火山月報(防災編)平成16年9月, 33-39.
- 気象庁 (2004b) 日本の主な火山活動。地震・火山月報(防災編)平成16年9月, 23-31.
- 気象庁 (2004c) 日本の主な火山活動。地震・火山月報(防災編)平成16年10月, 27-39.
- 気象庁 (2004d) 日本の主な火山活動。地震・火山月報(防災編)平成16年11月, 38-44.
- 気象庁 (2005) 2004年の日本の主な火山活動。地震・火山月報(防災編)平成16年12月, 94-113.
- Minakami, T., Utibori, S., Hiraga, S., Miyazaki, T., Gyoda, N. and Utunomiya, T. (1970) Seismometrical studies of Volcano Asama, Part 1. *Bull. Earthq. Res. Inst.*, 48, 235-301.
- 村上 亮 (2004) GPSが捉えた浅間火山2004年9月噴火前のマグマ移動。日本火山学会2004年秋季大会講演予稿集, 204.
- 日本機械学会 (1987) 機械工学便覧A5編流体工学, 120 p.
- 大木章一・村上 亮・渡辺信之・浦部ぼくろう・宮脇正典 (2005) 航空機搭載型合成開口レーダー(SAR)観測による浅間火山2004年噴火に伴う火口内の地形変化。火山, 50, 401-410.
- 嶋野岳人・飯田晃子・吉本充宏・安田 敦・中田節也 (2004) 浅間火山2004年噴火噴出物の岩石学的検討。日本火山学会2004年秋季大会講演予稿集, 186.
- Shimozuru, D. and Kagiya, T. (1978) A newly devised infra-red ground scanner and its application to geothermal research in volcanoes. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 4, 251-264.
- 下鶴大輔・内堀貞雄・行田紀也・小山悦郎・宮崎 務・松本時子・長田 昇・寺尾弘子 (1975) 1973年の浅間山噴火活動について。震研彙報, 50, 115-151.
- 下鶴大輔・鍵山恒臣・沢田宗久・長田 昇・内野 誠・

- 内山隆文 (1980) 噴火機巧. 第 3 回桜島火山の総合調査報告, 112-119.
- 渡辺秀文 (1998) 伊豆大島火山 1986 年噴火の前兆過程とマグマ供給システム. 火山, **43**, 271-282.
- 山本眞紀・武尾 実・大湊隆雄・及川 純・青木陽介・植田寛子・中村 祥・辻 浩・小山悦郎・長田 昇・ト部 卓 (2005) 2004 年浅間山噴火に先行する特異な長周期地震活動. 火山, **50**, 393-400.
- 吉本充宏・他 18 名 (2004) 浅間山 2004 年噴火の噴出物について. 日本火山学会 2004 年秋季大会講演予稿集, 185.
- (編集担当 後藤章夫)