

2004年浅間山で発生した爆発地震の  
シングルフォースモデルによる解析

西村太志\*・内田 東\*

(2005年3月30日受付, 2005年8月17日受理)

Application of Single Force Model to the Volcanic Explosion  
Earthquakes Observed at Asama Volcano in 2004

Takeshi NISHIMURA\* and Higashi UCHIDA\*

We analyze five explosion earthquakes observed at Asama volcano in 2004. The main phase consisting of Rayleigh wave is well explained by a vertical downward single force with peak amplitude of  $10^{10}$ – $10^{11}$  N and pulse width of 5–6 s. These source parameters are in the range expected from a scaling relation presented by Nishimura and Hamaguchi (1993), which suggests that the 2004 explosions of Asama volcano are typical Vulcanian eruptions. The internal pressure built up beneath the crater is estimated to be 0.2–1.5 MPa, which tends to become large after the formation of lava dome in the crater.

**Key words:** explosion earthquake, single force, Asama

## 1. はじめに

爆発地震はブルカノ式の爆発的噴火時にしばしば観測される地震で、鉛直下向きのシングルフォースを発震機構 (Kanamori *et al.*, 1984) とすることで観測波形の主要動をうまく説明できることが報告されている (Kanamori and Given, 1983; Nishimura and Hamaguchi, 1993). Nishimura and Hamaguchi (1993) は、火口から噴出する火山性流体を完全気体の等エントロピー流で近似し、爆発地震を励起したシングルフォースの大きさと継続時間を、噴出孔半径、噴出速度、火口浅部に蓄えられる圧力の関数で表した。そして、このモデルを1988–1989年の十勝岳や1980年のセントヘレンズ火山、1983年の浅間山の噴火活動に伴って発生した爆発地震に適用し、力の大きさは継続時間の2乗に比例すること、火口直下に蓄えられる圧力は1 MPa程度であること、規模は噴出孔半径に強く依存することを示した。さらに、Nishimura (1998) は、世界各地で記録された爆発地震の地震マグニチュードと噴出孔半径を調べ、このような相似性が多く

の火山の爆発地震で認められることを報告している。

浅間山の2004年の噴火活動では、9月1日、23日、29日、10月10日、11月14日の中規模から小規模の爆発に伴い、爆発地震が観測されている。この一連の活動では、強い空気振動を伴った爆発(9月1日)や山麓で有感となった地震動を励起した爆発(9月23日)など、特徴が異なる爆発的噴火が発生したことが報告されている(気象庁地震火山部, 2005)。そこで、本研究は、これら5つの爆発地震を解析し、それらの発生機構の巨視的な特徴を明らかにするとともに、他火山の爆発地震や1983年の浅間山の爆発地震(武尾・他1984)との違いに着目して議論する。

## 2. 観測波形の特徴

長野県松代町の気象庁精密地震観測点(MAJO)は、2004年の活動だけでなく1983年の爆発地震も記録しているので、本研究ではこの観測点のデータを解析する。MAJOは、現在STS-1型(ストレックイゼン社製)の広

\* 〒980-8578 仙台市青葉区荒巻字青葉6-3  
東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻  
Department of Geophysics, Graduate School of Science, Tohoku University, 6-3 Aramaki-aza Aoba,

Aoba-ku, Sendai 980-8578, Japan.

Corresponding author: Takeshi Nishimura  
e-mail: nishi@zisin.geophys.tohoku.ac.jp

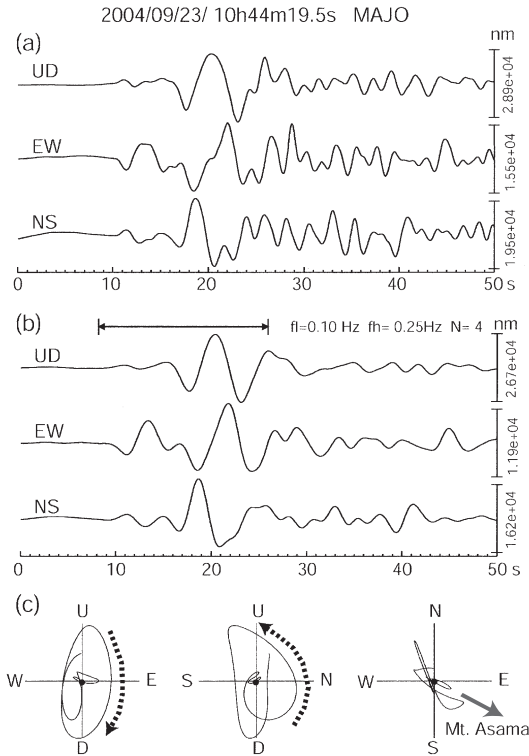


Fig. 1. Seismograms of volcanic explosion earthquakes on September 23, 2004. (a) Displacement seismograms (no instrumental correction). (b) Band-pass filtered (0.1–0.25 Hz) seismograms. (c) Particle orbits of the main phase that is indicated by a horizontal arrow on top of the waveforms in (b). Note that the main phase shows a retrograde motion as indicated by arrows with broken line on vertical cross sections (left and middle panels). Gray arrow on the NS-EW plane (right panel) indicates a direction to Mount Asama.

帯域地震計による観測を行い、IRISの観測点としても登録されている。9月23日の爆発地震の波形記録をFig. 1に示す。STS-1型地震計の速度信号を数値的に1回積分し、変位記録として示した。ただし、地震計の応答関数の補正は行っていない。観測波形にP波やS波はあまり明瞭に認められないが、シンプルな波形形状をもつ主要動はRetrogradeの動きを示しレーリー波であることがわかる(Fig. 1 (b), (c))。この特徴は、他の火山で報告されている爆発地震とほぼ同じである。この5秒程度の周期が卓越するレーリー波のあとにはやや短周期の地震動が続くが、本研究はこの後続波については特に議論しない。

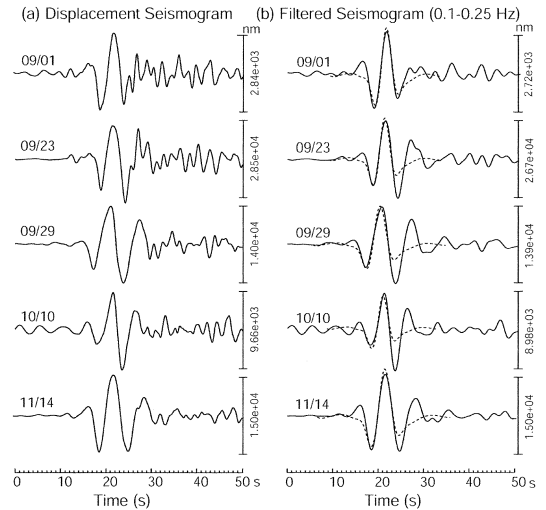


Fig. 2. Vertical component seismograms of volcanic explosion earthquakes observed at MAJO in 2004. (a) Displacement seismograms. (b) Filtered seismograms (0.1–0.25 Hz). Broken lines indicate the best fit theoretical waveforms calculated from a single force source.

Fig. 2に、9月から11月までに発生した爆発地震の上下動変位記録を並べた。いずれの爆発地震も、9月23日の爆発地震の波形と同じように、孤立したパルス状の長周期振動が卓越している。3成分記録はこの主要動がRetrogradeの動きをするレーリー波であることを示しており、一連の爆発地震がほぼ同じ震源機構を持つことを示唆している。ただし、最大振幅(p-p値)は $2.9 \times 10^{-6}$  mから $2.9 \times 10^{-5}$  mまで分布し、規模は1桁ほど違う。

### 3. データ解析

火山極近傍に設置した広帯域地震波形の解析は、鉛直方向のシングルフォースが働いたことを示している(大湊・他, 2005)。また、MAJOで観測された波形も、シングルフォースの震源機構解で説明されている他火山の爆発地震の波形の特徴とよく似ている。そこで、本研究では、観測された爆発地震の震源機構として鉛直下向きのシングルフォースを仮定し、その震源パラメータを求めた。理論波形は、1983年の爆発地震を武尾・他(1984)が解析したときと同じ半無限均質構造(P波速度 $6 \text{ km/s}$ , S波速度 $3.4 \text{ km/s}$ , 密度 $2,700 \text{ kg/m}^3$ )を仮定し、Nishimura and Hamaguchi (1993)と同じく波数離散化法を用いて計算した。また、地震計の特性も補正した。震源の深さは $0.5 \text{ km}$ として計算したが、解析する波が長

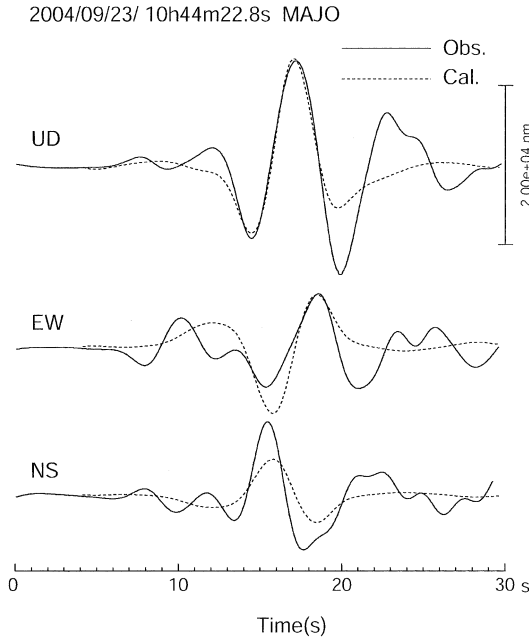


Fig. 3. Comparison of the observed seismograms on September 23, 2004, with the best-fit theoretical waves calculated from a single force source. The seismograms are filtered from 0.1 to 0.25 Hz.

周期のため地表に働いたと考えて差し支えない。シングルフォースの震源時間関数は三角パルス型の関数を仮定し、三角パルスの最大値(以後、力の大きさ) $F$ とパルス幅 $\tau$ を求めた。まず、パルス幅を1s刻みで計算した理論波形を観測波形と比較し、波形の合い具合を目で確認しながらパルス幅 $\tau$ を決定した。続いて、上下動成分の振幅の比較から、力の大きさ $F$ を推定した。Fig. 3に9月23日の爆発地震の観測波形と理論波形を比べた。レーリー波の特徴である上下動成分と水平動成分(南北動と東西動)に現れる1/4波長のずれなど、主要動の特徴を概ねうまく説明できていることがわかる。ただ、水平動成分の振幅が2倍程度合っていない。これは、レーリー波の伝播経路が構造の不均質性の影響をうけ、その到来方向が観測点と浅間山を結ぶ方向から30度ほどずれた(Fig. 1(c))ためと考えられる。Table 1に5つの爆発地震の $F$ と $\tau$ をまとめた。また、Fig. 2(b)に上下動成分の観測波形と理論波形を比べた。力の大きさは $10^{10}$ Nから $10^{11}$ N、パルス幅は5-6sと見積もられた。なお、波形の合い具合から、力の大きさ $F$ には2倍程度、パルス幅 $\tau$ には $\pm 1$ s程度の誤差があると推定される。

#### 4. 考 察

爆発地震源の震源パラメータであるシングルフォースの力の大きさ $F$ とパルス幅 $\tau$ は、

$$F = \pi r^2 P \quad (1)$$

$$\tau = c \frac{r}{v} \quad (2)$$

と表すことが出来る(Nishimura and Hamaguchi, 1993)。ここで $r$ は噴出孔の半径、 $P$ は火口浅部に蓄えられた圧力、 $v$ は噴出物質の初速度、 $c$ は噴出物質の比熱比から決まる定数でほぼ3である。(1)、(2)式から噴出孔半径を消去すれば、

$$\log F = 2 \log \tau + \log P + 2 \log \left( \frac{v}{c} \right) + \log(\pi) \quad (3)$$

が得られる。Fig. 4に、2004年の浅間山の爆発地震の震源パラメータを、他の火山の爆発地震の結果(Cruz-Atienza *et al.*, 2001; Nishimura and Hamaguchi, 1993; 加藤・他, 2002)とともに示し、(3)式と比較した。(3)式から予測される $F$ と $\tau$ の関係は実線で示してある。ここで、 $c=3$ 、 $v=100$ m/sとし、 $P$ については0.1, 1, 10 MPaの3通りを仮定した。図から、2004年の浅間山爆発地震のデータは $P=1$  MPaのときの実線付近から下に分布し、十勝岳火山やセントヘレンズ火山、ポポカテペトル火山の爆発地震の圧力とほぼ同じかやや小さい値をとることがわかる。

9月1日の爆発地震は、そのパルス幅はほぼ同じであるが、力の大きさは他の地震に比べて小さい。特に、その後に発生した9月23日の爆発地震に対しては1桁も小さい。これは、(3)式の右辺第2項と第3項に現れるパラメータに大きな違いがあることを示している。第3項に現れる $c$ は、適当な比熱比(1.1-1.4)のもとでは $3 \pm 0.3$ と見積もられる。また、噴出速度 $v$ は、2004年の浅間山の爆発的噴火に関して実測はないけれども、他の火山の解析例を見る限り50-200 m/s程度と考えられるので、(3)式の第3項は $2.0 \pm 0.3$ の狭い範囲に収まる。従って、9月1日の爆発地震の力の大きさが小さかったのは、第2項に現れる火口直下に蓄えられる圧力が小さかったためと推定できる。この圧力の大きさの差異は、Kanamori *et al.* (1984)のモデルに基づけば蓋の強度を表しているともいえる。大木・他(2004)は、9月16日の航空機SARの測定の結果、火口内に溶岩がドーム状に広がっていたことを報告している。このような溶岩ドームは一連の爆発的噴火活動の開始以前には報告されていないことから、9月1日の爆発地震の振幅がそれ以降の爆発地震に比べて小さいのは溶岩ドームによる強度の高い蓋が噴出孔を塞いでいなかったためと推察される。

Table 1. Source parameters of explosion earthquakes.

Date and time (JST)	Pulse width $\tau$ (s)	Single force $F$ (N)	Impulse (Ns)	Pressure $P$ (MPa)	Air wave <sup>1</sup> (Pa)	Tilt motion <sup>1</sup> (micro radian)
9.1 20h01m	5	$1.5 \times 10^{10}$	$7.5 \times 10^{10}$	0.17	>205	0.1
9.23 19h44m	5	$1.3 \times 10^{11}$	$6.5 \times 10^{11}$	1.49	72.3	0.05
9.29 12h17m	6	$7.3 \times 10^{10}$	$4.3 \times 10^{11}$	0.58	29.6	0.12
10.10 23h09m	5	$3.3 \times 10^{10}$	$1.7 \times 10^{10}$	0.38	18.9	-
11.14 20h59m	6	$9.4 \times 10^{10}$	$5.6 \times 10^{10}$	0.75	73.4	0.11

<sup>1</sup> Data of air wave and tilt motion are taken from Seismological and Volcanological Department of JMA (2005).

次に、2004年の噴火活動のひとつ前の活動である1983年4月8日の爆発的噴火に伴って発生した爆発地震と比較する。この爆発地震についても、武尾・他(1984)とNishimura and Hamaguchi (1993)により、その発震機構は鉛直下向きのシングルフォースで説明されている。両者とも、地震計のタイプは異なるが気象庁の松代観測点(MAJO)のデータを解析しており、本研究の結果と比較するにはよいだろう。Nishimura and Hamaguchi (1993)は、WWSSNの記録をもとに、爆発地震の主要動は $F = 1.5 \times 10^{10}$  N、 $\tau = 4$  sの鉛直下向きのシングルフォース(Fig. 4中の白丸)で説明できるとしている。武尾・他(1984)は、ASROのデジタルデータにインバージョン解析を行った結果、まず、 $8.0 \times 10^{10}$  Nsの力積となるシングルフォースが働き、その17秒後からシングルフォースが数回繰り返し働いたことを示した。このように彼らが推定した力の大きさやパルス幅、あるいは力積は、2004年の値に比べて同程度かやや小さい値であり、1983年と2004年の爆発的噴火の力学的規模に際立って大きな違いがなかったことを示している。

最後に、地震観測以外のデータと比較する。山頂から北北東に約2.5 km離れた気象庁F点の傾斜計は、噴火の数時間あるいは数十時間前から山の膨張を捉えている。それらの変化量は0.05–0.12 micro radianの狭い範囲に分布し(Table 1)、シングルフォースの大きさと顕著な相関はない。このことは、傾斜変動を引き起こした膨張源と爆発地震の力源となった火口直下の圧力溜まりは異なることを示している。また、火口南約8 kmの軽井沢観測所で観測された空気振動の大きさ(Table 1)とも相関は認められない。これは、火口直下に蓄えられた圧力を大気中に解放するときに、溶岩ドームの有無やマグマ物性の違いにより、マグマ破碎や噴出物質の放出等のメカニズムが異なっていたことを示唆している。

気象庁は、9月29日の噴火後の10月1日に行った観

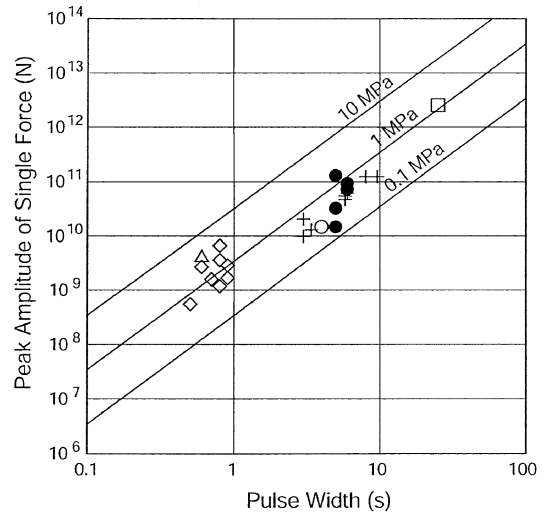


Fig. 4. Relation between peak amplitude and pulse width of vertical single force. Solid circles represent the data of Asama obtained in this study. Open circles, triangles, and square symbols are the data of the explosion earthquakes of Asama (April 8, 1983), Tokachi and Mount St. Helens (Nishimura and Hamaguchi, 1993). Diamonds and plus symbols denote Tokachi-dake data by Kato *et al.* (2002) and Popocatepetl data by Cruz-Atienza *et al.* (2001), respectively. Three fine lines represent the relation predicted from single force models with a pressure of 0.1, 1, and 10 MPa.

察により、火口底の北東側に直径70 m、深さ40 mのくぼみがあることを確認している(気象庁地震火山部, 2005)。このくぼみが9月29日の爆発地震の励起源として働いたと仮定するとパルス幅は約1 sになる。この値は今回の地震波解析による結果(6 s)にくらべて小さい。この原因として、噴出速度が100 m/sより遅い、あるいは

は、複数の震源が働いたことで見かけ上パルス幅を長くした、などの要因があげられる。あるいは、震央距離4 kmに置かれた広帯域地震計の9月1日の爆発地震の記録(加藤・他, 2004)は、周期約2秒のレーリー波が卓越していることを示しており、より遠方のMAJOで観測された波形は構造の影響をうけ短周期成分が減衰した可能性もある。仮に、2秒のパルス幅が妥当であるとすると推定される火口内圧力は5倍程度大きくなる。また、大湊・他(2005)は、火山極近傍に展開された広帯域地震計の波形記録を解析し、鉛直下向きのシングルフォースが働いた後に、上向きと下向きのシングルフォースが働いたと推定している。運動量保存則から、鉛直上向きの力に対しては下向きの力が必要であるので、本研究の結果は、これらの一連のシングルフォースを平均化した震源パラメータを見ている可能性がある。これらのことは、圧力の絶対値の詳細を議論するには、噴出速度の測定値や野外調査データとともに、近地の観測点を含む多数の観測点データの解析結果が必要であることを示唆している。しかしながら、本研究では、1983年と2004年の爆発地震を同一観測点の波形データを解析した結果を比較しているので相対的な違いは議論できると考えられる。また、爆発地震の震源パラメータの解析例は世界的にみてもまだ少ないので、爆発的噴火の力学過程を巨視的に捉えた系統的な調査も重要であろう。

## 5. ま と め

2004年に浅間山で発生した5つの爆発地震を解析した。その主要動であるレーリー波は、 $10^{10}$ – $10^{11}$  Nの鉛直下向きのシングルフォースが5秒から6秒間働いたとすることで説明できることが明らかとなった。求められた震源パラメータは、Nishimura and Hamaguchi (1993)により提案されている爆発地震のスケーリング則を概ね満足し、火口内に蓄えられた圧力は0.2–1.5 MPaと見積もられた。ただし、火口内に溶岩ドームが観測されるようになってからは圧力が大きくなった傾向が認められる。

## 謝 辞

解析には気象庁松代観測点の波形データを利用して頂きました。匿名の査読者2名と編集委員の大倉敬宏氏には丁寧に論文を見て頂きました。記して感謝致します。

## 引用文献

- Cruz-Atienza, V. M., Pacheco, J. F., Singh, S. K., Shapiro, N. M., Valdes, C. and Iglesias, A. (2001) Size of Popocatepetl volcano explosions (1997–2001) from waveform inversion. *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 4027–4030.
- Kanamori, H. and Given, J. W. (1983) Lamb pulse observed in nature. *Geophys. Res. Lett.*, **10**, 373–376.
- Kanamori, H., Given, J. W. and Lay, T. (1984) Analysis of seismic body waves excited by the Mount St. Helens eruption of May 18, 1980. *J. Geophys. Res.*, **89**, 1856–1866.
- 加藤幸司・大島弘光・笹谷 努(2002) 1988–1989年の十勝岳噴火に伴う爆発地震の震源メカニズム。北海道大学地球物理学研究報告, 65, 179–198.
- 加藤幸司・藤原喜明・山里 平(2004) 広帯域地震計で観測された2004年9月1日浅間山噴火に伴う爆発地震。日本火山学会講演予稿集2004年度秋季大会, S20.
- 気象庁地震火山部(2005) 浅間山(平成16年(2004年)年報)。火山活動資料(平成16年の活動)。
- Nishimura, T. (1998) Source mechanisms of volcanic explosion earthquakes: single force and implosive sources. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **86**, 97–106.
- Nishimura, T. and Hamaguchi, H. (1993) Scaling law of volcanic explosion earthquakes. *Geophys. Res. Lett.*, **20**, 2479–2482.
- 大木章一・矢来博司・村上 亮・宮脇正典(2004) 航空機 SAR で捉えた浅間山火口底のマグマ。日本火山学会講演予稿集2004年度秋季大会, S03.
- 大湊隆雄・武尾 実・熊谷博之・山品匡史・及川 純・小山悦郎・辻 浩・卜部 卓(2005) 2004浅間山噴火に伴う爆発地震の解析。地球惑星科学関連学会2005年合同大会講演予稿集, V055P-002.
- 武尾 実・浜田信生・柏原静雄・宇平幸一(1984)1983年4月8日浅間山の噴火に伴う長周期地震波の解析。火山, **29**, 31–44.

(編集担当 大倉敬宏)