

桜島火山におけるハーモニック微動のモーメントテンソル解析

為栗 健・Sukir MARYANTO・井口正人

要 旨

桜島火山において発生するハーモニック微動のモーメントテンソル解析を行った。BL型地震群発後に発生する微動（HTB型）と爆発的噴火直後に発生する微動（HTE型）のモーメントテンソル成分に大きな違いはなく、等方成分は50%以上、CLVD成分は20～30%、DC成分は20%以下であった。鉛直方向のダイポール成分が大きく、鉛直方向の力が優勢な震源が推定される。震源は火口直下の浅部であり、爆発的噴火発生前に火口底直下に形成されているガス溜まりが微動の発生に関与していると考えられる。

キーワード: 桜島火山, ハーモニック微動, モーメントテンソル解

1. はじめに

桜島火山では、山頂噴火活動の活発な時期に、ハーモニック微動（C型微動）が観測されることがある（西，1984）。これまでにスペクトルや振動軌跡を解析することにより、その特徴が調べられてきた（例えば、角田・井手上，1970；加茂・他，1977）。スペクトルは基本周波数とその整数倍にピークが現れることが知られている。Maryanto *et al.* (2005) は、ハーモニック微動を、爆発的噴火活動が活発化する数日～数時間前に発生する群発性BL型地震から推移したもの（HTB型）と爆発的噴火の2-3分後に発生するもの（HTE型）に分類し、HTBのピーク周波数は一定であるが、HTEのピーク周波数は時間が経つにつれて高周波側に徐々にシフトすることを示した。

Semeru火山，Lascar火山などにおいて、スペクトル解析に基づくハーモニック微動の発生メカニズムの研究が報告されている（例えば、Schlindwein *et al.*, 1995；Hellweg, 2000）。Schlindwein *et al.* (1995) では、Semeru火山で発生するハーモニック微動は、震源において振動が繰り返されており、火道上部のガスの振動によって励起されていると考えられている。Hellweg (2000) はLascar火山のハーモニック微動について、水やガスの移動によって励起され、地表に

近い部分で発生していることを示した。これまでの発生メカニズムに関する研究は主に、震源における時間関数を議論した研究であり、震源からの波動の radiation pattern や力のかかり方を議論したものはほとんどない。また、震源の位置も火口付近の浅い場所であることは推定されているが、その深さの見積りはなされていない。Maryanto *et al.* (2005) は、桜島火山のハーモニック微動の振動軌跡の解析からHTB, HTEともにRayleigh波およびLove波の表面波が卓越しており、Love波については特徴的な空間分布をもつことを示した。そこで、本研究では、ハーモニック微動のRMS振幅の空間分布を用いて、そのモーメントテンソル解を求め、メカニズムと震源の深さを推定した。

2. 観測とデータ

解析には南岳山頂火口から1.7～4.4kmにある5観測点において観測された3成分記録を用いた (Fig. 1)。各観測点には3成分短周期地震計（固有周波数1Hz）が、HIK観測点では地表に、他の4観測点では地表から85～290mの深さに設置されている。水平動は火口方向（L）と火口と直交方向（T）に設置されている。2001年以前は、アナログ磁気テープに収録されてお

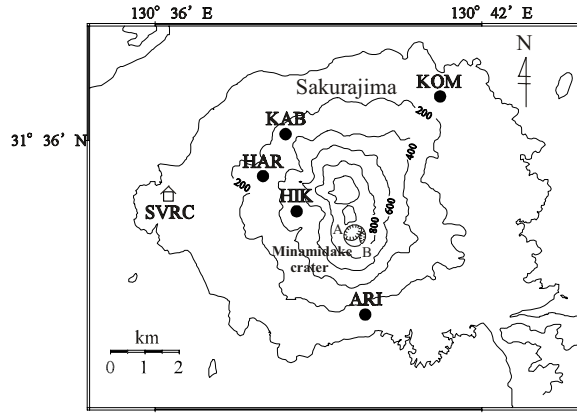


Fig. 1 Location of seismic stations. Solid circles denote permanent stations using for analyses.

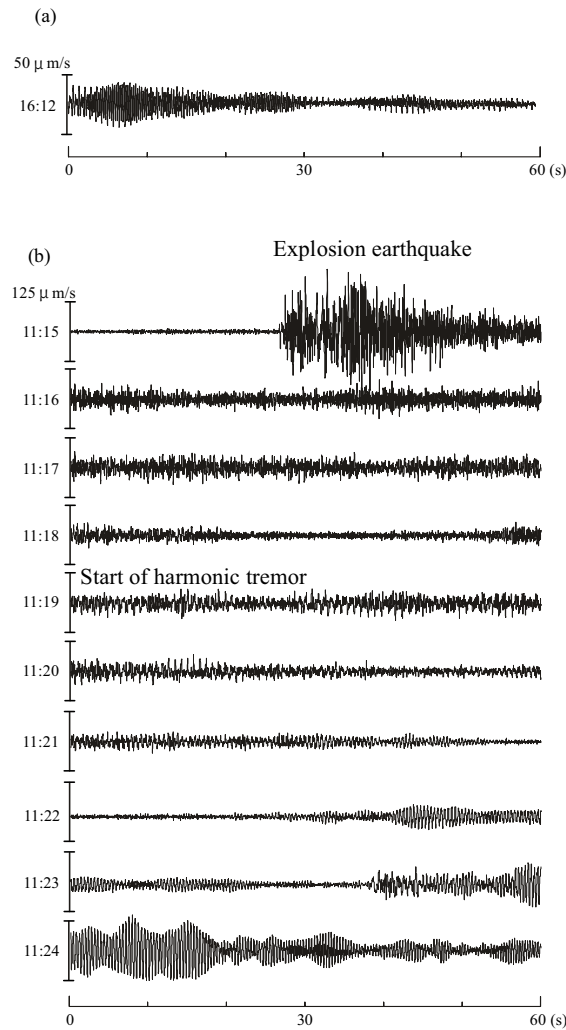


Fig. 2 Upper and lower traces are HTB and HTE, respectively. Seismograms are observed by a vertical component of seismometer at HIK station. (a) HTB occurred on July 20, 1990. (b) Explosion earthquake occurred at 11:15 on October 11, 2002 and HTE started at 11:19.

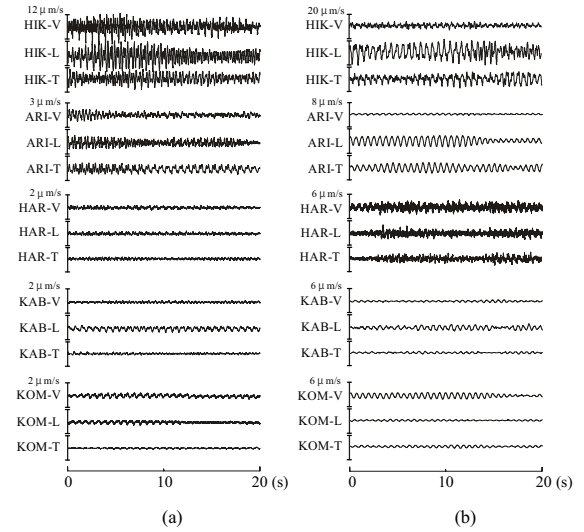


Fig. 3 Examples of velocity waveforms of harmonic tremors at 5 stations and 3 components. (a) HTB (16:12:55 to 16:13:15). (b) HTE (11:21:00 to 11:21:20).

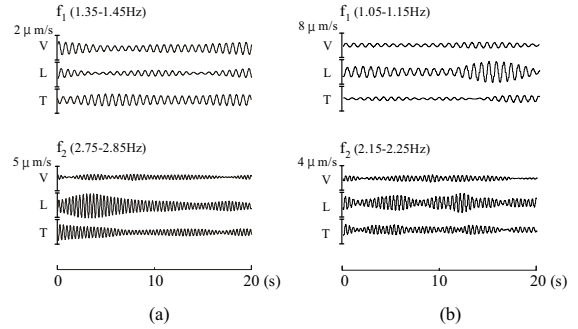


Fig. 4 Examples of waveform filtered at ± 0.05 Hz of f_1 and f_2 . Seismograms are observed at HIK station. (a) HTB. (b) HTE.

り、記録を分解能12bit、200Hzでデジタル化した。2001年以降については、分解能22bit、200Hzサンプリングでデジタル記録されたデータを使用した。

解析に使用したハーモニック微動の波形をFig. 2に示す。1990年7月20日に発生したHTBは14時頃から約2時間続いた。ここでは、すべての観測点において波形が飽和することなしに記録されている16:12:15から1分間のデータを解析した。HTEについては、2002年10月11日に発生したものを用了。11:15に爆発的噴火が発生し、11:19頃から波形がハーモニックに変化し始め、12分間続いた。

Fig. 3に5観測点における3成分記録を示す。水平動は火口方向 (L) と火口と直交方向 (T) で表示してある。HTB, HTEともにHIK観測点で最も振幅が大きく、火口から離れるにつれて振幅が小さくなる。KOM観測点を除くと、上下動成分より水平動成分の振幅が大きく、L成分が最大振幅を持つ観測点が多い。

HTEの火口に近い観測点（HIK, ARI）ではHTBと比較すると、上下動成分の割合が小さい。Fig. 4に基本周波数（ f_1 ）とその2倍の周波数を持つ第2モード（ f_2 ）に $\pm 0.05\text{Hz}$ のband-passフィルターを施したHIK観測点の波形を示す。HTB, HTEともに上下動成分の振幅はほぼ一定であるが、水平動成分は数秒～10秒程度の紡錘形のwave trainが見られる。HTBについては、基本周波数より第2モードの振幅が大きく、HTEでは逆に第2モードより基本周波数の振幅が大きい。

3. 解析

ハーモニク微動については、各観測点で共通の位相を対応付けることが困難であり、観測波形そのものからインバージョンによりモーメントテンソル解を求めることができない。そこで、5観測点における3成分記録について、RMS振幅の空間分布をインバージョンすることによりモーメントテンソル解を求めた。解析のwindowは4秒間とした。解析はハーモニク微動の基本周波数（ f_1 ）と第2モード（ f_2 ）について行った。HTBの基本周波数は 1.4Hz であり、 f_1 については $1.35\text{--}1.45\text{Hz}$ 、 f_2 については $2.75\text{--}2.85\text{Hz}$ のband-passフィルターを施した。HTEの基本周波数は解析対象とした時間内で 1.0Hz から 2.6Hz に増加する。そのため、解析する個々のwindowにおける基本周波数と第2モードに $\pm 0.05\text{Hz}$ のband-passフィルターを施した。観測点近傍の影響を取り除くために $1\text{--}3\text{Hz}$ の周波数を持つ遠地地震の振幅を用い、地震計の埋設深度が最も深いHAR観測点を基準として観測点の振幅補正を行った。

グリーン関数の計算は、地中埋設地震計の観測点における表面波の波動を求めるためにHisada（1994）の方法を使用し、インバージョンはKikuchi and Kanamori（1991）の方法をRMS振幅用に改良した。理論RMS振幅は振幅一定の周波数 f_1 , f_2 の正弦波からなる震源時間関数から求められた理論波形に、観測波形と同様のband-passフィルターを施すことにより計算した。震央については、HTB, HTEともにHIK観測点で最も振幅が大きく、火口から離れるにつれて振幅が小さくなる（Fig. 3）ことから、南岳火口と仮定した。深さについては 2km , 1km , 0.5km , 0.3km の4つの場合を仮定した。

4. 結果

Fig. 5にHTB, HTEのインバージョンの結果例を示す。各図の上段左側に震源時間関数、下段に得られたモーメントテンソル成分、右側にRMS振幅の観測

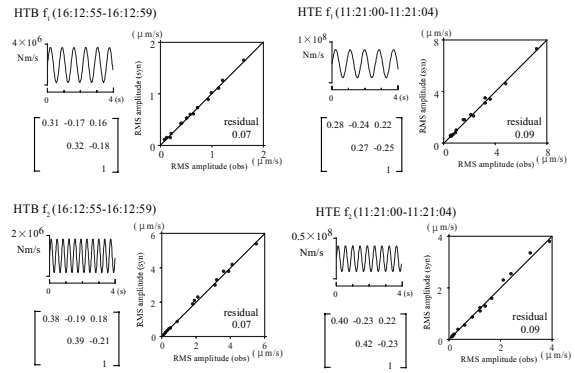


Fig. 5 Examples of result of the inversion. Assumed source time function and obtained moment tensor components are shown in left side. Relation between the RMS amplitudes of observation and synthetic plotted in right side.

値と理論値をプロットしたものを表示している。HTBの基本周波数の解析結果では、モーメントテンソル成分は M_{zz} 成分が卓越しており、体積変化を表す対角成分はすべて同じ符号である。非対角成分は M_{zz} 成分の20%程度の値を持っている。HTBの第2モードでもほぼ同様の結果が得られた。moment-rateはそれぞれ $4.8 \times 10^6 \text{Nm/s}$, $2.8 \times 10^6 \text{Nm/s}$ であり、震源の深さはともに 0.5km で残差が最小となった。RMS振幅の観測値と理論値はよく合っており、残差はともに 0.07 であった。HTEの基本周波数の解析結果もHTBとほぼ同様であり、モーメントテンソル成分は M_{zz} 成分が卓越しており、体積変化を表す対角成分はすべて同じ符号である。非対角成分は M_{zz} 成分の25%程度の値を持っている。HTEの第2モードでもほぼ同様の結果が得られた。moment-rateはそれぞれ $0.7 \times 10^8 \text{Nm/s}$, $0.3 \times 10^8 \text{Nm/s}$ であり、震源の深さはともに 0.3km で残差が最小となった。

モーメントテンソル成分は M_{zz} 成分が卓越しているが、非対角成分も無視できない値を持っている。また、対角成分の比からCLVD成分も含まれていると考えられる。そのため、モーメントテンソル成分を等方、CLVD, DC成分に分解した。全解析結果の各成分とmoment-rateをFig. 6に示す。HTBの基本周波数については、全解析範囲で等方成分は $50\text{--}60\%$ 、CLVD成分とDC成分が20%前後であった。第2モードについては、等方成分は60%台、CLVD成分は20%前後、DC成分は10%前後であり、基本周波数と同様の結果が得られた。基本周波数のmoment-rateは $3.2 \times 10^6 \sim 4.1 \times 10^6 \text{Nm/s}$ であり、ほとんど一定であった。第2モードのmoment-rateは $3.8 \times 10^6 \sim 9.5 \times 10^6 \text{Nm/s}$ であり、時間とともに減少する結果が得られた。

HTEの基本周波数については、等方成分は 50--

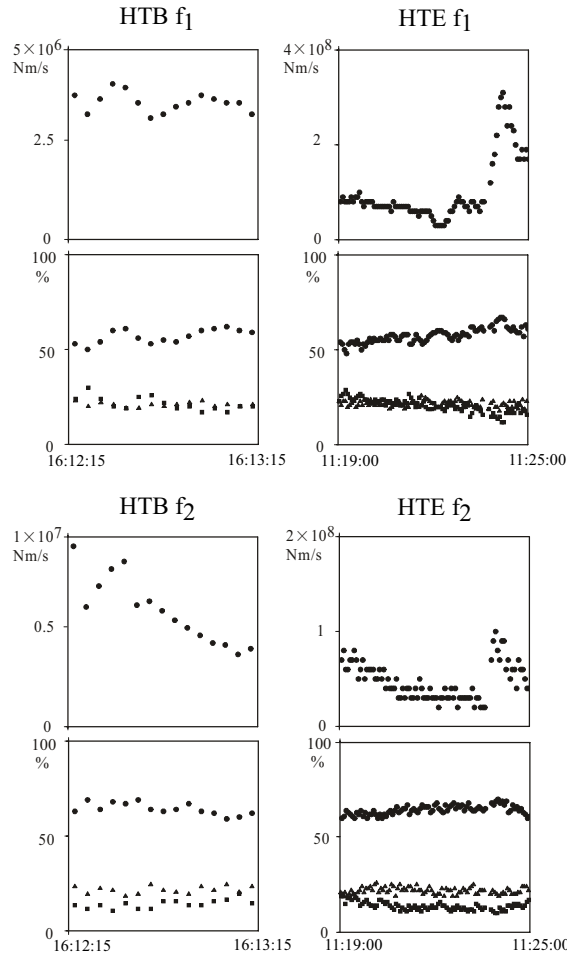


Fig. 6 In upper and lower figures, obtained moment-rate and components of moment tensor are shown in each figures, respectively. Circles, triangles, and squares mean percentage of isotropic, CLVD, and DC components of moment tensor.

70%, CLVD成分は20%前後, DC成分は10~30%であった。HTEの第2モードについては, 等方成分は60%台, CLVD成分は20%前後, DC成分は10%台であった。基本周波数のmoment-rateは11:23までは $0.6 \times 10^8 \sim 0.9 \times 10^8 \text{ Nm/s}$ でほとんど一定であったが, 11:24から $2.4 \times 10^8 \sim 3.1 \times 10^8 \text{ Nm/s}$ と大きくなった。第2モードのmoment-rateは $0.2 \times 10^8 \sim 0.9 \times 10^8 \text{ Nm/s}$ でほとんど一定の範囲であるが, 11:24まで徐々に減少しているようにも見える。

HTB, HTEともに等方成分の寄与が最も大きい結果が得られた。CLVD成分はHTB, HTEともに鉛直方向が卓越しており, その角度は約80度であった。観測波形のtangential成分にはLove波による振幅の大きな位相が見られるように, 解析結果には10~20%のDC成分が含まれていた。断層面の傾斜角はほぼ鉛直で走向が110~150度, もしくはほぼ水平で走向が20~60度であった。

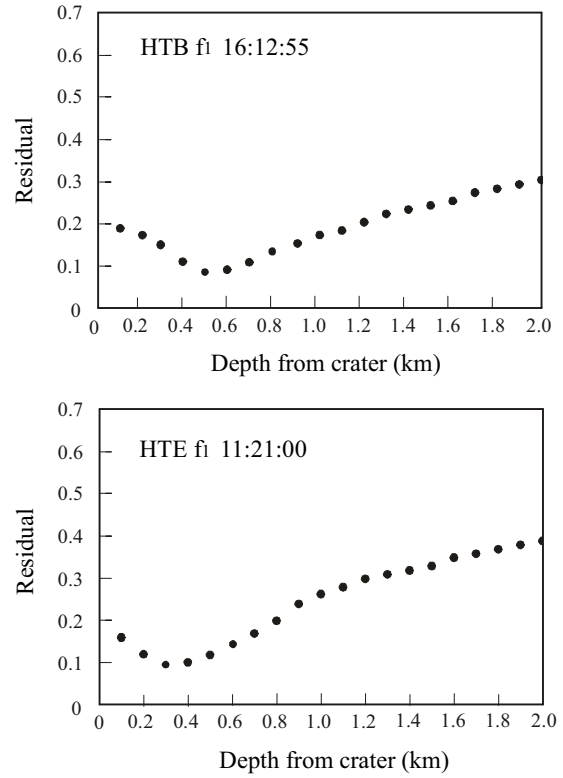


Fig. 7 Relation between source depths and residual. Upper and lower figures are HTB and HTE, respectively.

Fig. 7に残差の深さ分布を示す。HTBについては16:12:55, HTEについては11:21:00の解析結果のモーメントテンソル解を使用し, 0.1kmから2.0kmまで深さを0.1km毎に変化させた場合の残差を計算してプロットしてある。HTBについては0.5km, HTEについては0.3kmで残差が最小になっている。深さの残差は0.07~0.38であり, 深さを変えても残差はあまり大きくならない。しかしながら, 残差分布にlocal minimumが見られないことと, 観測波形に振幅の大きな実体波が見られないことから, この震源の深さは妥当であると考えられる。

5. 議論

HTB, HTEともにモーメントテンソル解には50%を超える等方成分が含まれているので, ほぼ全方位で押し引きであり, 膨張と収縮の繰り返しが主要なハーモニック微動の発生源と考えられる。また, -1:-1:2のダイポールからなるCLVDの主軸は鉛直方向であり, CLVD成分が約20%含まれていることから, 膨張・収縮震源は等方的ではなく, 鉛直方向の力が優勢である。DC成分については傾斜角が水平, 鉛直の2つの断層面のどちらがハーモニック微動の発生

に寄与しているかは本解析から判断できないが、膨張・収縮震源は鉛直方向の力が優勢であることを考えると、すべり角が90度近くになる鉛直方向の断層面が連動している可能性が高い。南岳火口内にはA、Bの両火口がWNW-ESE方向にある（Fig. 1）。傾斜角が鉛直方向の断層面の走向はN110~150度であり、火口列の方向とほぼ一致している。ハーモニック微動の発生時に両火口間を結ぶ面において、上下方向のせん断的な振動が引き起こされているのかもしれない。

解析から得られた震源の深さはHTBで0.5km、HTEで0.3kmと浅い。Ishihara（1990）は爆発的噴火に伴う歪ステップの解析から、深さ0.5kmに爆発発生前に高圧のガス溜まりが形成されており、爆発によりこのガス溜まりが破裂・収縮するものと考えた。また、Tameguri *et al.*（2002）は爆発地震の低周波主要動はガス溜まりの膨張と収縮により引き起こされることを示した。見積もられたハーモニック微動が発生する深さは火口底直下の火道最上部付近であり、爆発的噴火発生前に形成されていると考えられるガス溜まりの位置に相当する。HTBはBL型地震の群発的活動の数時間後に発生する。BL型地震に伴い、マグマは地表である火口底まで達し、火道はマグマで満たされていると考えられる（Iguchi, 1994）。先に述べたようにBL型地震の後に発生する爆発的噴火の前には、ガス溜まりが既に形成されていると考えられており、BL型地震発生後にガス溜まりが形成されるプロセスがあるはずである。火口底まで達したマグマは表面から冷却され固化し溶岩ドームとなるが、火道内部のマグマからは依然として脱ガスが進行すれば、溶岩ドームが栓となり火道上部にガス溜まりが形成されるはずである（Ishihara, 1985）。ハーモニック微動はインピーダンスのコントラストが大きい物体の共鳴より発生していると考えられている（加茂・他, 1977；Fujita and Ida, 2003）。BL型地震群発の後に発生するHTB型ハーモニック微動は、そのようにして形成されたガス溜まりの共鳴により励起されている可能性が高い。一方、HTE型は爆発発生から2-3分後に発生するものが多い（Maryanto *et al.*, 2005）。爆発により火道上部のガス溜まりを封圧していた溶岩ドームは破壊され、急激な減圧が起こる（Ishihara, 1990；Tameguri *et al.*, 2002）。溶岩ドームにより閉ざされていたガス溜まりがハーモニック微動を発生させる共鳴系とすれば、溶岩ドームが破壊された段階で共鳴系も同時に消失することになり、爆発発生後にはハーモニック微動が発生しないことになる。しかし、ガス溜まりの栓である溶岩ドームの破壊が十分でなく、ガス溜まりの径に対して十分

小さい径のventしか開口しなかった状態を考えると、小径のventを通じて火山灰や火山ガスは放出されるが、ガス溜まりは依然、大きいインピーダンスのコントラストをもっており、ガス溜まりが共鳴系になりうる。HTE型の卓越周波数の増加はガス溜まりの大きさが小さくなったことにより説明できる。以上のことからHTB型、HTE型のいずれも、共鳴によるガス溜まりの周期的な体積変化が微動の発生に関与していると考えられる。

6. おわりに

桜島火山で発生するHTB、HTEについて、モーメントテンソル解を求め、そのメカニズムと震源の深さを推定した。HTBとHTEのモーメントテンソル解に大きな違いは見られず、鉛直方向の力が優勢な震源における膨張と収縮の繰り返しによって励起されている。震源の深さは0.3~0.5kmと浅く、火道上部のガス溜まりの共鳴が微動の発生に関与している可能性が高い。

謝 辞

地震観測およびデータの蓄積は火山活動研究センターのスタッフの皆様によるものであり、感謝の意を表します。

参考文献

- 角田喜寿・井手上仁悟（1970）：桜島の「C型」火山性微動，火山，15，pp. 61-74.
- 加茂幸介・古沢 保・赤松純平（1977）：桜島の火山性微動の性質について，火山，22，pp. 41-58.
- 西 潔（1984）：爆発に先行する火山性B型地震の群発，京都大学防災研究所年報，第27号B-1，pp. 29-34.
- Fujita, E. and Ida, Y. (2003): Geometrical effects and low-attenuation resonance of volcanic fluid inclusions for the source mechanism of long-period earthquakes, Jour. Geophys. Res., Vol. 108, 2118, 10.1029/2002JB0018606.
- Hellweg, M. (2000): Physical model for the source of Lascar's harmonic tremor, J. Volcanol. Geotherm. Res., 101, pp. 183-198.
- Hisada, Y. (1994): An efficient method for computing Green's functions for a layered half-space with sources and receivers at close depths, Bull. Seism. Soc. Am., 84, pp. 1456-1472.
- Iguchi, M. (1994): A vertical expansion source model for

- the mechanism of earthquakes originated in the magma conduit of andesitic volcano, Sakurajima, Japan. Bull. Volcanol. Soc. Japan, Vol. 39, pp. 49-67.
- Ishihara, K. (1985): Dynamical analysis of volcanic explosion, Jour. Geodynamics, Vol. 3, pp. 327-349.
- Ishihara, K. (1990): Pressure sources and induced ground deformation associated with explosive eruptions at an andesitic volcano: Sakurajima volcano, Japan, in Magma transport and storage (Ed. Ryan, M. P.), John Wiley & Sons, Chichester, pp. 333-356.
- Kikuchi, M. and Kanamori, H. (1991): Inversion of complex body waves-III, Bull. Seismol. Soc. Am., 81, pp.2335-2350.
- Maryanto, S., Iguchi, M. and Tameguri, T. (2005): Spatio-temporal characteristics on spectra and particle motion of harmonic tremors at Sakurajima volcano, Japan, Ann. Disast. Prev. Res. Inst., 48B, (in printing).
- Schlindwein, V., Wassermann, J., and Scherbaum, F. (1995): Spectral analysis of harmonic tremor signals at Mt. Semeru volcano, Indonesia, Geophys. Res. Lett., 22, pp. 1685-1688.
- Tameguri, T., Iguchi, M. and Ishihara, K. (2002): Mechanism of explosive eruptions from moment tensor analyses of explosion earthquakes at Sakurajima volcano, Bull. Volcanol. Soc. Japan, 47, pp. 197-215.

Moment Tensor Analyses of Harmonic Tremors at Sakurajima Volcano

Takeshi TAMEGURI, Sukir MARYANTO, and Masato IGUCHI

Synopsis

Moment tensors of harmonic tremors observed after BL-type earthquake swarms (HTB) and immediately after explosive eruption (HTE) were estimated. HTB and HTE were excited by source of dominant vertical dipole. The source depths of HTB and HTE correspond to the location of gas pocket formed at uppermost part of the conduit before explosive eruption. It was inferred that harmonic tremor was excited by vibration of resonance of the gas pocket.

Keywords: Sakurajima volcano, Harmonic tremor, moment tensor solution

