

平成 17 年度修士論文

阿蘇火山における長周期微動の時間変化

—2002 年～2004 年—

Temporal change of long-period tremor

at Aso Volcano —2002-2004—

京都大学大学院理学研究科

地球惑星科学専攻地球物理学分野

火山物理学分科

池田 さや香

要旨

火山性微動はマグマや熱水、火山ガスなどの流体の運動と密接に関わっており、その発生過程を解明することは、火山現象の理解や噴火予知において非常に重要である。阿蘇火山ではさまざまな周期の火山性微動が観測されている。そのうち、長周期微動は基本周期を 15 秒として、7.5 秒、5 秒、3 秒にスペクトルピークをもつことが知られている(Kaneshima et al., 1996)。そして微動振幅の空間分布の解析や境界積分法を用いた数値計算により、微動の振動源は阿蘇中岳第一火口直下に存在する長さ 2.5km、幅 1km、厚さ 25mの流体で満たされたクラックの共鳴であることが示された(Yamamoto, 2005)。求められたクラック内の流体の音速は 400m/s 程度であることから、それはガスと若干の粒子の混合物、あるいは密度が大きめの混合ガスであると推定されている。このようなモデルをより具体的なものにするためには、長周期微動の時間変化について調べることも非常に重要である。そこで、本研究では 2002 年 11 月から 2004 年 7 月までの広帯域地震計のデータを用いて、微動の発生様式や波形の時間変化についての解析を行った。

2002 年 11 月から 2003 年 6 月までの長周期微動の基本周期は 16~20 秒であり、過去の研究で指摘されていた 15 秒より若干長くなっていた。そして 2003 年 7 月の土砂噴出の頃に 12 秒へと急に短くなった後、12 月にかけて徐々に長周期側に戻っていった。2003 年 7 月から 12 月にかけて、スペクトルピークが長周期化したことは、クラック内の流体の音速が小さくなっていくこと、具体的には SO₂ ガスと若干の粒子の混合物で満たされているクラック内部の SO₂ が減少していくことで定性的には説明可能である。

周期の変化の他に、2003 年 7 月の土砂噴出の直前には、微動の振幅や発生回数が急増し、活動が活発化した。しかし 2004 年 1 月の土砂噴出ではこのような変化は見られなかった。また、2003 年 6 月から 12 月までの長周期微動の基本モードと 2 次モードの振幅比はほぼ一定であったため、励起源は変化していないと考えられる。さらに、周期約 10 秒の振動モードが存在することが明らかになった。

目次

| | |
|--|----|
| 第 1 章 はじめに | 1 |
| 第 2 章 最近の阿蘇火山の活動 | 3 |
| 第 3 章 長周期微動 | 4 |
| 3.1 長周期微動について | 4 |
| 3.2 モデルについて | 4 |
| 第 4 章 データ | 6 |
| 第 5 章 長周期微動の時間変化 | 7 |
| 5.1 発生頻度の時間変化 | 7 |
| 5.1.1 相関係数による微動抽出法 | 7 |
| 5.1.2 相関係数と振幅による微動抽出法 | 8 |
| 5.1.3 長周期微動の発生頻度から見た時間変化の様子 | 8 |
| 5.2 スペクトルの時間変化 | 9 |
| 5.3 考察 | 11 |
| 5.3.1 振幅比の変化 | 11 |
| 5.3.2 土砂噴出 | 12 |
| 5.3.3 ピーク周波数の変化 (2003 年 7 月から 2003 年 12 月) | 12 |
| 5.3.4 10s モードの存在について | 14 |
| 第 6 章 まとめ | 16 |
| 謝辞 | 17 |
| 引用文献 | 18 |

第1章 はじめに

活火山の周辺では、さまざまな種類の火山性微動が観測されている。火山性微動は火山体深部からマグマ、熱水、水蒸気などが浅部に移動したり、火道内でマグマが発泡したりする際に発生すると解釈されている。したがって、火山性微動を観測・研究し、火山性微動の発生の物理過程を解明することは、噴火の予知につながる可能性があり非常に重要である。そのため、世界中の多くの火山で火山性微動が研究されている。

阿蘇火山でも今までに多くの観測・研究が行われ、多種の火山性微動の存在が明らかになっている。阿蘇火山の火山性微動は周期で見ると大きく三つに分類することができる。卓越周波数 4-7Hz の連続型微動、卓越周波数 1-2Hz の孤立型微動、周期が 1 秒以上の長周期微動である。

阿蘇山の長周期微動の存在は Sassa (1935) によって最初に明らかにされた。Sassa (1935) は周期 3.5~8 秒の微動を観測し、それを第 2 種微動と名づけ、火山ガスの内部爆発によるマグマ溜りの振動によって発生すると考えた。また、火口列に沿った方向のクラックの存在を示唆した。久保寺(1964) および Kubotera (1974) は第 2 種微動のスペクトルが自由振動のスペクトルに似ていることを指摘し、球形のマグマ溜りを仮定して、その大きさを半径 2~4km と推定した。中禮(1985) は固有周期 10 秒の地震計を一箇所に設置し、それによって周期 6~10 秒の長周期微動を観測し、パーティクルモーシオンが強い指向性を示していることから、第 2 種微動は P 波であると考えた。

1990 年代に入ってから、周期 0.1 秒から数 100 秒までの帯域をカバーする広帯域地震計が設置されるようになり、新たに多くの発見があった。まず、長周期微動は基本周期を 15 秒として、7.5 秒、5 秒、3 秒にスペクトルピークをもち、倍音の関係にあることが明らかになった(Kaneshima et al., 1996; Kawakatsu et al., 2000)。そして、Sassa の見出した第 2 種微動は、基本周期 15 秒の高次モードであろうと考えられた。また、長周期微動の震源は Kawakatsu et al. (2000) や Legrand et al. (2000) によって決定

されており、第一火口の南西数 100 m、深さが 1~1.5 km である。Yamamoto et al. (1999) は長周期微動振幅の空間的な分布から、火口直下に鉛直に近いクラックを推定した。さらに、Yamamoto (2005) は境界積分法を用いた数値計算により fluid-filled crack の振動特性を求め、クラックの厚さやクラック内流体の物性を求めた。それによると、クラック内流体の音速として 400 m/s という値が求められ、ガスの混合物、あるいは gas-ash 混合物であると推定された。

このように、近年、阿蘇火山の火山性微動の研究が進み、その発生に関するモデルが提唱されている。Yamamoto (2005) のモデルをより現実的で詳細なものにするためには、長周期微動の波形（減衰の様式）や周期が変化するものなのか、変化するならどれくらいの幅を持つのか、という情報が必要である。しかしながら、阿蘇火山においては長周期微動の時間変化についてこれまで系統的には研究されていない。

そこで、本研究では、長周期微動の発生モデルに制約を与えるため、微動の発生様式や波形の時間変化について、2002 年 11 月から 2004 年 7 月までのデータを用いて解析を行った。

第2章 最近の阿蘇火山の活動

阿蘇火山は九州の中央部に位置し (Fig.1)、東西 18 km、南北 25 km のカルデラと、10 数個の中央火口丘からなる活火山である。中央火口丘のうち、中岳が有史以降も噴火を繰り返している。中岳は北北西-南南東方向に直線状に並ぶ大小 7 つの火口からなり、現在は北端の第 1 火口でのみ活発な噴気活動がみられている。近年の火山活動の概要を以下に述べる。

阿蘇中岳第一火口では、1989 年から 1993 年まで断続的にストロンボリ式噴火が発生していたが、それ以降は全面湯だまりの状態が続いていた。1994 年から 1995 年にかけて土砂噴出が発生したものの、比較的穏やかな状態が続いていた。

しかし、2000 年以降、湯だまりの水位が徐々に低下し、2000 年 11 月には南壁で赤熱現象が観測され、火山活動が活発化する兆候がみられるようになった。2003 年 5 月には湯だまりの水位は火口南壁下部が露出するまで減少した。水位の減少に呼応して湯だまりの温度は徐々に上昇し、2003 年 4 月頃から 70°C を超えた。このような状況の中、2003 年 7 月 10 日に小規模な土砂噴出が発生した。この土砂噴出以降、湯だまりの減少は一層顕著になり、2004 年 1 月には面積で 4 割にまで減少した。湯だまりの表面温度は 2003 年 10 月には 80°C を超え、ほぼ沸点近くにまで上昇した。そして、2004 年 1 月 14 日、小規模の土砂噴出が発生した。その後、南側火口壁の温度は徐々に減少しているものの、湯だまりの温度は高い状態が続いている。

第3章 長周期微動

3.1 長周期微動について

Sassa (1935) は、振動の周期に着目し、火山性微動を第1種から第4種に分類した。第1、3、4種の微動は1Hzより高周波の波であり、第2種微動は周期3.5～8秒の波である。それぞれの微動は、特徴ある振動波形を持ち、表面的な火山活動との関連が調べられてきた。1994年から行われてきた火口近傍での広帯域地震観測の結果、静穏期においても、阿蘇火山は基本周期約15秒の波（長周期微動）を発していることが明らかになった。この波のスペクトルは、15秒を基本周期とし、7.5、5、3秒にもピークを持ち、何らかの共鳴体の固有振動であることが示唆された。7.5、5秒の成分はSassaの第2種微動に対応したものであると考えられている(Kaneshima et al., 1996; Kawakatsu et al., 2000)。

3.2 モデルについて

Yamamoto et al. (1999) は火口近傍における稠密な地震観測から、長周期微動振幅の空間的分布を求め、その分布が中岳第一火口直下に存在する火口列とほぼ平行なクラック状の振動源モデルで説明できることを明らかにした。そのクラック幅は1.0 kmで、地表の下300～400 mから垂直に約2.5 kmの深さまで延びている(Fig.2)。

一方、Chouet (1986) は、流体に満たされたクラック (fluid-filled crack) 内を非常にゆっくりした速度で伝わる波 (crack wave) の存在を明らかにしたが、Yamamoto (2005) は fluid-filled crack モデルの振動様式を、境界積分法を用いて計算する方法を開発し、観測された長周期微動の特徴である、倍音の配列、基本周波数、減衰の大きさから、クラックの形状（長さ と 厚さの比：アスペクト比）やクラック内外の物性（密度比や速度比）を推定した。

長周期微動の特徴である、基本周期が 15 秒であること、7.5 秒、5 秒にもスペクトルピークをもつこと、減衰 (Q 値) は約 5 であることをすべて説明できるクラックモデルは、長さ 2.5 km、幅 1 km、厚さ 25 m で、クラック内部の流体の音速は 400 m/s である。地下の温度や圧力を考慮に入れると、クラック内部の流体は、ガスと若干の粒子の混合物、あるいはやや密度が大きめの混合ガスである、というものである。

Fluid-filled crack の振動の周期は、クラックの形状 (特にアスペクト比)、クラック内外の物性 (速度比や密度比) によって大きく変化する (たとえば Kumagai et al., 2002)。このうち、火山体で大きく変化するのは、クラック内部の流体の音速である。クラック内部の流体の音速が大きくなれば、振動の周期は短くなり、小さくなれば長くなる。したがって、観測された振動の周期の変化からクラック内部の物性の変化を見積もることが可能である。

第4章 データ

阿蘇火山では先に述べたように 1994 年から広帯域地震計が設置されるようになり、現在では中岳火口周辺に 8 点の広帯域地震観測点がある(Fig.3)。まず、1994 年に NAR、TAK、SUN に STS-2 (固有周期 120 秒) が、1998 年には HND に STS-1 (固有周期 360 秒) が設置された。そして、2004 年 4 月には NAR2、MOUNT に CMG-40T (固有周期 30 秒)、2004 年 10 月には火口東、火口縁に CMG-40T が設置された。

本研究では、中岳第一火口から南西約 1 km 地点の HND で観測された上下動成分のデータを主に用いた。HND の地震計は地下 30 m のトンネル内にあるため、観測される波形の S/N は非常に良い。HND の地震計出力は、2 つの方法で記録されている。一つは、Reftek 記録計によるハードディスクに現地収録する方法で、もう一つはデータを無線テレメータで火山研究センターに送って収録する方法である。いずれも A/D の分解能 24 bit、サンプリング周波数は 20 Hz である。テレメータのデータには、雷などのスパイクノイズが混入することがあるため、解析には主として Reftek 記録計により現地で収録されたデータを用いる。解析を行ったのは、2002 年 11 月 11 日から 2004 年 7 月 20 日までである。ただし、2003 年 2 月下旬から 5 月、および 2003 年 9 月下旬から 12 月にかけては、機器異常によって現地収録のデータが得られなかったため、スパイクノイズがないことを確認した上で、テレメータされたデータで代用した。

第5章 長周期微動の時間変化

5.1 発生頻度の時間変化

5.1.1 相関係数による微動抽出法

長周期微動の活動度を調べるために、タイムウィンドウが 40 秒の基準波形を作成して、相関係数による微動の抽出を試みた。基準波形は S/N の良い 2002 年 12 月 5 日の波形(Fig.4)に 10 秒から 30 秒のバンドパスフィルターを施し(Fig.5)、36 個の長周期微動を取り出してスタックしている(Fig.6)。2002 年 11 月から 2004 年 7 月までのバンドパスフィルター (10-30 秒) を施したデータに対して、基準波形を 1 秒ずつずらして、相関係数を計算した。その結果の例を Fig.7 に示す。

2002 年 11 月は非常に相関係数が高く、0.95 以上のものが多い。それに比べて、2003 年 7 月、12 月は相関係数が低いことが分かる。相関係数が低い理由の一つは、長周期微動の周期が基準とした波形とは異なることである。2003 年 7 月の微動と 2002 年 12 月の微動では周期が異なっている可能性が高い。また、2004 年 5 月は 2002 年と同じように相関係数が高くなっている。

長周期微動を抽出するには相関係数がどの値以上のものを長周期微動とするのか、その下限値を決める必要がある。そこで、実際の波形と照らし合わせて適当な下限値を求める。2002 年 12 月 5、8 日の波形 (バンドパス 10-30 秒) をそれぞれ Fig.5、Fig.8 に示す。図中の長周期微動を実際に目で見て数えたところ、相関係数が 0.93 以上でカウントすると、数がほぼ一致した。

しかし、長周期微動を 0.93 以上で切り出すと、上で述べたように 2003 年 7 月、12 月は相関係数が低く、長周期微動が多数もれおちる。また、相関係数の下限値を低くした場合、振幅が小さい単なる揺れを拾う可能性がある。

以上のことから、相関係数のみを用いて長周期微動を抽出することは基準となる波形とは異なる周期を持つ微動のもれおちが多く、良い手法とはいえない。

5.1.2 相関係数と振幅による微動抽出法

そこで、相関係数と振幅をもとに、長周期微動を抽出する。相関係数だけでは長周期微動を抽出できないのは上で述べたとおりである。また、振幅だけで長周期微動を切り出すと、振幅の大きい地震まで取り出すことになる。

よって、相関係数と振幅に関して以下の基準を設けて長周期微動の抽出を試みた。

- (1) 相関係数 0.8 以上かつ 40 秒間最大振幅 $0.25 \mu \text{ m/s}$ 以上
- (2) 相関係数 0.93 以上

ここで、(1) あるいは (2) を満たすものを長周期微動とする。

実際の波形と相関係数を対応させた図を Fig.9 に示す。相関係数を下げ、振幅の情報を加えることで、基準波形と少し異なる波形の長周期微動の抽出に成功し、長周期微動の発生頻度などを求めることが可能となった。これについては次節以降で詳しく考察する。

5.1.1 で述べたとおり、長周期微動は時期によって異なる波形が現れていることが確認できた。本章では、長周期微動がどのように時間変化しているのか、長周期微動の振幅、発生頻度、波形のスペクトルなどをもとに考察する。

5.1.3 長周期微動の発生頻度から見た時間変化の様子

5.1.2 で述べた手法を用いて長周期微動を抽出し、一日あたりの発生回数をカウントし、図示したものが Fig.10(a)である。また抽出した長周期微動の相関係数を一日平均したものを Fig.10(b)に示す。これらの図からわかるように、2002 年 11 月から 2003 年 2 月までは長周期微動が一日 300~600 個発生している。この時期は、微動の相関係数の平均値は約 0.94 で、相関係数の大きい波形しか観測されていないことから、ほぼ同じメカニズムで長周期微動が発生していたと考えられる。ところが、2003 年 4 月から 6 月は、発生回数が一日 100 個以下となっており、長周期微動がほとんど発生していない。また微動の振幅も小さく、微動の活動が弱まっていた時期といえる。しかし、

2003年7月の土砂噴出の直前から発生回数が急激に増え、一日約800個になった。この状態が12月まで続いているが、相関係数は低く、観測されている微動波形は2002年12月のものとは異なる。次節ではその波形がどのように異なるのかを周波数領域で見えていく。

5.2 スペクトルの時間変化

まず、観測されたある日の生の波形データから、約7分間ごとにFFTによりスペクトルを算出し、24時間分スタックし、平均したものをその日のスペクトルとした。

Kaneshima et al. (1996) や Yamamoto (2005) によれば、長周期微動は15秒、7.5秒にスペクトルピークがあるが、いくつかのスペクトルを調べたところ、時期によってピークの周期が変化していることが認められた (Fig.11 (a))。スペクトルの変化を定量的に調べるために、スムージングしたスペクトルに対して、以下の3つの帯域 (Fig.11(b)) における最大値を求めた。

- (1) 6.9秒から9.1秒
- (2) 9.3秒から29秒
- (3) 14秒から29秒

得られたピーク周波数を Fig.12 に示す。この図を見るとピークの周波数は大きく時間変動していることがわかる。一番長い周期のものだけを取り上げると、2002年11月から2003年2月は16~18秒であるが、2003年3月から6月はやや長周期側の17~20秒となる。2003年7月には急に短周期の12秒付近になり、その後、徐々に長周期に戻り、2004年5月は17秒である。2003年7月から12月を除くと、基本周期は15秒より長周期にある。

Table はピーク周波数をもとに微動の時期を分類したものである。2003年7月の土砂噴出の頃に1番目、2番目のピークがともに短くなった。そして、その後、徐々に長

くなっていった。スペクトルのピークは 15 秒、7.5 秒付近のほかに、10 秒付近にも見られる時期があった。これは相関係数が大きい時期に対応している。しかし、2003 年 3 月頃に 10 秒モードは見られなくなる。この時期は相関係数の平均値が少し下がり 0.9 となっていた。10 秒モードは 2004 年 1 月頃、再び現れる。この時期の相関係数の平均値は 2002 年 11 月と同じ 0.94 である。この 10 秒モードの存在はこれまでには知られておらず、今回の解析でその存在が初めて確認された。このモードについては最後に考察する。

Table : ピーク周波数

| 期間 (月-年) | 長周期側から 1 番目のピーク | 2 番目のピーク | 3 番目のピーク | 波形の例 | スペクトル図 |
|---------------|-----------------|----------|----------|-----------|--------|
| Nov-02~Feb-03 | 16~18 秒 | 10~11 秒 | 7.7~8 秒 | Fig.13(a) | Fig.14 |
| Mar-03~Jun-03 | 17~20 秒 | 7.6~8 秒 | | Fig.13(b) | |
| Jul-03~Dec-03 | 12~15 秒 | 7~7.5 秒 | | Fig.13(c) | |
| Jan-04~Jul-04 | 15~17 秒 | 10~12 秒 | 7.6~8 秒 | Fig.13(d) | |

Q 値

長周期微動の減衰の様式が変化しているのか調べるために、スペクトルから Q 値を求める。振幅スペクトルがピークとなるときの周波数を ω_0 、振幅がピークの値の $1/\sqrt{2}$ 倍になるときのスペクトルピーク幅を $\Delta\omega$ とすると、Q 値は、

$$Q = \omega_0 / \Delta\omega$$

と表すことができる(Aki and Richards, 2002)。したがって、ピーク幅 $\Delta\omega$ を求めることによって Q 値を算出する。

そこで、まず、スムージングしたスペクトルに対して、残差が最小になる放物線を当てはめた。次に放物線からピーク幅 $\Delta\omega$ を求め、Q 値を計算した。求められた Q 値の時間変化を Fig.15 に示す。解析した全期間にわたって Q 値はほとんど変化していない。

Yamamoto (2005) によると、阿蘇火山の長周期微動の場合は、クラックの形状やクラック内外の物性が変化し基本周期などが変わったとしても、 Q 値には影響がなく変化しない。今回の結果はこれと調和的である。

5.3 考察

5.3.1 振幅比の変化

微動のモード間の振幅比は、励起の場所によって変化することが数値計算により確かめられている (Ferrazzini et al., 1990)。そこで、長周期微動の基本モード (10-30 秒) と 2 次モード (6-9 秒) の振幅比を求め、微動の励起源の変化が検出できるかどうかを調べる。しかし、基本モードとした帯域は 10-30 秒なので、上で述べた 10 秒のモードを含んでいる。10 秒モードが 2 次モードである可能性もあり、基本モードと 2 次モードの振幅比を正確に見ることができない場合がある。したがって、10 秒モードが現れていない時期 (2003 年 3 月から 12 月) について振幅比を求める。

5.1.2 で述べた方法を用いて長周期微動 (10-30 秒) を 40 秒間抽出する。取り出した長周期微動 (10-30 秒) と同じ時刻の 2 次モードの長周期微動 (6-9 秒) を 40 秒間切り出し、それぞれ最大値を求める。Fig.16 は、横軸が基本モードの最大振幅、縦軸が 2 次モードの最大振幅として、長周期微動 2000 個プロットしたものである。そして、一つ一つの長周期微動に対して、基本モードと 2 次モードの振幅比を求め、2000 個ごとに平均値と標準偏差を計算した (Fig.17)。ばらつきの大きい時期があるが (たとえば 2003 年 8 月 8 日頃)、これは脈動の影響を受けているためである。脈動の影響を考慮すると、2003 年 3 月から 12 月までは、振幅比はほとんど変化していない。したがって、この時期、長周期微動の励起源は変化していないと考えられる。Yamamoto (2005) は長周期微動の励起源をクラックの上端と推定しており、変化するとは考えていない。つまり、Yamamoto (2005) を支持する結果となった。

5.3.2 土砂噴出

本研究で用いたデータの期間中、2003年7月10日、2004年1月14日に土砂噴出が発生した。その際の長周期微動の様子を考察する。

振幅の変化を調べると、2003年7月頃に急激に大きくなっている (Fig.18)。土砂噴出の発生した前後10日を詳しく見てみると、2003年7月10日の土砂噴出の1~2日前から振幅が増大しているのがわかる (Fig.19(a))。発生頻度も土砂噴出の発生直前から急激に増加している (Fig.10)。つまり、土砂噴出によって発生頻度や振幅が増大したのではなく、発生頻度や振幅が大きくなってから土砂噴出が発生したことがわかる。スペクトルについては、直前か直後かははっきりとは分からないが、土砂噴出の頃に変化し、ピークが短周期側に移った (Fig.12)。

2003年7月以降、発生頻度、振幅とも大きい状態が続いていた。その状態の中で、2004年1月14日の土砂噴出が発生した。2004年1月の土砂噴出の場合には、2003年7月の時のような振幅の変化は見られなかった (Fig.19(b))。また、発生頻度、スペクトルにも変化が見られなかった。

土砂の噴出量はそれぞれ41トン、32トン程度と見積もられており (宮縁・他, 2005)、2003年7月のほうが少し大きいだけである。宮縁・他(2005)は、これらの土砂噴出は火山灰混じりのガスが大きな爆発を伴わずに湯だまりを突き抜けた現象であると解釈している。1994年に発生した土砂噴出では、クラック全体の膨張・収縮と考えられる地面の変位が観測されている (Kawakatsu et al., 2000)。しかし、2003年7月、2004年1月の土砂噴出では、そのような変位は観測されておらず、これらの土砂噴出はクラックでの大きな圧力増加を伴わずに浅部で発生したと考えられる。

5.3.3 ピーク周波数の変化 (2003年7月から2003年12月)

Yamamoto (2005) によれば、基本モードの周波数はクラック内部の流体の物性の変化に敏感である (Fig.20)。そこで、2003年7月から2003年12月までのスペクトル

ピークの変化に着目し、クラック内部の流体物性の変化が検出できるかどうかを議論する。

Fig.12 に示されているように、2003 年 7 月には周期 12 秒付近にピークがあるが、12 月にかけて徐々に長周期側へ移行し、15 秒になっている。2003 年 7 月以降は、COSPEC を用いた二酸化硫黄 (SO_2) の放出量測定が九州大学により実施されている (九州大学 2004)。その結果によれば、2003 年 7 月 31 日の測定では、 $2598 \pm 1026 \text{ton/day}$ であったが、2003 年 12 月までの放出量は単調に減少している (Fig.21)。

一般に fluid-filled crack では基本周波数が長周期に移ることは、クラック内部の流体の速度が小さくなることで説明できる。逆に流体の速度が大きくなれば基本周波数は短くなる。Kumagai and Chouet (2000) や Yamamoto (2005) は H_2O と CO_2 などの混合気体やガスと粒子の混合物で満たされたクラックの振動特性を考察している。地下 1.0km での圧力下で、気体成分の割合や温度をかえて、クラック内部の流体の音波速度や密度を計算し、それらの計算値を用いて予想される振動の基本周波数を求めている。 SO_2 と粒子の混合物の場合、 SO_2 の重量比が大きくなると混合物の音波速度が大きくなり、 H_2O と SO_2 の混合気体の場合は SO_2 の重量比が大きくなると、逆に混合気体の音波速度が小さくなる (Fig.22)。Yamamoto (2005) の計算結果によると、クラックのアスペクト比とクラック壁を構成する固体の弾性波速度が一定と仮定すると、流体の音波速度が大きくなれば、また、流体の密度が小さくなれば振動の基本周期は短くなる (Fig.20)。2003 年 7 月から 2003 年 12 月までの振動の基本周期は大きくなっているため、同時期のクラック内の流体の速度は小さくなっていったと考えるのが妥当である。火口からの SO_2 放出量の減少が、クラック内の SO_2 の減少に対応すると見なせば、流体の音波速度が小さくなっていることは、 H_2O と SO_2 の混合気体の場合ではなく、 SO_2 と粒子との混合物がクラックを満たしている場合にのみ説明できる。

クラックを満たしている流体が混合気体であるのかガスと粒子の混合物であるのか

は、微動の基本周期だけでは判断できない。しかし、このように基本周期の時間変化を調べ、他の測定量と比較することによって、定性的ではあるものの、クラック内部の流体に対する制約を与えることができ、モデルをより具体的で、現実的なものにする事ができる。

また、2003年7月10日の土砂噴出の頃に微動の周期が急に短くなったことは、土砂噴出の直前にSO₂の放出量が一時的に増えたことを表している可能性がある。そして、長周期微動の振幅も増大し、発生頻度も大幅に増えたのかもしれない。その後SO₂放出量が少しずつ減っていき、微動の周期が徐々に長くなっていったと考えられる。

5.3.4 10s モードの存在について

2002年11月から2003年2月、および2004年1月から5月上旬まで、10秒付近にもピークがある(Fig.12)。この10秒モードは遠地地震のないときにも観測されており、地震の影響ではないと考えられる。また、パーティクルモーションはほぼ火口方向を向く(Fig.23)ことから脈動である可能性も低く、長周期微動のピークであると考えられる。これまで10秒のピークは全く知られていなかったが、本研究で解析した期間では長期間安定して存在している。10秒モードが観測された時期は、相関係数が高い時期に相当する。基準波形が2002年12月5日から作成されたものなので、10秒モードの影響が大いに含まれているからである。10秒モードが見られる2004年1月～5月も相関係数が高い。

10秒モードの候補の一つとして、クラックの横方向の振動が上げられる。Yamamoto (2005) ではクラックの長さ(ほぼ鉛直の向きに2.5km)方向に伝わる crack wave がモデル化されているが、クラックの幅(北北西-南南東)方向に伝わる波も存在する(たとえば Ferrazzini et al., 1990)。しかし、Yamamoto et al. (1999) で求められたクラックの幅は1.0kmであり、長さ方向の基本周期が15秒であることを考慮すると、周期

10 秒の微動を生じさせるためにはもう少し幅の広いクラックが必要である。クラックの幅が変化したかどうかを確かめるためには、稠密な地震観測を行ない、長周期微動の振幅の空間分布を求める必要があるだろう。

10 秒モードをクラックの長さ方向の 2 次モードの振動であると考えられることも可能である。この場合 7.5 秒モードは 3 次モードとなる。しかし、そのためには Yamamoto (2005) で得られたクラックモデルより、アスペクト比が小さく、クラック内の流体の音波速度が小さい必要がある。今後の課題として、Yamamoto(2005)で用いられたパラメータより幅の広いレンジでの数値計算を行うとともに、10 秒モードの時間変化も説明することのできるモデルを構築することが必要であろう。

第6章 まとめ

2002年11月から2004年7月までの長周期微動の発生様式の時間変化を調べた。

Fig.24 に解析した発生頻度、相関係数平均値、基本周期、Q 値、RMS 振幅平均値をまとめると、解析の結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 2002年11月から2003年6月および2004年1月から7月に発生した長周期微動の基本周期は、過去の研究で指摘されていた15秒より若干長い。
- (2) 2003年7月10日の土砂噴出の頃に長周期微動の基本周期が短くなり、それが2003年12月にかけて徐々に長くなっていった。また、微動の振幅、発生頻度とも2003年7月の土砂噴出の直前に増大した。
- (3) 2004年1月14日の土砂噴出の前後では、長周期微動の周期の変化は見出せない。
- (4) 2003年6月から12月までの、長周期微動の基本モードと2次モードの振幅比はほぼ一定であった。
- (5) 周期10秒の振動モードが存在する。しかし、今のところ、これを説明するモデルは存在しない。
- (6) 2003年7月から12月にかけてスペクトルピークが長周期に変化したことは、クラック内の流体の音速が小さくなっていくこと、具体的にはSO₂ガスと若干の粒子で満たされたクラック内部のSO₂が減少していくことで、定性的に説明できる。

謝辞

本研究を進めるにあたり、平素から懇切丁寧なご指導をいただいた京都大学火山研究センターの大倉敬宏助教授に深く感謝申し上げます。数多くの貴重なご助言をいただいた田中良和教授、鍵山恒臣教授、須藤靖明助教授、防災研究所火山活動研究センターの石原和弘教授、井口正人助教授に厚く御礼申し上げます。また、阿蘇に滞在中ご指導いただいた火山研究センターのスタッフの皆様に御礼申し上げます。九州大学の金嶋聰教授、東北大学の山本希助手、東京工業大学大学院生の高木憲朗さんには阿蘇山での作業に同行させていただき、観測やデータ解析について数多くの有益なご教示をいただきました。深く感謝いたします。最後に、6年間の学生生活を遠くから温かく見守り、支えてくださった家族に心より感謝いたします。

引用文献

Aki, K., and Richards, P. (2002) *Quantitative Seismology*, second edition, University Science books, Sausalito, California.

Chouet, B. (1986) Dynamics of a fluid-driven crack in three dimensions by the finite difference method, *J. Geophys. Res.*, 91, (B14), 13967-13992.

中禮正明(1985) 阿蘇山の火山性長周期微動の振動様式と振幅別頻度分布について, *火山*, 30, 71-80.

Ferrazzini, V., Chouet, B., Fehler, M., Aki, K. (1990) Quantitative analysis of long-period events recorded during hydrofracture experiments at Fenton Hill, New Mexico, *J. Geophys. Res.*, 95 (B13), 21871-21884.

Kaneshima, S., Kawakatsu, H., Matsubayashi, H., Sudo, Y., Tsutsui, T., Ohminato, T., Ito, H., Uhira, K., Yamasato, H., Oikawa, J., Takeo, M., Iidaka, T. (1996) Mechanism of phreatic eruptions at Aso volcano inferred from near-field broadband seismic observations, *Science*, 273, 642-645

Kawakatsu, H., Kaneshima, S., Matsubayashi, H., Ohminato, T., Sudo, Y., Tsutsui, T., Uhira, K., Yamasato, H., Ito, H., Legrand, D. (2000) Aso94: Aso seismic observation with broadband instruments, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 101, 129-154.

久保寺章 (1964) 阿蘇火山の微動について (I) 第 2 種火山性微動の波動特性とその震動源の解明, 火山, 9, 87-98.

Kubotera, A. (1974) Volcanic tremors at Aso Volcano in *Physical Volcanology*, pp. 29-47, Elsevier.

Kumagai, H. and Chouet, B. (2000) Acoustic properties of a crack containing magmatic or hydrothermal fluids, *J. Geophys. Res.*, 105 (B11), 25493-25512.

Kumagai, H., Chouet, B., Nakano, M., (2002) Temporal evolution of a hydrothermal system in Kusatsu-Shirane volcano, Japan, inferred from the complex frequencies of long-period events, *J. Geophys. Res.*, 107 (B10), 2236 (ESE9).

九州大学大学院理学研究院地震火山観測研究センター (2004) 阿蘇火山における地球化学観測 (~2004年1月), 火山予知連絡会会報, 87, 83-87.

Legrand, D., Kaneshima, S., Kawakatsu, H. (2000) Moment tensor analysis of near-field broadband waveforms observed at Aso volcano, Japan, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 101, 155-169.

宮縁育夫, 池辺伸一郎, 渡辺一徳 (2005) 阿蘇火山中岳で 2003年7月10日と 2004年1月14日に起こった湯だまりからの火山灰噴出, 火山, 50, 227-241

Sassa, K. (1935) Volcanic micro-tremors and eruption-earthquakes (Part I of the geophysical studies on the volcano Aso), Mem. Coll. Sci. Kyoto Univ. Series A., 18, 255-293.

Yamamoto, M. (2005) Volcanic fluid system inferred from broadband seismic signals, Doctor thesis of Tokyo Univ.

Yamamoto, M., Kawakatsu, H., Kaneshima, S., Mori, T., Tsutsui, T., Sudo, Y., and Morita, Y. (1999) Detection of a crack-like conduit beneath the active crater at Aso volcano, Japan, Geophys. Res. Lett., 26, 3677-3680.

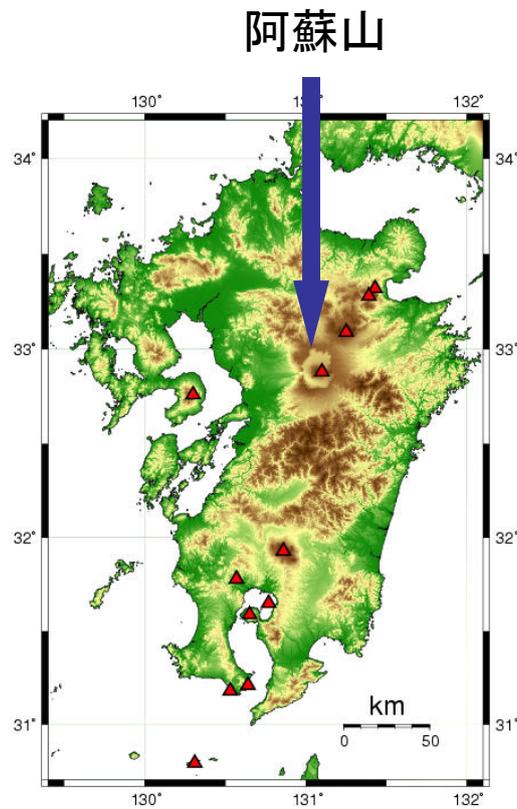


Fig.1 阿蘇火山の位置図。九州の中央に位置する。

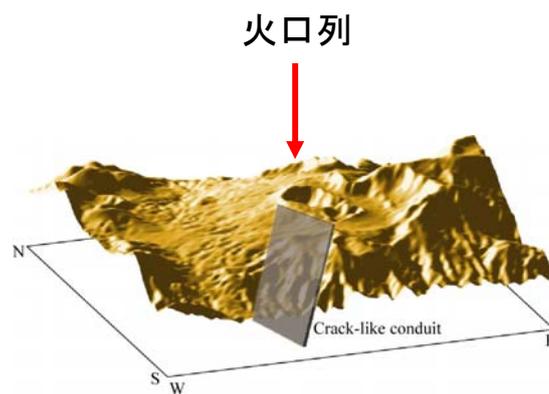


Fig.2 阿蘇中岳火口直下のクラック状火道モデル (Yamamoto et al., 1999 に加筆)。火口列にほぼ平行で幅 1.0 km、鉛直に深さ約 2.5 km まで延びている。

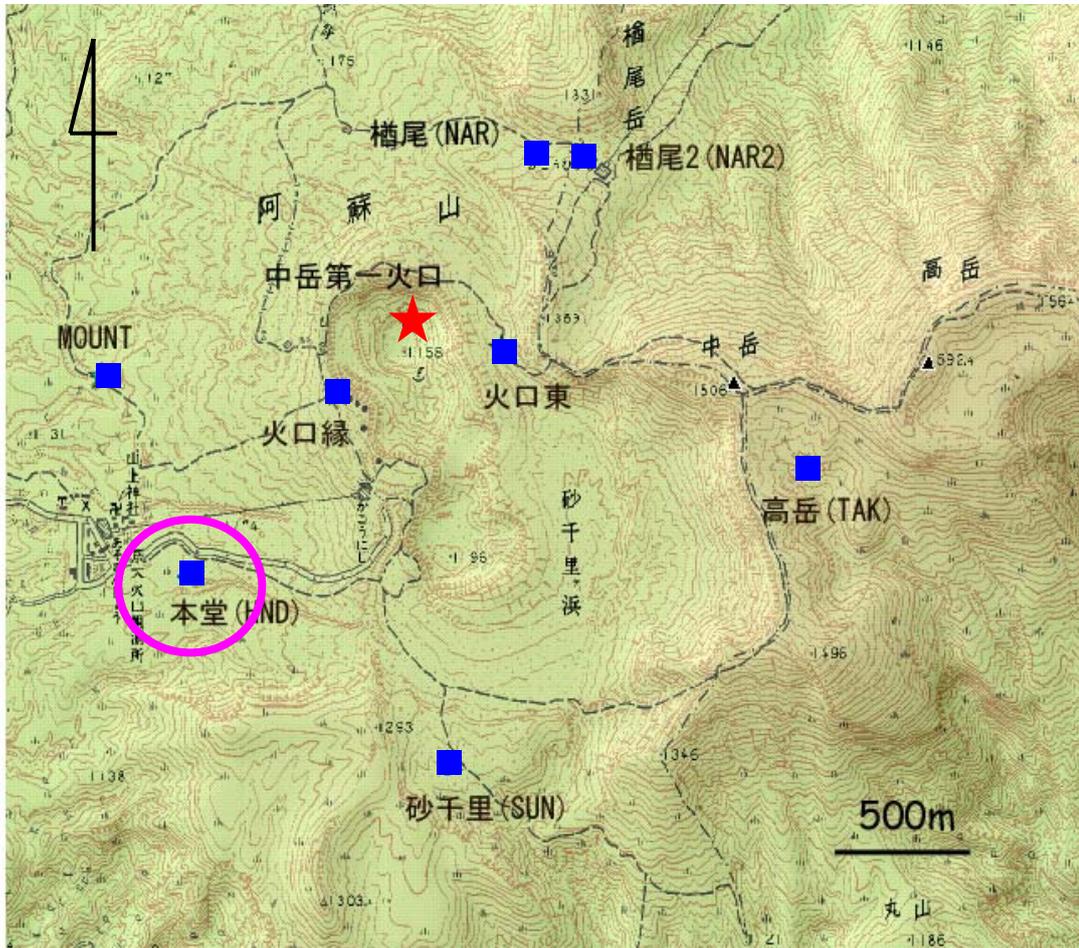


Fig.3 阿蘇中岳周辺の広帯域地震観測点の分布図。★は中岳第一火口、■は広帯域地震観測点。本研究では○で示した本堂のデータを主に用いた。

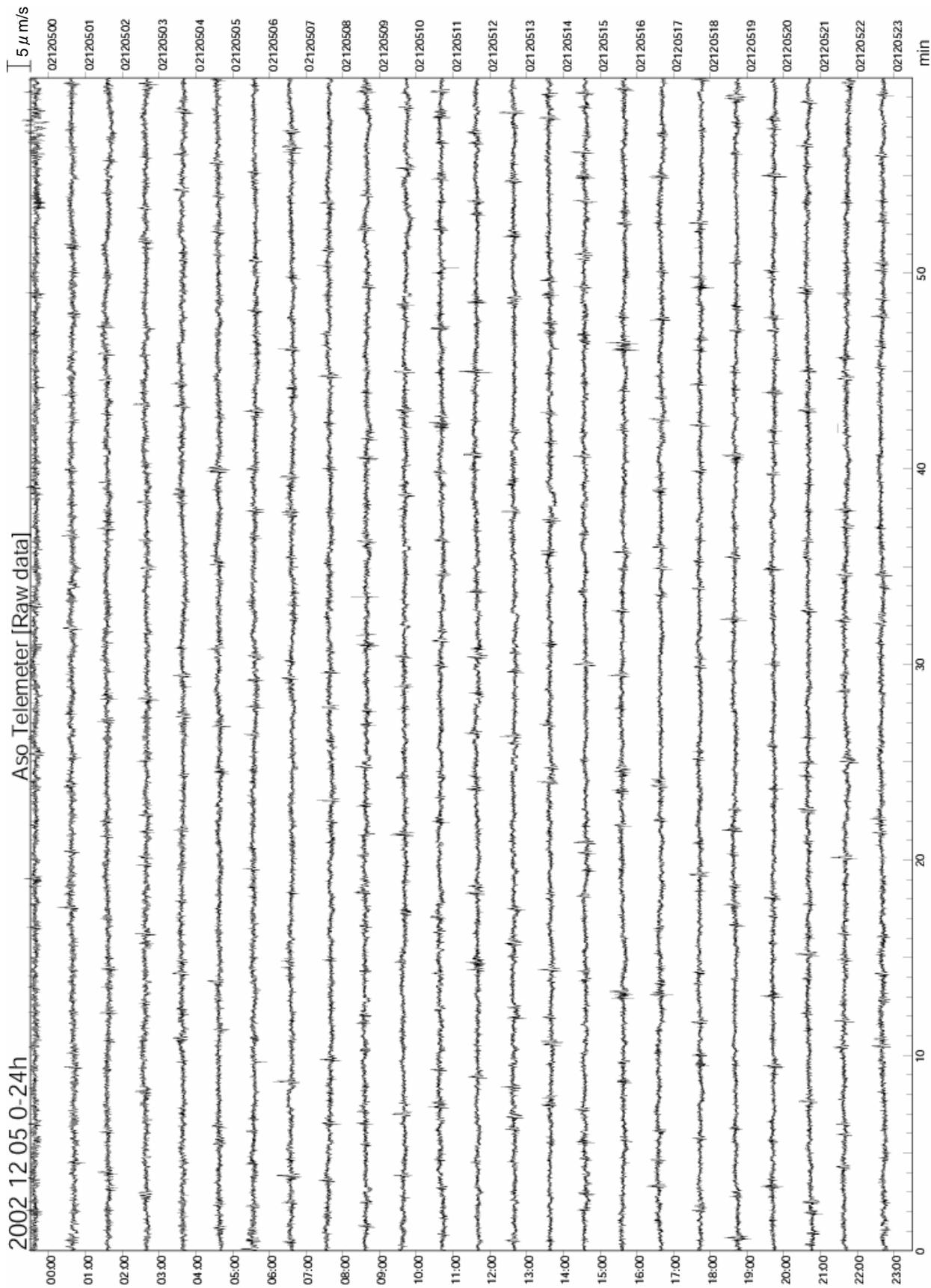


Fig. 4 HNDで観測された2002年12月5日の1日分速度波形 (テレメータ)

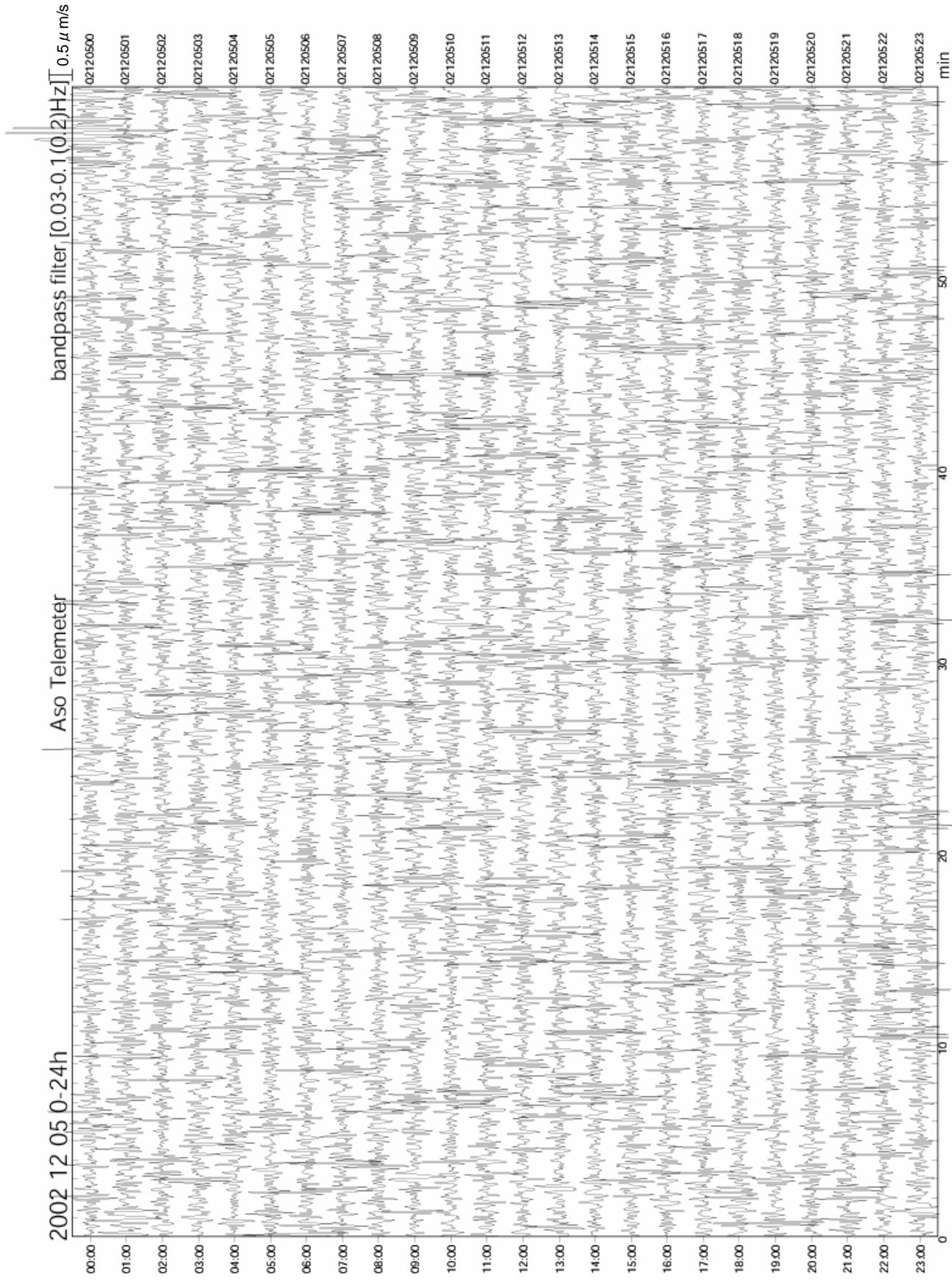


Fig. 5 HNDで観測された2002年12月5日の1日分速度波形（テレメータ）に10-30秒のバンドパスフィルターを施した波形。

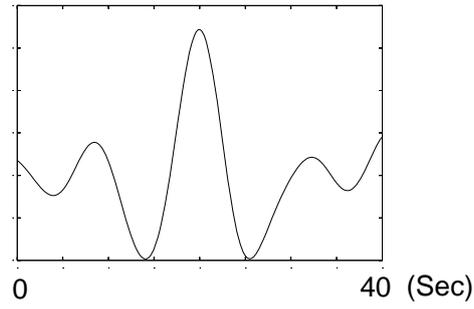


Fig.6 2002年12月5日の長周期微動36個をスタックして作成した基準の波形。

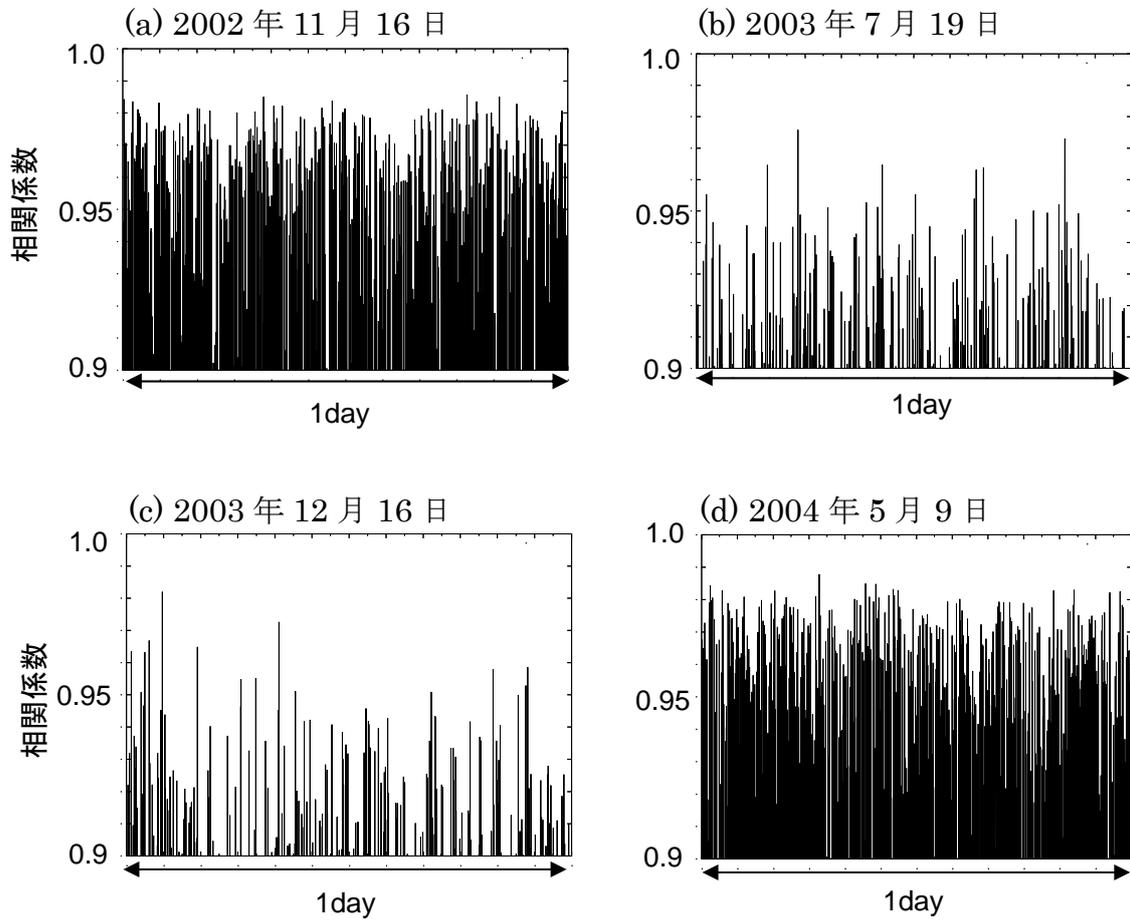


Fig.7 一日分の相関係数 (0.9 以上) の例。

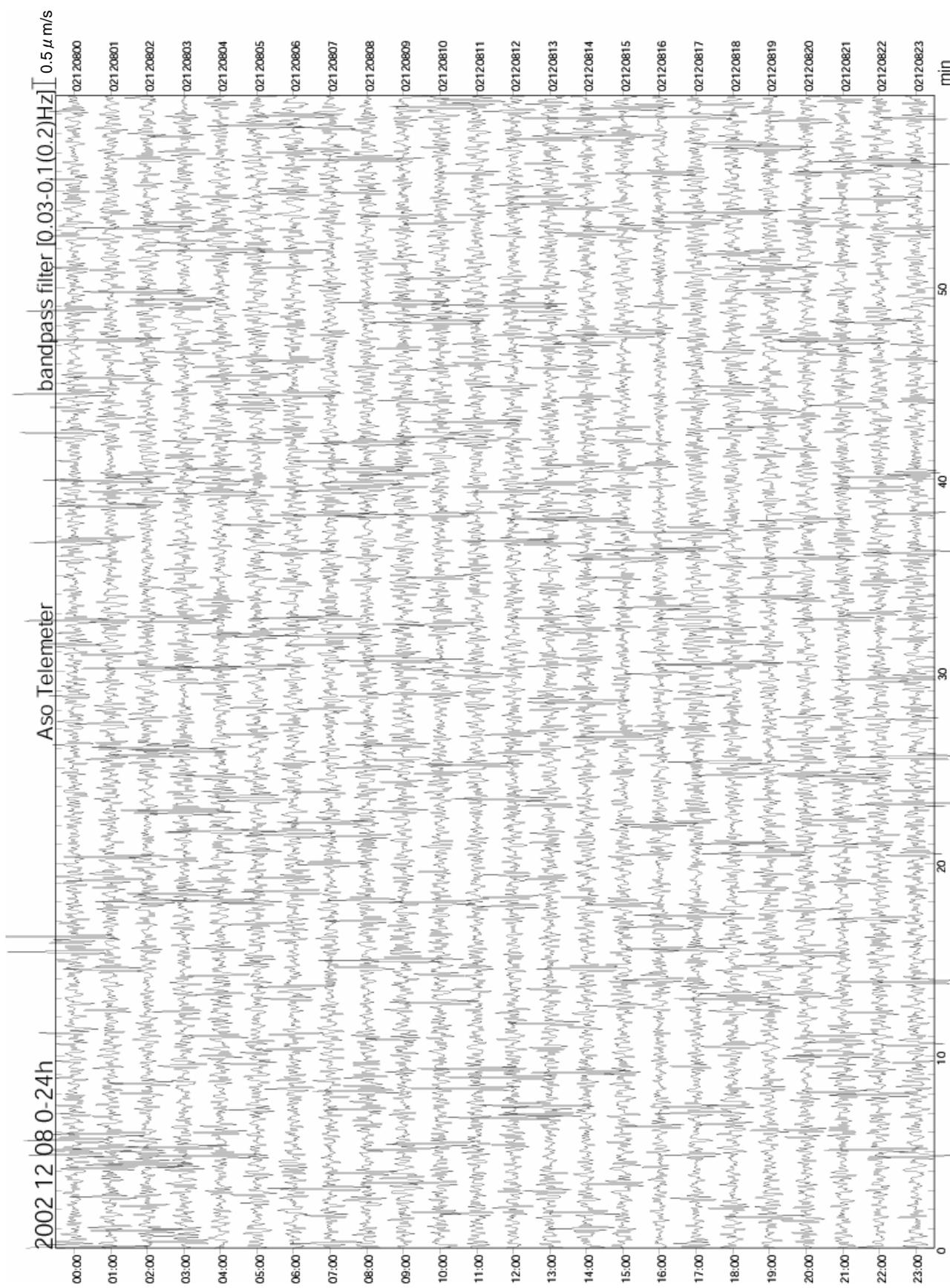


Fig. 8 HNDで観測された2002年12月8日の1日分速度波形（テレメータ）に10-30秒のバンドパスフィルターを施した波形。

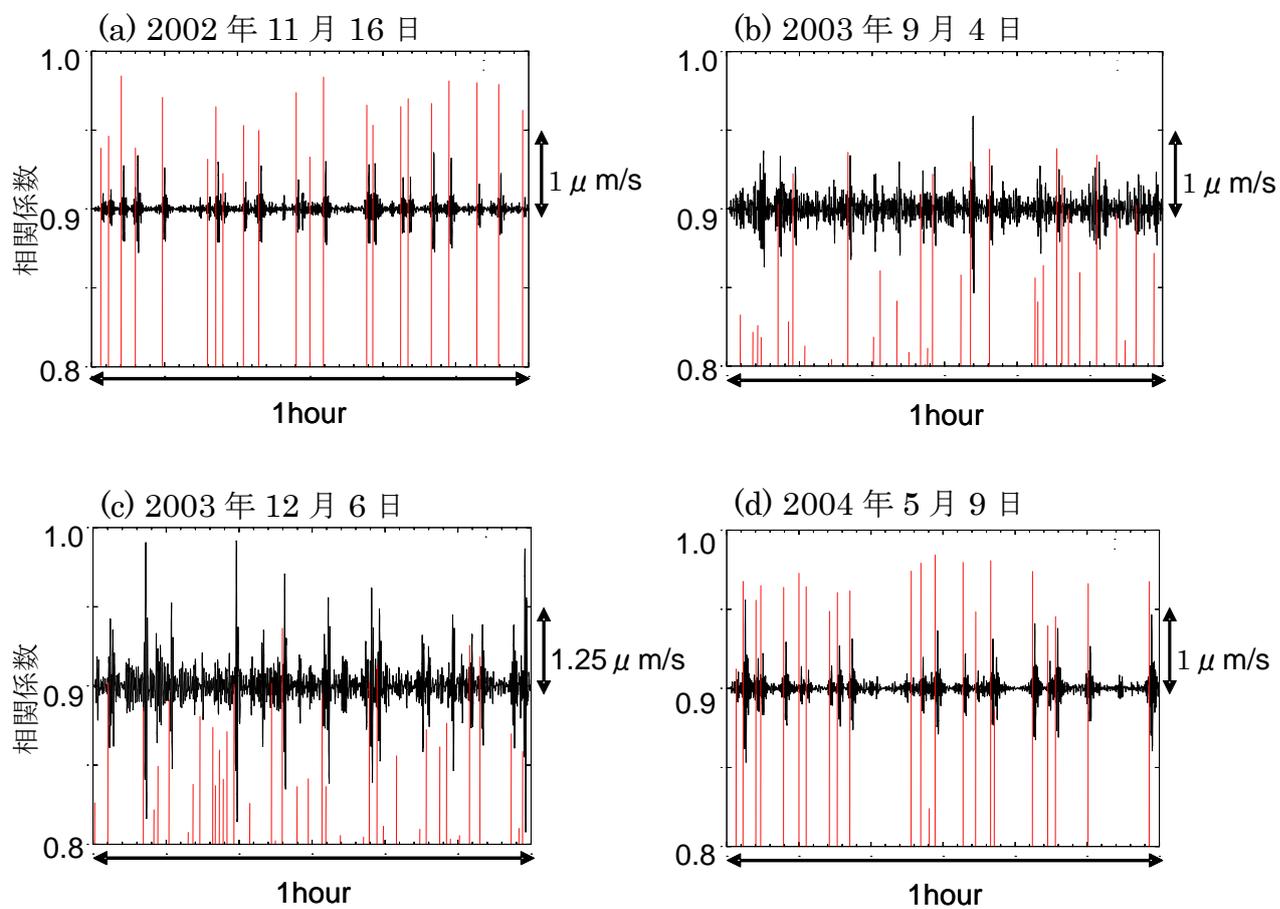


Fig.9 10-30 秒のバンドパスフィルターを施した波形（黒）と微動の抽出条件を満たしたときの相関係数（赤）。

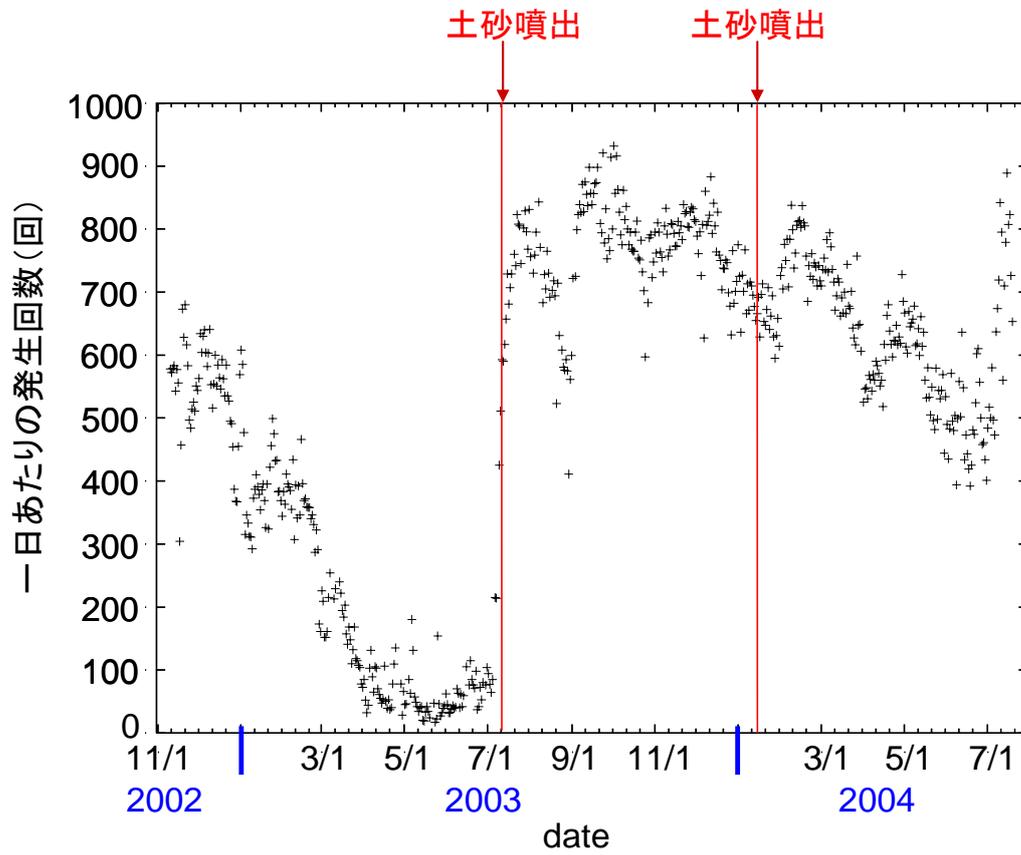


Fig.10 (a) 抽出した長周期微動の一日あたりの個数。
土砂噴出が発生した 2003 年 7 月 10 日と 2004 年 1 月 14 日を ↓
で示す。

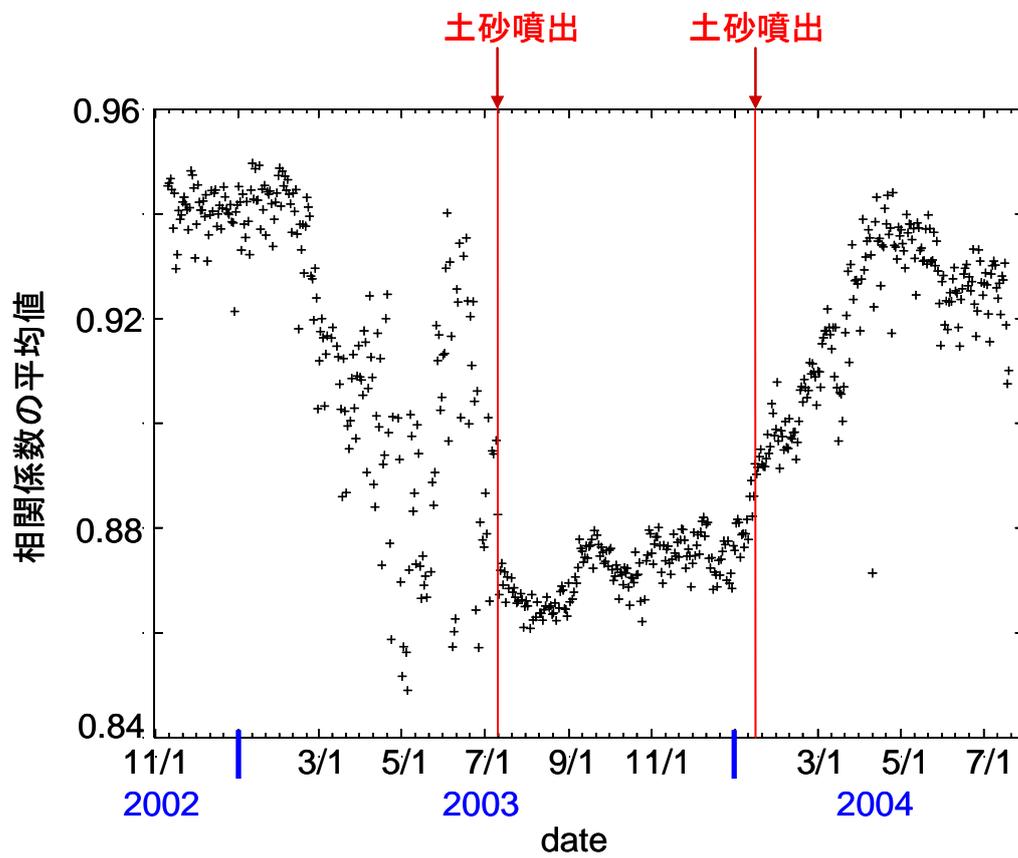


Fig.10 (b) 抽出した長周期微動の相関係数を一日平均したもの。
土砂噴出が発生した 2003 年 7 月 10 日と 2004 年 1 月 14 日を ↓
で示す。

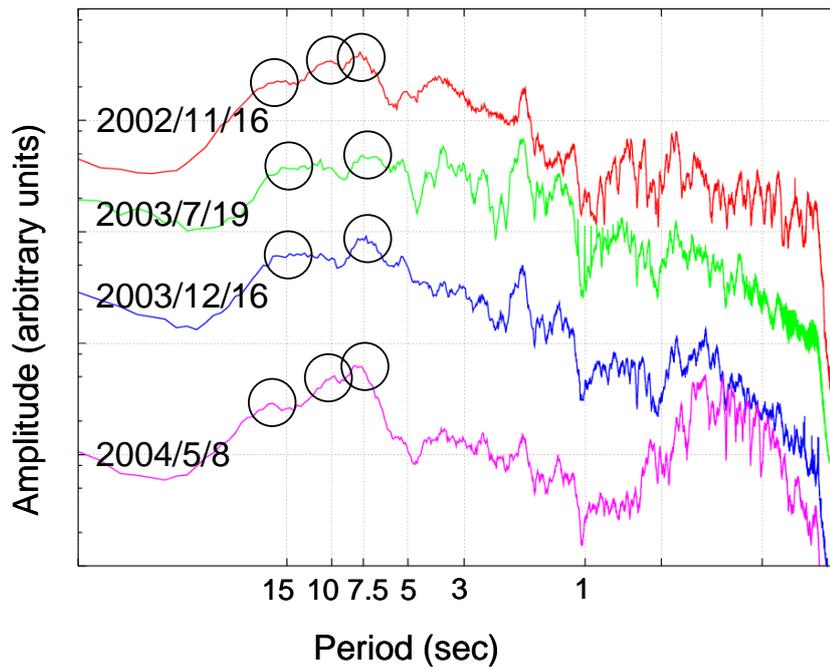


Fig.11 (a) HND の上下動成分約 7 分間のスペクトルを 24 時間分スタックし、平均したもの。○はピーク。

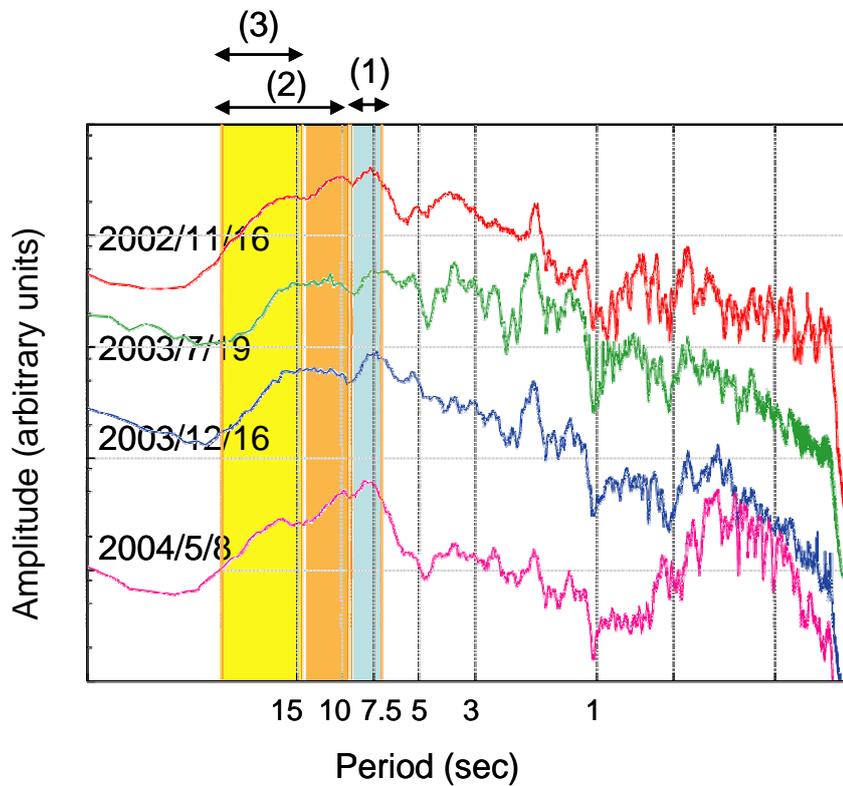


Fig.11 (b) 最大値を求めた範囲。
 (1) 6.9~9.1 秒 (2) 9.3~29 秒 (3) 14~29 秒

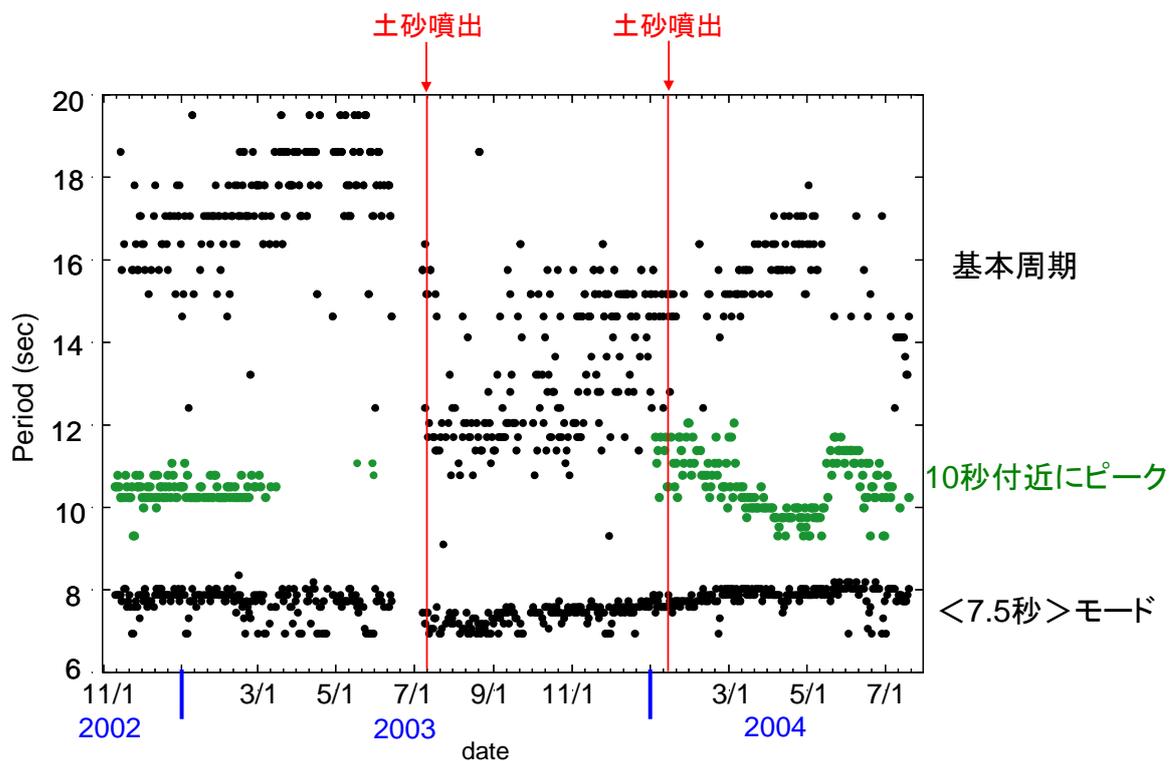


Fig.12 求められたスペクトルピーク。
土砂噴出が発生した 2003 年 7 月 10 日と 2004 年 1 月 14 日を ↓ で示す。

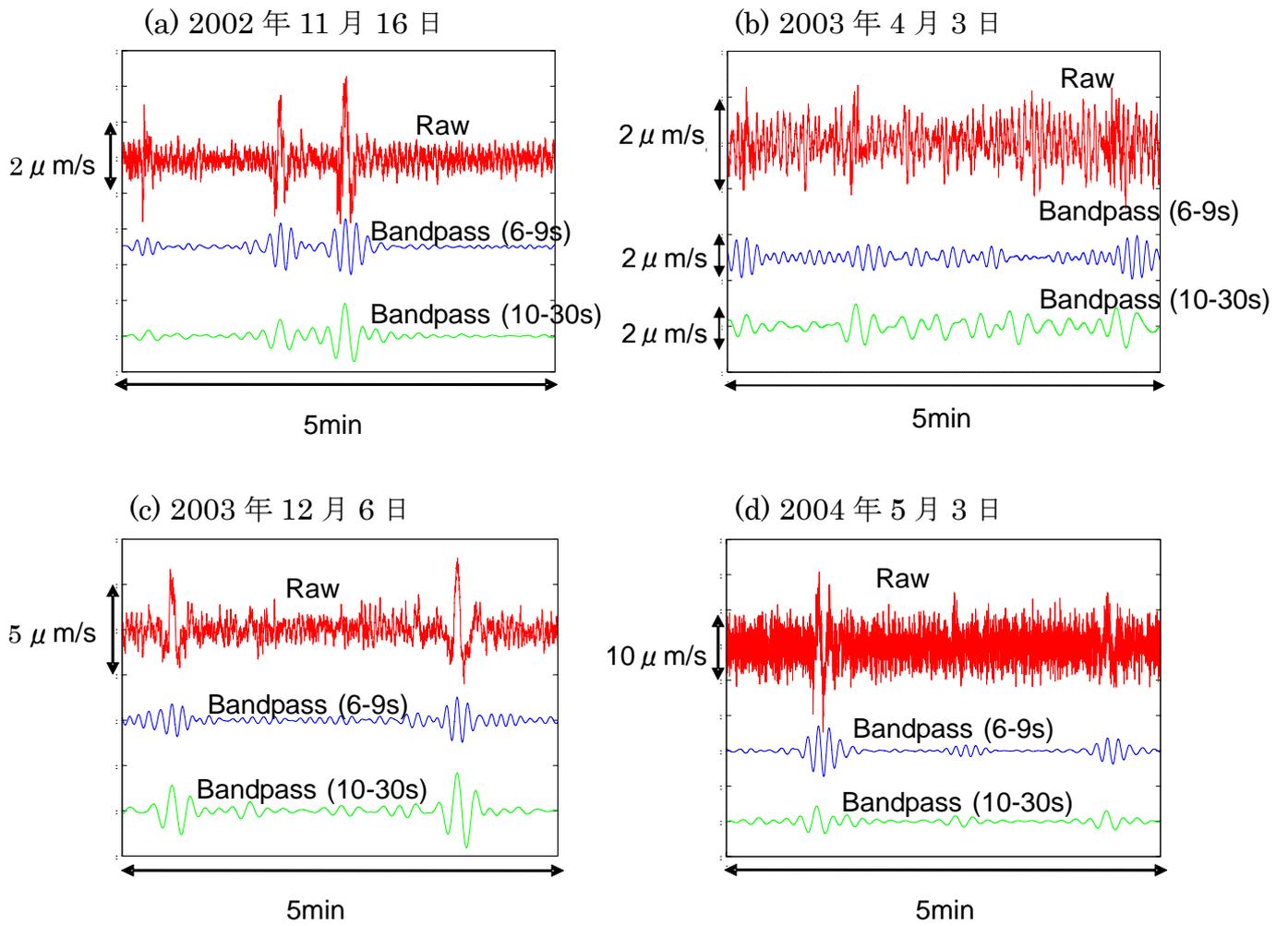


Fig.13 波形の例。上から、raw 波形、6-9 秒のバンドパスフィルターを施した波形、10-30 秒のバンドパスフィルターを施した波形。

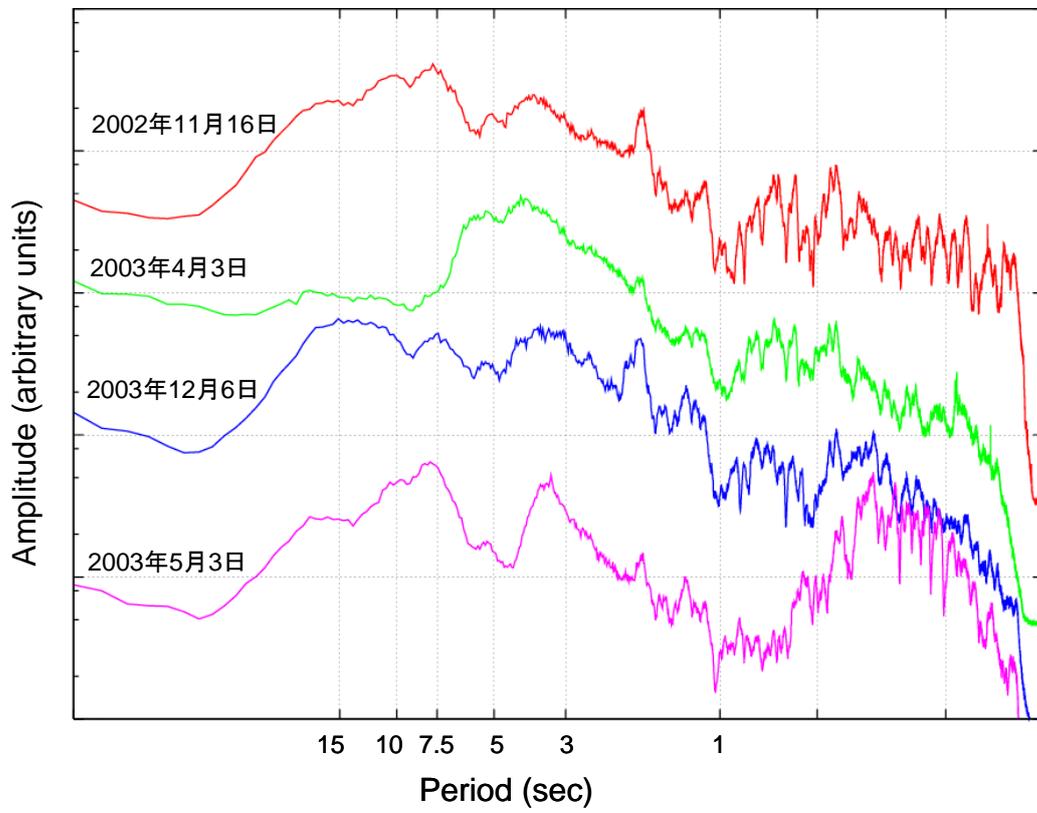


Fig.14 スペクトルの例。約7分間のスペクトルを24時間分スタックし、その平均をとったもの。

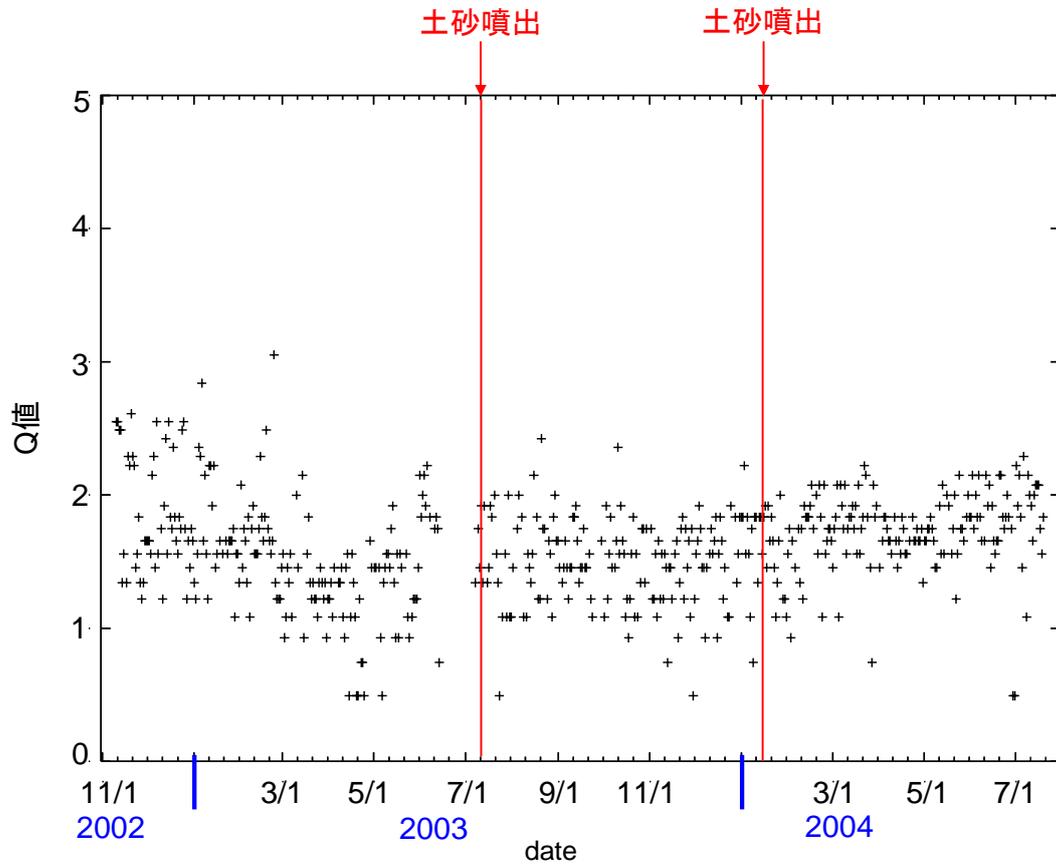


Fig.15 長周期微動の基本モードの Q 値。
土砂噴出の発生した 2003 年 7 月 10 日と 2004 年 1 月 14 日を ↓ で示す。

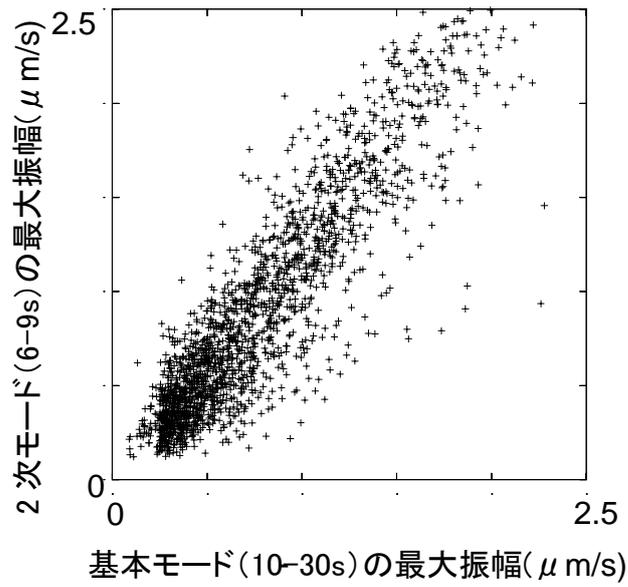


Fig.16 2004年1月20日～23日頃の長周期微動2000個の基本モード(10-30s)と2次モード(6-9s)の最大振幅。

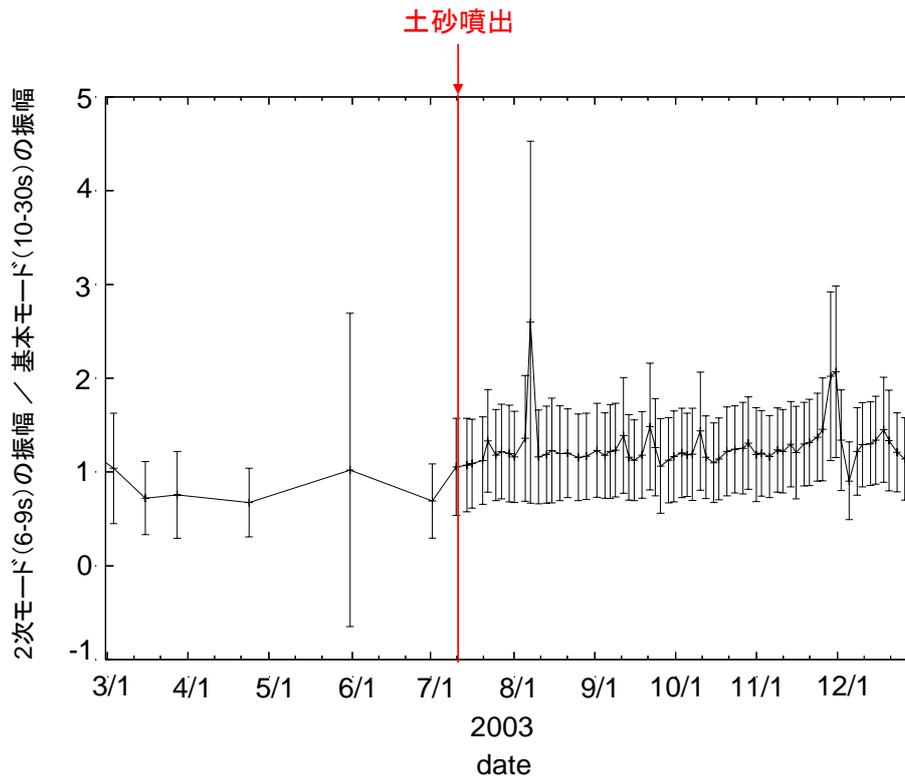


Fig.17 2003年3月から12月までのモード間振幅比(2次モード/基本モード)。長周期微動2000個ごとの平均値の変化を示す。エラーバーは標準偏差を表す。土砂噴出の発生した2003年7月10日を↓で示す。

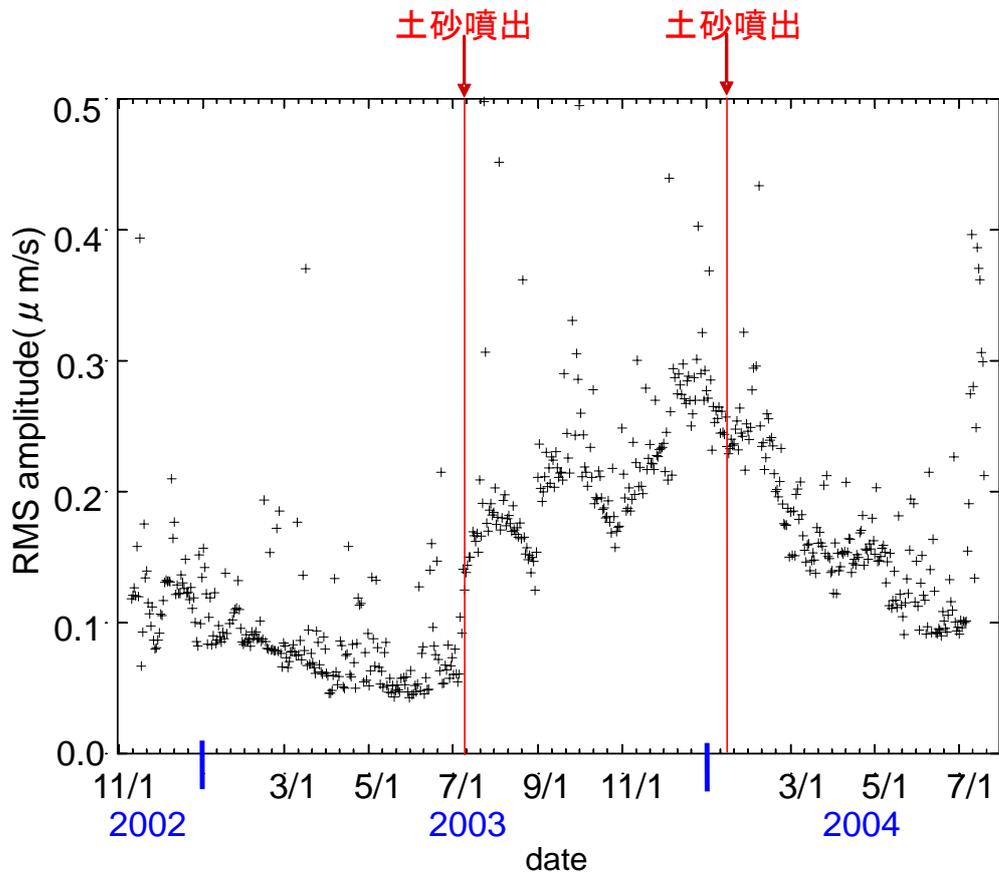


Fig.18 10 分間の RMS 振幅の一日あたりの平均値。10-30 秒のバンドパスフィルターを施した波形に 10 分間のタイムウィンドウで RMS 振幅を求め、一日あたりの平均をとったもの。土砂噴出の発生した 2003 年 7 月 10 日、2004 年 1 月 14 日を ↓ で示す。

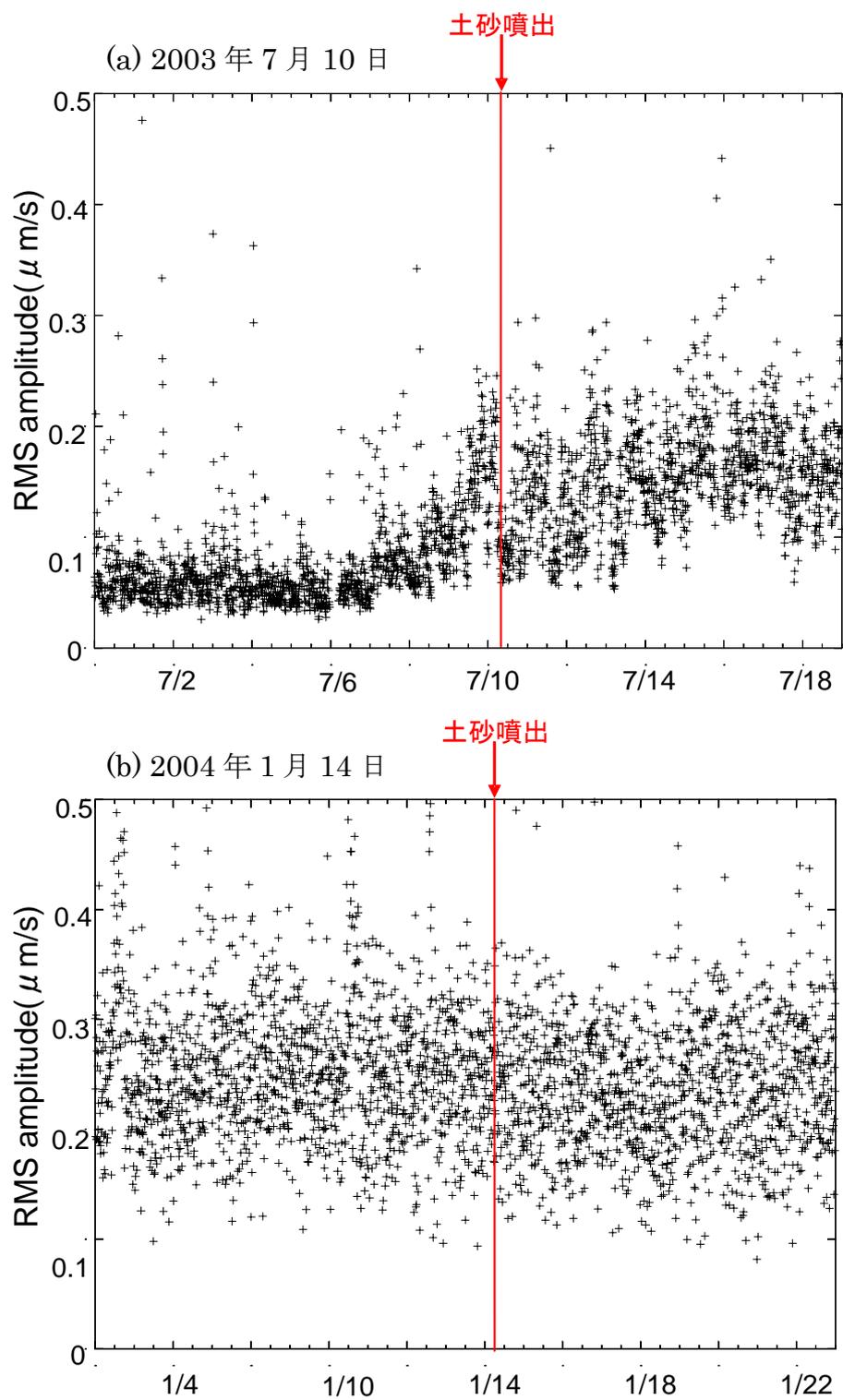


Fig.19 土砂噴出前後 10 日間の 10 分間の RMS 振幅。
 (a) 2003 年 7 月 10 日の土砂噴出の前後 10 日間
 (b) 2004 年 1 月 14 日の土砂噴出の前後 10 日間

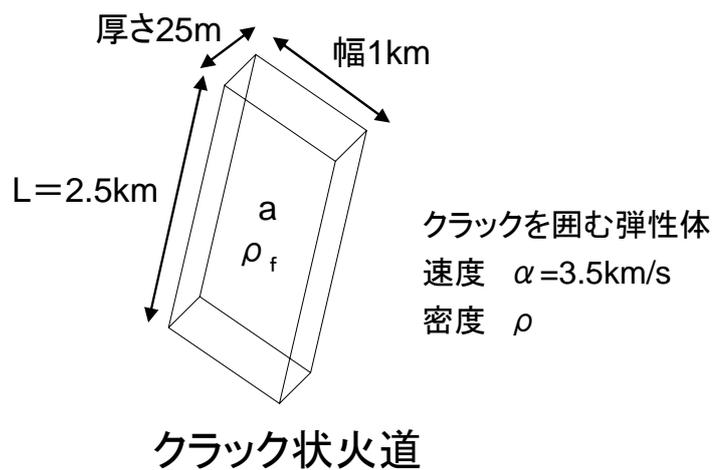
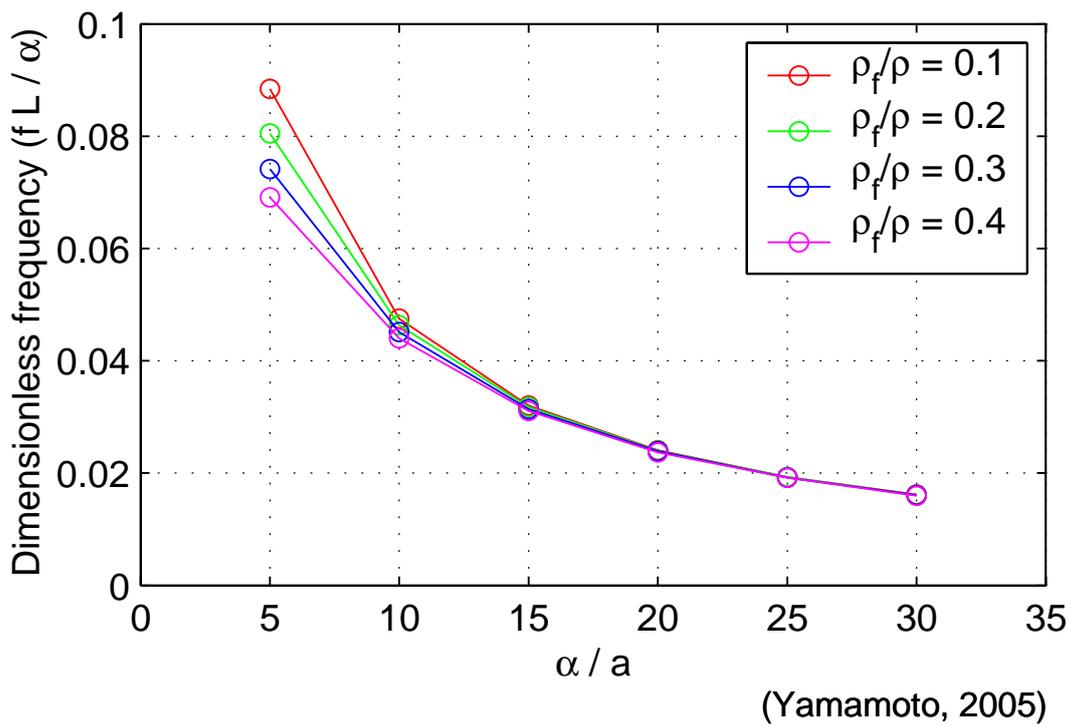


Fig.20 (上) クラックのアスペクト比を 10^2 で一定としたときの、クラック内外の物質の速度比・密度比と基本周波数との関係 (Yamamoto,2005)。

L : クラックの長さ f : 基本周波数

ρ : クラックを囲む弾性体の密度

α : クラックを囲む弾性体の速度

ρ_f : クラック内部の流体の密度

a : クラック内部の流体の音波速度

(下) クラック状火道の概念図。長さ L 、厚さ、幅の数値は Yamamoto(2005)による。

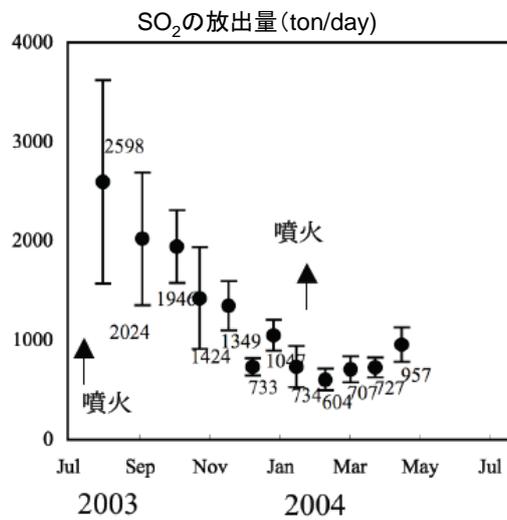


Fig.21 COSPEC を用いて測定された中岳第一火口からの SO₂ 放出量(九州大学, 2004 に加筆)

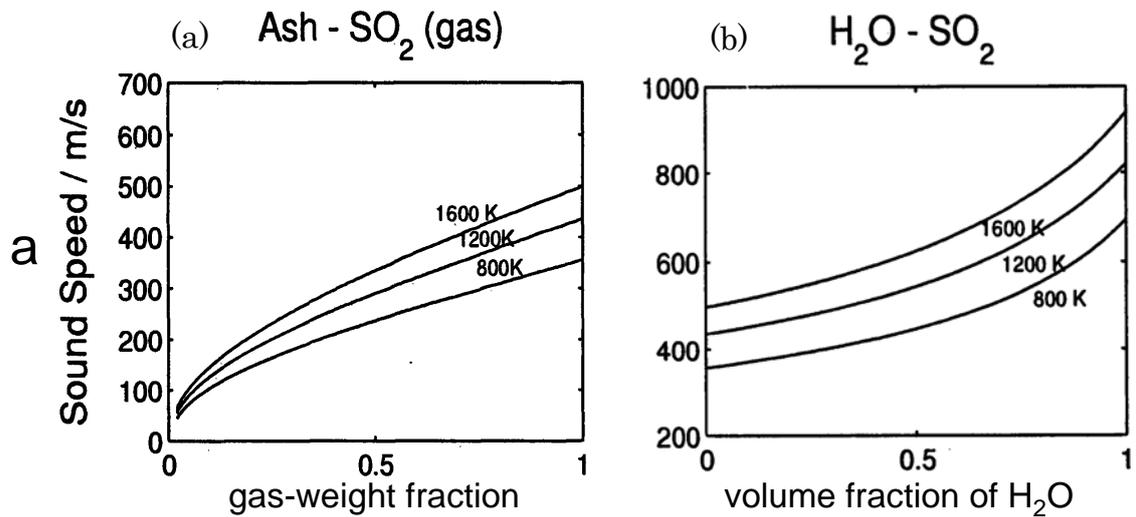


Fig.22 クラック内部の流体のガス重量比・体積比と音波速度との関係 (Kumagai and Chouet, 2000 に加筆)。
 (a) SO₂ と粒子の混合物の場合 (b) H₂O-SO₂ の混合気体の場合

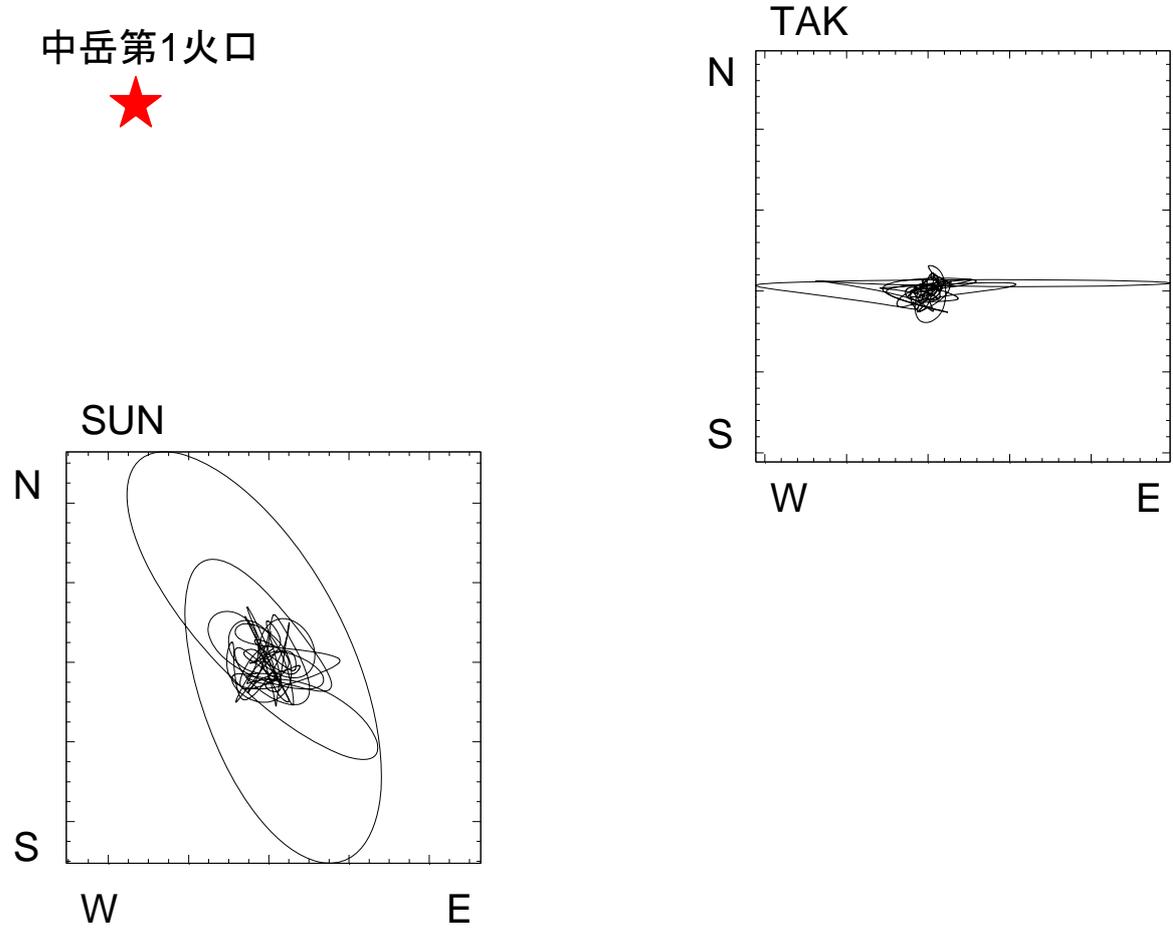


Fig.23 観測点 SUN、TAK における 2002 年 12 月 4 日の水平動パーティクルモーション (5 分間)
中岳第一火口の大体の位置を★で示す。

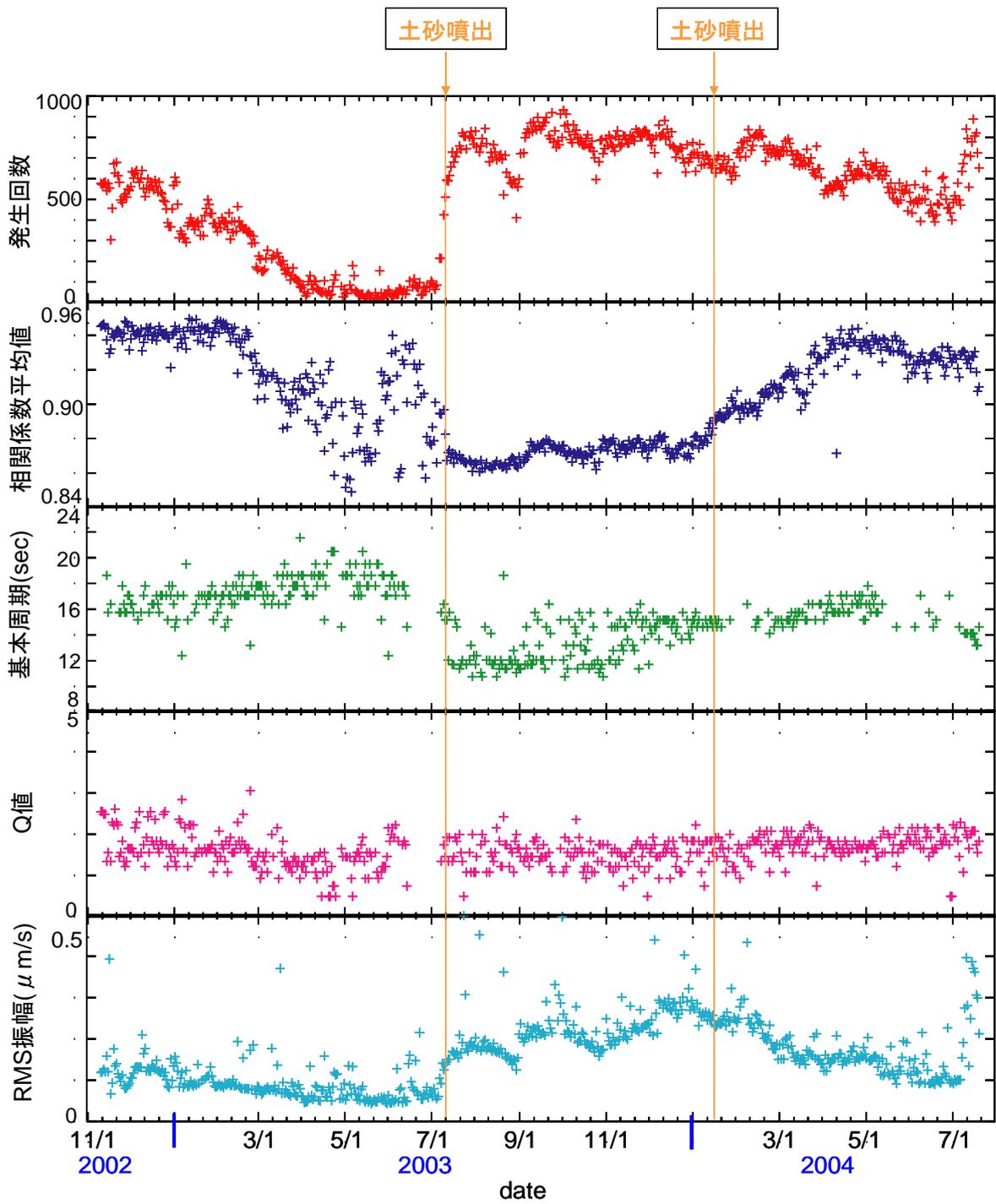


Fig.24 2002年11月から2004年7月までの長周期微動の発生頻度、相関係数平均値、基本周期、Q値、RMS振幅平均値の変化を並べた図。土砂噴出の発生した2003年7月10日、2004年1月14日を↓で示す。