

草津白根山における低周波地震の時間変化と火山活動との関連について

中野 優 (名大・環境学)

Temporal variation of Long-Period events at Kusatsu-Shirane volcano and their relation to the volcanic activity

Masaru Nakano (Grad. Sch. of Environmental Studies, Nagoya University)

1. はじめに

火山性地震の発生やメカニズムと火山活動との関連は多くの研究者によって広く議論されている。これを用いて震源の状態とその時間変化を推定することは、火山活動をモニタし、また火山内部の構造、噴火のメカニズムなどを推定する上でも重要である。そのなかでも、火山性低周波 (Long-Period, LP) 地震は近年研究が進み、メカニズムが明らかになりつつある。LP 地震は、イベントに固有の周波数 (f) と減衰定数 (Q) で規定される減衰調和振動を示す波形で特徴づけられる。 f と Q はイベント毎に系統的に変化し、震源の状態の変化を反映していると考えられる。LP 地震に対して波形インバージョンを適用した解析の多くは、震源にクラック状の共鳴体があることを示している [例えば *Ohminato et al.*, 1998, JGR; *Kumagai et al.*, 2002a, JGR; *Chouet et al.*, 2003, JGR; *Kumagai et al.*, 2003, Science; *Nakano et al.*, 2003, JVGR]。

我々はこれまでに草津白根山で 1992 年に発生した LP 地震の波形インバージョンなどの解析から、震源には熱水系の一部を構成するクラック状の共鳴体があり、その固有振動が地下深部から供給される熱によって励起されることを示した [*Kumagai et al.*, 2002a, JGR; *Nakano et al.*, 2003, JVGR]。さらに、熱水流体で満たされたクラックの振動特性を用いて f と Q の時間変化を調べた結果、 f と Q の時間変化はクラック内部の熱水流体が深部のマグマから供給される熱によって乾燥化していくプロセスで説明できることを示した [*Kumagai et al.*, 2002b, JGR]。しかし、ここで用いたデータはわずか数ヶ月間のものであり、このような f と Q の時間変動が他の期間でも見られるのか、またこの変化が季節変化である可能性もあり、より長期間のデータを解析して調べる必要がある。また、草津白根山では 1989-1992 年にかけて地震活動が活発であったため、この活動との関連も調べる必要がある。本研究では、東大地震研によって 1988 年に開始された草津白根山の定常観測による記録を MT から復元し、低周波地震の f と Q の時間変化を調べる。さらにその時間変化が熱水クラックの振動によって統一的に理解できるのかについて検証する。

2. 低周波地震の f と Q の時間変化

1988 年から 1995 年までのデータを調べた結果、欠測期間があるものの 1989 年から 1993 年にかけて LP 地震が頻発していたことが明らかになった。それぞれのイベントで最も周波数の低いピークの周波数をプロットすると図 1 になる。1989 年 10-11 月、1991 年 7-11 月、1992 年 8 月-1993 年 2 月の期間において周波数に系統的な時間変化が見られた。このうち 1992-1993 年については既に解析済みである [*Kumagai et al.*, 2002, JGR]。また、1990 年は LP 地震は数多く起きているものの周波数に系統的な変化は見られなかった。系統的な変化が見られるそれぞれの期間について詳しい f と Q を存否法によって求めた (図 2)。以下にそれぞれの期間の f と Q の時間変化について述べる。

1989 年 10 月-11 月：この時は約 30 日の間に 45 個の LP 地震が頻発し、 f と Q の変化は前半と後半の二つの時期に分けられ次のような変動を示した。 f は初め 3.2Hz 程度であったものが、前半の 15 日ほどで 1.7Hz まで少しずつ低下し、後半ではまた少しずつ約 4Hz まで上昇する V 字型の変動を示した。一方 Q はばらつきが大きいものの、その上限は前半では初め約 30 だったものが数日かけて一度 100 程度まで上昇し、15 日目頃には再び約 20 まで低下した。後半においても再び数日かけて 100 程度まで上昇し、再び約 30 に下がるという M 字型の変動を示した。

1991 年 7 月-11 月：この時期の変化も前半と後半の二つの時期に分けられる。周波数 f は前半は初め 2.5Hz だったものが 4.5Hz まで上昇した。そして急に 1.5Hz まで低下し、後半はゆっくりと約 2Hz まで上昇した。 Q は前半の始め約 40 だったものが一度 100 程度まで上昇したのち約 60 まで低下した。後半は Q は少しずつ低下し、最終的に約 20 となった。前半の変化は 1989 年の後半の変化と似ており、後半の変化は次に述べる 1992-1993 年の変化と似ている。

1992 年 8 月-1993 年 2 月：周波数 f は始め約 5Hz だったものが急激に 1.2Hz まで低下し、その後ゆっくりと約 4Hz まで上昇した。一方 Q は初め約 150 だったものが少しずつ低下し約 30 まで低下した [*Kumagai et al.*, 2002, JGR]。

3. 解釈

この変動を Kumagai et al., [2002b, JGR] による水 - ガス混相流体で満たされたクラックの振動特性を用いて解釈を試みた。クラックの振動特性は内部の流体の状態と気体成分の割合によって以下のように変化する(図3)。ここでクラックの特性を計算する際にクラックの形状として $L/W = 0.5$ 、 $L/d = 10^4$ を用いた。ただし、 L 、 W 、 d はそれぞれクラックの長さ、幅、厚さである。クラックが水 - 水蒸気混合物 (water foam) で満たされていた場合、気体成分の体積分率 (GVF) が 0 から 1 に変化するにつれ、クラックの振動の無次元固有周波数 ν は増加する。一方 Q は GVF が 0 近傍では 20 程度であるが、GVF が 0.5 付近で一度 100 程度まで上昇し、さらに GVF が 1 に近付くと再び 50 程度まで低下する(図3b,e)。また、クラックが霧 (mist) で満たされていた場合、気体成分の重量分率 (GWF) の増加とともに ν は増加し、 Q は減少する(図3c,f)。

観測された LP 地震が同一の共鳴体の振動によるものであると仮定し、さらに同一のモードが励起されているものと仮定すると、LP 地震の f と Q の時間変化は以下のように解釈できる。

1989 年：周波数 f が単調に増加、または減少する間に Q が一度増加し再び減少するパターンは、water foam で満たされたクラックの GVF の変化で説明できる。すなわちこの期間では、前半は初めクラックの内部はほぼ乾燥した状態 (GVF ~ 1) だったところに外部から水が侵入してきて、15 日ほどでクラックの内部は熱水で満たされる (GVF ~ 0)。その後再びマグマから供給される熱によって熱水は少しずつ気化し、後半ではクラック内部は乾燥した状態へと戻っていく (GVF ~ 1)。周波数から $f = \nu\alpha/L$ の関係を用いて試行錯誤によりクラックのサイズ L を推定すると、 $L = 71\text{m}$ となった。ここで α は周りの岩石の P 波速度であり、 $\alpha = 2500\text{m/s}$ を用いた。なお、GVF の変化は時間に対して linear に変化するものと仮定している。

1991 年：前半は 1989 年の後半と同様、water foam で満たされたクラックの乾燥化 (GVF の増加) で説明できる。後半の f の増加に伴う Q の減少は、mist の GWF が増加、すなわち乾燥化するプロセスで説明ができる。すなわち、この期間は全体を通して、深部から供給される熱によってクラック内部の乾燥化が進んでいる。内部の流体は初め water foam であったものが、乾燥化が進むことによって mist に変化する。mist で満たされたクラック内部は更に乾燥化してい

く。この時の f から推定したクラックのサイズは、前半では $L = 50\text{m}$ 、後半では $L = 310\text{m}$ となる。

1992-1993 年：1991 年の後半と同様 f の増加に伴う Q の減少で特徴付けられる。すなわち、mist で満たされたクラックの内部が乾燥化していくプロセスであると推定される。この時クラックのサイズは $L = 290\text{m}$ となる [Kumagai et al., 2002, JGR]。

4. 議論

LP 地震の周波数 f と減衰定数 Q の時間変化は、熱水流体で満たされたクラックの振動特性を用いて統一的に説明可能で、その変化は主にクラック内部の流体の乾燥化によって解釈できることが分かった。これは、熱水系の流体が火山活動の活発化に伴う熱流量の増加によって乾燥化していくものとして解釈できる。また、乾燥化のプロセスは 1989 年の後半と 1991 年の前半、および 1991 年の後半と 1992-1993 年のように同様のプロセスが繰返し見られ、いずれも 1 年の後半に見られた。

今回 LP 地震の f と Q を詳しく解析した期間の火山活動について総括すると、以下ようになる。火山活動が活発になり始めた 1989 年から LP 地震も多発した事は、深部からの熱の供給が増加したと調和的である。初めは乾燥していたクラックが地下水の侵入により湿った状態になっていく(前半)。震源域に水分が供給され、また深部から熱が供給されることにより熱水のガス化が起こり、これがトリガとなって LP 地震が発生する。水分の多い状態になった熱水系は熱の供給によって再び乾燥化する。乾燥化して水がなくなると、LP 地震は発生しなくなる。この期間は約 30 日と短い期間で乾燥から一度熱水で満たされ再び乾燥化するプロセスが見られるので、熱の供給はそのあとの期間よりも多かったと考えられる。1990 年は火山活動が活発であり LP 地震は多数見られたにも関わらず、 f と Q の系統的な変化は見られなかった。これは、最も火山活動の高い時期であり深部からの熱の供給が大きかったため、熱水系は比較的乾燥した状態にあったと考えられる。また f と Q の系統的な変化が見られなかったのは、熱水の状態が短時間で相やガス成分の割合が変化して不安定であったためであると考えられる。すなわちじっくりと乾燥化していくようなプロセスが見られなかったと考えられる。1991 年から 1993 年にかけては構造地震の活動は減少していくが、LP 地震の活動度はそれほど低下しない。この期間も熱水系は乾燥化していったと考えられる。しかし、 f と Q の時間変化のタイムスケールは長くなっており、熱の供給が低下したのと考えられる。1993

年以降 LP 地震がほとんど観測されなくなったのは、深部からの熱の供給が低下したためと考えられる。

ここで用いたクラックの振動の減衰定数 Q は、周りの弾性体へのエネルギー放射による効果のみが考慮されており、内部の流体内部での内部減衰は含まれていない。内部減衰は、ガスの割合が同じでも流体の状態、例えば泡の半径などに依存して変化する。従って 1989 年の前半などで見られた Q のばらつき、特に低下はこのような影響が含まれると考えられる。

ここで明らかになった熱水系の乾燥化は主に夏から冬と一年の後半にかけて見られた。春には欠測と思われるデータの欠落期間が多いので詳しいことは分からないが、1 年の同時期に同様の変化が見られると言うことは、熱水系の状態変化には季節性があることが示

唆される。火山内部からの熱の供給には季節性はほとんど無いと考えられるので、熱水系への水の供給に季節性があると考えられる。季節性は降雨や雪解けなどと関連があると考えられるが、定量的な議論は本研究の範囲外でありここでは行なわない。

5. まとめ

火山性低周波 (LP) 地震の固有周波数、減衰定数を熱水クラックの振動特性を用いて解釈した結果、熱水系が乾燥化するプロセス解釈できることが分かった。また、この LP 地震の活動と時間変化は、構造性地震から推定される火山活動と調和的である。このように、火山性低周波地震の発生は地下深部のマグマから供給される熱の影響と、熱水系の状態の両方に関連して発生していると考えられる。

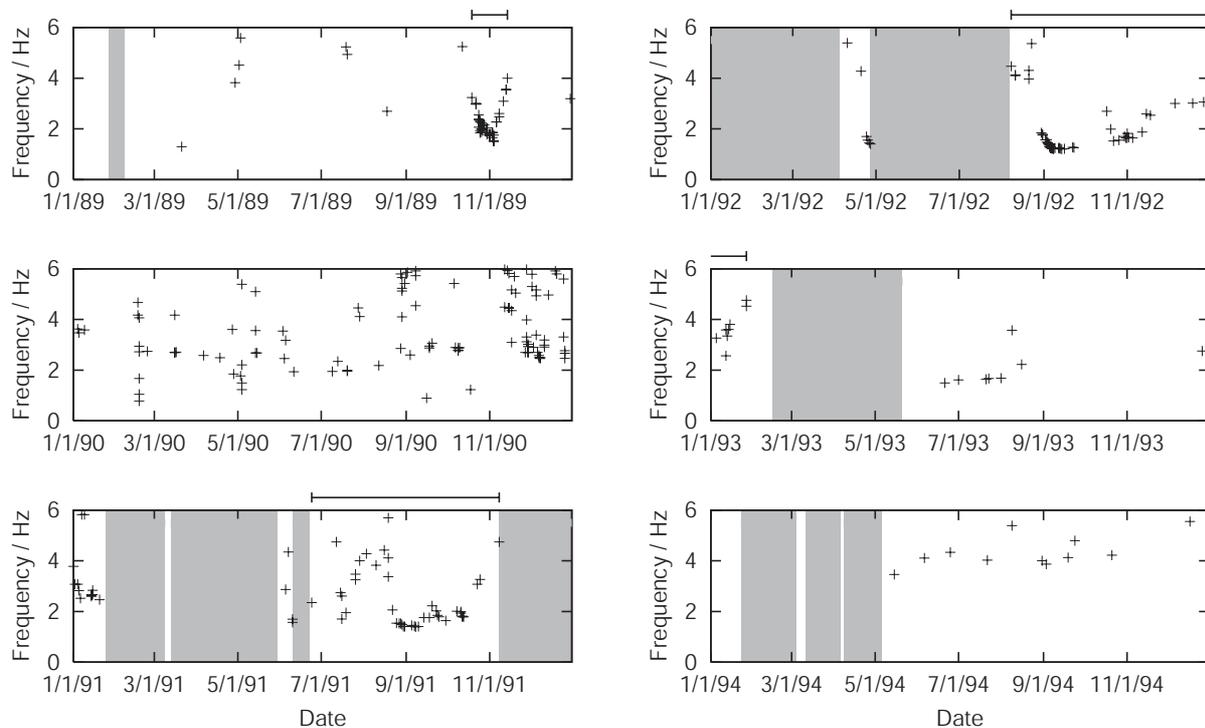


図 1. 草津白根山で 1989 年から 1994 年までに発生した LP 地震の周波数の時間変化。+ 印は一つのイベントを表し、最も周波数の低いモードのピーク周波数を示す。各プロットの上の横棒は、周波数に系統的な時間変化が見られる期間。灰色のハッチは、10 日以上イベントが全くトリガされなかった期間を表す。

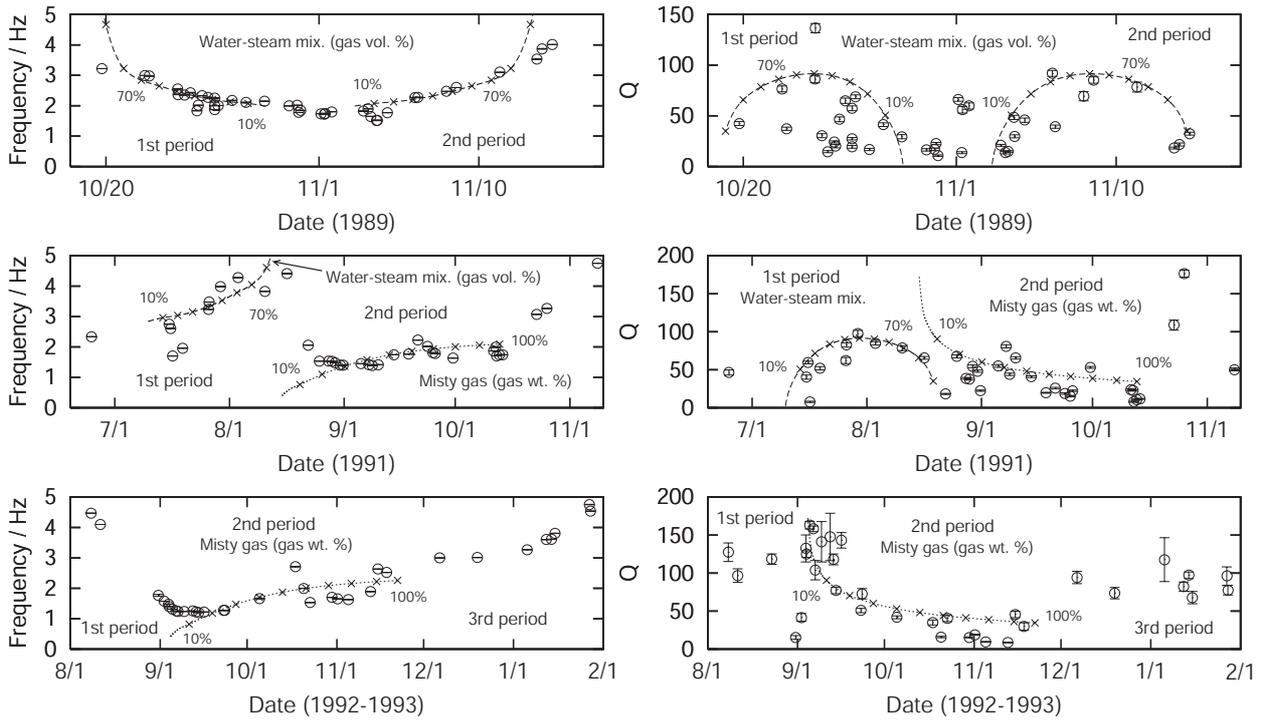


図 2. 周波数 f 、減衰定数 Q に系統的な変化が見られた期間の f と Q 。点線は熱水クラックの振動特性によるフィッティング。

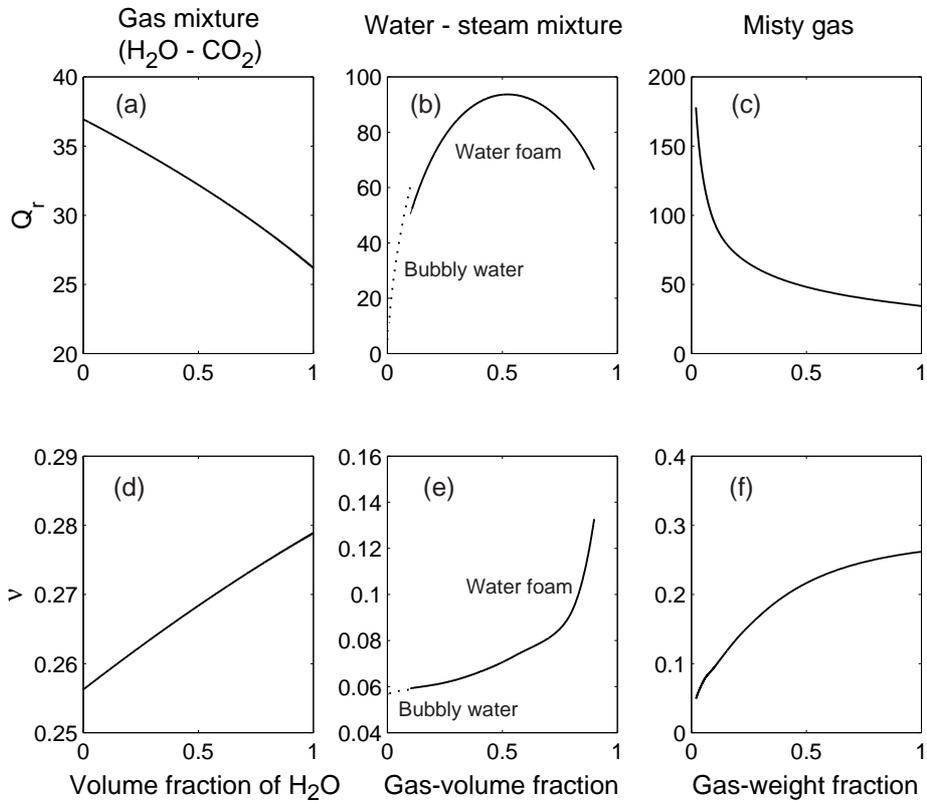


図 3. 熱水流体の満たされたクラックの振動特性。 Q_r 、 ν はそれぞれ波動エネルギーの放射による減衰、無次元周波数。