雲仙科学掘削の火山物理学的意義と課題

清水　洋

九州大学大学院理学研究院・地震火山観測研究センター

Geophysical meaning and subjects of the scientific drilling at Unzen Volcano

Hiroshi Shimizu

Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Sciences, Kyushu University

要旨

The 1990-95 eruption of Unzen Volcano was one of most closely monitored eruptions in the world. Various models about the physical structure and magma feeding system of Unzen Volcano have been proposed based on the geophysical observations. Scientific drilling is the most effective and direct method to understand the subsurface structure of a volcano and its eruption mechanisms, and the models previously obtained can be modified by the drilling.

The seismic experiment using artificial explosion sources conducted at Unzen Volcano in 1995. The velocity structure model within a depth of 1500m is verified directly by the down-hole measurements at the drilling holes. Although the drilling can not reach the magma reservoirs derived from geodetic measurements during the eruption, we will be able to get more precise seismic-image of the deeper reservoirs because the ambiguity of the shallow structure can be eliminated by the drilling.

Scientific drilling near the summit is aimed at the conduit around 1km below the crater, where the hypocenter of tremor and the source of ground deformation had located during the eruption. Rock samples, down-hole measurements and near-field observations at the conduit drilling hole will provide the knowledge about the structure in and around the conduit, and about the source mechanisms of those seismic- and geodetic-events.

In order to estimate the location of conduit more precisely for the determination of drilling trajectory, we are planning the volcanic conduit exploration using a controlled seismic source at Unzen Volcano in December 2001.

1　はじめに

科学技術振興調整費による「雲仙火山：科学掘削による噴火機構とマグマ活動解明のための国際共同研究」が、平成 11 年度より 6ヶ年計画で進められている。このプロジェクトでは、雲仙火山の山麓と山腹に計 3 本 (パイロットホールを含めると 4 本) の井戸が掘削され、種々の調査研究が実施される。この研究計画の目的や意義については、これまでも報告されており (たとえば、宇都・中田, 2000) 、本研究集会でも宇都によって紹介されている。したがって、ここでは火山物理学的側面から見た雲仙科学掘削の意義と課題について述べる。

2　雲仙火山の物理構造とマグマ上昇経路の解明

マグマ供給系を含む火山の地下構造を明らかにすることは、火山活動にともなう地震・微動・地殻変動などの諸現象の発生機構を知り火山活動の推移を予測するうえで、きわめて重要である。そのため、これまで多くの火山において火山体構造やマグマ供給系に関する研究がなされており、雲仙火山においてもいくつかの地球物理学的なモデルが得られている。

雲仙火山の深さ約 3km よりも浅い部分については、1995 年に人工地震を用いた構造探査が実施され、地震波速度構造モデルが提出されている (清水, 1997) 。これによると、雲仙火山の浅部地殻構造は浅い方から順に P 波速度 1-1.9km/s の表層、2.1-3.5km/s 層、約 4km/s の層、そして約 6km/s の層から構成されており、山体西側で 4km/s 層および 6km/s 層の顕著な盛り上がりが認められる。この盛り上がりは、後述する圧力源 C の直上に位置しており、マグマ供給系と山体構造の関係を考えるうえで興味深い結果となっている。さらに深部の地震波速度構造については、自然地震を用いたトモグラフィー研究があり (Ohmi and Lees, 1995; 八木原・清水, 1997) 、マグマ溜りの存在を示唆する低速度域が見出されている。

雲仙火山の比抵抗構造モデルについては、MT 法探査によって提出されている (Kagiyama *et al.*, 1999) 。それによると、海抜 400〜500m から海抜下約 1km に熱変質および地下水を多く含む層が広がり、それ以深は約 10km まで高比抵抗になっている。さらに深部は低比抵抗域になっているが、その水平的な分布状況は比較的一様であって、マグマ溜りに関連するような比抵抗の異常域は検出されていない。ただし、溶岩ドーム近傍約 1km の範囲では、約 1Ωm という極端に低比抵抗の層が地表付近に存在しており、火口直下における熱水の上昇を示している。

これまでの研究から、雲仙火山のマグマ供給系については、普賢岳の西方約 4.5km、深さ約 10km にマグマ溜りがあり、そこから普賢岳の火口に至る傾斜したマグマ上昇経路が存在している可能性が高いと考えられている。このことは、1990 年〜1995 年の噴火活動に伴う地殻変動データに点力源モデルを適用した結果、普賢岳から西に向かうにつれて深さと大きさを増す 3 つの減圧力源 (A、B、C ソース) の存在が推定されること (石原, 1993) 、また、噴火活動に先立って発生した島原半島西部下の地震の活動様式やメカニズムが、これらの地震が震源域の下方で圧力増加があったと仮定すると説明可能であること (馬越・他, 1994) 、さらに、上述のトモグラフィーの低速度領域の分布などから支持される。また、1996 年に実施された TDEM 法による電磁気構造探査でも、普賢岳西方の地下数 km に東西に伸びる低比抵抗域が見出されており、東西方向のダイク群の存在が示唆される (Kanda *et al.*, 1997) 。

このように、これまでの研究により、雲仙火山の深さ約 10km までのマグマの上昇経路の上面位置や圧力源の位置についてはある程度明らかになってきた。しかし、例えば圧力源の推定に際しては、最も単純な点力源を仮定しており、その形状や大きさは不明である。ましてや圧力源の位置にマグマ溜り (メルト) が存在するかどうかなど、圧力源の物性に関する情報はほとんど得られていない。さらに、10km よりも深いマグマ供給系については、いくつかのモデルはあるものの、いずれも客観的な地球物理的観測事実が充分ではなく、その実体は明らかではない。マグマ活動に起因する諸現象の発生機構を知り火山活動の推移を予測するためには、

さらに詳細な火山体の物理構造とマグマ供給系の解明が必要である。

雲仙科学掘削プロジェクトでは、3 本 (パイロットホールを含めれば計 4 本) の井戸を掘削する計画である。掘削によって地下の岩石 (ボーリングコア) を採取したり掘削坑内で各種の検層を行うことは、地下浅部の構造を知るうえで最も直接的かつ客観的な手段である。したがって、これらの掘削により、火山体構造探査等で得られている地殻浅部構造モデルを検証し、より正確なモデルを構築することが可能になる (図 1) 。本プロジェクトでの掘削井の深度は 1000〜2000m であることから、数 km 以深に推定されている圧力源 (マグマ溜り) に達することはできず、今回の掘削によってこれらを直接検証することは不可能である。しかし、掘削によって表層から基盤までの正確な構造を知り、その分を剥ぎ取ることで、より深部の構造を今まで以上の精度で明らかにすることが可能になる。地震探査や電気探査では、表層の構造の影響で深部からの情報が乱されたりマスクされることがあり、それが深部構造の解像度を低下させる一因となっている。事実、地震トモグラフィーの結果を見ると、きわめて低速度の表層とその下部に位置するマグマ溜りの存在が推定される層との間で、得られた速度値にトレードオフが認められる (八木原・清水, 1997) 。したがって、掘削によって浅部構造を正しく評価できれば、その下部にあるマグマ溜りをより鮮明に検出できると期待される。

さらに、雲仙科学掘削プロジェクトでは、掘削井に計器を設置して高精度観測を実施することになっている。平成 11 年度に掘削された北東山麓 (島原市南千本木) の井戸には、平成 12 年度に地震計と 16 個のハイドロホンが数珠つなぎに設置され、鉛直方向のアレイが構築された。これと地上に設置する通常のアレイにより 3 次元アレイを構成し、人工地震や自然地震を観測して、山体内の火道や地下深部のマグマ溜りなどからの反射・散乱波の検出をめざす。

また、平成 12〜13 年度に掘削される東山麓 (深江町大野木場) の井戸には、電極が多数設置され、電場の鉛直成分の鉛直勾配 ($\partial \mathrm{Ez}/\partial \mathrm{z}$) を測定する (時間領域鉛直電場勾配法) ことが計画されている。測定される勾配の時間変化は、電極が設置されている地層の比抵抗が変化しなければ電流密度の勾配 ($\partial \mathrm{jz}/\partial \mathrm{z}$) に等しくなり、この量が深部の比抵抗変化に極めて敏感であることから深部の比抵抗の時間変化を検知できると期待される。この観測を連続的あるいは繰り返し行うことにより、マグマ溜まりなどの時間的な状態変化を捉えることが可能になると期待される。

3　雲仙火山の噴火機構の解明

雲仙火山の 1990〜1995 年の噴火では、火口下約 2km 以浅で多くの地球物理学的現象が観測された (清水, 1992) 。それらの現象と推定発生域を図 2 に示す。例えば、溶岩ドーム出現前には孤立型微動が火口から約 0.7〜1.7km (海抜約 500〜−500m) の深さで発生し、ドーム成長中には低周波地震が火口から 0.5km 以浅 (海抜約 700m 以上) で観測された。また、ドーム成長の初期には火口から深さ約 500〜800m (海抜 700〜400m) を圧力源とするブルカノ式爆発が起こった。前節で述べたように、火口直下の山体浅部には比抵抗の極めて小さい領域があり、上記の諸現象はこの低比抵抗層内で発生したことが明らかになっている。これらや各種表面現象との対比から、それらの諸現象が上昇してくるマグマ・火山ガスと帯水層との相互作用で統一的に説明できる事

が示された (Kagiyama *et al.*, 1999) 。しかしながら、これらは定性的な説明にとどまっており、噴火機構をより詳しく理解するためには定量的なモデルの構築が求められている。海抜下 500m 以浅の火道およびその近傍の物理構造を知ることなしにモデルの定量化は不可能であるが、それに関する現在の我々の知識はきわめて不十分である。地震探査や電磁気探査などの物理探査を山頂付近において高密度で実施して、火山体浅部構造解析の精度を上げるとともに、火道およびその近傍を掘削して直接的に構造を知ることができれば、定量的モデルの構築に関して飛躍的な進展が期待できる。したがって、火道掘削では、採取したコアの物性測定のほか、掘削坑内における物理検層や物理観測の実施を計画している。以下にそれらの概要と期待される成果について述べる。

3.1 物理検層およびコアの物性測定

坑内における物理検層および採取したコアの物性測定としては、温度、弾性波速度、密度、比抵抗、空隙率、透水係数、流動電位カップリング係数、帯磁率などを考えている。

このうち、弾性波速度と密度は、溶岩ドーム直下で発生した地震や微動、噴火地震等の震源再決定や発震機構の研究に用いられる。これまでの震源決定は、火道内外の山体浅部の速度構造が未知のため、走時残差が小さくなるような構造を適当に仮定して行っていた。したがって、特に深さ方向の精度が不十分であり、例えば図 2 に示したドーム直下の低周波地震についても、真の震源はドーム基底部〜ドーム内部である可能性が高いと考えられる。正しい速度構造を使用することによって、今まで見えていなかった震源構造が明らかになる可能性がある。さらに、震源からの地震波のより正確な射出角が得られるので、現在まで未解決の発震機構についても決着がつくことが期待される。

また、比抵抗、空隙率、透水係数、流動電位カップリング係数および帯磁率の測定は、熱水系の解明にとって重要なデータとなる。TDEM 法による比抵抗構造調査は、観測点をドーム周辺に設置することで同地域の地下 1〜2km までの構造を推定することが可能であるが、これらの結果を掘削孔での検層データと比較・検証することで、比抵抗構造調査の技術的なレベルを向上できるほか、より精度の高い火道近傍の比抵抗構造を得ることが可能になる。これらを **2.2** の水理構造の研究結果と比較することで、火道内および近傍で起きていたさまざまな現象のメカニズムの解明に貢献できると考えられる。さらに、掘削資料による帯磁率測定は、雲仙火山山頂およびその周辺での磁気観測から火道近傍の熱構造の変化を解明するためにも極めて重要である。

3.2 坑内における物理観測

低周波地震や火山性微動、噴火地震等は、浅部火道内およびその近傍で発生しており、それらの発生機構を解明するためには、火道を含む山体浅部構造を知る必要があることは既に述べた通りである。しかし、これらのイベントの多くは初動が不明瞭で振幅も小さく、加えて山体構造の強い不均質性のため、構造が既知でも波形解析は必ずしも容易ではない。これらの問題をクリアする最良の方法は、震源近傍で広帯域の観測をすることである。そこで、火道をねらう掘削坑に、傾斜計 (または歪計) および地震計を設置して、near field 波形を

観測し、地震・微動の発生機構を明らかにする。掘削坑を用いた火道近傍における 3 次元アレイ観測の案を図 3 に示す。雲仙火山の噴火活動は既に停止しているため、噴火地震の発生は期待できないが、ドーム直下の微小地震や孤立型微動は頻度は少ないものの現在も発生しており、震源域のごく近傍で観測することが可能である。

また、浅部のマグマ供給系と熱水系の実態を明らかにするため、上記の傾斜計・地震計の他に温度計・熱流量計・磁力計などの各種観測計器も設置し、連続観測を実施したいと考えている。さらに坑内の異なる深さに電極を設置して、前述の時間領域鉛直電場勾配法の連続観測を行えば、火道内マグマの状態や周辺の比抵抗構造の時間変化を捉えることが可能になる。これらの連続観測結果を、TDEM 法や比抵抗法等によるサーベイの結果と合わせて総合的に解釈することにより、マグマおよび熱水系の実態解明とその経年変化が明らかになると期待される。

掘削坑を利用した上記の諸観測の実現のためには、傾斜した坑内に設置可能なセンサーを開発することや、高温・火山ガスに耐えるセンサーを開発することが課題となるであろう。

4　雲仙火山の火道探査計画

いままで述べてきたように、火道およびその近傍を掘削して直接的に構造を知ることができれば、地震・微動や爆発的噴火などの諸現象の発生機構について定量的モデルの構築が可能になり、火山噴火機構の研究に飛躍的な進展が期待できる。そのためには、掘削坑を普賢岳直下の海水準付近の深さで火道に命中させる必要があるが、現在想定している火道の位置は、噴火にともなって観測された地震・微動の震源や傾斜変動などの圧力源、トモグラフィーの結果による低速度域などの領域を連ねたものであり (図 2) 、数 100m の不確定性がある。火道掘削のためには、数 10m の精度で火道の位置が推定されていることが望ましい。そこで、われわれはより高精度に火道位置を推定し火道掘削経路の決定に資するため、平成 13 年度に人工震源を用いた構造探査を計画している。

構造探査 (案) は、深さ数 km 以浅の浅部火道のイメージングに重点を置き、反射・散乱法探査とファンシューティング・回折法探査により構成される。探査の測線とファンシューティング用震源の位置を図 4 に示す。

反射法探査は、鳥甲山から吹越を経て高岩山に至る南北約 12km の主測線上と、吹越から仁田峠を経て野岳付近に至る約 2.5km の副測線上で実施する。地震計間隔はいずれの測線も 25m 程度である。発震源は発震周波数をコントロールできる大型バイブレータ 3 台を用いる。測線上で 3 台を同期させて多数回発震させ、受信した地震波形をスタックして発震波形と相関をとり、反射波解析に用いる。発震点間隔は最小 25m〜最大 100m 程度である。また、これら反射法探査用の人工地震や後述のファンシューティング用の人工地震を、前述した北東山麓 (南千本木) の掘削坑に設置した 3 次元アレイ地震観測システムで観測して、火道等からの散乱波を検出することもめざす。反射・散乱法探査の模式図を図 5(a) に示す。

ファンシューティング・回折法探査も、反射法探査の測線をそのまま用いて実施する。また、発震は、大型バイブレータ 3 台を用いて雲仙火山の北東山麓〜南東山麓で行い、観測点 (測線) に至る波線が普賢岳直下の海水準付近 (想定火道位置) で交差するように発震源を分布させる (図 5(b)) 。火道の径が 100m 程度以下であ

る場合、異常領域 (火道) の大きさが人工地震の波長と同程度か或いは小さくなるため、火道を走時異常域として検出することは困難である。その場合、地震波は火道を回折して観測点に到達すると考えられるので、観測された回折波の波動場から回折源 (火道) をイメージングすることを試みる。このような「回折法探査」は未だ実用化されていないので、今後探査の準備と並行して手法の開発も推進する必要がある。

5　まとめ

この小論では、科学掘削が、ボーリングコアの採取と分析による地質学的・岩石学的研究のみならず、雲仙火山の物理構造とマグマ供給系、および噴火機構に関する地球物理学的研究の進展にも大いに役立つことを述べた。また、掘削前に如何に正確に火道の位置を知るかという課題と、それにチャレンジすべく現在計画中の火道探査について紹介した。さらに、火道掘削坑における計器観測についても、専用のセンサーの開発などいくつかの課題が残されているが、是非これらをクリアして火道近傍観測を実現し、雲仙火山の火道で何が起こっているのか／起こっていたのか、を明らかにしたい。そして、最終的には他分野の研究成果と突き合わせて、雲仙火山の総合的モデルの構築をめざしたい。

参考文献

石原和弘, 雲仙火山の溶岩の噴出率と地盤の変動速度から推定されるマグマの供給率について, 京都大学防災研究所年報, **36 B-1**, 219–230, 1993.

Kagiyama, T., Utada, H., and Yamamoto, T., Magma ascent beneath Unzen Volcano, SW Japan, deduced from the electrical resistivity structure, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **89**, 35–42, 1999.

Kanda, W., Utada, H., Kagiyama, T., and Tanaka, Y., Resistivity model of around Unzen Volcano infered from TDEM experiments, in *Proc. Unzen International Workshop: Decade volcano and scientific drilling*, 50–55, 1997.

Ohmi, S. and Lees, J.M., Three dimensional P- and S-wave velocity structure below Unzen Volcano, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **65**, 1–26, 1995.

清水洋, 雲仙火山モニタリング, 物理探査, **45**, 458–466, 1992.

清水洋・他, 1995 年人工地震探査による雲仙火山の地下構造, マグマ探査－現状と展望－, 京都大学防災研究所共同研究集会論文集, 9–15, 1997.

馬越孝道・清水洋・松尾のり道, 精度の良い震源分布から推定した 1990-94 年普 賢岳噴火活動のマグマ上昇経路, 火山, **39**, 223–235, 1994.

宇都浩三・中田節也, 雲仙火山科学掘削プロジェクトの概要, 月刊地球, **22**, No.4, 215–218, 2000.

八木原寛・清水洋, やや遠地地震を用いた雲仙火山の 3 次元 P 波速度構造, 月刊地球, 号外 **17**, 112–116, 1997.

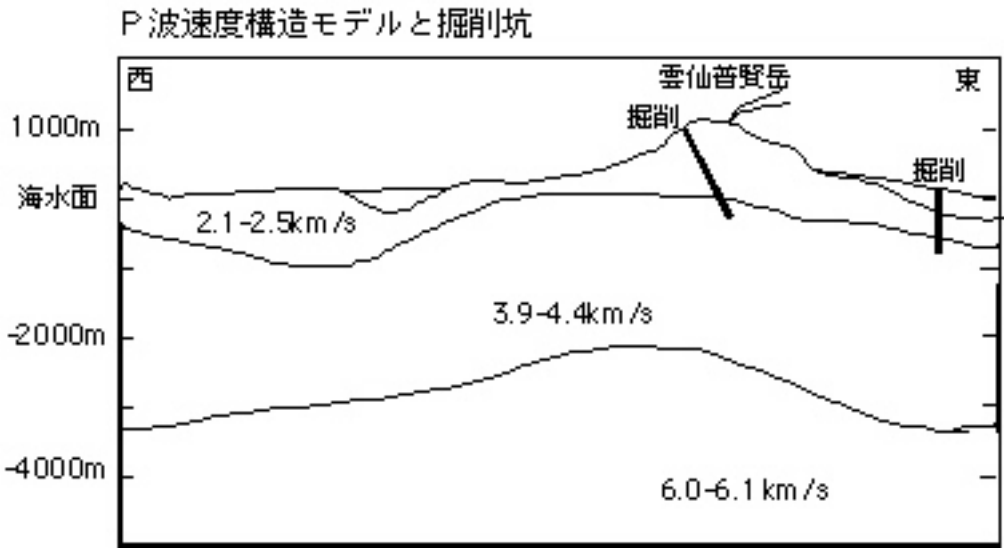


図1: East-west cross section of the velocity structure model derived from the 1995 explosion experiment at Unzen Volcano. Thick lines indicate the profiles of boreholes in the Unzen scientific drilling project.

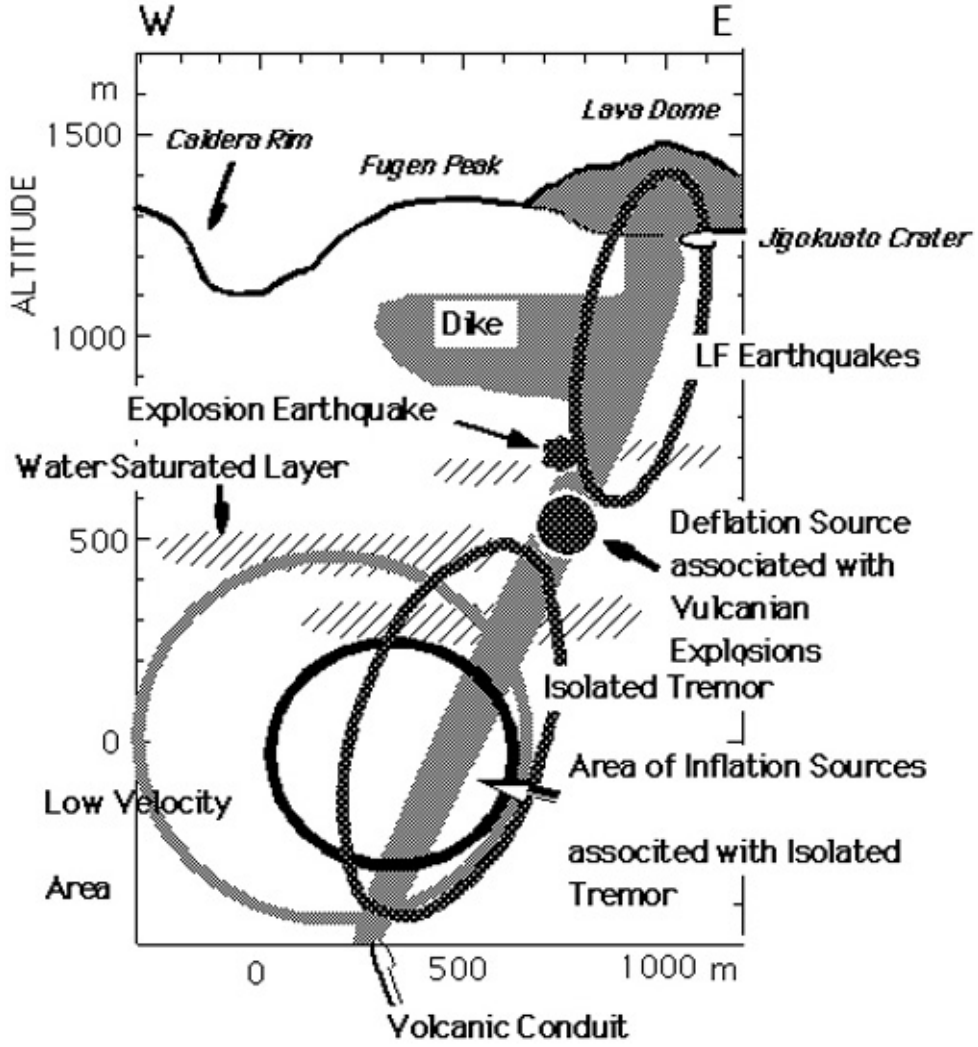
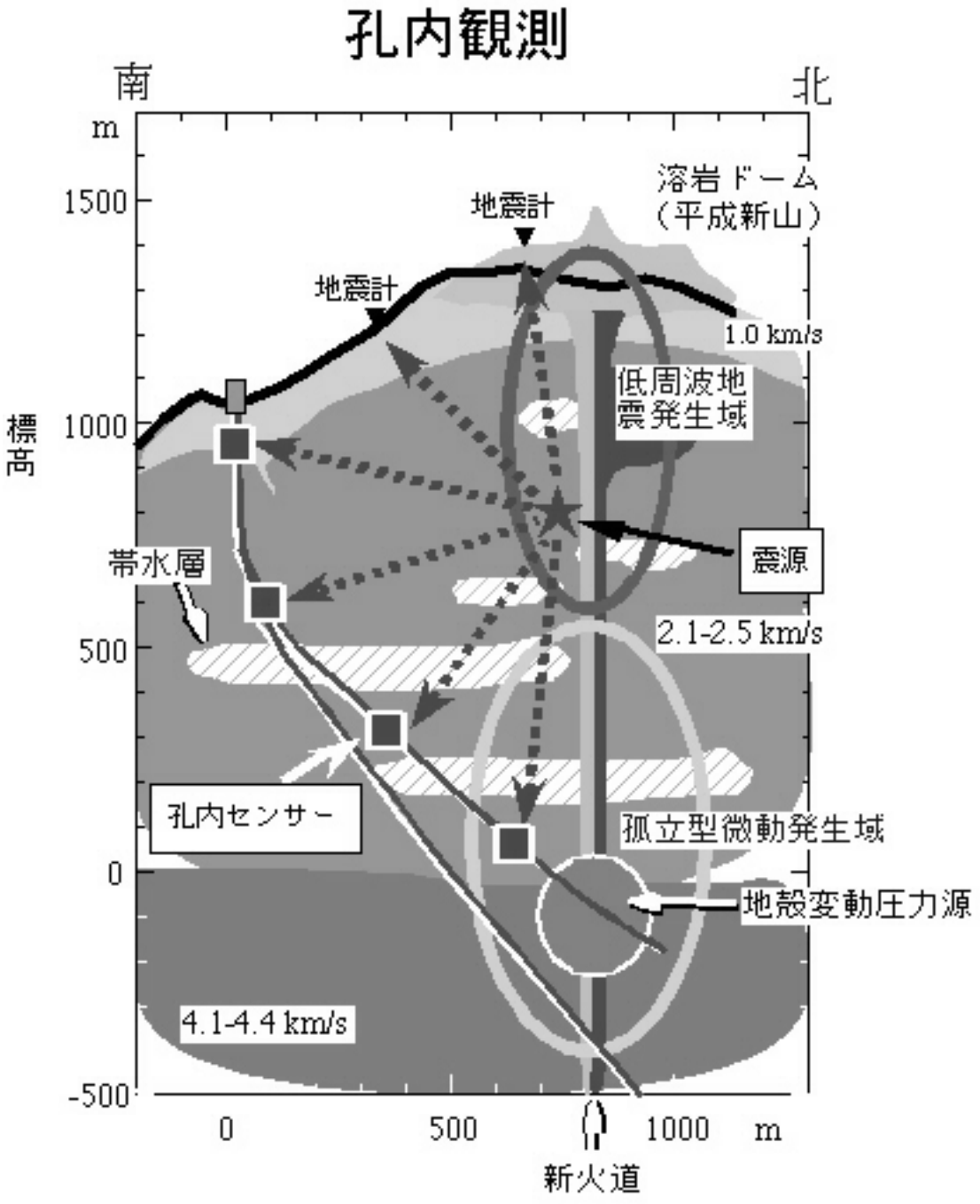


図2: East-west cross section of the structure model beneath the Fugen peak. Source regions of seismic and geodetic events during the 1990-95 eruption are shown in the model. A volcanic conduit is probably located on the lines connecting these sources.



火道および震源近傍における３次元アレイ観測

孔内にセンサー（地震計，歪計，温度計，電極など）を複数設置し，アレイを形成する．
このアレイにより，地震・孤立型微動を震源近傍で観測し，震源を高精度で決定するとともに発生メカニズムを明らかにする．
また，温度や比抵抗の時空間変化から，火道冷却過程と熱水系の時間変化を明らかにする．

図3:　Geophysical observations in the borehole near the volcanic conduit.

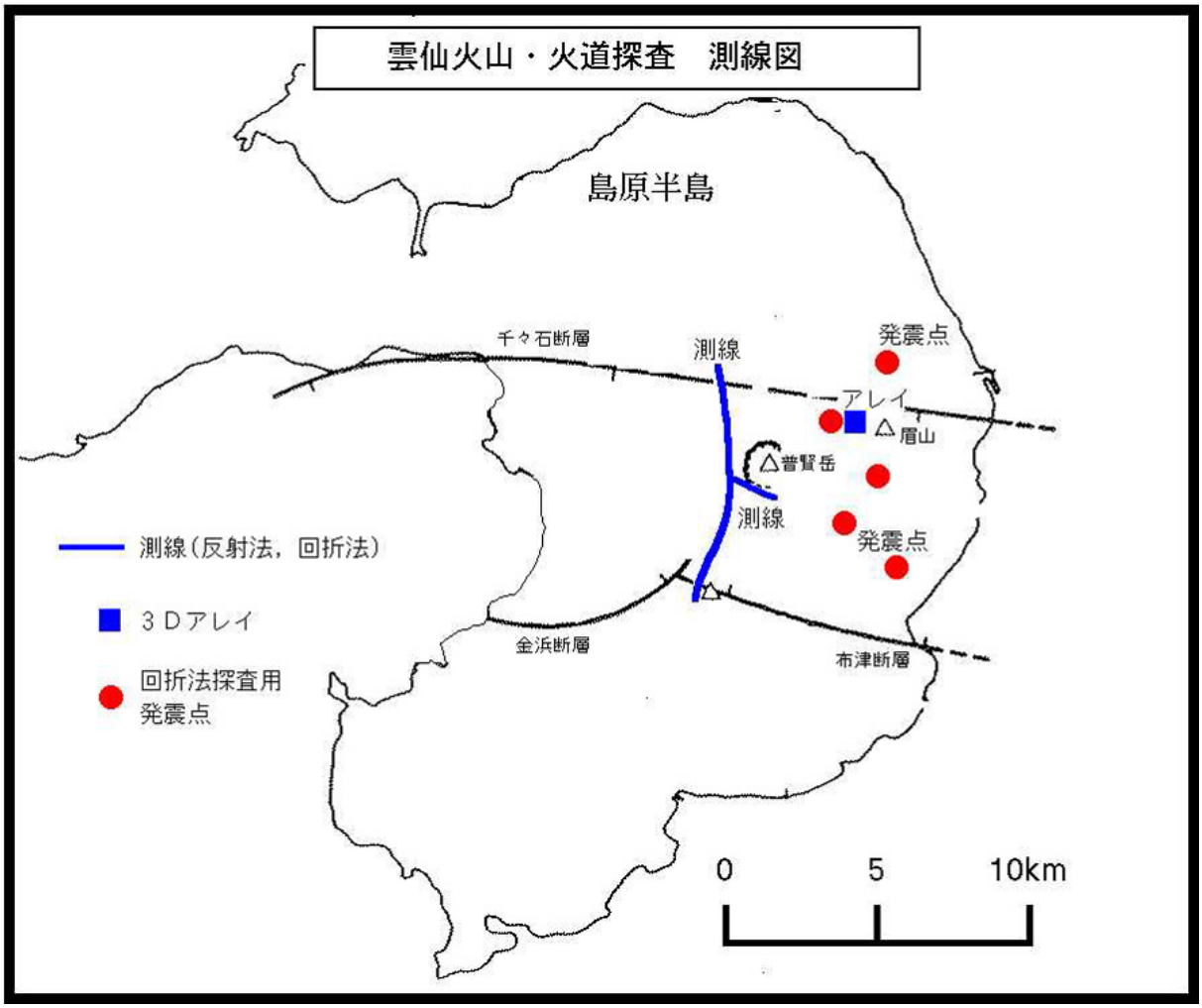


図4:　A plan for the volcanic conduit exploration at Unzen Volcano in Dec. 2001. Location of the survey lines and controlled seismic sources is shown in the map.

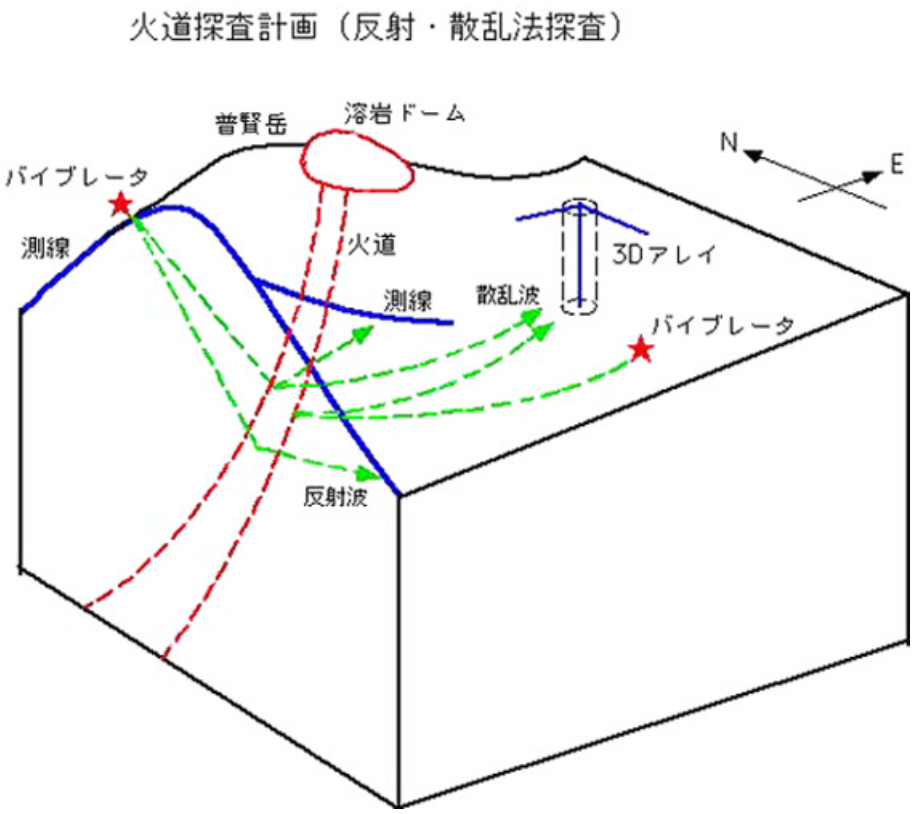


図5(a): Schematic illustration of the seismic reflection and scattering experiment in the volcanic conduit exploration at Unzen Volcano.

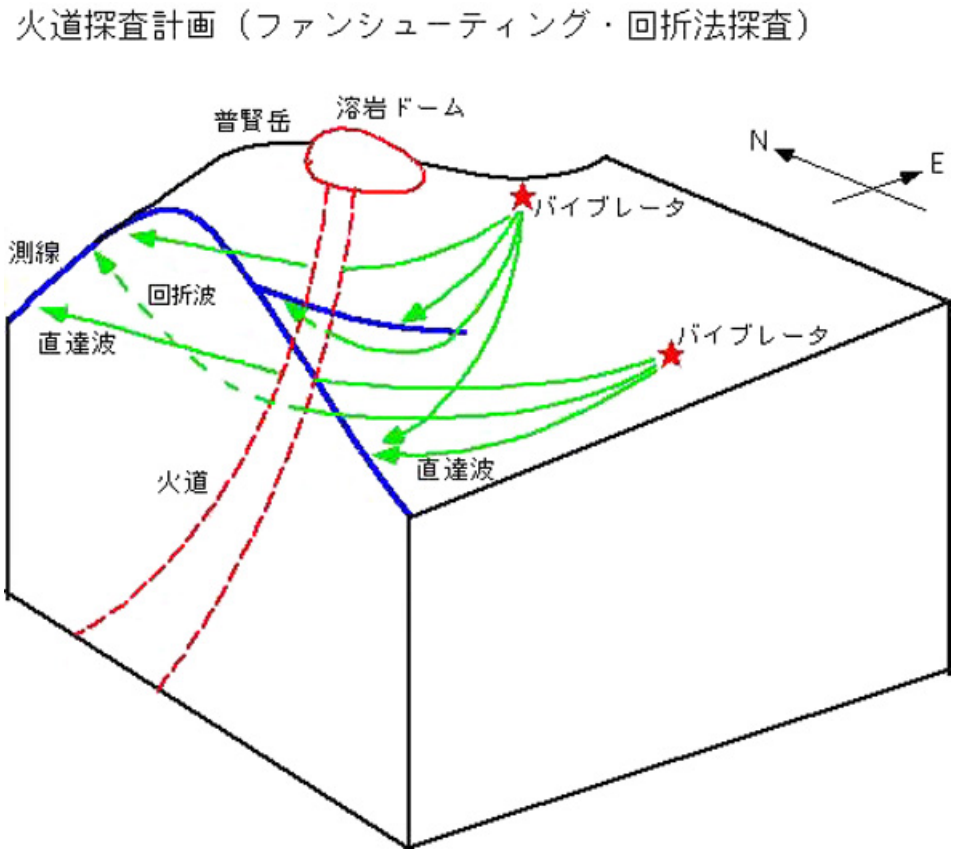


図5(b): Schematic illustration of the fan-shooting and seismic diffraction experiment in the volcanic conduit exploration at Unzen Volcano.