

ACROSSを使って地球深部を見る Penetrate across the mantle, and light up the heart of the Earth

東原 紘道^{1*}; 熊澤 峰夫¹
HIGASHIHARA, Hiromichi^{1*}; KUMAZAWA, Mineo¹

¹ 東京大学地震研究所

¹Earthquake Research Institute, Univ. of Tokyo

ACROSS は、精密な振動子を作り、同一の有限時間幅波形を繰り返し照射するトモグラフィ技法である。市販のパーツの合成による装置でも、極めて精密なスタッキングが可能なので、周波数 comb の強力な数学処理が可能、つまりデータは高度に retrievable である。多数ソースと多数センサーも干渉なしの統合運用ができる。

これまでに弾性波および電磁拡散波の研究が進んだ。前者では、Rotary モデルによる実用試験が相当の実績を上げている。特に ACROSS 方式で得られるデータの高品質を実証できたことが大きい。また開発が進行中の Linear モデルを使えば、中心核までを含む全地球の常時能動観測を実現すると見込まれる。

将来の地球透視を視野に、まずマントル底 D'' 層と内核の不均質性と異方性を狙う。近年、D'' 層の物性につき重要な実験データが出されていること、自然地震のデータを用いた大域地震学の成果が出されていること、によって突合せが可能になっているからである。この試みは新型の弾性 ACROSS の性能実証を兼ねるものであるが、さらに、これが実現するなら、ソース製作と解析の基本原則を同じくする地球浅部向け ACROSS との知見共有ができ、その将来性を見込みにも貢献する。

L 型は矩形波の力による駆動方式である。したがって不可避免的に高調波が発生するが、周波数振幅の変調を制御して、信号として活用する。

めざす不均質異方場の計算に際して、巨大自由度の算法、波数空間での処理の活用などいろいろなアイデアのテストが進められている。また既存の大域地震学のリバース・エンジニアリングは、多くの参照情報を与えている。

キーワード: アクロス, 能動監視, グローバル地震学, デイープラブラ, 理工連携

Keywords: ACROSS, active monitoring, global seismology, D'', ST collaboration

火山における弾性波アクロスの現状と展望 State of the art and future direction of ACROSS at Volcanoes

山岡 耕春^{1*}
YAMAOKA, Koshun^{1*}

¹ 名古屋大学大学院環境学研究科

¹ Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University

はじめに 火山において弾性波伝播特性（地震波速度や減衰構造）の時間変化はマグマ貫入、マグマの圧力変化、マグマの発泡状態等の化学変化、熱水やガスの移動、火山体内部の応力変化など火山活動を反映した様々な要因を推定するために重要な観測である。地震波干渉法やS波の異方性変化など自然界の震動を用いた手法は試みられているものの、高い分解能が期待できる人工的な震源を用いた方法による試みはまだ余り行われていない。

弾性波震源 弾性波アクロス震源としては、従来から回転型震源が主に用いられている。しかし既存の震源は大型のベアリングを用いていることから発熱が大きく、特別な冷却機構が必要となるなど問題点が多い。それらの問題点を解決した新型アクロス震源を開発した（山岡・他、日本地震学会 2014 年秋期大会）。この震源は小型ユニットを組み合わせた構造であり、小さい発生力から大きな発生力まで対応できる。それ以外にも散乱の影響を受けにくい低周波の震源として直線加振型も用いることができる（山岡・他、地球惑星科学連合 2011 年大会）。この震源は高調波ひずみ 5 % 程度で正弦波加振を行う事ができ、回転型に比較して低周波まで発生力が一定であるという利点がある。新型アクロス震源は、例えば多チャンネルの地震計と組み合わせて連続的な反射法モニタリングの震源として用いることができる。また低周波の直線加振型震源はインバージョンを用いた地下構造のモニタリングに利用可能である（道下・他、地球惑星科学連合 2009 大会）。

また地下深部の変動源に接近して地震波伝播特性を測定するためには、ボアホール内で稼働する震源が必要となる。径に制限があるボアホール内では、回転型の震源は高周波向きである。それに対し低周波発生のためにはボアホールの軸方向の移動による震源が向いている（横井・他、日本地震学会 2014 年秋期大会）。

桜島での試み 筆者達は、2012 年から桜島火山において弾性波アクロス震源を用いた実験を進めている（Yamaoka et al., 2014, EPS）。桜島では、鉛直軸の廻りを偏心したおもりが回転して力を発生するタイプの震源を設置した。これは火山に初めて設置することから、実績のあるタイプを設置して安定して運転するノウハウを確立するという技術的側面の目的からである。それでも夏期は停電を含む電圧変動によると思われるトラブルに悩まされる。現地での設置および稼働は、鹿児島大学の宮町教授の主導で実施し、名古屋大学が全面的に協力して行うという形で初めて実現した観測である。2012 年からの連続的稼働のデータを解析し、爆発的噴火に関連すると考えられる変動も捉えられつつある（前田・他、日本火山学会 2014 年秋期大会）。

キーワード: 火山, モニタリング, 地下構造, 時間変化, マグマ, 熱水

Keywords: Volcano, Monitoring, subsurface structure, temporal variation, magma, hydrothermal system

地下深部の地震学的タイムラプスイメジング Seismic time-lapse imaging of subsurface

笠原 順三^{1*}; 羽佐田 葉子²

KASAHARA, Junzo^{1*}; HASADA, Yoko²

¹ 静岡大学防災総合センター, ² 大和探査技術 (株)

¹CIRENH of Shizuoka Univ., ²Daiwa Exploration and Consulting Co. Ltd.

1. Introduction

The imaging of the Earth has been carried out by the passive method using natural earthquakes. When we use natural earthquakes, it is difficult to select source positions and ray paths. Although seismic interferometry technique acts as virtual sources, it seems difficult due to less excitation on refracted and reflected waves. The control sources are complementary to the natural earthquakes.

The benefit to use control sources is that we can get detailed information on the source signatures. Knowing the precise source signature, we can estimate the temporal changes of transfer functions between source and receiver.

To determine the location causing temporal change it is necessary to know the 3D seismic structure in details. Once we identify the ray path and travel time of the seismic wave concerning the target area, continuous monitoring using only a few receivers might be possible. To monitor the wider area and know the spatial distribution of changing zone, the time-lapse imaging is demanded.

2. Time-lapse Imaging

If numbers of sources and receivers are not so dense, the resolution of subsurface imaging will be limited. To enhance the resolution we can increase number of sources or receivers. In the field of the most recent seismic exploration surveys the number of receivers reaches to 10,000 with receiver spacing of 25-50 m. We might be possible to increase the density of receivers.

In the time lapse study of the subsurface, it is likely to exploit the temporal changes of waveforms. By use of residual waveforms and the reciprocal relation between source and receiver, we can do back-propagation of the residual waveforms from the receivers to focus to the location of temporal change.

3. Effects of near surface, weather conditions and rain falls

Through our knowledge of the seismic time lapse studies, the travel time changes of first arrivals are not large compared to the coda parts. One of the reasons for this is that we tend to observe the fastest arrivals and it is difficult to identify arrivals through a slower region. By use of the waveform residuals we might reduce this effect.

The temporal change in near surface layer strongly affects to observed waveforms. Without the consideration of near surface effects the results might lead to wrong answer. We will show some examples obtained in Awaji Island and a quarry field. Rain-falls and change of moisture contents due to weather conditions could be the most significant. The experimental observation of the time lapse in a quarry filed showed changes the residual waveforms day by day. The frozen of ground soil changes the waveforms during a day. We think that in the volcanic area the moisture contents in lava might strongly affect to the estimation of volcanic activity.

The effects of ground coupling of source can be eliminated by use of heavy concrete basement as in the installation of ACROSS sources.

The heterogeneity and anisotropy of the near surface layer might also affect to the paths of seismic waves and electromagnetic waves. This has to be considered.

4. Discussion and conclusions

Use of active source for the structural imaging could improve the resolution of blind parts of Earth's interior and possibly provide the time-lapse image. However, there are important factors that we should consider. The 3D structure is needed to evaluate the correct location of the temporal change. The backpropagation of residual waveforms from dense receivers gives better image of temporal changes if we properly evaluate the effects of near surface, heterogeneity and anisotropy. One of the ways to minimize the effects of near surface and weather condition on the time lapse is to place source(s) and receiver(s) in the ground.

The EM time lapse has similarity as the seismic one.

キーワード: タイムラプス, アクロス, 地震学的イメジング, 逆伝搬, 残差波形, 表層の影響

Keywords: Time-lapse, ACROSS, Seismic imaging, back-propagation, residual waveform, near-surface effect

表面波解析に基づく3次元地殻変動観測と長周期励起源への応用 Surface Wave Analyses for Observing 3-D Crustal Deformation and its Application to Long-period Excitation Sources

竹内 希^{1*}

TAKEUCHI, Nozomu^{1*}

¹ 東京大学地震研究所

¹ Earthquake Research Institute, University of Tokyo

これまでの地殻変動観測は、地表（もしくは地表付近）の固体地球の変形をとらえてきた。さらに深い領域における地殻変動観測ができれば、地球内部の運動が手にとるように見ることができ、プレート運動を始めとするマントル対流の理解にも、地震の準備・発生過程の理解にも有効であろう。

弾性波アクロスは地表のシングルフォース震源であり、主に表面波が励起される。ambient noise や自然地震に比べ、震源パラメータの不確実性が格段に小さいことから、そのぶん媒質の時間変動の検知精度は高いと考えられる。これまでも時間変動検出の努力はなされてきたが、実体波の走時変動の解析がほとんどであった。本研究は、(1) 表面波データを用いて時間変動成分を高精度に検出し、(2) 媒質の時間変化を3次元マッピングをすることを目的とし、必要な解析手法・アルゴリズムを提案する。また現在の観測データを用いてどこまで可能であることをデモンストレーションするとともに、長周期震源が開発された場合にどこまで拡張可能であることを示す予定である。地震波の伝播時間を見るというフィルター越しの観測であるが、地殻変動の3次元分布に関する直接的な証拠が得られるので、新たな地球科学の観測ツールになりうると考えている。

本解析の特色を、主に従来の実体波解析との対比により述べる。第一に最も基本的な観測量は地震波形の周波数スペクトルであるので、この基本量をできるだけ高精度で観測することに最大限の注意を払う。スペクトルの見かけ上の時間変動データから、適切なフィルター処理・モデル推定を行い、地殻変動のシグナル成分を抽出する。第2に、周波数スペクトルが基本データであるので、周波数領域でデータを解析する。個々のデータ毎に観測誤差は異なるので、時間領域に変換して取扱いを複雑にすることなく、誤差の違いを考慮する。解析手法自体は確立された表面波トモグラフィーそのものであり、既存の地震学の応用である。

キーワード: 地球内部構造, 表面波

Keywords: Earth's internal structure, surface wave

電磁アクロスにおける大規模データ解析の刷新に向けて Toward an Innovation for Large Scale Data Analysis in EM-ACROSS

大谷 隆浩^{1*}; 鹿野 豊²; 中島 崇裕³; 國友 孝洋¹; 藤井 直之⁴; 熊澤 峰夫⁵
OTANI, Takahiro^{1*}; SHIKANO, Yutaka²; NAKAJIMA, Takahiro³; KUNITOMO, Takahiro¹; FUJII, Naoyuki⁴; KUMAZAWA, Mineo⁵

¹ 名古屋大学, ² 分子科学研究所, ³ 地球環境産業技術研究機構, ⁴ 静岡大学, ⁵ 東京工業大学

¹Nagoya University, ²Institute for Molecular Science, ³Research Institute of Innovative Technology for the Earth, ⁴Shizuoka University, ⁵Tokyo Institute of Technology

本セッションの熊澤ら, 小川ら, および藤井らの発表で提示されているように, 我々は休眠中であった電磁アクロスの開発研究を再開する. 本発表では電磁アクロスにおける観測の方法と観測データから周波数伝達関数情報を抽出する手順について, 静岡大学で行われた試験送信から得られたデータを事例として再検討する. バイアスや雑音, 欠測などの異常を含む膨大な生の観測データから, 的確な誤差評価が付加された伝達関数情報を抽出するシステムの刷新につながるそれがその目的である.

アクロスは, 人工的に生成した電磁波や弾性波を複数の送信点から探査目標に対して常時発信し, 複数の受信点でその応答を測定する能動的な観測システムである. 送信される信号は位相を精密にした周期信号であり, また各送受信点が GPS 時計を利用して数十ナノ秒からマイクロ秒の精度で同期している. これにより, 1) 伝達関数を測定値として取り扱え, またその信頼度評価が可能である, 2) 高い S/N 比のデータを取得できる, 3) 構造・物性の時間変化の観測ができる, という利点がある (横山他, 2000).

電磁波を用いて地下の電氣的構造を求める電磁アクロスは, (小川・熊澤, 1996) によりその概念が提案された. その探査手法の原理と TDEM 法など既存の電磁探査法との関係は, (横山他, 2000) にまとめられている. また, 東濃鉱山 (岐阜県土岐市) や静岡大学 (静岡県静岡市) において, 接地電極を用いた試験送信が行われている (中島他, 2000), (中島, 2010). さらに今後は東京工業大学地球生命研究所と火山流体研究センターとの連携等を視野に入れて, 草津白根山をテストフィールドとした実用化研究の計画が構想されつつある. これに向けて, 従来の送信試験によって得られたデータを詳細に解析し観測方法やデータ解析の手順を再評価することで, 刷新的な改善につながる批判的・建設的な見解を導くことが本発表の目的である.

本発表では静岡大学で 2007 年から 2012 年までに行われた電磁アクロス試験送信によって得られた観測データを事例として, その観測方法や解析手順について再検討する. この試験に用いられた送信点は, 静岡大学構内に設置された 600m の 1 対の接地電極による電流ダイポールである. 観測点は送信点より 17km 離れた清水北部電場観測点, 18km 離れた俵峰磁場観測点, 7km 離れた麻機磁場観測点の 3 点である. 観測データには停電や機器の故障などのため欠測が含まれるものの, 観測期間は最長で 5 年あり, 総データ量は十数 TB におよぶ.

具体的に着目する課題として, 地表近くの変動に起因する雑音の除去について検討している. 電極接地によるダイポール送信では, 地表近くの変動 (季節変動, 年変化, 降雨など) が計測される伝達関数に大きく影響する. このため, データのスタッキングによって統計的に雑音を除去する際にも特別に考慮しなければならない. また観測点に影響するような近隣の微小地震や気象などの補助データを用いて, これらの変動をデータから除去する必要があると考えられる. データの再解析を通して, こうしたデータクリーニングに関する有用な知見を得ることが目的である. また, 電極接地によるダイポール送信もこのような変動の主要な原因の一つと考えられている. そのため草津白根テストフィールドにおいてはループアンテナによる信号送信も検討されているが, こうした観測の方法についてデータ解析により環境依存の不安定の程度を検討し, 抜本的な改善につながる見解を導くことも主眼においている.

キーワード: アクロス, 電磁探査, 火山, ビッグデータ

Keywords: ACROSS, Electromagnetic sounding, Volcano, Big data

比抵抗の時間変化の観測研究のレビューと展望 Reviews and future perspectives of studies on temporal resistivity change

小川 康雄^{1*}
OGAWA, Yasuo^{1*}

¹ 東京工業大学火山流体研究センター

¹ Volcanic Fluid Research Center, Tokyo Institute of Technology

3D magnetotelluric (MT) modeling is now in practice and is becoming a routine. It is time to start challenges on temporal changes of resistivity structures for active volcanoes or crustal-scale temporal resistivity changes.

Aizawa et al. (2011) made continuous MT measurements at two stations around the Sakurajima volcano and found that the apparent resistivities decrease after the onset of tilt measurement. They interpreted that the volatiles from the magmatic gas may decrease the resistivity of ground water. Honkura et al. (2013) analyzed the array MT data over the North Anatolian Fault during the 1999 Izmit earthquake and found the abrupt coseismic resistivity change at the fault zone.

Peacock et al. (2012, 2013) used MT method to monitor the temporal change of fluid distribution during the fluid injection for enhanced geothermal system. They used phase tensor (Caldwell et al., 2004) in order to avoid effect of temporal change of shallow local structure. MacFarlane et al. (2014) tried to explain the temporal change of phase tensor by two-dimensional resistivity model with anisotropy.

Saito et al. (2015) focused on the crustal resistivity change before and after the Tohoku-Oki earthquake. He used a profile MT data in 2003 passing through Naruko volcano (Asamori et al., 2010) and another repeated profile MT data in 2013. He also used phase tensor to detect the significant resistivity change. MT monitoring has an intrinsic problem of noise contaminations and unstable signal strengths, although it does not require any artificial sources.

Shallow resistivity monitoring by DC resistivity methods is well known. Izu-Oshima eruption in 1986 was successfully monitored by the apparent resistivity change using two sets of dipole-dipole array over the edifice (Yukutake et al., 1990). Although this experiment was successfully detected the rising magmatic melt at the vent, imaging the time-dependent structure was only possible by forward modeling with a priori volcanic knowledge (Utada, 2003)

Smaller scale 4D resistivity monitoring at Onikobe Geyser was successfully performed using multiple-source, multiple-receiver pole-pole method. Kouda (2009) report the case of time switching the current poles, but Jinguiji et al. (2012) report the case with multi-low-frequency current injection at different current poles. The latter has an advantage of continuously monitoring the 3D structure.

Volcano monitoring using controlled source electromagnetic induction is in practice at Izu-Oshima and Aso volcano using ACTIVE system (Utada et al., 2007). They use electrical grounded dipole with step waveform and measure vertical magnetic sensors at many locations. This has an advantage of covering a large area and wide frequency range. Theoretically, multiple sources are recommended, as the response functions are functions of resistivity structures including the transmitter and the receivers. Coincident loop system (VOLCANO LOOP) at the volcanic crater is proposed to monitor the phreatic eruption at Kusatsu-Shirane volcano (Hino, 2014). This has an advantage of an easy installation without digging and burying current or potential electrodes and monitoring the structure directly below the loop. However, the monitoring area is limited. The merit of the system is the detection of the secondary field when the primary field is absent.

EM ACROSS (Kumazawa et al., 2015) is a frequency domain technique. The frequency domain techniques measures primary and secondary fields together and care must be taken when the source receiver distance is smaller than the skin depth, where primary field dominates. Tensor measurements using multiple sources will be important.

キーワード: 比抵抗, 時間変化, モニタリング, 自然信号, 人工制御信号

Keywords: resistivity, temporal variation, monitoring, natural signal, artificial controlled signal

弾性波と電磁波を統合した全地球内部の物理的状態の能動的周波数コムスペクトル観測法

Integrated Frequency Comb Spectroscopy by ACROSS: Active Monitoring by Use of Elastic and Electromagnetic Waves

熊澤 峰夫^{1*}; 東原 紘道²; 藤井 直之³; 國友 孝洋⁴; 竹内 希²; 小川 康雄⁵; 大谷 隆浩⁴
KUMAZAWA, Mineo^{1*}; HIGASHIHARA, Hiromicho²; FUJII, Naoyuki³; KUNITOMO, Takahiro⁴;
TAKEUCHI, Nozomu²; OGAWA, Yasuo⁵; OTANI, Takahiro⁴

¹ELSI, 東工大, ²地震研, 東大, ³CIRENH, 静岡大, ⁴名古屋大, ⁵KSVO, 東工大

¹ELSI, TiTec, ²ERI, Univ. Tokyo, ³CIRENH, Shizuoka Univ., ⁴Nagoya University, ⁵KSVO, TiTec

In 1994, we started to develop an active method of observing the Earth's interiors by means of stationary transmission of accurate sinusoidal signal of elastic and electromagnetic waves. Original idea was quite naive in a sense that signal is a sinusoid with one spectral line, whereas we were confident that this type of frequency domain approach is definitely promising in future on the basis of its principle itself. Later developmental works made by many colleagues have been made to introduce a variety of new ideas, new theories and new technologies both in hardware and supporting theory. Koshun Yamaoka, Junzo Kasahara and their colleagues have been accumulating a large amount of applications. Now we are confident that this frequency domain approach is essential after 20 year effort on the developmental works for this methodology.

Now we claim that a new era has come to study the physics of the whole Earth's interiors by using an active method of physics instead of passive phenomenological approach. Pressure and temperature range of laboratory experiments on the materials has been extended to the bottom of the mantle, the first principle computation of physical properties has been realized, and numerical simulations of a variety of dynamic processes have come to be made, whereas the observation on the real nature has been made only passively so far without sufficient resolution and reliability yet.

We have apparently two major targets of the new observation technology:

(1) Active observation of the whole mantle, the inner core and also their boundary layers to provide much reliable data on the structure and their temporal variation with higher resolution to study the dynamics of the whole Earth. This target demands the installation of powerful transmitters distributed over the different continents, so that international corporation is demanded.

(2) Qualified system for monitoring the volcanic and earthquake fields can be now designed and proposed: implementation of denser array of both electromagnetic and elastic ACROSS of wider frequency range to acquire the detail physical states at the target sites. Special emphasis is placed on the physical studies of anisotropy and other structure-sensitive properties of the materials. The primary importance is to be placed on the study of the material physics through the qualified observations combined with laboratory experiments and material physics, which are essential for the background of future prediction research works on the disastrous events.

This presentation is an introduction to the forthcoming works directed to the "Integrated Frequency Comb Spectroscopy by ACROSS" for geophysical researches.

Keywords: ACROSS, frequency comb, monitoring observation, whole Earth

電磁・弾性波アクロスの統合による火山熱水系の変動イメージングへ向けて Towards Imaging of the Volcanic Hydrothermal System by Integrated Monitoring of Electromagnetic and Seismic ACROSS

藤井 直之^{1*}; 中島 崇裕²; 國友 孝洋³; 大谷 隆浩¹; 小川 康雄⁵; 熊沢 峰夫⁶

FUJII, Naoyuki^{1*}; NAKAJIMA, Takahiro²; KUNITOMO, Takahiro³; OTANI, Takahiro¹; OGAWA, Yasuo⁵; KUMAZAWA, Mineo⁶

¹CIRENH, 静岡大, ²RITE, ³名古屋大, ⁴名古屋大, ⁵火山流体センター、東工大, ⁶地球生命研、東工大

¹CIRENH, Shizuoka University, ²RITE, ³Nagoya University, ⁴Nagoya University, ⁵KSVO, TiTec, ⁶ELSI, TiTec

電気伝導度構造と地震波速度構造は、火山体熱水系を理解する上での必須情報である。こうした熱水系の物性は、応力、温度、周囲の岩石種、間隙流体の存在状態に依存するが、その感受性や周波数依存性（分散性）には特有の性質がある。これらの特性を利用して、火山体熱水系の変動といった地下の状態変化を捉えることは、火山活動や噴火予測にとって避けては通れない課題である。なかでも草津白根火山の湯釜・水釜を中心とした山頂地域は、これまでの継続的調査観測の蓄積により、例えば電磁気構造 (Nurhasan, et al. 2006) や浅部の低周波共鳴体の時間変動 (Kumagai, et al., 2002; Nakano & Kumagai, 2005) など、いくつかの興味深い結果が得られており、この課題に関して最適な実験場である。

こうした目的のために、ここでは従来の観測手法に加えて、電磁・弾性波アクロスの統合的観測システムを導入したいと考えている。これまで著者らは電磁・弾性波アクロスの統合的観測システムの実用化を目指して、東濃・名古屋大・静岡大などで開発してきた。とくに、電磁アクロスでは、電流ダイポール送信や電位差観測における接地電極の長期安定性の問題が注目される。これらを克服するために、例えば MI センサーの改良による 3 成分の磁気観測網（多点展開）の活用や複数のループ送信と大電流の制御法、そのアレイ化や同相と逆相ループペアの実用性など、多くの工夫が考えられる。その実現のため長期安定な観測システムを構築しその実用化試験観測を草津白根火山で実施する。もちろん、これまで開発してきたシステムとの比較観測から始めて、数年でこの新機軸の観測システムの実用化を確立したい。

キーワード: 火山熱水系, 統合アクロス, 稠密観測網, 連続観測, 構造敏感体

Keywords: volcanic hydrothermal system, Integrated ACROSS, dense observation network, continuous monitoring, structure sensitive material