

## 微小セラミック球による電磁波散乱と輻射熱抑制効果の研究 Electromagnetic scattering by fine ceramic spheres and scattering-induced suppression of insolation heating

堀江 潤<sup>1\*</sup>, 三ヶ田 均<sup>1</sup>, 後藤 忠徳<sup>1</sup>, 武川 順一<sup>1</sup>

HORIE, Jun<sup>1\*</sup>, MIKADA, Hitoshi<sup>1</sup>, GOTO, Tada-nori<sup>1</sup>, TAKEKAWA, Junichi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 京都大学大学院工学研究科

<sup>1</sup> Graduate School of Engineering, Kyoto University

### 1. 研究の背景・目的

在来型エネルギー資源が減耗し続け、代替エネルギー普及の目途もたっていない昨今、省エネルギーの徹底的な推進が重要である。電気エネルギーの主な消費源の1つが、夏場のエアコンの使用である。それを抑えることができるのであれば、大幅な省エネルギーの達成が期待できる。

夏場のエアコン使用を抑える方法の一つとして、輻射熱を抑制する遮熱塗料が注目されている。ミクロン単位の微小セラミック球が混ぜ込まれた塗料を金属の表面に塗ることで、日照射時の温度上昇が抑制される。これを建物の屋根や外壁に塗布すれば、夏の昼間の室温上昇が劇的に抑えられることが期待できる。本研究の目的は、遮熱塗料による輻射熱抑制効果を理論的に解明し、より効率のよい微小球の構造を検討することである。

### 2. 手法

本研究では、空気、塗料（微小セラミック球混入）、鉄板の三層を考え、空気層から振幅1の平面電磁波が入射したときの、鉄板に到達する波の強度を評価する。層境界における平面波の反射と透過にはFresnelの公式を、微小球による平面波の散乱にはMieの散乱理論を用いた。球の半径は4通り（0.5 μm, 0.4 μm, 0.3 μm, 0.3~0.5 μm[0.4 μmを中心にガウス分布]）考えて塗料層中にランダムに配置し、入射波長は近赤外線領域で計算を行った。

### 3. 結果

観測される波の強度を波長毎に計算した。観測強度は、球の直径程度の波長で最小値を取ることがわかった。これは、球のサイズを変えることにより特定の波長を選択的に弱めることができ得ることを示唆している。また、球のサイズに幅を持たせても観測強度にほとんど変化は出なかった。即ち、全ての球の半径を完全に同じにしなくても、その中間のサイズの球の散乱特性が得られる可能性があると考えられる。

### 4. まとめ

多様なモデルにおける入射波振幅1の平面波の観測強度を求めることができた。今後は、入射波振幅として日光の振幅を設定する等、実際に使われている遮熱塗料の散乱体系により近いモデルを想定し、その散乱特性を解析していきたい。

キーワード: 散乱, 電磁波, セラミック球, ミー散乱, 省エネルギー, 輻射熱

Keywords: scattering, electromagnetic wave, ceramic sphere, Mie scattering, energy saving, insolation heating

## 粒子法による亀裂内地震波動伝播シミュレーション Seismic wave simulation in fractured media using a particle method

武川 順一<sup>1\*</sup>, 三ヶ田 均<sup>1</sup>, 後藤 忠徳<sup>1</sup>

TAKEKAWA, Junichi<sup>1\*</sup>, MIKADA, Hitoshi<sup>1</sup>, GOTO, Tada-nori<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 京都大学

<sup>1</sup>Kyoto Univ.

The seismic wave propagation in fractured media with a particle method is presented. We use a Hamiltonian Particle Method (HPM) to simulate seismic wave propagation. It is easy to implement discontinuities in the particle method without numerical instability. Furthermore, spatial resolution can be improved only by dividing particles.

We simulate seismic wave propagation in a model with a random oriented single fracture, and implement arbitrary refinement technique to the model. The results are compared with the analytical solutions, and show good agreement with those. Next, we model the propagation of a plane wave through a well-defined fractured region. The results show good agreement with the formulae for effective moduli from existing theories. Our results show that the method is effective to simulate seismic wave propagation in fractured media.

キーワード: 粒子法, 数値シミュレーション, 亀裂, 地震波動伝播

Keywords: particle method, numerical simulation, fractured media, seismic wave propagation

## 水平回転軸型アクロス震源を用いたP波とS波に対する合成記録の生成 Simultaneous and independent generation of P and S phases using rotational seismic source (ACROSS)

笠原 順三<sup>1\*</sup>, 伊藤 慎司<sup>2</sup>, 羽佐田 葉子<sup>3</sup>, 高野 正充<sup>2</sup>, アンドレ ギデイ<sup>2</sup>, 鶴我 佳代子<sup>4</sup>, 藤井 直之<sup>1</sup>

KASAHARA, Junzo<sup>1\*</sup>, Shinji Ito<sup>2</sup>, HASADA, Yoko<sup>3</sup>, Masamitsu Takano<sup>2</sup>, Andre Guidi<sup>2</sup>, TSURUGA, Kayoko<sup>4</sup>, FUJII, Naoyuki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 静岡大学理学部, <sup>2</sup> NTT データ CCS (株), <sup>3</sup> 大和探査 (株), <sup>4</sup> 東京海洋大学

<sup>1</sup> Shizuoka University, <sup>2</sup> NTTdataCCS Co. Ltd., <sup>3</sup> Daiwa Exploration and Consulting Co. Ltd., <sup>4</sup> Tokyo University of Marine Science and Technology

### 1. はじめに

自然地震ではP波とS波が発生するが、人工震源を用いて地下構造を調べるときには通常P波震源とS波震源を別々に用いる。パイロサイスやエアガンもP波震源である。著者らは地下の変動の常時監視のために偏心荷重が軸の周りに回転する方式を用いた弾性波アクロスを用いている。これまでに製作されたアクロス震源には回転軸が鉛直のものと水平のものがあるが、フィールド実験が行われたのは主に回転軸が鉛直のものであり、加震方向は水平面内であった。今回水平回転軸の弾性波アクロス震源を新たに製作し、フィールドでの観測記録から上下加震と水平加震に対する応答を取得する試みを行った。

### 2. 弾性波アクロス震源とスペクトル、加震方向

弾性波アクロスは1995年より熊沢峰夫氏や名古屋大学のグループなどによって開発が続けられている (Kumazawa et al., 2000, Kunitomo and Kumazawa, 2004)。実用型の弾性波アクロス震源は、偏心荷重を軸の周囲に回転させ、遠心力によって地震波を発生させるものである。これらの震源では、正回転、逆回転で得られた記録を合成する事により回転面内の任意の方向への力に対する応答を作り出すことができる。鉛直回転軸をもつアクロス震源は水平方向の力を発生するので、地下にS波を多く放射しP波の放射は少ない。S波だけでなくP波も同時に使い時間変化を求めることを目的として水平回転軸をもつアクロス震源を製作し、上下・水平加震を生成するフィールド実験を行った。この新型アクロスは10-50Hzの震動を発生できるが、今回は10-35Hzを試験した。

### 3. 上下・水平加震の合成

回転型アクロス震源は、1つの偏心荷重を持つ1台のモータを正逆回転し、それによる震動を観測してそれぞれの記録を合成する。正逆回転の和によって上下加震に対する応答が得られる基本原理はツインパイプレータと同様である。位相をずらして合成することで回転面内の任意の方向の加震に対する応答を得られる。

おもりの重心位置を  $r(t)=[x,y,z]=[R\cos q(t), R\sin q(t), 0]$  と表す。zは回転軸方向、xは基準時刻のおもりの向き(鉛直下向き)、Rはおもりの回転半径、 $q(t)$ は震源の設計回転位相の時間関数である。このとき遠心力は  $F(t)=-M\ddot{r}(t)$  となり、周波数領域では  $F(\omega)=MR\omega^2[C(\omega), S(\omega), 0]$  となる。C( $\omega$ )とS( $\omega$ )は  $\cos q(t)$ と  $\sin q(t)$ のフーリエ変換である。逆回転では位相が $-q(t)$ となり、力は  $F^-(\omega)=MR\omega^2[C(\omega), -S(\omega), 0]$  である。正回転の場合を  $F^+$  と書く。

入力が震源の力で出力が観測点の地動である線形系  $U(\omega)=H(\omega)F(\omega)$  を考える。Uは地動変位または速度の3成分ベクトル、Hは求めるべき伝達関数を表す2階テンソルである。Hを3つのベクトル  $H_x, H_y, H_z$  に分解すると、 $U(\omega)=H_x(\omega)F_x(\omega)+H_y(\omega)F_y(\omega)+H_z(\omega)F_z(\omega)$  と表せる。このとき正・逆回転の地動スペクトルは

$$U^+(\omega)=H(\omega)F^+(\omega)=MR\omega^2\{H_x(\omega)C(\omega)+H_y(\omega)S(\omega)\}$$

$$U^-(\omega)=H(\omega)F^-(\omega)=MR\omega^2\{H_x(\omega)C(\omega)-H_y(\omega)S(\omega)\}$$

となる。従って伝達関数は以下の式で計算できる。

$$H_x(\omega)=\{U^+(\omega)+U^-(\omega)\}/\{MR\omega^2C(\omega)\}$$

$$H_y(\omega)=\{U^+(\omega)-U^-(\omega)\}/\{MR\omega^2S(\omega)\}$$

回転型のアクロス震源では  $H_z(\omega)$  は計測できない。時間波形はフーリエ逆変換により計算する。

### 4. 結果

得られた伝達関数において、観測点#7の上下加震のUD成分では0.2秒にP波、水平加震のNS成分は0.5秒にS波が到達していると考えられる。NS・EW成分での到達時間の差は異方性の影響か、或いは違う波群なのかは明確でない。全点の観測記録を震源からの距離に従って並べるとP波、S波の分離が明瞭である。上下加震のUD成分はP波が、水平加震のEW成分ではS波が卓越している。P波は1.6km/sの大坂層群、2.5km/sの神戸層群、4.0km/sの花崗岩を伝搬した屈折波と反射波からなると解釈できる。以上から、上下・水平加震に対応する記録を正・逆回転の記録から合成できていることを確かめた。

### 4. 結論

フィールド実験により、1台の回転型震源によってP波震動とS波震動を適切に合成できることを確認できたと思う。今後地震探査において極めて有用な技術となるだろう。

謝辞

# Japan Geoscience Union Meeting 2012

(May 20-25 2012 at Makuhari, Chiba, Japan)

©2012. Japan Geoscience Union. All Rights Reserved.



STT56-03

会場:203

時間:5月20日 16:00-16:15

本研究はJCCPの事業費によって行った。ご理解とご支援に対し深く感謝する。

キーワード: P波, S波, 回転型震源, PS, 同時生成, アクロス

Keywords: P-wave, S-wave, Rotational Source, PS, Simultaneous generation, ACROSS

## 簡便な動コイル型地震計による CCA 法の為の計器補正について On the system correction for CCA method using simple moving coil type seismometers

横井 俊明<sup>1\*</sup>

YOKOI, Toshiaki<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>(独) 建築研究所国際地震工学センター

<sup>1</sup>IISEE, BRI, Japan

CCA 法 (Cho et al. (2006), Tada et al. (2006) 等) は、小口径アレイを使った微動観測によってアレイ径の数十～数百倍の波長を持つレーリー波の分散曲線を推定できるとされる。小口径アレイによる観測では、各地震計からの信号の微小な位相差・振幅差を正確に測定する必要があることは想像に難くない。ところが、簡便な動コイル型地震計の出荷の際の特性は、それ程正確には調整されていない。また地震計の設置状況や設置点直下の非常に局所的な増幅等の影響等も考慮する必要がある。本発表では、これらの影響を観測記録自身とハドルテスト記録を使って補正する為の下記の定式化と、それを検証する為の実験結果を紹介する。

この定式化で補正が可能であるためには、次の二つの条件が必要であると考えられる、i) 非常に局所的な増幅の影響を除いて全地震計への入力地動のパワースペクトルは共通である。ii) 設置や局所的な増幅の影響に因る地震計間の位相差は無視できる。後者は、実観測の際の水平台等を使った注意深い地震計設置の必要性を示唆する。現場では気泡管式水準器による地震計設置状態の調整しかできないため、固有周波数付近の急激な位相特性の変化を適切なシャント抵抗の使用により予め抑制しておくことも場合によっては有効と考えられる。

キーワード: 微動, 小口径アレイ, 計器特性補正, 分散曲線, コヒーレンス

Keywords: Microtremor, Miniature Array, System Correction, Dispersion Curve, coherence

【定式化】計器補正の為に、次式で示す中間的な量  $R_{ik}(f)$  を観測記録のクロススペクトル

$C_{ik}^{obs}(f)$  の代わりに用いて CCA 係数を周波数領域で計算する。

$$R_{ik}(f) = C_{00}^{obs}(f) \cdot C_{ik}^{obs}(f) \cdot \overline{Cor_{ik}^{huddle}(f)} / \sqrt{C_{00}^{obs}(f) \cdot C_{kk}^{obs}(f)}$$

ここに  $C_{00}^{obs}(f)$  は、バンドパスフィルターとして使う代表チャンネルのパワースペクトル。

$$\overline{Cor_{ik}^{huddle}(f)} = \exp\left\{j/N \sum \text{Arg}\left(\sqrt{C_{ii}^{huddle}(f) \cdot C_{kk}^{huddle}(f)} / C_{ik}^{huddle}(f)\right)\right\}$$

は、ハドルテスト記録から計算した補正係数を示す。ただし、 $j$  は虚数単位、総和はハドルテスト記録のプロセッシングに使う時間ブロックに対して取る。上記2つの条件下で、近似

$R_{ik}(f) \approx \{C_{00}^{obs}(f)/P(f)\} \cdot C_{ik}(f)$  が成立し、CCA 係数は  $R_{ik}(f)$  を用いて計算できる。ただし

$P(f)$  は、全チャンネルに共通の地動入力のパワースペクトルを示す。

$$\sigma_{CCA} = \frac{\sum C_{ik}(f)}{\sum C_{ik}(f) \exp\{-j(\alpha_i - \alpha_k)\}} \approx \frac{\sum R_{ik}(f)}{\sum R_{ik}(f) \exp\{-j(\alpha_i - \alpha_k)\}}$$

## 東日本大震災前後における河川堤防の浅部物性変動

### Change of the near-surface geophysical properties along levee systems before and after the 2011 East Japan Earthquake

稲崎 富士<sup>1\*</sup>

INAZAKI, Tomio<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 土木研究所 地質・地盤研究グループ

<sup>1</sup> PWRI, Geology and Geotechnical Engineering RG

筆者らは河川堤防の安全性評価のための原位置調査手法として、ランドストリーマー方式高精度表面波探査と、牽引式比抵抗探査あるいはスリングラム法電磁探査を組み合わせた「統合物理探査」を提唱し、さらにその普及のための技術情報のとりまとめ・開示を進めてきた(稲崎, 2006; 稲崎ほか 2010)。これまでに14河川系39測線区間47kmにおいて実証調査を行ない、堤防縦断方向に存在する数10m規模の異常部を検出することが可能であることを明らかにしてきた。開発した統合物理探査の解析にあたっては、計測物性値から堤防および基礎地盤の浸透に対する安全性を評価することを前提としていたが、S波速度分布を求めることから、当初から地震に対する安全性も評価することが可能であることを指摘していた(稲崎ほか, 2008)。

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震による東日本大震災では、東北地方のみならず関東地方でも多くの堤防区間で深刻な被災が発生したが、そのなかには地震以前に統合物理探査を適用していた堤防区間も含まれていた。そこで同一区間において新たに同一条件で統合探査を実施し地震前の探査結果と比較検討した。比較探査を実施したのは小貝川左岸35km付近の約1.8kmの区間と江戸川左岸58km付近約3kmの区間の2区間である。前者では旧河道横断部約80mの区間で堤防天端が最大70cm沈下し、のり尻部に数条の縦断クラックが発生し小規模な噴砂も認められた。後者では堤体川表側に数条のクラックが発生し、約200mの区間で堤体のり部が最大1.5mすべり崩壊した。この2区間では2005年9月に統合物理探査を適用し、これらの地震被災区間に物性的異常部を見出していた。

比較探査は2011年7月から8月にかけて実施した。その結果、小貝川左岸35km付近の地震被災区間は相対的に低S波速度かつ低比抵抗で特徴づけられること、地震前後においてもその物性的特徴は共通していることがわかった。また測線全区間において、堤体部基礎地盤部ともS波速度が地震後に低下する傾向が認められた。地震による表層部の剛性率低下を捉えているとの解釈も可能である。一方比抵抗値は飽和帯である基礎地盤部ではほとんど変化していなかったが、堤体部では全域において比抵抗値が高くなる傾向が認められた。不飽和帯の比抵抗は湿潤状態の変化の影響を受けやすいことが知られている。堤体部の比抵抗変化はそれを捉えたものと解釈することができる。

江戸川左岸58km付近の被災は、地震前の探査で堤体下半に認められた高比抵抗異常区間の一部で発生した。この異常区間はS波速度が相対的に低く、低S波速度かつ高比抵抗で特徴づけることができる。堤体上半部においてはS波速度、比抵抗とも地震前後においてほぼ同じであり明瞭な変化は認められなかった。一方堤体下半部ではS波速度構造、比抵抗構造とも顕著な変動が認められた。特に被災区間を含む約600mの区間で比抵抗値が大きく低下していた。なおこの探査区間では堤防高さが10m以上あり、基礎地盤部の物性情報はわずかしが得られていない。また地震を挟んだ探査の間に、堤体の川表側に全測線区間にわたって腹付け盛土が施工されていた。地震時の法すべりはこの新規盛土部において発生している。探査結果からは堤体内部の不均質物性構造が法すべりの原因となった可能性が示唆された。

キーワード: 東北地方太平洋沖地震, 物理探査, 河川堤防, 物性変化

Keywords: East Japan Earthquake, geophysical survey, levee system, change in geophysical properties

## 不等間隔格子を用いた有限差分法による現実地形のモデル化 -海底地形の効果が津波伝播に与える影響評価- Modeling Real Structure with FDM using In-equally Spaced Grids - Effects of Seafloor Topography on Tsunami Propagation-

大畑 朋也<sup>1</sup>, 三ヶ田 均<sup>2\*</sup>, 後藤 忠徳<sup>2</sup>, 武川 順一<sup>2</sup>

OHATA, Tomoya<sup>1</sup>, MIKADA, Hitoshi<sup>2\*</sup>, GOTO, Tada-nori<sup>2</sup>, TAKEKAWA, Junichi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 石油資源開発 (株), <sup>2</sup> 京大院工

<sup>1</sup>Japan Petroleum exploration Co., Ltd, <sup>2</sup>Kyoto Univ.

様々な地球物理学的諸現象を解明するために数値シミュレーションを行う際、地球の表面形状がその現象に影響を与える場合が多く、より現実に近いモデルを設計することは現象の理解のために必要である。そこで現実の地形をモデル化する手法として本研究では不等間隔格子を用いた有限差分法を考えた。さらに本手法を津波防災分野に適用し、海底地形の効果による津波伝播への影響に関して考察した。

地震に伴って発生する津波挙動を予測する際に津波発生・伝播シミュレーションが広く行われているが、特に津波後続波の挙動予測が観測値と一致しない場合が多いという問題が知られている。本研究ではこの問題に対して、海底地形を考慮した津波の伝播シミュレーションを導入することで解決できるのではないかと、という仮説を立てこの課題に取り組んだ。計算手法としてはナビエ・ストークスの方程式を3次元方向で解き、上記の不等間隔格子を利用した有限差分法により現実の海底地形をモデル化し、津波伝播シミュレーションを行った。さらに本手法における津波伝播と長波近似による津波伝播とを比較することで、海底地形の効果が津波伝播に与える影響を評価した。その結果、現実の水深変化の効果と浅海域における非線形項の効果の2つが津波伝播に大きな影響を与えることが明らかとなり、より現実に近い海底地形を表現することでそれらの要素を津波伝播シミュレーションに取り入れた本手法が、後続波の高精度予測につながるということが分かった。

キーワード: 津波伝播シミュレーション, 海底地形, モデリング, 不等間隔格子, 津波後続波, 東北地方太平洋沖地震

Keywords: simulation of tsunami propagation, seafloor topography, modeling, in-equally spaced grids, later phases of tsunami, The Tohoku earthquake

## 海洋音響トモグラフィへのフルウェーブインバージョンの適用 The application of the fullwave inversion techniques to Ocean Acoustic Tomography

樹田 行弘<sup>1\*</sup>  
KIDA, Yukihiro<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 京都大学工学研究科

<sup>1</sup>Graduate school of engineering, Kyoto University

The problem of Ocean Acoustic Tomography (OAT) is to estimate the state of ocean in temperature, salinity, etc. that are related to sound velocity structure from the travel-time or other properties in acoustic wave propagation. The ocean is nearly transparent for low frequency acoustic waves so that the acoustic wave could propagate for thousands of kms. OAT was first introduced by Munk et al. (1995) and based on a ray theoretical approach. A travel-time inversion method has been developed using a ray-tracing scheme in the Munk's method. There is some similarity with seismic exploration both in theory and in data processing methods. However the waveform analysis is not common in OAT although its importance is widely recognized in seismic explorations. Actually there is hardly any precedent studies on waveform inversion in the application of OAT. In this study, a full-wave inversion technique is applied to OAT in the 2-D acoustic FDTD model in order to investigate the effectiveness of the method through the comparison of the results with that of the ray-tracing inversion approach. Then, as an application for a field data, the full-wave inversion technique is applied to the VCS experiment data in Lake Biwa. The result shows applicability of the full-wave inversion technique to OAT and also shows that full-wave inversion provides higher image construction than in travel-times inversions.

キーワード: 水中音響, VCS, フルウェーブインバージョン, 海洋音響トモグラフィ

Keywords: Underwater acoustic, VCS, Full-wave inversion, Ocean Acoustic Tomography



## 平行断層群の形成と応力場の関係

### Relationship between formation of parallel faults and stress fields in rock mass

今井 優希<sup>1\*</sup>, 三ヶ田 均<sup>1</sup>, 後藤 忠徳<sup>1</sup>, 武川 順一<sup>1</sup>

IMAI, Yuki<sup>1\*</sup>, MIKADA, Hitoshi<sup>1</sup>, GOTO, Tada-nori<sup>1</sup>, TAKEKAWA, Junichi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 京都大学

<sup>1</sup> Kyoto University

地震や地殻変動により平行あるいはそれと共役な方向に平行な断層群が形成されることがあり、このような平行亀裂群は、地殻スケールだけでなく岩石破壊試験などの供試体スケールでも確認できるが、その発生メカニズムや応力場との関係などは力学的に明らかになっていない。このような亀裂の挙動の解釈には、破壊力学の理論を用いた研究が数多くなされており、これらの多くは亀裂の進展を表現することに成功している。しかし、この理論によって亀裂の発生や結合を表現することは難しいため、近年では数値計算を用いた研究が盛んになされている。本研究においても数値計算によって断層の発生から進展までを表現しようと試みた。

本研究では、数値解析手法としてHPM (Hamiltonian Particle Method) という粒子法の一つを用いている。粒子法は連続体の運動を離散粒子群の運動で近似するため、計算格子の構築の必要がなく、境界面の複雑な変化や構造物の大変形、破壊現象などを比較的容易に扱えるという利点がある。計算モデルとして玄武岩質の直方体を仮定した3次元弾性体モデルを用いた。引張・せん断強度に不均質性を与えた下で、破壊条件には3次元 Mohr-Coulomb 条件を適用した。与える応力場として、圧縮場やせん断場、曲げの作用などを考え、その方向や大きさを変化させることで断層形状を比較した。計算の結果、圧縮場では主圧縮方向と直交する方向の拘束圧の影響が平行断層群の生成に対し支配的であり、拘束圧が高いほど平行断層群が密に発達すること、せん断場においてもせん断方向に合うように平行断層群が生成されることが分かった。

キーワード: 断層, 粒子法

Keywords: fault, particle method

## ACROSSによる淡路島野島断層近傍における11年間の地震波速度モニタリング 11 years long term monitoring of Seismic velocity near Nojima fault using ACROSS

生田 領野<sup>1\*</sup>, 山岡 耕春<sup>2</sup>, 渡辺 俊樹<sup>2</sup>, 國友 孝洋<sup>1</sup>, 西上 欽也<sup>3</sup>

IKUTA, Ryoya<sup>1\*</sup>, YAMAOKA, Koshun<sup>2</sup>, WATANABE, Toshiki<sup>2</sup>, KUNITOMO, Takahiro<sup>1</sup>, NISHIGAMI, Kin'ya<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 静岡大学理学部, <sup>2</sup> 名古屋大学大学院環境学研究科, <sup>3</sup> 京都大学防災研究所

<sup>1</sup>Faculty of Sciences, Shizuoka University, <sup>2</sup>Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, <sup>3</sup>Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

淡路島野島断層近傍に設置された人工震源システム (ACROSS=精密制御定常信号システム) を用い、地表と地下 800m のボアホール間で 11 年間にわたる地震波速度の変動をモニタリングした結果、実体波速度に約 4 %の速まりが見られたので報告する。

ACROSS 震源装置は偏心錘型のパイプレータ震源装置であり、地中で錘を精密に制御して回転させ、遠心力で発生させた地震波を定期的に送信することができる。我々はこの ACROSS 震源装置を 1995 年兵庫県南部地震で動いた野島断層の南端付近に建設し、地震で大変位をひきおこした断層周辺の岩石の弾性的性質の地震後の変化を地震波速度を通して明らかにすることを試みている。震源装置は同じ建屋内に設置された 2 台が同時に運転されており、それぞれ最大回転速度 25Hz と 35Hz で  $2 \times 10^5$  N の力を発生するように設計されている。これらの震源装置をそれぞれ約 9 から 16Hz, 16 から 22Hz の範囲で周波数変調させて運転した。運転は 2000 年から 2012 年まで断続的に行われ、震源から放射された地震波は直下のボアホール型地震計で観測されている。

本研究では以下の 3 点について検討した。直達の P および S 波の走時と振幅変化、後続波部分にあらわれる速度変化、S 波の偏向異方性の変化である。

P, S 波については、それぞれの到達時刻付近を 0.3 秒幅のウィンドウで抜き出し、相互相関法で到達時刻の変化を算出したところ、11 年間で 4 %程度の到達時刻の速まりを検出した。振幅は 20%程度ばらついてはいるが、単調な増加減少のトレンドは見いだせない。

後続波部分は S 波のコーダ部分 1 秒間の波形を 0.2 秒幅のウィンドウを 0.1 秒ずつずらしながら抜き出した。コーダ波が散乱されてくる震源-観測点を含んだ周辺の特定のボリューム内で一様な速度変化を仮定し、各ウィンドウの波形の走時変化を走時の絶対値で割って速度変化を推定した。11 年間で 1 %程度の地震波速度の速まりに相当する変動が見られた。

S 波の偏向異方性については過去の研究 (Ikua et al., 2004) で、断層平行成分が速く直交成分が遅い約 10%の非常に大きな異方性が見られているが、その変化については 2%の分解能の範囲内では 11 年間で有意な変化は見られなかった。

コーダ波部分の速度変化が P, S 波の速度変化より小さかったことは、直達の P, S 波の変化がコーダ波のカバーする領域 (~1km 程度) に比べて局所的であることを示唆している。

また 11 年間の速度変化を、大きな異方性を作り出している断層近傍の破碎構造の変化であるとすると、クラック密度の減少 ( $N=0.004-0.01$  程度) が示唆される。本実験サイトで 1996 年から繰り返し行われている 1700m ボアホールを通しての断層破碎帯への注水試験の解析では、透水係数が 2000 年から 2007 年にかけて、50%程度低下したことが報告されており (Kitagawa et al., 2007 など)、クラック密度の減少と定性的には整合的である。

10%もの異方性を作り出す破碎構造がありながら、速度変化は 4%であることから、地震後 5 年から 16 年の 11 年間の断層の回復は、クラック密度という観点で言えばごく小さいと言える。透水係数の大きな減少は、クラック間のコネクションの切断や目詰まりのような過程によりクラック密度の減少が拡大されて見えていると言えるかもしれない。

キーワード: アクロス, 野島断層, 断層解剖計画, 地震波速度, モニタリング

Keywords: ACROSS, Nojima Fault, Fault-zone Probe, Seismic velocity, Monitoring

## 宇宙線電磁成分を用いた横穴上部の土中水分量測定

### The measurement of soil water content of upper part of the cave using electromagnetic component of air shower

武多 昭道<sup>1\*</sup>, 大久保修平<sup>1</sup>, 田中宏幸<sup>1</sup>

TAKETA, Akimichi<sup>1\*</sup>, OKUBO Shuhei<sup>1</sup>, TANAKA K.M. Hiroyuki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所

<sup>1</sup>Earthquake Research Institute, University of Tokyo

宇宙線軟成分を用いて土中水分量を測定する新手法について報告する。

地表に入射する宇宙線は硬成分と軟成分から成り、硬成分は主にミュオン、軟成分は主に電磁成分から成る。軟成分の貫通能力は硬成分と比較して低いため、建物や丘等、 $2\text{kg/cm}^2$  よりも薄い、つまり水換算で20m よりも薄い構造物のラジオグラフィーに適している。しかし、これを行うには、軟成分と硬成分を分離する必要がある。軟成分と硬成分の分離は、強力な磁石と稠密な検出器によって可能であるが、その重量とコストのため、ラジオグラフィーには適さない。

我々は安価かつ効率的な統計的分離法を開発し、桜島有村観測坑にて試験観測を行った。試験観測の結果、軟成分の強度と降雨との間に有意な逆相関があることが分かった。降雨によって土中水分量が増加すると、減衰量が増加することが分かっているので、この結果から、宇宙線軟成分を用いて、土中水分量の増加を検出できたと言える。

本検出手法によって横坑周辺の土壌水分の時空間変動が押さえられれば、土質力学に基づいて、降雨に伴う地盤擾乱(ダイラタンシー等)や重力測定、傾斜測定等、降雨によって擾乱を受けやすい測定データの定量的な補正が可能となる。これまで行われてきた地殻変動測定の高精度化や、火山内部のマグマ運動の推定精度向上につながることを期待される。また、将来的には、地滑り面周辺の土壌水分の時空間変動の測定等、土砂災害防止のための基礎データの提供が可能となると期待される。

キーワード: 土中水分率, 宇宙線, ラジオグラフィー

Keywords: soil water content, cosmic ray, radiography

## MT 周波数応答関数を用いた電磁場時系列解析 - 物理探査への応用 - Analysis of electromagnetic data by using MT frequency response function, application of geophysical exploration

長谷 英彰<sup>1\*</sup>, 上嶋 誠<sup>1</sup>

HASE, Hideaki<sup>1\*</sup>, UYESHIMA, Makoto<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所

<sup>1</sup>Earthquake Research Institute, Tokyo University

地表で観測される電磁場時系列データには電離層や磁気圏起源の電磁場変動によるインダクションレスポンスが含まれており、MT法ではそれらをソースとして観測データから電場と磁場との周波数応答関数を求めることにより比抵抗構造の推定を行っている。地表で行われる電磁場観測は、このように比抵抗構造を推定するために行われることが多いが、例えば地下への注水・CO<sub>2</sub>貯留実験や地震に伴うシグナル検出など、インダクションレスポンスをターゲットとしない探査が行われることもある。このような場合、電磁場時系列データに含まれるインダクションレスポンスは解析の妨げとなるため、例えば地磁気擾乱が発生した場合には、ターゲットとするレスポンスを得ることが極めて困難な状況に陥ることがある。このような場合の解決策は、インダクションレスポンスが時系列データにどの程度含まれているか推定し、ターゲットレスポンスのシグナルを明確に抽出することであるが、このような解析が行われることは少ない。本講演では、MT観測で得られる周波数応答関数を用いて電磁場時系列データのインダクションレスポンスを推定する方法について解説を行い、実際の観測データを用いた解析結果について議論を行う。

キーワード: MT法, 周波数応答関数, 物理探査, 時系列解析

Keywords: MT method, frequency response function, geophysical exploration, analysis of time-domain data

## 偏波と透過波を利用した地中レーダによる地下構造探査精度の向上 Improvement of prospecting accuracy of subsurface structure by GPR using polarization and transmitted waves

槇原 慧<sup>1\*</sup>, 吉永 徹<sup>2</sup>, 小池 克明<sup>3</sup>, 橋野 芳治<sup>4</sup>, 吉田 雄司<sup>5</sup>, 板井 秀典<sup>6</sup>

MAKIHARA, Kei<sup>1\*</sup>, YOSHINAGA Tohru<sup>2</sup>, KOIKE Katsuki<sup>3</sup>, HASHINO Yoshiharu<sup>4</sup>, YOSHIDA Yuji<sup>5</sup>, ITAI Hidenori<sup>6</sup>

<sup>1</sup> 熊大・院・自然科学, <sup>2</sup> 熊大・工, <sup>3</sup> 京大・院・工学, <sup>4</sup> (株) 環境開発, <sup>5</sup> 九州計測器 (株), <sup>6</sup> ジオクロノロジージャパン

<sup>1</sup> Graduate School Sci. & Tec., Kumamoto Univ., <sup>2</sup> Faculty of Eng., Kumamoto Univ., <sup>3</sup> Graduate School of Engineering, Kyoto Univ., <sup>4</sup> Environment & Technology Co., <sup>5</sup> KyushuKeisokki Co., <sup>6</sup> Geochronology Japan Inc.

レーダを利用した地下探査技術(地中レーダ)によれば,地表から非破壊的に地表下数メートルまでの地下構造を可視化できるという利点がある。そのため地中レーダは各種埋設管(水道・ガス管,通信・電力ケーブルなど)の探索,地盤沈下の原因となり得る地下空洞や地下亀裂の存在の調査,考古学的な遺跡の発掘,地質構造の推定,および地下資源(地下水,石炭など)の探査など,多くの分野で利用されている。従来,レーダの反射を利用して,地層の境界面の位置や形状を把握するのが地中レーダ探査の主な目的である。さらに地下探査精度を向上させるためには,このような幾何情報のみでなく,地下物質の物性に関する媒質定数(誘電率,導電率,透磁率など)を推定し,物質が何であるかを同定することが望まれる。しかしながら,地下の物性分布や地層境界の形状に関する不均質は特に大きく,従来の反射型の地中レーダでは物性まで正確に把握するのは困難なのが現状である。

そこで本研究では,地中レーダによる地下構造の探査精度の向上を目的とし,送信アンテナと受信アンテナを分離させ,透過波と複数の偏波を計測できる機器の開発を行った。これをPOGRA(POLarimetry Ground penetration RAdar system)と称した。従来の地中レーダでは1つの偏波成分しか利用していないが,複数の偏波成分を計測することで地下構造の可視化精度を向上させることが期待できる。また,地中の対象物を測定する場合,透過型地中レーダによれば,反射型に比べてレーダの伝播距離が約半分になることに利点がある。これによりレーダの受信強度が増加し,探査可能な深度範囲が増大する。

POGRAの有用性を検証するために,まず円柱,三角柱,四角柱という簡単な形状の埋設物に対して,偏波計測を適用した。その結果,反射波の半値値と振幅の2つを組み合わせれば形状の識別が可能となることがわかった。

次に,多くの小型の箱に物性が異なる試料を詰めることで地層モデルを作製した。試料として豊浦標準砂を用い,その含水比を変えることで誘電率(比誘電率)が大(約20),中(約10),小(約5)の3種類の状態を設定した。これらの深度方向への並びを変えた6パターンの3層構造に反射型を適用した。フレネルの反射率の公式に基づき,測定結果から各層の誘電率を算定した。その結果,深度が深くなるにつれて誘電率が大きくなるパターンに対しては,誘電率を妥当に得られることがわかった。さらに,このモデルの下部に空間を設けることで,透過型の計測をした。その対象は地下水面下に存在する空洞の検出であり,箱に水を満たした領域を設定し,この下に空の箱を置いてこれを空洞とみなした。その結果,減衰が大きい帯水層を介しても透過波を検出でき,空洞の存在が把握できることを明らかにできた。

キーワード: 誘電率, フレネルの法則, 反射率, 透過率, 地質モデル

Keywords: Dielectricity, Fresnel equations, Reflection coefficient, Transmittance, Geological model