

平成22年 6月 4日現在

研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2007～2009
 課題番号：19540442
 研究課題名（和文） 比抵抗－地震波速度同時解釈による物質インヴァージョン手法の開発
 研究課題名（英文） Development of a new scheme of the joint-inversion for seismic and resistivity structures
 研究代表者
 上嶋 誠 (UYESHIMA MAKOTO)
 東京大学・地震研究所・准教授
 研究者番号：70242154

研究成果の概要（和文）：

地下の間隙流体存在様式を明らかにし、地震・火山活動等の地殻活動要因を明らかにするため、限定した2次元問題について物質情報（液相分率、空隙の形状、岩石種）をモデルパラメータとする比抵抗・地震波速度構造同時インヴァージョン手法を開発し、シンセティックモデルについて有効性を検証した。そこから、比抵抗・地震波速度それぞれのインヴァージョン手法のさらなる精度向上の必要性が明らかになったため、比抵抗インヴァージョンの側で、手法の改良を行った。

研究成果の概要（英文）：

In order to derive detailed information on the subsurface interstitial fluids and elucidate mechanism of crustal activities such as seismic and volcanic activities related to existence of the fluids, we developed a new 2-D inversion scheme, which jointly inverted EM responses and seismic travel times. In the scheme, material characteristics such as water content, pore geometry and host rock type are estimated as model parameters and structures of resistivity and seismic velocity are obtained at the same time. Since tests of the scheme by using synthetic models revealed necessity of further improvements in respective EM and seismic inversion methods, we also tried to improve the EM inversion scheme.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2008年度	500,000	150,000	650,000
2009年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	2,100,000	630,000	2,730,000

研究分野：地球電磁気学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・固体地球惑星物理学

キーワード：地球内部構造・比抵抗・地震波速度・地震電磁気同時解釈・物質情報抽出

1. 研究開始当初の背景

沈み込む海洋性プレートからの脱水によって、定常的に水が供給されている日本列島

においては、地殻や上部マントルに存在する水が、メルトの生成を介して火山活動を規定し、様々な地震活動（通常の地震や低周波地

震、低周波微動、ゆっくりすべり)を規定している。このため、地殻や上部マントルに存在する水やメルトなどの間隙流体をその存在様式も含めて精密にマッピングすることは、これら地殻活動の物理的メカニズムを探る上で必須のものとなる。

電磁気、地震それぞれの観測・解析技術の進歩と共に、より精密な構造決定が可能となり、両者の構造(電気の流れやすい低比抵抗領域と地震波速度の遅い領域)間に明らかな相関が認められるようになり、間隙水の存在がその共通の構造異常の原因としてあげられた。例えば、東北地方背弧で得られた比抵抗構造(Ogawa et al., 2001)と、地震波速度構造(Matsubara et al., 2004)との比較から、中部地殻に電気の流れやすい部分が認められた一方、ピーク値としてP波速度で8%程度、S波速度で5%程度の低速度異常が捉えられていた。

一方、上嶋(2003)や Takei(2002)は、比抵抗や地震波速度 V_p , V_s が、間隙流体の存在様式にどのように依存するかの理論的關係式を整理・導出した。その関係を、前述の東北背弧でのそれぞれの構造異常のピーク値に当てはめ、総合的に解釈すると、「比抵抗・速度異常領域は、ピーク値として、体積比にして5%程度の間隙水の存在を示唆し、その間隙の形状は球に近いが間隙は互いにつながっていないかならならず、間隙水の塩分濃度は海水の4倍程度以上でなければならない」ことが推定された(上嶋, 2005)。このように、地震波速度と比抵抗の両構造を同時に解釈することによって、構造異常を担う物質的実態がより精細に理解できるようになり、また両構造の確からしさも向上する。

2. 研究の目的

背景のところでも述べたように、比抵抗構造と地震波速度との間に対応関係が見られ、その共通の原因として間隙水の存在があげられた。しかし、それぞれの構造探査手法では構造に対する感度も異なるため、たとえば構造パターンに不一致が認められた場合(これは例えば異常のピーク位置の違いなどのより詳細なスケールでの不一致を意識している)、それぞれの手法から独立に得られた構造の比較だけからでは、その不一致が真に地下の間隙流体の存在様式を反映したものかどうかを判定することは困難である。

この困難を克服し、地下の間隙流体存在様式に対する推定精度を上げるため、本研究では、構造決定において、電磁気・地震観測を「同時インバージョン」にかける手法を開発し、地下の「物質・状態」情報をより高い確度で抽出することを目指した(ここでは、ホスト岩石種、間隙流体の存在様式等を総称して「物質・状態」と呼ぶことにしている)。

3. 研究の方法

(1) 比抵抗、地震波速度間の依存性の導出

新潟県中越地域における6km級の大深度ボーリングコア地震波速度・比抵抗検層データや、比抵抗、地震波速度構造がほぼ同一断面で推定されている東北背弧活動帯における構造データを詳細に調べ、現実には地下において地震波速度と比抵抗の間に成立する相関関係を調べた。また、固液2相からなる系において、全岩実効比抵抗や実効地震波速度を求める表式を得、そこから同一モデルに基づく比抵抗-地震波速度依存性の導出を図った。

(2) 比抵抗・地震波速度構造「同時インバージョン手法」の開発

(1)で検討した比抵抗-地震波速度相関関係を制約条件として、地震波速度、比抵抗構造を同時に求める2次元インバージョンコードの開発を行った。比抵抗はチューブモデル(例えば、渡辺, 2005)に基づいて液相分率、液相比抵抗、液相のつながり方に依存するものとし、地震波速度については、まずP波速度のみを扱うことにして、Takei(2002, 2009)に基づいて、液相分率、空隙の形状、岩石種を表す岩石地震波速度に依存するとした。

これらの依存関係を整理して新たに比抵抗、地震波速度を記述する、液相分率、空隙の形状、岩石種の3つの実効パラメータを定義し、それらをモデルパラメータとするインバージョンを構成した。新たに定義した実効パラメータにおいては、比抵抗は(つながり方や液相比抵抗を考慮に入れた)液相分率のみに依存し、P波速度については液相分率、空隙の形状、岩石種に依存することとなる。

走時計算についてはCoultrip(1993)に従って順計算を行い、震源も2次元面内にあるとし、電磁気応答関数計算についてはRodi(1976)に従って順計算を行い、3次元性の存在に強いとされるTMモードのインピーダンスを扱うものとした。インバージョンを構成するためには、観測値のモデルパラメータ依存性(感度行列)を求める必要があるが、これは、通常感度行列(電場磁場応答関数を比抵抗で偏微分したもの、走時を地震波速度で偏微分したもの)に、上記の比抵抗-液相分率依存性、地震波速度-液相分率、空隙形状、岩石種依存性を考慮することで求めることができる。

(3) 比抵抗構造インバージョン手法の改良

(2)で開発したインバージョンは、限定した2次元問題を考えているため、現実データへの適用は困難である。しかし、より現実的な3次元コードの開発を行う上で、通常地磁気地電流(MT)法電磁場変換関数には、

地下浅部の小スケール比抵抗異常の影響を受けてその絶対値が歪められてしまい、そこから得られた構造には比抵抗構造の特徴的なサイズや構造のコントラストが必ずしも正しいものとはならないという問題点があった。また、開発した同時インバージョン手法の検証から、4. (2)で述べるように、比抵抗、地震波速度それぞれの構造決定精度を上げる努力が必要であることも示唆された。

このため、3次元同時インバージョンを実現する前段階として、比抵抗インバージョンの側で地下浅部小規模不均質性に左右されない位相テンソルの逆解析を可能とする3次元インバージョンアルゴリズムの開発と、同じく地下浅部不均質性の影響を正しく見積もるため浅部不均質の影響が小さい長基線電場観測データを援用してインバージョンを行う2次元アルゴリズムの開発を行い、長基線電場データを援用するインバージョンコードを、中部地方跡津川断層周辺域の観測データに適用して構造を求めた。

4. 研究成果

(1) 比抵抗、地震波速度間の依存性の導出

ボーリングコア検層データや、同一断面における比抵抗、地震波速度構造モデルの比較から、間隙流体量が主たる要因として両方の物理量を規定すると考えられた中越地域においては地震波速度と比抵抗の間に明瞭な相関が認められた。一方、東北背弧活動帯においてはあまり良い相関が認められなかった。東北背弧活動帯においては、地震波速度が主として岩石種によって決定され、様々な場所でほぼ同一の深さ依存性をもっていたのに対し、比抵抗は主として間隙流体の存在やそのつながり方によって決定されるため、地震波速度に見られた顕著な深さ依存性は認められなかった。ただ、背景のところまで述べていたように、深さや水平方向の位置にずれはあるものの、比抵抗構造と地震波速度偏差構造との間には対応関係が認められた。

一方、固液2相系における全岩比抵抗と全岩地震波速度との間に成り立つ関係式をモデルから導出するため、まず比抵抗について直方体の稜の部分に間隙流体が存在するとするブリックレイヤーモデルについて、実効比抵抗を求める厳密解を導出した。同じくブリックレイヤーモデルに基づいて全岩地震波速度を求める解の導出は、今後の課題として残された。

(2) 比抵抗・地震波速度構造「同時インバージョン手法」の検証

3. (2)で新たに定義しなおした3つのモデルパラメータ：液相分率、空隙の形状、岩石種からなるモデルを考え、様々なモデルや比抵抗、P波速度に対する3つのモデルパラメータ

の制約条件を変えて、開発した同時インバージョン手法の評価を行った。その結果の一例を図1に示す。

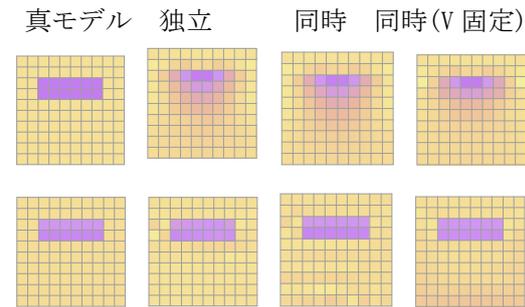


図1. 同時インバージョン結果の一例. 上段に比抵抗, 下段にP波速度モデルを示す. 左から, syntheticな観測値(走時, 電磁場応答関数)を作成した真のモデル, それぞれの独立したインバージョンの結果, 同時インバージョンの結果1(液相分率, 空隙形状, 岩石種をモデルパラメータとしたとき), 同時インバージョンの結果2(岩石種を固定して, 液相分率, 空隙形状をモデルパラメータとしたとき)を示す.

図1において、左から1列目は、syntheticな観測値を計算するために用いた真のモデルを示し、一様な比抵抗、速度構造の中に流体が分布する低比抵抗、低速度領域があるとするモデルである。2列目の電磁気、地震それぞれの独立したインバージョンの結果が示すように、P波速度はほぼ真モデルが復元されているが、比抵抗は低比抵抗域の底がぼやけて決定されている。これは、電磁場応答関数が電気伝導度(比抵抗の逆数)と低比抵抗体の厚さをかけたコンダクタンスに感度があるため、低比抵抗体の底は決まりにくく、インバージョンの安定化のために設けたモデルをスムーズにしようとする制約項がよりモデル決定に効果的に働いたためと判断できる。この状況に対し、前述の3つのパラメータを自由パラメータとする同時インバージョンを行った結果を3列目に示し、岩石種を固定した時の同時インバージョンの結果を4列目に示す。3列目の結果は、2列目の独立インバージョンの結果と殆ど変わらないが、4列目の結果は比抵抗モデルで改善がみられる。3. (2)で構成したモデルパラメータに基づいたとすると、液相分率のみが比抵抗、P波速度に対する共通の制約となり、空隙形状、岩石種はP波速度に固有の制約となる。図1の結果は、両者を独立に規定するパラメータを多く導入するほど同時インバージョンの効果が薄れ、独立したインバージョンとあまり変わらない結果を与える一方で、両者の相関を強くした制約のもとでは同時インバージョンの効果が顕著で真モ

デルの再現性が良くなることを意味した。こうして、開発した同時インバージョンが正しく機能していることが確認されたが、この結果は、それぞれのインバージョンにおけるインバージョン安定化のための制約条件の吟味や構造決定精度を上げる努力が引き続き必要であることと、それぞれのインバージョンで得られた構造パターンが一致しない時に、その不一致の真否判定に同時インバージョンの適用が有用であることを示唆した。

(3) 比抵抗構造インバージョン手法の改良と実データへの適用

比抵抗インバージョンの側でその構造決定精度を上げるため、地下浅部小規模不均質性に左右されない位相テンソルの逆解析を可能とする3次元コードの開発と、同じく浅部不均質の影響を無視できる長基線電場観測データを援用してインバージョンを行う2次元アルゴリズムの開発を行った。

上記の2つのアルゴリズムのうち、長基線電場データを援用するインバージョンコードを、中部地方津川断層周辺域の観測データに適用し、上部マントルに至る確度の高い比抵抗構造を推定した。別に解析が実施された地震波速度構造 (Nakajima et al., 2010) との比較から、地震波低速度域が一樣に存在する中下部地殻において一樣に低比抵抗域が存在するわけではなく、各主要断層下に、ある幅をもって低比抵抗域が局在することが明らかとなった。これは、連結度の高い流体が各断層下に局在していることを示唆する。通常、地殻の温度、圧力、岩石条件では、室内実験より、地殻内流体は静水平衡状態において結晶間隙に独立して存在するとされる (例えば Yoshino, 2002)。これに反して、連結度の高い間隙水が存在するためには、脆性変形がおこるなど、何らかの外的要因が必要となる。低比抵抗域が主要な断層下の下部地殻に局在していることから、そこに局在した脆性変形領域が存在するはずであるという興味深い示唆が得られた。

(4) 今後の展望

本研究の成果をもとに3次元比抵抗、地震波速度同時インバージョン手法を完成させ、実データに適用して地下の間隙流体の存在様式に関するより詳細な情報の抽出を図りたい。そのために、比抵抗、地震波速度それぞれのインバージョン手法をさらに確度の高いものにしていく努力が必要であるほか、物質・状態依存性制約条件をさらに進化させる必要がある。また、本研究で開発した確度の高い比抵抗構造インバージョン手法を実データに適用し、比抵抗-地震波速度構造の対比ケーススタディ事例を増やす

ことで、両者の相関関係を吟味していく必要がある。

[引用文献]

- Coultrip, R.L., High-accuracy wavefront tracing travelttime calculation, *Geophysics*, 58, 284-292, 1993.
- Matsubara, M. N. Hirata, H. Sato, and S. Sakai, Lower crustal fluid distribution in the northeastern Japan arc revealed by high-resolution 3D seismic tomography, *Tectonophysics*, 388, 33-45, 2004
- Nakajima, J., Kato, A., Iwasaki, T., Ohmi, S., Okada, T. and Takeda, T., Deep crustal structure around the Atotsugawa fault system, central Japan: A weak zone below the seismogenic zone and its role in earthquake generation, submitted manuscript, 2010.
- Ogawa, Y., Mishina, M., Goto, T., Satoh, H., Oshiman, N., Kasaya, T., Takahashi, Y., Nishitani, T., Sakanaka, S., Uyeshima, M., Takahashi, Y., Honkura, Y. and Matsushima, M., MT imaging of fluids in intraplate earthquake zones, NE Japan back arc. *Geophys. Res. Lett.*, 28, 3741-3744, 2001.
- Rodi, W.L., A technique for improving the accuracy of finite element solutions for magnetotelluric data, *Geophys. J. Roy. astr. Soc.*, 44, 483-506, 1976.
- Takei, Y., Earth's crust and upper mantle, Dynamics of solid-liquid systems *Encyclopedia of Complexity and System Science*, Springer, in. Vol. 3, p. 2676-2697, 2009.
- Takei, Y., Effect of pore geometry on V_p/V_s : From equilibrium geometry to crack, *J. Geophys. Res.*, 107, 2043, doi:10.1029/2001JB000522, 2002.
- Yoshino, T., Role of water in conductive anomalies and seismic reflections in the lower crust, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, 76, 479-500, 2002.
- 上嶋誠, 電気比抵抗と水. 笠原順三, 鳥海光弘, 河村雄行編: 地震発生と水-地球と水のダイナミクス. 東京大学出版会: 283-296, 2003.
- 上嶋誠, 電気伝導度構造から探る地殻の水の存在, *地学雑誌*, 114, 862-870, 2005.
- 渡辺了, 岩石の電気物性-レビュー, *地学雑誌*, 114, 837-861, 2005.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計3件)

- ① 上嶋誠, MT法による電気伝導度構造研究の現状, 地震 第2輯, 61, S225-S238, 2009(査読有).

[学会発表] (計7件)

- ① 白井嘉哉, 上嶋誠, 小河勉, 他 (計31名), 新潟-神戸ひずみ集中帯における深部比抵抗構造-広帯域MT法とネットワークMT法のジョイントインバージョン-, 2009年 Conductivity Anomaly 研究会, 2010年2月17日, 東大地震研.
- ② Patro, P.K. and Uyeshima, M., 3-D inversion of magnetotelluric Phase Tensor, 2009年 Conductivity Anomaly 研究会, 2010年2月17日, 東大地震研.
- ③ 森田陽子, 武井康子, 上嶋誠, 「電気伝導度・地震波速度構造同時インバージョンのための新しいスキームの開発」, 日本地球惑星科学連合 2009年度連合大会, 2009年5月20日, 千葉市幕張.
- ④ 森田陽子, 武井康子, 上嶋誠, 「電気伝導度構造・地震波速度構造-同時インバージョンの新しいスキームの開発に向けて-」, 2008年 Conductivity Anomaly 研究会, 2009年2月16日, 京大防災研.
- ⑤ 森田陽子, 武井康子, 上嶋誠, 「一次元地震波速度構造と比抵抗構造の比較-母岩と間隙水の役割-」, 日本地球惑星科学連合 2008年度連合大会, 2008年5月29日, 千葉市幕張.
- ⑥ 小河勉, 上嶋誠, 「直方体モデルのバルクの電気伝導度」, 日本地球惑星科学連合 2008年度連合大会, 2008年5月29日, 千葉市幕張.
- ⑦ 上嶋誠, 武井康子, 小河勉, 森田陽子, 加藤愛太郎, 「地殻内流体の詳細情報を抽出するための地震電磁気同時インバージョンの開発にむけて」, 日本地球惑星科学連合 2008年度連合大会, 2008年5月28日, 千葉市幕張.

[その他]

森田陽子, 「電気伝導度構造・地震波速度構造同時インバージョンの新しいスキームの開発に向けて」, 東京大学大学院理学系研究科地球惑星専攻修士論文, 92 pp., 2009年2月.

白井嘉哉, 「新潟-神戸ひずみ集中帯における深部比抵抗構造-広帯域MT法とネットワークMT法のジョイントインバージョン-」, 東京大学大学院理学系研究科地球惑星専攻修士論文, 208 pp., 2010年2月.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

上嶋 誠 (UYESHIMA MAKOTO)
東京大学・地震研究所・准教授
研究者番号: 70242154

(2) 研究分担者

加藤 愛太郎 (KATO AITARO)
東京大学・地震研究所・助教
研究者番号: 20359201

小河 勉 (OGAWA TSUTOMU)
東京大学・地震研究所・助教
研究者番号: 00345175

武井 康子 (TAKEI YASUKO)
東京大学・地震研究所・准教授
研究者番号: 30323653

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

森田 陽子 (MORITA YOKO)
東京大学・理学系研究科・修士課程学生
(現: シュランベルジャ)

白井 嘉哉 (USUI YOSHIYA)
東京大学・理学系研究科・修士課程学生
(現: 伊藤忠テクノソリューションズ)

Patro Bantu Prasanta Kumar
東京大学・地震研究所・JSPS 外国人特別研究員