

# 電気伝導度構造から探る地殻の水の存在

上 嶋 誠\*

## Estimation of Water Volume Fraction in the Crust from Electrical Conductivity Structure

Makoto UYESHIMA \*

### Abstract

To estimate crustal rheology, and to synthesize tectonic processes such as seismic and volcanic activities beneath the island arc, crustal water volume fraction and its connectivity is one of the most important parameters. Due to significant improvements in instruments, data-processing methods and inversion schemes, we are now coming to the stage where we can obtain detailed crustal electrical conductivity structures, and can discuss the relationship between structures and crustal activities. On the other hand, dependence of effective electrical conductivity versus temperature and water volume fraction can be estimated by referring to electrical conductivity-temperature dependence for dry rocks and water from laboratory experiments, and by assuming a connection rule with interstitial water. Then, if we can estimate the temperature structure successfully, the spatial distribution of crustal water volume fraction can be estimated for a specific connection rule directly from the electrical conductivity cross-section. In this paper, as a case study, we try to estimate the spatial distribution of water volume fraction from a 2-D electrical conductivity structure beneath an active back-arc area in Tohoku district, NE Japan (Ogawa, *et al.*, 2001), and compare the results with seismic structure (Matsubara *et al.*, 2004). Finally, we want to emphasize that a joint analysis using both electric and seismic information will reveal more detailed features of the interstitial water, and enhance the persuasiveness of the estimation.

**Key words** : electrical conductivity structure, water volume fraction, water connectivity

**キーワード** : 電気伝導度構造, 水の含有率, 水のつながり方

### I. はじめに

地殻の流動・破壊特性を知る上で、地殻内に存在する間隙水の量やそのつながり方を見積もることは非常に重要な意味を持つ。近年、電磁気探査の分野において、データ取得システム及びデータ

解析手法の両面で非常な進歩を見たため、詳細な電気伝導度構造を推定できるようになり、構造と地震・火山活動との関連性を議論できる段階に至った。一方、室内実験によって決定された乾燥岩石および間隙水の電気伝導度-温度依存性から、間隙水のつながり方を仮定すれば含水岩石全体の

\* 東京大学地震研究所

\* Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

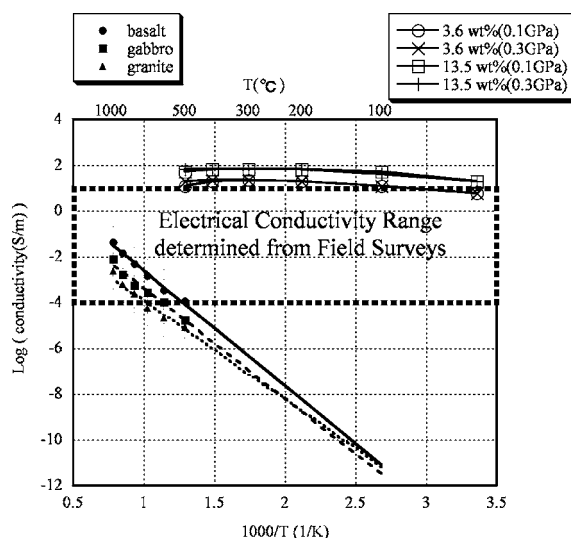


図 1 乾燥岩石、および、間隙水の電気伝導度-温度依存性。乾燥岩石については、Kariya and Shankland (1983) によって、ゲンブ岩 (basalt)、ハンレイ岩 (gabbro)、カコウ岩 (granite) 類について室内実験の結果をコンパイルしたものを標準偏差とともに示し、Arrhenius の関係式に従って低温側に外挿した直線をあわせて示す。間隙水については、Nesbitt (1993) による、各種塩濃度、圧力下における塩化カリウム水溶液の温度依存性を示す。

Fig. 1 Cumulative Arrhenius plots for typical dry crustal rocks and interstitial water with various salt concentrations and pressure conditions, respectively, compiled by Kariya and Shankland (1983) and Nesbitt (1993). Electrical conductivity range determined from field surveys is also shown by a rectangle.

実効電気伝導度の含水率や温度依存性が推定出来る (小論全体を通じて、含水率は、岩石中に存在する間隙水の体積分率を意味するものとする)。従って、温度構造が推定出来れば、含水率に応じた比抵抗の深さ依存性を見積もることが出来る。その結果と観測で得られた電気伝導度構造を対照することで、地殻内の間隙水の含有量分布を推定し得る。

岩石-流体二相系における電気物性については、上嶋 (2003) がまとめたほか、本特集号において渡辺 (2005) が詳細に論じているので、小論では観測によって決定された電気伝導度から、いかにして地殻内間隙水の存在状態を推定できるかに焦点をあてて筆を進めたい (ただし、基礎的事項の記述となる 2, 3 節では、若干の重複をお許しいただきたい)。ケーススタディとして、広帯域 MT 観測によって Ogawa *et al.* (2001) によ

って詳細な地殻電気伝導度 2 次元断面が推定された東北地方背弧を取り上げ、同地域の地殻における含水率分布の推定を試みる。

## II. 乾燥岩石および間隙水の電気伝導度

Kariya and Shankland (1983) は、1970 年代に行われた地殻構成岩石を調べた室内実験結果のコンパイルを行い、花コウ岩類、ゲンブ岩類、ハンレイ岩類について、高温 (500 ~ 1000°C) における標準的な乾燥状態の電気伝導度-温度依存性を導出した。一方、Nesbitt (1993) は、地殻内間隙水の電気伝導度-温度依存性を調べるため、塩水 (KCl 溶液) に対する室内実験結果のコンパイルを行った。これらの結果をあわせ、Arrhenius プロット (横軸に絶対温度の逆数を取り、縦軸に電気伝導度の常用対数をとったもの) を行ったものを図 1 に示す。Arrhenius プロット

上の傾きは、活性化エネルギーに対応し、同一の電気伝導メカニズムが働いている場合には直線となる。図1では、高・低温域において乾燥岩石の電気伝導メカニズムが同一であると仮定して、高温における実験結果を低温まで外挿している。

図1では、通常、電磁気野外調査から求められる地殻電気伝導度の値の範囲 ( $10^{-4}$  S/m  $\sim$  10 S/m) をあわせて示している。乾燥岩石は、高温になるにつれ電流が流れやすくなり、 $100^{\circ}\text{C}$  で  $10^{-11}$  S/m と非常に絶縁的であったものが  $1000^{\circ}\text{C}$  では  $10^{-1}$  S/m  $\sim$   $10^{-3}$  S/m に達する。一方で、間隙水の電気伝導度はすべての温度レンジにおいて 10 S/m  $\sim$   $10^2$  S/m と乾燥岩石に比べてはるかに高く、野外調査で得られた電気伝導度値はその両者の間に決定されている。従って、野外調査で得られた電気伝導度値は、乾燥岩石+間隙水の混ざり具合によって規定されていることが推察され、ここからは、この前提に基づいて議論を進めていくことにする。

### III. 水のつながり方の記述

乾燥岩石と間隙水からなる系のそのそれぞれの電気伝導度が既知であるとする、間隙水のつながり方を仮定することによって、Archie の式 (Archie, 1942), 修正 Archie の式 (Glover 他, 2000) などの実験式や、物理モデルに基づいた混合則 (並列モデルや Hashin and Shtrikman (1962) による等方性媒質の完全連結 (HSc), 完全孤立 (HSi) モデルなど) にあてはめることで、その実効電気伝導度-含水率依存性を求めることができる。実効電気伝導度  $\sigma_{\text{eff}}$  は、間隙水を含んだ岩石全体の電気伝導度であり、下に Archie の式 (1), 修正 Archie の式 (2), HSc (3a), HSi (3b) モデルそれぞれについてその表式を示す。

Archie の式 :

$$\sigma_{\text{eff}} = C \sigma_w \chi_w^m \quad (1)$$

修正 Archie の式 :

$$\sigma_{\text{eff}} = \sigma_r (1 - \chi_w)^{\frac{\log(1 - \chi_w^m)}{\log(1 - \chi_w)}} + \sigma_w \chi_w^m \quad (2)$$

HSc モデル :

$$\sigma_{\text{eff}} = \sigma_w \frac{3\sigma_r + 2\chi_w(\sigma_w - \sigma_r)}{3\sigma_w - \chi_w(\sigma_w - \sigma_r)} \quad (3a)$$

HSi モデル :

$$\sigma_{\text{eff}} = \sigma_r \frac{\sigma_w + 2\sigma_r + 2\chi_w(\sigma_w - \sigma_r)}{\sigma_w + 2\sigma_r - \chi_w(\sigma_w - \sigma_r)} \quad (3b)$$

ここで、間隙水、乾燥岩石の電気伝導度をそれぞれ、 $\sigma_w$ ,  $\sigma_r$  とし、含水率を  $\chi_w$  ( $0 \leq \chi_w \leq 1$ ) としている。Archie の式や修正 Archie の式において、 $C$  や  $m$  は室内実験結果から決定される正の定数である。

HSc, HSi モデルに基づく実効電気伝導度は、等方的な 2 相混合媒質における電気伝導度の上限、下限を与える。図2は、乾燥岩石と間隙水の電気伝導度がそれぞれ  $10^{-6}$  S/m, 10 S/m であるとして、修正 Archie の式や HSc, HSi モデルに基づく実効電気伝導度を含水率に対してプロットしたものである。修正 Archie の式において指数  $m$  が 1 である場合は、並列モデルと同等となる。並列モデルにおいては、重なった層面に沿って電流が流れることを仮定していて、層面に直交する方向に電流が流れると直列モデルとなるため、異方性が生じ、HSc より高い電気伝導度を示す。HSc の他にも brick モデル (Schilling *et al.*, 1997) などの間隙水が完全に連結しているモデルを考えることが出来るが、これらも修正 Archie の式で表現すると指数  $m$  はほぼ 1  $\sim$  1.2 程度となる。指数  $m$  が大きくなることは、間隙水の連結が悪くなることに対応している。間隙水が完全に孤立している場合 (HSi) は、含水率が 10% 程度以上に大きくならない限り、間隙水の存在はほとんど実効電気伝導度に寄与しない。

電磁気探査で求められるのは、実効電気伝導度の構造であるので、上述の実効電気伝導度-含水率依存性から、間隙水のつながり方を仮定すれば、地下の含水率を推定することができる。ある深さにおける電気伝導度が  $10^{-2}$  S/m に決定されたとし、その深さでの乾燥岩石、間隙水の電気伝導度がそれぞれ  $10^{-6}$  S/m, 10 S/m であるとする

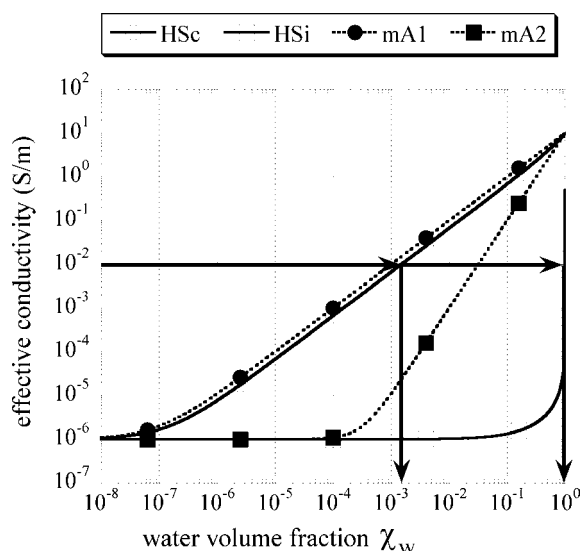


図 2 水を含んだ岩石についての実効電気伝導度-含水率  $\chi_w$  依存性. 乾燥岩石の電気伝導度を  $10^{-6}$  S/m, 間隙水の電気伝導度を 10 S/m とした. HSc, HSi: それぞれ Hashin and Shtrikman (1962) の完全連結, 完全孤立モデル, mA1, mA2: 指数  $m$  が 1 と 2 の修正 Archie 則 (Glover 他, 2000). 矢印は, 観測によって決定された実効電気伝導度が  $10^{-2}$  S/m であったとしたときに, HSc, HSi モデルそれぞれについて, 含水率がいかに求められるかを示す.

Fig. 2 Water volume fraction ( $\chi_w$ ) dependence of effective electrical conductivity for dry rock - water 2 phase media. Electrical conductivity of dry rock is assumed to be  $10^{-6}$  S/m, and that of interstitial water is assumed to be 10 S/m. HSc, HSi: Hashin and Shtrikman (1962)'s perfectly connected model and perfectly isolated model. mA1, mA2: modified Archie's law (Glover *et al.*, 2000) with exponents 1 and 2. Arrows indicate how water volume fraction can be determined directly from the effective electrical conductivity when the conductivity value is determined to be  $10^{-2}$  S/m by electromagnetic soundings.

と, 図 2 の矢印で示したように, HSc モデルでは約 0.1% の含水率であり, HSi モデルではほぼ 100% 水で満たされていなければならないことになる。乾燥岩石, 間隙水の電気伝導度は, 前節で述べたように, 温度に強く依存し, それぞれ, 岩石種や塩分濃度にも依存するため, こうして推定される含水率が現実のものとなるためには地殻の岩石種を決めた上で温度構造を推定し, これと独立に間隙水中の塩分濃度を決めて, 各深さにおける乾燥岩石, 間隙水の電気伝導度を見積もる必要がある。

#### IV. 東北背弧活動帯における地殻含水率の推定

まず, 東北背弧活動帯 (秋田県本庄市から岩手県花巻市に至る東西約 90 km の測線) で行われた広帯域 MT 法観測によって決定された 2 次

元電気伝導度構造を図 3 に示す (Ogawa *et al.*, 2001)。この構造から含水率を見積もるために, まず温度構造を推定し, 図 1 の電気伝導度-温度依存性から乾燥岩石, 間隙水それぞれについての電気伝導度-深さ依存性を求める。温度構造を推定するためには, 地表での熱流量値, 熱伝導率, 地殻内発熱量などの熱学的パラメタが既知である必要がある。ここでは, Furukawa (1995) や田中, 矢野 (2000) によってまとめられた地表での熱流量値  $85 \text{ mW/m}^2$  を用い, 上部地殻をカコウ岩類, 下部地殻をハンレイ岩類として Furukawa (1995) によってまとめられたそれぞれの岩石種についての熱的パラメタを引用して, 熱伝導率を上部, 下部地殻それぞれ  $3 \text{ W/m/K}$  および  $2 \text{ W/m/K}$  とし, 地殻の発熱量を  $A = A_0 \exp(-z/10) \text{ } \mu\text{W/m}^3$  で表し  $A_0$  を上部, 下部地殻それぞれ

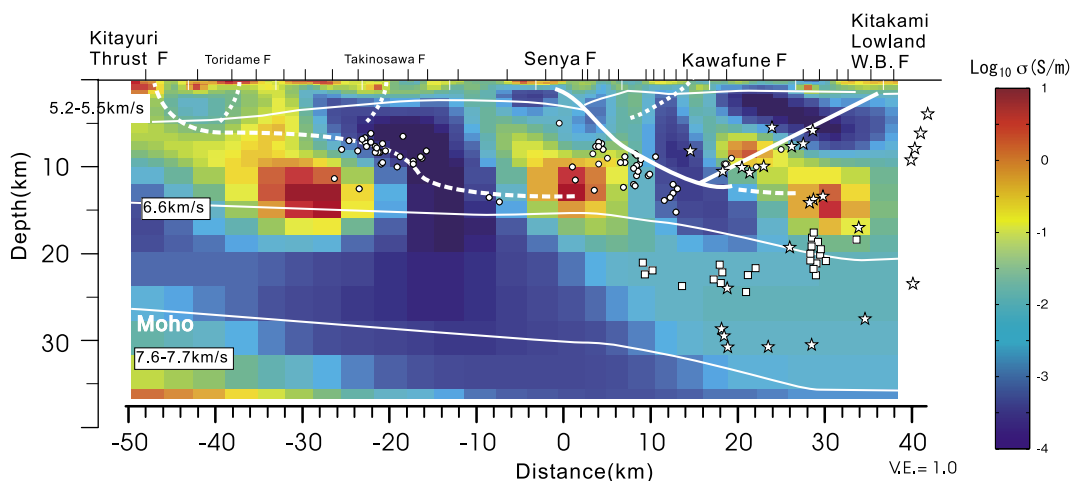


図 3 広帯域 MT 法探査によって決定された秋田県本庄市から岩手県花巻市に至る 2 次元電気伝導度断面図 (Ogawa *et al.*, 2001). 屈折法によって決められた地震波速度構造 (Iwasaki *et al.*, 2001) を実線および数字で示す. 反射法によって推定された奥羽脊梁山脈下の千屋断層および北上低地西縁断層の地殻内への延長を太線で示し (佐藤ほか, 1999), 構造地質学から推定された北由利衝上断層の延長を太破線で示す (佐藤・池田, 1999). また, 海野ほか (2000) によって決定された微小地震源を白丸で示し, 星, 四角のシンボルはそれぞれ, 人工地震解析から得られた P 波散乱体, 自然地震解析から得られた S 波散乱体の位置を示す (浅野ほか, 1999).

Fig. 3 2-D electrical conductivity cross-section determined by an analysis of a wide-band MT survey performed at Ou Backbone Range and Dewa Hills (Ogawa *et al.*, 2001). Also shown are seismicity data after Umino *et al.* (2000) in circles, S-wave reflectors (squares) & P-wave scatterers (stars) determined by Asano *et al.* (1999), seismic reflection result after Sato *et al.* (1999), seismic refraction result after Iwasaki *et al.* (2001), and structural geologic results after Sato and Ikeda (1999).

$1.3 \mu\text{W/m}^3$  および  $0.2 \mu\text{W/m}^3$  とする。こうして, 上下部地殻, 地殻マントル境界は, 屈折法によって決められた地震波速度構造 (Iwasaki *et al.*, 2001) に基づいて推定し, 1 次元熱伝導を仮定して温度構造を推定する。

この温度構造をもとに, 間隙水の塩分濃度を 3.6 wt% として, 地殻内の乾燥岩石および間隙水それぞれについて電気伝導度-深さ依存性を見積もったものを図 4 に示す。ここではこれ以降, 間隙水は KCl のみを含む塩水であると仮定して議論を進める。こうして, 各場所における乾燥岩石および間隙水の電気伝導度が推定され, 図 2 の両端の電気伝導度が確定したので, 観測によって決定した図 3 の電気伝導度値から, 図 2 の矢印で示した簡単な推定法によって各場所での含水率が推定できる。図 5a,b は, こうして HSc, HSi のそれぞれのモデルについて推定した含水率分布

構造を示している。

HSi モデルに基づく実効電気伝導度は, 含水率が相当高くない限りほとんど乾燥岩石の電気伝導度値をとるため, 観測値を説明するためには, 地殻のほとんどの深さで 90% 以上が間隙水で占められていなければならない。最下部地殻では, HSi に基づいたとしても間隙水を殆ど必要としない部分が図 5a の中で青色で示されているが, この領域では, 乾燥岩石の温度効果によって観測値が説明できることになる。これに対して, HSc モデルに対するプロファイルでは, 0.01% から 5 桁にわたる含水率の変化で観測から推定される実効電気伝導度のレンジ ( $10^{-4} - 10 \text{ S/m}$ ) を説明することが可能であった。ただし, 20 km 以深の高温部を除いて, 乾燥岩石の電気伝導度は間隙水の電気伝導度と比べてはるかに低い値をとるため, 実効電気伝導度に対する乾燥岩石電気伝導度

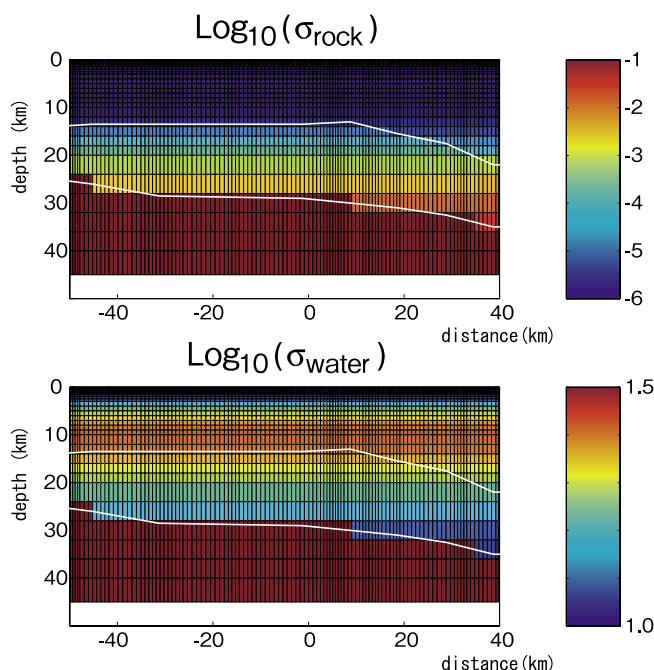


図 4 広帯域 MT 法探査を実施した秋田県本庄市から岩手県花巻市に至る測線で温度構造を推定した上で、見積もられた乾燥岩石（上）および間隙水（下）の電気伝導度 2 次元分布図。上下部地殻をそれぞれカコウ岩類、ハンレイ岩類とし、間隙水の塩分濃度は 3.6 wt% とした。見積もりの際に必要となる上下部地殻、地殻マントル境界面（実線で表示）は、屈折法探査の結果 (Iwasaki *et al.*, 2001) に基づいた。

Fig. 4 2-D cross-sections of electrical conductivity estimations for dry rock (upper) and interstitial water (lower) based on temperature structure estimation beneath the wideband MT survey line at Ou Backbone Range and Dewa Hills. Rock types of upper crust and lower crust are respectively assumed to be granite and gabbro. Salt concentration of interstitial water is assumed to be 3.6 wt%. Solid curves indicate the Conrad and Moho boundaries determined by seismic refraction study (Iwasaki *et al.*, 2001).

の寄与は殆ど無視できるほど小さく、実効電気伝導度はほぼ間隙水電気伝導度と含水率によってのみ規定されている。従って、上下部地殻の構成岩石として花コウ岩類、ハンレイ岩類を仮定してそれぞれの電気伝導度-温度依存性を用いたが、その類別はあまり含水率推定の結果には影響を与えなかったことになる。また、間隙水電気伝導度の温度依存性が小さいため、同じ実効電気伝導度値に対する含水率は地殻全体を通してほぼ一定となる。従って一般に電気伝導度は温度に敏感な物理量であるとされるが、地殻程度の低温領域では、ほとんど間隙水の存在やそのつながり方が観測で決定された電気伝導度値を規定していることになる。

## V. 議 論

HSc モデルに基づいた含水率構造では、上部地殻内に、西（日本海）側から北由利衝上断層下、千屋断層下、北上西縁断層下に 3 つの顕著な高含水率域が認められる。いずれも深さは約 10–20 km の範囲にあり、微小地震の震源はその上側に分布していて、高含水率間隙水の存在が微小地震発生をトリガーしているかのように見える。また、P 波 S 波散乱体は含水率の高い部分に分布する傾向があり、地震波散乱の要因として間隙水の存在を指摘し得る。

ここで推定された含水率構造は、地震波トモグラフィによる P 波 S 波速度構造 (Matsubara

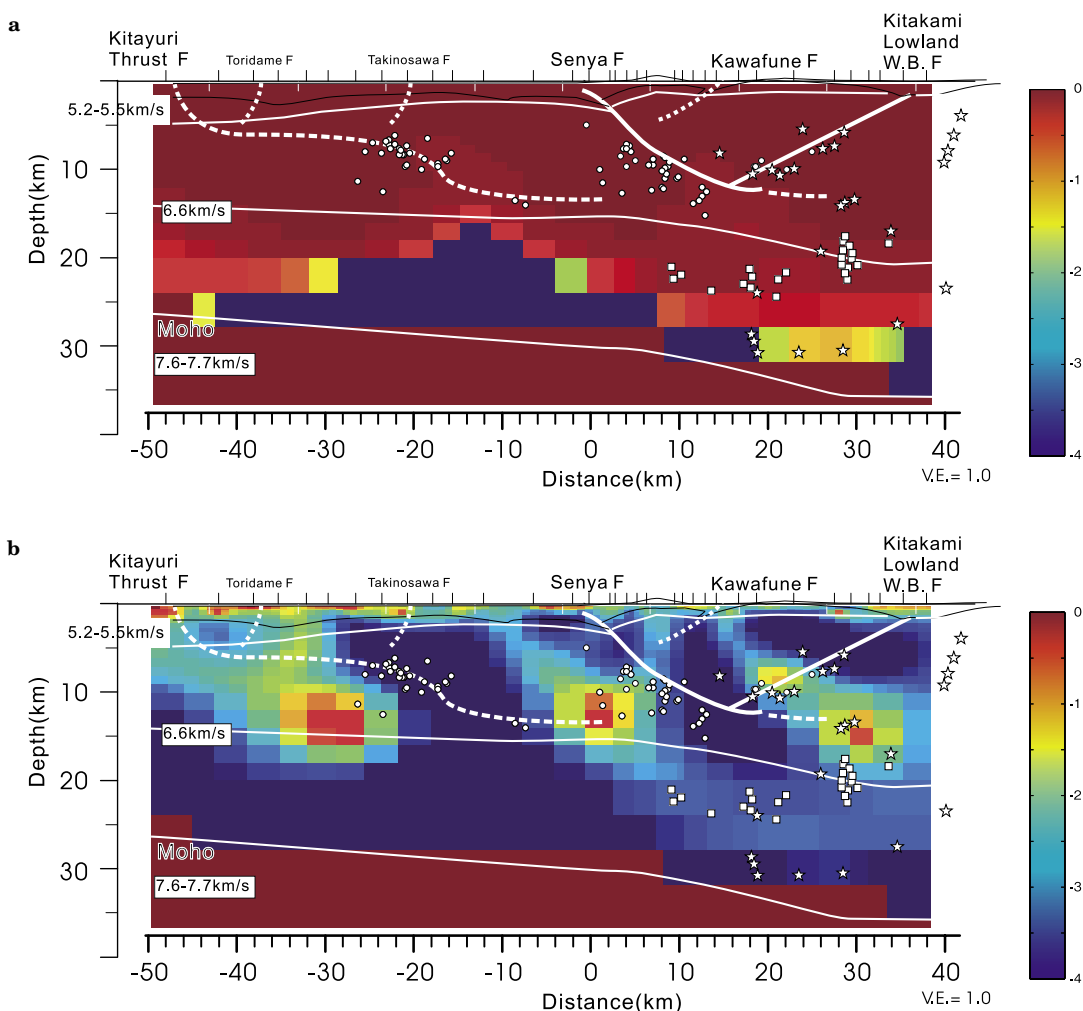


図 5 秋田県本庄市から岩手県花巻市に至る 2 次元電気伝導度断面 (図 3) より推定した, HSi (図 5a: 上), HSc (図 5b: 下) モデルに基づく含水率 2 次元分布図. 図 3 と同一の地震学的地質学的情報をあわせて記載している.

Fig. 5 2-D water volume fraction cross-sections for HSi (5a: upper) and HSc (5b: lower) connection rules determined from the 2-D electrical conductivity cross-section shown in Fig. 3. The same seismic and geologic information as in Fig. 3 is also shown.

*et al.*, 2004) とも, そのパーターベーション分布の空間パターンと定性的には一致している。Matsubara *et al.* (2004) で, P 波 S 波速度パーターベーションの両方が良く決定されているのは, 3 つの高含水率領域のうち, いちばん東側の領域であり, そこでは空間的ピーク値として  $\Delta V_p/V_p$  が約  $-8\%$  であるのに対して  $\Delta V_s/V_s$  が

約  $-5\%$  に決定されている。Takei (2002) による理論的研究によれば, このように P 波速度パーターベーションの絶対値が S 波に比べて相対的に大きくなるのは, その原因として間隙水の存在が考えられ, 本研究の結果と調和的である。しかし, 同じく Takei (2002) を引用して,  $\Delta V_s/V_s$  から推定される含水率は上記ピーク値を用いて

表 1 電気伝導度構造に基づいた含水率推定値の、間隙水のつながり方、塩分濃度トレードオフ関係. 詳細は本文を参照.

Table 1 Listed percentages are estimated water volume fraction based solely on the electrical conductivity structure for the respective connection rule and salt concentration of interstitial water. Area of peak water volume fraction values in the easternmost high water volume fraction area in the upper crust shown in Fig. 5b is considered.

| connectivity<br>salt conc. | parallel (mA1) | HSc | mA2 |
|----------------------------|----------------|-----|-----|
| 3.6 wt%                    | 14%            | 20% | 37% |
| 13.5 wt%                   | 5%             | 7%  | 22% |
| 24.7 wt%                   | 3%             | 4%  | 17% |

約 5 %となるのに対して、電気伝導度構造から推定した含水率は、間隙水のつながり方として HSc モデルに基づいたとすると 20 %となり、4 倍程度高い推定値を与える。最もつながり方が良く、含水率推定値の下限を与える並列モデルでも 14 %となり、定量的には地震学的推定と一致していない。

ここまでの推定では、間隙水の塩分濃度が 3.6 wt %と想定して議論を進めてきた。塩分濃度が高くなれば、間隙水の電気伝導度は高くなり、含水率推定値は低くなる。このように、電気伝導度構造から含水率を推定する際には、間隙水のつながり方の他に間隙水の塩分濃度の設定に関しても任意性がある。そこで、このトレードオフ関係について、今まで議論してきた上部地殻内最東部に存在する高含水率領域のピーク値に対して調べた結果を表 1 に示す。例えば、塩分濃度が 24.7 wt %と高濃度であれば、並列モデル、HSc モデルについては 5 %以下の含水率推定値を与えるが、指数  $m$  が 2 である修正 Archie 則 (mA2) については 17 %と依然として高い含水率を必要とする。このように、電気伝導度のみから推定する含水率には、表 1 で示した不可避の任意性があり、一意的に含水率を決定することは困難である。しかし、地震学的情報が高い確度で 5 %の含水率を要求するのであれば、電磁気学的情報を加えることによって表 1 のトレードオフ関係を参照して、その間隙水が 13.5 wt %以上の高塩分濃度をもっていて、かつ、並列モデルないしは HSc

モデルのようにそれらが良くつながっていなければならないことが推定できるようになる。このように、電磁気学的、地震学的情報を総合することにより、さらに進んだ詳細な地殻内の水に関する情報が抽出され、その推定の精度を増大させる事が期待できる。

## VI. まとめ

室内実験結果を参照することにより、電気伝導度構造から直接地殻内含水率分布を推定する方法を提示し、その過程で電気伝導度値は地殻程度の低温領域ではほとんど間隙水の存在やそのつながり方によって規定されていることを示した。その方法論のケーススタディとして、東北背弧活動帯で決定された電気伝導構造から実際に地殻内含水率分布の推定を試みた。高含水率領域の直上に微小地震震源が分布し、高含水領域に地震波散乱体が分布するなど、含水率分布断面と地震活動との間には明瞭な相関が認められた。また、定性的には地震波速度構造とも調和的な結果を与えた。

しかし、3.6 wt %の塩分濃度を仮定した推定では、地震波速度構造から推定される含水率に比べて 4 倍高い含水率となり、定量的には必ずしも一致するものではなかった。電気伝導度構造のみから推定する含水率分布には、間隙水のつながり方と間隙水の塩分濃度の設定による不可避の任意性がある。電磁気学的情報と地震学的情報をあわせて解釈することで、この任意性の範囲を狭めることが可能であり、今後このようなジョイント解



析を行うことでより詳細な地殻内の水に関する情報を抽出できる事が期待できる。

## 謝 辞

東北背弧活動帯の電気伝導度構造は、全国の大学、研究機関の研究者からなる電気伝導度構造研究グループによる地震予知計画にもとづく電磁気合同観測の結果として決定された。東京工業大学火山流体研究センターの小川康雄博士からは、その電気伝導度構造モデル数値を参照させていただきました。また、地学雑誌特集号編集委員会は小論を本特集号に掲載する機会を与えて下さいました。記して厚く謝意を表します。

## 文 献

- Archie, G. E. (1942): The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. *Trans. Am. Inst. Mining Eng.*, **146**, 54–62.
- 浅野陽一・海野徳仁・中村綾子・岡田知己・堀修一郎・河野俊夫・仁田交市・佐藤俊也・長谷川昭・小菅正裕・長谷見晶子 (1999): DAT アレイ地震観測による奥羽脊梁山地およびその周辺域における地震波散乱体分布の推定. *地震*, **52**, 379–394.
- Furukawa, Y. (1995): Temperature structure in the crust of Japan arc and the thermal effect of subduction. In Gupta, M. L. and Yamano, M. eds.: *Terrrestrial Heat Flow and Geothermal Energy in Asia*. Oxford & IBH, 203–219.
- Glover, P. W. J., Hole, P. J. and Pous, J. (2000): A modified Archie's law for two conducting phases. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **180**, 369–383.
- Hashin, Z. and Shtrikman, S. (1962): A variational approach to the theory of the effective magnetic permeability of multiphase materials. *J. Appl. Phys.*, **33**, 3125–3131.
- Iwasaki, T., Kato, W., Moriya, T., Hasemi, A., Umino, N., Okada, T., Miyashita, K., Mizogami, T., Takeda, T., Sekine, S., Matsushima, T., Tashiro, K. and Miyamachi, H. (2001): Extensional structure in northern Honshu Arc as inferred from seismic refraction/ wide-angle reflection profiling. *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 2329–2333.
- Kariya, K. A. and Shankland, T. J. (1983): Electrical conductivity of dry lower crustal rocks. *Geophysics*, **48**, 52–61.
- Matsubara, M., Hirata, N., Sato, H. and Sakai, S. (2004): Lower crustal fluid distribution in the northeastern Japan arc revealed by high-resolution 3D seismic tomography. *Tectonophysics*, **388**, 33–45.
- Nesbitt, B. E. (1993): Electrical resistivities of crustal fluids. *J. Geophys. Res.*, **98**, 4301–4310.
- Ogawa, Y., Mishina, M., Goto, T., Satoh, H., Oshiman, N., Kasaya, T., Takahashi, Y., Nishitani, T., Sakanaoka, S., Uyeshima, M., Takahashi, Y., Honkura, Y. and Matsushima, M. (2001): Magnetotelluric imaging of fluids in intraplate earthquake zones, NE Japan back arc. *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 3741–3744.
- 佐藤比呂志・平田 直・岩崎貴哉 (1999): 東北日本の地殻構造と新生代テクトニクス. *月刊地球*, **21**, 212–219.
- 佐藤比呂志・池田安隆 (1999): 東北日本の地殻構造と伸張テクトニクス. *月刊地球*, **号外27**, 135–141.
- Schilling, F., Partzsch, G.M., Brasse, G. and Schwartz, G. (1997): Partial melting below the magmatic arc in the central Andes deduced from geoelectric field experiments and laboratory data. *Phys. Earth Planet. Int.*, **103**, 17–31.
- Takei, Y. (2002): Effect of pore geometry on  $V_p/V_s$ : from equilibrium geometry to crack. *J. Geophys. Res.*, **107**, 2043, doi: 10.1029/2001JB000522.
- 田中明子・矢野雄策 (2000): 日本列島浅部の地下温度構造—坑井の温度データと地殻熱流量データから推定される温度の比較—. *物理探査*, **53**, 390–398, 2000.
- 上嶋 誠 (2003): 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.
- 海野徳仁・新井田清・長谷川昭・佐藤比呂志 (2000): 過去の大地震の震源域周辺の微小地震活動. 地球惑星科学関連学会 2000 年合同大会, Se-018.
- 渡辺 了 (2005): 岩石の電気物性—レビュー. *地学雑誌*, **114**, 837–861.
- (2005 年 10 月 14 日受付, 2006 年 1 月 18 日受理)