

## 複数の室内計測情報の統合による岩石の電気的性質の物理モデル化

大田優介\*・後藤忠徳\*\*・林為人\*・多田井修\*\*\*・笠谷貴史\*\*\*\*・町山栄章\*\*\*\*

### Rock physics modeling for electrical properties by integration of multiple information of laboratory measurements

Yusuke Ohta\*, Tada-nori Goto\*\*, Weiren Lin\*, Osamu Tadai\*\*\*, Takafumi Kasaya\*\*\*\* and Hideaki Machiyama\*\*\*\*

\*京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻 Department of Urban Management, Graduate School of Engineering, Kyoto University, Katsura C1-2-225, Kyoto 615-8540, Japan.  
E-mail: ohta.yusuke.58z@kyoto-u.ac.jp (Ohta)

\*\*兵庫県立大学大学院生命理学研究科 Graduate School of Life Science, University of Hyogo

\*\*\*マリンワークジャパン Marine Works Japan Ltd.

\*\*\*\*海洋研究開発機構 Japan Agency for Marine-earth Science and Technology

キーワード：岩石物理モデル，電気伝導度

Key words: Rock physics model; electrical conductivity

#### 1. はじめに

岩石の電気伝導度（比抵抗の逆数）は，含有鉱物により大きく変化しており，そのモデル化が進められてきた。従来，間隙率や間隙水の電気伝導度，粘土鉱物の含有量と電気伝導度の関係は，岩石物理モデル（物性を他の物性や形状パラメータで表した物理式）で記述されてきた（例えば，Katsube & Hume, 1983）。さらに大田ほか（2018）では，海底下塊状硫化物鉱床の岩石物理モデルが提案されている。大田（2018）では鉱床胚胎が期待される海底熱水活動域（中部沖縄トラフ）において硫化鉱物を含む岩石試料を採取し，その間隙水を交換しながら周波数 1kHz の交流電流に対する岩石試料の複素電気伝導度の絶対値を測定することにより，間隙水の電気伝導度変化に伴う岩石の電気伝導度の変化を式(1)のようにモデル化した。

$$\sigma_R = \left( \frac{F_2 F_3}{F_3 \sigma_w + F_2 C_e} + \frac{F_1}{\sigma_w} \right)^{-1} + C_s \quad (1)$$

この岩石物理モデルでは岩石は間隙率（式中の形状定数 $F_1 \sim F_2$ に含まれる），間隙水の電気伝導度 $\sigma_w$ ，表面電気伝導 $C_s$ などの関数として表されているほか，硫化鉱物の体積含有率と強い相関性のあるパラメータ $C_e$ が定義されているのが特徴であり，実際に硫化鉱物という物質情報と物性情報の結び付けに成功している。

調査地域の地質を鑑み，適切な岩石物理モデルを構築すれば，物理探査によって得られる地下の物性情報を他の物性や地下構造の情報に変換することが可能である（鈴木，2015）。従って，岩石物理モデルの高度化は地下構造解釈の高度化に寄与しうる。しかし，大田ほか（2018）では，電気伝導度の実成分のみを考慮したものであり，電流の周波数応対については記述していない。硫化鉱物は充電特性を持ち，高周波数の電流に対しては高導電率を發揮する一方で，低周波数の電流に対しては低導電率を示すことが知られている。したがって本来，このような岩石の電気伝導度は複素成

分を持つものであり，式(1)のような実成分モデルで解釈する際には虚部や周波数応対についての情報が損失してしまう。この問題を解決するためには，岩石物理モデルを周波数領域に拡張し，岩石の複素電導度を扱えるようにすることが必要である。

そこで本研究では，岩石サンプルの複素電気伝導度の周波数特性を再現することを目指し，岩石サンプルに対する物性測定を行うと共に，モデルの構築を行い，モデルの整合性について検証した。

#### 2. 対象海域と岩石サンプルの概要

本研究の調査海域は中部沖縄トラフである。この海域では複数の熱水活動が観察されており，実際に塊状硫化物の形成が確認されている。



第1図 調査海域および日本列島近海の熱水活動域の位置関係  
出展：海洋研究開発機構

海洋研究開発機構の調査航海 KM18-08C において，無人調

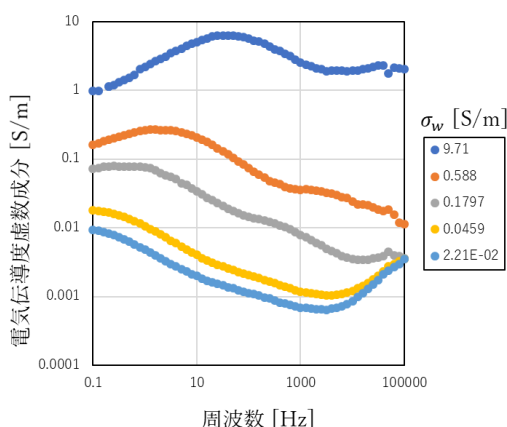
査船を用いて海底表面の塊状硫化物を含む岩石試料を19個採取し、径40mm、長さ40mmのコア状試料へと加工した。(コアサンプルと呼称)

### 3. 複素電気伝導度の室内計測について

本研究では間隙水の変化に伴ってどのように岩石全体の電気伝導度が変化するかを可視化するために、岩石の間隙水を電気伝導度が既知のNaCl溶液で置換することによって、ある間隙水の電気伝導度での岩石の複素電気伝導度を測定した。0.1Hz–100kHzの周波数レンジを51段階に離散化し、四極法の交流インピーダンス法による定電位計測(電位設定はサンプル依存で約20mV–100mV)を行い、得られた複素インピーダンスをサンプルの形状に基づいて複素電気伝導度に変換した。なお、間隙水として導入したNaCl溶液の電気伝導度は約0.03S/mから約10S/mのレンジを5~7の段階に分けたものである。

### 4. 測定結果

ここでは、岩石の複素電気伝導度の一例を第2図に示す。なお、複素電気伝導度は複素数のため実数成分および虚数成分を持つが、ここではそのうち虚数成分のみを示す。



第2図 測定された複素電気伝導度。縦軸は岩石サンプルの複素電気伝導度の虚数成分、横軸は周波数。凡例は間隙水の電気伝導度を示す。1サンプルにおける測定結果。

岩石サンプルの複素電気伝導度の虚数成分が、間隙水の電気伝導度の変化に伴って変化する特徴がみられる。また、周波数の変化に対し、 $\sigma_w$ が小さい2つのサンプルでは複数のピークを持つ特徴がみられる。このような特徴は、岩石内に異なる充電性質を持つ複数の硫化鉱物が存在することを示唆している。

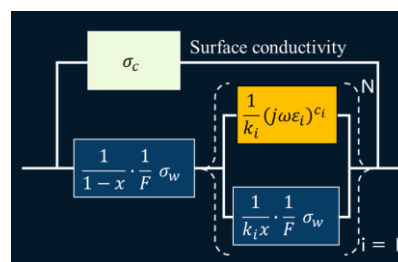
### 5. 物理モデル

本研究が構築した複素電気伝導度モデルは以下式(2)の通りである。式(1)の $C_e$ を、複素成分を持つキャパシタンスへと拡張してある他、形状定数に変更を加えた。

$$\sigma_R^* = \left[ \sum_{i=1}^N \left\{ k_i \frac{x}{\phi^m \sigma_w + x(j\omega \varepsilon_i)^{c_i}} \right\} + (1-x) \frac{1}{\phi^m \sigma_w} \right]^{-1} + \sigma_c \quad (2)$$

ここで、 $\sigma_R^*$  [S/m]は岩石の複素電気伝導度、 $\phi$ は間隙率、 $m$ はArchieの式の膠結係数、 $\sigma_c$  [S/m]は岩石粒子の表面を流れる過剰表面電気伝導を表す項である。このモデルはN個の充電項を持ち、 $\varepsilon_i$ 、 $c_i$ 、 $k_i$ はそれぞれi番目のキャパシタンス、

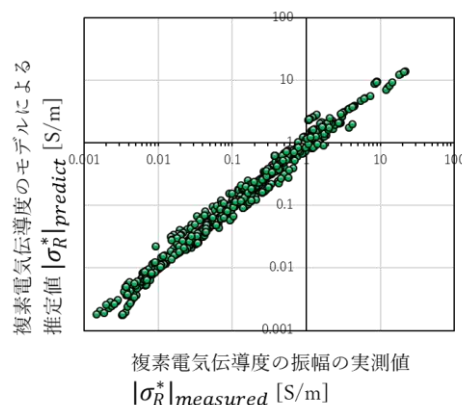
Cole-Coleパラメータ、充電項の重み係数である(ただし、 $\sum_{i=1}^N k_i = 1$ )。このモデルの等価回路図を第3図に示す。



第3図 モデルの等価回路図。

このモデルでは、第2図で示された複数のピークの特徴を再現するため、複数種のキャパシタンスを導入した。キャパシタンスが完全に充電されて不導体となった場合(式(2)の $\omega \rightarrow 0$ の極限)でも、間隙水 $\sigma_w$ が電流を流すことができること(図3の破線部分)が特徴である。

このモデルによって岩石サンプルの電気伝導度を再現した結果を第4図に示す。誤差は数%から20%程度と、精度よく再現することができた。



第4図 モデルによる複素電気伝導度の再現結果。横軸は実測された $|\sigma_R^*|$ であり、縦軸はモデルによって計算された $|\sigma_R^*|$ 。

### 5. まとめ

本研究では岩石試料の室内計測によって間隙水の電気伝導度、角周波数、岩石の複素電気伝導度との間の相関関係を調査した。また、その結果を元に構築した物理モデルを用いることで、岩石の複素電気伝導度を間隙水の電気伝導度や間隙率といった他の物性情報によって計算することが可能となった。今後、海底熱水活動域における物理探査の解釈技術として本研究で構築したモデルを実際に利用して、硫化鉱物の含有量などを推定することが期待される。

### 文献

鈴木浩一(2015) 岩石物理学に基づく物理探査データに対する複合解析技術の動向. 公益社団法人物理探査学会第133回学術講演会講演論文集, 物理探査学会.

Katsube, T. J., and Hume, J. P. (1983) Electrical resistivities of rocks from Chalk River, *Ws. Geophys. Geosci. Res, At Chalk River, proc.*, 105-114.

大田優介・後藤忠徳・小池克明・柏谷公希・林為人・多田井修・笠谷貴史・金松敏也・町山栄章・町山栄章(2018) 海底熱水活動域で得られた岩石試料の電気伝導度特性に基づく岩石物理モデルの構築. 物理探査, 71, 43-55.