

物理探査データと岩石物理学の統合に基づく海底下金属資源賦存量推定の試み

大田優介*・後藤忠徳**・小池克明***・柏谷公希***・笠谷貴史****・熊谷英憲****・町山栄章****

Evaluation of the amount of subseafloor metal resources based on the integration of geophysical data and rock physics

Yusuke Ohta*, Tada-nori Goto**, Katsuaki Koike***, Koki Kashiwaya***, Takafumi Kasaya****, Hidenori Kumagai**** and Hideaki Machiyama****

*名古屋大学大学院環境学研究科附属地震火山研究センター Earthquake and Volcano Research Center, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University
E-mail: ohtay@seis.nagoya-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
***京都大学大学院工学研究科 Graduate School of Engineering, Kyoto University
****海洋研究開発機構 Japan Agency for Marine-earth Science and Technology

キーワード: 海底熱水鉱床, 岩石物理モデル, 電気伝導度
Key words: Seafloor massive sulfide deposits; rock physics model; electrical conductivity

1. 研究の背景

金属資源の需要がますます増加している現状にあって、我が国の排他的経済水域内に多数存在する海底熱水鉱床の開発が望まれている。鉱床開発には規模・品位についての詳細な地質情報が必要となるが、海底での踏査・掘削調査は困難でありコストも高いため、物性分布を広域に明らかにできる物理探査の活用が不可欠である。

物理探査は掘削試験等の直接的情報収集技術と比較すると安価であり広域の地下構造を拘束に抽出できる手法であるが、反面、取得できるのは物性情報のみであり、元素濃度や鉱物組成といった化学情報に直接的に結びつかない。実際の物理探査結果から地質情報を取得するためには、対象地域の岩石の性状に即した岩石物理モデルを構築し、その種々のパラメータを適切に決定する必要があるが、海底熱水鉱床においては岩石物理モデルの選定、その最適パラメータの決定は未発展の課題である。そこで本研究では、海底下比抵抗トモグラフィーと岩石物理モデルを用いた海底下金属資源量の新規定量的解釈を試みた。

2. 研究対象

本研究の解析対象は、日本の海底熱水活動域（硫化鉱物胚胎地域）において実施された海底電気探査の結果である Ishizu *et al.*, (2019)の比抵抗トモグラフィーである。

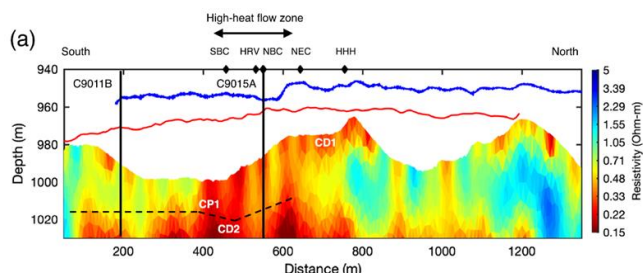


図 1. 海底熱水活動域比抵抗トモグラフィー(Ishizu *et al.*, 2019)

3. 解析手法

Ishizu *et al.*, (2019)の比抵抗断面から比抵抗要素を抽出し、各比抵抗要素に対し Pelton の式 (Pelton *et al.*, 1978) と修正 Archie の式 (Katsube and Hume, 1983) を統合した下記の岩石物理モデル (式(1)) を適用することで式(2)の資源量基準を計算した。

$$\sigma_R^* = \left[\left(1 - x \frac{F}{\sigma_w} + \frac{x F}{\sigma_w + x F (j\omega \epsilon)^c} \right)^{-1} + \sigma_c \right] \quad (1)$$

$$SME [\text{mol}/\text{cm}^3] = 0.0004 \exp(3.39x). \quad (2)$$

ただし、 $|\sigma_R^*|$ は岩石の複素電気伝導度の大きさ、 F は岩石の内部間隙形状に関する定数であり間隙率 ϕ と定数 m を用いて $F = \phi^{-m}$ で与えられる。 σ_w は間隙内流体（塩水）の電気伝導度 [S/m]、 σ_c は修正 Archie の式の過剰導電項に相当するパラメータである。 ω は角周波数、 ϵ は硫化物の粒径等と相関する比誘電率、 c は Cole-Cole parameter であり、 x は間隙流体と硫化鉱物が岩石内で互いに接触する範囲に関するパラメータであり、単純に硫化鉱物の存在量に比例する。 SME (Summation of metal elements: 金属元素の合算量)に関する式(2)は海底熱水鉱床の岩石試料 39 サンプルに対する実験から得られた経験式である。

比抵抗トモグラフィーの比抵抗要素は式(1)の $|\sigma_R^*|$ の逆数であると解釈できるので、本研究では x を求めるために式(1)の他のパラメータを決定する必要がある。 ϕ には掘削調査で得られている間隙率の代表値の深度プロファイルを線形近似して与えた。 σ_w は温度の関数であるため、海底下の温度構造を仮定し、Sinmyo & Keppler (2017) の実験結果を参考に温度-電気伝導度の相関関係式を取得して求めた。 ω は物理探査の観測周波数から求めた。 σ_c や c は岩石試料に対する式(1)の最適パラメータの最適値を基準に定められた。

決定論的に定めるのが難しいパラメータである、温度構造仮定における構造中の温度の最大値 $\max T$ [°C], m , および ϵ には以下の複数のパターンを与えた。

表 1. 解析パラメータ

	$\max T$	m	$\log_{10}(\epsilon)$
Analysis 01	350	2.67	0.956
Analysis 02	2	2.67	0.956
Analysis 03	350	2.67	2.000
Analysis 04	2	2.67	2.000
Analysis 05	350	1.78	0.956
Analysis 06	2	1.78	0.956
Analysis 07	350	1.78	2.000
Analysis 08	2	1.78	2.000

4. 解析結果

表 1 の各解析パラメータに基づく対象海域（断面）全体の金属資源量推定結果は表 2 に示すとおりである。

表 2. 解析結果. Fe, Cu, および Pb はそれぞれ「海域中の金属元素が全て単一の元素である場合」の単位奥行き当たり資源量を示す

	SME [mol/m]	Fe [t/m]	Cu [t/m]	Pb [t/m]
Analysis 01	510.555	2.85E+04	1.62E+04	1.06E+05
Analysis 02	609.785	3.41E+04	1.94E+04	1.26E+05
Analysis 03	379.914	2.12E+04	1.21E+04	7.87E+04
Analysis 04	521.543	2.91E+04	1.66E+04	1.08E+05
Analysis 05	298.232	1.67E+04	9.48E+03	6.18E+04
Analysis 06	495.994	2.77E+04	1.58E+04	1.03E+05
Analysis 07	158.091	8.83E+03	5.02E+03	3.28E+04
Analysis 08	363.627	2.03E+04	1.16E+04	7.53E+04

このうち、最も資源量が多く推定された結果と、最も少なく推定された結果である表 2 中の Analysis 02 と 07 について、解析された資源構造図を図 2 に示す。

5. 考察

Analysis 02 と 07 の資源量の比は表 2 の通り 4 倍弱である。このように推定値が大きな変動を示す原因は、式(1)で示される岩石の電気伝導度が主として {1} 間隙水（熱水）による電気伝導 {2} 硫化物による電気伝導の 2 系統の電気伝導によって規則されているためであると考えられる。

Analysis 02 の各パラメータ条件は、水温が低く、間隙の形状が間隙水による電気伝導を阻害しており、また硫化鉍物の導電性の特性値である比誘電率も低い状態を意味する。このような条件下では、熱水による電気伝導の値は小さくなり、金属量を増加させることによる電気伝導度の向上も十分ではないため、物理探査結果を説明するために至る所で金属量が最大化される。一方、Analysis 07 の条件では、熱水の温度は高く、形状定数は間隙水による電気伝導を比較的阻害せず、比誘電率も高いため、熱水の電気伝導だけでも断面内の一部領域の導電性を説明することが可能であるほか、金属量を増加させることで電気伝導度は飛躍的に向上するため、比較的少ない金属量で海底下比抵抗構造が説明できていると考えられる。

6. まとめ

本研究では地球物理学的手法による海底熱水鉍床の金属資源量推定手法開発を目的に、海底下比抵抗トモグラフィを試験的に資源量に変換する手法を構築した。その結果、物理探査手法のみにより海底下の金属資源分布を描画することが可能となり、その推定精度は低いものであったものの、「熱水-硫化鉍物」のトレードオフが金属資源量の大小を規則していることが明らかとなった。さらに精緻な資源量推定のためには、式(1)の各パラメータの妥当性検証、ならびに資源量の上下限を求める手法の開発などが必要である。

文献

- Ishizu, K., Goto, T., Ohta, Y., Kasaya, T., Iwamoto, H., Vachiriatienchai, C., Siripunvaraporn, W., Tsuji, T., Kumagai, H., and Koike, K. (2019) *Internal structure of a seafloor massive sulfide deposit by electrical resistivity tomography, Okinawa Trough*. Geophysical Research Letters, vol. 46, no. 20 pp.11025-11034.
- Pelton, W., H., Ward, S., H., Hallof, P., G., Sill, W., R., and Nelson, P., H. (1978) *Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency IP*. Geophysics, vol. 43 pp. 588-609.
- Katsube, T., J., and Hume, J., P. (1983) *Electrical resistivities of rocks from Chalk River*. In Proceeding Geophysical and Reuted Geoscientific Research at Chalk River, pp. 105-114, Ontario.
- Sinmyo, R., and Keppler, H. (2017) *Electrical conductivity of NaCl-bearing aqueous fluids to 600° C and 1 GPa*. Contributions to Mineralogy and Petrology, vol. 172, no. 1, pp.4.

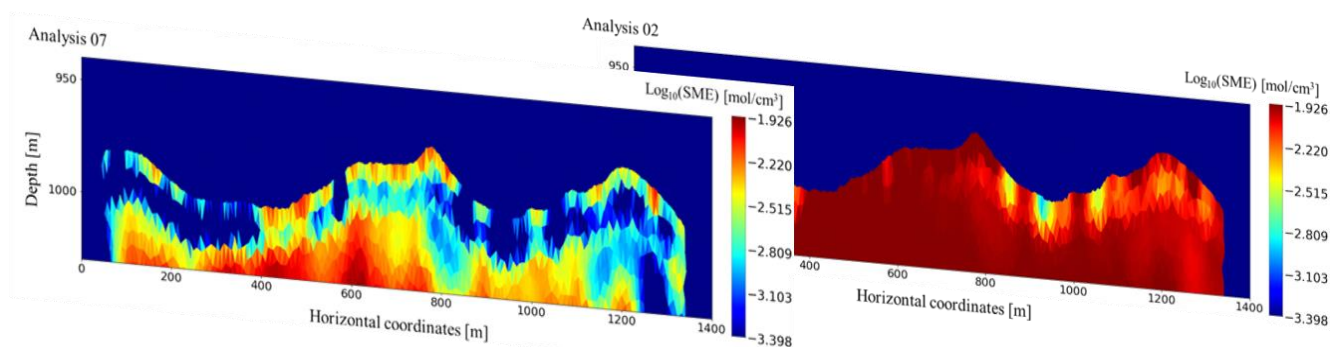


図 2. 推定された海底下金属元素濃度分布図 (右) Analysis 02 (左) Analysis 07