

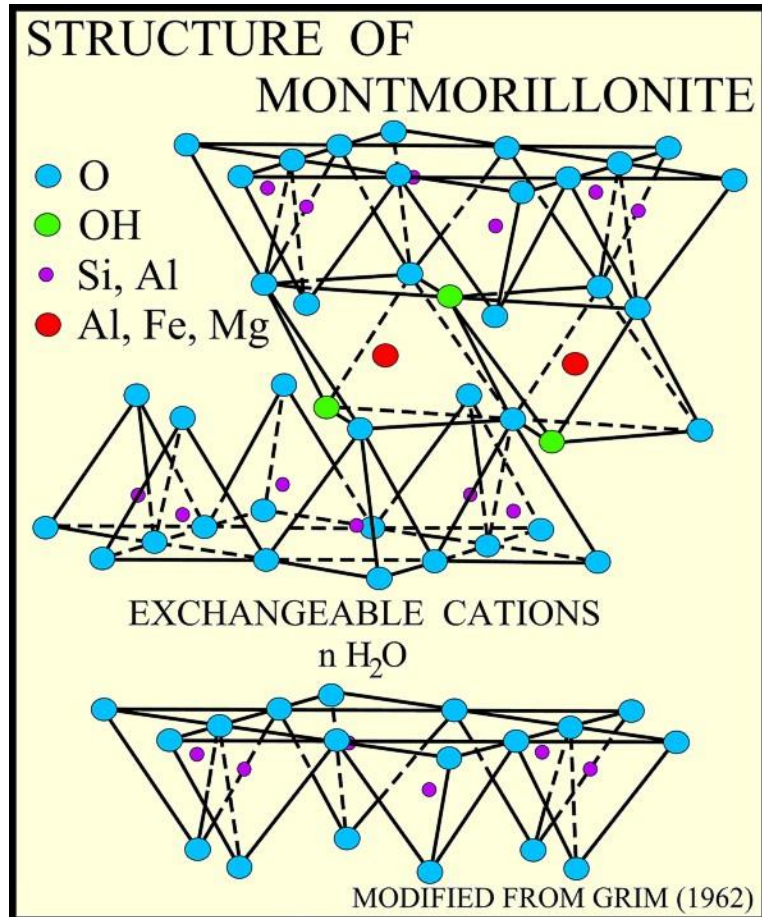
スメクタイトを含む岩石における 等価回路モデルの開発

青山健太郎, 橋本武志
北海道大学 理学院

はじめに

- 火山熱水系の比抵抗構造は、間隙率や間隙水の導電率のほか、スメクタイトの含有量に大きく影響を受けると考えられる。
- しかし、スメクタイトの含有量と比抵抗の定量的な関係は、十分にモデル化されていない。
- バルクの導電率から、スメクタイトの含有量を推定することを目的として、スメクタイトを含む岩石に適用可能な等価回路モデルの開発に取り組んだ。
 - Levy et al. (2018)の実験データを用いた。

スメクタイトの構造



- スメクタイトはシート状の珪酸塩鉱物が層状に重なった構造をしている。
- Si^{4+} が Al^{3+} や Mg^{2+} に置換されたことによる負電荷 (層電荷) を持つ。
- シートの間に Na^+ や Ca^{2+} などの陽イオンが濃集することで、電気的中性が保たれる。

Waxman & Smits (1968)の式

- Waxman & Smits (1968)は, 粘土鉱物を多く含む岩石に適用可能なバルク導電率の計算式として, 以下の式を提案した.

$$\sigma_{\text{bulk}} = \frac{1}{F} (\sigma_w + BQ_v)$$

$$(Q_v = \rho_g \frac{(1 - \phi)}{\phi} \text{CEC})$$

σ_{bulk} : 岩石のバルク導電率 (S/m)

σ_w : 間隙水の導電率 (S/m)

B : 交換性陽イオンの移動度 ($\text{m}^2/\text{V} \cdot \text{s}$)

Q_v : 交換性陽イオンの電荷量 (C/m^3)

F : 地層比抵抗係数

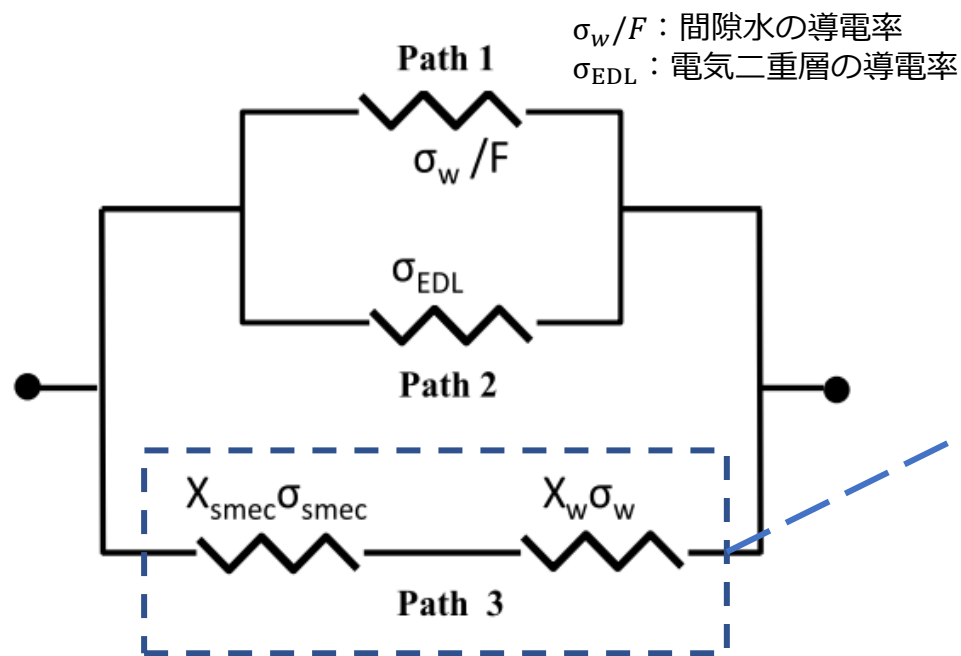
Φ : 間隙率

ρ_g : 粒子の密度 (g/m^3)

CEC : 陽イオン交換容量 (C/g)

Levy et al. (2018)の式 (1)

- スメクタイトの層間を通る電流を考慮して, 以下の等価回路が提案された.



等価回路図

$$\sigma_{\text{bulk}} = \frac{\sigma_w}{F} + \sigma_{\text{EDL-interface}} + \sigma_{\text{intra-solid}}$$

加えた項

$$\sigma_{\text{intra-solid}} = \frac{1}{\frac{1}{X_w \sigma_w} + \frac{1}{X_{\text{sol}} \sigma_{\text{sol}}}}$$

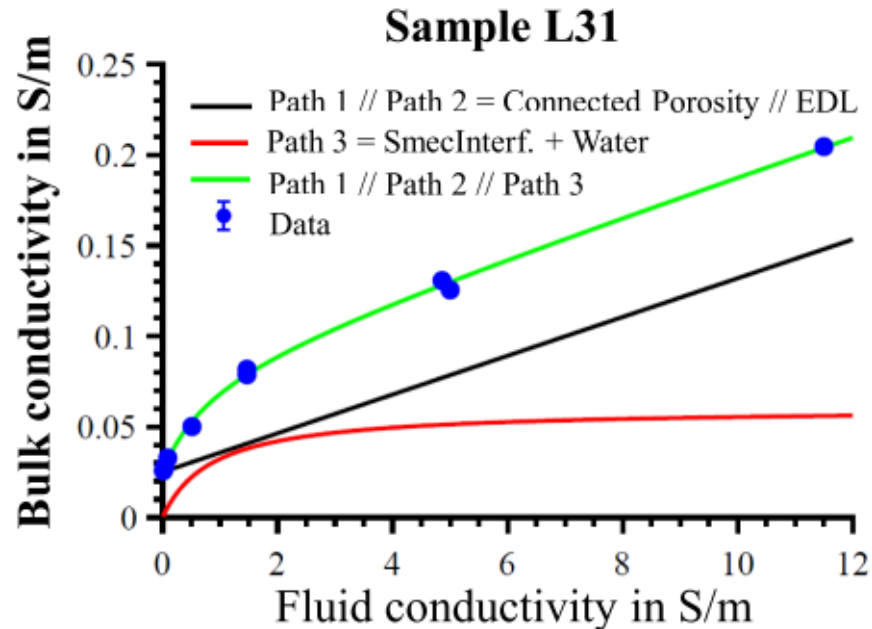
X_w : スメクタイト層間の体積分率

X_{sol} : スメクタイトの固相部分の体積分率

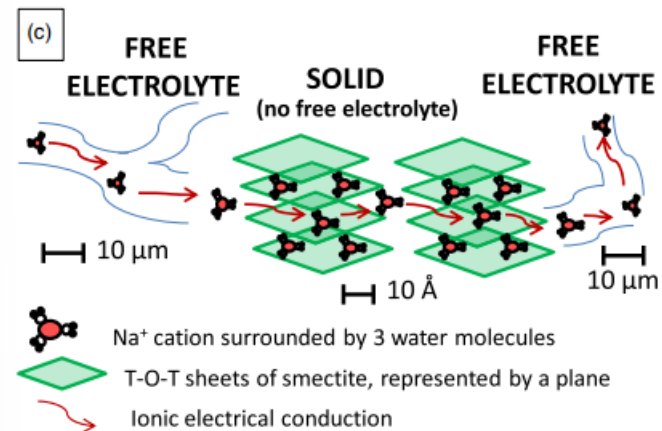
σ_{sol} : スメクタイト固相の導電率

Levy et al. (2018)の式 (2)

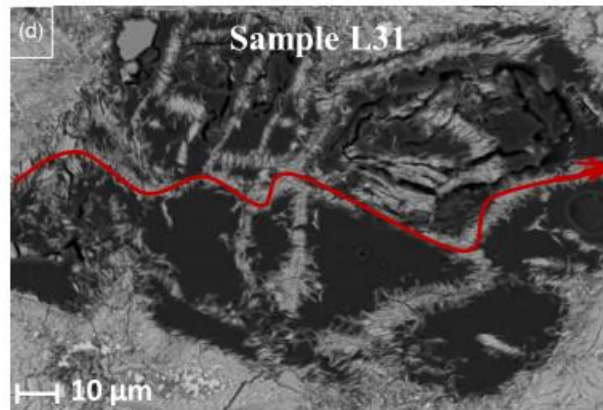
- 最小二乗法によるフィッティングを行った結果, 実験データと整合する結果が得られた.



スメクタイトの質量分率が32wt%の試料 (L31)におけるフィッティング結果



スメクタイトの層間を通るイオンの模式図



L31のSEM画像

Levy et al. (2018)の式の問題点

1. スメクタイトの固相を通る電流の経路を想定している点.
 - スメクタイトの固相 (Si_4O_{10} 四面体や, Al-O八面体) は, イオン結合または共有結合的であるため, 絶縁体に近いと考えられる (e.g., 渡辺, 2005).
2. 表面伝導項が, スメクタイトが寄与する項と, それ以外の粘土鉱物が寄与する項に分離されていない点.
3. スメクタイトの層間を通る経路の複雑さが考慮されていない点.
 - Archie則 : $F = \varphi^{-m}$

$$\sigma_{\text{bulk}} = \frac{\sigma_w}{F} + \sigma_{\text{EDL-interface}} + \sigma_{\text{intra-solid}} \quad \text{Levy et al. (2018)の式}$$

新たな式の考案

- Levy et al.(2018)の式を一部修正し, 以下の式を考案した.

- 式 :
$$\sigma_{bulk} = \frac{1}{F} (\sigma_w + \sigma_{EDL,other}) + \frac{1}{F'} (\sigma_w + \sigma_{EDL,smec})$$

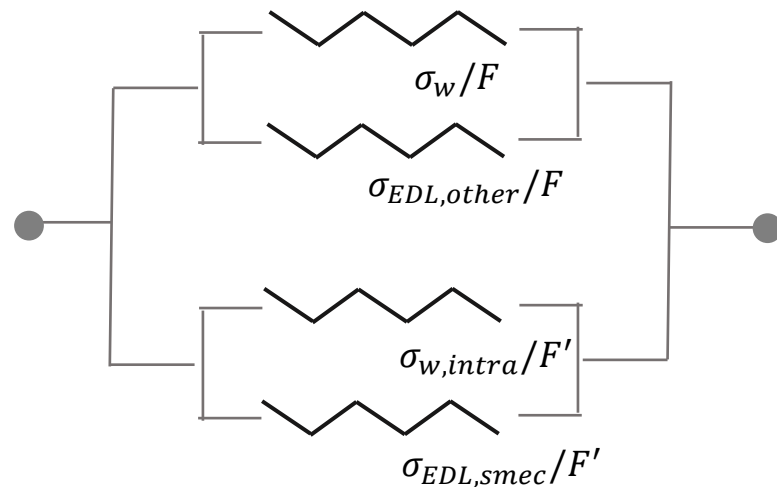
$\sigma_{EDL,other}$: スメクタイト以外の粘土鉱物が寄与する表面伝導項

$\sigma_{EDL,smec}$: スメクタイトが寄与する表面伝導項

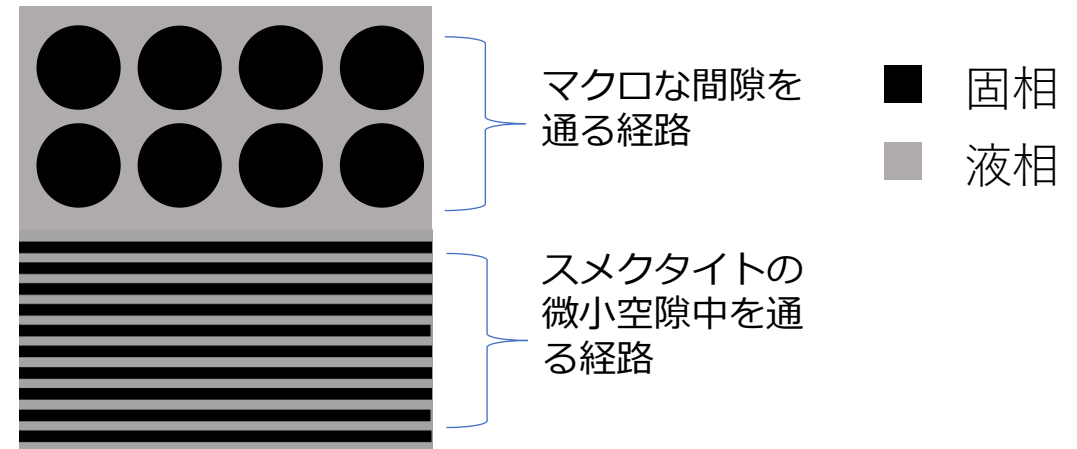
F : 地層比抵抗係数

F' : スメクタイトの層間を通る経路の複雑さ

※お詫びと訂正
 上の式の σ_w は, 正しくは以下の通りです。
 不備があり申し訳ありませんでした。
 第一項の $\sigma_w \rightarrow \varphi\sigma_w$ (φ : 間隙率)
 第二項の $\sigma_w \rightarrow X_w\sigma_w$ (X_w : スメクタイト中の液相の体積分率)



等価回路図



岩石の模式図

修正前と後の式の比較

- 修正前の式：

$$\sigma_{bulk} = \frac{\sigma_w}{F} + \sigma_{EDL-interface} + \sigma_{intra-solid}$$

$$\frac{\sigma_w}{F} = \frac{\sigma_w}{\varphi^{-m}}$$

$$\sigma_{EDL-interface} = B' Smec\% \frac{1-\varphi}{\varphi^{1-m}}$$

$$\sigma_{intra-solid} = \frac{\varphi'(1-\varphi')}{\varphi'\sigma_w + (1-\varphi')\sigma_{sol}} \frac{\rho_{soil}}{\rho_{smec}} (1-\varphi) Smec\%$$

- 変数： $\sigma_w, \varphi, \rho_{soil}, Smec\%$
- 定数： $m, B', \varphi', \sigma_{sol}, \rho_{smec}$ (5つ)

φ ：間隙率

m ：膠結定数

B' ：定数

φ' ：スメクタイトの体積に占める微小空隙の割合

ρ_{soil} ：土粒子の平均密度

ρ_{smec} ：スメクタイトの密度

$Smec\%$ ：スメクタイトの質量分率

※お詫びと訂正

下の式の σ_w は、前頁同様、正しくは以下の通りです。

不備があり申し訳ありませんでした。

第一項の $\sigma_w \rightarrow \varphi\sigma_w$ (φ ：間隙率)

第二項の $\sigma_w \rightarrow X_w\sigma_w$ (X_w ：スメクタイト中の液相の体積分率)

- 修正後の式：

$$\sigma_{bulk} = \frac{1}{F} (\sigma_w + \sigma_{EDL,other}) + \frac{1}{F'} (\sigma_w + \sigma_{EDL,smec})$$

$$F = \varphi^{-m}$$

$$F' = \left\{ \frac{\rho_{soil}}{\rho_{smec}} (1-\varphi) Smec\% \varphi' \right\}^{-m'}$$

- 変数： $\sigma_w, \varphi, \rho_{soil}, Smec\%$ (修正前と同じ)
- 定数： $m, m', \varphi', \rho_{smec}, \sigma_{EDL,smec}, \rho_{smec}, \sigma_{EDL,other}$ (6つ)

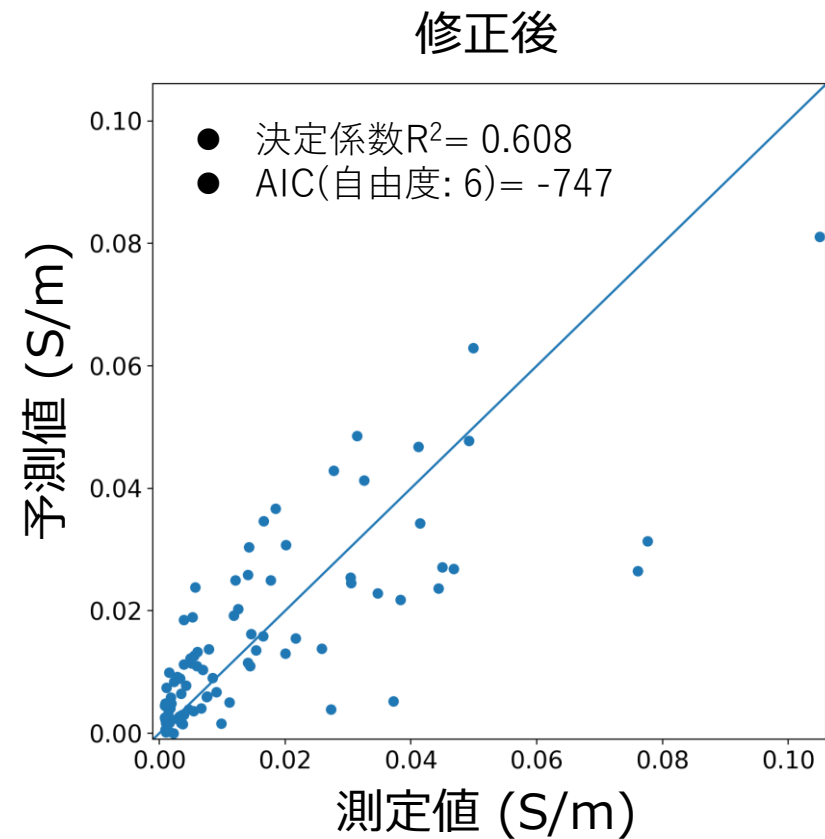
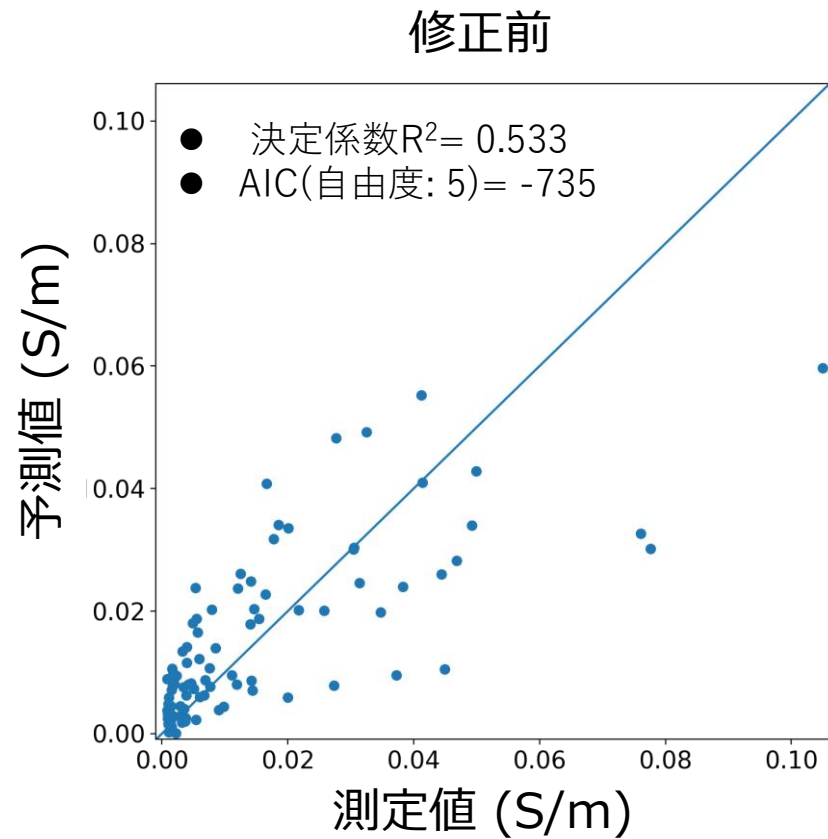
m' ：スメクタイトの微小空隙を通る経路の膠結定数

各式の定数は最小二乗法

(Levenberg-Marquardt法) により求めた。

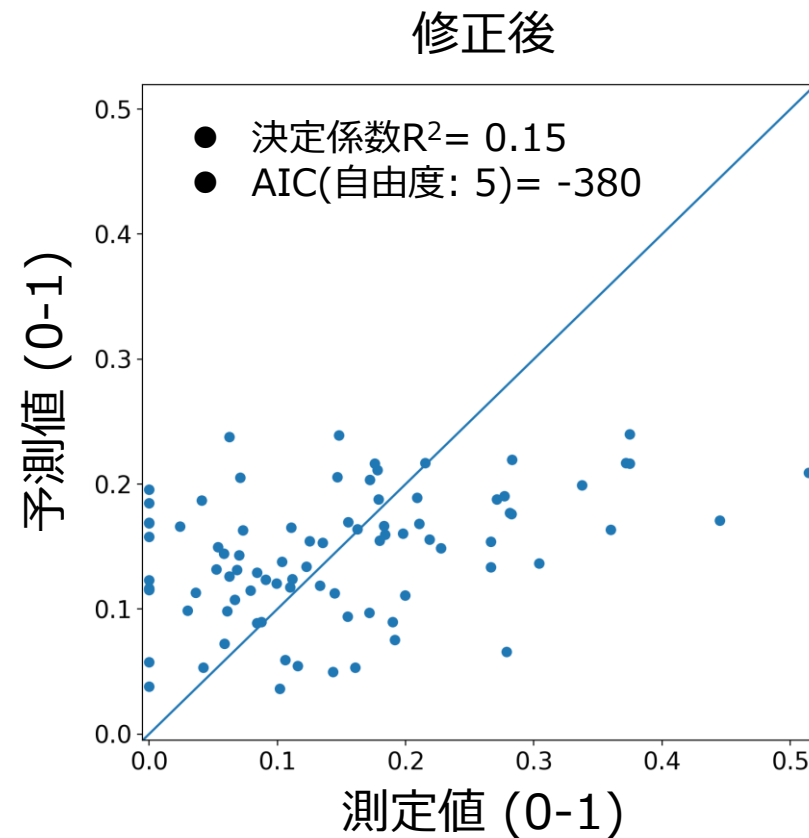
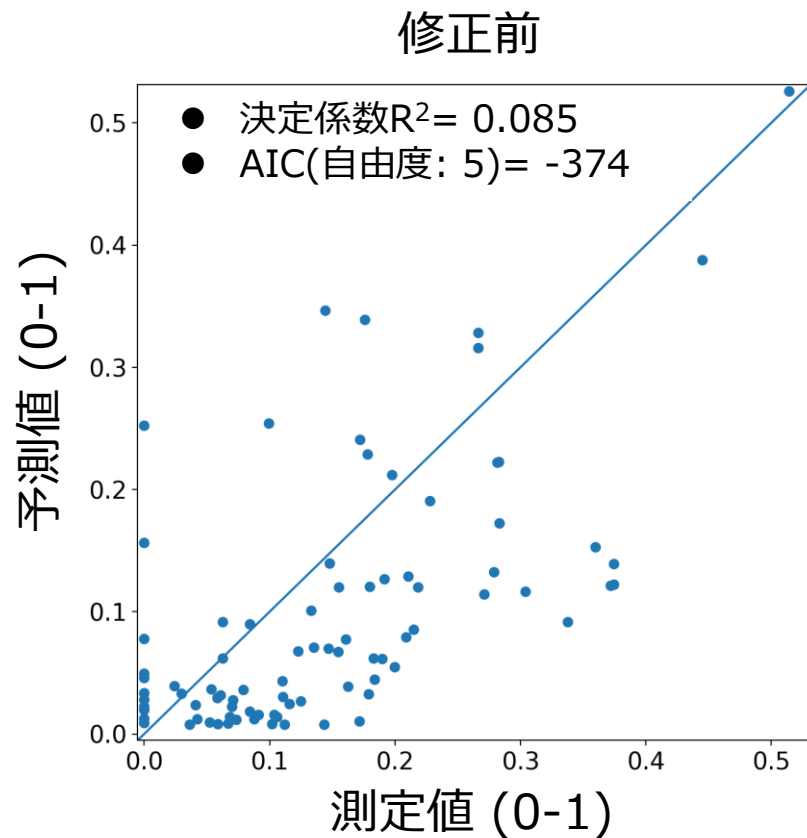
バルク導電率の予測結果

- 各式の定数を最小二乗法により求め、バルク導電率の予測精度を比較した。
- 修正により、決定係数とAICが改善された。



スメクタイト質量分率の予測結果

- 各式を, それぞれスメクタイト質量分率について解き, スメクタイト質量分率の予測精度を比較した.
- 修正により, 決定係数とAICが改善された.



フィッティング結果

定数	バルク導電率の 予測式	スメクタイト質量分率 の予測式	制約条件
m	1.91	4.58	$[1, \infty]$
B'	36.7	7.19	$[0, \infty]$
Φ'	0.45	0.95	$[0.45, 0.95]$
σ_{sol}	24.7	636	$[0, \infty]$
ρ_{smec}	2.60	2.00	$[2, 2.6]$

修正前

定数	バルク導電率の 予測式	スメクタイト質量分率 の予測式	制約条件
m	3.77	4.03	$[1, \infty]$
m'	3.28	1.24	$[0, \infty]$
Φ'	0.70	0.95	$[0.45, 0.95]$
$\sigma_{EDL,other}$	0.74	—	$[0, \infty]$
$\sigma_{EDL,smec}$	16.4	753	$[0, \infty]$
ρ_{smec}	2.60	2.60	$[2, 2.6]$

修正後

議論

- 今回の修正には, 以下の問題がある.
 - σ_w と σ_{bulk} の非線形的な関係が再現できなくなった点.
 - $\sigma_{EDL,smec}$ の値が, 753 S/m と大きすぎる点.

まとめ

- Levy et al. (2018)の式を物理的に妥当な形に修正し, スメクタイトが含まれる岩石に適用可能な等価回路モデルを得た.
- その結果, バルク導電率とスメクタイトの質量分率を高い精度で予測できた.
- 修正後の式は, 間隙水の導電率とバルク導電率の非線形的な関係を再現できないなどの問題があるため, 今後さらに修正を行う必要がある.

今後の計画

- 実験データは, 測定誤差を含む他, 数が限られる.
- 今後は, 有限要素法を用いたシミュレーションにより, 実験データを人工的に作成し, それを用いて等価回路モデルの開発を進める.
 1. 要素ごとに, スメクタイトや間隙水に応じた導電率を設定する.
 2. 静電場を与える.
 3. 系の静電エネルギーを最小にする電位の分布を求める.
 4. 取り出される電流から, バルクの導電率を計算する.

参考文献

- Garboczi, E. J. 1998 NIST Internal report 6269
- L Lévy, B Gibert, F Sigmundsson, ÓG Flóvenz, GP Hersir, P Briole, PA Pezard, The role of smectites in the electrical conductivity of active hydrothermal systems: electrical properties of core samples from Krafla volcano, Iceland, Geophysical Journal International, Volume 215, Issue 3, December 2018, Pages 1558–1582
- Shen, L. C. and Liu, C., J. Korringa, K. J. Dunn, Computation of conductivity and dielectric constant of periodic porous media
- 渡辺了, 2005, 岩石の電気物性—レビュー, 地学雑誌, 114(6) 837-861
- Waxman M.H., Smits L.J.M., 1968. Electrical conductivities in oil-bearing shaly sands, Soc. Pet. Eng. J., 8, 107–122..10.2118/1863-A

謝辞

本研究は、JST 次世代研究者挑戦的研究プログラム JPMJSP2119 の支援を受けたものです。
ここに感謝いたします。