

含水岩石内電気伝導度ネットワークの初期モデルの構築

藤田 清士 (大阪大学)¹・関 雅幸 (神戸常盤大学)²・桂 智男
(パイロイト大学)³・市来 雅啓 (東京工業大)⁴・小川 康雄 (東京工業大)⁵

A preliminary electrical conductivity network model within the hydrous rock

¹Kiyoshi Fuji-ta, Graduate School of Engineering, Osaka University

²Masayuki Seki, Faculty of Health Sciences, Kobe Tokiwa University

³Tomoo Katsura, Bayerisches Geoinstitut, Universität Bayreuth

⁴Masahiro Ichiki, Volcanic Fluid Research Center, Tokyo Institute of Technology

⁵Yasuo Ogawa, Volcanic Fluid Research Center, Tokyo Institute of Technology

Abstract

It is essential to comprehend the mechanism of electrical conductivity in the earth to consider the electrical conductivity network within the rock. The aim of our study is to quantify the electrical conductivity network in the rock. We try to evaluate the electrical conductivity models of fluid-mineral interaction. Prior to our model study, to measure the conductivity of single crystal brucite and amphibolite, we have observed a remarkable conductivity change accompanied with dehydration. Though small amount of fluid was formed after dehydration, bulk conductivity of the sample showed high conductivity. Based on these electrical conductivity data obtained from laboratory experiments, we have tried to construct electrical conductivity model of crustal rock. Our model has been compared with results from Electron Probe Micro Analysis in terms of fractal dimensions. In the initial model, we assumed a network model consists of 100 by 102 elements. Currents flow in the network model is ruled by optimal conditional judgments. Finally, we have constructed the preliminary electrical conductivity network path considering hydrous rock.

1. はじめに

地殻内や沈み込み構造の近傍では、地震発生に関連する脱水が起こる可能性が長年にわたり議論されてきた。電磁気観測から求められるリソスフェア内の電気伝導度の検証からは水や流体の存在により電気伝導度は何桁も変わる事が報告されている。

私達は含水鉱物及び含水岩石が脱水する際、『**鉱物+水**』、『**岩石+水**』の系が急激な電気伝導度変化を示すことに着目している。例えば、リソスフェアに存在する含水鉱物や含水岩石を任意の温度・圧力で脱水させた際、その試料を電気伝導度でその場観察(*in situ*)すれば、電気伝導度デー

タから、脱水過程や地球深部の脱水による電気伝導度コントラストとして捉えることが可能である。つまり、リソスフェア内での脱水過程を電気伝導度の視点から室内実験で再現することが可能である。私達は、含水鉱物や含水岩石が脱水する前後で電気伝導度が 2-3 桁変わる事を実験的に確認した (Fuji-ta et al. 2007, Fuji-ta et al., (In preparation))。

しかしながら、岩石/鉱物内での脱水時の電気伝導度メカニズムや固相—液相の電気伝導ネットワークに関しては不明な点が多い。岩石/鉱物—流体の電気伝導ネットワークを考える事は、微視的には岩石の電気伝導度を考えるために、巨視的には地殻やマンツルの電気伝導メカニズムを解釈するために必要不可欠である。その為、微視的にも巨視的にも電気伝導のメカニズムを理論的に解明し、地球内部の固相—液相の電気伝導メカニズムを定量化する研究が必要である。さらに岩石内の鉱物—流体の違いによる電気伝導度の差異や岩石内の理論的電気伝導度値を実験値や観測値と相互参照することにより地球内部の電気伝導度構造がより明確になる。

地球深部鉱物の電気伝導ネットワークについては、Simpson and Tommasi(2005)が olivine-enstatite 系のモデルで鉱物の結晶方向に依存する異方性を説明した。しかしながら、比較的深度の浅い場所に存在する地殻岩石・鉱物と流体を対象とした電気伝導度モデルは十分に検証されていない。本研究では現実的な含水岩石・鉱物内電気伝導度ネットワークモデルの構築を行い、固相—液相分布とその系における電気伝導度がどのように変化するかを定量評価することを目的とする。

2. 岩石内の電気伝導ネットワークモデル

私達の電気伝導ネットワークモデルでは、現実存在する岩石内の鉱物分布を意識しながらモデルを創生した。実際に電気伝導度測定をおこなった岩石の定性及び定量分析結果や SEM 画像と対比しながらモデルを構築した。具体的には、伝導性鉱物若しくは伝導性流体 (Conductor) と絶縁性鉱物 (Resistor) の粒 (以下セルと表現する) を考え、セルを 100×100 の 2 次元正方形格子状に配置した。電流の入力層と出力層(共に伝導性鉱物・流体があることを仮定した)を加えるため、厳密には 102×100 のシステムサイズとなった。電流が流れる方向と直角の方向の境界条件は周期境界条件としている。ある割合でランダムに絶縁性セルを置き (他は伝導性セルとする)、各セルに流れ込む正電荷は場所 (i, j) (i : 電流が流れる方向の位置 i 番目の層にある) j : 電流が流れる方向と直行する向き(図 1: Fig. 1)) にあるセルからは、場所 $(i+1, j-1)$ 、 $(i+1, j)$ 、 $(i+1, j+1)$ にあるセルへ流れるとする(図 2: Fig. 2)。

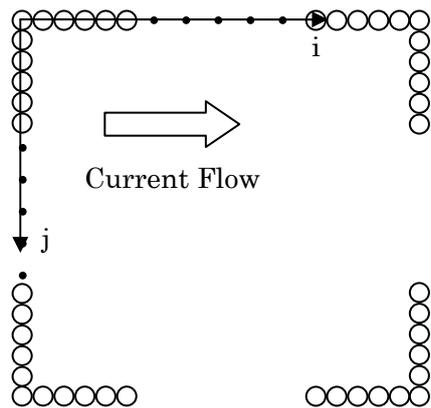


図 1 モデル内でのセルの位置の表し方

Fig. 1

Distribution pattern of cells in the model

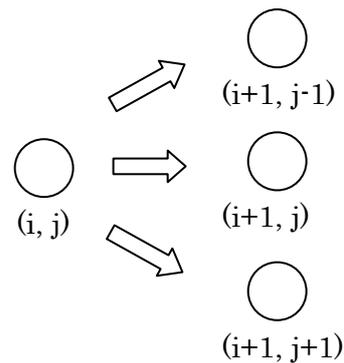


図 2 任意のセルから次のセルへの電流の流し方

Fig. 2

Current flow from an arbitrary cell to next cell

正電荷のローカルな流れ方はセルの種類とその配置により 16 通りとした。電流を次の層へ流すルールは異種間 (Conductor→Resistor、Resistor→Conductor) では同種間 (Conductor→Conductor、Resistor→Resistor) に対して f (flow rate) の割合で流れるとし(例えば、 f の値が 0.01 の場合、異種間では同種間で流れる量の 1% の電流が流れるとする)、元のセルにある正電荷の量が x のとき次のように仮定した。

- ・次層が同種 3 つの場合、 $\frac{1}{3}x$ ずつ流れる

- ・次層が同種 2 つ、異種 1 つの場合、同種には $\frac{x}{2+f}$ 、異種には $\frac{fx}{2+f}$ が流れる

- ・次層が同種 1 つ、異種 2 つの場合、同種には $\frac{x}{1+2f}$ 、異種には $\frac{fx}{1+2f}$ が流れる

- ・次層が異種 3 つの場合 (以下これを壁と表現する)、 fx ずつ流れ、 $(1-3f)x$ の正電荷が元の層に残る

実際のシステムでは、ある割合でランダムに Resistor のセルを置き (他は Conductor とする)、入力層の各セルに同量の正電荷を与え、出力層にある各セルにたどり着いた正電荷の合計と、入力した正電荷の合計との比 $\left(\frac{\text{出力層での正電荷の量}}{\text{入力層での正電荷の量}}\right)$ を求め、岩石内部の抵抗を考えた。又、ネットワークモデルでは、Conductor と Resistor の存在割合を変える事により、セル間のネットワーク結合がどのように変化するかを調べた。

3. シミュレーションの結果

102×100 のセルで構成された 2 次元正方格子のシステムに電流を流し、その応答を精査した。セル間の f の値を 0.1 から 0.01、0.001 と変化させ、入力に対する出力応答を計算した(図 3: Fig. 3)。

最初のモデルにおいては、 f が同じ場合、導体の存在割合が大きい方が抵抗は小さくなるが、導体の割合が同じの場合、 f の値が大きい方（異種間のセルにより電流が流れやすい）が、抵抗が大きくなるという結果になった。導体の割合が同じなら f の値が大きい方が、抵抗が小さくなる予測していたが異なるものとなった。これは、例えば Conductor→Resistor の壁→Conductor の壁と流れたとき、セルに留まる正電荷は、 f の値が大きい場合多くなり、これが繰り返されると出力層までにたどり着く電流が減るからであると推測できる。特にこの繰り返しが i が小さいところで起こると多くの正電荷がセルの中にとどまることになる。

そこで、Resistor→Conductor と電流が流れる場合は、同種間の場合と同じように流れを仮定し、Resistor から次の層の 3 つのセルには同じように、3 分の 1 ずつ電流を分配するモデルを考えた。これを第 2 のモデルとする。

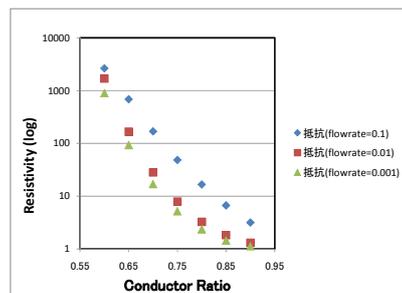


図 3 最初のモデルでの導体の割合と抵抗の関係

Fig. 3 Effect of conductive cells on the resistivity in the primary model

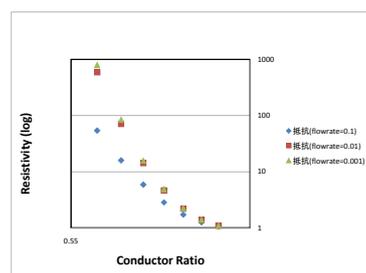


図 4 第 2 のモデルでの導体の割合と抵抗の関係

Fig. 4 Effect of conductive cells on the resistivity in the secondary model

第 2 のモデルでは、最初のモデルと同じように f の値が一定の場合、導体の割合が多くなるほど抵抗の値は小さくなるが、導体の割合が一定の場合、 f の値が 0.1 の場合は 0.01、0.001 の場合より抵抗値は小さくなった。又、両者のモデルでも導体の割合により、抵抗値が 3 桁程度変化し、脱水実験で電気伝導度が 2-3 桁変化する事を説明できる可能性がある。

実際の岩石中の存在する Conductor と Resistor の割合に関して (図 5 (a, b) : Fig. 5 (a, b)) は、フラクタル次元解析(Box count 法に基づく)により評価を行った。具体的には、2 次元正方形格子のシステムの分布する Conductor と Resistor の割合と実際の変成岩の伝導性鉱物若しくは伝導性流体 (Conductor) と絶縁性鉱物 (Resistor) の存在割合をフラクタル次元により定量的に解析した。結果として、モデルのフラクタル次元が実際の岩石のフラクタル次元の範囲に入る事を確認した。

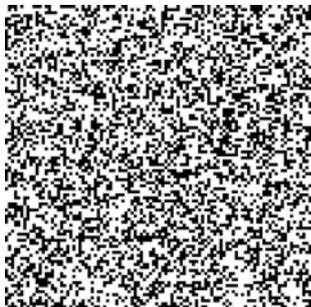


図 5(a) モデルの伝導性物質 (Conductor) と絶縁性鉱物 (Resistor) の分布

Fig. 5(a) Distribution pattern of conductors and resistors in the model

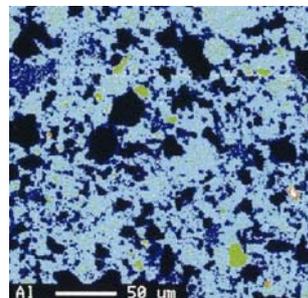


図 5(b) 変成岩の伝導性物質 (Conductor) と絶縁性鉱物 (Resistor) の分布

Fig. 5(b) Mineral distributions in metamorphic rock

4. 今後の展開

含水鉱物・含水岩石からどれだけの『水』や『流体』が脱水したかを定量的に評価する手法は実験的にも、理論的にも未だ十分確立していない。本研究はこの問題を解決するための布石であり、電気伝導度変化から脱水量や脱水した流体の特性まで見積もる定量的解釈に貢献する事が可能である。リソスフェアやその近傍の水や流体に関しては、未解明な事が多く、これまで筆者等が行ってきた実験的研究の連結により、『水』や『流体』の定量的な解釈が発展すると同時に、岩石内電気伝導度の定量的モデル構築のための基礎データが蓄積される。同時に、脱水実験から得られたデータをもとに、リソスフェア内の電気伝導メカニズム・脱水過程をモデル化する事も可能である。

一方、様々な岩石内の電気伝導ネットワークモデルを構築することにより、電磁気観測から得られる結果との比較研究が可能になる。本研究では、現在までに議論されている地殻内高電気伝導度異常を説明する水の存在や鉱物配列による電気伝導度の異方性の研究に貢献するだけでなく、

地殻に存在する岩石の鉱物-流体反応や伝導性鉱物-絶縁性鉱物の電気伝導度ネットワークを模する事が可能となる。

しかしながら、含水岩石・鉱物内電気伝導度ネットワークモデル構築の際には様々な要因を考慮しなくてはならない。Wang et al. (2005) が指摘するように岩石内の空孔のジオメトリーの考慮や脱水した流体の化学特性も電気伝導度に勘案しなくてはならない。又、本研究では、伝導性鉱物若しくは伝導性流体と絶縁性鉱物の粒セルは 2 次元正方格子状に配置しているが、今後は実際の岩石電気伝導度測定実験に用いる試料のように 3 次元形状 (e. g. David et al. 1990, Zhang and Knackstedt 1995) を仮定したモデルへの発展が必要とされる。

参考文献

- David, C., Gueguen, Y. and Pampoukis G., 1990. Effective Medium Theory and Network Theory Applied to the Transport Properties of Rock, *Journal of Geophysical Research*. Vol. 95, 6993-7005.
- Fuji-ta, K., Katsura, T., Matsuzaki, T. and Ichiki, M., 2007. Electrical conductivity measurements of brucite under crustal pressure and temperature conditions, *Earth Planets Space*, 59, 645-648.
- Simpson, F. and Tommasi, A., 2005. Hydrogen diffusivity and electrical anisotropy of a peridotite mantle, *Geophysical Journal International*, 160, 1092-1102.
- Wang K., Sun, J., Gung, J. and Su, Y. 2005. Percolation Network Modeling of Electrical Properties of Reservoir Rock, *Applied Geophysics*, Vol. 2, No. 4, 223-229.
- Zhang, X. and Knackstedt M.A., 1995. Direct simulation of electrical and hydraulic tortuosity in porous solids, *Geophysical Research Letters*, Vol. 22, 17, 2333-2336.