

北海道・日高変成帯のグラニュライトの電気伝導度測定実験

藤田清士 (神戸大学理学部)・桂智男 (岡山大学固体地球研究センター)・
田結庄良昭 (神戸大発達科学部)

Electrical conductivity measurements of granulite of Hidaka metamorphic belt, Hokkaido, Japan
Kiyoshi Fuji-ta (Kobe University), Tomoo Katsura (ISEI, Okayama University) and
Yoshiaki Tainosho(Kobe University)

1. はじめに

電気探査及び電磁気探査の観測・解析手法の進化により、地殻及びマントルの構造解析結果の精度は向上した。又、電気伝導度構造と他の地球物理学的情報や地質学的情報との直接対比による相互検証も行われてきた。しかしながら、構造解釈をする上で、テクトニクスに対する解釈だけでなく、岩石・鉱物学的な解釈については十分議論されずに終始することがある。その理由は、岩石が様々な鉱物を含み、その化学組成を一般化して特性を議論することは難しいからである。特に、岩石の電気伝導度に関連する物理条件は多様であり、鉱物そのものの種類や組み合わせは多種であるので、観測事実と岩石学的情報を一義的に対応させることには困難が伴う事が多い。

高倉 (2003) が指摘するように、地下を形成する岩石の電気伝導度 (比抵抗) 物性に関する知識の欠如は大きな問題である。その解決のためには、多数の岩石・鉱物が地下で存在していた条件を実験室内で再現し、岩石学的な精査をした上で電気伝導度測定の例証を増やすことが重要である (例えば、栗田 (1991)、藤田 (1999))。

現在までの岩石電気伝導度室内実験の問題点は、測定に使用する岩石の十分なキャラクターゼーションが欠如している事である。採取した岩石の電気伝導度を測定するだけでなく、岩石内の鉱物種や岩石内空孔の存在や伝導性鉱物の連結状態によって生ずる電気伝導度の差異も慎重に考慮しなくてはならない。当然のことながら、岩石が存在した温度・圧力条件を実験室で正確に再現する必要がある。

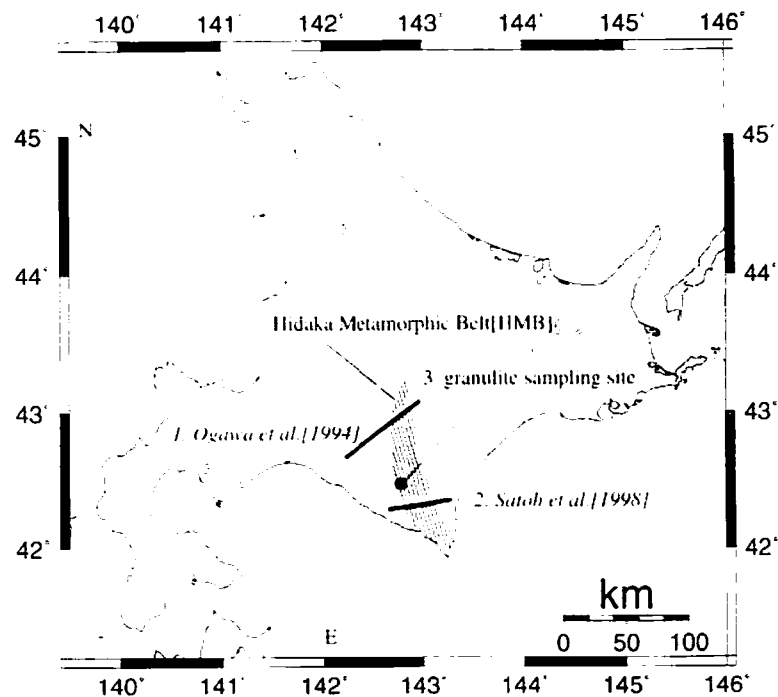
逆説的に述べると、地殻内岩石の電気伝導度測定については、十分なキャラクターゼーションと精度の高い測定技術が確立されれば、ある条件下の岩石電気伝導度測定結果には重要な意義を含む事が期待される。さらにノイズが小さく、精度の高い電磁気観測の解析結果が、岩石電気伝導度測定結果と直接対比されることにより、両者の解釈はより信頼性の高いものとなる事が期待される。

2. 測定試料合成

岩石電気伝導度測定用試料として北海道・日高変成帯の第IV帯からグラニュライトを採取した(第1図)。日高変成帯からの採取岩石は、構造運動や火成活動の影響が少なく、かつ地殻中部から下部地殻を反映するものを選択した。この岩石の主な鉱物は Garnet-cordierite-biotite であり、その詳細は小山内(1985)に記載されている。又、グラニュライトから求められた変成作用の温度・圧力条件は 700-800°C、10Kb 以下と推測されている。岩石学的・地質学的観点からこの地域がよく研究されてきたのは、下部地殻の岩石構成、さらには地殻形成史の解明に寄与するためとされる(小山内, 1985)。

グラニュライトは他の物質と反応しないように粒径が 10 μm 以下になるように粉砕した。粉末試料は元素分析のため X線回折パターンを精査した。数回の予備実験において、変成温度条件を超える領域で試料合成を行うと、鉱物の分解が観察され、元の岩石の鉱物構成を損なうことが分かった。そのため、試料の合成は下部地殻の最大圧力を 1 GPa と見積もり、温度条件は最大 600°C として焼結した。粉末試料は、合成時に圧力媒体内の他の物質と反応しないように白金カプセルに封入し、周りを NaCl で囲んでから加圧・加温を行った。焼結は約 1 時間で行った。

焼結試料は、EPMA(Electron Probe Micro Analysis)により定性分析ならびに定量分析を行った。特に焼結合成時に、試料の電気伝導度を大きく変化させる酸素分圧の変化に着目した。酸素分圧を高温・高圧実験中に完全に制御することは難しいため、本実験においては試料内に含まれる鉄イオンを定量的に評価した。鉄イオンの存在量は試料内の酸化/還元状態に鋭敏な指標であるため、実験前後で鉄イオンを見積もり、その変化量が微小であることから酸素分圧の影響は最小化することができた。

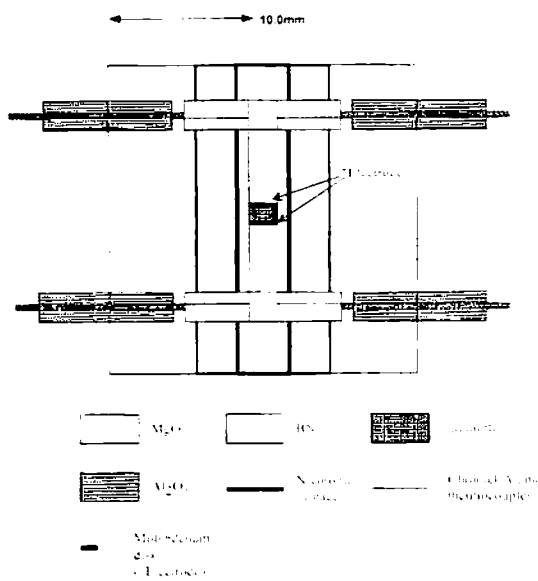


第1図 北海道・日高変成帯を横断するMT観測測線(1,2)及び岩石試料採取地点(3)

3. 岩石電気伝導度測定

高圧力発生には岡山大学固体地球研究センターのDIA型のマルチアンビル装置(UHP-2000/20)を用いた。圧力校正は、Bi, Tl, Baの3種類の元素を使用し、約5.5GPaまでの圧力を安定的に発生できることを確認した。加圧は下部地殻条件の1GPaまで行った。試料の加熱はニクロムヒーターを用いており、温度測定はクロメル-アルメル型熱電対を使用した。測定系全てを含む温度校正は、室温から約1000℃まで行った。

試料の周りはBN(Boron Nitride)で構成されており、圧力媒体にはMgOを使用した(第2図)。電気伝導度測定前には、ヒーターによる加熱により圧力媒体自体に含まれる水分を除外した。又、試料及び圧力媒体とマルチアンビルとの絶縁については、電気伝導度測定前に多数の模擬圧力媒体を作製し、測定用電流の漏洩がないことを確認している。試料はクロメル-アルメル型熱電

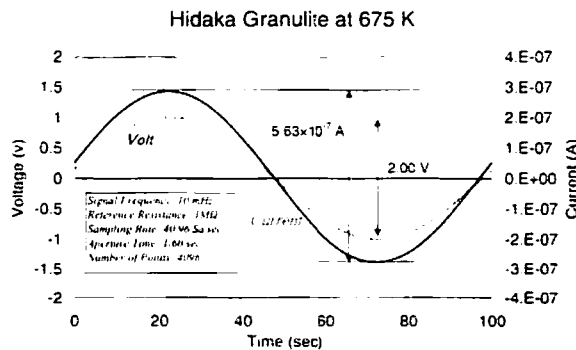


第2図 1000℃,1GPaまでの温度圧力条件に耐えるアセンブリの断面図

対を通して、Function Generator、2台のDigital multi-meter及び外部参照抵抗に接続した。

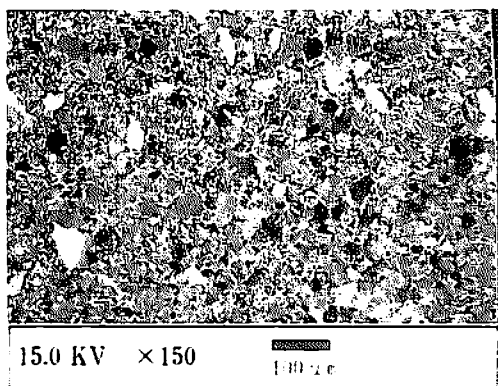
電気伝導度測定用信号電流及び電圧の波形例を第3図に示す。測定では、1Vp-pの正弦波を回路に印加した。良質なデータだけを取得するため、測定波形は常時監視し、外部ノイズによるバイアスを最小化した。測定周波数は商用電源雑音や他からの干渉を最小にする様、0.01Hzを採用した。1つのデータセットを構成するデータ数は4096であり、2から4周期の波形が含まれるように測定した。

電気伝導度は、加温・加圧後に回収した試料サイズから算出した。



第3図 675K 1GPaの温度圧力条件下で測定した信号電流及び電圧の波形例

4. 結果

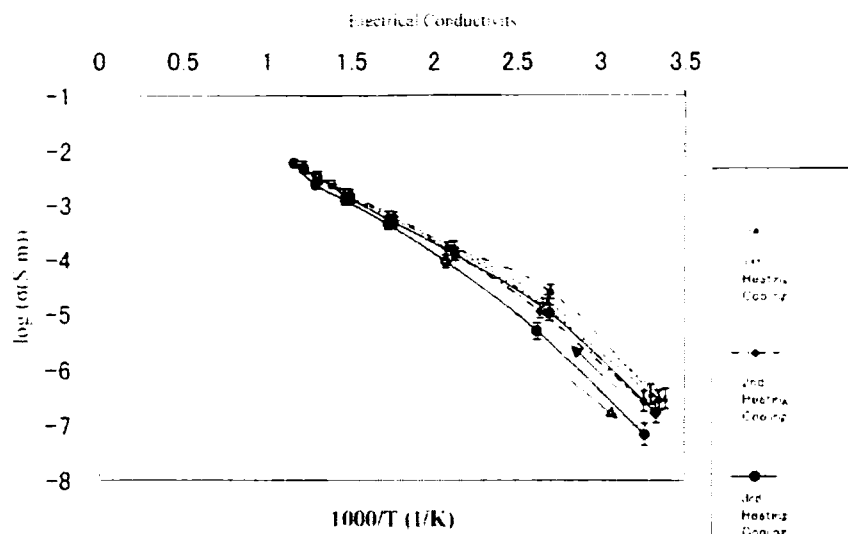


第4図 BEIによる回収試料の映像

過去の岩石電気伝導度測定実験において、問題視されてきたのは測定前後の鉱物の物理・化学変化である。そのため、電気伝導度測定後にもBEI (Backscattered Electron Image)により鉱物や試料内の割れ目観察を行った。第4図に示すとおり、グラニュライト岩石内の鉱物変化は無く、加圧・加温による試料の物理的な変化もない事が確認された。電気伝導度測定中の試料内鉱物は、比較的均一であり、鉱物間で平均的な導電ネットワークを形成している事が推定される。

第5図にグラニュライトの電気伝導度測定結果を示す。図の縦軸は電気伝導度、横軸は温度関数の逆数で Arrhenius plot により表記した。測定では、アセンブリ内の含水を除外するために、圧力を一定にしたまま、低温領域で温度を変化させた。その後、3 サイクルの温度上昇・降下過程を繰り返すことにより安定的な電気伝導度測定が可能となった。約 500K 以下の温度領域では、試料周辺や圧力媒体に含まれる水の影響により、試料の電気伝導度測定値は不安定な値を示す。しかしながら、500K を超える地殻中部から下部地殻に相当する温度領域においては、直線的かつ安定的な電気伝導度を示した。

一般的に、温度上昇と下降ステージで、試料の電気伝導度の値を一致させることは大変難しい。本実験で特徴的な事は、温度条件を変化させた際に岩石の電気伝導度測定値を安定的に取得する



第5図 グラニュライト岩石の電気伝導度測定結果

技術を確立した点である。又、焼結岩石試料を用いた事で岩石内に空孔が無く、電導性鉱物などの連結が理想的な乾燥岩石の電気伝導度測定が可能になった。特に、岩石で問題点になる試料サイズも、鉱物の粒径より十分大きく、露頭から直接採取した天然石に見られる局所的な鉱物の偏在もさける事ができた。

本実験で使用したグラニュライトを採取した日高変成帯では、多数の地球物理学的探査が実施されてきた（例えば、Arita(1998)）。又、日高変成帯の岩石は地殻深部の情報を含んでいるため、地質学的・岩石学的からも多角的に研究されている（例えば、小山内(1985)）。さらに、グラニュライト試料採取地点の南北を横切る広帯域MT観測がOgawa et al. (1994)や佐藤 他(1998)により、実施された（第1図）。

Ogawa et al. (1994)の解析結果から、日高変成帯下の深さ5kmから50kmまでに、低電気伝導度岩体の存在を示した。この岩体は変成度の高い地層とされる。又、高温変成岩のため、流体を含みにくいと解釈されている。一方、佐藤 他(1998)の解析結果からは深さ28kmまでの日高変成帯下の地殻内電気伝導度構造を提示している。この解析結果から、日高地域では地殻中部から下部地殻に向かい電気伝導度が高くなることが示された。

2つの観測から求められた電気伝導度と探査深度との関係を、本実験で得られたグラニュライトの電気伝導度と温度との関係として比較した。MT法による探査深度と地殻内温度とは直接対比できないため、探査深度は日高変成帯下の温度勾配から推定した温度に変換した。その結果、本実験から求められた電気伝導度は、地殻中部の温度条件下では、Ogawa et al. (1994)の電気伝導度推定値の範囲内に対応する。又、下部地殻の温度条件下においては、佐藤 他(1998)から算出された電気伝導度推定値の範囲内に対応することが見出された。

この様に、北海道・日高変成帯のグラニュライトを用いた電気伝導度測定実験により、地殻中部から下部地殻の温度・圧力条件における岩石の電気伝導度測定をする事が可能になった。岩石採取地点の地域的な地質や岩石学的な情報が明確であり、詳細な電磁気観測の解析結果が報告されている地域では、室内実験による測定結果と電磁気観測の解析結果を直接対比することが可能である。さらに、岩石採取地点と電磁気観測点が完全に一致していれば、より精度の高い相互検証が可能になるであろう。

5. おわりに

本研究では、焼結した合成試料により、乾燥岩石の電気伝導度測定を遂行した。焼結した試料内の鉱物は均一化され、岩石内の空孔を最小化する事により、理想的な鉱物を形成するため、地殻内岩石の平均的な電気伝導度を室内実験で再現することが可能である。反面、露頭から採取した岩石内の鉱物を物理・化学的に直接反映しているかという問題点も存在する。今後は、焼結試料と元の岩石の電気伝導度を比較研究する必要も生ずる。さらに、室内の岩石電気伝導度測定実験からは、岩石、水、鉱物等の相互作用及び岩石内電気伝導性物質のネットワークの解明も急

務である。上嶋(2003)は、間隙水の電気伝導度や乾燥岩石の電気伝導度の温度依存性から全岩の電気伝導度を見積もる手法について詳しく解説している。この様な基礎的研究は地殻内の水や岩石そのものの物理特性を究明する上で重要な分野である。近い将来、乾燥岩石や間隙水を含んだ岩石の電気伝導度についての定量的評価に寄与する室内実験が遂行されることが望まれる。その前提としては、測定岩石の十分なキャラクターゼーションが必要不可欠となるであろう。

謝辞

本研究は主に、岡山大学固体地球研究センターにおいて遂行された。岡山大学固体地球研究センターに教職員の皆様には、多大なるご指導とご助言をいただいた。

参考文献

Arita K., T. Ikawa, T. Ito, A. Yamamoto, M. Saito, Y. Nishida, H. Satoh, G. Kimura, T. Watanabe, T. Ikawa and T. Kuroda, Crustal structure and tectonics of the Hidaka Collision Zone, Hokkaido (Japan), revealed by vibroseis seismic reflection and gravity surveys, *Tectonophysics*, 290, 197-210, 1998.

藤田 清士, プレート内岩石の電気伝導度 —岩石電気伝導度測定実験の意義—, *地震研究所彙報*, Vol. 74, 311-321, 1999.

Ogawa, Y., Y. Nishida, M. Makino, A collision boundary imaged by magnetotellurics, Hidaka mountains, central Hokkaido, Japan, *J. Geophys. Res.*, 99, 22373-22388, 1994.

小山内康人, 静内川上流域における日高変成帯主帯変成岩類の地質と変成分帯, *地質学雑誌*, 第 91 巻, 第 4 号, 259-278, 1985.

佐藤秀幸, 西田泰典, 宇津木充, 平野和幸, 土井剛, 在田一則, マグネトテルリック法から推定される日高変成帯南部域の比抵抗構造, *北海道大学地球物理学研究報告*, 61, 59-68, 1998.

高倉伸一, アーチーの式と並列回路モデル, *CA 研究会論文集*, 127-132, 2003.

上嶋 誠, 電気比抵抗と水 (地震発生と水—地球と水のダイナミクス—笠原順三, 鳥海光弘, 河村雄行編), 283-296, 東京大学出版会, 2003.