

火成岩の不均一な圧縮に伴う熱起電力変化

竹内昭洋、藍壇オメル、佐柳敬造、長尾年恭（東海大）

Changes of Thermo-electromotive Force of Igneous Rocks Induced by Non-uniform Stress

Akihiro Takeuchi, Ömer Aydan, Keizo Sayanagi, and Toshiyasu Nagao (Tokai University)

Abstract

When a uniaxial load is subjected to an edge of an air-dry igneous rock block, the electric potential of the unloaded edge becomes high. We have proposed a possible source of this electromotive force is positive holes that are activated in the loaded volume and spread away into the unloaded volume. However, we do not have evidence of such charge carriers yet. In this study, to obtain such evidence, we measured thermoelectromotive force of gabbro blocks under the same loading condition. The Seebeck coefficient of the loaded volume decreased from $\sim 1.0\text{mV}/^\circ\text{C}$ to $\sim 0.7\text{mV}/^\circ\text{C}$ when loaded at 60MPa, while that of the unstressed volume did not remarkably change. This meant that the concentration of holes increased in the loaded volume and such a change was little in the unloaded volume. Thus, it was clarified that holes were generated in the stressed volume and the distribution of the holes spreading reached only around the stressed volume. Provably, holes that reach the unstressed edge are only a small portion of the whole holes. An electric dipole is formed in the loaded volume and generates electromotive force between the loaded and unloaded edges.

1. はじめに

地震発生に先行して起る様々な電磁気信号や電磁気環境の変化を検出することにより、地震の短期・直前予測ができるのではないかと期待されている。地震を起こす断層運動が地殻岩石の破壊現象であるとする概念を採用すれば、地震に先行する諸電磁気現象は地殻岩石の破壊に先行する何かしらのメカニズムによって駆動される必要がある。また一方で、地殻岩石の応力やひずみは決して一定様ではなく、特に断層周辺では、断層運動の直前から徐々に変化しているはずであると期待されている。これらの事柄を考慮すれば、地震に先行する諸電磁気現象のメカニズムは地殻岩石の応力やひずみの不均一な変化と大きく関わっていることが容易に想像できる。そこで我々は、実験室内において岩石試料を不均一に加圧し（未破壊）、それに伴う電気信号の検出を試みてきた。

これまでの実験結果によると、自然乾燥させた火成岩ブロックの一端のみを一軸圧縮（不均一圧縮）すると、非圧縮端が圧縮端に対して高い電位となる起電力が発生した[1・2]。石英を含む花崗岩よりも石英を殆ど含まないハンレイ岩の方がより強い起電力を示す傾向があることより、石英のピエゾ電気効果に起電力の原因を求めるのは現実的ではない。この起電力を説明するために、我々は圧縮端において発生した正孔が非圧縮端へ向けて拡散しているとするモデルを提唱してきた。しかし、真に正孔が発生し、電荷キャリアとして火成岩試料内を流れているという証拠はまだ得られていなかった。そこで本研究では、この証拠を掴むため、

同様の不均一圧縮下における火成岩試料の熱起電力をホットプローブ法により測定した。

2. 熱起電力とは

ある金属やセラミックスの試料内に温度差を与えると電位差が形成され、この電位差は熱起電力と呼ばれている。これは、加熱により励起された電荷キャリアが低温側に拡散することにより電荷密度にズレが生じるためである。例えば、正孔が多数派の電荷キャリアである場合（例えば、P型半導体）、高温部で熱励起された正孔が低温部に拡散し、高温部の電位が相対的に下がる（負の熱起電力）。一般的に温度差 ΔT [°C]が大きいほど熱起電力 ΔV [V]の絶対値は大きくなり、それらの比をゼーベック係数 α [V/°C]と呼ぶ。

$$\alpha = -\frac{\Delta V}{\Delta T} \quad [\text{V}/^\circ\text{C}] \quad (1)$$

式(1)にあるマイナスの符号は、正孔が多数派の電荷キャリアである場合が正值となるよう調節するためのものであると考えておけばよい。つまり、測定から得られたゼーベック係数 α が正の場合は多数派の電荷キャリアが正孔であり、負の場合は電子であると判定できる。

一方で、エントロピー流束の観点から理論的に導かれるゼーベック係数は、単一種の電荷キャリアで代表できる場合には、

$$\alpha = \frac{k}{e} \left\{ \ln\left(\frac{N}{n}\right) + C \right\} \quad [\text{V}/^\circ\text{C}] \quad (2)$$

と定義される。ここで、 k はボルツマン定数、 e は電荷キャリアの電気素量、 N は伝導体（または価電子帯）の状態密度、 n は電荷キャリアの濃度、 C は運動項である。式(2)が示す通り、電荷キャリア濃度 n の大きな物質ではゼーベック係数の絶対値が小さくなる。

3. 実験方法と結果

本実験では南アフリカ産のハンレイ岩を用いた。この岩石は、先行実験[2]において不均一圧縮に伴う起電力を発生させている。ブロック状（サイズ： $10 \times 3.0 \times 2.5 \text{ cm}^3$ ）にカットし、表面を800番の研磨剤で研磨した。その後、室温にて数日以上にわたり自然乾燥させた。Fig.1aに実験装置の概要図を示す。手動オイルポンプ式プレス機のフレーム内に試料を設置し、試料の一端のみ（加圧面： $2.5 \times 2.5 \text{ cm}^2$ ）が一軸圧縮できるようにした。荷重値をロードセルによって計測した。ピストンと試料との接着面に導電性銅テープを挟み、接触面の変化による接触電位の変動

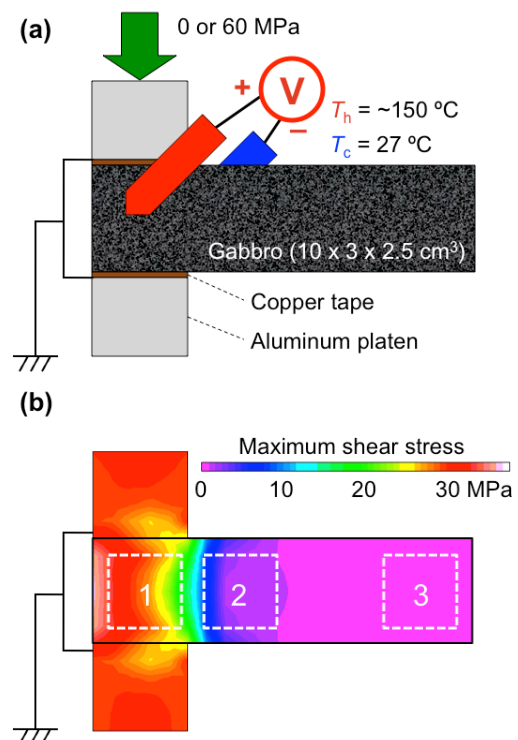


Fig.1: (a) Experimental set-up. (b) Measurement areas and the distribution of maximum shear stress by FEM.

を防ぐことを図った。試料の圧縮部を、アルミ製圧縮ピストンを通して接地した。

ホットプローブには半田ごてを用いた。こて先がステンレス製のものを採用し、こて先を加熱部・電源部から電氣的に絶縁させた。コールドプローブにはステンレス製の縊り線を採用した。ホットプローブを高抵抗エレクトロメータの正極に、コールドプローブを負極に結線し、両プローブ間の電位差を計測できるようにした。ホットプローブを試料側面のある領域においてランダムに接触させ、コールドプローブを対する側面のある一点に常時接触させた。Fig.1b に有限要素法による最大剪断応力の分布図と伴に示すように、測定領域を3ヶ所設定し、それぞれ領域1(圧縮部)・領域2(非圧縮部)・領域3(非圧縮部)とした。ホットプローブの接触は2秒間とし、2秒間のインターバルの後に再び2秒間接触させた。このような接触・非接触を80回繰り返した。ホットプローブを約150°Cに保ち、コールドプローブと試料を室温(約27°C)に保った。プローブ間の温度差 ΔT は、約120°Cとなる。試料を圧縮しない場合と60MPaで不均一に圧縮する場合の両方で熱起電力の計測を行なった。計測された応力値および熱起電力値はリアルタイムにアナログ出力され、40Hzサンプリングでデータレコーダに記録された。いくつかの試料に対して同様の実験を行った。

Fig.2 に実験結果の一例を示す。Fig.2a は領域1(圧縮部)における非圧縮の場合の熱起電力の時系列変化の一部を示す。ホットプローブを試料に接触させると負の起電力を示し、試料から離すと元の位置(ゼロ)に戻るの分かる。Fig.2b の青線は80回繰り返したデータの平均であり、約-120mVの熱起電力 ΔV を示す。この時のゼーベック係数 α は、式(1)より約1mV/°Cとなり、多数派の電荷キャリアが正孔であることが判定できた。Fig.2b の赤線は60MPaで不均一圧縮した場合の平均データである。熱起電力 ΔV が約-80mVに変化し、ゼーベック係数 α が約0.7mV/°Cと減少した。式(2)から、領域1(圧縮部)の正孔電荷キャリアの濃度 c が増加したと言える。つまり、ハンレイ岩を不均一圧縮すると、圧縮部に正孔の発生したことが示された。Fig.2c と Fig.2d に領域2と3(非圧縮)におけるそれぞれの結果を示す。やはりゼーベック係数 α が正值を示すことから、多数派の電荷キャリアが正孔であることが判定できるが、圧縮による係数の顕著な変化は見られない。このことから、非圧縮部では不均一圧縮による正孔の発生はないということが示された。他にも幾つかのハンレイ岩試料を用いて同じ実験を行なったが、同様の結果を得た。

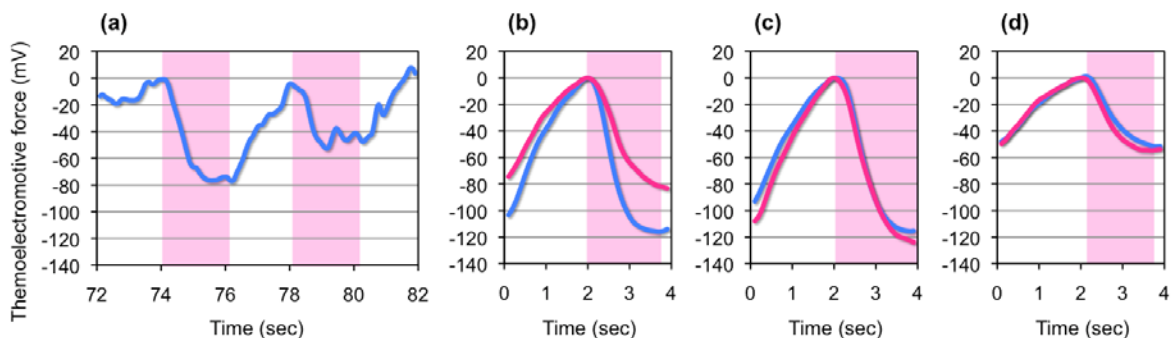


Fig.2: Experimental results. (a) An example of thermoelectromotive force measurements in area 1 (see Fig.1b) without subsection of loading. (b) Averaged thermoelectromotive force in area 1. (c) Averaged thermoelectromotive force in area 2. (d) Averaged thermoelectromotive force in area 3. Pink and white areas mean attachment and detachment of the hot-probe to the sample, respectively. Blue and red lines are of the sample without and with subsection of loading, respectively.

4. 議論

正孔の発生源として、過酸化架橋欠陥が考えられる。詳しい発生メカニズムは他の文献[1・2・3]に譲り、ここでは簡単に述べるに留めておく。過酸化架橋欠陥 ($O_3X-OO-YO_3$, X, Y は Si^{4+} , Al^{3+} など) とは、火成岩を構成する鉱物に普遍的に含まれる格子欠陥の一種である。外力によりその構造が歪むと、その欠陥が禁制帯に持つ空のエネルギー準位が価電子帯まで降下し、隣の酸素部位から電子が移動する。結果として、その酸素部位に正孔が発現し、歪んだ過酸化架橋欠陥に電子が捕捉されることになる。つまり、過酸化架橋欠陥がアクセプター化するのである。発現した正孔は、P 型半導体の正孔電荷キャリアと同様に、鉱物の価電子帯を通して非圧縮部へと拡散することができる。

発現する正孔の濃度は、試料の歪み具合に大きく依存するであろう。このことから、正孔(および対となる捕捉電子)の発現分布には大きな濃淡ができることになる。電子は過酸化架橋欠陥に捕捉されているので動けないが、正孔は自身の濃度差を解消しようと非圧縮部の方向へ拡散しようとする。しかし、同時に電子からの電気引力も受け、この二つの力が均衡するように、正孔の分布は特殊なものになる (Fig.3)。結果として、圧縮部附近に電荷のムラができ、電気双極子に似たものが生成される。領域 2 (非圧縮部) における正孔濃度の変化が殆どなかった (Fig.2c) ことから、この電気双極子の形成は圧縮部近傍に限られたものであろう。非圧縮端にまで到達している正孔は、全体から見ればほんの僅かではないと考えられる。これまでに我々が検出してきた起電力[1・2・3]は、この電気双極子が作る電場をもとに近似できるであろう。

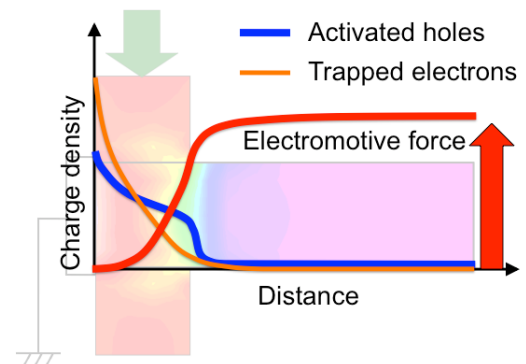


Fig.3: Electromotive force formed by activated holes and trapped electrons.

謝辞

本研究の一部は、文部科学省による「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画」(課題番号: 2501) 東海大学総合研究機構による「2010 年度研究奨励補助計画、火成岩の部分圧縮に伴う P 型半導体化現象の研究」および東海大学海洋研究所「個別プロジェクト研究、地震火山噴火に関連する精密地下監視と先行現象発現機構解明のための基礎研究」の支援を受けて実施されている。

参考文献

- [1] A. Takeuchi, "Positive holes flowing through stressed igneous rocks", *Electrical Engineering in Japan*, 169, 1-5, 2009.
- [2] 竹内昭洋, 藍壇オメル, 佐柳敬造, 長尾年恭, "火成岩の不均一圧縮に伴う起電力の発生とそのメカニズム", *東海大学海洋研究所研究報告*, 32, 45-51, 2011.
- [3] A. Takeuchi, Y. Futada, K. Okubo, N. Takeuchi, "Positive electrification on the floor of an underground mine gallery at the arrival of seismic waves and similar electrification on the surface of partially stressed rocks in laboratory", *Terra Nova*, 22, 203-207, 2010.