

不均一圧縮場における火成岩の P 型半導体的電気伝導メカニズム

竹内昭洋、アイダン・オメル、佐柳敬造、長尾年恭（東海大）

P-type semiconductor mechanism of igneous rocks under non-uniform pressure

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

Abstract

To study electric properties of Earth's crust-forming rocks, rock samples are usually placed under hydrostatic pressure at certain temperatures. However, when an igneous rock sample is placed under non-uniform pressure, new electric phenomena appear: (i) Electric currents automatically flow from the stressed volume to the unstressed volume. (ii) The surface of the unstressed volume is charged positive. Quartz-less rocks such as gabbro generate electric signals, sometimes stronger than quartz-bearing rocks such as granite. These results reject piezoelectric effect as the prim factor but indicate existence of positive charge carriers in the rocks. Here, peroxy bond ($O_3X-OO-YO_3$ with $X, Y = Si^{4+}, Al^{3+}$, etc.), which is one of the most ubiquitous lattice defects in igneous rock-forming minerals, is focused to explain these carriers. When this bond is deformed under non-uniform stress, an empty energy level of the bond shifts down into the Valence band and an electron can jump in this level from an oxygen neighboring. This leads to activation of a positive hole at the neighbor oxygen site. This hole can spread away through the Valence band, like charge carriers in a p-type semiconductor material. In the natural scale, this hole may contribute to the electric conductivity of the Earth's crust.

1. はじめに

岩石の電気特性は長年にわたって研究されている。それらの研究では、ある温度において岩石試料の全体を静水圧下におくのが一般的であろう。得られたデータはアレニウス式とのフィッティングに用いられ、電気伝導度、前指数関数因数、活性化エネルギー、活性化体積といったパラメータが見積もられる。しかしながら、地震発生前の断層帯や噴火前の火山帯といった地殻内では、むしろ不均一な応力場を形成していると予想できる。また、潮汐力により地殻にかかる応力は日々変化しているとも見られる。そこで、実験室内で岩石試料の一部のみを圧縮（不均一な圧縮）したところ、火成岩の新たな電気特性が検出されたので、これまでの成果と交えて報告する。

2. 室内での岩石の不均一圧縮実験

用いた岩種はハンレイ岩・中粒花崗岩・細粒花崗岩・大理石で、10cm×3cm×2.5cm のブロック状にカットし、自然乾燥させてある。Fig.1 に実験装置の概要を示す。電氣的に接地した金属製ケースで囲んだオイルポンプ式プレス機のピストン下に岩石試料を設置し、試料の一端のみを一軸圧縮した。あらかじめ 3MPa の圧縮応力を与えておき、そこから $1\pm 0.15\text{MPa/s}$ の応力速度で約 30MPa まで手動で加圧した。応力値はロードセ

ルによって計測された。また、圧縮部には 3 つの歪みゲージを貼り付け、その内の 1 つを使って応力に伴う圧縮部の歪みを計測した。更に、圧縮部と非圧縮部は微弱電流計（内部抵抗 $\sim 30\text{M}\Omega$ ）を通して結線され、岩石試料を流れる電流を計測した。計測された応力・歪み・電流値はデータロガーにアナログ・アウトプットされ、16Hz サンプリングで記録された。各試料に対して 30 分 \sim 1 時間以上の間隔をあけて圧縮実験を繰り返し、各岩種の複数の試料について同様の実験を行った。

Fig.2 に細粒花崗岩の場合の実験結果の一例を示す。歪みは圧縮の場合を正の値になるようにしており、Fig.2b の例は一軸圧縮方向の成分を計測している。電流値は初期の 3MPa 加えた状態における値を基準にしてあり、非圧縮端から電流計を通して接地方向に流れる場合が正の値になる。加压に伴う自発電流が確認できる。同様な電流は、ハンレイ岩や中粒花崗岩にも見られたが、大理石には顕著なものは見られなかった。Fig.3 に 30MPa の圧力を与えた際の電流値を岩種別に示す。石英粒子を豊富に含む花崗岩よりも、ほとんど含まないハンレイ岩の方が時には大きな電流値を示すことから、この電流の主要因が石英の圧電効果であるとは考え難い。また、全ての試料は自然乾燥させてあるため、イオンを運搬し得る流体状の間隙水が存在するとも考えがたい（つまり流動電位の発生が難しい）。

これまでも、岩石試料のサイズや形状を変えた同様の実験を行ってきており、やはり同様の電流を検出している [1-3]。更には、非圧縮部の表面に非接触型の電極（コンデンサー型）を設置した場合やフィールドミルを用いた場合には、表面が正に帯電したと考えられる信号をも検出している [2-4]。有限要素法による応力分布シミュレーション図（Fig.4）も示す通り、岩石試料内で人工的に機械的な変化を受けたのは圧縮部とその近傍だけであることから、この電流や正帯電の源が圧縮部とその近傍にあると考えるのが

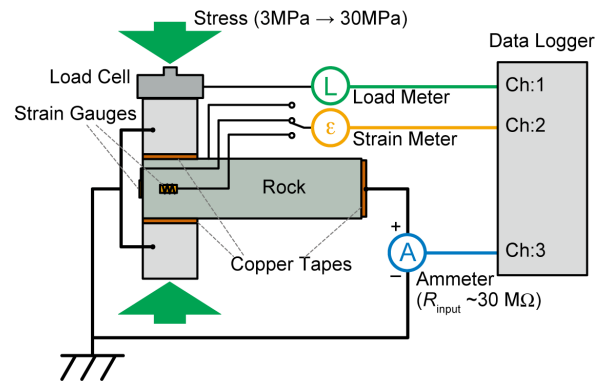


Fig.1: Experimental set-up.

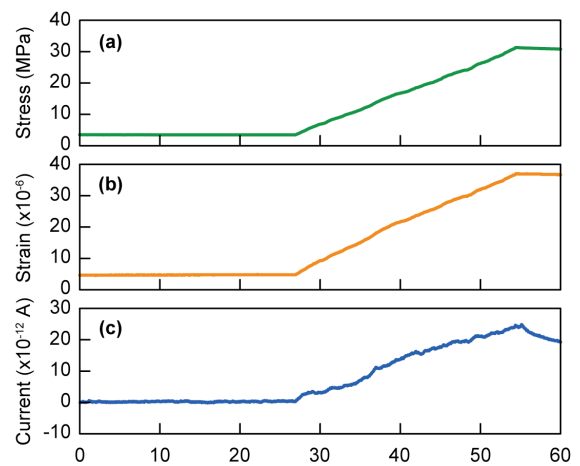


Fig.2: An example of experimental results. The sample is fine-grains granite.

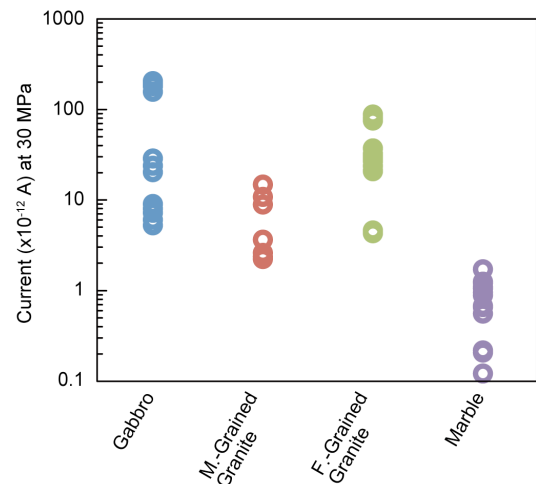


Fig.3: Current intensity at 30 MPa of uniaxial stress. The values are normalized to the values at the initial pressure of 3 MPa.

のは圧縮部とその近傍だけであることから、この電流や正帯電の源が圧縮部とその近傍にあると考えるのが

自然であろう。電流計が示す正の電流値も考慮すれば、圧縮部から非圧縮部の方向へと正の電荷が運ばれたと推測できる。それでは、この電荷の正体は何で、どのように発生したのであろうか。候補として考えられるのは、過酸化架橋という格子欠陥の変形に伴い発現する正孔電荷キャリアである。

3. 過酸化架橋と正孔電荷キャリア

説明を簡素化するため、最も構成元素が単純で最もポピュラーな鉱物である石英 (SiO_4) の過酸化架橋 ($\text{O}_3\text{Si}-\text{OO}-\text{SiO}_3$) を例に取り上げる。バンドモデルの視点から言えば、過酸化架橋の酸素対がつくるエネルギー準位のうち、反結合性の $3\sigma_u^*$ 準位が電子を持たない状態で禁制帯に存在すると考えられている (Fig.5a)。エネルギー準位は周辺のケイ素や酸素との量子的な相互作用の結果で決まるため、この過酸化架橋の構造が不均一圧縮により歪めば、 $3\sigma_u^*$ 準位も歪む (移動する) ことになる (Fig.5b)。歪みが進行し $3\sigma_u^*$ 準位の位置が価電子帯まで降りると、隣の酸素から電子が 1 つ移入できるようになる (Fig.5c)。歪んだ過酸化架橋は負に帯電し、電子を提供した酸素には正孔が現れることになる。この正孔に更に隣の酸素から電子が移入し、それだけ正孔がもとの場所から移動することになる (Fig.5d)。このような正孔 (正孔電荷キャリア) の伝搬メカニズムは P 型半導体内のそれと同等であり、本来は絶縁体である石英が不均一圧縮により P 型半導体化したと換言できる。

過酸化架橋は石英だけに存在するわけではなく、長石やカンラン石といった様々な火成岩構成鉱物にも含まれている ($\text{O}_3\text{X}-\text{OO}-\text{YO}_3$ 、ここで X や Y は Si^{4+} や Al^{3+} など)。つまり、あらゆる火成岩、火成岩の変成岩や火成岩起源の砂礫岩は P 型半導体化し、正孔を電荷キャリアとする電気伝導メカニズムが起ると

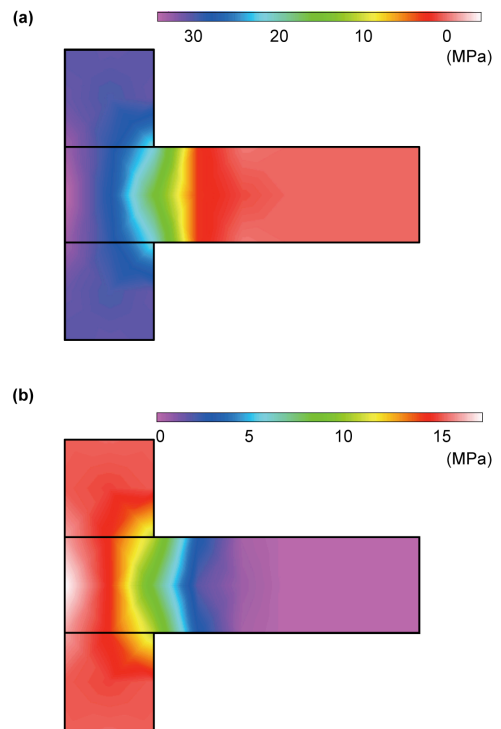


Fig.4: Finite element method analyses of stress distributions in a gabbro block under 30 MPa of non-uniform stress. (a) Compression in the vertical component. (b) Shear stress intensity.

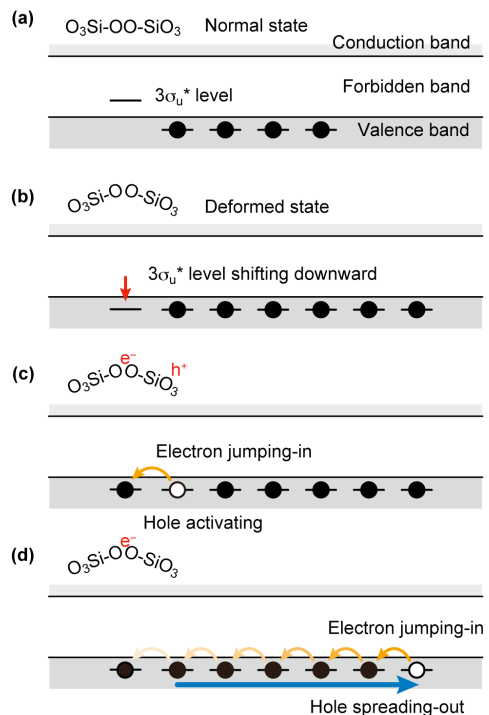


Fig.5: Diagrams of activation and diffusion of a positive hole in quartz. [4]

考えられる。一方で、非火成岩（例えば石灰岩や大理石）では、この電気伝導メカニズムは起らないことになる。これらのことは今回およびこれまでの実験結果 [1-3] と調和的である。

4. 地殻電気伝導率構造への影響

「火成岩の部分圧縮に伴う P 型半導体化」を地殻に応用してみる。全体として、地殻は深部ほど圧力が大きく温度も高い。これら圧力・温度勾配は地質学的時間スケールではほぼ一定であるかもしれないが、潮汐による地殻応力の日変化を繰り返している。本実験を単純に適用すれば、地殻下部から上部へと拡散する正孔の存在が期待される (Fig.6)。また、局部的に地殻応力が比較的活発に変化している場所、例えば地震発生前の断層帯や噴火前の火山帯では、地殻応力変化により活性化された正孔が拡散し、周辺の地殻電気伝導率構造に影響を及ぼしている可能性がある [2]。

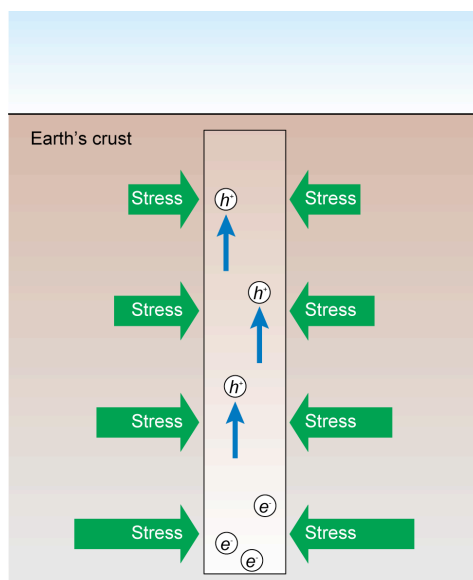


Fig.6: Vertical flow of positive holes in the Earth's crust due to tidal stress.

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）の支援を受けて実施された。ここに記して御礼を申し上げる。

参考文献

- [1] F.T. Freund, M.A.S. da Silva, B.W.S. Lau, A. Takeuchi, H.H. Jones, “Electric currents along earthquake faults and the magnetization of pseudotachylite veins”, *Tectonophysics*, 431, 131-141, 2007.
- [2] 竹内昭洋, B.W.S. Lau, F.T. Freund, “圧縮火成岩の P 型電気伝導とその地殻電気伝導構造への影響の可能性”, *Conductivity Anomaly 研究会 2008 年論文集*, 127-130, 2008.
- [3] A. Takeuchi, B.W.S. Lau, F.T. Freund, “Current and surface potential induced by stress-activated positive holes in igneous rocks”, *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 31, 240-247, 2006.
- [4] 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.