

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 1 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26400521

研究課題名(和文) 火成岩における剪断ひずみに伴う正孔電荷キャリアの発現メカニズム

研究課題名(英文) Activation mechanism of positive hole carriers induced by shear strain of igneous rocks

研究代表者

竹内 昭洋 (Takeuchi, Akihiro)

東京大学・地震研究所・技術職員

研究者番号：00468117

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：火成岩試料を部分的に一軸圧縮し不均一なひずみ場を形成させると、試料の圧縮部から非圧縮部へ向けて電流が流れたり試料の表面が正に帯電したりする。これは、圧縮部で発現する正孔電荷キャリアが原因であると考えている。そこで本研究では、真空乾燥させたハンレイ岩ブロックを用いて、圧縮部の熱起電力を計測することによりゼーベック係数を求め、その正負値と圧縮による変化とから、正孔電荷キャリアの発現を判定した。また、有限要素法により圧縮した岩石試料のひずみ場をシミュレーションし、ひずみ場と電場(電荷キャリア数など)を連結させる係数を導出した。

研究成果の概要(英文)：It has been reported that when an igneous rock is subjected to nonuniform loading, electric current flows from the loaded volume toward unloaded volume and the surface charges positive. This would be because of positive hole carriers that are activated in the loaded volume. Here in this study, using vacume-dried gabbro blocks, the thermo-electromotive force of the loaded/unloaded volume was measured, and the Seebeck coefficient was calculated. From its positive value and its change due to loading, it is found that positive hole carriers are activated in the loaded volume. On the other hand, based on the 3D finite-element analysis of the load gabbro blocks, relationships (e.g., between the strain and carrier number) are roughly estimated.

研究分野：地震電磁気学

キーワード：熱起電力 正孔電荷キャリア 火成岩 剪断ひずみ

1. 研究開始当初の背景

地震や火山噴火などの地殻活動に関連すると推測される電磁気的な先行現象（地電流変化や電離層擾乱など）を検出することにより、それらの短期的発生予測や災害軽減に貢献できるのではないかと期待されている。現在では、専用の観測衛星が打ち上げられるほど観測的研究は国内外で盛んになっているが、室内実験的手法によるメカニズム解明を目的とした基礎研究の報告は国内外を見渡しても散見する程度でしかない。数少ないこれまでの室内実験では、岩石試料の破壊に伴う電磁波や発光をもとにメカニズムが議論されてきた。しかし、地震や火山噴火が地殻岩石の破壊現象であるという概念に則れば、岩石破壊時の現象をいくら検証しても、先行現象の真のメカニズム解明には至らないと考えられる。

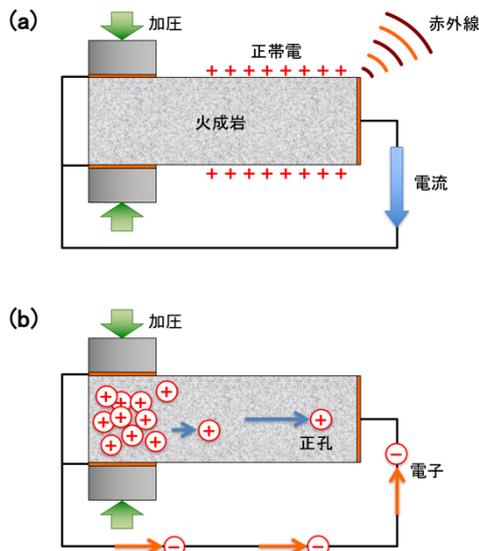


図1: 火成岩試料の不均一圧縮実験の概念図
 (a) 不均一圧縮に伴う自発電流(起電力)・帯電・赤外線の発生
 (b) 不均一圧縮に伴う正孔電荷キャリアの発現と拡散

本研究代表者のこれまでの室内岩石実験によれば、部分的な一軸圧縮により不均一なひずみ場を形成する火成岩試料内には、特殊な電場が形成される。例えば、十分に自然乾燥させた岩石試料を用いた場合 (図 1a)、
 ① 圧縮部から非圧縮部方向への自発電流
 ② 非圧縮部表面の正帯電
 ③ 非圧縮部表面からの赤外線放射
 を検出している (文献①)。これらの現象は、火成岩 (花崗岩やハンレイ岩など) 全般には起こるが、非火成岩 (大理石など) には起らない。よって、石英の圧電効果や間隙水の界面動電効果では説明が難しい。対して、圧縮部に正孔電荷キャリアが発現することを仮定するのが最も合理的であると考えられる (図 1 b)。圧縮部で発現した正孔はその濃度差を解消すべく非圧縮部の方向へ拡散するはずである。半導体物理の観点から、正孔濃度が増加するためには、アクセプターのエネルギー準位 (熱励起エネルギー) が低下すれば良い。ア

クセプター源の一つとして注目しているのは、過酸化架橋と呼ばれる格子欠陥 (石英の場合: $O_3Si-OO-SiO_3$) である。この欠陥は、火成岩の構成鉱物に普遍的に含まれるが、大理石には含まれない。図 2 に示すように、外力により過酸化架橋周辺の結晶構造がひずむと、この欠陥の $3\sigma_u^*$ エネルギー準位が降下することによって有効なアクセプターになるというモデルを考えている。発現した正孔は価電子帯を通過して非圧縮部へと拡散することができる。つまり、「不均一にひずんだ火成岩の P 型半導体化」が示唆されるのである。

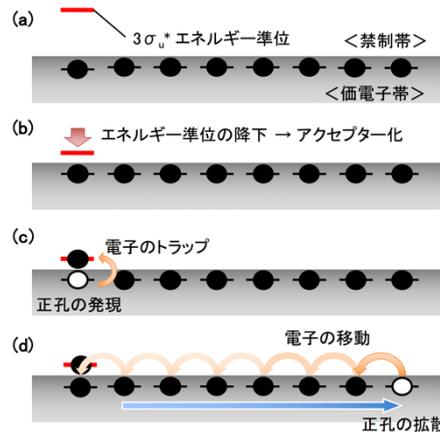


図2: 過酸化架橋のひずみに伴う正孔電荷キャリアの発現と拡散
 (a) 通常時
 (b) 外力による過酸化架橋のひずみとエネルギー準位の降下
 (c) 隣の酸素部位からの電子の移動(トラップ)による正孔の発現
 (d) 価電子帯を通した正孔の拡散

地殻内を拡散する正孔が地殻電気伝導度や地電流を変化させ、地表を帯電させた正孔が大気電気の変化や新たな化学反応 (酸化作用など) の促進を引き起こすと期待できる。この破壊を必要としない新しい電気-化学現象は、地震に先行する電磁気現象の可能性ある原因の一つとして頻りに引用されるようになってきた (文献②)。しかし、正孔の発現・拡散の豊富な状況証拠を掴んではいないが、現段階では仮説の域を完全には脱していない。

2. 研究の目的

本研究では、不均一なひずみ場を形成する火成岩試料に現れる電場が圧電効果や界面動電効果によるものではなく正孔電荷キャリアの発現 (火成岩の P 型半導体化) と拡散によることを立証し、さらに正孔電荷キャリアによるひずみ場・電場のカップリング関数を導出する。

3. 研究の方法

(1) 一般的に、半導体試料の電荷キャリアが電子か正孔かを判定する (P/N 判定) 方法として、ホール効果の測定が真っ先に考えられる。しかし、過去に行なった実験 (文献③) によれば、例えば不均一圧縮した花崗岩試料の非圧縮部の電気抵抗率はおおよそ $10^9 \Omega m$ から $10^8 \Omega m$ へと低下してはいるが、それでも一般的な P 型半導体試料に比べ抵抗率が大きいた

め、市販のホール効果測定器では測定が困難である可能性がある。そこで本研究では、熱起電力を計測し、その値から求めたゼーベック係数をもとに P/N 判定を試みる (図 3)。2 対の熱電対を用いることにより、熱起電力と温度を同時に計測することが可能となる。試料への部分的な加圧を与えることにより圧縮部に正孔電荷キャリアが発現していれば、熱起電力に変化が現れると予想される。

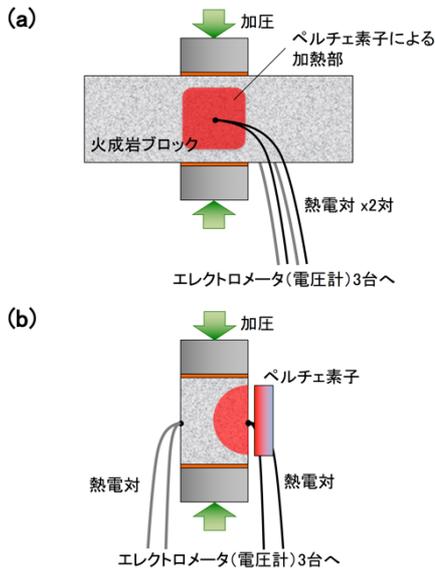


図3: 熱電対を用いた熱起電力測定概念図
(a)側面図 (b)異なる方向からの断面図

(2) (1)を補完する実験として、電気抵抗率の測定も行なう。一般的に岩石は高抵抗であるので、岩石試料の表面に漏れて流れる電流の影響を無くすために、試料側面にガードリングを設ける(図4)。印加電圧と電流値から、電気抵抗率を求めることができる。試料全体に加圧を与えることにより正孔電荷キャリアが発現していれば、電気抵抗率が減少すると

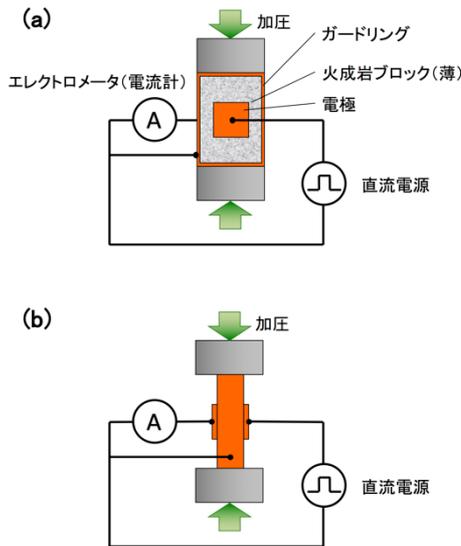


図4: ガードリングを使った高抵抗率測定概念図
(a)側面図 (b)異なる方向からの側面図

予想される。

(3) 有限要素法解析用 PC ソフトである ANSYS を用いて、不均一圧縮した岩石試料のひずみ場をシミュレーションする。

(4) (1)及び(2)で得られた実験結果と(3)で得られたシミュレーション結果を対応させることにより、ひずみ場と電場(電荷キャリア数など)を連結させる係数を導出する。

4. 研究成果

(1) ハンレイ岩をブロック状(25 x 30 x 75 mm³)に成形し、真空恒温器を用いて乾燥させ、本研究で用いる試料とした。ペルチェ素子により試料の片側側面中央部を約 50°C に加熱した。ブロック試料の中央部を圧縮しない場合、試料によってばらつきは大きかったが、ゼーベック係数は数 100 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ (正の値)となった。このことから、本研究で用いたハンレイ岩は、特にひずんでいない状態では主な電荷キャリアは正孔である、つまり P 型であると判定した。次にブロックの中央部を 10MPa まで一軸圧縮した場合、ゼーベック係数には若干減少する傾向が見られなくもなかったが、定量的に示すには至らなかった。少なくともこの「減少」から推察できることは、

- ① (多数派である) 正電荷キャリア数の増加または、
- ② (少数派である) 負電荷キャリア数の減少となる。

(2) (1)と同じ岩石を薄いブロック状(25 x 25 x 5 mm³)に成形したものを、本研究で用いる試料とした。試料中心部に 10V の直流電圧を掛け、1nA 程度の通過電流を検出した。試料全体を 10MPa まで一軸圧縮すると、試料によってばらつきはあったが、非圧縮時に 10⁸ Ωm 程度あった電気抵抗率が半分程度まで下がった例もあった。この「半減」を、電荷キャリア数の増減だけで説明しようとした場合、約 2 倍に増加したことを示すことになる。

(3) 実験セットアップの対称性を考慮し、試料全体の 4 分の 1 のみを解析した。このことにより要素数を節約でき、より解像度の高いシミュレーションを可能とした。上記実験(1)で用いたハンレイ岩ブロックを解析対象とした。各種パラメータは、文献値などをもとに決めた。シミュレーション結果の例を図 5 に示す。1/4 結果を対象に重ね合わせ、試料全体に拡張している。ブロック上下面の中央部を 10MPa で加圧し、更に手前側面の中央部を 50°C に加熱した場合の、相当弾性ひずみ量を示す。中央部は大きくひずんでいる(10⁻⁴程度)のに対し、両端部はほとんどひずんでいないことが確認できる。

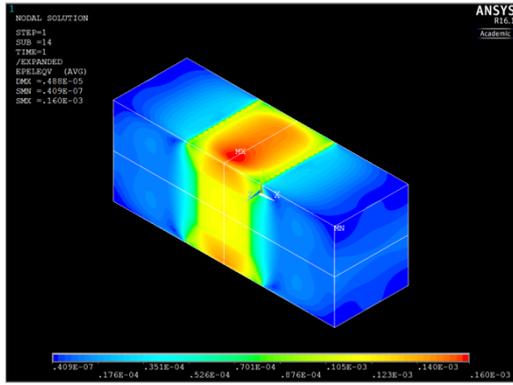


図5: 有限要素法によるシミュレーションの例
中央部に10MPa与えた場合の相当弾性ひずみ量

(4) (1) と (2) の結果から、ハンレイ岩試料の一軸圧縮部では、正の電荷キャリア数が増加したと考えられる。真空乾燥させた岩石試料であるので、移動度の極めて小さな陽イオンに寄与を求めるよりも、正孔を増加したキャリアの正体であると考えての方がもっともらしいと言える。また、(2) と (3) の結果から、正孔電荷キャリアの数が倍増するまで発現させるのに必要なひずみ量は、約 10^{-4} であると概算できる。

<引用文献>

- ① 竹内 昭洋、圧縮火成岩を流れる正孔電荷キャリア、電気学会論文誌 A、128 巻、4 号、2008 年、307-310
- ② F. Freund、A. Takeuchi、B. W. S. Lau、Electric currents streaming out of stressed igneous rocks - A step towards understanding pre-earthquake low frequency EM emissions、Physics and Chemistry of the Earth、31 巻、4-9 号、2006 年、389-396
- ③ F. Freund 他、Stress-induced changes in the electrical conductivity of igneous rocks and the generation of ground currents、Terrestrial、Atmospheric and Oceanic Sciences、15 巻、3 号、2004 年、437-467

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 0 件)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

[その他]
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

竹内 昭洋 (TAKEUCHI, Akihiro)
東京大学・地震研究所・技術職員
研究者番号：00468117

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：

(4) 研究協力者

吉田 慎吾 (YOSHIDA, Shingo)