

# 圧縮火成岩の P 型電気伝導とその地殻電気伝導度構造への影響の可能性

竹内昭洋 ( 秋田県立大学 ) Bobby W. S. Lau ( San Jose State University )

Friedemann T. Freund ( NASA Ames Research Center / San Jose State University / SETI Institute )

## **P-type conductivity in igneous rocks under stress and its possible affect on the conductivity structure of the Earth's crust**

Akihiro Takeuchi (Akita Prefectural University), Bobby W. S. Lau (San Jose State University),

Friedemann T. Freund (NASA Ames Research Center / San Jose State University / SETI Institute)

### **Abstract**

Peroxy bonds or links ( $O_3X-OO-YO_3$  with  $X, Y = Si, Al, \text{ etc.}$ ) are one of the least known but most ubiquitous defects in igneous rock-forming minerals. With its oxygen in the valence 1-, compared to normally 2-, the peroxy links represent positive hole pairs (PHPs). They have the unique ability to activate positive hole (p-hole) charge carriers. Mechanical stress or heating beyond  $\sim 400^\circ\text{C}$  breaks the PHPs and causes them to trap an electron from a neighboring  $O^{2-}$ . The neighboring  $O^{2-}$  thereby turns into  $O^-$ , i.e. a p-hole. As the electronic state associated with  $O^-$  in an  $O^{2-}$  matrix, these p-holes can spread through the valence band similar to defect electrons in a p-type semiconductor such as Si. In laboratory experiments, stressing a portion of rock samples causes electric currents and surface potentials. The surface of the unstressed volume acquires a positive charge and p-holes flow down the stress gradient, from the stressed volume into the unstressed volume. They increase the number density of charge carriers in the unstressed rock and thereby affect its electrical conductivity. When we apply this process to the Earth's tectonically active crust with countless, ever-changing stress gradients and complex temperature gradients in volcanic regions, changes in the number density of p-holes in the surrounding less stressed or cooler rocks may be responsible for changes in the conductivity structure near active faults and around volcanoes. The contributions from p-holes may well exceed the changes arising from pore water penetration into cold or hot rocks and to ionic conductivity changes during partial melting.

### **1. はじめに**

各種電磁気探査から得られた地殻の電気伝導率構造を論じるにあたり、一般的にまず注目される因子は温度、圧力、そして間隙水（イオン水）である。これら因子を念頭に、室内実験で得られた諸パラメータと電磁気探査で得られた電気伝導率構造を付き合わせるにより、地殻深部の諸情報を推定するのが一般的であろう[1]。しかし、本論では全く別の因子による地殻電気伝導率構造への影響の可能性を考えてみる。その因子とは「過酸化架橋（ $O_3X-OO-YO_3$ 、ここで  $X, Y = Si, Al$  等）」と呼ばれる格子欠陥である。

### **2. 過酸化架橋と正孔電荷キャリア**

話の単純化のため、まずは石英を例に取りあげる。石英において、過酸化架橋（ $O_3Si-OO-SiO_3$ ）は最もポ

ピュアな欠陥の一つである。過酸化架橋は、以下に示すその独特の特性から positive hole pair ( PHP ) 欠陥とも呼ばれる[2]。

石英内の PHP 欠陥を構成する酸素は、隣接するケイ素の対電子を一つ、隣り合う酸素の対電子を一つ共有することにより、最外殻を満たしている。この酸素対におけるエネルギー準位を Fig.1a に示す。加圧や加熱により PHP 欠陥の構造が変形すると ( Fig.1b )  $3\sigma_u^*$  準位はエネルギー的に下方へ移動し、2 つある  $1\pi_g^{nb}$  準位の片方は上方へ、もう片方はやや下方へ移動する。この時、石英結晶の価電子帯を構成する電子が隣接する酸素の最外殻電子軌道からこの非占有の  $3\sigma_u^*$  準位に遷移し得る。電子を供給した隣接酸素は正孔 ( positive hole、p-hole ) を獲得したことになる、変形した PHP 欠陥の酸素対は電子を獲得したことになる。更に PHP 欠陥の変形が進むと ( Fig.1c ) 片方の  $1\pi_g^{nb}$  準位が更に移動し、 $3\sigma_u^*$  準位よりも高位になる。この時に電子が遷移し、 $3\sigma_u^*$  準位は電子で満たされる。一方、この  $1\pi_g^{nb}$  準位に残された電子は、対電子として緩く捕捉されることになる。隣の酸素で活性化されたこの p-hole は、更に隣の酸素の最外殻電子軌道、つまり石英の価電子帯へと移動する。この電子と p-hole の置換の繰り返しにより、p-hole は周辺へと拡散することが可能である。酸素の電荷状態に注目すれば、 $O^{2-}$  格子中を O が移動していくことになるのである。

PHP 欠陥は石英結晶にのみ含まれているわけではなく、長石類やその他の鉱物にも豊富に含まれている。これら鉱物により構成される火成岩の圧縮に伴っても同様な p-hole の活性化と拡散が起こり得るのである。火成岩は多結晶性物質である。活性化された p-hole は、火成岩中の結晶粒界も鉱物の価電子帯ネットワークを巧く使って通り抜けていくことが可能であると考えられている。火成岩は普段は絶縁体であるが、圧縮または加熱されることにより P 型半導体化すると言えよう。

### 3. 室内実験による検証

「火成岩の部分圧縮に伴う P 型半導体化」を室内実験で検証してみることにする。最初の室内実験 ( Fig.2 ) では、タイル状の花崗岩試料 ( 約 20cm × 20cm × 1.3cm、角の一部は欠けている ) の一部分 ( 7.3cmφ ) を一軸圧縮し、圧縮に伴い変化する圧縮部および非圧縮部の電気伝導度を測定した[4]。実際には、DC100V の電気バイアスにより流れる電流値を測定した。岩石試料は自然乾燥させてある。外部からの電磁ノイズを遮断するため、接地された金属ケース内に試料を設置した。

Fig.3 に実験結果を示す。圧縮の開始と共に両箇所を流れる電流値が増加した。クラックの発生に伴う瞬間的な増加も確認できる。圧縮前と圧縮中における電流値を比べると、圧縮部では約 30 倍に、非圧縮部では約 8 倍に増加した。電流値の増加は電気伝導度の増加を意味する。このことは、花崗岩に含まれる石英の圧電

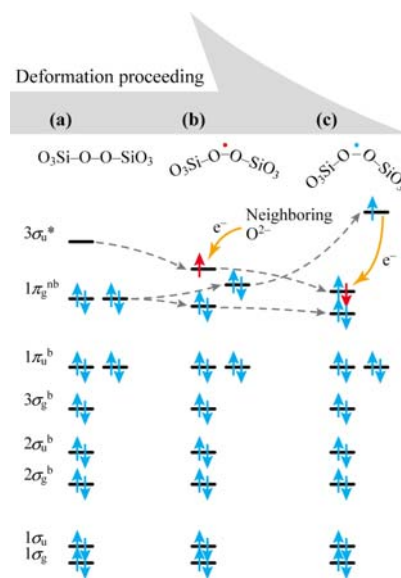


Fig.1: Deformation of PHP and activation of p-hole in quartz. [3]

効果が寄与している可能性がある。しかし、圧縮部にて活性化した p-hole が周辺非圧縮部へと拡散したというモデルでも巧く説明できる。

次の室内実験( Fig.4 )では、タイル状の岩石試料( 30cm ×30cm ×1cm )の中心部分( 2.5cm ×3cm )を一軸圧縮し、圧縮に伴い発生する電流および表面電位を測定した[5]。火成岩( 花崗岩、斜長岩、ハンレイ岩 )の他に、対象試料として非火成岩( 石灰岩、大理石 )、ガラス製タイル( 30cm ×30cm ×1cm )、プラスチック製シート( 30cm ×30cm ×0.8mm )も用いた。中央部の圧縮ピストンとタイル側面の電極は、それぞれ電流計を通して接地されている。また、非圧縮部分のタイル表面には容量性センサが設置され、電圧計を通して接地されている。全ての試料は自然乾燥させてある。外部からの電磁ノイズを遮断するため、接地された金属ケース内に試料を設置した。

Fig.5 に斜長岩を使った実験結果の一例を示す。圧縮行程に対応する電流が発生した。タイル側面からの電流と荷重ピストンからの電流とは、符号以外はほとんど同じ挙動を示す。電流計の接続設定を考慮すれば、タイル中心部からタイル側面へ向かう電流がイメージできる。タイル自身は電氣的にほぼ中性を保ち、接地点を經由する等価電気回路を想定できる。一方、表面電位は圧縮行程に呼応する正の値を示した。電圧計の接続設定を考慮すれば、タイル表面は正に帯電したことが分かる。他の火成岩も同様な電流・表面電位の挙動を示した。ハンレイ岩が最も大きな電流値を示し、斜長岩が最も大きな表面電位値を示した。一方で、非火成岩は微弱の電流および表面電位しか示さず、ガラスやプラスチックにいたっては更にその数分の一か検出限界値以下であった。

石英粒子を豊富に含む花崗岩よりも、ほとんど含まない斜長岩やハンレイ岩の方が大きな電流・表面電位を示すことから、これら電流・表面電位は石英の圧電効果によるものとは考え難い。また、全ての試料は自然乾燥させてあるため、流動電位によるものとも考え難い。対して、発生した電流の方向や表面の正帯電を考慮すれば、中心圧縮部にて活性化した p-hole が周辺非圧縮部へと拡散したというモデルで巧く説明できる。PHP 欠陥をほとんど含まない非火成岩やプラスチックには、p-hole 電流が発生しない。一方、ガラスには PHP 欠陥が含まれていてもおかしくないが、アモルファス構造ではエネルギー準位の逆転と電子の遷移のメカニズム( Fig.1 )が巧く働かないのではないかと予想される。

これらの実験結果をもとに少々大袈裟な表現をすれば、部分圧縮された火成岩は圧力-電力変換器であり、

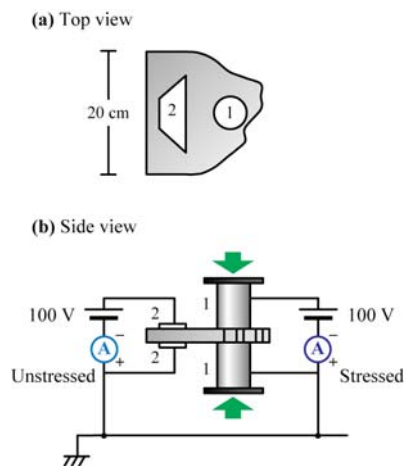


Fig.2: Set-up (1). 1: Load piston, 2: Cu-tape electrode. [4]

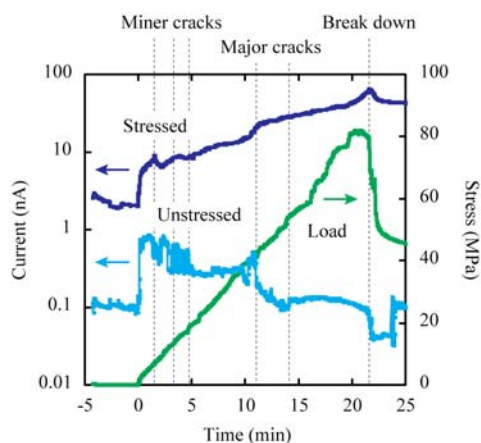


Fig.3: Result (1). The sample is granite. [4]

電流を流す様子はまさに電池と言っても良い。しかし、PHP および p-hole には未だ不明瞭な部分が多く、今後の更なる研究で明らかにしていく必要がある。

#### 4. 地殻電気伝導率構造への影響

室内実験で検証された「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ことにする。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り、このような長期にわたって p-hole を放出し続けるかどうかは分からない。しかし、局所的には圧力・温度勾配が比較的活発に変化している地域もある。それは地震発生前の断層帯や噴火前の火山帯である (Fig.6)。これら地域では加圧・加熱により活性化された p-hole 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。

#### 参考文献

- [1] 上嶋誠, 地学雑誌, 116, 862–870, 2005.
- [2] F. Freund, Nat. Hazards Earth Syst. Sci 7, 535–541 & 543–548, 2007.
- [3] 竹内昭洋, 電気学会論文誌 A, 128 (印刷中).
- [4] F. Freund, et al., Terr. Atmos. Ocean. Sci., 15, 437–467, 2004.
- [5] A. Takeuchi, et al., Phys. Chem. Earth, Parts A/B/C, 31, 240–247, 2006.

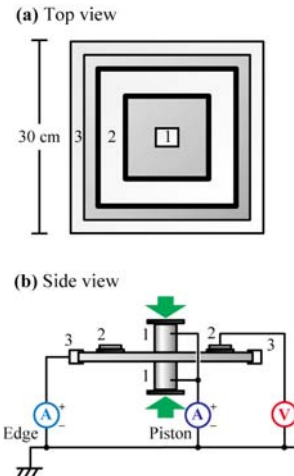


Fig.4: Set-up (2). 1: Load piston, 2: Capacitive sensor, 3: Al-frame electrode. [5]

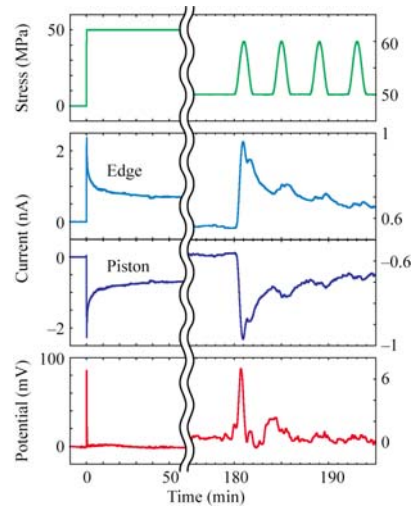


Fig.5: Result (2). The sample is anorthosite. [5]

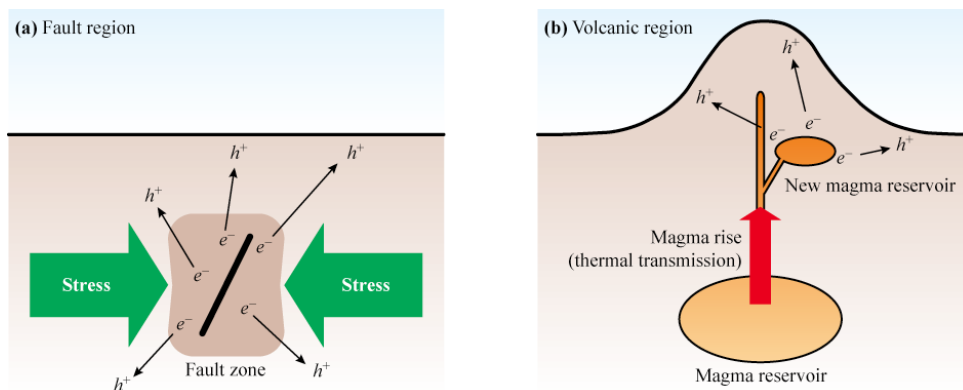


Fig.6: Schematics of the p-hole ( $h^+$ ) activation in the active Earth's crust.