

坑道内における地震波到達に伴う電場発生と 実験室における岩石圧縮に伴う電場発生

竹内昭洋（東海大）、二田祐佳子（秋田県立大）、大久保寛（首都大）、
中村行信（細倉金属鉱業（株））、阿部道彰（東北大）、竹内伸直（秋田県立大）

Electric fields induced by the arrival of seismic waves in a mine gallery and the stress to rock samples in laboratory

Akihiro Takeuchi (Tokai University), Yukako Futada (Akita Prefectural University),
Kan Okubo (Tokyo Metropolitan University), Yukinobu Nakamura (Hosokura Metal Mining Co. Ltd.),
Michiaki Abe (Tohoku University), Nobunao Takeuchi (Akita Prefectural University)

Abstract

A large plate electrode, lying 1.2-m above the floor of an underground mine gallery in northeast Japan, detected electric signals when seismic waves arrived. This signal is equivalent to the generation of an upward-pointing electric field. One of the possible mechanisms is the positive electrification of the floor. Here, we inspected such electric field and electrification in laboratory using an air-dried andesite block quarried from the mine. The block under partial load showed the upward-pointing electric field and positive electrification on the surface of the unstressed volume. The assumption of positive holes is reasonable to explain the laboratory results. They are activated from the deformation of peroxy bonds ($\text{O}_3\text{X}-\text{OO}-\text{YO}_3$ with $\text{X}, \text{Y} = \text{Si}^{4+}, \text{Al}^{3+}$, etc), a populous lattice defect in rock-forming minerals. In case of the underground-detection, the seismic waves would activate positive holes near the floor.

1. はじめに

地電流の異常変化現象や電離層の擾乱現象が地震発生前に起こっているとしばしば報告されている。これら現象のメカニズムを解明し、地震の短期・直前予測へと繋げるべく、世界各地で様々な観測網が展開されている[1]。一般的な観測ではアンテナやセンサーは地上に設置されるか人工衛星に搭載されているが、我々の研究グループでは宮城県北西部の細倉鉱山内に設けた観測室にて、地中空間の電場信号を常時観測している[2]。地下水を多く含む表層堆積層よりも更に地下でならば、震源からの直接的な電気信号を検出できるのではないかと期待しているからである。この地中観測室（12m × 15m × 2.5m）は熱変成を受けた安山岩-凝灰岩から成る基盤岩に覆われている。部屋の中央部には、アルミ製の大型平板電極が 15 本の碍子柱を用いて床から 1.2m 上に設置されており、1 MΩ の内部抵抗をもつデータレコーダを通して接地されている（Fig. 1）。この電極システムの時定数は 10^{-4}s 程度であると予想される。また、電極近くの床には加速度計を設置し、地震波による加速度の上下成分も同時観測できる。観測時刻は GPS を用いて世界時と同期している。

これまでの観測から様々な電気信号が得られているが、真に地震に関係するものなのか検討する作業が必

要である。なかでも地震波到達時の電気信号は比較的考察しやすい。例えば、2004年2月27日にマグニチュード4.6の地震が発生した。震源は宮城県沖、深さ約70kmで、観測室との震央距離は約75kmである。S波の第一波により床面が押し上げられると電気信号（過渡電流によりデータレコーダの内部抵抗に発生する電位差）は負の方向へ急増し、その後約1分かけて元のレベルに戻った（Fig. 2）。このような信号は他にも何度か検出されてり、その発生原因として、

- (1) 基盤岩に含まれる石英の圧電効果による床および壁の帯電
- (2) 地震波に圧縮されて移動した地下水の界面効果（流動電位）による床からの放射電場
- (3) 床や壁から噴出したラドンガスの放射壊変による気中イオンの増加

を考えた[2]。

本研究ではその他の原因として、

- (4) 正孔電荷キャリアの発現による床の帯電に注目する（正孔の詳細は後述）。検出された電気信号の方向と電極システムの接続設定を考慮すると、鉛直上向きの電場が想定できる。この電場を発生させるには、床が正に帯電する必要がある。そこで本研究では、岩石試料を部分圧縮することで地震波到達の模擬実験を行い、実際に岩石表面が正に帯電し、上向き電場を発生させるかどうかを検証する。

2. 実験方法と結果

Fig. 3 に実験装置の概要を示す。岩石試料（4.5cm × 4.0cm × 9.7cm）は地中観測室を取り囲んでいる安山岩から切り出した。接地したアルミ製ケージ内で自然乾燥させた岩石試料の下部のみを万力で圧縮し、荷重値をロードセル（ミネベア製 CMM1-2T および CSD-819C）で計測した。この圧縮部は上方に若干膨

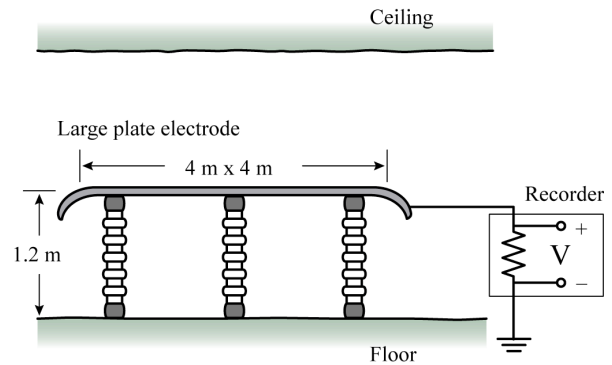


Fig. 1: Large plate electrode system at Hosokura underground room.

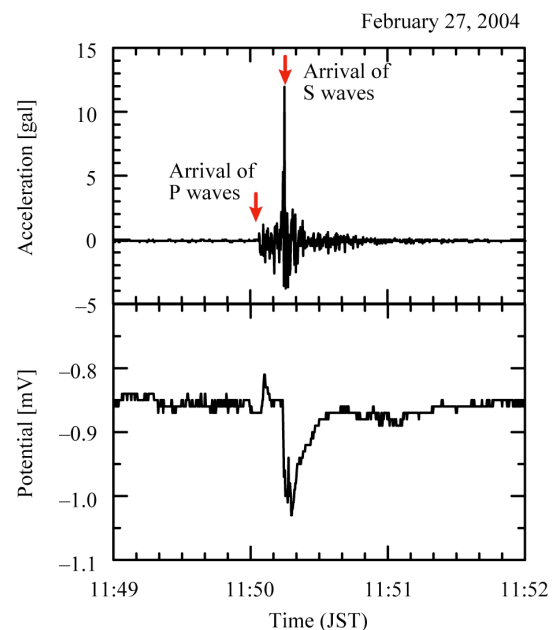


Fig. 2: Electric signal at the arrival of seismic waves [2].

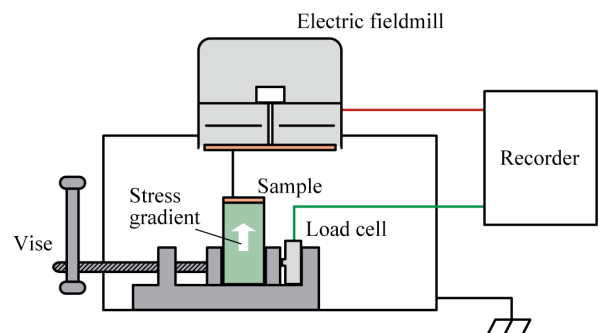


Fig. 3: Set-up of laboratory experiments.

張し、圧力勾配を伴って非圧縮部を押し上げようとする。このことを利用して、S波の第一波が床面を押し上げようとする瞬間をスロー再現した。それに伴い発生する電場（および帯電）をフィールドミル電界計（テラテクニカ製 EF-308T）で計測した。電界計の直下に銅板を取り付け、銅板と岩石試料上面に貼った銅テープとを接続した。これにより、岩石試料上面の帯電を電界計の直下へ静電誘導し、計測された電場値から帯電量も見積もることができる。荷重と電場のアウトプットデータをデータレコーダ（HIOKI 製 8050）で時刻同期した形で保存した。

岩石試料のふらつきとロードセルの下限有効荷重値を考慮し、岩石試料に 200kg（約 1.3MPa に相当）の荷重を加えた状態で、ある程度の時間放置した後に加圧した。Fig. 4a に実験結果の一例を示す。200kg の荷重が加えられている時の電場値を基準としてある。上向きの電場は正の値で表示され、同時に正の帯電を意味することになる。加圧に伴い上向きの電場が発生し（岩石試料の表面が正に帯電し）、減圧後その電場（帯電量）が減少していく様子が確認できる。荷重の上限を変えて実験を繰り返したが、やはり上向き電場と正帯電を示した（Fig. 4b）。ばらつきは大きい、図中に太線で示した傾向が荷重 200kg 以下の領域でも有効であるとする、実際の電場はグラフ値に約 0.2V/m を、帯電量はグラフ値に約 2pC/m² をそれぞれ加えたものになると予想できる。

3. 考察

本実験で用いた安山岩には僅かに石英が含まれるため、一連の電場および帯電の原因として石英による圧電効果が疑われる。そこで、石英をほとんど含まないハンレイ岩（9.4cm × 2.0cm × 9.7cm）を用いて同様の実験を行った結果、10 倍程度大きい上向き電場および正帯電を示した。このことより、一連の電場および帯電の主原因を石英の圧電効果に求めるのは妥当ではない。一般的に岩石に含まれる石英の結晶軸は分散しているため、発生する個々の圧電分極は殆どキャンセルされ、全体としては大きな分極にならないのであろう。

乾燥させた安山岩やハンレイ岩は絶縁体であるため、通常の電子はそれら岩石試料内部を移動しにくい、正孔電荷キャリア[3]を用いれば、上向き電場や正帯電を定性的には説明できる。鉱物結晶内には格子欠陥の一種である過酸化架橋（O₃X-OO-YO₃、ここで X、Y は Si⁴⁺や Al³⁺など）が多数存在する（Fig. 5a）。加圧に

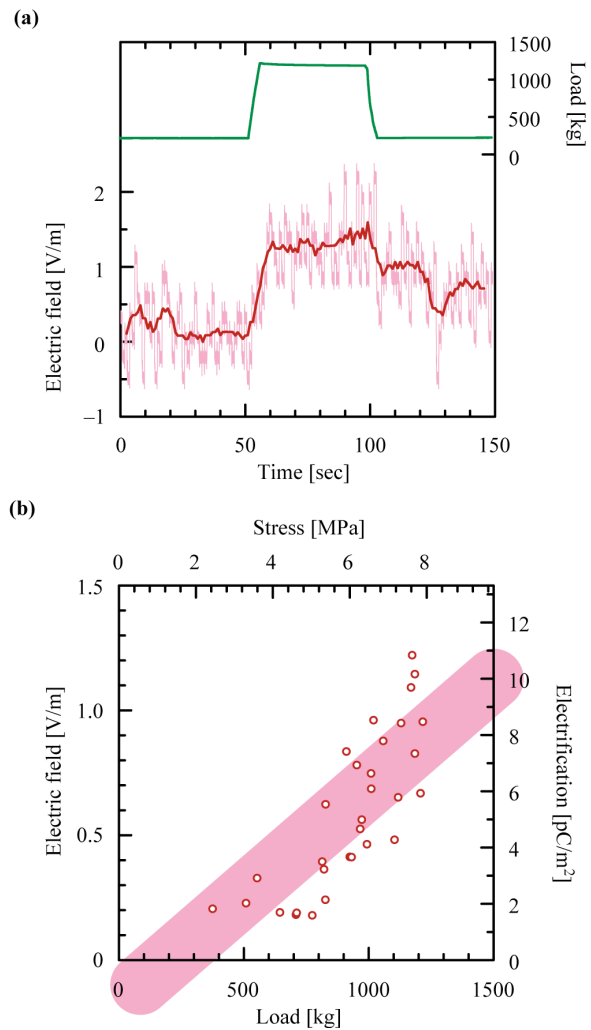


Fig. 4: Experimental results using an andesite block.

より過酸化架橋の格子構造が歪み、 $3\sigma_u^*$ エネルギー準位が価電子帯まで下降すると (Fig. 5b)、隣接する O^{2-} から電子が移入し、その電子を供給した O^{2-} に正孔電荷キャリアが発現する (Fig. 5c)。この正孔は、P 型半導体の電荷キャリアと同様に、価電子帯の最上部を通して拡散することができる (Fig. 5d)。岩石試料の圧縮部で発現した正孔は非圧縮部の表面へと移動し、正帯電を引き起こすことになる。その後、正孔の緩慢な拡散と再結合により帯電量がゆっくりと減少し、上向き電場もゆっくりと減少したのであろう。

観測室で得た観測結果と室内実験で得た実験結果は、圧力および圧力変化率が異なるため単純に比較することはできないが、地下観測室で検出された電気信号の原因として正孔電荷キャリアも考慮されるべきことが示されたと言えよう。

4. 結論

鉱山坑道空間を利用し、大型平板電極による電場信号を観測している。長期にわたる観測の中で、地震波到達時に特異な信号が何度か検出された。可能性あるメカニズムの一つとして、地中観測室の床の近くで地震波により正孔電荷キャリアが活性化し、床面が正に帯電したと考えることができる。将来、地下電磁場観測による地震の短期・直前予測を実現させるためにも、観測データを更に蓄積し、本研究のように一つ一つの電気信号を地道に検討していく必要がある。

謝辞

本研究は細倉金属鉱業株式会社のご好意により実施されている。また、本研究の研究費の一部は大久保寛の若手研究 B (No.20760268) の助成に依っている。

参考文献

- [1] S. Uyeda, T. Nagao, M. Kamogawa, Short-term earthquake prediction: Current status of seismo-electromagnetics, Tectonophysics (印刷中).
- [2] K. Okubo, S. Sato, T. Ishii, N. Takeuchi, Observation of atmospheric electricity variation signals during underground seismic wave propagation, IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 1, 182-187, 2006.
- [3] 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, 307-310, 2008.

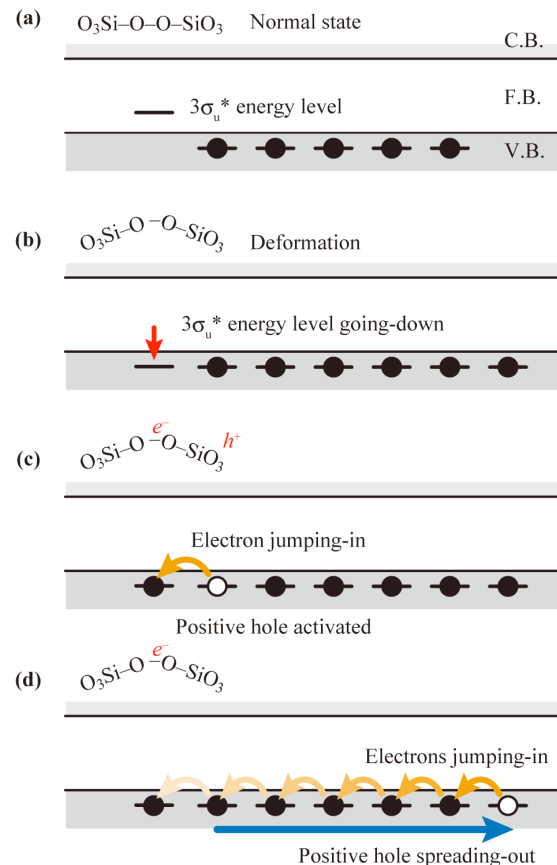


Fig. 5: Mechanism of the positive hole activation and spreading-out in igneous rock-forming minerals.