

封圧下における石英を含まない岩石の摩擦電磁気現象に関する実験的研究

白井信正^{1,*}・堤 昭人²

Nobumasa Shirai and Akito Tsutsumi (2010) Experimental studies of electromagnetic signals associated with stick-slip of quartz free rocks. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 61 (5/6), p. 217-231, 15 figs, 1 appendix.

Abstract: A stick-slip experiment was conducted using dry cylindrical samples saw-cut at an angle of 30° under confining pressures ranging from 30 MPa to 120 MPa. The samples used in the experiment were quartz-free basalt, gabbro, and peridotite. Loading on the rock samples was applied by a manual micro-discharge pump at a controlled rate of ~ 0.003 mm/s. Solenoids aligned circumferentially with the sample were used as sensors for detecting the magnetic field signal, while two pairs of electrodes, each consisting of two copper plates (30×30 mm), were used as sensors for detecting the electric field signal. The electrode pairs were aligned circumferentially with the cylindrical sample, one perpendicular to and the other parallel with the saw-cut surface. Variations in both the electric and magnetic fields were detected at the point of slippage during stick-slip motion in all samples, even in the quartz-free samples. However, no such signals were detected during stable sliding. In almost all of the gabbro samples, the amplitude of the electric field variation measured by the electrode pair aligned parallel to the fault was longer than that obtained by the electrode pair orientated normal to the fault. This indicates that the gabbro samples are anisotropic. Moreover, the separation of electric charges between the faults and electric discharge is considered to occur simultaneously because the signals detected by the coils and the signals observed on the electrodes occurred almost simultaneously. Furthermore, the amplitude of the electric field variation measured by the electrode pairs was found to increase with the stress drop during stick-slip. Next, signals induced in each of the four copper electrodes were measured individually to confirm the anisotropy of the electric field variation. Results showed that the signals detected by the electrodes positioned parallel sides of the fault of the gabbro sample exhibited opposite polarities in the early stages, confirming anisotropy parallel and normal to the fault. For the basalt samples, although the electric and magnetic fields were too low to measure differences in the two directions for some samples, similar tendencies as those for the gabbro samples were observed.

Keywords: stick-slip;electromagnetic signal;rock friction

要 旨

30MPa から 120MPa までの封圧条件の下で、30° にプレカットされた円柱状の試料を用いて固着すべり実験を行った。実験には石英を含まない玄武岩、斑レイ岩とカンラン岩試料を用いた。岩石試料への軸方向荷重載荷は微量吐出手動ポンプで行い、速度は約 0.003mm/s となるように操作した。磁界信号を検出するセンサには試料の周方向に配置したソレノイドを用いている。電界信号を検出するセンサには 2 枚の銅板を対 (30×30mm) にした電極を 2 組用い、各電極対を円柱状試料の周方向にプレカット面に直行配置及び面と相対 (平行) する方向に配置して記録した。

実験の結果、石英を含まない試料においても、固着すべり間のすべり時に電界及び磁界変化が全ての試料において検出された。しかし、これらの信号は定常滑り時には検出されなかった。銅板電極対で計測した電界変化の振幅は、斑レイ岩ではほぼ全ての試料において滑り面と平行に配置された電極対のほうが滑り面に対して垂直に配置された電極対で計測した値より大きい値を示し、電界変動の異方性を示唆する結果が得られた。

更に、コイルで検出した信号と電極で観察された信号がほぼ同時に生起していることから、滑り面間の電荷の分離と放電が同時に起きたものと考えられる。

また、電極対で計測した電界変化の振幅は、固着す

¹地質情報研究部門 (AIST, Geological Survey of Japan, Institute of Geology and Geoinformation)

²京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻 (Division of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyoto University, Kyoto 606-8502, Japan)

* Corresponding autor: N. SHIRAI, Central 7, 1-1-1 Higashi, Tsukuba, Ibaraki 305-8567, Japan. Email: n.shirai@aist.go.jp

べり時の応力降下量と共に増加していることも分かった。

次に、電界変動の異方性を確認することを目的に、4つの銅電極それぞれに誘起する信号を個別に計測した。この結果、斑レイ岩試料では滑り面を挟んで平行に配置した電極で検出した信号は発生初期に逆極性を示し、滑り面と平行な方向と垂直な方向の異方性を確認することができた。しかし玄武岩試料においても斑レイ岩と同様の結果が得られたが発生した電・磁界のレベルは低く明確な差は見られないものもあった。

1. はじめに

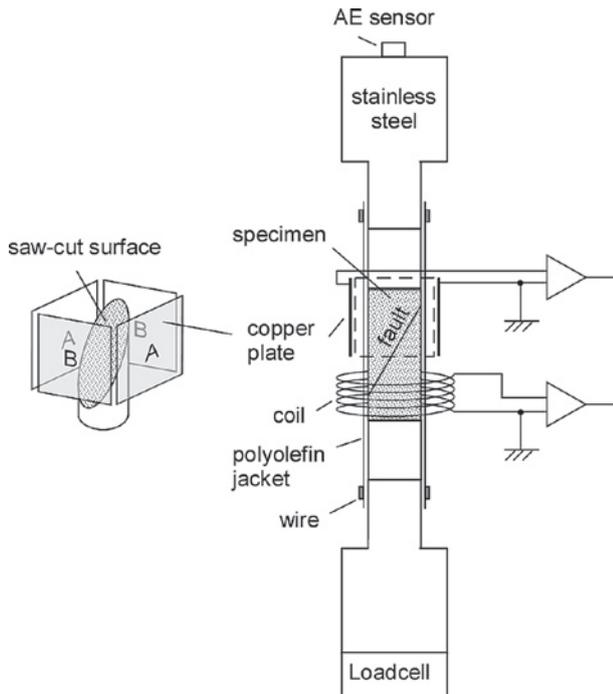
岩石が破壊する時に電気的信号の発生や発光現象を伴うということはよく知られており、このような信号生成を引き起こすメカニズムを解明するために、岩石サンプルを用いた単軸あるいは3軸圧縮試験での破碎試験が国内外で広く行われてきた。これらの岩石破壊時に基づいていくつかのモデルが提案されている。よく知られる Nitsan (1977) や Warwick ほか (1982) の研究では、石英結晶を含む花崗岩サンプルを用いた変形実験の結果から、観測された電気信号を発生させるメカニズムの候補として石英の圧電効果に起因する可能性が最も高いことが示された。しかしその後、石英を含まない岩石の変形実験においても電磁気信号が発生することが示されたことから (例えば Ogawa ほか 1985)、石英の圧電効果以外にも電磁気信号を生成するメカニズムが存在することが示唆される。石英の圧電効果に拠らない機構としては、マイクロクラックの壁面からの電荷の分離に起因するもの (Ogawa ほか (1985) Yamada ほか (1989)), 破壊面からの帯電粒子の放出によるもの (Enomoto, Kawaguchi, Hashimoto (1990) ; Kawaguchi (1998) ; Tsutsumi *et al.*, 2003), 亀裂表面の原子の振動モデル (Frid *et al.*, (1999) 2003), そして、励起されたエキソ電子によるもの (Cress *et al.*, 1987, Brady and Rowell, 1986) などが提唱されている。

さて、これらの破碎試験と比べて、岩石の摩擦に伴う信号発生に関する実験研究の数は少ない。これまでに報告されているのは、立方体に整形した試料を両側の試料で挟み試料ブロック間に相対変位を起こすタイプの二面剪断試験 (Yoshida ほか 1994, 1997), あるいは円柱状試料の長軸に対して約 30° の方向に切断面を入れ、封圧下で摩擦実験を行うもの (Takeuchi, Nagahama (2001)) など少数例に留まっている。また、いずれの実験においても、石英を含む花崗岩がサンプルとして用いられているため、発生した電磁気信号が圧電効果によるものか他のメカニズムに起因するものか明確にすることは困難である。

圧電結晶を含まない岩石の摩擦時の電・磁氣的挙動について、その電磁気異常発生条件や、従来知られている圧電効果に起因する現象との強度関係・寄与率が推定できるようになれば、震源域の破壊誘起電磁気現象を考える上で重要である。また、震源域が石英など圧電結晶を含まない岩石により構成される場合の現象を考える上でも重要である。筆者らは、石英を含まない幾つかの岩石に関して、封圧下での摩擦実験を行い、固着すべり (stick-slip) 発生時における電磁界変動の計測を試みてきた (堤・白井, 2006, Tsutsumi, Shirai, 2003, Tsutsumi, Shirai, 2008)。これまでの実験において 120MPa までの各種封圧下での摩擦実験を行い、「固着すべり」現象のすべり時における、電界、磁界信号の特性評価に加え、信号強度の垂直応力、応力降下量、変位量依存性などについて検討した。これらについては既に英文論文にて発表済みであるが本稿では最初にこれまでの実験と成果の概要を述べる (2., 3.1, 3.2)。更にその後に行った固着すべり時に生じる電界変動の異方性を示すデータを得ることを目的に行った実験方法とその結果について報告し (3.3), これらを合わせて考察する。

2. 実験方法

実験は産業技術総合研究所に設置してある油圧式三軸圧縮変形試験機を用いて行った。第1図は実験システムの概要である、圧力容器はステンレス (SUS630) 製で、容器の内径、外形はそれぞれ 94mm と 196mm である。実験に用いた封圧は 30MPa~120MPa で、封圧の微調整、ピストンの駆動はともに油圧ポンプにて行った。特に載荷ピストンの変位速度は併設している手動微量吐出ポンプを用いて約 0.003mm/s の速度とした。また、ピストン変位、荷重はともに圧力容器の外で測定した。試料には直径 20mm×長さ 50mm の円柱状に整形した玄武岩、斑レイ岩、カンラン岩を用いた。これらの円柱状試料には、軸方向に対して約 30度で斜交する切断面を入れることでこれを模擬断層面とし、摩擦実験におけるすべり面を既定している。切断面 (摩擦面) は、固着すべりを起こしやすくするために細粒 (#1000) の研磨剤で研磨した (Dieterich, 1979)。岩石試料は封圧容器の油が供試体内に侵入しないようにポリオレフィンの熱収縮チューブで被覆した。電磁界変動計測は、電界変動センサとして岩石試料に対して近接して対向させた2枚の銅版電極 (30mm×30mm) を2対 (第1図、電極対 A:0.42pF at 1kHz, 電極対 B : 0.37pF at 1kHz) 配置し、磁界変動センサとして試料周りに外径 42mm のアクリル円筒にエナメル線を巻いた中空単層ソレノイド (206T, 13.7 Ω, 1mH at 1kHz) を配置して電極間及びソレノイドに誘起さ



第1図 圧力容器内における岩石摩擦に伴う電磁気信号計測を目的とした実験システムの概略図. 電極対Aは断層面に対して垂直, 電極対Bは断層面の走向と平行となるよう設置している.

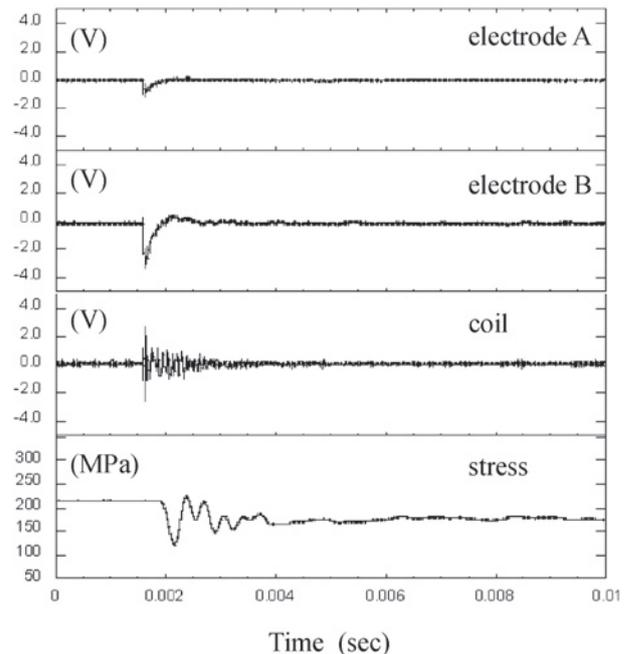
Fig. 1 Schematic diagram of the configuration of the test system. The rock specimen with a saw-cut surface, copper plate electrodes, and coil were all set within a triaxial pressure vessel. Electrode pairs A and B were set normal and parallel to the strike of the fault plane, respectively. An AE sensor was attached to the moving piston at a distance of 160 mm from the center of the fault.
ELSEVIER の了解を得て, 「Tectonophysics vol.450 (2008) 79-84」より転載

れる電圧変動の同時計測を試みた. このソレノイドは 300kHz 周辺に共振点を有する. 電界信号が高インピーダンス源であることを考慮して, 増幅器には入力インピーダンスが高く周波数帯域が広い機種を選定し, 1MΩの入力インピーダンス持つ増幅器 (株エヌエフ回路設計ブロック BX-31A, 周波数帯域は DC~70MHz, 利得 100) を使用した. 増幅器からの出力はアコースティックエミッション (以下 AE と記す) センサ, 荷重変換器などの出力とともにデジタルオシロスコープ (IWATSU DS-9244AM, LeCroy 6050) に取り込んだ. 荷重変換器からの出力は, 変位計出力とともに 1ms のサンプリング間隔でデジタル記録計 (TEAC, DR-M2a) にも取り込んだ.

3. 実験結果

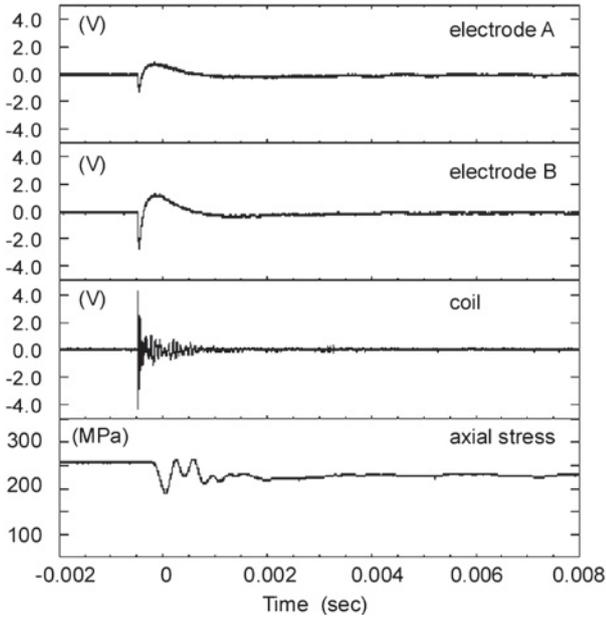
3.1 石英を含まない岩石の固着すべり

実験に用いた石英を含まない岩石において, 固着すべりを伴わない定常すべり時には, 電界, 磁界信号が計測されなかった. 一方, 固着すべりのすべり時には, 全ての岩石試料において, すべりの開始に同期して顕著な電界・磁界の変動が認められた. 第2図及び第3図に, 固着すべり挙動のすべり時における AE とともに計測された信号を示す. 第2図はカンラン岩, 第3図は細粒斑レイ岩を用いた封圧 80Mpa のもとの計測例である. これらの図において, 電・磁界信号と軸荷重波形の間には約 0.3ms の遅れが見られるが, これは, (1) 軸荷重は岩石試料のすべり面で直接計測しているわけではなく前述のように容器の外部で計測していること, 及び (2) 封圧をシールする载荷ピストンの Oリングの摺動抵抗によって応答に遅れが生じたものと考えられる. 第4図は細粒斑レイ岩を用いた封圧 30Mpa における固着すべり開始時の AE, 電極 B, 及びコイルの記録波形の時間軸を拡大して表示したものである. 電界信号と磁界信号波形とは明らかに異なっ



第2図 固着すべり挙動のすべり開始時における载荷重降下をトリガーとして記録した電極 A, B, 及びコイルの電位変動記録.

Fig. 2 Record of the electric signals measured at the copper plate electrodes and the coil for a stick-slip experiment on basalt at 80 MPa confining pressure. (a) Data for the entire recording period. (b) Enlargement of that part of the record in (a) that contains the stick-slip event (vertical dashed lines in (a)).
ELSEVIER の了解を得て, 「Tectonophysics vol.450 (2008) 79-84」より転載



第3図 玄武岩試料を用いた固着すべり挙動のすべり開始時における载荷重降下をトリガーとして記録した電極 A, B, 及びコイルの電位変動記録。

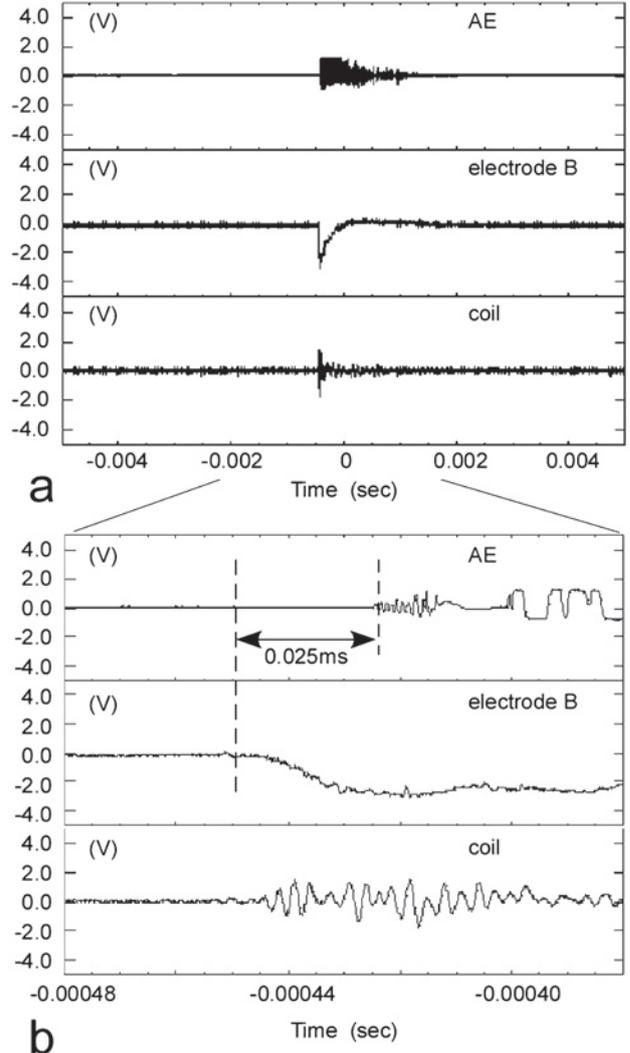
Fig. 3 Record of the electric signals measured at the copper plate electrodes and the coil for a stick-slip experiment on peridotite at 80 MPa confining pressure. ELSEVIER の了解を得て, 「Tectonophysics vol.450 (2008) 79-84」より転載

ている。電界信号は、発生初期に見られるパルス状の過渡的变化とその後の減衰する波尾で特徴付けられる。一方、磁界信号は発生初期の高周波（約 500kHz）で減衰振動する成分（damped oscillation）と、それに続く、一定振幅で 1ms 程度の定時間持続した後減衰する振動波形成分（約 10kHz）からなり、両者の成因が違っていることを窺わせる。

銅板電極対で計測した電界変化の振幅は、斑レイ岩ではほぼ全ての試料において滑り面と平行に配置された電極対のほうが滑り面に対して垂直に配置された電極対で計測した値より大きい値を示し、電界変動の異方性を示唆する結果が得られた(第2図, 第3図)。また、第5a図に示すように電界信号の開始から最初のピークに至るまでの過渡時間は、応力降下量や垂直応力の違いによる差は見られずほぼ同一時間である。電界信号波形の振幅は第5b図に示すように応力降下量と比例関係にある。

3.2 AE 発生と磁界信号の生起順序

電磁気信号の発生と AE 発生などのタイミングの時間的関係に関するデータは、信号の発生機構を考察する上で非常に重要である。しかしながら、これまでの実験においては、AE センサは容器外部に配置しており試料とは約 140mm 程度の離れているため第4図に見

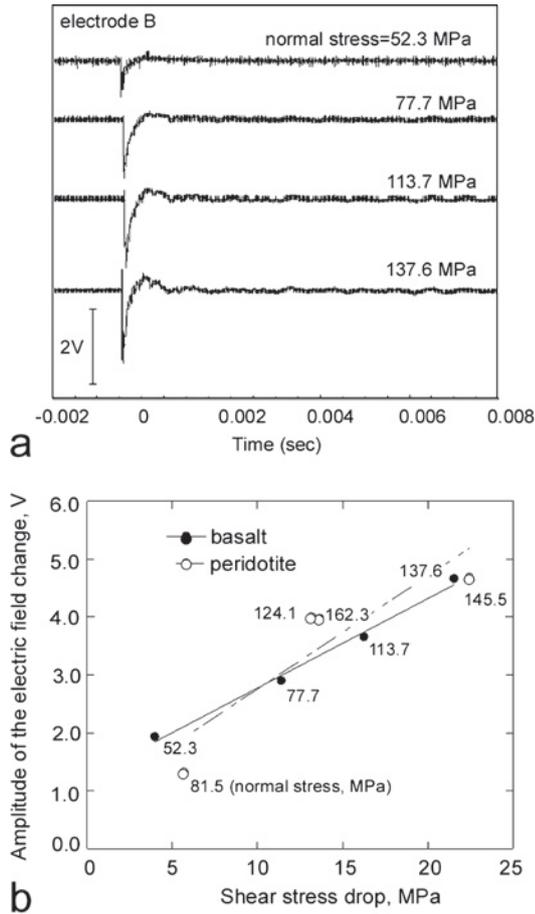


第4図 玄武岩を用いた封圧 30Mpa における固着すべり開始時の AE, 電極 B, 及びコイル波形の時間関係。(a) 記録した信号全時間の表示。(b) 波形の立ち上がり部の時間軸を拡大して表示。

Fig. 4 Representative record showing the relationship between the timing of the AE signal and that of electromagnetic field signals for a stick-slip event within basalt at 30 MPa confining pressure. (a) Data for the entire recording period. (b) Enlargement of that part of the record in (a) that contains the stick-slip event. ELSEVIER の了解を得て, 「Tectonophysics vol.450 (2008) 79-84」より転載

られるように弾性波の到達時間差分の遅れが生じていた。信号発生の際の厳密なタイミングに関して、それを議論することのできる直接的なデータの取得を目的として以下の実験を行った。

実験試料として直径 20mm の円柱状に加工した阿武隈斑レイ岩を用いた。円柱試料には、円柱軸に対して 30 度の角度で断層面（切断面）を加工してある。また切断面（摩擦面）は、固着すべりを起こしやすくなるためにこれまでと同様に細粒（#1000）の研磨剤で研

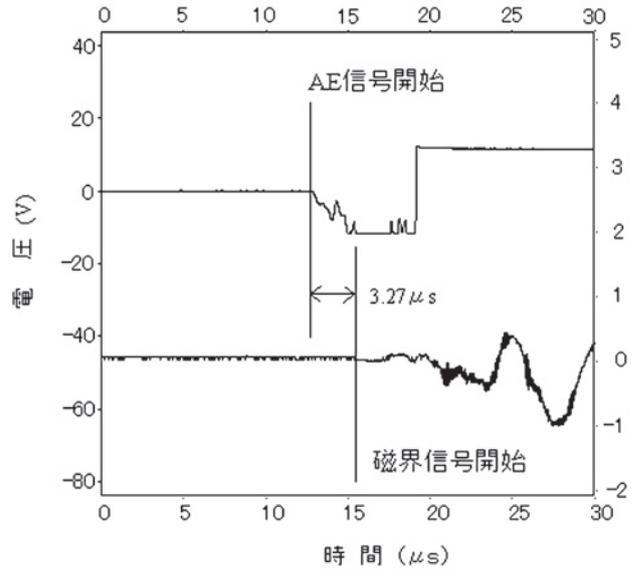


第5図 垂直応力による固着すべり時の電界信号強度の違い。(a) 電極対Bに誘起された封圧30~100Mpaの下における玄武岩試料の電界信号変動。(b) 玄武岩試料による応力降下量と電界信号強度の関係

Fig. 5 Effect of stress on the intensity of the electric signal recorded at the time of stick-slip. (a) Records of the change in the electric field measured at electrode pair B during stick-slip events for basalt at between 30 and 100 MPa of confining pressure. (b) Relationship between the intensity of the electric field signal and the magnitude of the stress drop for basalt and peridotite samples. ELSEVIER の了解を得て, 「Tectonophysics vol.450 (2008) 79-84」より転載

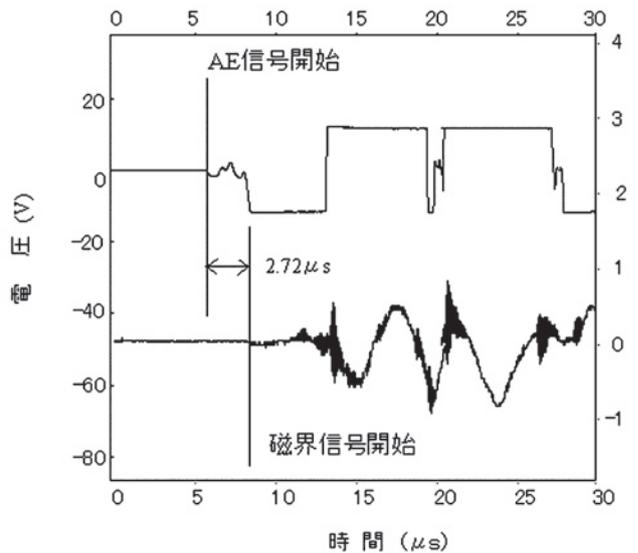
磨した。実験では、より正確な AE の開始タイミングを知るために、すべり面直近の試料表面に AE センサを設置し、電磁気信号発生との関係を調べることにした。

第6図、第7図に同時計測した AE の信号とコイルで検出した磁界信号の例を示す。これまでの例で電磁気信号 (電界センサ、磁界センサの信号) 発生のタイミングはほぼ同じであることは分かっているがこの図からは AE 信号の立ち上がりのタイミングが、常に電磁界信号発生開始に対して約 $3\mu\text{s}$ 先行することがわかる。



第6図 AE 信号と磁界信号の発生時間の差の例

Fig. 6 Examples of occurrence time of the AE and the magnetic field variation.



第7図 AE 信号と磁界信号の発生時間の差の例

Fig. 7 Examples of occurrence time of the AE and the magnetic field variation.

3.3 異方性確認

これまでの実験データで、摩擦面に対して平行に近い方に設置した電極間 (第1図、電極B) において計測される信号の方が摩擦面に対して高角 (直交) な方向に設置した電極間 (第1図、電極A) の信号よりも強いことが明らかになり、摩擦面の方向に対して電界変動の異方性を示唆する結果が得られている (第2図、第3図)。しかしこれまでの計測では、各電極対の

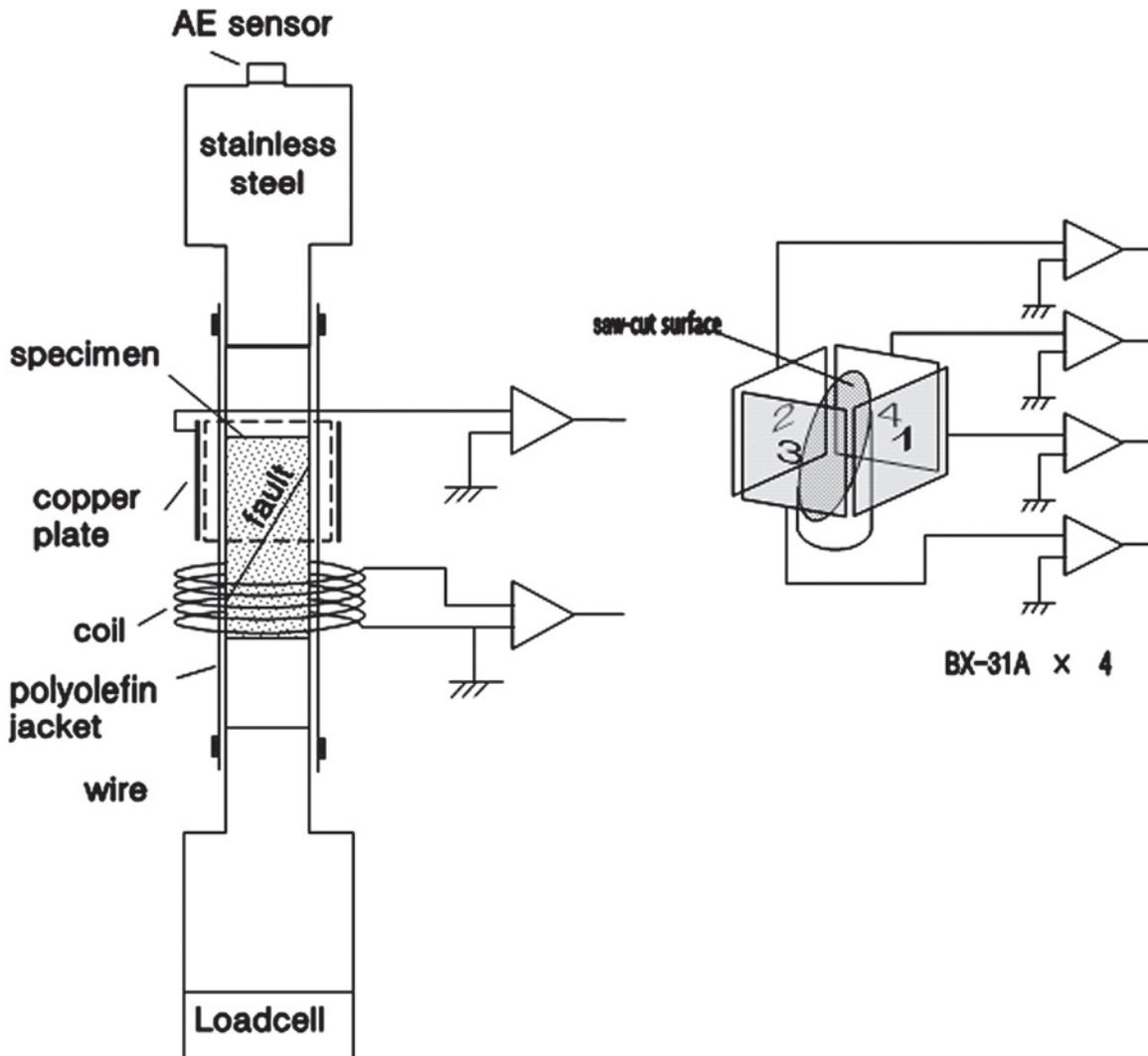
一方を接地していたため両電極対の信号波形の強度を比較する場合は適切ではない。

そこで電界変動の異方性を示すより確かなデータを得ることを目的に、第8図に示すように4つの銅電極それぞれに誘起する信号を個別に計測する方法に改め、得られた信号を比較することとした。用いた試料はこれまでと同様に、直径20mmの円柱状に加工した阿武隈斑レイ岩、カンラン岩を用いた。円柱試料は、円柱軸に対して30度の角度で断層面（切断面）を加工してある。また切断面（摩擦面）は細粒（#1000）の研磨剤で研磨した。

実験に用いた岩石試料では、センサ電極に明確に逆極性の電位が誘起される試料と不明確な試料とが見られた。斑レイ岩試料においては4個のうち3個において電界信号発生初期にセンサ電極に逆極性の電位が誘

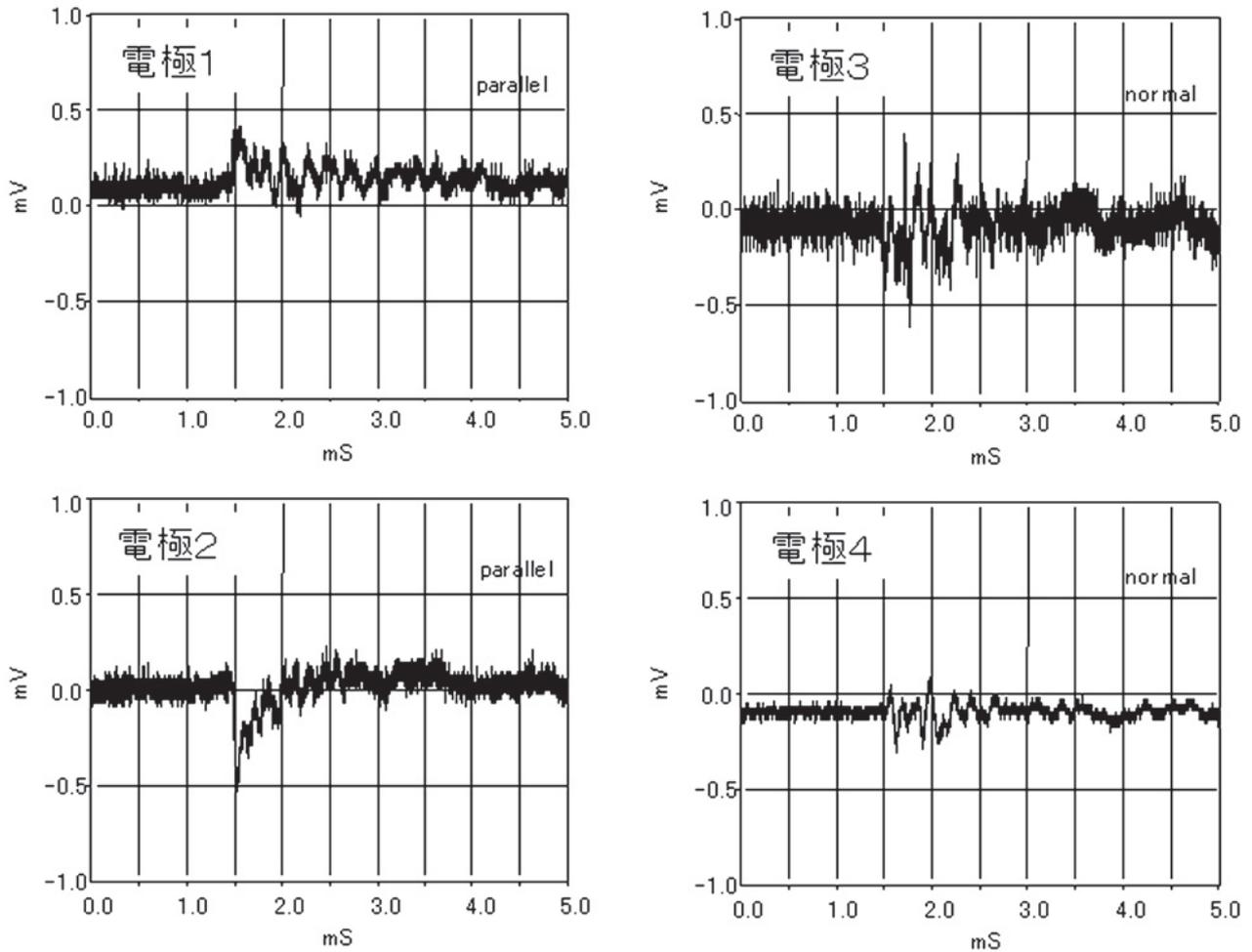
起された。第9図に斑レイ岩試料を用いた結果の例を示す。第9図の電極1、電極2は摩擦面に対して平行に近い方位に設置した電極の信号波形で、電極3、電極4が摩擦面に対して高角（直交）な方向に設置した電極の信号波形である。電極1、電極2の信号の開始から最初のピークに至るまでの部分に着目すると互いに逆の極性を示していることが分かる。他方、電極3、電極4の信号波形には逆極性は認められない。また、第10図の例のように平行配置、直角配置の両方の電極対の信号が同じ極性を示す事例や第11図に示すような極性が明確に現れない例も観測された。

摩擦面に対して平行に近い方位に配置した電極の極性が逆極性を示す試料について、各センサ電極の幾何学的な配置誤差や電気的な感度の違いによって現象が引き起こされたものではなく、すべり時に生じたこと



第8図 改めた計測系、右側に示すように4つの銅電極それぞれに誘起する信号を個別に計測する。

Fig. 8 Signals induced in each of four copper electrodes were measured individually the electric field variation.



第9図 平行配置した電極のみが逆極性を示した電界信号波形の例。

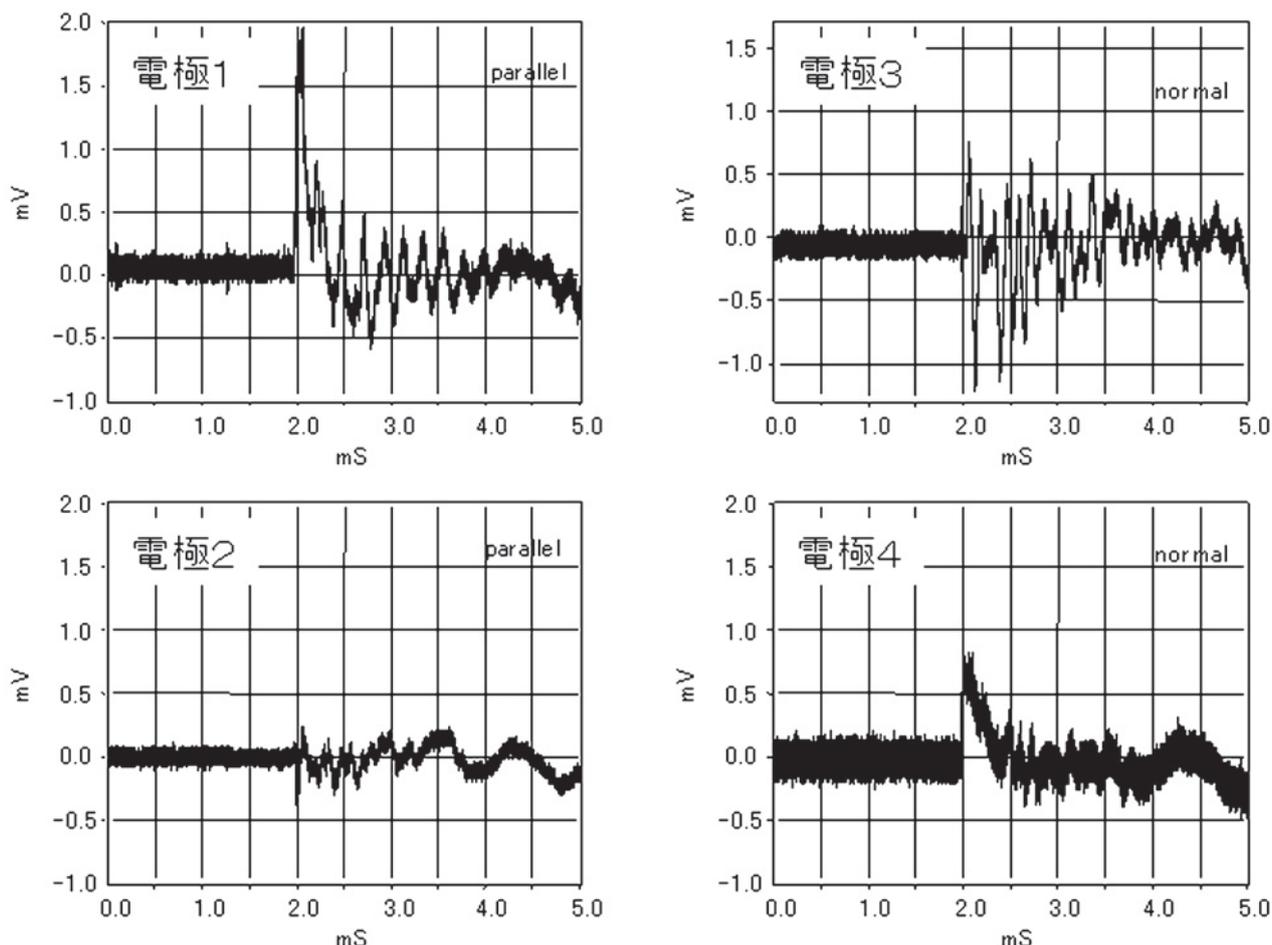
Fig. 9 Signals detected by the electrodes of the gabbro sample exhibited opposite polarities only positioned parallel sides of the fault in the early stages.

を確認するために試料と各センサ電極との配置を変えて実験を行った結果の例を第12図以降の図に示す。第13図はこの実験の途中で容器から岩石試料とエンドピース部をジャケットで被覆した試料アセンブリを取り出し、電界センサに対して試料アセンブリを試料の長軸周りに90度回転して再度計測した信号例である。第14図、第15図も同様にそれぞれ更に90度ずつ時計回りに回転した位置で計測したものである。いずれの場合においても、同様に摩擦面に対して平行に近い方位に設置した電極の信号では互いに逆の極性を示していることが分かる。他方、摩擦面に対して高角(直交)な方向に設置した電極の信号では逆極性は認められない。摩擦面に対して平行に近い方位に設置した電極の信号では相対するセンサ電極に誘起された電圧波形、振幅は対称ではなく違いが認められる。

4. 考察

岩石破壊時には、玄武岩、石灰岩などの石英結晶を含まない岩石試料についても顕著な電磁気信号や発光が計測されていることから (Ogawa et al., 1985; Yamada et al., 1989; Kawaguchi, 1998), 圧電効果に依らない信号発生機構の存在が指摘されている。

セラミクスや金属材料の破壊や摩擦に伴って、亀裂面や摩擦面が帯電し、更には荷電粒子、電子、電磁波、光などの放射現象が伴われることが知られている (Dickinson et al., 1981; Enomoto and Chaudhri, 1993; Nakayama and Nevshupa, 2002)。岩石破壊過程で形成される微小亀裂(マイクロクラック)においても、亀裂面の帯電に起因する素過程に破壊時の電磁気信号発生の原因を求めようとするモデルがある (Ogawa et al., 1985; Yamada et al., 1989)。最近、花崗岩の摩擦実験を行って電磁気計測を試みた竹内らは、断層表面の



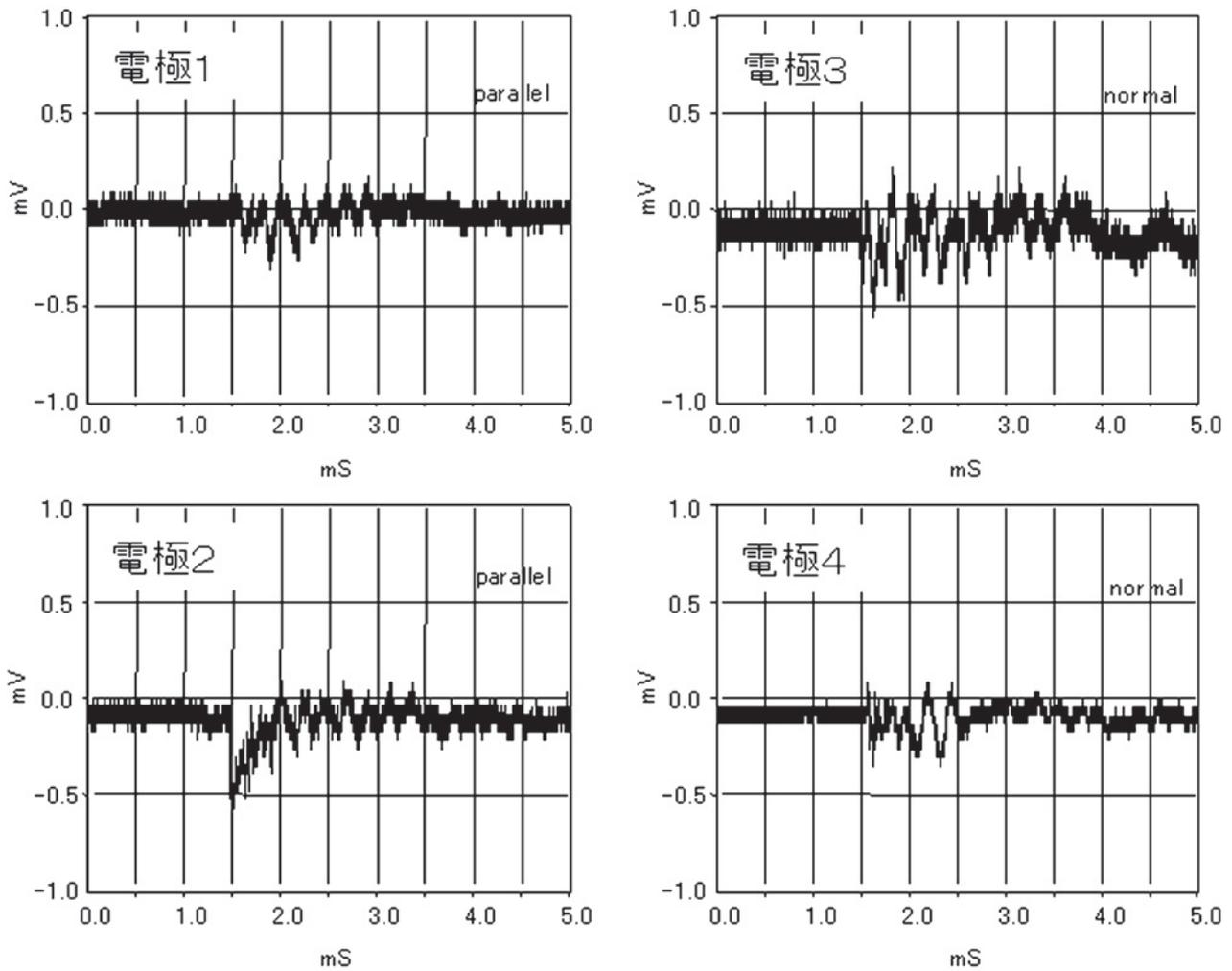
第 10 図 平行・直交配置の両電極対の電界信号波形が同じ極性を示した例.

Fig. 10 Signals detected by the electrodes positioned on both sides of the fault of the gabbro sample parallel and normal to the fault exhibited same polarities in the early stages.

アスペリティ（真実接触部）の剪断による帯電に起因した電磁気信号発生機構を提唱した（Takeuchi and Nagahama, 2002, 2006）. その中で、実験で観測される電磁気信号の指向性の主因としてアスペリティ表面の電荷がすべり面に対して垂直に形成される等価的な電気ダイポールによるモデルが示された（Takeuchi and Nagahama, 2006）. 筆者らが行った実験において電極対 2 組（A と B）で電界信号の振幅は明らかな違いが観測された. すなわち、摩擦面に対して高角（直交）な方向に設置した電極間の信号が弱く、摩擦面に対して平行に近い方位に設置した電極間において計測される信号が優位に強い（第 2 図, 第 3 図）という傾向が認められる. 上述した岩石すべり時の電界信号の違いはこのアスペリティの帯電モデルによって説明することが可能である.

第 5 図 a から電界信号の強度はすべり面の垂直応力増加とともに増大することが分かる. 更に、第 5 図 b に示すようにカンラン岩のデータでは電界信号の変動

の大きさが応力降下量に対して強い正の相関を示すことが見てとれる. 一方、玄武岩の電界変動の大きさは応力降下量と垂直応力の両方と強い相関がみられる. 固着すべり実験で観測された電・磁界信号の発生機構を説明するモデルは、このような、観測された応力条件と信号強度との相関関係をも説明し得るものでなければならない. Takeuchi and Nagahama (2001) では、アスペリティ面積の増大と垂直応力の関連（Dieterich and Kilgore, 1994）及び固着すべり時の垂直応力と総応力降下量とが正の相関関係を示すこと（Sholz and Engelder, 1976）などに基づいてアスペリティ面積の増加に起因する電磁気信号の強度と応力降下量との関係を論じている. 我々の実験で得られた電磁気信号の電界信号強度と応力降下量の関係のみについていえば、Takeuchi and Nagahama (2001) によって提案されたモデルによってこの結果を説明することが可能である. しかしながら、このモデルは、信号が固着すべり時のみ検出され定常すべり時には検出されないという本研



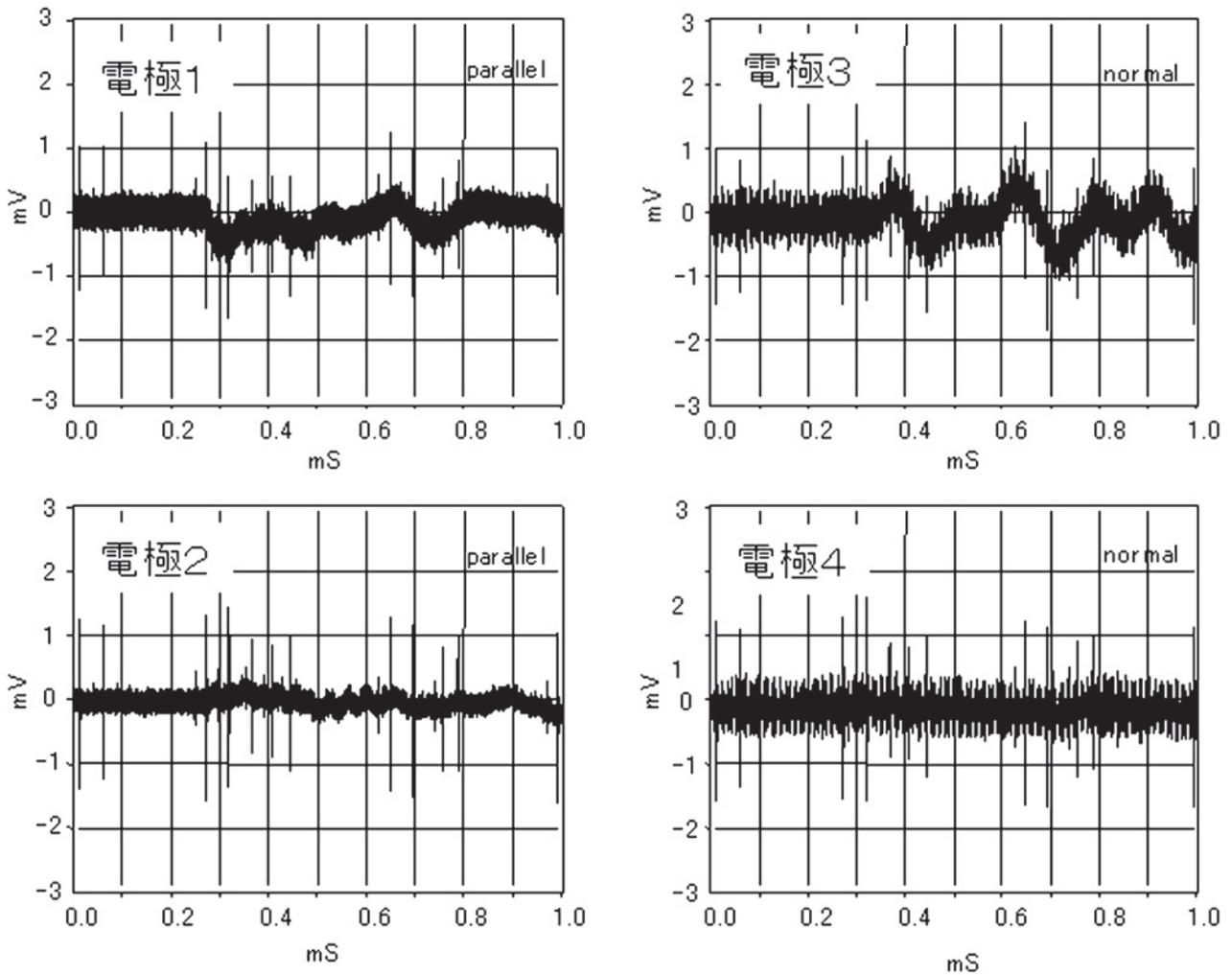
第 11 図 平行配置の電極対の信号波形の極性が不明確な例.

Fig. 11 Signals detected by the electrodes positioned parallel sides of the fault of the gabbro sample exhibited polarities not clear in the early stages.

究の結果とは調和的ではないように思える。Takeuchi and Nagahama (2001) が示したモデルでは、新たなアスペリティの剪断によって電磁気信号が発生すると仮定している、これは摩擦実験においてアスペリティが剪断されれば定常すべり時においても電磁気信号の発生を伴うということを示唆するものであろう。一方、我々の結果は、電磁気信号の発生が、固着すべり時のすべり速度と密接な関係にあることを示している。AE の発生と磁界変動の生起順序の実験から得られた AE が磁界変動に先行する結果は AE の発生原因が磁界発生の原因と同一ではない可能性が高いことを示している。

上述のように、電界信号発生過程においては、応力降下量あるいは切断面のすべり速度がその発生の機構と密接に関連しているものと考えられる。特に、アスペリティの剪断に伴って発生する電界信号は、固着

すべり時のすべり速度がその特性を決定づける重要な要素である可能性がある。固着すべり時のすべり速度は、定常すべり速度より大幅に大きく、定常すべり速度が 1mm/sec 以下であるのに対して数十 cm/sec 程度と見積もられている (Johnson et al., 1976)。筆者らが行った石英を含まない岩石の圧縮破壊実験では主破壊前の段階において AE の発生にもかかわらず電界信号が全く検出されないことが確認されており我々が検出したレベルの電界信号はクラック生成に伴って発生しているのではなくアスペリティの剪断面の摩擦によって引き起こされたものと考えられる。電界信号の開始から最初のピークに至るまでの過渡時間は、応力降下量や垂直応力の違いによる差は見られずほぼ同一時間である (第 5 図 a)。よく知られているように固着すべり実験では応力降下量とすべり量の比は試験機ごとに一定 (Ohnaka, 1973) で、装置の剛性で決まる (Johnson and



第12図 平行配置した電極1と電極2の信号が逆極性を示した電界信号波形。

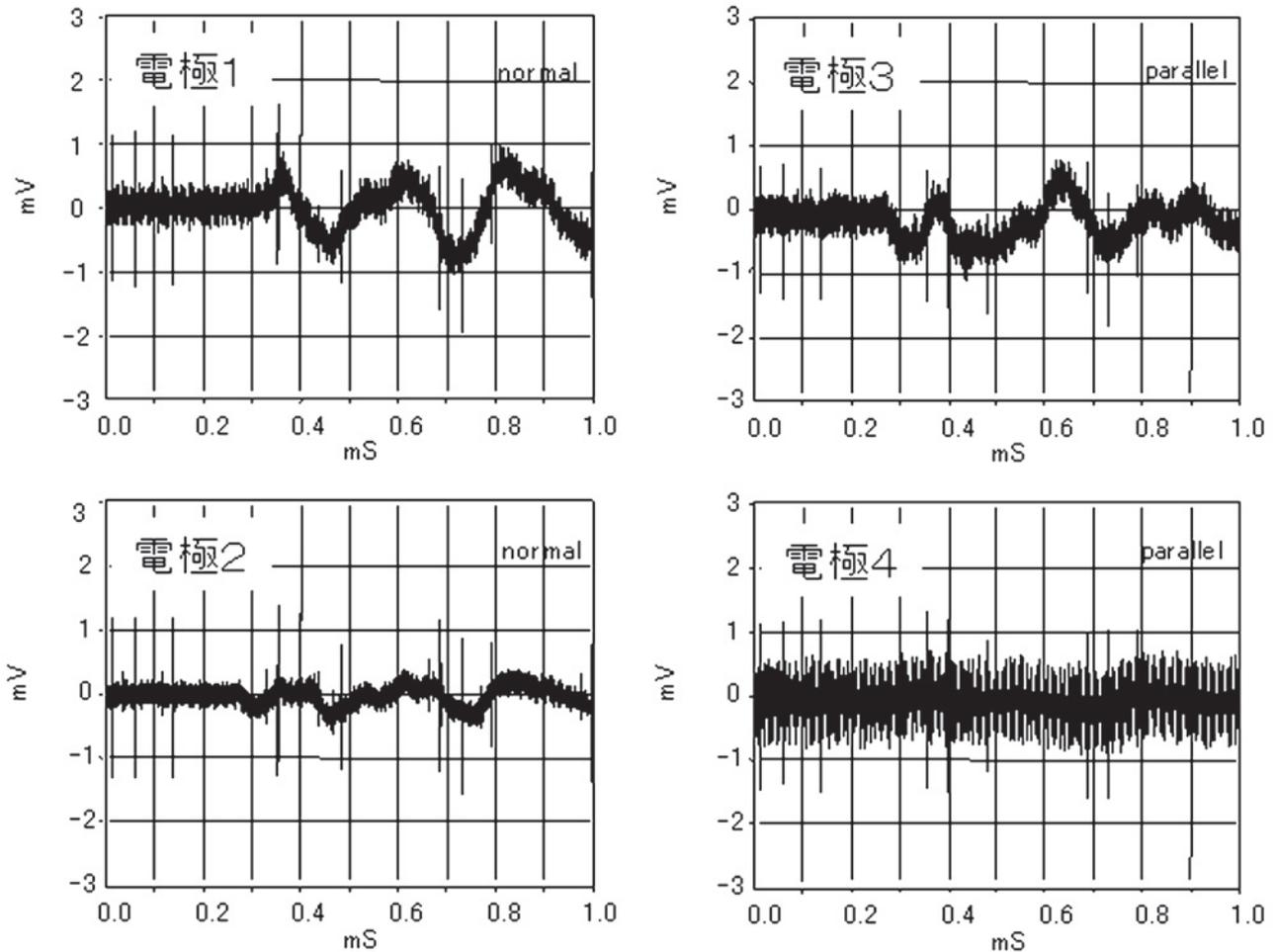
Fig. 12 Signals detected by the electrodes of the gabbro sample exhibited opposite polarities only positioned parallel sides of the fault in the early stages.

Sholz, 1976). すべりに要する時間もまた、試験機の性質のみで決まりその値は一定となる。したがってすべり速度は応力降下量あるいはすべり量が大きくなるほど早くなり、両者はきれいな正の相関を示す (Johnson et al., 1973 ; Johnson and Sholz, 1976 ; Shimamoto et al., 1980)。この結果は、上述した電磁気信号の発生過程がすべり速度と密接に関連しているとする我々の仮説を支持するものであろう。

これまでに行われた多くの研究において、固着すべり時にすべり面の垂直方向への振動が生じていることが報告されている (Brune et al., 1993; Bodin et al., 1998; Bouissou et al., 1998)。BouissouらはPMMA (ポリメタクリル酸メチル) を供試体とした固着すべり実験を行い、すべり時に断層面の部分的な離反が生じていることを示した。この実験では、切断面の垂直方向への最大変位が垂直応力と比例関係にあることが明らかにし

ている。この現象に対して彼らは、高い垂直応力下で垂直変位が大きくなるのは、高圧であるほど、噛み合っているアスペリティを分離させるのに高い垂直応力が必要となるからであると解釈した。筆者らが行った実験においても瞬間的な切断面の離反や垂直方向の振動が生じていたと仮定した場合、あるいは応力降下量の増大に伴う切断面の垂直方向への変位増加が起きていたとすれば、瞬間的な切断面の分離によって切断面の剥離帯電と表面間の電圧増大の要因となり電磁気信号の強度と応力降下量の関係にも作用したことが予想される。O'Keefe and Thiel (1995) によって提案された亀裂-開口モデル (capacitor model) によれば切断面の瞬間的な分離量が増大すれば切断面間の等価的な容量が減少し切断面間にかかっている電圧の増加を引き起こすことになる。

固着すべり時に記録されているコイルで検出した低



第 13 図 岩石試料を試料の軸周りに 90 度回転して電極との配置を変えた固着すべり時の電界信号波形。

Fig. 13 Turn the specimen assembly one-fourth revolution. Signals detected by the electrodes of the gabbro sample exhibited opposite polarities only positioned parallel sides of the fault in the early stages.

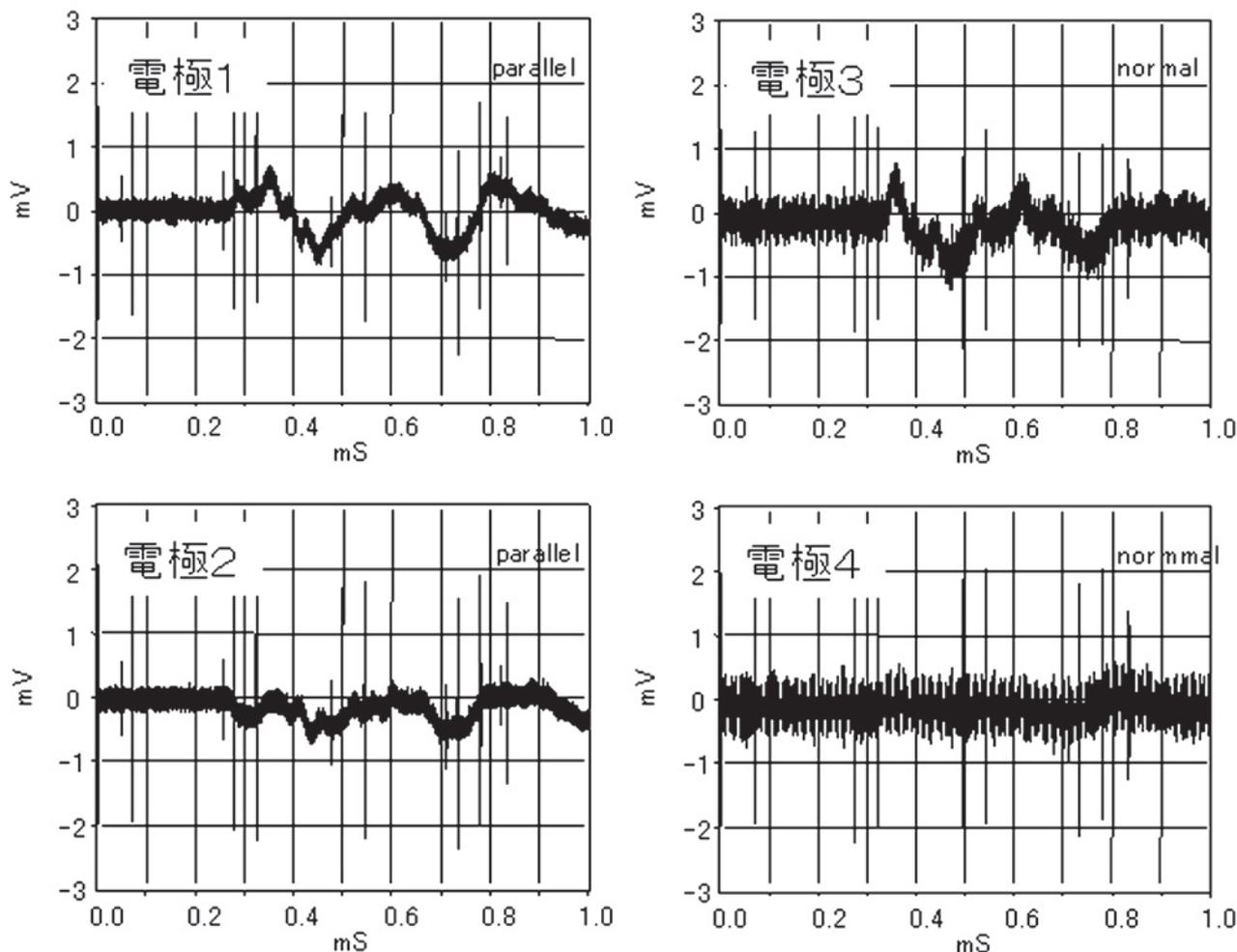
い周波数成分は電極で検出した信号波形とは明らかな違いがある。この低い周波成分はすべり時のコイルの振動による地磁気との相互作用によって誘導されたものである可能性がある。電界信号が示すゼロレベルへの指数関数的減少は、切断面間の電荷の微小な中和過程を反映したものであろう。コイルで検出した信号には固着すべりの初期に明確な高い周波数成分が見られるが、電極で検出した信号とは波形が異なる。この結果はコイルで検出した高い周波数の成分が装置の振動に起因するものである可能性が考えられよう。しかしこの高い周波数の信号はコイルでのみ検出されていることから実験に用いた電極とコイルの電・磁界に対する検出特性の違いによるものと解釈できる。前述のように、電・磁気センサは両者とも切断面から数 cm の距離に配置されており、観測対象としている電磁気信号の波長より極めて短い。このような領域においては、界 (場) の特性が主として波源の特性を反映したもの

となる。

第 2 図, 第 3 図, 第 4 図に示したように、電界センサと磁界センサによる観測波形には大きな違いが見られる。このことから、盤間での分極のような高インピーダンスの過程と盤間での電荷の中和過程のような低インピーダンスの過程が同時に進行しているものと考えられる。

第 13 図から第 15 図に示した岩石試料は試料アセンブリとセンサとの位置を変える作業ごとに封圧からの解放と再加圧されることになりその都度すべり面の位置が変化してアスペリティが前回と異なっていると考えられる。しかし、いずれの場合も毎回試料の同じ盤には同じ極性が生じ反転することはない。

切断面に平行配置した電極対で検出した信号にのみ逆の極性が現れ、直角配置の電極対の信号には現れない場合には即ち逆極性の帯電中心がすべり面の短軸方向へ変位を持たず等価電気ダイポールはすべり面に対



第14図 岩石試料を試料の軸周りに180度回転して電極との配置を変えた固着すべり時の電界信号波形。

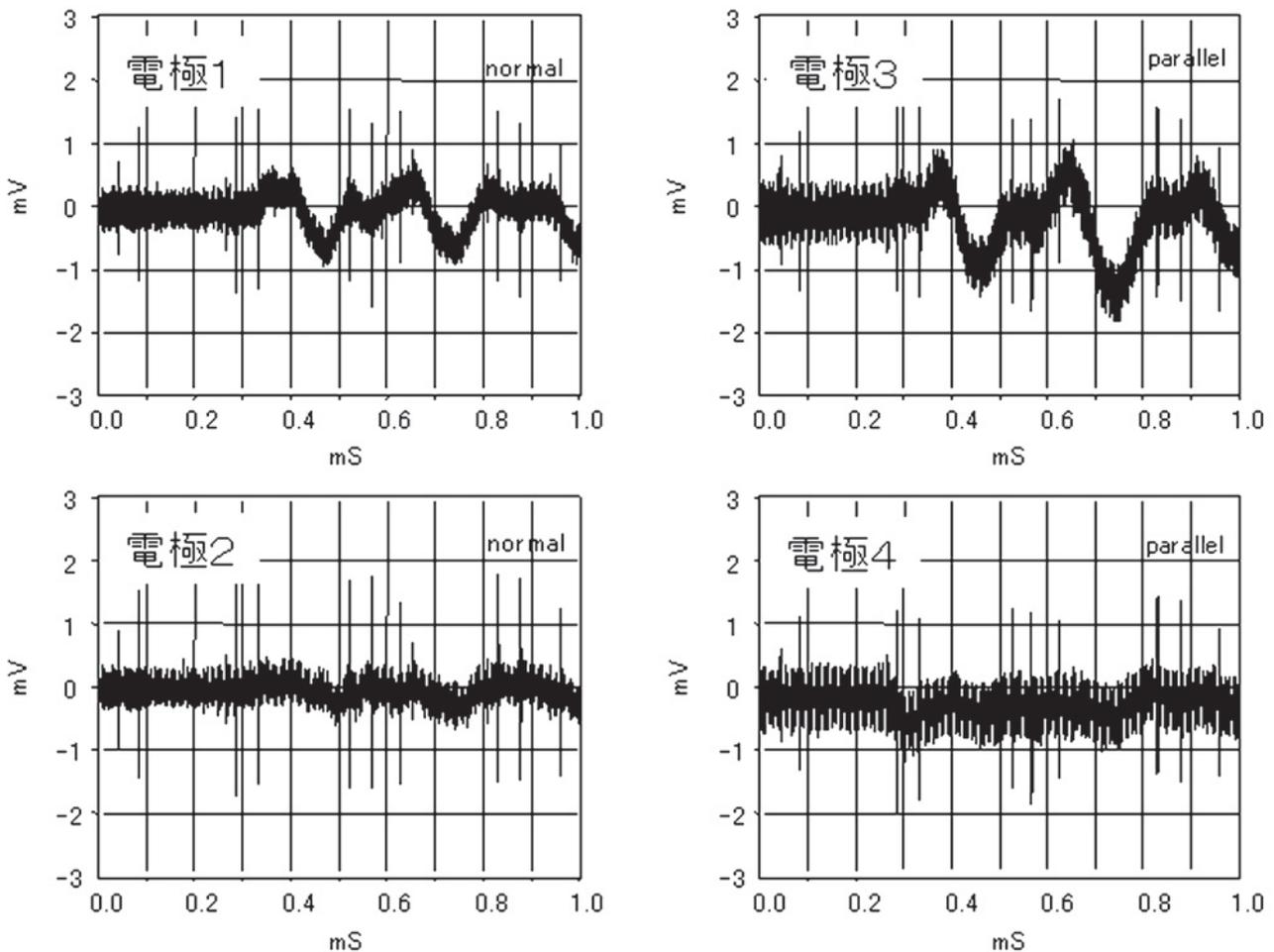
Fig. 14 Turn the specimen assembly one-half revolution. Signals detected by the electrodes of the gabbro sample exhibited opposite polarities only positioned parallel sides of the fault in the early stages.

して鉛直に生じたことを示している。一方、切断面に対して第10図の例のように平行配置、直角配置の両方の電極対の信号が逆極性を示しその振幅も両者ほぼ同じ値を示す場合は幾何学的なセンサ配置誤差に起因するものとは考えにくく、等価的な電気ダイポールがすべり面(楕円)の短軸方向成分を持つことを表している。即ち、帯電は盤のすべり面に一様に生じたのではなく面のある部分に局部的に生じたこと、しかも互いの極性の帯電中心がすべり面の短軸方向へ変位して生じたことを示している。

5. まとめ

いくつかの種類 of 岩石に関して、封圧下での摩擦実験を行い、固着すべり (stick-slip) 発生時における摩擦面近傍の電磁界変動計測を試みた。結果は以下のように要約される。

- (1) 斑レイ岩、カンラン岩、玄武岩などの石英(圧電性結晶)を含まない岩石を用いた摩擦実験においても、固着すべりのすべり時においては、全ての岩石試料において、すべりの開始時に顕著な電界・磁界の変動が観測される。観測された電・磁界信号は固着すべり時の急激なすべりと応力降下を伴う機構によって引き起こされると考えられる。一方、固着すべりを伴わない、定常すべり時には、電界、磁界信号が計測されない。
- (2) 電界信号の振幅はすべり面のすべり速度あるいは応力降下量の増大に伴って増加する。電界信号の発生には摩擦帯電と剥離帯電が密接に関与していると考えられるが、本実験で用いたセンサで検出可能な電界信号の発生には固着すべり初期の模擬断層面の急激なすべりと固着すべり時のすべり面の急激な分離のどちらかあるいは両方が必要である。



第 15 図 岩石試料を試料の軸周りに 270 度回転して電極との配置を変えた固着すべり時の電界信号波形.

Fig. 15 Turn the specimen assembly three-fourth revolution.

Signals detected by the electrodes of the gabbro sample exhibited opposite polarities only positioned parallel sides of the fault in the early stages.

- (3) 固着すべり時には高インピーダンス (分極) と低インピーダンス (電荷中和) の異なる過程が同時進行していると推測される。
- (4) 異方性確認実験において斑レイ岩試料 4 個のうち 3 個において摩擦すべり時に盤間に逆極性の電界変動が認められる。すなわち、摩擦面に対して高角 (直交) な方向に設置した電極間の信号が弱く、摩擦面に対して平行に近い方位に設置した電極間において計測される信号が優位に強い。
- (5) すべり面に平行に配置した電極に誘起される逆極性信号の強度は非対称である。
- (6) 平行、直行配置の両電極対が共に逆極性の電界変動を示す場合は等価的な電気ダイポールがすべり面 (楕円) の短軸方向成分を持つと推測される。

固着すべり現象は岩石、金属、プラスチック、合成ゴムなど多くの材料で観察されている (Brune *et al.*, 1993)。その端的な例が断層の固着すべりである地震

である。筆者らが実験で得た結果が些かなりとも地震の諸過程における断層とその周辺の電磁気的な挙動を解明する一助となれば幸いである。

謝辞: 本稿のご査読をいただき、ご助言、ご加筆をいただいた地圏資源環境研究部門の雷興林氏に厚くお礼申し上げます。

文 献

- 赤尾保男 (1991) 環境電磁工学の基礎. 電子情報通信学会, 東京, 356.
- Bodin, P., S. Brown., and D. Matheson. (1998) Laboratory observation of fault-normal vibrations during stick slip. *J. Geophys. Res.*, **103**, 29931-29944.
- Bouissou, S., J. P. Petit. and M. Barquins (1998) Experimental evidence of contact loss during stick-

- slip: possible implications for seismic behaviour. *Tectonophysics*, **295**, 341-350.
- Brady, B. T. and G. A. Rowell, (1986) Laboratory investigation of the electro-dynamics of rock fracture. *Nature*, **231**, 488-492.
- Brune, J. N., S. Brown. and P. A. Johnson. (1993) Rupture mechanism and interface separation in foam rubber models of earthquakes: a possible solution to the heat flow paradox and the paradox of large overthrusts. *Tectonophysics*, **218**, 59-67.
- Cress, G. O., B. T. Brady. and G. A. Rowell (1987) Sources of electromagnetic radiation from fracture of rock samples in the laboratory. *Geophys. Res. Lett.*, **14**, 331-334.
- Dieterich, J. H. and Kilgore. (1994) Direct observation of frictional contacts: new insights for state-dependent properties. *Pure Appl. Geophys.*, **143**, 283-302.
- Dieterich, J. H. (1979) Modeling of rock friction. 1. Experimental results and constitutive equations. *J. Geophys. Res.*, **84**, 2161-2168.
- Dickinson, J. T., Donaldson, E. E. and Park, M. K. (1981) The emission of electrons and positive ions from fracture of materials. *J. Mat. Sci.*, **16**, 2897-2908.
- Enomoto, Y. and Chaudhri, M. M. (1993) Fracto-emission during fracture of engineering ceramics. *J. Am. Ceram. Soc.*, **76**, 2583-2587.
- Enomoto, Y. and H. Hashimoto . (1990) Emission of charged particles from indentation fracture of rocks. *Nature*, **346**, 641-643.
- Frid, V., A. Rabinovitch. and D. Bahat. (1999) Electromagnetic radiation associated with induced triaxial fracture in granite. *Phil. Mag. Lett.*, **79**, 79-86.
- Frid, V., A. Rabinovitch. and D. Bahat .(2003) Fracture induced electromagnetic radiation. *J. Phys. D:Appl. Phys.*, **36**, 1620-1628.
- Johnson, T., F. T. Wu. and C. H. Scholz. (1973) Source parameters for stick-slip and for earthquakes. *Science*, **179**, 278-279.
- Johnson, T., and C. H. Scholz. (1976) Dynamic properties of stick-slip friction of rocks. *J. Geophys. Res.*, **81**, 881-888.
- Kawaguchi, Y. (1998) Charged particle emission and luminescence upon bending fracture of granite. *Japan. J. Appl. Phys.*, **37**, 3495-3499.
- Nakayama, K. and Nevshupa, R. A. (2003) Plasma generation in a gap around a sliding contact. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **35**, L53-L56
- Nitsan, U. (1977) Electromagnetic emission accompanying fracture of quartz-bearing rocks. *Geophys. Res. Lett.*, **4**, 333-336.
- Ogawa, T., K.Oike. and T. Miura. (1985) Electromagnetic radiations from rocks. *J. Geophys. Res.* **90**, 6245-6249.
- Ohnaka, M. (1973) Experimental studies of stick-slip and their application to the earthquake source mechanism. *J. Phys. Earth*, **21**, 285-303.
- O'Keefe, S. G. and D. V. Thiel. (1995) A mechanism for the production of electromagnetic radiation during fracture of brittle materials. *Phys. Earth Planet. Int.*, **89**, 127-135.
- Shimamoto, T., J. Handin. and J. M. Logan. (1980) Specimen-apparatus interaction during stick-slip in a triaxial compression machine: a decoupled two-degree-of-freedom model. *Tectonophysics*, **67**, 175-205.
- Sholz, C. H. and J. T. Engelder. (1976) The role of asperity indentation and ploughing in rock friction – I, *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, **13**, 149-154.
- Takeuchi, A. and Nagahama, H. (2001) Voltage changes induced by stick-slip of granites. *Geophys., Res., Lett.*, **28**, 3365-3368.
- Takeuchi, A. and H. Nagahama. (2002) Interpretation of charging on fracture or frictional slip surface of rocks. *Phys. Earth Planet. Inter.*, **130**, 285-291.
- Takeuchi, A. and H. Nagahama. (2006) Electric dipoles perpendicular to a stick-slip plane. *Phys. Earth Planet. Inter.*, **155**, 208-218.
- 遠矢弘和 (1999) はじめてのノイズ対策技術. 工業調査会, 東京, 155p.
- Tsutsumi, A., S. Tanaka, N. Shirai. and Y. Enomoto (2003) Electric signals accompanying fracture of granite. *Japan. J. Appl. Phys.*, **42**, 5208-5212.
- Tsutsumi, A., N. Shirai. (2008) Electromagnetic signals associated with stick-slip of quartz-free rocks. *Tectonophysics*, **450**, 79-84.
- 上村銑十郎 (1999) 近方界における電界強度測定は意味があるか. EMC. **32**, 40-44.
- Warwick, J. W., C. Stoker. and T. R. Meyer (1982) Radio emission associated with rock fracture: possible application to the great Chilean earthquake of May 22, 1960. *J. Geophys. Res.*, **87**, 2851-2859.
- Yamada, I., K. Masuda. and H. Mizutani (1989) Electromagnetic and acoustic emission associated with rock fracture. *Phys. Earth Planet. Inter.*, **57**, 157-168.
- Yoshida, S., P. Manjgaladze, D. Zilpimani, M. Ohnaka. and M. Nakatani (1994) Electromagnetic emissions associated with frictional sliding of rock. Electromagnetic phenomena related to earthquake prediction, edited by M. Hayakawa, and Y. Fujinawa, Terra Scientific Publishing Company, Tokyo. 307-322,

Yoshida, S., M. Uyeshima. and M. Nakatani (1997) Electric potential changes associated with slip failure of granite: Preseismic and coseismic signals. *J. Geophys. Res.*, **102**, 14883-14897.

(受付：2009年9月10日；受理：2009年11月4日)

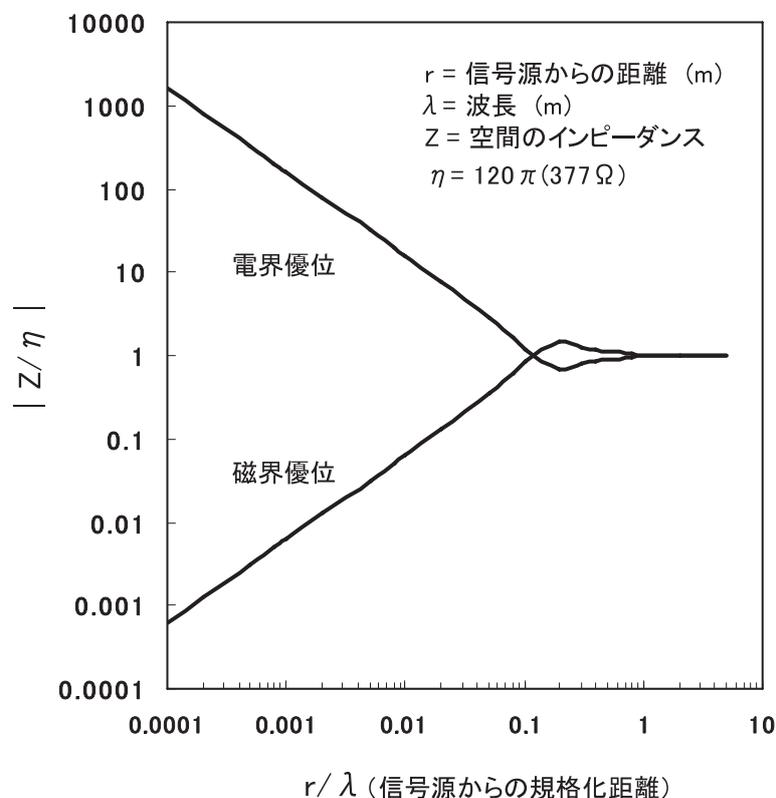
付 録

近傍電磁界計測における留意点

高压容器を用いたこれまでの岩石破壊電磁気に関する実験は、信号強度と容器の容積的な制約によってセンサが岩石試料のごく近傍に設置されている。このような実験で、高周波の信号を対象とする場合には、以下に述べる近傍界における波動インピーダンスの特徴に留意する必要がある。

電磁波の放射源からの距離が波長 λ の1/2程度より近い領域のことを近傍界と呼ぶ。この領域においては、界(場)の特性が主として波源そのものの特性によって決定されるため、遠方界のように平面波を前提とした電磁波の扱いが適用できなくなる(赤尾, 1991; 遠矢, 1999)。電界と磁界の強度比は空間インピーダンス、 Z により与えられるが、波源からの距離が波長 λ の1/2

程度より十分に離れた遠方電磁界においては、 Z の値は、自由空間の固有インピーダンス(377 Ω)に収束する(付図1 因みにこの値は真空中のインピーダンスである。油を圧媒体に使用するような場合には透磁率と誘電率の比が異なるため低い値となる)。したがってセンサが校正されていれば電界、磁界どちらか一方の測定値から他方の値を求めることができるが、近傍界ではインピーダンスが一定とはならず、放射源からの距離とともに大きく変化してしまう(付図1)。例えば、電気双極子の作る界(場)を考えると、波動のインピーダンスは波源に近づくにつれて増大し、波源近傍は高インピーダンスで電界が優位な界(場)となる。一方、磁気双極子の作る界においては、波源近傍は磁界の優位な低インピーダンス電磁界となる。界強度は距離に依存し、インピーダンスも距離と周波数によって変わるため、波源近傍で電界強度の絶対測定は極めて困難である(上村, 1990)。以上のような状況から、近傍電磁界では、電界または磁界のいずれか一方の測定値から他方を求めることは困難であるので、両者が混在するような場合には電界と磁界をそれぞれ別に計測する必要がある。得られたデータを検討するにあたってはこれらのことに加えセンサの校正が困難なことが定量的な議論を阻む要因になっていることを認識しておく必要がある。



付図1 近傍電磁界の規格化インピーダンス