

報 告

岩石の破壊電磁気現象に関する実験的研究

Experimental studies of electric signals associated with brittle deformation of rocks

堤 昭人\*・白井信正\*\*

Akito Tsutsumi\* and Nobumasa Shirai\*\*

**Key Words :** *Stick-slip, triaxial test, electric potential, electromagnetic measurement*

はじめに

これまでに、岩石の破壊や摩擦に伴う電磁気信号発生機構の解明を目的とした変形実験が多数行われている。その実験手法は様々であるが、広く行われているのは、通常の岩石破壊、摩擦実験などの変形実験を行って、周囲に配置したアンテナを用いた電磁気計測を行うタイプの実験である。したがって、実験の基本は岩石変形実験と信号計測である。信号計測においては、その対象が微弱な電磁気信号であるために、外来ノイズの遮蔽、除去などの対策が重要である。また、試料に近接した位置での信号計測になることから、特に岩石破壊や摩擦に伴って発生する高周波の電磁気信号を計測の対象とする場合には、近傍場での波動インピーダンスと信号特性の関係について計測上の留意点などをきちんと抑えておく必要がある。本報告では、これまでに行われている破壊電磁気計測実験の様々な手法を簡単に解説し、電磁気信号計測に際して留意すべき点を述べる。また、最近我々のすすめている実験研究手法の概要と予察の結果を報告して、この種の実験で得られる情報の一例を紹介する。

一般的な破壊誘起電磁気計測実験の手法

比較的多く行われている変形実験手法は、各種形状に整形した岩石試料に様々な手法で荷重を載荷することで変形させ、試料近傍にセンサを配置して電界、磁界、発光などの計測を試みるタイプのものである。荷重載荷の方法は、岩石に限らず材料の強度試験で一般的に用いられる手法(山口・西松, 1977)が採用されて

いる。例えば、載荷プレスを用いて円柱状の試料を圧縮破壊する一軸圧縮試験(Nitsan, 1977; Warwick et al., 1982; Yamada et al., 1989; 福井ほか, 2001)、棒状あるいは板状の試料の両端を支持点とし、中央部分を荷重点として載荷する曲げ試験(Kawaguchi, 1998)、ハンマー打撃や振り子式、落下式などの方法で金属製の錘を岩石試料にぶつけることにより試料を打撃する試験法(Ogawa et al., 1985; Yamada, et al., 1989)が用いられる。整形していない不規則形状の試料については、例えば金属平板間に試料を挟み載荷する手法が用いられている(Ogawa et al., 1985)。これまで実験は大気圧下で行われていたが、最近は圧力容器を用いた封圧下での三軸圧縮破壊実験も報告されるようになった(Frid et al., 1999, 2003)。摩擦実験は破壊実験に比べると多くは行われていない。代表的な実験としては、立方体に整形した岩石試料を押付けて両側の試料ブロックに相対変位を起こすタイプの二面剪断試験(Lockner, et al., 1986; Yoshida, et al., 1994, 1997)、あるいは円柱状試料の長軸に対して約30度の方向に切断面を入れ、圧力容器内で摩擦実験を行うもの(Takeuchi and Nagahama, 2001)などがある。

電界に関連した計測では、基準電位と試料表面に設けた電極間、あるいは試料近傍に設置した電極との間の電位変化を計測する手法が一般的にはとられる。一方、磁界センサとしては、フェライトコア+コイル型アンテナや、岩石の周囲あるいは円柱状試料に直接巻きつけたコイルセンサ(Yamada et al., 1989)、ループアンテナ(Frid et al., 1999, 2003)などが用いられる。

ノイズ対策上の留意点

信号計測においては、その対象が微弱な電磁気信号であること、および電位変動測定用のセンサに銀ペーストによる電極や金属板電極などを用いることが多く、センサ系のインピーダンスが高くなるため、電磁結合や静電結合による外来ノイズの影響を受けやすくなる。従って、信号伝送系のノーマルモードノイズやコモンモードノイズなどに対する一般的なノイズ対策の他に、場合によっては、センサ系へ混入する外来ノイズを避けるために電磁遮蔽を施す必要がある。実験場所の電磁環境や外来ノイズの影響、および計測側が要求する条件が既知の場合には、装置設計の段階で電磁遮蔽を施しておくことが望ましいが、実際には電磁環境や外来ノイズの特性およびその影響をあらかじめ把握することが困難な場合が多い。そのため、装置を設置した後に、ケースバイケースで、装置を磁気遮蔽効果の期待できる鉄やパーマロイ(高透磁率物質)、あるいは静電遮蔽効果を期待して導電率の大きい銅などの金属で新たに覆うというような対策を講じることになる。例えば、ここで紹介する我々の実験は、ステン

2005年9月1日受付。

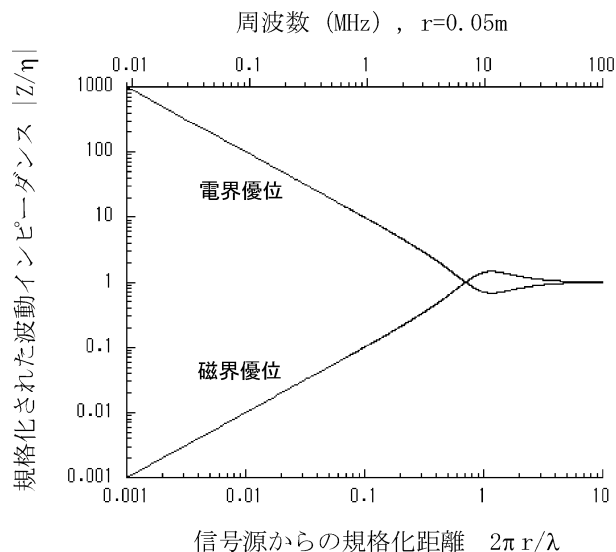
\* 京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻  
Division of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyoto University, Kyoto 606-8502, Japan

\*\* 産業技術総合研究所地質情報研究部門  
Institute of Geology and Geoinformation, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, AIST Central 7, Ibaraki 305-8567 Japan

レス鋼 (SUS630) 製の一般的な压力容器内部で変形と信号計測を行っているが、この容器には商用電源からの誘導や周辺機器の電磁ノイズに対して計測に支障のないレベルの遮蔽の効果が認められるので、压力容器表面について新たな電磁遮蔽は行わなかった。一方で、压力容器に侵入する载荷ピストンは、O-リングを用いてシールされているために压力容器とは非接触の状態にあり、電気的にも結合していない。このため、実験を実施するにあたっては、装置の各部に帯電する電荷の除去や、計測に障害を引き起こす可能性のある周波数に対して低インピーダンスを保つことを目的に、ピストンと压力容器を導電性のテープや導線などを利用して同電位にするボンディングが重要であった。

### 近傍電磁界計測における留意点

これまで行われている岩石破壊電磁気に関する実験は、大半におい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、近傍界における波動インピーダンスの特徴に留意して実験、データの評価を行う必要がある。ここに近傍界とは、電磁波の放射源からの距離が波長 $\lambda$ の1/2程度より近い領域のことである。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ようになり、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 $\lambda$ 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 $\Omega$ )に収束する(第1図)。この値は真空中のインピーダンスであるので、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)。従ってセンサが較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。一方、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(第1図)。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、波源近傍での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



第1図 電気双極子および磁気双極子の作る波動インピーダンスと波源一観測点間距離との関係。r: 信号源からの距離 (m),  $\lambda$ : 波長 (m),  $Z$ : 空間インピーダンス,  $\eta = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0} = 120\pi$  (377 $\Omega$ ): 自由空間の固有インピーダンス。

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。

### 電磁気信号計測例: 封圧下での変形実験

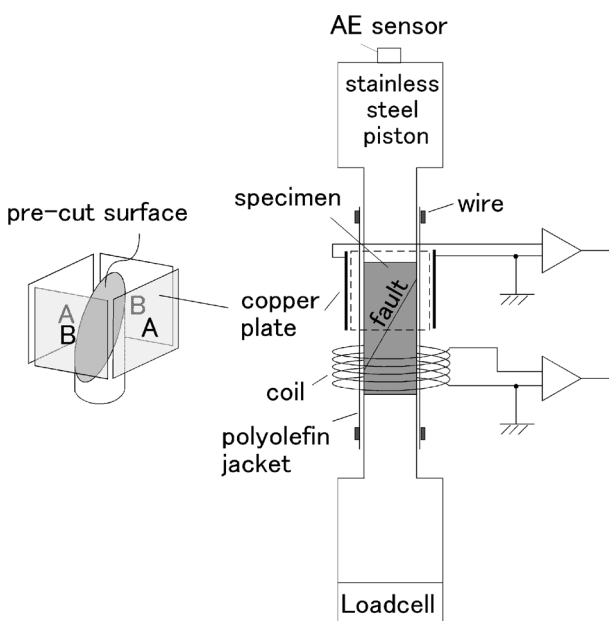
上に述べた近傍界の特異性は、試料近傍での計測をやっかいなものにしているように思える。しかしながら、逆に、このような性質を利用することで定性的にはあるが波源で起こっている現象に迫ることも可能である。例えば、電界・磁界の同時測定を近傍電磁界の領域で行って、もし岩石の種類によって電界センサと磁界センサの観測波形やそのレベルに大きな違いが見られるような場合には、波源の性質を電気双極子あるいは磁気双極子のいずれかのモデルで特徴付けられるような現象として特定することが出来よう。このような意図のもと我々は、花崗岩及び、石英を含まない幾つかの岩石に関して、封圧下での変形実験を行って、近傍界での電界・磁界変動の同時測定を試みている。ここでは摩擦実験についてその手法と実験結果の一部を簡単に紹介する。

#### 実験方法

実験は産業技術総合研究所に設置されている油圧式三軸変形試験機を用いて常温で行った。前述のように压力容器はステンレス鋼製で、容器の内径、外径はそれぞれ94mmと196mmである。封圧の微調整、ピストンの駆動はともに手動油圧ポンプにて行っている。また、ピストン変位、荷重はどちらも压力容器の外で測定している。試料には直径20mm×長さ50mmの円柱状に整形した花崗岩、玄武岩、ハンレイ岩、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）。実験に用いた封圧は 20 MPa~100 MPa で、ピストンの変位速度は約 0.003 mm/s である。

電磁気信号計測のために、圧力容器内部においては、岩石試料に対して近接して対向させた 2 枚の銅版電極（30 mm×30 mm）を 2 対配置している（第 2 図、電極対 A : 0.37 pF at 1 kHz, 電極対 B : 0.42 pF at 1 kHz）。同時に、試料周りには外径 42 mm のアクリル円筒にエナメル線を巻いたコイルアンテナ（206T, 13.7 Ω, 1 mH at 1 kHz）を配置しており、電極間およびコイルに誘起される電圧変動の検出を試みている。圧力容器からの信号取り出し用電極としては、西澤（1997）による多線型電極を利用した。ここで用いたコイルアンテナは、300 kHz 周辺に共振点を有する。回路に抵抗を挿入することで共振ピークを無くして周波数特性をより平坦にすることも可能であるが、同時に検出感度も下げることになるため、今回示す実験では信号の検出感度を優先して、抵抗素子による平坦化措置は施していない。現象を電圧の形で観測するには、入力インピーダンスをなるべく高く設定する必要があるため、プリアンプの入力インピーダンスを 1MΩ と高い値に設定している（(株)エヌエフ回路設計ブロック BX-31A, 周波数帯域は DC~70 MHz, 利得 100）。前述のように波源のインピーダンスが想定困難であることもあって、インピーダンス整合は施していない。

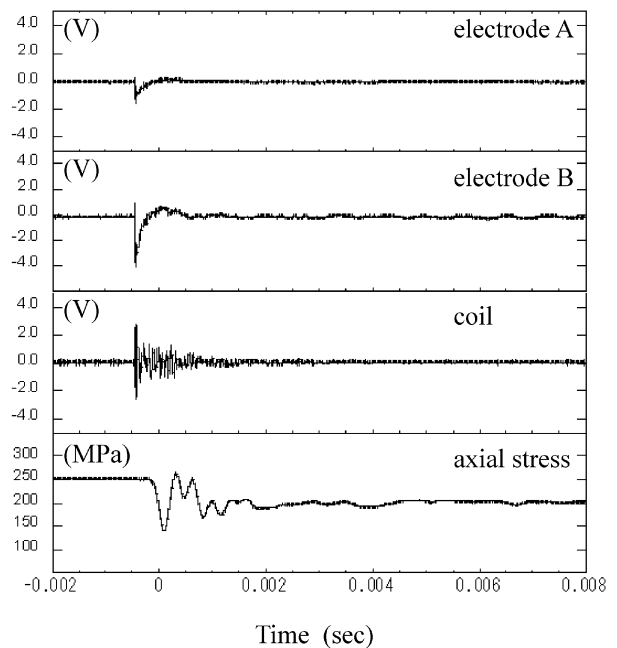


第 2 図 圧力容器内における岩石破壊や摩擦に伴う電磁気計測を目的とした実験システムの概略図。電極対 A が断層面に対して垂直、電極対 B が断層面の走向と平行になるよう試料を設置している。

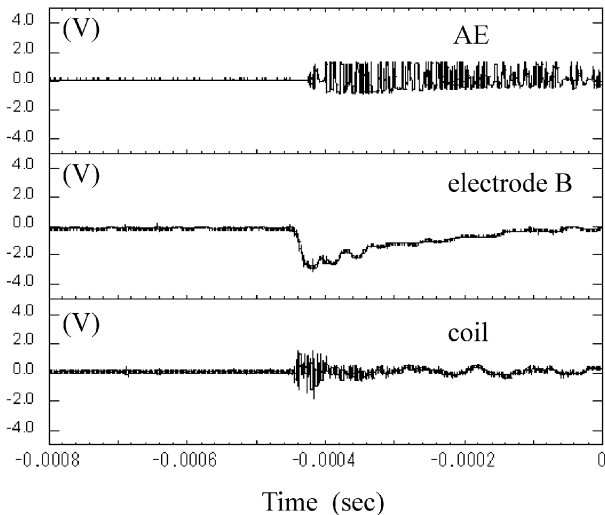
プリアンプからの出力は AE センサ、荷重変換器などの出力とともにサンプリング間隔 0.1 μs（10 MHz）でデジタルストレージ式オシロスコープ（IWATSU, DS-9244AM）に取り込んだ。計測では荷重信号変化をトリガーとして、トリガー時刻の前後あわせて 10 ms 時間分のデータを記録している。荷重変換器からの出力は、変位計出力とともに 1 ms のサンプリング間隔（1 kHz）でデジタル記録計（TEAC, DR-M2a）にも取り込んでいる。

**実験結果**

固着すべりを伴わない定常すべり時には、電界、磁界の変動は認められなかった。一方、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（AE の発生）に同期して顕著な電界・磁界の変動が認められた。第 3, 4 図に、細粒ハンレイ岩を用いた封圧 100 MPa と 30 MPa における実験結果を示す。電界、磁界変動の開始と AE 発生開始時刻の間には約 0.03 ms の時間差が認められるが（第 4 図）、AE センサの取り付け位置（第 1 図、試料から約 150 mm 上方のピストン端面）を考慮すると、両者は同期しているものと考えられる。注目すべき点は、電界と磁界の変動の波形が明らかに異なる点である（第 3, 4 図）。電界は、初期の急激な信号変化とその後の減衰する波尾で特徴付けられる。一方磁界は、初期の高周波（約 500 kHz）で減衰振動する成分（damped oscillation）と、それに続く、一定振幅で 1 ms 程度の定時間持続した後減衰する波形成分（約 10 kHz）からなる。電界



第 3 図 固着すべり挙動のすべり開始時における、軸荷重の降下をトリガーとして記録した電極 A, B, コイル、および軸応力変動の記録。ハンレイ岩、封圧 100 MPa。時間 0 がトリガー時刻で、その前後合わせて 10 ms 間の記録を保存。



第4図 固着すべり挙動のすべり開始時におけるAE, 電極B, およびコイルの記録. 時間軸を拡大して表示. ハンレイ岩, 封圧 30 MPa.

信号には摩擦面の方向に対して異方性が認められる(第3図). 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(第2図, 電極A)の信号が弱くて, 摩擦面に対して平行に近い方位に設置した電極間(第2図, 電極B)において計測される信号が有意に強い.

#### 実験結果について

岩石破壊時に, 電気的信号の発生や発光などの現象が伴われることが古くから知られており, 現象の発生機構に関していくつかのモデルが提唱されてきた(例えば山田, (1990)を参照). 流体の存在しない条件下での信号発生メカニズムとしては, 破壊やすべり時の応力降下に伴う石英結晶の圧電効果にその原因を求めるモデルがひろく取り上げられており, これまでに, 主に花崗岩を用いた破壊実験や摩擦実験が数多く行われている(Nitsan, 1977; Warwick et al., 1982; Yoshida, et al., 1994, 1997). しかしながらこの圧電モデルは, 石英を含まない岩石, すなわち圧電性結晶を含まない岩石の破壊に伴われる信号に関しては, その発生を説明することが出来ない. 他方では, 玄武岩, 石灰岩などの石英結晶を含まない岩石や輝石, カンラン石などの結晶の破壊にお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; Schloessin, 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.

脆性材料の破壊や摩擦に伴って, 亀裂面や摩擦面が帯電し, さらには荷電粒子, 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)についても同様の

現象を想定し, 微小亀裂表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). このモデルは, 対象とする岩石について圧電性結晶含有の有無を問わないので, 圧電モデルに対極するモデルとしてしばしば取り上げられる. しかしながらこの機構は, 石英を含まない岩石の破壊や摩擦について実験的に詳しく調べられているわけではない.

今回の実験では, 花崗岩試料だけでなく石英を含まない岩石(ハンレイ岩, カンラン岩)の固着すべり挙動においても, すべりに伴う顕著な電界, 磁界変動が確認されたことは重要である. 石英などの強圧電性結晶の圧電効果に因らない信号発生機構の存在が強く示唆される. 電界信号には摩擦面の方向に対して異方性が認められた. このことから, 摩擦面に直交した方向での分極が示唆される. さらに, 磁界変動信号が明瞭に記録されていることから, 摩擦面間あるいは摩擦面内で放電が生じたことを強く窺わせる. これらの結果は, 今後現象の発生モデルを構築, 検証する上での重要な知見となるであろう.

#### おわりに

本報告では, 岩石破壊や摩擦に伴って発生する高周波の電磁気信号計測を目的とした実験についてその基本的手法や計測上の留意点, あるいはこの種の実験で得られる情報についてこれまでに行われてきた実験や我々が最近行っている実験を紹介しながら解説した. 岩石破壊に伴われる電磁気現象の発生機構解明を目的とした実験としては他にも,  $10^{-5}$  Pa程度の真空装置内や雰囲気ガス中で行う放出物質の特定を目的とした実験(Brady and Rowell, 1986; Cress et al., 1987; Kawaguchi, 1998)や, 発生電荷量の測定を目的とした実験(Enomoto and Hashimoto, 1990; Tsutsumi et al., 2003)も行われている. また, 流体が存在するwetな条件下での実験として, 岩石変形時の界面動電現象を扱った実験的研究がある(Jouniaux and Pozzi, 1995; Lorne et al., 1999; Yoshida, 2001). 天然の岩石破壊に伴われる電磁気現象はいくつかの機構が合わさったものであろう. 実験の対象を単純化し, 目的に応じた実験手法によって現象発現の素過程を一つ一つ明らかにしていくことが重要である.

#### 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 p.
- Brady, B.T. and Rowell, G.A., 1986, Laboratory investigation of the electrostatics of rock fracture. *Nature*, **231**, 488-492.

- Cress, G.O., Brady, B.T. and Rowell, G.A., 1987, Sources of electromagnetic radiation from fracture of rock samples in the laboratory. *Geophys. Res. Lett.*, **14**, 331-334.
- Dickinson, J.T., Donaldson, E.E. and Park, M.K., 1981, The emission of electrons and positive ions from fracture of materials. *Jour. Mater. Sci.*, **16**, 2897-2908.
- Dieterich, J.H., 1979, Modeling of rock friction. 1. Experimental results and constitutive equations. *Jour. Geophys. Res.*, **84**, 2161-2168.
- Enomoto, Y. and Chaudhri, M.M., 1993, Fracture emission during fracture of engineering ceramics. *Jour. Amer. Ceram. Soc.*, **76**, 2583-2587.
- Enomoto, Y. and Hashimoto, H., 1990, Emission of charged particles from indentation fracture of rocks. *Nature*, **346**, 641-643.
- Frid, D., Rabinovitch, A. and Bahat, D., 1999, Electromagnetic radiation associated with induced triaxial fracture in granite. *Phil. Mag. Lett.*, **79**, 79-86.
- Frid, D., Rabinovitch, A. and Bahat, D., 2003, Fracture induced electromagnetic radiation. *Jour. Phys. D: Appl. Phys.*, **36**, 1620-1628.
- 福井勝則・大久保誠介・寺嶋卓文, 2001, 一軸圧縮試験における岩石からの電磁波の発生. 資源と素材, **117**, 703-710.
- Jouniaux, L. and Pozzi, J.P., 1995, Streaming potential and permeability of saturated sandstones under triaxial stress: Consequences for electrotelluric anomalies to earthquakes. *Jour. Geophys. Res.*, **100**, 10197-10209.
- Kawaguchi, Y., 1998, Charged particle emission and luminescence upon bending fracture of granite. *Japan. Jour. Appl. Phys.*, **37**, 3495-3499.
- Lockner, D.A., Byerlee, J.D., Kuksenko, V.S. and Ponomarev, A.V., 1986, Stick slip, charge separation and decay. *Pure Appl. Geophys.*, **124**, 601-608.
- Lorne, B., Perrier, F. and Avouac, J.P., 1999, Streaming potential measurements, 2. Relationship between electrical and hydraulic flow patterns from rock samples during deformation. *Jour. Geophys. Res.*, **104**, 17879-17896.
- Nakayama, K. and Nevshupa, R.A., 2002, Plasma generation in a gap around a sliding contact. *Jour. Phys. D: Appl. Phys.*, **35**, L53-L56
- 西澤 修, 1997, 封圧下での岩石のひずみと弾性波の多点計測のための油圧容器用多線型および同軸型電気信号取り出し口. 地質調査所月報, **48**, 431-438.
- Nitsan, U., 1977, Electromagnetic emission accompanying fracture of quartz-bearing rocks. *Geophys. Res. Lett.*, **4**, 333-336.
- Ogawa, T., Oike, K. and Miura, T., 1985, Electromagnetic radiations from rocks. *Jour. Geophys. Res.*, **90**, 6245-6249.
- Schloessin, H.H., 1985, Experiments on the electrification and luminescence of minerals and possible origins of EQLs and sferics. *Ann. Geophys.*, **3**, 709-720.
- Takeuchi, A. and Nagahama, H., 2001, Voltage changes induced by stick-slip of granites. *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 3365-3368.
- 遠矢弘和, 1999, はじめてのノイズ対策技術. 工業調査会, 東京, 155 p.
- Tsutsumi, A., Tanaka, S., Shirai, N. and Enomoto, Y., 2003, Electric signals accompanying fracture of granite. *Japan. Jour. Appl. Phys.*, **42**, 5208-5212.
- 上村銑十郎, 1990, 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., Stoker, C. and Meyer, T.R., 1982, Radio emission associated with rock fracture: possible application to the great Chilean earthquake of May 22, 1960. *Jour. Geophys. Res.*, **87**, 2851-2859.
- Yamada, I., Masuda, K. and Mizutani, H., 1989, Electromagnetic and acoustic emission associated with rock fracture. *Phys. Earth Planet. Inter.*, **57**, 157-168.
- 山田功夫, 1990, 岩石の破壊に伴う電磁気的現象の発生機構, *Conductive Anomaly* 研究会論文集, 39-48.
- 山口梅太郎・西松裕一, 1977, 岩石力学入門. 東京大学出版会, 東京, 266 p.
- Yoshida, S., 2001, Convection current generated prior to rupture in saturated rocks. *Jour. Geophys. Res.*, **106**, 2103-2120.
- Yoshida, S., Manjgaladze, P., Zilpimani, D., Ohnaka, M. and Nakatani, M., 1994, Electromagnetic emissions associated with frictional sliding of rock. In Hayakawa, M. and Fujinawa, Y., eds., *Electromagnetic phenomena related to earthquake prediction*, Terra Scientific Publishing Company, Tokyo, 307-322.
- Yoshida, S., Uyeshima, M. and Nakatani, M., 1997, Electric potential changes associated with slip failure of granite: Preseismic and coseismic signals. *Jour. Geophys. Res.*, **102**, 14883-14897.