

岩石の破壊誘起電磁気現象発生機構の解明

(課題番号 13640459)

平成13年度～平成14年度科学研究費補助金(基盤研究(C)(2))

研究成果報告書

京都大学図書



9810058890

附属図書館

平成15年3月

研究代表者 堤 昭人

(京都大学大学院理学研究科)

科研

2002

286

岩石の破壊誘起電磁気現象発生機構の解明

(課題番号 13640459)

平成13年度～平成14年度科学研究費補助金(基盤研究(C)(2))

研究成果報告書

平成15年3月

研究代表者 堤 昭人

(京都大学大学院理学研究科)

は し が き

国内外を問わず、地震関連電磁気現象の解明を目指して、岩石破壊に伴う電磁気現象の発現機構の解明を目的とした様々な実験的研究が行われてきた。破壊領域における流体の移動に起因するもの（界面動電現象）を除けば、電磁気的な信号発生の機構として最も広く研究され、また多くの人に受け入れられているのは、石英結晶の圧電性（ピエゾ効果）にその原因を求めるものである。しかし、震源域には、花崗岩のような石英主体の岩石が必ず存在するという訳ではないので、全ての現象の発生源を石英の圧電に求めることには無理がある。一方で、最近のいくつかの研究では、石英を含まない岩石試料の破壊時にも顕著な電界の変動が検出されることから、石英結晶に依らない信号発生のメカニズムの存在する可能性が指摘されるようになった。しかしながら、その発生条件、機構などはほとんど調べられてない。本研究では、このような背景から、岩石破壊時の電磁気現象発生機構の評価を行うことを目的として以下の項目について研究を行った：（１）試験システムの試作、（２）様々な種類の岩石の摩擦試験、三軸圧縮破壊試験による変形時の電荷変動、電界変動等のその場計測。本研究の主な成果は以下のよう

簡易型 3 軸圧縮変形試験システムの設計・製作

封圧 200 MPa (2 kbar) 程度までの条件での岩石の破壊試験、および対向アンテナによる電界計測、試料表面の発生電荷計測が圧力容器内部で行えるような小型の試験システムを導入した。電磁気的計測を行うことを主たる目的とするため、圧力や荷重の載荷システムには、手動ポンプを利用して極力外部ノイズを避ける仕様を採用した。一般に、圧力容器を用いた岩石の試験システムは、大がかりで高価な油圧載荷システムを用いて行われる。本システムにおいては圧力容器の構造を検討し、内部にヨークシステムを採り入れることで載荷ライン等を最大限に簡素化した。

電磁界変動検出用アンテナの試作

静水圧下での電界、磁界測定をおこなうために、圧力容器内に組み込めるアンテナ 2 種類を試作した。電界変動計測システムは、岩石試料に対し近接して対向させた 2 枚の板状銅板電極 (30mm×30mm) を 2 対配置して、電極間に誘起される電荷変動の検出する仕様とした。プリアンプの入力インピーダンスは計測する信号の信号源インピーダンスが大きいことと、信号線接続による損失を少なくするために 1 MΩ に設定した (周波数帯域は DC ~ 70 MHz, 利得 100)。

岩石破壊に伴う電荷変動信号の解析

岩石破壊に伴い検出される電荷信号の性質を、センサーの特性も含め定量的に解析した。直径約 20mm の岩石試料の破壊により誘起される電荷量は、放電時定数が約 1 ms の積分回路で近似されるセンサー回路を用いた場合、約 10^{-11}C となることがわかった。試料の断面積（約 3cm^2 ）と破壊前の信号発生継続時間（約 10s）の値を用いると過渡電流密度として 10^{-12}A/cm^2 の値が得られる。M=6 の地震における典型的な震源域の面積（ 10^8m^2 ）を用いて震源での発生電流を見積もると、およそ 1A となる。この値は、一般に言われている地表での電磁気異常観測データを説明するものとしては 2 桁程度小さいことが明らかになった。

導電性ダイヤモンド圧子を電極として用いた摩擦実験における摩擦電磁気現象の計測

花崗岩、斑レイ岩、石灰岩などの板状整形試料において、ピンオンディスク型の摩擦試験を行い、垂直加重を変化させた時の力学的性質の変化と、それに伴う AE 信号、電荷発生強度等の信号変化の関係を調べた。電荷の検出においては、導電性ダイヤモンド圧子部分を電極として用いた。結果、試料中の石英の有無に関わらず、全ての試料において顕著な電荷発生が認められた。電荷発生のタイミングは、スティック・スリップに伴う垂直載荷重降下およびそれに伴う AE 信号の発生と密接に関連している。又、電荷信号強度は、AE 信号強度（イベント積算数）の増加に伴って線形に増加する関係が認められた。

本報告書には、本研究で設計・製作した試験機システムの概要と上記実験結果の一部、およびこれらの成果のうち印刷中の論文を掲載した。その他の成果についても順次公表していく予定である。また、本報告書には、本研究費旅費を用いて行った、震源域での岩石変形把握を目的とした調査研究結果をまとめた内容も含まれている。

研究組織

研究代表者：堤 昭人（京都大学・大学院理学研究科・助手）

研究分担者：嶋本利彦（京都大学・大学院理学研究科・教授）

研究分担者：白井信正（産業総合技術研究所・主任研究官）

研究経費

平成 13 年度	2,900 千円
平成 14 年度	1,200 千円
合計	4,100 千円

研究発表

(1) 学会誌等

Tsutsumi, A., Tanaka, S., Shirai, N. and Enomoto, Y. Electric signals accompanying fracture of granite, *Japanese Journal of Applied Physics*, in press.

佐藤慶治・堤 昭人, 柳ヶ瀬断層の内部構造と透水性構造, 構造地質, 印刷中

Hashimoto, H., Enomoto, Y., **Tsutsumi, A.**, and Kasahara, M., (2002) Anomalous geo-electric signals associated with recent seismic activities in Tsukuba and volcanic activity at Mt. Usu in Hokkaido, in: *Seismic Electromagnetics, Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling*, Ed. By M. Hayakawa & O. A. Molchanov, pp. Terra Scientific Publication, Tokyo, 77-80.

Tsutsumi, A., Nishino, S., Mizoguchi, K., Hirose, T., Uehara, S., Sato, K., Tanikawa, W. and Shimamoto, T. Internal and permeability structures of the Neodani fault, Nobi active fault system, central Japan, *Tectonophysics*, submitted.

堤 昭人・廣瀬丈洋・溝口一生・佐藤慶治・嶋本利彦, ガス圧式三軸変形試験機を用いた岩石の浸透率測定—掛川層群の浸透率構造解析例—, 資源・素材学会特集号, 査読中

(2) 口頭発表

西野真一郎・堤 昭人・嶋本利彦, 2001, 高知県手結周辺に分布する四万十帯の透水性, 日本地質学会第 108 年学術大会 (金沢大学) 講演要旨集, p. 263.

Tsutsumi, A, Uehara, S, Mizoguchi, K, Nishino, S, Hirose, T, Tanikawa, W, Wibberley, C, J, and Shimamoto, T, 2001, Internal and permeability structures of several active fault zones in Japan. Proceedings of International symposium on slip processes in and below the seismogenic region (仙台).

Tsutsumi, A, 2002, Sliding behavior and deformation textures of simulated gouge: A review. 地球惑星科学関連学会 2002 年合同大会予稿集, CD版.

西野真一郎・堤 昭人, 2002, 高知県四万十帯の内部構造と浸透率, 日本地質学会第 109 年学術大会 (新潟大学) 講演要旨集

西野真一郎・堤 昭人, 2003, 四万十付加体の間隙率・浸透率構造, 構造地質研究会
2002 年度例会講演要旨 (静岡大学), 36-37.

白井信正・堤 昭人, 2003, 封圧下での岩石破壊に伴い発生する過渡電磁気現象に関する実
験的研究, 2003, 地球惑星科学関連学会 2003 年合同大会予稿集, CD版

平成13年度～平成14年度科学研究費補助金（基盤研究（C）（2））

（課題番号 13640459）研究成果報告書

岩石の破壊誘起電磁気現象発生機構の解明

目次

- | | | |
|--|----|---|
| 堤 昭人・白井信正 | 1 | 岩石破壊に伴い発生する過渡電磁気現象に関する研究—試験機システムの概要と破壊実験結果— |
| Tsutsumi, A., Tanaka, S., Shirai, N. and Enomoto, Y. | 14 | Electric signals accompanying fracture of granite, <i>Japanese Journal of Applied Physics</i> , in press. |
| Hashimoto, H., Enomoto, Y., Tsutsumi, A., and Kasahara, M. | 27 | Anomalous geo-electric signals associated with recent seismic activities in Tsukuba and volcanic activity at Mt. Usu in Hokkaido, in: <i>Seismic Electromagnetics, Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling, Ed. By M. Hayakawa & O. A. Molchanov, pp. Terra Scientific Publication, Tokyo, 77-80, (2002)</i> |
| 佐藤慶治・堤 昭人 | 31 | 柳ヶ瀬断層の内部構造と透水性構造, 構造地質, 印刷中 |
| 堤 昭人・廣瀬丈洋・溝口一
生・佐藤慶治・嶋本利彦 | 39 | ガス圧式三軸変形試験機を用いた岩石の浸透率測定—掛川層群の浸透率構造解析例—, 資源・素材学会特集号, 査読中 |

岩石破壊に伴い発生する過渡電磁気現象に関する研究

—試験機システムの概要と破壊実験結果—

堤 昭人・白井信正

Mechanism of transient electric activities associated with rock failure

Akito Tsutsumi and Nobumasa Shirai

1. 設計・製作した液圧式三軸圧縮試験システムの概要

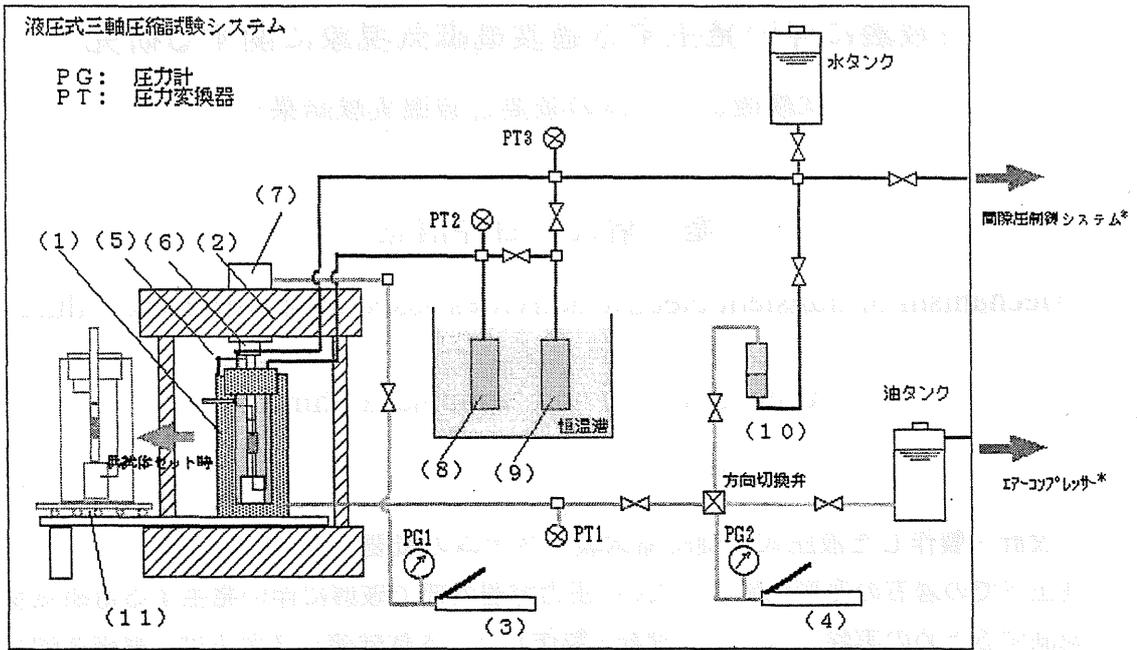
高圧下での岩石の変形試験を行ない、圧力容器内部で破壊に伴い発生する電磁気現象を観測するための実験システムを設計・製作した。本試験機システムは、電磁気的なノイズを極力除外する目的で、全ての動作を手動でおこなうことが出来るように設計された液圧式簡易三軸試験システムである(図1. 1, 1. 2)。圧力容器を用いた岩石の変形試験は、一般に大がかりで高価な油圧载荷システムを用いて行われる。本システムにおいては、圧力容器内部のヨークシステム(図1. 3)、手動プレスによる载荷方式等を採用することでシステムを最大限に簡素化した。仕様、特徴は以下の通りである。

仕様

- ・ 供試体寸法： 径 20 or 25 mm 長さ ~100 mm
- ・ 軸荷重： 50 ton
- ・ 封圧(側圧)： 200 MPa (手動ポンプ式)
- ・ 間隙圧(水)： 20MPa (手動ポンプ式)
- ・ ピストン変位： 20 mm (手動制御)

特徴

- ・ 圧力容器内部にヨーク(封圧補償システム)を組み込んでいるために、高圧下でのピストンの押し出しに配慮する必要がなく、アクチュエーターの負荷能力を最大限に利用することが可能。
- ・ 圧力容器は、上部のみ開放したポッド型を採用したため、供試体のセット、シールまわりのメンテナンス等が容易に行える。
- ・ 圧力容器は、容器上部よりピストンに载荷する方式のため、アクチュエーターを上方に設置することができ、汎用の一軸圧縮プレスへの組み込みが可能。
- ・ 本システムでは、すべての载荷動作を、油圧ハンドプレスを用いた手動で行うために、システム内に電氣的ノイズの発生源が少なく、圧力容器内部での精密な電磁気計測実験などに向いている。



- (1) 圧力容器 (液圧 2 k b) (2) 載荷フレーム (汎用圧縮プレス 50ton用)
 (3) ハンドプレス 700kg/cm² (アクチュエーター用) (4) ハンドプレス 2000kg/cm² (封圧用)
 (5) 変位計 (6) 荷重計 (7) アクチュエータ (8)、(9) 間隙流体貯留容器
 (10) 流体変換器 (油/水) (11) 圧力容器スライド板
 * オプション

図 1. 1 液圧式三軸変形浸透試験システム図

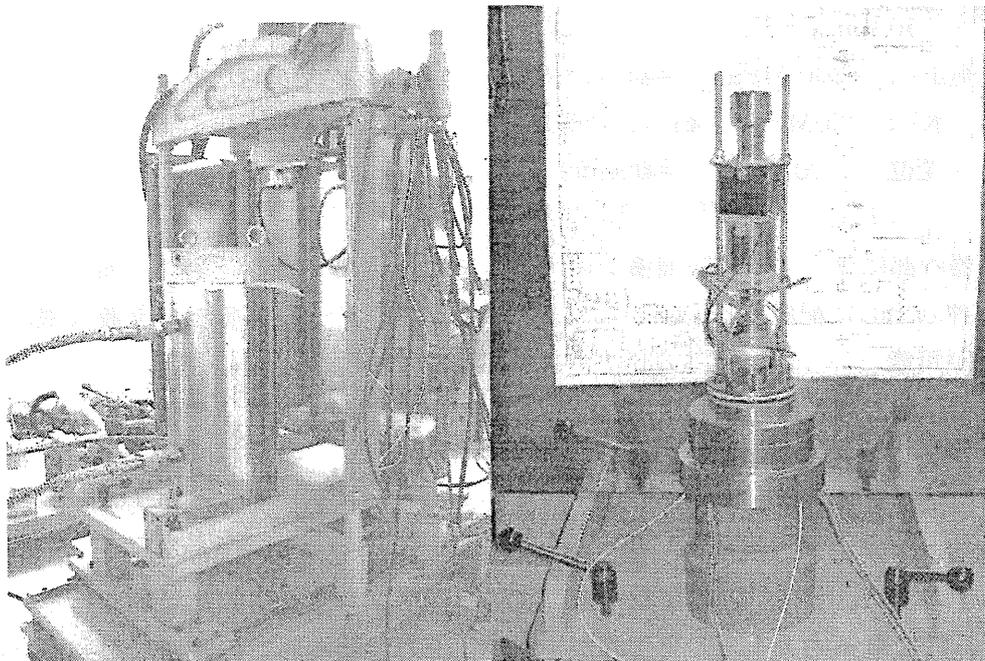


図 1. 2 試験機システム写真 (左) と圧力容器内部アンテナシステム (右)

2. 強度計算

2・1 圧力容器本体

$$\sigma_{T(\max)} / S = \frac{k^2 + 1}{k^2 - 1} P(\text{内圧})$$
$$P = \frac{\sigma_T k^2 - 1}{S k^2 + 1}$$

SNCM439 (Cr 多い) 降伏点 885 N/mm² 引張強度 980N/mm² (10000kg/cm²)

直径 3 cm の丸棒なら約 6.1 トンで降伏

直径 2.5 cm の丸棒なら約 4.2.5 トンで降伏

SNCM630 (Mo 多い) 降伏点 885 N/mm² 引張強度 1,080 N/mm²

60-200φ 容器全長は、440程度 (短すぎ! CD50M riken の寸法 E 変更)

安全率 4 なら $P = \frac{980}{4} \left(\frac{10.09}{12.09} \right) = 204.5 [MPa]$

70-200φ $P = \frac{980}{4} \left(\frac{7.16}{9.16} \right) = 191.5 [MPa]$ 200MPa で S=3.83

70-220φ $P = \frac{980}{4} \left(\frac{8.88}{10.88} \right) = 200.0 [MPa]$

80-220φ $P = \frac{980}{4} \left(\frac{6.56}{8.56} \right) = 187.8 [MPa]$ 200MPa で S=3.76

2・2 補償室

40-100φ $P = \frac{980}{4} \left(\frac{5.25}{7.25} \right) = 177.4 [MPa]$

2・3 ねじの強度計算

2kb でネジが受ける力

内径 70mm $2000 \times (3.5^2 - 1.5^2) \times 3.14 = \underline{62.8 \text{ ton}}$

内径 80mm $2000 \times (4.0^2 - 1.5^2) \times 3.14 = \underline{86.4 \text{ ton}}$

3kb では

$$3000 \times (4^2 - 1.5^2) \times 3.14 = 129.5 \text{ ton}$$

【ネジ山一個の剪断を受ける面積】

六角穴付きボルト (並目) M24 (ヘッド最大径 36.4mm おねじ谷径 24mm, ピッチ 3mm)

$$\text{一つのネジ山底面の面積} = 2.26 \text{ cm}^2$$

$$\text{ネジ 8 本だと } \underline{18.1 \text{ cm}^2}$$

六角穴付きボルト (並目) M36 (ヘッド最大径 54mm, おねじ谷径 36mm, ピッチ 4mm)

$$\text{一つのネジ山の面積} = 4.52 \text{ cm}^2$$

$$\text{ネジ 8 本だと } \underline{36.1 \text{ cm}^2}$$

六角穴付きボルト (並目) M42 (ヘッド最大径 63mm, おねじ谷径 42mm, ピッチ 4.5mm)

$$\text{一つのネジ山の面積} = 5.93 \text{ cm}^2$$

$$\text{ネジ 8 本だと } \underline{47.4 \text{ cm}^2}$$

直径 140mm の台形ネジだと

$$\text{一つのネジ山の面積 } 14 \times 3.14 \times \text{ネジの底面幅}$$

$$\text{底面幅} = 0.85 \quad S = 37.3 \text{ cm}^2$$

【ネジ山 1 本の剪断応力】

直径 80mm 86.4ton

$$\text{M24 } 86400 / 18.1 = 4773.4 \text{ bar (467.8 MPa)}$$

$$\text{M36 } 86400 / 36.1 = 2393.4 \text{ bar (234.5 MPa)}$$

$$\text{M42 } 86400 / 47.4 = 1822.8 \text{ bar (178.6 MPa)}$$

3. 実験結果

3・1 岩石の一軸圧縮破壊時の電荷変動・電界変動同時計測

地震電磁気現象発生メカニズム解明を目的とした岩石変形・破壊あるいは摩擦試験が数多く行われており、幾つかの手法で破壊に関連した信号が計測されている。破壊領域における流体（液相，気相）の移動に起因するものを除けば、岩石破壊に伴う電磁気現象発現のメカニズムとして広く支持されているのは、岩石中の石英結晶の圧電効果にその原因を求めるものである。一方で、これまでの我々の電荷検出器を用いた実験においては、石英を含まない岩石試料の破壊時にも顕著な電荷の変動が検出されることから、石英結晶に依らない信号発生のメカニズムの存在する可能性が指摘されていた。今回、花崗岩及び、石英を含まない幾つかの岩石や、MgO単結晶に関して、一軸破壊実験を行い電荷変動と同時に電界変動の計測を行ったので、ここにその結果の概略を報告する。

3・1・1 実験方法

試料には15x15x30mmに整形した花崗岩（稲田産，真壁産の2種類），玄武岩，ハンレイ岩，カンラン岩，蛇紋岩，石灰岩試料および，24x12x6mmのMgO単結晶を用いた。

実験は外部の電磁気的影響を減ずるために，銅箔と亜鉛メッキ鋼板で覆ったシールドボックスを用い，試料への載荷は雑音を避けるためにハンドプレスにて行った（図3・1）。電荷は，試料表面に塗布した銀ペーストを電極として，チャージアンプにて計測している。電界の計測においては，試料に近接して対向させた2対の銅板電極を用いて，電位変化を入力抵抗1M Ω のデジタルオシロスコープにて計測した。

3・1・2 実験結果

これまでに報告されている結果と同様，花崗岩試料にのみ主破壊前の変形加速ステージにおける顕著な電荷変動が認められた。また，微弱ながら幾つかの実験では，電荷変動と同期して電界の変動も認められた。加えて，電荷の発生にはAEの発生との明瞭な関連性が認められる（図3・2）。一方で，石英を含まない試料（玄武岩，ハンレイ岩，カンラン岩，蛇紋岩）においては，主破壊に先行するAEの発生が認められるものの，電荷および電界に顕著な変動は認められなかった。これらのことから，主破壊前に計測される信号発生においては石英の圧電効果が主たる要因となっているものと考えられる。

一方，主破壊時には石灰岩を除く全ての試料において，顕著な電荷および電界の変動が認められた（図3・3）。対向電極においては，主たる変動として，数10msで減衰する振動的な波形が記録され，微小な変動としては，少なくとも整定時間が主たる変動の数倍程度持続する変化が見られた。花崗岩，はんれい岩で，破壊に伴って記録される電場変動信号のレベルに大きな差は認められない。また，MgOの破壊においては，信号の

急激な変化を断続的に含む特徴的変動が認められた。この特徴は MgO 結晶の強い劈開性に起因する可能性がある。記録された電界信号には、劈開面に直交する方向と平行な方向とで顕著な異方性が認められた (図 3. 4)。

3・1・3 まとめ

今回の実験で、強圧電性結晶である石英を含まない岩石 (例えばはんれい岩、蛇紋岩) あるいは非圧電性結晶である MgO の破壊に伴い、試料表面の電荷および電界の明瞭な変動が認められた。このことは、これら試料の破壊により、試料近傍に圧電分極以外の原因で過渡的な電場が形成されたことを意味している。この種の岩石破壊実験における電磁気信号計測においては、破壊そのものに起因する電磁気現象が存在することを意識して今後の研究をすすめる必要がある。

3・2 封圧下での岩石破壊時の電磁気信号変化

3・2・1 実験方法

上記一軸破壊試験と同様の実験を三軸試験機内で行った。封圧媒体としては油を用いており、今回の封圧条件は 20, 60, 100MPa である。試料には $\phi 20\text{mm} \times 40\text{mm}$ の円柱状に整形した花崗岩 (稲田産、真壁産)、玄武岩、はんれい岩、かんらん岩を用いた。これらの供試体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。実験では、規定の封圧を加えた後、試料が破壊するまで差応力を加え、破壊時の電磁気信号の変動を計測している。

電界変動は岩石試料に対し近接して対向させた 2 枚の板状銅板電極 ($30\text{mm} \times 30\text{mm}$) を 2 対配置して電極間に誘起される電荷変動の検出を試みた。プリアンプは計測する信号の信号源インピーダンスが大きく、しかも接続による損失を少なくするために入力インピーダンスは $1\text{M}\Omega$ に設定した (周波数帯域は DC \sim 70MHz, 利得 100)。一方、磁界変動は $\phi 42\text{mm}$ の中空単層円筒コイル (全巻数 206) をセンサとして用いて、試料の一部が円筒コイル内に収まるように同軸上に配置した。コイルセンサのプリアンプには入力インピーダンス $1\text{M}\Omega$, 周波数特性は DC \sim 10MHz のものを使用して、これらの同時計測を試みた。

3・2・2 実験結果

封圧下での実験においても、花崗岩試料にのみ、主破壊前の変形加速ステージにおける顕著な電界および磁界変動が認められた。これらの変動には AE の発生との明瞭な関連性が認められる。石英を含まない試料においては、主破壊に先行する AE の発生が認められるものの、磁界および電界に顕著な変動は認められなかった。これらのことから、主破壊前に計測される信号発生においては石英の圧電効果が主たる要因となっているものと考えられる。

一方、主破壊時には全ての試料において、顕著な電界と磁界の変動が認められた(図3.5, 図3.6)。いずれの試料においても磁界変動信号のレベルに大きな差は認められないものの、強圧電性結晶である石英を含まない玄武岩、ハンレイ岩、カンラン岩の破壊に伴う電界変動信号については、岩石の種類によって大きなレベルの差が認められた(図3.5, 図3.6)。これらのことは、強圧電性結晶を含まない試料においては、新生面の形成とそれに続く破断面での剪断摩擦過程において過渡的な電磁場が形成されたものと考えられる。他方、花崗岩の破壊における電磁波の発生ではこれらの過程に石英の圧電効果が加わって電磁場が形成されたものと考えられる。

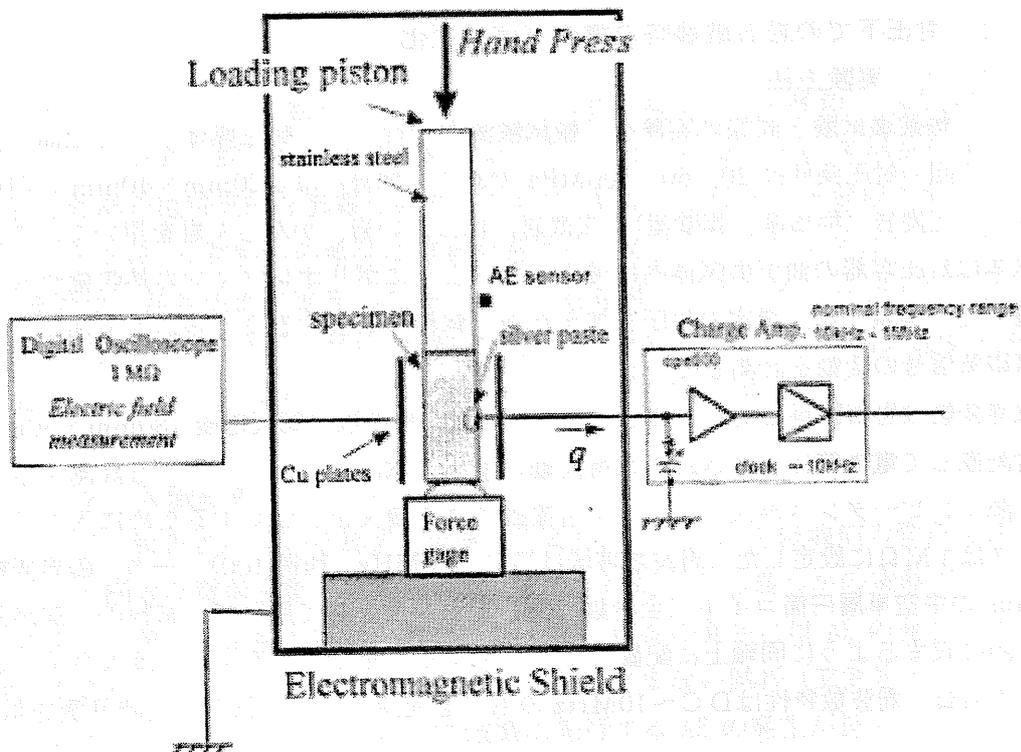


図3.1 岩石一軸破壊時の電荷，電磁界変動計測実験システム

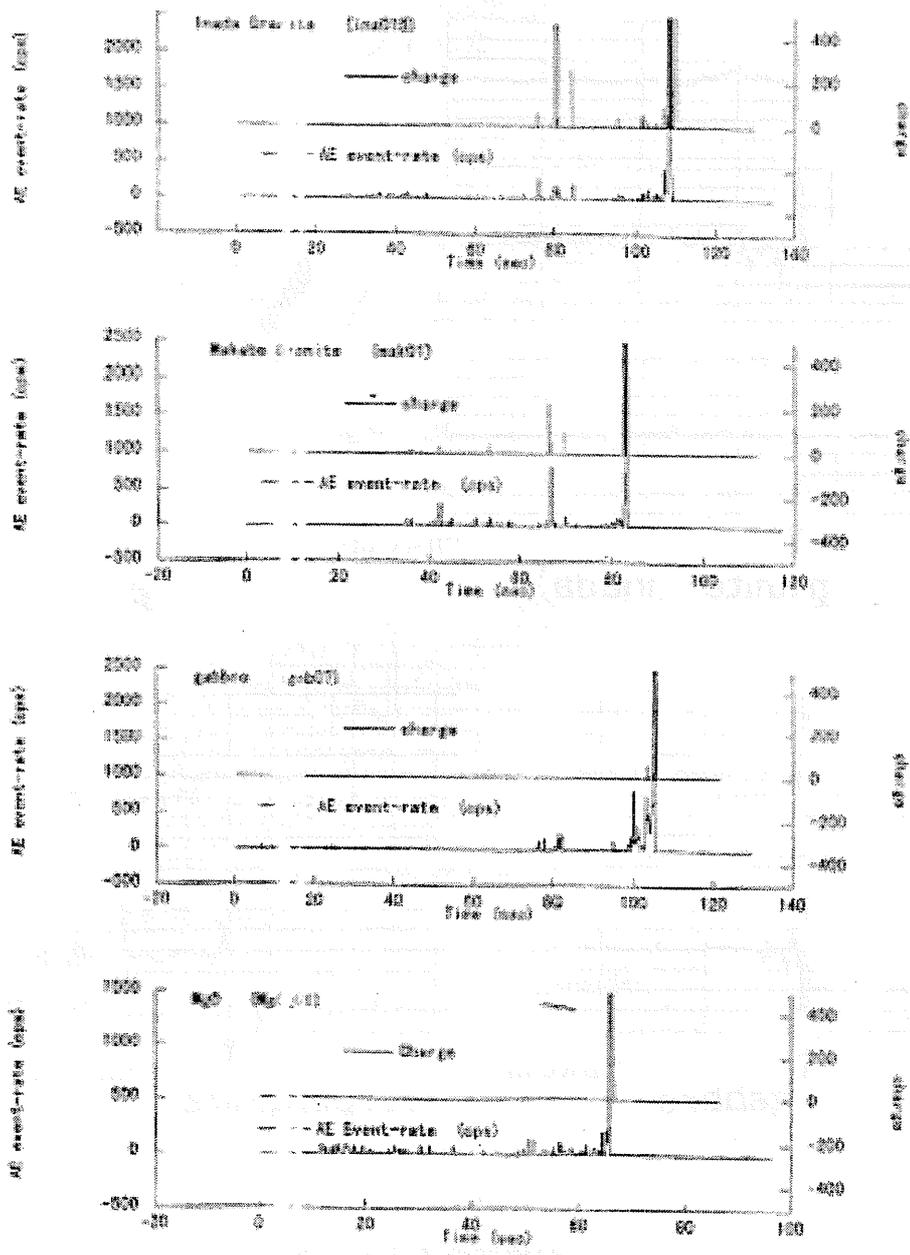


図3. 2 岩石破壊時の電荷変動とAE変動データ

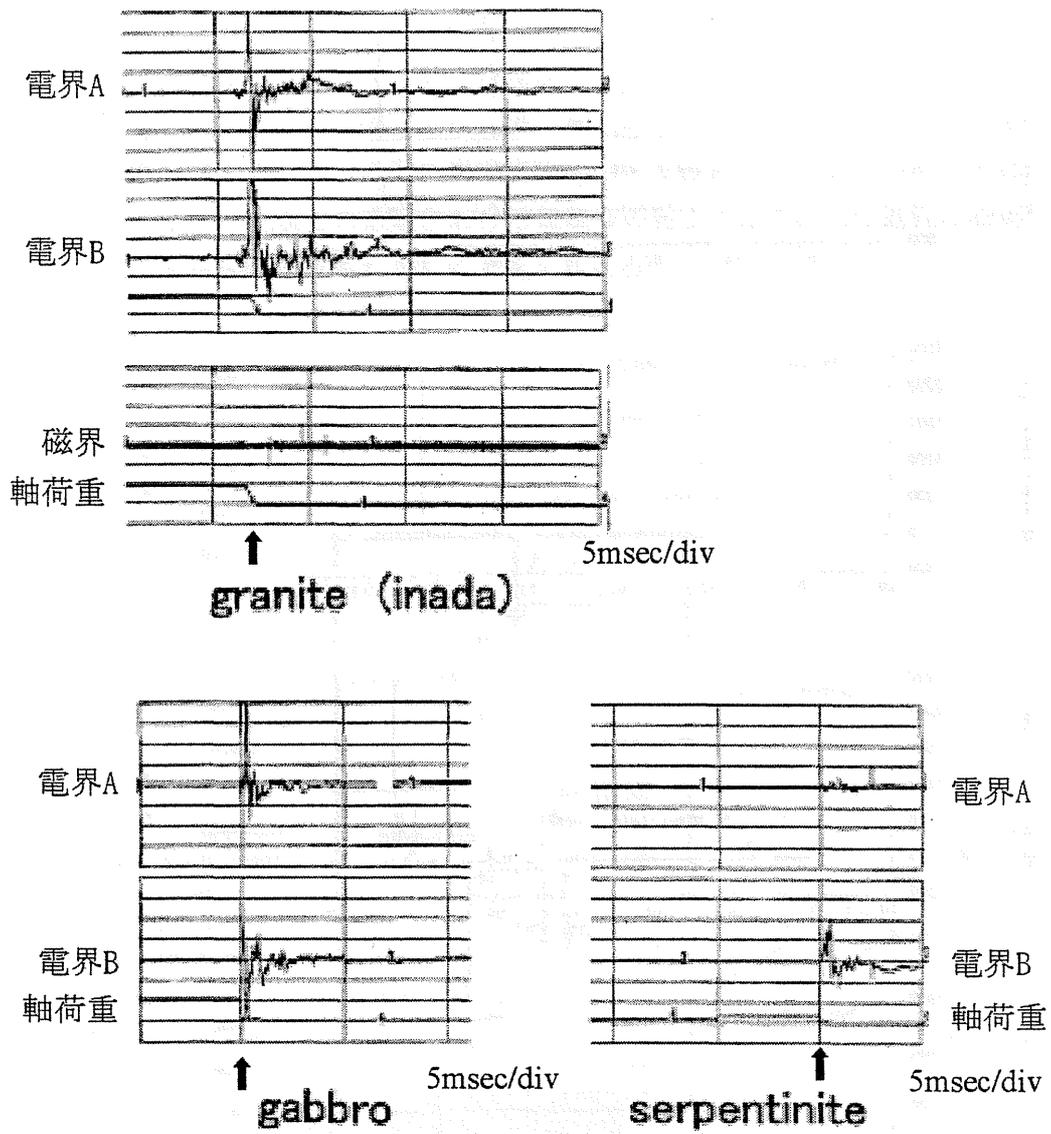


図 3. 3 花崗岩, ハンレイ岩, 蛇紋岩の破壊時に観測された電界変動記録.

対向電極AおよびBは、MgOの劈開面と平行および直交する方向にそれぞれセットした

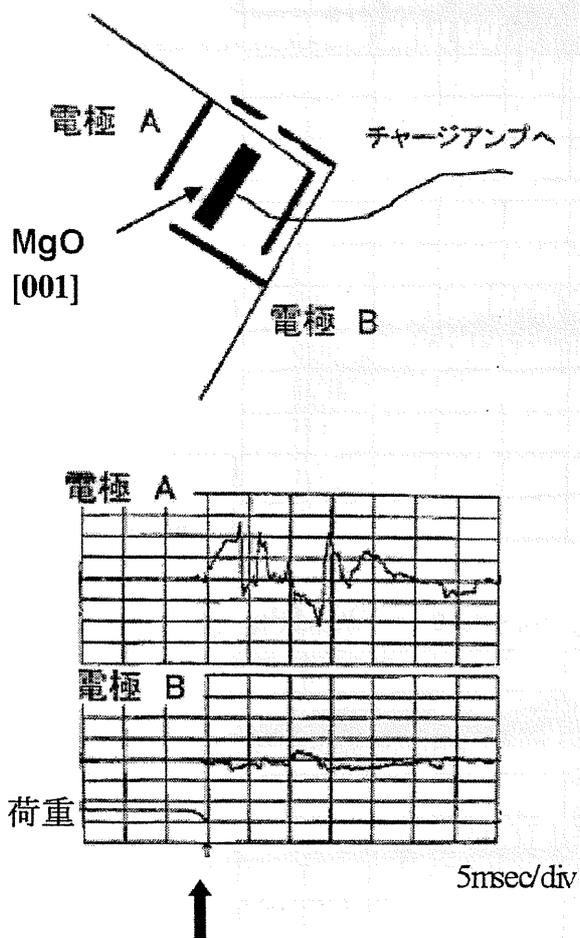
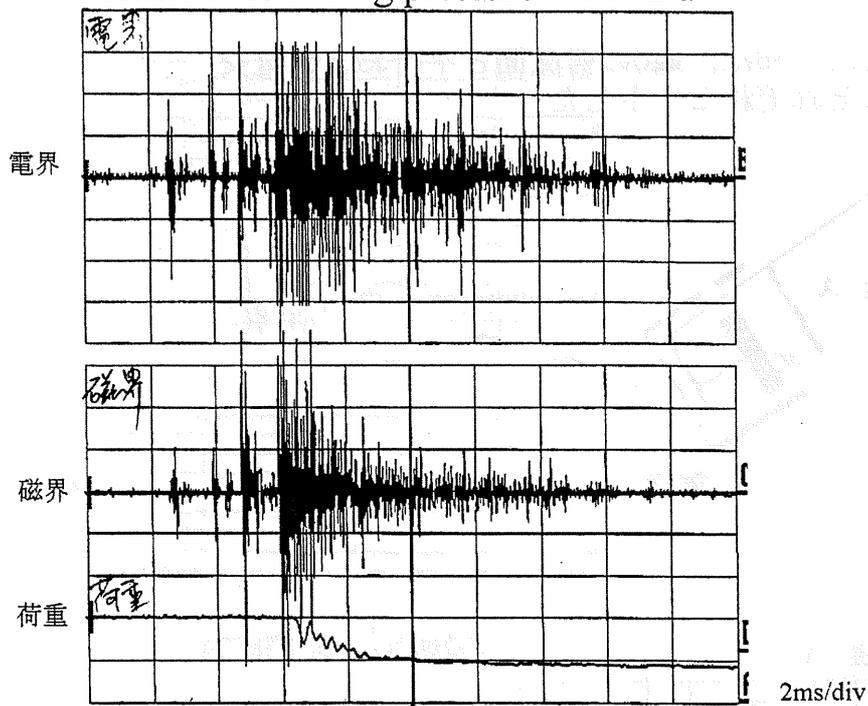


図 3. 4 MgO 単結晶の破壊に伴う電界変動記録

Inada Granite: confining pressure = 60MPa



Inada Granite: confining pressure = 100MPa

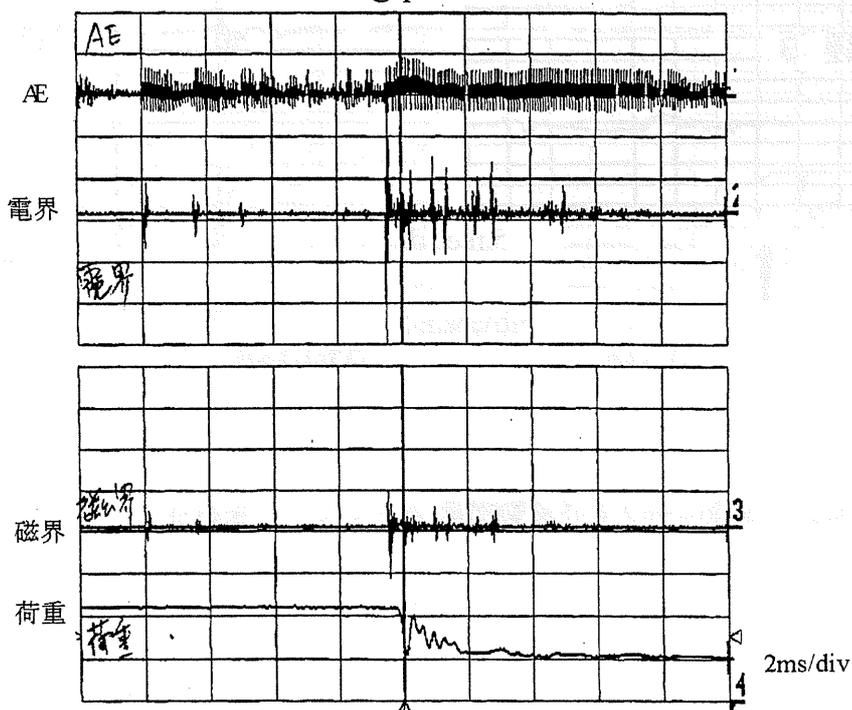
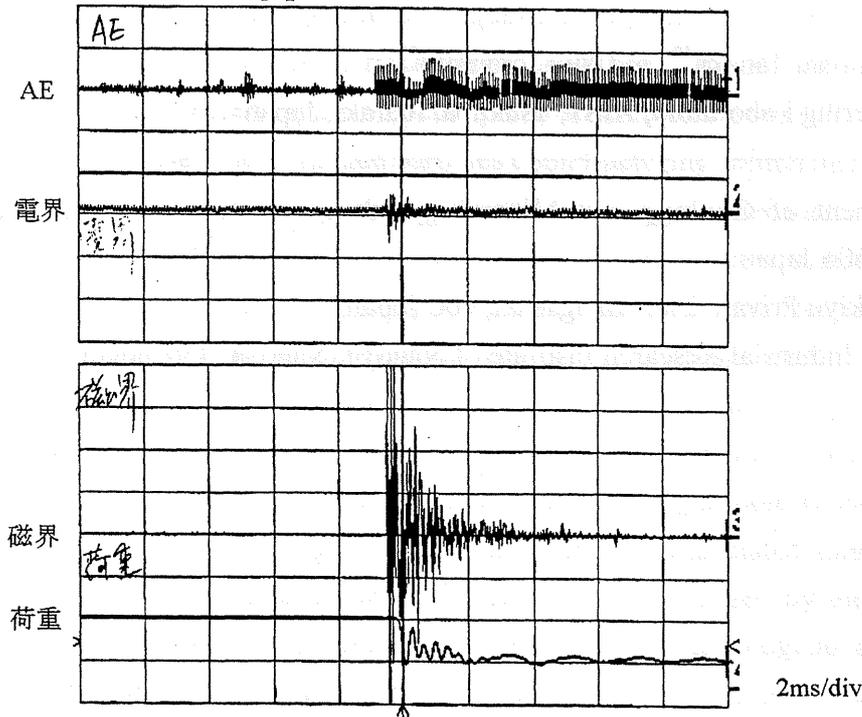


図3. 5 稲田花崗岩の封圧下での破壊に伴う電磁界変動

Basalt: confining pressure = 60MPa



Dunnite: confining pressure = 60MPa

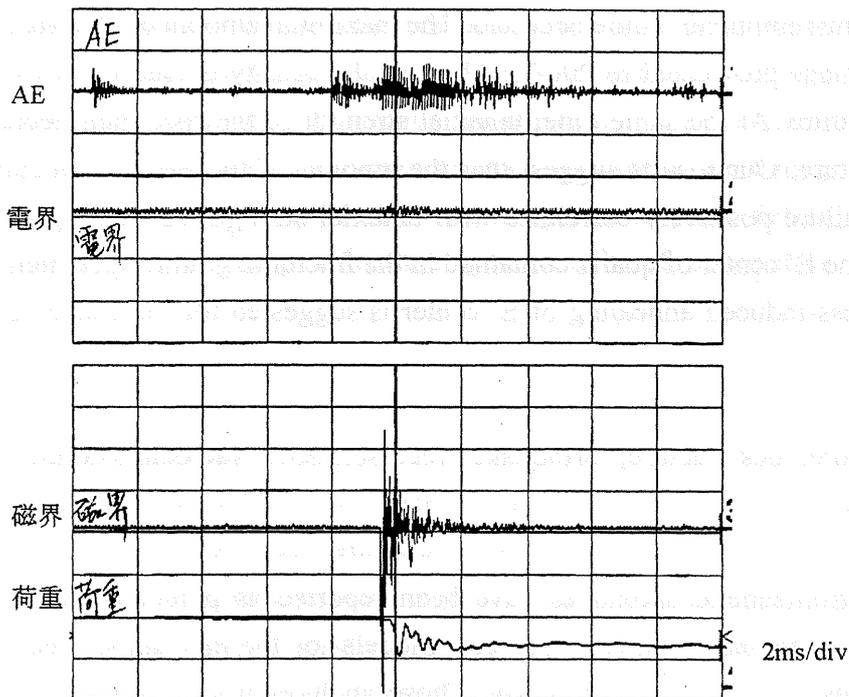


図3. 6 玄武岩, カンラン岩の封圧下での破壊に伴う電磁界変動