

岩石の破壊に伴う電磁氣的現象の発生機構

名古屋大学理学部 山田功夫

Sources of electromagnetic emission associated with fock fracture

Isao YAMADA

Department of Earth Sciences, Nagoya University

1. はじめに

地震の前に電磁波の放射や地電位の異常変化が観測されたという報告がいくつかある。例えば、GOKHBERG et al.(1982) は日本の内陸に起こったいくつかの地震の前に電磁波ノイズの異常を観測したことを報告している。ほかにもWARWICK et al.(1982), 尾池・小川(1982), YOSHINO (1985), OIKE and OGAWA(1986)などによる地震の前兆としての電磁波の異常が観測されたという報告がある。森(1982)は前崎沖海底地震計への給電電流の変化を観測し、近くに起こった地震 ($M=6.7$)の前に付近の海底の地電位が変化したと思わざるを得ないような給電電流の異常変化が観測されたことを報告している。また、MIYAKOSHI(1986)は山崎断層で、付近に起こった $M=5.6$ の地震の前に前兆的な地電位の変化が観測されたことを報告している。

一方、VOROTSOS and ALEXOPOULOS (1984a)やVOROTSOS and ALEXOPOULOS(1984b)はギリシャ北部に起こる地震は彼らの地電位観測システムでほとんど予知できるとしている。地震に伴って地磁気の変化が観測されたと言う報告もたくさんある [例えば KATOU and UTASHIRO (1949), 藤田(1965), RIKITAKE(1965)]。しかし、これらの観測は測定間隔が数日から1年毎であるため地震の前後で地磁気の変化があったことは確かであるが、それがいつ起こったのか分からないことが多い。NEVADAでのマグニチュード 7.1の地震の場合は震央の近くでの連続観測があり地震の前後の磁力変化が観測されている [BREINER(1964)]。また、人工地震や地下核爆発の実験など人工的な震源での全磁力の観測の例もある [HASBROUCH and ALLEN(1972), 田島 他(1975), 瀬戸(1977)]。そして、これらの磁力の変化は圧磁気効果によるものとされている。

このように地震に伴う電磁氣的現象が現れることは確かのようにだが、まだ地震に伴う電磁氣的現象(特に大地震の前)の発生メカニズムについては、その伝播のメカニズムも含めてほとんど解明されていない。

一方、NITSAN(1977)は岩石の破壊に伴い電磁波の放射が観測されることを実験的に示し、その原因として圧電効果をあげている。しかし、SCHLOESSIN(1985), OGAWA et al.(1985)や CRESS et al.(1987)は電磁放射が必ずしも石英を含む岩石だけで観測されるのではなく他の岩石においても同様に観測されることから、その原因は圧電効果によるものではなく、むしろ岩石の破壊によって新しい面での分極等によるもの(接触電位の逆な現象)だとしている。

このように岩石の破壊に伴う電磁氣的現象の発生メカニズムはまだ解明されたとはいえず、しかも、これまでは岩石の最終的な破壊に伴うもので、micro crack に伴う電磁氣的現象についての観測はほとんどない。また、この電磁氣的現象が破壊の瞬間に起こっているのか、

それとも、弾性波の通過による二次的に発生するものかどうかについてもはっきりしていない。

我々は、岩石の破壊に伴う電氣的現象の発生メカニズムを解明するために、碎石爆破や人工地震によって誘発される地電位の変化を観測した〔山田 他(1983),山田・村上(1982)〕。また、室内の実験では色々な方法で岩石の破壊実験を行い、微小破壊に伴う電磁氣的現象を観測した〔山田・村上(1981),山田・増田(1984), YAMADA et al.(1989)〕。ここでは、地震に伴う電氣的現象の発生メカニズムを解明するため、色々な観測や実験によって確かめられた、岩石の破壊に伴う電磁氣的現象の発生メカニズムについて議論する。

2. 微小破壊および人工地震などに伴う電磁氣的現象の特徴

我々のいくつかの実験から、岩石の破壊にともなって電磁氣的現象が現れる事が分かった(図-1に微小破壊に伴い観測された電波の記録の例を示す)。その特徴は(1)班晶としての石英を含む岩石で特に顕著であるが他の岩石でも観測される〔山田・村上(1981)〕、(2)石英を含む岩石においてもすべての微小破壊に伴って観測されるわけではない〔山田・村上(1981)〕、(3)一軸圧縮の実験によれば電磁氣的現象の発生時刻は弾性波の観測から計算される微小破壊の発生時刻に一致する〔YAMADA et al.(1989)〕、(4)電磁波としてこの電磁氣的現象を観測した場合そのエネルギーは100kHz~1MHzに集中する〔YAMADA et al.(1989)〕、(5)折り曲げによる破壊実験で観測された微小破壊に伴うサンプル内の電位の変化から計算される、この現象の発生源での大きさは双極子モーメントで $10^{-15} \text{C}\cdot\text{m}$ 程度と言うことである〔山田・村上(1981)〕。

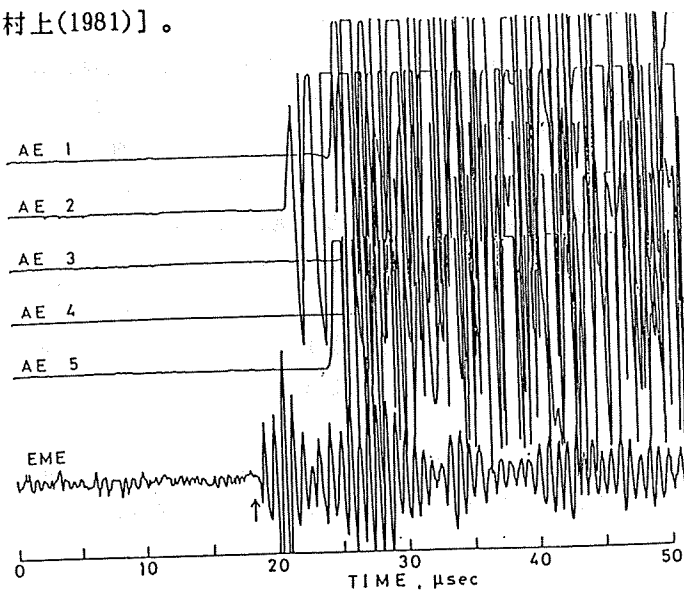


図-1 岩石の破壊にともない観測された電磁放射の記録例
上の5本記録(AE1-AE5)はAEセンサーによる弾性波の記録。下(EME)は電磁波の記録を示す。上向きの矢印は弾性波の着震時から計算された微小破壊の発振時刻を示す。

人工地震や砕石爆破の観測でも震源の極近くで顕著な地電位の変化が観測された（図-2に人工地震に伴って観測された地電位の変化の例を示す）。その特徴は（1）爆破と同時に（地震波が電極の所に到着する以前）地電位の変化が観測される、（2）地震波が電極の所を通過するときにも大きな地電位の変化が観測される、（3）爆破と同時に観測される変化の大きさは $10\sim 400\text{mV/km}$ 、地震波の通過に伴う変化は $150\sim 1500\text{mV/km}$ であった【山田・村上(1985), 山田 他(1983)】。

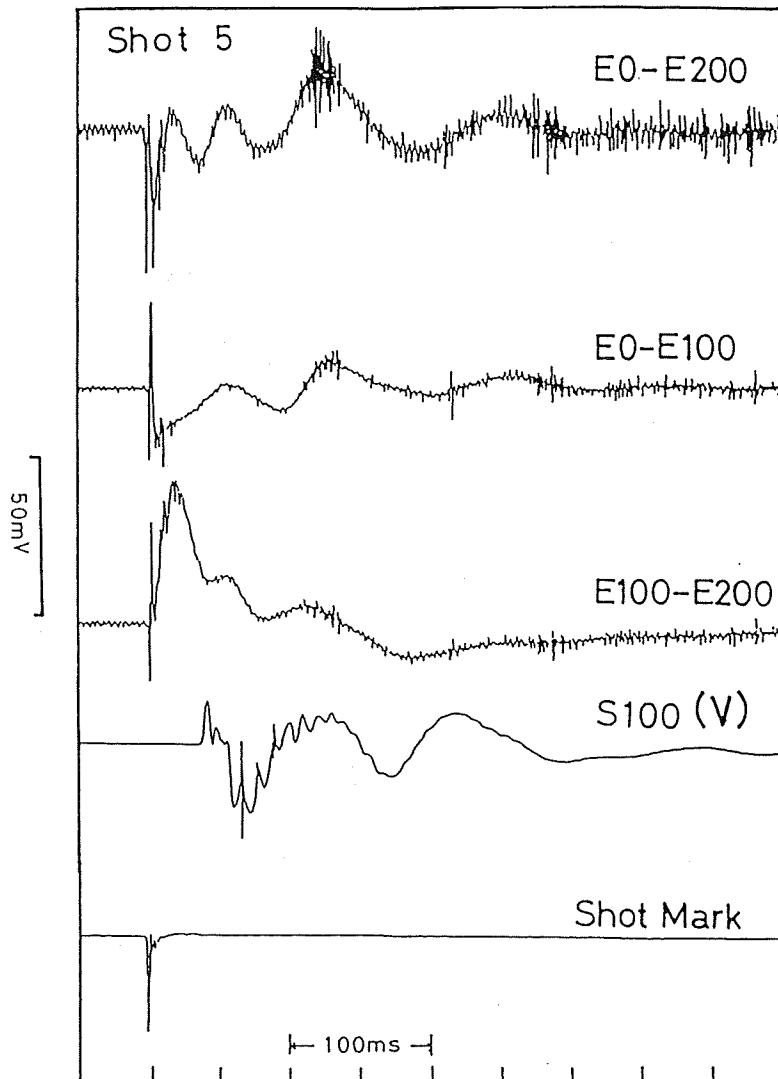


図-2 1982年10月山梨県倉敷町での人工地震にともなって観測された地電位の記録
 E0-E200, E0-E100, E100-E200はそれぞれ爆破点から0-200m, 0-100m, 100-200mの地点
 での電位の変化。S100は爆破点から100mの地点の地震計の記録を示す。

この小論では、これらの電磁氣的現象の発生メカニズムについて議論するが、実験の際に観測された現象は電位の変化であったり、電磁波であったりするが源は同じものと仮定し、すべて前に述べたような特徴を示すと仮定する。すなわち、信号源での双極子モーメントは $10^{-15} \text{ C} \cdot \text{m}$ 程度の現象と仮定する。また、破壊面の大きさは直径 1 mm 程度で、破壊は結晶が直接切れる場合と粒界が離れる場合とを考る(図-3、a, b)。破壊はオープンクラックだけが起り、クラックが開いたときの両面の間隔は $1 \mu\text{m}$ と仮定する。実験に使われたサンプルは主に花崗岩なので、その破壊強度は $5 \times 10^8 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$ とする。

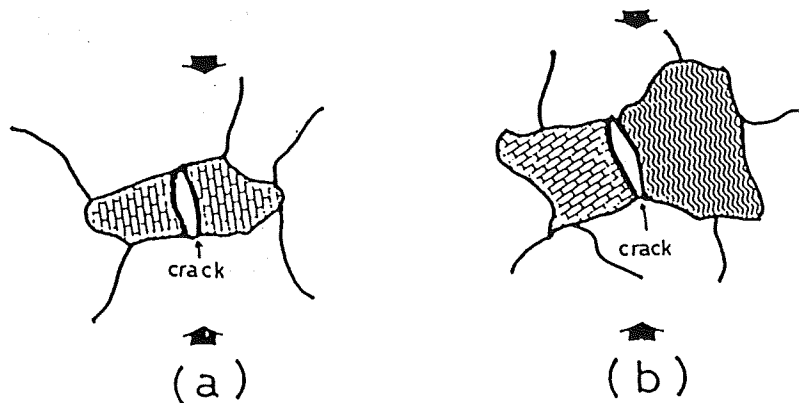


図-3 微小破壊のモデル a: 結晶内部での破壊 b: 結晶粒界の分離

3. 岩石の破壊に伴う電磁氣的現象の発生機構

岩石が破壊されるときに起こる電磁氣的現象の発生機構としては(1)微小破壊が起こり周りの歪が開放されることによる構成鉱物の圧電効果、(2)結晶構造の断裂による破壊面での分極、(3)粒界の分離による薄離電位、(4)磁性鉱物の脱磁等が考えられる。実験ではサンプルはよく乾燥して使ったので、含まれる水の振舞いは無視されるが、人工地震や碎石爆破の場合は(5)地下水の急激な移動による流動電位を考える必要がある。

圧電効果モデル

岩石の破壊に伴う電磁氣的現象は石英を含むような岩石でより顕著に観測される[山田・村上(1981), NITSAN(1977)]ことから、この電磁氣的現象を構成鉱物の圧電効果によると考えることができる。微小破壊が起こったとき、そのまわりではかなりのstress dropが起こる。そしてそれが石英のような強い圧電的性質を持つ鉱物の中であった場合、そこでは強い圧電現象が起こるのであろう。石英の場合 $1 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$ の応力に対して $-2.3 \times 10^{-12} \text{ C} \cdot \text{m}^{-2}$ の分極をする。ここで、石英の破壊強度 $5 \times 10^8 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$ が破壊によって完全に開放されるとすると、この

時の圧電効果によるchargeはおおよそ $10^{-3} \text{C} \cdot \text{m}^{-2}$ となる。微小破壊に関与したのは直径1mm程度の石英の粒子であったであろうから、双極子モーメントにして $10^{-12} \text{C} \cdot \text{m}$ となる。この値は観測より四桁程大きい。また、このモデルでは圧電鉱物を含まない岩石についての実験結果を説明できない。

結晶破壊モデル

石灰岩や olivine, basalt, glass などの破壊によっても電磁気的な現象が観測される [SCHLOESSIN(1985), 山田・村上(1981)]。これには圧電効果以外のメカニズムを考える必要がある。微小破壊では多くの場合、結晶構造が壊れ新しい面が形成される。破壊によって結晶構造の1つ1つのつながりが切れ、隣の原子からの束縛が解かれた場合、そこでの表面エネルギーが増加する。そして、その瞬間には新しくできた面では電氣的な分極が起こる。SCHLOESSIN(1985)が石英の破壊面で見積った破壊面でのchargeは $q = 2.1 \times 10^{-7} \text{C} \cdot \text{cm}^{-2}$ である。微小破壊による破壊面でもこの程度であろう。この面の直径を1mmとするとここでの双極子モーメントは $1.7 \times 10^{-15} \text{C} \cdot \text{m}$ となりこの値は観測をほぼ満足する。

粒界分離モデル

異種の鉱物が接触していて急に離れた時、薄離電位（接触電位の逆）が起こることが期待される。この現象は接触電位の逆を考えればよであろう。接触電位差 V_c は二つの物質の仕事関数の差によって現される。

$$V_c = (\Phi_1 - \Phi_2) / e \quad e: \text{電子の電価}$$
$$\Phi_1, \Phi_2: \text{それぞれの物質の仕事関数}$$

仕事関数はそれぞれの物質に固有な値で、物質内部の電子が表面からどれだけ出易いかを示す量で、一般には1-5eV程度である。例えばFeでは4.48eV, Mgでは3.67eVである。結局接触電位により発生する電圧 V_c は大きくとも1Vのオーダーである。いま、二つの粒子間の距離 d が10Åで接しているときの電子密度 $\sigma = (\epsilon / d) V_c$ だから $10^{-2} \text{C} \cdot \text{m}^{-2}$ 程度となる。破壊によって新しく現れた面の直径を1mmとするとここでのchargeは $0.8 \times 10^{-8} \text{C}$ となる。向かい合う破壊面の間隔を1 μm 程度とすれば、ここでの双極子モーメントは $0.8 \times 10^{-14} \text{C} \cdot \text{m}$ となり観測とほぼ一致する。OGAWA et al.(1985)も岩石が大きく破壊する時に観測された電磁波の観測から同様の見積をし、観測とよく合うことを示した。

しかし、このモデルは破壊の大きさが構成鉱物の粒子サイズで、粒子間の分離でのみ起こる場合であり、結晶内での微小破壊には当てはまらない。また、破壊の面が大きくなるとそれぞれの面は必ずしも同じ鉱物の組合せから成る面ではなくなるから、同じ方向に分極せず、破壊面が大きくなってもchargeのエネルギーはそれほど大きくなり得ないことになる。

磁性鉱物モデル

電磁気的象が、マグネタイト等の磁性鉱物が破壊にすることによって起こる考えると、粒

子が一様に磁化している場合の磁化のエネルギー U は

$$U = N J^2 V / 2$$

N : 反磁場係数 (球の場合は $4\pi/3$)
 J : その磁性鉱物の磁化
 V : 粒子の体積

で現される。いま、マグネタイトの粒子の直径を $1\mu\text{m}$ 、磁化 J を 1T とすると磁化のエネルギーは 10^{-9}Joule となる。このモデルでは、我々の観測は磁場の急変によって誘導された電場を観測したことになり、直接比較できない。しかし、この値はかなり小さい様に思われる。

その他の破壊に伴う電磁気的現象との関係

他にも、ここで示した破壊に伴う電磁気的な現象と似た現象が知られている。例えば、金属の表面工学の分野で研究されている *exo-electron emission* とか *Kramer 効果* [例えば、佐藤(1966)、佐藤(1968)] と呼ばれる、金属表面からの異常電子放射がある。また、*PARKHOM ENKO*(1960)は、石灰岩の中を弾性波が通過するとき、サンプルの中の電位の変化が観測されこの現象が一種の摩擦電気だとした。これらの現象は古くから研究されてはいるがそのメカニズムについてはよく分かっていない。その源は我々が議論しているものと同じものである可能性もある。

4. 人工地震および砕石爆破に伴う地電位の変化の発生機構

前に述べたように、人工地震や砕石爆破など大規模な岩石の破碎においても、その震源の近くで地電位の変化が観測される。この現象の発生メカニズムとして前節で述べた微小破壊に伴う現象をそのまま拡張して考えることが出来る。しかし、我々の室内での実験ではよく乾燥したサンプルを使用しているので、これまでは水の影響を考えなかった。野外での観測では地下水の振舞いもかなり重要と思われる。

岩石の破壊と界面動電効果

MIZUTANI et al.(1976), *ISHIDO and MIZUTANI* (1981)は地下水の動きによる界面動電効果が地電位の変化として観測される可能性を理論的実験的に示した。人工地震などは地下で行われるので一時的な地下水の動きをもたらす。例えば人工地震の場合、爆破は地下 $30\sim 100\text{m}$ の所で行われるので、付近の空隙のほとんどは地下水で満たされているであろう。この中で爆破が行われると地下水は放射状に外に追いやられるような強い圧力を受けるはずである。しかし、岩石の中の割れ目はそれほど多くなく、大量の地下水が一度に動くことはできない。そこで瞬間的には大きな圧力勾配が出来る。*MIZUTANI et al.*(1976)によれば流体の圧力 P と電流 I との間に

$$I = (\phi \epsilon \xi / \eta) \text{grad}P - \phi \sigma \text{grad}E$$

ϕ : 空隙率 = 10^{-2}

E : 地電位

ϵ : dielectric constant = $0.7 \times 10^{-9} \text{F} \cdot \text{m}^{-2}$

ζ : zeta potential = $10^{-2} - 10^{-1} \text{V}$

η : 流体の粘性 = $10^{-4} \text{N} \cdot \text{sec} \cdot \text{m}^{-2}$

σ : 流体のelectrical conductivity = $10^{-1} \text{mho} \cdot \text{m}^{-1}$

の関係がある。

これによれば、電位差が0であっても地下水の圧力勾配があると電流が流れることになる。爆破の場合、そこではかなりの範囲で岩石の破壊強度($10^8 \sim 10^9 \text{N} \cdot \text{m}^{-2}$)を越えているであろうから、平均的なgradPを $10^9 \text{N} \cdot \text{m}^{-2} / 100 \text{m}$ 、地表付近の比抵抗を $100 \Omega \cdot \text{m}$ 程度とすると 10V/km の地電位の変化が起こることになる。この値は観測値にほぼ一致する。

岩石の破壊と圧磁気効果

田島 他(1975)や瀬戸(1976)は、大島で行われた2回の人工地震の爆破点近傍において、爆破と同時に、 $0.7 - 0.1 \text{nT}$ の全磁力の変化を観測した。また、田島 他(1975)は埋立地(川崎市扇島)での爆破では地磁気の変化は観測されなかったことを報告している。これは大島の全磁力の変化が、岩石が破壊し、応力が開放されることによるものであろう事を示唆している。HASBROUCK and ALLEN(1972)はアムチトカ島における地下核爆発の実験の際に 3km 離れた観測点で 9nT の全磁力変化が観測され、観測点で 60bar のstressの変化があれば説明できるとしている。このように爆破にともなって観測された全磁力の変化のメカニズムは圧磁気効果で説明出来そうである。

BREINER(1964)は1954年のNevadaでの地震($M=7.1$)に伴って約 7km 離れた観測点で 1nT 程の全磁力の変化が観測され、この変化が圧磁気効果で起こったとすると震源でのstress dropが 100bar 程度あれば良く、他の地震学的方法で求められる値と一致するとしている。

我々の場合は磁場の観測ではないので直接結これとび付かないが、大きな磁場の変動があれば当然それに誘導された電場の変化も観測されるであろう。その意味でもう1つの可能性として圧磁気効果をこの原因に上げることが出来る。

5. むすび

地震の前に電磁波の放射や地電位の変化が観測されたと言う報告の真実性を実験的に確かめ、その発生メカニズムを解明するために、我々は実験や観測を進めてきた。その結果、人工地震や碎石爆破などによる大規模な岩石の破壊や、岩石の破壊実験により発生する微小破壊に伴って電磁氣的現象が起こっていることが確認された。

その発生メカニズムとしては種々なモデルが考えられ、ここではいくつかのモデルについて定量的な評価、比較を試みた。しかし、それぞれのモデルに関する基礎的なデータの不確かさは大きく、どのモデルがこの現象の発生メカニズムを説明するのに適しているかを特定することはできない。観測値をよく説明する事だけからは、爆破の場合は流動電位モデルが、実験では結晶破壊モデルが良い。しかし、最も顕著に現れるべき圧電効果が起こって

ないとするのはおかしい。むしろ、我々の観測がまだ不十分で、発生源の大きさを小さく見積りすぎているとすべきかも知れない。さらに、これを自然界に応用するにはスケール効果、地下水の存在の是非、地下の温度、応力変化の大きさ等の問題がある。

ここでは、伝播のメカニズムについては議論しなかったが、地下深部で破壊に伴い何か電氣的現象が起たとしても、どの様にして伝播して電波として観測されるのかを考えることは発生のメカニズムと同様今後の重要な問題である。

謝辞

電気通信大学の芳野赴夫氏、富沢一郎氏、宇宙科学研究所の水谷 仁氏、高知大学の村上英記氏からは多くのご意見御協力をいただきました。ここに感謝致します。

参考文献

- Breiner S., Piezomagnetic effect at the time of local earthquakes, *Nature*, 202, 790-791, 1964
- Cress G.O., B.T.Brady and G.A.Rowell, Sources of electromagnetic radiation from fracture of rock samples in the laboratory, *Geophys. Res. Lett.*, 14, 331-334, 1987
- 藤田尚美 新潟地震に伴う地磁気の変動, 測地学会会報, 11, 8-25, 1965
- Gokhberg M.B., V.A.Morgounov, T.Yoshino and I.Tomizawa, Experimental measurement of electromagnetic emissions possibly related of earthquakes in Japan, *J. Geophys. Res.*, 87, 7874-7828, 1982
- Hasbrouck W.P. and J.H.Allen, Quasi-static magnetic field changes associated with the Cannikin nuclear explosion, *Bull. Seis. Soc. Am.*, 62, 1479-1487, 1972
- Ishido I. and H. Mizutani, Experimental and theoretical basis of electrokinetic phenomena in rock- water systems and its applications to geophysics, *J. Geophys. Res.*, 86, 1763-1775, 1981
- Kato Y. and S. Utsiro On the changes of the terrestrial magnetic field accompanying the great Nankaido earthquake of 1946, *Sci. Rep., Tohoku Univ.*, 5, Ser.1, 40-41, 1949
- Mizutani H., T.Ishido and S.Ohnishi, Electrokinetic phenomena associated with earthquakes, *Geophys. Res., Lett.*, 3, 365-368, 1976
- Mizutani H. and T.Ishido, A new interpretation of magnetic field variation associated with the Matsushiro earthquakes, *J. Geomag. Geoelectr.*, 28, 179-188, 1976
- Miyakohsi J., Anomalous time variation of the self-potential in the fractured zone of an active fault preceding the earthquake occurrence, *J. Geomag. Geoelectr.*, 38, 1015-1030, 1986

- 見果,
電は
上
- 森 俊雄, 東海沖の海底地電位変化について。-海底地震計常時観測システムの利用-, 地震, 2, 35, 213-222, 1982
- Nitsan U., Electromagnetic emission accompanying fracture of quartz-bearing rocks, Geophys. Res. Lett., 4, 333-336, 1977
- 尾池和夫・小川俊雄, 地震に伴う電磁波放射の観測, 京大防災研年報, 25, 39-100, 1982
- Oike K. and T.Ogawa, Electromagnetic radiations from shallow earthquakes observed in the LF range, J. Geomag. Geoelectr., 38, 1031-1040, 1986
- Ogawa T., K.Oike and T.Miura, Electromagnetic radiations from rocks, J. Geophys. Res., 90, 9245-6249, 1985
- Parkhomenko E.I., A study of the triboelectric effect in rocks and in certain dielectrics by means of a dynamic method, Izv. Geophys. Ser., 55-62, 1960
- Rikitake T., Geomagnetism and earthquake prediction, Tectonophysics, 6, 59-68, 1968
- 佐藤教男, 個体のexo-electron放射, 電気化学, 34, 245-253, 1966
- 佐藤教男, 金属の自然電子放射, 日本金属学会会報, 7, 313-322, 1968
- Schloessin H.H., Experiments on the electrification and luminescence of minerals and possible origins of EQLs and sferics, Ann. Geophys., 3, 709-720, 1985
- 瀬戸孝夫, 伊豆大島爆破実験に伴う地磁気変化の観測 (II), CAシンポジウム 講演集, 151-153, 1977
- 田島稔・瀬戸孝夫, 吉田光雄, 伊豆大島爆破実験に伴う地磁気変化の観測, CAシンポジウム講演集, 155-160, 1976
- Vorotsos P. and K.Alexopoulos, Physical properties of the variations of the electric field of the earth preceding earthquakes I, Tectonophysics, 110, 73-98, 1984a
- Vorotsos P. and K.Alexopoulos, Physical properties of the variations of the electric field of the earth preceding earthquakes II : determination of epicenter and magnitude, Tectonophysics, 110, 99-125, 1984b
- Warwick J.W., Radio emission associated with rock fracture: Possible application to the great Chilean earthquake of May 22, 1960, J. Geophys. Res., 87, 2851-2859, 1982
- 山田功夫・村上英記, 岩石の破壊に伴う電位の変化, 地震学会講演予行集 No.2, 156, 1981
- 山田功夫・村上英記・増田幸治, 人工地震に伴う地電位の変化, 地震学会講演予行集 No.1, 259, 1983
- 山田功夫・村上英記, 砕石爆破に伴う地電位の変化, 地震, 2, 2, 393-400, 1982
- Yamada I., K.Masuda and H.Mizutani, Electromagnetic and acoustic emission associated with rock fracture, Phys. Earth Planet. Inter., 57, 157-168, 1989

Yoshino T., The possibility of using a direction finding technique to locate earthquake epicenters from electromagnetic precursor radiation, Ann. Geophys.,3, 727-730, 1985