

# 野島断層地下電極からの高周波信号放射実験

## —1.地下電極までの信号伝送—

富澤一郎<sup>(1)</sup>・辻隆行<sup>(1)</sup>・石井直人<sup>(1)</sup>・大志万直人<sup>(2)</sup>  
(1)電気通信大学菅平宇宙電波観測所 (2)京都大学防災研究所

### High-Frequency Signal Transmission Experiment by Using Borehole Electrodes Installed at the Nojima Fault - 1.Signal Transmission down to the Electrodes -

Ichiro TOMIZAWA<sup>(1)</sup>, Takayuki TSUJI<sup>(1)</sup>, Naoto ISHII<sup>(1)</sup>, Naoto OSHIMAN<sup>(2)</sup>

(1)Sugadaira Space Radio Observatory, The University of Electro-Communications

(2)Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

#### 1. はじめに

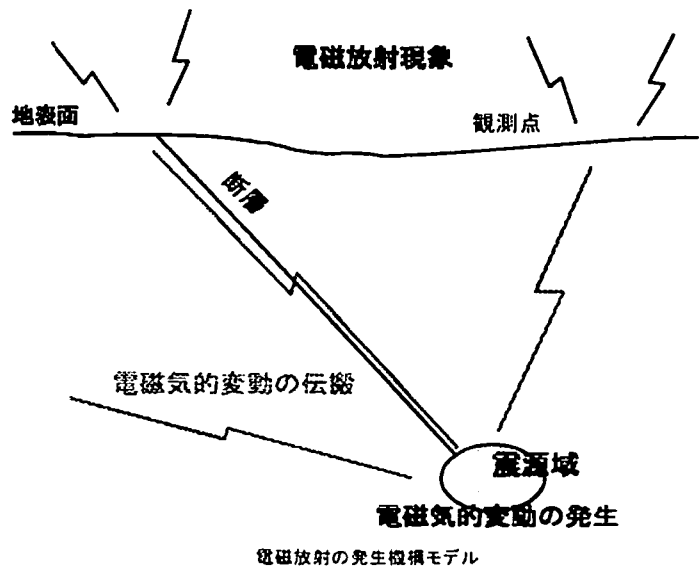
これまで、地震前後に数10[Hz]から数10[MHz]に達する高周波電磁放射現象が観測されたとの多数の報告がある(e.g.,Gokhberg et al.,1982; Warwick et al., 1982; Rikitake, 1998)。しかしながら、この電磁放射の発生ならびに伝搬機構は、ほとんど明らかにされていない。これは、地震と電磁気変動現象の発生原因が直接的なのか間接的なのかが明確でないこと、導電率の高い地表付近を高周波電磁界変動が透過することの困難さ、間接的な高周波変動発生源までの駆動エネルギー伝達機構の不明確さに原因があると考えられる。

これまで室内での岩石破碎実験では、地震により直接電磁気現象を発生させることが可能であることが明らかになっている

(Nitsan, 1977; Warwick et al., 1982; Schloessin, 1985; Ogawa et al., 1985; Cress et al., 1987; Yamada et al., 1989; Enomoto and Hashimoto, 1992)。したがって、地殻変動に伴って電磁気的変動が発生し、これが地表付近まで伝搬し、電磁放射現象として観測されるという直接的発生伝搬機構モデルでは、伝搬に絞って調べることにより、モデルの妥当性を評価できる。

高周波信号の地表付近伝搬の問題点は、導電率の高い様な地殻表層を透過する際、大きな減衰を伴うので、これを克服できる伝搬機構が提出されていないことにある。

図2に示すように、地中での平面波減衰量は、発生源が深さ10kmの場合、10[Hz]では40[dB]、100[kHz]では160[dB]、1[MHz]では480[dB]と周波数が高くなるに従って急激に増加する。よって、様な大地中で、深さ10数km～数10kmの震源付近からの高周波電磁波の伝搬は困難である。したがって、この問題点を克服できない限り、地下深くで発生した電磁気変動が電磁波を放射し、これが地表付近まで伝搬し、さらに地表と電離層導波管内を伝搬するという直接発生伝搬機構で、電磁放射を説明することは困難である。



第1図 電磁放射の直接発生伝搬機構モデル

一様な地殻表層ではなく、活断層のような地震つまり電磁気的変動の発生源が地表地殻に存在し、しかも活断層という導電率が高い可能性のある特異な構造が存在する場合、この活断層が高周波信号の特異伝搬経路となる可能性が考えられる。しかしながら、活断層といっても個々の活断層により構造が異なり、しかも構造が複雑であることから、簡単なモデル計算は困難である。そこで、活断層伝搬機構に関しては、ある程度の実証実験が必要であると考えている。

Maeda and Tokimasa(1996)や

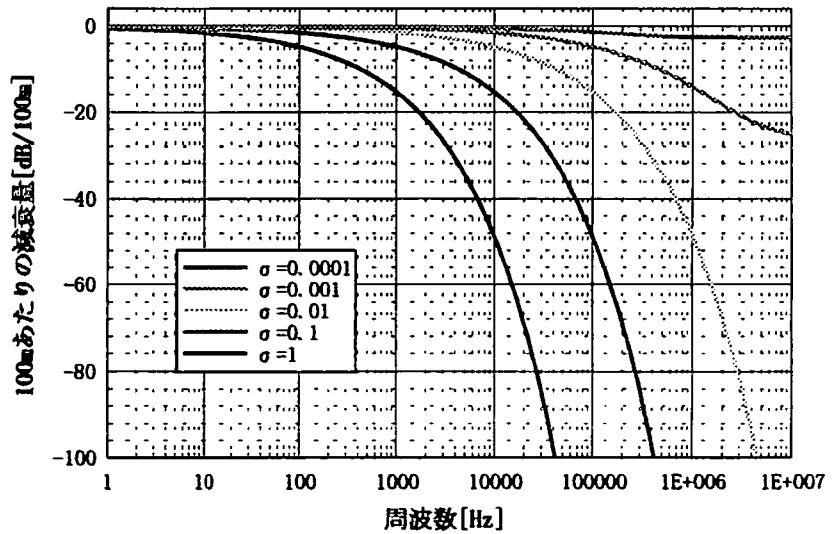
Tomizawa and Yoshino(1996)によると、兵庫県南部地震の際に電磁放射現象を観測したとの報告があったことから、野島断層付近が電磁放射の発生源となったことは疑いがない。このことは、直接発生伝搬機構と考えた場合、野島断層地中部分に発生源があり、野島断層が特異伝搬路となった可能性を考えることができる。このように断層付近での特異伝搬の可能性が高い野島断層での伝搬実験の実施は、直接発生伝搬機構を考える上で重要な意味がある。

断層は通常、水分を多く含むことから岩石中の成分が溶解してイオン化し、周囲と比較して導電率が100倍程度高い場合もある。しかし、この高導電率が高周波でも同様かどうかについては、明らかにされていない。

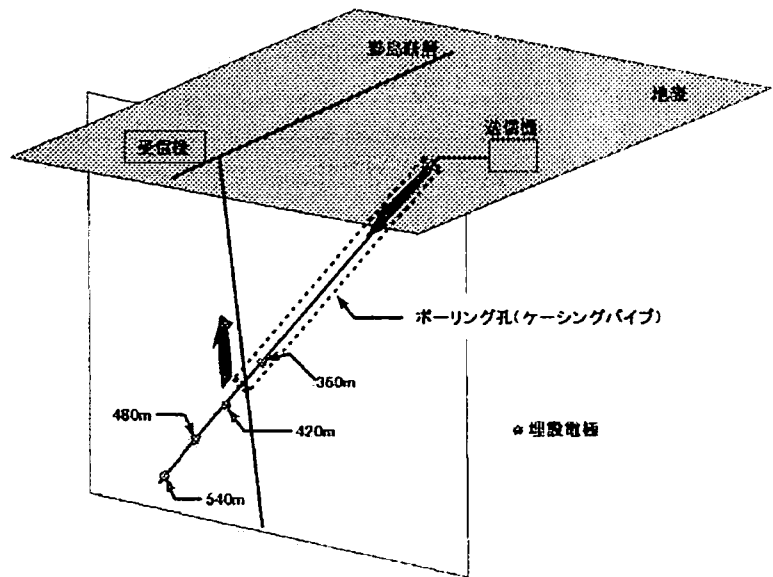
高周波電磁界では波長が短くなるため、断層と他の部分の電氣的構造の違いに伝搬が

影響される可能性が高くなる。断層の導電率が高い場合は、断層が伝送線路として働くか、それとも反射層として働く可能性がある。このように断層の電気電導度の特異構造から、断層沿いの伝搬が考えられる。本実験では、最終的にこの特異伝搬の存在の確認を目的としている。

### 地中における 減衰量の変化 ( $\epsilon r=10$ )



第2図 平面波地中伝搬減衰率周波数依存性の電気電導度による変化



第3図 野島断層500mボーリング孔を利用した地中—地表間伝搬実験計画見取り図

## 2. 地下電極接続ケーブルの電気的特性調査

### 2. 1 調査の必要性

地下電極に接続しているケーブルは、電力用で高周波伝送用のケーブルではないことから、高周波特性が良くない可能性がある。また、大地やケーシングパイプが存在することから、ケーブルの容量が変わっている可能性もある。さらに、このボーリング孔では、地下水がわき出している地上から数10mの深さまでケーブルが水に浸かった状態となっていることから、容量および漏れコンダクタンスが増加している可能性がある。

以上のような理由から、ケーブル電気的特性を実測により求める必要がある。この特性を基にケーブルを通して地下電極間のインピーダンスを推定し、最終的に供給可能な電力の見積もりを得る必要がある。この電力伝送効率を踏まえて、最終的に伝搬実験で用いるべき周波数を決定する。

### 2. 2 接続ケーブルの電気的特性調査方法

ケーブルの高周波電気的特性を測定する方法として、インピーダンス測定法とパルス反射法二つの方法を採用した。

#### 1) インピーダンス測定法

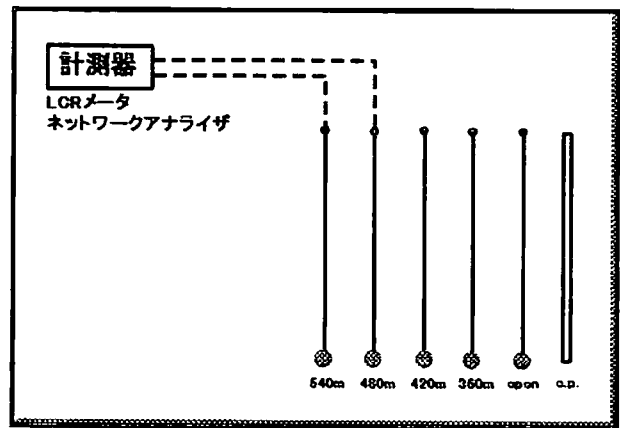
ケーブル線間の電気的特性が一定であれば、入力端から見たインピーダンスが、ケーブル特性インピーダンスおよび地下電極間インピーダンスで決まる。この性質を利用してケーブルの電気的特性を推定する。ただし、地下電極間のインピーダンスは、他の方法で推定することが不可能なため、簡単に電気的特性を推定することはできない。ここではたまたま地下電極に接続されずに開放端として残っていた1本の線と同じ長さを持つ540m電極接続線との間を、ほぼ開放端と仮定して推定を行う。

#### 2) パルス反射法

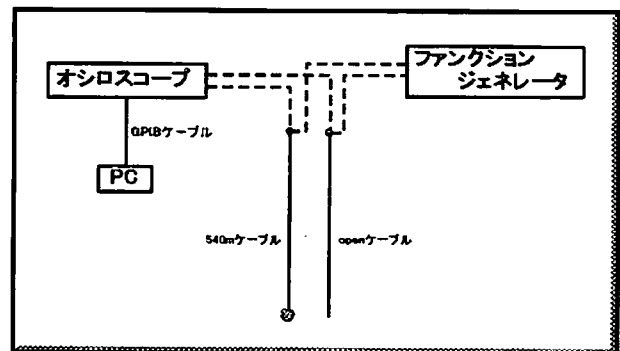
ケーブル線間の電気的特性が一定であれば、入力端子および地下電極接続点以外のインピーダンス不連続点は存在しない。したがって、入力からパルス波を送信し、地下電極接続点からの反射波の到達時間を計測することにより、ケーブル中の伝搬速度を求めることができる。しかし、この場合地下電極間のインピーダンスおよびケーブルの周波数分散性を考慮して、伝搬速度を推定することが必要となる。

## 3. ケーブルの電気的特性推定

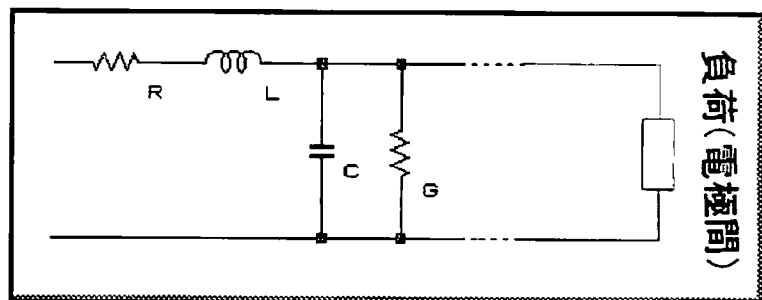
### 1) 入力インピーダンス測定値からの推定についての考察



第4図 入力インピーダンス測定法の模式図



第5図 パルス反射法の模式図



第6図 地下電極接続ケーブルのはしご型分布定数等価回路

地下電極接続ケーブルは、電力伝送用で高周波伝送は考慮していないが、ケーブル断面構造が対称的であり、しかもこの構造が長さ方向にほとんど変化しないことから、第6図のように分布定数等価回路として扱うことができる。この分布定数等価回路構成素子の定数は、ケーブルの地下埋設、ケーシングパイプの存在、地下水の存在などにより変化している可能性もあり、第7図に示すようなアルゴリズムで、実測値を基にして推定しなければならない。

### 2) 位相速度測定値からの推定についての考察

周波数2[kHz]信号を入射した際の伝搬速度より位相定数を算出し、これを分布定数素子値として推定した。しかし、この素子値を基に実際に算出した入力インピーダンスと実測値とを比較すると、一致しないことが分かった。これは、以下の理由によると考えられる。a)

算出した位相定数が正確にケーブルの特性を示していない。b) 入力インピーダンス算出の際にケーブル間の終端が開放端であるとの仮定が成立していない。

### 3) 入力インピーダンス測定値からの単位長等価回路定数推定結果

実際のケーブルと同じ構造のケーブルを利用して、基本的な電気特性を測定し、地下埋設により値の変わる可能性の小さい抵抗RおよびインダクタンスLをほぼ固定し、容量C、コンダクタンスGに関して値を変化させて第7図のアルゴリズムにより、入力インピーダンスが許容範囲で一致する場合をC、Gの推定値とした。この結果、次の推定値を得た。

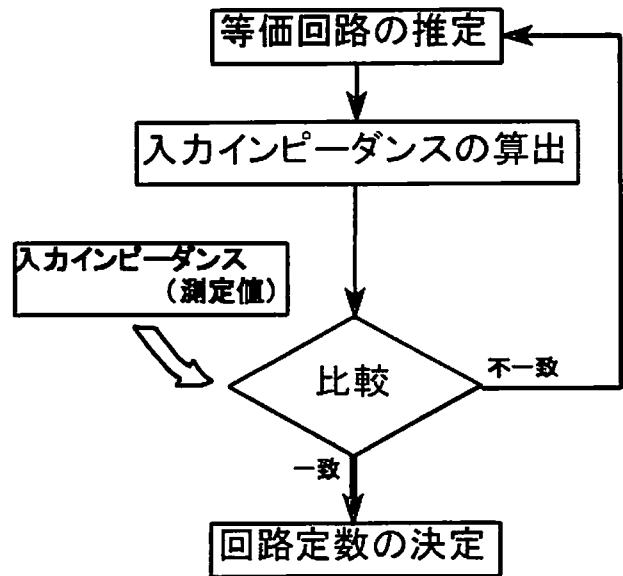
$$R = 0.0266[\Omega/m], C = 17.7[pF/m], L = 1.91[\mu H/m], G = 0.543[\mu S/m]$$

CおよびGの推定値は、ケーブルのみの場合より大きくなる。これは、2本の線の一方が地下電極に接続されていて分布容量が増加しているためか、ケーブル中に水が侵入して等価的に分布容量を増加させているためと推定している。

## 4. 電極間入力インピーダンスの算出

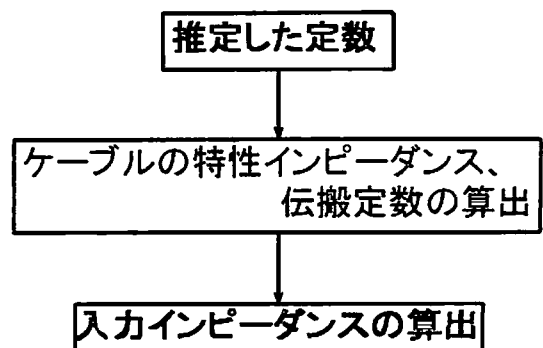
入力インピーダンスは、ケーブルの特性インピーダンス、ケーブル長、および負荷インピーダンスにより決まる。この関係を利用して、実測した入力インピーダンス、上の推定分布定数等価回路定数、およびケーブル長540mを使って、第8図のアルゴリズムにより電極間のインピーダンスを算出する。

実際に、480m-540m接地電極間入力インピーダンスを求めた結果を第9図に示す。この図から、電極間入力インピーダンスが、周波数と共に大きく振動的に変化することが分かる。



回路定数の推定フロー

第7図 地下電極接続ケーブルの分布定数推定フローチャート

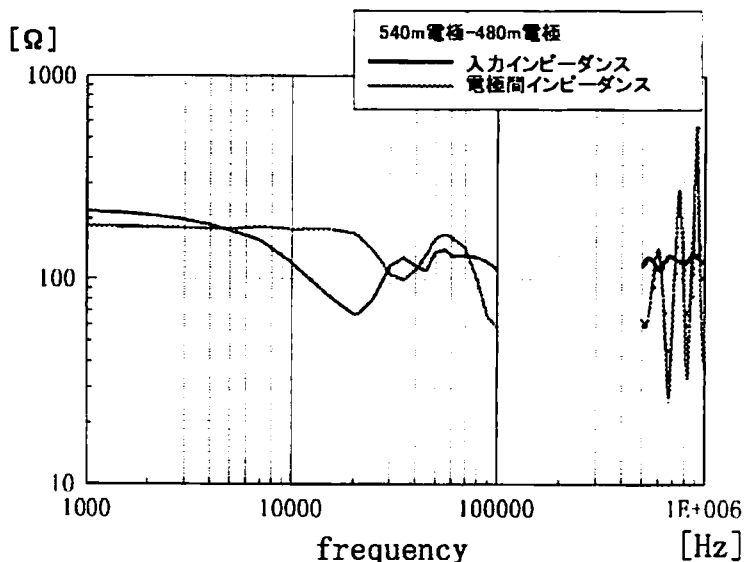


第8図 電極間入力インピーダンス推定アルゴリズム

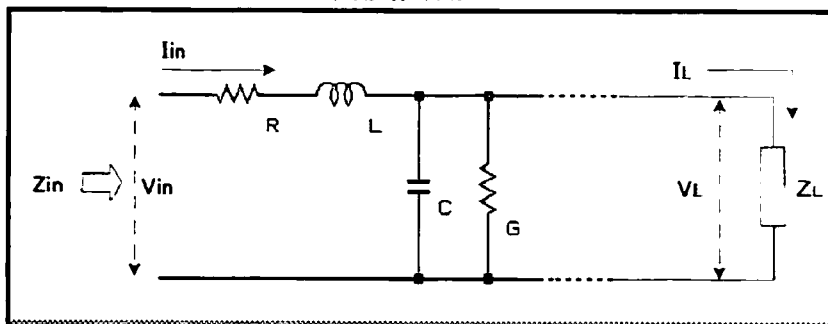
## 5. 電力供給効率の算出方法と算出結果

電力供給効率計算のために第10図のように入出力電圧電流を定義する。ここで入力電圧を  $V_{in} = 1 [V]$  とする。つぎに、この時の入力電流  $I_{in}$ 、電極間電流  $I_L$ 、電極間電圧  $V_L$  を算出する。これらの値を元に、入力電力  $P_{in}$  および電極間での電力  $P_L$  の算出する。電力供給効率  $\eta$  は、この二つの電力の比 ( $P_L / P_{in}$ ) として定義される。

実測したインピーダンスから上の手順を基に電力供給効率  $\eta$  を求めた結果を第11図に示す。



第9図 実測した入力インピーダンスおよび推定した地下電極間入力インピーダンスの周波数特性



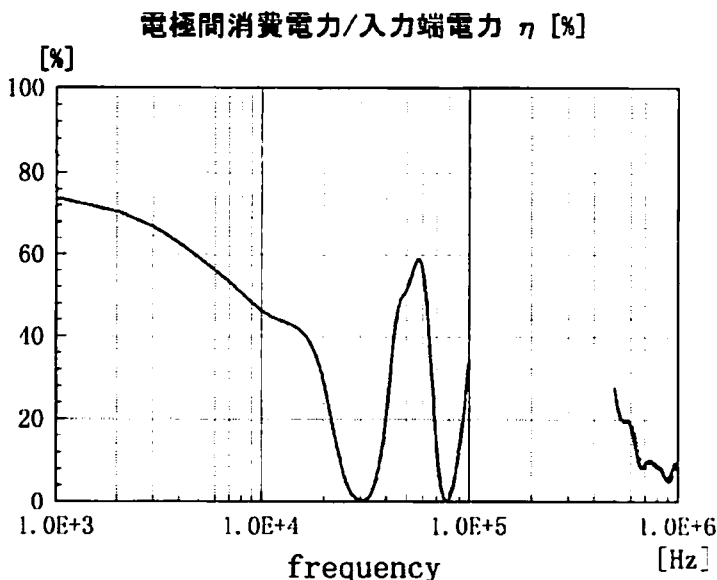
第10図 電力供給効率計算のための等価回路電圧電流の定義図

## 6. 結論

地下電極までの信号伝送に関して以下の結論を得た。

- 1) 地表-地下電極間接続ケーブルの電気的特性推定を行い、これを利用して地下電極間インピーダンス推定を可能にした。
- 2) 電力ケーブルの特性インピーダンス、ケーブル長、接地電極間インピーダンスの周波数特性を考慮して、地下-地表間電力供給効率の周波数特性を推定可能とし、以下の結果を得た。

- 1[kHz] 約75%
- 10[kHz] 約45%
- 100[kHz] 約30%
- 1[MHz] 約10%



第11図 540mと480mの地下電極間への電力供給効率の周波数依存性

3)この供給効率をみると、周波数が高くなるに従って、全体的な供給効率が低下し1MHz以上では10%以下になる。また、周波数的に大きく変動する。このことから地下電極までの信号伝送に適切な周波数の存在が分かった。

4)高周波域での供給効率が高い点は、伝送路(ケーブル)インピーダンスと電極間インピーダンスとの関係が整合状態に近くなることを意味している。この結果から、50kHz前後、100kHz~500kHzの間(今回の実験では測定器の問題から入力インピーダンスが得られなかったため、周波数が特定できていない。)が、高周波伝搬実験に利用可能である。

今後の課題としては、以下が挙げられる。

a)100~500[kHz]の周波数範囲の電気的特性推定、b)ケーブル電気的特性パラメータの精度向上、c)埋設電極間インピーダンス変化原因の考察、d)パルス反射法による地中反射点の検出、e)断層付近の電磁界伝搬シュミレーション

これらの結果を考慮して、実際の地下電極-地上間の高周波伝搬実験を行う必要がある。

### 参考文献

- Glynn O. Cress, B.T. Brady, and Glen A. Rowell: Sources of electromagnetic radiation from fracture of rock samples in the laboratory, *Geophys. Res. Lett.*, vol.14, no.4, pp.331-334, 1987.
- Y. Enomoto and H. Hashimoto: Transient electric activity accompanying rock under indentation loading, *Tectonophys.*, vol.211, no.1-4, pp.337-344, 1992.
- M.B. Gokhberg, V.A. Morgounov, T. Yoshino and I. Tomizawa: Experimental measurement of electromagnetic emissions possibly related to earthquakes in Japan, *J. Geophys. Res.*, vol.87, no.B9, pp.7824-7828, 1982.
- Koitiro Maeda and Noritaka Tokimasa: Decametric radiation at the time of the Hyogo-ken Nambu earthquake near Kobe in 1995, *Geophys. Res. Lett.*, vol.23, no.18, pp.2433-2436, 1996.
- U. Nitsan: Electromagnetic emission accompanying fracture of quartz-bearing rocks, *Geophys. Res. Lett.*, vol.4, pp.333-336, 1977.
- Toshio Ogawa, Kazuo Oike, and Taiji Miura: Electromagnetic radiations from rocks, *J. Geophys. Res.*, vol.90, no.D4, pp.6245-6249, 1985.
- Tsuneji Rikitake: Nature of electromagnetic emission precursory to an earthquake, *J. Geomag. Geoelectr.*, vol.49, pp.1153-1163, 1997.
- H.H. Schloessin: Experiments on the electrification and luminescence of minerals and possible origins of EQLs and sferics, *Ann. Geophys.*, vol.3, no.6, pp.709-720, 1985.
- Ichiro Tomizawa and Takeo Yoshino, Wideband EM phenomena associated with Hyogoken-Nambu Earthquake, XXVth General Assembly of URSI, Aug.28-Sep.5, 1996, Lille, France, HEG.2,1996.
- I. Yamada, K. Masuda and H. Mizutani: Electromagnetic and acoustic emission associated with rock fracture, *Phys. Earth Planet. Int.*, vol.57, pp.157-168, 1989.
- James W. Warwick, Carol Stoker and Thomas R. Meyer: Radio emission associated with rock fracture: Possible application to the Great Chilean Earthquake of May 22, 1960, *J. Geophys. Res.*, vol.87, no.B4, pp.2851-2859, 1982.