

# 兵庫県南部地震の余震に伴う電磁放射検出の試み

吉田真吾・中谷正生・浅田鉄太郎

東京大学地震研究所  
(1995年9月26日受理)

## Observations of Electromagnetic Radiation Associated with Aftershocks of the Hyogoken-nanbu Earthquake

Shingo Yoshida, Masao Nakatani and Tetsutarou Asada  
Earthquake Research Institute, University of Tokyo  
(Received September 26, 1995)

### Abstract

To detect coseismic electromagnetic radiation associated with aftershocks of the 1995 Hyogoken-nanbu earthquake, measurements of vertical electric field component were carried out near the Nojima fault on Awaji Island. Using a ball antenna and a seismometer, both electric field and vertical ground motion were digitally recorded, triggered by the ground motion. The frequency response of the observation system is almost flat from 1 Hz to 200 Hz for the electric field measurement. Although triggered records for about 170 aftershocks were obtained during the observation period from March 18 to April 2, 1995, no coseismic electromagnetic signal was detected. A possible reason is that a shallow and large aftershock did not occur near the observation site during the observation period.

### 1. はじめに

最近、地震前に電磁放射現象が観測されたという報告が頻繁になされている(例えば, Gokhberg et al., 1982; Oike and Ogawa, 1986; Fraser-Smith et al, 1990; Fujinawa and Takahashi, 1990; Yoshino et al., 1993; Kopytenko et al., 1993). 電磁放射を説明するのに様々なメカニズムが提出されているが, そのうちのひとつは, 本震前の微小破壊に起因するというものである. 破壊前の震源核成長過程において多数のAEが発生することは室内実験により確認されている(Ohnaka et al., 1995). もしも微小破壊により電磁場変動が生ずるとい説が正しいのなら, 大規模な破壊時, すなわち地震と同時に電磁波が放射されている可能性が高い. しかしながら, コサイスミックな電磁場変動が観測されたという報告は非常に少ない. それは, 実際にコサイスミッ

クな電磁場変動が検知できないものであることを必ずしも意味するわけではない。卓越周波数や強度について何もわかっていないコサイスマミックな電磁場変動を調べるには、広い周波数帯域で震源近傍での観測をすべきであるが、そのような観測が今迄ほとんどなされていなかったために検知されていないのかもしれない。

室内実験においては、岩石が破壊する時に電磁波放射が起こることが実証されており、放射メカニズムについてもかなり解明されつつある(例えばNitsan, 1977; Cress et al., 1987; Ogawa et al., 1985; Yamada et al., 1989; Yoshida et al., 1994)。Yoshida et al. (1994)は、すべり破壊時に放射される電磁波の振幅が岩石中の石英の含有量及び応力変化量に強く依存することを示し、電磁放射の発生原因は主に石英の圧電効果によると推察した。更に、電磁放射を伴うAEの震源の震源決定を行い、Fig.1に示されるように震源は石英の結晶上またはすぐ近傍に位置することを見いだした。ほぼ同じ震源で何度も繰り返しAEが発生する場合、同じ震源から放射された電磁波の波形は常に同じ極性を示すこともFig.1からわかるが、これは、電磁波の極性は石英の結晶軸の向きを反映していることを意味する。

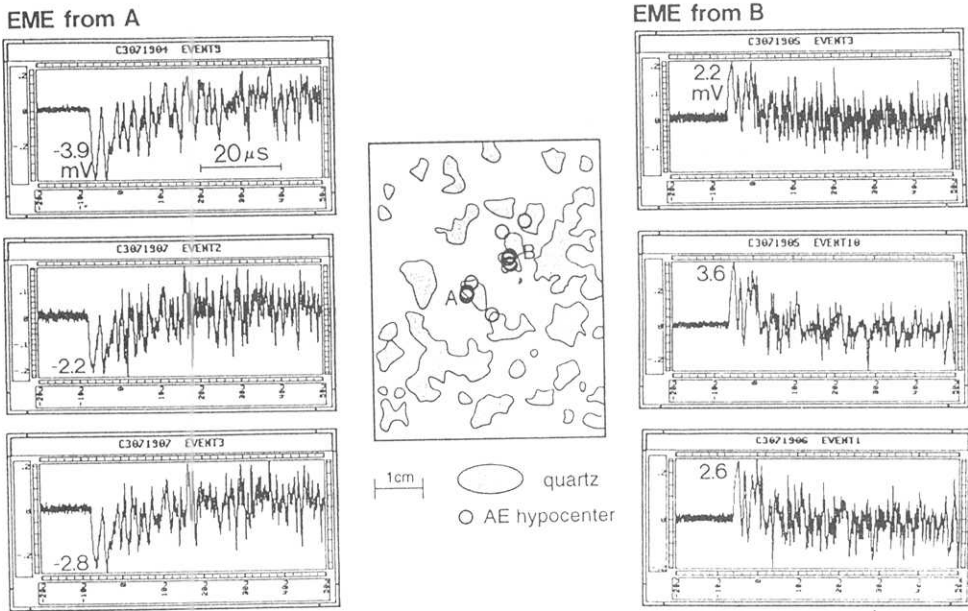


Fig.1. middle: Locations of AE events that accompany electromagnetic emission (EME). The hatched areas denote quartz crystals on the sliding surface. All the AE events accompanying EME are located on or close to quartz. left: The EME waveforms associated with three AE events of which locations are almost the same at position A. right: The EME associated with AE located at B. If the source location is the same, the initial polarity of the EME is also the same. This suggests that the initial polarity reflects the orientation of the electrical axis of the quarts. (after Yoshida et al., 1994)

地殻の比抵抗が仮に1 kΩ m程度とすると、電磁波に対するskin depthは10 Hzで約5 km、1 Hzで約15 kmとなるので、数kmの深さで発生した地震から放射された電磁波が減衰せずに地殻内を伝播し地表まで到達できるのは、10 Hzより低周波成分に限られる。したがって10Hz以下の周波数帯域に着目した観測が必要である。震源で放射された電波が直接地表まで到着するのではなく、2次的な波源から電磁波が発生する場合にはもっと高周波成分が観測される可能性もあるが、今回は地殻内を直接伝播してきた電磁波に着目することとする。地殻内での減衰を考えると、大きくて浅い地震ほど電磁波が検知しやすいだろう。また、実験室と同様に石英の圧電効果で電磁波が放射されるのなら、花崗岩質の地域で起こる地震がよい。人工起源のノイズレベルは低いほうがいいので人口密集地は避けるべきである。シグナルが非常に微弱なものである可能性が高いので、地震にできるだけ近いところで観測すべきである。このような理由から1995年兵庫県南部地震の余震が続く淡路島野島断層近くで観測を行なうこととした。花崗岩質地域であり、余震が続いているので観測点の近くで浅くて大きな地震が起こることが期待されるからである。コサイズミックであるかどうかは震源時(origin time)を知らなければならないが、大学連合がこの期間余震観測をしているため、小さな地震についても震源時の情報が得られるという点でも非常に好都合な観測点といえる。

## 2. 観測システム

Ogawa et al.(1966)が空中起源の電場変動を測定するために開発したボールアンテナをセンサーとして用いた。空中にかかげられた導体球と地球表面とでコンデンサー $C_0$ を形成し、垂直電場に比例した電位差を取り出そうとするもので、アンテナの回路はFig.2で与えられる。ゲインは、等価回路において $C_0$ とRC回路部のインピーダンス比に電圧が配分されることから

$$\left| \frac{V}{Eh} \right| = \frac{C_0 R}{\sqrt{R^2(C + C_0)^2 + \frac{1}{\omega^2}}} \quad (1)$$

となる。長周期側の遮断周波数

$$\omega_c = \frac{1}{R(C + C_0)} \quad (2)$$

より短周期側ではゲインは一定で

$$\left| \frac{V}{Eh} \right| \xrightarrow{\omega \gg \omega_c} \frac{C_0}{C + C_0} \quad (3)$$

式(3)から明らかなように、浮遊容量でほぼ決まる $C$ が $C_0$  (10 pF のオーダー)に比べ大きいと高いゲインが得られないので、できるだけ短いケーブルを使ってアンテナを高入力インピーダンス回路に接続する必要がある。その為、通常導体球の中にボルテージホロウ回路を入れる。また、前述したように我々は測定周波数領域をできるだけ長周期側に延ばしたいので、式(2)で与えられている長周期側の遮断周波数を小さくするため大きな $R$ を使う必要がある。そこで $R=10\Omega$ の抵抗を用いた。具体的な回路はSasaki et al. (1994)によった(Fig.3)。このようにして作成したボールアンテナの特性を、シグナル・ジェネレータに接続した2枚の鉄板間で電場を変動させ調べたところ、1 Hz - 1 MHz までフラットであることがわかった。

アンテナからの出力信号は、ハイカット・フィルターと商用周波数60Hzを除去するバンド・

リジェクト・フィルターを通し、500HzでAD変換して記憶容量500MBのハードディスクに書き込んだ(Fig.4)。収録装置はRefraction Technology社製のReftek 72Aを用いた。トータル観測システムの周波数応答は少なくとも1Hzから200 Hzまでほぼフラットである。トリガー方式で観測を行ない、地震計(固有周波数2Hz速度型)の信号でトリガーをかけ、トリガーの前後20秒ずつ計40秒のデータを、地震計の上下動成分とともに記録した。

大地から絶縁した状態で空中に固定するため、塩化ビニールのパイプで支柱を作り5mの高さにアンテナを設置した。また、雨が降った場合にも地表から絶縁された状態を保つため、ボールアンテナと塩化ビニールのパイプの接合部は、水平方向に多数の溝を彫ったアルリンを用いた。

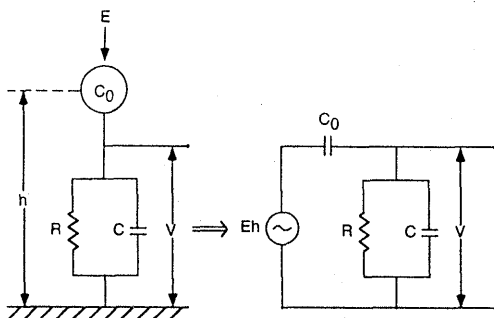


Fig.2. Schematic diagrams of the ball antenna circuit and its equivalent circuit.

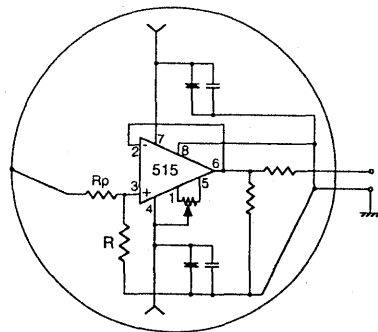


Fig.3. Ball antenna circuit.

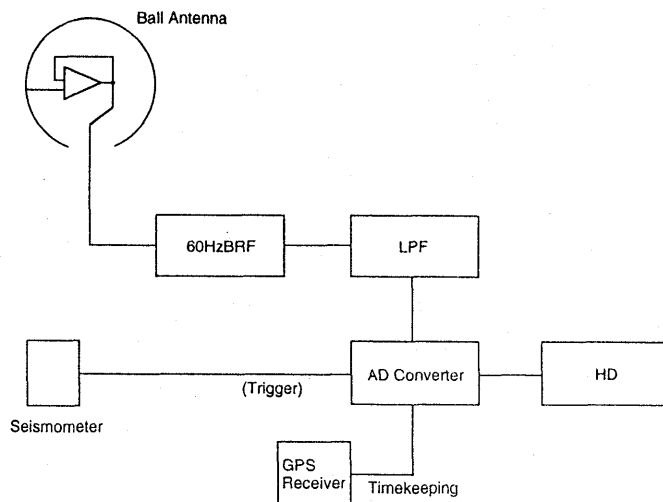


Fig.4. Block diagram of the measurement system.

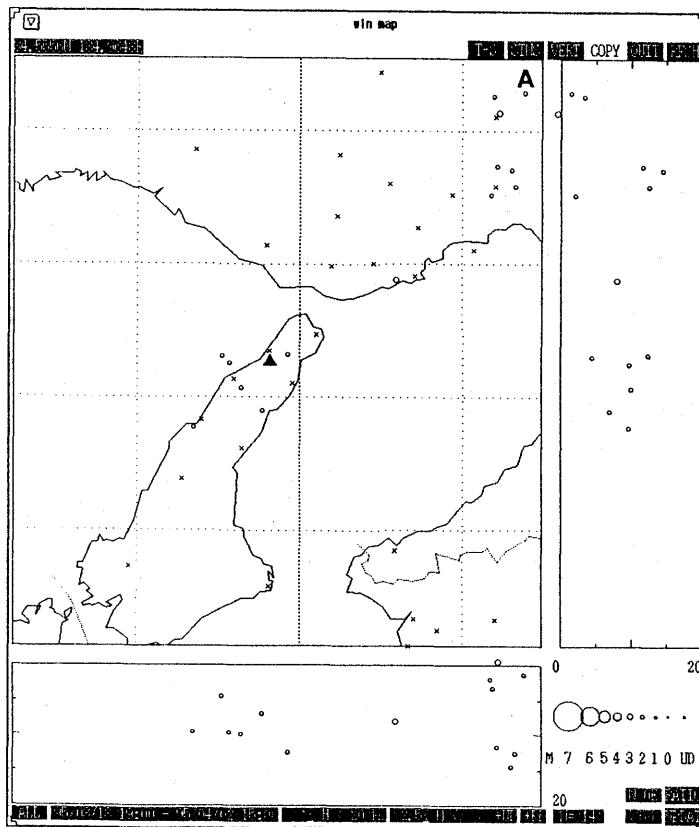


Fig.5. Hypocenters (open circles) of the aftershocks of  $M \geq 2.5$  that occurred during the observation period. The observation point is indicated by a solid triangle.

### 3. 結果

観測点をFig.5に示す。前述したように観測点は断層に近い程望ましいのだが、断層沿いに高圧線が走っているため、少し離れた地点を選んだ。この辺りは周りに人家がなく、人口密集地帯に比べるとはるかにノイズレベルが低い。

観測は1995年3月18日から4月2日まで行い、約170個の地震のトリガー記録が得られた。この観測期間中、緊急地殻活動調査地震観測網(Hirata et al., 1995)によって決定されたマグニチュード2.5以上の震源分布がFig.5に示されている。期待に反し、観測点近くでは、浅くて大きな地震がひとつも発生していなかったことがわかる。

記録の1例をFig.6に示す。3月25日に得られた記録であるが、地震波の到達直前に電場変動が観測されている。この記録からだけでは、コサイスマックなものかの判定は難しいが、大学連合により決定されている震源時(図中↓で示されている)と比較すると、電磁波発生時刻とずれており、コサイスマックなものでないことがわかる。

記録の得られた約170個の地震の中で唯一震源時と同時に電磁場にシグナルらしきものが見られた記録をFig.7に示す。この地震のマグニチュードは2.9であり観測されたものの中で3番目に大きく、震源の深さは1.5kmと求められているが、空中震源解を除くともっとも浅い地震

である。したがってこの地震だけ電磁波放射が検知できたとしてもそれほど不思議ではない。しかし、震央は観測点からかなり離れており(Fig.5のA), この距離で $V_{pp}$ が0.9Vもの信号が観測されるとは考え難い。仮に石英の圧電効果で説明しようとする、 $10^8 \text{m}^3$ の単結晶が100 barの応力変化をしなくてはならないことになる。したがって、偶然、震源時と同時に電場が地震以外の原因で変化したと考えられる。この地震以外、大学連合により決められた震源時と同時に明瞭な電場変動が見られる記録はなかった。

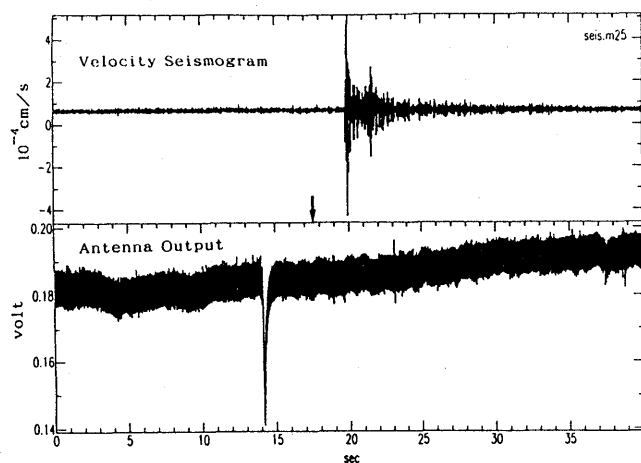


Fig.6. An example of the records of the seismometer (top) and ball antenna (bottom). The origin time of this earthquake is denoted by an arrow.

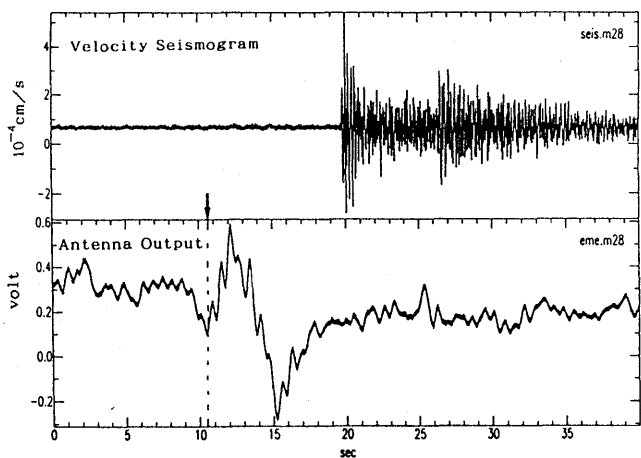


Fig.7. Another example of the records. The electromagnetic signal looks to have arrived at the same time as the origin time of the earthquake. This earthquake is one of the shallowest and largest among the events that occurred during the observation period. The amplitude of the electromagnetic variation is too large to consider it to be a seimogenic signal.

#### 4. まとめと今後の課題

浅い、近い、大きい、という3つの条件を満たす地震が観測期間中にひとつも発生しなかったため、はたして地震と同時に放射される電磁波が検知できるのかどうかを調べるという所期の目標は達成されなかった。今回の観測で結論できることは、我々の観測システムではマグニチュード3以下の地震から放射される電磁波は検知できなかったということだけである。所期の目標が達成できなかった最大の理由は、兵庫県南部地震が発生してから、ポールアンテナの作成を始めたため観測開始が非常に遅れたことにある。

コサイスマミックな電磁波放射が検出できるか調べるためには、M3よりも大きな地震が発生するような地震活動の活発な地点を選び、再度観測を行う必要がある。その際、今回の観測経験をもとに次のような点を改良する予定である。収録装置を雨から保護するために被せようとしていたビニールシートが風ではためくと出力電圧が変動することに観測開始直前に気づき、ビニールシートを取り除いたが、このようにアンテナの出力は非常に局所的な電場変動に影響される。そのため少なくとも2点で同時観測する必要がある。今回トリガー方式の記録の他に、のべ49時間の連続記録も採った。現在解析中であるが、次回の観測までに平常時のバックグラウンド雑音について知見を増やすのに役立つだろう。

今回開発したシステムによって、移動観測点で地震動と電場変動の同時記録をトリガー方式によりとることに成功した。観測チャンネル数を増やすことにより、より信頼性の高い観測システムの構築ができるであろう。

#### 謝辞

観測の準備、観測機器の設置、撤収、震源データの参照等の際し、川勝均、石川良宣、笹井洋一、加藤郁夫、亀伸樹、吉原俊博、金嶋聡、卜部卓、鷹野澄、平田直、関根真弓、飯高隆の諸氏に協力して頂いた。ここに記して深く感謝します。

#### 参考文献

- 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.
- Fraser-Smith, A. C., A. Bernardy, P. R. McGill, M. E. Ladd, R. A. Helliwell and O. G. Villard Jr., 1990. Low frequency magnetic field measurements near the epicenter of the Ms 7.1 Loma Prieta earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 17, 1465-1468.
- Fujinawa, J. and K. Takahashi, 1990, Emission of electromagnet radiation preceding the Ito seismic swarm of 1989, *Nature*, 347, 376-378.
- Gokhberg, M. B., V. A. Morgunov, T. Yoshino and I. Tomizawa, 1982, Experimental measurements of electromagnetic emissions possibly related to earthquakes in Japan, *J. Geophys. Res.*, 87, 7824-7829.
- Hirata, N., S. Ohmi, S. Sakai, K. Katsumata, S. Matsumoto, T. Takanami, A. Yamamoto, T. Nishimura, T. Iidaka, T. Urabe, M. Sekine, T. Ooida, F. Yamazaki,

- H. Katao, Y. Umeda, K. Ito, M. Nakamura, N. Seto, T. Matsushima, H. Shimizu and Japanese University Group of the Urgent Joint Observation for the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake, 1995, Urgent Joint Observation of Aftershocks of the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake, *J. Phys. Earth* (in press).
- Kopytenko, Yu. A., T. G. Matiashvili, P. M. Voronov, E. A. Kopytenko and O. A. Molchanov, 1993, Detection of ultra-low-frequency emissions connected with the Spitak earthquake and its aftershock activity, based on geomagnetic pulsations data at Dusheti and Vardzia observatories, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **77**, 88-95.
- Nitsan, U., 1977, Electromagnetic emission accompanying fracture of quartz-bearing rocks, *Geophys. Res. Lett.*, **4**, 333-336.
- Ogawa, T., Y. Tanaka, T. Miura and M. Yasuhara, 1966, Observations of natural ELF and VLF electromagnetic noises by using ball antennas, *J. Geomag. Geoelectr.*, **18**, 443-454.
- Ogawa, T., K. Oike and T. Miura, 1985, Electromagnetic radiations from rocks, *J. Geophys. Res.*, **90**, 6245-6249.
- Ohnaka, M., S. Yoshida and Shen Lin-feng, 1995, Slip-failure nucleation process and induced microseismicity, *Abst., IASPEI, 27th General Assembly*.
- Oike, K. and T. Ogawa, 1986, Electromagnetic radiation from shallow earthquakes observed in the LF range, *J. Geomag. Geoelectr.*, **38**, 1031-1049.
- Sasaki, H., K. Tsuji, M. Itoh, T. Tabei, M. Kusunose, T. Nakamura, T. Ogawa, T. Yonagita, T. Saito, K. Yamamoto, Y. Hatano, K. Takahashi and Y. Fujinawa, 1994, ELF electromagnetic wave observation system on the seabed, in "Electromagnetic Phenomina Related to Earthquake Prediction", edited by M. Hayakawa and Y. Fujinawa, Terra Pub., pp. 193-204.
- 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. Zilpimiani, M. Ohnaka and M. Nakatani, 1994, Electromagnetic emissions associated with frictional sliding of rock, in "Electromagnetic Phenomina Related to Earthquake Prediction", edited by M. Hayakawa and Y. Fujinawa, Terra Pub., pp. 307-322.
- Yoshino, T., I. Tomizawa and T. Sugimoto, 1993, Results of statistical analysis of low-frequency seismogenic EM emissions as precursors to earthquakes and volcanic eruptions, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **77**, 21-31.