

兵庫県南部地震発生時の ELFからHF帯までの 電磁界変動現象の関連性

Electromagnetic Phenomena from ELF to HF bands
Associated with the 1995 Hyogoken-Nambu Earthquake

冨澤一郎・芳野赳夫（電気通信大学）

Ichiro Tomizawa and Takeo Yoshino

(Univ. of Electro-Comm., 1-5-1 Chofugaoka, Chofu-shi, Tokyo 182, JAPAN)

EMAIL: tomizawa@aurora.ee.uec.ac.jp

要旨

兵庫県南部地震発生直後のELFからHF帯までの電磁界変動の観測結果から、広帯域にわたる変動の波形が相互に関連しており、また、約900kmの範囲で同時に受信され、しかもその強度スペクトルの特性が周波数的に逆比例する傾向を示していることが分かった。こうした特徴から発生源が、兵庫県南部地震域の地表面付近にあり、しかも指数関数的な特徴を有していることが分かった。

1.はじめに

地震や火山噴火などの地殻変動に伴う電磁放射現象の観測が各地で実施され、この結果地殻変動関連現象が報告されている[例えば、Gokhberg et al., 1982; Warwick et al., 1982; Yoshino et al., 1985; Oike et al., 1986; Fujinawa et al., 1990; Yoshino et al., 1993]。しかし、その発生・伝搬機構及び人工雑音等との判別に関しては、不明の点が多い。

一方、室内の岩石破碎実験から、様々の岩石に力を加えたり、たたいたりすると電磁気現象が観測されることが明らかにされてきた[Nitsan, 1977; Warwick et al., 1982; Ogawa et al., 1985; Cress et al., 1987; Yamada et al., 1989]。岩石破碎時の電磁氣的現象は、花崗岩などの圧電性鉱物を含む岩石で顕著に現れる[Nitsan, 1977; Warwick et al., 1982]。ただし、この現象は、圧電性を持たない岩

石でも観測されることから、必ずしも圧電性に起因するものでないことが分かっている[Ogawa et al., 1985; Cress et al., 1987;

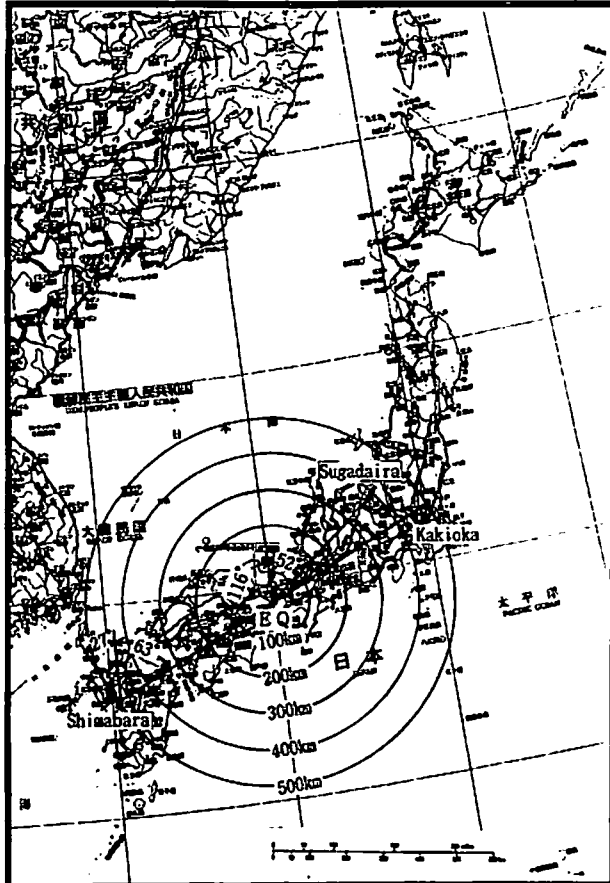
Yamada et al., 1989]。また、室内実験で得られた電磁気現象のスペクトルは、直流からHF帯までの広いスペクトルを有していることも報告されている。

しかしながら、現在までのELF帯以上の電磁気現象の観測では、単一周波数によるものがほとんど[Gokhberg et al., 1982;

Warwick et al., 1982; Yoshino et al., 1985;

Oike et al., 1986; Yoshino et al., 1993]で、他は広帯域受信波形の包絡線強度を観測していた[Fujinawa et al., 1990]ことから、地震や火山などの地殻変動現象時の周波数スペクトルに関する情報は得られていない。このため、地震前後に、どのような機構により、電磁気現象が発生し、それが観測点まで到達しているかに関する理解が進んでいない。

本報告は、1995年1月17日05時46分52秒JSTに第1図の円の中心位置で発生した兵庫県南部地震時に多地点・多周波で観測された電磁気現象に関して、その発生源位置ならびに放射スペクトルを求めた結果を述べる。また、その特徴から発生機構に関しても議論する。

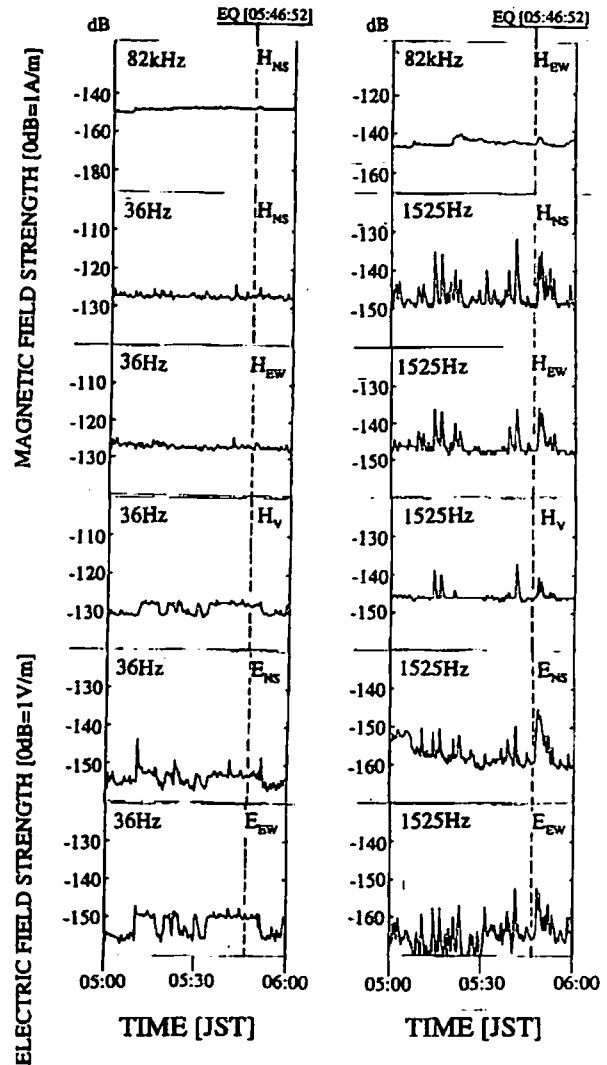


第1図 兵庫県南部地震震央から見た観測点位置と距離

2. ELF帯電磁界変動観測結果

兵庫県南部地震時の電磁界変動に関しては、当初電気通信大学の関東地方観測網と長崎県島原観測点の36Hz電磁界強度変動にほとんど変化がないことと、雷放電雑音のような変動が継続していたことから、地震との関連現象は観測されなかったと結論していた。しかし、最近島原観測点の1525Hz電磁界強度データを詳細に解析してみたところ、第2図のEQと記した時刻から約5分間にわたり、強度が急激に増

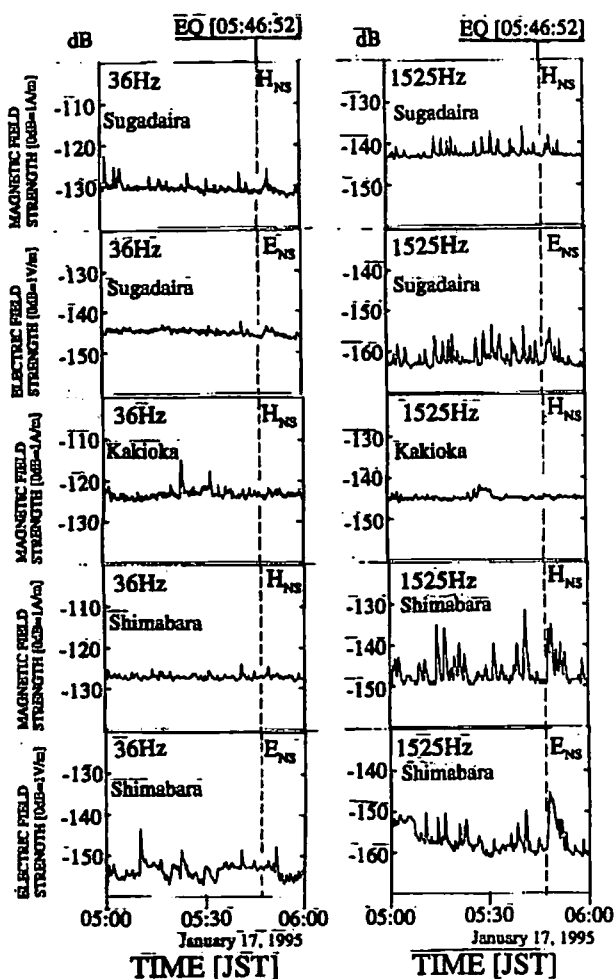
加している現象を見出した。詳しく見るとわずかではあるが同様の強度増加が36Hzおよび82kHzにも現れている。



第2図 島原観測点の電磁界変動

次に、この現象が、単に島原観測点特異のものかどうかを確認するために、同様の観測を行っている約1000km北東に離れた長野県菅平および茨城県柿岡の2観測点の電磁界強度と比較した。(第1図参照)この結果、第3図に示すように、島原観測点ほど顕著ではないが同様の強度増加が菅平観測点に現れていることが分かった。しかし、柿岡観測点の変動が現れていない。この差異は柿岡観測点の受信感度の低下にあることが後で判明した。地震直後の急激な電磁界強度の増加が約900km離れた、2つの観測点で同時に観測されていることから、この原因が局所的なものではなく、遠方か

ら伝搬してきたものであることが分かる。また、菅平の36 Hzの強度増加がわずかではあるが鳥原より顕著に現れている。

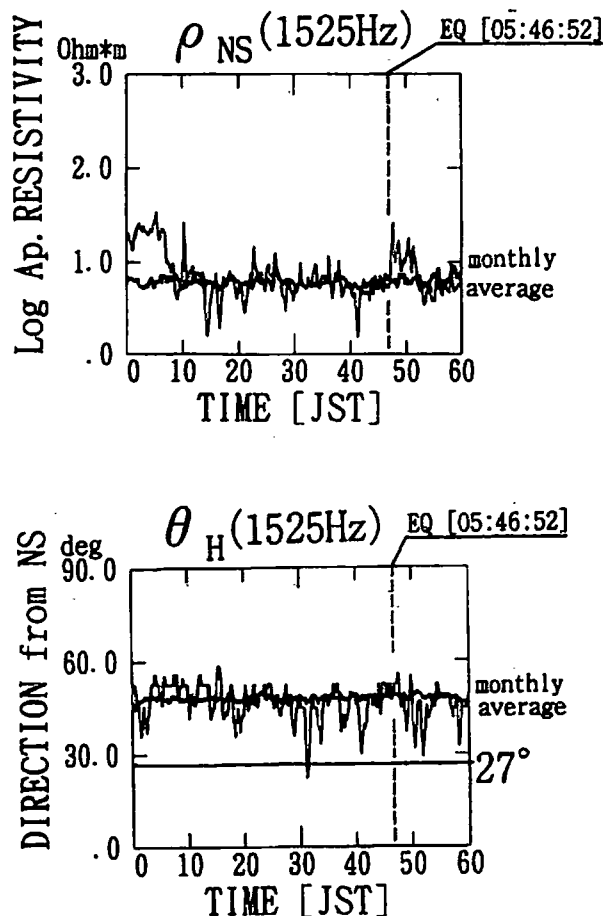


第3図 鳥原・菅平・柿岡観測点の電磁界強度変動

第2図の磁界3成分の強度を見ると、水平磁界成分 H_{NS} 、 H_{EW} が垂直磁界成分 H_V に比べて約10 dB強いことから、磁界ベクトルが水平面から15度以内にあることが分かる。ELF帯の伝搬モードはTMモードである[Galejs, 1972]ことと合致している。したがって、地震と同時に強度増加する現象は遠方から伝搬してきたものであることが分かる。

磁界ベクトルがほぼ水平方向にあることから、この2つの水平成分間の強度比が磁界ベクトルの水平面内の方向を示している。ただし、強度のみの情報であるので、その方向には2つの曖昧さが残る。第4図下部に1525 Hzの水平面内の磁界ベクトル

方向を求めた結果を示す。

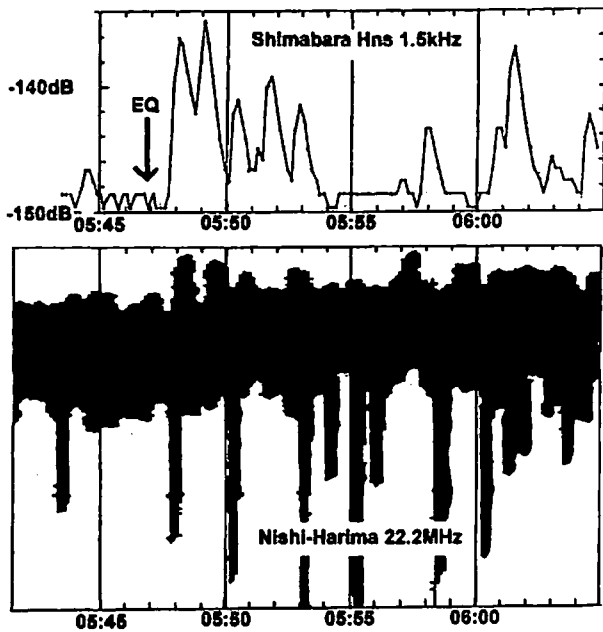


第4図 磁界ベクトル方向と見かけ比抵抗

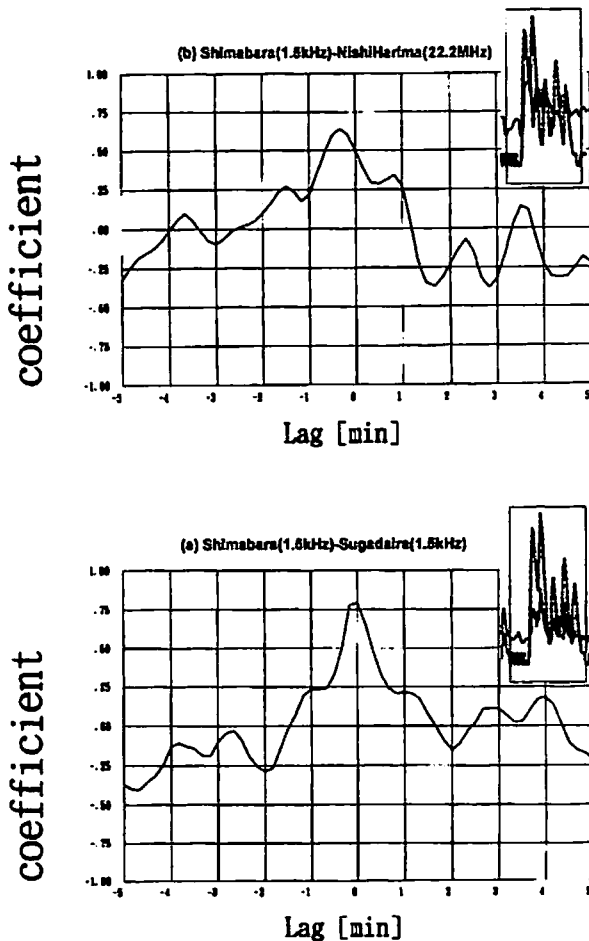
この二つの方向は他の要因を考えて何れが合理的か判断しなければならない。第1図から鳥原観測点から見た震源方向と直交する方向が北から西回りに27度になる。鳥原の観測地から求めた方向が約30度であることから、波源が震源方向にあるとすれば説明がつく。

3. HF帯電磁界変動との関連性

兵庫県南部地震時の電磁界変動に関しては、前田ら[Maeda and Tokimasa, 1995]が2.2 MHzの木星電波観測データに特異なインパルスを受信したと報告している。このデータを詳しく見たところ、インパルス状の放射のほかに逆極性のゆっくりした変動がわずかに含まれていることに気がついた。第5図に、2.2 MHzペンレ



第5図 鳥原1.5kHzと西はりま22.2MHz強度変動の比較



第6図 (a) 鳥原1.5kHzと菅平1.5kHz間の相互相関 (b) 鳥原1.5kHzと西はりま22.2MHz間の相互相関

コーダ記録を拡大して、鳥原の1.5kHz磁界変動と並べて示す。

第5図の二つの波形同士ならびに鳥原と菅平の1.5kHz水平磁界強度変動波形同士の相似度を調べるために、これら二つの組み合わせについて5時45分から10分間の波形について相互相関を求めた結果をそれぞれ第6図(b)と(a)に示す。鳥原の水平磁界1.5kHzと西はりまの22.2MHz強度変動の相関係数は0.65と良い相似度を示している。一方、鳥原と菅平の1.5kHzの強度変動波形の相関係数は更に良く0.8となる。

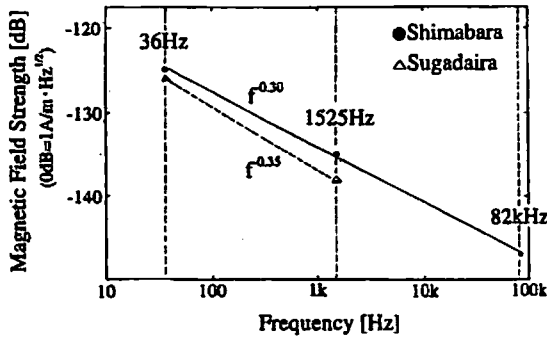
以上の結果から、ELFからHFと非常に異なった周波数での強度変動同士、また、地震震央から反対方向に約500km離れた観測点同士の波形の相関が高いということを示している。いいかえれば、電磁界変動の発生源が一つで広帯域性を持ち、しかも時間的強度変動が四方に伝搬していることになる。

4. 放射源の周波数スペクトル推定

鳥原と菅平における電磁界強度増加の周波数依存性を求めた結果を第7図に示す。1から3dBの強度差があるが、鳥原も菅平もおおよそ周波数の -0.3 乗の周波数特性を示している。これは、放射源が同一で距離が同じであると考えれば説明がつく。つまり、波源の放射と伝搬の周波数特性が同一ということである。したがって、放射源が鳥原と菅平からほぼ同一の距離になればならない。もし、震央に放射源を置けば両方の観測点からほぼ等距離となることから、周波数特性について合理的に説明できる。

第7図の周波数特性は、上に述べたように伝搬の周波数特性が重なっているので、実際の放射源の周波数特性に直すためには、伝搬の周波数特性を補正する必要がある。ここでは、簡単のため地表と電離層の成す球殻状導波管内に垂直電気双極子(VED)を考え、Galejs[1972]の方法により計算する。第8図に36Hz,1525Hz,82kHzにおける正規化磁界強度の距離依存性を示す。垂

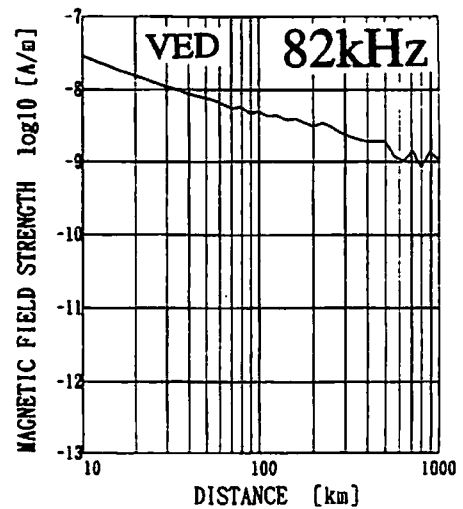
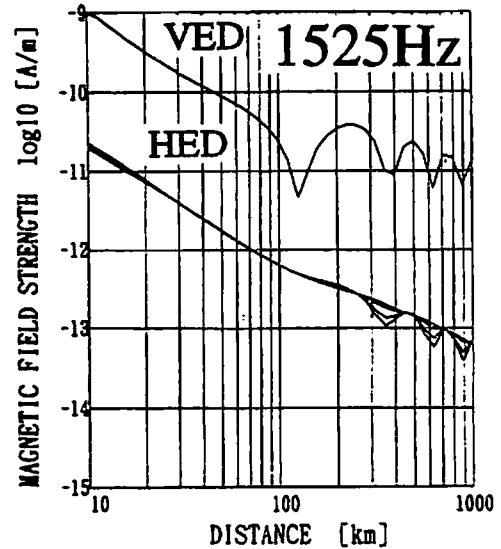
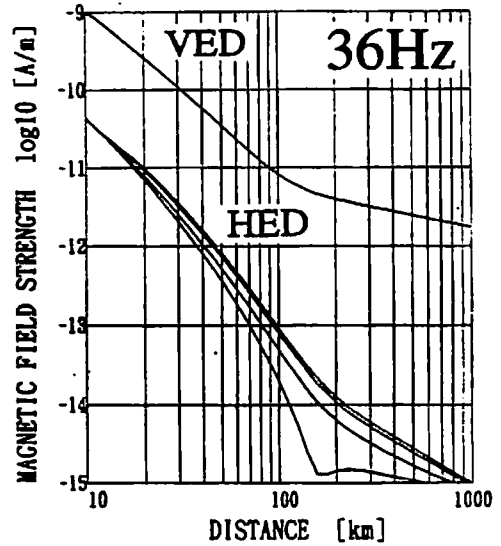
直電気双極子モデルでは、放射源から約200 kmまでに近傍電磁界成分は減衰し、以遠では伝搬モードのみが存在する。ただし、1525 Hzでは、伝搬モードが2つとなるためモード間干渉を起こしている。いずれにせよ、放射源を震央に置いた場合の鳥原までの距離が500 kmであるから、放射電磁界となっていることは明らかである。ここで、各々の周波数における実際の磁界強度と正規化磁界強度との差が伝搬補正值となる。



第7図 鳥原および菅平観測点での強度増加の周波数依存性

第9図にこれらの補正を行って求めた各周波数の双極子モーメントを示し、これらを周波数に対してプロットしてみると、36 Hzから82 kHzまでの双極子モーメントの周波数特性はおおよそ周波数の-1乗で減衰していることが分かる。

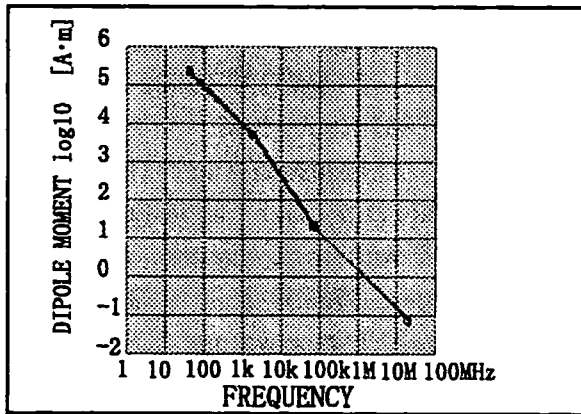
一方、Maeda and Tokimasa[1995]の放射電力の見積もりに基づいて、また、等方放射を仮定して双極子モーメントを求めてみると、 $3 \times 10^{-1} [\text{Am}]$ となる。もし、放射電力が $1/10$ となっても双極子モーメントは $9 \times 10^{-2} [\text{Am}]$ となる。この値を同じ図の上にプロットすると第9図のようになり、ELFからLFまでの周波数に逆比例する特性の延長上に乗っている。このことは、前節の単一で広帯域性を有する放射源の存在を推定したことを裏付けるものと考えられる。



第8図 垂直電気双極子モデルでの強度の距離依存性計算結果

VED Model

Freq.	Field Strength/ Normalization Factor	=Dipole Moment [Am]
36Hz	$5.6 \times 10^{-7} / 2.5 \times 10^{-12}$	$=2.2 \times 10^5$
1525Hz	$1.8 \times 10^{-7} / 2.3 \times 10^{-11}$	$=7.8 \times 10^3$
82kHz	$4.5 \times 10^{-8} / 1.9 \times 10^{-9}$	$=2.3 \times 10^1$
22MHz	0.02W(?) 0.2W(Maeda 1995)	9×10^{-2} 3×10^{-1}



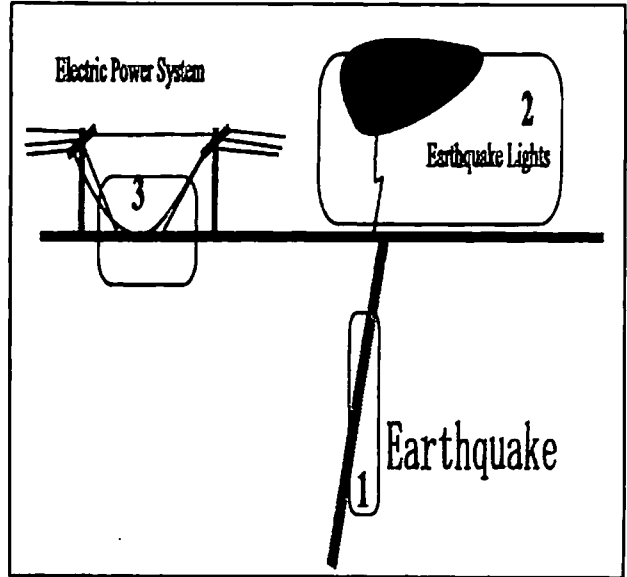
第9図 垂直電気双極子モデルと考えたときの双極子モーメントの周波数変化

5. まとめ

兵庫県南部地震発生時のELFからHF帯までの広帯域多点電磁界観測から以下のことが分かった。

- 1) 地震発生直後のELF, LF, HFと大きく違う周波数帯の強度変動が関連していることがわかった。
- 2) 震源から離れた長崎県島原、長野県菅平および兵庫県西播磨の三カ所で受信されたことから地震波動に起因するものではない。
- 3) 到来方向の推定結果は、発生源が兵庫県南部地域に有ることを示唆している。
- 4) 変動強度は、おおよそ観測周波数に逆比例して減少する傾向を示している。
- 5) 3つの帯域で波形が似ているというこ

とは、その発生源が相互に関連し、広帯域性を持っていることを示唆している。

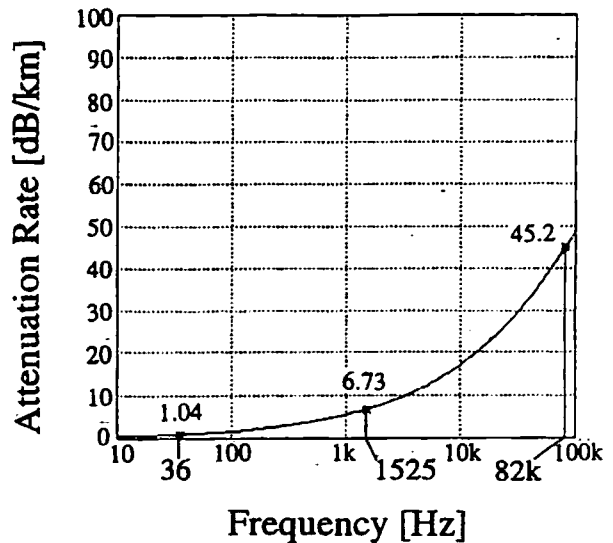


第10図 電磁界変動発生機構モデル

- 6) 地震発生時に起きる電磁気現象としては、第10図に示すように、地震現象起因のもの、地震に伴う発光現象起因のもの[佃,1995]、地震によって破壊された送電線起因のものおよび自然の雷放電現象起因のものが考えられる。
- 7) 地震発生時には、日本列島中央部では

$$\epsilon / \epsilon_0 = 4$$

$$\sigma = 10^{-4} [\text{S/m}]$$



第11図 地中の伝搬減衰の周波数依存性
落雷が観測されていないので、地震現象自体が兵庫県地域の電力線に起因す

る現象かの何れかである。

- 8) これまで、第11図に示すように、低周波ほど地中の伝搬減衰が少なく、また、電離層と地表面の形成する導波管内の伝搬減衰も36 Hzのほうが少ないことから、遠方では低周波側の電磁界変動が検出されると推測していたが、今回の結果はこれが成り立たないことが分かった。
- 9) 22 MHzではSkinDepthが、10m程度となり、地中深くからの伝搬は難しい。したがって、放射源は地表付近に存在すると考えられる。

謝辞：兵庫医科大学前田耕一郎博士に、西はりま天文台での22 MHzの観測データ使用の許可を戴いたことを深く感謝する。地震前後の落雷データを提供戴いたウェザーニュース株式会社に感謝する。

参考文献

- 佃為茂; 1995年兵庫県南部地震に伴った発光現象, 月刊地球, 号外NO.13, 184-189, 1995.
- 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,
- Fujinawa, Y., K. Takahashi, and T. Kumagai; Observations of possible precursory electromagnetic wave radiation prior to earthquakes or volcanic eruptions, *EOS*, **71**, 909, 1990.
- Galejs, J.; *Terrestrial Propagation of Long Electromagnetic Waves*, Pergamon Press, Oxford, pp.74-149, 1972.
- Gokhberg, G.B., V.A. Morgounov, T. Yoshino, and I. Tomizawa; Experimental measurement of electromagnetic emissions possibly related to earthquakes in Japan, *J. Geophys. Res.*, **87**, 7824-7828, 1982.
- Maeda, K., and N. Tokimasa; Decametric radiation associated with the Hyogo-ken Nanbu earthquake, submitted to *Geophys. Res. Lett.*, 1995.
- Nitsan, U.; Electromagnetic emission accompanying fracture of quartz-bearing rocks, *Geophys. Res. Lett.*, **4**, 333-336, 1977.
- Ogawa, T., K. Oike, and T. Miura; Electro-magnetic radiations from rocks, *J. Geophys. Res.*, **90**, 6245-6249, 1985.
- Oike, K., and T. Ogawa; Electromagnetic radiations from shallow earthquakes observed in the LF range, *J. Geomag. Geoelectr.*, **38**, 1031-1040, 1986.
- Warwick, J.W., C. Stoker and T.R. Meyer; Radio emission associated with rock fracture: Possible application to the Great Chilean Earthquake of May 22, 1960, *J. Geophys. Res.*, **87**, 2851-2859, 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., I. Tomizawa and T. Shibata; The possibility of using a direction finding technique to locate earthquake epicenters from electromagnetic precursor radiation, *Ann. Geophys.*, **3**, 727-730, 1985.
- Yoshino, T., I. Tomizawa and T. Sugimoto; Results of statistical analysis of low-frequency seismogenic EM emissions as precursors to earthquakes and volcanic eruptions, *Phys. Earth Planet. Int.*, **77**, 21-31, 1993.