2000 年鳥取県西部地震および 2001 年芸予地震に 関連した VHF 帯電磁現象の観測

広島市立大学情報科学部* 吉田彰顕・西 正博

Observation of Co-seismic Electromagnetic Phenomena in VHF Associated with the Tottori-ken Seibu Earthquake in 2000 and the Geiyo Earthquake in 2001

Teruaki YOSHIDA and Masahiro NISHI

Faculty of Information Sciences, Hiroshima City University 3-4-1, Ozuka-higashi,
Asaminami-ku, Hiroshima, 731-3194, Japan

(Received October 1, 2001; Accepted August 12, 2002)

Many observations have been made in order to clarify the relationship between electromagnetic (EM) phenomena and earthquake (EQ) activities. We have been observing EM waves in east, west, south and north directions by a PLL type synthesized FM tuner from 76 MHz to 90 MHz in VHF band. This frequency band is strictly administrated for FM broadcastings in Japan and hardly influenced by artificial or urban noises compared with other lower frequency bands. In observing EM phenomena at FM broadcasting frequency band, an observation method that distinguishes seismic EM waves from FM broadcasting waves is required. Therefore, we have developed a novel dual frequency observation method in which the observation is made at two different frequencies of f_n and f_r . During the observation, the Tottori-ken Seibu EQ ($M=7.3$, $d=11$ km) occurred on October 6, 2000. Co-seismic broadband EM waves associated with the Tottori-ken Seibu EQ were detected by the observation system located at Hiroshima City University (HCU) 130 km from the epicenter. The observed EM waves rose up to the peak level right after the EQ, then slowly returned to a normal level about three hours later. Following the Tottori-ken Seibu EQ, we had the Geiyo EQ ($M=6.4$, $d=51$ km) on March 24, 2001. Our observation system detected two kinds of EM phenomena associated with the Geiyo EQ at HCU 45 km from the epicenter. One EM phenomenon detected in VHF band appeared after the earthquake. The observed EM waves followed similar variation to that of the Tottori-ken Seibu EQ, which had a sharp rise followed by a slower decline lasting about three hours. EM levels of both f_n and f_r frequency channels were similarly fluctuated. It is therefore suggested that the detected EM waves had broadband spectra. The maximum peak level of -98 dBm was observed in the west direction that was not toward the epicenter. The peak levels of EM waves were detected at 15:28:20 (JST) after the occurrence time of the Geiyo EQ, at 15:27:54 (JST). The time when the detected EM waves rose up to the peak level corresponded to the time of seismic swing arrival at the HCU observatory. The other EM phenomenon detected in VHF band disappeared at the time of earthquake. Amplitude fluctuations of about 2 dB were observed since one day before the Geiyo EQ, then, the fluctuations disappeared at the occurrence of the earthquake. These fluctuations were mainly detected from the east and south directions, which coincide with the direction toward the epicenter.

Key words: synthesized FM tuner, VHF wave, dual frequency observation method, Tottori-ken Seibu earthquake, Geiyo earthquake.

* 〒739-3194 広島市安佐南区大塚東 3-4-1

§ 1. はじめに

地震に関連した電磁気現象については、地電位や、比抵抗の測定といった、直流 (DC) 成分の測定から、ULF, ELF, VLF, LF, MF, HF, VHF 帯まで、幅広い周波数帯にわたって観測が行われている [例えば, Hayakawa and Fujinawa eds. (1994), 力武 (2001), 長尾 (2001)].

最も基本的測定である、地電位や、比抵抗の測定では、例えば、地震発生の日前から継続した地電位差異常をとらえた事例 [宮腰 (1985)], 地震発生時より約 10 秒遅れて地電流変化をとらえた事例 [大志万 (1995)], 地震動の到来とともに異なる 2 地点で地電位差変化をとらえた事例 [竹内・他 (1996)], 地震動の到来とともに地電位差変化が発生し、約 1 時間後に定常に戻る現象をとらえた事例 [Nagao *et al.* (2000)], NTT のメタリック回線を利用したネットワーク MT 法により、北海道下に沈み込むマントル上部の電気伝導度構造を広域的に明らかにした事例 [Sato *et al.* (2001)], などが報告されている。

電磁波としての観測では、VLF 帯、LF 帯の歴史が長く、その後、より低周波数帯の ULF 帯や ELF 帯での観測や、より高周波数帯の MF 帯、HF 帯、VHF 帯へと、その観測周波数帯が拡大し、今日では幅広い周波数帯にわたって観測が行われている。

VLF 帯、LF 帯の観測では、京都府、千葉市近郊、茨城県西部の地震発生時の約 1 時間前から継続した 81 kHz の異常をとらえた事例 [Gokhberg *et al.* (1982)], その後、関東地方周辺の複数の観測点で 36 Hz, 1525 Hz, 82 kHz において、1985 年から 5 年間に 29 例の電磁放射を検出した事例 [Yoshino *et al.* (1993)], 163 kHz のパルスが地震の前に増加する事象をとらえた事例 [Oike and Yamada (1994)], VLF 帯パルスが地震の前に増加し、地震発生とともに消滅する現象をとらえた事例 [Fujinawa and Takahashi (1998)], 地震発生の日から 4 日前に発生した VLF 帯電磁波異常の到来方向を特定した事例 [Asada *et al.* (2001)] など、多数報告されている。

より低周波の ULF 帯では、ロマブリタ地震 [Fenoglio *et al.* (1995)], スピタク地震 [Molchanov *et al.* (1992)] などにおいて、地震に先行する ULF 帯磁場変動が報告されている。また ELF 帯では 223 Hz において、複数の観測点において地震に関連した電磁現象をとらえた事例 [Hata *et al.* (1996)], などが報告されている。

より高周波の HF 帯では、1960 年のチリ地震の際、地震発生時の約 5 日前に 18 MHz の電磁異常を検出した事例 [Warwick (1963)], 1995 年の兵庫県南部地震の際、地震発生の前後約 1 時間の間に 22.2 MHz のパルス異常を検出した事例 [Maeda and Tokimasa (1996)] な

どが報告されている。なお兵庫県南部地震では、地震に関連した多くの電磁波異常が記録され、まとめて報告されている [例えば、力武 (2001), 長尾 (2001)].

以上のような、地震に関連して電磁放射を直接とらえた事例の他に、電離層異常に着目し、オメガ電波 [Hayakawa *et al.* (1996)] や、FM 放送波の電離層反射・散乱異常 [Kushida and Kushida (1998), Sakai *et al.* (2001)] を間接的にとらえる観測が行われている。

しかし、VHF 帯の観測では、FM 放送波の電離層反射・散乱異常から地震現象をとらえるという間接的方法は行われているものの、地震に関連した電磁放射を直接的にとらえた事例はほとんど報告されていない。

VHF 帯は、その観測事例が少ないことに加え、都市・人工ノイズが少ない周波数帯であること、高感度な受信機の入手が容易であること、観測用アンテナも低周波数帯に比べ小型であることなど、微弱な電磁放射の観測に適していることから、筆者らは、VHF 帯に着目し、全国 10 か所において、地震に関連した電磁放射の観測を行っている。VHF 帯の観測周波数としては、FM 放送業務専用に割り当てられ、他からの電波干渉の少ない FM 放送帯を選択した。観測用受信機には、FM 放送受信用に市販されている PLL 形シンセサイズド FM チューナ (以降、シンセサイズド・チューナという) を用いた。しかし、この FM 放送帯域において微弱な電磁現象を観測する場合、FM 放送波そのものが、最大の干渉電波となる。そのため、観測したデータの変化が、FM 放送波による電波干渉か、それとも地震に伴う電磁放射なのかを識別するため、筆者らは二周波観測法 [吉田・西 (2001)] により観測を行っている。

本論文では、観測方法、観測系の構成法について述べるとともに、広島市立大学観測点において検出した、鳥取県西部地震、および芸予地震に関連した電磁放射特性について報告する。

§ 2. 観測方法

2.1 観測周波数帯

地震に関連した電磁現象がどのような周波数スペクトルを有しているのか、現状では十分には明らかにされていない。このため、地震に関連した電磁現象の観測に当たっては、多くの異なる電波周波数帯での観測が望ましい。しかし、現代社会は、すでに通信や放送などの人工電波はもちろん、電気・機械製品などからの電磁ノイズ、さらに太陽フレアや銀河ノイズなどの宇宙起源ノイズ、雷や雪雲などの気象起源の自然ノイズなど、多くの電磁波で溢れている。このような現代社会の電磁環境の中で、地震に関連した電磁現象を、より正確に検出する

ためには、これらの電磁波の影響を受けにくい観測周波数帯を選定するとともに、観測対象の電磁波と、それ以外の電磁波との識別が不可欠である。

筆者らは次のような理由から、VHF帯(30 MHzから300 MHz)、中でもFM放送帯(76 MHzから90 MHz)を観測周波数帯として選定し、観測を行うこととした。

(1) 観測で問題となる都市・人工ノイズはこれまでの研究から、一般に周波数が高くなるに従い、そのノイズ量が減少することが知られている[ITU-R (1998)]。都市・人工ノイズが少ないVHF帯観測点では、銀河ノイズ[Jansky (1932)]の検出が可能となる。筆者らの観測系では、銀河ノイズの観測状況を、その観測点における都市・人工ノイズ環境の一つの目安としている。

(2) 76 MHzから90 MHzは、国内においてFM放送専用帯として、電波監理されているため、他目的からの電波干渉が少ない。また、FM放送波の送信場所は固定であり、送信周波数、出力などの情報が公開されている。そのため、各観測点においては、その周辺のFM放送波の影響を避けて、観測周波数を設定することができる。

(3) 観測系の受信機としては、近年の半導体製品の性能向上により、フロント・エンドに低雑音なGaAs-FETを用いた、シンセサイズド・チューナが市販されており、低コストで利用できる。また、アンテナについては、VHF帯の波長が数m程度であるため、設置保守が容易であるとともに、市販のアンテナを活用できる。

(4) VHF帯電波の地表波としての伝搬距離は、発信源や観測点の標高にも依存するが、一般に、100 kmから200 km程度[細矢(1999)]であり、それ以遠の電磁波の影響を受けにくい。そのため、観測エリアは、電波の見通し距離に相当する、半径100 kmから200 km程度となり、広域観測に適している。

(5) VHF帯電波は、定常の電離層電子密度から求まる、電離層反射の臨界周波数より高周波であり、電離層反射の影響を受けにくい。このため、低周波数帯の観測法に比べ、熱帯地方からの雷ノイズの影響をほとんど受けない。ただし、時として電離層電子密度の上昇に伴う、Sporadic-E層による、FM放送波の反射を受信することがある。しかし、次項で述べる二周波観測法により、VHF帯電磁放射とFM放送波との識別は可能である。

2.2 二周波観測法

前項で、FM放送帯は、他の低周波数帯と比較し、都市・人工ノイズが少なく、微弱な電磁現象の観測に適していることを述べた。しかし、この周波数帯は76 MHzから90 MHzの範囲において、原則として100 kHzごとにFM放送用の送信周波数として割り当てられ、国内のFM放送局から、一定の送信電力でFM放送が行わ

れている。

一般に電磁波観測においては、自然電磁波(雷、雪雲、銀河ノイズなど)と人工電磁波(通信・放送波、電気製品からのノイズなど)が検出される。このため、微弱な電磁波を検出しようとする場合、検出対象とそれ以外の現象との識別が不可欠となる。特にFM放送周波数帯において、地震に伴う電磁現象の観測を行う場合、FM放送波の影響をいかに避けるか、また識別するかが、観測の必須条件となる。筆者らの観測系においても、Sporadic-E層、飛行機、流星エコーなどによるFM放送波の反射・散乱、地表波伝搬などによる受信レベル変動を、日常的に観測している[西・吉田(2001)]。そこで筆者らは、地震に関連する微弱な電磁現象と、それ以外の要因の電磁現象を識別するため、Fig. 1に示すような二周波観測法を考案し、観測を行っている。

二周波観測法は、次のように2つの異なる周波数(ここではfn波、fr波として示す)を、観測周波数として設定するものである。

(fn波) FM放送局の送信周波数としては、国内で割り当てられていない80.8 MHzから81.2 MHzの内の、1周波数。

(fr波) 観測点では通常受信されない、遠隔地のFM放送局が送信している周波数の内の、1周波数。

この二周波観測法では、これまで受信した観測データの特徴から、大きく次の3つのケースに分類できる。

(fn波のみが変動する場合) 27 MHz帯のトランシーバの3次高調波ひずみである81 MHzの電磁波からの干渉と考えられる。この場合、fn波の受信機の復調音から、トランシーバで通話する音声を確認することができる。また、この場合の受信レベル変動は、多くの場合、継続時間が数分以下のパルス的な変動を示す。

(fr波のみが変動する場合) 遠隔地のFM放送波が、電離層、流星エコー、飛行機などからの反射・散乱により受信された可能性が高いと考えられる。この場合、fr波の受信機の復調音から、FM放送であることを確認でき、天気予報、交通情報、電話番号、コマーシャルなどから、fr波の送信局を特定することができる。また、この場合の受信レベル変動は、日変化、継続時間などにおいて、その反射物が何であるかを識別できるほど、特徴ある変化を示すことを確認している[西・吉田(2001)]。

(fn波、fr波ともに変動する場合) 異なる2つの周波数の受信レベルが変動したことから、広帯域な電磁波を受信した可能性が高いと考えられる。またこの場合、fn波、fr波ともに、その受信波の復調音は、FM方式特有のザーというFMノイズ音となる。

このように、二周波観測法は、観測データに現れた変

Fig. 1. Dual Frequency Observation Method.

fn: A frequency channel is selected from 80.8 MHz to 81.2 MHz, which is not assigned for any FM broadcasting use in Japan.

fr: A frequency channel is selected from 76 MHz to 90 MHz except for 80.8 MHz to 81.2 MHz. This frequency channel is not usually received at the observation site and is used at a remote FM station far from the observation site.

Case 1: Fluctuation in only fn frequency; in this case, a received signal is considered as a communication signal from a transceiver radio station.

Case 2: Fluctuation in only fr frequency; in this case, a received signal is considered as a reached FM broadcasting signal from a remote station.

Case 3: Fluctuation in both fn and fr frequencies; in this case, a received signal is considered as a broadband EM signal.

Then, we can identify by the observation method whether a received signal is a broadband seismic electromagnetic signal or an artificial signal.

化から、広帯域な電磁波か、それともトランシーバの3次高調波ひずみや、FM放送波などの人工電磁波を受信したものなのか、容易に識別することができ、1波のみによる観測と比較し、より識別精度の高い観測が可能となる。

§ 3. 観測系の構成

二周波観測法による広島市立大学観測系の構成図をFig. 2に示す。受信アンテナには、VHF帯FM放送信用の5素子八木アンテナを用い、各エレメントを大地に対し水平にし、東西南北4方向に設置した。観測機器類は屋内に設置し、アンテナと受信機は同軸ケーブルにより接続した。受信機にはシンセサイズド・チューナを

Fig. 2. Basic configuration of our observation system. The four 5-element Yagi FM antennas are directed toward east, west, south and north, respectively. Each antenna is connected with two synthesized FM tuners to receive the level of fn and fr channels. The received levels are converted to digital data by the A/D converter. Then, the personal computer analyzes the digital data.

用い、各観測方向につき2台ずつ、合計8台接続し、二周波観測法の構成とした。また受信レベル値は、データ処理を容易に行えるよう、ADコンバータを介し、デジタル値としてパソコンのハードディスクに記録した。

広島市立大学観測系（北緯34度26分13秒、東経132度25分5秒）の屋上に計測した。アンテナの指向特性をFig. 3に示す。本測定では、広島市立大学から最も近く、かつ見通しのある、五日市FM放送局（北緯34度23分42秒、東経132度21分34秒）から送信されている、81.3 MHzの放送波を受信し、五日市FM放送局の方向を0度とし、アンテナを15度ずつ回転しながら、360度の範囲で、指向特性の測定を行った。前方（0度方向）と後方（180度方向）の2方向に指向性を有しており、その指向性差は約8 dB、指向性の半値幅は約70度であり、それぞれ、5素子八木アンテナの、標準的な電気特性を示していることを確認した。

観測用の受信機には、近年FM放送帯の受信機として広く普及している、シンセサイズド・チューナを用いた。このチューナは、水晶共振器により周波数の安定化を図り、かつフロント・エンドに低雑音指数のGaAs-FETを用いており、各種市販品が全国で手軽に入手できる。筆者らの観測に用いたシンセサイズド・チューナもその内の一機種であり、その電気特性をまとめると次のようになる。

(1) 3 dB 受信帯域幅=100 kHz, 30 dB 受信帯域幅=300 kHz, 70 dB 受信帯域幅=400 kHz と、優れた周波

Fig. 3. Directivity of 5-element Yagi antenna installed on the rooftop in Hiroshima City University (HCU). The half-value angle in main lobe is about 70 degrees. The directivity ratio between forward and backward is 8 dB.

数選択性を有しており、隣接周波数干渉を受けにくい。

(2) 受信レベル (dBm) に対応した検出電圧 (mV) は Fig. 4 に示すように、1 対 1 に求めることができる。Fig. 4 に示した校正カーブに基づき、観測で得られた検出電圧 (mV) から、受信レベル (dBm) へ変換した。その変換誤差は最大約 0.5 dB であった。なお、校正カーブの温度による変動誤差は約 0.5 dB/10 度であった。

(3) 受信レベルの測定限界は、Fig. 4 に示すように、約 -120 dBm であった。観測に用いたシンセサイズド・チューナは、雑音指数=2 dB、受信帯域幅 (3 dB)=100 kHz であり、計算により求められる受信機の熱雑音 (測定限界値) は -121.8 dBm となり、Fig. 4 の実測結果と、よく一致した。

なお、市販されている複数のシンセサイズド・チューナについて、その電気特性を比較したが、どの機種も性能的に大差なく、ほぼ同様の性能を有していた。

実際の観測においては、FM 放送波からの電波干渉を極力避けるため、観測に先立ち、観測点毎に、76 MHz から 90 MHz の範囲にわたって、100 kHz ごとの受信レベルを測定し、FM 放送波の影響が最も少ない周波数を選択し、その観測点における観測周波数 (fn 波、fr 波) として設定した。

Fig. 5 は広島市立大学において、76 MHz から 90 MHz の範囲で測定した、FM 放送波の全スペクトルである。観測点近傍の広島地区で放送されている FM 放送

Fig. 4. Input-and-output performances of the synthesized FM tuner. Measured performances are well uniformed for each frequency, 77, 81, 85 and 89 MHz. The synthesized FM tuner can measure EM waves up to -120 dBm, the thermal noise level.

Fig. 5. Spectra from 76 MHz to 90 MHz every 100 kHz at HCU. In these spectra, we can find some frequencies of lower received levels as shown by arrows. Electromagnetic waves associated with earthquakes may be observed in these frequencies without FM broadcasting interference. Then, fn and fr channels of the dual frequency observation method are selected in these frequencies.

局のみならず、広島市立大学からは見通しのない山口、松山、大分にある FM 放送局からの電波も、観測点に伝搬することを確認した。しかし、測定した Fig. 5 のスペクトルの内、図中に矢印で示した周波数点では、スペクトル間隙が存在する。このようなスペクトル間隙においては、FM 放送波からの干渉を最小にでき、微弱な電磁波の観測が可能となる。

76 MHz から 90 MHz のスペクトル計測により、広島

市立大学において、fn 波は、東西南北すべての方向を 80.9 MHz に設定し、fr 波は、東=79.5 MHz または 89.9 MHz、西=86.8 MHz または 84.6 MHz、南=85.6 MHz、北=86.8 MHz または 84.6 MHz とし、観測を開始した。

なお、観測系の時刻情報は、1 時間ごとに、ネットワーク経由で正確な時刻情報を入手し、観測系の時刻ズレを修正した。

次節以降、鳥取県西部地震および芸予地震の際に、広島市立大学において検出した電磁現象について報告する。Fig. 6 に観測点および震央の位置を示す。

§ 4. 鳥取県西部地震に関連した電磁波の観測結果

2000 年 10 月 6 日 13 時 30 分 18 秒 (JST)、鳥取県西部地震 ($M=7.3$ 、震源の深さ 11 km) が発生した。本節では、震央から約 130 km 離れた広島市立大学において観測した、鳥取県西部地震に関連した VHF 帯電磁放射の、受信結果を報告する。データのサンプリング間隔は 1 分である。地震発生時刻を含む 5 時間の東西南北 4 方向の変動を Fig. 7 に示す。Fig. 7 では、上から東西南北の 4 方向における、fn 波、fr 波の両方の受信レベル変動を示している。4 方向共通の現象として、地震直後から受信レベルが上昇をはじめ、揺れがおさまって約 3 分後にピークレベルに達した。また西方向や北方向では、その後、受信レベルは減少に転じ、約 3 時間後に、通常の

受信レベルに戻るという現象を、観測することができた。なお、東方向や南方向において、西方向や北方向のように受信レベルが減少する現象が、検出されなかった理由は、観測データに銀河ノイズが重畳したためである。地震発生直後に観測された、東西南北 4 方向の最大受信レベルは、それぞれ約 -110 dBm、-104 dBm、-110.5 dBm、-110.5 dBm であった。また地震発生直後より、fn 波、fr 波両方の観測周波数の受信レベルが、同様の変動を示したことから、地震に関連して検出した

Fig. 6. Map of epicenters of the Tottori-ken Seibu EQ and the Geiyo EQ and HCU observatory. The solid stars show the epicenters and the solid circle shows the location of Hiroshima City University. The distance between the epicenter of the Tottori-ken Seibu EQ and HCU is about 130 km. The distance between the epicenter of the Geiyo EQ and HCU is about 45 km.

Fig. 7. Received EM waves associated with the Tottori-ken Seibu EQ at Hiroshima City University on October 6, 2000 (JST). The received levels from east, west, south and north directions are shown from top figure, respectively. Solid lines show fluctuations of fn channel and gray lines show fluctuations of fr channel. The received levels of EM waves rose at 13:30 (JST) in each direction. Both of the levels of fn and fr were similarly fluctuated. The maximum peak levels were detected at three minutes later of the Tottori-ken Seibu EQ. These received levels have been observed every one minutes.

電磁波は、広帯域な電磁波であると考えられる。

なお、東方向のfr波(79.5 MHz)において、12時から13時にかけて、パルスのレベル上昇が観測されたが、fn波のレベル上昇を伴っておらず、fr波固有のレベル変化であることがわかる。これは、日常的に観測されており、79.5 MHzのFM放送波が、飛行機などに反射し、受信されたものであることを確認しており〔西・吉田(2001)〕、地震とは無関係なレベル変動である。また南方向の観測データでは、17時にかけて徐々に受信レベルが上昇する現象が、fn波、fr波ともに観測されたが、これは天の川銀河の南中に関連した銀河ノイズによるものである。広島市立大学の南方向には一日一回、天の川銀河の南中に関連した銀河ノイズが検出され、そのピークが一月に、約2時間づつ早まる現象を、日常的に観測している〔Yoshida and Nishi (2001)〕。なお、広島市立大学の観測系における、バックグラウンド・ノイズは、東西南北それぞれ、約-113 dBm、-108 dBm、-112 dBm、-113 dBmである。

§5. 芸予地震に関連した電磁波の観測結果

鳥取県西部地震の観測においては、データのサンプリング間隔が1分であったが、その後、より詳細な時間変化を検出できるよう、サンプリング間隔を10秒に変更し、観測を行った。2001年3月24日15時27分54秒(JST)、芸予地震($M=6.4$ 、震源の深さ51 km)が発生した。本節では、震央から約45 km離れた広島市立大学において観測した、芸予地震に関連したVHF帯電磁放射の、受信結果を報告する。なお、広島市立大学の観測室において、地震発生時刻の前後4時間にわたり、ビデオカメラによる観測室内の録画と、シンセサイズ・チューナのfr波の復調音を、録音することができ、地震発生のその瞬間を、VTRに記録することができた。

5.1 地震発生とともに生じた現象

広島市立大学において、地震に関連して、fn波、fr波ともに変動した電磁波を観測した。地震発生時刻を含む6時間の東西南北4方向の変動をFig. 8に示す。鳥取県西部地震同様、地震発生直後から受信レベルはピークレベルに達し、約3時間後に通常レベルに戻った。このような事例は、広島市立大学において観測を開始して以来、鳥取県西部地震および芸予地震の2例のみであった。観測した変動が、地震発生とともに生じたことから、検出した受信レベル変動は、地震に関連した現象である可能性が高いと考えられる。またfn波、fr波ともに変動したことから、観測した電磁波は広帯域な電磁波であると考えられる。さらに録音したfr波の復調音を再生し、確認したところ、広帯域電磁波特有のザーという

FMノイズ音であった。

4方向の内、最大の受信レベルは-98 dBmであり、西方向で観測された。なお東方向の14:10、16:45、18:20に見られるfr波(89.9 MHz)のパルスのレベル上昇は、fn波のレベル上昇を伴っておらず、fr波固有のレベル変化であることから、二周波観測法の項で言及したように、遠隔のFM放送波が到来したものであり、地震とは無関係の変動である。また、録音したfr波の復調音

Fig. 8. Received EM waves associated with the Geiyo EQ at Hiroshima City University on March 24, 2001 (JST). The received levels from east, west, south and north directions are shown from the top figure, respectively. Solid lines show fluctuations of fn channel and gray lines show fluctuations of fr channel. The received levels of EM waves rose at 15:28 (JST) in each direction. Both of the levels of fn and fr were similarly fluctuated. The detected levels slowly decreased and returned to the normal level about three hours later as well as the Tottori-ken Seibu EQ. These received levels have been observed every 10 seconds.

を再生したところ、89.9 MHzを送信周波数とする、神戸からのFM放送であることを確認でき、東方向で受信したfr波のパルスのレベル上昇は、89.9 MHzのFM放送波が、飛行機などに反射して、届いたものであることがわかる。

5.2 地震発生とともに消滅した現象

芸予地震発生のおよそ1日前から続いた電磁現象が、地震の発生とともに消滅するという現象を検出した。Fig. 9は広島市立大学で観測した、東方向のfn波(80.9 MHz)の受信レベル変動を、上から3月22日、23日、24日、25日の4日間について示した。芸予地震が発生した24日15時28分(JST)のおよそ1日前から受信レベル変動に、1 dBから2 dBの振幅変動が重畳していることがわかる。このような変動は観測開始以来、初めての現象であり、23日から24日にかけての深夜においても継続しており、地震発生とともに、その振幅変動が消滅したことから、地震に関連した電磁現象の可能性が高いと考えられる。

なお、3月25日の7時から11時(JST)にかけて

Fig. 9. Time variation of fn channel (80.9 MHz) in the east direction at HCU from March 22 to March 25, 2001 (JST). A small fluctuation of about 2 dB was occurred since one day before the Geiyo EQ. Then, the fluctuation just disappeared at the occurrence of the earthquake.

-113 dBm から -106 dBm のレベル変動が観測されているが、これは、太陽フレアによる電磁ノイズを受信したものであり、4月2日まで継続してほぼ同じ時間帯で観測された。

5.6. 観測結果に対する考察

6.1 芸予地震の発生とともに生じた現象

4節、5節において、地震発生とともに発生した、VHF帯電磁放射の観測結果を示した。さらに、芸予地震発生の瞬間をより詳細に観察するため、震央から約45 kmの広島市立大学観測点で得られたVHF帯観測データと、震央から約38 kmのK-Net広島観測点(北緯34度22分、東経132度27分)の地震動データを合わせてFig. 10に示す。地震発生とともに、広島市立大学においてVHF帯受信レベルが上昇しているが、その上昇開始時刻は15時28分10秒であり、地震発生時刻(15時27分54秒)より遅れ、K-Net広島観測点のS波到来時刻(15時28分10秒)と一致した。このことから、地震発生とともに生じたVHF帯電磁波は、これまで観測された、地電位変動[竹内・他(1996), Nagao et al. (2000)]や、ULF帯[Fujinawa and Takahashi (1998)]の観測結果と同様に、地震動の到来にともない、発生したものと考えられる。なお、VHF帯観測データは10秒ごとに記録し、Fig. 10では、例えば6秒から15秒までの受信レベルの平均値を10秒の値に、16秒から25秒の平均値を20秒の値として記録した。

また、広島市立大学において録画した映像を再生したところ、地震による揺れは15時28分08秒(JST)から始まり、特に大きな揺れは15時28分23秒から15時28分20秒まで続き、15時28分23秒に、地震による揺れがおさまったことを確認した。一方、Fig. 10に示したVHF帯電磁波の受信レベル上昇は15時28分10秒に始まり、その最大値は、15時28分20秒(JST)に検出しており、広島市立大学で揺れを録画した時刻とも一致した。

このように、K-Net広島観測点の地震動の変化、地震の瞬間をとらえたVTRの記録時刻から判断すると、地震に関連して検出したVHF帯電磁波は、地震動の到来にともない発生した電磁波である可能性が高いと考えられる。

次に、地震発生とともに検出したVHF帯電磁波の最大受信レベルより、その到来方向について考察する。鳥取県西部地震、芸予地震において、東西南北4方向で検出した、受信レベルの最大値を、Fig. 11に示す。最大受信レベルの値は、鳥取県西部地震と芸予地震では異なるものの、2例とも西方向で検出され、ともに震央方向と

Fig. 10. Seismograph signals in the K-net and VHF signals in HCU associated with the Geiyo EQ, 15 h 27 m 54 s on March 24, 2001 (JST). The K-net seismograph is installed at HRS 013 point in the K-net. The VHF signals rose up corresponding to seismic swing arrival at HCU. In VHF data, the solid line shows received levels of 80.9 MHz (fn) and the dotted line shows received levels of 84.6 MHz (fr) in the west direction.

は異なった方向で観測された。異なる地震で 2 例とも、西方向で最大の受信レベルを記録したことから、この電磁放射は、地震源によらず、観測点もしくは観測点近傍に依存した要因の可能性が高いと考えられる。

地震動の到来とともに生じる電磁現象はすでに、地電位差変化や ULF 帯で検出されており、その発生メカニズムとして、流動電位による説 [例えば、Ishido and Mizutani (1981), 竹内・他 (1996), Nagao *et al.* (2000)], 震源域での微小破壊に伴う電荷対の生成説 [例えば、Molchanov and Hayakawa (1995)], 対流圏における放電説 [Fujinawa *et al.* (2001)] などが提案されている。今回、筆者らが VHF 帯で検出した、地震動の到来とともに発生とともに生じた電磁放射現象の発生源および発生メカニズムは、現時点では不明であるが、観測点の広島市立大学の西方向に、活断層が走っていることは興味深い。電磁放射の発生源として、活断層に着目した

Fig. 11. This figure shows the peak level chart detected at HCU associated with the Tottori-ken Seibu EQ and the Geiyo EQ. Solid lines show the peak level of fn channels and gray lines show the peak level of fr channels. The peak levels were detected from the west direction in the both earthquakes and not from the epicenters.

説 [Warwick *et al.* (1982)] もあり、今後さらに観測事例を増やし、電磁放射の発生源および、発生メカニズムについて考察できるようにしたい。

6.2 芸予地震の発生とともに消滅した現象

地震に伴う電磁現象においては、その前兆現象について関心が高まっており、中でも、地震発生とともに消滅する電磁現象は、地震に関連した現象の可能性が高いとして注目されている。これまでの観測でも、81 kHz の異常をとらえた事例 [Gokhberg *et al.* (1982)], 地震の発生前に LF 帯 (163 kHz) [Oike and Yamada (1994)], VLF 帯 (1 から 10 kHz) [Fujinawa and Takahashi (1998)] で放射パルスが増大する報告、1995 年の兵庫県南部地震の際、地震発生の前後約 1 時間の間に 22.2 MHz のパルス異常を検出した報告 [Maeda and Tokimasa (1996)], 同じく兵庫県南部地震において、地震発生前から続いた AM ラジオ放送 (MF 帯) に混入したノイズが、地震発生とともに消滅したとの事例 [芳野 (1996)], などが報告されている。

筆者らは、広島市立大学内の観測点において、Fig. 9 に示したように、地震発生の約 1 日前より、通常のレベル変動に重畳した変動が昼夜連続して発生し、地震発生とともに消滅するという電磁現象を、VHF 帯で検出した。この重畳変動について、地震発生時刻を含む 6 時間の様子を、Fig. 12 に示す。Fig. 12 では、上から東西南

北4方向のfn波(80.9 MHz)の受信レベル変動幅を示した。Fig. 12で示した変動幅は、観測した10秒ごとの受信レベルの差分を求め、表示した。特に東方向の変動が顕著であり、次いで南方向の変動が顕著であり、その変動幅は約 ± 1 dBであった。広島市立大学内の観測点で検出した、このような重畳現象は、観測開始以来、初めての現象であり、事例としては少ないが、地震発生とともに消滅したことから、地震に関連した現象と考えられる。なお、fn波の変動よりは微弱ではあったが、fr波においても同様の重畳変動を観測しており、広帯域な電磁現象であったと考えられる。

Fig. 12では、東西南北4方向のfn波(80.9 MHz)の受信レベル変動幅を、地震発生時刻を含む6時間の様子

Fig. 12. Differential levels of 80.9 MHz (fn) detected from east, west, south and north directions in the Geiyo EQ. The amplitudes of the fluctuations were about 2 dB from peak to peak. Before the EQ, the higher fluctuations were detected from east and south directions. These fluctuations were reduced right after the Geiyo EQ.

として示した。この変動幅が東西南北どの方向で、より顕著に検出されたのかを確認するため、Fig. 12のデータの内、地震発生前の3時間分について、東西方向それぞれの振幅変動差、南北方向それぞれの振幅変動差を求め、それぞれFig. 13の横軸、縦軸に示した。Fig. 13の結果からも、振幅変動幅は東方向が最も顕著であり、次に南方向で顕著であったことがわかる。

今回、筆者らがVHF帯で検出した、芸予地震の発生とともに消滅した電磁放射現象は、地震動の到来とともに発生した電磁現象と比較して、それぞれの現象が、より顕著に検出された方向が、お互いに異なることから、その発生源および発生メカニズムは、それぞれ異なるものと考えられる。

§7. まとめ

広島市立大学に設置した観測系システムにより、鳥取県西部地震(2000年10月6日)および芸予地震(2001年3月24日)に関連したVHF帯の電磁現象を観測した。観測された現象の発生メカニズムについては、まだ明らかにされていないが、用いた観測方法および得られた観測結果を以下にまとめて示す。

- (1) 微弱な電磁放射の観測を行うため、VHF帯の中で

Fig. 13. A scatter diagram of differential received levels in east, west, south and north directions. This figure shows the dual dimension map of the differential levels of 80.9 MHz during 3 hours before the Geiyo EQ. The horizontal axis indicates the differential level (dB) of east and west directions. The vertical axis indicates the differential level (dB) of north and south directions.

も、特にFM放送帯(76 MHzから90 MHz)に着目し、 -120 dBmまで測定可能な観測系を構成した。

(2) FM放送帯における観測では、観測データの変化が、FM放送波によるものか、それとも広帯域な電磁放射によるものかの識別が重要であり、その方法として、fn波、fr波を用いた、二周波観測法を用いた。

(3) 広島市立大学の観測系において、鳥取県西部地震および芸予地震の際、地震発生とともにVHF帯電磁放射を検出した。fn波、fr波の受信レベルが共に上昇したことから、検出した電磁波は広帯域な周波数スペクトルを有している可能性がある。

(4) 地震発生とともに生じた電磁放射は、観測点への地震動の到来とともに発生したことを明らかにした。その後、その電磁放射は単調減少しながら、約3時間後に定常レベルに復帰した。

(5) 観測した電磁放射の最大受信レベルの方向は、鳥取県西部地震、芸予地震ともに、広島市立大学の観測系の西方向であった。

(6) 芸予地震が発生する約1日前から、受信レベルに、 $\pm$ 約1 dBの振幅変動が発生し、地震の発生とともに、その振幅変動は消滅し、通常のレベルにもどった。その振幅変動は、広島市立大学の観測系の東方向で特に顕著であり、次いで南方向において変化が大きかった。

本稿では、広島市立大学において検出したVHF帯電磁現象について、その観測方法および観測結果について述べた。現在、筆者らの観測チームは同様の観測系を全国10カ所で運用中である。今後さらに観測点を増やし、より多くの観測事例を蓄積したい。

謝 辞

本論文で報告した観測は、広島市立大学およびNTTドコモの研究支援により実施した。地震動については、防災科学研究所のK-Netの観測データを参照させていただいた。査読者の方々からは論文の改善に当たって有益なコメントをいただいた。また、地震電磁現象の観測をされている多くの研究者から貴重な論文を送付いただいた。このように、本観測の遂行、本論文の作成は、多くの方々のご支援ご助言によるものである。これらの方々には厚くお礼を申し上げる。

文 献

Asada, T., H. Baba, M. Kawazoe and M. Sugiura, 2001, An attempt to delineate very low frequency electromagnetic signals associated with earthquakes, *Earth Planets Space*, **53**, 55-62.
Fenoglio, M. A., M. J. S. Johnston and J. D. Byerlee, 1995, Magnetic and electric fields associated with

changes in high pore pressure in fault zones: Application to the Loma Prieta ULF emissions, *J. Geophys. Res.*, **100**, 12951-12958.
Fujinawa, Y. and K. Takahashi, 1998, Electromagnetic radiations associated with major earthquakes, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **105**, 249-259.
Fujinawa, Y., T. Matsumoto, K. Takahashi, S. Yamane and Y. Enomoto, 2001, Spatio-temporal relationship between anomalous ELF/VLF band signals and earthquakes, Rep. of the National Research Inst. For Earth Science and Disaster Prev., **61**, 55-81.
Gokhberg, M. B., V. A. Morgounov, T. Yoshino and I. Tomizawa, 1982, Experimental Measurement of Electromagnetic Emissions Possibly Related to Earthquakes in Japan, *JGR*, **87**, B9, 7824-7828.
Hata, M., X. Tian, I. Takumi, S. Yabashi, and A. Imaizumi, 1996, ELF horizontal magnetic flux precursor of the moderate M5.8 Yamanashi '96 inland earthquake a general approach to electromagnetic wave precursor, *J. Atmos. Electricity*, **16**, 199-220.
Hayakawa, M. and Y. Fujinawa (eds), 1994, *Electromagnetic Phenomena Related to Earthquake Prediction*, Terra Science Publishing Company, Tokyo, 677 pp.
Hayakawa, M., O. A. Molchanov, T. Ondoh, and E. Kawai, 1996, Anomalies in the sub-ionospheric VLF signals for the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake, *J. Phys. Earth*, **44**, 413-418.
細矢良雄監修, 1999, 電波伝搬ハンドブック, リアライズ社, 東京, 407 pp.
Ishido, T. and H. Mizutani, 1981, Experimental and theoretical basis of electrokinetic phenomena in rock-water systems and its applications to geophysics, *J. Geophys. Res.*, **86**, 1763-1775.
ITU-R, Recommendations Radio wave propagation, Vol. P Series—Part 1, P. 372-6, 1998.
Jansky, K. G., 1932, Directional studies of atmospherics at high frequency, *Proc. of IRE*, **20**, 1920-1932.
Kushida, Y. and R. Kushida, 1998, On a Possibility of Earthquake Forecast by Radio Observation in the VHF Band, *Riken Rev.*, **19**, 1-13.
Maeda, K. and N. Tokimasa, 1996, Decametric radiation at the time of the Hyogo-ken Nanbu earthquake near Kobe in 1995, *Geophys. Res. Lett.*, **23**, 2433-2436.
宮腰潤一郎, 1985, 断層破砕帯における自然電位の時間的变化, *月刊地球*, **12**, 369-378.
Molchanov, O. A., Y. A. Kopytenko, P. M. Voronov, E. A. Kopytenko, T. G. Matiasvili, A. C. Fraser-Smith and A. Bernadi, 1992, Results of ULF magnetic field measurements near the epicenters of Spitak ($M_s=6.9$) and Loma Prieta ($M_s=7.1$) earthquakes: Comparative analysis, *Geophys. Res. Lett.*, **19**, 1495-1498.
Molchanov, O. A. and M. Hayakawa, 1995, Generation of ULF electromagnetic emissions by micro-

- fracturing, *Geophys. Res. Lett.*, **22**, 3091-3094.
- Nagao, T., Y. Orihara, T. Yamaguchi, I. Takahashi, K. Hattori, Y. Noda, K. Sayanagi and S. Uyeda, 2000, Co-seismic geoelectric potential changes observed in Japan, *Geophys. Res. Lett.*, **27**, 1535-1538.
- 長尾年恭, 2001, 地震予知研究の新展開, 近未来社, 名古屋, 209 pp.
- 西 正博・吉田彰顕, 2001, 二周波観測法によるFM放送波の反射特性の検討, 信学技報, AP2001-8, 57-62.
- Oike, K. and T. Yamada, 1994, Relationship between shallow earthquakes and electromagnetic noises in the LF and VLF ranges in electromagnetic phenomena related to earthquake prediction, eds. Hayakawa, M. and Fujinawa, Y., 115-130, Terra Scientific Pub., Tokyo.
- 大志万直人, 1995, 1995年兵庫県南部地震に関する電磁気変化, 月刊地球, 号外13, 164-174.
- 力武常次, 2001, 地震予知—発展と展望—, 日本専門図書出版, 東京, 617 pp.
- Sakai, K., T. Takano and S. Shimakura, 2001, Observation system for anomalous propagation of FM radio broadcasting wave related to earthquakes and its preliminary result, *J. of Atmospheric Electricity*, **21**, 71-78.
- Satoh, H., Y. Nishida, Y. Ogawa, M. Takada and M. Uyeshima, 2001, Crust and upper mantle resistivity structure in the southwestern end of the Kuril Arc as revealed by the joint analysis of conventional MT and network MT data, *Earth, Planets and Space*, **53**, 829-842.
- 竹内伸直・中鉢憲賢・成田憲一, 1996, 地震波伝播による地電位差変動の発生特性, 電気学会論文誌C, Vol. 116-C, No. 9, 1064-1069.
- Yoshida, T. and M. Nishi, 2001, The Observation of Broadband Co-seismic Electromagnetic Waves in VHF Band, 2001 IEEE Antennas & Propagation Society International Symposium, 184-187.
- 吉田彰顕・西正 博, 2001, デジタルFMチューナによる二周波観測法, 信学技報, AP2001-8, 51-56.
- 芳野赳夫, 1996, 阪神大震災における高周波帯の電磁気放射観測(その1), Conductivity Anomaly 研究会論文集, 173-180.
- Yoshino, T., I. Tomizawa and T. Sugimoto, 1993, Results of statistical analysis of low-frequency seismicogenic EM emissions as precursors to earthquakes and volcanic eruptions, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **77**, 21-31.
- Warwick, J. W., 1963, Radio astronomical techniques for the study of planetary atmospheres, in *Radio Astronomical and Satellite Studies of Atmosphere*, edited by J. Aarons, p. 400, North Holland, Amsterdam.
- Warwick, J. W., C. Stoker and T. R. Meyer, 1982, Radio emission associated with rock fracture: Possible application to the great Chilean earthquake of May 22, 1960, *J. Geophys. Res.*, **87**, B4, 2851-2859.