

## 研 究

## 地震に伴う LF 帯電波の受信

石井隆廣雄\*<sup>1</sup> 磯辺 武\*<sup>1</sup> 寺島 良子\*<sup>1</sup>高橋 耕三\*<sup>2</sup>

(平成元年 5 月 22 日受理)

## RECEPTION OF COSEISMIC RADIO WAVES IN LF BAND

By

Takahiroo ISHII, Takeshi ISOBE, Yoshiko TERAJIMA  
and Kozo TAKAHASHI

Since 1966, before great earthquakes in many countries, people have noticed anomalous electromagnetic effects around future epicenters. Some seismologists attach importance to observation of seismic radio waves or earth currents to predict imminent great earthquakes, and they have succeeded in receiving precursory signals. In Japan, difficulty in receiving precursory seismic radio waves is met in discriminating precursory seismic radio waves from atmospheric or man-made noise, but coseismic radio waves, received during an earthquake shock, are easily identified. An attempt to receive coseismic radio waves was initiated in 1983 at Inubo Radio Wave Observatory (35°42'N, 140°51'E, 73.6 mH), and has been successful at 67.5 kHz and 77.0 kHz frequencies since December 1987.

## 1. ま え が き

地震に伴う現象及び地震前兆現象の研究は、各分野で精力的に行われ、多数の報告がある。例えば、1975～1977年の伊豆半島における群発地震の際は、微小地震の観測のほか、水準測量、光波測量などにより地震の経過が詳細に追跡され、異常隆起の実態を把握し、河津地震\*<sup>3</sup>に先行した異常静穏状態が観測されるなど、地震予知に関する研究の上で興味ある結果が得られている<sup>(1)</sup>。また、河津地震では地下水や井戸水が濁ったという報告もあり<sup>(2)</sup>、地震の発生により、温泉の湧出量は増加し、温泉の温度は上昇する傾向を示した<sup>(3)</sup>。地殻変動の観測から、伊東市西方の冷川峠付近において隆起現象が報告され、その隆起量は最大で 15 cm にも達していること

が明らかにされた<sup>(4)</sup>。

一方、地震前に電波が放射されることも知られており、日本の観測例としては、菅平電波観測所で1980年3月30日の地震の際、地震発生の約40分前から地震発生までの間 81.0 kHz において、10～15 dB のレベル上昇が観測されたとの報告がある<sup>(5)</sup>。京大防災研究所でも、1983年8月頃から 163 kHz で地震前兆の電波放射を観測している<sup>(6)</sup>。地震前兆の電波放射は、岩石破壊のモデル実験により確認され、その周波数帯は ELF 帯から VHF 帯まで観測できることを示唆している<sup>(7)</sup>。地震前兆電波の放射メカニズムとしては下記のようなモデルが考えられる。地震の発生する断層面には強度の高い部分 (Asperity) が多数存在し、地震の前にはこれらのアスペリティに応力・歪が集中し、その結果として応力・歪が限界に達し次々と破壊される。最も強度の高いアスペリティが最後に残り、これが破壊されるときが地震の発生時と考えられている。それゆえ、地震前には、アスペリティの応力・歪の急変により電波が放射され、その強度は地震直前に最大になるものと考えられている<sup>(8)</sup>。

\*<sup>1</sup> 犬吠電波観測所\*<sup>2</sup> 第二特別研究室\*<sup>3</sup> 1976年8月18日2時19分頃伊豆半島南東部にマグニチュード5.4の地震が発生した。地震の被害は静岡県加茂郡河津町に集中した。気象庁による正式な命名ではないが河津地震と呼んでいる<sup>(1)</sup>。

地震前兆電波が受信できても、現状では空電や人工雑音でないことの証明ができないため、犬吠電波観測所では、同定が容易な地震に伴う電波放射に着目し、1983年に調査を開始した。当初は LF 帯の 117 kHz, 200 kHz で観測を行なったが、日本海中部地震や近距離の茨城県沖地震でも地震に伴う電波現象を見いだすことはできなかった。その後、受信周波数の変更を行うとともに、逐年観測装置を整備しながら模索を続け、比較的混信及び大気雑音の少ない 67.5 kHz, 77.0 kHz を常時観測することにより、1987年12月に多発した千葉県東方沖地震に際し、77.0 kHz の観測で地震に伴う電波現象を見いだすことができた。また、1988年5月7日の北海道十勝沖地震でも電波現象を明瞭に検出できた。

本報告は、1987年12月以降に、主として 77.0 kHz (ホイップアンテナ) で検出した電波現象について記述されている。第2節では観測の問題点と観測システムについて、第3節では日中に検出した電波現象を地震の大きさとの関係、並びに電波現象と地震との時間的關係について、第4節では大気雑音レベルの高い夜間に検出した電波現象について記述されている。

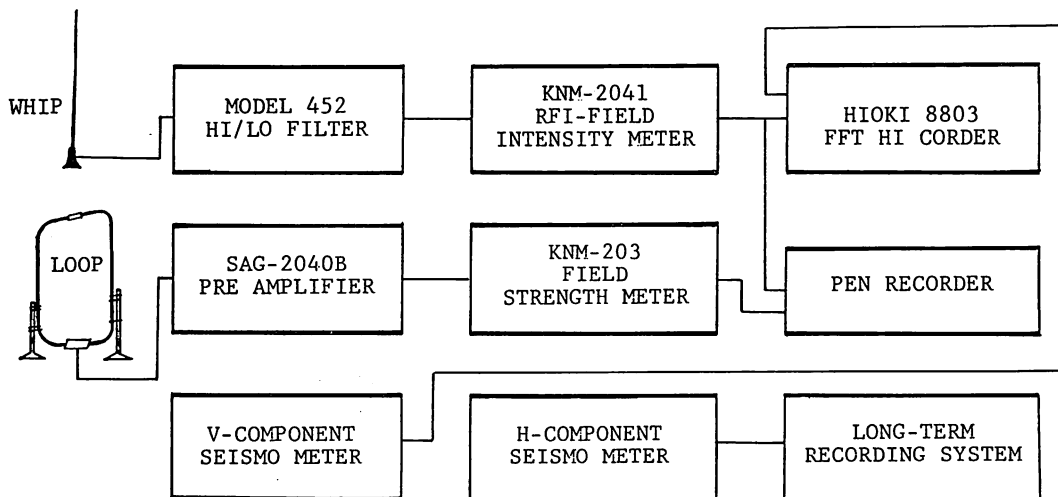
## 2. 観測システム

地震に伴う電波放射の観測には、人工電波の混信及び大気雑音が障害となる。人工電波の混信については、送信している周波数領域 (オメガ電波帯、放送波帯、標準電波帯等) を避けることにより解決できる。しかし、大気雑音は雷放電により発生し、季節・昼夜の別なく到来して著しい受信妨害を与える。その発生地域はスマトラ、ジャワ、フィリピン、オーストラリア等である。また、日光・秩父山脈を連ねる線、南北アルプスを連ね

る線、及び九州北部が夏季の空電発生地である<sup>(9)(10)</sup>。LF 帯 (51 kHz) における大気雑音レベルの日変化は、昼に低く夜間は高くなって、日出時には最も低くなる。昼夜 (12:00 JST/00:00 JST) のレベル差は数 dB である<sup>(11)</sup>。

夜間における雑音対策としてループアンテナによる観測を行っている。ループアンテナの指向は8字特性を示すことから、ループを含む面 (アンテナの指向方向) を大気雑音の強い方向と直角 (最小感度方向) に設置することにより大気雑音は軽減される。その反面、この方向で地震が発生したときに利得低下を生じ、電波現象を検出できない恐れがある。これまで (1985年以降) に発生した主な地震 ( $M \geq 7.0$ )<sup>(12)</sup> は茨城県沖、東北、北海道方面に集中しているが、上記の理由から、ループアンテナの指向方向をこれらの方向から約  $40^\circ$  ずらし、南北方向に向け観測を行うことにした。

観測場所は犬吠電波観測所 ( $35^\circ 42' N$ ,  $140^\circ 51' E$ , 海拔 73.6 m) で、関東地方東部では珍しい安定した岩石の露出した場所であるため、近くには地震研、気象庁、防災センターの地震計が設置されている。観測に使用した機器のブロックダイアグラムを第1図に示す。図のように、電波観測は2系統に分かれ、上段の 77.0 kHz の観測システムは、6 m のホイップアンテナを使用し、フィルターを介して電界強度測定器へ、その出力は2ペン式記録計の片側に毎時 100 mm の速度で常時記録され、地震発生時にはイベントレコーダ (日置 FFT ハイコーダ) に地震波とともに記録される。中段の 67.5 kHz の観測システムは 1.6 m  $\times$  1.4 m のループアンテナを使用し、前置増幅器を介して電界強度測定器へ、出力は2ペン式記録計の片側に記録される。地震波の観測システ



第1図 地震に伴う電波放射の観測システム。

ムは、下段の水平動地震計と上下動地震計で構成され、上下動地震計の出力によってイベントレコーダにトリガをかけ、77.0 kHz (現在は 67.5 kHz も同時記録) の観測とともに毎分 108 mm の速度で記録される。また、水平動地震計出力は毎秒 4 mm の速度で記録される。電界強度測定器の帯域幅は 6 dB 帯域幅で 67.5 kHz が 1 kHz, 77.0 kHz 観測用が 200 Hz である。

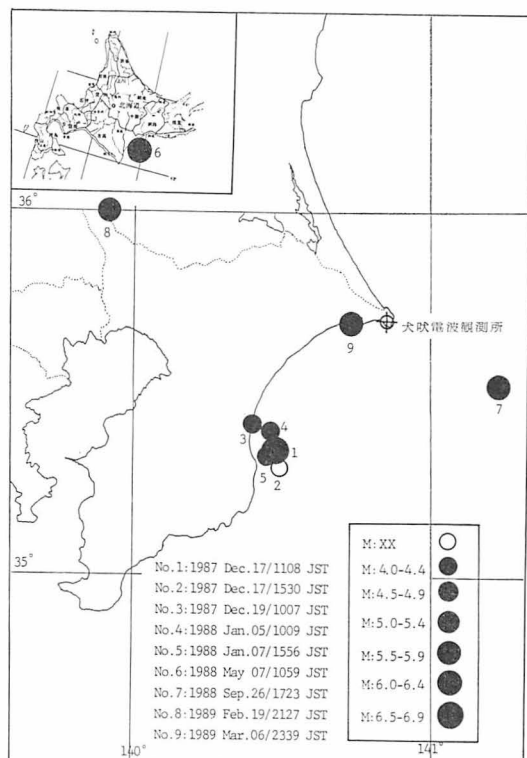
### 3. 日中に検出した地震に伴う電波現象

犬吠電波観測所では、1987年12月に頻発した千葉県東方沖地震でいくつかの地震に伴う電波現象を検出した。また、1988年5月の北海道十勝沖地震で明瞭な電波現象を検出した。これらの地震から主なるものを抽出し、震央、規模及び発震源年月日時分<sup>(13)</sup>を第2図に日本標準時で示し、地震の発生順に番号を付してある。

#### 3.1 1987年12月17日11時08分に発生した地震 (No. 1)

この地震は顕著地震<sup>\*4</sup>で、規模は  $M=6.7$ 、千葉、銚子、勝浦の震度は5を記録した。これを契機として12月中に発生した主な地震は14回も報告され、死者2人、負傷者135人、家屋の全壊6棟、半壊90棟、一部破損62,593棟 (1987年12月26日現在、消防庁調べ) と九十九里地方一体に大きな被害をもたらした<sup>(13)</sup>。

一方、地震に伴い第3図下段のような電波現象が検出された。それは、地震動が大きな変化から小さな変化に移り変わるころ (地震発生後約50秒) から、電波レベルは少し上昇し始めたように見うけられ、小刻みな変動を繰り返しながら150秒ほど継続し、静穏時のレベルに回復した。この電波現象では、地震動の間にレベル上昇が



第2図 電波放射を観測した主な地震の震央、規模、発生時刻。

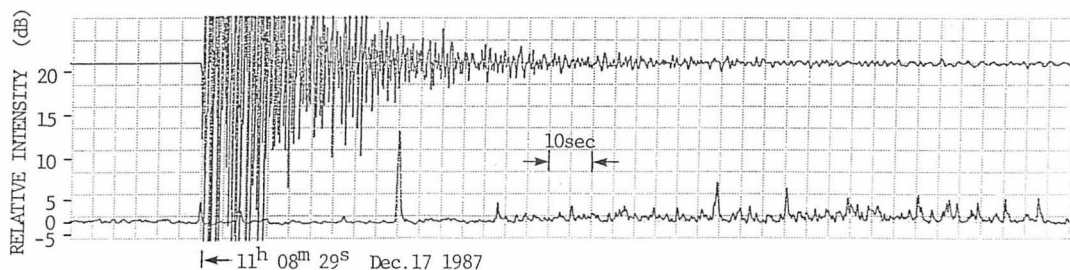
観測されていることから、地震に伴って放射された電波を検出したと考えることができる。このときのレベル上昇は最大で約 5 dB と比較的小さなものであった。

#### 3.2 1987年12月17日15時30分に発生した地震 (No. 2)

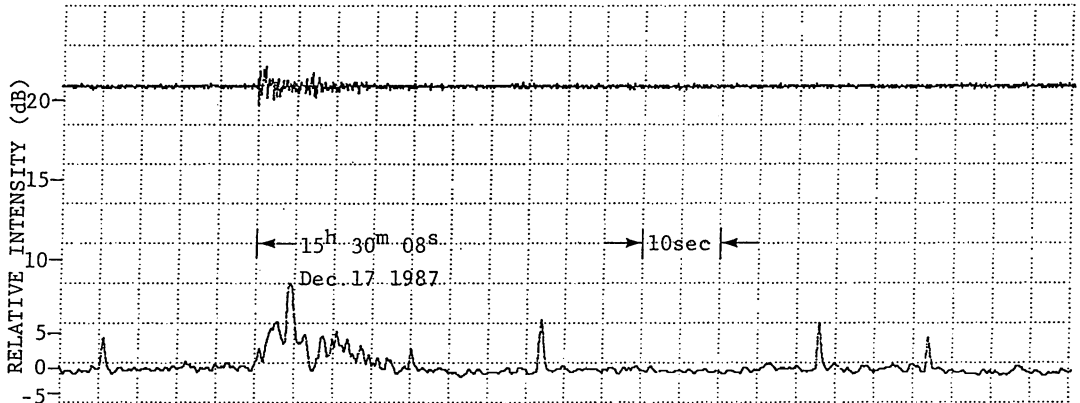
この地震は千葉県東方沖で発生した局発地震で、千葉勝浦の震度は1、銚子における震度の報告はなかった<sup>(13)</sup>。第4図上段の地震波の記録に見られるように、小規模な地震ではあったが、地震に伴う電波現象 (第4図下段) は明瞭に検出された。すなわち、地震動の開始時と

\*4 地震の有感距離による分類<sup>(19)</sup>

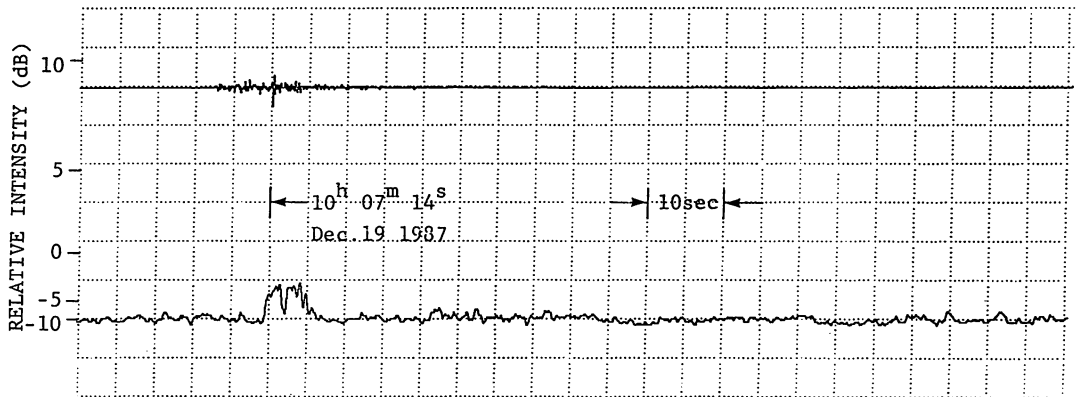
|        |        |                        |
|--------|--------|------------------------|
| 顕著地震   | 最大有感距離 | 300 km 以上のもの           |
| やや顕著地震 | "      | 200 km 以上 300 km 未満のもの |
| 小区域地震  | "      | 100 km 以上 200 km 未満のもの |
| 局発地震   | "      | 100 km 未満のもの           |



第3図 地震 No. 1 (千葉県東方沖, '87年12月17日11時08分,  $M: 6.7$ , 深さ 58 km, 犬吠南西 52 km) とそれに伴う電波現象, 上段が上下動地震計出力, 下段が 77.0 kHz の電波強度。



第4図 地震No. 2 (千葉県東方沖, '87年12月17日15時30分, 局発, 深さ 50 km, 犬吠南西 55 km) とそれに伴う電波現象。  
上段が上下動地震計出力, 下段が 77.0 kHz の電波強度。



第5図 地震 No. 3 (千葉県東方沖, '87年12月19日10時07分, M: 4.0, 深さ 38 km, 犬吠南西 49 km) とそれに伴う電波現象。  
上段が上下動地震計出力, 下段が 77.0 kHz の電波強度。

ほぼ同時にレベルは上昇し始め, 18秒ほど現象は継続した後, 静穏時のレベルに回復した。このときのレベル上昇は最大で約 8 dB と地震 No. 1 に比べて 3 dB ほど大きく現れた。

### 3.3 1987年12月19日10時07分に発生した地震 (No. 3)

地震 No. 2 と同様に千葉県東方沖で発生した地震を第5図に示してある。地震の規模は  $M=4.0$ , 局発地震で, 千葉の震度は3, 銚子における震度の報告はなかった<sup>(13)</sup>。

図のように, 観測された地震の大きさは地震 No. 2 より幾分小さく, 地震に伴う電波現象は約 7 dB と地震 No. 2 とほぼ同じ大きさであった。この場合の電波現象は地震動の開始時より約 7 秒の遅れを示したことが特長としてあげられ, 地震波の最大付近から急激に数 dB

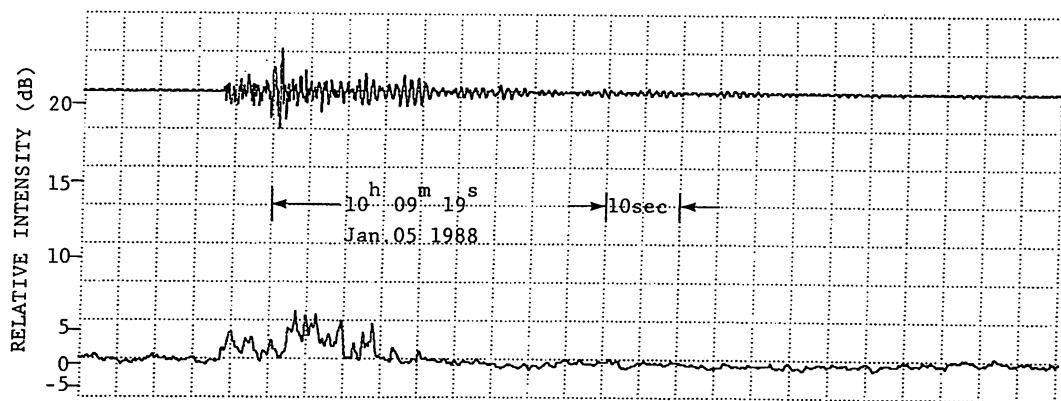
のレベル上昇を示した。その継続時間は約 8 秒と非常に短い現象であった。

### 3.4 1988年1月5日10時09分に発生した地震 (No. 4)

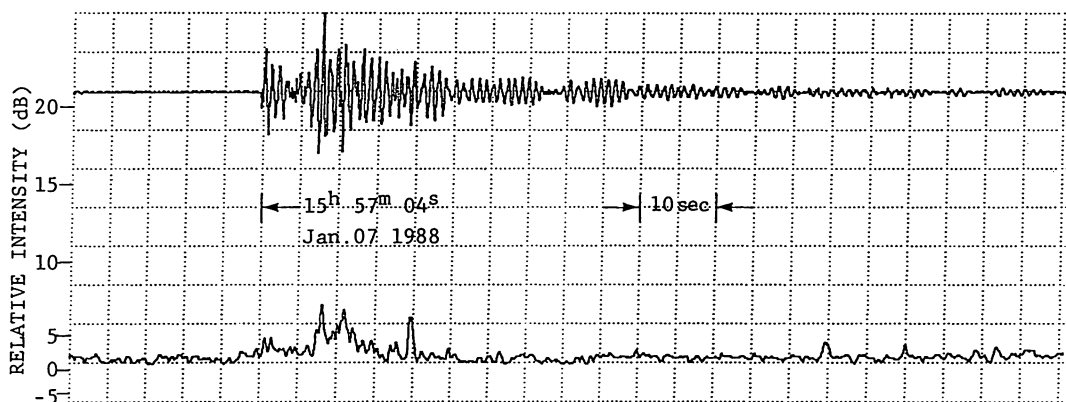
千葉県東方沖で発生した小区域地震で, 地震の規模は  $M=4.3$ , 銚子における震度の報告はなかった<sup>(14)</sup>。この地震の観測例を第6図に示してある。

図のように, 地震に伴う電波のレベルは地震の発生とほぼ同時に上昇し始め, 20秒ほど継続し, 静穏時のレベルに回復した。電波現象の最大は, 地震動の最大より3秒ほど遅れ, その大きさは約 5 dB と地震 No. 3 より 2 dB ほど小さく現れた。一方地震の大きさは, 地震 No. 3 より幾分大きく現れた。

### 3.5 1988年1月7日15時56分に発生した地震 (No. 5)



第6図 地震 No. 4 (千葉県東方沖, '88年1月5日10時09分,  $M: 4.3$ , 深さ 43 km, 犬吠南西 43 km) とそれに伴う電波現象。  
上段が上下動地震計出力, 下段が 77.0 kHz の電波強度。



第7図 地震 No. 5 (千葉県東方沖, '88年1月7日15時57分,  $M: 4.8$ , 深さ 41 km, 犬吠南西 55 km) とそれに伴う電波現象。  
上段が上下動地震計出力, 下段が 77.0 kHz の電波強度。

地震 No. 4 と同様に, 千葉県東方沖で発生した小区域地震で, 地震の規模は  $M=4.8$ , 鉾子における震度の報告はなかった<sup>(14)</sup>。この地震の観測例を第7図に示してある。

図のように, 電波の受信レベルは, 地震発生とほぼ同時に雑音レベルから上昇を開始し, 地震波の振幅が最も大きいところに最大に達し, その後地震動は継続しているにもかかわらず, 13秒ほどで静穏時のレベルに回復した。この地震は地震 No. 4 より幾分大きい, 電波現象は約 5 dB と地震 No. 1, No. 4 と変わらない。したがって, 観測点の地震が大きいほど電波現象が大きく現れるとは限らないことになる。

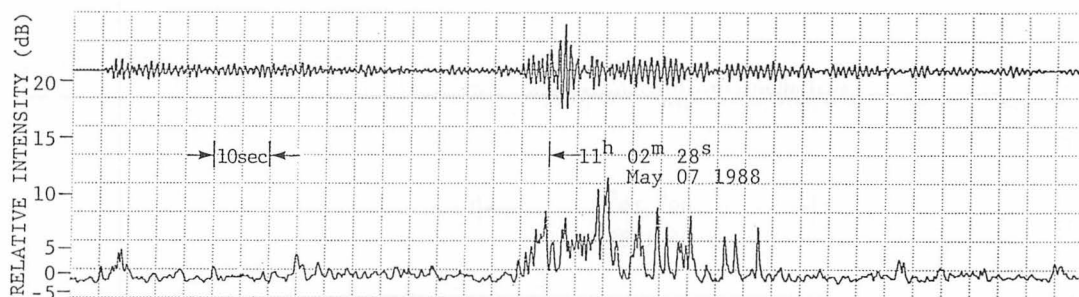
上記の電波現象は, いずれも観測点から 50 km 前後の近距離における地震 (No. 1~No. 5) に伴うものである。

### 3.6 1988年5月7日10時59分に発生した地震 (No. 6)

遠距離で発生した地震の観測例として, 1988年5月7日の北海道十勝沖地震を第8図に示してある。この地震の規模は  $M=6.4$  の顕著地震で, 鉾子における震度の報告はなかった<sup>(15)</sup>。

図のように, 観測された地震動では, 初期微動 (P波)\*5に続いて, 主要動 (S波)\*5が明瞭にみられる。これに伴う電波現象は, 初期微動の間 (約75秒) 2ないし 7 dB のレベル上昇が認められ, S波の到達とともに, レベル上昇はいっそう明瞭に現れ, 最大時には約 12 dB

\*5 震源から直接観測点に到達する地震波にはP波 (縦波) とS波 (横波) がある。その速度はP波が約 8 km/s, S波が約 4 km/s である<sup>(16)</sup>。先に到達したP波による振幅が小さく周期の短い振動を初期微動という。初期微動に続くS波による振幅が大きく周期が長い振動を主要動という。



第8図 地震 No. 6 (北海道十勝沖, '88年5月7日11時02分,  $M: 6.4$ , 深さ 94 km, 犬吠北 797 km) とそれに伴う電波現象。  
上段が上下動地震計出力, 下段が 77.0 kHz の電波強度。

のレベル上昇を伴った。

LF 帯における電界強度の距離特性によると、電波強度は距離とともに指数関数的に減衰する<sup>(20)</sup>。したがって、震源が遠距離の場合、震源で地震に伴う電波放射があっても、その電波現象は小さく現れる。また、地震波速度と電波速度との関係から、電波現象は地震波の到達前に検出されることになる。しかしながら、観測された電波現象は、遠距離 (約 800 km) の場合でも地震波とほぼ同時に検出され、その大きさは、近距離 (約 50 km) の地震に比べて数 dB 大きく現れている。この問題については、今のところ地震に伴う電波の発生場所、放射出力等が不明のため、定量的に解明することはできない。今後も観測を継続し、蓄積されるデータを検討し、更に研究を進めていきたい。

1987年12月～1988年9月 (地震 No. 1～No. 7) の期間に観測された電波現象は、大気雑音レベルの低い日中に検出され、夜間にはまったく検出できなかった。その理由は下記のように考えられる。大気雑音に日周変動があり、夜間になると 77.0 kHz の大気雑音レベルは 6～10 dB 上昇する。前述のように、日中検出された電波現象では、北海道十勝沖地震を除き、ほとんどの場合レ

ベル上昇が数 dB 以下だから、たとえ、地震に伴う電波放射があっても、夜間の雑音レベルに埋れて検出されないであろう。

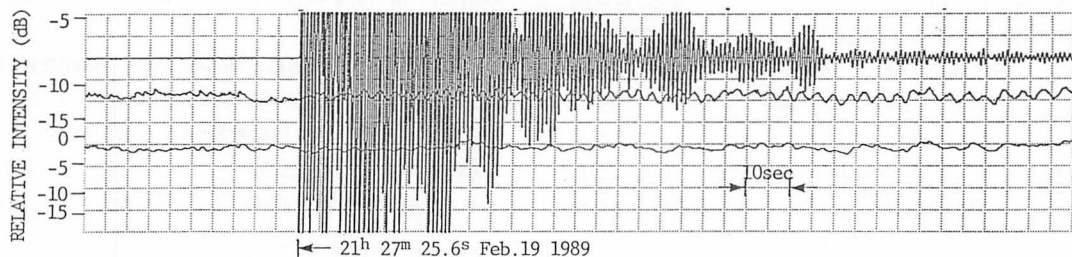
そこで、2. で述べたように、夜間の雑音対策としてループアンテナを併用して観測した。

#### 4. 夜間に検出した地震に伴う電波現象

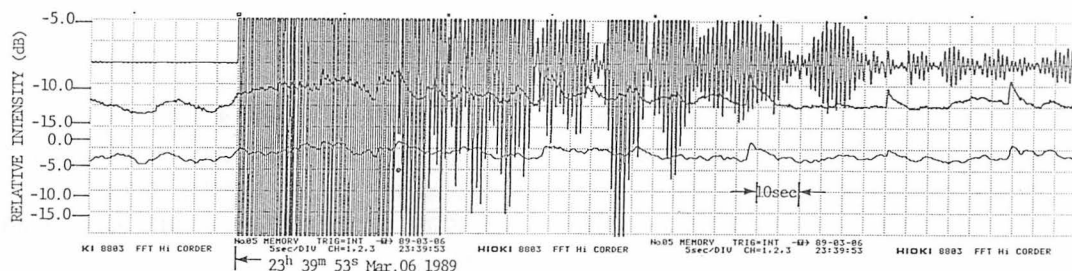
##### 4.1 1989年2月19日21時27分に発生した地震 (No. 8)

茨城県南西部で夜間に発生した  $M=5.6$  の顕著地震で銚子の震度は4であった<sup>(17)</sup>。この地震の記録例を第9図に示してある。ところで、1988年9月26日に発生した地震 (No. 7)<sup>(16)</sup>に伴う電波現象の観測結果から、67.5 kHz と 77.0 kHz の測定器に感度差のあることが判明したので、ホイップアンテナにも前置増幅器を付し、双方の最低感度を同程度にし比較測定を行なった。したがって本説で示す 77.0 kHz の記録と前節で示した記録の最低感度は異なる。

図の上段にみられるように、かなり大きな地震動であることがわかる。地震に伴う電波現象は、中段のループアンテナを用いた 67.5 kHz に検出されているように見



第9図 地震 No. 8 (茨城県南西部, '89年2月19日21時27分,  $M: 5.6$ , 深さ 54 km, 犬吠西南西 91 km) とそれに伴う電波現象。  
上段が上下動地震計出力, 中段が 67.5 kHz の電波強度, 下段が 77.0 kHz の雑音強度。



第10図 地震 No. 9 (千葉県北部, '89年3月6日23時39分, M: 5.9, 深さ 61km, 犬吠西 52 km) とそれに伴う電波現象。  
上段が上下動地震計出力, 中段が 67.5 kHz の電波強度, 下段が 77.0 kHz の電波強度。

うけられる。地震発生後10秒を経過したところに、地震発生前の比較的平坦な記録から、脈動した記録に移り変わっていく様相が明瞭に認められる。これに比べて下段のホイップアンテナ (77.0 kHz) の観測では地震に伴う電波現象はまったく認められない。これは、双方の大気雑音レベルの相違に原因があると考えられる。すなわち、地震発生前の夜間における大気雑音の相対強度は、ホイップアンテナの -2 dB に対してループアンテナは -12 dB と、10 dB も低い。このことから、ループアンテナの8字指向特性を利用した夜間の雑音レベルの軽減が効果的に行なわれたと考えることができる (2.参照)。したがって、夜間の地震に伴う電波現象は、雑音レベルの低いループアンテナでのみ検出されたと解釈される。

#### 4.2 1989年3月6日23時39分に発生した地震 (No. 9)

この地震は夜間、千葉県北部の銚子付近で発生した顕著地震で、銚子の震度は5を記録した<sup>(18)</sup>。犬吠で観測した記録例を第10図に示してある。

図のように、地震の発生と同時に中段の 67.5 kHz (ループアンテナ使用) 及び下段の 77.0 kHz (ホイップアンテナ使用) に地震に伴う電波現象が検出されている。地震発生から 20 秒を経過したところのレベルが最も大きく、67.5 kHz で約 4 dB, 77.0 kHz で約 2 dB であった。

夜間ホイップアンテナを使用した 77.0 kHz に電波現象が検出されたのは、これが初めてである。観測点から震央までの距離が 11 km と短いことから、放射された電波の減衰は千葉県東方沖地震に比べて少なく、したがって D/U (希望波電力対干渉波電力比) の小さいホイップアンテナを使用した 77.0 kHz にも電波現象が検出されたと考える。

電波現象がホイップアンテナに比べてループアンテナに大きく現れたことから、夜間の現象検出にループアンテナが有効であることがわかる。このため今後も本説の

方法で観測を継続していく予定である。

## 5. む す び

本報告は、地震に伴う電波放射を LF 帯で観測した受信結果であり、要約すると次のようになる。今後蓄積されるデータをもとに更に検討していきたい。

1 1987年12月以降に発生した比較的近距离の千葉県東方沖地震でいくつかの地震に伴う電波現象を検出することができた。また、茨城県沖地震でも電波現象を検出した。

2 1988年5月に遠距離の北海道十勝沖で発生した地震で、比較的大きな電波現象 (12 dB のレベル上昇) が検出された。

3 電波現象は主に大気雑音レベルの低い日中に多く検出される。しかしながら、日中の時間帯であれば、電波現象は必ず検出されるとは限らない。

4 1988年3月の夜間に千葉県北部で発生した地震に際し、ループアンテナ (67.5 kHz), ホイップアンテナ (77.0 kHz) の双方に電波現象を検出した。

5 近距离の地震で犬吠における震度が4、またはそれより大きな地震動の場合の電波現象は概して小さく、遠距離の地震で犬吠の震度が小さいときの方が電波現象は比較的大きく現われる。

## 謝 辞

この観測は東京大学地震研究所との共同研究であり、観測にご協力いただいた東京大学地震研究所の関係各位に対し、特に地震観測システムの保守にご尽力いただいた高橋正義氏に深く感謝します。この観測計画を推進された元電波部長戸倉幸雄氏、元犬吠電波観測所長磯崎進氏、並びに観測機器の整備にご努力いただいた前犬吠電波観測所長杉内英敏氏に感謝し、併せて本発表を強くご推奨くださった防災科学技術センター流動研究官藤縄幸雄氏に厚くお礼申し上げます。

