

兵庫県南部地震と関連する電波放射

前田耕一郎¹、時政典孝²、黒田武彦²

1) 兵庫医科大学

2) 兵庫県立西はりま天文台

Radio Emission Associated with the Hyogo-ken Nanbu Earthquake

Koichiro MAEDA¹, Noritaka TOKIMASA², Takehiko KURODA²

1) Department of Physics, Hyogo College of Medicine Nishinomiya, Hyogo 663, Japan

2) Nishi-harima Astronomical Observatory Sayo-cho, Hyogo 679-53, Japan

E-mail: maeda@hyogomc.kugi.kyoto-u.ac.jp

(Received 1995 July 12)

概要

1995年1月17日に兵庫県南部地震（マグニチュード=7.2）が発生した。我々は西はりま天文台において、電波干渉計により22.2 MHz（波長=13.5 m）で、この地震と関連して発生したと考えられる電波を受信した。パルス状の電波放射が本震発生時刻前後に受信されており、放射パルスの時間間隔は1～3分の程度であった。また、干渉計のデータより放射の発生場所について検討した結果、破壊が地表まで達した野島断層の中央部である可能性が高いとの結論を得た。これまでにも地震と関連すると思われる電波放射の観測例が報告されているが、今回のように、地震の断層破壊と直接的に結び付く電波放射が観測されたのは初めてである。

Abstract

The Hyogo-ken Nanbu earthquake occurred on January 17, 1995, in Japan. In association with this earthquake we observed decametric radiation at 22.2 MHz (wavelength=13.5 m) with a phase-switched interferometer at Nishi-harima Astronomical Observatory. Emission pulses were observed before and after the main shock, and pulse intervals were mostly 1-3 min. Our interferometer data indicate that the radiation presumably came from the central part of the Nojima fault, on which the surface rupture was produced. Although there are many reports on radio emission which are possibly related to earthquake, we present the first convincing evidence of the emission of seismic decametric radiation in connection with fault rupture.

Key words: Earthquake, Radio Emission, Fault Rupture

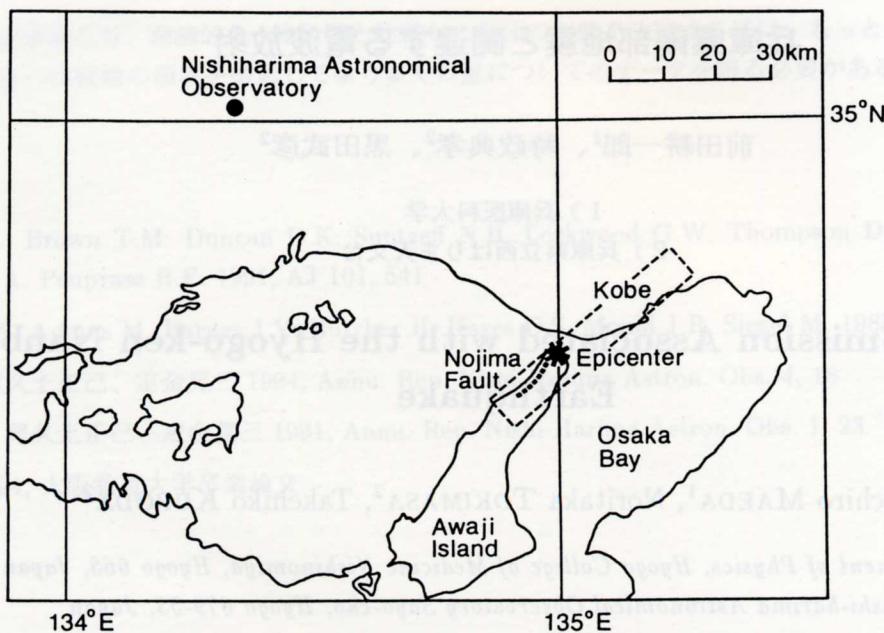


Fig. 1. Locations of Nishi-harima Astronomical Observatory (NHAO), the epicenter of the Hyogo-ken Nanbu earthquake, and the Nojima fault. The after-shock region is schematically indicated by the dashed-line square.

1. はじめに

西はりま天文台では、一般への普及・教育活動だけでなく、研究面での貢献も行うことを活動目標に掲げている。1992年より、兵庫医科大学物理学教室との協力のもとに、主に木星電波の研究を行うことを目的として16～50 MHzの周波数範囲で電波観測を開始した(Maeda, 1993)。1994年7月には木星にシャーメーカー・レビー第9彗星が衝突するというまれな現象が起こり、その観測のために、電波干渉計、円偏波計などの装置の整備が行われた。彗星衝突期間の観測を終えた後、落雷による事故のために1994年10月から12月中旬まで観測を中断していたが、12月下旬に干渉計の整備を行ってテスト観測を開始した。このテスト観測期間中の1月17日に兵庫県南部地震が発生し、地震と関連して発生したと考えられる電波が受信された。図1に西はりま天文台と震源地域の地理的な関係を示す。本論文では、観測された電波放射の特徴、及び電波発生場所について考察した結果を報告する。

2. 位相切り換え型干渉計

兵庫県南部地震が発生した際、西はりま天文台では位相切り換え型(乗算型)干渉計のみが作動していた。干渉計観測には、水平偏波の3素子八木アンテナ(ゲイン~8 dB)2基が用いられている。2基の八木アンテナは、ほぼ東西方向(上から見て東西方向より約1°時計回りに回転)で約193 m離して設置されている。また、各八木アンテナは地上約5 mの高さに、南の方位で高度40°の方向に向けて取り付けられている(図2)。各アンテナからの出力は長さ200 mの同軸ケーブルにより観測小屋まで引き込まれ、ハイブリッド回路により電界の和と差の成分に分けられる。和と差の成分はRFスイッチによって切り換え周波数275 Hzで交互に通信型受信機NRD-525(日本無線社製)に入力される。受信モードはAM(Amplitude Modulation)とし、AM検波出力(AF信号)を位相検波することにより2つのアンテナにおける電波の電界の積に比例した出力が得られる(Maeda, 1990)。1994年12月下旬からのテスト観測期間中には、干



Fig. 2. One of the three-element Yagis used for interferometer observations.

涉計の出力電圧はペンレコーダーに紙送りスピード 3 cm/h で記録されていた。

乗算型干渉計を使って木星電波のモニター観測を行っている理由は次の点にある。木星電波は間欠的に放射され、また、電波強度が時間的に変動する (Carr et al., 1983)。2つのアンテナにおける電界の和をとる、加算型干渉計の場合には、電波源自体での強度変動なのか干渉パターンによる変動なのかを見分けることが難しい。乗算型干渉計の場合には、プラスとマイナスのフリンジが交互にできるので、出力電圧の符号 (+ あるいは -) が木星の通過するフリンジに応じて変化する。このような符号の変化は確実に検出できるので、強度変化を示す天体電波の同定には乗算型干渉計による観測が極めて有用である。

3. 観測された放射の特徴

図3に、1月13日より1月18日までの日本標準時 (JST) 0時から11時までの記録を示す。図3には2例 (1月13日と18日) の木星電波ストームが示されている。木星電波の記録を見ると、約10分毎に出力電圧の符号が変化しているが、この符合変化は地球の自転による木星の方向の変化により説明される。1月17日5時46分に兵庫県南部地震が発生したが、図3に示されているように、地震発生時刻前後 (5時~7時の間) にパルス状の電波放射が受信されている。パルスは1.5時間にわたって常にプラスに振れており、木星電波の場合のような出力電圧の符号の変化が見られない。

一般に、冬季の5時~7時は、夜明け前の混信の少ない静かな時間帯である。この時間帯には、単発的に空電 (大気中の放電による電波) のパルスが見られることがあるが、近くで雷雨の発生でもない限り、1月17日のようなパルスが観測されることはない。神戸海洋気象台に問い合わせたところ、1月17日の5時~7時に兵庫県内で雷雨が発生するような気象状況にはなかった。また、空電パルスが多数発生する場合には、プラスの振れだけでなくマイナスの振れも同じ時間帯に起こるのが通例である。したがって、1月17日に観測されたパルス群は通常の空電が原因とは考えられない。図3において、日出 (~7時10分であった) 後は、間欠的にパルス状の強い放射が観測されているが、これらは主に人工の混信や空電と考えられる。

記録を拡大して、観測された放射の特徴を調べてみた (図4)。受信システムの時定数は約1秒であるので、パルス状の放射の継続時間は1秒程度であったと考えられる。放射パルスは2つのグループとなって発生している。最初のグループは、地震発生時刻の約40分前にスタートし、20分間続いており、第2のグル

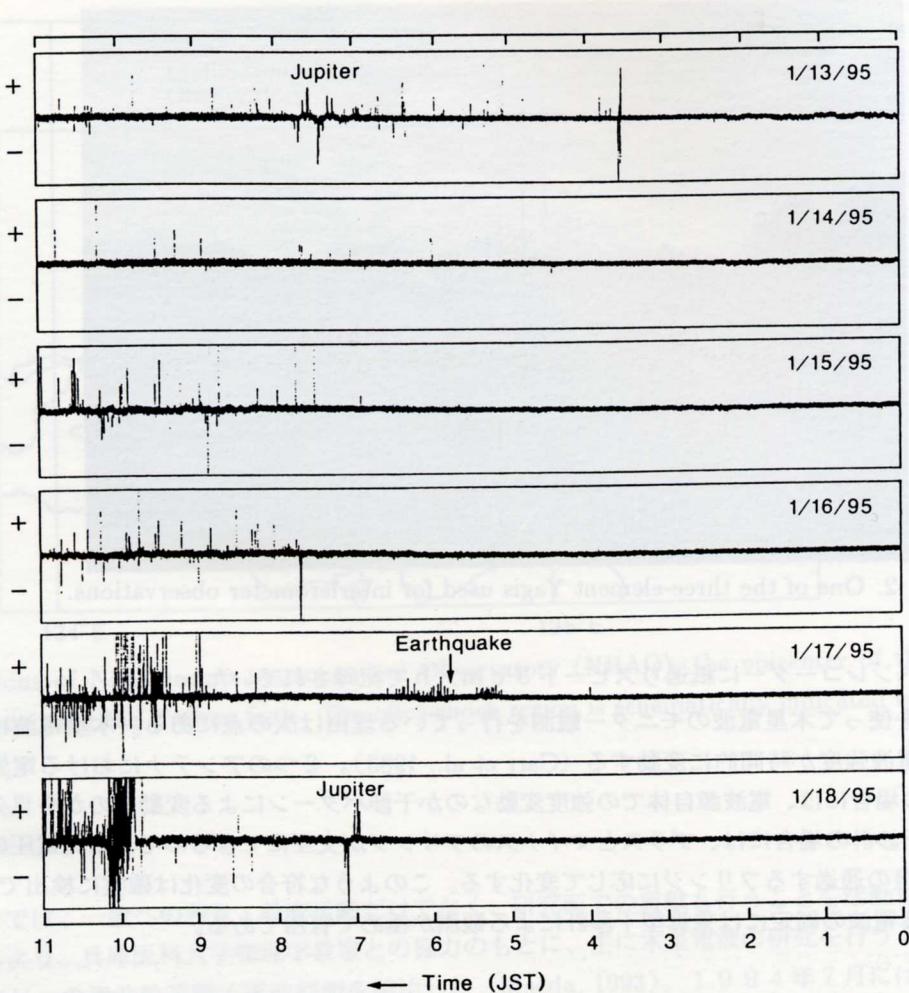


Fig. 3. Interferometer records at 22.2 MHz from January 13 through January 18, 1995. Two Jovian noise storms are indicated. On the January 17 record, pulsed emissions are seen in the period 0500-0700 JST, around the occurrence time of the Hyogo-ken Nanbu earthquake.

は地震発生時刻直前から約50分間継続している。最初のグループには15個、第2のグループには24個のパルスが認められた。各パルスの発生時刻を計測し、パルスの時間間隔を調べたところ、放射パルスの時間間隔は大多数が1~3分の間に分布し、平均パルス間隔は最初のグループでは1.3分、第2のグループでは1.8分であった。

パルスの高さを計測して、対応するアンテナの等価雑音温度（アンテナ温度と呼ぶ）に変換した。アンテナ温度は、アンテナから受信機に入力される雑音電力の大きさを表現する。22.2 MHzにおける銀河背景放射の平均輝度温度を10万度と仮定して計算した結果、パルスの平均アンテナ温度は約 5×10^4 Kとなった。

4. 電波の到来方向

地震発生時刻付近で観測された放射の源について、干渉計の記録から次のようなことがいえる。記録で特徴的なことのひとつは、前にも述べたように、約1.5時間にわたって常にプラス（上向き）のパルスが記録されていることである。もし、電波源が天体であったとすると、木星電波の場合と同様に、出力電圧の符号変化が

Radio Emission with Hyogo-ken Nanbu Earthquake

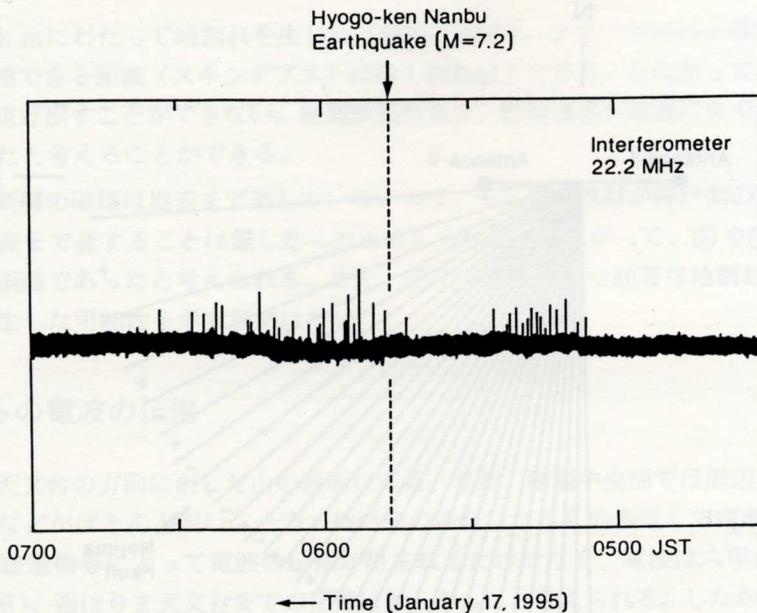


Fig. 4. Interferometer record at 22.2 MHz on January 17, 1995. Pulsed emissions were observed before and after the main shock of the Hyogo-ken Nanbu earthquake.

観測されるはずである。地震発生時刻付近の放射の場合、符合変化が見られないで、電波源は干渉計の基線に対して固定された方向にあった、つまり、電波源は地上にあったことを示している。

干渉計の出力がプラスあるいはマイナスとなるフリンジの角度幅は $2^\circ \sim 3^\circ$ である。したがって、観測されたパルスが常にプラス出力であったことを考えると、西はりま天文台から見た電波源の広がりはあるプラスのフリンジの角度幅以下であったと考えるのが自然であろう。電波源が比較的大きな広がりを持ち、選択的に複数のプラスの方向でのみ電波を放射したと考えることも可能だが説得力に欠ける。

図5に水平面内におけるフリンジの符合の分布を示す。図5において、+と示された方向から来る電波に対しては干渉計の出力電圧がプラスとなり、また、-と記された方向から来る電波に対しては出力電圧がマイナスとなることを示す。電波源は、いずれかのプラス・フリンジの方向にあったと考えられるが、どのプラスのフリンジの方向から来たかを干渉計のデータのみから特定することはできない。

図6は震源地域に干渉計のプラス・マイナスのパターンを重ね書きしたものである。図6において、地表まで破壊が及んだ野島断層の中央部が干渉計のプラス出力の領域（①の+）にあることが注目される。神戸側にもプラスの領域（③と④の+）はある。

5. 野島断層中央部の特徴と電波放射

震源地域において卓越する地形・地質構造は花崗岩による六甲山地－淡路島（山地）のブロックとそれを分断する凹地状の明石海峡である。花崗岩のように石英を含む岩石を圧縮破壊したとき圧電効果による電気分極に起因して電波が放射されることが知られている（Nitsan, 1977; Warwick et al., 1982）。また、岩石を圧着して滑らせる実験においても電波放射が確認されている（Yoshida et al., 1994）。電波放射が震源地域に卓越して分布する花崗岩の圧電効果に起因すると仮定すると、強い圧縮破壊の起こる断層が放射源となる可能性が高い。兵庫県南部地震の場合、震源は明石海峡付近で地下約15 kmにあり、まず淡路島の野島断層に破壊が広がり、その後、神戸側の断層に破壊が及んだと考えられている（菊池, 1995）。野島断層の破壊は地表まで

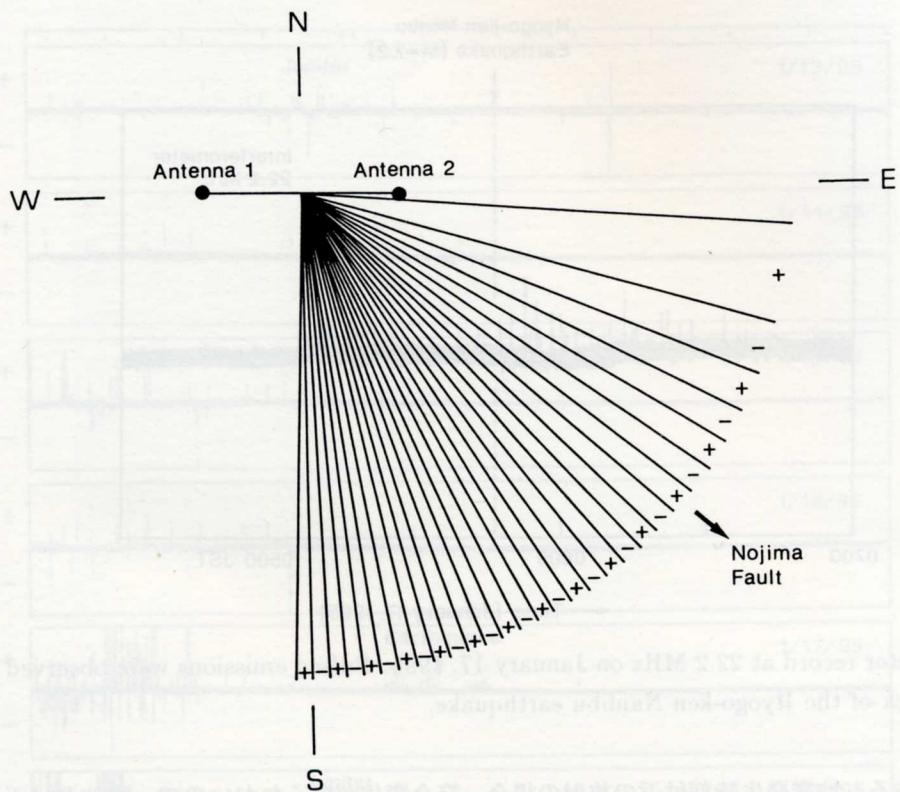


Fig. 5. Fringe sign distribution in the horizontal plane. Each positive or negative fringe has an angular width of 2-3°.

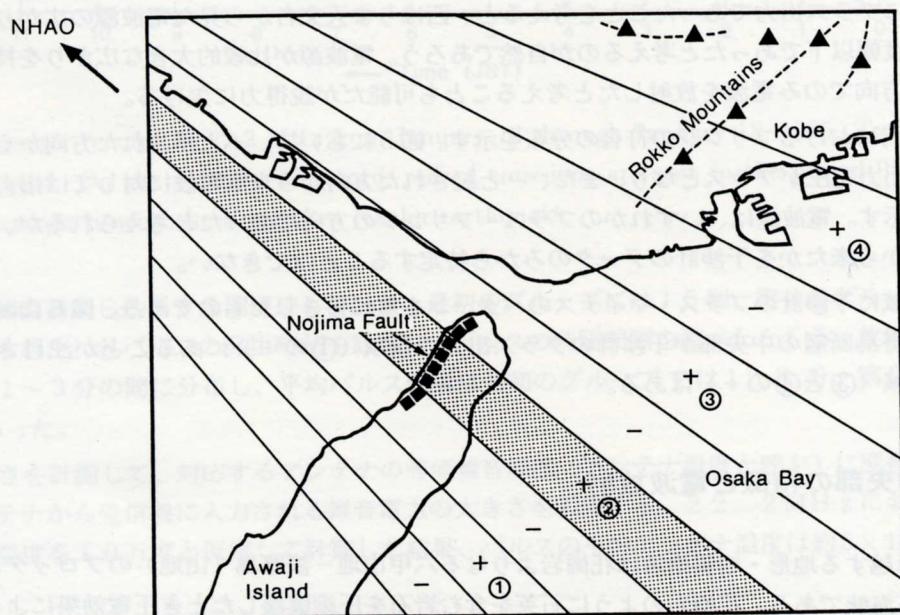


Fig. 6. Fringe sign distribution together with the Earthquake zone. Since we observed only positive pulses associated with the Hyogo-ken Nanbu earthquake, the positive fringes are labeled with ① ② ③ and ④. Note that the central part of the Nojima fault, on which the surface rupture was produced, is located in the shaded positive fringe labeled with ②.

及び、総延長約17kmにわたって地割れを生じた（林他、1995）。22.2MHzの電波の場合、海水、湿土を考えた場合、伝播できる距離（スキンデプス）は約1波長以下である。したがって、電波は地表近くで発生しなければ空中へ抜け出すことができない。野島断層の場合、断層破壊が地表にまで及んでいるので、地表近くで電波が発生したと考えることができる。

神戸側の場合、断層の破壊は地表まで達していないので、もし電波放射が神戸側の断層内で起こっていたとしても、電波が地表まで達することは難しかったと考えられる。したがって、③や④の+の領域では電波が空中に出ることは困難であったと考えられる。また、①の+の領域では顕著な地割れは発見されておらず、地表近くで電波が発生した可能性を示す証拠はない。

6. 野島断層からの電波の伝播

野島断層は西はりま天文台の方向に面した山の斜面にある。また、断層中央部では周辺に電波の伝播を妨げるような高層の建造物などがほとんど無い。一方、神戸側の場合、たとえ地表近くで電波が発生したとしても、都市部にある地上の建造物等によって電波の伝播が阻まれるだけでなく、電波は六甲山系の山々によってブロックされ（図6参照）、西はりま天文台までの伝播は難しかったと考えられる。したがって、神戸側の断層の場合、地下で圧電効果による電波が発生した可能性はあるが、伝播の条件が満たされていなかったといえる。

野島断層から西はりま天文台への電波伝播を考えた場合、直接波としての伝播経路のほかに電離層での反射を介する伝播経路が考えられる。西はりま天文台と野島断層の水平距離は約76kmである。電離層の反射高度を200～400kmと仮定すると、電離層内の有効反射面に対する電波の入射角は5°～11°程度である。通信総合研究所（国分寺）で測定されている垂直入射の場合の最大反射周波数（ f_{max} ）は5時頃で数MHz、7時頃でも10MHz以下である。垂直入射から外れる（入射角 ν ）と有効最大反射周波数は約 $f_{max}/\cos\nu$ と増加するが、今回の場合、入射角の効果を考慮しても、有効最大反射周波数は高々10MHzであり、22.2MHzの電波を反射する条件にはなかった。したがって、電波は直接波として西はりま天文台の方向に伝わったものと考えられる。

西はりま天文台のアンテナは高度約405mにある。野島断層中央部は50～100mの高さにあるので、地球の曲率は電波の伝播に大きな影響は及ぼさない。直接波の伝播経路に沿って地形を調べたところ、西はりま天文台の手前約20kmの距離にある高度約400mのいくつかの山の尾根によって、野島断層中央部からの電波は幾何学的に遮られる。西はりま天文台から20kmの距離での第1フレネル帯の半径を見積ると、約450mである。幾何学的考察から、西はりま天文台のアンテナからは、第1フレネル帯の上部半分に近い領域が見えたと考えられる。したがって、自由空間に比べれば数分の1に強度が落ちたと考えられるが、回折波は西はりま天文台まで到達可能であった。以上の考察より、野島断層中央部から放射された電波の回折波が西はりま天文台で観測された可能性が高い。

7. 放射電力について

電波が野島断層中央部から来たと仮定して放射電力を見積ってみた。観測からわかるのは、アンテナから受信機に入力される雑音電力の大きさのみである。電波の到来方向がわかれば、その方向の有効面積から電波のフラックス密度を見積ることができる。放射パルスのアンテナ温度の平均値は約 5×10^4 Kの程度である。野島断層の方向でのアンテナの有効面積は、 $46m^2$ の程度である。また、回折によって電波強度が1桁落ちたと考えて計算すると、西はりま天文台の距離における自由空間での電波のフラックス密度は約 $3 \times 10^{-19} Wm^{-2}Hz^{-1}$ である。ここで求めた値は、西はりま天文台の方向へ伝播して来た電波に対してのものであり、他の方向にも同じ強度で電波が放射されたかどうかはわからない。仮に、野島断層にある電波源から、上で求めたのと同じ

強度で 2π ステラジアンの広がりに電波が放射されたと考えると、 22.2 MHz 付近での単位周波数あたりの放射電力は、約 $10^{-8} \text{ W Hz}^{-1}$ である。全放射電力を知るには、周波数についての積分を行わねばならないが、周波数スペクトルに関する情報は何も得ていない。仮に、上で求めたスペクトル電力で 22.2 MHz の帯域幅にわたって電波が放射されたと仮定すると、全放射電力は、約 0.2 W 程度となる。この数値は、多くの仮定の基で試験的に求められた値にすぎない。また、理論との比較がどの程度可能なのかについても明確とはなっていない。

8. 結論

我々は西はりま天文台において兵庫県南部地震と関連すると考えられる電波を 22.2 MHz で受信した。位相切り換え型干渉計のデータに基づいて解析した結果、観測された電波は野島断層中央部における断層破壊と関連して発生したものである可能性が高いとの結論を得た。

西はりま天文台で地震関連の電波が観測・認識された要因として、次の事項が挙げられる。(1) 野島断層の地質が、岩石破壊に際して電波を発生しやすい花崗岩であったこと、(2) 断層の破壊が地表まで達したために、地表付近で圧電効果による電波が発生し、その電波があまり減衰を受けずに空中へと抜け出せる条件にあったこと、(3) 野島断層周辺に電波を遮る建造物などがほとんどなかったこと、(4) 野島断層中央部は $50 - 100 \text{ m}$ の高さにあり、遠くへの電波の伝播に有利な条件にあったこと、(5) 電波の発生時間帯が、混信の極めて少ない夜明け前であったこと、などである。このように、発生、伝播、受信の条件が偶然そろっていたために、地震と関連する電波放射が西はりま天文台で受信されたものと考えられる。今回の観測によって、実験室で観測されていた、岩石破壊に伴う電波放射が、地震に際しても実際に起こっていることが確認できたことは、地震と関連する電磁気的現象の研究を進める上で大きなステップになると思われる。

地震予知との関連で注目されるのは、本震の約 40 分前頃から約 20 分間電波放射が観測されたことである。これまでにも、低周波数 ($< 1 \text{ MHz}$) では地震前に電波ノイズの増加があることが報告されている（例えば、Gokhberg et al., 1982; Fujinawa and Takahashi 1990）が、今回のように地震と直接的に結び付くと考えられる電波が観測されたのは初めてである。地震の前兆現象としての電磁気的影響を研究するという観点に立って、広い周波数範囲で電波観測を試みることは地震予知の研究を進める上で有意義なことと考えられる。

《参考文献》

- Carr, T.D., M.D. Desch, and J.K. Alexander, in Physics of the Jovian Magnetosphere, ed A.J. Dessler, Cambridge University Press, New York, 1983.
- Fujinawa, J., and K. Takahashi, 1990, Nature, 347, 376-378.
- Gokhberg, M.B., V.A. Morgounov, T. Yoshino, and I. Tomizawa, 1982, J. Geophysical Res., 87, 7824-7828.
- 菊池正幸, 1995, 科学朝日 (増刊)、第 56 卷 4 号、9.
- Maeda, K., 1990, Astron. Herald, 83, 72.
- Maeda, K., 1993, Annual Report of the Nishiharima Astronomical Observatory, 4, 28.
- Nitsan, U., 1977, Geophys. Res. Lett., 4, 333.
- 林愛明、井宮裕、宇田進一、三沢隆治、1995, 応用地質、36 卷 1 号、41
- Warwick, J.W., C. Stoker, and T.R. Meyer, 1982, J. Geophys. Res., 87, 2851.

Radio Emission with Hyogo-ken Nanbu Earthquake

Yoshida, S., P. Manjgaladze, D. Zilpimiani, M. Ohnaka, and M. Nakatani, 1994, in Electromagnetic Phenomena Related to Earthquake Prediction, eds M. Hayakawa, and Y. Fujinawa, 307-322, Terra Scientific Publishing Company, Tokyo.