ELF 帯電磁波を用いた地震前兆現象の観測*

太田健次**, 渡辺伸夫**, 早川正士***

**中部大学工学部電子情報工学科 ***電気通信大学工学部電子工学科

*Observation of Precursory Phenomena on Earthquake
using ELF Electromagnetic Waves

**Kenji OHTA, **Nobuo WATANABE

Department of Electronics and Information Engineering, Chubu University,
Kasugai, Aichi 487-8501 Japan

***Masashi HAYAKAWA

Department of Electronic Engineering, The University of Electro-Communications, Chofu, Tokyo 182-8585 Japan

Abstract: There are two kinds of method to estimate precursory signature of earthquakes by means of electromagnetic waves. The direct method is measuring emissions from the ground surface of the epicenter. An example of this method is ULF/ELF electromagnetic emission because its propagation loss in the ground is very low. Another method can be called "indirect method", by measuring the change in amplitude and/or phase of VLF/LF subionospheric propagation due to the change in the ionosphere disturbed by the energy from the epicenter. VLF/VHF signals are used in order to study the anomaly in their propagation. These two methods (direct and indirect) are very complementary to each other. We have carried out our observation of ELF electromagnetic waves below 50Hz at Nakatsugawa in Japan (Geographic lat. 35.4° N, long. 137.5° E in Gifu Prefecture near the foot of Mt. Ena). We have analyzed ELF electromagnetic waves (emissions) by means of the direct method, and also the modification of the ionosphere using Schumann resonance (as indirect method) for the Taiwan Earthquakes in 1999. It is found that we can detect the precursory signature of Taiwan earthquakes by both of these methods.

Keywords: Precursor of earthquake, Direction finding of ELF wave, Schumann resonance

1. はじめに

電磁波を用いた地震前兆現象の観測には大別して2つの手法があるように考えられる。その1つは、岩盤に対する圧力変動によって岩石の破壊や荷電粒子の移動による誘導電流等によって震央の極めて近傍から発生する電磁波の一部を地表面で直接観測（以後、直接観測法と呼ぶ）するもので、深い地中を伝搬するため、一般にULF/ELF帯電磁波の観測が有望とされている[1]。他の1つは、地中から発生する超低周波の電磁波や荷電粒子が地表面から電離層に放出され、その結果として震央上空の電離層が擾乱し、電離層で反射される送信局電波に強度/位相の変動を与えるもので、地震の前兆を電離層の擾乱で間接的に知る（以後、間接観測法と呼ぶ）ものである[2]。一般に送信局電波は電離層で反射するVLF/VHF帯の電波が用いられている。いずれの方式であっても、本震の前後に変化が検出されることになるが特に本震の前に現れる電磁変動をここでは電磁波による地震前兆現象と呼ぶことにする。

我々は直接観測法を1998年より自然電磁環境の比較的良好な、岐阜県中津川市の恵那山麓にある中津川観測所（地理緯度 35.4° N, 地理経度 137.5° E）でELF帯電磁波（50Hz以下）の予備観測を開始し、観測機器の改良を行っている[3]。また、間接観測法では、1997年より愛知県春日井市の中部大学（ 35.2° N, 137.0° E）にてVLF帯電磁波（10kHz～40kHz）の観測を行っている[4]。これら2つの観測法は互いに補間の関係にあるが対象とする周波数が大きく異なるため、装置も解析法も異なる。このため、異なる2つの観測法を維持することは観測にも解析にも経済的、時間的な制約がある。そこで、電離層をモニタするVLF帯電磁波をELF帯電磁波であるシューマン共振の観測で置き換えることを試みている。ここでは、1999年9月21日2時47分（日本時間、以後時刻はすべてJST）台湾北西部集集（Chi-Chi）で発生したマグニチュード7.6（以後、 $M=7.6$ と記す）の地震[5]の前兆現象について、直接観測法と間接観測法で解析したのでその結果について報告する。

2. ELF 帯電磁波の観測

ELF 帯電磁波の観測システムを図 1 に示す。基本的にはインダクションコイルを用いた ELF 帯の磁界 3 成分 (B_x, B_y, B_z) を 30Hz の LPF を含むプリアンプ (利得 66dB) に導く。その後、100Hz のサンプリング周波数で A/D 変換した後、6 時間ごとにハードディスクに保存する。このファイルは 1 日で 4 ファイルとなり、ファイルネームの先頭に観測日を、末尾にファイル番号 0 (00 時 00 分～05 時 55 分), 1 (06:00～11:55), 2 (12:00～17:55), 3 (18:00～23:55) を自動的に付記し、日時を区別している。ディスクに保存する時間は観測が中断されるが 6 時間ごとに僅か 5 分であるため無視している。このデータは定期的に回収され、ディスクを交換し、観測を続行している。信号解析はデータ長を 1024 にした FFT 解析を用い、サンプリング周波数が 100Hz であるため、時間分解能 10.24s, 周波数分解能 0.098Hz で 0Hz から 50Hz までの周波数解析が可能で、磁界 3 成分の振幅と位相差が得られる。

Fig. 1. The observation system of electromagnetic wave in ELF.

3. 台湾地震における直接観測法のデータ解析

図 2 は 1999 年 9 月 1 日より 9 月 30 日までの各ファイルにおける 18Hz の平均水平磁界強度 $\{(B_x^2 + B_y^2)^{1/2}\}$ のレベル変動を示したものである。日付はファイル 0 の直下に示す。図において、9 月 15 日 (ファイル 0, 00:00～05:55) と 9 月 20 日 (ファイル 3, 18:00～23:55) に大きな変動が見られる。

Fig. 2. Intensity level of $\{(B_x^2 + B_y^2)^{1/2}\}$ in 18Hz from September 1 to 30 in 1999.

当然ながら、VLF 以下の周波数帯域においては電磁波強度の変動に最も大きな影響を与えるものは雷放電である。15 日ピークを示すファイル 2 (12:00~17:55) においては、中津川観測所より北西および北東方向に雷雲が広く分布していたが夏期の雷放電活動としては穏やかであり、図 2 に見られる 15 日 (12:00~17:55) における磁界強度のピークは雷放電によるものではない。この急激な上昇については第 4 節で明らかにする。

しかし、図 2 の 20 日ファイル 3 (18:00~23:55) における磁界強度のピークは、雷放電活動とよく符合していた。図 3 に 9 月 20 日ファイル 0~3 における 18Hz の細かな磁界強度 $\{(B_x^2+B_y^2)^{1/2}\}$ 変化を示す。20 日は 00 時より 12 時頃までは雷放電活動はほとんど発生していない。雷放電活動は 12 時 30 分頃から活発になり、中津川観測所より北西方向の岐阜県郡上八幡町の山間部では落雷を伴う記録的な豪雨となり、18 時から 21 時には岐阜県美濃地方、飛騨地方、長野県御嶽地方の広い範囲で落雷が発生した。21 時から 23 時には再び岐阜県郡上八幡町から美濃加茂市の山間部で活発な雷放電活動があった。しかし、その後雷雲は岐阜県東濃地方、長野県御嶽地方、長野県駒ヶ岳地方に分散し、次第に終息した。

Fig. 3. A change of noise level in 18Hz on September 20.

図 3 に示す細かな磁界強度の変化はこれらの雷放電活動をよく示している。00 時より 12 時における平均雑音のレベルは概ね -25dB で極めて安定している。しかし、12 時 30 分以降は一変し、激しく変動している。特に 21 時 30 分から 23 時では磁界強度のベースが時間の経過と共に 5dB から 10dB の急激な上昇がみられる。このような急激なベースの上昇は観測期間中で最大なものである。

図 4 にこの磁界強度のベース変動を詳しく検討するため、周波数解析のソナグラム (Sonogram) を示す。

図 4 は 9 月 20 日 18:00 より 23:55 (ファイル 3) における周波数解析である。横軸はファイル 3 の時間を示し、時間分解能は 10.24s である。また、縦軸は 0Hz から 50Hz の周波数を示し、周波数分解能は 0.098Hz である。そして、磁界強度 (dB) を色別で示している。21 時 30 分よりパルス性雑音と背景雑音の上昇が見られ 23 時以降急激に減少しているのが容易に分かる。しかし、雷放電活動によるパルス性雑音のみでは図 3 に示す磁界強度のベース部分が 5dB から 10dB も上昇することは解釈できない。なぜなら、21 時 30 分以前にも激しい雷放電活動が発生しているがベース部分の急激な上昇はほとんど見られない。かつまた、図 3 でベース部分の急激な上昇が見られる時間帯ではパルス性雑音によるレベル変動は他の時間帯ほどには強く現れていない。このため、図 3 に示す 21 時 30 分から 23 時における磁界強度のベース部分の上昇はこの時間帯における雷放電活動でなく背景雑音が大きく影響しているものと強く推定できる。そして、ソナグラムよりこの背景雑音は極めて低い周波数から 50Hz にまで広く分布している。ここでは代表値として 18Hz を選定し、磁界成分の位相特性とその到来方位を解析する。

この背景雑音を解明するため、21 時 30 分から 23 時における 18Hz での B_x と B_y の位相差を図 5(a) に、その到来方位を図 5(b) に示す。

Fig. 4. An example of Sonogram (September 20).

Fig. 5. Azimuthal angle and phase difference of electromagnetic wave in ELF.

図 5(a)において、位相差の中央値は概ね 180° であることは明らかである。よって、背景雑音は直線偏波で到来していると考えられる。ULF/ELF 帯電磁波のように極めて低い周波数における到来方位の測定法は確立されていないが、観測された背景雑音が概ね直線偏波と考えられることより、ゴニオメータ法による到来方位測定[6]を試みた。図 5(b)はゴニオメータ法による到来方位測定を示す。なお、角度は第 1 象限で東より北方向に角度を測定した。21 時 30 分から 23 時に中津川観測所に到来した背景雑音は概ね 30° から 40° に中央値がある。ゴニオメータ法では 180° の不確定さが存在するが、既に記したように 21 時 30 分から 23 時での時間帯においては雷放電話動が観測所の北西で発生していること、観測点より見て第 1 象限に遠距離伝搬する波源が存在しないことより、ここでは第 3 象限からの到来として取り扱う。この仮定に基づくと、異常な背景雑音の上昇は第 3 象限の西より南へ概ね 30° から 40° で遠方より中津川観測所へ到来したことになる。

重要なことは、この背景雑音発生後の 21 日未明 02 時 47 分に M=7.6 の台湾地震が発生していることである。そして、中津川観測所から見て台湾は第 3 象限の西より南へ 35° の方位にある。つまり、この背景雑音の上昇は台湾で発生しているもので、21 日未明 02 時 47 分に発生した M=7.6 の台湾地震の前兆現象と強く推定される。

なお、この傾向は 50Hz 以下の他の周波数帯域においても求められた。直線偏波で到来方位が 30° から 40° の背景雑音は台湾地震の本震、余震の発生している 21 日 02 時から 09 時においても観測されたことを付記する。また、この時間帯における背景雑音の上昇は他の研究者によっても報告されている[7]。

4. 台湾地震における間接観測法のデータ解析

シューマン(Schumann)共振は完全導体と見なせる大地と電離層間を伝搬する ELF 帯電磁波の球殻空洞共振で、その源は雷放電である[8]。共振周波数は概ね 8Hz の基本波(1 次モード波：以後 Sch1 と略記する)とその高調波(14Hz の 2 次モード波：Sch2, 20Hz の 3 次モード波：Sch3, 26Hz の 4 次モード波：Sch4, ...)で構成される。一般に各モード波の周波数は伝搬する状況(地球磁界に対する角度、陸/海、昼/夜)により概ね $\pm 0.2\text{Hz}$ 程度異なり[9]、各モード間の強度は雷放電発生から観測地点までの距離、雷放電の周波数成分に依存するとされている。

地震の前兆現象として震央上空の電離層が擾乱されることはすでに報告されている[2]。我々も春日井-NWC(オーストラリア)間の VLF 局電波(19.8kHz)[10]や春日井-福島間の標準電波 JG2AS 局(40kHz)[11]を用いて地震前兆現象の観測を行っている。その解析結果では送信点と受信点の伝搬経路上(80km 以内)で発生する比較的大きな地震(M=5 以上)では強度/位相に変動が現れることを検出している。そこで、大地-電離層間を伝搬するシューマン共振においても地震前兆現象が観測されるものと考え解析を行った。ここでは、前節で対象とした 1999 年 9 月の台湾地震で観測されたシューマン共振の異常励起に着目した間接観測法による地震前兆現象についてのみ報告する。

通常、中津川で観測されるシューマン共振は Sch1 と Sch2 が検出される程度で、Sch3 と Sch4 は次第に雑音に埋もれほとんど観測されない。しかし、極めて特殊な例を図 6 に示す。

Fig. 6. Sonogram (magnetic field NS (By)) of file 1 on September 15 in 1999.

図 6 は 1999 年 9 月 15 日 6 時 00 分より 11 時 55 分(ファイル 1)の時間帯における磁界 NS 成分(By)のソナグラムである。明らかにシューマン共振の異常励起を示すもので、Sch1 から Sch3 はほとんど背景雑音に埋もれているが、Sch4 のみが異常に励起されていることが分かる。この観測時期は、増幅部にあるフィルタの設定が十分ではなくエリアシングのため 25Hz を対称とし、低域の信号が高域に現れている。また、パルス性雑音が多いことが特徴的である。これは、観測点が夏期に当たり観測点近傍で雷放電活動が活発であることに起因している。パルス性雑音と Sch4 の励起とは相関が見られず Sch4 の励起が安定していることより、図 6 に見られるパルス性雑音はシューマン共振を生成している雷放電とは関係のない観測点近傍の雷放電活動であるといえる。

図 6 に示す時間帯での、Sch4 の中心周波数とその到来方位を表 1 に示す。

Table 1. Center frequency and arrival direction of Sch4.

磁界 NS 成分(By)	Sch4	磁界 EW 成分(Bx)	Sch4
中心周波数	25.29Hz	中心周波数	26.37Hz
到来方位の中心角度	36°	到来方位の中心角度	19°

注目すべき点は Sch4 の中心周波数で磁界 NS 成分(B_y)が通常の共振周波数より低くなっていることである。シューマンの共振周波数は伝搬する状況により通常 $\pm 0.2\text{Hz}$ 程度異なることは既に述べた。しかし、表 1 に示す磁界 EW 成分(B_x)はほぼ正常値であるが、磁界 NS 成分(B_y)の共振周波数は 1Hz 程度低くなっている。

Fig. 7. Sonogram (magnetic field EW (B_x)) of file 0 on September 15 in 1999.

Fig. 8. Sonogram (magnetic field NS (B_y)) of file 0 on September 15 in 1999.

図 7 と図 8 はそれぞれ 9 月 15 日ファイル 0 における磁界 EW 成分(B_x)と磁界 NS 成分(B_y)のソナグラムで図 6 の前 6 時間のシューマン共振(Sch4)を示すものである。図 7 と図 8 より、異なる周波数のシューマン共振は同時に励起されており、単一場所で発生した雷放電によるシューマン共振の励起であることを示している。図 8 の Sch4 に注目すると、所々パルス性雑音で励起状態が変動していることが明らかである。励起に変動を与えているパルス性雑音は数例で、その他のパルス性雑音は図 6 と同様にシューマン共振には全く影響を与えていない。このことより、励起に変動を与えているパルス性雑音と変動を与えないパルス性雑音とは全く異なるものであることは明らかである。つまり、励起に変動を与えないパルス性雑音は図 6 と同様に中津川観測所の近傍で発生している雷放電活動によるものと考えられる。また、このシューマン共振の励起が図 2 における 9 月 15 日の急激な上昇の原因となっていることはこのソナグラムから明らかである。

ここで、励起に変動を与えているパルス性雑音の到来方位を求めた。ゴニオメータ法によるこのパルス性雑音の到来方位は何れも周波数全体としては 35° にピークが存在する。つまり、中津川観測所から見て 35° の方向か

ら到来していることになる。この時間帯では第1象限に雷放電活動がないため、第3象限より到来しているものと考えられる。よって、中津川で観測されたシューマン共振の励起に影響を与えているパルス性雑音は、中津川観測所で西から南へ 35° の方位で到来している。この角度は表1シューマン共振周波数Sch4の25.29Hzの方位角と概ね同じである。

これらの解析結果より地震の前兆現象と考えられるシューマン共振の励起には以下に示す特徴がある。①シューマン共振の励起はBxとByでは通常の場合 $\pm 0.2\text{Hz}$ の数倍異なる。②異なる2つの周波数のシューマン共振は同時に励起していることより、シューマン共振を発生させている雷放電は単一場所によるものである。③異なる周波数のシューマン共振は同時に励起しているにもかかわらずそれぞれ異なる方位より到来している。④通常のシューマン共振周波数で到来する波は直線偏波に近い伝搬特性で比較的狭い角度で中津川へ到来している。⑤通常の共振周波数に比べ異なる周波数で到来しているシューマン共振の場合は楕円偏波で、広い角度より到来している。⑥通常の共振周波数に比べ異なる周波数で到来しているシューマン共振の場合は雷放電で励起が変化する状態が観測される場合がある。

これらのことより、9月15日に観測された通常のシューマン共振(Bx)は発生時刻から南アメリカに広く分布する雷放電を源としその発生場所と中津川を大円とする伝搬経路でのシューマン共振と考えられる[12]。よって、その到来方位は中津川から見て雷放電発生の大円方向を指すものと考えられる。そして、通常のシューマン共振周波数より、大きく異なるシューマン共振は、シューマン共振を生成する雷放電発生場所と中津川とは異なる別の場所を大円として共振しているものと考えられる。そして、この大円伝搬路の一部に電離層の擾乱が発生しており、共振の電磁波の一部が中津川方向に反射されたものと考えられる。電離層の擾乱を発生させている場所が中津川から1000kmオーダの距離にあれば直線偏波に近い伝搬特性を示し、数100km程度であれば直線偏波とはならない。そして、電離層擾乱発生場所こそが地震前兆の現象を発生させている場所と考えられる。

また、可能性としては地震前兆によるパルス性雑音によりシューマン共振が発生し、パルス性雑音発生場所と中津川を大円とした伝搬で共振が生成されている可能性もある。しかし、この場合は生成されるシューマン共振は1つであり、同時に生成される異なる周波数のBx,Byは存在しない。よって、中津川で観測されるシューマン共振で、通常とは異なる周波数の到来方位が地震前兆現象を発生させている震央の方位を示しているものと考えられる。地震前兆現象として電離層が擾乱し、その地点で観測されるシューマン共振の波を反射させ、中津川方向に伝搬させたものと考えられる。そして、最も興味が持たれることはこの励起の6日後に中津川より 35° の方位にある台湾でM=7.6の地震が発生していることである。

一般に、シューマン共振は概ね8Hzの基本波(Sch1)、14Hz(Sch2)の第2高調波、20Hz(Sch3)の第3高調波、26Hz(Sch4)の第4高調波などが観測される。しかし、通常は基本波が最も強く、高次の高調波になるにつれ背景雑音に埋もれ観測することが困難となる[8]。また、どの高調波が最も強く受信されるかは雷放電特性(強度の周波数特性)が同一とすれば発生場所と受信点の距離に依存する。しかし、どの場合であっても他の高調波がほとんど受信されないということは無く、各高次のシューマン共振の強度は伝搬経路の日変化のため、一般的には周期的に変動する。しかし、15日ファイル0に始まったシューマン共振の励起は19日ファイル3までSch4が最大強度を継続する。このように、Sch4のみが極端に強く、かつまた長時間にわたり検出された例は1999年の9月のみである。

Fig. 9. The drift of the intensity of Sch4 in September.

1999年9月におけるSch4成分が存在する20.02Hz~34.96Hz帯域における平均水平磁界強度の変動を図9に示す。明らかに、9月15日から16日にかけて極端な強度の上昇と23日から25日までの緩やかな上昇と下降が見られる。9月15日の上昇では、6日後の9月21日台湾で午前2時48分にM=7.6の本震、2時57分にM=6.0、3時11分にM=6.1の余震、また9月22日9時15分にもM=6.4の余震が観測されている[5]。また、15日ほどの強度は無いが23日からの緩やかな上昇は9月21日の本震およびその他の余震による影響であるか、またはその後には発生する26日8時53分にM=6.5の前兆を示しているかは明らかではない。

電離層の擾乱は地磁気擾乱に影響されることは広く知られている。しかし、このシューマン共振の異常励起とは明らかな相関は得られなかった。よって、9月15日におけるシューマン共振の励起は台湾で発生したM=7.6の地震に深く関係があると考えられる。以上の観点から、Byのシューマン共振25.29Hzに強く影響を与えている図8のパルス性雑音を見直してみよう。シューマン共振を励起するパルス性雑音の到来方位は概ね35°で、中津川観測地点より台湾方向を示している。かつまた、このパルス雑音はBxのシューマン共振26.37Hzの励起にはほとんど影響を与えていない。よって、パルス性雑音が台湾上空で発生していると仮定すれば、Byのシューマン共振25.29Hzは雷放電の波源と台湾とを結ぶ大円上の伝搬路を持つシューマン共振と考えることができる。かつまた、Bxのシューマン共振26.37Hzは雷放電の波源と中津川を結ぶ大円上の伝搬路を持つシューマン共振と考えることができる。従って、台湾上空に伝搬路を持つシューマン共振25.29Hzは電離層擾乱により通常とは大きく異なる共振周波数を持ち電離層擾乱のため中津川観測所へ反射されたものと考えられる。一方、中津川上空に伝搬路を持つシューマン共振26.37Hzは地震による電離層の擾乱を受けていないため、通常のシューマン共振周波数と大きく異なることはないと考えられる。このように15日におけるシューマン共振の励起とBx, Byの周波数のずれは9月23日から始まる励起でも見られ、台湾での異常伝搬が強く推定される。なお、1999年1月から2004年8月までに発生したM=5.0以上の地震は33回で、陸上の地震7回の内6回に、また、海中の地震26回の内マグニチュードが大きく陸地に近い4回にシューマン共振の前兆現象が見られた。

5. むすび

科学的な地震予知の研究は学問的のみならず被害を最小に押さえるため極めて重要な社会的課題である。特に、短期的な予知の研究は多くの関心を集めている。我々は電磁波を用いた地震予知が有望と考えているが、直接観測法と間接観測法を両立させることは観測設備、解析能力に限界がある。そこでELF帯電磁波を用いて両立させる観測法の開発に取り組んでいる。ここでは、1999年9月に発生した台湾地震におけるELF電磁波の直接観測法とシューマン共振を用いた間接観測法について一例を示した。いずれの観測法であっても地震前兆現象と考えられる電磁波の励起が観測された。特に、シューマン共振を用いた間接観測法は局電波を用いた間接観測法と比べ観測地点の電磁雑音環境の設定は限定されるが直接観測法との比較が容易にでき、有望な観測手法と考えられる。

参考文献

- [1] O. Molchanov, A. Kulchisky, M. Hayakawa, Inductive seismo-electromagnetic effect in relation to seismogenic ULF emission, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 1, pp.61-67, 2001.
- [2] M. Hayakawa, O. A. Molchanov, T. Ondoh, E. Kawai, The precursory signature effect of the Kobe earthquake on VLF subionospheric signals, *J. Comm. Res. Lab.*, 43, pp.413-418, 1996.
- [3] K. Ohta, K. Umeda, N. Watanabe, M. Hayakawa, ULF/ELF emissions observed in Japan, possibly associated with the Chi-Chi earthquake in Taiwan, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 1, pp.37-42, 2001.
- [4] K. Ohta, K. Makita, M. Hayakawa, On the association of anomalies subionospheric VLF propagation at Kasugai with earthquakes in the Tokai area, Japan, *J. Atmos. Electr.*, 20, 2, pp.85-90, 2000.
- [5] 地震加速度情報, www.adeq.or.jp
- [6] 岡田敏夫, 森山伸一, 岩井 章: "ホイ斯拉の2周波数方位測定装置とその観測結果", 電子通信学会論文誌, pp.993-1000, J61-B, 12, 1978.
- [7] M. Seto, K. Murayama, Y. Kitamura, T. Watanabe, Observation of seismo-genic ELF magnetic field variations and seismo-electric currents in a power transmission system, *Seismo Electromagnetics*, Eds. M. Hayakawa and O. A. Molchanov, pp.69-75, 2002.
- [8] W. O. Schumann, On the free oscillations of a conducting sphere which is surrounded by an air layer and an ionosphere shell, *Z. Naturforsch. A*, 7a, pp.149-154, 1952.
- [9] 佐尾和夫, 空電, pp.106-107, p.82, 成山堂書店, 1981.
- [10] 太田健次, 原 俊介, 早川正士, TT法による地震前兆現象の検出改善, *J. Atmos. Electr.*, 24, 1, pp.31-38, 2004.
- [11] 太田健次, 花井伸一, 原 俊介, 早川正士, JG2AS局を用いた地震前兆現象の観測, *J. Atmos. Electr.*, 23, 2, pp.85-95, 2004.
- [12] A. P. Nickolaenko, M. Hayakawa, *Resonances in the Earth-Ionosphere Cavity*, p.267, Kluwer Academic Publishers, 2002.

(Received November 2, 2004; revised December 25, 2004;
accepted January 15, 2005)