

# 見通し内 VHF 帯伝搬異常と地震発生との統計的関連性

本島 邦行<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> 群馬大学大学院 電気電子工学専攻、群馬県桐生市天神町 1-5-1

Statistical relation between anomalous line-of-sight propagations in the VHF band and occurrences of earthquakes.

Kuniyuki Motojima

<sup>1)</sup> Dept. Electronic Eng., Gunma University, 1-5-1 Tenjin-cho, Kiryu 376-8515, Gunma, Japan

**Abstract:** This paper was intended to find out any relation between anomalous line-of-sight propagations in the VHF band and occurrences of earthquakes near the VHF propagation path. The broadcasting waves from Tokyo tower were monitored continuously for 1155 days at Kiryu Gunma. Anomalous propagations were distinguished from the received data by using a statistical analysis. After the statistical thoughtful consideration, it was found out that earthquakes associated with anomalous propagations were characterized by (1) magnitude of earthquakes  $M \geq 4.5$ , (2) distance from epicenters  $L \leq 75\text{km}$  and (3) depth of hypocenters  $D \leq 50\text{km}$ .

**Key words:** seismogenic electromagnetic phenomena, short-term earthquake prediction, VHF band, line-of-sight propagation, precursors of earthquakes.

## 1. はじめに

近年、短期地震予知を目的として、地球規模で生じる電磁気学的現象と地震発生との関連性について、様々な観測結果が報告されている（早川, 2006）。特に、1995年1月17日に発生し多数の犠牲者を出した阪神・淡路大震災以降、これらの関係について注目が集まり多くの観測結果が報告されている。地震の前兆現象として現れる電磁気学的現象の報告は、二つに大別される。一つは地震の前触れとして生じる岩盤破壊に伴って放射される電磁波を直接観測したものである。破壊する岩盤からは様々な周波数帯の電磁波が放射されるが、地圏内の伝搬損失が比較的少ない ULF 帯電磁波として捉えたもので、地震発生の数週間～数日前に観測された報告がある（Fraser-Smith et al., 1990; Hayakawa et al., 1996）。もう一つは電磁気学的現象を間接的に観測したもので、主に VLF 帯と VHF 帯の2つの周波数帯での観測結果が報告されている。VLF 帯における観測では、電離層・大地導波管モードで伝搬する既存送信局からの電波を計測することで、電離層下部に生じた擾乱を間接的に捉えた報告である（Hayakawa et al., 1996; Molchanov and Hayakawa, 1998）。この観測方法では、送信局と受信局（観測点）間を結ぶ大円近傍の異常現象を捉えることができるため、観測可能領域が数千 km と広範囲である。一方、VHF 帯を用いた観測では、伝搬異常による見通し外 VHF 帯放送波を捉えることで、電磁気学的現象を観測する方法である（串田, 2000; Kushida and Kushida, 2002; Yonaiguchi et al., 2007）。さらに、単に伝搬異常を捉えるだけでなく、受信波の到来方向や偏波を計測することで、地震との関連性をより深く追求した報告もなされて

いる（米内口ほか, 2007）。これらの研究結果から、見通し外の VHF 帯伝搬異常は電離層内ではなく地表面に近い大気圏内の異常を捉えたものであることが明らかとなっている（Fukumoto et al., 2001; Fujiwara et al., 2004）。さらに、北海道地方における近距離 FM 放送波の伝搬異常を観測し、伝搬異常の積算継続時間長と数日後に生じた地震の規模・最大震度間の関連性を指摘する報告もある（Moriya et al., 2010）。

ところで筆者らは、今まで観測対象になっていなかった見通し内の VHF 帯伝搬に着目し、受信電界強度を常時自動計測するシステムを構築することで長期の観測をおこなってきた。見通し内 VHF 帯放送波は常時受信できるので、受信電界強度の変動を統計処理することで伝搬異常を検出し、地震発生との関連性について検討した（本島ほか, 2009; Motojima, 2009）。見通し内 VHF 帯伝搬観測では、観測可能範囲が他の方法よりも狭くなるが、簡易な観測装置による面的な多点同時観測網を構築すれば、異常現象発生地域を精度良く絞り込むことが可能となる。そこで本論文では長期間の観測結果を対象とし、捉えられた多数の伝搬異常と伝搬異常を伴う可能性の高い地震の条件について統計的に検証する。そして、伝搬異常を伴っていると考えられる地震の(1)規模、(2)震央と電波伝搬路間距離、(3)震源の深さ、(4)両者の発生時刻間隔、について考察する。

## 2. 観測システムとデータ解析方法

本論文における観測では、見通し内 VHF 帯放送波の伝搬異常と電波伝搬路周辺を震央とする地震との関連性を統計的に考察するため、長期間の観測が必要となった。そこで電波伝搬自動観測システムを構築し、見通し内 VHF 帯放送波の受信電界強度を3年以上連続観測した。この観測システムは、群馬大学工学部桐生キャンパスに設置され、地上5階建て校舎屋上に配置された複数のアンテナと、観測周波数に応じて最適なアンテナを選択する自動アンテナ切替器、受信電界強度計測用の汎用スペクトルアナライザ、データ記録及び制御用 PC で構成されており、24時間連続で自動観測が可能である（詳細は本島ほか (2009), Motojima (2009) に掲載されている）。この観測システムは、VLF 帯～UHF 帯の広帯域で受信電界強度計測が可能であり、VLF 帯の JJY 波から UHF 帯のテレビ放送波まで約 50 波を約 2 分半毎に巡回計測している。計測された受信電界強度は、30 分毎に自動でグラフ化されてから大学のホームページサーバにアップロードされ、インターネット上のどこからでも受信電界強度変化を監視できるようになっている（<http://www.el.gunma-u.ac.jp/~motolab/>）。

本論文では、観測中の約 50 波のうち見通し内に送信局がある VHF 帯放送波を対象とする。具体的には、東京タワーを送信局とする VHF 帯 FM 放送波とアナログテレビ映像波計 8 波の受信電界強度変化を統計的に解析して、伝搬異常の発生を検出した。東京タワーと群馬大学桐生キャンパス間は約 92km 離れているが、等価地球半径係数を  $k = 4/3$  とすると受信点（桐生）は見通し内範囲の境界に近く、等価地球半径係数  $k$  の影響を受け易い位置関係にある。観測期間を 2007 年 2 月 1 日から 2010 年 3 月 31 日までの 1155 日間として、この間に観測された受信電界強度を解析対象とした。受信電界強度にはノイズや短時間揺らぎを含むため、20 分間移動平均値を受信データとした。ところで、見通し内 VHF 帯伝搬であっても受信電界強度に日変化を生じる。そこで 1 日を 5 分ごとの 288 の時間帯に分けて、各々の時間帯別に受信電界強度の平均値  $m$  と標準偏差  $\sigma$  を算出することで日変化の影響を取り除いた。なお、季節による変動は考慮していない。また各放送波は、設備の保守点検のため週に 1 度の頻度で停波するが、停波中であることは容易に見分けが付くので除外している。

伝搬異常の発生は、各時間帯別の平均値  $m$  と標準偏差  $\sigma$  を基準に判別した。本論文では、平均値  $m$  より  $\pm 3\sigma$  以上外れた受信データを「異常データ」とし、計測対象 8 波のうち 3 波以上で同時に異常データが観測され、しかもその状態が 30 分以上継続した場合を「伝搬異常発生」と判定した。なお、全観測期間の受信電界強度分布（デシベル表示）を調べたところ、観測対象の全周波数において平均値を中心にほぼガウス分布しており、本論文で用いる正規

分布に基づく統計処理が妥当であることを確認している。

本論文では、伝搬異常と地震の発生時刻間隔から、両者の関連性を考察する。伝搬異常が観測された後、ある一定の時間内に地震が発生した場合を「併発」と判定する。しかしこの判定方法では、両者の間に関連性が存在せず互いにランダムに発生している場合でも、たまたま両者の発生間隔が短いと「併発」と判定してしまう。しかも伝搬異常と地震の発生回数が多いほど確率的に「併発」の回数が多くなるため、このままでは関連性を考察できない。そこで、伝搬異常と地震が無相関に発生している場合の併発回数 ( $n_{unc}$  とする) を算出し、実際の観測結果から得られる併発回数 ( $n_{obs}$  とする) と比較することで両者の関連性を考察する。伝搬異常と地震の発生時刻間隔が  $t_{seq}$  以内である場合を「併発」と判定し、さらに観測時間 (期間) 長を  $T_{all}$  とすると、ランダムに発生した1度の伝搬異常が、特定の地震発生前の  $t_{seq}$  時間内に生じる確率は  $t_{seq}/T_{all}$  である。観測期間中に発生した伝搬異常の回数を  $N_{anom}$  回とし、さらに地震が  $N_{eq}$  回発生したとすると、両者が無相関の場合の併発回数  $n_{unc}$  は次式となる。

$$n_{unc} = \frac{N_{anom} \cdot N_{eq} \cdot t_{seq}}{T_{all}} \quad (1)$$

そこで本論文では、実際の観測結果から「併発」と判定された回数  $n_{obs}$  と、確率的に求められる無相関の併発回数  $n_{unc}$  を比較することで、伝搬異常と地震の関連性を考察するための判断基準とした。

### 3. 観測結果

前述の条件で判定した伝搬異常は、2007年2月1日から2010年3月31日までの1155日間に33回発生した (式(1)中の  $N_{anom} = 33$ )。これは、平均すると35日に1回の頻度で伝搬異常が発生していたことになる。一方、この観測期間中に日本全国で震度1以上の地震は約4800回発生しているが、関東とその周辺地域を震央とする地震は約1200回ほどである。本論文では、伝搬異常と地震の発生時刻間隔から両者の関連性を考察するが、全ての地震を対象とすると、地震の発生回数が多すぎて伝搬異常との関連性が分からない。また、もし地震が見通し内VHF帯伝搬に影響を与えているならば、東京一桐生間の電波伝搬経路からそれほど遠くない地域を震央とする地震に限定されるはずである。さらに、規模が小さな地震ではその予兆現象も小さいであろうから、異常現象を捉えることは難しいと考えられる。そこで本論文では、考察対象とする地震を震央位置が関東および周辺地域のものとし、地震の規模をマグニチュード3以上のものに限定する。そして伝搬異常と、対象とする地震の(1)規模 (マグニチュード[M])、(2)震央位置 (送信点である東京タワーと受信点である桐生を結ぶ直線を電波伝搬路として、伝搬路震央間距離  $L$  [km])、(3)震源の深さ ( $D$  [km])、との関連性を各々統計的に検証する。

#### 3. 1 地震規模と伝搬異常の関連性

まず始めに、地震の規模 (マグニチュード) と伝搬異常との関連性について Table 1 に示

す。ここでは、電波伝搬路から 75km 以内に震央があり ( $L \leq 75\text{km}$ )、震源の深さが 50km 以内 ( $D \leq 50\text{km}$ ) の比較的浅い地震に限定している。伝搬異常発生後 48 時間以内に地震が発生していた場合 ( $t_{seq} = 2 \text{ days}$ ) を「併発」と判定した結果である。

Table 1 Relation between magnitude of earthquakes and anomalous propagations.

Magnitude	Number of earthquakes, $N_{eq}$ ( $L \leq 75\text{km}, D \leq 50\text{km}$ )	Number of earthquakes with anomalous Propagations, $n_{obs}$ ( $t_{seq} = 2 \text{ days}$ )	Number of earthquakes from (1), $n_{unc}$	$n_{obs}/n_{unc}$ ratio
$\geq M3.0$	109	8	6.23	1.28
$\geq M3.5$	50	6	2.86	2.10
$\geq M4.0$	35	6	2.00	3.00
$\geq M4.5$	10	4	0.57	7.02
$\geq M5.0$	2	1	0.11	9.09

観測期間中、対象となるマグニチュード 3 以上の地震は 109 回発生したが ( $N_{eq} = 109$ )、伝搬異常を伴った併発回数  $n_{obs}$  は 8 回となっており、両者が無相関である場合の併発回数  $n_{unc} = 6.23$  と比較して有意といえるほど大きくない。しかし、地震の規模を大きなものに限定し、例えばマグニチュード 4.5 以上の地震に限ると、観測期間中発生した 10 回の地震 ( $N_{eq} = 10$ ) のうち 4 回の地震が伝搬異常発生から 48 時間以内に起きており ( $n_{obs} = 4$ )、無相関の併発回数  $n_{unc} = 0.57$  と比べて約 7 倍の高頻度である。つまり規模の大きな地震ほど、伝搬異常を伴う可能性が高くなっていると考えられる。そこで以降の検討では、規模をマグニチュード 4.5 以上の地震に限定して、他の条件 (電波伝搬路—震央間距離  $L$  [km]、震源深さ  $D$  [km]、異常伝搬との発生時刻間隔  $t_{seq}$  [days]) との関連性について考察する。

### 3. 2 電波伝搬路—震央間距離と伝搬異常の関連性

Table 2 Relation between epicenters of earthquakes and anomalous propagations.

Distance between propagation path and epicenters, $L$ [km]	Number of earthquakes, $N_{eq}$ ( $M \geq 4.5, D \leq 50\text{km}$ )	Number of earthquakes with anomalous propagations, $n_{obs}$ ( $t_{seq} = 2 \text{ days}$ )	Number of earthquakes from (1), $n_{unc}$	$n_{obs}/n_{unc}$ ratio
$L \leq 200\text{km}$	54	7	3.09	2.27
$L \leq 175\text{km}$	50	7	2.86	2.45
$L \leq 150\text{km}$	43	5	2.46	2.03
$L \leq 125\text{km}$	27	5	1.54	3.25
$L \leq 100\text{km}$	22	5	1.26	3.97
$L \leq 75\text{km}$	10	4	0.57	7.02
$L \leq 50\text{km}$	4	1	0.23	4.35

規模がマグニチュード 4.5 以上で、かつ震源の深さが 50km 以内 ( $M \geq 4.5, D \leq 50km$ ) の地震に限定した場合の、電波伝搬路—震央間距離  $L$  と伝搬異常との関連性について Table 2 に示す。対象とする地震の震央を電波伝搬路から 200km 以内の領域 ( $L \leq 200km$ ) まで広げると、観測期間中 54 回の地震が発生したが ( $N_{eq} = 54$ )、これは平均すると約 21 日に 1 度の発生頻度である。このうち、伝搬異常発生後 48 時間以内 ( $t_{seq} = 2 days$ ) に発生した地震は 7 回である ( $n_{obs} = 7$ )。もし、伝搬異常と地震発生が無関係ならば確率的に  $n_{unc} = 3.09$  回であるので、 $n_{obs} = 7$  回は約 2 倍の頻度である。さらに、電波伝搬路より 75km 以内の領域 ( $L \leq 75km$ ) に震央を持つ地震に限ると、無相関の併発回数  $n_{unc} = 0.57$  回であるのに対して、実際に伝搬異常を伴った地震の併発回数は  $n_{obs} = 4$  回と約 7 倍の発生頻度となる。この結果からは、はっきりとしたしきい値は分からないものの、電波伝搬路からおおよそ 75km 以内の領域を震央とする地震では、伝搬異常を伴う可能性が高いと考えられる。

### 3. 3 震源の深さと伝搬異常の関連性

Table 3 Relation between depth of hypocenters and anomalous propagations.

Depth of hypocenters ( $D [km]$ )	Number of earthquakes, $N_{eq}$ ( $M \geq 4.5, L \leq 75km$ )	Number of earthquakes with anomalous propagations, $n_{obs}$ ( $t_{seq} = 2 days$ )	Number of earthquakes from (1), $n_{unc}$	$n_{obs}/n_{unc}$ ratio
$D \leq \infty$	17	4	0.97	4.12
$D \leq 70km$	14	4	0.80	5.00
$D \leq 60km$	11	4	0.63	6.35
$D \leq 50km$	10	4	0.57	7.02
$D \leq 40km$	7	3	0.40	7.50
$D \leq 30km$	4	2	0.23	8.70
$D \leq 20km$	2	1	0.11	9.09

次に、震源の深さと伝搬異常との関連性について考察する。Table 3 は、規模がマグニチュード 4.5 以上で、かつ震央が電波伝搬路から 75km 以内 ( $L \leq 75km$ ) の地震に限定した場合の、震源の深さと伝搬異常との関連性を集計したものである。観測期間中、対象となる地震は 17 回ほど発生しているが ( $N_{eq} = 17$ )、伝搬異常発生から 48 時間以内 ( $t_{seq} = 2 days$ ) に発生した地震は 4 回である ( $n_{obs} = 4$ )。伝搬異常と地震が無相関の場合  $n_{unc} = 0.97$  回であるから、その約 4 倍の頻度で地震が発生していたことになる。さらに、震源の深さが比較的浅い地震に限定するほど、無相関の併発回数  $n_{unc}$  に対して実際に発生した地震の回数  $n_{obs}$  の比率が高くなっており、震源が浅い地震ほど伝搬異常を伴う傾向が強いと考えられる。他の条件同様に、無相関の併発回数  $n_{unc}$  に対する実際の併発回数  $n_{obs}$  の比を 7 倍以上 ( $n_{obs}/n_{unc} \geq 7$ ) とすると、震源の深さが 50km 以内 ( $D \leq 50km$ ) の地震に限定することができる。

### 3. 4 伝搬異常と地震の発生時刻間隔

さらに、伝搬異常と地震の発生時刻間隔  $t_{seq}$  をパラメータとして、実際の併発回数  $n_{obs}$  と無相関の併発回数  $n_{unc}$  を比較することで、両者の発生時刻間隔について考察する。Table 4 は、

前述の伝搬異常を伴っていたと思われる地震 ( $M \geq 4.5, L \leq 75\text{km}, D \leq 50\text{km}$ 、観測期間中計 10 回発生 ( $N_{eq} = 10$ )) を対象にして、「併発」と判定する発生時刻間隔  $t_{seq}$  を変えた場合の、観測された併発回数  $n_{obs}$  と無相関の併発回数  $n_{unc}$  を示している。両者の発生時刻間隔  $t_{seq}$  を長くともほど「併発」と判定される地震回数  $n_{obs}$  が増えるが、両者が無相関の場合の確率的な併発回数  $n_{unc}$  も式(1)に従って増加する。発生時刻間隔  $t_{seq}$  を 21 日以上とすると、無相関の併発回数  $n_{unc}$  の方が実際に観測された併発回数  $n_{obs}$  を上回り、伝搬異常と地震との間に関連性が認められない。しかし、発生時刻間隔  $t_{seq}$  を短くすると無相関の併発回数  $n_{unc}$  に対する実際の併発回数  $n_{obs}$  の比は高くなり、発生時刻間隔を 48 時間以内 ( $t_{seq} \leq 2 \text{ days}$ ) に限定すると約 7 倍 ( $n_{obs}/n_{unc} \geq 7$ ) となる。この結果から、伝搬異常は地震発生の約 1 週間～数日前に発生する可能性が高く、特に地震発生前 48 時間以内に生じる可能性が高いと考えられる。

Table 4 Time difference between earthquakes and anomalous propagations.

Time span associated with earthquakes, $t_{seq}$	Number of earthquakes with anomalous propagations, $n_{obs}$	Number of earthquakes from (1), $n_{unc}$	$n_{obs}/n_{unc}$ ratio
$t_{seq} = 30 \text{ days}$	6	8.57	0.70
$t_{seq} = 21 \text{ days}$	6	6.00	1.00
$t_{seq} = 14 \text{ days}$	6	4.00	1.50
$t_{seq} = 10 \text{ days}$	5	2.86	1.75
$t_{seq} = 7 \text{ days}$	5	2.00	2.50
$t_{seq} = 5 \text{ days}$	5	1.43	3.50
$t_{seq} = 4 \text{ days}$	4	1.14	3.51
$t_{seq} = 3 \text{ days}$	4	0.86	4.65
$t_{seq} = 2 \text{ days}$	4	0.57	7.02
$t_{seq} = 1 \text{ days}$	2	0.29	6.90

### 3. 5 伝搬異常データ例

観測期間中に捉えられた伝搬異常データ例を、Fig. 1 に示す。これは、2007 年 8 月 16 日深夜から翌 17 日未明にかけて VHF 帯テレビ放送波（フジテレビ波とテレビ朝日波）に発生した伝搬異常データである。両波ともほぼ同時刻の受信電界強度に V 字型の大きな落ち込みを生じているが、特に、16 日 23 時 15 分頃フジテレビ波において、平均値  $m$  から  $-6\sigma$  以上外れた最小値を記録した。このような観測値はまれな数値である。ほぼ同時刻に、観測していた他の VHF 帯放送波においても大きなレベル低下が発生していた。この伝搬異常の約 39 時間後である 2007 年 8 月 18 日の 13 時 36 分に千葉県東部を震源とするマグニチュード 4.5 の地震と、約 42 時間後の 16 時 55 分に千葉県南部を震源とするマグニチュード 5.2 の地震が発生した。この例では、1 つの伝搬異常に対して 2 つの地震が発生しているため、各々個別の対応関係が分からない。しかし、はっきりした伝搬異常発生後 48 時間以内に、電波伝搬路近くを震央とする比較的大きな地震が発生していたことは明らかである。

## 4. 考察

### 4. 1 伝搬異常を伴う地震

以上の結果から断定することはできないが、次の条件を満たす地震は、地震発生に先立つ 48 時間以内に伝搬異常を伴っていた可能性が高い。

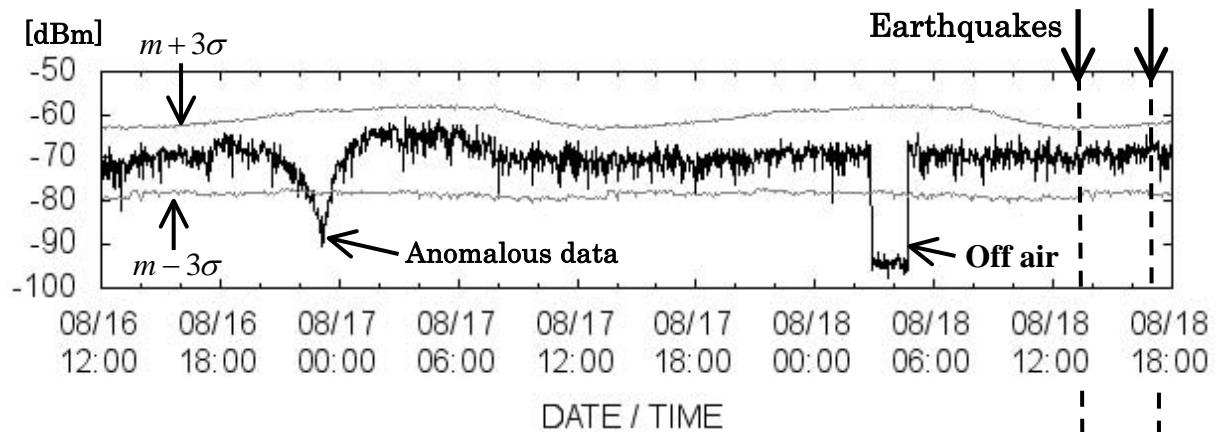
伝搬異常を伴う可能性の高い地震の条件

- (1) 規模がマグニチュード 4.5 以上
- (2) 震央位置が電波伝搬路から 75km 以内の領域
- (3) 震源の深さが 50km 以内

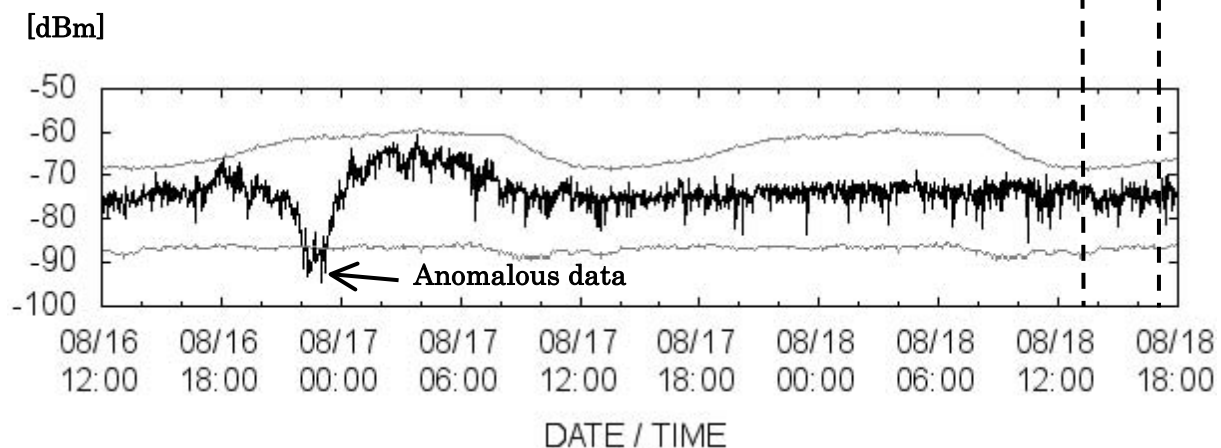
上記の条件を満たす地震は、観測期間中に 10 回発生しており、そのうち 4 回の地震で地震発生前 48 時間以内に伝搬異常を伴っていた。また、前述の伝搬異常判定条件は満たしていないが、残り 6 回のうち 2 回の地震で、発生前 48 時間以内にやや弱い伝搬異常を伴っていた。

東京タワーと群馬大学桐生キャンパス間の電波伝搬路と、伝搬路から 75km 以内の範囲、及び観測期間中に発生した上記条件を満たす 10 回の地震の震央位置を Fig. 2 に示す。10 回の地震のうち、伝搬異常を伴っていた 4 回の震央位置を○印で表し、やや弱い伝搬異常を伴っていた 2 回の震央位置を△印、伝搬異常が観測されなかった 4 回の震央位置を×印で表す。

ここで、地震に伴う見通し内 VHF 帯伝搬異常の発生原因について推測する。地震に関連した地球電磁気学的な現象の発生原因については、「地圏・大気圏・電離圏結合」現象などの仮説が提案されている。本論文における異常現象は見通し内 VHF 帯伝搬に現れたものであり、電波伝搬路長の短さ（約 92km）からも、電離圏の異常現象が観測されたとは考えにくい。



(a) Fuji TV (f=193.25MHz)



(b) TV Asahi (f=205.25MHz)

Fig. 1 Anomalous propagation data on VHF TV broadcasting band (Aug. 16-18, 2007).

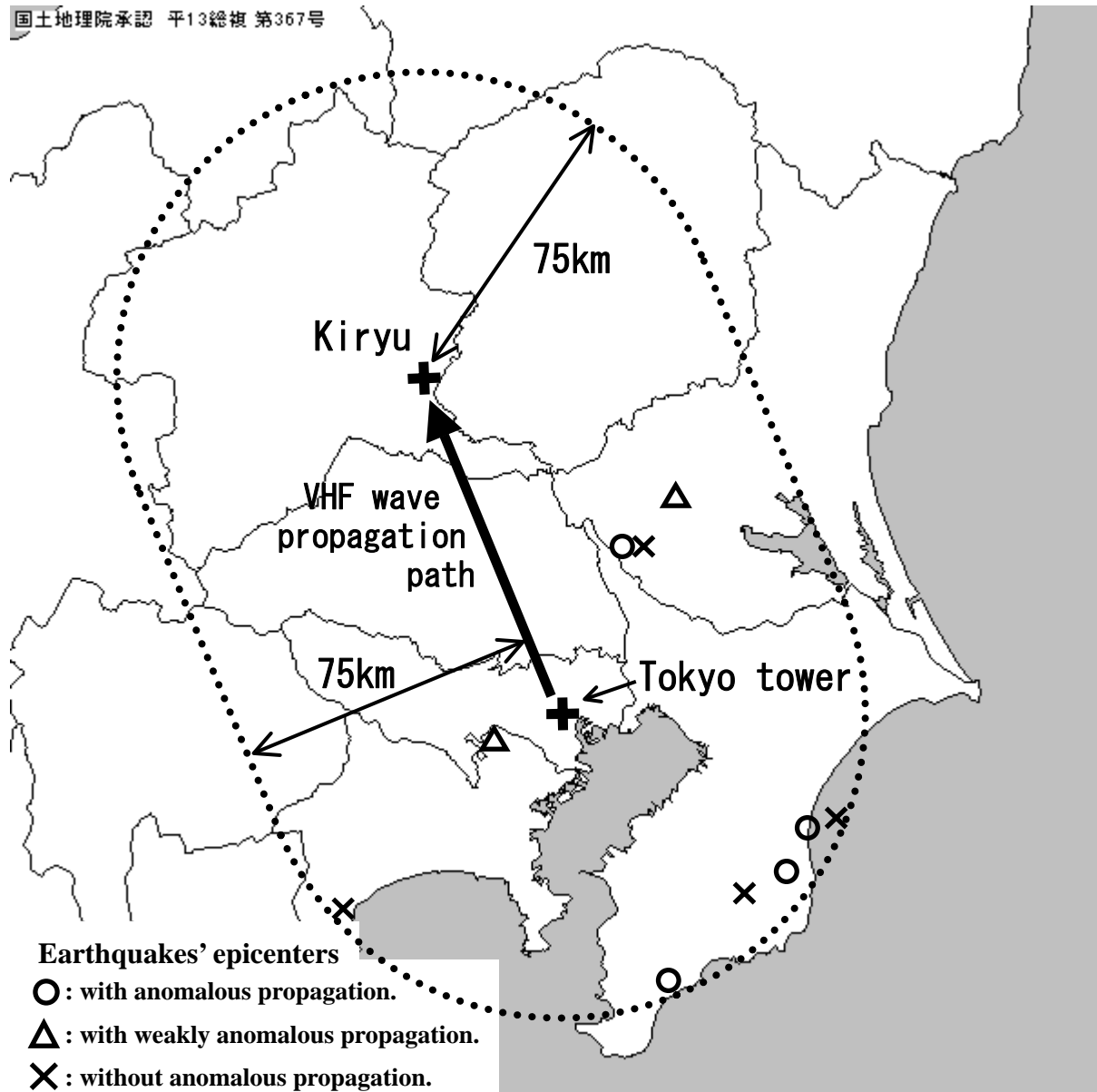


Fig. 2 Region of the earthquakes' epicenters under consideration and VHF wave propagation path.

おそらく、大気圏内に生じた屈折率異常が、見通し内 VHF 帯の伝搬異常として捉えられた結果であると考えている。通常の見通し内 VHF 帯伝搬では、地上高が高くなるほど屈折率が小さくなるため伝搬波は地表面側に曲げられ、幾何学的な地平線よりやや遠方の等価地球半径係数  $k = 4/3$  に相当する範囲まで到達する。しかし地震発生前には、地表面近くの大気屈折率に異常を生じたため（等価地球半径係数  $k$  が変化）、受信電界強度の異常として観測されたのではないかと推測している。地表面近くの大気屈折率に異常が生じる原因としては、地震発生前に地中から大気中に放出される放射性ガス量の変動し、地表面近くにおける大気の等価誘電率が変化したことによる影響ではないかと考えている。



#### 4. 2 伝搬異常を伴わない地震

ところで前章の Table 1-4 では、前述の条件を満たす地震が伝搬異常を伴っていた可能性が高いことを示しているが、地震発生に伴って必ずしも伝搬異常が観測されていたわけではない。Table 1-4、Fig. 2 に示すように、伝搬異常を伴っていた地震は約半分である ( $n_{obs}/N_{eq} = 0.4$ )。つまり、約半分の地震は伝搬異常を伴わずに発生している。そこで、前述の条件を満たす地震が発生したにも関わらず、伝搬異常が観測されなかった原因について考察する。

まず第一に、見通し内 VHF 帯伝搬といえども日変化の影響を受けるため、昼間の受信電界強度が低下して伝搬異常と判定することが困難となり、結果として伝搬異常を見逃している可能性がある。これは、昼間の日照によって大気の大気対流が活発になり、地表面近くと上空の屈折率差が小さくなることが原因であるが、観測期間中 33 回の伝搬異常はいずれも夜間に発生していた。夜間に発生した伝搬異常が未明まで継続したデータはあるが、夜明け後の日変化により伝搬異常が消失している。1つの例として Fig. 3 は、2007 年 5 月 8 日 21 時 01 分に茨城県南部を震源とするマグニチュード 4.5 の地震に伴って、8 日未明に NHK 教育テレビ波とフジテレビ波に現れた伝搬異常データである。この伝搬異常例では、夜明け頃まで激しい電界強度変動を繰り返しており「伝搬異常発生」と判定されているが、日の出後の日変化とともに伝搬異常の判別がつかなくなっている。昼間の伝搬異常を検出しにくいのは、本観測法の大きな欠点である。

また、異常が発生しているにも関わらず、地表面近くの大気屈折率に影響が現れなかった場合も考えられる。例えば、昼間同様に地表面近くの大気が攪拌されるような気象条件では、地表面付近に滞留した放射性ガスが拡散されるため、伝搬異常が生じにくいはずである。そこで、観測期間中に発生した前述の条件を満たす 10 回の地震と、見通し内 VHF 帯電波伝搬路に近い埼玉県熊谷市の夜間における風速との関連性について調べた。

Table 5 は、伝搬異常を伴っていた地震の発生日時・震央位置・規模・震源の深さと、地震発生前 48 時間以内に発生した伝搬異常の発生日時及びその時刻における熊谷市の風向風速である。この表から分かるように、伝搬異常発生時の熊谷市の風速は 2.5m/s 以下と比較的小さく、穏やかな気象条件であったことが分かる。

一方、Table 6 は「伝搬異常発生」判定を伴わなかった地震の発生日時・震央位置・規模・震源の深さと、地震発生前 48 時間以内の熊谷市における夜間の最大風速を示している。この表から分かるように、伝搬異常を伴っていない地震は、発生前夜間の風速が 2.9m/s 以上と比較的大きかった。この 6 例から断定することはできないが、風速が大きい場合には伝搬異常が発生しにくいと考えることができる。また、Table 6 中の 2007 年 6 月 2 日 14 時 43 分に発生した地震では、前述の判定基準では「伝搬異常発生」と判定されなかったが、地震発生の約 19 時間前に弱い伝搬異常が観測されていた。また、2008 年 8 月 8 日 12 時 57 分に発生した地震でも同様に、地震発生 11 時間前に弱い伝搬異常が生じていた。これらは伝搬異常発生時の風速が各々 3.1m/s、2.9m/s とやや大きかったため、明らかな異常データとして捉えることができなかつた例ではないかと考えている。

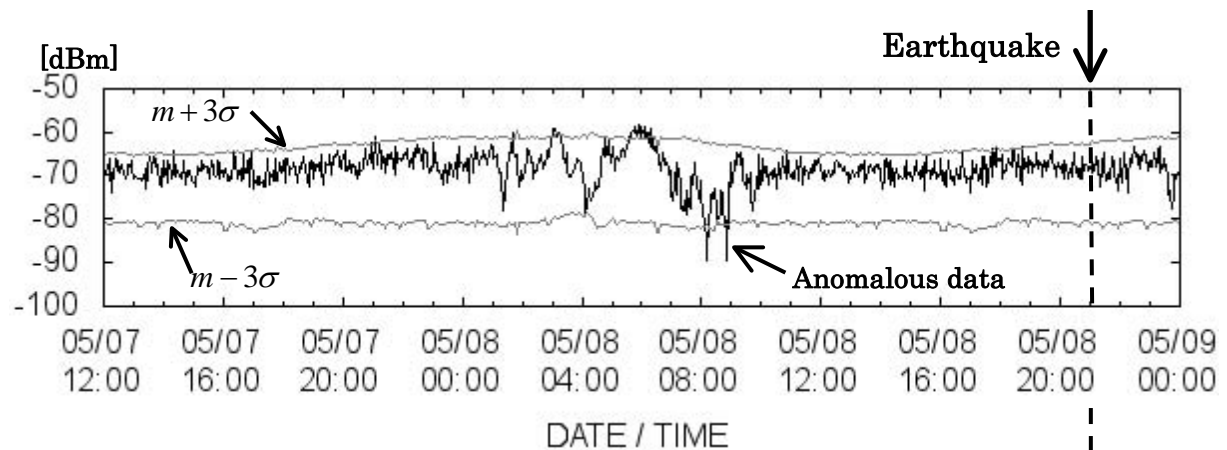
さらに、震央位置が海洋にある場合も、放射性ガスによる屈折率異常が生じにくいため、伝搬異常が発生しづらいのではないかと推測している。例えば、Table 6 中の 2007 年 8 月 16 日 04 時 15 分に発生した地震では、震央が海洋であったために伝搬異常が発生しなかつた可能性がある。

#### 4. 3 他の観測方法との比較および結果の差異

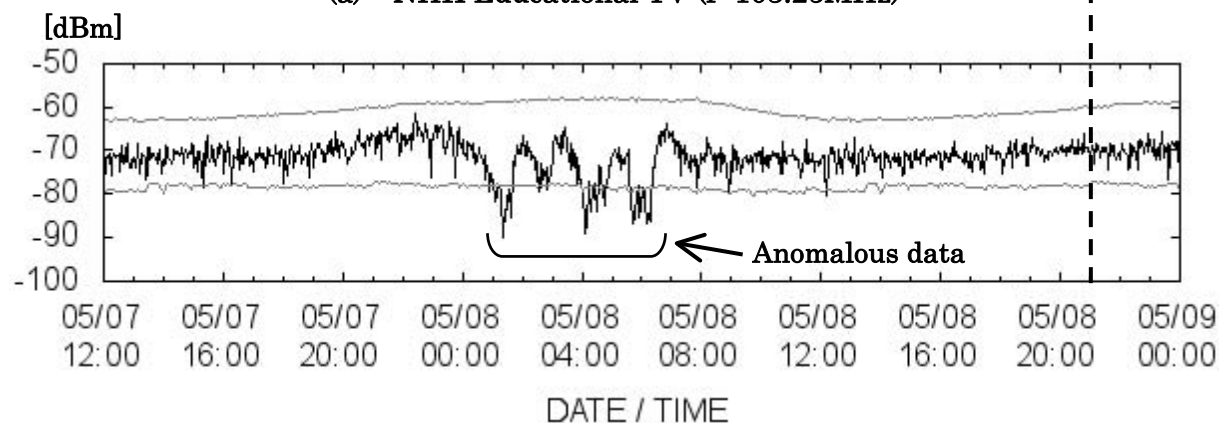
本論文の観測方法は、見通し内 VHF 帯放送波を常時受信している点の特徴である。同じ VHF 帯の伝搬でも他の観測法では、通常受信できない放送波が「受信できる」ことが伝搬異常の発生を意味するため、伝搬異常発生の判断が容易である。例えば、Moriya et al. (2010)

は、地震発生に先行して受信されるエコーの積算継続時間長に着目し、地震の規模・最大震度との関係式まで示している。この観測方法では、地震に伴う伝搬異常波の電界強度変化が急激であるため、地震と関連のない伝搬異常（スポラディックE層や雷雨）と判別しやすい。一方、本論文の観測法では、常時観測している受信電界強度が「統計的にまれな変動をする」現象を伝搬異常としている。そのため、長期間の観測データを統計処理して正常と異常を判別するしきい値を設定することで「伝搬異常」を判定している。しかし、前節で述べたように日常的に他の気象条件による影響も受けるため、地震と関連した伝搬異常であるのかを判定するのが難しい側面がある。

また本観測結果では、規模の大きい地震、震源が浅い地震ほど伝搬異常を伴う可能性が高くなっており、他の研究報告と一致する結果となっている。しかし本観測法における伝搬異常と地震との発生時刻間隔は、地震発生前 48 時間以内に確率が高くなっているのに対して、他の研究報告では 1-2 週間前から伝搬異常が観測されている。どちらも地震に先行して生じる地球規模の電磁気学的現象を捉えたものと思われるが、本観測法で捉えた伝搬異常の方が地震発生まで比較的短時間である。この発生時刻間隔の差違は、地震の前兆現象発生のメカニズムに関わっていると推測されるため、今後解明する必要がある。



(a) NHK Educational TV ( $f=103.25\text{MHz}$ )



(b) Fuji TV ( $f=193.25\text{MHz}$ )

Fig. 3 Anomalous propagation data on VHF TV broadcasting band (May 7-8, 2007).

Table 5 Relation between weather conditions and earthquakes associated with anomalous propagation.

Occurrence time of earthquake (JST)	Epicenter	Magnitude	Depth of hypocenter	Occurrence time of anomalous propagation (JST)	Direction and velocity of the wind
At 21:01 on May 08, 2007	Southern Ibaraki (36°03'N,139°53'E)	M4.5	46km	About 01:00 on May 08, 2007	NW 2.5m/s
At 13:36 and, at 16:55 on Aug. 18, 2007	Eastern Chiba (35°21'N,140°21'E) Southern Chiba (35°02'N,140°02'E)	M4.5 M5.2	24km 20km	About 22:00 on Aug. 16, 2007	WNW 2.2m/s
At 07:34 on May 01, 2008	East courts of Chiba (35°26'N,140°26'E)	M4.6	36km	About 05:00 on May 01, 2008	Calm 0.2m/s

Table 6 Relationship between weather conditions and earthquakes associated without anomalous propagation.

Occurrence time of earthquake (JST)	Epicenter	Magnitude	Depth of hypocenter	Maximum window velocity in nighttime (JST)	Remarks
At 14:43 on June 02, 2007	Southern Ibaraki (36°08'N,140°02'E)	M4.6	50km	SE 3.1m/s, at 20:00 on June 01, 2007	Weakly anomalous propagation before 19 hours.
At 04:15 on Aug. 16, 2007	Offshore from eastern Chiba (35°26'N,140°31'E)	M5.3	31km	ENE 4.0m/s, at 22:00 on Aug. 15, 2007	Epicenter in the sea
At 02:21 on Oct. 01, 2007	Western Kanagawa (35°13'N,139°07'E)	M4.9	14km	ENE 3.1m/s, at 01:00 on Sep. 29, 2007	
At 12:57 on Aug. 08, 2008	Eastern Kanagawa (35°37'N,139°32'E)	M4.6	30km	SSE 2.9m/s, at 20:00 on Aug. 07, 2008	Weakly anomalous propagation before 11 hours.
At 15:13 on Aug. 20, 2008	Southern Ibaraki (36°03'N,139°54'E)	M4.6	45km	ESE 4.2m/s, at 20:00 on Aug. 18, 2008	
At 04:54 on Feb. 17, 2009	Southern Chiba (35°16'N,140°13'E)	M4.6	31km	NW 8.7m/s, at 20:00 on Feb. 16, 2009	

## 5. むすび

本論文では、見通し内 VHF 帯放送波の伝搬異常に着目し、3 年以上の長期観測結果から、地震に先行して発生する伝搬異常について統計的に検証した。東京タワーを送信点とする VHF 帯テレビ放送波と FM 放送波を観測対象として、見通し内である群馬大学桐生キャンパスにおける受信電界強度を長期連続観測した。そして、受信データを統計処理することで伝搬異常を判別し、地震の規模、電波伝搬路—震央間距離、震央の深さをパラメータとして、伝搬異常と地震との関連性を統計的に考察した。その結果、(1) 規模がマグニチュード 4.5 以上、(2) 震央位置が電波伝搬路から 75km 以内の領域、(3) 震源の深さが 50km 以内、の 3 つの条件を満たす地震では、見通し内 VHF 帯伝搬異常を伴っていた可能性が高いことが判明した。また、見通し内 VHF 帯伝搬異常の発生時刻と地震発生時刻との間隔についても検討をおこなった結果、地震発生前 48 時間以内に伝搬異常が発生する頻度が高くなっていることが明らかとなった。見通し内 VHF 帯伝搬は電波伝搬路における気象条件の影響を受け易いが、特に日照や強風によって地表面近くの大気が攪拌されるような場合には、伝搬異常を生じにくいことも分かった。このことは、地震に伴う VHF 帯伝搬異常の原因が大気圏内に存在する可能性を示すものであり、電離層内の擾乱などによる影響ではないことを強く示唆する結果である。

本論文の観測方法は、従来の観測方法と異なる見通し内 VHF 帯伝搬を用いているため、伝搬異常が生じているエリアを精度良く特定できる可能性がある。更に、簡易な観測装置で構成されるため、面的な多点同時観測網を構築しやすい観測方法である。

本論文では、伝搬異常を伴う地震の条件を統計的に検証した。一方、伝搬異常を伴わなかった地震については、可能性として考えられる原因について考察した。しかし、伝搬異常が現れたにも関わらず、地震が発生しなかった観測例も存在する。そこで今後の課題は、見通し内 VHF 帯伝搬波の観測を継続することで地震と関連しない伝搬異常の原因を解明すること、他の地域の観測でも同様の結果が得られるかを検証すること、そしてレイトレース法などのシミュレーションによって大気の屈折率異常が見通し内 VHF 帯伝搬に及ぼす影響を検証すること、などが考えられる。

## 謝辞

Fig. 2 は、国土地理院発行の数値地図 200000 (地図画像) の地図データに基づくフリーソフトウェア「白地図 MapMap」による地図画像を編集した。また、Table 5-6 中の埼玉県熊谷市の気象観測データは、国土交通省気象庁の熊谷地方気象台の観測結果を利用した。

## References

- Fraser-Smith A. C., A. Bernardi, P. R. McGill, M. E. Ladd, R. A. Helliwell, and O. G. Villard, Jr., "Low-frequency magnetic field measurements near the epicenter of the Ms. 7.1 Loma Prieta earthquake," *Geophys. Res. Lett.*, vol.17, no.9, pp.1465-1468, 1990.
- Fujiwara H., M. Kamogara, M. Ikeda, J.Y. Liu, H. Sakata, Y.I. Chen, H. Ofuruton, S. Muramatsu, Y.J. Chuo, and Y.H. Ohtsuki, "Atmospheric anomalies observed during earthquake occurrences," *Geophys. Res. Lett.*, vol.31, L17110, 2004.
- Fukumoto Y., M. Hayakawa, and H. Yasuda, "Investigation of over-horizon VHF radio signals associated with earthquakes," *Natural Hazards Earth System Sci.*, vol.1, no.3, pp.107-112, 2001.
- Hayakawa M., R. Kawate, O. A. Molchanov, and K. Yumoto, "Results of ultra-low-frequency magnetic field measurements during the Guam earthquake of 8 August 1993," *Geophys. Res. Lett.*, vol.23, no.3, pp.241-244, 1996.

- Hayakawa M., O. A. Molchanov, T. Ondoh, and E. Kawai, "The precursory signature effect of the Kobe earthquake on VLF subionospheric signals," J. Comm. Res. Lab., Tokyo, vol.43, no.2, pp.169-180, 1996.
- Kushida Y., and R. Kushida, "Possibility of earthquake forecast by radio observations in the VHF band," J. Atmos. Electr., vol.22, pp.239-255, 2002.
- Molchanov O. A., and M. Hayakawa, "Subionospheric VLF signal perturbations possibly related to earthquakes," J. Geophys. Res., vol.103, no.A8, pp.17489-17504, 1998.
- Moriya T., T. Mogi, and M. Takada, "Anomalous pre-seismic transmission of VHF-band radio waves resulting from large earthquakes, and its statistical relationship to magnitude of impending earthquakes," Geophys. J. Int., vol.180, pp.858-870, 2010.
- Motojima K., "Precursors of earthquakes in the line-of-sight propagation on VHF band," J. Atmos. Electr., vol.29, no.2, pp.95-104, 2009.
- Yonaiguchi N., Y. Ida, and M. Hayakawa, "On the statistical correlation of over-horizon VHF signals with meteorological radio ducting and seismicity," J. Atmos. Solar-terr. Phys., vol.69, pp.661-674, 2007.
- 串田嘉男, "地震予報に挑む," PHP 新書, 2000 年出版.
- 早川正士, "地震電磁気現象の計測技術と研究動向," 信学論(B), vol.J89-B, no.7, pp.1036-1045, 2006.
- 本島邦行, 吉澤将一, "地震に先行して生じる VHF 帯放送波伝搬異常の統計的検討," 信学論(B), vol.J92-B, no.2, pp.497-501, 2009.
- 米内口直之, 増田茂, 伊田裕一, 早川正士, "宮城県沖地震に関連した VHF 帯電磁雑音のフラクタル解析," 信学技報, AP2007-116, pp.7-11, Dec. 2007.