Molchan's Error Diagram による
見通し内 VHF 帯放送波の伝搬異常と地震の関連性解析

小倉 佑哉¹, 本島 邦行¹

¹群馬大学大学院 理工学府

**Statistical relation between earthquakes and radiation dose increments
at the radiation monitoring post**

Yuya Ogura¹, Kuniyuki Motojima¹

¹Graduate School of Science and Technology, Gunma University, 1-5-1 Tenjin-cho, Kiryu, Gunma, 376-8515, Japan

Abstract. This paper was intended to find out any relation between anomalous line-of-sight propagation in the very high frequency (VHF) band wave and occurrences of earthquakes near the propagation paths. We found that the received power has seasonal variation in the VHF wave. Therefore, we calculated the threshold level for determining anomalies propagation by using observed data in immediate several weeks. Using the proposed calculation method, we can take into account the effect of seasonal variation. In addition, this paper estimated relation between earthquakes and anomalous line-of-sight propagation of VHF band wave with “Molchan’s Error Diagram”. Finally, we revealed that occurrences of earthquakes and anomalous propagation have a high relativity.

Keywords: short-term earthquake prediction, VHF band, line-of-sight propagation, integral analysis, Molchan’s Error Diagram

1. はじめに

日本は複数の海洋及び大陸プレートの境界上に位置することから、世界有数の地震大国である。東日本大震災をはじめ、熊本大震災等の大規模な地震が近年日本を襲い甚大な被害をもたらした。地震による被害を最小限に食い止める為には事前の対策が必要不可欠である。ゆえに地震予測の実現は重要な課題である。地震予測は時間区分の違いから「長期的予測」と「短期的予測」に大別される。「長期的予測」は数年或いは数十年以内に地震が発生する可能性を予測するものであり、地震発生時期の具体性に欠ける。一方「短期的予測」は数日単位レベルでの予測となる為、地震に対する危機管理意識が高まり事前の対策に対して有効かつ重要であると考えられる。

短期的予測として、電磁気学的現象と地震発生との関連性について数多くの結果が報告されている(早川, 2006)。電磁気学的現象を間接的に観測した例として、VLF帯とVHF帯における電波観測の報告がある。VLF帯における報告では、VLF帯の電磁波が電離層と大地を反射しながら伝搬する性質から電離層下部の擾乱を捉え、地震との関連付けを行っている

(Hayakawa et al., 1996; Molchanov and Hayakawa, 1998)。一方 VHF 帯における報告では、見通し外 VHF 帯電波伝搬を捉える事で地震との関連付けを行っている (Yonaiguchi et al., 2007)。また、著者らは見通し内 VHF 帯電波を観測し、その受信電力から統計的处理に基づいて伝搬異常と地震の関連性について検証を行っている (本島ほか, 2009; Motojima, 2009; 本島, 2011)。

本稿では解析期間内の見通し内 VHF 帯電波における平均受信電力を基準値とし、実測値と基準値間の差を積分することで伝搬異常を検出し、地震との関連付けを行った。従来法である 3σ 法(本島, 2011)やウェーブレット変換を用いた解析(樋口ほか, 2014)では過去数年間の観測データを基に伝搬異常判定に要する閾値を算出していた。しかし、本稿の積分解析では解析日直前における数日間の観測データを基に閾値を算出している。これにより、月毎の受信電力変動による影響を考慮できるほか、観測開始から短期間での解析を可能とした。

また伝搬異常と地震の関連性を示す評価方法に関して、過去に適中率と予知率及びそれらの相乗平均、確率利得を用いた報告 (谷川ほか, 2016)、Molchan's Error Diagram を用いた報告 (Peng Han, Katsumi Hattori, Jiancang Zhuang, Chieh-Hung Chen, Jann-Yenq Liu and Shuji Yoshida, 2017) がされている。ゆえにこれらの評価方法を適応し、本稿で取り扱う解析方法の有意性及び伝搬異常と地震の関連性を評価、検証した。

2. 観測データ

群馬大学桐生キャンパスでは様々な見通し内 VHF 帯放送波を観測対象とし、24 時間体制でその受信電力 (dBm) を計測している (本島ほか, 2009; Motojima, 2009; 本島, 2011)。

本稿で解析対象としたデータは、群馬大学桐生キャンパスで観測している見通し内 VHF 帯放送波である NHK FM 東京 (82.5 MHz) の受信電力とし、2012 年 4 月 24 日から 2017 年 4 月 23 日までの 5 年間 (1825 日間) を解析期間とした。またこの放送波では解析期間内に放送を休止する時間帯 (停波) が存在する為、その時間帯における観測データは解析対象外とした。さらに解析対象とした見通し内 VHF 帯放送波の受信電力は日変化を伴う。この影響を取り除く為、1 日を 5 分刻みに分割し、解析期間の全観測データ (5 年間) から 5 分間隔の平均値及び標準偏差を算出し、規格化したデータを解析に使用した。

3. 地震データ

伝搬異常と地震の関連性を評価する前に、どのような条件を含む地震が伝搬異常を引き起こすかを考える必要がある。そこで見通し内 VHF 帯放送波に影響を与える地震は、伝搬路近辺で発生したもので、かつ規模が大きいものであるという仮定のもと解析対象とする地震の判定方法について記述する。地震データに対して「マグニチュード M 」、「電波伝搬路から震央までの距離 L [km]」及び「震源までの深さ D [km]」の条件を設ける事で、解析対象とする地震を限定する。また「電波伝搬路から震央までの距離 L [km]」に対する伝搬路及び解析対象とする地震の震源域を図 1 に示す。

4. 見通し内 VHF 帯放送波の伝搬異常判定方法

本稿では解析期間内の平均受信電力を基準値とし、実測値と基準値間の差を積分した数値から伝搬異常の検出を行った。従来法である 3σ 法やウェーブレット変換を用いた解析では、過去数年間の観測データを基にある一定の閾値を算出している。ゆえに、月毎の受信電力変動による影響を考慮することが困難かつ長期間の観測データを必要とした。一方、本稿の積分解析では解析日直前における数日間の観測データを基に閾値を算出する為、月毎の受

Figure 1. VHF wave propagation path and epicenter region for consideration

信電力変動による影響の考慮、及び短期間の観測データのみでの解析を可能とした。ここで、観測データから伝搬異常の判定を行う手順について以下に記述する。

- 手順(1). 積分区間を設定する為のサンプリング数を N_s と定義し、観測データの初めから N_s 番目までのデータに対して実測値と基準値間の差を積分する。
- 手順(2). 積分区間を1データ分(約40秒)ずらし手順(1)同様、実測値と基準値間の差を積分する。(※群馬大学桐生キャンパスで観測している電波伝搬データの間隔は約40秒)
- 手順(3). 手順(1)及び手順(2)で求めた積分値が予め定めた閾値を超えた場合、その積分値を”異常値”と定義する。
- 手順(4). 複数の”異常値”が存在する場合、その間隔がいずれも5分以内であれば、それら全てを”連続な異常”とみなす。また”連続な異常”の時間長が60分以上であるものを”伝搬異常”と定義する。

5. 評価方法

本稿では伝搬異常と地震の関連性を統計的に評価するための評価値として、予知率(Prediction rate)と適中率(Hit rate)及びそれらの相乗平均(Geometric mean of Prediction rate and Hit rate)、警報期間(Alarm period)、警報分率(Alarm rate)、確率利得(Gain of probability)を使用する。

予知率とは「解析対象となる地震総数に対する伝搬異常により予知された地震数」の割合で、式(1)で示される。

$$\text{予知率} = \frac{\text{伝搬異常により予知された地震数}}{\text{解析対象となる地震総数}} \quad (1)$$

適中率とは「解析期間中の総警報時間に対する地震と関連した総警報時間」の割合で、式

(2)で示される。

$$\text{適中率} = \frac{\text{地震と関連した総警報時間}}{\text{解析期間中の総警報時間}} \quad (2)$$

そして、予知率と適中率の相乗平均は式(3)で示される。

$$\text{予知率と適中率の相乗平均} = \sqrt{\text{予知率} \times \text{適中率}} \quad (3)$$

ここで相乗平均を評価値として用いる理由について述べる。解析対象となる地震総数に対し解析期間中の総警報時間が極めて短い場合を仮定する。この時、全ての警報時間内に地震が発生していたとしても(=適中率:100%)予知できる地震数は極めて少ない為、予知率は低い値を示す。逆に解析対象となる地震総数に対し解析期間中の総警報時間が極めて長い場合を仮定する。この時、解析期間内全てに警報が出ていれば発生した地震全てを当てることが可能である(=予知率:100%)。しかし、地震と関連の無い警報時間が増加する為、適中率が極めて低い値を示す。ゆえにどちらか一方の評価値が優れていたとしても、関連性の低い結果となる為、本稿では互いの相乗平均をとり、それを評価値としている。

また警報期間(Alarm period)とは、4章で定義した伝搬異常の開始時刻から終了時刻に「関連付け期間長 t_{per} [days]」を加算した時間長のことである(図2)。ここで、“ $-t_{\text{per}}$ ”とは伝搬異常の終了時刻後に加算する関連付け期間長のことであり、地震発生前 t_{per} 以内に発生した伝搬異常が“関連あり”と判定するために定義された時間長である。

一方、“ $+t_{\text{per}}$ ”とは伝搬異常の開始時刻前に加算する関連付け期間長のことであり、地震発生後 t_{per} 以内に発生した伝搬異常が“関連あり”と判定するために定義された時間長である。例として $t_{\text{per}} = -3$ [days]とした場合、解析対象とする地震発生時刻の3日前から地震発生時刻までの間(Alarm period)に発生した伝搬異常が地震と関連したとみなす。本稿では短期地震予知を目的としている為、 $t_{\text{per}} = +1$ [days]から $t_{\text{per}} = +3$ [days]及び $t_{\text{per}} = -1$ [days]から $t_{\text{per}} = -3$ [days]として解析を行った。

警報分率とは「全解析時間に対する解析期間中の総警報時間」の割合で、式(4)で示される。

Figure 2. Alarm period and temporal relation between anomalous propagation and earthquakes

$$\text{警報分率} = \frac{\text{解析期間中の総警報時間}}{\text{全解析時間}} \quad (4)$$

さらに各評価値に基づいて Molchan's Error Diagram を導出し、伝搬異常と地震の関連性について評価を行った。

6. 解析データ（積分値）の月別変動

本稿で解析対象とした見通し内 VHF 帯放送波の受信電力は日変化を伴う。ゆえにその影響を取り除く為、規格化を行った（2章参照）。ここでは規格化後のデータから積分解析を用いて算出したデータを解析データとし、解析データの変動が月毎に異なるかを検証した。

(a) Integration with respect to larger data than mean

(b) Integration with respect to smaller data than mean

Figure 3. Monthly trend of observed data

解析データの月別変動を検証する理由として、4 章の伝搬異常判定に用いる閾値決めが関係している。ここで、解析データが月毎に変動しない場合は、全解析期間において同一の閾値から伝搬異常を判定すればよい。一方、解析データが月毎に変動する場合は、前者と同じく全解析期間において同一の閾値から伝搬異常を判定した場合、月毎の伝搬異常発生頻度に差が生じる可能性が考えられる。そこで本稿では伝搬異常と地震の関連性解析を行う前に、解析データの月別変動の有無を検証した。解析期間内の平均受信電力を基準値とし、基準値よりも高い電界強度を含む実測値と基準値の差を積分した解析データの月別変動を図 3(a)で、基準値よりも低い電界強度を含む実測値と基準値の差を積分した解析データの月別変動を図 3(b)で図示した。

図 3 の結果から解析データは冬季に高く、夏季に低くなる傾向にあると言える。通常、VHF 帯電波伝搬は冬季穏やかであり、夏季は活発となる傾向にある。上記の結果を踏まえると、冬季は平均受信電力よりも比較的高い受信電力が安定して観測され、夏季は受信電力の分散性が高いものの平均受信電力よりも比較的低い受信電力が観測されることが読み取れる。ゆえに全解析期間に対し同一の閾値から伝搬異常を判定した場合、月毎の伝搬異常発生頻度又は年毎の伝搬異常発生頻度に差が生じる可能性があると考えられる。従って年及び月毎の影響を考慮する為、解析対象日前 x 日間(x :任意)の解析データの平均値から閾値を選定することで伝搬異常判定を行うこととした。

7. 解析結果

本稿の解析で用いた解析期間、放送波、地震パラメータを以下に列記する。

(1).解析期間

2012 年 4 月 24 日から 2017 年 5 月 23 日(5 年間)

(2).放送波

NHK FM Tokyo_82.5MHz(送信所：東京スカイツリー)

(3).地震パラメータ

- ・マグニチュード $M \geq 4.0$
- ・電波伝搬路から震央までの距離 $L \leq 75$ [km]
- ・震源までの深さ $D \leq 75$ [km]

上記の条件をもとに 4 章で記載した解析方法を適用することで、伝搬異常と地震の関連性を検証した。また地震パラメータに関して、下記のパターンでも同様の解析を行ったが、上記の条件(3)が最も伝搬異常と地震との関連性を強く示した為、本稿ではその解析結果について記載した。さらに $t_{\text{per}} = -1$ [days] とした時の各評価値に基づいて導出した Molchan's Error Diagram を図 4(a)、 $t_{\text{per}} = -1$ [days] から $t_{\text{per}} = -3$ [days] とした時の Molchan's Error Diagram を図 4(b)、 $t_{\text{per}} = +1$ [days] から $t_{\text{per}} = +3$ [days] とした時の Molchan's Error Diagram を図 4(c)で図示した。

地震パラメータ

- ・ $M \geq 4.0$, $L \geq 75$ [km] , $D \geq 50$ [km]
- ・ $M \geq 4.0$, $L \geq 100$ [km] , $D \geq 50$ [km]
- ・ $M \geq 4.5$, $L \geq 75$ [km] , $D \geq 50$ [km]
- ・ $M \geq 4.5$, $L \geq 100$ [km] , $D \geq 50$ [km]

(a) Molchan's Error Diagram for $t_{\text{per}} = -1$

(b) Molchan's Error Diagram for $t_{\text{per}} = -1 \sim -3$

(c) Molchan's Error Diagram for $t_{\text{per}} = +1 \sim +3$

Figure 4. Molchan's Error Diagram

Molchan's Error Diagram は図 4 のように「警報分率(Alarm rate) τ 」に対する「予知率(Prediction rate) ν 」として表される。一般的に予知率は警報分率と共に増加し、ランダムな予測に対しては図 4 の対角線で図示される。さらに、ランダムな予測による予知率と伝搬異常に基づく予知率の比を確率利得 G_p (Gain of probability)と定義する。ここで各評価値に基づいた Molchan's Error Diagram における各線の導出方法について記述する。

(1).Random prediction (対角線)

図 4 における対角線のことであり、ランダムな予測に対して描かれる線である。この線よりも上に存在する予測は、予想される地震の割合が警報割合よりも大きいことを示しており、ランダムな予測より関連性が有ることを意味する。

(2).Prediction based on anomalous propagation (実線)

図 4 における実線のことであり、伝搬異常に基づいた予測に対して描かれる線である。また伝搬異常を決定付ける閾値を変化させることで伝搬異常発生と判定される頻度を変え、その時の警報分率及び予知率をプロットしたものである。

(3).95% confidence (破線)

図 4(a)における破線のことであり、信頼区間を表す線である。95%信頼区間とは 95%の信頼度という基準である区間を推定した場合、同じ条件で標本抽出を繰り返した際、全真値の 95%が含まれる区間を表している。本稿では、伝搬異常と地震が無関係という仮定のもとで 95%の信頼度という基準で推定した区間外(残り 5%)に含まれる標本は確率統計において偶然には起こりえないと判断する。よって図 4(a)の破線で示した 95%信頼区間を伝搬異常に基づいた予測線(図 4 の実線)が超えているものは伝搬異常と地震の関連性が極めて高い予測であると評価できる。

また 95%信頼区間を導出する方法について述べる。解析期間中に地震が N_{eq} 回発生したと仮定すると、警報時間中に発生する地震数は二項分布に従う。ゆえに解析期間中に地震が N_{eq} 回発生した場合の警報分率を τ とすると、警報時間中に n 回地震が発生する確率は式(5)となる。Molchan's Error Diagram では各警報分率に対して、 $\text{Bin}(n, \tau)$ の二項分布における確率式(5)を算出し、95%信頼区間を図示する。

$$P(n) = \binom{N_{eq}}{n} \tau^n (1 - \tau)^{N_{eq} - n} \quad (5)$$

図 4(a)より破線円内の予測が 95%信頼区間から最も離れており、伝搬異常と地震の関連性が極めて高いと考えられる。そこで $t_{per} = -1[\text{days}]$ から $t_{per} = -3[\text{days}]$ において、95%信頼区間から最も離れた条件(伝搬異常と地震との関連性を最も強く示す条件)に対する解析結果を表 1 に示した。さらに図 4(b),(c)から、正の関連付け期間長による解析ではランダムな予測に等しく、負の関連付け期間長による解析では 95%信頼区間を超える予測が存在する為、VHF 帯放送波において地震発生の数日前に伝搬異常が発生しやすいと考えられる。

表 1 より関連付け期間長の増加に伴い、95%信頼区間を超える予測に対する警報分率も増加していることから、予知率の増加、確率利得の減少に繋がったと考える。さらに地震発生の 1 日前に約 34%の確率で伝搬異常が発生し、発生した伝搬異常の約 11%が地震と関係があることが確認できた。また表 1 における条件では Molchan's Error Diagram の 95%信頼区間を超えることから、伝搬異常と地震の関連性は極めて高いと考えられる。

表 2 では関連付け期間長を $t_{per} = -1[\text{days}]$ とし、伝搬異常判定の基となる閾値決めに要する日数(x 日)を 5、10、15、20、25、30 日間と設定した際の各解析結果についてまとめた。表 2 より閾値決めに要する日数を 15 日間程度とした場合、最良の結果を得ることができた。

Table 1. Optimum analysis parameters for association between anomalous propagation and earthquakes

Station name	NHK FM Tokyo(82.5[MHz])		
Integral interval	2.5 [hour]		
Threshold level	8100	8100	8100
Duration time of anomalous propagation	60 [min]		
Earthquake magnitude (M)	$M \geq 4.0$		
Distance between wave propagation path and epicenters (L)	$L \leq 75$ [km]		
Dipth of hypocenters (D)	$D \leq 75$ [km]		
Period of analysis (T_{all})	1825 [days]		
Reference period for ditermining the threshold level (x)	20 [days]		
Defined length of time period associated anomaly with earthquakes (T_{per})	-1 [days]	-2 [days]	-3 [days]
Total alarm time	10558 [hour]	17204 [hour]	22589 [hour]
Alarm rate	0.241	0.393	0.516
Total relevant Alarm time	1179 [hour]	3490 [hour]	6418 [hour]
Number of earthquakes (N_{eq})	90		
Relevant earthquakes	31	51	61
Prediction rate	0.344	0.567	0.678
Hit rate	0.112	0.203	0.284
Geometric mean of Prediction rate and Hit rate	0.196	0.339	0.439
Probability Gain	1.43	1.44	1.31

Table 2. Analysis result by changing the number of days to determine the threshold

Station name	NHK FM Tokyo(82.5[MHz])					
Integral interval	2.5 [hour]					
Threshold level	7100	7900	8100	8100	8100	8100
Duration time of anomalous propagation	60 [min]					
Earthquake magnitude (M)	$M \geq 4.0$					
Distance between wave propagation path and epicenters (L)	$L \leq 75$ [km]					
Dipth of hypocenters (D)	$D \leq 75$ [km]					
Period of analysis (T_{all})	1825 [days]					
Reference period for ditermining the threshold level (x)	5 [days]	10 [days]	15 [days]	20 [days]	25 [days]	30 [days]
Defined length of time period associated anomaly	-1 [days]					
Total alarm time	13685 [hour]	11098 [hour]	10574 [hour]	10558 [hour]	10653 [hour]	10614 [hour]
Alarm rate	0.312	0.253	0.241	0.241	0.243	0.242
Total relevant Alarm time	1788 [hour]	1224 [hour]	1083 [hour]	1179 [hour]	1202 [hour]	1185 [hour]
Number of earthquakes (N_{eq})	92	91	90	90	88	88
Relevant earthquakes	40	32	31	31	30	30
Prediction rate	0.435	0.352	0.344	0.344	0.341	0.341
Hit rate	0.131	0.110	0.102	0.112	0.113	0.112
Geometric mean of Prediction rate and Hit rate	0.238	0.197	0.188	0.196	0.196	0.195
Probability Gain	1.39	1.39	1.43	1.43	1.40	1.41

さらにこの日数を縮める、または延ばす事で伝搬異常と地震の関連性が低くなる傾向にあることが確認できた。これは日数を縮める事によりデータ数の減少から不安定な解析となり、また日数を延ばす事で解析データの月別変動が反映されづらくなることが原因であると考え

8. むすび

本稿では Molchan's Error Diagram に基づき、見通し内 VHF 帯放送波の伝搬異常と地震の関連性について統計的に検証を行った。その際、解析期間内の平均受信電力を基準値とし、実測値と基準値間の差を積分することで伝搬異常の検出を行った。また、6 章 図 3 より見通し内 VHF 帯放送波の受信電力は年及び月ごとに変動する事が確認できた。そのため、解析対象日前 x 日間(x :任意)の解析データの平均値から閾値を定めることで伝搬異常の判定を行った。その結果、7 章 図 4 より Molchan's Error Diagram の 95%信頼区間を超える予測が存在することが確認でき、その条件での予測は伝搬異常と地震の関連性が極めて高いと考えられる。また表 1 で示した解析結果では、伝搬異常発生時刻から 1 日以内に 11% 程度の確率で地震が発生し、かつ解析期間中の対象地震の約 34%を予測したと言える。さらに表 2 では伝搬異常判定の基となる閾値決めに要する日数を変化させた時の各解析結果を表しており、閾値決めに要する日数を短期間(5 日間程度)或いは長期間(30 日程度)とした場合、予知率と適中率の相乗平均及び確率利得が下がる傾向が確認できた。この理由として前者ではデータ数の減少に伴い解析日より前の受信電力変動を考慮しきれず、また後者ではデータ数の増加に伴い解析データの月毎の影響が反映されていないことが考えられる。本稿の解析結果では閾値決めに要する日数を 10 日間から 20 日間程度とした場合、最適な結果を得る事ができた。ゆえに VHF 帯でも過去数日間の短期間データのみで伝搬異常の判定を行うことが可能である。またこれにより年及び月毎の影響を考慮する事も可能であると考えられる。

今後の課題として、VHF 帯の電波は大気の影響(季節要因など)を受けやすいため、新たに気象データを解析に取り込み、強風やラジオダクトといった気象現象と伝搬異常の関連性を明らかにすると共に、より信頼性の高い伝搬異常と地震の関連性を突き詰める必要があると考える。

謝辞

本研究で扱っている地震データは気象庁から拝借していることを付記し、関係各位に心より感謝致します。

References

- Dowden, R.L., Brundell, J.B.; Rodger, C.J., "VLF lightning location by time of group arrival (TOGA) at multiple sites," J. Atmos. Sol. Terr. Phys., vol. 64, pp.817–830, 2012.
- Hayakawa M., O.A. Molchanov, T. Ondoh, and E. Kawai, "The precursory signature effort of the Kobe earthquake on VLF subionospheric signals," J. Comm. Res. Lab., Tokyo, vol. 43, no. 2, pp. 169–180, 1996.
- 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.
- 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.
- Motojima K., and N. Haga, "Stochastic relation between anomalous propagation in the line-of-sight VHF band and occurrences of earthquakes," Natural Hazards and Earth Syst. Sci., vol. 14, no. 8, pp. 2119–2124, 2014.

- 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.
- Peng Han, Katsumi Hattori, Jiancang Zhuang, Chieh-Hung Chen, Jann-Yenq Liu and Shuji Yoshida, “Evaluation of ULF seismo-magnetic phenomena in Kakioka, Japan by using Molchan’s error diagram,” *Geophys. J. Int.*, vol. 208, pp. 482–490, 2017.
- 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.
- 本島邦行, “見通し内 VHF 帯伝搬異常と地震との統計的関連性,” *J. Atmos. Electr.*, vol. 31, no. 1, pp. 37–49, 2011.
- 大曾根暖, 小川潤也, 羽賀望, 本島邦行, “ラジオダクト及び見通し内 VHF 帯伝搬異常と地震との統計的関連性,” *J. Atmos. Electr.*, vol. 33, no. 2, pp. 115–125, 2013.
- 樋口友基, 羽賀望, 本島邦行, “連続ウェーブレット変換を用いた見通し内 VHF 帯伝搬異常と地震との統計的関連性,” *J. Atmos. Electr.*, vol. 34, no. 2, pp. 87–100, 2014.
- 南條利昂, 羽賀望, 本島邦行, 岩崎博之, “落雷と見通し内 VHF 帯伝搬異常の統計的関連性,” *J. Atmos. Electr.*, vol. 36, no. 1, pp. 23–38, 2016.
- 谷川 廣祐, 羽賀望, 本島邦行, “見通し内 VHF 帯放送波の伝搬異常と地震及び地表面平均風速の統計的関連性,” *J. Atmos. Electr.*, vol. 37, no. 1, pp. 11–24, 2017.

(Received June 7, 2018; accepted April 30, 2019)