

落雷と見通し内 VHF 帯伝搬異常の統計的関連性

南條 利昂¹, 羽賀 望¹, 本島 邦行¹, 岩崎 博之²

¹群馬大学大学院 理工学府

²群馬大学 教育学部

Statistical relation between lightning and anomalous propagation in the
line-of-sight VHF band

Toshitaka Nanjo¹, Nozomi Haga¹, Kuniyuki Motojima¹, Hiroyuki Iwasaki²

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

²Faculty of education, Gunma University, 4-2 Aramaki-cho, Maebashi 371-8510, Gunma, Japan

Abstract. In order to make a prediction of earthquakes, we have to find out any relationship between electromagnetic phenomena and earthquakes.

We have been observed VHF radio waves that propagate from line-of-sight region for several years. During the observation, we noticed some anomalous propagation associated with lightning storms on the VHF band. When strong lightning storms occur, the anomalous propagation sometimes appears on the VHF radio waves. To get more absolute relationship between anomalous propagation and earthquakes, the anomaly associated without earthquakes should be excluded from anomaly data. Therefore, we investigate the relationship between the anomalous propagation on VHF radio waves and occurrences of lightning storms by statistical original method. In this paper, using statistical estimation, we find out strong relationship between the anomalous propagation on the VHF band and occurrences of lightning storms near the wave propagation path.

Key words: short-term earthquake prediction, lightning, anomalous propagation, line-of-sight VHF band propagation

1. はじめに

日本は世界でも有数の地震大国であり、現在も地震の発生が多数確認されている。中でも、1995年に発生した阪神淡路大震災や、2011年に発生した東日本大震災等の大震災では、かけがえの無い命が奪われ甚大な被害をもたらした。このような被害を減らすために、地震対策は必須である。この地震対策の例として、地震を予知することが挙げられ、それにより予め対応ができれば、被害を抑えることができる。この地震予知は、長期的予知と短期的予知の2つに大別できる。これらのうち、長期的予知は年単位での予知であり、予知情報の具体性に欠け、人々が危機感を持ちにくい欠点がある。一方、短期的予知では、「日数単位の具体的な予知」が可能となり、長期的予知の欠点を克服することができる。この短期的地震予知の達成に向けて、電磁気学的現象と地震の関連性を示唆する観測結果が報告されている（早川, 2006）。また、地震発生に伴う電磁気学的な現象として、VLF帯やVHF帯電波を観測した報告もある。例として、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を利用し、電離層下部の擾乱を捉える方法がある（Hayakawa *et al.*, 1996; Molchanov and Hayakawa, 1998）。これは、地震発生前に電離層に何らかの異常が発生していることを示唆している。一方、VHF帯電波を用いた報告では、見通し外に到達した電波を異常伝搬とすることで地震の前兆現象として捉える方法がある（申田, 2000; Kushida and Kushida, 2002; Yonaiguchi *et al.*, 2007）。その他に、著者らは見通し内VHF帯電波を観測し、受信電力を統計処理することで異常伝搬を検出して地震と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）。しかしながら、これらの報告で扱った伝搬異常のうち、地震を伴わないものが存在することもわかってきた。これは、伝搬異常が地震と関連のない現象によっても発生することを示唆している。この地震以外の伝搬異常発生要因として、スプラディック E 層、大気屈折率異常などによるものが挙げられる。実際に FM 放送波を用いた見通し外電波伝搬と大気屈折率の関連性を述べている報告がある（吉田ほか, 2010; 小森ほか, 2013）。また、見通し内VHF帯伝搬異常とラジオダクトの関連性を統計的に検証した報告もある（大曾根ほか, 2013）。このように、地震以外の伝搬異常発生要因を明らかにしていくことが、地震予知をする上で必須である。

ところで筆者らは、様々な送信所から送信される見通し内VHF帯電波を長期間観測している。そして、観測データを元に地震を伴わない伝搬異常を調べた結果、落雷発生時に伝搬異常が発生している場合があることがわかってきた。

そこで本稿では、落雷に注目して伝搬異常との関連性を統計的に検証した。これは、落雷を伴う積乱雲に関連した大気現象も伝搬異常発生の要因となっている可能性があるためである。そして、その特徴を基に、本研究の最終目標である短期的地震予知において、落雷がノイズ源と思われる伝搬異常を除去できるかを考察する。

2. 電波伝搬観測システムと解析対象とする放送波、観測期間

本稿では、見通し内 VHF 帯伝搬異常と電波伝搬路近郊で発生する落雷の関連性を統計的に解析する。そこで、本研究室で独自に構築した見通し内 VHF 帯電波伝搬観測システムについて説明する。本観測システムは Fig. 1 に示す通り、複数本のアンテナ、アンテナ切替器、スペクトラムアナライザ、データ記録及び制御用パーソナルコンピュータで構成されている。複数本のアンテナは全て群馬大学桐生キャンパス（群馬県桐生市, 36°25'N, 139°20'E）屋上に設置してあり、ここが受信点となっている。アンテナ切替器は、観測対象の放送波によって最適なアンテナに自動で切り替えるために用いている。そして、スペクトラムアナライザにより取得した受信電力データをデータ記録及び制御用パーソナルコンピュータにより保存する。このパーソナルコンピュータにより作成した受信電力データのグラフを群馬大学のウェブサーバに自動でアップロードすることにより、インターネットを通してどこでも観測データを閲覧することができる。

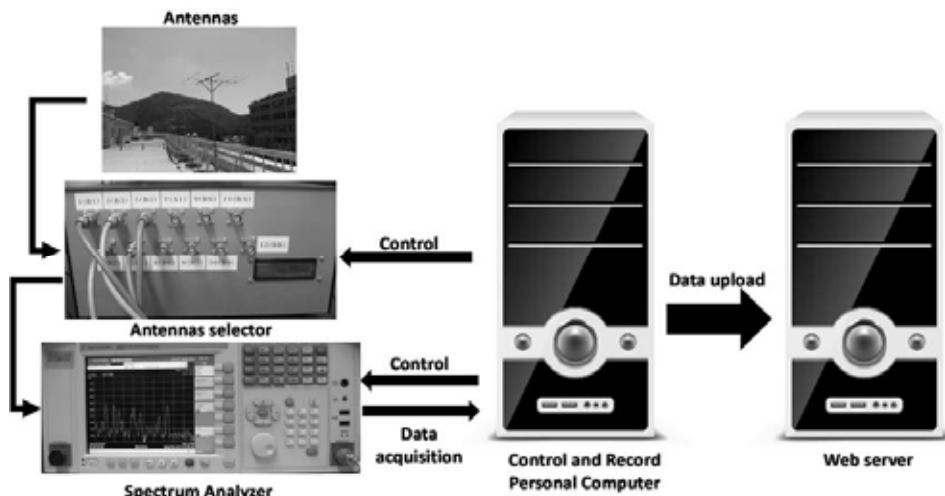


Fig. 1 Observation system.

本稿で解析対象とする放送波とその観測期間を Table 1 に示す。東京タワーを送信局とする FM Tokyo (80.0 MHz)の観測開始日は、アンテナ位置が変更された 2013 年 2 月 11 日としているため、観測期間が他の放送波に比べて短い。また、東京スカイツリーを送信局とする NHK FM Tokyo (82.5 MHz)の観測開始日は、放送が開始された 2012 年 04 月 23 日としているため、他の放送波と観測期間が異なっている。

Table 1 Broadcast stations and observation periods for analysis.

Broadcast station (frequency)	Observation period
FM Tokyo (80.0 MHz)	Feb. 11, 2013 to May 30, 2014 (11371 hours)
NHK FM Tokyo (82.5 MHz)	Apr. 23, 2012 to May 30, 2014 (18430 hours)
NHK FM Mito (83.2 MHz)	May 30, 2011 to May 30, 2014 (26304 hours)

本稿では、受信電力のデータに含まれるパルス性のノイズや短時間揺らぎを低減するために、受信電力の 10 分間の移動平均値を統計解析用データとして用いた。また、各放送波が停波している期間のデータは取り除いて解析を行った。

3. 伝搬異常判定方法

伝搬異常を判定する前に、観測期間中の受信電力データが正規分布に従っているか確認を行った。その結果、Table 1 に記載した各放送波の受信電力がほぼ正規分布に従っており、正規分布に基づく統計処理が可能であることが分かった。正規分布とは、移動平均をとった受信電力データを x 、平均値を μ' 、標準偏差を σ' とすると以下に示す式のような密度関数を持つ連続な確率分布のことをいう。

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma'} e^{-\frac{(x-\mu')^2}{2\sigma'^2}} \quad (3.1)$$

また、この受信電力は夜間に変動が激しく、日中は比較的安定しているなどの日変化を生じる。そこで、1 日を 5 分毎の時間帯に分けて、各々の時間帯別に平均値 μ と標準偏差 σ を求め、これらの値を基準に伝搬異常の判定を行うことで日変化の影響を低減した。本稿では、受信電力が $\mu + 2\sigma$ を上回った状態が 1 時間以上継続していた場合を伝搬異常として扱った。また、1 つの伝搬異常とその次に発生する伝搬異常の両者の間隔が 1 時間以内であった場合は、それらを 1 つの伝搬異常とした。この伝搬異常の判定方法を Table 1 の各放送波に対して適用した。各放送波に対する伝搬異常発生回数を Table 2 に示す。ここで、平均値 $\mu - 2\sigma$ を下回ったデータを伝搬異常データと判定しない理由は、落雷に関連した伝搬異常については $\mu - 2\sigma$ を下回るものは殆どなく、 $\mu + 2\sigma$ を上回るものが支配的であるためである。

Table 2 Broadcast stations and the number of anomalous propagation for analysis.

Broadcast station (frequency)	The number of anomalous propagation
FM Tokyo (80.0 MHz)	142
NHK FM Tokyo (82.5 MHz)	186
NHK FM Mito (83.2 MHz)	224

4. 落雷データと落雷群判定方法

本稿では、Washington 大学から提供された World Wide Lightning Location Network (WWLLN) の落雷データを使用した。この WWLLN は世界に存在する 60 を超える受信点から構成されており、対地落雷から放出された VLF 帯の電波を観測し、その到達時刻を基に落雷地点を計算している。その推定精度は±5km と評価されている。WWLLN の検出効率は全ての落雷に対しておよそ 11 パーセントであり、より強力な雷撃であるとその効率は 30 パーセント以上になる (Dowden *et al.*, 2002)。この落雷データは、幾つかの全球規模や日本周辺の落雷気候学に利用されている (Iwasaki, 2012; Virts, *et al.* 2013)。個々の稲妻の太さは数 cm と細く、継続時間も 1 秒未満なので、落雷に伴う大気電気的な変化が伝搬異常を引き起こすとは考え難く、より時空間スケールの大きな積乱雲に伴う何らかの大気現象が伝搬異常の原因と考える方が伝搬異常の継続時間を説明しやすい。また、積乱雲内部の強い上昇気流に伴い電荷分離が起き、その結果として落雷が発生するため、落雷は強い積乱雲活動の代表としても利用される。本稿では、落雷の集団 (以後、落雷群とよぶ) という考え方を導入することで、強い上昇気流が維持され続ける活発な積乱雲の集団を抽出することにした。

この落雷群であるかの判定は、落雷間の距離、落雷間の時間間隔、落雷数を考慮して行った。具体的には、落雷データを 3 時間分取り出し、そのデータの中で落雷間の距離が 5km 以下であるものを落雷のグループとした。そして、その落雷グループの中で落雷数が一番多いデータを落雷群データとして扱った。このようにして作成した落雷群を用いて解析を行う。ここで、Fig. 2 のように、伝搬路からの距離 L [km] がある一定値以下の落雷群を解析対象として扱った。具体的な距離の上限としては、 $L \leq 10$ km、 $L \leq 20$ km、...、 $L \leq 50$ km のように、いくつかの場合について検討を行った。

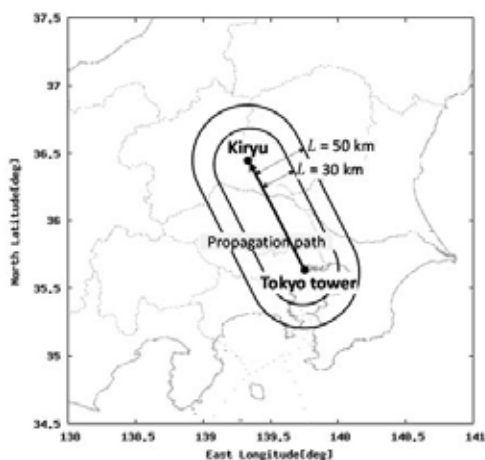


Fig. 2 Lightning range under consideration(L [km]).

5. 落雷と伝搬異常の関連性

本稿では確率利得 $G_p(t_{per})$ (Gain of probability) を評価指標として落雷と伝搬異常の関連性を考察する。確率利得は、「実際に落雷群が伝搬異常と併発する確率 (観測併発確率, $P_{obs}(t_{per})$ とする)」と、「落雷群が伝搬異常と関連性がないと仮定した場合にそれらと併発する確率 (無相関併発確率, $P_{unc}(t_{per})$ とする)」の比で表される (Motojima and Haga, 2014)。落雷群の活動中、もしくは落雷群の活動終了時刻を基準にし、そこからある一定の時間内に伝搬異常が発生している場合を併発していると見なす。そして、その併発が起こる確率のことを「落雷群が伝搬異常と併発する確率」という。また、落雷と伝搬異常が互いに無関係でも併発することがあるため、上述のように無相関併発確率を定義して、これと「落雷群が伝搬異常と併発する確率」との比をとることで、落雷と伝搬異常の関連性を考察することができる。以下に上記の観測併発確率 $P_{obs}(t_{per})$ 、無相関併発確率 $P_{unc}(t_{per})$ を算出するためのパラメータについて述べる。

まず、落雷群と伝搬異常を関連付けるために関連付け時間長 t_{per} [hours]を定義する。ここで、関連付け時間長とは「 t_{per} で定義された時間内に落雷群と伝搬異常の両方が発生した場合、落雷群が伝搬異常と併発した」と判断するための時間の尺度である。この関連付け時間長 $t_{per} < 0$ のとき、落雷群活動前に起こった伝搬異常を関連付けられる。 $t_{per} > 0$ の場合は、落雷群の活動が終了してから起こった伝搬異常を関連付けられる。また、落雷群活動中を $t_{per} = \text{middle}$ と定義することにより、落雷群の活動中に起こった伝搬異常を関連付けられる。

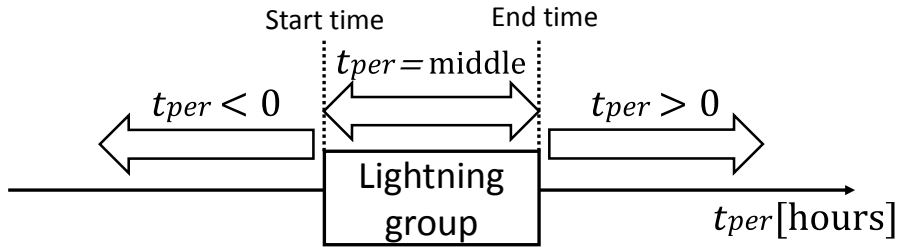


Fig. 3 Relation between the period of a lightning group and t_{per} .

落雷群の発生回数を $N_{lightning}$ 回、落雷群が伝搬異常と併発した回数を $N_{obs}(t_{per})$ 回とすると、観測併発確率 $P_{obs}(t_{per})$ は以下のように表される。

$$P_{obs}(t_{per}) = \frac{N_{obs}(t_{per})}{N_{lightning}} \quad (5.1)$$

次に無相関併発確率 $P_{unc}(t_{per})$ について述べる。始めに $t_{per} \neq \text{middle}$ 時の無相関併発確率について述べる。全観測期間を T_{all} [hours]とし、この期間内に伝搬異常 (N_{anom} とする) が1回だけ発生したときのことを考える。この伝搬異常が関連付け時間長 t_{per}

外で発生する確率を $\bar{P}_{unc}(t_{per}) \mid N_{anom}=1$ とすると、以下のように表される。

$$\bar{P}_{unc}(t_{per}) \mid N_{anom}=1 = \frac{T_{all} - t_{per}}{T_{all}} \quad (5.2)$$

同様に、観測期間内に伝搬異常が2回だけ発生したときのことを考える。この伝搬異常が関連付け時間長 t_{per} 外で発生する確率を $\bar{P}_{unc}(t_{per}) \mid N_{anom}=2$ とすると、以下のように表される。

$$\bar{P}_{unc}(t_{per}) \mid N_{anom}=2 = \left(\frac{T_{all} - t_{per}}{T_{all}}\right) \times \left(\frac{T_{all} - t_{per}}{T_{all}}\right) = \left(\frac{T_{all} - t_{per}}{T_{all}}\right)^2 \quad (5.3)$$

上記の考えを用いて、観測期間内に伝搬異常が N_{anom} 回発生したとする。このとき、伝搬異常が関連付け時間長 t_{per} 外で発生する確率を $\bar{P}_{unc}(t_{per}) \mid N_{anom}$ とすると、以下のように表される。

$$\bar{P}_{unc}(t_{per}) \mid N_{anom} = \left(\frac{T_{all} - t_{per}}{T_{all}}\right)^{N_{anom}} \quad (5.4)$$

無相関併発確率 $P_{unc}(t_{per})$ とは、関連付け時間長 t_{per} の間に落雷群と伝搬異常が無相関に併発する確率であるため $\bar{P}_{unc}(t_{per}) \mid N_{anom}$ の余事象となり、1から $\bar{P}_{unc}(t_{per}) \mid N_{anom}$ を引いた値になる。式で表すと以下ようになる。

$$P_{unc}(t_{per} \neq \text{middle}) = 1 - \left(\frac{T_{all} - t_{per}}{T_{all}}\right)^{N_{anom}} \quad (5.5)$$

同様に、落雷群活動中 ($t_{per} = \text{middle}$) について考える。落雷群活動中の関連付け時間長を各々の落雷群継続時間の平均値で代表させると、無相関併発確率は以下のように表される。

$$P_{unc}(t_{per} = \text{middle}) = 1 - \left(\frac{T_{all} - (\text{落雷群継続時間の平均値})}{T_{all}}\right)^{N_{anom}} \quad (5.6)$$

最後に、確率利得 $G_p(t_{per})$ は前述したように観測併発確率 $P_{obs}(t_{per})$ と無相関併発確率 $P_{unc}(t_{per})$ の比であるため、以下のように表される。

$$G_p(t_{per}) = \frac{P_{obs}(t_{per})}{P_{unc}(t_{per})} \quad (5.7)$$

落雷群と伝搬異常に相関があると仮定した場合の併発確率 $P_{obs}(t_{per})$ と、両者が互いに無相関であると仮定した場合に偶然に併発する確率 $P_{unc}(t_{per})$ の比をとることで、落雷群と伝搬異常の両者の関連性の度合いを知ることができる。確率利得の値が1に近いほど、つまり $P_{obs}(t_{per})$ と $P_{unc}(t_{per})$ の値が近いほど落雷群と伝搬異常は互いに無相関であるといえる。また、この $G_p(t_{per})$ の値が1より大きい値であるほど落雷群と伝搬異常は互いに関連性が高いといえる。

6. 解析結果

FM Tokyo (80.0 MHz)、NHK FM Mito (83.2 MHz)、NHK FM Tokyo (82.5 MHz) の放送波を用いて算出した確率利得のグラフを示し、落雷と伝搬異常の関連性を考察する。また、4章で述べたように、伝搬路との距離 L [km]が基準値 (10 km、20 km、...、50 km) 以下の範囲で生じた落雷群を解析対象とした。まず、東京タワーから送信される放送波を用いたときの確率利得算出結果を Fig. 4 に示す。また、Table 3 に、落雷群の数を伝搬路との距離の上限ごとに示す。

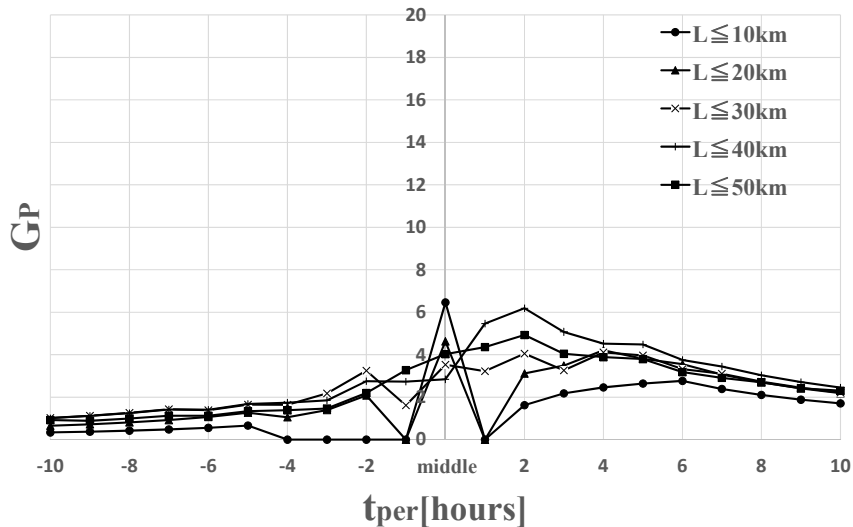


Fig. 4 Values of G_p (FM Tokyo).

Table 3 Number of lightning groups within several distances from the propagation path (FM Tokyo).

L [km]	$L \leq 10$ km	$L \leq 20$ km	$L \leq 30$ km	$L \leq 40$ km	$L \leq 50$ km
$N_{lightning}$	25	39	50	59	74

全ての L [km] の上限に対して、 $t_{per} = \text{middle}, 1, 2$ hours で確率利得の値が高くなっている。つまり、落雷群活動中、もしくは活動終了後に伝搬異常が引き起こされやすいことがわかる。また、落雷と伝搬路間の距離 L [km] の上限が短い場合、落雷群活動中の伝搬異常発生頻度が高くなり、逆に距離 L [km] の上限が長い場合、落雷群の活動終了後に伝搬異常の発生頻度が高くなる傾向が読み取れる。

落雷群と伝搬異常の関係を時系列で考察するため、2013年7月8日のデータを一例として取り上げる。まず、15時から17時までの間に伝搬異常と併発したものと判定された落雷群の位置を、時間帯ごとに Fig. 5 に示す。なお、ここで示しているのは伝搬

路までの距離が $L \leq 50$ kmの落雷の位置である。また、12時から23時までの期間の受信電力の推移を Fig. 6 に示す。

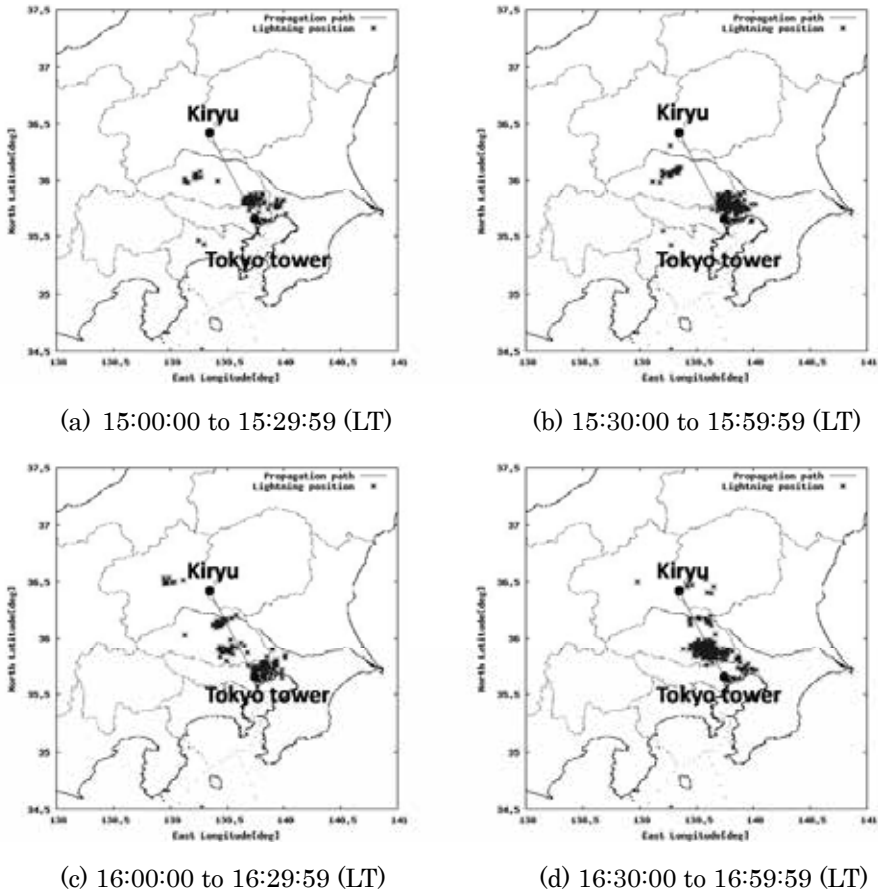


Fig. 5 Lightning positions near the propagation path (July 8, 2013).

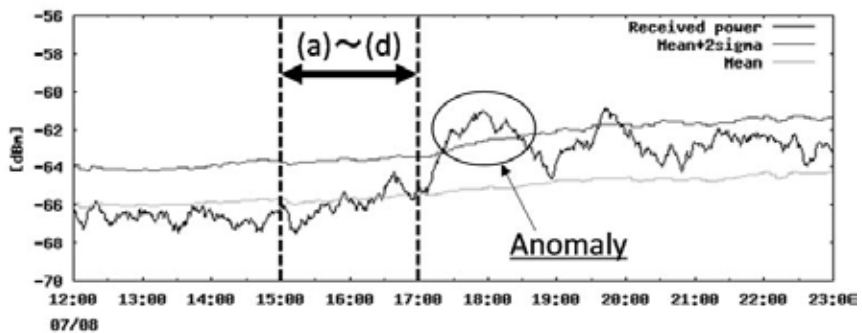


Fig. 6 Time variations of the received power (July 8, 2013, FM Tokyo).

この例では、15 時頃から落雷群が伝搬路付近に発生している。それに伴い、17 時頃から受信電力が上昇し、伝搬異常が発生している。この例では落雷群の活動中に伝搬異常が発生しており、落雷群発生に伴う伝搬異常の可能性が高い。

次に、茨城県燕山の放送波を用いたときの確率利得の算出結果を Fig. 7 に示す。また、Table 4 に、落雷群の数を伝搬路との距離の上限ごとに示す。

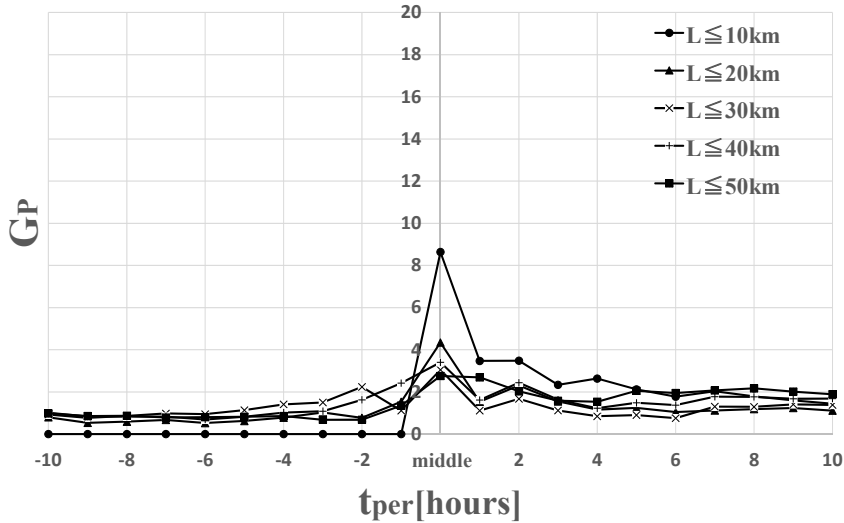


Fig. 7 Values of G_p (NHK FM Mito).

Table 4 Number of lightning groups within several distances from the propagation path (NHK FM Mito).

L [km]	$L \leq 10$ km	$L \leq 20$ km	$L \leq 30$ km	$L \leq 40$ km	$L \leq 50$ km
$N_{lightning}$	34	77	106	146	175

茨城県燕山の放送波を用いた場合、 $t_{per} = \text{middle hours}$ で確率利得の値が高くなっており、落雷と伝搬異常の関連性が高いことがわかる。特に、この傾向は $L \leq 10$ kmの落雷群に対して最も顕著に現れている。茨城県燕山の放送波を用いた場合、より伝搬路に近い落雷群が伝搬異常を引き起こしていると考えられる。

ここでも東京タワーの放送波を用いたときと同様に、Figs. 8, 9にそれぞれ示す落雷の位置と受信電力の時間推移を基に両者の関係を考察する。なお、ここでは2013年7月26日に伝搬路との距離が $L \leq 50$ kmで発生した落雷データを用いた。

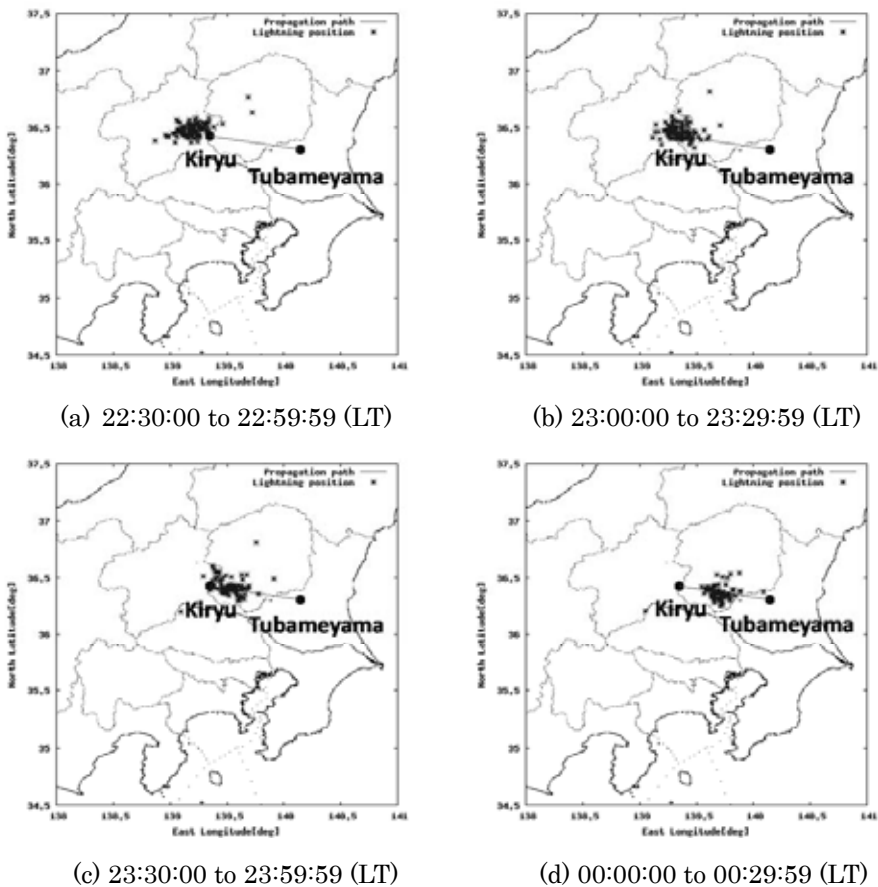


Fig. 8 Lightning positions near the propagation path (July 26–27, 2013).

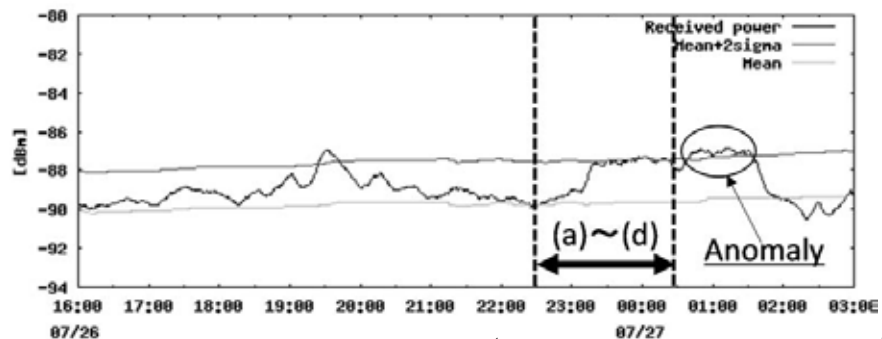


Fig. 9 Time variations of the received power (July 26–27, 2013, NHK FM Mito).

22:30 頃から群馬大学桐生キャンパスより西の方向において落雷群が発生しており、時間が経つにつれて伝搬路上を東に向かって通過している。それに伴い、23:30 頃から

受信電力が上がり、伝搬異常が発生していることがわかる。これも東京タワーの放送波を用いたときと同様、落雷群発生に伴う伝搬異常である可能性が高い。また、この例では 19:30 頃に伝搬異常が発生しているが、これは落雷群発生に伴う伝搬異常の可能性は低い。それは、落雷群発生に伴う伝搬異常は落雷群活動前には起こらないからである。

最後に、東京スカイツリーの放送波を用いたときの確率利得の算出結果を Fig. 10 に示す。また、Table 5 に、落雷群の数を伝搬路との距離の上限ごとに示す。

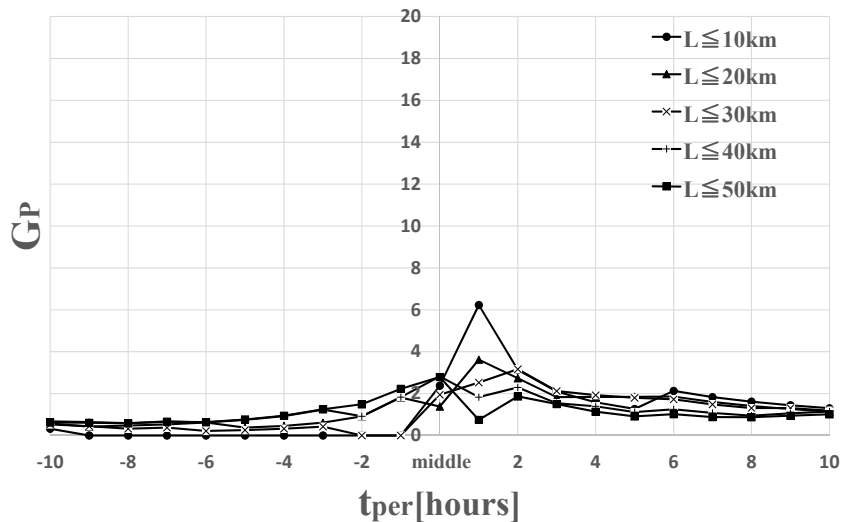


Fig. 10 Values of G_p (NHK FM Tokyo).

Table. 5 Number of lightning groups within several distances from the propagation path (NHK FM Tokyo).

L [km]	$L \leq 10$ km	$L \leq 20$ km	$L \leq 30$ km	$L \leq 40$ km	$L \leq 50$ km
$N_{lightning}$	32	55	79	109	134

落雷群と伝搬路の距離を $L \leq 10$ km に限定した場合以外では、落雷と伝搬異常の関連性は殆ど見られないが、 $L \leq 10$ km のときの $t_{per} = 1$ hour では確率利得の値が高くなっており、落雷と伝搬異常の関連性が高いことがわかる。東京スカイツリーの放送波では、茨城県燕山の放送波を用いたときと同様に、伝搬路に近い場所に発生する落雷群が伝搬異常を引き起こしている可能性が高い。

また、Figs. 11, 12 にそれぞれ示す落雷の位置と受信電力の時間推移を基に両者の関係を考察する。なお、ここでは 2012 年 5 月 28 日に伝搬路との距離が $L \leq 50$ km の落雷データを用いた。

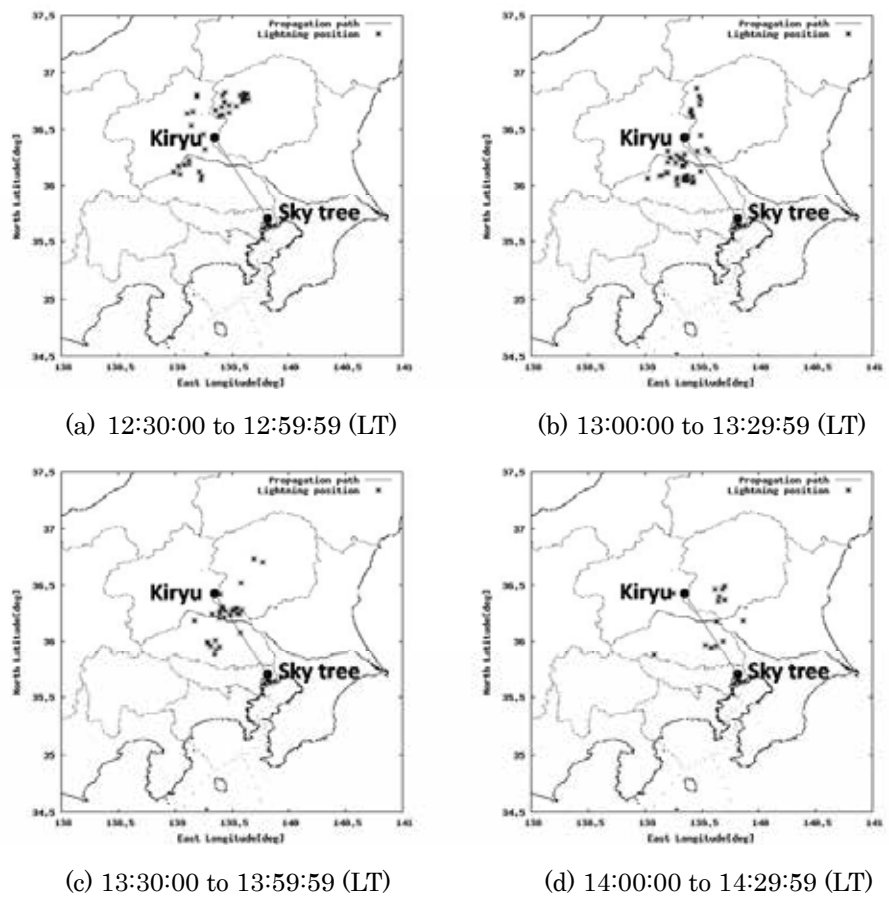


Fig. 11 Lightning positions near propagation path (May 28, 2012).

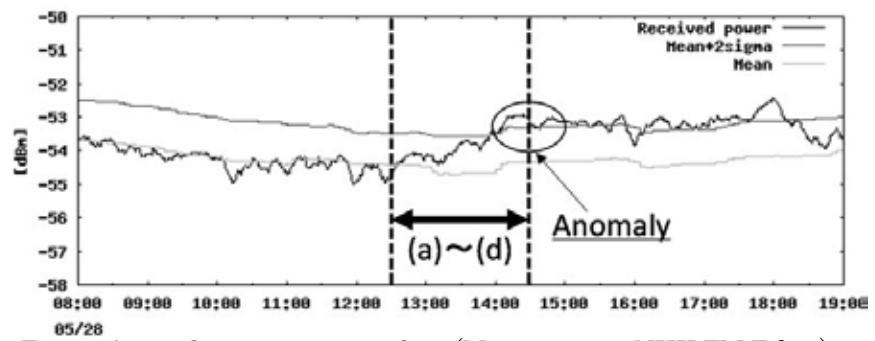


Fig. 12 Anomalous propagation data (May 28, 2012, NHK FM Tokyo).

この例では、12:30 頃から落雷群が発生し、時間が経つに従い伝搬路に近づいている。それに伴い、14 時頃から受信電力のデータが $\mu + 2\sigma$ を超えて伝搬異常が発生して

いる。これも Figs. 6, 9 と同様に、落雷群発生に伴う伝搬異常である可能性が高い。

7. むすびと考察

本稿では受信電力データを用い、落雷と伝搬異常の関連性について統計的に検証した。東京タワー (80.0 MHz)、茨城県燕山 (83.2 MHz)、東京スカイツリー (82.5 MHz) をそれぞれ送信点とする VHF 帯 FM 放送波を観測対象とし、受信点の群馬大学桐生キャンパスで取得した受信電力データを統計処理して伝搬異常を算出した。また、落雷データを落雷間の距離、落雷間の時間間隔、落雷数を考慮して落雷群として扱い解析を行った。そして、落雷群と各放送波で発生した伝搬異常の関連性について、確率利得 $G_p(t_{per})$ を評価指標として定量的に評価した。その結果、上記に示した 3 つの放送波全てで落雷群の活動中、もしくは活動後に伝搬異常が引き起こされやすいことがわかった。また、これは放送波や落雷と伝搬路の距離 L [km] の違いによって、落雷群活動中の伝搬異常発生頻度が高いか、落雷群の活動が終了してから伝搬異常発生頻度が高くなる傾向があるのかがわかった (Figs. 4, 7, 10)。この伝搬異常が発生する要因として、活発な積乱雲からの下降気流により作られた冷気外出流の存在が考えられる。地面付近に厚さ 200-300 m の厚さを持つ冷気が堆積することによりラジオダクトが発生し、伝搬異常が引き起こされた可能性がある。もし、この仮説が正しいならば、積乱雲活動の結果として伝搬異常が発生することになる。そして、ここで想定している地震の短期予測手法におけるリードタイムは、落雷と伝搬異常が併発するリードタイムよりも長い (Motojima, 2009; 本島, 2011)、落雷群を準実時間で監視していれば、地震の前兆現象としての伝搬異常と区別できる可能性が高い。しかし、伝搬異常の発生原因となっている現象が特定されておらず、まだ未検証の問題も多い。それらについては、今後解析を行うことで追求していく必要がある。

また、落雷と伝搬異常の関係を落雷の位置及び受信電力の時間推移をもとに考察を行った。これにより、落雷と伝搬異常の関連性がより明確になった。

今後の課題としては、どのような落雷群が伝搬異常を引き起こしているのか、落雷群の特徴を見出すことが挙げられる。その特徴を見つけ出すことが出来れば、落雷と伝搬異常の関連性がより明確になると考えられる。また、本稿で落雷と伝搬異常の間には関連性があることが判明した。そのため、落雷と関連のある伝搬異常を取り除いて地震と伝搬異常の解析を行うことで、地震と伝搬異常の関連性をより高いものにすることが今後の課題の 1 つとして挙げられる。

謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 2610382 と 26400463 の助成を受けた。また、本研究に用いた落雷データは、50 を越える大学や研究機関の協力により運営されている the World Wide Lightning Location Network (<http://wwlln.net>) より提供されたものであ

る。関係各位に心より感謝いたします。

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.
- Iwasaki H, “Preliminary Study on Features of Lightning Discharge around Japan Using World Wide Lightning Location Network Data,” *SOLA*, vol. 10, pp. 98–102, 2014.
- 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.
- 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.
- Virts KS, JM Wallace, ML Hutchins, RH Holzworth. 2013. Highlights of a new ground-based, hourly global lightning climatology. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 94: 1381-1391.
- 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.
- 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.
- 串田嘉男, “地震予報に挑む,” PHP 新書, 2000 年出版.
- 小森弘貴, 坪島知也, 西正博, 新浩一, 吉田彰顕, “FM 放送波を用いた地上デジタルオーバーリーチ伝搬特性の推定,” *J. Atmos. Electr.*, vol. 33, no. 1, pp. 1–8, 2013.
- 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.

吉田彰顕, 新浩一, 西正博, “見通し外 FM 放送波の伝搬特性と高層気象大気屈折率の関連,” J. Atmos. Electr., vol. 30, no. 2, pp. 83–94, 2010.

**(Received August 17 2015; revised January 18 2016;
accepted January 31 2016)**