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

吉田 彰顕 新 浩一 西 正博

広島市立大学大学院 情報科学研究科

Correlation between the aerological atmospheric refractivity and the received level of non-line-of-sight FM radio waves

Teruaki Yoshida, Koichi Shin, Masahiro Nishi

Graduate School of Information Sciences, Hiroshima City University,
3-4-1 Ozuka-higashi, Asa-minami-ku, Hiroshima 731-3194, JAPAN

Abstract. After the Hyogoken-nanbu earthquake in 1995, Kushida et al. reported that they had detected propagation anomalies of the non-line-of-sight FM radio wave of 77.1MHz broadcasted from Sendai. They hypothesized that the propagation anomalies were due to the ionospheric disturbances which might be affected by the earthquake. Then, non-line-of-sight FM radio waves have been observed to clarify the hypothesis at many electromagnetic observatories. We also started observation of non-line-of-sight FM radio waves with a dual frequency method from 1996. Now, more than 140 tuners have been operated at our twelve observatories in Japan. Our previous observation results suggested that propagation anomalies might be affected by meteorological conditions rather than by the ionospheric disturbances. It is highly required to investigate the propagation characteristics of non-line-of-sight FM radio waves and the meteorological data near propagation paths. So we have been observing non-line-of-sight FM radio waves at Kajigamori electromagnetic observatory in order to clarify correlation between the aerological atmospheric refractivity and the propagation characteristics of FM radio waves. The observed FM radio wave frequencies were 88.0MHz from Oita and 83.2MHz from Miyazaki. The observation period was for 3 years from January 2006 to December 2008. It was found from our observational results that the received levels of non-line-of-sight FM radio waves had seasonal variations in their fluctuations. The fluctuation levels in summer season were larger than those in winter. They were strongly correlated with the aerological atmospheric refractivity.

Key words: FM radio wave, Kajigamori, non-line-of-sight, propagation, aerological atmospheric refractivity

1. まえがき

1995年の兵庫県南部地震の際に、見通し外 FM 放送波 77.1MHz に異常伝搬があり、それは地震に伴う電離層擾乱との仮説がなされ、地震との相関が強いとの報告がなされた(Kushida and Kushida, 2002)。この報告を契機に、見通し外 FM 放送波と地震との関連についての観測が多くの研究機関で行われるようになった(Hayakawa and Molchanov, 2002)。筆者らも見通し外 FM 放送波と地震との関連に興味を抱き、1996年から二周波法(Yoshida et al., 2006)により見通

し外 FM 放送波の観測を開始した。現在広島市立大学を含め、全国 12 ヶ所に観測系を構築し、約 140 台の FM チューナーを用い、その受信レベル変動を昼夜連続で観測している。二周波法の採用により、観測データに現れる変化が FM 放送波を受信したものか、広帯域な電磁波を捉えたものか、それとも人工ノイズの影響なのかの識別を容易にした。また筆者らの観測チームが全国で運用している複数の異なる観測点のデータを同時に比較検討することで、その変化が観測点固有のローカルな現象なのか、それとも全ての観測点に現れるグローバルな現象なのかの識別を可能にした。その結果、地震に関連した電磁現象は、極めて微弱な現象であることがわかってきた (Yoshida et al., 2002)。特に複数年の観測を継続することで、見通し外 FM 放送波の受信レベルには、地震とは関連のない要因 (例えばダクト伝搬やマルチパスフェーディング) が引き起こすレベル変動 (Takahashi et al., 2006) があること、またその変動には地表の気温や湿度、風速との関連が強いことがわかってきた。

このような状況の中で、筆者らは、見通し外 FM 放送波の伝搬特性と地表の気象データとの関連を明らかにするため、地震火山活動の活発な伊豆諸島の新島山頂 (標高 435m) に観測系を設置し、東京、静岡、浜松からの FM 放送波の受信レベル変動特性を 3 年間にわたり観測した。その結果、見通し外 FM 放送波の受信レベル変動は、伝搬プロファイルに依存し、地表の気象データ (気温、湿度、風速) と強い相関があることを報告した (Higashi et al., 2009)。

本論文では新たに、見通し外 FM 放送波の伝搬特性と伝搬経路周辺の高層気象データとの関連について検証を試みる。2003 年 7 月に四国の梶が森山頂 (標高 1,400m) に、FM 放送受信機、アンテナなどの観測系を設置し、見通し外となる大分、宮崎からの FM 放送波の受信レベル変動の 3 年間連続で観測した。そして梶が森観測所で得られた見通し外 FM 放送波の受信レベル変動特性を、伝搬経路周辺の 4 箇所の高層気象データと比較し、その関連を調べた。以下、本論文では、最初に各 FM 放送波の伝搬経路、観測系の構成図を示し、次に 2006 年から 2008 年までの 3 年間の見通し外 FM 放送波の受信レベル変動を示す。さらに、受信レベル変動が最も顕著となった 1 ヶ月間について、より詳細に受信レベル変動と高層気象データとの比較考察を行う。

2. 観測方法

2.1. 見通し外 FM 放送波の伝搬プロフィール

Fig. 1 に、見通し外 FM 放送波の受信レベルを観測した梶が森観測所、および大分、宮崎の各放送局からの伝搬経路、高層気象データの観測所の位置関係を示す。また、Fig. 2 に各放送局から梶が森観測所までの伝搬プロファイルを等価地球半径係数 $k=4/3$ として示す。

FM 放送波の受信機、アンテナなどの観測系は、四国の梶が森山頂 (標高 1,400m) に設置した。梶が森観測所では、大分 (88.0MHz) 宮崎 (83.2MHz) の各放送局から送信される FM 放送波の受信レベル変動を昼夜連続で観測した。

Fig. 2 の伝搬プロファイルより、梶が森観測所と大分、宮崎の各放送局間の伝搬距離は、それぞれ 218km, 320km であり、かつ送受信間に見通しの無い「見通し外伝搬」となっていることがわかる。またその伝搬プロファイルより、大分からの FM 放送波 (88.0MHz) は、標高 500.9m から送信され、日向灘を海

Fig. 1. Locations of the FM radio stations and Kajigamori observatory.

上伝搬し四国西部で山岳回折し、梶が森観測所に伝搬し、宮崎からの FM 放送波 (83.2MHz) は、標高 1137.5m から送信され、同じく日向灘を海上传搬し四国南西部で山岳回折し、梶が森観測所に伝搬することがわかる。各放送局の諸元を Table 1 に示す。

2.2. FM 放送波の観測システム

Fig. 3 に観測に用いたシステムの構成図を示す。受信アンテナには、FM 放送受信用の 3 素子八木・宇田アンテナを用い、大地に対して水平に設置した。受信機には雑音指数 2dB の PLL 型 FM 受信機を用いた。また隣接チャネル干渉を軽減するため、受信機内部の IF フィルタを帯域幅 50kHz のセラミックフィルタに交換した。観測に先立って受信機の受信レベル(dBm)と検出電圧(mV)の校正を行い、約 -125dBm まで測定可能であることを確認した。また検出電圧(mV)から受信レベル(dBm)が求められるよう、信号発生器と電力計を用いてレベル校正を行った。なお FM 受信機の表示部の劣化防止と、受信機からのノイズ対策のため、受信機のデジタル表示部を消灯して観測を行った。

受信機とアンテナは同軸ケーブルを用いて接続した。受信機からの検出電圧(mV)は、AD コンバータを介し、アナログ値からデジタル値に変換し、サンプリング周期を 2 秒としてパーソナルコンピュータに記録した。記録された観測データはデジタル方式の携帯電話回線を経由し、広島市立大学に転送できる構成とした。なお本観測システムの時刻は、梶が森観測所屋上に設置した GPS から得られる時刻をもとに、観測データとともに記録した。また、停電時に備え、観測機器に給電する 100V 電源は無停電電源系とした。観測システムの諸元を Table 2 に示す。

受信機とアンテナは同軸ケーブルを用いて接続した。受信機からの検出電圧(mV)は、AD コンバータを介し、アナログ値からデジタル値に変換し、サンプリング周期を 2 秒としてパーソナルコンピュータに記録した。記録された観測データはデジタル方式の携帯電話回線を経由し、広島市立大学に転送できる構成とした。なお本観測システムの時刻は、梶が森観測所屋上に設置した GPS から得られる時刻をもとに、観測データとともに記録した。また、停電時に備え、観測機器に給電する 100V 電源は無停電電源系とした。観測システムの諸元を Table 2 に示す。

Table 1. Specifications of the FM radio stations.

	Station	Frequency	Power	Altitude	Longitude	Latitude
Oita	FM Oita	88.0 MHz	1 kW	500.9 m	131.26.34 E	33.19.48 N
Miyazaki	FM Miyazaki	83.2 MHz	1 kW	1,137.5 m	131.16.10 E	31.46.10 N

Fig. 3. Observation system configuration

Fig. 2. Propagation profiles from Oita and Miyazaki FM radio stations to Kajigamori observatory.

Table 2. Observation system specifications.

Receiving antenna	Yagi-Uda antenna
Observation band	FM radio frequency
Receiver	Synthesized FM tuner
Noise figure	2 dB
Receiving bandwidth (3dB)	50 kHz
Limitation of received level	-125 dBm
Sampling rate	2 sec.

3. 梶が森観測系における見通し外 FM 放送波の伝搬特性

梶が森観測系において大分および宮崎からの FM 放送波の受信レベル変動を実測した結果をそれぞれ Fig. 4, Fig. 5 に示す。これらの図には 2006 年, 2007 年, 2008 年の 3 年間に得られた観測データを示す。大分および宮崎からの FM 放送波の受信レベルは常に変動しており, 特に冬季に比べ春から秋にかけてその受信レベル変動が大きくなっていることがわかる。また, 得られた受信レベルをもとにその累積分布を求め, その結果をそれぞれ Fig. 6, Fig. 7 に示す。年毎に多少のばらつきはあるものの, 大分, 宮崎ともにその累積確率値の一桁変化に対応し, 受信レベル値が約 10dB 変化していることがわかる。このことから大分, 宮崎の 2 区間ともその受信レベルは, 典型的なレイリー分布に従って変動していることがわかった (Shibuya, 1974)。また, 大分, 宮崎の 2 区間についてその受信レベルのフェージングレンジ (累積確率の 10% 値と 90% 値の差) は, それぞれ 11dB, 16dB となり, 長距離かつ海上低層伝搬となった宮崎区間の方が約 5dB 大きな変動となった。次節ではこれら受信レベル変動の要因について考察する。

4. 見通し外 FM 放送波の受信レベル変動要因

4. 1 大気屈折率および修正屈折指数

見通し内の近距離電波伝搬特性および受信レベル変動要因については, VHF 帯からミリ波帯まで, 通信, 放送の両面からこれまで多くの優れた伝搬研究がなされてきた。その結果, 電波伝搬特性に最も大きな影響を与える要因は, 大気屈折率の空間的・時間的変化による電波屈折率であることが示された (Hall, 1996)。

大気屈折率 n の値は通常 1.0003 程度で, その変化は 10^{-5} から 10^{-6} のオーダーであり非常に小さい値である。そこで電波伝搬の研究分野では, その変化を明瞭にするため, 以下に定義する屈折指数 N (NU) が一般に広く用いられている (CCIR, 1992; Freeman, 1997)。

$$N \equiv (n-1) \times 10^6 \quad \dots\dots\dots(1)$$

N は気温・気圧・湿度の関数であり, 次式で与えられる。

$$N = \frac{77.6}{T} \left(P + \frac{4810 P_w}{T} \right) \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここで, T は気温 (K), P は大気圧 (hPa), P_w は水蒸気圧 (hPa) である。

さらに, 球面である地球表面での電波伝搬特性にスネルの法則が適用できるよう, 屈折率 n の代わりに次式に示すような修正屈折率 m , 修正屈折指数 M (MU) が多く用いられている (ITU, 1996)。

$$m \equiv n + h/a \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$M \equiv (n-1+h/a) \times 10^6 = N + h/a \times 10^6 = N + 157 h \quad \dots\dots\dots(4)$$

ここで, h は海拔高 (km), a は地球の半径で 6,370km である。

4. 2 見通し外 FM 放送波の受信レベル変動と修正屈折指数との比較

本論文の 3 節では, 3 年間の観測データをもとに, 大分および宮崎からの FM 放送波の梶が森における受信レベル変動は, 年間を通して変動しており, 特に冬季に比べ春から秋にかけてその受信レベル変動が大きくなっていることを示した。本節ではさらに, 1 ヶ月間の観測データをもとに, その変動をより詳細に考察する。

Fig. 4. Annual variations of received levels from Oita (2006~2008).

Fig. 6. Cumulative probabilities of received levels from Oita (2006~2008).

Fig. 5. Annual variations of received levels from Miyazaki (2006~2008).

Fig. 7. Cumulative probabilities of received levels from Miyazaki (2006~2008).

地震による影響を避けるため、伝搬区間およびその周辺において M5 以上の地震が発生しておらず、かつ大きなレベル変動が観測された 2008 年 5 月の 1 ヶ月間について、大分および宮崎からの FM 放送波の梶が森における受信レベルを 2 秒サンプルデータとして Fig. 8 に示す。両区間ともその受信レベルは 40dB~50dB の幅で変動していることがわかる。

さらにこのレベル変動をより詳細に調べるため、観測データをもとに中央値変動およびフェーディングレンジを求めた。中央値変動は、受信レベルの観測データより、1 時間毎の累積分布を求め、その 50% 値として表した。また、フェーディングレンジは、累積分布の 10% 値と 90% 値の差として求めた。得られた結果を大分区間、宮崎区間についてそれぞれ Fig. 9, Fig. 10 に示す。大分区間、宮崎区間について伝搬経路が異なるため、それぞれの変動幅や変動時刻には多少のずれはあるものの、中央値のみが変動している時、フェーディングレンジのみが変動している時、中央値とフェーディングレンジがともに変動している時、両者がともにほとんど変動していない時、などその変動特性には興味深い特徴がみえる。

これらの受信レベル変動特性が高層気象データとどのように関連するのか、伝搬区間に近い 4 箇所の気象台 (Fig. 1 参照) から 1 日 2 回 (9 時と 21 時) 公表されている高層気象データ (JMA, 2010) と比較する。2008 年 5 月の 1 ヶ月間について、鹿児島、福岡、米子、潮岬の各高層気象データから求めた修正屈折指数 M を Fig. 11, Fig. 12, Fig. 13, Fig. 14 にそれぞれ示す。

修正屈折指数 M は、4.1 節で述べた式 (4) からわかるように、海拔高に対して正比例の関係にあるが、各高度の気温、大気圧、水蒸気圧により変動し、大気屈折率に依存する。Fig. 11 ~ Fig. 14 に示した M 値 (M プロファイル) は、5 月 10 日の 9 時、21 時、24 日の

Fig. 8. Received levels of FM radio waves from Oita and Miyazaki (May 2008).

Fig. 9. Median levels and fading ranges of FM radio wave from Oita (May 2008).

Fig. 10. Median levels and fading ranges of FM radio wave from Miyazaki (May 2008).

Fig. 11. M profiles calculated by Kagoshima aerological data (May 2008).

Fig. 12. M profiles calculated by Fukuoka aerological data (May 2008).

Fig. 13. M profiles calculated by Yonago aerological data (May 2008).

Fig. 14. M profiles calculated by Shionomisaki aerological data (May 2008).

21 時では、高度に対してきれいな正比例の関係となっていることがわかる。この日時に対応する受信レベル変動を Fig.9, Fig.10 で確認すると、中央値変動、フェーディングレンジともに数 dB 程度の小さな値となり極めて安定な電波伝搬となっていることがわかる。

また、Fig.9, Fig.10 において、中央値、フェーディングレンジがともに大きな変動となった、5 月 22 日、23 日について、この日時に対応する Fig.11 の計算結果をみると、21 日の 21 時から 23 日の 9 時にかけて、M プロファイルは高度約 500m~1,300m において負の微係数となっていることがわかる。このように負の微係数となる状態では、その高度にダクトが形成されることが既によく知られている (ITU, 1996)。5 月 22 日、23 日に観測された受信レベル中央値の上昇は、この伝搬経路とほぼ同じ高度にダクトが形成され、送信された FM 放送波はあたかも導波管に閉じ込められたように受信点に到達し、レベル上昇したためと考えられる。

一方、5 月 11 日、12 日、15 日、16 日、および 30 日には、中央値変動は数 dB 程度と比較的小さな値となっているが、フェーディングレンジは 20dB 程度の大きな変動となった。この日時に対応する Fig.11~Fig.14 の M プロファイルをみると、負の微係数区間は高度約 1,300m~2,200m の領域に形成されていたことがわかる。この高度は、Fig.2 に示した伝搬プロファイルからもわかるように、観測した見通し外 FM 放送波の伝搬経路よりさらに上空となる。このため、この高度にダクトが形成されたとしても、受信レベルの中央値には大きな上昇はみられず、FM 放送波は最短経路波となる山岳回折波と伝搬経路上空のダクト波リークの 2 波による干渉性フェージングの影響を受け、2 波の位相変化に応じて、大きなレベル変動を生じたと考察される。

また、鹿児島地方気象台では、M プロファイルの異常は 21 日の 21 時からすでに観測されていたが、大分区間、宮崎区間ともに受信レベルの中央値の最大値は 5 月 22 日の 2 時前後、つまり 5 時間程度遅れて観測されていることがわかる。さらに、Fig.11 の鹿児島と Fig.14 の潮岬の M プロファイルを比較すると、例えば、鹿児島で 5 月 17 日の 9 時から始まり 18 日の 9 時に収束したダクトは、潮岬では 17 日の 21 時から見え始め 18 日の 21 時に収束し、約 12 時間の遅れが観測されている。また、同様に鹿児島で 5 月 26 日から始まり 27 日の 21 時に収束したダクトは、潮岬では 27 日の 9 時から顕著に見え始め 28 日の 21 時まで継続しており、同様に約 12 時間から 24 時間の遅れが観測されている。これは、一般に我が国の気象現象が、南西から北東にゆっくり移動する傾向とよく一致している。さらに、5 月 10 日、24 日の M プロファイルは、4 箇所ともきれいな直線となり、ダクトが形成されていないことがわかる。また、見通し外 FM 放送波の受信レベルが大きく変動した 5 月 21 日~23 日については、多少の時間差はあるものの、4 箇所の M プロファイルにも大きなダクト形成がうかがえる。このように、高層気象の影響する範囲は、多少の時間的なずれはあるものの、広域に広がっていることがわかる。

以上述べたように、見通し外 FM 放送波の受信レベル変動は、高層気象データと関連が深いことを確認することができた。

5. まとめ

見通し外 FM 放送波の受信レベル変動要因を解明するため、四国の梶が森山頂 (標高 1,400m) に FM 放送波の観測系を設置し、大分、宮崎からの見通し外 FM 放送波の受信レベル変動の観測を 3 年間行った。その結果、高層気象データから求められる大気屈折率の空間的・時間的变化と、見通し外 FM 放送波の受信レベル変動には大きな関連があることが確認できた。以下にその観測結果をまとめて示す。

- ・観測した大分、宮崎の 2 区間ともに、見通し外 FM 放送波の受信レベルは春から秋にかけて大きく変動した。
- ・その受信レベル変動は、受信レベル 10dB の変化に対して、その累積確率が一桁変化するレイリー分布に従った。
- ・見通し外 FM 放送波の受信レベル変動要因を解明するため、観測期間中、比較的大きな受信レベル変動となった、2008 年 5 月の 1 ヶ月間について、4 箇所の高層気象データから大

気の修正屈折指数を求め、見通し外 FM 放送波の受信レベル変動と比較した。その結果、次のように両者には強い関連があることを確認した。

- 修正屈折指数が高度に対して正比例となる場合、見通し外 FM 放送波はレベル変動の少ない安定な電波伝搬となる。
- 修正屈折指数が高度に対して負の微係数となる場合、その高度でダクトが形成され、ダクトの形成高度により、見通し外 FM 放送波の受信レベルは次の特徴を示す。
 - ◇ 見通し外 FM 放送波の伝搬経路とほぼ同じ高度にダクトが形成された場合、受信レベルは上昇し、レベル変動幅も大きくなる。
 - ◇ 見通し外 FM 放送波の伝搬経路の高度より上空にダクトが形成された場合、受信レベル上昇は生じにくく、干渉性フェージングによって大きなレベル変動を生じる。

本論文では、見通し外 FM 放送波の受信レベル変動はその伝搬区間周辺の高層気象データと関連が深いことを確認することができた。今日、見通し外 FM 放送波の観測から地震との関連を解明しようとする研究が各所で精力的に進められている。観測系に現れた変化が、地震によるものかそれとも地震とは関係のない要因によるものか、その時々気象データ、とりわけ伝搬経路の高度に相当する高層気象データとの比較検討が不可欠であると思われる。

謝辞

本論文では、大気の修正屈折指数を求める際、気象庁が公開している高層気象データを利用させていただいた。また、観測系の構築、観測系の運用は科学研究補助金により行われた。ここに謝意を表します。

参考文献

- Freeman, R. L., Radio System Design for Telecommunications, Chapter 1, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1997.
- Hall, M. P. M., Propagation of Radio Waves, Chapter 6, The Institution of Electrical Engineers, London, 1996.
- Hayakawa and Molchanov (eds), Seismo Electromagnetics: Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling, TERRAPUB, Tokyo, 2002.
- Higashi, T., K. Shin, M. Nishi, and T. Yoshida, Seasonal variations of over-horizon propagation characteristics of FM broadcasting waves, Journal of Atmospheric Electricity, 29, No. 2, 105-113, 2009.
- JMA, <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/upper/index.php>, 2010.
- ITU, Handbook on Radio Meteorology, Chapter 3 and 4, Geneva, 1996.
- Kushida, Y. and R. Kushida, Possibility of earthquake forecast by radio observation in the VHF band, Journal of Atmospheric Electricity, 22, No. 3, 239-255, 2002.
- Shibuya, S., The General Theory of Microwave Propagation, Chapter 4, Corona Publishing Co., Ltd., Tokyo, 1974 (in Japanese).
- Takahashi, S., M. Nishi, and T. Yoshida, Propagation characteristics of FM broadcasting waves at the Mid Niigata Prefecture earthquake, Proc. of Progress in Electromagnetics Research Symposium, 219-222, 2006.
- CCIR, The Radio Refractive Index: Its Formula and Refractivity Data, Rec. 453-3, RPN Series, Geneva, 1992.
- Yoshida, T. and M. Nishi, Observation of co-seismic electromagnetic phenomena in VHF associated with the Tottori-ken Seibu earthquake in 2000 and the Geiyo earthquake in 2001, Jishin, 55, No. 2, 107-118, 2002 (in Japanese).
- Yoshida, T., M. Nishi, and K. Mochizuki, Observation of seismic electromagnetic phenomena in VHF band by dual frequency method, Electrical Engineering in Japan, 155, No. 4, 36-44, 2006.