見通し外 FM 放送波 77.1MHz の 3 年間 3 区間における観測結果

西 正博 新原 英満 新 浩一 吉田 彰顕

広島市立大学大学院 情報科学研究科

**Observation results of non-line-of-sight 77.1 MHz FM radio waves
on three different paths for three years**

Masahiro Nishi, Hidemitsu Shinbara, Koichi Shin, and Teruaki Yoshida

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, it was reported that the propagation anomalies of the non-line-of-sight 77.1 MHz FM radio waves broadcasted from Sendai were detected. It was then hypothesized that the propagation anomalies were due to ionospheric or atmospheric disturbances. Since then, over-horizon FM radio waves have been observed to clarify the hypothesis at many electromagnetic (EM) observatories. Some of them were observed on one propagation path or in a period less than one year. Therefore, it is highly desired to deal with some more propagation paths and more data during several years. In this paper, we describe the observation method and results for the non-line-of-sight FM radio wave of 77.1 MHz broadcasted from Sendai to Nobeyama, Yokosuka, and Hitachi EM observatories. The observation period was for 3 years from January 2006 to December 2008. From the observation results, it was found that the received levels had seasonal variations in their fluctuations. The fluctuation levels in summer season were larger than those in winter. Comparing the received levels of the 77.1 MHz and the aerological atmospheric refractivity, it was also clarified that the received level fluctuations were mainly affected by the change of the aerological atmospheric refractivity. The cross correlation factors among received levels observed at the 3 sites depended on the propagation profiles. There were high correlations more than 0.6 between the received levels at Yokosuka and Hitachi, while there were low correlations less than 0.4 between the received levels at Yokosuka and Nobeyama. It was concluded that the non-line-of-sight 77.1 MHz FM radio waves were characterized by terrestrial propagations with atmospheric refractivity variations.

Key words: 77.1 MHz FM radio wave, non-line-of-sight propagation, different paths, aerological atmospheric refractivity, correlation factor

1. まえがき

1995 年 1 月 17 日に発生した兵庫県南部地震の際に、77.1MHz の見通し外 FM 放送波の伝搬特性に異常が検出され、地震との相関が強いことが報告された。この報告の中で、検出した前兆異常は、77.1MHz の周波数で仙台から放送される FM 放送波が、震央上空の電離層に影響されたものであるとの仮説がなされた(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注目が集まり、以来多くの研究機関で観測が行われるようになった (Hayakawa and Molchanov, 2002)。筆者らも提案された仮説に興味を抱き、1996 年から見通し外 FM 放送波の観測系の構築を開始し、現在広島市立大学の他、全国 12 箇所に観測系を構築し、FM 放送帯において 100 以上の周波数チャンネルについて、その受信レベル変動を昼夜連続で観測している (Yoshida et al., 2006)。

これまでも見通し外 FM 放送波の伝搬異常と地震との関連について、多くの報告がなされている。中でも、兵庫県南部地震の際にその前兆異常があったとされた見通し外 FM 放送波 77.1MHz の伝搬特性については、例えば、その異常伝搬はどこから届くのか、本当に電離層からの異常反射なのかという視点から、複数の仰角のアンテナからの受信レベル測定 (Fukumoto et al., 2001) や、気象による伝搬異常と地震との関連性を統計的手法により見出そうとする事例 (Takahashi et al., 2006; Yonaiguchi et al., 2007) など、多くの研究機関で観測がなされ、種々の議論が展開されている。

しかし、これまでの報告の多くは 1 つの観測区間での結果に基づく報告や、観測期間も 1 年以内の観測データをもとにした報告であり、地震が発生していない期間での検証や、複数区間との比較検討がなされておらず、その伝搬異常が地震によるものか、それとも通常の気象要因による伝搬変動なのか、必ずしも十分な考察に至っていない。

広島市立大学の観測チームは、複数区間複数年における伝搬特性の把握が変動要因の解明に重要と考え、野辺山、日立、横須賀の 3 区間にて、77.1MHz の見通し外 FM 放送波の長期連続観測を行っており、現在も継続中である。本論文では最初に、77.1MHz の FM 仙台放送局から、野辺山、横須賀、日立までの各観測区間の伝搬プロファイルを示し、次にこれら 3 区間で得られた 2006 年から 2008 年までの 3 年間の受信レベル変動の観測結果を報告する。そして高層気象データから得られる大気屈折率と受信レベル変動の比較を行い、またその受信レベル変動から区間相関係数を算出することにより、見通し外 FM 放送波 77.1MHz の伝搬特性を考察する。

2. 観測方法

2.1. 見通し外 FM 放送波の伝搬プロファイル

Fig. 1 に 77.1MHz 見通し外 FM 放送波の受信レベルを観測した野辺山、横須賀、日立観測所、および FM 仙台放送局から各観測所への伝搬経路を示す。また同じ 77.1MHz の放送波を送信する放送大学放送局と、高層気象データの館野観測所の位置関係もあわせて示す。Fig. 2 には FM 仙台放送局から各観測所までの 3 区間の伝搬プロファイルを等価地球半径係数 $K=4/3$ (標準伝搬) として示す。

各観測点では、2006 年から FM 仙台の放送波 (出力: 5kW) を長期連続観測しており、現在も継続中である。Fig. 1 に示すように、各観測点の位置関係は、FM 仙台放送局からみて、野辺山と横須賀が異なる方向でほぼ同じ距離、横須賀と日立がほぼ同じ方向で異なる距離となっている。また館野高層気象観測所は、気象庁の高層気象観測所の中でも、対象とするの伝搬経路から最も近傍に位置している。

Fig. 2 の伝搬プロファイルより、FM 仙台放送局と野辺山、横須賀、日立各観測所間の伝搬距離は、それぞれ 335km, 356km, 188km であり、か

Fig. 1. Locations of the FM Sendai station and Nobeyama, Yokosuka and Hitachi observatories.

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確認できる。また、FM 仙台放送局からの 77.1MHz 放送波の最短伝搬経路はそれぞれ、野辺山へは標高約 2,000 m の越後山脈で山岳回折し、横須賀へは標高約 500m の阿武隈高地にて山岳回折し関東平野上空を通過、日立へは同じく阿武隈高地を山岳回折することがわかる。FM 仙台放送局と各観測点の位置および標高データを Table 1 に示す。

Fig. 2. Propagation profiles from FM Sendai station to Nobeyama, Yokosuka, and Hitachi observatories.

2.2. 観測システムの構成

Fig. 3 に各観測点に設置した観測システムの基本構成図を示す。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。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、-125dBm まで測定可能であることを確認した。

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、サンプリング間隔を 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インターネットや ISDN 回線を経由し、各観測点から広島市立大学に転送でき、パーソナルコンピュータの遠隔操作も可能とした。なお本観測システムの時刻は、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。また送信源の確認のため、HDD に受信機の復調音を記録できる構成とした。観測システムの主な諸元を Table 2 に示す。

Table 1. Location and altitude of FM Sendai station and the EM observatories.

	Longitude	Latitude	Altitude
FM Sendai	140.52.20E	38.14.17N	231m
Nobeyama	138.28.42E	35.56.35N	1343m
Yokosuka	139.39.49E	35.13.31N	155m
Hitachi	140.38.36E	36.34.22N	35m

Fig. 3. Observation system configuration

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.

2.3. 各観測点における77.1MHzの受信環境

Fig. 4 に各観測点における 77.1MHz FM 放送波の受信環境の一例を示す。通常、野辺山、横須賀、日立それぞれの観測点では、FM 仙台と同じ周波数で送信されている東京からの放送大学の電波が受信される。しかしながら、放送大学の放送が停止する 0 時から 5 時までの間には放送大学の電波が受信されなくなり、FM 仙台の放送波を観測することが可能となる。Fig. 4 の例では、放送大学が 0 時から 5 時 30 分過ぎまで停止しており、さらにその中で FM 仙台が 2 時から 4 時 30 分過ぎまで停止している状況を示す。FM 仙台が停止するのは半年に 1 回程度の頻度である。この図から各観測点のローカルなノイズレベルは約 -120dBm であり、0 時から 5 時の間では FM 仙台を観測可能であることがわかる。また、復調音を聞くことでそれぞれの受信波が FM 仙台や放送大学の電波であることを確認した。本研究では、放送大学の放送が停止する 0 時から 5 時までを観測対象時間帯とした。以下の観測結果はすべて観測対象時間帯に得られたものである。

3. 見通し外 FM 放送波 77.1MHz の伝搬特性

3.1. 受信レベルの変動特性

野辺山、横須賀および日立観測点において、仙台からの 77.1MHz FM 放送波の受信レベル変動を 2006 年から 2008 年までの 3 年間実測した結果を Fig. 5 に示す。Fig. 5 より、各観測点共通に、冬季には安定する一方で、7 月から 9 月にかけての夏季には受信レベルは上昇し、そのレベル変動も大きくなるといった季節変動の傾向があることがわかる。各観測点における受信レベルは、冬季には野辺山で約 -120 dBm、横須賀で約 -115dBm、日立で約 -110dBm

Fig. 4. Observation example of 77.1 MHz FM broadcasting wave at Nobeyama, Yokosuka, and Hitachi observatories.

Fig. 5. Received levels of 77.1 MHz (FM Sendai) at Nobeyama, Yokosuka, and Hitachi observatories for 3 years from 2006 to 2008.

Fig. 6. Cumulative probabilities of received levels at Nobeyama observatory.

であり、また夏季には、野辺山で約 15dB, 横須賀で約 25dB, 日立で約 25dB のレベル上昇を確認できた。

上記の季節変動特性を定量的に示すため、本観測では各年の冬季(1月から3月), 夏季(7月から9月)に着目して、受信レベルの累積確率を求めた。Fig. 6, Fig. 7 および Fig. 8 にそれぞれ、野辺山, 横須賀, 日立における各年の冬季および夏季の受信レベル累積確率を示す。各図より、どの観測点においても冬季に比べ夏季の受信レベルが大きいことがわかる。また、野辺山における受信レベルの季節間の差は他の横須賀や日立の差に比べて小さいことがわかる。累積確率 10% 値で比較すると、冬季と夏季の受信レベル差は、野辺山では 5~7dB であり、横須賀や日立では 12~15dB であった。

Table 3 に各観測点における冬季および夏季の受信レベル変動幅を示す。なおここでは、受信レベル変動幅を受信レベルの累積確率 1% 値と 99% 値の差と定義した。Table 3 より、各観測点において冬季に比べて夏季の受信レベル変動幅が大きくなる傾向が確認できる。夏季の受信レベル変動幅は冬季と比較して、野辺山においては 1dB~5dB 程度、横須賀においては 14dB~18dB 程度、日立においては 10dB~14 dB 程度大きいことがわかった。野辺山においては、他の観測点と比較して、受信レベルは年間通して低く、かつ夏季のレベル上昇も小さくそれゆえ受信レベル変動も小さくなることがわかる。

3.2. 大気屈折率と伝搬特性の比較

前節に示した受信レベルの季節変動の要因として、これまでも議論されてきたように(Higashi et al., 2009), 気象条件の影響が支配的であることが考えられる。特に、電波伝搬に最も大きな影響を与える要因の一つとして、大気屈折率の空間的・時間的変化が示唆されており(Hall, 1996), 筆者らのこれまでの他観測点における見通し外 FM 放送波の伝搬データからも大気屈折率による伝搬への影響が大きいことを確認している(Yoshida et al., 2010)。本節では今回観測した 77.1MHz の見通し外 FM 放送波においても、大気屈折率と伝搬特性の比較を行った。

本論文では、大気屈折率変化の定量値として、従来から用いられている修正屈折指数 M

Fig. 7. Cumulative probabilities of received levels at Yokosuka observatory.

Fig. 8. Cumulative probabilities of received levels at Hitachi observatory.

Table 3. Fluctuation levels of the received levels in winter and summer seasons at Nobeyama, Yokosuka and Hitachi observatories for 3 years from 2006 to 2008.

	Nobeyama		Yokosuka		Hitachi	
	Winter	Summer	Winter	Summer	Winter	Summer
2006	9.5	10.9	8.9	26.8	14.5	25.3
2007	10.0	14.5	9.8	25.1	13.7	27.0
2008	11.9	14.1	8.4	22.8	16.1	27.7

[dB]

(MU)の高度変化である M プロファイルを求め、伝搬特性との比較に用いた。修正屈折指数 M は(1)式で与えられる。

$$M \equiv \left(n - 1 + \frac{h}{a} \right) \times 10^6 = N + \frac{h}{a} \times 10^6 = N + 157h \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 n は大気屈折率(通常 1.0003 程度)、 h は海拔高(km)、 a は地球の半径で 6,370km である。また N は屈折指数(NU)であり(2)式で与えられる。

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

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(CCIR, 1992; Freeman, 1997)。つまり M プロファイルを求める際には、気温、気圧および湿度等の高さ方向の気象データが必要となる。本研究では、気象庁の館野観測所にて得られた高層気象データ(JMA, 2010)を利用して、 M プロファイルを求めた。

冬季および夏季における受信レベル観測結果の一例として、Fig. 9 および Fig. 10 に各観測点にて得られた 2006 年 2 月および 2006 年 8 月の受信レベル変動を示す。各図は 1 日のうち 0 時から 5 時までの観測結果を 1 か月間示したものであり、この時間内で 77.1MHz の放送大学が停止せず FM 仙台が観測されなかった時間帯は除外して表示した。また、比較のために求めた 2006 年 2 月および 2006 年 8 月の M プロファイルを Fig. 11 および Fig. 12 にそれぞれ示す。各図の M プロファイルにおいては、横軸が修正屈折指数 M を表し、縦軸が海拔高 h を表す。

Fig. 9 と Fig. 10 より、各観測点での受信レベルは、冬季には安定しており、夏季には冬季に比べて上昇し大きく変動していることが確認できる。一方、Fig. 11 および Fig. 12 からは、冬季には M プロファイルが直線的な特性となった日がほとんどであり、夏季にはその直線的な関係が崩れる日が多かったことが確認できる。

Fig. 9. An example of received levels at Nobeyama, Yokosuka, Hitachi observatories in winter (Feb. 2006).

Fig. 10. An example of received levels at Nobeyama, Yokosuka, Hitachi observatories in summer (Aug. 2006).

Fig. 11. M profiles calculated by Tateno aerological data (Feb. 2006).

Fig. 12. M profiles calculated by Tateno aerological data (Aug. 2006).

一般に M プロファイルが直線的な場合には、伝搬環境が安定し、直線的でない場合には、大気屈折率の逆転層が形成され、ダクトに閉じ込められて電波の異常伝搬(ダクト伝搬)が生じることが知られている(ITU, 1996)。Fig. 9とFig. 10の受信レベルとFig. 11とFig. 12の M プロファイルを比較すると、冬季、夏季ともに M プロファイルが直線的な場合には受信レベルが安定し、直線的でない場合には受信レベルが変動している傾向があることがわかる。特に2006年8月の横須賀および日立においては、9日と10日に、通常より安定した受信レベルが観測されているが、その前後1週間には受信レベルの変動

がより大きくなっている。2006年8月の M プロファイルからは、9日と10日に直線的な関係となっていることが確認でき、他の日では大気屈折率の逆転層が形成されやすい状態となっていたことがわかる。これらの結果より、野辺山、横須賀、日立の3観測点にて受信するFM 仙台 77.1MHz の見通し外放送波は、高層気象の影響を大きく受けて伝搬していることが推測できる。

また我々は詳細にFig. 11とFig. 12の M プロファイルを観察し、夏季と冬季の M プロファイルの傾きに差があることに気が付いた。本研究では、 $\alpha_M = \Delta M / \Delta h$ (MU/km)を高さ方向の M プロファイルの傾きと定義して、各時間の M プロファイルのデータから最小2乗法にて直線近似し、その傾きとして α_M を求めた。Fig. 11とFig. 12の M プロファイルから各月における α_M の平均を求めると、2006年2月は122.6MU/km、8月は111.5MU/kmとなった。これらの値は(3)式を用いて等価地球半径係数 K に換算することができ(Shinji, 1992)、それぞれ1.28および1.41となる。

$$K = \frac{10^6}{\alpha \alpha_M} \dots\dots\dots (3)$$

等価地球半径係数が増加することは、大気による電波の屈折が大きくなることを意味し、伝搬経路上に存在する山岳の標高が等価的に低くなることである。よって冬季に比べて夏季に受信レベルが大きくなる理由が以下のように考察できる。冬季は、大気による電波の屈折が小さく、FM 仙台の放送波は山岳回折損失が大きく、伝搬しにくい環境となる。一方夏季は、電波の屈折が大きく、山岳回折損失が少ないため、伝搬しやすい環境となる可能性が高いと考えられる。

これらの考察を検証するため、館野の高層気象観測データから M プロファイルの傾き α_M の月毎の平均を求め、2006年から2008年までの3年間についてまとめたものをFig. 13に示す。またFig. 13には α_M から算出される等価地球半径係数 K もあわせて示した。Fig. 13より α_M は1年周期で変動しており、冬季に約125MU/km、夏季に約110MU/kmとなることがわかる。また、Fig. 5に示した受信レベルの季節変動と比較してもわかるように、 α_M が小さくなれば受信レベルが大きくなり、 α_M が大きくなれば受信レベルが小さくなるといった傾向も確認できる。

以上の結果より、各観測点の夏季における受信レベルの上昇の要因は、大気による電波の屈折が大きくなることにより山岳回折損失が減少したためであると考えられる。

Fig. 13. Annual variation of gradient of M profile α_M and effective earth radius factor K from 2006 to 2008.

3.3. 受信レベルの区間相関特性

本観測では、77.1MHz 見通し外 FM 放送波の 3 区間での同時観測を行ったことにより、3 区間の受信レベル変動特性の相互相関(以下、区間相関と呼ぶ)を検証することが可能となった。以下の手法により、野辺山、横須賀、日立における受信レベル変動の区間相関をそれぞれ求め、受信レベルの変動特性を検討した。

- 各観測点、1 か月における受信レベルデータ(2 秒サンプル)の 1 時間ごとの中央値を算出。
- 各観測点間の受信レベル中央値の区間相関係数 ρ を 1 か月ごとに算出。
- 各観測点間の区間相関係数 ρ の 3 年間の変動特性を定量評価。

Fig. 14 に、一例として、Fig. 10 に示した 2006 年 8 月の受信レベルから 1 時間ごとの中央値を求めた結果を示す。Fig. 14 より、野辺山-横須賀間、野辺山-日立間に比べて、横須賀-日立間においては受信レベルが同様に変動しており、区間相関が高いことを確認できる。それぞれの区間相関係数を算出した結果、野辺山-横須賀間では 0.29、野辺山-日立間では 0.39、横須賀-日立間では 0.80 となった。

各月受信レベルデータから区間相関係数を求め、2006 年から 2008 年までの 3 年間の区間相関係数をプロットした結果を Fig. 15 に示す。Fig. 15 より、3 年間を通じて、横須賀-日立間の区間相関は、野辺山-横須賀間、野辺山-日立間の区間相関に比べて高いことがわかる。また横須賀-日立間の区間相関が、1 月から 3 月の冬季に低くなることが確認できるが、この要因としては、冬季には伝搬環境が安定しやすく、各区間において受信レベルがほとんど変動しないためであると考えられる。Table 4 に、各観測点間における 3 年間の区間相関係数のうち、0.6 以上となる月、0.4 以下となる月を調べ、それぞれの生じる確率を求めた結果を示す。横須賀-日立間の区間相関係数が 0.6 以上となった確率は全体の 69.4%であったのに対し、野辺山-横須賀間、野辺山-日立間の区間相関係数が 0.4 以下となった確率はそれぞれ全体の 77.8%、86.1%であった。横須賀-日立間の区間相関が高くなった要因は、Fig.2 からわかるように横須賀と日立の観測点において、FM 仙台からの放送波の伝搬経路がともに阿武隈高地上空となるた

Fig. 14. Median values of received levels at Nobeyama, Yokosuka and Hitachi observatories (Aug. 2006).

Fig. 15. Cross correlation factors in mean values of received levels for 3 years from 2006 to 2008.

Table 4. Percentages of cross correlation factor more than 0.6 and less than 0.4.

	$\rho \leq 0.4$	$\rho \geq 0.6$
Nobeyama-Yokosuka	77.8 %	2.8 %
Nobeyama-Hitachi	86.1 %	0.0 %
Yokosuka-Hitachi	16.7 %	69.4 %

めであると考えられる。一方、伝搬距離がほぼ同距離であるにもかかわらず、野辺山ー横須賀間の区間相関が低くなった要因は、野辺山において、FM 仙台からの放送波は標高 2,000m 級の越後山脈を越えて到来しており、阿武隈高地とは標高の異なる伝搬経路を通過するため、横須賀への伝搬に比べて野辺山への伝搬において山岳回折による減衰が大きくなったためであると考えられる。仮に、FM 仙台からの放送波が電離層反射して伝搬してくると仮定すると、ほぼ同距離である野辺山と横須賀の区間相関は高くなるはずである。しかしながら、野辺山ー横須賀間の区間相関が低いという観測結果を得た。よって今回観測された FM 仙台からの放送波は電離層反射によるものではないといえる。

3.2 節に示した受信レベル変動の季節変動の考察、および本節で示した区間相関特性の検討結果より、FM 仙台からの放送波の伝搬は、大気屈折率の影響を受けやすい対流圏伝搬が支配的であることが明らかとなった。

4. まとめ

兵庫県南部地震の際に、77.1MHz の見通し外 FM 放送波の伝搬特性に異常が検出されたことから、見通し外 FM 放送波と地震との関連に注目が集まり、以来多くの研究機関で観測が行われるようになった。筆者らも 1996 年から提案された仮説に興味を抱き、観測を行ってきたが、観測すればするほど、地震とは関係の無い通常の気象変動との相関が強いことに気付かされた。そこで見通し外 FM 放送波の伝搬特性を複眼的に評価できるよう、同じ FM 仙台の 77.1MHz 放送波を異なる 3 地点(野辺山、横須賀、日立)において連続観測を行った。

本論文は、77.1MHz の見通し外 FM 放送波の受信レベル変動の要因を明らかにすることを目的として、3 年間 3 区間の観測結果に基づき、高層気象データから得られる大気屈折率と受信レベル変動を比較し、またその受信レベル変動から区間相関係数を算出することにより、見通し外 FM 放送波 77.1MHz の伝搬特性の考察を行った。得られた結論は次の通りである。

- ・見通し外 FM 放送波 77.1MHz の受信レベル変動は、野辺山、横須賀、日立すべての観測点で日常的に観測された。また受信レベル変動幅は夏季に大きく、冬季に小さくなるという季節変動特性を生じる。
- ・見通し外 FM 放送波 77.1MHz の伝搬特性は大気屈折率変化の影響を受けており、*M*プロファイルが直線的な場合受信レベルは安定し、直線的でなく大気屈折率の逆転層が生じた場合受信レベルは変動することを確認した。
- ・受信レベルが夏季に上昇する要因は、冬季に比べて夏季に *M*プロファイルの高さ方向の傾きが小さくなる、つまり大気による電波の屈折が大きくなることにより、等価的に山岳回折損失が減少するためであることがわかった。
- ・受信レベル変動幅の区間相関については、区間距離が異なるものの、その伝搬損失要因がともに阿武隈高地となる横須賀ー日立間において最大となった。また、区間距離がほぼ等しいものの、それぞれ越後山脈および阿武隈高地と伝搬経路が異なる野辺山ー横須賀間において最小となった。
- ・これらの結果より、77.1MHz の見通し外 FM 放送波は、電離層反射よりもむしろ、山岳回折を含む、大気屈折率の影響を受けやすい対流圏伝搬が支配的であることを明らかにした。

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館野観測点におけ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

- CCIR, The Radio Refractive Index: Its Formula and Refractivity Data, Rec. 453-3, RPN Series, Geneva, 1992.
- Freeman, R. L., Radio System Design for Telecommunications, Chapter 1, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1997.
- Fukumoto, Y., M. Hayakawa and H. Yasuda, Investigation of over-horizon VHF radio signals associated with earthquakes, Natural Hazards and Earth System Sciences, vol. 1, pp.107-112, 2001.
- Hall, M. P. M., Propagation of Radio Waves, Chapter 6, The Institution of Electrical Engineers, London, 1996.
- Hayakawa, M and O. A. 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, Vol.29, No.2, pp.105-113, 2009.
- ITU, Handbook on Radio Meteorology, Chapters 3 and 4, Geneva, 1996.
- JMA, <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/upper/index.php>, 2010.
- Kushida, Y. and R. Kushida, Possibility of earthquake forecast by radio observation in the VHF band, Journal of Atmospheric Electricity, Vol. 22, No. 3, pp. 239-255, 2002.
- Shinji, M., Wave Propagation in Radio Communication Systems, Chapter 5, Corona Publishing Co., Ltd., Tokyo, 1992 (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, pp. 219-222, 2006.
- Yonaiguchi, N., Y. Ida, and M. Hayakawa, On the statistical correlation of over-horizon VHF signals with meteorological radio ducting and seismicity, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, Vol. 69, pp.661-674, 2007.
- Yoshida, T., M. Nishi, and K. Mochizuki, Observation of seismic electromagnetic phenomena in VHF band by dual frequency method, Electrical Engineering in Japan, Vol. 155, No. 4, pp. 36-44, 2006.
- Yoshida, T., K. Shin, and M. Nishi, Correlation between the aerological atmospheric refractivity and the received level of non-line-of-sight FM radio waves, Journal of Atmospheric Electricity, Vol. 30, No. 2, pp.83-94, 2010.

(Received November 8, 2010; revised December 1, 2010;
accepted December 6, 2010)