

## 中波帯山頂送信における輻射及び伝搬特性の解析

### Analysis of Medium Wave Propagation and Radiation from Transmitting Station on the Top of the Mountain.<sup>†</sup>

乗松 義弘<sup>‡</sup>      小野 和雄<sup>‡</sup>      松永 真由美<sup>‡</sup>

Yoshihiro Norimatsu\* , Kazuo Ono\* and Mayumi Matsunaga\*

Abstract: The propagation characteristic of the radio wave from transmitting station on the top of mountain has not been clarified though it is necessary to consider setting up the transmitting station in the mountain areas because of many reasons, such as electromagnetic environmental problems around antenna stations and huge cost and area for it.

The researches on transmitting radio waves from the top of mountain are very few as far as the authors know. There are two main reasons. One is the difficulty of analytical estimation of radio wave propagation from transmitter to receivers along complex geographical features. The another reason is the accepted explanation in broadcasting circles that the conductivity of mountain area is too low for efficient emission of radio wave.

In this report, we try to overturn an established theory through analytical and experimental studies. The Furutsu's theory is applied to the analysis of propagation characteristic of the medium wave transmitted from the antenna on the top of a mountain. The mountains are modeled by the plateau of arbitrary height with lower conductivity than those of plains.

Numerical results thus obtained by our model are compared with the experimental results and well agree with those for the receiver far from antenna. Although the field strength measured at the foot of mountain is fairly lower than that estimated by the analysis, both results verify that the field strengths at the propagation distance are satisfactory for broadcasting purpose.

An experimental verification is now being planned to verify the control of vertical radiation patterns from the antenna on the top of mountain.

Key words: Medium-wave , Surface-wave and Space-wave , Mixed path , Control of vertical radiation, Transmitter on the top of mountain

<sup>†</sup> Theoretical Analysis of Propagation characteristics in Medium Waves Transmission from the Top of the Mountain, Piers 2006-Tokyo.

<sup>‡</sup> 愛媛大学大学院理工学研究科

\* Graduate School of Science and Engineering Ehime University

## 1. はじめに

我が国で最初に中波放送（ラジオ放送）が開始されて以来80年が経過し、民放ローカル局でも放送開始から50年を経過しており、アンテナ設備の更新時期を迎えている。しかし、中波帯の送信アンテナの大半は1/4波長程度の支線式円管柱モノポールアンテナが採用されており、効率を重視する大電力局の場合は地上高100m以上の大型アンテナである。また、送信所はアンテナ基部を中心として、1/4波長程度のラジアルアースを放射状に100本以上も埋設しているため、同一敷地内でのアンテナ更新は困難である。

また、中波帯の送信所は田園地帯など大地の導電率が良い場所が適していることから、従来より湿潤な平野部に建設されている場合が多い。しかし、建設当時は人家の少なかった送信所周辺も市街地化が進み、送信所の敷地内にまで人家が建てられている例もある。もはや既存の送信所周辺ではアンテナ建替えのための敷地を確保することは不可能に近く、広大な敷地を確保するためには膨大な費用が必要となる。さらには、大電力局からの電磁波による人体への影響が懸念されるなど、電磁波環境問題が発生しており、送信所を人家の少ない場所へ移転させることも検討しなければならない。

このような状況下で中波帯送信所の候補地を考えた場合、山間部への置局が最も適していると考えられるが、従来より中波帯の山岳部伝搬特性は平野部に比べて悪いとされており、これまでも山岳部への移転により受信状態が悪くなった事例もある。また、ラジアルアースを埋設するための敷地面積を確保することも困難になるため、アンテナ効率の低下が懸念される。しかし、波長に比べて高い送信点（標高差3波長以上の山頂や山岳部）に中波帯の送信所を置局した例は見あたらず、中波帯の山岳伝搬特性も明らかにされていない。

本報告では、中波帯の山頂送信における伝搬特性の解析を行うと共に、実測値との比較により検証を行っている。さらに、アンテナ単体の輻射特性についても解析を行い、中波帯の山頂送信特性について、電波伝搬特性とアンテナ特性の両面から考察を行っている。

## 2. 中波帯の電波伝搬特性

### 2.1 混合伝搬路における地上波の伝搬解析

中波帯の電波伝搬理論については、平面大地上の垂直ダイポールを波源とする A.Sommerfeld<sup>(1)(2)</sup> の理論解析に始まり、その後、Van.der.Pol、Nissen<sup>(3)</sup>、A.Norton<sup>(4)</sup>により近似式が導出され、さらに、古津<sup>(5)</sup>、J.R.Wait<sup>(6)(7)</sup>らにより厳密な伝搬理論式が展開されている。また、Eckersley<sup>(8)</sup>、須田<sup>(9)</sup>、Millington<sup>(10)</sup>らは、実用的な電界強度計算法を提案しているが、特に、Millington の方法は半実験的ではあるが混合伝搬路において実測値と比較的良好に合致することからITU-R<sup>(11)</sup>で勧告されており、日本の電波法にも採用されている。最近でも、中波帯の電波伝搬に関する研究が継続して行われており<sup>(13)(16)</sup>、地形を考慮した新しい計算手法についてもいくつか報告されているが、<sup>(17)</sup> <sup>(18)</sup>大地の電気的特性と地形の変化を同時に考慮した理論的かつ実用的な電界強度の計算法は未だ確立されていない。

中波帯の伝搬は、送受信点高が波長に比べて低いことを前提とした地表波伝搬に加えて、伝搬路に沿って大地の電気的特性が大きく変化する場合は混合路伝搬として取り扱われ、波動理論に基づく厳密な解析が行われている<sup>(5)(7)</sup>。特に、我が国のような地形の複雑な地域では、伝搬路に沿って大地表面の起伏が激しく変化し、山岳伝搬も多く含まれている。また都市部（市街地）の周辺では建物の影響も大きくなるため空間波を考慮したより厳密な解析が必要と考えられる。

本報告では、放送波の電界強度を測定して理論値と実測値の比較を行い、実際問題として伝搬路に沿って大地の電気的特性と共に地形が大きく変化する場合は、地表波領域であっても地表波と空間波の地表波領域であっても地表波と空間波の両方を考慮した伝搬理論解析の必要性を提起している。

図1に示すような、平面大地上の伝搬モデルにおいて大地から高さ $h$ の送信点 $T$ の位置に垂直に設置された、微小ダイポールからの放射電磁界を考えた場合、K. A. Nortonは一連の論文により、式(1)のような実用的な電界強度計算式を導いている<sup>(4)</sup>。式(1)の第1項と第2項は、空間波成分（直接波と反射波）を表している。送信点の高さ $h_1=0$ 、受信点 $P$ の位置を $h_2=0$ とすると、式(1)の第1項と第2項は互いに打ち消し合い第3項のみが残る。第3項は $R_1$ に依存する項が含まれておらず、大地の誘電率や導電率の影響を受けることから地表波を表している。

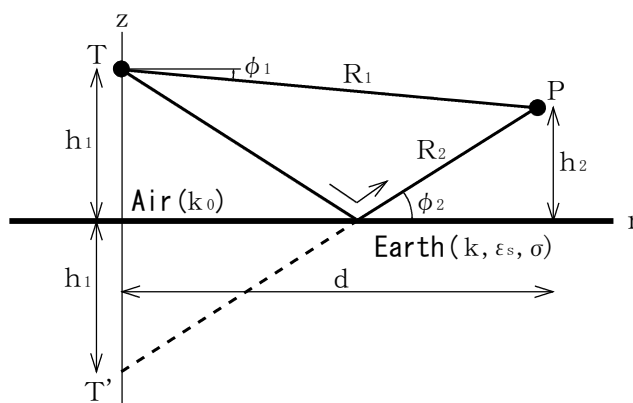


Fig. 1 Propagation model on the flat earth.

$$E_z \doteq \cos^2(\phi_1) \frac{e^{jk_0 R_1}}{R_1} + R_v \cdot \cos^2(\phi_2) \frac{e^{jk_0 R_2}}{R_2} + (1 - R_v) [1 - u^2 + u^4 \cdot \cos^2(\phi_2)] \cdot [1 - j 2 \rho F(\rho)] \cdot \frac{e^{jk_0 R_2}}{R_2} \quad \dots (1)$$

但し、式(1)において

$$u = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_s - j 60 \lambda \sigma}}$$

$$R_v = \frac{\sin(\phi_2) - u \sqrt{1 - u^2 \cdot \cos^2(\phi_2)}}{\sin(\phi_2) + u \sqrt{1 - u^2 \cdot \cos^2(\phi_2)}} \quad \dots (2)$$

$$F(\rho) = 1 - j \sqrt{\pi \rho} e^{-\rho} \cdot \text{erfc}(j \sqrt{\rho}) \quad \dots (3)$$

**erfc** : 誤差補関数

$$\rho = \frac{j \pi d}{\lambda} \cdot \frac{\epsilon_s - 1 - j 60 \lambda \sigma}{(\epsilon_s - j 60 \lambda \sigma)^2} \quad (\text{垂直偏波}) \quad \dots (4)$$

$\rho$  : 数値距離

式(2)は大地の反射係数を表している。式(3)は補誤差関数を含んでおり、大地の電気的特性や伝搬距離に応じた地表波の減衰量を示すことから減衰関数と呼ばれている。また、減衰関数Fは式(4)で示される $\rho$ の関数として表されている。ここで $\rho$ は単位を持たない複素数で、周波数と大地の誘電率と導電率に依存し、伝搬距離で表されることから数値距離と呼ばれている。

## 2.2 地形が不規則な混合伝搬路における地上波の伝搬解析

地形が不規則な混合伝搬路における伝搬特性を解析するため、古津理論<sup>(19), (20)</sup>に基づき伝搬路モデルを図2のように考える。古津氏は伝搬路の地形が不整な場合及び媒質が不均一な状態を考慮した地上波伝搬特性の解析を行っているが、ここでは古津理論を応用し、中波帯の山頂送信における伝搬特性の検証を行った。

計算の簡略化を図るため、山岳の部分上台地形に近似し、山の高さを $h (= a_3 - a_2)$ で表す。また、送信点と受信点の地上高(地表面からの高さ)はそれぞれ零としている。文献(19)と(20)より減衰係数は式(7)で表される。

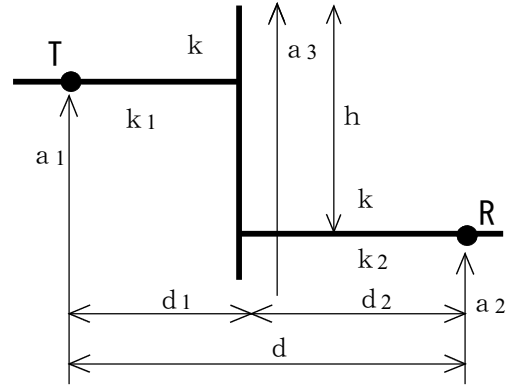


Fig. 2 Propagation model of transmitter on the mountain.

$$A = e^{-(s_1^2 + s_2^2)} \left[ U(\sqrt{r_1} s_2 + \sqrt{r_2} s_1) - j\sqrt{\pi} (\sqrt{t_2/r_2} + \sqrt{t_1/r_1})^{-1} \right. \\ \times \left[ \sqrt{t_1 t_2 / r_1 r_2} \cdot U(s_2 + j\sqrt{t_2}) \cdot U(s_1 + j\sqrt{t_1}) + \sqrt{t_2/r_2} \{ U(q_2, (\sqrt{r_1} s_2 + \sqrt{r_2} s_1) / p_2) \right. \\ \left. - U(p_2, (s_2 + j\sqrt{t_2}) / p_2) \} + \sqrt{t_1/r_1} \{ U(q_1, (\sqrt{r_1} s_2 + \sqrt{r_2} s_1) / q_1) \right. \\ \left. \left. - U(p_1, (s_1 + j\sqrt{t_1}) / p_1) \} \right] \right] \quad \dots (7)$$

$$\left. \begin{aligned} k &= 2\pi/\lambda \\ k'_1 &= k_1 / \sqrt{k_1^2 - k^2} \\ k'_2 &= k_2 / \sqrt{k_2^2 - k^2} \end{aligned} \right\} \text{Vert. Pol.} \quad r_1 = d_1 / (d_1 + d_2), \quad r_2 = d_2 / (d_1 + d_2)$$

$$\begin{aligned} t_1 &= -j(k/k'_2)^2 k \cdot d_2 / 2 & s_1 &= (a_3 - a_1) \sqrt{k / 2d_1} e^{-j\pi/4} \\ t_2 &= -j(k/k'_1)^2 k \cdot d_1 / 2 & s_2 &= (a_3 - a_2) \sqrt{k / 2d_2} e^{-j\pi/4} \end{aligned}$$

$$U(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} e^z \int_z^\infty e^{-x^2} dx \quad \dots (8)$$

$$U(z, n/z) = \left( \frac{2}{\sqrt{\pi}} \right)^2 e^{z^2 + n^2} \int_z^\infty dx \cdot e^{-x^2} \int_{(n/z)x}^\infty e^{-y^2} dy \quad \dots (9)$$

### 3. 伝搬特性の数値計算及び実測値との比較

#### 3.1 地表波成分と空間波成分の距離特性

式(1)より伝搬距離と仰角を変化させた場合の空間波成分と地表波成分の電界強度を計算し、最大値で規格化した結果を図3に示す。図中の点線が空間波を示し、実線が地表波を示している。図3より、大地の電気的定数及び伝搬距離の違いにより空間波と地表波の強度の割合が異なっている様子が示されている。伝搬路の導電率が大きいほど地表波強度が空間波強度より高くなり、地表波の伝搬距離も伸びている。同時に図3は伝搬距離の違いによる空間波と地表波の垂直方向の指向特性が示されている。特に、導電率が小さい場合は伝搬距離が長くなると地表波の強度が小さくなり、空間波の打上げ角度は導電率が大きいほど下向きになっている。乾燥大地では送信点の近傍しか地表波が存在しておらず、ほとんどが空間波と考えられる。従って、山頂送信の場合、打上げ角により水平より上方に輻射されるため、水平面より下側には輻射されないこととなり、電界強度が低下する。

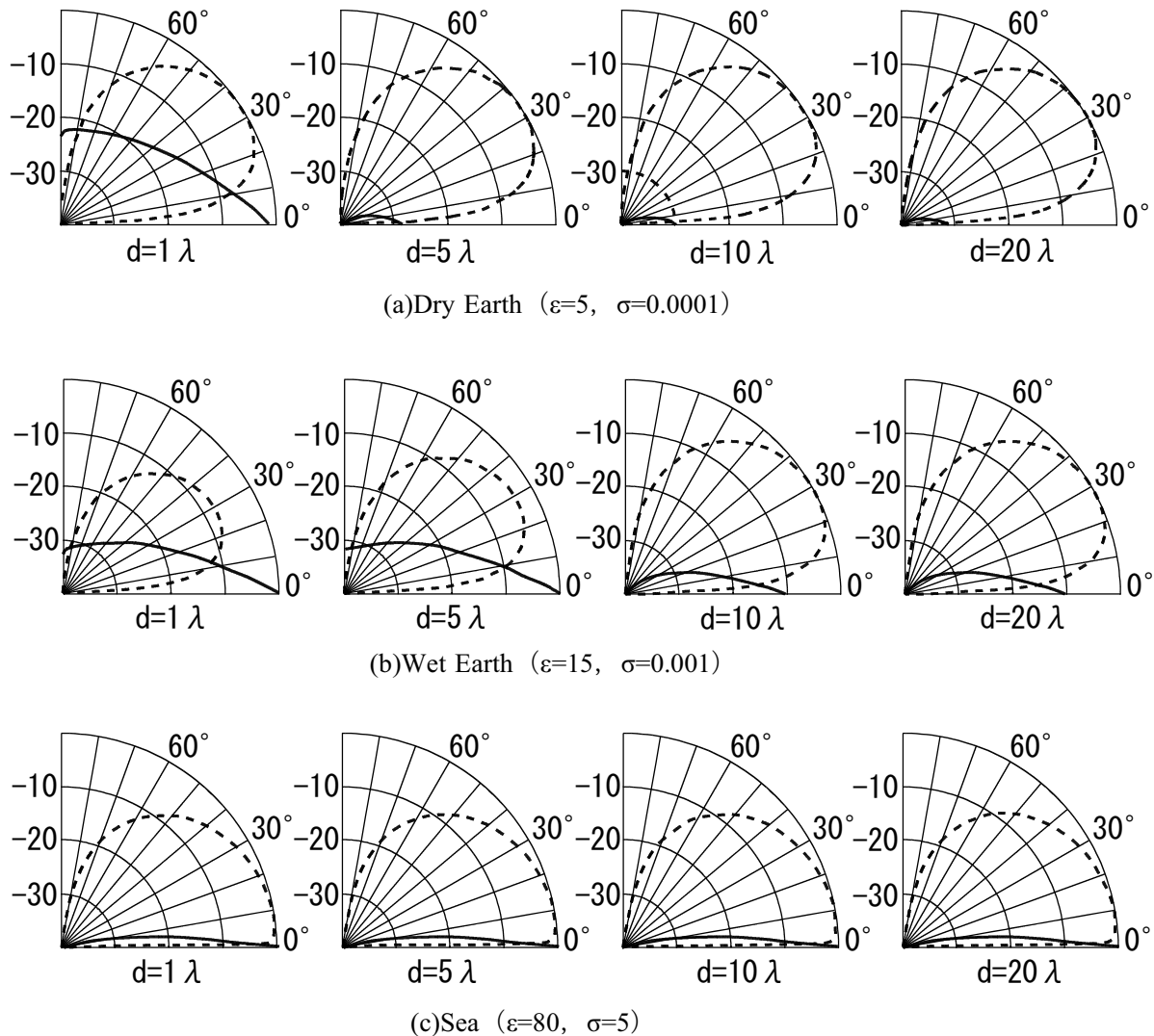


Fig. 3 Vertical pattern of space wave and surface wave.

### 3.2 山頂送信の伝搬特性

送信電力 1 kw、周波数 1 MHz、送信効率100%とし、送信高を変化させた場合の場合の電界強度曲線を図4に示す。計算に使用した大地の電気定数は、通常大地 ( $\epsilon = 15, \sigma = 0.001$ ) とした。図4より、送信高が高くなるにつれて、伝搬距離に関係なく電界強度が大きくなっており、伝搬特性の観点からは平地の送信に比べて山頂送信が不利になることはないと考えられる。

図5に山頂送信モデル(台地形状モデル)の電界強度計算結果を示す。①は送信点から台地の端まで10 kmの距離がある場合で、山陰の部分に遮蔽損失が表れており、崖から遠くなるにつれて遮蔽損失が回復している。従って空間波成分が計算されていると考えられる。②は台地の端に送信点を置いた場合で、伝搬路が全て見通しになるため均一伝搬路での電界強度曲線に類似した電界曲線になっている。

また、①と②を比較した場合、それぞれ見通し領域での電界曲線は同等の傾向を示しているため基本的には距離損失の違いが残る。これにより、伝搬路が同条件であれば山頂送信による伝搬特性の違いは無いものと考えられる。距離損失についても、①と②の距離差に比べて伝搬距離が遠い場合は電界値がほぼ同等になり、山岳部分の伝搬路に違いがある場合も伝搬特性は大差無いことが示されている。

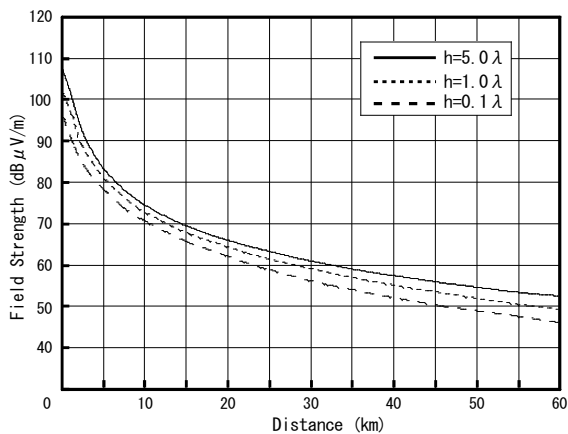


Fig. 4 Effect of field strength at the receiver on the height of transmitter.

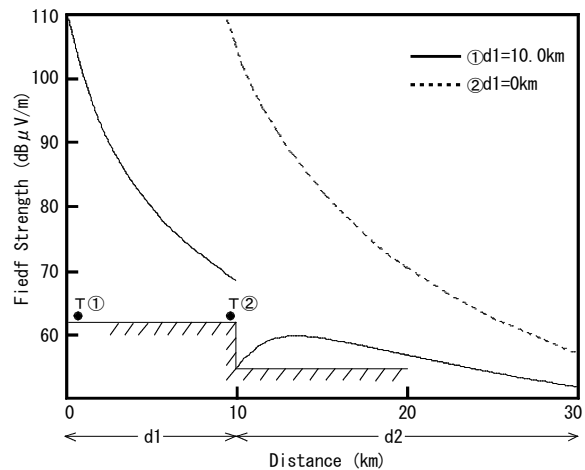
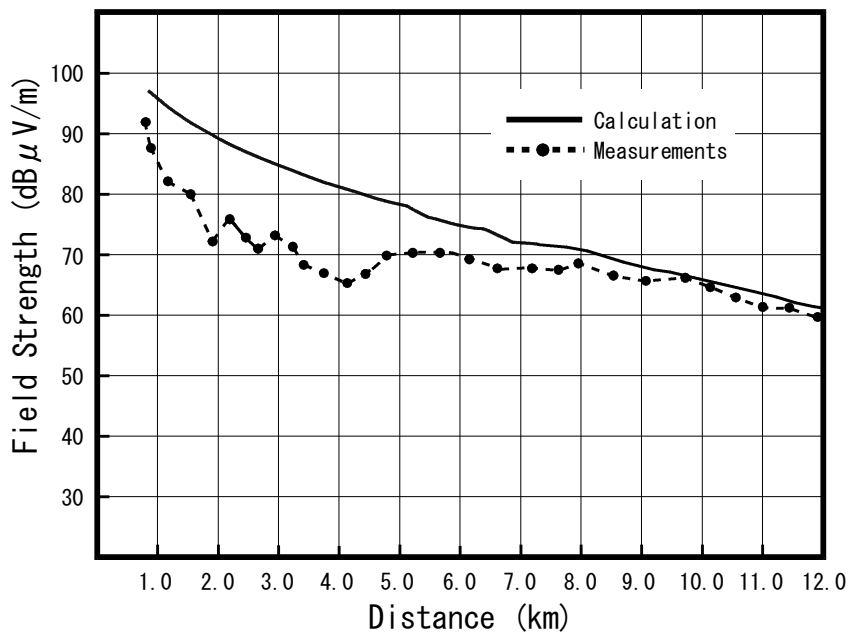


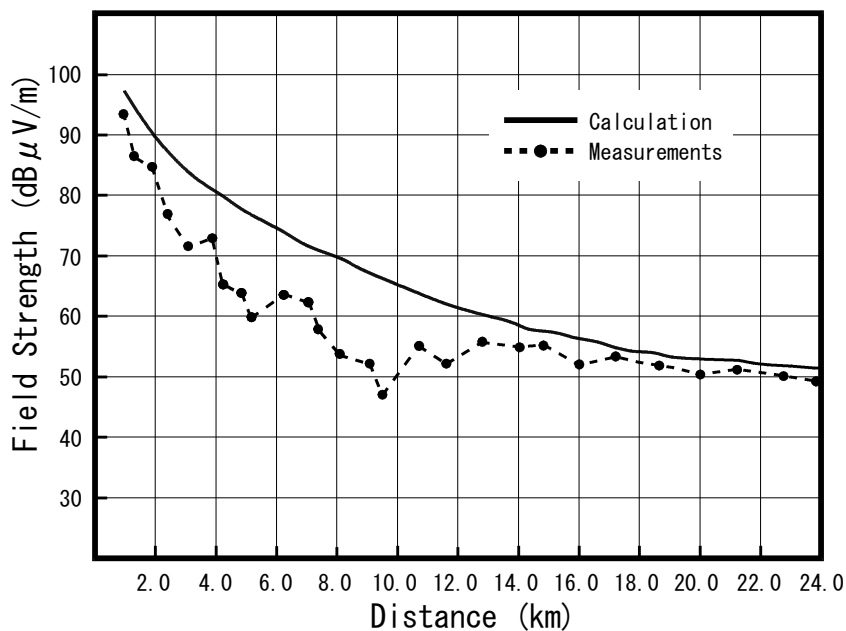
Fig. 5 Calculation of field strength by the propagation model of transmitter on the mountain.

### 3.3 山頂送信における電界強度

標高920mの大月山山頂に実験局（周波数:1233kHz, 電力:100W）を設置し、電界強度を測定した結果を図7に示す。図7を見ると、いずれも山頂に近い領域においては計算値より測定値がかなり低くなっているが、電界強度が高いため実用上は問題が無いと考えられる。また、距離が遠くなるに従って計算値と測定値が合致しており、山頂送信の伝搬特性が悪いとは言えない。



(a) Field strength curve (Mountain ~ Plains)



(b) Field strength curve (Mountain ~ Town area ~ Countryside)

Fig. 6 A curve of field strength by comparizon calculation and measurement.

## 4. 送信アンテナの垂直指向特性

### 4.1 大地上に設置された垂直ダイポールアンテナの指向特性

損失のある大地上に設置された垂直ダイポールの特性については、Wise<sup>(21)</sup>によって式(10)のような放射電界の表示式が導出されている。

$$E_{\theta}^v = -j \frac{\eta(I \cdot L)}{2\lambda} \sin\theta (1 + \Gamma \cdot e^{2jk_h \cos\theta}) \frac{e^{jkR}}{R} \quad \dots (10)$$

ここで $\Gamma$ はWiseが導入した反射係数である。

$$\Gamma = \frac{n^2 \cos\theta - j\sqrt{\sin^2\theta - n^2}}{n^2 \cos\theta + j\sqrt{\sin^2\theta - n^2}} \quad \dots (11)$$

$$n^2 = \epsilon_s + j \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0} \quad n : \text{複素屈折率}$$

式(10)より、大地の電気的特性が異なる場合における仰角方向の放射電界 $E_{\theta}^v$ を $0 \sim 90$ 度の間を変化させて計算し、最大値で規格化したものを図7に示す。媒質定数は、海水(誘電率:80、導電率: $\infty$ )、標準大地(誘電率:15、導電率:0.005)、乾燥大地(誘電率:5、導電率:0.0001)について計算を行っており、媒質定数に対する放射特性(垂直指向性)を明らかにしている。

図7より、大地表面の導電率が高く、海上のように完全導体に近いほど水平方向の電界強度が大きくなるのがわかる。また、山岳など大地の導電率が小さい場合には、上方約 $30$ 度方向の電界強度が最大となり、打上角に相当している。導電率が小さい状態では、水平方向の電界強度がほとんど得られず、地表波として伝搬しないことがわかる。

中波帯の山頂送信においては、サービスエリアは水平面より下向きとなるため、送信所近傍や伝搬路の導電率が悪い場合は、平野部の送信と比べて電界強度が格段に低下すると予想される。これに対しては、垂直指向性を下向きに制御可能な中波帯の送信アンテナの開発が必要となる。

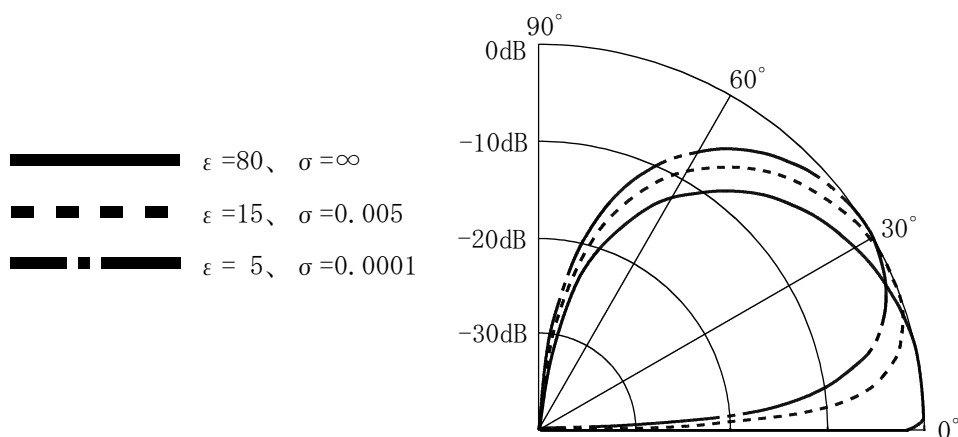


Fig. 7 Vertical radiation pattern for dipole antenna on the lossy earth.



## 4.2 垂直指向特性が制御可能なアンテナ設計

前項の結果より、山頂送信を行う場合は垂直指向性を下向きに制御する必要があることがわかる。しかし、中波帯の送信アンテナの多くは1/4波長程度の垂直モノポールアンテナが採用されているため、そのままでは垂直指向性を制御することができない。これまでに副導線を利用することにより、中波帯送信アンテナの電流分布を変更してアンテナの能率改善を行った報告はされているが<sup>(22)</sup>、指向性を改善した例は見あたらない。

ここでは、副導線を利用して主アンテナと副アンテナの構成とし、等価的に2つの給電点により励振する方法について解析を行い、電流分布の合成により垂直指向性を変更できることを確かめた。

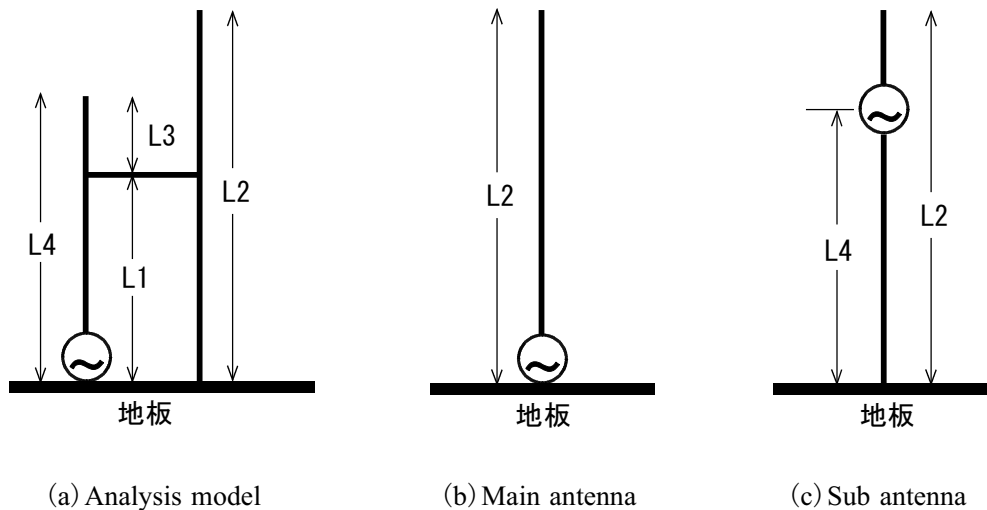


Fig. 8 Antenna model by the feeding that used vice-conducting wire.

$$D_1(\phi) = I_0 \frac{k_0 \cdot \sin \phi [\cos(mL_2 \cdot \cos \phi) - \cos(m_0L_2)]}{1 - k_0^2 \cdot \cos^2 \phi} \quad \dots (12)$$

$$D_2(\phi) = I_0' \frac{k_0 \cdot \sin \phi}{1 - k_0^2 \cdot \cos^2 \phi} \cdot \frac{\cos(m_0L_4) \cdot \cos(mL_2 \cdot \cos \phi) - \cos(m_0L_2) \cdot \cos(mL_4 \cdot \cos \phi)}{\cos(m_0L_4)} \quad \dots (13)$$

$$\text{但し、} \frac{I_0}{I_0'} = \frac{\sin(m_0) \cdot (L_2 - L_4)}{\cos(m_0L_4)}$$

図8(a)は、基部接地型の鉄塔に副導線を利用して給電するアンテナモデルを表している。図(b)と図(c)は、図8を等価的に2基のアンテナに置き換えたモデルで、それぞれの電流分布を個別に調整し、それらを合成することにより図8(a)の特性が得られる。

式(12)と(13)を計算した結果より図9の指向性図が得られており、副導線による給電点の調整により垂直指向性が可変できることが明らかである。

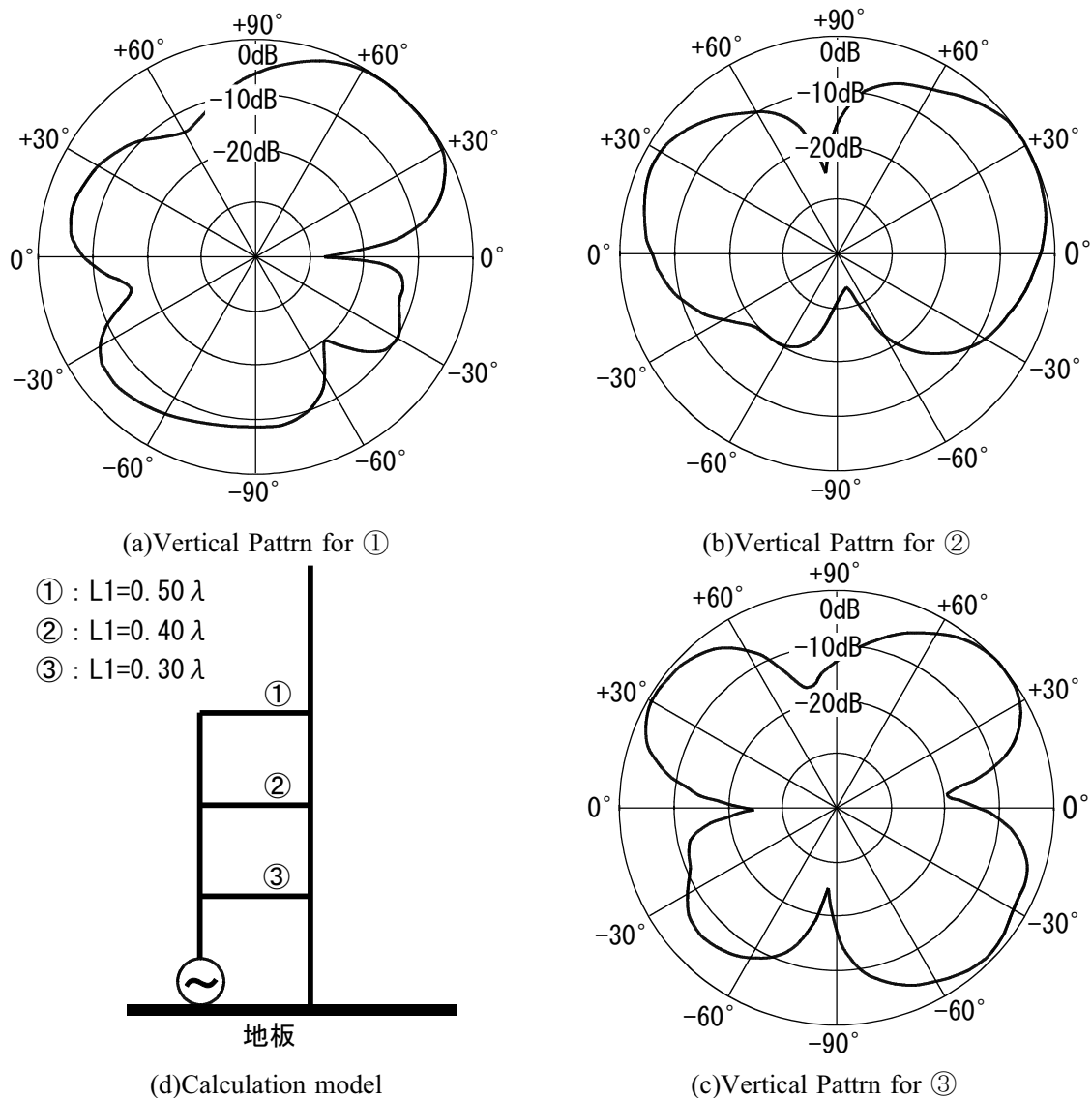


Fig. 9 Radiation pattern for a new design antenna on the lossy earth.

## 5. まとめ

中波帯の山頂送信特性について伝搬特性と輻射特性の解析を行い、放送波を利用した実測との比較により地表波だけでなく空間波も考慮した実験的検証を行った。

伝搬特性に関しては、平地から送信した場合と比べて遜色のない解析結果が得られたが、実測では山の麓までの送信点に近い領域では電界強度が低くなる結果が得られた。この原因究明については今後の課題である。また、輻射特性に関しては、大地の導電率が小さいほど水平方向の電界強度が低下し、打上げ角が大きくなる。従って、山頂送信の場合はサービスエリアが下向きとなるため、垂直指向性を改善する必要性が生じるが、副導線を利用する方法でアンテナの電流分布を変更し、垂直指向性を下向きに改善できることを確かめた。

以上より、従来、中波帯の山頂送信は実用的でないと考えられていたのに対し、数値解析と実験により山頂送信の実用性を示す事ができた。

## 6. 参考文献

- [1] A.Sommerfeld:Uber die Ausbreitnug der Wellen in der Drahtlosen Telegraphie, Ann.d.Physik, B28, 1909.
- [2] ザンマーフェルト理論物理学講座IV,物理数学, A.Sommerfeld,pp.267-278,講談社
- [3] Van.der.Pol,Nissen:Ausbreitung electromagnetischer Wellen:Uber einem ebenen Erde Ann.d.Phys., Bd.6,pp.273-294,1930.
- [4] K.A.Norton:The Propagation of Radio Waves over the Surface of the Earth and in the Upper Atomosphere, Part I , IRE, Vol.24, pp.1367-1387,Oct. 1936, Part II , IRE, Vol.25, pp.1203-1237 ,Sept. 1937.
- [5] K.Furutsu:Propagation of Electro-Magnetic Waves over a Spherical Earth across Boundaries Separating Different Earth Media, J.RadioRes.Lab.,Vol.2, No.10, p.345-398, 1955.
- [6] J.R.Wait:Excitation of surface waves on conducting, stratified, dielectric-clad, and corrugated surfaces, J.Res.NBS,Vol.59,No.6,pp.365-377,1957.
- [7] J.R.Wait:Recent Analytical Investigations of Electromagnetic Ground Wave Propagation over Inhomogeneous Earth Models,Proceedings of the IEEE,Vol.62,No.8,pp.1061-1071,August,1974.
- [8] P.P.Eckersley:The calculation of the service aera of broadcast stations,Pcoc.IRE,Vol.18, 1930.
- [9] K.Suda:Field-Strenght Calculation,New Method for Mixed Paths,Wireless Eng.,p.249, Sept,1954.
- [10] G.Millington:Ground-wave Propagation over an Inhomogeneous Smooth Earth, PIEEE,Part III, pp.53-64,Vol.96, Jan.1949.
- [11] Rec.ITU-R P.368-7:Ground-wave propagation curves for frequencies between 10kHz and 30MHz.
- [12] R.E.Collin: Antenna and Radiowave Propagation., McGraw-Hill,pp372-377.
- [13] 乗松義弘:中波電波伝搬の自動計算法, テレビジョン学会技術報告,Vol.20,No65, pp.13-17.
- [14] 乗松義弘:中波放送サービスエリアの自動計算について,放送技術,Vol.51,No.1,pp.115-120,1998.
- [15] 乗松,小野,松永: 中波帯における電波伝搬特性の実験的検証,信学技報,AP2003-252,pp.13-17.
- [16] 河野,石原:市街地—郊外地—海上からなる3区間混合経路上の電波伝搬,EMT-05-32,pp.1-6.
- [17] Levent Sevgi,Felsen::A New Algorithm for Ground Wave Propagation Based on a Hybrid Ray-Mode Approach,Int.J.Numer.Model,pp.87-103,1998.
- [18] Levent Sevgi,Felsen: Groundwave Propagation Modeling:Problem-Matched Analytical Formulations and Direct Numerical Techniques,IEEE Antenna and Propagation magazine, Vol.44, No.1, pp.55-75,February,2002.
- [19] K.Furutsu:On the theory of Radio Wave Propagation Over Inhomogeneous Earth., J.RadioRes.Lab, Vol.67D, No.1, 1963.
- [20] K.Furutsu,R.E.Wilkerson: Some Numerical Results Based on the Theory of Radio Wave Propagation Over InhomogeneousEarth., J.RadioRes.Lab., Vol.68D, No.7, 1964.
- [21] Wise.H: Asymptotic dipole radiation formulas, Bell Syst. Tech.J., P662, Oct.1929.
- [22] 遠藤, 松下: 中波放送用アンテナの電流分布変更, NHK 技術研究, 第14巻, 第8号, pp497-526.
- [23] Norimatsu,Ono,Matsunaga: Theoretical Analysis of Propagation characteristics in Medium Waves Transmission from the Top of the Mountain, Piers 2006-Tokyo, 2006.