中波山頂放送アンテナの野外実験

沢谷 邦男[†], 土屋 知久[†]

宇野 亨[†], 猪狩 和久[†]

正会員 安達 三郎[†],

あらまし 中波放送アンテナは従来、都市郊外の導電率の高い平面大地に設置されてきたが、用地難や電磁環境問題などが生じている。そこで、アンテナ設置場所に山岳を利用することが考えられる。800 MHz 帯を用いた小型モデル実験によると、山頂アンテナの方が平面大地上のアンテナに比べて動作利得が高くなる場合のあることが指摘されている。このことを確認するために、放送波により近い周波数を使った野外での大型モデル実験を行った。本論文ではこの実験の結果について述べている。この実験では、周波数帯は 10~50 MHz であり、山岳モデルの高さは 3.75 m とし、その上に埋設接地線を施したモノポールアンテナを直立させた。この実験装置を用いて入力インピーダンスと電界強度の測定を行い、平面大地上アンテナの測定結果と比較を行った。その結果、山の高さ 1/4 波長および 1/2 波長、アンテナ高 1/4 波長に対して、平面上アンテナよりも山頂アンテナの方が利得が高くなることが定量的に確認され、ほかのパラメータにおいても山頂アンテナの方が高い動作利得を示した。これらのことから、中波放送アンテナを山頂に設置することが実用上有効であるとの結論を得た。

1. ま え が き

中波放送アンテナは従来、都市郊外の導電率の高い平面大地に設置されてきたが、近年、設置場所周辺の都市化が急速に進みつつある。このような状況の下で、特に送信電力の増力変更の場合には強力な誘導電磁界による電話線への漏洩や混信等の電磁環境問題が生じ、送信アンテナの移転を必要とする場合が増えている。また、同様な事情により新設時に適当な用地を見つけることも困難となっている。そこで、従来の平面大地でなく人家から離れた山岳を利用することが考えられる¹⁾²⁾

800 MHz 帯を用い、平面大地を完全導体とした小型モデル実験によると、山頂アンテナの方が平面大地上のアンテナに比べて動作利得が高くなる場合のあることが指摘されている¹⁾²⁾。具体的には、山岳高を

0.125~0.3 波長程度とすることにより、平面大地上アンテナと同程度、もしくはそれ以上の動作利得が得られている²⁾

このことを確認するためには、放送波により近い周波数を使った野外での大型モデル実験が必要である。そこで、宮城県鳴子町川渡の東北大学農学部附属農場で野外実験を行った。本論文では、この実験の結果について述べる。

2. 野外実験の概要

2.1 山岳媒質

大型モデルを使った野外実験を行うに当たり、まず、平坦で障害物の少ない場所を選択する必要がある。この条件を満たす候補地について検討した結果、東北大学農学部附属農場の牧草地が適当であるとの結論を得た。この牧草地には適当な高さの山がないので、モデル山岳は土を搬入して作ることにした。したがって、あまり大きな山岳を築くことは困難であり、測定周波数を 10~50 MHz とし、山岳高を 3.75 m とした。

[†] 東北大学 工学部

Field Experiments of Medium-Wave Broadcasting Antenna on Mountain Top by Kunio Sawaya, Tomohisa Tsuchiya, Toru Uno, Kazuhisa Igari and Saburo Adachi (Faculty of Engineering, Tohoku University, Sendai)

モデル山岳媒質の条件として、(i)測定周波数(10~50 MHz)において岩山(比誘電率 $\epsilon=14$ 、導電率 $\sigma=0.002\text{s/m}$)を模擬する媒質定数³⁾に近い、(ii)温度や湿度により電気定数が変化しにくい、(iii)適度の粘性あるいは硬度を有しており山岳がくずれにくい、などがあげられる。入手可能ないくつかの土の電気定数を測定した結果、上記の条件に最も近いものとして粘度質 $\epsilon=9$ 、 $\sigma=0.005\text{s/m}$ の媒質を用いることにした。

2.2 測定方法

図1に農場の実験現場の略図を示す。まず、平面大地上モノポールアンテナの特性を測定するために、農場を横切る道の端の凹地に粘土を平らに盛ってならし、平面大地に近い環境をつくった。その中心に一辺150 mmの正八角形の銅板を置き、それぞれの辺の中心から放射状に埋設接地線を施した。銅板の中心に送信アンテナとしてモノポールアンテナを直立させて根本を固定し、さらにステーを張って風などによる転倒を防止した。

次に、底面の半径が約5 mで高さ3.75 mのほぼ円錐状に粘土を盛り、その頂上に平面大地の時に用いた埋設接地線を施した銅板を置いてモノポールアンテナを直立させた(図2)。

また、受信用アンテナとして直径92 cm、地上から中心までの高さ136 cmである遮蔽ループアンテナを用いた。山岳高は3.75 mであり、送信アンテナ長と

しては3.75 m(20 MHzで1/4波長)と1.875 m(40 MHzで1/4波長)の2本を用いた。接地線は深さ約15 cmの所に最大5 mの平編組銅線を8本設けた。

2.3 実験の手順

この実験におけるパラメータは次の通りである。

- (i) 距離： d ……………4種類
50, 60, 70, 80 m (3.75 m アンテナ)
25, 30, 35, 40 m (1.875 m アンテナ)
- (ii) 接地線の長さ： g ……………6種類
0, 1, 2, 3, 4, 5 m
- (iii) アンテナ長： l ……………2種類
3.75, 1.875 m
- (iv) 山岳高： h ……………2種類
平面上0 m, 山頂3.75 m

モノポールアンテナの入力インピーダンスはインピーダンスメータを用いて、2~50 MHzで2 MHzおきに、また、電界強度についてはトラッキングジェネレータとスペクトラムアナライザを用い、2~50 MHzで連続的に測定した。なお、電界強度の測定の際にはトラッキングジェネレータからモノポールアンテナへ入射する電力とアンテナ入力端からの反射電力を、方向性結合器を用いて監視している。また、電界強度の測定において、 S/N は20~30 dB程度であり、十分な受信レベルが得られた。

3. 測定結果と検討

3.1 入力インピーダンス

図3に平面上アンテナと山頂アンテナの入力インピーダンスの比較を示す。ただし、ケーブルの特性インピーダンス Z_0 は50 Ω である。この図によると、平面アンテナよりも山頂アンテナの方が共振周波数が高く、入力抵抗が大きい。また、図4にアース長 g を変化させたときの入力インピーダンスの比較を示す。図4(a), (b)の平面上アンテナの入力インピーダンスから、アース長 g が短いほど共振周波数が高く、また、共振周波数以下では入力抵抗が大きいことがわかる。図4(c), (d)の山頂アンテナの入力インピーダンスからは、 $g=0$ のときを除き接地線に対する入力抵抗の違いはあまり見られない。

3.2 電界強度

図5に周波数に対して連続的に測定した受信電界強度のデータを離散的に読みとってプロットした例を●印で示す。ただし、縦軸は相対受信電界強度であり、アンテナへの入射電力(=トラッキングジェネレータの出力電力)を一定とした場合の値である。この図からわかるように、測定値には周波数に対してリップル

図1 実験現場の略図
Schematic illustration of experimental spot.

図2 山岳モデル
Mountain model.

図 3 平面上アンテナと山頂アンテナの入力インピーダンスの比較
Input impedance of monopole antenna on flat earth and top of mountain.

図 4 アース長を変化させたときの入力インピーダンスの比較
Input impedance with the varying earth length g .

- (a) Antenna on flat earth, $l=3.75$ m. (b) Antenna on flat earth, $l=1.875$ m.
(c) Antenna on top of mountain, $l=3.75$ m. (d) Antenna on top of mountain, $l=1.875$ m.

図 5 電界強度の周波数特性 (入射電力一定)
Typical data and smoothed curve of field strength as a function of frequency. (Incident power to the antenna is constant.)

を含んでいる。この原因としては、モノポールアンテナの後方数十 m 付近に存在する低い樹木 (高さ 2 m 以下) などによる散乱波との干渉が考えられる。このようなデータをそのまま用いるには問題があるので、最小 2 乗法により 3 次曲線近似して平滑化した。その結果を図 5 に実線で示す。また、図 6 には平滑化した山頂アンテナおよび平面上アンテナに対する電界強度の例を示す。この図から山頂アンテナの方が平面上アンテナより電界強度が強いことがわかる。

図 6 ならびに他のパラメータにおける同様の図において、モノポールアンテナが $1/4$ 波長となる周波数 (3.75 m アンテナでは 20 MHz, 1.875 m アンテナでは 40 MHz) における平滑化されたデータを読みとり、

(a) $l=3.75$ m

(b) $l=1.875$ m

図 6 平面上アンテナと山頂アンテナの電界強度の周波数特性の比較 (入射電力一定)
Smoothed curve of field strength from monopole antenna on flat earth and top of mountain.
(Incident power to the antenna is constant.)

(a) $l=3.75$ m

(b) $l=1.875$ m

図 7 平面上アンテナと山頂アンテナの電界強度の距離特性の比較 (入力電力一定)
Field strength as a function of distance d . (Input power to the antenna is constant.)

距離 d を変化させて平面上アンテナと山頂アンテナの場合を比較した結果を図 7 に示す。ただし、この図にはアース長 g を 1~5 m と変化させたときに得られた電界強度のうち、平面上アンテナに対して山頂アンテナの電界強度が最も大きい場合 (アース長 $g=5$ m の場合) と小さい場合 (アース長 $g=1$ m の場合) を示した。ここで、○と□印ならびに×と*印は、それぞれ山頂アンテナならびに平面上アンテナに対する平滑された測定値であり、実線と一点鎖線ならびに点線と破線はこれらの測定値から得られた回帰直線である。また、縦軸はモノポールアンテナへの入射電力とアンテナ入力端からの反射電力から、入力電力 (= アンテナに消費される電力) を求め、これがすべてのパラメータに対して等しくなるように、電界強度の測定値を補正した値であり、アンテナ利得に比例した値となっている。図 7 によると、3.75 m 山頂アンテナ (20

MHz, アンテナ長 l = 山岳高 $h=1/4$ 波長) では平面上アンテナに比べて $-0.5 \sim +4.5$ dB 程度の電界強度が得られ、1.875 m アンテナの山頂アンテナ (40 MHz, アンテナ長 $l=1/4$ 波長, 山岳高 $h=1/2$ 波長) では 2~6 dB ほど高い電界強度が得られた。

図 8 にアース長 g をパラメータとし、距離 d を変化させたときの電界強度分布を示す。この図によると、山頂アンテナよりも平面上アンテナの方がばらつきがある。また、平面上アンテナの場合、接地線 0 m と 3 m を除き、接地線を長くするにつれて電界強度が低下する傾向が見られる。山頂アンテナについては接地線 0 m を除き、接地線の長さに対する電界強度の大きな変化は見られない。平面上アンテナに対する上記の傾向は、接地効果を高めることにより放射効率が高まるといわれていることと相反するものであり、今後の検討を要する。また、平面の電界強度の測

(a) 平面上アンテナ, $l=3.75$ m

(b) 山頂アンテナ, $l=3.75$ m

(c) 平面上アンテナ, $l=1.875$ m

(d) 山頂アンテナ, $l=1.875$ m

図 8 アース長を変化させたときの電界強度の距離特性の比較 (入力電力一定)

Field strength as a function of distance d with varying earth length g . (Incident power to the antenna is constant.)

- (a) Antenna on flat earth, $l=3.75$ m. (b) Antenna on flat earth, $l=1.875$ m.
(c) Antenna on top of mountain, $l=3.75$ m. (d) Antenna on top of mountain, $l=1.875$ m.

定値はリップルが大きく、最小2乗近似した際にリップルの少ない山頂のデータよりも誤差が大きくなってしまったことも原因のひとつと考えられる。

4. 電界強度の距離特性に関する検討

以上の実験結果が妥当なものであるかについて検討するために、文献5)の方法を用いて点波源を仮定し、損失性大地を考慮して受信点(ループアンテナの中心)での水平方向磁界強度の距離特性を計算した。ただし、点波源の高さは平面大地の場合 0.088 波長⁶⁾、山頂の場合には山岳高 $h+0.088$ 波長としてある。なお、ここで計算される磁界強度は山岳からの散乱が考慮されていない。電気定数は一般の山岳を構成する岩山の代表値 ($\epsilon=14$, $\sigma=0.002$ s/m), 乾燥土の代表値 ($\epsilon=4$, $\sigma=0.001$ s/m), また、野外実験でモデル山岳に用いた粘土の媒質定数 ($\epsilon=9$, $\sigma=0.005$ s/m) を用いて

計算し、実験値との比較を行った。その結果を図9に示す。この図は、図7で測定値から得られた回帰直線と、文献5)の方法から得られる理論値とを比較するために、 3.75 m, 1.875 m アンテナに対してそれぞれ 50 m と 25 m での値を 0 dB として規格化したものである。この図によると、理論値と実験値の距離特性の傾きはほぼ一致している。このことから、実験結果の妥当性を一部確認することができた。

5. む す び

本報告では、山頂に設置された中波放送アンテナの特性を評価するために、野外での大型モデル実験を行った結果を述べた。

本実験の結果を要約すると、山岳高 $1/4$ 波長の山頂アンテナ(周波数 20 MHz)では平面上アンテナに比べて $-0.5 \sim +4.5$ dB 程度の電界強度が得られ、山岳

(a) 平面上アンテナ, $l=1.875$ m

(b) 山頂アンテナ, $l=1.875$ m

図 9 電界強度の理論値と実験値との比較
Field strength as a function of distance d .

(a) Antenna on flat earth, $l=1.875$ m. (b) Antenna on top of mountain, $l=1.875$ m.

高 $1/2$ 波長の山頂アンテナ (周波数 40 MHz) では 2~6 dB ほど高い電界強度が得られることがわかった。この実験において測定したこの他の周波数 (10~50 MHz, 山岳高 0.125~0.625 波長) においても, 山頂アンテナの方が平面大地上アンテナに比べて高い電界強度が得られている。

大地を完全導体とした 800 MHz 帯でのモデル実験および計算では¹⁾²⁾, 山岳高 0.3 波長以下, アンテナ長 0.25 波長程度において, 山頂アンテナの方が平面大地上アンテナに比べて利得が高くなることが示されており, これ以上の山岳高では利得が低下するという傾向が見られた。しかしながら, 上記の通り 0.5 波長の山岳であっても, 山頂アンテナの方が利得の点でまだ有利であるとの結論が得られた。このことは文献 1) の結論に比べて好ましいものであり, 山頂アンテナの有効性が確かめられたものと考えられる。また, 媒質定数を変化させて点波源からの電磁界を計算し, 実験値との比較を行ったところ, 距離特性について良い一致が見られ, 実験の妥当性が一部確認された。

以上の検討により, 山頂アンテナの有効性が実証されたものと考えられる。なお今後の課題としてアース長と電界強度の関係を明確にすることがあげられる。

本研究を行うに当たり, 東北大学農学部附属農場長阿部篤郎教授を始めとする農場関係者各位には多大な御協力と御援助を頂き, 深く感謝の意を表す。また, 実験遂行に際しては, 東北大学工学部電気理論講座の諸兄に全面的な御協力を頂いた。なお, 本研究の一部は放送文化基金の援助のもとに行われた。関係各位ならびに御教示頂いた財電波技術協会 遠藤敬二博士に感謝する。(昭和 61 年 10 月 16 日受付, 昭和 61 年 12 月 5 日再受付)

〔参考文献〕

- 1) 藤掛, 安達, 沢谷: “回転対称形山岳上の山頂に設置された中波放送アンテナの放射特性”, 信学誌論, **J68-B**, 11, pp. 1274-1281 (Nov., 1985)
- 2) 藤掛, 安達, 沢谷, 柴田: “中波山頂放送アンテナのモデル実験”, テレビ誌, **39**, 11, pp. 1097-1102 (Nov., 1985)
- 3) 電子通信学会編: “アンテナ工学ハンドブック”, オーム社, p. 709 (1980)
- 4) 沢谷, 土屋, 宇野, 猪狩, 安達: “中波山頂アンテナの野外実験”, 信学技報, AP 86-48 (July, 1986)
- 5) I. V. Lindell and E. Alanen: “Exact Image Theory for the Sommerfeld Half-Space Problem, Part II: Vertical Electric Dipole”, IEEE Trans., **AP-32**, 8, pp. 841-847 (Aug., 1984)
- 6) 遠藤, 佐藤, 永井: “アンテナ工学”, 日刊工業新聞社, p. 123 (昭 44)

さわや くに お
沢谷 邦男 昭和 51 年, 東北大学大学院博士課程修了。現在, 同大学助手。アンテナ, 電波工学の研究に従事。工学博士。

つちや ともひさ
土屋 知久 昭和 61 年, 東北大学工学部電気工学科卒業。現在, 同大学大学院修士課程在学中。山頂アンテナの研究に従事。

う の とおる
宇野 亨 昭和 60 年, 東北大学大学院博士課程修了。現在, 同大学助手。電磁波における逆散乱問題, アンテナの研究に従事。工学博士。

い がり かずひさ
猪狩 和久 昭和 52 年, 東北学院大学経済学部二部経済学科卒業。53 年, 東北大学工学部技官となり, 現在に至る。アンテナの製作および測定機器の開発に従事。

あ だち さぶろう
安達 三郎 昭和 33 年, 東北大学工学部通信工学科大学院博士課程修了。アンテナ, 電磁波の散乱・伝搬, ランダム媒質中の伝搬, プラズマ中の波動放射・伝搬, プラズマ加熱用アンテナ, 人体とアンテナの相互結合, 逆散乱問題, 携帯アンテナ等の研究に従事。現在, 東北大学工学部教授。正会員。