中波山頂放送アンテナのモデル実験

正会員 藤 掛 英 夫[†], 正会員 安 達 三 郎^{††}
 沢 谷 邦 男^{††}, 柴 田 康 弘^{†††}

あらまし 用地難や電磁環境問題を避けるために、中波放送アンテナを例えば山頂に設置することが考えられている。しかし、山頂に設置した場合の中波放送アンテナの特性をあらかじめ予想することは、これまで理論的にも実験的にも困難であった。そこで本論文では、山頂アンテナに関する筆者らのこれまでの理論の検証と、山岳モデルを用いた実験方法の確立を目的として、モデル実験を行って得た測定結果について述べている。実験モデルには、良導体である平地を模擬する導体地板上に、損失性誘電体で構成された回転対称型のモデル山岳を製作し、この上に埋設接地線を実施した直立モノポールアンテナを立てた。この実験装置によって、先の筆者らの理論的報告の検証を行うと共に、理論的には困難な、接地効果がアンテナ特性に及ぼす影響を明らかにする。これによって、ある条件下において山頂中波アンテナが、実用上有効であることを結論している。

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。しかし、近年設置周辺部の都市化に伴って電磁環境問題が生じ、送信アンテナの移転が必要となる場合が増えている。また、同様な事情により、新設時における用地難の問題も深刻化している。そこで代替地として、人家から離れた山岳を利用することが考えられる^{1)~3)} (図1参照)。山岳に富み、地形地勢の複雑な我が国において、中波放送アンテナを非居住地帯である山頂へ設置することが可能となれば、その意義は大きい。

図1 中波放送アンテナの山頂への設置
 Location of medium-wave broadcasting antenna on a top of mountain.

一般に、山岳地帯は乾燥した岩石で構成されている場合が多く、平面大地よりも導電率が低い。そのため、アンテナを山頂に移転した場合に、アンテナ近傍大地における吸収損失と接地損失の増加に伴う放射効率の低下や、アンテナからの直接波と山岳による散乱波との干渉による、放射特性の劣化の可能性が考えられる。中波放送アンテナの歴史は古く、その技術は確立されているようにみえるが、上述の問題を扱った研究報告は少ない⁴⁾⁵⁾。本論では、山頂に設置された中波放送アンテナ（以下、山頂アンテナと略称する）の基本特性の解明を目指し、室内モデル実験を行った結果について述べる。その中で、理論的な解析結果³⁾に対する実験的検討を行うと共に、接地効果のアンテナの特性に及ぼす影響を考察する。

山頂上の垂直アンテナによる特性の解析・検討を行うに際して、放射系の構成要素、すなわちアンテナ、山岳および大地のモデル化が必要である。ここでは、山岳の導電率が大地に比べて低いこと、主に山岳の影響を知ることが目的としていることから、山岳を完全導体平面大地上の均質な回転対称型損失性誘電体として考え、その頂に垂直モノポールアンテナを直立した放射系を取り扱う。接地には、放射状の埋設銅線を使用し、入力インピーダンス、利得および垂直指向性の測定を行った。なお、山岳媒質としては岩石を想定し、また、その形状に関しては成形の容易さから、半球および円錐を用いた。

[†] 現在、NHK長野放送局

^{††} 東北大学 工学部電気工学科

^{†††} 現在、日本テレビ放送網株式会社

“Model Experiments of Medium-Wave Broadcasting Antennas on a Mountain Top” by Hideo Fujikake (NHK Nagano Station, Nagano), Saburo Adachi, Kunio Sawaya (Faculty of Engineering, Tohoku University, Sendai) and Yasuhiro Shibata (Nippon Television Network Corp., Tokyo)

2. 縮尺モデル実験

2.1 実験用山岳モデルの媒質

電磁界の相似則に基づき、MF帯(0.3~3 MHz)をUHF帯(0.3~3 GHz)に換算し、1/1000の小型山岳モデルを用いて実験を行った。岩山を想定した場合、MF帯では比誘電率 $\epsilon_r \cong 14$ 、導電率 $\sigma \cong 0.002(\text{S/m})$ であるので、そのモデル系における山岳誘電体の媒質定数は相似則⁶⁾により、比誘電率 $\epsilon_r \cong 14$ 、導電率 $\sigma = 0.002 \times 1000 = 2(\text{S/m})$ 程度が望ましいことになる。その他に実験に用いる媒質の条件として、次のような性質が望まれる。

- (i) 温度や湿度によりあまり電気定数が変化せず、化学的に安定で接地線を腐食しない。
- (ii) 適度の粘性あるいは硬度を有しており、変形加工が容易である。

上記の諸条件を考慮し、同軸ケーブル内に種々な誘電体を挿入して、反射法によりその媒質定数を測定した。その結果、一般の接地工事において、接地抵抗の低減剤として使用されるアスロン(半水石膏を主成分とする無機組成物)をゲル状で用いることにした。また、導電率 σ が小さくアスロンには劣るものの、比誘電率の値が目標値に近い油粘土(主成分は天然土と鉍物性油)も一部の測定に用いた。モデル系での媒質定数(岩石の換算された目標値)とアスロンの値を表1に示す²⁾。アスロンの誘電率は、目標とした値(換算値)の約2倍であるが、接地には導電率の方が重要であるので、これを用いることにした。

2.2 山岳モデルの構造

図2に入力インピーダンスおよび利得の測定に用いたアンテナと山岳モデルの構造を示す。アンテナの特性は、山岳媒質の電気的特性のみならず、その形状によって大きく変わることが理論的にも示されるが、モデル実験においては、地板上に半球状山岳モデルを置き、その頂にモノポールアンテナを設けた。給電は、地板を貫くセミリジッド同軸ケーブルより、半球の頂点で行う。その際、媒質と同軸ケーブルの外皮の間に絶縁チューブを挿入し、外皮と地板ならびに媒質

を電氣的に絶縁した。

一般に、中波放送アンテナでは、アンテナ長と同程度の半径を持つ埋設放射状銅線(アースネット)を接地として用いる⁷⁾。室内モデル実験における接地方式には、アースネットを模擬した銅製円板を用いた報告例があるが⁴⁾、山頂上では、これを用いるだけの表面積がないと考えられるので、本測定では山岳に沿って放射状に偶数本の接地銅線を埋設して使用した。接地線の設けられたモノポールアンテナを写真1に示す。ここで、接地線の長さおよび本数をそれぞれ l_e 、 N で表す。また、アスロンをゲル状で使用することから、その形状を保つために、ポリエチレン製容器で媒質の外側を覆う。なお、アンテナ長 l は、800 MHzで0.25波長となる94 mmとした。

図3(a)に指向性測定に用いた山岳モデルの構造を

図2 半球状山岳の実験モデル

Experimental model of a monopole antenna on a top of hemispherical mountain.

写真1 接地線付モノポールアンテナ(カバーと山岳誘電体を取り除いた場合)

Monopole antenna with earth wires (without cover and dielectric of mountain).

表1 山岳モデルの媒質定数
Medium constant of mountain model.

Dielectric	$\sigma(\text{S/m})$	ϵ_r	μ_r
岩石	1.0~2.0	14	1.0
アスロン	1.0	30	1.0
油粘土	0.05	12	1.2

図 3 指向性測定用の山岳モデル
Models of mountain for measurement of radiation pattern.

- (a) Model of hemispherical mountain.
(b) Model of conical mountain.

示す。図 2 の地板上のアンテナは、映像法より 2 つの対称なモノポールアンテナに逆相給電した場合と等価である。本測定では、この原理を用いることにより、地板のエッジ回折界の問題を解消する。なお、指向性については、比較のために図 3 (b) に示すような円錐状山岳モデルに対しても測定を行った。

3. 測定結果

損失性媒質を入れた実験を行うのに先き立って、接地線の効果や表面の誘電体カバーの影響を検討するために、図 2 のモデルにおいて損失性媒質を入れない状態でインピーダンスを測定した。その結果を図 4 に

図 4 モノポールアンテナの入力インピーダンス (損失性媒質を入れない場合)
Input impedance of monopole antenna located at height of mountain (without lossy medium).

図 5 山頂アンテナの入力インピーダンス (油粘土の場合)
Input impedance of monopole antenna on top of hemispherical mountain (with oil clay).

示す。●印はモノポールアンテナと地板だけの場合である。共振周波数が 660 MHz と低く、また、共振周波数付近でインピーダンスは高い値となっている。これは給電ケーブルの外側に不平衡電流が流れ、地板とモノポールアンテナが絶縁されているものの、オフセット給電モノポールアンテナに近い動作をしているためと考えられる。△印は接地線を取り付けた場合である。890 MHz で共振し、接地線がない場合に比べて抵抗分が下がる。接地線の長さが $l_0=60$ mm と短いため、1250 MHz 付近でない地線として充分な動作を期待できないが、接地線がない場合との比較から、不充分ながらも地線として動き、給電ケーブル外側の不平衡電流をある程度低減しているものと考えられる。

図 5 は容器内に油粘土を注入し、接地線の数 N を変化させたときの入力インピーダンスである。導電率 σ が小さいため、 N の変化に対してのインピーダンス変動が大きい。ただし、 N が 4 本以上ではあまり

差はみられない。\$N\$ の増加に対して共振周波数が高くなると共に、入力抵抗がかなり減少していく。したがって、油粘土のように導電率の小さな媒質では接地線の数を増やし、接地抵抗の減少を図る必要がある。

図 6(a) は、容器内にアスロンを注入し、接地線の数 \$N\$ を変化させた場合の入力インピーダンスを示す。接地線の数 \$N\$ の変化によらず、共振周波数は 730 MHz と一定であり、\$N\$ の増加に伴い入力抵抗は減少する。しかし、その変化は共振点付近で、90~115 \$\Omega\$ であり、図 5 の油粘土の場合に比べて小さい。これより、アスロンの導電率が高く、主に電流は山岳表面を流れ、山岳内部に電磁界が浸透していないものと考えられる。さらに、接地線の長さ \$l_e\$ を変えた場合を図 6(b) に示す。図 6(a) と同様に、接地効果の向上に伴う僅かな抵抗分の減少が観測される。この要因には、入力抵抗内の接地に伴う損失抵抗分の減少が考えられる。以上のことから、アスロンのように

導電率の高い媒質の場合には、接地線を 4 以上とすればその長さが \$\lambda/6\$ 程度と短くても充分な接地効果が得られるものと考えられる。

次に、この入力抵抗の減少に関連して、放射効率の評価を試みる。一般に、放射効率 \$\eta\$ は次式で定義される。

$$\eta = \frac{R_r}{R_r + R_l} = \frac{R_r}{R} \quad (1)$$

ここで、\$R_l\$ はアンテナの導体損、接地損失、およびアンテナ近傍大地での損失に伴う損失抵抗であり、損失の大部分は接地損失と考えることができる。また、\$R_r\$ は、放射抵抗で実測は困難である。そこで、正弦状の電流分布を仮定し、モード展開法を用いて得られた理論値を用いた¹⁾。入力抵抗 \$R\$ としては、実測値を使用する。この手法により得られた放射効率が図 7 に示されている。接地線を設けることによって効率 \$\eta\$ は向上し、600~900 MHz の周波数帯において 4 本以上で 70~85% の高効率を得ている。また、図 7 に併せて示されている放射抵抗 (計算値) は、平面上のアンテナに比べて、山頂アンテナの方がかなり高いことを示している。これより、山頂アンテナにおいては、簡単な接地を用いても高い放射効率が保持されることが考えられる。平面大地上の \$\lambda/4\$ モノポール中波放送アンテナの効率はアースネットを用いて 50~60% であり、山頂アンテナの効率 70~85% の値はこれに比べて高いものである。

次に、利得について検討を行った。図 8 にアンテナ利得の測定値を示す。なお、この図においては、中波放送用の垂直アンテナの利得の評価に、よく使用される地上利得が示されている。これは、完全導体平面上の微小モノポールアンテナ (絶対利得 4.76 dBi) に対する相対利得である。

(a) 接地線の数を変えた場合

(b) 接地線の長さを変えた場合

図 6 山頂アンテナの入力インピーダンス (アスロンを入れた場合)

Input impedance of monopole antenna on top of hemispherical mountain (with Asron).

- (a) Various number of earth wires.
- (b) Various length of earth wires.

図 7 放射抵抗と放射効率

Radiation efficiency and radiation resistance.

図 8 アンテナ利得の測定値
Measured antenna gain.

アンテナ利得の測定手順は以下の通りである。1 m×2 m の導体板上に長さ 94 mm のモノポールアンテナと山頂モデルアンテナを 1 m 隔てて置き、受信電界強度を測定した。次にモデルアンテナを長さ 94 mm の基準モノポールアンテナで置き換え、同様に電界強度を測定した。基準アンテナと山頂モデルアンテナのインピーダンスの測定値から不整合損失がわかるので、これらを電界強度に加えることにより不整合分を補正し、さらに基準アンテナとの差をとることにより、基準アンテナに対する相対的なアンテナ利得が求まる。基準アンテナの利得は理論的に既知であるので、山頂モデルアンテナのアンテナ利得が得られる。なお、導体板のエッジ回折界により、受信電界強度は周波数に対して±0.5 dB 程度のリップルを含むので、図 8 にエラーバーを添えてプロットした。

山岳高 $a=110$ mm の山頂アンテナの利得は、全帯域において地板上モノポールアンテナ ($a=0$) よりも高く、最大でその差は約 3 dB に達する。また、山岳高 $a=48$ mm の山頂アンテナにおいても、低い周波数域で地板上の利得を上回る。指向性利得の理論的検討¹⁾³⁾において、高さが 0.3 波長程度の山岳を用いた場合、同程度の平面上のアンテナに比べて 2.3 dB 高い利得が得られており、ここでも同様の傾向が示されている。これより、山頂アンテナの利得は、山岳高を 0.3λ 程度に選ぶことができれば、同程度の平面上のアンテナよりも高くなることが実験的に確認された。

図 9(a) に半球モデルにおける山頂アンテナの垂直面指向性を示す。図中において、実線は正弦状のアンテナ電流分布を仮定しモード展開法を用いて得られた理論値であり、●印は容器内にアスロンを注入した時

(a) 半球状山岳モデル

(b) 円錐状山岳モデル

図 9 垂直面指向性
Vertical radiation patterns.

- (a) Model of hemispherical mountain.
(b) Model of conical mountain.

の測定値である。理論値と実測値は、非常によく一致する。このことから、モード展開法を用いた手法は有効であったことが示された。また、 $\lambda/4$ モノポールアンテナに比べて鋭い指向性が理論、実験共に観測されており、アンテナ長 $\lambda/4$ 程度でもアンチフェーディングの効果を期待することができる。

図 9(b) に、円錐状山岳モデルにおける指向性の測定例を示す。併せて、物理光学法²⁾³⁾により求めた理論値も記してある。図 9(a) に比べると、図 9(b) は山岳高が高いので主ビームが鋭く、サイドローブが現れる。また、理論値と実測値は比較的良好に一致しており、理論値の妥当性が示されている。以上の指向性の検討から 0.25 波長程度の長さの山頂アンテナに対しては、正弦状の電流分布で計算してもほぼ妥当な結果が得られることが示された。

4. む す び

岩山上に、中波放送アンテナを設置した場合を想定して、室内モデル実験を行った。アンテナの放射効率、接地線を増すことにより向上し、4本以上設けることで1/8波長程度の山岳高に対する実験では70～85%の高効率が得られた。高効率の得られる原因として、平面上に比べ山頂上では放射抵抗が高くなるのが大きく寄与している。山岳によってアンテナの実効高が増し放射抵抗が増大するため、接地抵抗を適当な値に保つことができれば、全体としてアンテナの放射効率を高くすることができると考えられる。

アンテナ利得は、指向性利得の向上が大きく寄与して、0.3波長程度の山頂にのせた場合の方が、平面上より約3 dB高い値が得られることが、実験的に示された。また、垂直面指向性の測定からは、理論値との良い一致が見られ、垂直アンテナ上の電流分布は、ほぼ正弦上に保たれていることがわかった。

以上の実験的検討から、平面上のアンテナとの比較を通じて山頂アンテナの特性評価を行った。その結果、山岳高を0.125～0.3波長程度、アンテナ長を0.25波長程度に選ぶことができれば、平面上アンテナに比べて同程度もしくはそれ以上の特性を有する放射系が実現できる可能性が示された。今後、より現実

に近い山岳モデルを扱うと同時に、屋外での大型モデル実験を行うなどの、本方式の実用化に向けての研究が必要となってくるであろうと思われる。

本研究の一部は、昭和58年度前期の放送文化基金の助成を受けて行われた。関係各位ならびに御教示をいただいた遠藤敬二博士に深く感謝する。また、実験装置の製作に当り、東北大学技官 猪狩和久氏には熱心な御助力をいただいたことに対しても厚く御礼申し上げる。(昭和60年2月28日受付、昭和60年5月29日再受付)

【参 考 文 献】

- 1) 藤掛, 安達: “山頂に設置された中波放送アンテナの放射特性”, 信学技報, AP 84-4, pp. 25-32 (Apr., 1984)
- 2) 藤掛, 柴田, 沢谷, 安達: “中波放送用山頂アンテナのモデル実験”, 信学技報, AP 84-92, pp. 13-20 (Dec., 1984)
- 3) 藤掛, 安達, 沢谷: “回軸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”, 信学論誌(B), J 68-B, 11, 投稿中 (Nov., 1985)
- 4) H. Page and G. D. Monteath: “The Vertical Patterns of Medium-Wave Broadcasting Aerials”, JIEE, No. 1714 R, pp. 279-297 (Sep., 1955)
- 5) G. Gentile: “MF Transmitting Aerials on Elevated Site”, EBU Rev., Tech. Part, No. 165, pp. 230-241 (Oct., 1977)
- 6) 虫明, 安達: “基礎電波工学”, 共立出版, pp. 151-153 (1975)
- 7) 日本放送協会編: “NHK 技術ハンドブック”, 日本放送出版協会, 第3巻, 送信編, pp. 36-37 (1970)