

日本列島近傍の電力線誘導放射電磁界の観測*
—B₁-31 の結果—

富沢 一郎**・芳野 越夫***・山川 智***

(1983年5月27日受理)

Observation of Electro-magnetic Field,
Induced and Radiated from Power Lines,
near the Japan Islands
—The Results of the Balloon B₁-31—

By

Ichiro TOMIZAWA, Takeo YOSHINO, and Satoshi YAMAKAWA

Abstract: The balloon B₁-31 was launched on October 18, 1982 from Sanriku which were on-boarded a new observation instrument to observe the electromagnetic fields induced and radiated from power lines in Japan. Horizontal and vertical components both of magnetic and electric fields were measured by the instrument.

By means of the directivity of a horizontal loop antenna, we measured directions of original sources of magnetic fields. At 50 Hz the magnetic field mainly comes from the southern part of the 50 Hz region which is spreaded in the Japan Inlands.

Magnetic field intensity at 50Hz varies from 6×10^{-6} A/m (above the launching site) to 3×10^{-8} A/m (500 km). At 60Hz, it varies from 5×10^{-7} A/m (above the launching site) to 6×10^{-8} A/m (500 km). Electric field intensity at 50Hz varies from 3×10^{-2} V/m (above the launching site) to 1×10^{-4} V/m (30 km), however, it reduces to less than the background noise field from 30km to 500 km. At 60 Hz the electric field intensity it is also less than

* 宇宙研特別事業費による研究論文

** 電気通信大学菅平宇宙電波観測所

*** 電気通信大学応用電子工学科

the background noise field all the way.

We compared the observed attenuation rate of the fields, and the results of calculation as dipole models. As a result, at 50 Hz a vertical electric dipole model can produce the steep attenuation rate which is observed up to about 10 km, on the other hand, a horizontal magnetic dipole model can produce the rather slow attenuation rate which is observed from 10 km to 5000 km. At 60 Hz a horizontal magnetic dipole model might produce the slow attenuation rate as well as the latter case of 50 Hz.

概 要

1982年10月18日、三陸より放球された気球 B₁-31 に搭載した新型の観測装置により、日本列島の電力線の誘導放射電磁界を観測した。この装置によって磁界電界の水平・垂直両成分が観測できた。

水平ループアンテナの指向性を利用して、磁界の発生源の方向を探った結果 50 Hz では、磁界は主に東日本の 50 Hz 地域の中でも南半分の部分から来ていることが判明し、他方、60 Hz では、西日本の 60 Hz 地域全体から来ていることが明らかになった。

50 Hz 磁界強度は、 6×10^{-6} A/m (放球点付近) から 3×10^{-8} A/m (500 km) まで変化する。60 Hz では、 5×10^{-7} A/m (放球点付近) から 6×10^{-8} A/m (500 km) まで変化する。50 Hz 電界強度は 3×10^{-2} V/m (放球点近傍) から 1×10^{-4} V/m (30 km) まで変化するが、それ以後では背景雑音強度以下となる。60 Hz では、観測全体に渡って背景雑音強度以下であった。

観測によって得られた電磁界強度の減衰率と双極子モデル計算結果の比較を行った結果 50 Hz では放球点から 10 km 程度までの急激な減衰があり、これについては垂直電気双極子モデルが適用できると考えられ、それ以遠では、水平磁気双極子モデルを指向して緩やかな減衰率を生ずると考えられる。60 Hz の緩やかな減衰率は 50 Hz での遠方の場合と同様に水平磁気双極子モデルが適用できると考えられる。

1. はじめに

今までに、日本列島近傍の電力線誘導放射磁界について、二つの気球(B₁-29, B₁-30)を用いて観測を行ない[1][2]、磁界強度の距離変化を求め、さらに、この変化の様子をいくつかの誘導放射源モデル計算結果と比較することにより、実際の誘導放射の原因を調べて来た[3]。しかし、これらの観測は、水平磁界強度のみについての情報しか得ておらず、しかも、十分なデータが得られていないため詳細な比較ができなかった。

今回は、以下の四つの目的を持っているため、観測を電界・磁界のいずれも水平・垂直の両成分について行った。

- (1) 50 Hz, 60 Hz の電磁界の到来方向を調べ、誘導放射源の位置および広がりを求める。
- (2) 日本列島近傍の 50 Hz, 60 Hz の電磁界強度の絶対値を求める。
- (3) 50 Hz, 60 Hz の電磁界強度の日本列島からの距離に対する減衰率を求める。
- (4) 電磁界の波動インピーダンスを求める。

2. 50 Hz および 60 Hz 電磁界の到来方向

図1の黒丸で示した地点で観測した 50 Hz, 55 Hz, 60 Hz の水平磁界強度を、アンテナの回転方向を示すホールセンサ出力を基準にして調べてみると、わずかではあるが方向による強度依存性がある。アンテナは、ループアンテナを使用しているので、その指向特性は8字型となり、ループの中心軸方向で利得が最小となる。したがって、ループ軸の方向が到来方向と見なせる。しかし、ループアンテナの指向性が 180° の対称性を有するため、方向は一意的に定まらない。

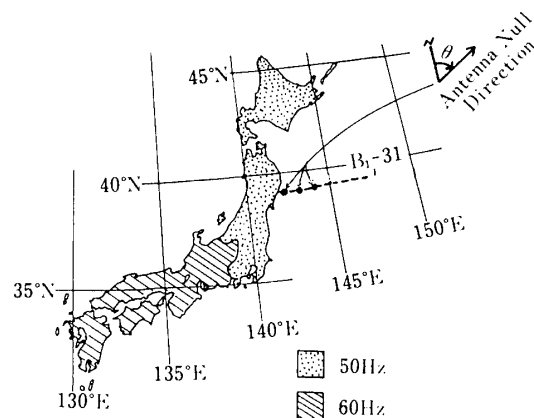


図1 気球 B₁-31 の飛跡と、50 Hz, 55 Hz, 60 Hz 水平磁界の到来方向の観測点 (●印)

図2に、観測で求めた到来方向の範囲を示す。この図では、角度を北から東まわりにとっている。50 Hz は、 $20^\circ \sim 140^\circ$ および $200^\circ \sim 320^\circ$ 、55 Hz は、 $40^\circ \sim 80^\circ$ および $220^\circ \sim 260^\circ$ 、60 Hz は $60^\circ \sim 90^\circ$ および $240^\circ \sim 270^\circ$ 方向から到来していることがわかった。観測が日本列島近傍で行われていることから考えると、50 Hz および 60 Hz の到来方向は、それぞれ $200^\circ \sim 320^\circ$ 、 $240^\circ \sim 270^\circ$ であると推定できる。しかしながら 55 Hz は、電力線誘導放射と無関係であるので、このいずれかを決定できない。50 Hz のほうが 60 Hz に比べて広がっているのは、観測地点と誘導放射源との距離の差である。60 Hz 地域は、観測地点から 300 km 以上離れており、しかも、見掛け上の大きさが数 10° 程度であり、他方、50 Hz 地域は、観測地点から見て北から南まで広がっていることから大きさは 180° 程度になる。60 Hz の到来

方向の広がり、ほぼ上の見掛け上の大きさと一致している。しかし、50 Hz では、見掛け上の大きさに比べて小さくなっている。しかも、方向は、50 Hz 地域の南半分に対応することから、誘導放射源が東南部、関東により多く分布していることを示すもので誘導放射源の原因及びそのモデルを考える上で重要な意味がある。

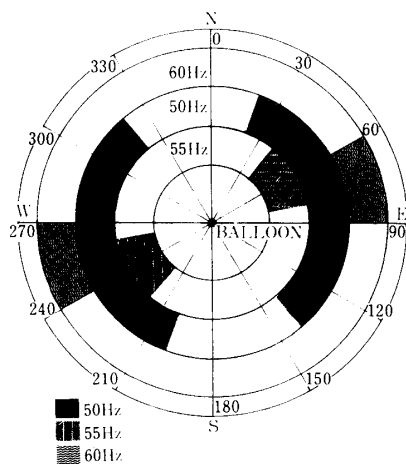


図2 50 Hz, 55 Hz, 60 Hz の到来方向。

アンテナが双指向性であることから 180° 対称性がある。

3. 50 Hz および 60 Hz の電磁界強度とその距離変化

気球 B₁-31 の放球後の位置と高度を図3に示す。気球は9時ころまでほぼ垂直に上昇

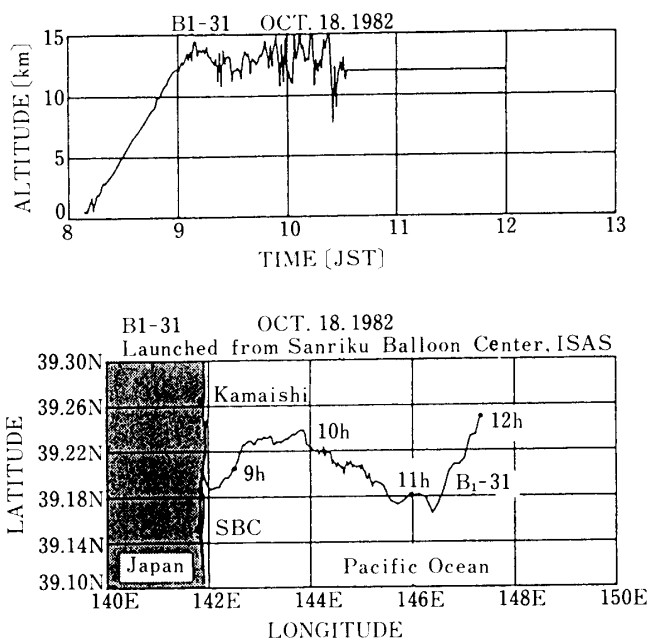


図3 気球 B₁-31 の飛翔高度と位置

し、これ以後ほぼ水平に飛翔した。この様子から、距離変化を二つの部分に分けて考えることにする。第一の部分は、放球から9時までの垂直方向の距離変化、第二の部分は、9時以後の水平方向の距離変化である。垂直方向は、地上からの高度を水平方向は日本列島からの水平距離を、距離の値として採用した。ただし、これらの距離は、正確に誘導放射源の位置が求まっていないため、便宜的に用いている。

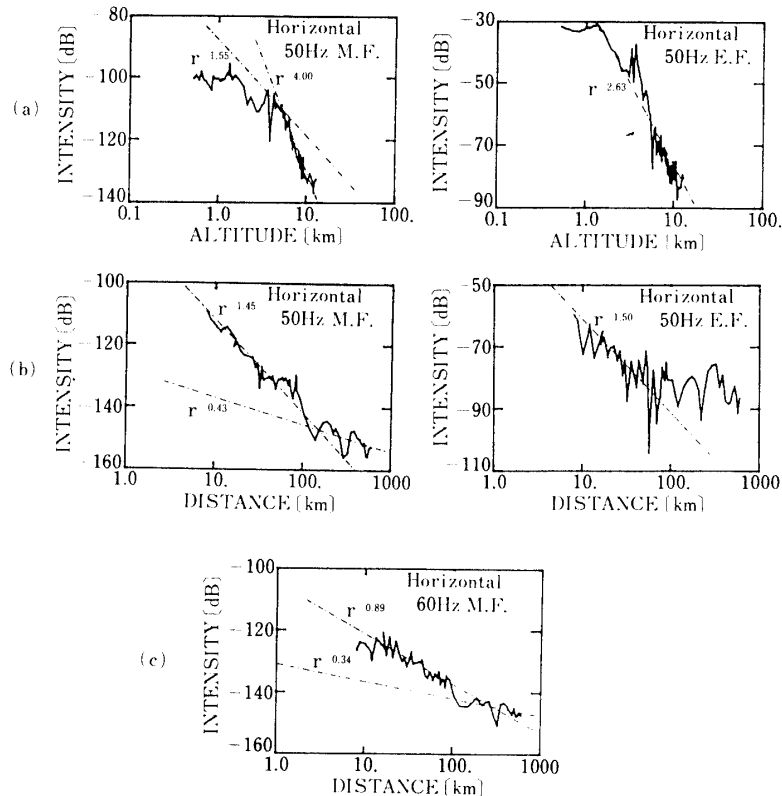


図4 距離（高度）に対する水平電磁界強度の変化

- (a) 放球から9時までの垂直上昇部
- (b) 9時以後の水平飛翔部
- (c) 60 Hzの9時以後の水平飛翔部、電界は背景雑音以下であった

3.1 垂直方向の距離変化に対する強度変化

放球から9時までのほぼ垂直に上昇しているときの50 Hzの強度を高度に対して求めた結果を図4(a)に示す。ここでは、 $0\text{ dB}=1\text{ A/m}$ (磁界), $0\text{ dB}=1\text{ V/m}$ (電界) とした。磁界強度は、放球直後で -105 dB ($5.6\times 10^{-6}\text{ A/m}$) から気球の上昇とともに急激に減衰し、高度10 kmで -130 dB ($3.2\times 10^{-7}\text{ A/m}$) となる。この間の減衰は約25 dBである。一方、電界強度は、放球直後で -30 dB ($3.2\times 10^{-2}\text{ V/m}$) から高度10 kmで -80 dB ($1.0\times 10^{-4}\text{ V/m}$) へと急激に減衰する。この間の減衰は約50 dBで、磁界の減衰より大きい。次に、

この間の減衰率を求めてみると、磁界は放球点を含めた場合距離(高度)の -1.55 乗で 5 km以上の高度では -3.63 乗となり、電界は -2.63 乗、 -4.94 乗となる。磁界、電界のいずれも 5 km以上で、より急激に減衰する。

60 Hzの磁界強度は -130 dB (3.2×10^{-7} A/m)程度で大きな変化はなかった。一方、電界強度は、背景雑音に埋まっており、強度が -70 dB (3.2×10^{-4} V/m)以下である。

3.2 水平方向の距離に対する強度変化

9 時以降のほぼ水平に飛翔したときの 50 Hz電磁界強度を日本列島からの距離に対して求めた結果を図4(b)に示す。磁界強度は、距離 10 kmにおいて -120 dB (1.0×10^{-6} A/m)、 100 kmにおいて -140 dB (1.0×10^{-7} A/m)、 500 kmにおいて -150 dB (3.2×10^{-8} A/m)となり、 10 kmより近いところに比べて少しゆるやかな減衰を示す。特に 100 km以遠は距離の -0.43 乗と、 100 km以内の -1.45 乗に比べて更にゆるやかな減衰となっている。一方、電界強度は、 10 kmにおいて -70 dBであるが、約 30 kmにおいて背景雑音強度以下となり、それ以遠では -80 dB (1×10^{-4} V/m)以下である。減衰率は距離の -1.5 乗で磁界とほぼ同じ値となる。

60 Hzの磁界強度の距離変化を図4(c)に示す。この強度は、 10 kmにおいて -125 dB (5.6×10^{-7} A/m)、 100 kmにおいて -135 dB (1.8×10^{-7} A/m)、 500 kmにおいて -145 dB (5.6×10^{-8} A/m)となる。減衰率は、 100 kmまで距離の -0.89 乗、 100 km以遠で -0.34 乗となり、 50 Hzに比べて少しゆるやかな減衰を示す。一方、電界は、背景雑音強度 -80 dB (1.0×10^{-4} V/m)以下である。

3.3 波動インピーダンス

電界強度と磁界強度の比である波動インピーダンスは、誘導放射源近傍の電磁界分布を表わす上で便利なパラメータである。また、実際には、誘導放射源の原因により大きく違ってくことから、この原因を探る上で有効な値である。ここでは、波動インピーダンス Z を全電界強度/全磁界強度から求めた。この結果を図5に示す。 50 Hzは、放球点近傍で 700Ω 、 5 kmで 377Ω 付近、これ以後 377Ω 前後の値をとる。ここでの 377Ω は、ELF波

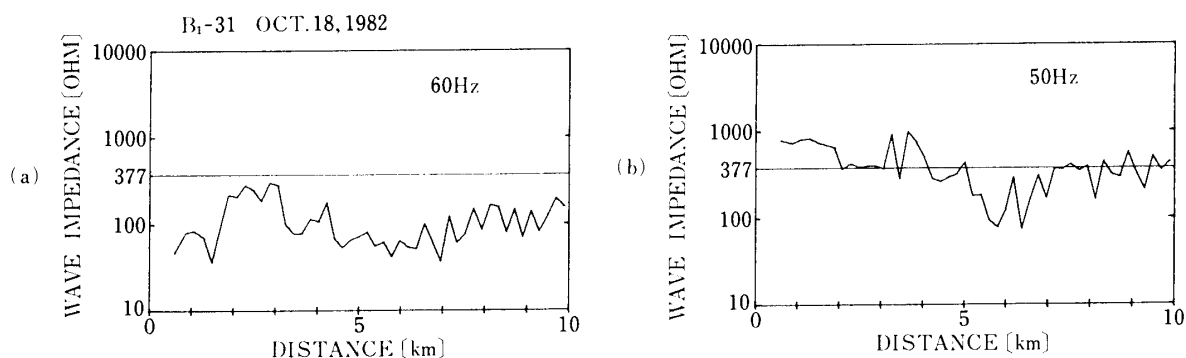


図5 波動インピーダンスの距離変化

(a) 60 Hz. この値は、上限を与えている。

(b) 50 Hz

の伝搬モードである TM_0 の波動インピーダンスに当り、この値が誘導放射源の区別をする目安となる。

60 Hz では、電界の値が背景雑音強度以下であるので、図5(a)の値は、波動インピーダンスの上限を示している。60 Hz では、この値は 100Ω 前後であることから50 Hz に比べて小さいことがわかる。

4. 観測結果とモデル計算値との比較

4.1 モデル計算

電力線誘導放射源の基本モデルは、水平磁気双極子で表わされる電流ループモデルと垂直電気双極子で表わされる地面と電力線間のコンデンサモデルの二つを主として考えている。この二つの基本モデルのいずれが現実の値に合致するかが、誘導放射の原因を究明す

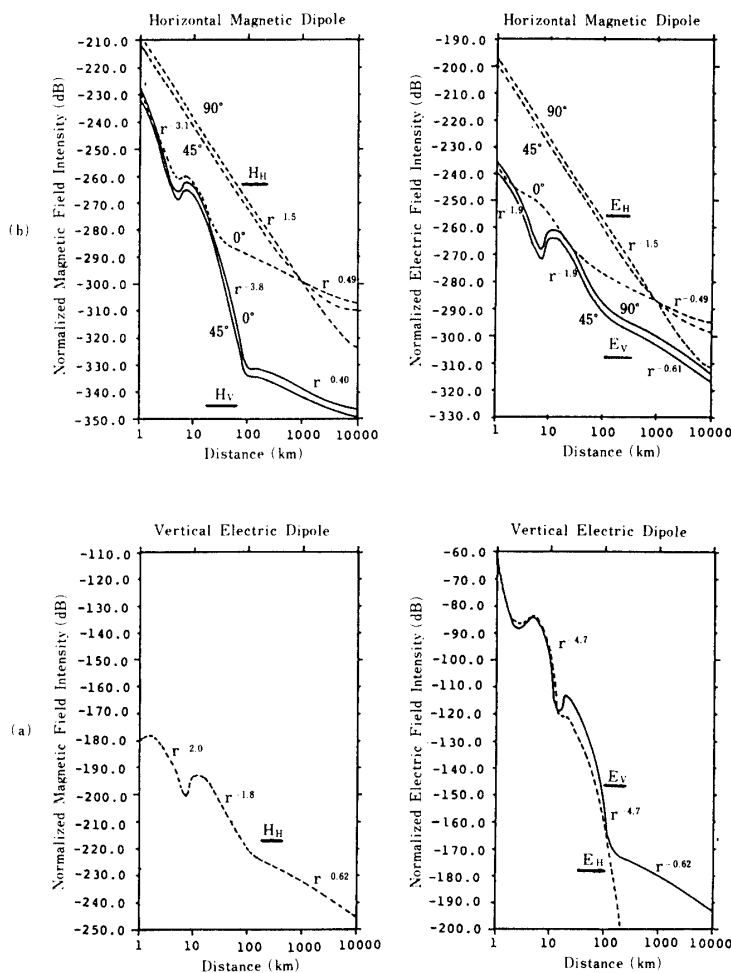


図6 モデル計算結果

- (a) 垂直電気双極子モデル
- (b) 水平磁気双極子モデル

る上で非常に重要である。B₁-29での磁界減衰率を説明する上からは、水平磁気双極子モデルが適当であると考えた[3]。今回の観測では、B₁-29に比べて多くの情報を得ているので、二つの基本モデルの計算値と詳しい比較ができる。

図6に、二つの双極子モデル各々についての計算結果を示す。この計算では、双極子を地表と電離層の成す球殻状導波管内に置き、この双極子からの地表距離に対する電磁界強度を求めた。ただし、いずれの強度も双極子モーメントで正規化した。図中でHは磁界、Eは電界を表わし、添字のHは水平成分、Vは垂直成分を表わしている。水平磁気双極子の場合、方向性があるので、双極子軸からの方向角を0°、45°、90°の三通り示してある。水平磁気双極子では、電界、磁界のいずれも水平・垂直の両成分が存在し、しかも、水平成分のほうの値が大きい。他方、垂直電気双極子では、磁界は水平成分しか存在せず、電界は水平・垂直の両成分が存在するが、垂直成分のほう大きい。

二つのモデルとも、距離が大きくなるに従って波打つように強度が変化するのは、導波管内を伝わるモード間干渉によるものである。50 Hz、60 Hzでは、波長に比べて導波管の厚さ、つまり電離層の高さ(約80 km)がはるかに小さいため、TM₀モードしか導波管内を伝搬できないので、その他の高次モードやTEモードは急激に減衰する。このため、約100 km以遠ではモード干渉が起きない。

比較の便利のため、各曲線の近似に用いた直線(一点鎖線)とその減衰率を求め、図中に示した。

4.2 放球点近傍の減衰率

図4(a)から放球点近傍では、50 Hzの磁界強度が $r^{-1.55}(r < 5 \text{ km})$ 、 $r^{-3.63}(r > 5 \text{ km})$ 、電界強度が $r^{-2.63}(r < 5 \text{ km})$ 、 $r^{-4.94}(r > 5 \text{ km})$ という指数関数で近似した。しかし、10 kmより近い点では、誘導放射源からの距離についてのあいまいさが大きく、この減衰率はかなり大きな誤差を含んでいる可能性がある。したがって、大まかな特徴についてのみ、観測と計算とを比較する。

図4(a)の特徴としては、減衰率が磁界では $r^{-1.5} \sim r^{-4}$ 電界では $r^{-2} \sim r^{-5}$ で、電界のほうが早く減衰する点が上げられる。この特徴と図6の H_H 、 E_H の減衰特性を比較すると、磁界の減衰率はいずれのモデルでも説明できるが、電界の減衰率が大きくなる点は垂直電気双極子モデルの減衰率でないと説明できない。また、電界のほうが減衰率が大きいという点は、やはり垂直電気双極子モデルのほうが合致する。以上から考えると、放球点近傍の誘導放射源としては、電力線と大地の成すコンデンサ・モデルに近いと言える。

4.3 10 km 以遠の減衰率

図4(b)の特徴としては、減衰率が磁界では $r^{-1.45} \sim r^{-0.43}$ 、電界では $r^{-1.5}$ で、電界と磁界の減衰率がほぼ一致する点が上げられる。一方、60 Hzの磁界減衰率が $r^{-0.89} \sim r^{-0.34}$ で50 Hzより少し減衰がゆるやかである。

これらの特徴を図6の H_H 、 E_H の減衰特性と比較すると、100 km以内で $r^{-1.5}$ という減衰を電磁界の両方が示すという特徴は、水平磁気双極子の場合だけが示す。垂直電気双極子では電界の減衰率が大きくなっており異なる。また、100 km以遠での $r^{-0.43}$ という減衰特性も $r^{-0.49}(\theta = 90^\circ)$ という計算値とほぼ一致する。一方、60 Hzの $r^{-0.89} \sim r^{-0.34}$ という

減衰率は、いずれのモデルでも説明できない。また水平磁気双極子と考えると $r^{-0.49}$ に比べて少し小さい。これは 60 Hz の場合の距離を実際より小さくとり過ぎているため、見掛け上ゆるやかになっていることが一つの原因と考えられる。この差については今後解決すべきところである。以上から考えると、50 Hz の 10 km 以遠での誘導放射源としては、電流ループ・モデルで説明できる。この点は、 B_1-29 の場合と一致する [3]。ただし、60 Hz の場合は、減衰率が少し異なることからはっきりわからないが、同様に電流ループ・モデルに近いと考えられる。

4.4 波動インピーダンス

一般的には、送信源から十分遠方での電磁界の波動インピーダンスは 377Ω となる。しかし、送信源近傍においては、距離とともに急激に減衰する近傍電磁界が存在するため 377Ω とはならない。この近傍における波動インピーダンスは、送信源が、電気双極子であるか、磁気双極子であるかによって変わってくる。前者では、 377Ω より大きく、後者では、 377Ω より小さくなる。例えば、図 6(a) では、 $r=10$ km において 3Ω となる。図 5(b) で 50 Hz の波動インピーダンスが、放球点近傍で 700Ω と 377Ω より、わずかに高いが、2 km 以遠では、 377Ω 前後の値をとることから、放球点の極めて近傍では電気双極子型の特性を示すが、少し離れるとほぼ伝搬モードとなり誘導放射源の特性は消えている。放球点近傍において電気双極子の特徴を示す点は、4.3 での減衰特性から求めた結果と一致している。

一方、60 Hz の場合、上限が 100Ω 程度と 377Ω に比べて小さいことから磁気双極子型と言えるが、遠方においても 377Ω に近づかない点は、伝搬モードの存在から考えると矛盾している。したがって、今回の観測結果のいずれかに問題があったのかもしれない。今後 60 Hz の波動インピーダンスについて測定し直す必要がある。

5. 結 論

気球 B_1-31 を用いて、日本列島近傍の電力線誘導放射電磁界を観測した。この観測では、従来の磁界のみの観測を改めて、電界・磁界の水平・垂直の両成分をほぼ同時に観測し、しかも、水平アンテナの指向性を利用して到来方向の測定も行った。この結果、次のような新たなことがわかった。

- (1) 50 Hz の到来方向は、約 120° の広がりを示している。またこの方向は、東西南部から関東を指しており、50 Hz 地域の誘導放射源分布を考える上から重要な意味がある。
- (2) 60 Hz の到来方向は、約 30° の広がりを示している。また、この到来方向は、西日本の 60 Hz 地域と対応しており、しかも、この広がり観測地点から見た 60 Hz 地域の広がりとはほぼ一致する。したがって、60 Hz が西日本から到来していることが確かめられた。
- (3) 水平磁界強度は、50 Hz では 6×10^{-6} A/m から距離とともに急激に減衰し、500 km で 3×10^{-8} A/m となり、60 Hz では 3×10^{-7} A/m から 50 Hz に比べてゆるやかに減衰し、500 km で 6×10^{-8} A/m となる。

- (4) 水平電界強度は、50 Hz では 3×10^{-2} V/m から水平磁界に比べて急激に減衰し、約 30 km で 1×10^{-4} V/m となり、これ以遠では背景雑音強度以下となる。他方 60 Hz では、背景雑音以下となり強度を求められなかった。
- (5) 放球点近傍で観測された磁界の距離 r に対する減衰特性が $r^{-1.5} \sim r^{-4}$ 、電界では $r^{-2} \sim r^{-5}$ でしかも電界のほうが減衰率大きい、という特徴と、モデル計算によって得られた減衰率を比較した。この結果、観測の特徴を説明できるのは、垂直電気双極子であると結論した。ただし、減衰率の正確な比較は距離のあいまいさの問題から行わなかった。
- (6) 10 km 以遠での 50 Hz 水平磁界の減衰特性 $r^{-1.45} \sim r^{-0.43}$ および水平電界の $r^{-1.5}$ とモデル計算結果を比較すると、水平磁気双極子の場合の減衰特性とほぼ一致する。他方、60 Hz の水平磁界の減衰特性 $r^{-0.89} \sim r^{-0.34}$ は、水平磁気双極子の減衰特性より小さくなっている。これは、減衰率を求める場合の距離に西日本までの距離を考慮しなかったことが原因ではないかと考えられる。
- (7) 観測から求めた 50 Hz の波動インピーダンスは、放球点近傍で 700 Ω と電気双極子型の特徴を示す。この点は(5)での結論と合致する。しかし、値は垂直電気双極子を考えた場合に比べはるかに小さい。したがって、垂直電気双極子のみを誘導放射源と考えることは困難であり、複合的な誘導放射源を考えなければならない。
- (8) 遠方では、50 Hz の波動インピーダンスは、ほぼ伝搬モードのインピーダンス 377 Ω に一致する。よって、50 Hz の磁界が伝搬モードによって、かなり遠方まで達していると推測できる。

最後に、気球観測に全面的な御援助を頂いた西村研、広沢研の方々に深く感謝する。観測装置の製作に多大な貢献をした水野良之君、本下昌彦君に深く感謝する。

参 考 文 献

- [1] 富沢一郎・芳野赳夫：大気球シンポジウム (1978)
[2] 富沢一郎・芳野赳夫：大気球シンポジウム (1980)
[3] 富沢一郎・芳野赳夫：大気球シンポジウム (1981)