

## 日本列島周辺における電力線誘導・放射電磁界

ELECTROMAGNETIC FIELD AROUND JAPAN ISLANDS, INDUCED AND RADIATED

FROM POWER LINES

## — 気球観測 —

BALLOON OBSERVATION

富沢 一郎

芳野 越夫

ICHIRO TOMIZAWA

TAKEO YOSHINO

電気通信大学

UNIVERSITY OF ELECTRO-COMMUNICATIONS

## 1. はじめに

電力線などの電力施設から電磁界線等に対する誘導・放射電磁界について、古くから多くの研究がなされてきた<sup>(1)</sup>。しかし、こうした誘導電磁界が電力施設から離れた地点において、どのような分布をしているかという問題については検討がなされていない。この理由は、誘導電磁界の影響が遠方では無視できるとして扱ってきたものと推測される。しかしながら、現在、自然電磁界(例えば、空電、シュマン共振、ELF電磁波、VLF放射、ホイッスル)を観測する場合、こうした電力施設からの誘導放射電磁界の影響が妨げとなっている。また、電力線からの電磁放射とVLF帯自然電磁放射が関連して観測される<sup>(2)</sup>。地球磁気圏内のオーロラ現象のような自然現象のトリガとして作用している<sup>(3)</sup>。こうした報告もあり、新しい問題として注目されてきた。こうした電力施設からの電磁界放射の影響は、電力量の増加に伴って拡大して来ると推測されるが、将来の影響を予測する上で電界・磁界の観測点における誘導放射電磁界の分布や変動を把握しておらず、しかも、その発生機構自体についてもわかっていない。筆者等は、このような基本的事項について、気球、ロケット、衛星等の観測法を使う観測と、地上観測と組合せて明らかにすることを目的としている。

日本列島は、世界的に見ても総電力量が、比較的狭い地域に集中しており、しかも、日本列島にはこれに匹敵する地域がないので、日本列島は、一つの独立した誘導放射源と見なされ、

その上、日本列島のほぼ中央部で50 Hzと60 Hzの二つの周波数使用地域が分割されているので、互いに比較できる利点があり、日本列島周辺での観測は、電力線誘導放射源をモデル化する上で適している。

本報告では、気球による水平磁界観測結果と単純なモデル計算との比較を行う。

## 2. 気球観測

電力施設のごく近傍(数10 km以内)における誘導放射電磁界は、ほとんどその電力施設自体の特性を表わしている。日本列島自体を誘導放射源として観測するためには、できるだけ日本列島から離れたなければならぬ。日本列島から約1500 km地点まで連続観測できるレーン気球方式<sup>(4)</sup>は、距離の点ではもちろんのことながら、電源として電池を使用しており電源から50 Hz、60 Hzの混入の心配がなく、高度を一定高度で飛行させる上に、重量制限が比較的ゆるやかである等の利点があるので、こうした観測に適している。

## 2.1 気球および観測装置

図1に観測に使用した気球B1-29の飛行時の荷姿を示す。気球は、容積1000 m<sup>3</sup>、全重量80 kgであり、また、気球からの吊下部に1 rpmで回転するモータを入れ、受信アンテナを回転させ、最下部に観測装置を入れゴンドラを取付けた。

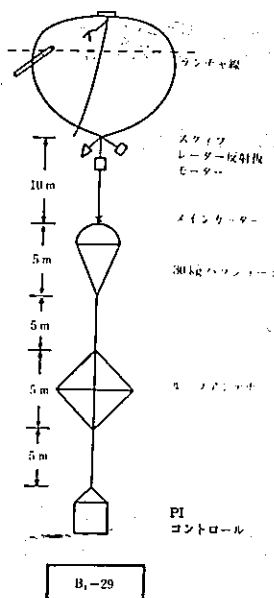
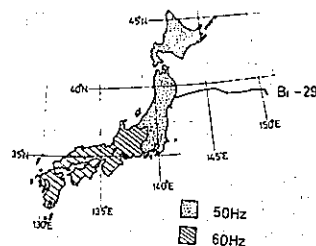


図1. 気球B<sub>1</sub>-29の  
発射時の荷姿

⇒ 図3. 日本列島上の  
商用周波数分布と  
観測気球B<sub>1</sub>-29の  
経路



この気球からのテレメータを、可視範囲(約500km)では直接受信し、また、可視範囲外では、この気球と受信点の中間にある中継気球で中継して受信した。

図2に観測装置のブロックダイアグラムを示す。今回の観測では、商用周波数50Hz、60Hzおよびそれらの高調波の水平磁界強度を測定するため、10Hz～2kHzの広帯域受信機を用いた。アンテナは、対角線長5m、巻数80回のテターループで、この出力カトランスを接触レインバーダンス交換を行った後、プリアンプで増幅し、10Hz～2kHzのBPFを通し、この後でAGCをかけている。最後に、この出力を中心周波数6kHzのAMに変換し、これを伝送した。また、AGC電圧は、他のチャンネルを通して伝送した。今回の観測では、アンテナとトランス部を合わせた特性測定が不完全であったため、周波数特性の補正ができなかった。絶対強度は求められなかった。このため、観測結果は全て放球点上空での磁界強度と基準とした相対値で求めた。

## 2.2 観測状況

観測気球B<sub>1</sub>-29は、1978年9月27

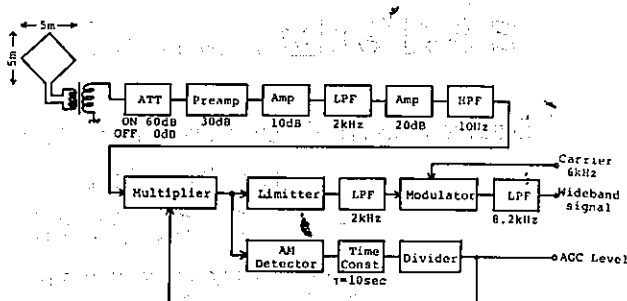


図2. 電カ線誘導放射磁界観測装置ブロックダイアグラム

日0941JSTに、東京大学宇宙航空研究所三陸大気球観測所(39°9'N, 41°49'E)より放球され、太平洋上を東方に飛翔した。中継気球は、これに先立ち、0730JSTに放球され、観測気球放球時には既に高度25kmに到達していた。観測気球は、当初高度16kmで水平に飛翔する予定であったが、高度11km付近でガス漏れを生じたが図3に示すように急激に降下しながら東方に飛び続け、15時に放球点東方780kmの海上に着水した。

今回の観測では、さらに、中継気球自体の何項が不明で、偶然アンテナが観測気球方向を向いたときのデータしか得られなかった。350km以上では観測点の値しか得られなかった。

※注: 現宇宙科学研究所

## 2.3 データ解析方法

データ解析手順を図に示す。気球から伝送された6kHzのAM信号は、受信時、録音時、発球から50Hzを減入するのを防ぐため、AM信号のままデータレコーダに録音し、解析

2倍の速度で再生し、さらに、1 kHzのH  
周波数を通した後でAM検波する。これにより、  
50 Hzの直接混入を全て防止し、  
倍速再生により50 Hz、60 Hzが、  
100 Hz、120 Hzとなるので、  
50 Hzの直接混入とは明確に区別できる。  
また、解析上のダイナミックレンジを確保する  
ため、40 Hz以下の信号強度の強いシミュ  
レーションを除去し、デジタルデータに変換後A/D  
変換で補正し、これをスペクトル解析した。  
スペクトル解析は、1回のスペクトルを求め  
るために1024点のデータを使用し、FFTを  
用いて行った。512点のデータは、1秒の  
120回のスペクトルを求め、最後にこれらの平  
均を求めて平均スペクトルを得た。0~100 Hz  
のスペクトルを求める場合、サンプリング周波  
数は200 Hz、1回のスペクトルを得るのに  
要するデータ量は5.12秒、平均スペクトルを得  
るためのデータ量は5分8秒となる。このとき  
の周波数分解能は0.2 Hzである。

### 3. 観測結果

#### 3.1 商用周波数(50 Hz, 60 Hz)水平磁界 の存在

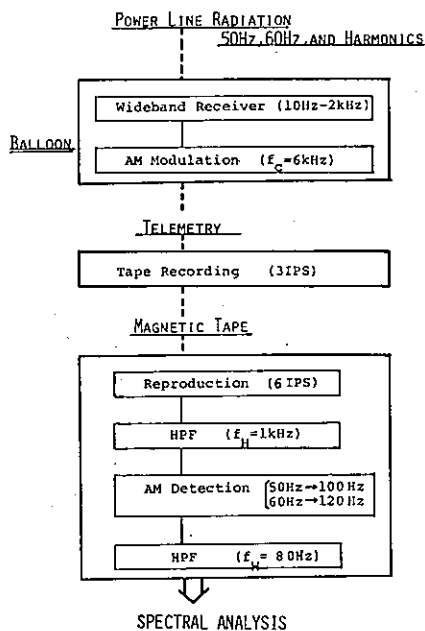


図4. データ解析手順

0~100 Hzの平均水平磁界強度スペクト  
ルを、放球点からの距離に従って5点を調べ、  
これを図5に示す。左端が放球直後、右端が着  
水直前で、左端のスペクトルは、減衰器を入れ  
ているため見掛け上小さい。また、40 Hz以  
下は、デジタルデータに変換する際に、HPF  
で除去されている。

図中の右端に商用周波数50 Hzおよび60  
Hzの位置を示す。50 Hz成分は、全スペ  
クトルにおいて背景雑音より強く、60 Hz成分  
は、左端のスペクトルを除いて全スペクトルに  
おいて背景雑音より強いので、両周波数成分と  
も、誘導放射磁界成分を含んでいると考えられ  
る。50 Hz地域において観測を行っているの  
で60 Hz成分は、受信感化上で混入したとは  
考えられないので、実際の観測値であることは  
明らかである。他方、50 Hz成分は、テレメ  
ータ受信以後の地上での混入に十分注意して解  
析しているため実際の観測値であることは確実  
である。以上から、50 Hz、60 Hzの電力  
線誘導放射の水平磁界成分が、放球点から約4  
0 kmの東方海上において、背景雑音より強く  
存在していることがわかった。

さらに、図5において、57.5 Hzと85  
Hz付近のスペクトルピークは、気球に搭載し  
た気圧計の符号電圧用モータおよびその符号電  
圧計自体からの直接混入である。

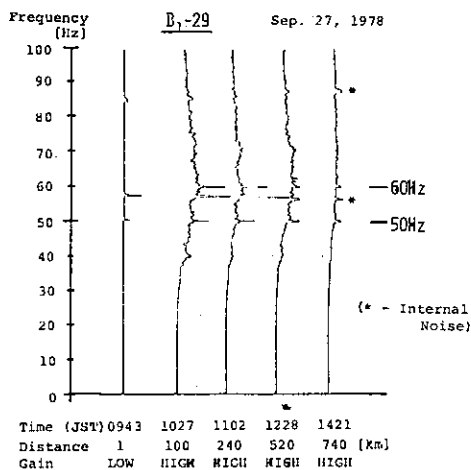


図5. 放球点からの距離に従って5点のスペクト  
ルを左から並べた。各々のスペクトルにおいて  
右方にスペクトル強度が高くなっている。  
57.5 Hzと85 Hzは気球内部混入である。

### 3.2 50 Hz, 60 Hz 水平磁界強度の放球点からの距離に対する変化

AGCおよび減衰路の補償を行、E後平均ス  
ペクトルを求め、50 Hz, 60 Hz 成分の強度から  
背景雑音分を差し引いて得られた強度を、放球  
点上空の50 Hzの強度を基準とし、放球点か  
らの距離に対して図6のようなプロットした。

放球直後、60 Hzは内部雑音以下となり強  
度を求められなかった。また、350 km以遠  
では、2.2 dB/100 kmより数点しか値を  
得ることができなかった。

最小二乗法を用い直線近似した結果を図6に  
破線で示した。50 Hzの水平磁界強度は、約  
100 kmまで15 dB/100 kmの急激な  
減衰を示すが、100 km以遠では、1.3 dB  
/100 kmのゆるやかな減衰に変わる。一  
方、60 Hzの水平磁界強度は、100 km以  
遠において1.6 dB/100 kmであり、5  
0 Hzの100 km以遠の減衰率に比べてず  
ばに大きい。ここで求めた減衰率は、E層帯の  
伝搬モードであるTM<sub>0</sub>の50 Hzにおける減  
衰率0.2 dB/100 km<sup>(5)</sup>に比較して大き  
い。したがって、今回観測した50 Hz, 60 Hz  
の水平磁界は、日本以外の遠方の国から伝搬し  
てきたとは考えられない。また、日本列島から  
遠ざかるに従って急激に減衰するに似て、50  
Hz, 60 Hzの水平磁界が、日本列島に起源  
があると考えられる。これは、最初に述べたよ  
うに、日本列島周辺での観測は、日本列島のサ  
テライト放射線と考えればよいことを示している。

## 4. 誘導放射線の単純なモデルと そのモデルを用いた誘導放射 電磁界の計算

### 4.1 誘導放射線のモデル化

誘導放射線と別の角度から見れば、送信機に  
接続されたアンテナと考えられる。E層帯の  
アンテナから誘導放射する電磁界の強度は、ア  
ンテナを流れる電流と、アンテナの長さや形状  
などにより、アンテナ電流とアンテナ長またはア  
ンテナ面積の積に比例するので<sup>(5)</sup>、誘導放射線

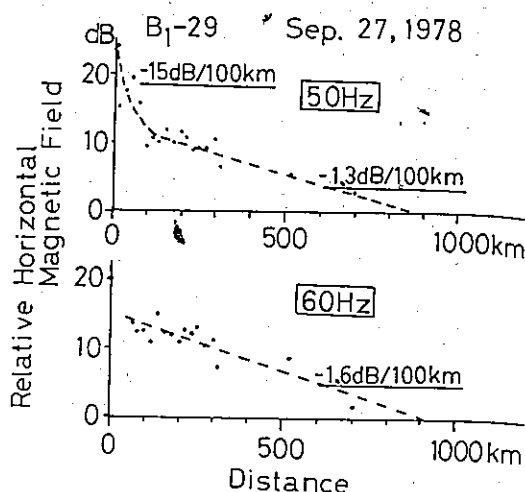


図6. 50 Hz, 60 Hz 水平磁界強度の  
放球点からの距離に対する変化。  
・が観測値を表わし、---は観測  
値から最小二乗法で求めた減衰率を  
表わしている。

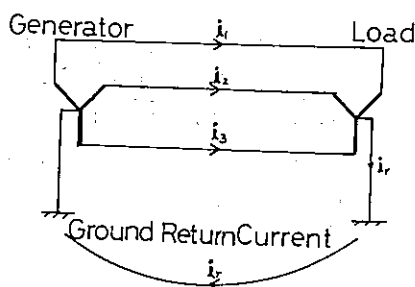
として最も可能性のある場合は、いずれの値  
も大きい送信線である。この点から、誘導放射  
線を送信線と考える。これをモデル化する。

送信線をなめた全送信線系は、理想的に  
その送受信は全て負荷で消費され、損失はな  
い。実際には、負荷側に理想的な負荷を接続し  
ない場合は少なく、多くの場合様々な不平衡、非  
直線負荷が接続されている。また、送信線側  
も全てが完全に平衡している場合は少ないの  
で、不平衡負荷の一部を形成している。

図7に示す単純化した3相線方式の送信  
線系が、不平衡状態になるとは、電流 $I_1$ ,  
 $I_2$ ,  $I_3$ の和は零とならないため、帰還電  
流が流れ、接地点を通じて大地を流れ大きな  
電流ループを形成する。これをアンテナ回路  
と見ると、垂直ループアンテナに置き換えると  
アンテナ電流が $I_1$ , ループアンテナの面積  
送信線と帰還電流の成すループの面積と考  
えられる。この面積は、接地方式、接地線の有無  
大地電導率等のパラメータにより変化するの  
で一義的に定めることはできない。

ここで形成されるループアンテナの大きさ  
は長さ数100 km、高さ数100 m程度であ  
るから、50 Hz, 60 Hzの自由空間波長6  
00 km, 5000 kmに比べてはるかに小

図7.  
単純化し  
た双極子  
線方式送  
受信系統  
とこれを  
流れる電流



こので、このループアンテナを微小水平磁気双極子で表わすことができる。したがって、誘導放射現象のモデルとして微小水平磁気双極子を考へ、この双極子を用いて誘導放射電磁界が計算できる。

#### 4.2 水平磁気双極子モデル計算と観測結果の比較

水平磁気双極子は、大地と電離層の成す球殻状の導波管内に置かれており、この双極子からの誘導放射電磁界は、導波管の境界の条件により大きく変化する。ここでは、図8K示すようなパラメータを用いて計算を行った。計算は、Galejsの球殻状導波管モード理論式<sup>(5)</sup>に従い、観測地双極子近傍であることを考慮し、そのモードまで含めて計算し、水平磁気双極子が

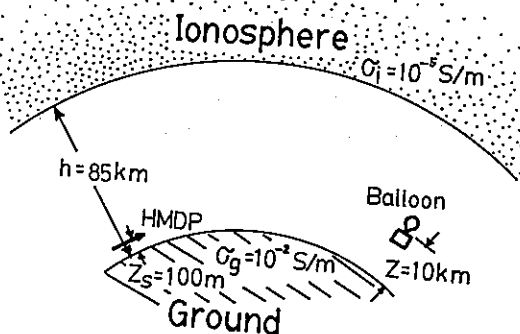


図8. 水平磁気双極子(HMDP)モデル計算に使用したパラメータ

$\sigma_g$ : 大地電気伝導度,  $\sigma_i$ : 電離層電気伝導度  
 $Z_s$ : HMDPの高さ,  $Z$ : 観測地点の高さ  
 $h$ : 電離層高度

らの距離に対する水平磁界強度を、磁気双極子モーメント  $I \cdot da$  ( $I$ : 電流,  $da$ : ループ面積) で正規化して算出した。変化の様子は、双極子軸方向何れへ成す角度  $\theta$  により変わるもので、 $\theta$  をパラメータとした結果を図9K示す。この計算において、50 Hz と 60 Hz との違いはほとんど無視できるので、図9を用いて両用波数について考察する。

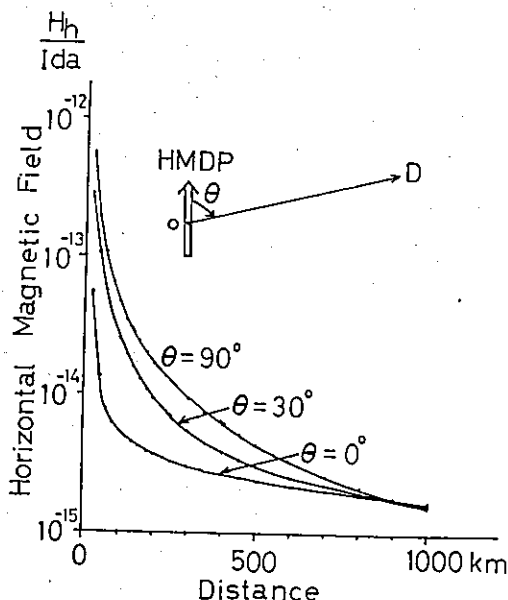


図9. 水平磁気双極子による水平磁界強度を双極子軸に対する角度  $\theta$  をパラメータとし、双極子からの距離に対して求めた。

距離 D	角度 $\theta$		
	0° 180°	30° 150°	90°
100 km	5	13	13
200 km	2	6	6
300 km	1.3	4	5
500 km	0.8	1.5	3
1000 km	0.7	1.0	1.8

表1. 水平磁界強度の減衰率 [dB/100km]

水平磁界強度の減衰率は、双極子からの方向と距離によって変化する。この様子を表1Kまとめよう。

観測地は、放射点から100kmまでの50Hzの減衰率が15 dB/100 km となっており、表1Gは、同様に100kmの点で  $\theta$  が30°, 90°の時、13 dB/100 km とする減衰率を示していること

から、放射点付近の50 Hz水平磁界は、放射点  
付近に置かれた水平磁気双極子で表わすこ  
とができる。これに続く100 km以上の50 Hzの減  
衰率1.3 dB/100 kmは、表1では300  
km以上の地点でみられているので、これを  
考えると観測結果を説明するKは双極子  
の位置を放射点から300 km以上離れた点  
にならない。言い換えると、100 km以上の水平  
磁界は放射点から300 km以上離れた点  
にある水平磁気双極子で表わすことができる。

他方、60 Hzの観測値1.6 dB/100 kmは  
表1では300 km以上の点で計算値とあ  
う。実際には、60 Hz地域は、観測点に最近の点  
でも500 km以上離れているので、500 km  
以上放射点から離れた点にある水平磁気双極子  
で表わすことができる。

以上から、50 Hzの水平磁界強度の減衰率  
変化を説明するためには、放射点近傍と放射点  
から300 km以上離れた点の二つの水平磁  
気双極子を置かねばならないが、遠地点では、  
後者の双極子の磁界が卓越している。前者  
は後者に比べて双極子モーメント $I \cdot da$ が小さい。  
したがって、遠方では一つの双極子が存在  
していると思える。よって、日本列島から  
100 km以上東方に離れて見れば、50 Hz  
60 Hz地域をそれぞれ一つの水平磁気双極子  
として扱うことができる。

## 5. まとめ

気球による電力線誘導放射水平磁界観測を行  
った結果、三陸から740 km東方の太平洋上  
空まで、50 Hz、60 Hzの水平磁界が背景  
雑音より強く観測されており、その減衰率は  
100 km以上において50 Hzが1.3 dB/100 km  
60 Hzが1.6 dB/100 km、100 km  
より近い点では50 Hzが1.5 dB/100 km  
であった。これらの減衰率は、送電線を、水平  
磁気双極子で置き換え、誘導放射線と考えるモデル  
計算を行った結果と比較すると、50 Hzの  
場合、放射点近傍と、放射点から300 km以上  
離れた点にある二つの水平磁気双極子の組合  
せで説明され、60 Hzの場合、放射点から5  
00 km以上離れた点にある水平磁気双極子  
で説明できることがわかった。

今回の観測では、絶対強度を求めることがで  
きず、また、距離的に連続したデータを得られ  
なかった。今後の観測では、これらの点を  
改善し、さらに電界強度観測も含めて行う予定  
である。また、モデル計算をより現実的なもの  
に改善する予定である。

最後に、リレー気球観測に多大の御支援を  
頂いた現宇宙科学研究所 西村研の皆様  
に深く感謝する。

## 参考文献

- (1) 電気学会編、「送電工学」、電気学会
- (2) R.A. Helliwell, J.P. Katsufakis, T.F. Bell, and R. Raghuram; "VLF line Radiation in the earth's magnetosphere and its association with power system radiation", J. Geophys. Res., 80, pp. 4249-4258 (1975)
- (3) W-M. Boerner and J.B. Cole; "Interaction of natural and man-made sources with the geo-electromagnetic environment -- an overview", URSI Abstracts, Session of Commissions, Washington D.C. 1981, p. 248
- (4) 西村 純, 広沢春任, 太田茂雄, 杉山弘光, 藤井正美, 山上隆正, 粕 壺, 岡部達見, 松坂幸彦; 「リレー気球」, 大気球と宇宙 (昭和52年度); 東京大学宇宙航空研究所 pp. 82-92 (1977)
- (5) J. Galejs, "Terrestrial Propagation of Long Electromagnetic Waves", Pergamon Press, Oxford (1972)