

電力線誘導・放射の水平磁界成分の分布*

富沢一郎**・芳野赳夫**

1. はじめに

電力線等の電力施設から電話線や信号線に対する電磁誘導・静電誘導による影響については古くから多くの検討がなされてきた[1]。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について検討はなされていない。これは誘導電磁界の影響が遠方では無視できると見なしていたことによると考えられる。しかし、自然の電磁環境を乱さず自然電磁波（例えば、シューマン共振、ELF放射、ホイスラ空電）を観測しようとする場合にはこうした電力施設からの誘導・放射電磁界が妨げとなる。今後、電力消費量は増大すると予想され、こうした誘導・放射電磁界の影響も大きくなると考えられるので、将来の影響を予測し、電力施設に対する対策を立てる必要から、現在の誘導放射電磁界についての基礎データを得ることが要請されている。我々は、こうした誘導放射電磁界の分布について観測を行い、それらのモデルを作ることにより誘導放射源の全体的特徴を明らかにすることを目的としている。

この論文においては、リレー気球B₁-29によって得られたデータと、単純な双極子モデルから計算した分布との比較を行った。

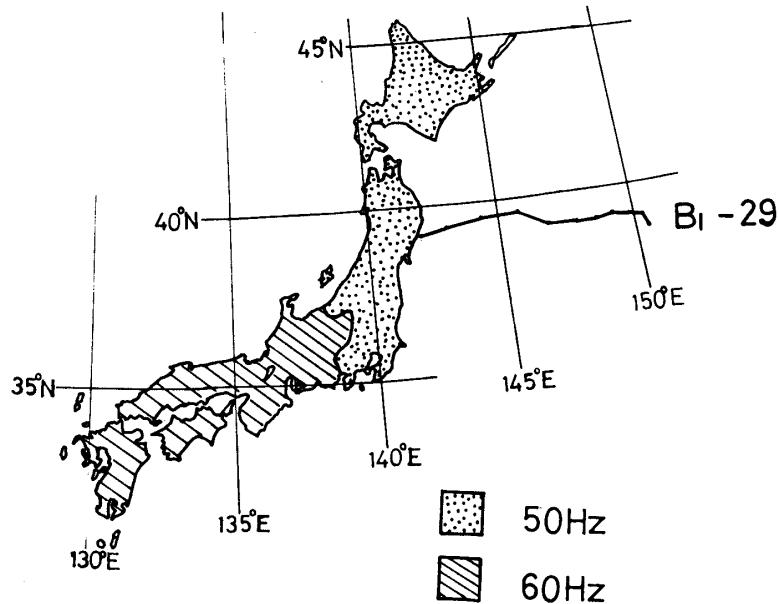
2. 気球観測

電力施設のごく近傍における誘導放射の観測は、強い誘導電磁界の中にいるので局部的な特性を表わしているに過ぎず、誘導放射源全体の特性を見るためにはこうした電力施設から離れて観測する必要がある。1500 km以上までの距離まで達することができるリレー気球方式[2]を用いて太平洋上を日本から離れながら観測することは、この目的に適している。また、気球は、電源として電池を用いているので観測の妨げとなる電源からの直接の混入がなく高空を一定高度で飛翔でき、大きなアンテナを積むことができ、しかも、リレー中継方式を用いることにより遠方まで連続観測ができるという利点がある。

観測気球B₁-29は、1978年9月27日09:41 JSTに東京大学宇宙航空研究所三陸大気球実験場(39°9'N, 141°49'E)より放球され、図1のようにはば真東に飛び14:30ころ約750 kmの距離まで到達した[3]。この観測には、商用周波(50 Hz および 60 Hz)とそれらの高調波の水平磁界成分を検出するために、対角線長5 m、巻数80回の方形ループアン

* 宇宙研特別事業費による研究論文

** 電気通信大学

図1 リレー気球 B₁-29 の飛跡と日本の商用周波数分布

テナを用いた。アンテナ出力は、10Hz～2kHzのBPFを通した後増幅され、6kHzの搬送波を振幅変調し、テレメータで伝送した。図2のようにこの出力をその場では検波せず振幅変調のままデータレコーダに記録し、解析時に倍速度で再生し、これを直線検波することにより地上での混入を防いだ。また、出力の周波数は地上での直接混入とは周波数的に違うことからはっきり区別することができる。検波した後、A/D変換をし、ミニコンピュータYHP 2100 Aを用いてスペクトル解析を行い、50 Hz および 60 Hz を含むパワースペクトルを図3のように求め、これを時間的に連続して行うことにより、強度変化を求めた。

図4は、スペクトル解析から得られた50 Hz と 60 Hz の相対強度を放球点からの距離に従ってプロットしたものである。上方が50 Hz、下方が60 Hzの水平磁界成分の強度変化を示している。いずれも300 km以遠においてわずか2点しか求められなかったのは、中継気球の故障のためである。したがって、遠方における変化に関しては大まかなものしかわかつていいない。しかし、全体的な減少傾向については、明らかである。

50 Hz の水平磁界成分は約100 kmまで15 dB/100 km以上の大きな減衰を示すが、それ以後は、1.3 dB/100 kmとゆるやかな減衰を示す。放球直後の急激な減衰は放球点近傍の誘導磁界によるものと考えられる。一方、60 Hzは、100 km付近までデータをとれなかったがそれ以後は約1.8 dB/100 kmと50 Hzよりわずかではあるが大きな減衰を示している。50 Hz および 60 Hz の両方が存在しその強度が日本列島から離れるに従って減衰することは、その起源が日本列島にあることを示している。観測された磁界強度変化と誘導放射源のモデルから求めた変化との比較をこの後で行う。

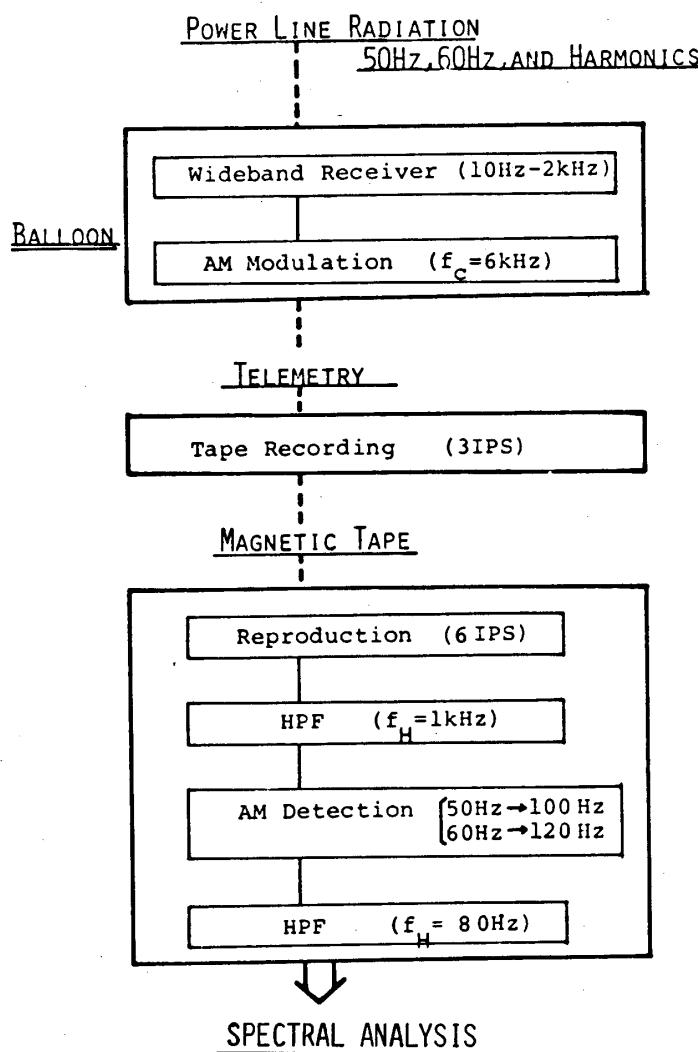


図2 気球観測データの処理手順。ここでは地上での混入をいかに防ぐかに重点をおいてある。

3. 誘導放射源のモデル化およびモデルを用いた計算

3.1 誘導放射源

商用周波において誘導放射電磁界を生ずる主なものとして高压送電線、低压送電線、低圧配電線があげられる。これは、誘導放射源を送信アンテナとして考えた場合、アンテナとして働く導線の長さおよびそれを流れる電流量が大きいほうが放射しやすいので、この条件を満すものとしては上記の電線が考えられるからである。

送電線を含めた全送配電系統は理想的にはその送出電力をすべて負荷に与える。しかし、実際には、負荷側に理想的な負荷をつないでいるわけではなく様々な不平衡負荷を接続することが多い。また、送電線自体もすべて平衡がとれているわけではないので不平衡負荷の一

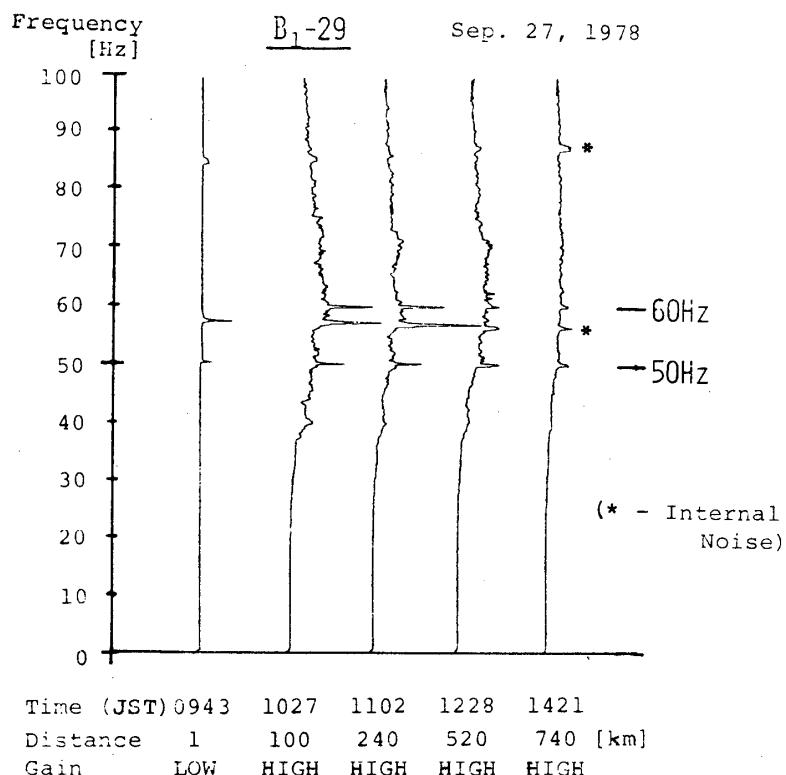


図3 気球の飛距離にしたがって5点を選びこの点でのスペクトルを左から並べた。左端のスペクトルは放球直後のもので、減衰器が入っているため見掛け上小さく見える。57.5Hzと85Hzは付近のスペクトルのピークは、気球に相乗りしている機器内部の雑音が混入したもので偽のスペクトルである。

部となっている。

送電線が平衡状態のときは、3相交流の場合3線を流れる電流を i_1, i_2, i_3 とすると、これらの和 $i_1 + i_2 + i_3$ は零、つまり帰還電流 i_r が零となる。単相2線式の場合は往復電流が等しいのでその和は零となる。したがってこの送電線によって生ずる電磁界は互いに打ち消し合って離れて見た場合誘導放射電磁界は生じない。しかし、先に述べたように実際には、送電系統はわずかな不balanceを生ずることが多い。ただ、単相の場合は2線が必ず閉ループを形成するため外部へのものが少なく、この問題を考える必要がない。3相交流の場合、位相および振幅が不balanceとなると $i_1 + i_2 + i_3 = i_r \neq 0$ となり不balance電流 i_r を生ずる。これは、中性点電流となり帰還路を通って帰還する。図5はこの状態を示している。この帰還路の状態によって誘導放射電磁界の強度が変わってくる。もし、帰還電流が中性線を流れる場合この電流の形成するループは小さく誘導放射の大きさを決める磁気双極子能率 $i_r da$ が大きくならないので問題となりにくい。しかし、一般的にはこの電流が全て中性線を通るわけではなく、一部が中性点接地を通じて大地を流れる。この場合にはループの電流は小さいがループの面積

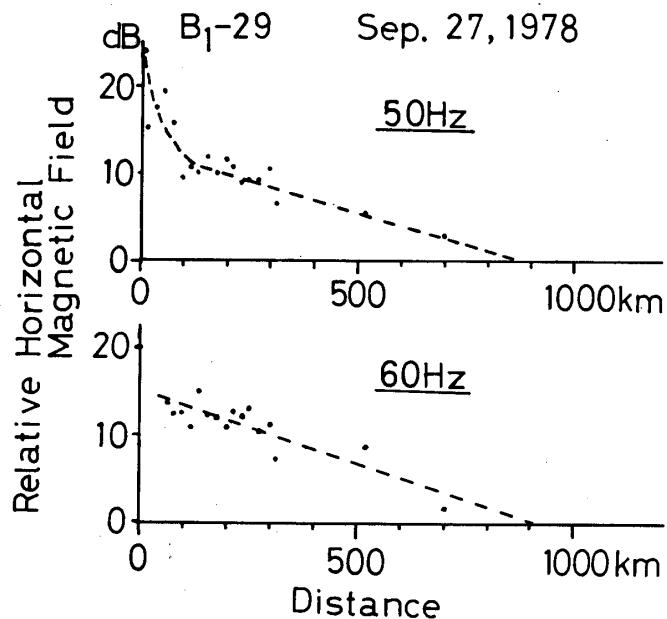


図4 (上) 50 Hzの水平磁界成分の強度を放球点からの距離に対してプロットした。約100 kmまで15 dB/100 km以上の急激な減衰を示すが、それ以遠では1.3 dB/100 kmとゆるやかな減衰を示す。300 km以遠において2点しか求められなかつたのは中継気球の故障のため。
 (下) 60 Hzについて同様にプロットした。100 km以遠において1.8 dB/100 kmと50 Hzよりわずかに大きな減衰を示す。

da"が大きくなり磁気双極子能率としては大きな値となることがあります、大きな誘導放射電磁界を生ずることもある。他方、この中性線がない場合、帰還電流は中性点接地を通じてすべて大地を流れる。したがって、中性線を有する場合に比べて大きな大地帰還電流となり、より大きな誘導放射電磁界を生ずる。このように、送電線の不平衡電流によって生ずる誘導放射電磁界は水平磁気双極子を用いて表わすことができる。ただ、もっと詳しく言えば他の双極子成分も存在するがここでは単純化して考えることとする。

3.2 水平磁気双極子による誘導放射磁界の水平成分分布の計算

ここでは、一つの水平磁気双極子から生ずる水平磁界成分の距離的変化についてGalejsのモード理論[4]に従って計算をした結果について述べる。

水平磁気双極子は地球大地と電離層の成す導波管内に存在している。ELF帯においてこの導波管内を伝搬できるモードは $TM\phi$ のみであり、他の高次モードおよびTEモードは急激に減衰してしまう。しかし、双極子近傍においては、これら減衰モードの電磁界が減衰を受けて存在するため大きな値となる。これが一般的にいうところの誘導電磁界である。双極子の

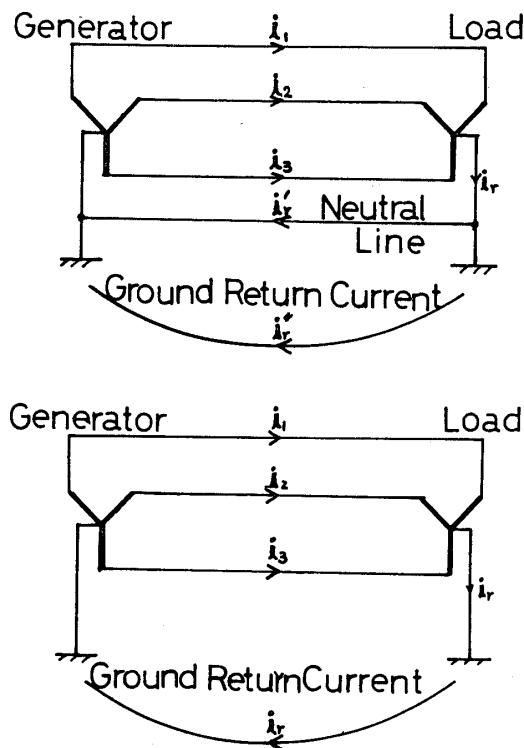


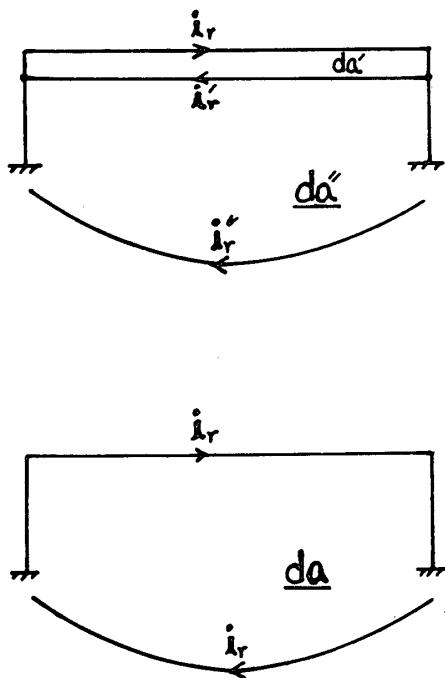
図5 3相4線式と3相3線式の送電線に帰還電流 i_r が流れる様子を表わす。

ごく近傍で観測を行ってもこの誘導電磁界のみを観測することになり、観測点近傍の誘導放射源の特性しかわからなくなってしまう。したがって、近傍電磁界からある程度以上の距離をとらなければ誘導放射源の全体的特性を測定できない。こうした点から近傍に誘導放射源のない太平洋上の日本から離れた地点において観測を行う意味がある。

この計算では、気球観測と対応づけるために水平磁界成分の距離に対する変化についてのみ求めた。求めた値はいずれの場合も双極子能率 I_{da} で正規化してある。これは、誘導放射源の双極子能率が概知でないことと、気球観測では絶対値が求められず相対的变化のみについてしか比較できないからである。

まず最初に、東日本の 50 Hz を使用している領域について 1 つの双極子を用いて表わすとする。東日本の場合、電力の輸送が主に南北方向に行われていると考え、水平磁気双極子はこれと直角な東西方向とする。次に、西日本の 60 Hz を使用している領域では電力輸送が主に東西方向に行われていると考え、水平磁気双極子の方向を南北とする。

気球観測はほぼ東方向に行われたので、これに対応する変化を求めるため東日本の場合双極子の向いた方向、西日本の場合双極子と直角な方向への水平磁界成分の距離による変化を計算により求めた。計算は、地球大地と電離層の形成する球殻状導波管内における高次モード

図6 不平衡電流 i_r の流れ方.

- (上) 中性線があるのでほとんどの線を流れ、わずかな電流が大地中を流れる。
- (下) すべての i_r が大地中を流れるので磁気双極子能率 $i_r da$ を大きくし、大きな誘導放射電磁界を生ずる。

まで含めて行った。計算に用いたパラメータを以下に示す。

電離層高度 $h = 70 \text{ km}$

受信高度 $Z_r = 1 \text{ km}$

双極子高度 $Z_s = 0.1 \text{ km}$

大地電気伝導度 $\sigma_g = 10^{-2} \text{ mho/m}$

電離層電気伝導度 $\sigma_i = 10^{-5} \text{ mho/m}$

モード数 $N = 20$

まず、東日本の水平磁気双極子について計算した結果を図7に示す。水平磁界成分は水平磁気双極子から離れるに従って数 $10 \text{ dB}/100 \text{ km}$ 以上という急激な減衰を示すが、 100 km 以遠においては、この減衰が急にゆるやかになり、約 $0.7 \text{ dB}/100 \text{ km}$ でほぼ一定となる。この値は、伝搬モードである $TM\phi$ モードの減衰率に比べて大きいが、これはまだこの時点では減衰モードが残っているためと考えられる。したがってこの方向に対しても誘導磁界と放射磁界の境界は約 100 km であるといえよう。

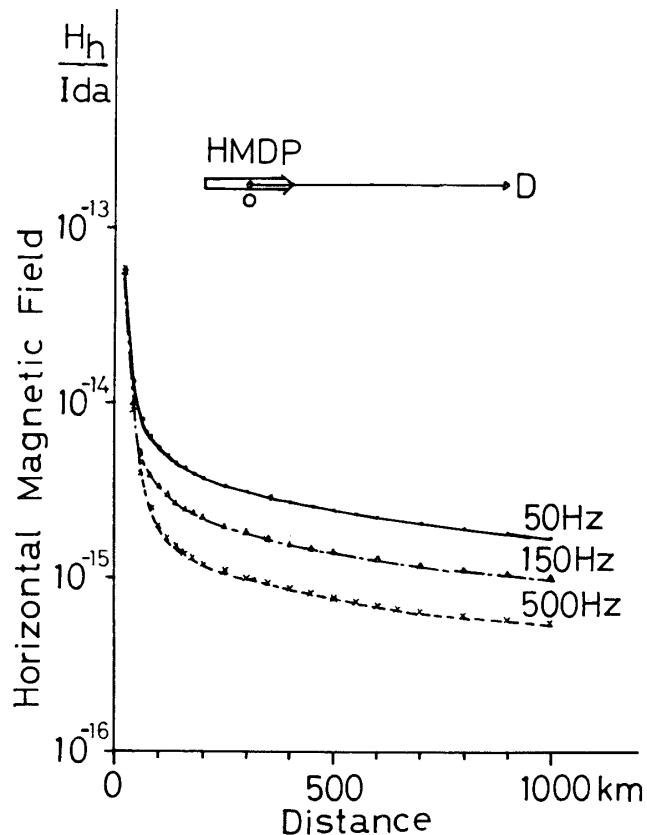


図7 水平磁気双極子方向の水平磁界強度の距離変化

次に、西日本におかれた水平磁気双極子について計算した結果を図8に示す。ただし、ここでは、50 Hzについて計算した結果を示してあるが、図7の周波数的変化と同様に、距離の短いところでの減衰率の違いはあるが遠方における減衰率はほぼ同じである。この場合図7と変化の様子が異なっている。水平磁気双極子の近傍では、減衰率が10 dB/100 km程度とゆるやかであるが、逆に100 km以遠では、約2.5 dB/100 kmと大きくなる。また、図7の場合と比べて誘導磁界と放射磁界の境がほとんどわからない。これは、伝搬モード成分がわずかしかなく、ほとんど減衰モード成分であることを示している。

この2つのモデルは水平磁気双極子の伝搬モードを放射しやすい方向としていく方向を示している。よって、この中間の方向では、遠方における減衰率が0.7 dB/100 kmより大きく、2.5 dB/100 kmより小さいことが予測される。

4. 気球観測結果とモデル計算結果との比較

B₁-29の観測から求めた図4の結果から、50 Hzおよび60 Hzの放球点からの距離に対する水平磁界強度変化が求められた。50 Hzの水平磁界は、約100 kmまでに15 dB/100 km

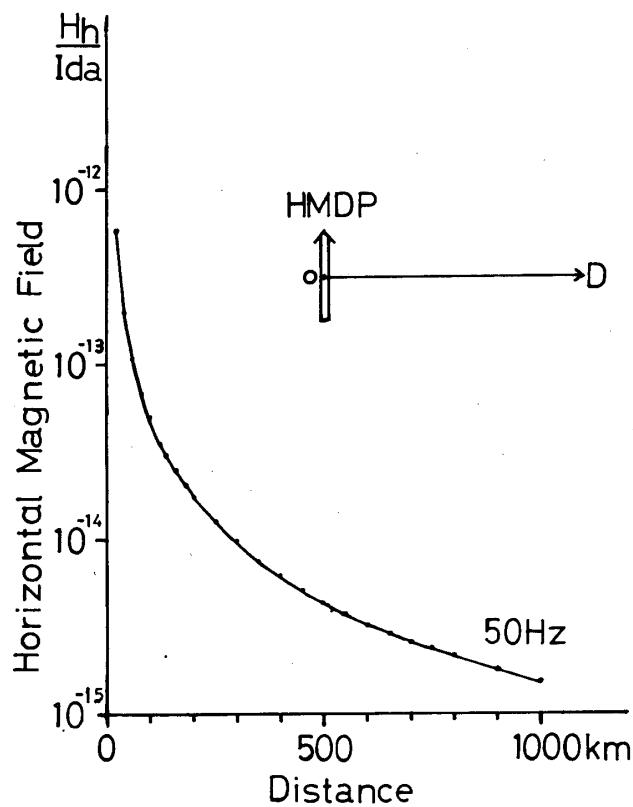


図8 水平磁気双極子と直角方向の水平磁界強度の距離変化。

以上の減衰を受けるが、それ以遠では $1.3 \text{ dB}/100 \text{ km}$ とゆるやかな減衰を示す。こうした変化の特徴は、東日本におかれた水平磁気双極子モデルから求めた形状とよく似ている。しかし、この減衰率はモデル計算で求めた値とは一致しない。モデル計算では、双極子近傍において数 $10 \text{ dB}/100 \text{ km}$ とはるかに観測値より大きな値を示すが、 100 km 以遠では逆に $0.7 \text{ dB}/100 \text{ km}$ と観測値より小さな値となる。他方、 60 Hz の場合は観測では約 100 km 以遠では約 $1.8 \text{ dB}/100 \text{ km}$ と 50 Hz の減衰率に比べてわずかに大きな値が得られた。観測は 60 Hz 領域から 500 km 以上離れたところで行われたのだからほぼ放射磁界を観測していると見なせる。したがって、モデル計算から求めた減衰率のうち遠方のもので比較すると $2.5 \text{ dB}/100 \text{ km}$ となり観測値より大きな減衰を示す。

50 Hz のモデルでは減衰率を増す方向に、 60 Hz のモデルでは逆に減らす方向に修正する必要がある。最も単純に考えれば、双極子と観測方向との成す角により伝搬モード成分と減衰モード成分との比が変わってくるので、これをを利用して減衰率を合わせることができる。つまり、東日本のモデルの場合双極子の方向を真東から少し傾け、西日本のモデルの場合真北から少し東方向に傾けねばならない。言い換えれば、電力の輸送方向がそれぞれ南北または東西方向からずれていることになる。実際こうした方向の違いが存在し得るので、遠方に

おける水平磁界強度の変化は単純な水平磁気双極子モデルで近似的に表わし得るといえる。しかし、もっとも詳しい観測値が得られればより複雑なモデルが必要となってくるであろう。

5. ま と め

B₁-29による商用周波(50 Hz, 60 Hz)の水平磁界強度の観測から、50 Hzの水平磁界成分および60 Hzの水平磁界成分の減衰率を得ることができた。

こうした誘導放射電磁界が電力線の不平衡電流によって生ずることを述べた。また、この電流によってループが形成されることから誘導放射源のモデルとして水平磁気双極子を考えた。さらに、このモデルを用い計算を行い、遠方の減衰率を観測結果と比較し、これから観測結果が近次的には単純な水平磁気双極子モデルで説明できることを示した。

この論文では、観測の精度があまりよくなかったことから詳しい検討ができなかった。また、絶対強度が求められなかつたため誘導放射源の双極子能率つまり電流とループの大きさについては議論できなかつた。今後より詳しい観測を行い、こうした点についても調べてゆく予定である。

最後に、リレー気球観測に多大な御援助を頂いた東京大学宇宙航空研究所西村研の皆様に深く感謝する。また、データ解析を助けて頂いた水野良之君に感謝する。

1980年5月10日

参 考 文 献

- [1] 電気学会編;「送電工学」, 電気学会発行.
- [2] 西村純ほか;「リレー気球」, 大気球シンポジウム(昭和52年度) p. 73.
- [3] 芳野赳夫, 富沢一郎;「商用電力線放射の観測報告」大気球シンポジウム(昭和53年度) p. 73.
- [4] Galejs, J.; "Terrestrial Propagation of Long Electromagnetic Waves" Pergamon Press, Oxford. (1972).