

ループアンテナの微小回転振動に起因した S/N の
低下が電力線放射源方向の推定に与える悪影響*

富 沢 一 郎**

(1986 年 7 月 21 日受理)

Disturbances on Estimation of Source Directions of Power
Line Radiation due to Degradation of S/N Caused by Small
Rotational Vibration of Loop Antenna

By

Ichiro TOMIZAWA

Abstract : Dependency of antenna angular resolution on signal to noise ratio is revealed to be an important factor on estimation of source direction of Power Line Radiation for an instrument aboard a balloon. On the balloon experiments, B₁-33 and B₁-34, the directional characteristics of the noise level have almost always showed maxima in the north-south direction and minima in the east-west direction. As the magnetic field strength with respect to the rotation angle was comparable to or in small excess to the noise level, it is difficult to estimate the real source direction by using the above directional characteristics. The constant directional characteristics of the noise level indicate that the noise is produced not by atmospherics but by the balloon rotation itself. According to the investigation the source of the noise is the small rotational vibration with respect to the horizontal axis perpendicular to the loop antenna axis. In fact the additional noise caused by occasional atmospheric activity or by instantaneous vibration can make a small fluctuation in the directional characteristics of the level as observed on the balloons.

* 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

概 要

大気球に搭載した電力線放射観測装置により電力線放射源方向を推定する場合、ループアンテナの角度分解能に対して信号対雑音比(S/N)の影響が重要な要素であることを示した。実際に大気球 B₁-33 および B₁-34 の観測データを用いて磁界強度の回転角依存性から電力線放射源方向を推定する場合、S/N が低いため推定精度が 90° と悪いことがわかった。また、この解明の過程において、背景雑音強度が南北方向で増加し、東西方向で減少するという特徴を両気球観測共示すことがわかった。この特徴は雷放電ではなく気球の回転自体に起因していることを示している。こうした特徴から雑音の原因について調べた結果、ループアンテナ軸に直交した水平軸まわりの微小回転振動の大きさが南北方向で最大となり東西方向で最小となるためであると結論した。しかし、実際に観測された雑音強度の回転角特性が、滑らかではなく細かい変動を示すことから、雑音強度の特性には、さらに、回転振動の時間的变化または雷放電活動度の時間的変動に起因する部分が含まれていると考えられる。

1. は じ め に

筆者らは、日本列島に張りめぐらされた電力線システムから放射される基本周波数 (50 および 60 Hz) の電磁界強度を日本列島周辺において測定し、その放射機構、主放射源の位置、全放射エネルギー量を明らかにすることを目的として、大気球観測を行って来た [1~4]。今までの観測から、電力線放射の主放射機構は、電力線の中性接地線を通じて地中を流れる不平衡電流が形成するループアンテナからの放射であることがわかってきた [2, 3]。第二の目的の主放射源の位置を求めるためには、50 および 60 Hz の電磁界の到来方向を求めることが必要条件である。この論文では、特に到来方向を水平ループアンテナ方向と磁界強度の変化から推定する方法を開発し、さらに、この推定方法の精度に S/N が大きく影響していることを指摘する。また、実際のデータでの推定精度が悪いことを示し、背景雑音の原因を解明することにより改善の可能性を調べる。

2. 電力線放射電磁界強度観測システムおよび気球飛翔の概略

図 1 に大気球 B₁-34 に搭載した電力線放射電磁界強度観測システムのブロックダイアグラムを示す。このシステムでは、磁界・電界の各々直交三成分の強度を 50, 55, 60 Hz の三周波の狭帯域受信機で測定し、それらの出力を直列信号に変換した後にテレメータを通じて三陸へ伝送した。この受信と同時に X, Y 方向のループアンテナの北からの回転角を求めるために X, Y 方向の二本のホールセンサー出力をテレメータで伝送した。大気球 B₁

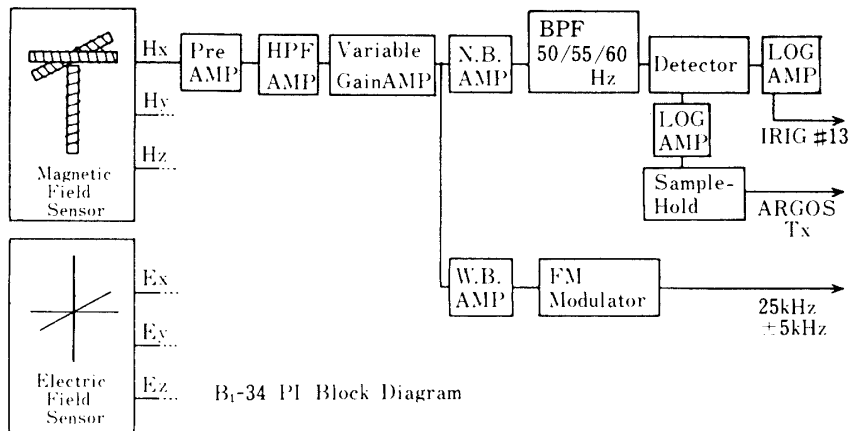


図 1 B₁-34 に搭載した電力線放射電磁界強度観測システムのブロックダイアグラム

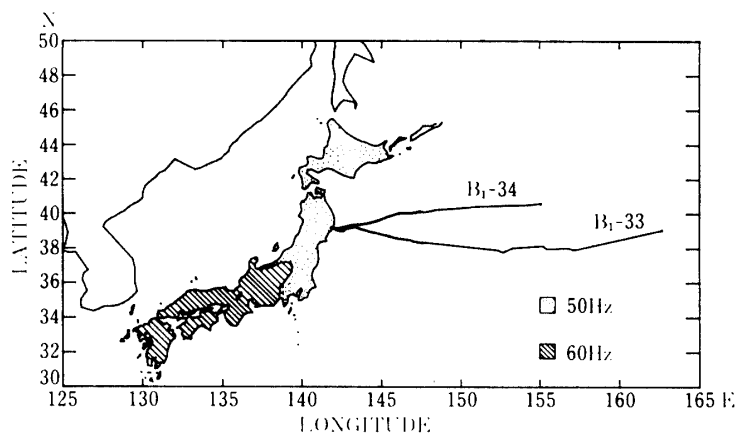


図 2 大気球 B₁-33 および B₁-34 の飛翔経路および日本列島上の電源周波数 50 Hz および 60 Hz の地域の分布

-33 でも B₁-34 とほぼ同じシステムを用いて観測を行った。回路の詳細についてはここでは省略する[5, 6 参照]。

B₁-33 は、1983 年 9 月 24 日 0658 JST に三陸から放球し、図 2 に示すようにほぼ東方に高度 17～19 km で飛翔した。他方、B₁-34 は、1984 年 10 月 3 日 0723 JST に三陸から放球し、高度 17～20 km で飛翔し、B₁-33 に比べて少し北寄りの飛翔経路を通った。この論文で使用する観測データは、三陸から約 600 km の可視範囲内で取得したものである。可視範囲外のデータは、気象衛星 NOAA を中継して伝送する ARGOS システムを利用した。このデータは距離的な磁界強度の減衰を測定する目的に使用し[5, 6]、この論文では扱わない。

3. 磁界強度の回転角依存性を求めるためのデータ解析手順

ループアンテナの指向特性は，図3に示すように中心軸方向で最小感度となり，中心軸

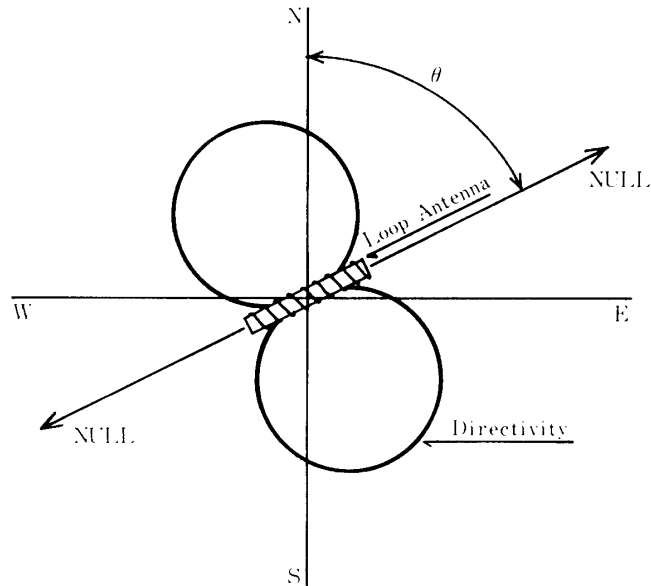


図3 水平ループアンテナの指向特性と回転角 θ . 回転角は，北から東回りにとったループアンテナの中心軸までの角度となる。

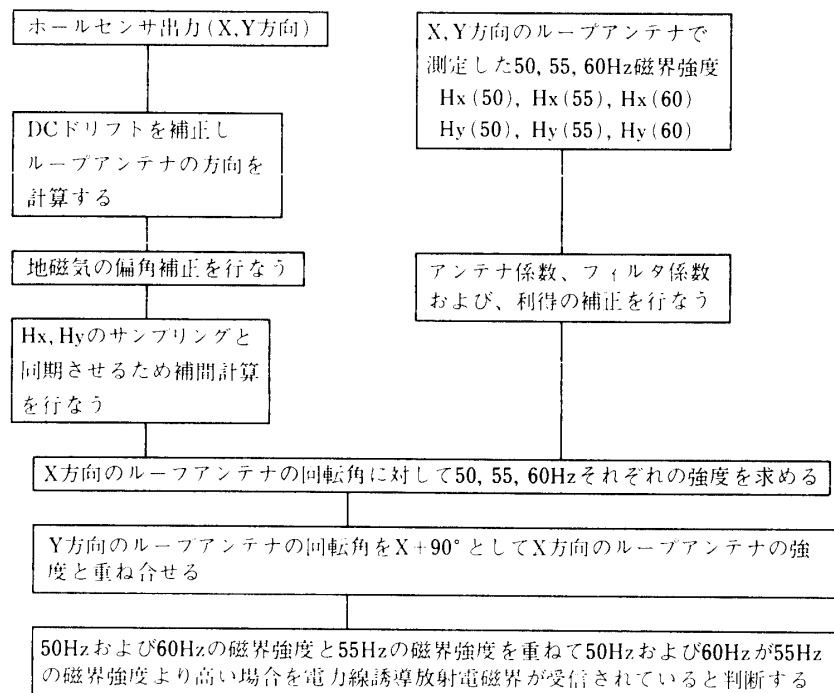


図4 50, 55, 60 Hz の水平磁界強度の回転角による変化を求めるための手順

と直角方向で最大感度となる。感度が最小となる方向の角度幅は約 10° であるが、感度が最大となる方向の角度幅は 90° と広い。したがって、電力線放射源方向の推定を行なう上では、磁界強度の最小となる方向を使用するのが適当である。ただし、補助的に最大感度方向を併せて判断する。この方向推定の精度に関しては次節で詳しく検討する。

今回新たに開発した回転角に対する水平磁界強度特性を求めるための手順を図 4 に示す。まず、 X, Y 二方向のホールセンサーのテレメータ出力から X 方向のループアンテナ軸の北から東まわりの角度を求める。他方、 X, Y 両方向のループアンテナで受信した 50, 55, 60 Hz の強度電圧値をテレメータデータから取り出し、さらにアンテナ感度係数、フィルタ係数および利得を各々の周波数に対して補正することにより磁界強度に変換する。ホールセンサーから求めた回転角と磁界強度の測定は、互いに同期を取っていないので、実際の回転角を、補間を用いて求める。このようにして、ループアンテナの回転角と 50, 55, 60 Hz の水平磁界強度の対応をつけられたので、次に、 $0 \sim 360^\circ$ の回転角を 5° 毎に区切って、それぞれの区間の磁界強度の平均値を各周波数毎に求める。ここで、 5° 区切りとしたのは、前に述べた約 10° という角度分解能に比べて小さくするためである。もし、 10° 以上の区切りとすれば平均化により 10° 以下の強度変化がわからなくなってしまうからである。

実際の観測では、アンテナの回転は図 5 に示すように 10 分から数 10 分に 1 回という非常にゆっくりとしたものである。したがって、気球位置があまり移動しないようにという条件から 30 分の平均を取る場合、各角度方向のデータ数が極めて少なくなってしまう。これを補うため、 X 方向と同様にして求めた Y 方向のループアンテナの回転角に対する磁界強度を 90° だけ回転させて等価的に X 方向アンテナのデータと重ね合わせる。こうすることにより、各角度方向のデータ数が約 2 倍に増加するので、データの信頼性が向上する。

ここで、ループアンテナの回転速度の条件について考えてみる。ループアンテナの磁界強度のサンプリング間隔は 2.7 秒である。この時間以内に 5° 以上の回転があると、どの方向のデータを受信しているのか、わからなくなる。したがって、 5° の分解能を確保するための条件は、次式で示される。

$$\begin{aligned} \text{回転速度} &< 1 / \{ (360/5) \times 2.7 \} \\ &= 0.31 \text{ rpm} \end{aligned}$$

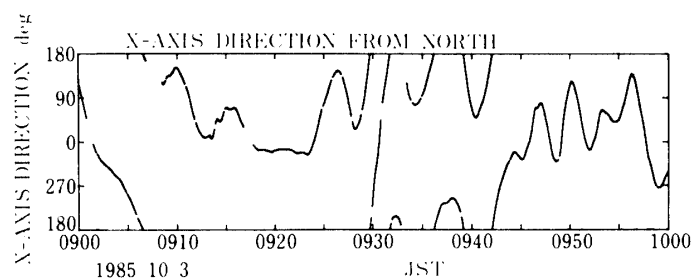


図 5 B_1-34 のアンテナの軸方向を 0900~1000 JST の間求めたものである。アンテナの回転は 10 分程度である。

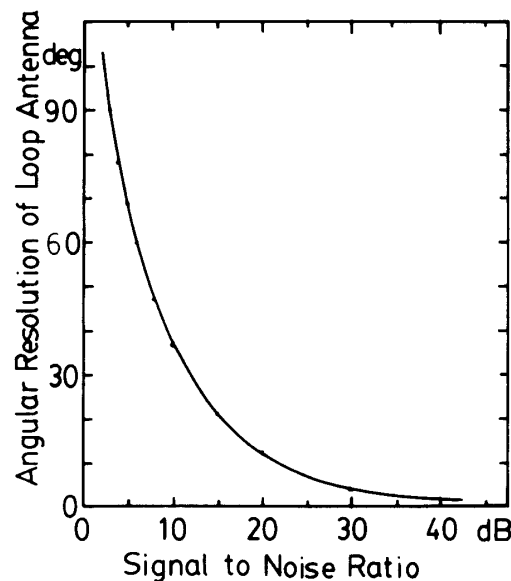


図 6 ループアンテナの感度最小方向を利用して方向を推定する場合の角度分解能の S/N 依存性

実際に B_1-33 および B_1-34 での気球回転速度は $0.03 \sim 0.3$ rpm であるので、この条件を満たしている。したがって、この論文で扱うデータの角度分解能 5° は保証されている。この二つの気球観測では自由回転としたが、モータを付けて強制回転をさせる場合は、角度分解能を犠牲にしないよう注意しなければならない。

4. 電力線放射源方向の推定精度と S/N の関係

前節で述べたように、水平ループアンテナの指向特性の最小感度方向に電力線放射源があった場合、約 10° の範囲で磁界強度が減少する。この特性を利用することにより、約 10° の方向分解能で電力線放射源方向を推定することが可能である。もし、信号対雑音比 (S/N) が 20 dB 以上となるような場合は原理的にさらに高精度の測定が可能である。図 6 に、角度分解能と信号対雑音比の関係を示す。この図からわかるように S/N が悪くなると角度分解能が急激に悪化する。実際の測定では、S/N が 20 dB を越えることはないので方向推定精度は 10° より悪くなっている。当然 S/N = 0 dB では推定は不可能である。よって、放射源方向の推定精度は、S/N に強く依存していることが明らかとなった。

5. B_1-33 および B_1-34 の観測データを用いた電力線放射源方向の推定

実際の観測データを図 4 の手順にしたがってまとめた結果を図 7～10 に示す。図 7 および 9 は B_1-33 の観測から、また、図 8 および 10 は B_1-34 の観測から得られた。ここでは、図 7～10 のデータを用いて電力線放射源方向を推定する手順を示す。これらの図中において、各々の特性の黒く塗りつぶしてある部分が背景雑音 (55 Hz の磁界強度) より強い場合、つまり電力線放射の S/N を表わしている。逆に言えば、中心部の白抜きの部分が背景雑音の回転角依存性を示している。各図にはこの回転角特性を、 B_1-33 の場合は 1 時間毎に、 B_1

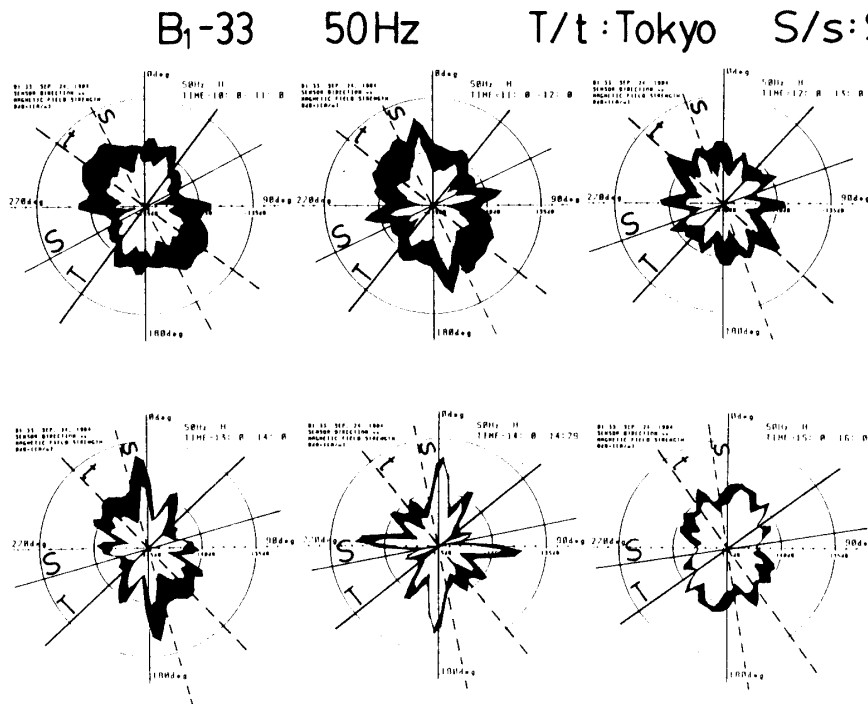


図 7 B_1-33 で観測した 50 Hz の水平磁界強度の回転角に対する変化を示している。データは 60 分間の平均値である。これらの特性の外側の境界が 50 Hz の強度を示し、内側の境界が背景雑音の強度を示している。図中の実線は気球から見た東京及び仙台の方向を示し、破線は東京および仙台方向に直角な方向を示している。

-34 の場合は 30 分毎に求めたものを並べて示してある。この時間間隔の違いは、 B_1-33 に比べて B_1-34 のほうが約 2 倍の速さで飛翔したために生じた。

B_1-31 で行った簡単な到来方向の推定から、50 Hz の放射源は、東北地方南部から関東地方方向、他方 60 Hz の放射源は西日本方向であるという結果が得られた[3, 7]。ここでは、いくつかの仮定した電力線放射源方向を実際に観測データから得られた強度の回転角特性の上に描き、両者の一致の具合を時間を追って比較する方法を採用する。この方法を採用する理由は、図 7～10 を見てわかるように、S/N が悪いと一意的に放射源方向を推定できない点にある。

日本中の送電システムは、ほぼ同一の方式を採用しているため、電力線放射の大きさは、送電電力に比例すると仮定する。また、電力線システムは互いに同期しているので位相は同じであるから全電力線放射は、各電力線の放射の重ね合せで表わせる。つまり、同じ様な電力線であれば電力線の数が多い場合のほうが放射強度は強い。以上の点を考慮すると、大電力送電線が多く、しかも電力線の数が多い場所で電力線放射が強くなると考えられる。これは、等価的に消費電力の大きい場所に対応する。図 11 に日本列島の各電力会社の発電

B_1-34 50Hz T/t:Tokyo S/s:Sendai

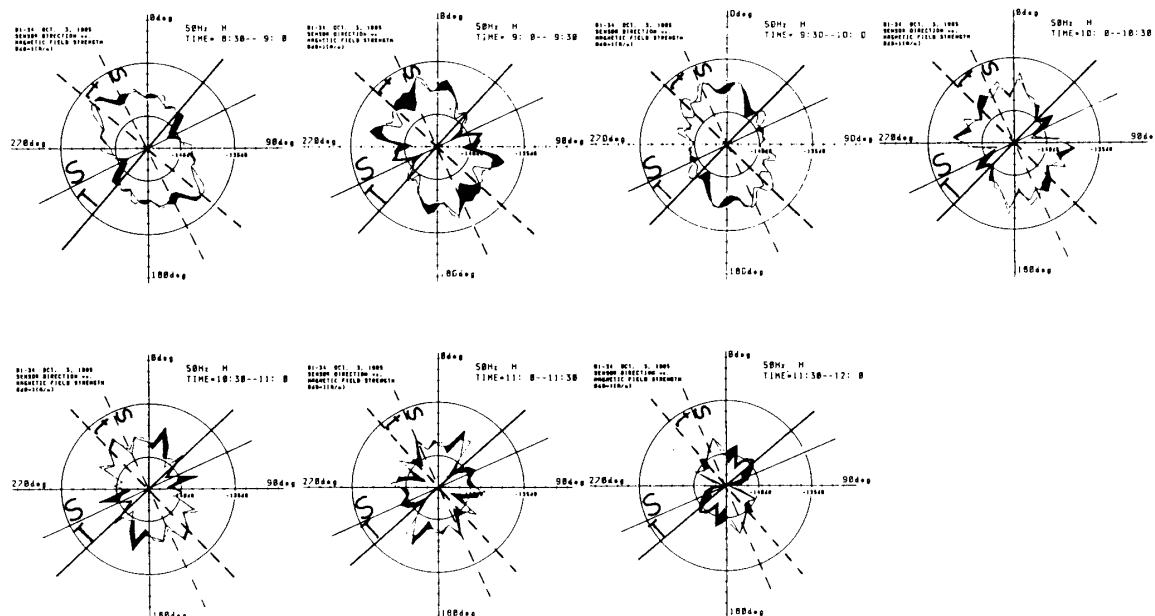


図 8 B_1-34 で観測した 50 Hz の水平磁界強度の回転角に対する変化を示している。他の部分は、図 7 と同じである。

B_1-33 60Hz O/o:Osaka

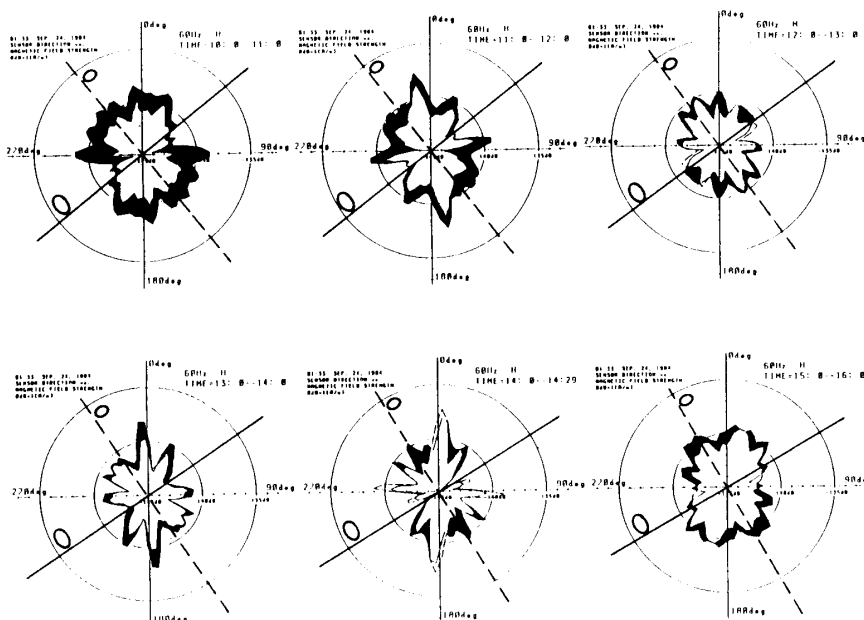


図 9 B_1-33 で観測した 60 Hz の水平磁界強度の回転角に対する変化を示している。図中の直線は大阪方向を示しており、破線は大阪方向に直角な方向を示している。

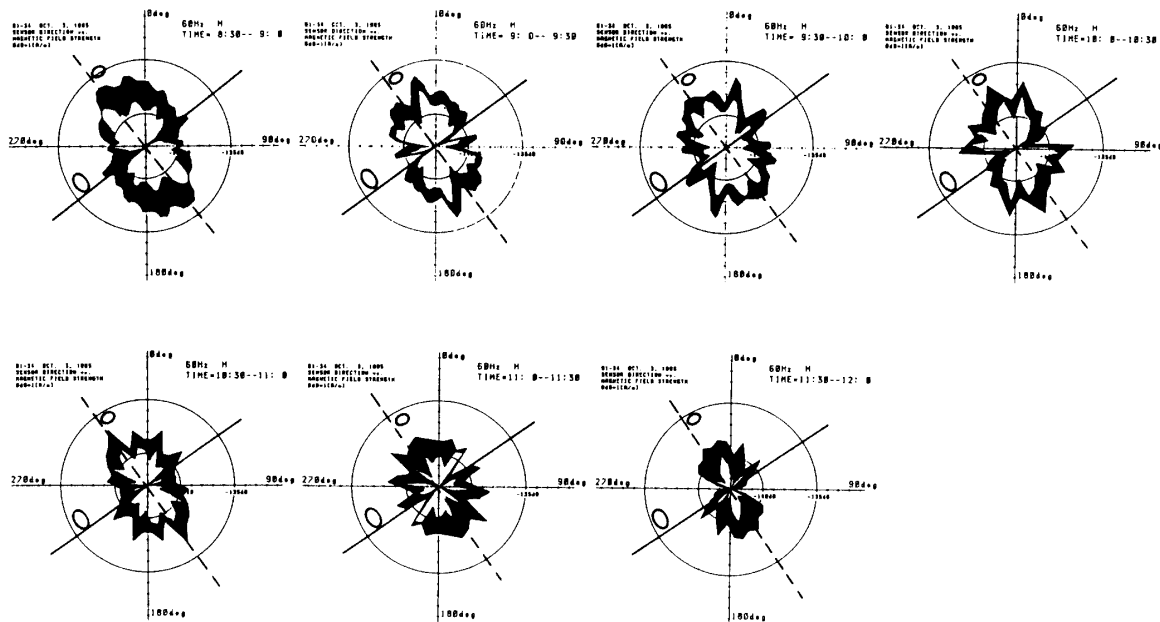
B₁-34 60Hz O/o : Osaka

図 10 B₁-34 で観測した 60 Hz の水平磁界強度の回転角に対する変化を示している。他は図 9 と同じである。

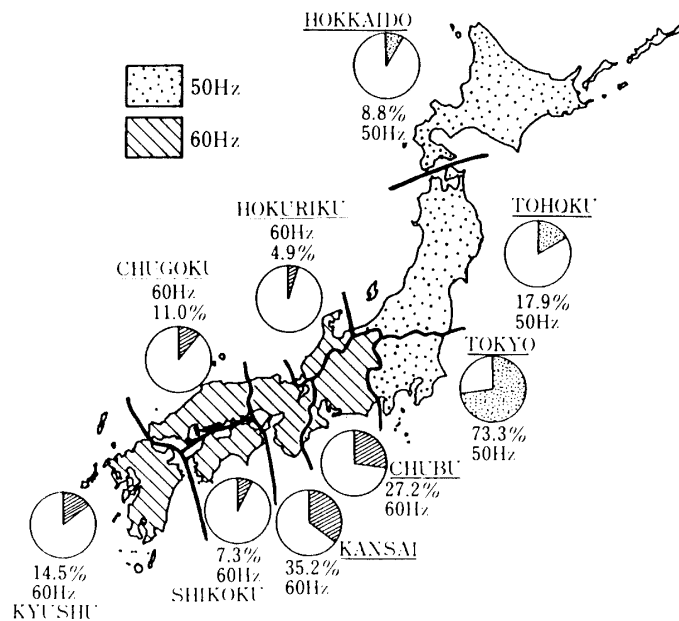


図 11 日本の九電力会社別の総発電量を 50 Hz および 60 Hz の二つの地域毎に集計し、それらに対する各電力会社の占める割合を示してある。

電力量の割合を示す。消費電力と発電電力量は同一のものではないが、各電力会社の比をとる上ではほぼ一致する。図 11 から 50 Hz 地域では東京電力が 73 % を占め圧倒的に大きい、60 Hz 地域では関西電力が 35 % で最も大きく、中部電力が 27 % で次に大きく他は 15 % 以下と 50 Hz 地域に比べて分散的である。したがって、ここで仮定する電力線放射の中心として最も消費電力の大きい地域の中心を選び、50 Hz 地域では東京を、60 Hz 地域では大阪を中心とする。ただ、50 Hz 地域では、気球との距離が場所によって大きく異なり、しかも、放射強度が距離が大きくなるに従って急激に減衰することから気球に近い地域からの寄与が大きい可能性が残されている。この点を考慮して、ここでは、東北地方の大電力消費地である仙台をもう一つの 50 Hz の中心の候補と考える。

気球から見た東京および仙台の方向は、気球が東方へ飛翔するに従って変化する。図 7 および 8 に東京および仙台を実線で示し、それぞれの傍らに T (東京)、S (仙台) の印を付加した。また補助的意味から東京および仙台の方向に直角な方向、つまり最大感度となる方向を破線で表わし、t (東京)、s (仙台) を付加した。同様にして図 8、9 の 60 Hz の場合も、大阪方向を O これと直角方向を o として示した。

図 7、8 でこの二つの仮定した放射源方向が最小感度(強度)方向と一致するか調べてみる。図 7 の B_1-33 の場合は、S/N が 3 dB 以上とされていることから方向推定は何とかできるが、図 8 の B_1-34 の場合は、S/N が 0 dB となり推定不可能である。 B_1-33 の場合でも、3 dB 程度の S/N であるから、図 6 より推定精度は 90° となり、これは最大感度方向を利用して推定する精度と等しくなり、いずれの方法でも差はなくなる。しかも、東京と仙台の方向の差は 30° 程度であるので分離は不可能である。しかしながら、全体的に見て、東京および仙台方向で強度が減少し、これと直角方向で強度が増加する点は予測とうまく合っている。したがって、東京と仙台の分離は不可能であるが、東京から仙台にかけての地域に放射源があると推定できる。

図 9 の B_1-33 の場合、S/N が 2 dB 程度しかなく、感度最小方向による方向推定は不可能であるので、感度最大方向を使って推定を行なう。全体的に大阪方向に直角方向で強度が背景雑音に比べて増加していることから大阪方向に放射源があるという仮定と矛盾しない。他方、図 10 の B_1-34 の場合、S/N が 3 dB 以上取れるので感度最小方向および感度最大方向の両方を考慮する。全体的に見て強度の最小方向は大阪方向に比べて時計回りに $10\sim 20^\circ$ 回転させると最適となるが、強度最大方向は、大阪方向と直角方向とうまく合っている。両者の方向推定値の精度が 90° であることを考えると両者の推定方向とも大阪方向に電力線放射源があると見なして良い。

図 7~10 において、電力線放射源方向を推定する場合最も問題となるのが低い S/N である。まずこの点を改善しない限り精度の高い方向推定は不可能である。近い将来計画している気球観測においては広帯域信号をテレメータで伝送し、後でさらに高精度のスペクトル解析を行なうことにより S/N の向上を図る予定である。もう一つ問題となるのが背景雑音に回転角依存性がある点である。この点については次節で詳しく検討するが、こうした特性の上に低い S/N の電力線放射磁界が重なるとどうしても背景雑音の特性に影響されるため、さらに方向推定がやりにくくなる。

6. 背景雑音強度の回転角依存性とその発生原因の究明

6・1 背景雑音強度の回転角依存性

気球上で受信した 55 Hz の水平磁界強度は、背景雑音のみを表わしている。図 7, 8 の白抜きの部分が、この背景雑音の回転角に対する強度変化特性を表わしている。この二つの図を全体的に見てみると、おおまかな傾向として南北方向で最大強度となり、東西方向で最小強度となることがわかる。こうした傾向は、ほぼ全ての観測データに渡って共通して現われている。つまり、気球の飛翔位置、観測時間帯、さらに別々の気球において変化がほとんどないことから、定常的な雑音源を予想させる。

6・2 背景雑音の発生原因の定性的検討

もし、55 Hz の雑音磁界強度が受信システム内部の雑音に起因するのであれば、その強度は回転角には依存しないので、円形の一様な回転角特性を示すはずであるから、この雑音は外部に起因することは明らかである。外来雑音としてまず第一に考えられるのが雷放電雑音である。雷放電雑音強度が回転角に対して変化を生ずるためには、気球から見て一つの狭い地域に雷放電源が集中していなければならない。しかも、実際に観測された回転角特性を説明するためには、定常的に東西方向に雷放電源が存在しなければならない。この条件を満たすためには気球の飛翔距離（約 600 km）に比して十分遠方に雷放電源が集中していなければならない。気球から見て西方向となるが、アフリカ大陸は、シューマン共振における大きな雷放電雑音源となっているという事実から推測して 50~60 Hz においても同様の寄与をしている可能性はある。しかしながら、この雷放電源の強度が時間的にあまり変化しない点は実際の雷放電源の特性と合わない。以上の点を考え合わせると、アフリカ大陸程度遠方の雷放電源が、気球で観測された定常的な背景雑音源である可能性は小さい。

雷放電源が原因でないとすると、他に外来雑音は考えられない。よって、気球観測システムが回転することに伴って起こる何らかの雑音が原因と推定される。しかしながら、ここで観測しているのは 50~60 Hz の磁界強度であるから、気球の回転に伴って 50~60 Hz の雑音磁界を発生する原因を探さなければならない。いろいろな可能性を検討したが、磁界センサーであるループアンテナが気球の飛翔中の微小振動を受け、外部の定常的な地磁気の方角に対する角度が微妙に変化し、ループアンテナに微小起電力を発生させることが原因であるという考えに達した。この基本的考えに基づき、実際に南北方向で雑音強度が最大となるような回転角依存性が得られるか理論的な検討を行なう。

6・3 ループアンテナの微小振動に起因する雑音磁界発生メカニズムの理論的検討

ここで次の仮定をおく。

- ① 地球磁場は、定常的でその成分は $(B_x, 0, B_z)$ で表わせる。
- ② ループアンテナの水平回転速度は 0.1 rpm 程度である。
- ③ ループアンテナの軸と地磁気方向の成す水平面内の角を θ_H とする。
- ④ ループアンテナの軸と水平面との成す角を θ_E とし、この値は通常ほぼ 0 である。
- ⑤ x, y, z の三軸を中心とした微小回転振動とする。

⑥ 微小回転振動は正弦波的な成分の集合と考え、しかもその振動スペクトル強度は、20～60 Hz の範囲では一様とする。

⑦ 三軸まわりの回転振動は互いに独立とする。

以上の仮定の下に微小雑音起電力を理論的に求める。

x 方向ループアンテナに誘起する起電力 V は

$$V = -d\phi/dt \quad (1)$$

で表わせる。ここで、 ϕ は x 軸方向の磁束密度である。 ϕ は実際にはループアンテナのパラメータと地磁気に対するループアンテナの方向性から

$$\phi = nA_{\text{eff}}(B_x \cos \theta_H + B_z \sin \theta_E) \quad (2)$$

となる。ただし、 n はループアンテナの巻数、 A_{eff} は等価的な断面積である。よって、

$$V = -nA_{\text{eff}} \frac{d}{dt} (B_x \cos \theta_E \cos \theta_H + B_z \sin \theta_E) \quad (3)$$

この起電力 V への各回転振動成分の寄与を求める。

(a) x 軸まわりの微小回転振動： $A_{xn} \sin \omega_n t$

$$\theta_E = 0, \theta_H = \omega t \quad (4)$$

したがって、起電力は、アンテナの回転に伴うゆっくりした変動成分のみとなり全く x 軸まわりの微小回転振動の影響はない。

(b) y 軸まわりの微小回転振動： $A_{yn} \sin \omega t$

$$\theta_E = A_{yn} \sin \omega t, \theta_H = \omega_n t \quad (5)$$

$$\begin{cases} \cos \theta_E \approx 1 - \frac{1}{2} A_{yn}^2 \sin^2 \omega t \\ \sin \theta_E \approx A_{yn} \sin \omega t \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} V &= -nA_{\text{eff}} \frac{d}{dt} \left[B_x \left(1 - \frac{1}{2} A_{yn}^2 \sin^2 \omega t \right) \cos \omega t + B_z A_{yn} \sin \omega t \right] \\ &= -nA_{\text{eff}} \left[B_x \left\{ -\frac{1}{2} A_{yn}^2 \omega_n \sin 2\omega_n t \cos \omega t \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \omega \left(1 - \frac{1}{2} A_{yn}^2 \sin^2 \omega t \right) \sin \omega t \right\} + B_z A_{yn} \omega_n \cos \omega t \right] \end{aligned} \quad (7)$$

50～60 Hz における雑音成分のみ取り出す。

$$V_n = -nA_{\text{eff}} \left[B_x \left\{ -\frac{1}{2} A_{yn}^2 \omega_n \sin 2\omega_n t \cos \omega t + \frac{1}{4} A_{yn}^2 \omega \cos 2\omega_n t \sin \omega t \right. \right.$$

$$+\frac{1}{4}A_{yn}^2\omega\cos 2\omega_nt\sin\omega t\Big\}+B_zA_{yn}\omega_n\cos\omega_nt\Big] \quad (8)$$

ここで $\omega t=0$ (南北方向) とすると

$$V_n=-nA_{\text{eff}}B_xA_{yn}\omega_n\left(-\frac{1}{2}A_{yn}\frac{\omega}{\omega_n}\cos 2\omega_nt+\frac{B_z}{B_x}\cos\omega_nt\right) \quad (9)$$

次に, $\omega t=\frac{1}{2}\pi$ (東西方向) とすると

$$V_n=-nA_{\text{eff}}B_xA_{yn}\omega_n\left(-\frac{1}{4}\frac{\omega}{\omega_n}\cos 2\omega_nt+\frac{B_z}{B_x}\cos\omega_nt\right) \quad (10)$$

回転振動スペクトルが 20~60 Hz で一定という仮定から 55 Hz への寄与は, 27.5 Hz, 55 Hz のいずれも同等である. したがって,

$$\frac{1}{2}A_{yn}\gg\frac{1}{4}A_{yn}\cdot\frac{\omega}{\omega_n} \quad (11)$$

であるからその振幅部分について比較すると $\omega t=0$ のときのほうが V_n の強度は大きいので南北方向で雑音強度が大きくなる.

(c) z 軸まわりの微小回転振動: $A_{zn}\sin\omega_nt$

$$\theta_E=0, \theta_H=\omega t+A_{zn}\sin\omega_nt \quad (12)$$

$$\cos\theta_H=\left(1-\frac{1}{2}A_{zn}^2\sin^2\omega_nt\right)\cos\omega t-A_{zn}\sin\omega_nt\sin\omega t \quad (13)$$

$$\begin{aligned} V &= -nA_{\text{eff}}\frac{d}{dt}\left[B_x\left\{\left(1-\frac{1}{2}A_{zn}^2\sin^2\omega_nt\right)\cos\omega t-A_{zn}\sin\omega_nt\sin\omega t\right\}\right] \\ &= -nA_{\text{eff}}B_x\left[-\frac{2}{1}A_{zn}^2\omega_n\sin 2\omega_nt\cos\omega t+\omega\left(1-\frac{1}{2}A_{zn}^2\sin^2\omega_nt\right)\sin\omega t\right. \\ &\quad \left.-A_{zn}\omega_n\cos\omega_nt\sin\omega t-A_{zn}\omega\sin\omega_nt\cos\omega t\right] \end{aligned} \quad (14)$$

50~60 Hz における雑音成分のみ取り出す.

$$\begin{aligned} V_n &= -nA_{\text{eff}}B_x\left[-\frac{1}{2}A_{zn}^2\omega_n\sin 2\omega_nt\cos\omega t+\frac{1}{4}A_{zn}^2\omega\cos 2\omega_nt\sin\omega t\right. \\ &\quad \left.-A_{zn}\omega_n\cos\omega_nt\sin\omega t-A_{zn}\omega\sin\omega_nt\cos\omega t\right] \end{aligned} \quad (15)$$

ここで $\omega t=0$ (南北方向) とすると

$$V_n = -nA_{\text{eff}}B_xA_{zn}\omega_n\left(-\frac{1}{2}A_{zn}\sin 2\omega_nt - \frac{\omega}{\omega_n}\sin \omega_nt\right) \quad (16)$$

次に $\omega t = \frac{1}{2}\pi$ (東西方向) とすると

$$V_n = -nA_{\text{eff}}B_xA_{zn}\omega_n\left(\frac{1}{4}A_{zn}\frac{\omega}{\omega_n}\cos 2\omega_nt - \cos \omega_nt\right) \quad (17)$$

(b)の場合と同様に一樣な振動スペクトルを仮定し、また微小振動を考慮すると

$$\sqrt{\left(\frac{1}{2}A_{zn}\right)^2 + \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2} \ll \sqrt{\left(\frac{1}{4}A_{zn} \cdot \frac{\omega}{\omega_n}\right)^2 + 1} \quad (18)$$

であるから $\omega t = \frac{1}{2}\pi$ のときのほうが V_n の振幅は大きくなる。したがって東西方向のほうが雑音強度が強くなる。

6・4 実際の回転振動の大きさの推定と実際の回転角特性を生ずる原因の究明

三軸のまわりの微小回転振動のうち南北方向で最大となり、東西方向で最小となるのは (b) y 軸まわりの微小回転振動の場合のみである。したがって、気球搭載のループアンテナの雑音の原因は y 軸まわりの微小回転振動であると推定される。次に、この微小回転振動の大きさを求めてみる。外来雑音磁界をこのループアンテナで受信する場合に発生する起電力は

$$V = -nA_{\text{eff}}\mu_0H_{55}\omega_{55}\sin \omega_{55}t \quad (18)$$

で表わされる。(9)を(18)に対応させて書直すと

$$V_n = -nA_{\text{eff}}\mu_0H_xA_{yn}\omega_{55}\sqrt{\left(\frac{1}{2}A_{yn}\right)^2 + \left(\frac{B_z}{B_x}\right)^2} \cdot \sin \omega_{55}t \quad (19)$$

となる。(18)と(19)を比較すると

$$H_xA_{yn}\sqrt{\left(\frac{1}{2}A_{yn}\right)^2 + \left(\frac{B_z}{B_x}\right)^2} \quad (20)$$

が等価雑音磁界強度となる。図7, 8から南北方向の雑音磁界強度は $10^{-7}[\text{A/m}]$ である。また

$$H_x = 3.6 \times 10^3 [\text{A/m}]$$

$$B_z/B_x = 0.78$$

である。さらに、 $\frac{1}{2}A_{yn} \ll B_z/B_x$ と考えられるから A_{yn} を求めると

$$A_{yn} = 4 \times 10^{-11} \quad [\text{rad}] \quad (21)$$

となる。

求まった A_{yn} の値から考えると、実際の(9)と(10)の差、つまり南北と東西の方向による雑音強度の差はほとんど無視できる。したがって、南北方向と東西方向の雑音強度差は、単純に y 軸まわりの微小回転振動だけでは説明できないので、さらに何らかの仮定を導入する必要がある。もし、 y 軸まわりの回転振動の大きさが、 x 軸が南北方向を向いたときに最大となり x 軸が東西方向を向いたときに最小となればうまく説明がつく。実際の南北と東西の雑音強度差は最大 4 dB 程度であるから、それほど大きな方向依存性を考える必要はなく、現実には起こっている可能性は十分ある。このような方向依存性が z 軸まわりの回転振動にも起きたと考えると、その差を計算してみると東西方向に比べて南北方向の回転振動のほうが 10^{11} 大きくなければならず非現実的である。

6・5 回転角に対する雑音強度の細かい変動の原因

背景雑音の回転角特性の定常的な部分は、 y 軸まわりの微小回転振動の南北方向での増大で説明できる。しかし、もう少し詳しく図 7, 8 を見てみると、もっと細かい回転角依存性が存在する。これは、 y 軸まわりの微小回転振動の大きさがさらに細かな変動をしているためか、それとも強い雷放電が起きたために偶発的な変動によるもののいずれかであると考えられるが、現在のところ判別できない。

7. 結 論

大気球 B_1-33 および B_1-34 に搭載した電力線放射電磁界観測装置の水平ループアンテナの回転を利用して、気球から見た電力線放射源方向の推定を行なう方法を開発し、実際にデータを処理して推定を行った。しかしながら、実際に得られたループアンテナの回転角に対する磁界強度変化は、50 Hz および 60 Hz のいずれの場合とも背景雑音との信号対雑音比 (S/N) が大きく取れないため、方向推定の精度が得られなかった。この過程において、方向推定精度と信号対雑音比の関係を求め、実際に S/N が 3 dB 程度では最低感度方向を利用しても、最大感度方向を利用しても 90° の誤差が見込まれることを示し、S/N が方向推定の重要なパラメータであることを指摘した。

実際の観測データと、いくつかの仮定の下に予測した電力線放射源方向との比較を行ない、50 Hz 地域は東京から仙台に渡る範囲に中心が存在し、60 Hz 地域は大阪周辺地域に中心が存在すると推定できることを示した。

背景雑音のみを含む 55 Hz の磁界強度が南北方向で最大となり、東西方向で最小となるという特性を示し、この特性が時間的にも場所的にも、さらに、一年間隔った B_1-33 および 34 の両気球においても同様に観測された。この特徴は、遠方の雷放電源が定常的に存在すると考えれば説明できるが、現実には存在の可能性は小さい。他には外来雑音源が存在すると考えられないので気球の回転に伴う磁界雑音の発生機構を調べた。この結果、 y 軸まわりの微小回転振動が原因であることがわかった。しかし、実際には、これに加えて、 y 軸まわりの回転振動自体が南北方向で大きく、東西方向で小さくなるのが背景雑音の回転角依存性を生ずる原因であることを示した。また、この回転振動の大きさを求めてみると南北方向で $4 \times 10^{-11} [\text{rad}]$ と微小なものであることがわかった。これに対して東西方向は 4

dB 程度小さい。

さらに細かな回転角特性の変動は、微小回転振動の短期的な変動によるものか、雷放電雑音の活動度の変化によるものかわからない。この点は今後に残された課題である。

謝 辞

電力線放射の観測研究に対して常に励ましを頂く電気通信大学芳野赳夫教授に深く感謝する。気球観測装置の製作およびデータ解析に携って来た山川智、石本俊英、岩瀬肇、佐々木勇人の各氏に感謝する。最後に、気球観測において多大の御援助を頂いた宇宙科学研究所西村研究室および広沢研究室の方々に深く感謝する。データ解析の一部を電気通信大学情報処理センターの M 180, M 260 を用いて行った。

参 考 文 献

- [1] 富沢一郎・芳野赳夫「電力線放射の研究-I. 気球観測-」, 電気通信大学学報, **30**, 101-108 (1979)
- [2] 富沢一郎・芳野赳夫・水野良之, 「電力線誘導放射の観測」, 大気球シンポジウム(昭54年度), 125~131 (1979)
- [3] 富沢一郎・芳野赳夫, 「日本列島近傍の電力線誘導放射電磁界強度」, 大気球シンポジウム(昭57年度), 100~109 (1982)
- [4] 山川智・富沢一郎・芳野赳夫, 「50 Hz および 60 Hz の電磁界から推定される日本列島からの電力線放射エネルギー」, 大気球シンポジウム(昭和59年度), 68~70 (1984)
- [5] 山川智, 「日本列島近傍の電力線誘導放射電磁界の大気球 B_1 -33 による観測研究」, 電気通信大学応用電子工学科修士論文(1985)
- [6] 岩瀬肇, 「大気球 B_1 -34 による電力線誘導放射電磁界の観測研究」, 電気通信大学応用電子工学科卒業論文(1986)
- [7] 富沢一郎・芳野赳夫, 「日本列島近傍の電力線誘導放射電磁界の観測- B_1 -31 の結果」, 宇宙科学研究所報告, **8**, 101~110(1983)