

VLF電波観測と送電線誘導雑音

渡邊 伸夫*, 栗本 計起*

The Observation of VLF/ELF Waves and the Harmonic Noise Occurred from Power Lines

Nobuo WATANABE* and Kazuoki KURIMOTO*

(Received May 30, 1997)

The magnetic and electric fields sometimes changes in relation to the earthquake has long been discussed. After the disastrous Kobe earthquake in January 1995, the electromagnetic perturbation in the atmosphere or ionosphere associated with great earthquakes became well known. The electromagnetic environment of harmonic noise occurring from power lines is a very serious problem in observing VLF/ ELF electromagnetic waves.

But these environment before and after the construction of power lines have not been observed. We had the very rare chance to measure the noise from the power lines during power transmission near our observatory, in Yamaoka.

This paper discusses the intensity of this harmonic noise and how to measure VLF/ELF waves.

Keywords : VLF/ELF, harmonic noise from power lines, earthquake, FFT, Sonograph

1. まえがき

VLF/ELF(以下VLFと記す)電波観測は電離層変動のみならず、磁気圏における電子密度情報を得る数少ない受動的手段として古くより用いられている。近年、注目されている地殻の変化に伴う電磁波の観測は、将来、地震予知に結びつく重要な観測である。地震前兆による電磁波が直接的に地中より発生するか、それとも間接的に電離層より到来するかについては多くの議論があるが、いずれにしても、このようなVLF観測には、10kHz以下の人工雑音に埋もれた微弱な自然電波を受信し、基礎データを蓄積収集する必要がある。そこで、こうした微弱電波の観測には、何よりも場所の選択と低雑音で高感度な受信器が必要である。

しかし、近年、山奥まで開発が進み、家庭用の電化製品や送配電線から放出される人工の電磁波雑音が大きな障害となってきた。こうした折、我々のVLF観測拠点であった山岡観測所(岐阜県恵那郡山岡町:図15参照)の西方900mの地点に、500kV超高压送電線が建設される運びとなった。特に、500kV超高压送電線からの誘導雑音(以後、送電線誘導雑音と記す)は極めて強く、こうした微弱電波の観測には致命的障害となる。

ところが今まで、送電線誘導雑音がVLF電波観測に対して及ぼす影響について基礎的なデータは無く、新しい観測地点の選定に当たってもなんら基準となるデータはなかった。今回、観測地点の近隣1km以内に民家もなく、送電線の運用開始前後における誘導雑音を観測しデータを取得する絶好の機会となった。

そこで、VLF電波と送電線誘導雑音の影響について詳

*電子工学科(Department of Electronic Engineering)

しく研究し、これらのデータを基に、新しい観測候補地の選定と、雑音の解析システムを合わせて開発した。

2. VLF電波観測

従来、VLF電波観測で、我々が扱ってきたホイスラの到来波の電界強度は、おおむね、0.1mV/m前後である。VLF電波は波長が長いので、受信には、低雑音の増幅器と実効面積200m²程の大型の棒型空中線（ループアンテナ）を必要とする。今後、VLF微弱電波の観測には、フェライトコア・バーアンテナを用いて、よりコンパクトな受信アンテナと超低雑音増幅器の開発が是非とも必要である。

近年、低雑音トランジスタやアナログICが開発され、高感度で低雑音用増幅器の製作が可能となった。しかし、VLF微弱電波の観測では、デジタル信号処理技術を応用して、人工雑音の中からの的確に信号を抽出し解析する必要がある。昨今、パーソナルコンピュータの発展により、こうした分野のソフトウェアも豊富に出回り、高度な信号処理が可能である。しかし、我々の観測対象が特殊なものであり、継続して自動観測を実行するためには、専用のソフトウェアの開発によるきめの細かい処理が必要となる。

3. VLF雑音

VLF観測で問題となる雑音は、増幅器が発生する雑音（ホワイトノイズ）と、商用電源からの誘導雑音、そして空電（雷や雲間放電により発生する電波）がある。これらの雑音測定は、通常、増幅器の入力電圧に換算して比較すると便利である。一般に、微弱信号電圧の測定は、エレクトロニックボルトメータ（電子電圧計）を使用する。これは、信号の平均値を正弦波の実効値に換算して表示する。従って、増幅器雑音や誘導雑音など複雑な波形をした信号の測定には誤差が多くなる。そこで、ピーク電圧の測定やFFTスペクトル分析が用いられる。

(1) ホワイトノイズ

増幅器雑音の測定は、帯域幅 f を限定し、バンド・パス・フィルタを通して測定する。この値は、その周波数帯域に含まれる全てのスペクトル成分を合成したものである。従って、ホワイトノイズのように信号のスペクトルが連続して均一に分布している場合は、帯域幅 f の平方根に比例する。通常、 f を1HzとしnV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ の単位を使用する。

(2) 誘導雑音と空電

誘導雑音の発生源は、家庭用電化製品及び柱上トランス、送配電線、そして高圧送電線がある。我々の経験では、家庭用電化製品からの雑音は、100m程度離れればその影響は無視できる。そして、送配電線からは約1km、500kV高圧送電線からは10km離れることが目安である。

言うまでもなく、誘導雑音は商用電源周波数60Hzとその高調波によるものである。そして、発生源が送電線に沿って広く分布する場合は、それらが、一層複雑に混ざり合い一様ではない。従って、現地での測定が不可欠となる。誘導雑音の観測は、夏期の雷雲や前線が接近した場合を避け、空電が少ない冬の穏やかな日を選んで行うことが望ましい。これらの測定には、周波数スペクトル解析により、空電と誘導雑音とを区別し客観的に判断することが重要である。

4. VLF観測システム

4.1 低雑音増幅回路

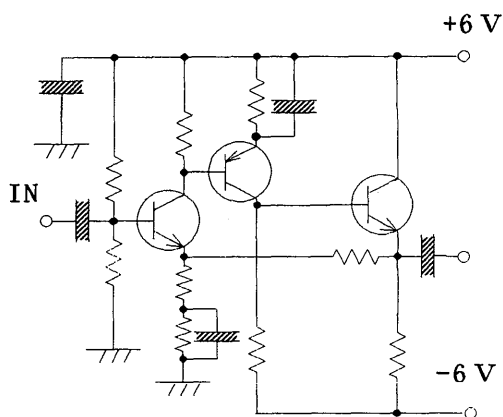


図1 トランジスタ低雑音増幅器の回路例

図1は、低雑音バイポーラトランジスタを初段に用いたVLF観測のための増幅回路例である。低雑音トランジスタ回路は、バイアス点を極低電流に設定することが望ましい。また、自然現象を対象とする観測増幅器では、入力信号のダイナミックレンジが極めて広く、絶えず過大入力にさらされる恐れがある。過大入力は時に増幅器のバイアス点を変動させ、極端な場合はしばらくの間正常な増幅ができなくなることもある。これは、単一電源の増幅器に多く、段間のカップリングコンデンサを省略し、直流帰還を施すことで安定する。近年、バイポーラアナログ集積回路による超低雑音オペアンプ (Operational Amplifiers) が容易に入手でき、低雑音で安定性に優れた増幅器の製作が可能である。

本増幅回路の入力端子を100Ωでショートし、出力を電子電圧計 (VP-960) で測定して入力換算雑音電圧NLを求めると。

$$NL = 1.22 \mu\text{V (rms)} \quad (R_s = 100 \Omega \quad \text{ゲイン: } 40\text{db})$$

となった。

4.2 VLF観測アンテナ

VLF観測用増幅器は主に電界強度が0.1mV/m前後の電波の受信を目的とする。

ここで、ループアンテナの誘起電圧は、

$$e_o = E \cdot h_f \text{で表される。}$$

$$h_f: \text{ループアンテナ実効高 } h_f = 2\pi TA/\lambda$$

$$T: \text{ループの巻き数, } A: \text{面積 (m}^2\text{)}$$

$$E: \text{電界強度 (V/m)}$$

$$\lambda: \text{波長 (m)}$$

山岡観測所の空中線【A=200m²(H:20m, L:20m, 2等辺三角形), T=2回】を例に誘起電圧 e_o を計算すると

$$e_o = 0.84 \mu V_{rms} \text{ (1kHz) となる。}$$

これは、先の低雑音増幅回路のホワイトノイズレベル(NL)に相当し、十分なS/N比を得るためには、T, Aを更に大きくとる必要がある。しかし、いずれの場合もアンテナの建設コストが増大する。

4.3 入力トランス型VLF観測用増幅器

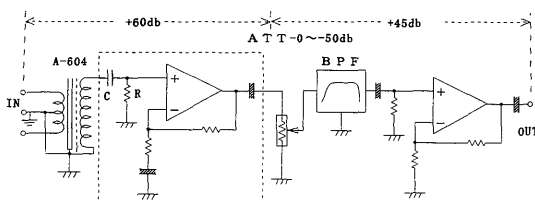


図2 VLF観測用増幅器回路図

そこで図2の様に、入力トランスを使用しアンテナ誘起電圧をステップアップした。初段で利得を高めることは、全体の雑音指数の改善に大きく寄与する。また、トランスを用いるため過大入力に対する飽和特性がなだらかであり、入力ダイナミックレンジの広い自然雑音を対象とする観測には大きな利点がある。

今回用いた入力トランスは、巻き線比が1:40であり、ゲインは+32dBとなる。但し、これは2次側を解放して使用した場合である。通常、トランジスタ増幅回路の入力インピーダンスは10kΩ程度であり、FET入力低雑音オペアンプを使用することで、より高性能な増幅器の設計も可能と思われる。今回測定に使用した増幅器には、初段アンプ部に図1のトランジスタ増幅回路を用いた。

4.4 雑音信号解析

本雑音信号処理プログラムは、パーソナルコンピュータ(PC-9801)を用い、FFTスペクトル解析を実行するものである。自己開発ソフトウェアであり、今後VLF自動観測システムの開発に応用すれば、きめの細かい処理が

可能となる。

(1) スペクトル解析

FFT・パワースペクトラム解析は、サンプリング周波数を f_c (本例では20kHz)、データ数を N (1024個)とすると、周波数範囲 $0 \sim f_c/2$ (10kHz)を、 $N/2$ (512点)のスペクトルで表示する。従って、スペクトル周波数 f_n ($n=1 \sim 512$)は、 $f_n = n \cdot f_c / N$ (Hz)で表され、その間隔は、 $\Delta f = 19.53$ Hzとなる。特に、今回のように商用電源周波数60Hzの高調波を分析する場合は、 f_n の間隔と第 n' 次の高調波周波数 $F_{n'} = n' \cdot 60$ (Hz)とが一致するようにサンプリング周波数を選ぶことが理想である。例えば、 $f_c = 60 \times 256 = 15.36$ kHzと選べば、 $\Delta f = 15$ Hzとなり $F_{n'}$ と一致する。

今回、やむなく $f_c = 20$ kHzで実行したため、 $F_{n'}$ と Δf の間隔が徐々に変化し、 $F_{n'}$ が f_n とほぼ一致した場合と、 Δf の中間に位置した場合とでグラフ上で表示されるスペクトルの大きさ e_n が変化する。中間に位置した場合、エネルギーは、 f_n と f_{n+1} にまたがり、更にその両サイドに散らばって分布する。従って、実際のスペクトルの大きさ E_m は、これらのスペクトル成分を合成して求める必要がある。問題はその範囲であり、他の周波数成分や雑音を合成することを避けるため、ある特定範囲に限定する。本プログラムでは、その範囲を f_n を中心に $\pm 2\Delta f$ に限定した。裾野の拡がり具合から取り残したエネルギーを想定して、基準入力1V(p-p sin波)を加えた時、 $E_m \approx 353.6$ mV(rms)を示すよう実験的に次式で補正した。

$$E_m = e_m \left(1 + \frac{e_n}{e_{(n+2)}} \cdot 0.2 \right)$$

$$\text{但し, } e_m = \sqrt{\sum_{n=2}^{n+2} e_n^2}$$

(2) スペクトロ・グラフ

サウンド・スペクトログラム(ソナグラフ)とは、音声のスペクトルの時間的変化を、縦軸を周波数、横軸を時間、スペクトルの強さを濃淡で表し、3次元パターン表示するものである。

本ソナグラフは、パソコン画面の2×2の4ドットを1画素とし、縦軸(周波数)の分解能は、128点(256点 FFT使用)で表示する。横軸(時間)は、1フレーム 32768個のデータを記憶し、順次128点づつデータをずらしながら256点データを取り込みFFT演算を繰り返すと、256回のデータが得られる。従って、128×256画素13譜調のスペクトロ・グラフが描かれる。(図8参照)

本図では、60Hz誘導雑音と高調波は水平方向に連続した黒い線となる。また、雲間放電や雷などの雑音は、縦の線となる。増幅器ホワイトノイズは全体に霞状の細かい

い斑点で表示される。ここに何らかの信号が受信された場合は、これらの雑音とは違った、特異なパターンが描き出され、一目して、雑音との判別が可能である。

5. VLF増幅器の特性試験

増幅器の特性試験回路を図3に示す。

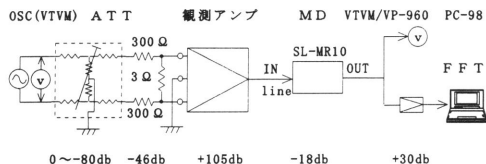


図3 増幅器特性試験／信号解析ブロック図

(1) 周波数特性

図4はVLF観測増幅器の周波数特性を示す。電源周波数60Hzで増幅器が飽和するのを防ぐため入力段で低域をカットした。入力トランスと初段増幅器とのカップリングコンデンサCと入力抵抗Rとの時定数により、960Hz以下の周波数で徐々にゲインが低下する。

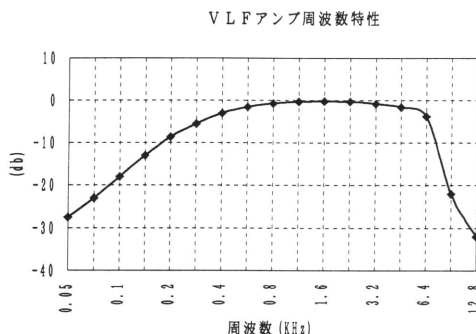


図4 VLF観測増幅器の周波数特性

(2) 雑音特性

① 入力換算雑音電圧NLは、入力端子をショートし残留出力電圧を測定する。ガードアースを十分に取り、増幅器全体をシールドボックスに入れるなどの配慮が必要である。

$$NL = 0.123 \mu V (\text{rms})$$

($R_s = 3\Omega$ ゲイン：105db 電子電圧計VP-960)

② 雑音の周波数特性

(R_s ：ショート ゲイン：105+12db 1024点FFT)

図5は、誘導雑音の少ない山中で増幅器雑音を録音し、スペクトル解析した結果を示す。上段に波形、下段にパワースペクトラムを示す。

図6は、50, 70.7, 100, 141, 200・・・(Hz)の各ス

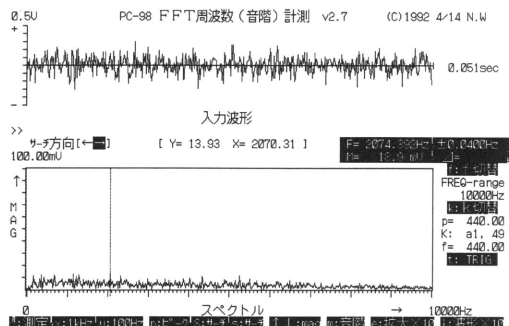


図5 VLF観測増幅器雑音特性

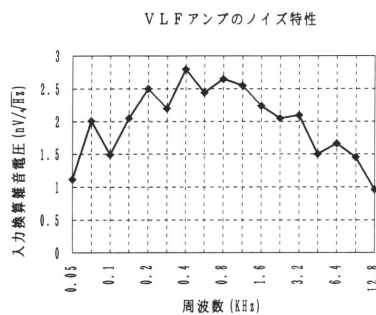


図6 VLF観測増幅器入力換算電圧雑音

クトルの大きさを読み取り、 $\sqrt{\Delta f}$ で割ることで、入力換算電圧雑音の周波数特性を表した。

(3) 入出力特性

入出力特性は、図14を参照。実線は電子電圧計での測定値、点線は1024点FFTにより測定した値である。

6. 観測

6.1 誘導雑音の観測

今回の観測の主な目的は、「500kV高压送電線の運用開始（以後、運用と記す）により、具体的にどの程度誘導雑音が増加するか」を測定することと、「山岡観測所に代わる新しい観測候補地の選定」である。

そこで、次の3項目について測定を実施した。

- 送電線運用前の山岡観測所周辺の雑音レベルの測定。
- 送電線運用後の誘導雑音レベルの変化と測定。
- 各地のバックグラウンド雑音の調査。

観測は中部電力株式会社と共同、或いは、相互に実行したものを集計、検討を加えながら実施した。

6.2 観測方法

誘導雑音の測定は、特定のループアンテナを基準に、各地で観測する。今回、特に測定時期を選ぶ余裕がなく、極力空電の影響が少ない方法を試みた。

送電線からの誘導磁界は、送電線を中心に同心円状に発生する。従って、誘導雑音がこの磁界によるものと仮定すると、ループアンテナの面を送電線の進行方向に対し直角とした場合に最小となる。これに対し、平行とした場合は大きく、更に水平に設置すると最大となる。そこで、ループを水平に直接地面に伏せて測定した。通常、電波は地中の中には伝搬しにくく、アンテナを地面に伏せた場合、空電に対して感度が低くなる。ところが、60Hzのような低い波はある程度浸透すると思われ、送電線の誘導雑音の測定には有効と考えられる。

観測は、次に示す移動用簡易アンテナ①②③を用い、図7のように実行した。録音には、ランダムアクセスが可能でデータの比較が容易なMD(Recordable-MiniDisk)を使用した。

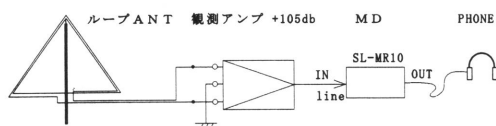


図7 観測システムブロック図

①ACコード簡易ループアンテナ【110m²×2T】

40m²芯ビニール線をループとし、地面に直接揚げ2回巻きループアンテナとする。面積は所により100～120m²前後の違いがあり1～2db程度の誤差を見込む。

②垂直ループアンテナ【19m²×4T】

上記2芯ビニール線を2重にし、頂点をアルミポールで支え、底辺7mの2等辺三角形とする。面積は約19m²とする。

＜①との相対利得差：約－13db（山岡観測所^注）＞

③枠型空中線【6.25m²×2T】（中部電力製作）

一辺が2.5mの正方形の木枠をフレームにビニールコードを巻き付けたループアンテナ。

＜①との相対利得差：約－30db（山岡観測所⁰）＞

これは、山岡観測所100m南地点で、ループ面と平行な方向を、0°（磁北）とした場合の実測比である。

6.3 観測結果

6.1(a) (b) (c)の各項目に関連して、それぞれ、代表的な解析結果の例を次に示す。

図8aは、運開前(1996年4月10日)の山岡観測所の測定結果の一例を示す。

パワースペクトラムにおいて、5k～9kHzのスペクト

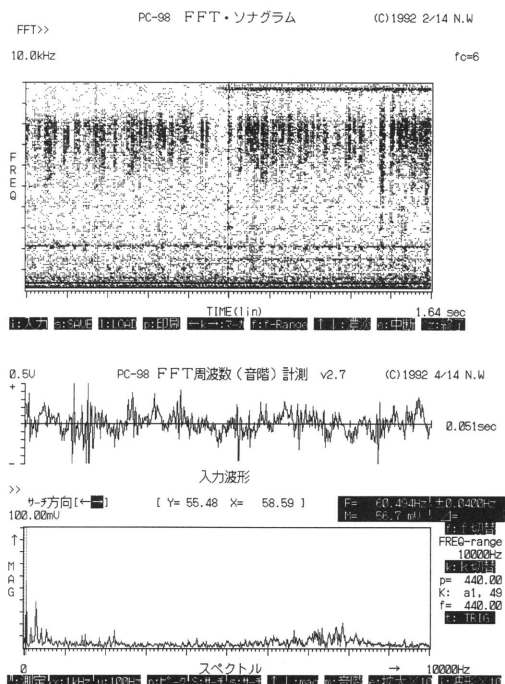


図8a 誘導雑音特性 通電前(1996-4/10) 山岡観測所南100m

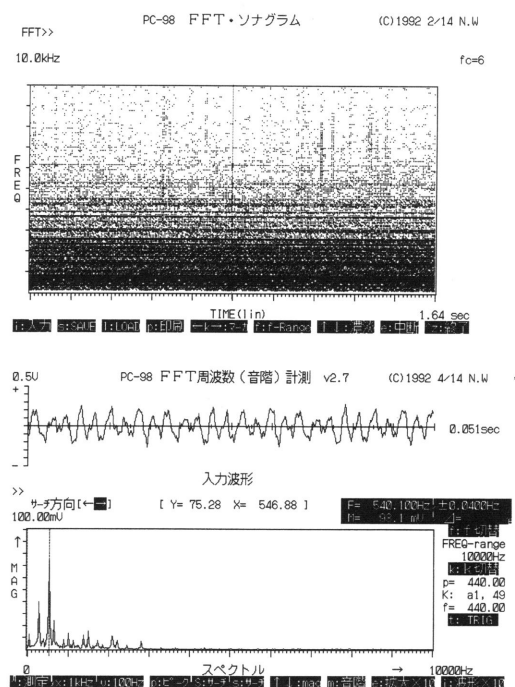


図8b 誘導雑音特性 通電後(1996-6/17) 山岡観測所南100m

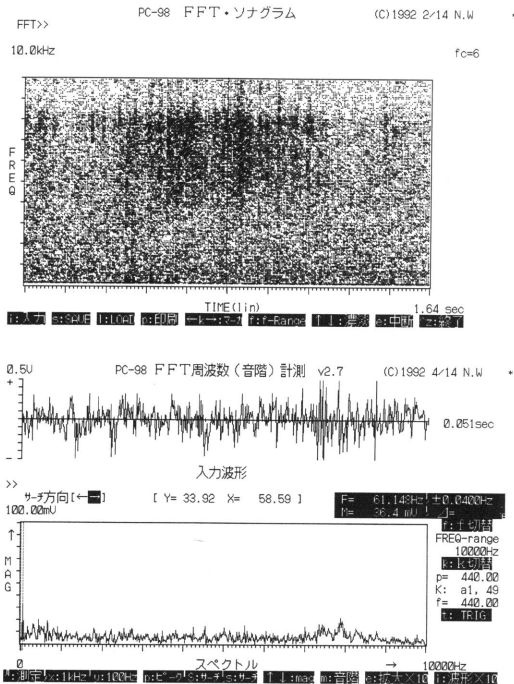


図8c 誘導雑音特性 中津川溪谷, 杉ヶ沢(1996-9/25)

ルレベルの上昇は、空電の影響によるものである。

図8bは、運開後(1996年6月17日)の山岡観測所の測定結果の一例を示す。

観測増幅器のアッテネータを -30db としたことで、少なくともそれ以上は雑音が増加している。ソナグラムでは、 2.5kHz 以下がほぼ真っ黒になるほど、無数の線が描かれ多数の高調波の存在が認められる。

図8cは、(1996年9月25日)の中津川溪谷(山岡観測所, 図15の北北東約 10km 地点)の測定結果の一例である。

全体に増幅器のホワイトノイズが分布し、逆に、誘導雑音が少ない非常に静かな場所と分かる。図8aと比べ空電のレベルは多少高く、これは季節からして妥当である。

7. 結果と考察

誘導雑音は、その周波数や強度が場所や時間で複雑に変化し、これらを総合的に評価することは難しい。ここでは、観測データを基に、様々な方法を試みた。

〈1〉ある特定スペクトルの単独レベル

高調波のスペクトルは、場所や時間で不規則に変動し、対象を特定することは難しい。但し、同一地点でほぼ同時刻に測定した、雑音の指向性の解析には有効である。

〈2〉最大スペクトル および、スペクトルの平均レベル

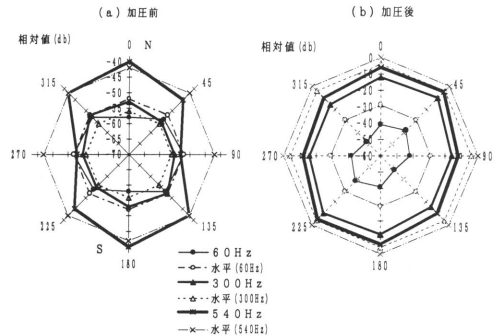


図9 誘導雑音の方向性

スペクトルが不規則に分布する信号を比較する一方法である。共に一長一短があり、平均化により雑音にマスクされる場合もある。

〈3〉スペクトルの合成レベル

各スペクトルを自乗し合計したものを平方根で開き、誘導雑音レベルとした。実効値と平均値同様、変動の大きいデータの比較には有効と思われる。

7.1 誘導雑音と指向性

図9a, bに運開前後の山岡観測所における誘導雑音の指向性の变化を示す。観測は、棒型空中線③を使用し、1996年6月6日中部電力株式会社により実施された。

今回、運用をひかえた 500kV 送電線と平行して、その、西方約 10km に同じく 500kV 送電線が運用中である。この送電線は、ほぼ、南南東から北北西の向きに設置されており、通電前の観測結果ではその影響が認められる。測定はループ面と平行な方向を 0° (磁北)としたため、図では、最大値を示す方向と送電線の向きが一致する。但し、周波数により方向にずれが生じ複雑な伝搬が推定される。図bの加圧後は、スケールの取り方で楕円表示となるが、それぞれ 10db 以上の指向差と方向性が揃って現れ

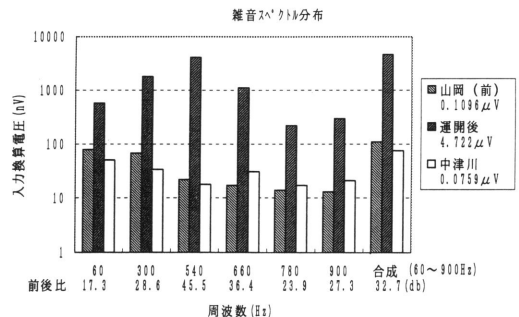


図10 総合誘導雑音レベルの評価例

ている。また、水平（直接地面に伏せた）時最大値を示すことでも、送電線の影響が顕著である。前後比は、42db (540Hz水平)認められる。

7.2 誘導雑音レベルの評価

図10は、山岡観測所における運用前後の観測データ、図8a, bと、中津川溪谷、図8cをもとに、誘導雑音レベルを比較した。いずれも簡易ループアンテナ①を使用した。空電の影響を避けるため、1kHz以下で60Hz高調波の主なスペクトル、60,300,540,660,780,900Hzの6点を選定した。右端の棒グラフは、この6点のスペクトルを合成した誘導雑音レベルである。

〈1〉 運用前後比

下段の数値は各周波数毎の前後比を示す。運用後540Hzのスペクトルが最も強く観測され、その比率も45.5dbと最大を示す。これは、(1)の測定結果42dbと、時期やアンテナが異なるがほぼ一致した。

合成の誘導雑音レベル比は、32.7dbとなった。一方、平均のレベル比は31.7dbで、あまり差はない。これは、小さな高調波を除外し、変動を少なく計算するためである。

〈2〉 中津川溪谷の雑音レベル

運用前の山岡観測所と中津川溪谷の誘導雑音を比較すると、合成レベルで、 $0.1096\mu\text{V}$ と $0.0759\mu\text{V}$ となった。その差は-3.19dbと僅かだが、微弱な自然電波の観測には、例えば1dbでも非常に大きな意義がある。

7.3 誘導雑音の高調波スペクトル分布

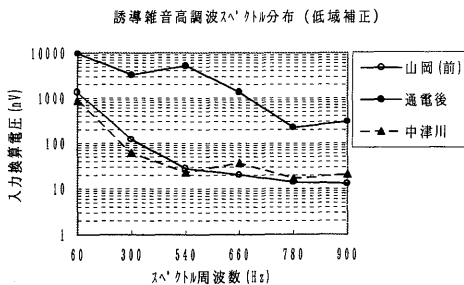


図11 誘導雑音スペクトルの分布

図11は、図10を増幅器の周波数特性で換算補正し、折れ線で結んだものである。運用前の山岡観測所のように送電線から遠く離れた場所では、60Hzをピークに高次ほど減衰する典型的な歪み波交流のパワースペクトラム分布を示している。

一方、運用後の分布は540Hz以下のスペクトルがほぼ $10\mu\text{V}$ 付近で頭打ちとなり、一見、飽和したかに思われ

る。しかし、増幅器の入出力特性から入力飽和レベルは-30dbアテネータのとき、 $780\mu\text{V}$ で十分な余裕があり、出力波形からも飽和は確認できない。そこで、増幅器入力での飽和を考えると、飽和により自らの高調波が加算され、その後、アンプの周波数特性により540Hz付近の高調波がより大きく増幅されたと考えられる。増幅器の低域特性は入力段のCR時定数で決まる。従ってそれ以前、すなわち、入力トランスで飽和した可能性が指摘される。この場合、中間アテネータではどのように調整しても無意味であり、送電線近傍1km以内は、念のため、アンテナに減衰器を取り付けるか、実効高の小さいアンテナを使用することとした。

7.4 送電線からの距離と誘導雑音の変化。

送電線近傍において、仮に入力トランスが飽和したとしても、その9次高調波が基本波と同等レベルで発生することはあり得ない。また、アンテナに減衰器を取り付けても同様な結果が観測されたことから、実際に540Hzが強く受信されたと考えるのが自然である。では、なぜ遠く離れた地域では60Hzが強く観測されるか。60Hzは540Hzに比較し遠くまで伝搬するか。と言った疑問が生まれる。そこで、送電線からの距離をパラメータに誘導雑音の分布を調査した。

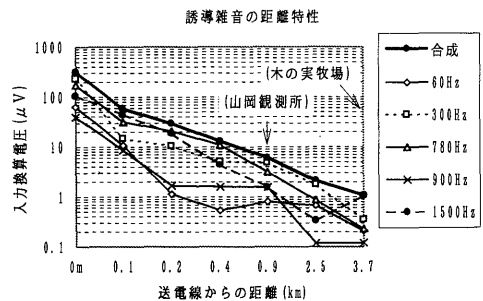


図12 送電線からの距離と誘導雑音の変化

図12にその結果を示す。垂直ループアンテナ②を使用し、900m以内はアンテナに抵抗減衰器、-20db/-40dbを挿入した。参考として山岡観測所と新設された500kV送電線（愛岐幹線）周辺の見取り図を図15に示す。観測は、送電線の東側、林道沿いに実施した。近隣1km内外の民家や配電線の影響、谷間や峰筋といった地形の影響を考慮すると、かなり誤差を含むと思われる、今回3.7kmまでの測定結果では伝搬特性の確認はできなかった。

7.5 送電線運用開始前後の雑音変化。

図13は、山岡観測所における送電線運用試験時の雑音変化の分析である。観測、解析は、中部電力株式会社に

上記(1)(2)は、いずれも増幅器の飽和が原因と考えると説明がつく。

しかし、装置の検証と、観測データを解析する限り、増幅器の飽和は認められない。入力トランスも、十数mVの入力に対しても十分動作する。この種のトランスは、巻き線に直流が流れると簡単に飽和する場合がある。しかし、今回増幅器入力回路は直流的に中性で、更にフィルムコンデンサを使用していることから、トランスの飽和は考えられない。新たな観測増幅器の設計や高性能磁性材料を使用した入力トランスなど、今後の検討課題である。

(4) 60Hz以下ULFに対する影響について

今回、プロトン磁力計に対しては、顕著な影響はなかった。但し、データ自体の影響の有無は、今後の観測データを統計的に調べる必要がある。

謝 辞

本研究を進めるに当たり有益なご助言をいただいた本学電子工学科鈴木宣夫教授に心より感謝いたします。また観測調査、データ分析にご協力いただいた、中部電力株式会社、電力技術研究所、情報ネットワークグループの各担当諸氏に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 渡邊伸夫, 栗本計起: “パーソナルコンピュータによる高速FFTサウンド・スペクトログラフ装置”, 電子情報通信学会EMCJ91-68, pp.23-28 (1991-12).
- 2) 太田健次, 岡田敏美: “昼間ボイスラの電界強度の緯度変化”, 信学論, J68-B, 12, pp.1493-1499 (1985-12).
- 3) M.Hata, X.Tian, I.Takumi, S.Yabashi and A.Imaizumi: “ELF horizontal magnetic flux precursor of the moderate M5.8 Yamanashi '96 inland earthquake”, J.Atmos.Electr., 16, 3, pp.199-220 (1996-5).
- 4) M.Hayakawa and O.A.Molchanov: “Precursory effect in sub-ionospheric VLF signals for the Kobe earthquake”, Proceedings of 10th International Conference on Atmospheric Electricity, pp.424-427 (1996-6).
- 5) 中部電力株式会社, 電力技術研究所, 情報ネットワークグループ: “電界強度測定結果報告書” (1996-4) (1996-5) (1996-6)