

## ファーフールドへの誤信 (確定版)

By H.Paul Shuch, N6TX

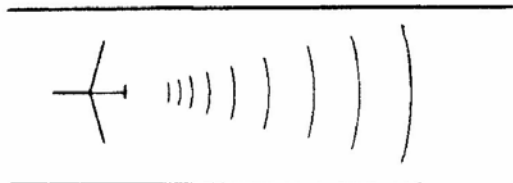
From QEX, December 1987 pp10-11

翻訳 田村潤司 JA7AVQ

読者はこれまで地域の VHF あるいは UHF の会合に参加し、そこでアンテナゲインの測定を行ったことがあるだろうか？　そこでまず間違いなく聞かされることは「アンテナ・レンジが短すぎる」と云うでぼやきあろう。「俺のアンテナの性能が良くなかったと云うけど、それは Near Field での測定だったからさ。もっとゲインがあるよ・・・。」　このぼやきはイソップ物語の酸っぱい葡萄の話にそっくりであるが、彼の云うのには一理ある。簡単に云えば DX アンテナの性能は DX Condition の下で測定される必要がある。それでは本当の話 Near Field の限界がそこにあるのだろうか？　それならば、Far Field と云うが、それはどれだけ離れていれば十分と云えるのであろうか？　1987 年 West Coast VHF/UHF Conference のすぐ後に、筆者はこれを発見しようと思いついた。(実はこの Conference の測定では、筆者のアンテナの性能が、自分の信じているレベルよりも悪かったのである！)

### 《 伝統的な説明 》

短い電磁波は直線的に自由空間を飛んで行く。そしてアンテナはこのことを知っている。(たとえアンテナ設計者がそれを知らなくとも！)　出来るなら試してみても良いのだが、電磁放射をペンシル・ビームのように細く向けることは実際には出来ない。放射しているアンテナの波頭は距離が遠くなるに従って広がって行く。

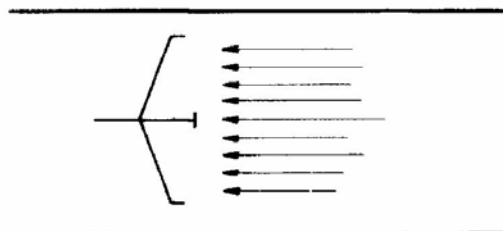


**Fig 1—Visualizing the beamwidth for a radiating antenna.**

Fig.1はこの様子を図にしたものである。(Fig.1：放射中のアンテナのビーム幅を視覚化したもの)　そして読者はなぜアンテナが限定されたビーム幅を持っているのかが分かるであろう。

向かって来るエネルギーの最大量を捕まえるために、我々が受信用のアンテナを設計する時には、拡散して行くビームを出来るだけ捕まえるようにする。このための普通のやり方は、アンテナを物理的に大きくすることである。しかし、ア

アンテナの Capture area (捕捉面積) を拡大するための方法は色々ある。(物理的には小さくとも、電気的には大きくする方法がある。) つまり、放射エネルギーの Ray(線のこと)を出来るだけ多く捕捉することによってゲインを稼ごうとする。Fig.2 参照 (Fig.2: 受信アンテナに到達する平面的な波頭 Planar wavefront )

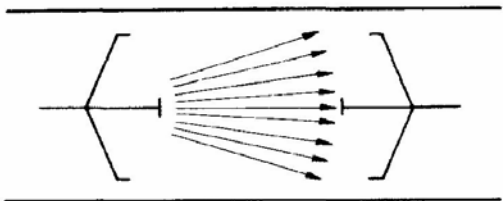


**Fig 2—Planar wavefront arriving at a receiving antenna.**

(訳注; Planar とは、まさに平面的なことを意味している)

さて問題は次の通りである。効率的に機能するには、受信アンテナは平面波頭を捕捉する必要がある。つまり、個々の電波は平行して到着しなければならないと云うことである。もし送信用と受信用

アンテナ間の距離が適当に離れていれば、ほぼそのような状態に近いと云える。しかし、もし受信用アンテナの物理的サイズ(あるいは捕捉面積)がエネルギー・ソースからの距離に比較してかなり大きければ、問題が生ずる。



**Fig 3—The near-field problem occurs because a nonplanar wave front appears at the receiving antenna.**

Fig.3 で見られるとおりに、受信エネルギーは非平行線として到着する。各電波は互いに位相がずれた状態で受信アンテナに到達している。そして一部は打ち消しあう。従って near field で測定されたアンテナのゲインはエラーになってしまう。(受信エネルギーが平面的波頭ではないので)

### 《 解析的なアプローチ 》

エンジニアリングのテキストブックでは、放射しているアンテナの前にあるフィールドを3種の明確な領域に分けるように書いてある。すなわちフレネル・ゾーン(Fresnel zoon)または near field、フラウンホフナー・ゾーン(Fraunhofer Zoon)または far field、及び遷移ゾーン(transition zoon)である。アンテナ測定に関するこれらの三の領域の意味は次の通り。

送信アンテナの near field 内で受信アンテナによって捕捉されたパワーは、殆ど変化しない。距離の変化に対する平均誤差は恐らく  $\pm 2\text{dB}$  程度であろう。アンテナ間の間隔を far-field の距離までに長くすると、回収されるパワーは距離の二乗

に反比例する。遷移領域の範囲内ではパワーが一定でもなければ、二乗に反比例することもない。

Near-field 領域内では、最大パワー密度はある固定した距離において生ずる。これは容易に予測できる。

$$d = 0.2 D^2 / \lambda \quad (\text{Eq 1})$$

d : 最大のパワー密度となる放射アンテナからの距離

D : アンテナの直径 (パラボラ・アンテナとする)

$\lambda$  : 運用周波数

3種の寸法(dimension)のすべては、同様の単位で表される。例えばパラボラ反射アンテナについて、near field は次の算式にほぼ等しい距離で外に向かって広がる。

$$d = \pi D^2 / 8 \lambda \quad (\text{Eq 2})$$

この算式で、d は near-field の境界線を表す。それ以外の記号は上記に同じ。

Far-field 領域の始まりの距離 d は、ほぼ次の通りである。

$$d = 2D^2 / \lambda \quad (\text{Eq 3})$$

この算式での d は far-field の境界線を表す。それ以外のすべての係数は上記に同じ。

Far-field の境界線は  $(16/\pi)$  の係数であり、すなわちアンテナからの距離は、near-field 境界線までの距離の約5倍である。Near field と Far field 間の領域は遷移領域と考えられている。

さてアンテナゲインの測定に関連して云えば、受信アンテナは送信アンテナの far-field のところにあることが望ましい。その逆もまた同様である。従って Eq.3 は我々が求めている関係に対して最も妥当なものである。ここで Far-field の境界線は、アンテナ直径の二乗に、また波長に逆比例して、直接影響を受けると云う点に注意して欲しい。従って、高い周波数で運用されている物理的に大きなアンテナ (マイクロウェーブ・ハムが良く利用している状況) については、アンテナ測定に要求されるパスの長さ(path distance)はきわめて大きくなる。

#### 《 哲学的な反論 》 Philosophical Objection

上記の算式にまつわる問題は、我々がまさに学ばんとしている物理的メカニズムを不鮮明にしてしまう傾向がある。Near-field や far-field の境界線を規定する距離を数学的に予測することが可能であると云うことは、これらの距離がなぜア

ンテナ測定での差を生じさせるのかを明確に視覚化することとはまったく別である。もし我々が計算よりも概念を強調することを望むとすれば、なぜ全てが関わっているのか、正確な説明（恐らくメカニカルな類似性を含めて）を理解しなければならない。

これが筆者を考えさせることになったのである。明確な関係を示すには算式が余りにも複雑であるし、係数も余りにも恣意的である。更に算式ではあるとされる正確な境界線をいやでも理解するに到る調査量も少ない。筆者は *near-field* と *far-field* の考察に関する情報が膨大な量であることは知っている。しかし誰も計算以上のことで悩んではいない。数字はそれ自身がもう十分であることを語っている。

さて、ここからは自分のためではない。技術的と云うよりは哲学的であるが、宇宙は規則性のある場所だと考えている。全ての物理的法則は究極的には理解できるものであり、従って本来簡単なものである。もし現象を説明するのに算式の複雑な組み合わせが必要だとするならば筆者も争わなければならない。我々はまだ十分に理解していないだけなのである。一旦関係が十分に理解できたならば、それは直感的に明らかになる。もはや数学的な理由付けは必要がないのである。このことは、通常我々がインスピレーションと呼ぶ理解のレベルである。これは突然のあっ！（またはアー）と云う叫び声で起きる。残念ながら、筆者がアンテナ測定の *near* と *far* を考えているときには、そのようなインスピレーションは出なかった。

#### 《 論理を優先させる 》

アンテナの働きよりももっとミステリアスなのは人の心の動きである。Rohn 25 アンテナ（Rohn 社のアンテナのタイプ、アマチュア向けのアンテナ・メーカー）が倒れてきたかのように、インスピレーションが筆者の頭を打った。約2週間前のことであるが、筆者の意識から全体のジレンマが出てきた。ある朝熟睡から目が覚めた時、思わず大声で「そうだ、そのためだ！」と叫んだ。妻の Suk/WA6PLF はもう 20 年以上も筆者のクセを知っているので、何事もないようにコーヒーをいれに起きて行った。筆者はワープロの前に腰かけ、突然で、説明不要のような、直感的に明らかなことを文章にしておこうと思い立った。これまでも何回かあったことだが、今回も「どうして気が付かなかったのだろう」と思った。ここにこのたびの天啓を得た思考過程を説明して置きたいと思う。

まず二つの理想的な、ロスレスの、完全にマッチした *Isotropic* アンテナを考

えよう。一つは放射しており、他は受信しているものとする。これら二つのアンテナを、自由空間において、例えば運用周波数の波長の 25 倍の距離に引き離すとする。(25 倍とは、Isotropic Free-space path loss が丁度 50dB となる距離だからである) ここで正確に 1W の RF を送信アンテナに入れたとする。受信アンテナによって回収されるパワーは丁度 50dB 少なくなるが、別に表現すれば 10uW である。これはアンテナゲイン測定用の較正されたパス(path)を構成することになる。

さてここで、isotropic アンテナを二つのゲイン・アンテナに交換してみよう。それぞれ Path の両端におく。受信用アンテナによって集められるパワーは、正確に 10mW と測定されたとする。これは双方のアンテナが isotropic であった時に受信された信号パワーよりも正確に 30dB 多い。その結果我々は次のような結論に到る。すなわちこれらのアンテナの間では、二つのアンテナを組み合わせると 30dB のゲインを持っていることになる。二つのアンテナは等しいので、個々には +15dBi のゲインを持つことになる。

これまで我々は、パワー比の方法によるアンテナゲインの標準的な測定方法について簡単に述べてきた。テクニックは標準ゲイン・ホーンの較正で認められている方法である。

この方法では、isotropic アンテナ（これは実際に作ることは出来ないし、買うことも、実物を見ることも出来ない）間で実際に測定を行う必要はない。なぜなら isotropic free-space path loss は簡単に計算できるからである。

我々は上記の過程を、二つの 15-dB-gain テストアンテナを二つのアンテナと交換することで行ってきた。但し、後者は全く同じもので、それぞれは例えば +20dBi のゲインを持っているものである。今や総合ゲインは+40dBi となる。そして path loss は相変わらず 50dB である。我々の受信信号パワーは、送信されたパワーよりも全体で 10dB 弱く、すなわち 100mW となることが予想される。Power Ratio による測定はそれでも有効である。

さてここで面白いことが起きる。我々の相似アンテナのサイズをもう一度大きくして（従ってゲインも大きくなる）、夫々が+30dBi の仮定ゲインを持つものとしよう。Total Path loss は依然 50dB である。総合アンテナゲインは+60dBi である。従って受信されるパワーは、送信されたパワーよりも 10dB 多いもの、すなわち 10W に等しくなるであろう。これは正しいであろうか？

諸君は「待ってくれ、それは不可能だ！」と云うに違いない。確かに、受信パワーが送信パワーを超えることはない。それではエネルギー不滅

の法則に反することになる。これは次のようなことを意味している。我々がアンテナゲインを増大させるにつれて、受信パワーがもはや増加しないと云う点に達する。我々が運用している波長に対して、我々が選択した距離において、そして我々が測定しようとしているアンテナを用いて、我々はまさに黄昏（たそがれ）ゾーンに、つまり **near field** に入っていくのである。

このことは、二つのアンテナの結合したゲインが、双方の間にある **free-space isotropic path loss** とまさに「正確に」等しくなった時に生ずることである。勿論次のようにして同様の解析を行うことができる。二つのアンテナのサイズ（つまりゲイン）を一定にしたまま、双方の距離（従って **free-space path loss**）を縮小して行く。この方法でも回収パワーがもはや増加しない点に到達することであろう。メカニズムが明らかになったであろうか？

正しいエンジニアリングの手法によれば、我々がアンテナゲインを増大させようが、あるいは距離を短縮させようが、受信可能なパワーに到達する前の数 dB で止まる筈なのである。これで大まかではあるが **far field** がスタートする点を知ることが出来るのである。

以上のことを総合すれば次の結論に到達する。「正確にアンテナゲインを測定するためには、送信用および受信用のアンテナ間の距離は、送信・受信双方のアンテナのゲインを加えた総合ゲインを明らかに上回るような **free-space isotropic path loss** が生ずる長さでなければならない。」

分かった。それではどれだけあれば **additional path loss** が十分と云うか？ Eq2 と Eq3 を比較することによって、我々は次のように決定することが出来る。**Far field** は、**near field** が終わるところにあるアンテナから5倍離れたところから始まる。距離係数(**distant factor**)の5に対する **free-space isotropic path loss** との差は、 $10 \log(5)^2 = 14 \text{ dB}$  である。かくて、**Far-field** 境界線にあるためには、**free-space isotropic path loss** が、二つのアンテナによる総合ゲインよりも、少なくとも 14dB 以上大きくなる処でなければならない。

以上に従えば、正しく **far-field** 境界線上にあることになる。良好な測定と云うのであれば、我々は、最低距離を倍にして、**far-field** 内で操作するよう心がけなければならない。そのようにするためには、正確に 6dB の **path loss** を加えなければならない。(距離を倍にすることは受信電圧が半分になる、あるいは回収パワーが 1/4 になる、あるいは信号が 6dB 弱くなることを忘れないように！) 従って実際のガイドラインとしては、**path loss** は二つのアンテナの総合ゲインよりも 20dB 以上大きくななければならない。

このガイドラインを、アンテナ・レンジとしての必要な長さを決定するのに使う方法の例として、1296MHz 用の 10ft dish を考えて見よう。(推定ゲインは +30dBi) レンジの反対側の端にあるこれに対するアンテナは標準ゲインのホーン (推定ゲイン+15dBi) であるとする。最低レンジの長さは、free-space path loss の 45dB よりも十分に大きいことを示している。

我々のガイドラインでは、-65dB path が許容限界であることを示している。これを翻訳すれば、32.5m の距離である。今年の Conference におけるレンジの長さが、これよりも短いとすれば、そして君の 10 ft の dish が期待通りに測定されなかったとしても、それは正しい結果なのである。

反対に、正しい理由にはならないが、君の Dish は算式が示すようなゲインがないのかも知れない。君が知っている通り、アンテナとはそんなものなのである。

以上