

Super Rad アンテナの理論

後編

JA2PGU 尾裕 照明 Teruaki Osako

先月号に掲載した「Super Rad アンテナの理論」は、概略を解説したもので、誌面の都合もあり説明が十分でないことは否めません。また、このアンテナの素性はいったい何なのか分からない方も多いのではないかと思います。今回は、もう少し踏み込んだ話をしたいと思います。〈編集部〉

1 進行波型アンテナについて

Super Rad アンテナはといった、進行波型アンテナか、定在波型アンテナなのか、わからないのではないのでしょうか。結論からいうと進行波型アンテナと“同属”だと思っています。いわゆる進行波型アンテナはダイポールがエレメント長手方向に移動して行くもので、Super Rad アンテナは磁気ダイポールが軸方向に移動して行くものと解釈できます。本質は同じです。進行波型と定在波型という大分類法がよくないと思っています。

理論上の微小ダイポールや磁気ダイポールはどっちに属するのかわからないのではないのでしょうか。進行波型とはいえず、かといって定在波が立っているわけでもありません。ダイポールや磁気ダイポールの移動という考え方は上記大分類より、上位概念といえます。進行波型も定在波型も一形態を表しているにすぎません。そこで、進行波型アンテナについて考察してみます。

図1-1は進行波型アンテナの最も簡単な例です。電磁界のようすから進行方向に対して直行しています。これらの図の精度には自信がありませんが、伝搬方向は電気力線、磁力線の移動方向になることを示したかったのです。電磁界両者そろっていることが重要で、これがベアになって電力を伝搬できるのです。しかし、問題は進行波の伝搬速度です。この際、伝搬速度

を位相速度といういい方しておきます。位相速度 v は式1-1で表されます。

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \text{式1-1} \quad LC \text{ともに単位長さあたりの量}$$

この式だけでは、位相速度が光速以下ということの証明にはなりません。エレメントのインダクタンスと大地間とのキャパシタンスで位相速度は光速より遅くなるという前提で話を進めます。このあたりの話はいろいろあって光速より遅くなることもあるそうですが、私たちに関係ある事柄については光速より遅くなると解釈すればよいでしょう。同軸ケーブル内の位相速度が光速以下になるので領けます。

ところで、エレメントに電流が流れ、ある程度大きな輻射抵抗があれば、電磁波が発生しないわけにはい

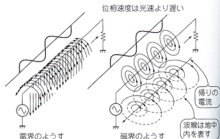


図1-1 進行波型アンテナの電磁界のようす

きません。しかし、図1-1で電磁界の位相速度は光速より遅いので、電磁波はエレメントに対してある角度を持たなければなりません。したがって、電線を介在して伝搬する電磁界と電磁波となる電磁界は別物と解釈しないといけません。そもそも、光速で電線を伝搬するという事は、必ずLCが存在するのであり得ないということにしておきます。導体間に電界が生じるということは必ず、キャパシタンスが存在し、電線に電流を流すと磁界が生じるということは必ずインダクタンスが存在するという事を意味します。

ところで、LCとは何かというと、エネルギーを蓄える物という見方もできます。Cは静電エネルギー、Lは電磁エネルギーをそれぞれ蓄えます。位相速度が遅くなるとは、上記エネルギーがエレメント上に、より長く止まることを意味します。電流がキャパシタンスに電荷を溜めます。いや、キャパシタンスがあればこそ電流が流れることができるのです。インダクタンスがあればこそ磁界を発生でき、電界とペアとなって電力を供給します。直流でさえ、電源投入時は2本の電線間にキャパシタンスとインダクタンスがないと電力供給ができません。両者がないと電磁界が発生できず、近接作用説に反してしまうからです。

そうすると、図1-2に示すようにダイポールのごとく電荷間の間に電界が生じます。もし、光速でダイポールがエレメントの長手方向へ移動したら、この電界は発生できないと考えられます。



図1-2
進行波型アンテナはダイポールが移動していることを示している

しかし、この電界は電磁波には成り得ない成分ですが、電流が存在するため、もし輻射抵抗がある程度あれば、電磁波を輻射することになり位相速度は光速でなければなりません。下の一連の式はそういうことを意味しています。qなる電荷が溜まるからこそ電流が流れ、ひいては電磁波が発生できるのです。図1-3は前号でも掲載した微小ダイポールの説明図で式1-2から式1-4はその解析式です。前号では式1-2は不必要なため割愛しました。

$$E_r = \frac{q \ell \cos \theta}{2 \pi \epsilon r^2} [1 + jkr] e^{-jkr} \dots \text{式1-2}$$

$$E_\theta = \frac{q \ell \sin \theta}{4 \pi \epsilon r^2} [1 + jkr + (jkr)^2] e^{-jkr} \dots \text{式1-3}$$

$$H_\phi = \frac{i \ell \sin \theta}{4 \pi r^2} [1 + jkr] e^{-jkr} \dots \text{式1-4}$$

もし、電線を伝搬する速度が光速という極限だったらどうでしょう。電荷も溜まらず電流も発生しないと思います。電線上の位相速度が光速以下ならば、図1-4に示すように電磁波はエレメントに対してある角度を持って伝搬することになると考えられます。つまり、エレメントに対して垂直方向の伝搬とエレメントの長手方向の伝搬のベクトル合成されたものといえます。

しかし、光速は一定ですから、エレメントに対して垂直方向の速度も光速以下となります。別な言い方をすれば、いわばダイポール・アンテナがある速度でエ



図1-3
微小ダイポールとP点の電磁界

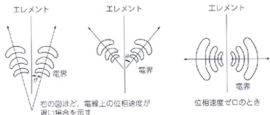


図1-4
進行波型アンテナにおける電磁波輻射のようす

メント長手方向へ移動しているという言い方ができます。図ではわかりにくいかもしれませんが、やはり磁力線、電磁力線の移動方向と伝搬方向は一致しています。

ところで、伝送路のLCをどんどん増やしていったらどうなるでしょうか。電磁界の位相速度もどんどん遅くなります。と同時に、電磁波の放射する角度 θ もどんどん大きくなっていきます。そして、ついに位相速度がゼロになってしまったら、 θ は 90° になってしまいます。位相速度ゼロになってしまうと、伝送路上での波長もゼロになってしまうので無理はありますが、位相速度ゼロとは私たちが利用するダイポールなどの定在波アンテナにはかなりません。実際のダイポールは共振と定在波を利用し小さくならないようにしているともいえます。つまりダイポール・アンテナの移動がない状態です。

アンテナを分類するのに、大きく進行波型と定在波型に分けませんが、結局のところ定在波型は進行波型のはんの特例にすぎないと考えられます。そのようすを図1-4に示します。 θ が 90° になっても、電磁波の放射方向と電磁力線と磁力線の移動方向が一致するという原則はあくまでも守られています。このことを念頭にいれると、Super Radアンテナの放射原理を理解する場合に多に役立ちます。

Super Radアンテナのシリンダに流れるリング電流は、いわば磁気ダイポールとして動作しているはずで、この磁気ダイポール自体の放射抵抗はあまりに小さく、ほとんど放射しないと思われ、ところが、リング電流が上方に移動することにより、放射抵抗が増大し電磁波が放射されるという説明を先月号でしました。これは、図1-5に示すように上記進行波型アンテナの説明と同じように解釈できることを示しています。リング電流の移動速度は光速以下であることと放射抵抗も増大したために、電磁波はシリンダに対してある角度で放射せざるをえないのです。

このように考えると、Super Radアンテナは進行波

型アンテナと同属といえると思います。図1-2のように一般的な進行波型アンテナは、ダイポール・アンテナがエレメント長手方向に移動していくものというのなら、Super Radアンテナは磁気ループ・アンテナが軸方向に移動していくものです。しかし、そもそも進行波型だの定在波型だのと分類したことは罪が大きいような気がします。このように分類されると、まったく別物と思われ、定在型アンテナしか経験のない私たちには、進行波型アンテナには考えが及ばないのではないのでしょうか。定在波型アンテナは進行波型アンテナの特例と考えれば、もっと早くSuper Radアンテナについて理解できたのかもしれませんが。

理論上の磁気ダイポールや微小ダイポールは、電磁波の放射方向とアンテナ自体の移動がないことから定在波型と同属といえるのです。これでスッキリしました。定在波型アンテナという呼称よりもっと適切な言葉を適応すべきではないでしょうか。余談ですが、放射抵抗が十分大きくなるほど輪を大きくしてしまつたら、分布定数として扱わなければならないエレメント上に一定の電流は流れず定在波がたつてしまいます。磁気ループ・アンテナは共振コンデンサ付近で電流が最も小さくなります。このアンテナはしっかりと定在波型アンテナです。

2 フィーダ放射とアース線について

小型アンテナは、フィーダ放射を疑われやすく、誤解されている面が多々あるように思われるので考察してみます。残念ながら、アンバランスなSuper Radアンテナにはフィーダ放射を抑えるために同相フィルタは必須と言っていると思います。自作後、同相フィルタを付けずに実験し、再現性がないと主張する方もおられるので注意しましょう。同相フィルタの挿入位置もひじょうに重要です。

フィーダ放射はその原因が同相電流によるものであることは、よく知られています。Super Radアンテナにおける同相電流とはどのようなものでしょうか。図

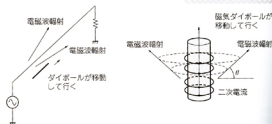


図1-5 進行波型アンテナとSuper Radアンテナの相似性



図2-1 Super Radアンテナの基本図

2-1はSuper Radアンテナの構造図です。図2-2はこのアンテナを同軸ケーブルを使って空高く上げた場合の想像図です。図2-1から単純にただのLC並列共振回路にタップから給電しているものにすぎません。LC並列共振回路であるために、共振周波数ではコイルの両端にはかなり高い電圧が発生します。

このLC並列共振回路をコイルの両端を外部から見たインピーダンス Z はひじょうに高いことも容易に理解できます。

図2-2に示すように長いフィーダをつないで、空高く上げたとすると、コイルの両端の電位が定まらないことは想像できます。同軸ケーブルが分布定数素子であることや、同軸ケーブル-大地間との静電容量のため、アンテナ側での同相成分としてのインピーダンスが存在するのがその理由です。また、アンテナ-大地間の静電容量があるためループが形成されるものと考えられます。しかもかなり高い電圧がコイル両端に発生しているために、アンテナ直下のフィーダは電位的に相当振られることとなります。つまり、アンテナ側で電位の振られによりフィーダは電圧給電されることとなります。これが、同相電圧です。

この同相電圧が悪さをするわけですが、Super Radアンテナの場合には必ず、アンテナ直下ではフィーダへの電圧給電になります。この同相電圧を発生しないようにするには、アンテナ直下の電位を固定できればよいのです。幸い、外部から見たインピーダンスが高いので、ちょっとしたインピーダンスで接地できれば簡単に固定化されます。ちょうど垂直ダイポールを電圧給電する場合、 $\lambda/4$ の接地型垂直アンテナに比し、接地抵抗が大きくてもかまわないという事情と同じです。

ですから、フィーダ長が $\lambda/4$ の整数倍はひじょうに悪く、フィーダ輻射の可能性が高くなります。しかし、アンテナから $\lambda/4$ の位置に同相フィルタを入れると、この部分は図2-3に示すラジアルのように働き、簡単にアンテナ側の電位を固定化できます。しかも、



図2-2 Super Radアンテナにフィーダを付けた場合



図2-3 2シリンダ・タイプの典型

フィーダからの輻射は最小になります。このような場合、ノンアースで使用できます。実際には $\lambda/10$ 程度の位置に同相フィルタを挿入しても効果はてきめんでノンアースでも使用できるケースが多いようです。これほどまでに、インピーダンスが高いのです。つまり、Super Rad アンテナはその直下では、同相電圧を供給できても同相電流を供給する能力はありません。

Vadim Demidov氏の論文によれば、EHアンテナはマイクロバートと同じ動作をしているという記述があります。Lloyd Butler氏の論文も同じようなことが書かれています。

これはちょっと変で、フィーダの長さと同相フィルタの挿入位置によっては、そうなる解釈すべきことです。マッチングの状態も変動すると思いますが、フィーダ輻射を極小にもできるはずで、決してEHアンテナ=マイクロバートということではないと思います。Super Radとはまったく逆で、アンテナ直下で最も同相電流が大きくなっているようです。この違いは、図2-1のようにSuper Radアンテナでは下側にシリンダがないことが原因のようです。たしかに図2-4(次ページ)に示すような2シリンダ・タイプの場合には、同相電流が多く上記論文に書かれているEHアンテナと同じような傾向でした。

アンテナ直下は同相成分に対してハイ・インピーダンスになるように設計したほうが有利です。ロー・インピーダンスでは、どうしてもラジアルなど疑念的な



図2-4 フィーダに波が乗るようす

アースに流すか、フィーダにより多くの同相電流を流さざるを得ないからです。マイクロバートはそれを積極的に利用したものといえます。Super Radアンテナは紆余曲折の末、結局原型に近い構成がフィーダ輻射や扱いやすさの点で有利と考えました。

要するに、フィーダの長さ気をつけ同相フィルタの挿入位置を注意すればよいのです。同相電圧や同相電流が悪さをすれば、VSWRの悪化を招くのですぐわかります。

こういう事態に対処するために、アンテナのマッチング機構をいじってしまい、強引にVSWRを下げてしまうとひどいフィーダ輻射にさいなまされ、かつ再現性のないアンテナとなるでしょう。自作する際には、よく気をつけなければなりません。

フィーダ輻射といっても、ある適当な長さのフィーダがアンテナに接続されているというだけでは、そんなに良好なアンテナとして動作するとは考えにくいのです。Vadim Demidov氏の論文でも、L-λタイプのEHアンテナを使い、フィーダ長がλ/4で送信機側でアースした場合を想定しています。つまりフィーダ輻射に都合の良い条件です。上記のようにきちんと調整すればいざしらず、適当に接続しただけでは普通は大したことはありません。

ちなみに、フィーダにアンテナ・チューナを介して給電したことがあります。Super Radアンテナに比べて-15dBから-20dBの実力でした。それもそのはずで、フィーダは屋根を這わして部屋に引き込んだものでアンテナらしく空中高く架設したものでありません。長さを管理して空中高く架設しマッチングを取った場合には、しっかりとアンテナとして動作しました。つまり、普通はフィーダ輻射をあてにしたところで大して良いアンテナにはなりそうにないということです。

こんな具合ですから、長さと同相フィルタの挿入位置には気をつけましょう。Super Radアンテナに限っ

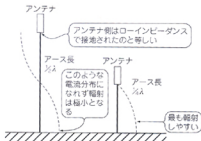


図2-5 アース線の長さによる輻射のようす

て言うのなら、同相フィルタは半波長の整数倍の間隔は避けながら、複数個をとるところに挿入しておけばまず問題ないと思います。

アース線についても、誤解が多いので考察しておきます。とにかく、アース線がくっついていれば、輻射があると考えやすいのですが、フィーダと同様、アンテナになるには条件を満たす必要があります。そもそも、半波長ダイポールでも長さ調整をしないと、まともにアンテナとして動作しないのに、アース線に限って無条件で良好なアンテナになるなどということがおかしな話なのです。フィーダでも言えることです。

図2-5はアース線が接地している場合の波の乗り方を簡単に表しています。図の右側はλ/4の長さの場合で先端はハイ・インピーダンスです。左側はλ/2で先端はロー・インピーダンスです。

ところで、この両極端なアース線をSuper Radアンテナに接続したらどうなるでしょうか。アース線に対しても、Super Radアンテナは電圧給電するのでλ/4を接続したら、輻射が多いにありえます。λ/2のアースを接続したら輻射もなく良好なアースとなりえます。アース線の長さはλ/4の奇数倍の長さ気をつけする必要があります。

長いからいけないのは迷信で、波長に対する長さが問題なのです。アース線からの輻射もフィーダからの輻射も同様、どこまで許容できるかの問題でもありません。アース線の長さもλ/4の奇数倍±λ/8を気をつけければ、十分にアンテナの電位の固定化がなされるといいます。しかし、このあたりはケース・バイ・ケースといったところです。

もし、アース線をつけてVSWRが改善されるどころか、悪化した場合には多いにアース線からの輻射を疑う必要があります。何しろ、アース線にまで電力を供給しているわけですから、アンテナ本来のVSWRは実現できないはずで、もし、アースをすることにより、

良好にVSWRが実現できたらアース線からの輻射は少ないと判断できます。アンテナのインピーダンス調整がきちんと50Ωに調整してあって、もしVSWRが1にならないのであれば、ある程度アース線や同軸ケーブルからの輻射はあると考えられます。VSWRが1.2に劣化したのであれば、同軸ケーブルの損失がないとすれば、大雑把にいうと最大15%程度はアース線やフィードからの輻射があると疑えます。この程度のVSWRの劣化はよくあることで、許容してもよいと思っています。これもケース・バイ・ケースです。輻射しているかどうか、蛍光灯や微少なダイポールなどで検出してみれば上記のことがわかるはずですが、必ずS/Nの劣化が起きます。S/Nの話になると、ある程度経験がないと難しいかもしれません。

おまけに、同軸ケーブル上の良い位置に同相フィルタが挿入してあれば、アース長がたとえ悪くてもアース線による輻射が抑えられます。両者が助け合うようなものです。ユーザーによっては、アースだけで同相フィルタがなくても良好に動作するという方もいます。アースが取りにくいので、同相フィルタだけで使用している方もいます。アンテナの作り方と、ケーブルの長さ、同相フィルタの位置によっては大きなフィード輻射やアース線からの輻射が発生します。このことが、いろいろ誤解を生んでしまったと思います。アンテナの構造とフィードの長さ、同相フィルタの位置を十分に考慮すれば、こういった輻射は必ず抑えられると思います。

良好なS/NとVSWRが得られるなら、ほとんどアンテナ自体からの輻射であることの証でもあります。ぜひともこのような状態で運用していただきたく思います。一般的にSuper RadアンテナはS/Nが良いといわれています。フィードやアース線からの輻射をあてに

していないことを意味しています。

あとがき

進行波型アンテナについては、Super Radアンテナがどのような位置づけなのか明確にしたい例を挙げました。納得しかねる方もおられるでしょうが、逆に微少ダイポールや磁気ダイポールはどの分類に属するかと問われたら返事に窮するのではないのでしょうか。

いわゆる進行波型アンテナとSuper Radアンテナは“同属”ということをおわかっていただければ幸いです。

フィード輻射やアース線による輻射は極力避けるべきです。要するに長さ、同相フィルタの挿入位置を気をつければよいのです。そして何よりもアンテナ自体をきちんと調整しておくことが重要です。そのうえでVSWRを確認し、一番良いところでも1.5以上になるようでしたらこれらの輻射を疑ってください。実際にはきちんとVSWRが1になることは、むしろまれなもので、ある程度はこうした輻射があることは否めませんが、このような輻射があっても良いことはありませんが、半波長ダイポールでも完全バランスが取れている場合は希で、やはり同相電流は普通に発生し、また相当量フィード輻射分損失も発生しているはずですが、フィード輻射は小型アンテナの特技では決してありません。

◎

【参考文献及び引用文献】

- ・宇田 新太郎 著：新版無線工学I 伝送編、丸善株式会社。
- ・後藤 尚久 著：なっとくする演習・電磁気学、講談社。
- ・Super Rad アンテナの理論、CQ ham radio 2010年8月号、CQ出版社。
- ・June 28, 2005 Lloyd Butler VK5BR Some Different Ideas on the EH Antenna.
- ・May 2003 Vadim Demidov, Radiating Feeder.

HAM TECHNICAL SERIES

好評発売中

手作りアンテナでHF/50MHzにオン・エアしよう 特選 ハムのアンテナ製作集

CQ ham radio編集部 編 B5変型判 144ページ 定価2,310円(税込)
JAN9784789815635

HFローバンド/ハイバンド～50MHzをターゲットに、精選したアンテナ製作集をお届けします。手作りしたアンテナで受信できたときの感激を、ぜひ多くの方に味わっていただきたいというのが、本書の趣旨です。どうぞ、ハムライフのお供の1冊にお加えください。

