

電波研究の玉手箱

第9講 アンテナ・伝搬の七不思議

電気通信大学名誉教授
唐沢 好男

毎号、電波技術の基本テーマの中に見え隠れする不思議を玉手箱につめてお届けしている。物理学にパラドックスはないと言われているが、その正体を見るまでの格闘もまた楽しい。そしてそのもがきを通じて、一つ上の理解に至るのが学びである。そのためには、一つの現象を多角的に眺めることが大事になる。本講では、アンテナ・伝搬の界隈に現れる不思議を七つ取り上げ、皆さんの好奇心を呼び起こしてみたい。



不思議との出会い

それぞれの分野には、人知が及ばない奇異なものや七つ選んだ「○○の七不思議」がある。スケールの大きい「世界の七不思議」から、怪奇色漂う「学校の七不思議」、ローカル色豊かな「猿沢の池の七不思議」まで、挙げだしたらきりが無い。

筆者は電波や無線通信の世界に生きてきたが、その長い経験の中で、不思議と感じることにいくつも出会った。特に晩年、大学教員になって学生相手に電波工学や無線通信の授業をしてきたが、その準備の際に、あるいは授業中にときどきそれにぶつかった。教える立場からは説明に悩ましく困った問題なのだが、それをネタに学生たちとする議論は結構楽しかった。本講では、アンテナ・伝搬界隈に見え隠れする七つの不思議を取り上げる。なお、その謎解きを詳しく行うスペースが無いので、ヒントに触れる程度にとどめる。

① 自由空間伝搬の周波数特性

「アンテナの特性が周波数に因らないとき、無線回線の受信強度は周波数に対してどう変化するか」を考える。第1講（本報 No.335）で取り上げた「フリスの伝達公式」により、遮蔽物や散乱物が無い自由空間伝搬路において、受信電力 P_r は、送信電力 P_t 、周波数 f 、送受信間距離 d 、送信アンテナ利得 G_t 、受信アンテナ利得 G_r に対して次式で表される。

$$P_r = \frac{1}{L_p} G_r G_t P_t \quad (1)$$

$$L_p = \left(\frac{4\pi df}{c} \right)^2 \quad (c: \text{光速})$$

L_p は自由空間伝搬損と呼ばれ、この値（無次元数）が1000であれば30dBの損失（減衰）になる。この式は、周波数が高くなるほど受信強度は弱くなるということを言っている。ミリ波やテラヘルツ波のような高い周波数の電波は、遠くまで届きませんよということである。これが冒頭の質問に対する答えだろうか。

でも、真空中の伝搬に周波数は関係ないことであり、なぜ周波数特性が現れるのだろうか。(1)式の前提条件は「アンテナの特性＝利得」のことである。「アンテナの特性＝開口面積」とすると、周波数特性は反対になる。冒頭の問は、問自体に問題があった（＝あいまい性があった）のである。どうも、アンテナの都合、すなわち、利得と面積の関係がもつ周波数依存性を伝搬損に繰り込んでいるためと気が付く。（この続きは[1]の2章で）

② 壊れたアンテナの性能

パラボラアンテナで電波受信をしているとき、図1に示すようにパラボラ面の半分を電波吸収シートで覆ってしまう場合を考える。運用中にパラボラの半分が外れて落ちたと考えてもよい。この時、アンテナの性能（利得）はどれだけ低下したのだろうか？

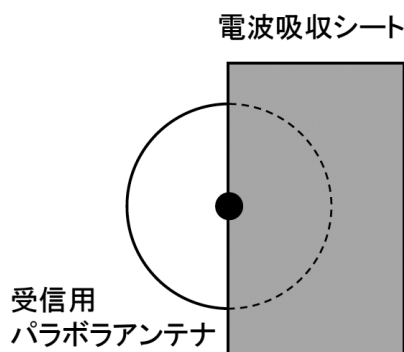


図1 開口面の半分を電波吸収シートで覆ったアンテナの性能

これに対しては、以下の答えが、典型的であろう。

i) アンテナの開口面積が半分になったのだから、利得は開口面積に比例すると言うアンテナの基本性質より、利得も半分低下する（すなわち利得低下は3dBである）。

ii) 本来、左右のそれぞれの半分からの電界強度がパラボラの焦点にある一次放射器において重ねあわされるわけであるから、半分覆われれば受信電圧が半分になり、利得では1/4すなわち6dB低下する。

どちらも正しそう。でも、それでは矛盾している。この答えは、次のような説明をすればどちらが正しいかは明らかになる。アンテナの利得は送受信で可逆であり、受信アンテナ利得は送信アンテナ利得に等しい。送信系で考えれば、送り出した電力の半分が吸収シートに吸収される。それで、まず、性能は3dB落ちる。次に、遠方から見たアンテナの面積は、半分になっているのだからさらに3dB下がる。合計6dBの低下になってii)が正しい。

それでも、送受の可逆性を使わず、受信アンテナの動作としてi)の間違いを納得できるように説明するのは、結構骨が折れると思う。なぜなら、そのアンテナは到来電力の半分かをしっかりと受け止めているのだから。しかし、実は、壊れたアンテナの性能は壊れた分だけ性能が落ちるのではなく、せっかく入射できた波もその一部は受信できないモード（基本モード以外の直交モード）に変わり、さらに大きな劣化になるのである。（考え方のヒントは[1]の2章に）。

この問題を次のようなたとえ話に置き換えてみよう。100人のチームが全員で協力して仕事をすると100の力が発揮できる。一方、100人で成し遂げようとしたチームから50人が抜けてしまうと、25の力しか発揮できない。最初から50人のチームが全員で協力して50の力を発揮するのは違うのである。

③ アレーアンテナの利得

図2に示す同相給電2素子アレーアンテナの正面方向（図の上向き方向）のアンテナ利得の素子間隔依存性を考える。話をシンプルにするため、送信に用いるアンテナとして以下の前提を採る。

- (a) 素子アンテナは無指向性アンテナ（全方向に利得1）
- (b) 入力電力はすべて空間に放射される（効率1）
- (c) アレー素子間の結合は無い

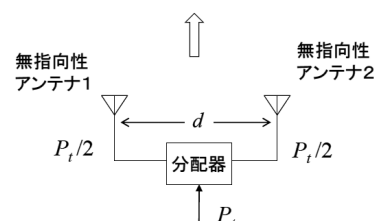


図2 同相給電2素子アレーアンテナ

これに対して、以下の二つの考え方ができる。

i) 前提(c)を根拠とする。お互いに影響が無いなら、遠方点での電界は二つのアンテナそれぞれの電界の和になる。それぞれのアンテナからの放出電力は単一アンテナの場合に比べて1/2であるから電界強度は $1/\sqrt{2}$ 倍。同相合成される電界は $\sqrt{2}$ 倍である。アンテナの利得は、間隔 d に依存せず常に $G=2$ である（図3の点線）。

しかしながら、この考え方には致命的な欠陥がある。 $d=0$ での電界強度は、どの方向に対しても $\sqrt{2}$ 倍になるので、全立体角で電力を積分すると2になる。アレーアンテナからの放射電力が入力($P_i=1$)以上に出力されることになり、“エネルギー保存則”に反してしまうのである。

ii) 素子アンテナの電力指向性パターンは変わらないとして、これを全方向に対する積分を行ってアンテナからの放射電力求め、その値で正規化して求める。アンテナ利得の定義に従った算定法であり、結果は図3の実線（アンテナ指向性積分）になる。

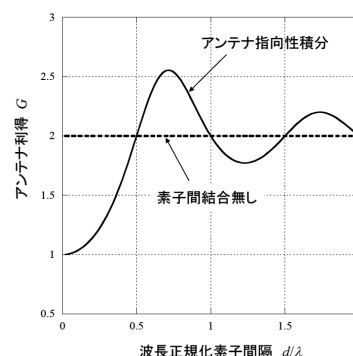


図3 無指向性アンテナ同相給電アレー利得の素子間隔特性

結果の合理性に照らせば、後者に理があるであろう。でも、それぞれのアンテナにはちゃんと電力が半分ずつ供給されているのだから単純に足すだけでよいではないかと思う。実は、この問題は奥が深い。無指向性アンテナと言う具体的な形が無い架空のアンテナを相手にしてはこれ以上議論が進まない。半波長ダイポールアンテナを用いて理論的に解析してみると、アンテナパターン積分で求めることの妥当性や、なぜそうなるかと言う仕組みが見えてくる [2]。

④ 無線リンクの相反定理

基地局と移動体の通信において、そのマルチパス環境の中を端末が動いている状況を考える。図4はこのモデルであり、送受信同じ周波数で同時に双方向の伝送を行っている。このとき、双方向の二つの受信変動が同じであれば、可逆性が成立していると言えるし、異なれば、成立していないということになる。

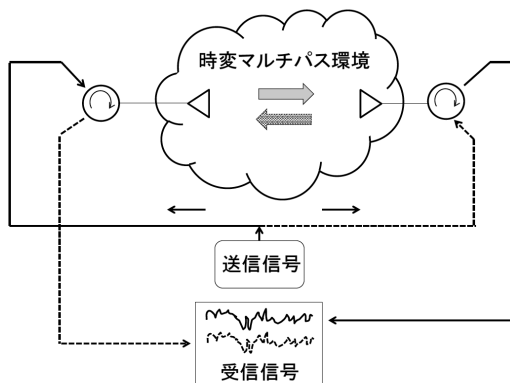


図4 マルチパス環境における通信回線の相反性は？

通常、無線回線では両方向の回線は可逆性が成立していると言われ、相反定理と呼ばれる。相反定理が成立していないなら、していない例の一つ示すだけで十分である。図5はその例である。左側に遅延量の異なる二つのパス、右側に移動する端末があり、この間を中継アンテナが結んでいる。左側(A)を送信局とすると、ある周波数 f_0 で、二つの遅延波が同振幅・逆位相で中継アンテナに入射した場合、打ち消されて右側には放射されず、端末での受信強度は0である。一方、右側(B)から送信されると、ドップラー周波数 f_D 分、伝送周波数がシフトし ($f_0 + f_D$)、左側の遅延パスでは位相の差が生じて完全には打ち消されず、受信信号が得られる。すなわち、相反定理は成立していない。実際のマルチパス環境はもう少し複雑であるが、それとも同じである。

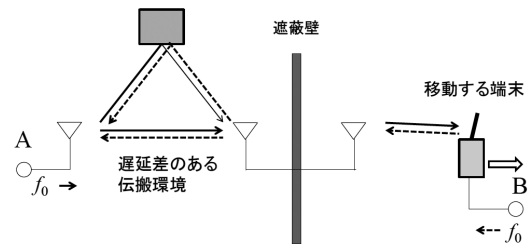


図5 相反定理が成り立たない一つの例

マルチパス環境にはドップラー周波数偏移と伝搬遅延が共に存在する。結論から言うと、ドップラー偏移だけ、あるいは遅延広がりだけの場合には相反定理は成立する。その両方が存在するとき、相反定理は破綻するのである。とはいえ、その成り立たないことが顕著になるのは、最大ドップラー偏移 f_D [Hz] と遅延広がり σ_τ [s] に対して $f_D \sigma_\tau < 1$ の条件が崩れるときである ([3] の4.6節)。幸い、近未来の無線通信においても、その伝搬環境は $f_D \sigma_\tau$ は0.01程度以下であり、近似の意味において、マルチパス環境と言っても相反定理は大丈夫といっても良いであろう。

⑤ 海面反射

筆者の研究者としての出発点は、衛星を介する船舶通信（海事衛星通信）における電波伝搬。衛星が低仰角にあるとき、海面からの反射波によるフェージングが問題になる。電波の海面反射は目に見えない。この現象を肌感覚で知りたいと思い、西伊豆に出かけては海に映る夕日の写真を何枚も撮った。太陽を衛星に見立てての海面反射である。海が鏡の面のように平坦ならば太陽の反射光は正規反射点から来る。海面が荒れてくると、反射波の到来範囲が広がるはずであるがどんな形になるだろう。図6がその答え。きれいな光の道になっている。ところで、どうしてこんなきれいな光の道ができるのだろう。何で、丸く広がらないのであろう。

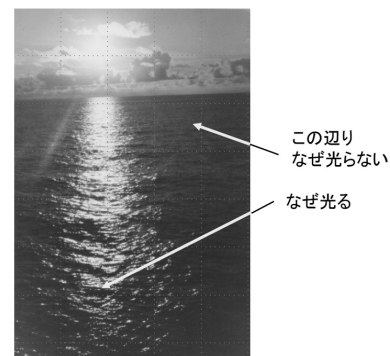


図6 太陽光の海面反射（なぜ光の道ができるのか）

⑥ ドップラースペクトル

図7(上)は、水平面の周囲一様から到来するマルチパス環境の中を一定速度で移動受信するときに現れる時間変動のパワースペクトルを、横軸周波数を最大ドップラー周波数 f_D (=速度/波長)で正規化して示している。この形はUシェイプと呼ばれ、電波関係の皆様にはお馴染みの形である。

この図を見て不思議に思わないだろうか。 ± 1 でスペクトル密度が無限大になっている。でも電力の積分値は1になっているので、電力そのものが発散しているわけではない。公園の花時計を斜めに見ると、秒針が0秒と30秒付近で動きが速く、15秒と45秒付近では一瞬止まったように見える(数学用語で言う位相停留点)。図の横軸の ± 1 (すなわち $\pm f_D$)が位相停留点に当たる。この形がどういうメカニズムで現れたかを図7(下)が示している。

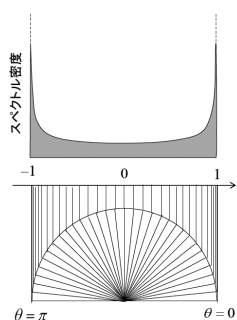


図7 ドップラースペクトルとその原理



図8 扇風機の軸に固定した団扇(絵は鳩山町イメージキャラクター「はーとん」)

面白い実験をしてみよう。図8のように扇風機の軸に絵の描いてある団扇(裏面は白紙)をしっかりと固定する。これを高速で回転させたとき、絵はどう見えるであろうか。いろいろの角度からの絵が混じりあって元の形が消えてしまうと思うであろう。回転時の団扇の面積(最大1)の存在確率(正確には確率密度)は図7(上)のようになり、 $\theta=0$ (表面正面)と π (裏面正面)で極めて高いことを言っている。それなら、高速回転時にはこの面(裏面は白紙なので表面)のときの絵が我々の眼の中に残像として生き残るのではないだろうか…。さあスイッチ ON。

⑦ 電波は重力で曲がる?

相対性理論は質量 m の物質には mc^2 (c :光速)のエネルギーがあることを教えてくれる。電波には、電界 E に対しては単位体積あたり $\epsilon_0 E^2/2$ (ϵ_0 :真空中の誘電率)の、磁界 H に対しては $\mu_0 H^2/2$ (μ_0 :真空中の透磁率)のエネルギー(単位は $[J/m^3]$)があ

り、両者は同じ値になるので足したエネルギー密度は $\epsilon_0 E^2$ である。重さなどなさそうな電波といえどもエネルギーがあるのだから、質量があると推論でき、その大きさは $\epsilon_0 E^2/c^2 [kg/m^3]$ と算定される。ちなみに、 $E=1[V/m]$ では、 $1m^3$ 当たりの質量は、およそ $10^{-28} kg$ と非常に小さい値である。質量あるものが重力空間を動いていれば、ニュートン力学により経路は重力によって曲がる。故に電波も重力によって曲がると推測できる。

一方、一般相対性理論によって、光が重力によって曲がることが知られているが、これは、重力による空間のゆがみによると説明されている。実際、1919年、皆既日食の際に、太陽近くに見える天体位置のずれの角度を正確に測定し、アインシュタインの予測が正しいことが実証されている。曲がる角度は光を質量がある光子としてニュートン力学で求めたものに対して、相対論で求めたものはおよそ2倍の値になるらしい。

ニュートン力学であれ、相対性理論であれ、光が重力によって曲がることは確かのようにあり、同じ電磁波の仲間として電波も同様に曲がるだろうと推量してよさそう。ただし、その曲りの角度はあまりにも微小(太陽の重力場でも1秒角(1度の3600分の1)のオーダー)であり、地上の、あるいは宇宙との無線通信回線への心配は無用である。

鳥の目・虫の目・魚の目

「物理にパラドックスはなく、我々の理解の迷いに過ぎない」(ファインマン)。そうであれば、パラドックスが生まれる原因は、問題設定(前提)が間違っているか、考えが未熟である(深いところにある真実に気がついていない)のどちらかである。

今回取り上げた不思議も多かれ少なかれそのどちらかになる。物理現象にはからくりが有るが、その見極めには多角的な視点が大事である。一方から見のみでは、本講でも述べているように迷子になりやすい。その突き詰めて行く先に、もしかしたら、パラドックスそのものが真理であるという新たなパラダイム(上位世界)に気づくことができるかもしれない。

さて、いよいよ次回が最終講。電磁気学のからくりを物語風にまとめてみたい。磁界は電界の相対論的効果と言われる奥が深い世界なので、不思議のスケールも大掛かりになる。お楽しみに。

<参考文献>

- [1] 唐沢好男, 無線通信物理層技術へのアプローチ, コロナ社, 2021.08.
- [2] 唐沢好男, “素子近接配置におけるアレーアンテナの利得について,” 技術レポート(私報), TR-YK-063, 2021.09.
http://www.radio3.ee.uec.ac.jp/ronbun/TR_YK_063_Array_Antenna_Gain.pdf
- [3] 唐沢好男, 改訂 デジタル移動通信の電波伝搬基礎, コロナ社, 2016.03.