

アンテナ・伝搬の七不思議

唐沢 好男

不思議発見

巷には、何だろうこれと思うものを7つ集めた「〇〇の七不思議」がある。「世界の七不思議」といったスケールの大きいものから、怪奇色漂う「学校の七不思議」、ローカルな「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長く生きてきたが、その折々に、不思議と覚えることにいくつも出会った。特に後半、大学教員になって、電波工学や無線通信の授業に気合を入れたが、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、そんなことも知らなかったかと思われるのはまずいし、説明に悩ましく困った問題もあった。しかし、晩年、少し余裕が出てからは、それをネタに学生たちと議論を楽しむことができた。

電波の世界もマックスウェルが打ち立てた電磁界理論まで踏み込んで行くと、筆者には力が及ばない難問が山ほど有るが[1],[2]、本稿では、アンテナ・伝搬という世界の中で、筆者が出会った肩の凝らない七つの不思議を皆さんと共有したい。

取り上げる話題は

- 1) 自由空間伝搬損が何で周波数に依存するの？
- 2) 壊れたアンテナの性能
- 3) 無線回線の相反定理：成立している？
- 4) 電波の実体は実数？複素数？
- 5) 安全な場所
- 6) 光の道
- 7) 本物と偽物：宇宙人がテレビを見ると

である。疑問の答えやヒントを載せているものもあるが、問題提起で終わっているものもある。一緒に悩んでいただければうれしい。

① 自由空間伝搬損が何で周波数に依存するの？

無線通信の授業では、自由空間の電波伝送、すなわち、フリスの伝達公式から入ることが多い。

図1はこの伝送の基本図である。送信アンテナの受信方向に対する利得を G_t とする。受信アンテナは、送信アンテナに対して十分遠方にあり、すなわち電波を平面波で受信できる位置にあり、その距離を d とする。送信電力を P_t とすると、アンテナから放射されたエネルギーは球面上に広がり、受信アンテナ点での電力密度は $P_t G_t / (4\pi d^2)$ となる。受信アンテナが電波を集めることができる実効的な面積（アンテナ実効面積）を A_r とすると、受信電力 P_r は次式となる。

$$P_r = A_r \frac{1}{4\pi d^2} G_t P_t \quad (1)$$

アンテナの実効面積と利得の関係は、アンテナの形式によらず、次式で与えられる。

$$A_r = \frac{\lambda^2}{4\pi} G_r \quad (2)$$

ここで、 λ は電波の波長である。【(2)式の導出は自明ではなく、背後に奥深い電磁気理論がある。詳細は[3]を見てほしい】。無指向性のアンテナ ($G_r=1$) の実効面積は $\lambda^2/(4\pi)$ であり、これは、円周が1波長の円の面積に等しい。きれいな対応になっていて、覚えるのに都合がよい。

これより、受信電力は、送受信のアンテナ利得 G_t, G_r 、距離 d 、電波の波長 λ により、次式で整理される。

$$P_r = \frac{1}{L_p} G_r G_t P_t \quad (3a)$$

$$L_p = \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 \quad (3b)$$

ここで、 L_p は自由空間伝搬損と呼ばれる。式(3)で表される関係式が、無線伝送の基本式であり、フリス (Friis) の伝達公式と呼ばれる。

ここでの不思議は式(3b)である。自由空間伝搬、すなわち、真空中の伝搬なのに、電波の弱まり方が周波数の関数になっている。何で？

これをもう少し見てみたい。式(3)全体を見ると、アンテナ利得 G_t と G_r が周波数によらない場合、受信電力は周波数の2乗に反比例し、周波数が高くなると受信レベルが下がることを示している。この周波数特性は伝搬損 L_p の中に含まれている。

ここで、次の問を考えてみよう。「アンテナの特性が周波数によらないとき、伝送周波数が高くなると受信強度はどうなるか？」。答えは、「強くなる・弱くなる・変わらない」のど

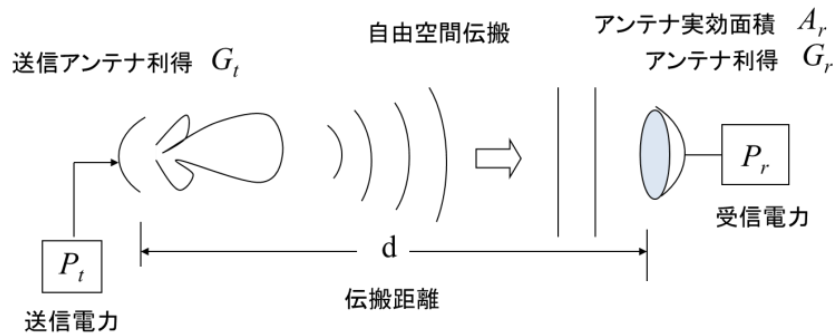


図1 無線通信の基本伝送系

れかであるが、(3)式は、「弱くなる」と教えてくれている。

別の見方をしてみよう。

フリスは、その原著論文[4]の中で、その冒頭に、式(4)の形を示し、その導出を行っている。

$$P_r / P_t = A_r A_t / (d\lambda)^2 \quad (4)$$

ここで、 A_t は送信アンテナの実効面積である。式(2)により送信アンテナ利得 G_t をアンテナ実効面積 A_t に変換して式(1)に代入すれば、式(3)と(4)が、同じことの別表現であることが分かる。式(4)では、4つの基本パラメータ (A_t, A_r, d, λ) が数値係数を含まず結ばれていて、美しい形になっている (フリス自身がそれを強調している[4])。

(4)式を見て、同じ問「アンテナの特性が周波数によらないとき、伝送周波数が高くなると受信強度はどうなるか？」をしてみよう。答えは、「強くなる」ですね。あれっ、さっきと反対。しかし、これは、“アンテナの特性が周波数によらない”という意味を考えることに對する問題提起になっている。アンテナの特性を、利得で言う場合と実効面積で言う場合では、結論が反対になるが、両者は式(2)で結ばれていて、その式自体が周波数の関数になっているので「特性が周波数によらないアンテナ」は存在しえず、設問自体が矛盾を含んでいるということになる。

上記の質問に対する答えには、昔と今で感覚が違っているのではないだろうか？昔の無線通信は開口面積が決まったパラボラアンテナで対向することが多いため、「強くなる」の感覚、移動通信で代表される現在の主流は利得の周波数依存性が小さいダイポールアンテナ対向のシステムがイメージされ、「弱くなる」の感覚かと思うのだが・・・。

本項の不思議「自由空間伝搬損の式(3b)が何で周波数に依存」に戻る。もし、(4)式をフリスの公式と学んだ人は、 $(d\lambda)^2$ を自由空間伝搬損と学ぶのではないだろうか？上に述べたようにこちら周波数特性があるが、(3)式とは逆である。私見では有るが、真の自由空間伝搬損は d^2 であるべきであって、アンテナ特性の定義の都合で λ まで含まれて自由空間伝搬損と呼ぶのは、ネーミングが良くないのではないだろうか。

おまけとして、フリスの公式を忘れてしまったとき、思い出す方法の一つ（図2）[5]。

- i) 送信点と受信点の間に幅1波長のレッドカーペットを敷く（面積 S_0 は $d\lambda$ ）。その上に、高さが1mの直方体水タンクを用意し、これに水を満タンにする。
- ii) 底面積が A_t となる場所に仕切り板を入れ、残りの水を全部抜く。
- iii) 仕切り板を外し、下がった水の高さを a とする（ $a=A_t/S_0$ となる）
- iv) 次に底面積が A_r となる場所に仕切り板を入れ、残りの水を全部抜く。
- v) 仕切り板を外し、さらに下がった水の高さを b とする（ $b=(A_r/S_0)a$ となる）

このようにして得た水の高さ b が総合減衰量（ P_r/P_t ）を与える。これも不思議ですね。

そうすると、送信アンテナと受信アンテナの実効面積をそれぞれ $d\lambda$ として対向させれば損失が無いことになる。本当だろうか？ 当たらずしも遠からずである。

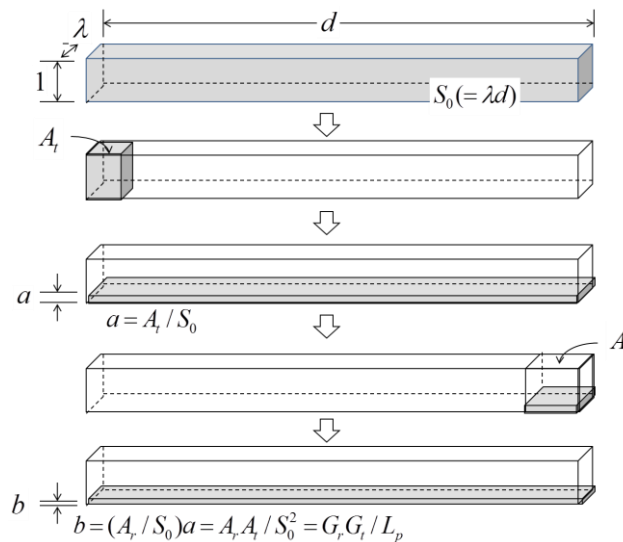


図2 フリスの伝達公式：忘れたときに

② 壊れたアンテナの性能

図3に示すように、パラボラアンテナで電波受信をしているとき、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？」

これに対しては、以下の答えに代表されるであろう。

- i) アンテナの開口面積が半分になったのだから、式(2)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合成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。

どちらも正しそうに見える。しかしそれでは、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瞭になる。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の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それで 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。筆者なりに考えて行き着いた答えを[6]に示しているので、興味ある読者は見てほしい。

当然ながら、最初から半円形のパラボラアンテナとして正しく設計されれば、円形パラボラアンテナの利得に比べて 3dB 低く、i) の考えに間違いはない（効率の議論は無視しているが）。では、「半分壊れたアンテナ(6dB 利得低下)」と「正しく設計された面積半分のアンテナ (3dB 低い)」の違いはどこにあるのだろうか？

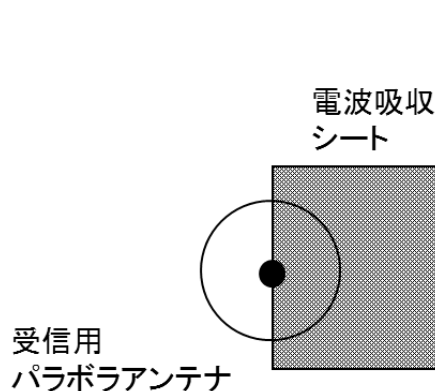


図3 吸収シートで半分が覆われた
受信パラボラアンテナ

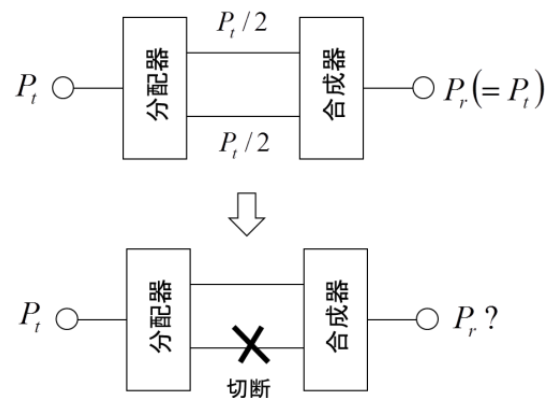


図4 マイクロ波回路とのアナロジー？

以下の例は、類似なことであろうか？

マイクロ波回路で、ウィルキンソン型の分配器と合成器を図4（上）のように接続する。この接続では電力の損失はない（原理上）。そうすると、中間部分の上下の線路には半分ずつの電力 ($P_t/2$) が伝送されていることになる。このとき、同図（下）のように一方の線路を切断したとき、その出力は？ $P_t/4$ 、そう、6dB 低下ですね。上半分に流れていた電力の半分はどこに行ってしまったのだろう。図3の問題と共通しているように思うのだが、どうだろうか？

ここからの教訓。「100 人が力を合わせてことを成し遂げるための戦略がある。50 人が抜けた状態でその戦略を実行することによる成果と、最初から 50 人で成し遂げるために練り上げられた戦略による成果には倍の差が出る」

③ 無線回線の相反定理：成立している？

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移動体が動いている状況を考える。図5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。実際には、ありえないことであるが、理想的なサーキュレータを使うなどして、双方向の信号がそれぞれ同時に測定できたとする。このとき、双方向の二つの受信変動を比べたとき、変動が同じであるかどうかということである。同じであれば、伝送路に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。

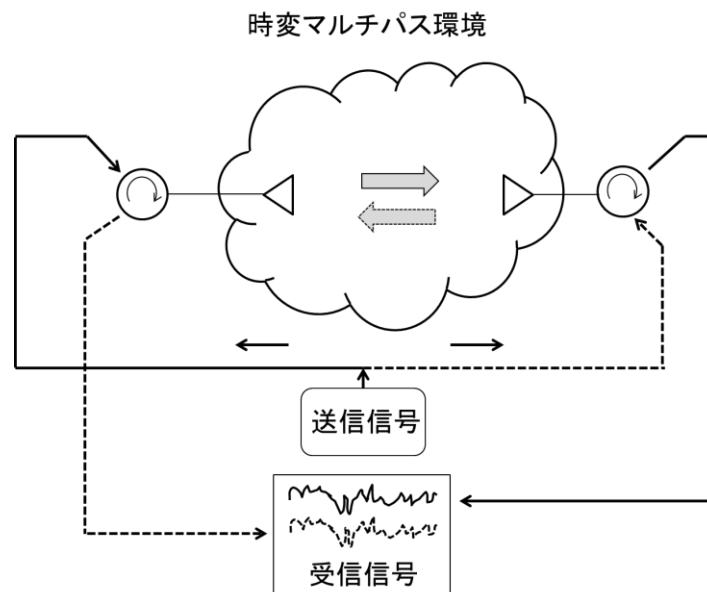


図5 マルチパス環境での通信リンクの双方向の可逆性（相反性）は成立するか？

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、相反定理とも言われる。図5の場合に、相反定理が成立していないなら、していない例を一つ示すだけで十分である。図6はその例である。左側（A側）に遅延量の異なる二つのパスが有り、一旦合成されて再放射し、それを移動体端末（B側）で受ける（あるいは送る）構成である。左側を送信局とすると、送信信号の周波数では、中継のアンテナに入射したとき、二つの遅延波が同振幅・逆位相であった場合には打ち消されて、右側には放射されない、すなわち、受信強度は0である。一方、右側（B側）から送信されると、ドップラー周波数分伝送周波数がシフトして、左側の遅延パスでは位相の差が生じて打ち消されなくなる。すなわち、 $A \rightarrow B$ では受信強度無し、 $B \rightarrow A$ では受信強度有りとなって、相反定理は成立していない。

もう少し現実的には図7のような回路になるだろうが、これとても同じである（図6よりは説明が悩ましいが）。文献[7]では、これを定量的に調べていて、大雑把な意味で、

$$f_D \Delta\tau \ll 1 \quad (5)$$

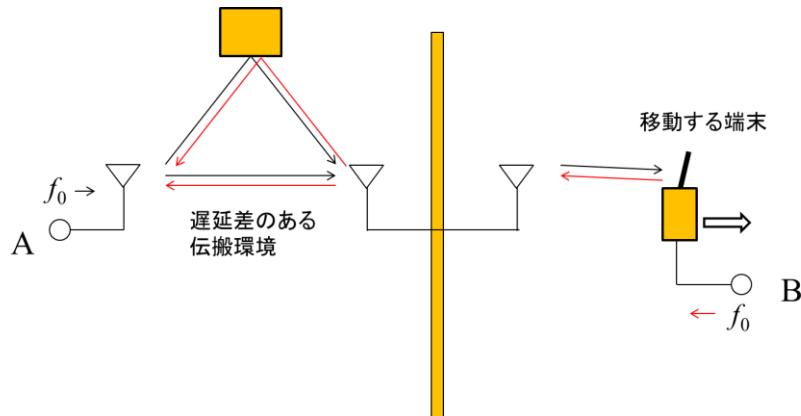


図6 相反定理が成り立たないリンクの例

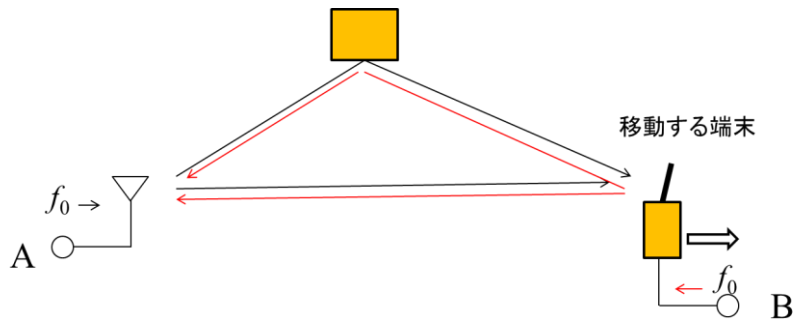


図7 移動通信のリンク例

が相反定理成立の条件になる。 f_D は最大ドップラーシフト、 $\Delta\tau$ は最大遅延差である。

式より、ドップラーシフトと遅延差の一方だけでは、その値がどんなに大きくても相反定理が成立するが、両方共に存在して、かつ、式(5)が成立しないくらいになると、相反定理が崩れる。

幸いなことに、現在、実用あるいは計画中の無線システムの運用環境においては、 $f_D\Delta\tau$ が0.01を超えることはまずなく、相反定理が成立している通信環境にあるといえる。

統計的な意味では、ドップラーシフトの広がり標準偏差 σ_v （文字 v はギリシャ文字の“ニュー”でドップラー周波数の変数記号）と遅延広がり標準偏差 σ_τ の積： $\sigma_v\sigma_\tau$ に対して $\sigma_v\sigma_\tau \ll 1$ が同様な条件となる。伝搬パラメータ $\sigma_v\sigma_\tau$ はスプレッドファクタと呼ばれ、情報伝送の限界を議論するのに重要なパラメータとなる[7]–[9]。

④ 電波の実体は実数？複素数？

アンテナに流れる電流、アンテナから放射される電波（空間の電氣的歪）は実数で表される物理量である。一方、マックスウェルの方程式から導かれる電磁波は $\exp\{j(\omega t - kx)\}$ のように、複素数量を許している。大学での電気回路（交流回路）の授業でも、電圧や電流に関して $\exp\{j(\omega t + \phi)\}$ のような複素数表現（フェーザ表現）が用いられる。この理由は式展開に便利で解析性に優れると言うためから来ていると思うが、慣れるに従って、電気に関する物理量の実体は複素数かも、と思うようになってくる。この問題を考える二つの例を挙げる。

（１）解析信号

空間を伝搬する物理信号（以下、これを電波信号と呼ぶ）を $s(t)=r(t) \cos(\omega_c t + \phi(t))$ と表す。角周波数 ω_c （以下、単に周波数と呼ぶ）の搬送波の振幅と位相の変化に情報 $x(t)=r(t) \exp(j\phi(t))$ を乗せている。情報信号 $x(t)$ は $\omega_c/2$ より帯域幅の狭い時間変動する複素数信号でベースバンド信号と呼ばれる。ベースバンド信号は、複素平面上（I, Q 座標）に次式で表される。

$$\begin{aligned} x(t) &= r(t) \exp\{j\phi(t)\} \\ &= x_I(t) + jx_Q(t) \end{aligned} \quad (6)$$

この信号を搬送波周波数 ω_c により位相基準を定め、次式の実数信号（電波信号、正確には帯域通過信号と呼ばれる）に変える。

$$\begin{aligned} s(t) &= r(t) \cos\{\omega_c t + \phi(t)\} \\ &= r(t) \cos \phi(t) \cos(\omega_c t) - r(t) \sin \phi(t) \sin(\omega_c t) \\ &= x_I(t) \cos(\omega_c t) - x_Q(t) \sin(\omega_c t) \end{aligned} \quad (7)$$

電波信号 $s(t)$ をフーリエ変換すると、図 8 左に示すように、正の周波数 ω_c と負の周波数 $-\omega_c$ を中心に複素共役の関係を持つ周波数成分が現れる。この正の周波数成分 $S^+(\omega)$ を逆フーリエ変換して時間変動 $s^+(t)$ に戻すと $s^{(+)}(t) = r(t) \exp\{j(\omega_c t + \phi(t))\}$ となる。この形で表された信号は解析信号と呼ばれる。時間領域において、電波信号は実数、解析信号は複素数である。電波信号の正負のスペクトルは複素共役の関係になっていて、同じ情報を共有するだけであるので、電波信号と解析信号が持つ情報は同じである。正の周波数とは、時間に対して位相が進む変化（複素面上では反時計方向に回転する変化）を、負の周波数とは、時間に対して位相が遅れる変化（複素面上では時計方向に回転する変化）を言う。

ここで、実数信号である電波信号と、複素数である解析信号のどちらが実体かを考えてみたい。複素数は見えないのだから電波信号が実体であると考えるのが自然であろう。実はもっと豊かな世界が見えない空間にも広がっていて、その一部が見えているだけと考えれば、複素数の世界（解析信号）の存在を否定できるものでもない。スペクトルを見ると電波信号（実数信号）は、正負の位相回転が常にペアに存在しなければならず、むしろそのような拘

束条件が常に課せられていること自体不自然ではないか、とも思える。少し脱線するが、電磁気学では、単独の磁荷の存在は否定され、正負のペアでのみの存在が許される。そしてその実態は電流であるという別の物理量に置き換えられて説明されている。実数信号と解析信号のスペクトルを見ているとこの例を思い起こさせるが・・・。

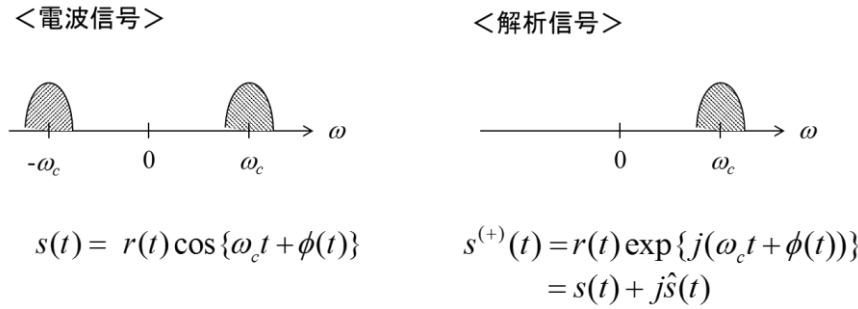


図8 電波信号（実数信号）と解析信号（複素数信号）：そのスペクトル

解析信号についてももう少し見てみよう。

$$\begin{aligned}
 s^{(+)}(t) &= r(t) \exp \{ j(\omega_c t + \phi(t)) \} \\
 &= x_I(t) \cos(\omega_c t) - x_Q(t) \sin(\omega_c t) + j \{ x_I(t) \sin(\omega_c t) + x_Q(t) \cos(\omega_c t) \} \\
 &= s(t) + j\hat{s}(t)
 \end{aligned} \tag{8}$$

$$\hat{s}(t) \equiv x_I(t) \sin(2\pi f_c t) + x_Q(t) \cos(2\pi f_c t) \tag{9}$$

(9)式で表される $\hat{s}(t)$ は $s(t)$ のヒルベルト変換と呼ばれる形である。ヒルベルト変換は実数信号表現と複素数表現の橋渡しをするものであるが、詳しくは[10], [11]を見てほしい。この例から、ヒルベルト変換とは、実数信号の裏側に隠れて存在する虚数信号のイメージをうかがわせるが、実体は何なのだろうか。

実数信号 $s(t)$ として三つの正弦波が合成された信号

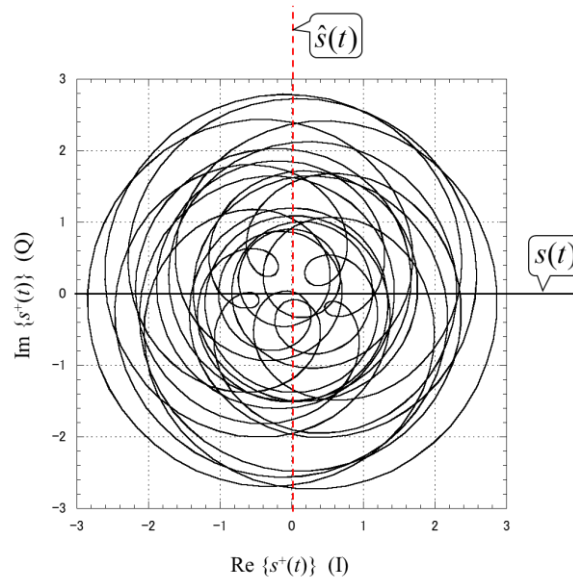
$$s(t) = r_1 \cos(\omega_1 t + \phi_1) + r_2 \cos(\omega_2 t + \phi_2) + r_3 \cos(\omega_3 t + \phi_3) \tag{10}$$

を考え、 $\omega_1: \omega_2: \omega_3 = 1.0:1.8:2.5$; $r_1, r_2, r_3 = 2.0, 1.0, 1.2$; ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 : ランダムな初期位相、とする。この解析信号 $s^+(t) (=s(t) + j\hat{s}(t))$ を IQ 面上にプロットしたのが図9(a)である。I 軸上での変化 $\text{Re}(s^+(t))$ が $s(t)$ に、Q 軸上での変化 $\text{Im}(s^+(t))$ が $\hat{s}(t)$ になる（同図(b)）。

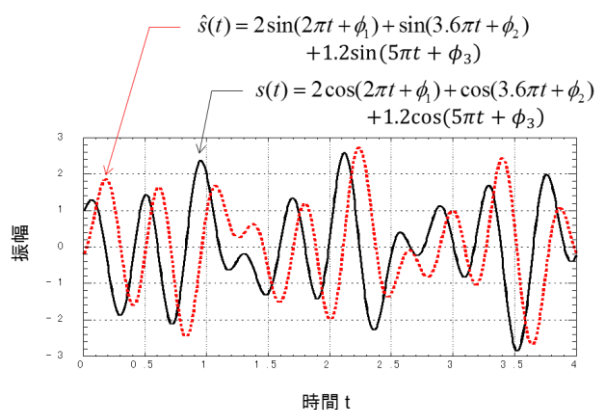
我々は、電波信号を物理量として図9(b)の黒線の変化しか認識し得ない。そしてそれが全てである。一方、虚数部を担う赤点線の変化は何なのだろうか？現実には無いものを書いているだけなのだろうか？（こういう議論とは別に、赤点線で示すヒルベルト変換信号が実

用的に役に立つことは[10]を)

この種の実数/複素数問題は解釈問題と言われる。繰り返しになるが、解析信号が本質であると考え人は、それが多次元の物理空間に横たわり、我々の眼がその一つの次元（実数部）を見ているだけと主張する。実数派は「見えるものが全て、無いものは無い」の一点張りである。両方の考えが共存して決着が付かないのは、この世界が我々の眼には両者に共通する実数量でしか見えておらず、生起する物理現象の説明に矛盾が起きないからである。宗教論争みたいなものかもしれない。



(a) IQ 座標（複素面）上へのプロット



(b) I 軸上および Q 軸上での時間変化

図9 解析信号の時間変化の例

(2) 電波の反射

図10のケースを考える。アンテナから放出される電波信号 $s(t)$ は実数信号である。これが途中の反射物に反射して信号変化を受けた。反射係数 γ は振幅と位相の変化で与えられる複素数である。反射後の電波信号 $s'(t)$ はどう表せるのだろうか？ $\gamma s(t)$ ？でもこれだと実数信号の世界に複素数を持ち込んでしまい、その結果が複素数の世界に変えられてしまっている。では、 $\text{Re}\{\gamma s(t)\}$ ならどう？これも変。正解は、

$$s'(t) = \text{Re}\{\gamma s(t)\} - \text{Im}\{\gamma\} \hat{s}(t) \quad (11)$$

二つのケースで見てきたように、アンテナ・伝搬分野においても、意外と身近なところにヒルベルト変換が現れる。

このように、実数の世界から複素数の世界へ橋渡ししてくれるのがヒルベルト変換である。この(2)項はこれだけだと消化不良になってしまっていると思うが、ヒルベルト変換に興味を持った読者は、是非、文献[10],[11]で知識を深めてほしい。

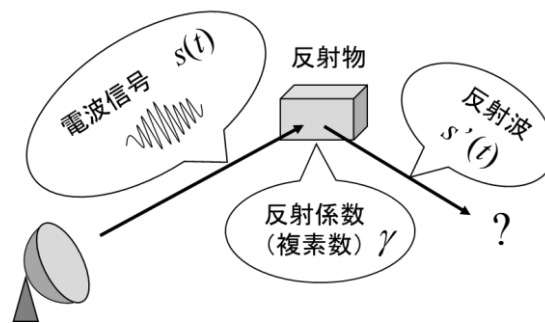


図10 電波信号（実数）の反射信号はどう表されるか？

⑤ 安全な場所

以下、[7]のコラム記事より。(移動通信のレイリーフェージングを学んだ後の教室で)

先生：レイリー分布、わかりましたか？

学生：同じようなものがたくさん集まると、その振幅は、中心極限定理により、正規分布になります。通信の信号は、同相成分 ($\cos 2\pi f_c t$) が運ぶものと、直交成分 ($\sin 2\pi f_c t$) が運ぶものの合成なので、それぞれの強さを x, y とすると通信信号の振幅 r は $\sqrt{x^2 + y^2}$ と表されます。マルチパス伝搬では多数の波が集まってきて x, y が独立に正規分布するので、 r の分布はレイリー分布になります。

先生：どんな形ですか？

学生：図 1 1 のようになります。

先生：発生確率でみると、 r の途中に最大値が現れていますね。 r が十分大きな値のところで、 $r = 0$ では、発生確率が 0 です。

学生：はいそうです。

先生：今から、ゲームをしましょう。大きなボードを用意して、ダーツで遊びましょう。先生がダーツを的の中心に向かって何回も投げます。ダーツが中心から外れる距離 r の確率は、どうなりますか？

学生： x, y 軸のそれぞれに正規分布するだろうから、 r はレイリー分布に近いと思います。

先生：そうですね。では、ダーツの大きさより少し大きな孔をあけたボードを持って、君はその孔の後ろに立ってください。

学生：孔の位置は、どこがよいですか？

先生：当たると痛いので、当たらない確率のところが良いですね。そう、 $r = 0$ のところは、確率 0 なので、安心ですね。的の中心位置に穴をあけて、その後ろに立っててください。

学生：・・・・・・・・？

この話の不思議はなんでしょう。「確率」と「確率密度」の違いですね。図 1 1 中に示した式 $f(r)$ は確率密度関数と言って確率密度を表すもの、確率ではありません。確率は 0~1 の範囲になるが、確率密度は、非負のどんな値をとることもできます。中心点付近、「確率密度」は極めて 0 に近いのに、当たる「確率」は最大の場所だったのです。ところで、確率密度って？

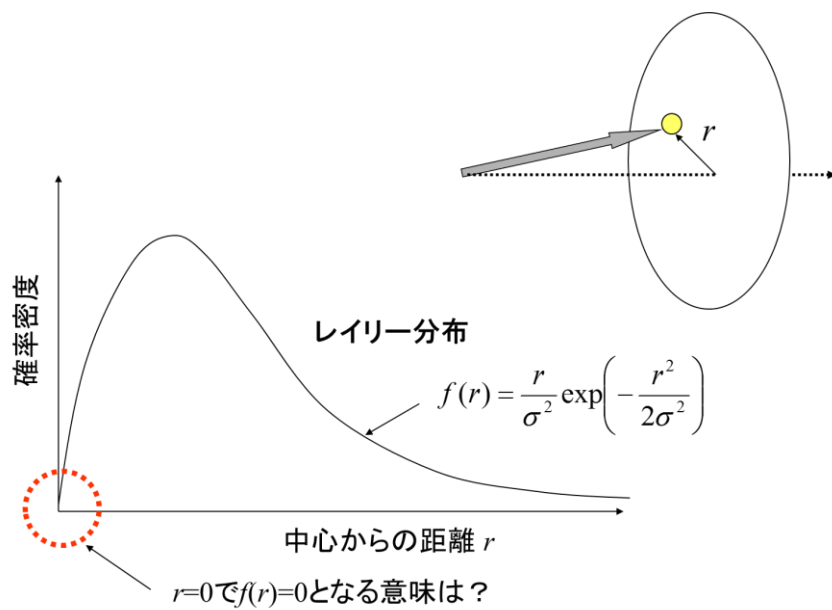


図 1 1 レイリー分布の確率密度関数

⑥ 光の道

海岸で夕日を見る。夜、池の向こうのふちに立つ灯りを見る。水面に少し波があると、その光は自分に向かって一本の道のように見える（図12）。光の道と言われている現象です。なぜ、広がらずに道になるのでしょうか。

図12の写真には思い出があります。筆者が企業の研究所に居た時、その最初の研究テーマは、船舶への衛星通信で問題になる海面反射フェージングの解明と対策でした。まずは、現象を目で見てみようと、図12のような写真をいっぱい取りました。いろいろな海面状態での反射を見たくて、新婚時代よく西伊豆に旅行に出かけ、海面に映る夕日の写真ばかり撮っていました。（筆者の本心に気づいた女房は、あきれるばかりでしたが。）

この現象は考えれば分かる問題ですね。1)海面が光って見えると言うことはどういう条件が満たされているときか？ 2)図12の×点から光が反射してくるとしたら、そこはどんなになっていなければならないか、 3)そうなる確率はどうか？の順にですね。ちなみに、学生からのよくある答えは「波がこっちに向かってやってくるから」。違うよ。

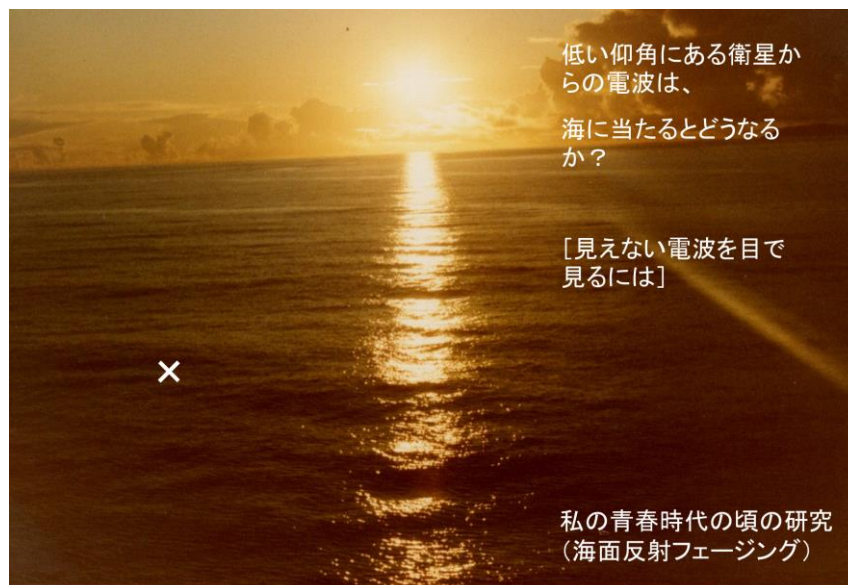


図12 光の道

⑦ 本物と偽物：宇宙人がテレビを見ると

最後はアンテナ・伝搬の粋からはみ出してしまうが、電波に関連する話題。

我々が目で見ることのできる光は図 1 3 下のように赤から紫まで広い波長体のスペクトルを有している。一方、同図上に示す光の 3 原色：赤、緑、青で、ほとんど全部の色を作り出してしまう。

赤い光と緑の光を重ねて黄色を作る。波長 700nm の赤い光と波長 500nm の緑の光からその中間にある波長 600nm の黄色い光を生み出している。電波で言うと 1GHz の電波と 2GHz の電波で 1.5GHz の電波を作り出しているようなものである。非線形な現象であれば、そういうこともできなくはないが、光の強い弱いに関係しておらず、非線形現象ではなさそう。マックスウェルの電磁気学では同じ仲間である光と電波なのに、電波では説明できない現象。これがずっと不思議であった。

疑問を解いてくれたのはネットの検索サイト。それによると、これは人間の目の色認識機能に拠るらしい。人間の目は、赤・緑・青色の 3 色のみ（最近では 4 色とも言われているが）を識別できるセンサーしかなく、かつ、その識別フィルタの特性は甘く Q 値が低い（図 1 4）。例えば黄色の光を見る、赤と緑のポートに半分ずつ出力がたち、それを人間の脳が、そういう組み合わせは黄色と判断するようである。それゆえ、真に黄色のスペクトルに近いナトリウムランプの光でも、赤と緑が足されただけの光でも、人間の目には黄色に見えて区別が付かない。

そのようにして、我々は毎日だまされ続けている。例えば、テレビ。我が家の猫も小鳥の映像に興味深げに見るが、生命体としての発生源は同じところにあるので、同じようにだまされているのだと思う。でも、まったく発生の異なる宇宙人がテレビ（あるいは図 1 5 の写真）を見たらどう思うだろうか？

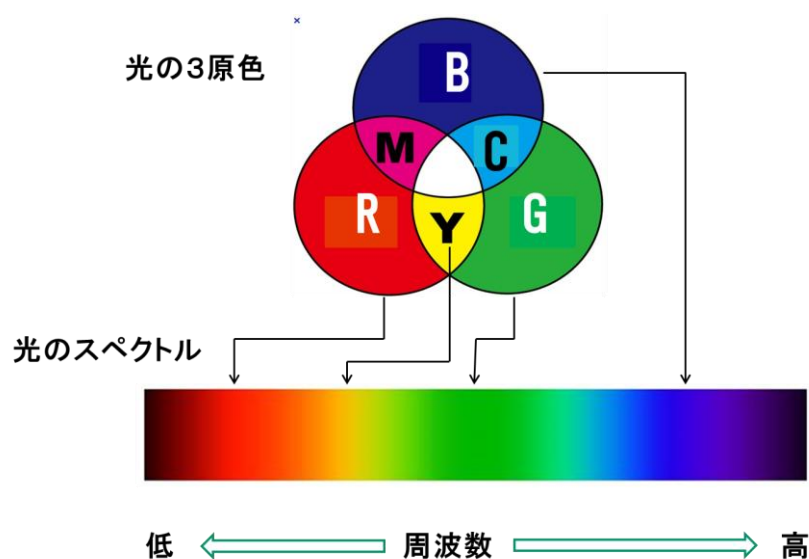


図 1 3 光のスペクトルと 3 原色

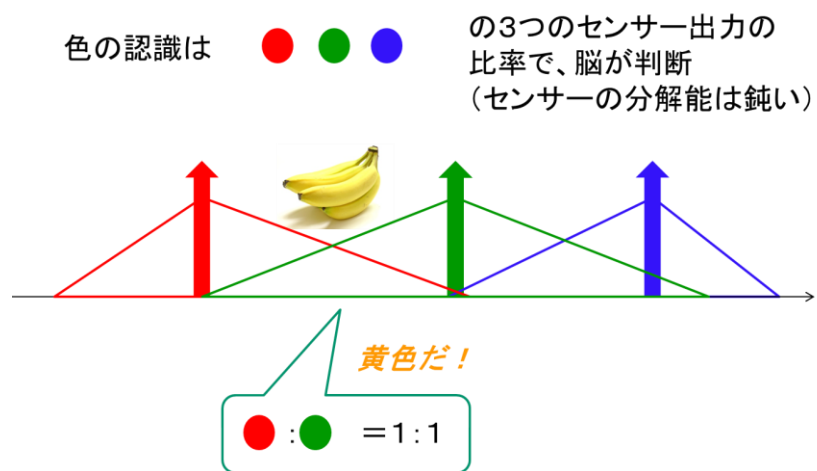


図 1 4 人間の光センサーと色認識



図 1 5 カラフルな写真 (どこでしょう?)

終わりに

一電波研究者が感じた唐沢流七不思議を紹介した。内容に濃い薄いがあり、割いた文量も違いが大きい（総じて前半のテーマにウェイトが行っている）。七つにまとめきれずに割愛したものもある。読者の皆さんにも、それぞれの不思議があると思う。これを酒のつまみに電波の不思議を語り合えれば、筆者にとって最高の幸せである。

参考文献

- [1] 後藤尚久他, “楽しく学ぶ電波教室：－こんな質問にどう答えるか－,” 信学会, A・P 第2種研究会, A・P 8 5－S1～S12, 1986.01.
- [2] 安達三郎, “電磁波工学におけるパラドックス：－その思い違いを探る－,” 信学誌, vol. 67, no.6, pp. 657-662, 1984.06.
- [3] 虫明康人, アンテナ・電波伝搬, 電子通信学会編, コロナ社, 1961.
- [4] H. T. Friis, “A note on a simple transmission formula,” Proc. IRE and Waves and Electronics, pp. 254-256, May, 1946.
- [5] 唐沢好男, “フリスの伝達公式への温故知新,” 信学技報 A・P2015-173, 2016.01.
- [6] 唐沢好男, “フリスの伝達公式への温故知新,” 研究会発表スライド
http://www.radio3.ee.uec.ac.jp/ronbun/AP_ken_H20160114_Friis.pdf
- [7] 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.
- [8] Y. Karasawa, "On physical limit of wireless digital transmission from radio wave propagation perspective," Radio Science, vol. 51, issue 9, pp. 1600-1612, Sept. 2016.
- [9] Y. Karasawa, "A simple formula for noncoherent capacity in highly underspread WSSUS channel," IEICE Trans. Commun., vol. E101-B, no.5, pp. 1262-1269, May 2018.
- [10] 唐沢好男, “無線技術者のためのヒルベルト変換,” 私報、Tech. Rep. YK-013, 2018.07,
http://www.radio3.ee.uec.ac.jp/ronbun/Hilbert_TR-YK-013.pdf
- [11] 唐沢好男, “電波信号とヒルベルト変換,” 信学技報, A・P2018-92, pp. 19-24, 2018.10.