

「近い」と「遠い」の境界線を探る

——次世代の無線伝送システムに向けて——

松室 堯之
Takayuki MATSUMURO

理工学部電子情報学科 助教
Assistant Professor, Department of Electronics and Informatics



1. 「近さ」について

大学生になって春から一人暮らしを始めたひとは、賃貸住宅を苦勞して探した経験があるのではないのでしょうか。限られた家賃の範囲で全ての希望を叶える家というのはなかなか見つからないものですね。そんなときは、仕方なく優先順位の高い条件を満たしている家を選ぶわけですが、そのときに「大学への近さ」を特に重視している人も多いと思います。例えば、大学から徒歩20分と聞くと、「遠い」と思うのでしょうか、それとも「近い」のでしょうか。実際に20分かけて歩いて通学するには、少し遠いと思う人が多いと思います。しかし、自転車ですれば10分もかからないので、近いと考えるひともたくさんいるのではないのでしょうか。

よく考えてみると、私たち人間は「近さ」を時間で判断することが多いようです。例えば、新大阪から東京までの所要時間は、新幹線が開通した1964年のひかりではおよそ4時間程度かかっていました。しかし、現在はのぞみを使えば2時間30分かかりません。この50年間で物理的な距離は全く変化していないにも関わらず、私たちは大阪と東京が「近くなった」と感じる事が出来ます。

さらに、現代の私たちはスマートフォン（携帯電

話）を用いて「いつでも、どこでも、だれとでも」つながることが出来るようになりました。スマートフォンは、私たちの声や情報を電気信号に変換して通信をしています。この電気信号は、光の速さ（1秒間に地球を7周半する速さ）で伝わる事が出来ます。地球の裏側の友達に対してほとんど声が遅れることなく通話することが出来るのは、まさに光の速さのおかげです。地球上のどこかで起きた情報を全世界で同時に知ることが出来るということは、極端に言えば私たちは地球の大きさが無視できるほど「近くなった」ということができます。

このように、前提条件や考え方によって、実際の距離は全く同じであったとしても「近さ」はさまざまに変化します。今回は、みなさんのスマートフォンにも必ず入っているアンテナというデバイスによって、「近い」と「遠い」の境界線はどこにあるか、ということについて考えたいと思います。

2. アンテナ：電波の出入り口

私たちにとって最も身近な電子機器となったスマートフォンには、アンテナというデバイスが入っています。スマートフォンを使って通話するとき、私たちの声は電気信号に変換されたあと、アンテナから空間に飛び出して基地局を通して相手のスマート

フォンまで届けられます。このとき、空間を伝わる電気信号は「電波」と呼ばれています。アンテナとは、空間を伝搬する電波の出入り口ということが出来ます。このとき、アンテナからの「近さ」に応じて異なる性質の電波（電磁界）が存在します。

アンテナには様々な形状がありますが、本稿では教科書でもよく目にする微小ダイポールアンテナと開口面アンテナという2つの基本的なアンテナからの放射現象を考えることによって、アンテナからの「近さ」に応じた電波の性質を示します。

2.1 微小ダイポールアンテナ（点からの放射）

スピーカーが空気を振動させて音を放出するのと同じように、アンテナは電流を振動させることによって電波を空間に放出します。電流が正弦的に振動する微小な長さのアンテナを「微小ダイポールアンテナ」と呼びます。特に、線状電流の場合を電気ダイポール、ループ電流の場合を磁気ダイポールとそれぞれ呼びます。微小ダイポールアンテナからの放射は、大きさが無視できる「点からの放射」として考えることができます。

まずは、図1をご覧ください。この図には、微小ダイポールアンテナ（電気ダイポール）から電波が放射される様子を示しています。電波は「電界」と「磁界」が互いに絡み合った波として存在します。

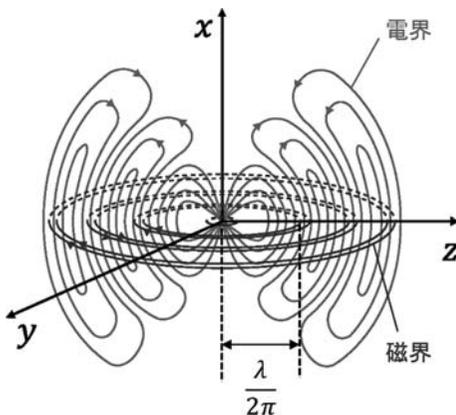


図1 微小ダイポールアンテナ（電気ダイポール）から電波が放射される様子

電界と磁界を合わせて電磁界といいます。図1は、原点のアンテナから染み出した電磁界が、やがてアンテナから切り離されてひとつのループを作り遠方へ放射していく様子を表しています。

このとき、微小ダイポールアンテナの周りには、原点からの距離の3乗分の1で減衰する「準静電界」、原点からの距離の2乗分の1で減衰する「誘導界」、原点からの距離に反比例して減衰する「放射界」という3種類の電磁界が存在します¹⁾。原点からの距離が $r = r_c$ を満たすとき、これら3つの成分は等しくなることが知られています。距離 r_c は電波の波長を λ として、式(1)で与えられます。

$$r_c = \frac{\lambda}{2\pi} \quad (1)$$

すなわち、原点からの距離が $r < r_c$ である場合、準静電界および誘導界が支配的な領域となり、原点からの距離が $r > r_c$ である場合は放射界が支配的な領域となります。式(1)をみると、準静電界および誘導界が支配的な領域の大きさは、波長に比例して大きくなるのが分かります。非放射の電磁界である準静電界および誘導界は、リアクティブ電磁界と呼ばれています（本稿では以降、単に誘導界と呼びます）。

2.2 開口面アンテナ（面からの放射）

微小ダイポールアンテナと同様に基本的なアンテナとして「開口面アンテナ」があります。微小ダイポールアンテナからの放射が大きさが無視できる点からの放射であったのに対し、開口面アンテナは「面からの放射」として考えることができます。BS放送などを受信するために用いているパラボラアンテナは、開口面アンテナのひとつです。

波長よりも十分大きな開口面を用いて放射することによる最大の効果は、狙った方向に電波をまっすぐ放射することができるという点です。これをアンテナの指向性といいます。図2をご覧ください。この図は、開口面アンテナから放射された電波が伝搬

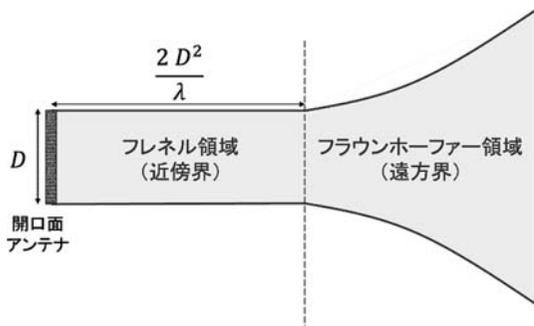


図2 開口面アンテナから電波が放射される様子

する様子の断面図を表したものです。開口面アンテナから放射された指向性の高い電波は、飛び出してしばらくの距離をビームとして伝搬したあと、徐々に広がっていくことがわかります。開口面から飛び出た電波がビームとして伝搬する領域を「フレネル領域（近傍界）」といい、徐々に広がっていく領域を「フラウンホーファー領域（遠方界）」と呼びます。近傍界と遠方界に明確な境界線を引くことは出来ませんが、式（2）の目安が用いられます¹⁾。

$$R = \frac{2D^2}{\lambda} \quad (2)$$

ここで、 R は開口面の中心からの距離、 D は開口面の大きさ、 λ は波長を表します。式（2）によれば、近傍界の大きさは開口面の大きさの2乗に比例し、波長の大きさに反比例することがわかります。

2.3 アンテナの「近さ」

これまでに、微小ダイポールアンテナと開口面アンテナを例にとって、アンテナから電波が放射したとき空間に存在する電磁界の性質について述べました。また、それぞれのアンテナにおいて電磁界の性質が変化する距離として式（1）と式（2）を示しました。既に述べたように、式（1）は「誘導界」と「放射界」を区別し、式（2）は「近傍界」と「遠方界」を区別します。厳密な距離はアンテナごとに若干異なりますが、様々なアンテナに対してもこれら2つの境界を同様に当てはめることができます。

一方で、現実のシステムでは電波を放射する「送信アンテナ」と電波を吸収する「受信アンテナ」が必要です。この受信アンテナが、送信アンテナの作り出す電磁界のうち、どのような性質をもつ電磁界が存在する距離に置かれているかによって、アンテナの「近さ」が決まります。ここで改めて気をつけておきたいことは、アンテナの「近さ」は物理的な距離だけではなく、電波の波長や開口面の大きさによって変化するという点です。

3. 次世代の無線伝送システムに向けて

これまでの主な研究開発課題であったスマートフォンなどの電波を用いた無線通信システムにおいては、送信アンテナと受信アンテナはできるだけ離して「放射界」かつ「遠方界」に設置されて用いられることが多く、「誘導界」または「近傍界」における伝送システムの設計はほとんど進められていませんでした。

しかし近年、電波の新しい利用方法として無線電力伝送システム（ワイヤレス給電）が注目され始めています。このシステムでは、効率よくエネルギーを送るため、受信アンテナを「誘導界」または「近傍界」に設置する必要があります。これまでの無線通信システムとは異なる設計が求められます。

3.1 「誘導界」における伝送

2007年にアメリカのMITがおこなった実証実験²⁾をきっかけに「誘導界」におけるエネルギー伝送（共鳴送電）が大きな注目を集めています。

共鳴送電に用いる素子は、もはや電波を放射せず結合によってエネルギーが運ばれるため、アンテナではなく共振器（コイル）やカプラと呼ばれます。送電カプラおよび受電カプラの距離は、誘導界の条件を満たすため式（1）の r_c よりも短い必要があります。例えば、10 MHzの周波数を用いた場合、誘導界を用いて伝送可能な距離は約5mとなります。しかし、既にみたように誘導界においては、電界強度や磁界強度が距離の2乗分の1や3乗分の1で減

衰してしまうため、実際には 1 m 程度以下の伝送距離でよく用いられます。

共鳴送電における最大伝送効率 η_{\max} は、送電容量と受電容量の Q 値 (Q_1 , Q_2), 結合係数 k を用いて、以下の式で与えられます³⁾。

$$\eta_{\max} = 1 - \frac{2}{1 + \sqrt{1 + k^2 Q_1 Q_2}} \quad (3)$$

伝送距離が長くなり結合係数 k が低下した場合でも、送電容量と受電容量の Q 値が高ければ、高い効率でエネルギーを送送可能であることが分かります。ただし、この最大伝送効率を実現するためには、送電容量と受電容量のインピーダンスの比が最適条件を満たす必要があります。

この最適条件は、送電容量および受電容量の位置によって変化するため、移動する物体への送電には動的なインピーダンス整合手法の開発が求められます。また、いくら誘導界におけるエネルギー伝送であったとしても、その外側には「放射界」が存在するためシステムからの不要な放射を抑制する手法の検討も課題であるといえます。

3.2 「近傍界」における伝送

「近傍界」におけるエネルギー伝送の歴史は誘導界よりも古く、1960 年代に W. C. Brown らによる実験⁴⁾に端を発します。その後、1968 年に P. E. Glaser によって宇宙太陽発電システム (Solar Power Satellite) の構想が提唱され⁵⁾、多くの研究プロジェクトが進められてきました。また、現在では次世代 (第 5 世代) の高速通信システムの実現に向けて準ミリ波帯アレーアンテナの検討が進められおり、モノのインターネット (IoT) と呼ばれる通信端末やセンサー端末の圧倒的な増加予想を背景に、情報とエネルギーを同時に伝送しようとする試みが始まりつつあります。

「誘導界」の条件である式 (1) は波長に比例するのに対し、「近傍界」の条件である式 (2) は波長に対して反比例することがわかります。すなわち、同

じ開口面の大きさに対して波長が短くなるほど近傍界の距離は長くなります。例えば、24 GHz の周波数を用いた場合、直径 50 cm の開口面積を持つアンテナの近傍界は約 40 m となります。

近傍界における送受電アンテナの伝送効率は、送電アンテナと受電アンテナの面積 (A_1 , A_2), 伝送距離 L を用いて、以下の近似式で計算できます⁶⁾。

$$\eta = 1 - \exp\left(-\frac{A_1 A_2}{\lambda^2 L^2}\right) \quad (4)$$

伝送距離 L が増加した場合でも、送電アンテナと受電アンテナの面積が十分大きければ、高い効率でエネルギーを送送可能であることが分かります。ただし、この伝送効率を実現するためには受電アンテナに向けて適切なビームフォーミングをおこなう必要があります。そのため、アレーアンテナの素子に位相差を与えるアクティブフェーズドアレーアンテナの高精度な開発が求められます。また、受電アンテナからパイロット信号を放射して送電アンテナでビームが折り返す方向に再放射するレトロディレクティブ手法が有効であると考えられています。さらに、誘導界におけるエネルギー伝送と比較して高周波数の回路を用いるため、直流とのエネルギー変換効率の向上が求められています。

4. まとめ

本稿では、微小ダイポールアンテナと開口面アンテナを例にとり、アンテナの「近さ」は物理的な距離だけではなく波長や開口面の大きさによって変化することを述べました。また、次世代の無線伝送システムでは、これまでと比較してアンテナに「近い」領域で伝送することを示し、「誘導界」における伝送と「近傍界」における伝送の概要について述べました。

最後に、第 2 節では式 (1) および式 (2) は天下りの記載しましたが、理論的に導くことができますので、ご興味のあるかたはお手持ちのアンテナ教科書をフォローして頂ければと思います。それか

ら、波長や開口面の大きさが変わると図1や図2の絵がどのように変わるか、想像してみてください。この機会に、目に見えない電波の世界を少しでも体感して頂ければ幸いです。

参考文献

- 1) 安達三郎, 米山務, 「電波伝送工学」, 第2章, pp.41-57, 1981.
- 2) A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, and M. Soljacic, "Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonators," *Science*, vol.317, pp.83-86, July 2007.
- 3) 大平孝, "ワイヤレス電力伝送のkQ積理論入門," *電子情報通信学会誌*, vol.98, no.10, pp.885-887, Oct. 2015.
- 4) W. C. Brown, "The history of power transmission by radio waves," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-32, pp.1230-1242, 1984.
- 5) P. E. Glaser, "Power from the sun ; its future," *Science*, vol.162, no.3856, pp.857-886, 1968.
- 6) 篠原真毅, "無線電力伝送の送電距離に対する理論と技術," *電子情報通信学会論文誌 B*, vol.J96-B, no.9, pp.881-893, Sep.2013.

