

# ワイヤレス電力伝送：その理解の壺

唐沢 好男

無線通信は電波が情報を運ぶ機能を利用するものである。本資料では、電波のもう一つの役割、電力を運ぶ機能を取り上げる。電波自体がエネルギー源であるので、伝搬することが電力伝送であるとも言える。近年、電気自動車への電力供給等、伝送距離 1m 程度のワイヤレス給電に期待が高まっている。本資料では、端末機器へのワイヤレス給電を目的とした近傍電磁界利用による短距離の伝送（非放射電磁界の利用）から、電波伝搬による遠距離伝送（放射電磁界の利用）までの、幅広いワイヤレス電力伝送技術を対象にして、教科書風にまとめている。短・中距離ワイヤレス電力伝送は、省電力社会実現を支える技術として、特に応用面で技術開発が進んでいるが、技術理解の壺を押さえることに重きを置き、その基礎を述べるに留める。

## 目次

|                              |    |
|------------------------------|----|
| 1. ワイヤレス電力伝送の歴史 .....        | 2  |
| 2. 伝送方式の分類 .....             | 4  |
| 3. 短距離送電：磁界結合と電界結合 .....     | 6  |
| 3. 1 磁界結合                    |    |
| 3. 2 電界結合                    |    |
| 3. 3 電力とデータの同時伝送             |    |
| 4. 中距離送電：共鳴送電 .....          | 10 |
| 4. 1 原理                      |    |
| 4. 2 伝送の実際                   |    |
| 5. 遠距離送電：電磁波方式（電波伝送方式） ..... | 12 |
| 5. 1 原理                      |    |
| 5. 2 レクテナ                    |    |
| 5. 3 伝送の実際                   |    |

## 参考文献

## 1. ワイヤレス電力伝送の歴史

電磁界によって、すなわち、空間を介して相手に電力を送る技術を対象とする。この技術は、無線電力伝送、ワイヤレス給電（あるいは非接触給電）などと呼ばれている。ニュアンスとして、前者は大きな電力を遠方に送るイメージ、後者は、近傍にある機器（受電ユニット）に必要とする比較的小さな電力を送るイメージを感じる。本書では、短距離から長距離までの伝送技術を包含するよう「ワイヤレス電力伝送」と呼ぶ。

マルコーニが無線通信の実験を始めた 1890 年代、米国のニコラ・テスラ (Nikola Tesla : 囲み記事参照) は、電力送電網を無線で実現する夢を温めていた。その一環として、1901 年、テスラは、ニューヨークのロングアイランドに、高さ 57m の電波送信塔：ウォーデンクリフ・タワー (図 1 : 別名テスラタワー) の建設に着手し、ラジオ放送や無線送電の実現を試みた。残念ながら、送電に用いた 150kHz・300kW の電波では、それぞれの家庭の電燈を無線送電で灯すという思い描いた結果にはならなかった。しかし、無線で送電するという歴史の第一歩は、ここに踏み出された [1], [2]。

テスラが挑戦した時代から半世紀後、第二次世界大戦において、大電力を送信可能なマイクロ波レーダが開発され、ワイヤレス電力伝送の機が熟してきた。1964 年、米国のウィリアム・ブラウン (William C. Brown) が、彼の発明による電力受信用アレーアンテナ「レクテナ (rectifying antenna の略で rectenna)」を用いて、電力の空間伝送ができることを実証した。レクテナでのマイクロ波の電力変換効率は、周波数 2.45GHz で 80% であった。1975 年、米国のジェット推進研究所 (JPL) は、直径 26m のパラボラアンテナから 450kW のマイクロ波を送電し、距離 1.54km 先のレクテナで 30kW の受電を成功させた。レクテナは、270 の受電素子で構成されるサブアレー (1.16m×1.2m のサイズ) を 17 個配置した平面アレーを用いた。これらの実験によって、マイクロ波を用いて指向性を高めれば、大電力を長距離に伝送できることが明らかになった [3]。

この技術実証により、その応用として、1968 年に米国のピーター・グレイザー (Peter E. Glaser) が提唱した宇宙太陽光発電 (Solar Power Satellite/System: SPS) : 静止軌道衛星が太陽電池パネルで受け止めた電力をマイクロ波を介して地上に送るシステムが、現実味を帯び、1981 年に、米国航空宇宙局 (NASA) と米国エネルギー省 (DoE) により、具体的な設計が行われた。静止軌道上の衛星が、5km×10km の太陽電池パネルを挙げ、直径 1km のアンテナから、周波数 2.45GHz の電波を出力 6.72GW で送信し、それを、地上の直径約 10km のレクテナで受信し、5GW (受信効率 89%) を受け止めるという、壮大な規模のものであった。SPS は、将来において地上の化石燃料の枯渇が予想され、その解決のための切り札としての期待があった。NASA/DoE の SPS 計画は、財政面の問題等で凍結状態にあるが、1980 年代後半以降、京都大学の松本紘等のグループが牽引役になって、将来的な実用化を視野に入れた検討が続けられている [4], [5]。

ここまでの流れは、大電力を長距離に伝送したいという目的であった。これに対して、1990 年代後半、比較的小電力を 1cm 以内の短距離で、日常生活に用いる小型機器に対してワイヤレス給電したいという需要が高まり、電気シェーバーやコードレス電話、電気ポットなどに応用されてきた。この伝送では、電磁誘導を利用したコイル対向、すなわち磁界結合が用いられた。また、メーカー間で異なる規格を統一するため、2010 年に国際標準規格がワイヤレスパワーコンソーシアム (WPC) により定められ、Qi (チー) 規格と呼ばれている。この目的では、コイルを用いた磁界結合が主流であるが、コンデンサの電極を介した電界結合も実用化されている [6]。

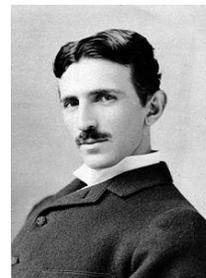
さらに、2007 年には、マサチューセッツ工科大学 (MIT) の M. Soljacic のグループが、LC 共振を結合させた共鳴送電により、直径 60cm のヘリカル型オープンコイルを用いて、距離 1m を 90% の効率で、距離 2m を 40% 以上の効率で伝送し、60W の電球を点灯させるデモンストレーションを行った [7]。この発表は、世界の大きな注目を集め、ワイヤレス電力伝送の新たな可能性を示すものとなった。この共鳴送電技術は、電気自動車への充電など、時代のニーズを受けて、実用化に向けた研究開発が盛んになっている [8]。

上述の技術は、受電側で必要な電力を、自前で送電して賄う方式であるが、太陽光や照明光、通信用電

波など既に環境に充満している微弱なエネルギーを汲み取って利用する方式は、エネルギーハーベスティング、あるいは環境発電と呼ばれる。センサーネットワークなど、消費電力が少ないシステムへの応用が期待され、近年、この研究開発も進んでいる。

---

## テスラの波乱万丈



電気工学で、磁束密度の単位としての「テスラ」を学ぶが、ニコラ・テスラ(1856-1943)の生涯はあまり知られていない。マーガレット・チェニー（鈴木豊雄訳）のテスラの伝記[2]には、以下のように紹介されている。「時代の寵児、詩人にしてエンジニア、食通にして名講演者、科学者にしてショーマン。歴史の波に翻弄され、“電気の魔術師”としての知名度をエジソンに奪われ、“無線の発明者”の栄誉をマルコーニにとられ、事業家としての成功をウェスティングハウスに譲り、候補に挙がりながらノーベル賞も逃した不遇の大天才」。クロアチアに生まれ、アメリカに渡って活躍した。

この章では、「無線送電のパイオニア」として名前を挙げているが、テスラにとっては、これは発明家としてのほんの一端。数多の突飛な発想の中では、現実路線のアイデアに位置づけられる。地球の固有振動周期を1時間49分と算定し、この時間ごとに、1トンのダイナマイトを爆発させることを、数か月継続すれば、やがて地球は真っ二つに割れると言った、というような類の話が本にはいっぱい載っている。稲妻が飛び交うテスラの実験室を訪れたマーク・トウェインが身の危険を感じて震え上がった、という話も出ている。

交流電源システムの生みの親がテスラであり、直流派のエジソンとの確執も有名である。1901年から数年間、ラジオ放送や無線電力伝送を夢見て、悲運の塔「ウォーデンクリフ・タワー（図1）」建設に悪戦苦闘している中、マルコーニの無線通信実験（デモンストレーション）が着々と進み、マルコーニの名声が高まっていった。しかし、長年継続した二人の特許紛争は、アメリカにおいては、テスラの死後八か月（1943年）に、アメリカ合衆国最高裁の「無線の発明者はテスラである」という判決で決着した。

---



図1 ウォーデンクリフ・タワー (テスラタワー) ([1] Tesla, Electrical World & Engineer, 1904)

## 2. 伝送方式の分類

前節で述べたように、ワイヤレス電力伝送は、伝送の方式、伝送距離によって種々の分類ができるが、図2に示すように、送受電の仕組みは共通である。送電側では、直流電源や商用電源(50/60Hz)を電力源として、それを空間に送るための高い周波数に変換し、アンテナやコイルなどの送電素子に接続する。受電側は、これを同様な素子によって汲み取り、利用可能な電源(直流・交流)に変換する。

電力伝送方式は、伝送距離によって、大きく3つに分けられる。i) 1cm以下の短距離送電、ii) 数十cm～数mの中距離送電、iii) 距離に制限のない遠距離送電である。短距離送電では、電磁誘導を利用したコイルによる磁界結合、あるいは、平板電極を対向させる電界結合が利用される。中距離送電では、LC共振で結合する共鳴送電が用いられる。なお、共鳴送電は、共振送電とも呼ばれ、呼び名がまだ定着していないが、本書では、共鳴送電と呼ぶ。この短距離伝送と中距離伝送は、非放射の近傍電磁界が電力を運んでいる。遠距離送電は、通信と同じ仕組みの電磁波方式(電波伝送方式)、すなわち、フリスの伝達公式に従う伝送になる。受信側で、電力受信専用のアンテナであるレクテナを用いることが通信とは異なる。

図3は、上述の4つの送電方式(短距離方式を磁界結合と電界結合の二つに分けている)のイメージを示している。表1は、それぞれの方式の特徴をまとめている。方式の詳細については、次節以降で説明する。近距離送電と中距離送電では、送電側の近傍に漂う電磁エネルギーを受電側でくみ取るイメージ、遠距離送電では、送られてきたエネルギーを受け取るイメージで捉えるとよいであろう。

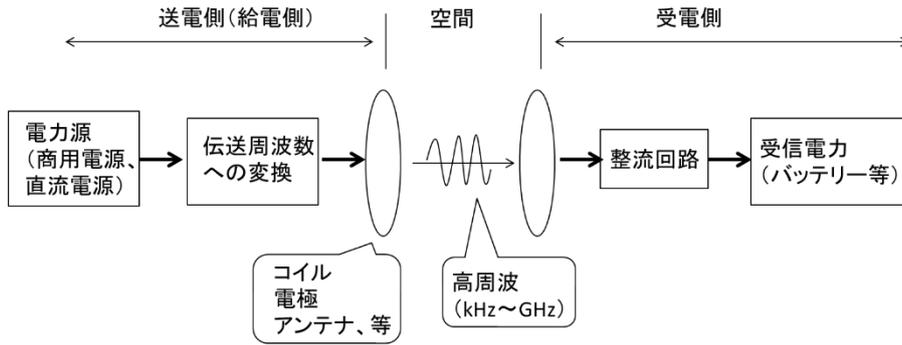


図2 ワイヤレス電力伝送方式の基本構成

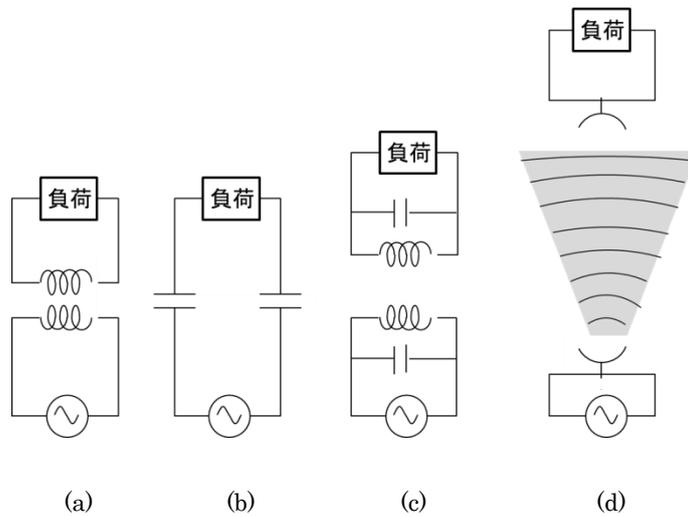


図3 ワイヤレス電力伝送方式

(a) 磁界結合方式、(b) 電界結合方式、(c) 共鳴結合方式、(d) 電磁波方式(電波伝送方式)

表1 各種伝送方式の特徴比較

| 方式         | 電磁結合方式               | 電界結合方式               | 共鳴結合方式           | 電磁波方式<br>(電波伝送方式) |
|------------|----------------------|----------------------|------------------|-------------------|
| 原理         | 電磁誘導                 | 変位電流                 | LC共振             | 自由空間伝搬            |
| 送・受電部      | コイル                  | コンデンサ電極              | コイル<br>(浮遊容量も利用) | アンテナ<br>(受信はレクテナ) |
| 最大伝送距離     | 1cm                  | 1cm                  | 数m               | 制限なし              |
| 伝送周波数(*)   | 100kHz               | 1MHz                 | 10MHz            | GHz帯(マイクロ波)       |
| 最大伝送電力(**) | 100W                 | 100W                 | 1kW              | GW級の伝送も可          |
| 応用分野(給電)   | 家電製品<br>情報端末<br>体内機器 | 家電製品<br>情報端末<br>体内機器 | 電気自動車<br>交通システム  | SPS<br>移動体・飛行体    |

\*) 代表値であり、幅広い対応が可(この値に拘束されるものではない)

\*\*) 目安値であり、構成の工夫により、さらに大電力化が可能

### 3. 短距離送電：磁界結合と電界結合

#### 3. 1 磁界結合

##### (1) 原理

原理はファラデー (Michael Faraday 囲み記事) の電磁誘導の法則の応用である。

図4(a)に示す環状ソレノイド (中心の長さ  $l$ 、断面積  $S$ 、透磁率  $\mu$ ) において、巻き数  $N_1, N_2$  のコイル 1, 2間の相互インダクタンスを求める。コイル1の電流  $I_1$ によって、磁気回路を通る磁束  $\Phi_m$ は、

$$\Phi_m = \mu S N_1 I_1 / l \quad (1)$$

となる。この磁束とコイル2の鎖交磁束は漏れ磁束がないとすると  $\phi_{21} = N_2 \Phi_m$  であるので、相互インダクタンス  $M$ は次式となる。

$$M = \frac{\phi_{21}}{I_1} = \frac{\mu N_1 N_2 S}{l} \quad (2)$$

コイル1, 2の自己インダクタンス  $L_1, L_2$ は

$$L_i = \frac{\mu N_i^2 S}{l} \quad (i=1, 2) \quad (3)$$

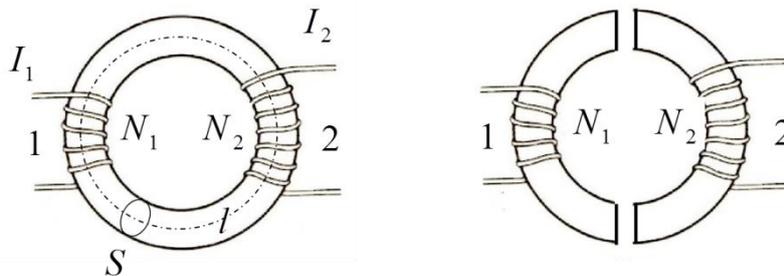
であるので、漏れ磁束がない場合には、 $M^2 = L_1 L_2$ の関係が成り立つ。このとき、2つのコイルは密結合であると言う。コイル1側を送電、2側を受電とすると、回路に浮遊抵抗が無ければ、電力は100%、2側に送ることができる。

しかし、これをワイヤレス送電に応用する場合には、例えば、図4(b)のようなギャップを介することになるので、漏れ磁束が発生し、 $M^2 \leq L_1 L_2$ となる。結合係数  $k$ を用いてこの関係を表せば、

$$M = k \sqrt{L_1 L_2} \quad (0 \leq k \leq 1) \quad (4)$$

となり、送電効率  $k$ の値に応じて変化することになる。当然ながら、ギャップ間隔が大きくなるほど結合係数の値は小さくなるので、伝送可能距離は自ずと限られた距離になる。

実際の磁界結合型電力伝送では、小型機器に組み込まれて利用されることが多いため、そのような目的では、図5に示すような平面に同心円状に多数回巻いたスパイラルコイル (平面空芯コイル) が用いられる。同図には、発生する磁力線のイメージも示しているが、この場合でも、図の上から同形を受電コイルをかざした場合に、間隔が大きくなると、漏れ磁束が大きくなって、給電効率の低下が起きる。平面コイルの利用は、送受電部を小型に実現できるが、図4(b)のように磁力線がコアの磁性体内に閉じ込められていないので、周囲に金属物がある場合には、渦電流が発生する等により、給電効率の低下や発熱を伴う。このため、実際の構成には、これらの影響が現れないようにする工夫が求められる。



(a) 密結合

(b) ギャップを有する結合

図4 環状ソレノイドのトランス結合

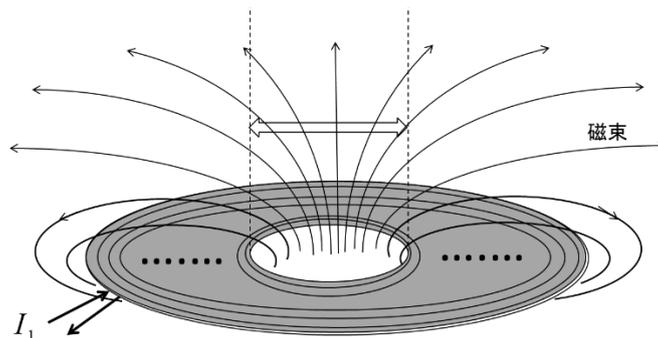
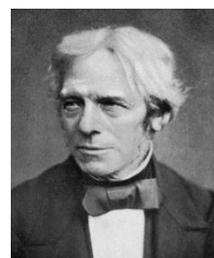


図5 平面空芯スパイラルコイルと発生磁束 (イメージ)

---

## ファラデーの生き様



マイケル・ファラデー (Michel Faraday: 1791-1867) は、電磁誘導の法則やベンゼンの発見など、19世紀にノーベル賞が有ったら6つは取れたであろうと言われる科学者である(\*)。ロンドン近郊の貧しい家庭に生まれ、まともな教育を受けることなく製本屋に奉公していた。その傍ら、ロンドン市が主催する協会の講演を聞いては科学者になる夢を膨らませていた。意を決したある行動が報われて、英国王立研究所の助手になることができた。アンペアやマックスウェルなど電磁気学の創成期には早熟の天才が活躍するが、ファラデーは努力の人であった。研究者仲間からは常に格下に見られながら、天性の洞察力で電気力線や磁力線など場の概念(近接作用)を生み出し、物理学の改革者となった。

ファラデーは実験を好み、その記録を詳細に残していた。彼の最後の実験は、光源(ナトリウムの気体から出る光)を磁場の中に置いての光のスペクトル変化の観察であった。結果、何も変化は現れず、失敗を記してノートを閉じた。それから35年後、ゼーマンがファラデーの失敗実験に再挑戦した。当時の最新装置を用いることによって、スペクトル幅が僅かに広がる現象を見出した。後にゼーマン効果と呼ばれ、ノーベル賞に輝いた。ゼーマンは、「あのファラデーが何かあると睨んで行ったことには、再挑戦してみる価値があった」と語って、敬慕の情を示したと言う。

晩年、物理学の第一人者となったファラデーに対して、英国王立協会会長職の就任要請が来た。このとき、ファラデーは、“I must remain plain Michel Faraday to the last”と断った。彼の信念・人生哲学を物語っている。

---

\*) 小山啓太、光と電磁気：ファラデーとマックスウェルが考えたこと、ブルーバックス、2016。

## (2) 伝送の実際

10W 程度の伝送では、直径 5cm 程度のスパイラル型平面コイル（空芯コイル）が用いられる。実際の給電回路では、コンデンサを付加して、弱い共振特性を持たせている。給電側の前段部には、商用電源や直流電源から、送電する周波数（100kHz 前後が一般）に変換する回路が、受電側の後段には、送電周波数の電力を直流電力に変換する整流回路が組み込まれる。

図 5 に点線の範囲で示している送電コイルと受電コイルの中心軸がずれると、漏れ磁束が多くなるため、結合が弱くなる。このため、受電コイルの位置合わせが問題になる。これを解決するため、主に、充電パッド側に以下のような工夫が行われている[9]。

- ・マグネット吸引型：給電コイルの中央に永久磁石を取り付け、受電コイルの中に入れた磁石を給電コイルの中央に引き寄せる方式。
- ・可動コイル方式：受電コイルの位置を検出し、充電パッドの給電コイルが、モータ駆動等により受電ユニットの直下に移動する方式
- ・コイルアレー方式：充電パッドに多数のコイルを密に重ねて敷き詰め、受電コイル近傍のコイルのみを作動させる方式

小型化・薄型化・低コスト化の点で、それぞれに一長一短があり、新たな方式開発も期待されている。

## 3. 2 電界結合

### (1) 原理

電界結合はコンデンサの電極を介して電力の伝送を行う。図 6 (a) に示すように、送電側と受電側を二つのコンデンサ（キャパシタ）によって結ぶ電気回路で原理が説明できる。コンデンサの電極間に流れる電流は変位電流と呼ばれる。平面コンデンサの静電容量  $C$  は、電極面積  $S$ 、間隔  $d$ 、空間の誘電率  $\epsilon_0$ （通常の構成では、空気中での動作となるので、真空中の値  $\epsilon_0$  とする）に対して、以下に与えられる。

$$C = \epsilon_0 \frac{S}{d} \quad (5)$$

図 6 (a) の電気回路としてみると、受電側で  $|I|^2 R_L$  ( $I$ : 電流、 $R_L$ : 負荷抵抗) の電力を受け止めることになる。電流  $I$  は、周波数が  $f$  のとき、

$$I = \frac{V_0}{R_L + \frac{1}{j2\pi f C_1} + \frac{1}{j2\pi f C_2}} \quad (6)$$

となるので、

$$\frac{1}{2\pi f} \left( \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right) \ll R_L \quad (7)$$

というような条件で動作させれば、コンデンサによる電流減少が小さく抑えられて、効率の低下を防ぐことができる。周波数が低いと、この条件を満たすことが難しくなるので、電極の大きさや間隔と合わせた周波数設定が必要になる。

コンデンサのインピーダンス増加による電流減少を積極的に抑えるには、図 6 (b) に示すように、送電側あるいは受電側のどちらかに、周波数  $f_0$  で回路が共振状態になるコイルを入れればよい。この構成は、同図(a)の構成と区別して、共振型電界結合（あるいは直列共振型電界結合）と呼ばれる。共振条件より、コイルの値は、

$$L = \frac{C_1^{-1} + C_2^{-1}}{(2\pi f_0)^2} \quad (8)$$

と定められる。この条件で、LC 直列部分のインピーダンスが 0 になって、給電効率を上げることができる。ただし、共振周波数が非接触部のコンデンサの静電容量に依存するため、電極間隔が一定しないような使用形態では、 $L$  の値調整や伝送周波数調整などが必要になって使い勝手の悪いことになる。この欠点、すなわち、共振周波数の電極間隔依存性を緩和する方式として、やや複雑な構成の並列共振型電界結合がある[10]。

電界結合と磁界結合では、応用面で磁界結合が主流であるが、どちらも同じようなことができるという意味で機能的な違いはない。平板電極で簡易に構成できるという点では、電界結合にメリットがあるが、磁界結合には電界結合に見られるようなギャップ間の放電現象がないため、比較的高電力を送りたいような場合には、磁界結合が適している。このように一長一短あり、用途に応じて使い分けられる。

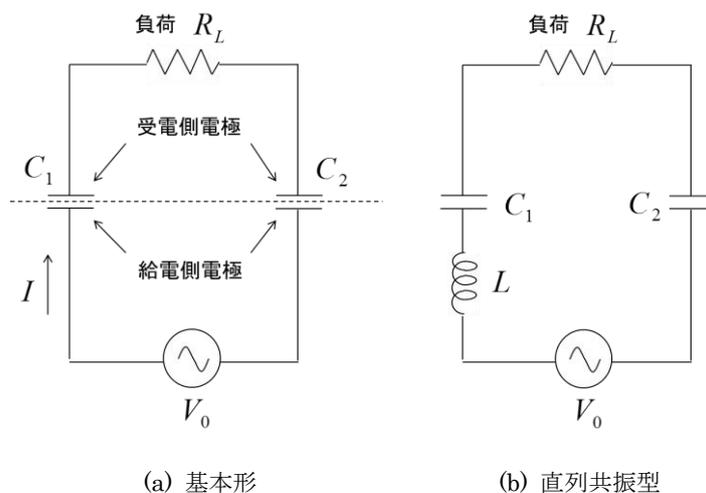


図6 電界結合給電方式

## (2) 伝送の実際

基本的には磁界結合と同様の応用ができる。さらに、電界結合方式は面対向にする電極板を送電側で大きなサイズとすることができるため、回転系やスライド系への応用が容易である[10]。既存の機器における回転系への電力伝送はスリップリングが用いられる。この場合、金属ブラシの擦り付けによる摩擦や汚れに対するメンテナンスが必要になる。これに対して回転軸とその受け側の両面に金属面に対向するような仕組みを付ければ、電界結合給電によって、上記の問題が解決できる。スライド系も同様である。

### 3. 3 電力とデータの同時伝送

ワイヤレス給電によって、リチウムイオン電池を充電する際、充電状態に応じて送電を制御したい場合がある。このようなときには、電力の一方的な伝送だけではなく、データも同時に伝送することが求められる。このような制御情報程度の低速のデータ伝送であれば、電力伝送の無変調信号に、例えばその振幅に浅い変調をかけること（重畳変調）で対応ができる。

情報端末機器に対してより高速のデータ伝送を行いたいためには、上記の重畳変調では帯域幅が取れず、電力伝送と情報通信を分離しなければならない。ただし、情報を近距离に無線で伝送する手段は種々存在するため、電力伝送のシステムに独自に組み込むか、既存システムを利用するかは、受電側での電力事情や用途に応じて使い分けることになる。

電力と情報を同時に並列で伝送する例として、電力を磁界結合で、情報を電界結合とすることにより、

送受電ユニットをコンパクトにまとめた伝送法が実現している[11]。電力を送る磁界結合の空芯コイル間に、磁界結合に影響を与えないように形状を工夫したデータ伝送用電極を挿入し、10Wの電力と伝送速度65Mbpsの双方向データの同時伝送を実現している。

## 4. 中距離送電：共鳴送電

### 4. 1 原理

磁界結合では、3.1節で述べたように、コイルとコイルの間隔が離れるほど、磁束漏れによって結合係数 $k$ の値が小さくなり、送電効率が低下する。この問題は、図7に示すLC共振回路の構成によって軽減することができる。外見上、コイルが対向しているように見えるので磁界共鳴送電、あるいは、磁界共振送電と呼ばれる。本書では、共振がLC一体での共振動作であることを考え、単に、共鳴送電と呼ぶ。図の $L_1$ 、 $C_1$ と $L_2$ 、 $C_2$ のそれぞれの値を伝送周波数 $f_0$ で共振するように設定する。すなわち、

$$1/\sqrt{L_1 C_1} = 1/\sqrt{L_2 C_2} = 2\pi f_0 \quad (9)$$

1次、2次回路の固有周波数を、抵抗分 $R_1, 2$ を含めて複素数で表すと次式となる[5]。

$$\hat{f}_i = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{1}{\sqrt{L_i C_i}} + j \frac{R_i}{2L_i} \right) \equiv f_0 + j\alpha_i \quad (i=1, 2) \quad (10)$$

$\alpha_{1,2}$ は銅損や放射損によるエネルギー散逸による周波数の虚数項である。この $f_0$ と $2\alpha_i$ の比で得られる無次元量をQ値と呼ぶ。

$$Q_i \equiv \frac{f_0}{2\alpha_i} = 2\pi f_0 \frac{L_i}{R_i} \quad (11)$$

図7の回路における2つのループに流れる電流をそれぞれ $I_1, I_2$ とすると、キルヒホッフの電圧則により、共振状態での電圧と電流の関係は以下の式で表される。

$$\begin{pmatrix} V_0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_1 & j2\pi f_0 M \\ j2\pi f_0 M & R_L + R_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \end{pmatrix} \quad (12)$$

これより、電流について整理すると、行列の逆行列の演算から、次式の形に整理できる。

$$\begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \end{pmatrix} = \frac{V_0}{R_1(R_L + R_2) + (2\pi f_0 M)^2} \begin{pmatrix} R_L + R_2 \\ -j2\pi f_0 M \end{pmatrix} \quad (13)$$

共振条件において、1次側の電力を $V_0 I_1$ 、2次側の負荷抵抗が受け取る電力は $R_L |I_2|^2$ であるので、効率 $\eta$ は、式(11), (13)より、以下で求められる。

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{R_L |I_2|^2}{V_0 I_1} = \frac{4\pi^2 f_0^2 M^2 R_L}{\{R_1(R_L + R_2) + (2\pi f_0 M)^2\}(R_L + R_2)} \\ &= \frac{1}{\left\{ \frac{1}{k^2 Q_1 Q_2} (r+1) + 1 \right\} \left( 1 + \frac{1}{r} \right)} \quad (r \equiv R_L / R_2) \end{aligned} \quad (14)$$

効率を最大にする最適なインピーダンス比  $r_{opt}$  は、 $\partial\eta/\partial r=0$  より、次式で定まる。

$$r_{opt} = \sqrt{1+k^2Q_1Q_2} \quad (15)$$

この時、最大効率  $\eta_{max}$  は次式となる。

$$\eta_{max} = \frac{k^2Q_1Q_2}{\left(1 + \sqrt{1+k^2Q_1Q_2}\right)^2} \quad (16)$$

上式より、伝送効率は、回路の指標関数（Figure of Merit）と呼ばれる  $k\sqrt{Q_1Q_2}$  によって定められることが分かる。コイル間の距離が離れて  $k$  の値が小さくなくても、 $Q$  の値を大きくできれば、効率を上げられることが分かる。周波数を定め、共振回路を適切に設計すれば、 $Q=1000$  程度を実現できる。その場合、たとえば、 $k=0.01$  といったギャップが大きい場合でも、効率を 80%程度にまで高めることができる。共鳴送電では、このようにして、間隔：数 m でのワイヤレス給電が行われている。具体的な  $Q$  値の定め方やより詳細な理論解析等については文献[5]を参照してほしい。ここでは、図7の直列共振の形（コイルとコンデンサが直列に配置）で原理を学んだが、並列共振でも同様に原理の説明ができる（ただし、回路解析がやや複雑）。マイクロ波回路の教科書等で学んでいるように、高い  $Q$  値では、共振特性が急峻になって、共振できる周波数帯域が狭くなる。実際の装置製作においては、周波数調整などに注意を払う必要がある。

ここでは、本給電方式を、二つの LC 共振回路の共鳴結合と説明したが、高  $Q$  値コイルによる電磁誘導という解釈も成り立つ。原理そのものは、マイクロ波回路技術の黎明期にあったと言える。

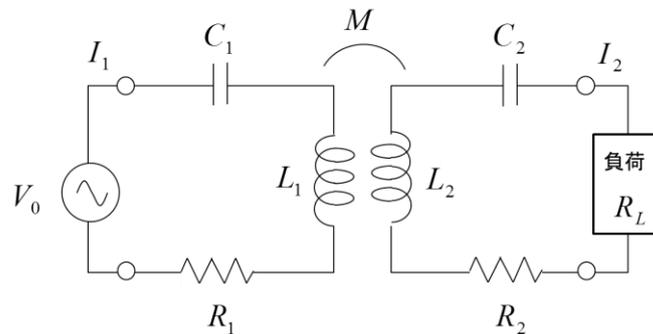


図7 共鳴結合回路（直列共振の例）

#### 4. 2 伝送の実際

ここでは、共鳴給電の先駆的役割を果たした MIT グループの構成を例として述べる。図8は共鳴給電の基本構成である。同図の回路（ただし図7は直列共振であるが、図8の構成は並列共振）におけるコンデンサの働きは、巻き線間の静電容量（浮遊容量）を利用するため、回路素子としてのコンデンサを付加させなくてもよい。原理的に、 $Q=1000$  の場合、間隔がコイル直系と同程度で、送電効率は 90%以上、2倍で 70%程度になる。送電距離を長くしたい場合には、コイルの直径を大きくしなければならない。

高い  $Q$  値のコイルを用いる場合、前述のとおり動作周波数帯域が狭くなり、インピーダンス整合など安定な動作を得るための工夫が必要になる。MIT グループでは、同図に示すように、送電用共振コイルの入力側に励振コイルを、受電用共振コイルの出力側にピックアップコイルを置いて、共振コイルから見た電源や負荷のインピーダンスを柔軟に整合させる工夫を行っている。周波数 10MHz、コイル直径 60 cm、伝送距離 2m において、効率 40%で、60W の電球を点灯させている[7]。

MIT グループの実証実験（デモンストレーション）が契機となって研究開発が進み、様々な改良提案や応用提案が行われている[8]。この方式では、磁界結合や電界結合のように送受電のユニットの厳密な位置

合わせが必要でなく、コイルの向きを対向しなくてもよいことが特長になっている。電磁誘導による磁界結合では1cm程度以下の短距離給電であったためその応用が限られていたが、この方式によって給電距離を数m程度まで拡大することができ、また、電気自動車へのワイヤレス給電などの時代の要請もあって、近年、共鳴給電方式の実用利用に大きな期待が寄せられている。

一方、共鳴送電では、磁界結合などの短距離ワイヤレス給電と違って、送受電装置の10m内の空間に電磁界を漂わせるため、周囲の電波機器との干渉問題や生体への影響など、周波数共用問題や安全への配慮のもとでのシステム設計が求められる。

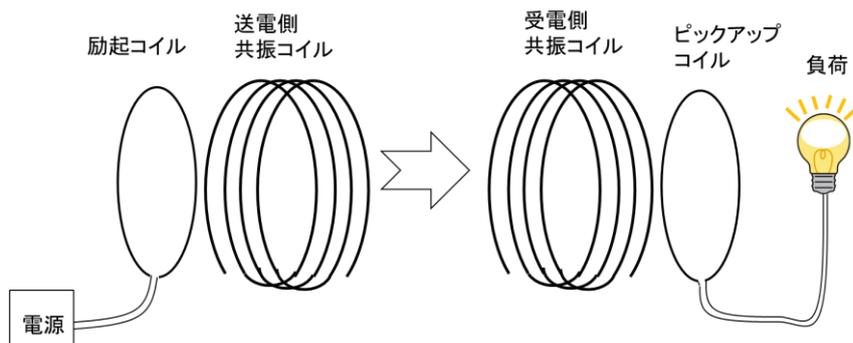


図8 共鳴送電方式の構成例

## 5. 遠距離送電：電磁波方式（電波伝送方式）

### 5.1 原理

電磁波方式は、送受電間にアンテナを対向させ、電波として伝送させる方式であるため、無線通信と同様に遠距離送電が可能である。基本構成は無線通信システムと同じであるが、受信側に電力受信に特化したアンテナ「レクテナ」を用いることが特徴になる。

送電側のアンテナには、通信システムと同様に、開口面アンテナ（パラボラアンテナなど）やアレーアンテナが用いられる。ただし、不要な電力を目的方向以外に放射することを防ぐため、アンテナには低サイドローブであることが求められる。受電側も必要な電力を受け取れる大きさのアンテナが用いられることは通信と共通である。受信電力の算定もフリスの伝達公式に従うが、アンテナ利得を用いた表現よりは、実効面積を用いた次式の表現が便利である。

$$P_r = \frac{A_t A_r}{\lambda^2 d^2} P_t \quad (17)$$

ここで、 $P_t$ ,  $P_r$ は送・受信電力、 $A_t$ ,  $A_r$ は送・受信のアンテナの実効面積、 $\lambda$ は電波の波長、 $d$ は送電距離である。

貴重なエネルギーを無駄にしないためにも、また、不要なエリアに電波干渉問題を生じさせないためにも、送信アンテナの利得設計には、ビーム幅が受信エリアを照射するように定めるのが理想である。この条件を満たす送電アンテナ面積として、電力が無駄なく伝送されるためには、(17)式で  $P_r \sim P_t$  であることが望まれるので、極めて大雑把ではあるが、送電アンテナの理想的サイズは、同式より、 $A_t \sim (\lambda d)^2 / A_r$  と算定される。実効面積と実アンテナ面積は異なり、かつ、円形、あるいは正方形のような対称形状のアンテナに対してであるので、あくまで、目安値と理解してほしい。

フリスの伝達公式は、放射電波が平面波として受信点に到達する遠方放射界を対象としているが、それ

よりももう少し近い距離で送受信アンテナを対向させる場合には、伝送効率に関して、次の近似式がある[5]。

$$\eta \approx 1 - \exp\left(-\frac{A_t A_r}{\lambda^2 d^2}\right) \quad (18)$$

上式は、 $d$ が十分大きいところで、フリスの公式に一致し、 $d$ が小さいところで1に近づく。(ただし、後者の場合は、 $A_t \leq A_r$ が前提になるので注意)。

受信側では、電力を受け取るアンテナ「レクテナ」が用いられる(詳細は次節)。単一受信アンテナの場合は、受信の後、整流回路により電力を取り出すので、アンテナそのものは通信用のものと変わらない。アレーアンテナで受信する場合は、素子アンテナ毎に整流して電力を取出し、それを合成する。そのため、受信アンテナの実効アンテナ面積  $A_r$  は、素子毎の実効アンテナ面積  $A_{r,m}$  ( $m=1, 2, \dots, M$ ;  $M$ は素子数)の合成になる。

$$A_r = \sum_{m=1}^M A_{r,m} \approx M A_{r,0} \quad (19)$$

ここで、 $A_{r,0}$ は、素子アンテナの利得が同じ場合の素子アンテナの実効面積である。

通信信号をアレーアンテナで受信する場合には、素子毎の受信信号を同相で合成して信号対雑音電力比(SN比)を高めることをするが、レクテナでは、電力合成であるので、位相制御の概念がない。そのため、通信用アンテナはアンテナ開口面(あるいは受信アンテナ利得)によって決まる鋭いアンテナ指向性をもつものに対して、レクテナのアンテナパターンは広いビーム幅を有する素子アンテナのパターンになる。広い指向性で受信できるため、大規模アレーの場合でもビーム方向調整が緩和され、この点が大きなメリットである。

## 5. 2 レクテナ

レクテナは、アンテナ素子で受信した高周波信号を、整流回路を介して電力として取り出すアンテナである。単一素子でも、アレー構成でも、「アンテナ+整流回路」の機能は変わらないが、アレーの場合には、もう一段、電力合成の機能が加わる。図9はアレー型レクテナの基本構成である。アンテナ素子は電波を受信するためあるので、素子のタイプや配列の方法は、通信システムで用いられているものと変わりはない。電力伝送は搬送波かそれに近い狭帯域信号なので、通信に求められる広帯域アンテナである必要はない。前述のとおり、レクテナの指向性パターンは素子アンテナの指向性パターンになるので、ビーム方向調整が簡単になる。

レクテナの性能、すなわち電力抽出効率を上げるためには、電波信号を直流電力に変換する整流回路も重要である。整流回路には半波整流と全波整流がある。電力伝送では、受信信号のエネルギーを効率よく取り出すために全波整流が行われる。全波整流は、電子回路の教科書で学ぶように4つのダイオードをブリッジ構成にするのが基本であるが、一つのダイオードと1/4波長線路で構成する方式もレクテナの提唱者であるブラウンによって提案されている[5]。アレー型レクテナでは、素子毎に取り出した直流電力の合成が必要になるが、具体的な回路構成については、電源回路の専門書で学んでほしい。

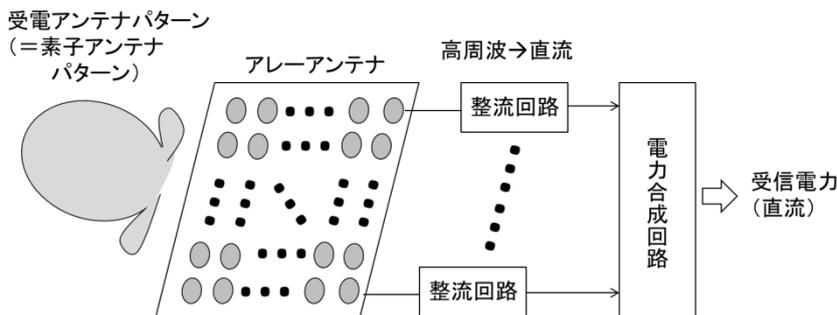


図9 レクテナの基本構成 (アレー受信型)

### 5.3 伝送の実際

遠距離電力伝送は、宇宙太陽光発電 (SPS) への応用が当初の研究開発を牽引した。この応用では、地上の発電所規模の電力 (例えば、1GW (百万 kW)) を、36,000km も離れた静止衛星軌道上から送ることになるので、衛星も受電設備も極めて大規模なものになる。人体への安全性の観点から、受電エリアでの許容電力密度の基準値が  $10\text{W/m}^2$  と定められている。1GW を受電する場合には、最低でも、 $10^8\text{m}^2$  (10km 四方) のエリアが必要になる。送電アレーアンテナのサイズも前述した  $A_r \approx (\lambda d)^2 / A_r$  で概算すると、周波数 2.54GHz に対して、 $2 \times 10^5\text{m}^2$  (約 500m 四方) となる。実際には、様々な効率低下 (アンテナ効率、電力変換効率など) を考慮し、これより大きなサイズになる。NASA/DoE モデルでは、送電用アンテナアレーのサイズを直径 1km で設計している。

SPS は、国家的な規模の構想のため、まだ、実現の目途は立っていない。そのため、当面の具体的な応用は、地上の飛行体 (飛行船・ドローン・航空機) や移動体への給電を想定した検討が進められている。地上 50m にある無人飛行船に取り付けた直径 3m サイズのレクテナに、10kW の電力 (周波数 2.54GHz) を送り、5kW の直流電力確保の実験例が報告されている [12]。距離：数m 範囲の規模では、共鳴型ワイヤレス電力伝送が適しており、10m 以上の遠距離電力伝送に活路が求められている。

ここでは、電磁放射による電波伝送型電力伝送の例を示したが、レクテナ自身は、空間に置くことによって、周囲に漂っている電磁界を受け止めることができるので、エネルギーハーベスティングの手段としても活用が期待されている。

#### 本資料のまとめ

- ① 無線送電は、マルコーニの無線通信実験開始と同時代 (1890 年代) に、テスラによって、歴史の第一歩が踏み出された。その後、SPS 応用の長距離・大規模伝送から、ミリメートル～メートル単位のワイヤレス給電へと技術が進んできている。
- ② 伝送方式には、短距離送電技術として磁界結合方式と電界結合方式が、中距離送電技術として共鳴結合方式が、遠距離送電技術として、電磁波方式 (電波伝送方式) がある。短距離送電と中距離送電では、非放射の電磁界を利用する。遠距離送電では、送受信にアンテナを用いて放射電磁界を利用する。
- ③ 1cm 以内の短距離送電では、小型家電製品や携帯端末への給電に実用化されている。メートル単位の共鳴結合方式は、電気自動車への充電など、近未来への応用に期待が高まっている。
- ④ 電磁波方式 (電波伝送方式) の受信アンテナには、整流回路を備えたレクテナが用いられる。アレー構成のレクテナでは、そのアンテナの指向性は、ビーム幅の広い素子アンテナの指向性になり、電力捕捉のためのポインティングが容易になる。

## 参考文献

- 1) N. Tesla, "The transmission of electric energy without wires," the 30<sup>th</sup> Anniversary Number of the Electrical World & Engineer, March, 1904.
- 2) マーガレット・チェニー (鈴木豊雄訳)、テスラ 発明王エジソンを越えた偉才、工作舎、1997。 (コラムで引用しているテスラの紹介文は、訳本の表紙カバーより)
- 3) W. C. Brown, "The history of power transmission by radio waves," IEEE Trans. Microwave Theory and Technol., vol. MTT-32, no. 9, pp. 1230-1242, 1984.
- 4) H. Matsumoto, "Research on solar power station and microwave power transmission in Japan," IEEE Microwave Mag., pp. 36-45, Dec. 2002.
- 5) 篠原真毅、小柴公也、ワイヤレス給電技術、科学情報出版、2013.
- 6) 松木英敏、高橋俊輔、ワイヤレス給電技術がわかる本、オーム社、2011.
- 7) A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J.D. Joannopoulos, P. Fisher, and M. Soljacic, "Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonators," Science Magazine, no. 317, pp. 83-86, 2007.
- 8) 篠原真毅 (監修)、電界磁界結合型ワイヤレス給電技術、科学情報出版、2014.
- 9) ワイヤレス給電技術の実際、グリーン・エレクトロニクス, no. 6, CQ 出版, pp. 52-68, 2011.
- 10) 1m 先を狙え！共鳴式ワイヤレス電力伝送の実験、グリーン・エレクトロニクス, no. 17, CQ 出版, p. 28-45, 2014.
- 11) 小玉彰広、山中拓也、高崎和之、唐沢 好男, "電力と双方向のデータを同時に伝送する近距離ワイヤレスシステムの伝送特性評価とその応用," 信学論(B), vol. J100, no.1, pp. 11-20, Jan. 2017.
- 12) 藤野義之、藤田正晴、賀谷信幸、恩田昌彦、富田一正, "高効率レクテナの開発と無人飛行船滞空実験への応用," 通信総合研究所季報, vol. 44, no. 3, pp. 139-160, 1998.