

省エネルギーのための電子技術専門誌

トランジスタ技術 増刊
SPECIAL

グリーン・ エレクトロニクス

Green Electronics

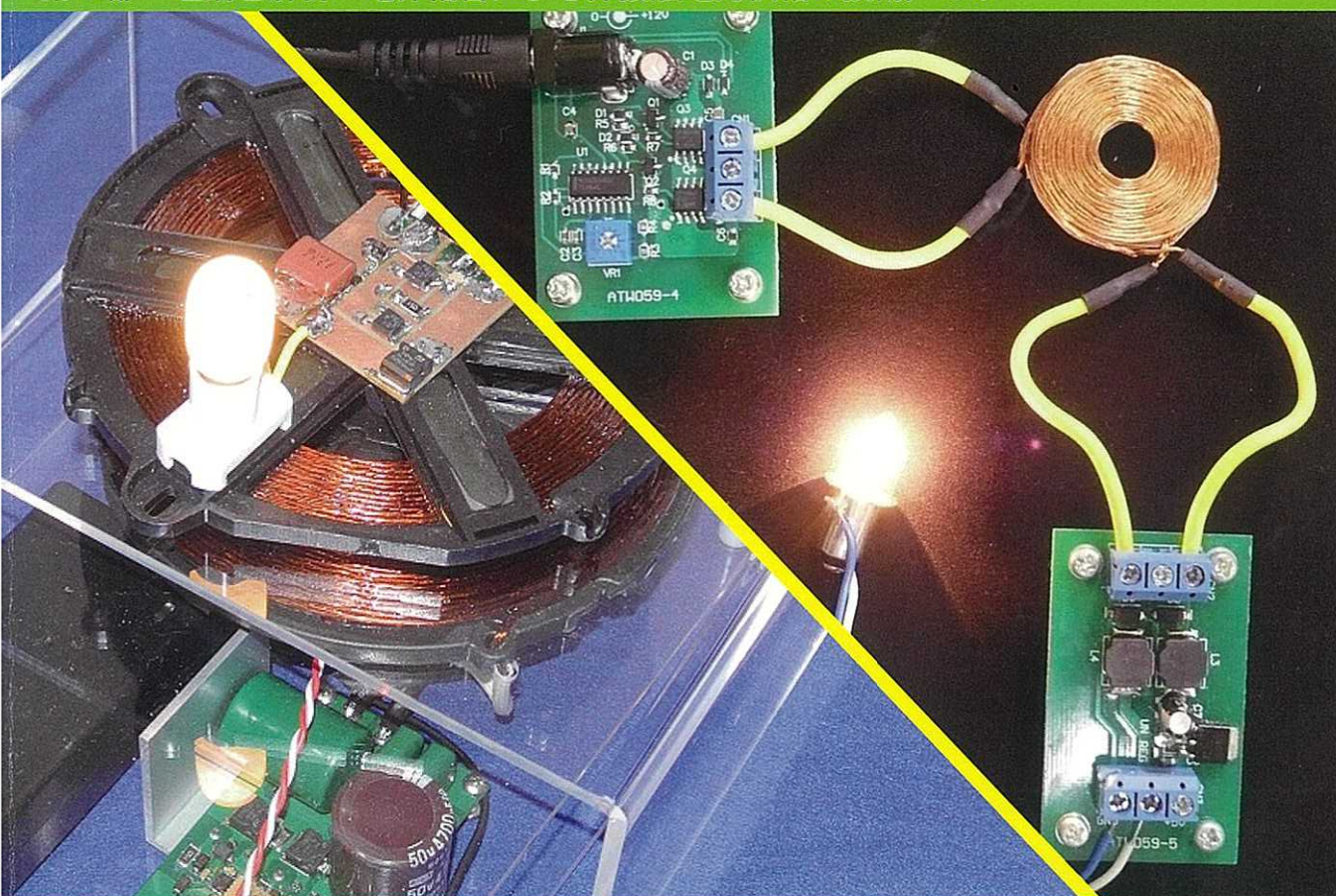
No.
19

水にも埃にも強い手ぶらコードレス電源の作り方

キットで体験! 時代はIoT! 最後のケーブルをなくせ
CとLと非接触パワー伝送の実験

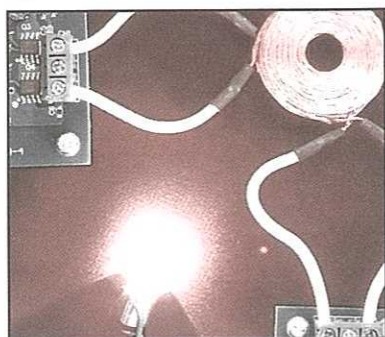
特集

- 第1部 製作と実験…実験キットで学ぶワイヤレス給電の基礎, ほか
第2部 理論と解析…電界結合による非接触電力供給の技術, ほか



CQ出版社

第2章



電磁気学のおさらいから始める

プリント基板コイルを使った ワイヤレス給電

高橋 俊輔
Shunsuke Takahashi

近年、電動車両やモバイル機器に搭載されるバッテリーへの充電方式として、接続コードや接続端子などを必要としないワイヤレス給電(非接触給電)が注目を集めています。ワイヤレス給電はAC電源をAC電源のまま繋ぐコンセントではなく、AC電源をDC電源として出力するので一種の充電器と考えられます。

私の勤務する大学では、電動バスを充電する30 kWといった大型のEV用ワイヤレス給電システムと、携帯電話やタブレットなどのモバイル機器を充電するための50 W以下の小型ワイヤレス給電システムを研究しています(写真1)。

EV用ワイヤレス給電システムは細い絶縁線を多数



(a) 電動バス



(b) モバイル機器

写真1 電動バスとモバイル機器へのワイヤレス給電

バス用の30 kW以上の大型とモバイル機器用の50 W以下の小型が研究対象



(a) 車外での接触式充電の操作



(b) 車内でのワイヤレス充電の操作

写真2 電動バスでの充電操作

接触式は運転手が外に出て操作が必要、非接触式は車内で操作

撚り合わせたリッツ線を使ったコイルを、またモバイル機器用のものはバルク・コイルと言われるプリント基板などを使ったコイルを研究対象としています。

本稿ではEV用ワイヤレス給電装置についても触れますが、学生たちが研究しているモバイル機器用のバルク・コイルを主として解説していくことにします。

ワイヤレス給電の利点

● ケーブル・ゼロならではの利点

電動バスにワイヤレス給電装置を搭載した場合、写真2(a)の接触式充電のように運転手が降車することなく、車内で給電操作を行うことが可能となり、充電プラグ抜き差し時間の省略と、雨天時の給電でもプラグに触らないため感電の心配がなく、運転手の労働環境の改善を図ることができます。

モバイル機器にワイヤレス給電装置を搭載した場合、床を這い回るコード類をなくすることが可能となるだけでなく、小型薄型化しているモバイル機器に差し込む接触式充電コネクタの破損といったトラブルもなくなります。

● しかし、課題もある

特有の課題としては、電磁波を扱うため漏洩電磁界による人体あるいは周辺機器への影響が生じる危険性があります。また、ワイヤレス電力伝送を行う空間に金属性の異物が入り込むと、発熱などを引き起こすこともあります。

送受電コイルの位置がずれると伝送電力が小さくなったり、効率が低くなったりします。さらに送受電方式や、周波数、充電制御方式などの標準化を図らないと互換性が低くなり、いつでも、どこでも手軽に充電できるという利便性が失われます。

ワイヤレス給電とは

● 電磁気学の歴史を簡単におさらい

人類が最初に電磁気現象に触れた記録としては、磁気現象は紀元前6世紀ごろにはすでに小アジアのマグネシア地方で磁石が知られています。マグネットという言葉は、この地名から来ています。同じところにギリシャのタレスが、琥珀を羊皮で擦ると物を引き付ける性質をもつことを見つめました。これは摩擦電気(静電気)の発見です。

1600年、英国のギルバートは自著「磁石論」の中で琥珀の力(電気)と磁石の力(磁気)は別物であることを述べています。それ以前は、この2種類の力に明確な区別はされていなかったものを、初めて明確に区別しました。ギルバートは琥珀などに生じる静電気を、

琥珀を表すギリシャ語elektronからelectricsと名付けました。これが電気という言葉の始まりです。

しかしながら、電磁気学としてまとまったものは18世紀末から始まったと言えます。簡単に述べると、フランスでクーロンが電気の間に働く力、磁気の間に働く力をクーロンの法則という形でまとめ(1700年代後半)、アンペールによる電流とその周りにできる磁場との関係を表すアンペールの法則、ビオとサバール両者による電流の周りにできる磁場を計算するビオ・サバールの法則、ドイツのガウスによる電荷と電場の関係を表すガウスの法則などで電気と磁気の相互作用が法則化され、英国のファラデーがそれらの現象を「電場」と「磁場」という「場」の考えかたで統一的に理解しました(1800年代前半)。電場と磁場の関係を図1に示します。

それらを英国のマックスウェルが、マックスウェル方程式という形で数式を使って見事に定式化(1800年代後半)したものが現在の電磁気学です。

● マックスウェル方程式は難しくない？

マックスウェル方程式は、電場の強度 $E(t, x)$ 、磁束密度 $B(t, x)$ 、電束密度 D 、磁場の強度 H 、電荷密度 ρ 、電流密度 j とし、 $\nabla \cdot$ が発散を、 $\nabla \times$ が回転を示すとすると、次のたった四つの式だけで電磁気学のすべてを簡潔に表すことができます。

$$\nabla \cdot B = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\nabla \times E + \frac{\partial B}{\partial t} = 0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\nabla \cdot D = \rho \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\nabla \times H - \frac{\partial D}{\partial t} = j \quad \dots\dots\dots (4)$$

一見理解しづらい式のように思えますが、式(1)は磁束密度の発散量が0、すなわち磁場には源がないという構造を示す磁束保存の式を、式(2)は磁場が時間変化をするとその周りにぐるっと電場が生じるという電磁誘導を示すファラデー・マックスウェルの式を示しています。



図1 電場と磁場の関係
電場と磁場は電荷を介して切っても切れない関係

また、式(3)は電束密度が源から出て周囲へ発散する量は電荷密度と同じである。すなわち電場の源は電荷であるというガウス-マクスウェルの式を、式(4)は電流と時間変化する電場の周りにぐるっと磁場が生じるというアンペール-マクスウェルの式を示しています。

このように発散と回転の意味を捉えてマクスウェルの方程式を考えてみると、単純でわかりやすい式であることがわかってもらえたと思います。

また E 、 B 、 D 、 H はそれぞれ、

$$D = \epsilon E \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$B = \mu H \quad \dots\dots\dots (6)$$

の関係にあり、 ϵ はその媒質の誘電率、 μ は透磁率で、真空中ではそれぞれ真空の誘電率 ϵ_0 および透磁率 μ_0 となります。 ρ と j の間には以下の電気量保存則が成り立ちます。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot j = 0 \quad \dots\dots\dots (7)$$

● 電磁波の伝わりかた

電磁界の発生源から誘導される電界、磁界の空間分布は、正弦振動による電磁界の時間的変動を基本として考えられ、マクスウェルの方程式の式(4)、アンペール-マクスウェルの式に示されるように、電界の振動によってそれに直交した方向の誘導磁界が生じ、その誘導磁界の振動によって磁界に直角方向に新たな誘導電界の振動が生じる、ということを繰り返す、電界→磁界→電界で波長を形成します。誘導電界、誘導磁界の強度が十分で、この電界→磁界の繰り返しが遠くまで続いていくものが、電波あるいは電磁波と呼ばれるものです(図2)。

電界からどの程度の大きさの磁界が誘導されるかは媒質の性質で決まりますが、それは電界と磁界の大き

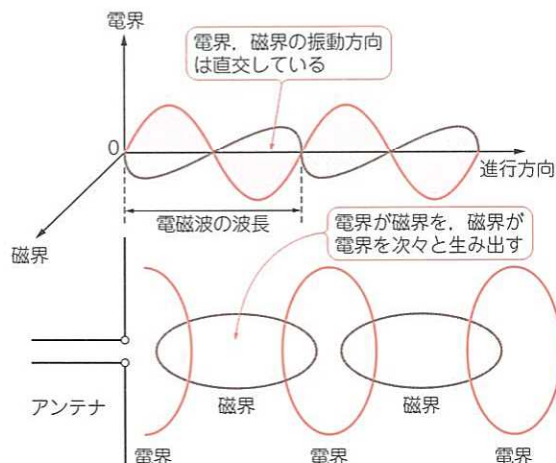


図2 電界と磁界の関係
電界の変化が磁界を、磁界の変化が電界を生み出す

さの比 E/H で表されます。

$$Z_0 = \frac{E}{H} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad \dots\dots\dots (8)$$

これは電気回路における電圧と電流の比 V/A という電気インピーダンスの定義と等価になり、特性インピーダンス Z_0 と呼ばれ、物理的次元および単位はインピーダンスに一致し、単位はオーム(Ω)です。真空の場合は、光速を C として、

$$\text{真空の透磁率 } \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ [H/m]}$$

$$\text{真空の誘電率 } \epsilon_0 = 1/(\mu_0 C^2) = 10^7/4\pi C^2 \\ = 8.85 \times 10^{-12} \text{ [F/m]}$$

ですので、

$$Z_0 = 4\pi C \times 10^{-7} \approx 120\pi \approx 376.7 \text{ } [\Omega] \quad \dots\dots\dots (9)$$

となり、自由空間インピーダンスと呼ばれます。

● 近傍界と遠方界

時間的に変動する電界あるいは磁界が存在する場合、それに伴う誘導界が生じますが、その空間分布は数波長を超えるまでは球面波であり、発生源である電界や磁界の性質の影響を受けます。

図3に示すように、これらの空間領域を近傍界と呼び、電磁エネルギーが貯蔵されているだけで外に向かっているエネルギーの流れがないので、非放射域とも言います。この領域はエネルギーが貯まっているだけなので、エネルギーを取り出すためにはコイルを置くだけではだめで、繰り返すく取り取るポンプ操作の働きをする周波数が重要となります。

一方、近傍界の外側は遠方界と呼ばれ、自由空間インピーダンスは式(9)の 376.7Ω に一定で、平面波となり、電磁波によってエネルギーが自然に運ばれる領域で放射域とも呼ばれています。この領域はエネルギーが流れているので、エネルギーを取り出すためにはコイルを置くだけでよいのですが、そのままではエネルギーがコイル表面で反射してしまうため、共振回路を使って電磁波に同調させて取り込む必要があります。

両者の境界は電磁波の波長を λ 、距離を D として D/λ は $1/(2\pi)$ となります。

● ワイヤレス給電方式

ワイヤレス給電方式は下記のように分類されます。

- 非放射系
 - 磁界結合方式
 - 電磁誘導方式
 - 磁界共振方式
 - 電界結合方式
- 放射系
 - 無線(マイクロ波)方式
 - レーザ方式
 - 超音波方式

● 電磁誘導方式

これはファラデーが見出した電磁誘導の法則に基づき、インダクタンス結合型として対向させたコイルと磁束収束用の磁性体コアを用いて、送受電コイル間に共通に鎖交する磁束を利用するものです。

基本原理は図4に示すように、一般的にはトランスと呼ばれる変圧器です。1次側コイルに交流電流を流すとコイル周囲に磁界が発生し、1次/2次コイルを鎖交する磁束によって2次側コイルに誘導起電力が発生します。理想的な変圧器の磁束はすべて主磁束で構成され、漏れ磁束がありません。この場合の1次コイルと2次コイルとの結合の度合いを示す結合係数 k は1です。すなわち Φ_2/Φ_1 が k となります。

ワイヤレス給電の場合にも送受電用コイルを鎖交する磁束が伝送の要であり、両コイルの結合度が高いことが望まれます。しかし、大きなギャップによって磁路が切れていて、漏れ磁束があるために、結合係数は1よりもかなり小さくなります。

そこで、電力を効率よく伝達するために、送電側の

印加周波数を高周波にしたり、コイルのインダクタンスにコンデンサを並列もしくは直列に接続した共振回路を最適設計したりすることで、送電側と受電側のコイル間のギャップを拡げています。

● 磁界共振方式

この方式は、2007年に米国Massachusetts Institute of Technology (MIT)の研究チームが、2m離れた距離で60 Wの電力を送ることに成功したことで一躍注目を浴びました。図5はMITが発表したシステムの概要で、送電側と受電側のコイルを高 Q にして電磁的に同じ周波数でLC共振させ、空間に蓄積される磁界エネルギーを通して電力伝送をする磁界共振の技術を活用しています。

送電コイルから放射される磁束を直接受電コイルに鎖交させれば電磁誘導方式となりますが、送電側と受電側のコイルがほとんど鎖交していない結合係数 k が0.01以下となるようコイル間距離を十分に離れた状態で、磁界共振方式は電磁誘導方式とほとんど同じシス

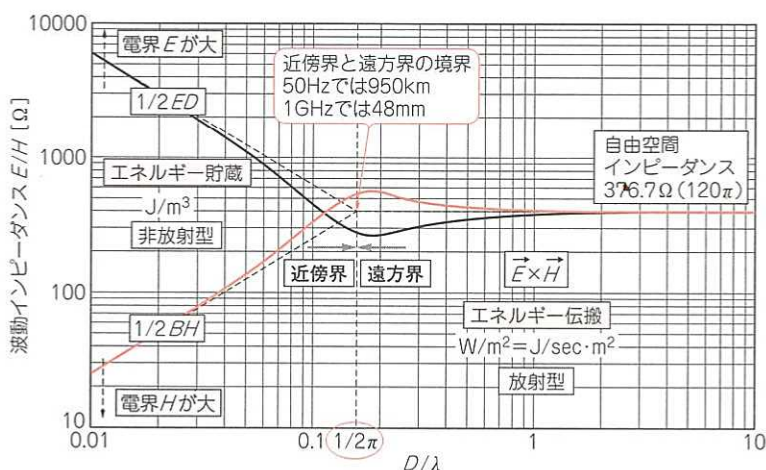


図3 近傍界と遠方界
ワイヤレス給電は非放射系と放射系の
両方のシステムがある

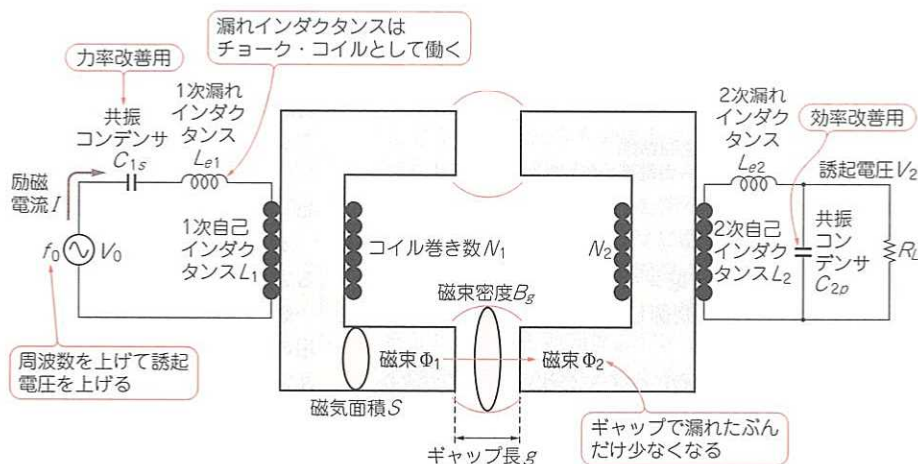


図4 電磁誘導方式の基本原理
基本はトランスだが、漏れ磁束対策で効率を上げるのがミン

図5 MITが発表したシステムの概要
コイル・サイズ、波長、伝送距離のどれが変わっても共鳴が起こらなくなる

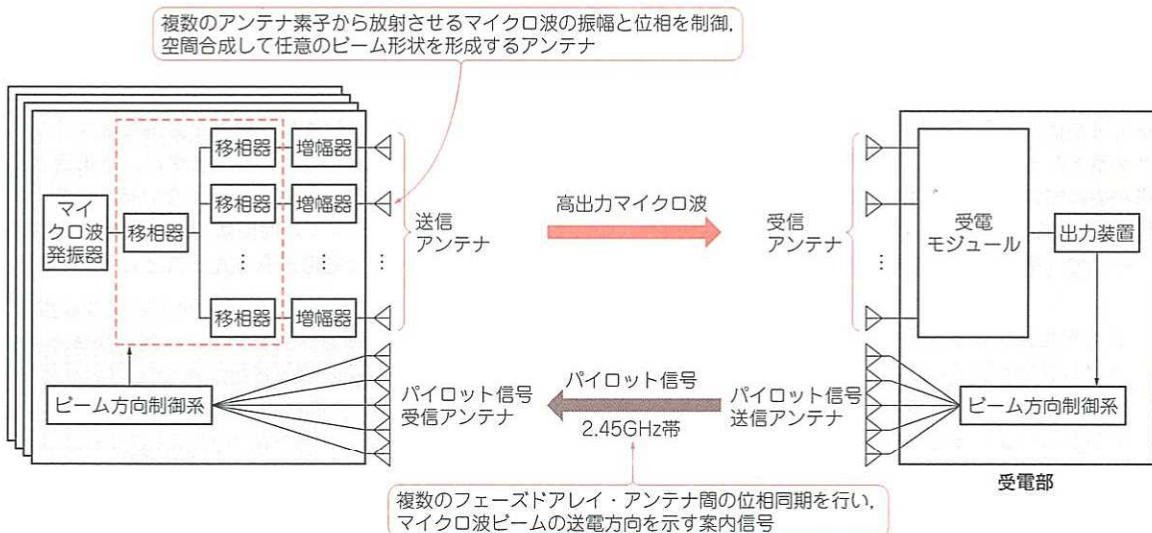
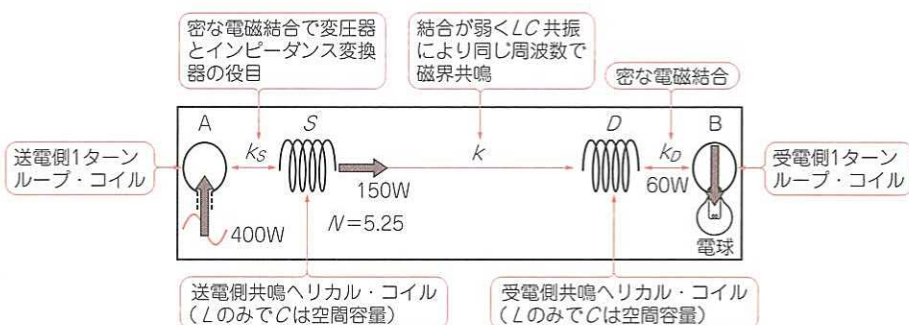


図7 無線方式の概略系統図
マイクロウェーブ通信と基本は同じ

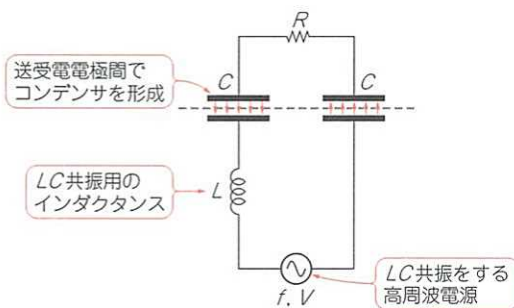


図6 電界結合方式の伝送回路図
コンデンサの極板間に貯まった電界エネルギーで電力伝送

テムを使いながら送受電コイル・サイズと空間波長、空間磁界分布をうまく制御してエネルギーを伝送しています。

伝送量を確保するためにコイル形状、サイズ、波長、伝送距離に一定の制約が生まれ、その制約条件が崩れると共鳴が起こらず、電力伝送ができなくなります。

● 電界結合方式

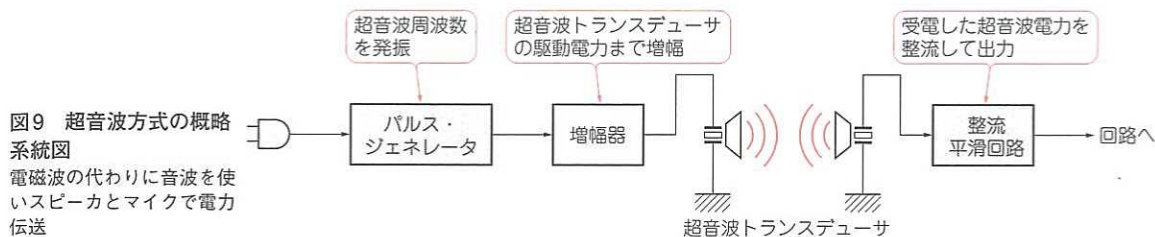
前述のように、送受電側のLC共振器間のインダクタンスの「磁界」エネルギーを媒介にした磁界結合方式の電力伝送が可能であれば、送電側と受電側に設置したキャパシタンス電極間の「電界」のエネルギーを媒介にした電界結合方式もまた成り立ちます。

これはまさにコンデンサであり、極板間の静電容量(接合容量)に変位電流として交流電圧を印加し、静電誘導の作用によってワイヤレスにエネルギー伝送を行うシステムです(図6)。

● 無線(マイクロ波)方式

本来は遠方にまで伝搬する遠方界の電磁波を利用する方式で、2.45 GHzや5.8 GHzの周波数を用いるのが一般的です。マイクロ波の発振源としては電子レンジ用のマグネトロン管が大量に生産されていることから、非常に安価にシステムを構成することができます(図7)。

電波自体は原理的に真空中でも伝搬する性質をもって、どのような遠方にも到達させることができた



め、航空宇宙分野での利用が可能な規模の距離と電力容量でエネルギー伝送が行える反面、電磁波のエネルギーが拡散してしまい伝送効率が上がりません。電磁波による生体への影響など懸念すべき課題もあります。

受電後の直流への整流についても小電力であれば、かなりの高効率を保つことができるため、小電力のワイヤレス給電においてマイクロ波は強力なツールとなると考えられます。EVを含めた大電力のワイヤレス給電系では、逆に受電後の整流の高効率化が課題と言えます。

● レーザ方式

テラHz帯のレーザを送信し、ソーラーセルと同じように半導体で受信し、半導体の光起電力効果を利用して光エネルギーを直接電気に変換して電力伝送する技術です(図8)。

遠方界を利用するレーザ光はビームを形成でき、飛散角が小さく、少ない減衰で長距離にまでエネルギーを伝搬できます。したがって、マイクロ波と同様に宇宙エレベータといった航空宇宙分野を中心に研究が進められてきましたが、近年は近距離の移動体もその対象となり、災害監視用無人飛行機/ドローン、月面探査ローバーや一般のロボットなどへの給電が試みられています。

● 超音波方式

超音波を伝送手段とした電力伝送システムで、図9のように送電部はパルス・ジェネレータ、増幅器、超音波トランスデューサで構成され、送電部から発生した超音波を受電部で受信することで電力を伝送する技術です。

米国のuBeam社が2014年8月に初期プロトタイプ・デバイス開発を行い、20 kHz以上の超音波を利用して伝送可能距離は7 m程度となっています。

磁界結合方式を使った回路

● 回路の基本動作

磁界結合方式の基本回路図を図10に示します。交流電源を直流に変換してインバータに印加します。イ

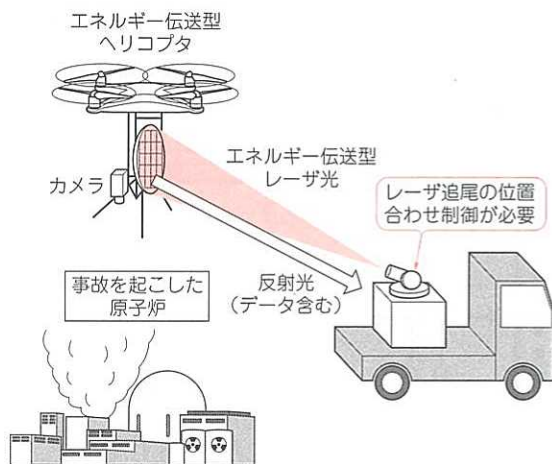


図8 レーザ方式の応用例
太陽光パネルの太陽光をレーザに換えただけ

ンバータは送電コイル L_1 とコンデンサ C_S の値で決まるLC共振周波数 f 、

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_S}} \dots\dots\dots (10)$$

の高周波電流を発生できるようにタイミング制御/ドライバ回路で駆動されます。高周波のインバータ矩形出力は送電コイルと共振用コンデンサに印加され、大きな電氣的振動を発生してコイルの周辺空間を磁界エネルギーで満たします。

そのエネルギーを、同じ共振周波数をもつように設計された受電コイル L_2 とコンデンサ C_P で受け取り、出力の正弦波を整流/平滑して負荷に供します。

ここで、共振回路に挿入されるコンデンサの配置としてよく使われるものとしては、図11の4通りが挙げられます。電源効率改善のために、送電側に直列コンデンサを配置する方式を採用する場合もあり、また送電コイルからエア・ギャップに励磁無効電力を供給するための並列コンデンサを配置する場合もあります。

受電コイルでのコンデンサ配置方法についても、直列コンデンサと並列コンデンサがあります。これらは一概にどちらが良いと言えるものではなく、使用する周波数やコイル、ギャップ、負荷などの条件によって決まります。

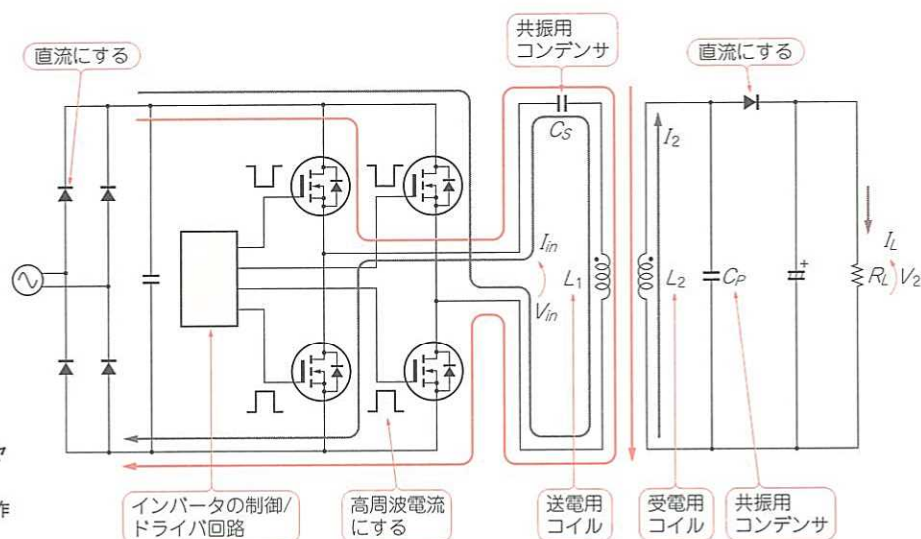


図10 磁界結合型ワイヤレス給電の基本回路
基本回路はACからDCを作るコンバータ回路

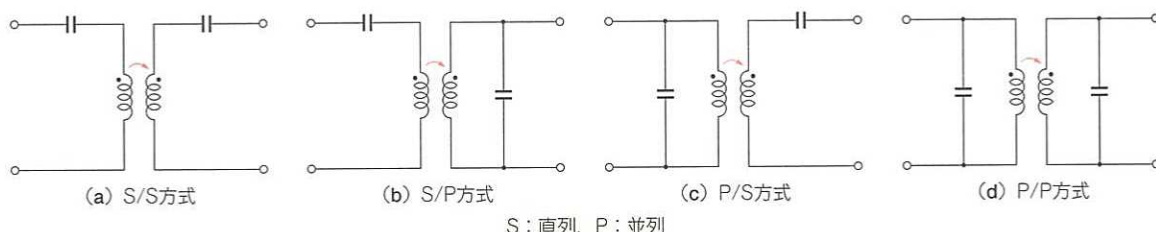


図11 コンデンサの挿入位置
直列と並列のLC共振回路を2組並べたもの

また、コンデンサを直並列に配置することもあるため、図12のようにLTspiceなどの回路シミュレーションを駆使することによって、周波数特性だけでなく過渡特性を含めた最適な方式を設計することが可能ですが、パラメータが多くなると最適解を求めるにはかなりの時間が必要な場合もあります。

■ 結合係数 k と Q 値が 電力伝送の性能を決める

● 結合係数 k はどうやって求める？

回路シミュレーションをする場合には計算条件として相互インダクタンス M を決める必要がありますが、 $M = k \cdot \sqrt{L_1 \cdot L_2}$ であるので、代わりに k 値を入れても同義となります。

コイル間の k 値は、JIS C5321に定められた図13の測定法によって、自己インダクタンス L_{open} と漏れインダクタンス(短絡インダクタンス) L_{SC} を実測して求められます。必要なギャップを離して送受電コイルを設置したうえで、 L_{SC} は送電コイル、または受電コイルを短絡して、他方からLCRメータで実測することにより得られる値です。実測した L_{open} と L_{SC} から

$$k = \sqrt{1 - L_{SC}/L_{open}} \quad \dots\dots\dots (11)$$

の式で結合係数 k が求まります。 k 値は送電側から実測しても受電側から実測しても同じ値になります。

しかし、この方法ではインダクタンスを計測するLCRメータが必要なうえ、まずはコイルを作らないと k 値を決定することができません。そこで、今までに作成したいくつかのコイル・データから k 値を推定するチャートを図14に示します。

k 値はコイル間ギャップだけではなく、コイル・サイズおよびコイル構造に大きく影響されるため、横軸には使いたいコイル間ギャップ g [mm]を、作りたいコイル外径 D [mm]で除した g/D を使うことで無次元化をはかるとともに、コイル構造としては製作しやすい渦巻き型の円形型でコアなしの空芯コイルだけに絞りました。

同じ g/D 値でも、コイルのわずかな構造の違いで k 値はかなりばらつきますが、 g/D 値からおおよその k 値を求めることができます。

● コイルの Q 値を大きくするには

共振回路における共振のピークの鋭さを表す値、 Q (Quality factor) 値は振動の状態を現す無次元数で、式(12)で表されます。

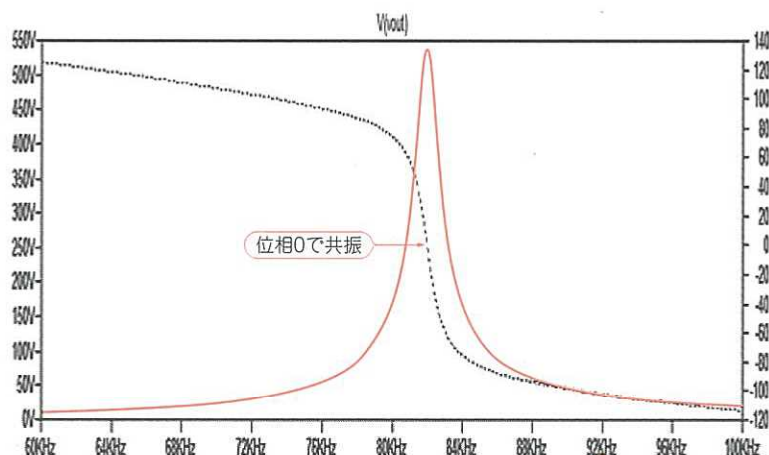
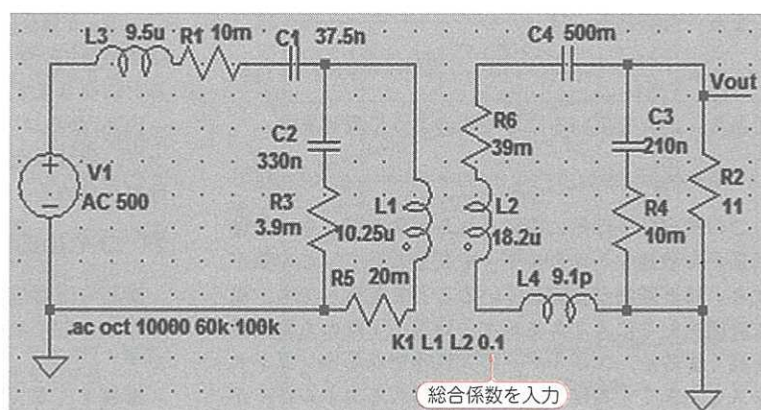


図12 LTspiceによる回路シミュレーション例
構成部品の等価損失などをしっかり把握しないとうまくいかない

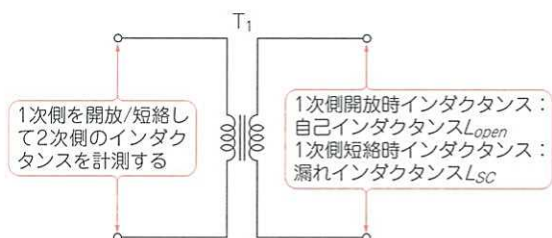


図13 k 値の計測方法(出典: JIS C5321)
自己インダクタンスと漏れインダクタンスの比から求められる

$$Q = \omega_0 / (\omega_2 - \omega_1) \quad (12)$$

ここで、 ω_0 は共振ピークでの共振周波数、 ω_1 は共振ピークの左側において振動エネルギーが共振ピークの半値となる周波数、 ω_2 は共振ピークの右側において振動エネルギーが半値となる周波数で、 $\omega_2 - \omega_1$ は半値幅と呼びます。

インダクタとキャパシタを用いた直列共振回路の場合、 Q 値は、

$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (13)$$

とも表せます。これはインダクタンス L を大きくする

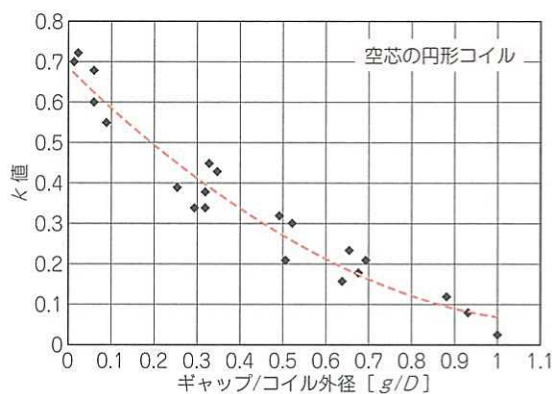


図14 g/D 値と k 値
実際に製作したコイル径と設計ギャップの比と計測 k 値の関係

か、キャパシタンス C を小さくする、あるいはコイルに太い導線を使って損失抵抗 R を小さくする、もしくは等価直列抵抗(ESR)の小さなコンデンサを使うことで Q 値が大きくなることを示しています。しかし、コイル外径寸法に制限がある場合は、線を太くするほどインダクタンスが小さくなるため、両者の兼ね合いが必要です。

また、角振動数 ω は、

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad \dots\dots\dots(14)$$

であり、これを用いることで次のように表せます。

$$Q = \frac{\omega L}{R} \quad \dots\dots\dots(15)$$

この式の分子は系に蓄えられるエネルギーを、分母は系から散逸するエネルギーを表していて、この値が大きいほど振動が安定していることを意味します。単位時間当たりに入るエネルギー回数、すなわち周波数を高くするか、エネルギーの入れ物であるインダクタンスを大きくするほど、系に蓄えられるエネルギーが増加して Q 値が大きくなり、共振系の ESR を小さくするほど、系の損失エネルギーが減少して Q 値が大きくなるのがわかります。

● kQ 積で効率が決まる！

2006年にMITが磁界共鳴式ワイヤレス給電システムの論文の中で、Figure of Merit(FOM)という概念を持ち出してきました。これはコイルの結合係数 k とコイルの Q 値の積 kQ 値が同じならば、コイル間効率は同じであるという考えです。

図15に kQ 値と効率の関係を示します。ここで横軸は kQ 値を2乗した α を採用し、縦軸はコイル間効率を示します。

例えば、 k 値が0.6で Q 値が40の送受電コイルと、 k 値が0.1で Q 値が240の送受電コイルは、ともに α が576で、そのときの効率は同じ92%になるということです。 k 値0.6のコイルは、図14を用いるとコイル外径 D を1[m]としたときにギャップ g は0.08[m]ですので、この g/D は送受電コイルの磁束がしっかりと鎖交する電磁誘導の世界です。

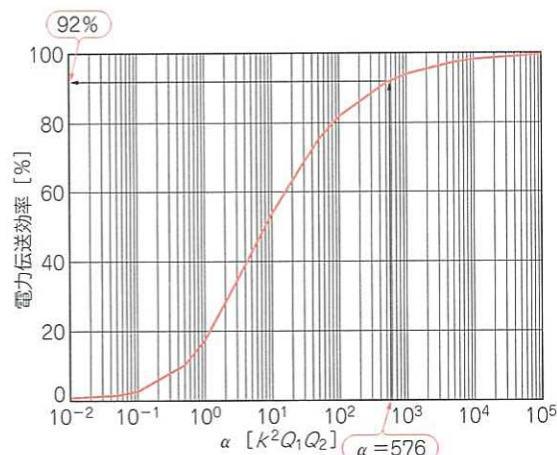


図15 kQ 値と効率の関係
 kQ 値の2乗数値よりコイル間効率が推定できる

一方、 k 値0.1のコイルは D を1[m]としたときに g は0.9[m]となり、この g/D は磁界共鳴の世界ということになります。

FOMからコイル構造、コイル外形、コイル間ギャップ、周波数から目的とするコイルのおおよその伝送効率を求めることができます。

■ コイルのインダクタンスを推定する

空芯の円形コイルを製作するまえに、コイルの構造や寸法からインダクタンスが推定できれば非常に便利です。

導線をぐるぐると巻いたガラ巻きコイル(写真3参照)の場合のインダクタンス L [μ H] を求める式は、

$$\begin{aligned} \text{コイル外半径} &: r \text{ [mm]} \\ \text{コイル内半径} &: r_i \text{ [mm]} \\ \text{コイル幅} &: d = (r - r_i)/2 \text{ [mm]} \\ \text{コイル厚み} &: l \text{ [mm]} \text{ (ガラ巻きの場合は} \approx d \text{と} \\ &\text{考えてよい)} \end{aligned}$$

$$\text{コイル巻き数} : N$$

として、

$$L = \frac{10\pi r^2 N^2}{(6r + 9l + 10d) \times 10^{-3}} \quad \dots\dots\dots(16)$$

です。

蚊取り線香状に平たく単層にぐるぐる巻いた平巻き型コイル(プレーナー・コイル、写真5のマット下の導線を参照)のインダクタンス L [μ H] を求める式は、

$$\begin{aligned} \text{コイル外径} &: D_o \text{ [mm]} \\ \text{コイル線径} &: W \text{ [mm]} \\ \text{コイル間隙} &: S \text{ [mm]} \\ \text{コイル巻き数} &: N \end{aligned}$$

として、

$$A = \frac{D_o - (NW + (N - 1)S)}{2} \quad \dots\dots\dots(17)$$

$$L = \frac{N^2 A^2}{279.4 D_o - 355.6 A} \quad \dots\dots\dots(18)$$

です。

コイル線径や巻きかたの若干の違いで実際の数値は変わりますが、ほぼ近い値が得られます。

■ 磁界の収束および遮蔽

● 高透磁率の材料が有効

コイルの k 値および Q 値を上げるためには、高い周波数まで磁束をよく収束させる高透磁率で飽和磁束密度の大きな材料、一般的にはフェライトをコアとして使用しますが、酸化鉄を主成分に混合焼結したもののため薄く成型できず、厚く重いものになります。

そこで、モバイル機器用ワイヤレス給電システムでは、フェライトは図16のように卓上の送電側コイルの磁束収束用に使われます。集積度が高いモバイル機

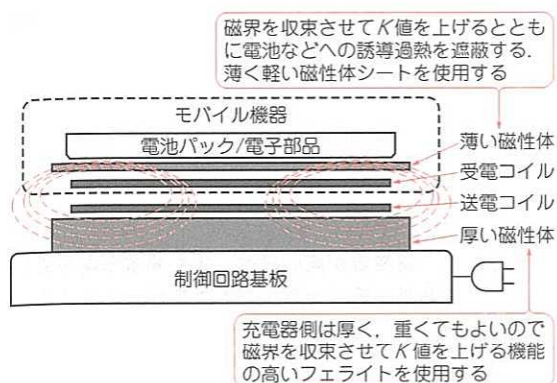


図16 モバイル機器用ワイヤレス給電システムの磁性体
充電器側は主として磁束収束、モバイル側は磁束収束と磁束遮蔽

器側の受電コイルの内蔵場所は電池パックと本体裏の蓋の間あたりが想定され、優れた磁気遮蔽が求められる。

給電コイルから送られてくる高周波の磁束が電池パックや電子部品の金属面に到達すると、渦電流が発生して異常発熱を起こす恐れがあります。受電コイルと電池パックの間に、高透磁率で高飽和磁束密度の磁性体シートを挿入することにより、磁束収束の効果だけでなく優れた磁気遮蔽効果を果たすことができます。

● モバイル用には薄型磁性体シートで対応

モバイル機器部品への磁束遮蔽用薄型磁性体シートとして、Fe系アモルファスを材料とした日立金属のファインメット（厚み120 μ m）および、戸田工業のフレキシブル・フェライト・シート（厚み98 μ m）を空芯コイルと組み合わせて使用しました。アルミニウム板（厚さ1mm）でも遮蔽ができるので対象に入れてみました。基準とするための4mm厚のフェライトおよび、まったく磁性体を付けない空芯コイルを含む計五つのケースで、周波数に対するQ値を実験計測した結果を図17に示します。

やはりフェライトはQ値が高く、送電コイルに使うことで伝送性能を向上できます。アルミニウム板では遮蔽効果はありますが、空芯コイルのQ値を大幅に下げるので使うことができないことがわかります。ファインメットは125kHz以上では空芯コイルのQ値を下げる現象が見られました。フレキシブル・フェライト・シートは4mm厚フェライトまではいかないものの非常に高いQ値にできることがわかり、受電コイルに使うことで良好な伝送性能が得られます。

磁界分布は電磁界解析ソフトウェアを使ってシミュレーション解析することもできます。ただ、J-MAGなどの高価なソフトウェアを使えば容易ですが、Sonnet

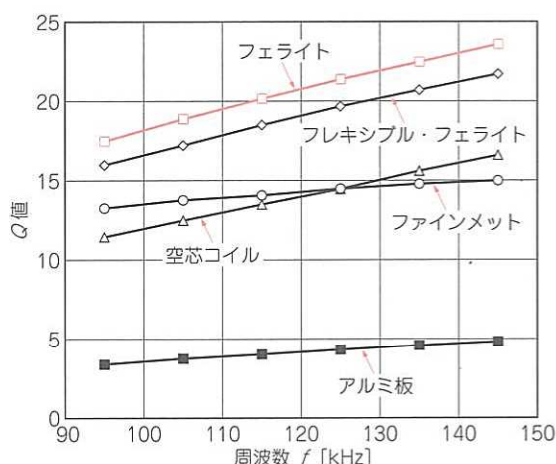


図17 薄型磁性体シートのQ値

Liteなどの簡易シミュレータでは低い周波数では広い空間のメッシュが切れず、なかなか難しいものがあります。

簡単な回路で作れる

磁界結合型のワイヤレス給電システムは面倒な技術ではなく、図10のようなフルブリッジのインバータを使わなくても、小電力で効率を考えなければ、図18に示すような日本テクモ(<http://www.n-tecmo.co.jp/>)が販売するスイッチング方式の小型ワイヤレス給電キットなどを使うことで簡単に実験ができます。

■ 送電回路

IC₁(PWM制御用IC TL494)は送電側の共振回路に加える高周波信号を作っていて、その周波数を決めるのがVR₂です。周波数設定が容易にできるようにVR₂を抵抗で分割しています。

VR₁は共振回路に加えるパルス電流のパルス幅を決めるもので、最大(右回し極限)で約50%(IC₁の13ピンにV_{ref}を加えてプッシュプル・モードに設定して、その片側を使用しているのが正確には45%が最大)です。左へ回すとパルス幅が狭くなり、最小(左回し極限)ではパルスがなくなります。共振回路に加える電力を調整するために設けていますが、できるだけ遠くまで電磁波を飛ばすことが目的なので、最大の50%で使っています。

この基板は実験用のパルス発生器として、いろいろな回路実験に使用できます。送電コイルを抵抗に置き換えると、TP₅とGND間に電圧パルスを出力できるパルス発生器として使用でき、VR₂を変えることによって周波数が、VR₁を変えることによってパルス幅が可変できます。

コラム 表皮効果と近接効果とは？

周波数が高くなるにつれて、導線を通る電流は導体の表面に集まろうとする表皮効果が現れます。導体内部の高周波電流は表面からの距離が増すと指数関数的に減少し、その割合は $1/e$ です。電流が導体表面に集まって導体の中心部に電流が流れないと、導体の有効断面積が小さくなって導体抵抗が増加して損失となり、高周波になるほどその傾向は強まります(図A)。導体表面の電流振幅に対して、電流振幅が $1/e$ になる距離を表皮の厚さ(深さ) δ とすると、

$$\delta = \sqrt{2/(\omega\mu\sigma)} \quad \dots\dots\dots (19)$$

また、表面抵抗 R_s は、

$$R_s = \sqrt{\omega\mu/2\sigma} \quad \dots\dots\dots (20)$$

で表されます。ここで ω は角周波数($2\pi f$)、 μ は導体の透磁率、 σ は導体の導電率、 f は周波数[Hz]です。そこで、真空中での透磁率を $4\pi \times 10^{-7}$ H/m、

銅の導電率を 5.8×10^7 S/mとすると、式(19)は δ [m] = $0.066/\sqrt{f}$ となります。この式から、50 Hzでは $\delta = 9$ mmですが、85 kHzでは $\delta = 0.2$ mmとなります。

すなわち、周波数が高いほど、また導電率が小さいほど表皮効果が強くなり、コイル抵抗が大きくなるということです。コイル抵抗が増大するのを防ぐため、径を細くした素線を絶縁して多数撚り合わせ、導体の表面積を増やしたリッツ線を使用します。

また、並行して走る導線の電流は互いの導線が近づくほど、同方向の場合は排斥しあって互いの外周表面付近に、また逆方向の場合は引き合って互いの内周表面にしか流れなくなる近接効果が発生します。これを防ぐには、撚りかたに工夫をして近接効果低減を謳ったリッツ線を使用すると効果があります。



図A 導体断面における表皮効果と近接効果(電流密度分布)
表皮効果は周波数が高いほど、近接効果は導線間距離が狭いほど現れる

基板のパターン変更が必要ですが、IC₁の13ピンを0Vにしてシングルエンド・モードにすれば、0~90%可変とすることも可能です。0~90%可変とし、パルス幅を最大の90%とした場合には、コイルへの印加電力はさらに大きくなると考えがちですが、実験をしてみるとわかるように、きれいな正弦波が得られず、50%が伝送電力最大となります。

電圧の高いACアダプタあるいは他のDC電源を使用できるようにツェナー・ダイオードZD₁でIC電源を7.5Vにしているので、他の回路の電源と共通に使うこともできます。また、逆流防止ダイオードD₁を装備しているため、電源を逆接続しても回路が壊れないようになっています。

IC₁の8ピンと11ピンにはドライブ用の矩形波が交互に出ていて、その信号を使って2個のLEDを電源表示を兼ねて光らせています。

IC₁の8ピンからの出力をMOSFETの2SK2409のゲート・ドライブ回路であるTr₁のベース回路に入力します。Tr₁はベースに電流制限用、ベース-エミッタ間に電圧安定用の抵抗をあらかじめ接続したデジタル・トランジスタと呼ばれるもので、電流の吐き出し用途のPNP型を使用しています。通常のトランジスタにベース抵抗とベース-エミッタ間抵抗を挿入したものを使用してもかまいません。

MOSFETのゲート・ドライブはTr₁のみでも駆動はできますが、MOSFETがOFFした際にゲート電圧を迅速に下げることができません。そこで、ゲート電圧を急速に下げするためにTr₂を設けています。これでもMOSFETのゲート・ドライブがやや不十分(TP₃の波形が悪いと、ゲート電圧OFFが遅れる)なため、波形が気になる場合はTP₁とTP₃との間に1kΩを入れると改善されます。

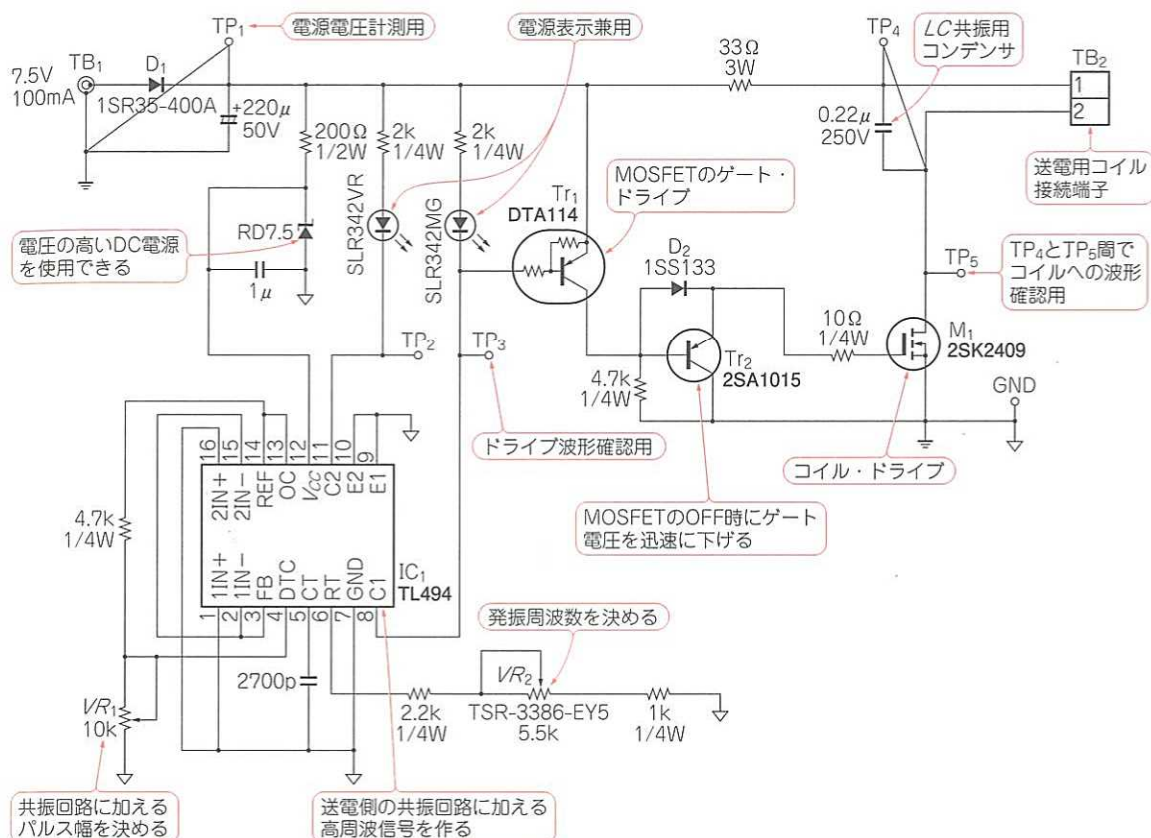


図18 小型ワイヤレス給電システムの送電部回路*1
FETのスイッチングだけでワイヤレス給電の電源部はできる

● テスト・ポイントの作動状況

- ▶ TP₁ : 電源電圧計測用
- ▶ TP₂, TP₃ : IC₁ の 8 ピンと 11 ピンにドライブ用の矩形波が交互に出ているのをオシロスコープで観測できる。
- ▶ TP₄, TP₅ : コイルへの印加波形をオシロスコープで観測できる。

GNDとTP₄あるいはTP₅間の波形は、矩形波に正弦波が重畳したような形に観測されます。

■ 受電側回路

最も簡単な受電側回路を図19に示します。受電側の共振回路も、送電側のLC共振周波数と同じになるようにコイル L_2 とコンデンサ C_6 の値を決めます。

この共振回路の出力は高周波電流なので、例えばLEDを点灯させるのであれば、ダイオードで整流して

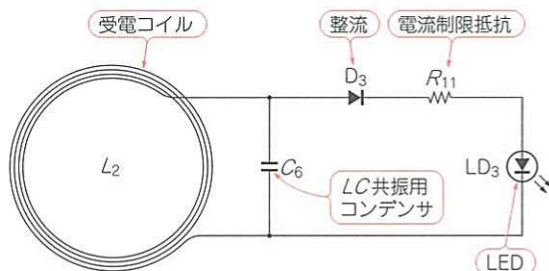


図19 受電側回路の一例
LC共振器の出力を整流するだけ

電流制限抵抗を通してLEDを接続するだけです。負荷や使いかたに応じて全波整流をしたり、FETのようなアクティブ素子を使って整流することもできます。

アイデア次第でこんなことも！

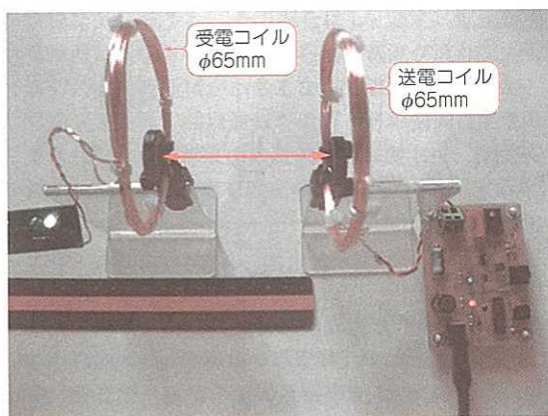
■ 単線、リッツ線を使ったコイルの例

図18と図19の送受電部を使い、コイルにマグネット・ワイヤやリッツ線を使った、いろいろなワイヤレス給電の応用例をいくつか示してみます。

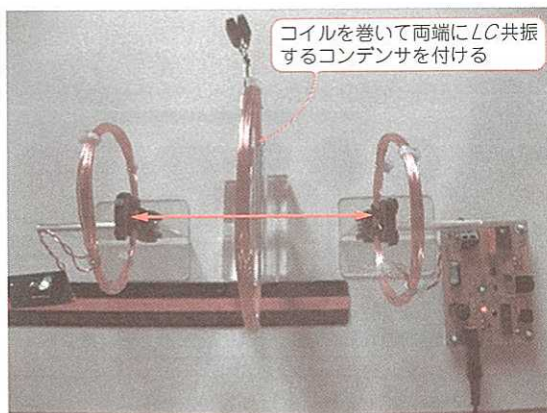
*1：有限会社 日本テクモ(代表取締役社長 片岡 義範)
〒805-0023 福岡県北九州市八幡東区宮の町2-15-16
TEL 093-651-3648, FAX 093-651-6057
MAIL info9@n-tecmo.co.jp

写真3は送受電コイルに単線のポリウレタン電線を使って、中継コイルの効果を示しています。送受電コイル間の電力伝送距離を伸ばすには、

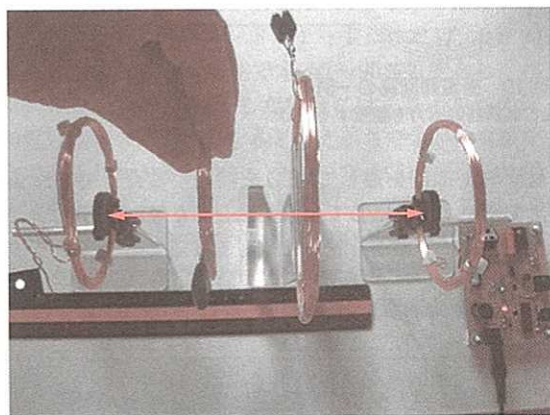
- ① コイルの結合係数 k と Q 値を大きくする
- ② 中継コイルをうまく使用する



(a) 通常の送受電コイルのみだと、送受電コイル間距離5cm



(b) $\phi 103\text{mm}$ の中継コイルを入れると、送受電コイル間距離10cm



(c) $\phi 103\text{mm}$ と $\phi 60\text{mm}$ の中継コイルを入れると、送受電コイル間距離17cm

写真3 中継コイルのコイル間距離拡大効果
中継コイルの位置でコイル間距離が変わることが実験でわかる

が考えられます。①については前述しましたが、②の中継コイルは円形コイルの両端に送受電コイルと共振する容量のコンデンサを接続したものです。このように簡単に中継コイルの効果を実験することができます。

中継コイルは写真4の中央の車両に設置したように、二つのコイルに分けて中間に直列あるいは並列にコンデンサでLC共振させることで遠方まで電力を伝送することができます。

写真5は、テーブル・マット上に置いた水を張ったガラス鉢に入れた受電コイルに繋がれたLEDが点灯している様子です。テーブル・マットの裏側に丸みのある菱形にリッツ線が貼ってあり、送電コイルになっています。送電コイルの面積内ならばどこに置いても点灯しますし、水中でも漏電や感電することなく給電することができます。

■ バルク(プレーナ)型コイルの例

磁界結合型ワイヤレス給電システムにおいては、高周波での表皮効果や近接効果を考慮して、リッツ線で構成されるコイルが通常ですが、リッツ線コイルでは薄型化が困難、製造工数が増加、特性値がばらつくなどの課題があります。

これらの問題を解決するため、金属薄膜を使ったバルク・コイル、いわゆるプリント基板コイルが使われるようになっていきます。

● 通常のプリント基板コイル

プリント基板コイルと言うと小電力用と思われるかも知れませんが、実は2011年にパイオニアがEV充電用に3kW出力のものを開発しています(写真6)。85kHzの銅の表皮深さが約0.2mmであることを考慮して厚みのある銅箔を使い、また、スパイラル状のコイルを設計する際も近接効果の影響を改善するパターン形成を施すなど、高周波抵抗成分の低減を図っています。

エイト工業の厚銅基板は表面銅箔厚225 μm で、写真7のように12.5mm幅で30A、3mm幅でも10Aを流すことができるため、コードレス・キッチンとしてフード・プロセッサのような数百Wの機器を、プリント基板コイルを使ってワイヤレス給電化するのは容易だと思います。

伝送周波数10kHz以上で50W以上の出力のワイヤレス給電システムは、電波法100条他の規定により設置する場所を管轄する総合通信局に設置許可申請を行って許可を得ない限り使用することができません。アマチュアがワイヤレス給電の実験を行うのなら50W以下で行うことが最適であり、その場合にはプリント基板の銅箔厚は通常の35 μm や70 μm で十分です。ということは、CADなどでコイル形状を作成して自宅

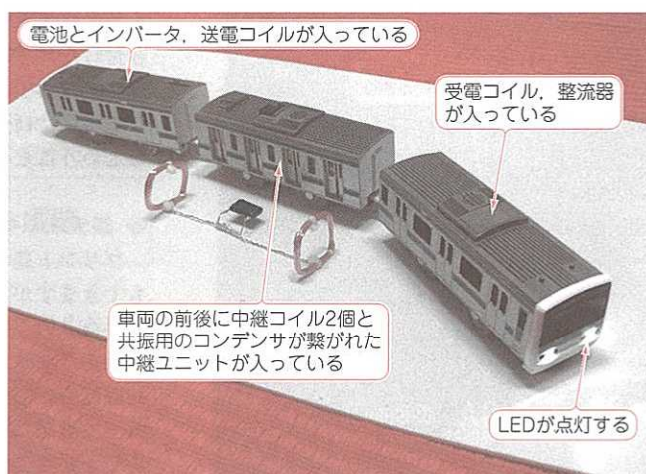


写真4 2重中継コイルによる
連結車両への給電
コイルを二つ連成し、コンデンサ
を直列/並列で共振させる

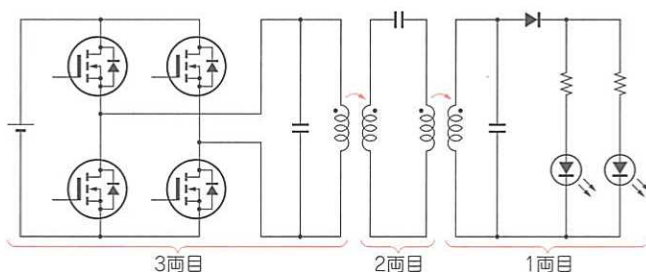


写真5 テーブル・マットを通して水中給電
テーブルにコイルを埋め込まなくてもLEDの水中花を作れる



写真6 金属薄膜で形成したEV用コイル
プリント基板コイルでも3kWの電力伝送ができる

で容易にプリント基板コイルを製作することができ
ます。

プリント基板コイルの薄さをモバイル機器に利用
することはすぐにできますが、そのアプリケーションの
一つを紹介します。研究室の入口もそうですが、今や
マンションや自宅の玄関扉にもキーレスの暗証番号式
エントリ方式やさらに進んで暗証番号を打たなくても
よいスマート・エントリ方式が広く使われるようにな
りました。これらの電子錠の電源にはほとんど電池が
使われています。電池は商用電源に比べて非常に高価

な費用が掛かり、また材料資源の浪費になりますが、
写真8のように薄いプリント基板コイルにより、それ
らがセーブされます。ただし、停電対策は考慮する必
要があります。

● フレキシブル基板コイル

給電面が平面でない場合や非常に薄いコイルが欲し
い場合には、写真9のようなフレキシブル・プリント
基板でコイルを作ることでもできます。写真のものは両
面基板を使ってコイルを作っています。



写真7 厚銅基板の電流と線幅
3mm幅のプリント基板コイルでも10A流せる

その応用として、円筒容器の内外面に円筒形状に巻き付けたコイル間での給電状況も示しています。例えば、真空容器とか高压の引火性ガス容器に設けたガラスあるいは樹脂製の窓を通して、内部の機器に給電するということができます。

● 銀ナノ・ペースト印刷基板コイル

プリント基板コイルをエッチングで作るのは自宅でもできますが、版下の製作、感光、現像、エッチングとかなりの手間が掛かります。

最近、プリンタで印刷でき、導電性を発現できる焼結温度もかなり低い銀ナノ・ペーストがDICなどから入手できるようになりました(写真10)。また、特殊用紙が必要ですが、印刷するだけで過熱をしなくても導電性を発現するものも、三菱製紙から出ています。これならばCADソフトウェアでコイル・パターンを描き、通常の印刷コマンドで印刷するだけでコイルを作ることができます。

ただ、まだ印刷厚さが数 μm と薄く、損失抵抗が大



(a) ドア開放時の無給電状態



(b) ドア閉鎖時の給電状況

写真8 電子錠への給電
細長いプリント基板コイルならば幅の狭いドアにも給電できる

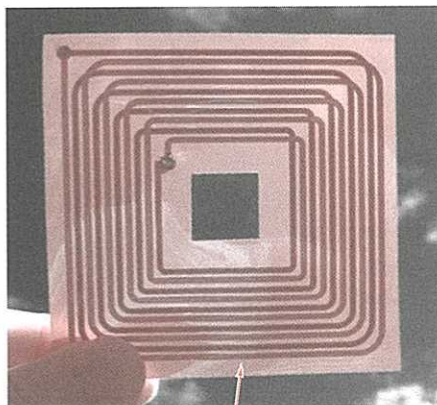
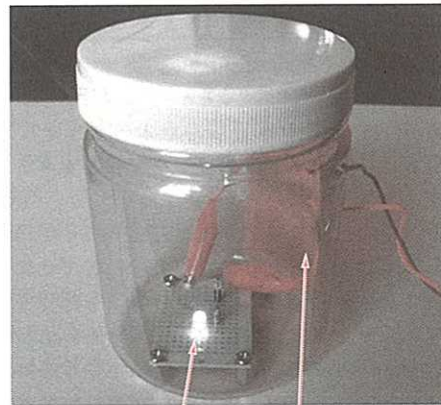


写真9 フレキシブル基板コイル
密閉円筒容器にも外部から給電できる



密閉容器内にコネクタなしに給電ができる
円筒容器形状に合わせて内外にコイルを配置

きいため、磁界結合型のように送受電コイルに電流を流すものではQ値が上がらず、非常に小電力でギャップがほとんどないものしか現状では使える状況にはありません。しかし、電界結合型のように送受電コイルに電圧を掛けるものでは、十分に使えます。

ワイヤレス給電の将来的な展開

● ロボット

海洋研究開発機構は異業種中小企業の優れた技術力を結集して、市販ガラス球(外径36 cm, 内径33 cm)を耐压容器に使い、水深8000 mで深海底の3Dビデオ撮影や採泥を行うことができる水中探査機として、取り扱いが容易で低コストの「江戸っ子1号」を開発しました。

内蔵電子機器の電源である2次電池充電用コネクタ穴をガラス球に開けると、耐圧性の劣化、コストの増加が懸念されるため、ツクモ電子が写真11のように内径110 mm, 外径145 mmの送受電コイルを約25 mm

の間隔でガラス球の内側と外側に配置して充電を行うワイヤレス給電システムを開発しています。25 kHzのスイッチング電源による電磁誘導式で12 Wを給電し、充電時間は6～8時間です。

● 計測機器

現在、建設構造物は高度成長時代のスクラップ&ビルドの考えから大きく転換して、維持管理技術により健全な状態を保ちながらの延命化が重要視されてきています。これらの多くは目視観察による日常点検が行われていますが、内部の腐食や締結ボルトのゆるみと

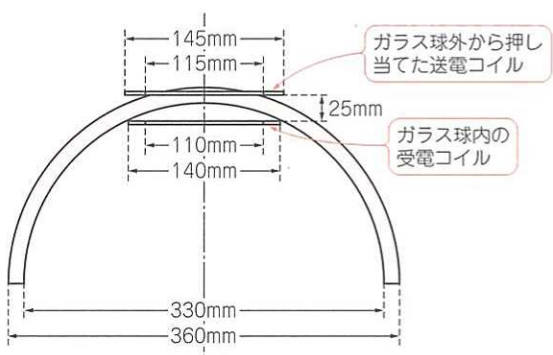


写真11 江戸っ子1号の送受電コイル
耐圧性を損わずにガラス球の内外面で給電できる

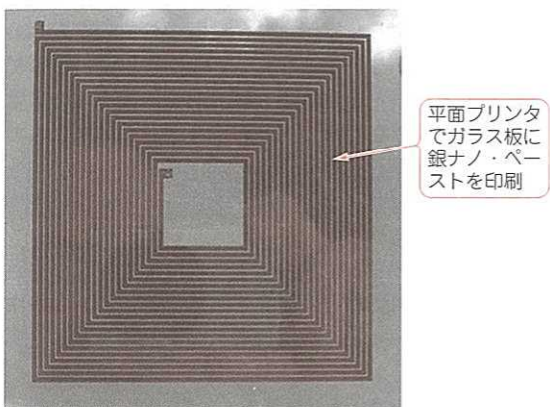


写真10 銀ナノ・ペースト印刷基板コイル
自宅のプリンタでも印刷実行、すぐにコイルができる

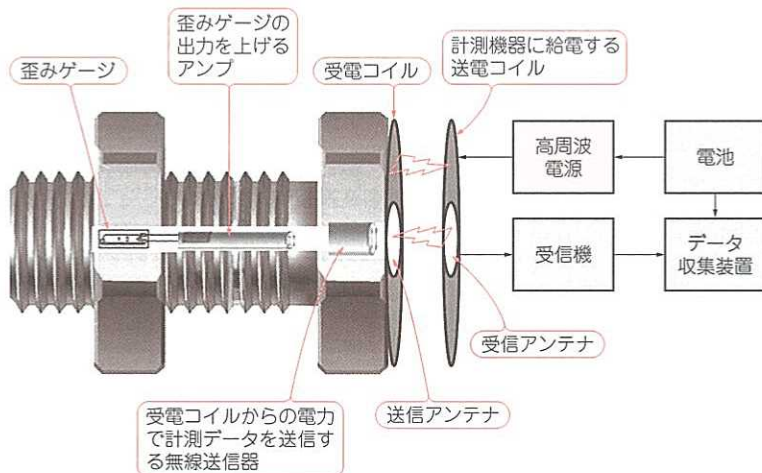


図20 ボルト軸力計測システム
電池レスでボルトの軸力を非接触で収集できる

いったものは目視点検では把握できません。さらに高所での目視点検には、安全の観点から限りがあります。

そこでセンサ計測部、通信部を構造物内部に埋設して計測するシステムが考えられ、一例としてトンネル内の地中ひずみ分布を計測してトンネル周辺山地のゆるみ領域を判断するため、ロック・ボルトの軸力を計測するシステムが実際に設置されていますが、有線型センサのためケーブル劣化の懸念があります。しかし、建設構造物は数十年にわたって使われるものであるため、電池などを埋め込むことはできず、バッテリーレスのメンテナンス・システムが求められています。

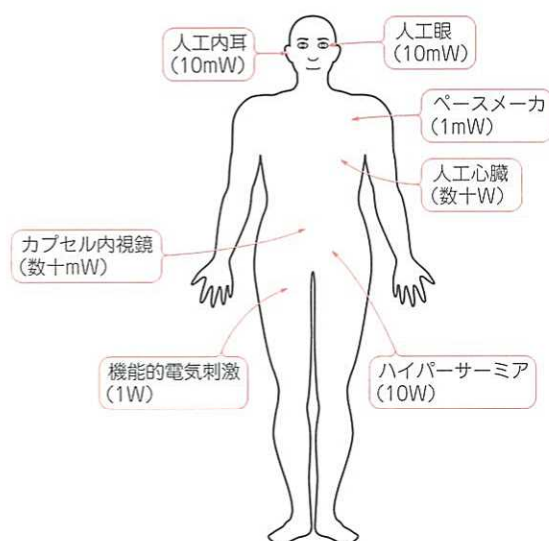


図21 植え込み医療機器と消費電力
ワイヤレス給電式植え込み医療器の消費電力

そこで図20のように、ボルト側には軸力を計測する歪みゲージ、増幅器、送信機と磁界共鳴式ワイヤレス給電の受電部を埋め込み、計測システム側にはワイヤレス送電システムと歪みデータを受け取る受信機、表示器から構成されるワイヤレス・ボルト構造体軸力計測システムをボルト・メーカーのサンノハシが開発しています。

これは、計測側の送電コイルからボルト頭部に設けられた受電コイルに向けて電力を伝送し、受電した電力を使って軸力データを計測システム側に送信して、計測システムにてデータ処理や記録、表示を行うシステムです。IDをボルトごとに埋め込んで、一度に多数の軸力データを採取し、IDを元にボルトごとの軸力管理も可能です。

● 医療機器

医療の分野において体内埋め込みを想定した医療機器に、ワイヤレス給電が使われています。

現状の植え込み医療機器の電力は体内に内蔵された電池を利用するもので、電池寿命が切れるまに再度手術で交換をする必要があり、患者への負担が大きいものです。しかし、体内植え込み機器に皮膚を通して有線でエネルギーを送ることは、感染防止などの日常のケアの大変さなどから何としても避けたいところであり、皮膚を貫通させることなく、ワイヤレスでエネルギーを送ることができれば、この分野の治療が大いに進むことになります。

図21に研究が進んでいるワイヤレス給電式植え込み医療機器と消費電力の関係を示しています。この中でハイパーサーミア、機能的電気刺激と人工内耳は実

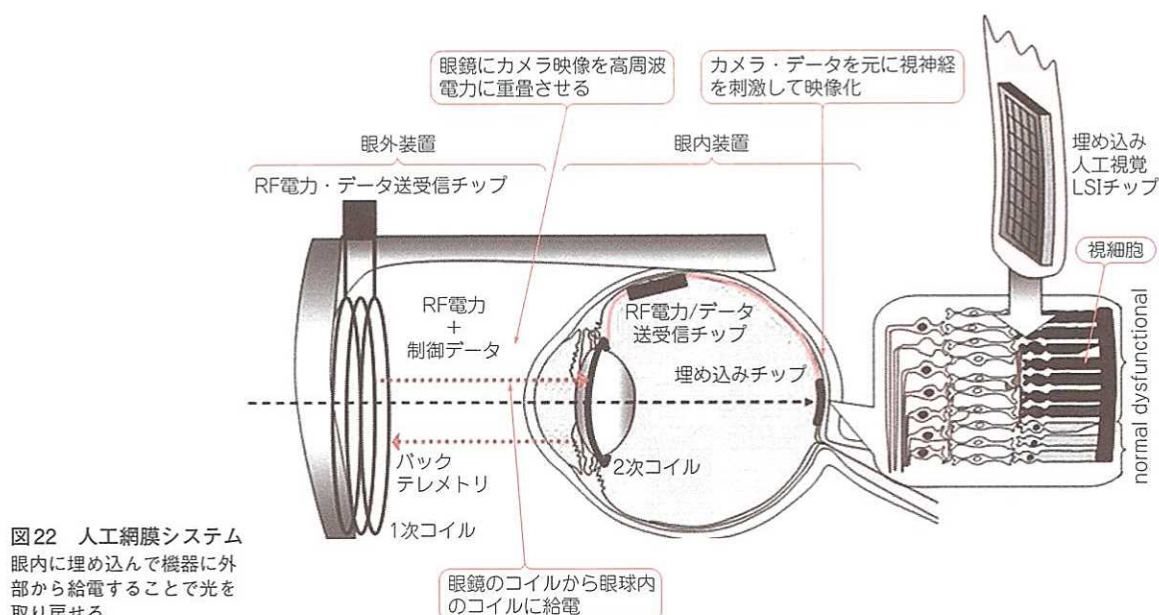


図22 人工網膜システム
眼内に埋め込んで機器に外部から給電することで光を取り戻せる

用化が進み、製品も出されています。

水晶体皮質や核が濁る白内障の治療は、水晶体を取り出して人工水晶体を装着することで光を取り戻せます。しかし、網膜にある光受容器が徐々に機能しなくなる網膜色素変性症や加齢黄斑変性症は失明が必然です。これらの病気に対して、人工器官を網膜に埋め込み、眼鏡に装着した極小の外部カメラとつなぐ人工眼の開発が進められています。図22に示すように、カメラによる画像をプロセッサ装置によって電気信号に変えて眼内の人工器官へ送信し、さらに器官から視神経へデータを送って脳に映像を見せる仕組みで、人工器官を動作させる電力は眼鏡に装着した送電コイルから眼内の受電コイルに伝送します。

先日、TVで全盲の男性が人工眼を埋め込む手術を受け、初めて妻の顔を見たとの海外ニュースを見る機会がありました。実際に見えている画像はモザイクが掛かったように粗いものでしたが、妻の顔を見て喜ぶ男性の輝くような笑顔は本当に素晴らしいものでした。

参考文献

- (1) 小林王義：バルクコイルを用いたモバイル機器用ワイヤレス給電装置の設計手法に関する研究，早稲田大学大学院博士

学位論文，2014/10

- (2) 小林王義，羅峰，高橋俊輔，紙屋雄史，大聖泰弘：電磁誘導型非接触給電装置に用いるバルク導体コイルの結合係数k値の向上手法に関する実験的検討，自動車技術会2013年度学術研究講演会前刷集，P5，pp.1-2(CD-R)，2014/3
- (3) 小林王義，羅峰，高橋俊輔，紙屋雄史，大聖泰弘：磁界共振型非接触給電装置に用いるバルク導体コイルの性能指数Q値の向上手法に関する実験的検討，自動車技術会2013年度学術研究講演会前刷集，P6，pp.1-2(CD-R)，2014/3
- (4) 高橋俊輔：ワイヤレス給電技術者育成のための基礎知識，イルカカレッジ，2012/12/12
- (5) <http://www.phys.u-ryukyu.ac.jp/~maeno/cgi-bin/pukiwiki/index.php?FrontPage>
- (6) 宇宙航空研究開発機構：マイクロ波無線電力伝送地上試験／実用化実証デモンストレーション資料，2015/3/8
- (7) 河島信樹，武田和也：レーザエネルギーおよび情報供給システム，特許第4928203号，pp1-13，2012
- (8) http://www.deepfriedneon.com/tesla_f_calcsipiral.html
- (9) 漆畑栄一：EV・PHV向けワイヤレス給電システムの概要・開発動向と今後の課題，信学技報，WPT2012-24，pp.23-26，2012
- (10) 土屋利雄，松浦正己，三輪哲也，小栗一将：往還型深海探査機「江戸っ子1号」開発計画，第23回海洋工学シンポジウム資料，2012/8
- (11) 太田淳：人工視覚システムの開発，キーエンス研究開発サポートサイト，pp2，2014

グリーン・エレクトロニクス No.18

好評発売中！

従来のMOSFETと同じように使える！
高安全性・高信頼性ノーマリOFF型誕生！

トランジスタ技術 SPECIAL 編集部 編
B5判 120ページ
定価：本体 2,400円＋税

新版

30 MHz/10 kWスイッチング！ 超高速GaNトランジスタの実力と応用

GaN(ガリウム・ナイトライド)，SiC(シリコン・カーバイド)など，新しい半導体材料によるパワー・デバイスが実用化されてきており，実際の製品への応用が広がりつつあります。

特集では，これら新パワー・デバイスの特長を生かした活用方法を探求していきます。高電圧動作のパワー・エレクトロニクス回路を高速にスイッチングすることが可能となるため，数kWクラスのパワー回路を小型かつ軽量に実現できるようになります。



CQ出版社

<http://shop.cqpub.co.jp/>