

# 電界結合方式無線電力伝送を応用した搬送システム

原川 健一<sup>\*、1</sup>

(2023年1月9日受付)

## Carrier System Applying Electric Field Coupling Method Wireless Power Transmission

Kenichi HARAKAWA<sup>\*、1</sup>

(Received January 9, 2023)

### 1. はじめに

電界結合非接触給電技術は、現時点においても世の中に広まっていないが、軽量であり、低放射化できる優れた点もある。ただし、電極間距離を広く取れず、磁界結合に比して高い動作周波数が求められるため磁性体の透磁率を高く保って使用できず、大電力化が難しい問題がある。

応用先は、リニア系、回転系、フリーポジション系等がある。今回はリニア系を例にして検討結果を概説する。

### 2. 電界結合非接触給電

#### 2.1 基礎的事項の説明

図1に電界結合非接触送電の基本回路を記す。高周波電源(電圧:  $V$ , 周波数:  $f$ )と負荷( $R$ )を二つの接合容量( $C_c$ )で接合した回路であり、対向する電極を電源側と負荷側に分け、それぞれを送電部、受電部としている。

送電部と受電部は、相互に自由に移動できるものとする。

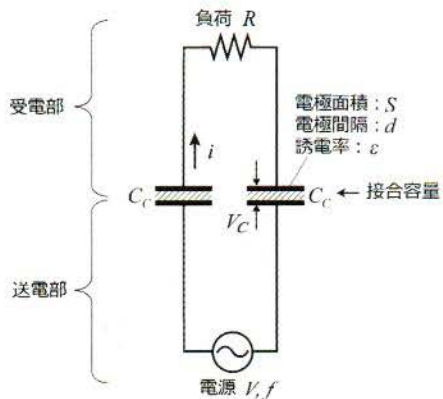


図1 電界結合の基本回路

キーワード: 電界結合, 搬送線路, 安全, 低放射, 送電

\* 株式会社 ExH

(〒270-1356 千葉県印西市小倉台 3-1-8-106)

ExH Corporation, 3-1-8-106, Oguradai, Inzai, Chiba 270-1356, Japan

<sup>1</sup> kenichi\_harakawa@exh-energy.com

高周波電源の電力が接合容量を介して負荷に流れる。この時、接合容量に流れる電流( $i$ )は、(1)式で求められる。また接合容量は(2)式で求められる。さらに、負荷に届けられる電力は、(3)式から求められる。

$$i = 2\pi f C_c V_c \tag{1}$$

$$C_c = \epsilon \frac{S}{d} \tag{2}$$

$$W = Ri^2 \tag{3}$$

これより、周波数( $f$ )、接合容量( $C_c$ )、電圧( $V$ )に比例して電流( $i$ )が増大し、その二乗に比例した電力が負荷( $R$ )に届く。

なお、接合容量( $C_c$ )は、対向する電極面積( $S$ )が広く、電極間隔( $d$ )が狭く、接合部の誘電率( $\epsilon$ )が大きい程増大する。

伝送効率を上げる方法として、図2に示すように、直列共振回路がある。

接合容量のリアクタンスを打ち消す様にインダクタンスを直列に付加した時(直列共振条件)に、送電が最大になる。

異なる方式として、図3に示すように、二つの並列共振回路とトランスを付加する並列共振方法がある。トランス(変圧比  $n$ )を入れることにより、接合容量に印加される電圧が  $n$  倍になる。これにより(1)式に示されるように送

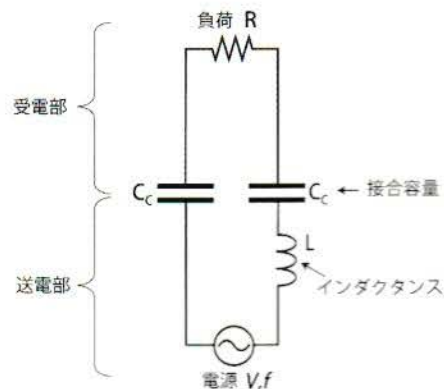


図2 直列共振を用いた電界結合回路

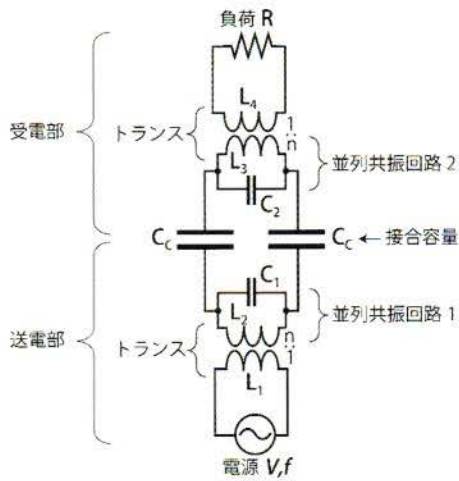


図3 並列共振を用いた電界結合回路

電流を大きく出来る。また、並列共振回路2により、受電側のインピーダンスを大きくすることができ、受電効率を上げることが出来る。

他の利点としては、次のことが挙げられる。

- ・ 接合容量が共振回路の一部ではないため、電極間隔が変化しても共振周波数への影響は少ない。
- ・ 共振回路がフィルターとして働き、電源高調波、負荷整流回路の非線形性による高調波をカット出来る。
- ・ 双方向送電が可能

図4には、10 cm角の電極を対向させて接合容量を形成させたときに、電極間隔を変化させたときの2 MHzにおける伝送電圧比を示している。キャパシタンスのみの時には、電極間隔を10 μmより広くすると、送電効率が落ちてくるが、並列共振回路では、約10倍の電極間隔まで広げることが出来る。直列共振は、任意の電極間隔でインダクタンスを調整することにより共振点を作ることが出来る。ただし、接合容量が少し変化すると急激に送電効率が落ちる。

これより、接合容量が変化しがちな用途では、並列共振回路が優れている。一方、回転系の様に接合容量がほぼ一

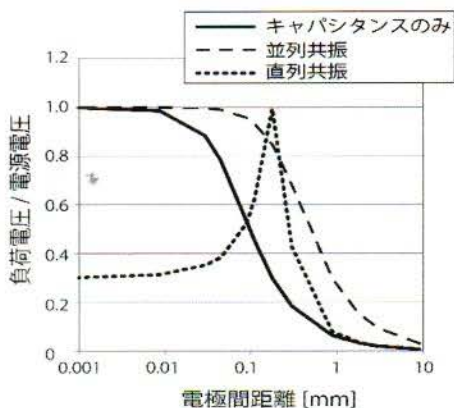


図4 共振回路方式の比較

定している用途では、回路点数の少ない直列共振回路が適している。

次に、並列共振回路の実装上の利点及びこれによる低放射率について述べる。

### 2.2 並列共振による実装面の利点

図5には、並列共振回路を用いた場合に、送電部及び受電部をシャーシで囲んだ際、シャーシと電極間に寄生容量が発生する様子を示している。

受電部に注目すると、各電極と受電側シャーシ間には、 $2C_y$ の寄生容量が発生する。二つの寄生容量は直列関係になるため、全体で $C_y$ の寄生容量になる。ここには、並列共振回路があり、 $C_2$ の容量で共振回路を構成しており、寄生容量と並列関係になっている。このため、共振回路の容量を $C_2-C_y$ にすることで、共振を維持することが出来る。同時に、電極をシャーシ近傍に位置させることが出来る。同じことが送電側でも実施出来る。

この様にして、接合容量の電極をシャーシ内に挟み込む

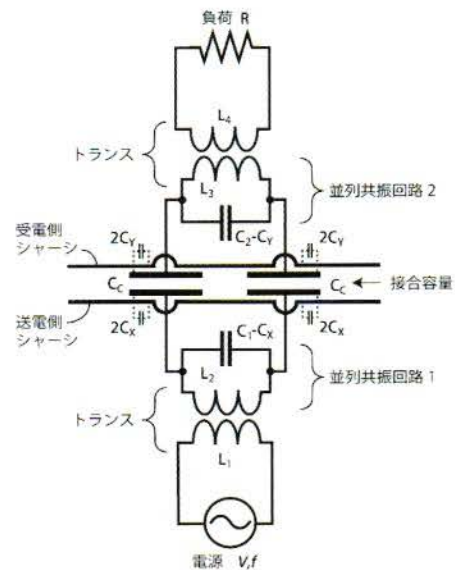


図5 接合部電極とシャーシの関係

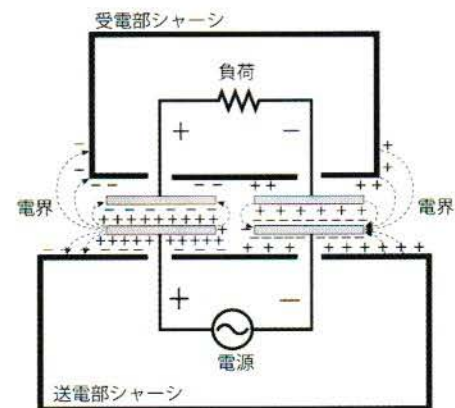


図6 接合容量による周囲への帯電の様子



ことが可能になるため、電磁波放射低減にもつながる。

図6には、送電部と受電部をそれぞれシャーシで囲んだ時の様子を示している。送電側の(+)電極に注目すると、本電極からは、対向電極及び直下のシャーシに多くの電界が集中する。シャーシに向かう電界は、寄生容量を介するものであるため、上述の方法で対応可能である。対向電極に向かうものは、電力送電に寄与する。

しかし、それ以外にも小さいとはいえ、受電部側シャーシとの間にも電界が生ずる。この電界は、対向電極に流れるエッジ部の電界とともに、変位電流として空間に放射され、電磁波放射の原因になる。

この時、シャーシを電極の外側にはみださせるオーバーハング(OH)が重要になる。図7に示すように、OHを大きくすると、変位電流は、シャーシに挟まれた空間内に閉じ込められ、外部放射が低減できる。

図8には、電極間電圧10V、周波数6.78MHz、負荷抵抗5Ωとしたとき、OHを-5mmから15mmまで変化させたときの放射電界強度と距離の関係を示している。距離は、接合容量エッジ部からの距離としている。図7および図8から判るように、OH=-5mmの時には、接合容量が露出しているため、空間に多くの変位電流が流れ、強い電界強度が観測されている。これに対し、OHを徐々に大きくしてシャーシで挟む空間内に電極を挟み込むと、変位電

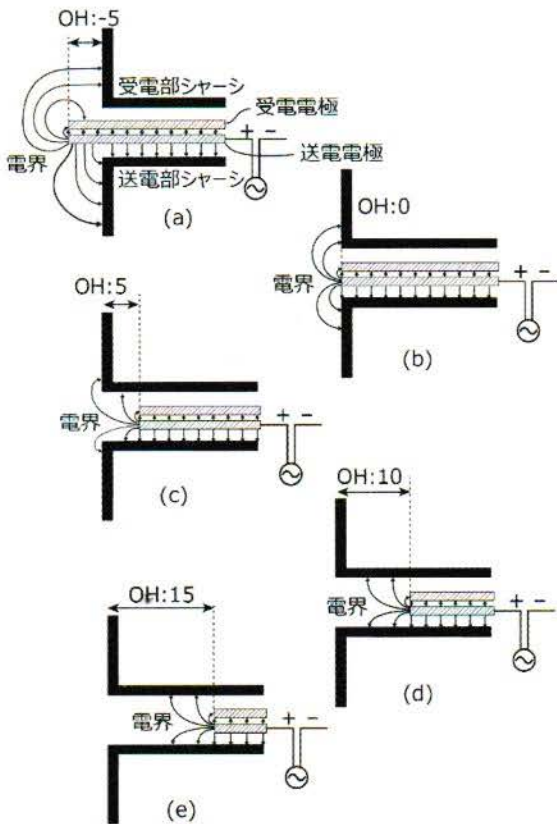


図7 オーバーハング(OH)と変位電流の関係

流は空間に放射され難くなり、電界強度は最大40dB程度低減できる。

### 3. 連続給電型搬送線路への適用

次に、電界結合非接触電力供給技術をリニア系に適用した場合について述べる。

#### 3.1 平行二線方式

図9は、平行二線式線路を用いた例である。線路を送電電極として用い、電流も差動モードで流している。その上を線路と非接触状態を保って受電部の電極を滑らせて受電する。受電体には並列共振回路を用いて入力インピーダンスを高くしているため、複数の受電体が同時に受電することができる。搭載できる搬送体の数は、送電電力量に対する受信電力の比で決まってくる。

ただし、平行二線方式で定在波を起こさせると外部への放射が大きくなる。さらに、線路が露出して使用される為感電の心配がある。

なお、平行線方式の感電の問題を解決すべく、並行二線式線路全体を後述する同軸線路の様に、シールド材で囲む案も出てくるが、線路としての伝送モードが成立しない。

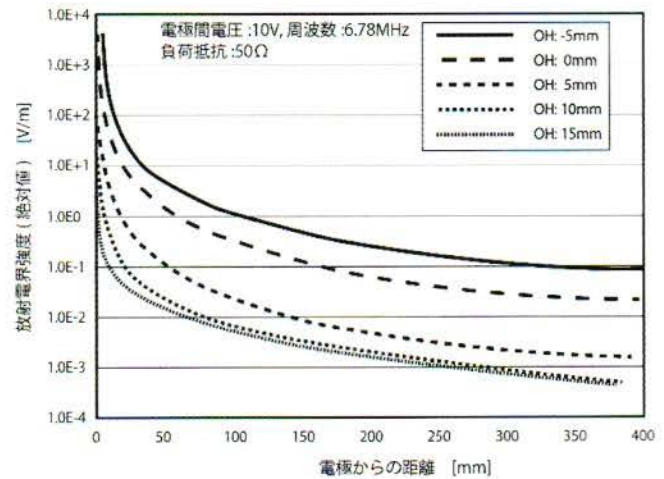


図8 OHを変化させたときの放射電界強度と距離の関係

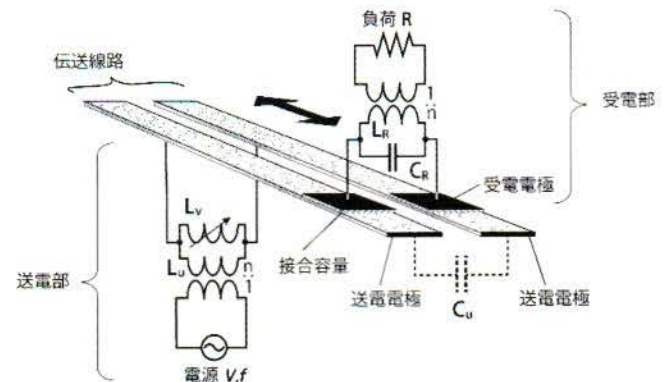


図9 平行二線式電界結合搬送システム



### 3.2 同軸線路方式

平行二線方式を用いることによる電磁放射と感電の心配を解決すべく、同軸線路方式が提案されている。

同軸線路方式は、図 10 に示すように、受電電極を同軸線路の内部導体と外部導体に対向させて、それぞれに接合容量を形成するものである。通常同軸線路は外部導体で内部導体を覆っているため、内部導体に電極を対向させることはできないが、本提案ではスリット付き同軸線路を用いることで可能にしている。

図 12(a) に示すように、同軸線路は外部導体の一部を取り去って、完全に覆わなくても線路として動作する。外部導体の円周方向に流れる電流成分はないため、スリット幅が狭ければ、同軸線路の動作に影響を与えない。

この場合にも、並列共振回路を送電線路側と受電体側に用いている。図 9 と異なる点は、外部導体は GND に接続され、高周波電力はその内部空間を流れるため、外部導体に人が触ることが出来る安全性を有している。

図 11 には、一例としての具体的構造を示している。同軸線路方式と言っても、同心円形状を採用する必要はない。この図では、押し出しアルミニウム材を製作し、組み合わせている。内部導体を支えているのは、低損失誘電材である。外部導体の側面にはレールが付けられており、搬送体を走行させる。さらに、外部導体上面にはラックギヤがあり、搬送体内部にあるピニオンギヤと噛み合っている。

外部導体表面には、スリットが開けられているが、常時

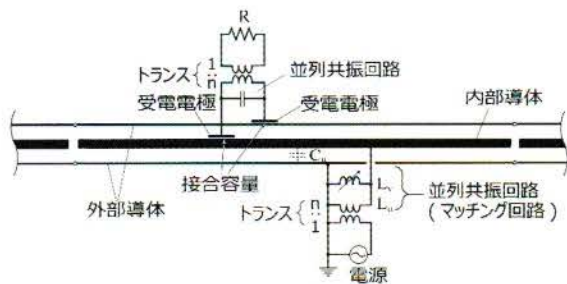


図 10 同軸線路式電界結合搬送システム

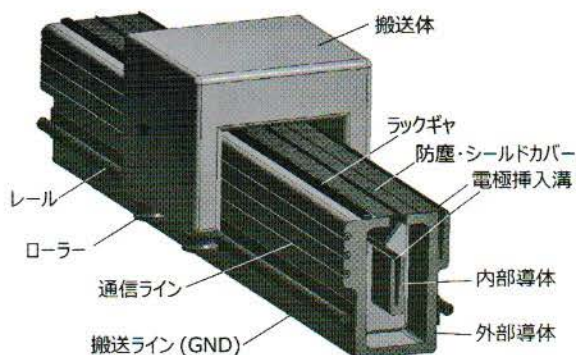


図 11 同軸方式搬送線路構造の一例

は強磁性の薄板でカバーされており、ごみ等の侵入を防いでいる。搬送体が移動する際には、磁力で薄板カバーがめくれ上がり、内部導体と対向する電極が外部導体と非接触で移動可能にしている。

内部導体及び外部導体の右側面には、受電電極を挿入して接合容量を形成する溝が設けられている。これらの溝内に受電電極を挿入し、後述する磁気的方法またはフェザータッチ法により接合容量を形成する。外部導体側の溝は無くして、外部導体右側面と面的に対向させる方法でも良い。

外部導体左側面には、3本の通信ラインが一部を露出して埋め込まれている。これらは、漏洩同軸線路であり、異なる周波数で駆動させ、搬送体内のアンテナにより、通信しつつ移動可能である。

### 3.3 同軸線路方式と平行二線方式の比較

図 12 に、改めて同軸線路方式と平行二線方式の断面を示す。同図(a)の同軸線路方式は外部導体を GND に接続し、一部にスリットを設ける。線路内の磁界が漏れ出て外部に電磁放射するが、スリット幅が狭い程、放射は低減できる。外部導体を GND に接続しているため、人が触ることができ、線を隣接して配置することも可能であり、外部に金属板があっても配置出来る。

同図(b)の、平行二線方式は並行線を配置し、差動モードで電流を流す方式である。各線は誘電損失の無い絶縁体で保持されている。平行二線方式は電界結合だけでなく、磁界結合でも利用されている。ただし、電界結合で用いる場合には、送電線(送電電極)と受電電極間の距離が取れないため、絶縁層を厚くすることができない。このため、経年変化等によって絶縁層が剥げることも十分に想定しなければならない。絶縁層が剥げた部分と GND 間に触れば、高周波感電を引き起こす。高所に設置して人が触れないようにする等の多重の配慮が必要であり、人と混在する環境で安易に使用すべきではない。

さらに、平行二線方式は、線路自体は小断面でありコンパクトに収容できるが、周囲に磁界と電界が広がっている。周辺に導体板があれば、渦電流を発生させて損失が出ると

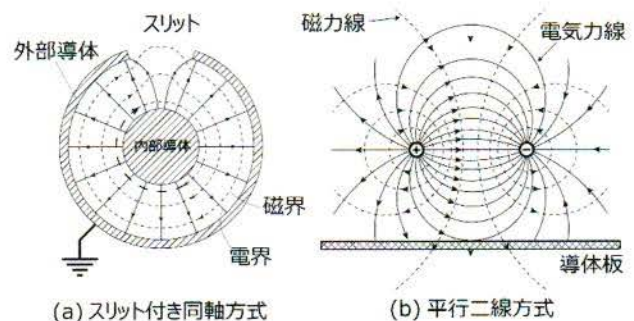


図 12 同軸線路方式と平行二線方式の比較



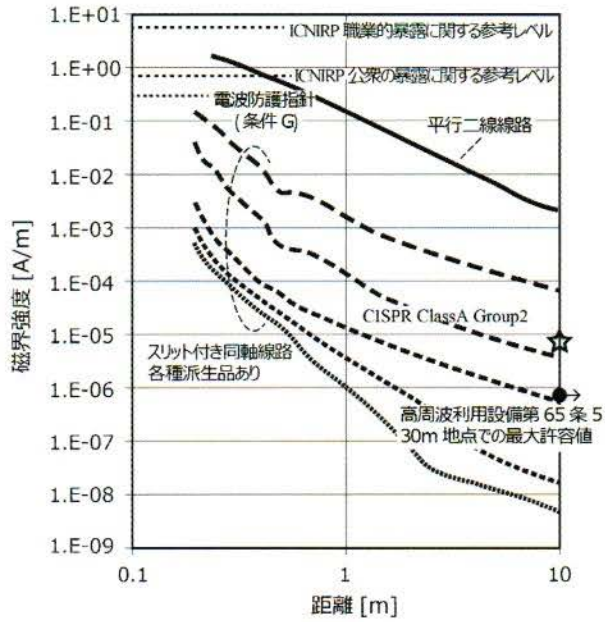


図13 平行二線方式と同軸方式から放射される磁界強度

ともに、線路における反射点にもなる。このため、設置する場合には周辺に導体（鉄筋等）が存在しない環境が必要であり、同軸方式より広い場所を占有する。

3.4 放射低減

図13には、線路長15mの平行二線式線路（線径100mmΦ、線間距離400mm）とスリット付き同軸本路（内部導体径100mm、外部導体内径230mm）に6.78MHz、1kWを送電したときの線路中央部およびスリット中央部からの放射磁界強度の距離依存性を示している。一番上にあるのが平行二線からの放射であるが、近傍域では人体防護指針であるICNIRP（公衆の暴露に関する参考レベル）および電波防護指針（条件G）を超えている。

10m地点では、CISPR Class A Group2のレベルより2桁大きく、高周波利用設備の最大許容値（30m点）を超えている。

その下の5本の線は、スリット付き同軸線路からの放射を示している。一番上の線は、スリットに何も被せていないときのものであり、10m地点でCISPR Class A Group2および高周波利用設備の最大許容値を超えている。被せ方を工夫することにより、放射磁界強度は落とすことができ、高周波利用設備の最大許容値を下回ることが出来ている。

この様に、スリット付き同軸線路の場合には、10kW以上の送電にも使用できる可能性がある。

3.5 電極の保持方法

電界結合方式では、電極間距離が取れないため、図14に示すように、電極間にガラス等の高硬度のゴミが有ると、電極表面を傷つけ、ブレーキが掛かってしまう。

このため、高硬度のゴミ等に対処する必要がある。

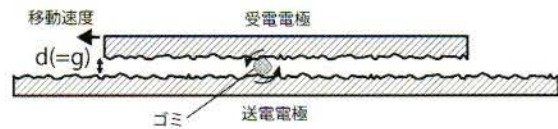


図14 電極間に挟まれた高硬度のゴミによる破損

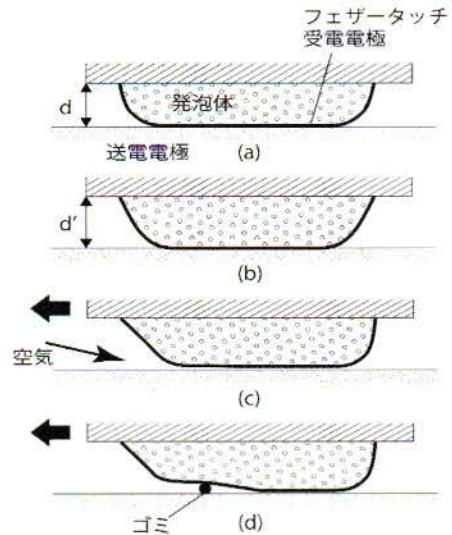


図15 フェザータッチ電極の挙動

3.5.1 フェザータッチ方式

ゴミに対処するとともに、接合容量を大きくできる方式にフェザータッチ電極がある。フェザータッチ電極は約0.25mm厚のSUS板をバネ性のある受電電極として活用し、表面にDLC（Diamond Like Carbon）膜をコーティングした電極を用いる。DLC膜の厚さを約1μmとする。DLCは、固く、摺動性のある膜であり、420kV/mの絶縁耐圧、比誘電率が約10と高いことから、空気を挟む電極に比して接合容量を数十倍増大させることが出来る。

図15に示すように、発泡体を受電電極でU字型に挟んでフェザータッチ電極とする。

同図(a)および(b)に示すように、送電電極に対して受電電極の位置が変化しても、電極自身が変形して対応する。

同図(c)に示すように、受電体が移動すると空気を巻き込み、非接触状態になる。

同図(d)に示すように、高硬度のゴミ等が侵入しても、電極が変形して、ゴミをやり過ごせる。

なお、送電電極器表面には、アルミナ膜（30μm）を付けているものとした。

3.5.2 磁石吸引方式

二つ目は、磁気吸引方式である。図16に示すように、永久磁石に強磁性体電極を近接させると、永久磁石の中心に吸引される。

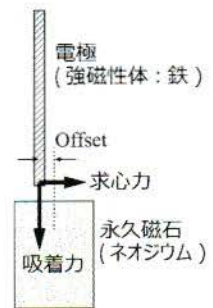


図16 磁気吸引法



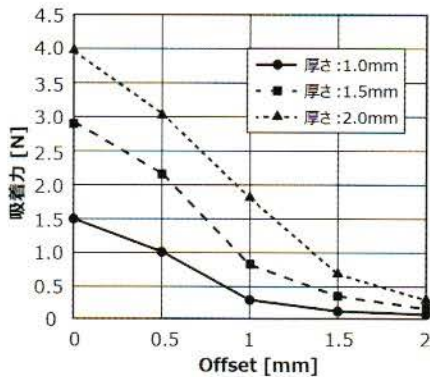


図 17 各磁石厚に対する吸着力と Offset の関係

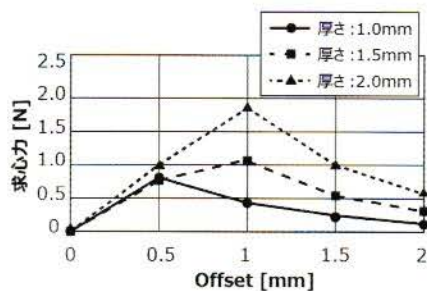


図 18 各磁石厚における求心力と Offset の関係

強磁性体電極の永久磁石中心からのオフセット (Offset) に対して、磁石の厚さを 1 mm, 1.5 mm, 2 mm と変化させたときの吸着力と求心力の関係を図 17 および図 18 に示した。

以上から、電極を非接触で精密に位置合せするのに磁石を用いる方法は有効である。非磁性のごみであれば、電極が Offset 方向に移動したり、一時的に変形したりしてゴミをやり過ごせる。ただし、強磁性のごみが付着することには注意しなければならない。

上述の電極保持方法は、搬送システムを構築する際に有効である。

#### 4. 非連続型給電線路

今までは、連続給電型の搬送線路について述べてきたが、図 19 に示すように、スリットの代わりに、電極とスイッチの付いた挿入ピンを内部導体に刺し、搬送体の移動をセンサでとらえてスイッチングする方式も考えられる。

この方法の利点は、線路全体から電磁波を放射せず、特定の搬送体が存在する場所でのみ電極を On にする。このため、搬送体の下だけにアクティブな電極があるため、オーバーハング等の手法を用いることで、電磁波放射を低減できる。さらに、人混在環境でもアクティブな電極には搬送体が有って人が触れないため、安全性が増す。

使用するスイッチとして MOSFET を使い、6.78 MHz で動作させた場合、Off 時において寄生容量で通過してしまう成分を並列接続するインダクタンスで阻止する必要がある。

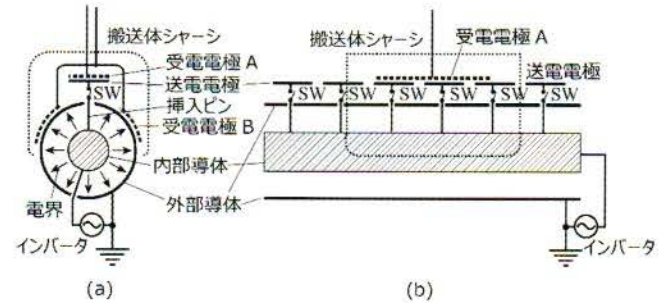


図 19 非連続型給電線路

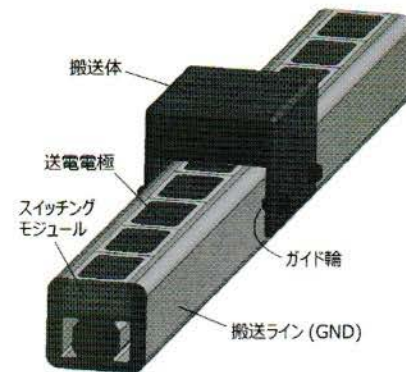


図 20 非連続給電式搬送線路構造

る。これにより、SW が Off 時の挿入ピンでの反射が無くなり、同軸線路内の多重反射を防止出来る。

図 20 には、製作したときのイメージを示す。表面に電極が連続しており、それに対向させる電極と側面に対向させる電極が搬送体内に存在する。

この図では、送電電極が連続して配置されており、走行時に送電電極を切り替えつつ連続給電が可能である。

しかし、作業ポイントのみに電極を配置する方法も取れ、作業による停止時に受電する。電極数が少なくなり、低コスト化が図れる。この場合には、スイッチングモジュールには、容易に電極の位置が変更できる必要がある。

図 20 の方式を採用するならば、同軸線路の内部導体をバスバーとして使用し、直流給電する方式も考えられる。搬送体は、停止時に上面と側面に電極を押し付け、接触させて受電出来る。ただし、電極表面酸化膜の影響を排除する必要があり、低融点金属電極を提案したい。

#### 5. まとめ

電界結合による非接触給電を用いた連続又は非連続型搬送システムについて説明してきたが、停止時または低速の移動であれば、接触給電も可能である。インバータが不要になり低コスト化できる。ただし、腐食環境での使用には、電界結合方式が適している。金属部を酸化膜、DLC、樹脂等で保護すればよい。用途に応じて、電界結合と接触式を選択し、適材適所な実用化を狙いたい。