

# Applicability of Non-contact Power Transmission for Space Systems

Osamu Kawasaki, Kazuyuki Hirose

Institute of Space and Astronautical Science (ISAS), Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA)

3-1-1 Yoshinodai, Chuo-ku, Sagamihara, Kanagawa, 252-5210, JAPAN

## Abstract:

Non-contact power transmission (or wireless power transmission) technique is a useful method in case where interconnecting wires are inconvenient, hazardous, or impossible. There are three major method of wireless power transmission, (1)electromagnetic induction (2)magnetic resonance and (3)electromagnetic radiation.

The electromagnetic induction method is already commercialized in small power transfer such as charging a electric shaver or electric toothbrush, cell-phone and the active research has been carried out in large power application such as charging technique for electric car.

The non-contact power transmission technique is expected to be one of the fundamental technique for improvement of space infrastructures because of following its characteristics;

- Avoid arcing or short circuit failure in case of connect/disconnect operation of power coupler
- Avoid worn down and change of resistance of metal contact especially in a brush structure of slip ring
- Flexibility in positioning of power feeding will improve system reliability

It is important to evaluate the characteristics non-contact power transmission for coming practical application in space.

We focused on electromagnetic induction method and made a trial product of coil for transmission coupler. The coil was formed on a flexible thin polyimide substrate to save space and aiming at the flexibility in its transformation which absorb the change of the transfer characteristics.

This paper reports the results of trial production and its characteristics of power transmission.

# 非接触電力伝送の宇宙適用性の検討

川崎 治 廣瀬 和之

宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 電子部品・デバイス・電源グループ

## 1 はじめに

非接触電力伝送技術は、特に電磁誘導方式において、電気シェーバや電動歯ブラシ、携帯電話の充電など民生用小電力用途で近年急速に市場が開拓された技術であり、また大電力伝送においても電気自動車の無接点プラグ、停車時の充電スポットへの応用などの研究が進んでいる<sup>[1][2]</sup>。

非接触電力伝送は以下の観点から、将来の宇宙共通インフラとして基盤技術向上が期待できるため、その特徴を把握しつつ宇宙適用性を検討し、実用化にあたっての課題を抽出しておくことは非常に重要と考える。

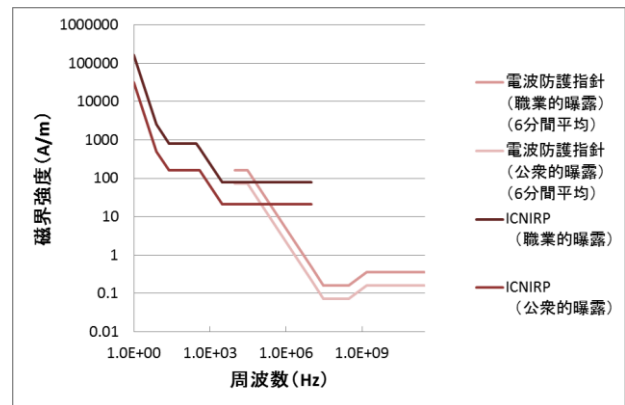
- ・金属接点を有さないため、宇宙空間での分離・結合を想定した給電において、宇宙プラズマ環境下でのアーク放電、コネクタ勘合不良による短絡や給電不良の原因を排除できる。スリップリングへの応用においては接点の摩耗粉による短絡、接触抵抗の変動等の耐久性を中心とした問題を解決できる。
- ・給電側と受電側の位置決めに自由度があるため、コネクタ勘合に比べて無人・無重力の環境での信頼度が向上できる。

非接触電力伝送の主な伝送方式の分類には(1)電磁誘導方式(2)磁界共振結合方式(3)マイクロ波方式の3種があるが、本検討においては非放射型の近接用途を想定し、マイクロ波方式は検討から除外した。また磁界共振結合方式は伝送距離に比して大電力が伝送できることから近年注目を集めている方式であるが、これも以下の理由から今回の検討から除外した。

- ・磁界共振結合方式の伝送周波数帯はMHz帯であり、ある程度以上の電力伝送におけるパワーエレクトロニクスとのマッチングを観点とした場合、GaN等高周波における低損失のスイッチングデバイスの高性能化が必要になること。
- ・伝送方向における磁界強度の問題、端的に言えば電波防護指針やICNIRPに示される曝露限度を下回る強度に保つためには適切な遮蔽と距離が必要であることから、宇宙機のように重量及び空間的に高い制約があり、なおかつ厳しいEMC要求との競合を考慮に入れると現時点では技術的難度が高いこと。

第1図に電波防護指針及びICNIRPの磁界強度曝露

限度を示す。磁界共振結合方式による伝送では、約30W程度の伝送においてもカプラ周囲数10cm程度の範囲でICNIRPの公衆曝露限度レベルを超える例も報告されている<sup>[3]</sup>。



第1図 磁界への曝露レベル限度

## 2 宇宙適用にあたって考慮すべき要素

宇宙機及び宇宙空間での適用において考慮すべき要素を以下に示す。

### (1) 伝送電力の需要

非接触電力伝送に需要のある使用局面としては、宇宙機の一次電源である太陽電池パネルから構体へ数kW～数10kWの伝送から、個々の搭載機器への配電にあたる数10W～数100W、また有人と圧環境ではパソコン/工具/カメラ等の電池への充電に必要な数W～数10Wまで幅広く存在すると考えられる。

数kW～数10kWの大電力の一次電源の配電には伝送電圧の高圧化により損失を少なくするとともに、大きな開発課題としてインバータの小型化などが必須であるが、将来の木星・トロヤ群探査のための中型ソーラー電力セル探査機のように、宇宙機の構造的な要請から電磁誘導方式の非接触電力伝送が必要とされるミッションもあり、需要は十分に存在する<sup>[4]</sup>。一方、有人と圧環境で使用される数W～数10Wの小電力機器においては、既に存在する民生用品の設計評価とスクリーニングを有人安全性の観点で実施することにより比較的容易に転用・実現できるものと考えられる。

数10W～数100Wの中規模の給電については、船

外の交換・移動が行われる機器、例えば国際宇宙ステーション「きぼう」曝露部の実験機器への配電、月面上でのローバへの給電などに主に需要があると考えられる。この電力域ではコイルの重量及びサイズがインバータのそれに比べてシステム上重要なポイントとなる。電磁誘導方式における伝送距離は一般にコイルサイズの数分の1程度が実用的な限界とされており、機器側への制約とならないコイルのサイズと伝送距離が重要な検討課題となる。

## (2) 負荷への給電

現在の電磁誘導方式による給電は、給電対象のバッテリーへの充電を主目的としている。宇宙用へのシステムレベルでの適用の場合、バッテリーへの充電とともに負荷への給電、あるいは負荷のみへの給電への対応が必要である。特に宇宙機の負荷の半分を占めるのが熱制御用のヒータであり、大きいもので数100W程度の随時のトランジエントな変動に追従して、可能な限り伝送効率を維持するために力率を維持するシステムの工夫が必要である。

## (3) 耐宇宙環境性

述べるまでもなく、民生用にはない厳しい温度環境及び放射線環境への適応が求められる。特に露出せざるを得ないコイル周辺の耐環境性については設計に並行して試作試験等で確認する必要がある。

## (4) 位置決めシステム及び位置ずれに対するロバストネス

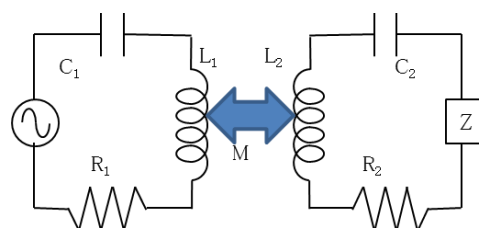
既に民生用ではIH調理器などが対象の検出機能を有するが、これに加え、例えば無人ローバなどのような移動体への給電を考えた場合には給電側との位置関係を検出し、要すれば位置修正を行うシステムの構築が不可欠である。また、このような状況下では必ずしも給電側コイルと受電側コイルが正確に正対する環境に無い可能性の方が高い。このためコイル間の距離及び位置ずれにロバスト性があるだけでなく、角度のずれにも可能な限りロバストなコイル形状の工夫が望ましい。

## 3 コイルの検討、試作及び伝送試験

今回の検討では数10W～数100Wの中規模の給電への適用をターゲットとしてコイルに着目し、前項で述べた検討要素のうち省サイズ、軽量、位置や角度ずれにロバスト性のあるコイルを実現するべく、形状の検討、試作、及び伝送効率の試験を実施した。

電磁誘導方式と磁界共振結合方式はマイクロ波方式の放射型の電力伝送とは異なり、非放射のアンテナ(コ

イル)近傍にとどまるリアクティブなエネルギーを利用する<sup>[5]</sup>。磁界共振結合方式においては、同じ共振周波数の非放射のアンテナを近づけ電力伝送を行うが、電磁誘導方式においてもコイルと適切なキャパシタによるLC共振を利用しなければ効率的な伝送はできず、等価回路ではいずれも相互インダクタンスMを用いて同様に扱うことができる。第2図に等価回路の模式図を示す。



M: 相互インダクタンス  

$$M = k\sqrt{L_1 L_2}$$
  
 k: 結合係数

第2図 結合の等価回路模式図

電磁誘導方式の場合は磁界共振結合方式に比べ、結合係数kが伝送効率に対して支配的である。そのため、通常のトランスの設計と同様に結合係数と個々のコイルのインダクタンスLをいかに高めるかが重要になる。一方、磁界共振結合方式ではインダクタンスLを高めるのみならず、共振によるエネルギー伝送を高めるためコイルのQ値が重要なファクターとなる。Q値とLは式(1)のような関係がある。

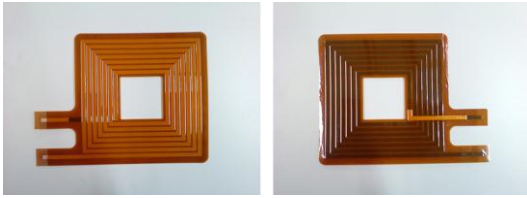
$$Q = \frac{\omega L}{R} \quad (1)$$

インダクタンスLやQ値を上げるためにはコイルの巻き数を増やせばよいが、同時に抵抗Rを上げることにするとともに寄生容量が発生し、共振条件設定におけるCのコントロールにも影響を与える。磁界共振結合方式ではMHz帯を用いてQ値を高めるが、電磁誘導方式で用いるkHz帯においては損失となるコイルの抵抗RとLの設定が重要な設計ファクターとなる。

一方、省スペース化及び軽量化のためには銅の表皮効果を利用することによりコイル厚みを薄くすることが可能である。コイル厚みを薄くすれば副次的な効果として実装形状の自由度が期待できる。実装形状に自由度が高まれば位置ずれや角度ずれにコイル形状の側面からロバスト性を追求できる可能性が発生する。

以上を踏まえ、ポリイミドのフレキシブル基板上に銅箔によって形成したコイルを試作した。試作コイルを第3

図に示す。コイルサイズは外形 90mm 角、巻き数は 7 巻とした。



第 3 図 試作コイル(左:表面、右:裏面)

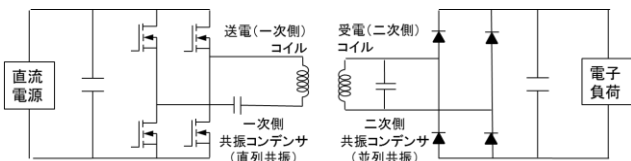
表皮効果を利用することによりコイルを薄くすることができるが、表皮深さを超えて薄くすると、伝送効率を低下させる抵抗の増大につながる。フレキシブル基板に一般的に使用される圧延銅箔の厚みは 35 $\mu\text{m}$  であるが、試作したコイルの銅箔厚みは 160 $\mu\text{m}$  とし、さらに 20 $\mu\text{m}$  の銅めっき層を形成した。この厚みに相当する表皮深さを持つ伝送周波数は 100kHz $\sim$ 200kHz 程度となる。

試作コイルのインダクタンスの測定値とシミュレーションによる設計値との比較を表 1 に示す。ほぼ設計意図どおりの試作結果となっている。

第 1 表 試作コイルのインダクタンス(100kHz)

	インダクタンス( $\mu\text{H}$ )
製造結果	4.24
設計値	3.88

この試作コイルを用いた伝送試験のスキーマチックを第 4 図に示す。



第 4 図 伝送試験スキーマチック

試験ではコイルインダクタンス向上のため、送信側及び受信側とも試作コイルの 3 層重ねで試験を行った。共振方式としては、電磁誘導方式において優れるとされる一次側に直列共振、二次側に並列共振を採用した。

伝送効率計測には、今回はネットワークアナライザ等を用いずに直流電源の電圧及び電流の出力指示値と電子負荷の電圧及び電流指示値を用いた。即ち以後のデータは一次側のスイッチングによる損失と二次側の

整流による損失を加えた伝送効率である。なお送信電力は 50W を超えないように電子負荷設定により調整を行った。

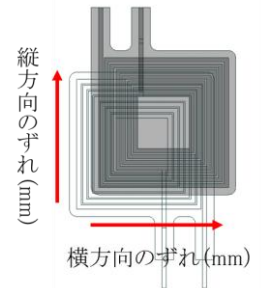
#### 4 試験結果

第 5 図に重ね合わせた送信コイルと受信コイルの位置ずれに対する伝送効率計測の概念図を示す。

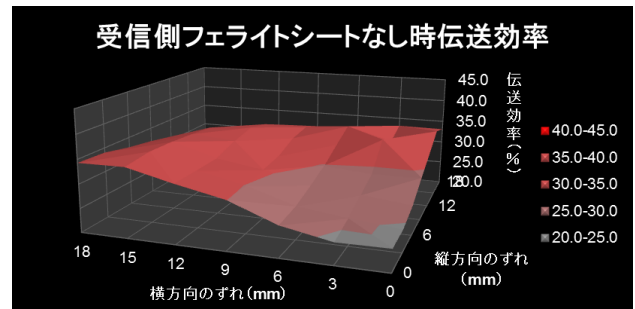
伝送電力は、数 W レベル(電源電圧を 12V)、共振周波数は 120kHz、初期伝送距離は 0mm とし、3mm づつ縦方向及び横方向にそれぞれ 18mm(コイルサイズの 1/5)

までずらしたときの伝送効率をマトリクス的に計測した。

第 6 図に結果を示す。



第 5 図 位置ずれの計測



第 6 図 低電力伝送における位置ずれの伝送効率に及ぼす影響

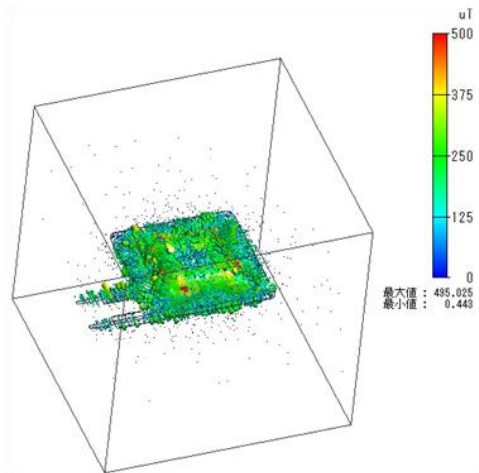
位置ずれ 0mm $\sim$ 3mm 程度の時の伝送効率が 25% 程度にとどまるのに対し、縦横いずれも 15mm 程度の位置ずれを生じさせると伝送効率は 35% 程度まで上昇する。これはコイルが空心かつ平板であるために近距離の伝送では受信側に効果的に鎖交する磁束密度の高い位置がコイル中心にないことを示している。

第 7 図に、このコイルに 1A を通電した時の磁束密度のシミュレーション結果を示す。磁束密度の高い部分はコイル内周付近に分布しており、これは試験結果に対応する。この性質を利用し位置ずれに強いシステムを構築できる可能性がある。

#### 5 伝送効率の改善検討

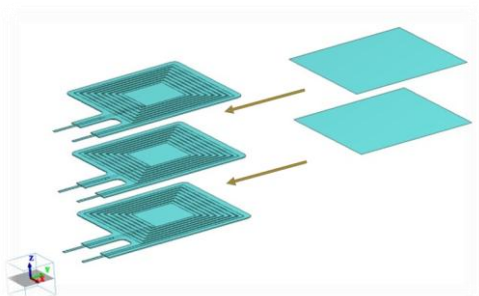
前項の結果より、平板で空心のコイルは位置ずれに強い傾向があるものの、伝送効率の観点では、スイッチング及び整流による損失を考慮してもかなりの低効率と

なった。伝送効率の改善のため、磁束を効果的に受信側に鎖交させるため受信側にフェライトシートを組み合わせることを検討した。



第7図 コイルの磁束密度分布

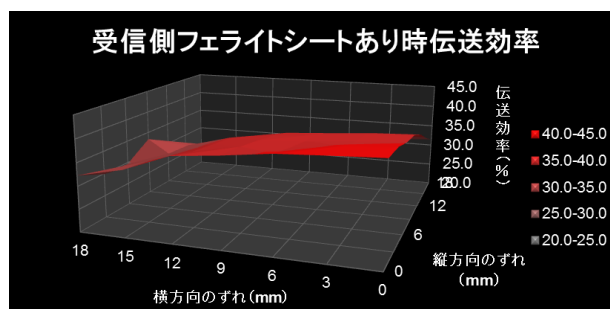
フェライトシートは100kHz～300kHzで $\mu=480$ 程度を有するものを、第8図に示すように受信側の積層したコイル間に実装した。この結果、コイルのインダクタンスはシートなしの場合3層で34.7 $\mu\text{H}$ から53.8 $\mu\text{H}$ に向上した。



第8図 コイルとフェライトシートの組み合わせ

第9図に受信側にフェライトシートを組み合わせたときのコイルの位置ずれと伝送効率の計測結果を示す。フェライトシートの組み合わせの結果、磁束がコイル中心部に集中し、位置ずれのない時に伝送効率が最大となっていることがわかる。フェライトシートの採用により、伝送効率は最低でも30%以上、位置ずれのない時で40%以上に向上した。

空心コイルの位置ずれに対するロバスト性を利用しつつ、伝送効率を高めるためのフェライトシートの実装には、その実装形態に今後の検討課題があると考えられる。



第9図 フェライトシート位置ずれの伝送効率に及ぼす影響

## 6 距離と位置ずれの総合評価

受信側にフェライトシートを組み合わせた状態で電源電圧を宇宙機のバスで多く使用される50Vに設定し、位置ずれと伝送距離のギャップにおける総合的な伝送特性を取得した。この結果、距離0mm位置ずれ0mmの初期状態で伝送効率20.5%の状態から、距離20mm位置ずれ縦横9mmの状態では伝送効率17.4%（初期に対し85%）を維持できることを確認した。

## 7 まとめ

非接触電力伝送の宇宙用への適用要件を検討し、電磁誘導方式による省スペース・軽量のフレキシブル平板コイルを試作、その伝送特性を計測した。このコイルをベースとし、引き続き位置・角度ずれに対する特性と伝送効率の向上をめざすとともに宇宙用としての耐環境評価を検討する予定である。

## 8 参考文献

- [1] 安倍秀明、田村秀樹、北村浩康、井上博允、坂本浩、原田耕介「携帯機器用非接触充電システム」、信学技報、EE98-64(1999-01)
- [2] 高橋俊輔「EV用ワイヤレス給電システムにおける効率向上」、信学技報、WPT2012-22(2012-11)
- [3] 谷屋明彦、小林茂、堀内雅城、横井行雄「磁界共鳴ワイヤレス電力伝送における電磁界シミュレーションと磁界分布計測の対比評価」、信学技報、WPT2010-14(2011-01)
- [4] 白澤洋二、森治、奥泉信克、澤田弘崇、横田力男、田中孝治、豊田裕之、他「ソーラー電力セイルの大型セイル膜面開発およびその収納・展開方法の検討」、第13回宇宙科学シンポジウムP2-128、2013年1月
- [5] 居村岳広、内田利之、堀洋一「非接触電力伝送における電磁誘導と電磁界結合の統一的解釈」、電気学会自動車研究会、VT-09-007、2009年1月