

探査機による惑星と宇宙空間の磁場観測

松岡彩子¹, 篠原 学², 田中良昌³, 藤本晶子⁴, 寺本万里子⁴, 野村麗子⁵, 村田直史⁵
(¹京大, ²鹿児島高専, ³極地研, ⁴九工大, ⁵JAXA)

Measurement of the magnetic fields at the planets and in the space by the spacecraft

A. Matsuoka¹, M. Shinohara², Y. Tanaka³, A. Fujimoto⁴, M. Teramoto⁴, R. Nomura⁵, N. Murata⁵
(¹Kyoto Univ., ²Kagoshima Nat. Inst. Tech., ³NIPR, ⁴Kyushu Inst. Tech., ⁵JAXA)

はじめに

太陽からは常にプロトンと電子を主成分とする電離気体（プラズマ）である太陽風が放出され、太陽系内の空間を満たしている。太陽風は惑星に吹き付け、相互作用を起こすことによって惑星の環境にも大きな影響を与えている。宇宙空間に存在する最も普遍的な物質であるプラズマに起こる様々な現象は、その場に探査機を送り込んで直接観測することによって研究されてきた。物理過程の解明には、プラズマそのものだけでなく、プラズマの挙動を決める磁場や電場を観測することが必須である。中でもフラックスゲート方式の磁力計を用いた直流から低周波の磁場の観測は、宇宙探査の黎明期である1950年代末に始まり今日まで盛んに行われている。この間、フラックスゲート磁力計には様々な改良が重ねられ、現在も多くの探査機に搭載されている。

水星探査機 BepiColombo 「みお」とジオスペース探査衛星「あらせ」

宇宙における磁場、そしてプラズマの観測は、近年、より難易度の高い領域へ踏み出しつつある。太陽に最も近い惑星である水星や、地球の放射線帯は、放射線環境が極めて厳しく観測器や探査機を劣化させるため、長い間探査が進まなかった。更に水星は、太陽からの輻射熱が地球の場合の10倍の環境にあり、探査機は極端な高温および低温環境にさらされる。このような高い放射線や極端な温度の環境の宇宙領域を探査するために、我々は耐放射線性を高めた宇宙機搭載用の磁力計を開発し、極端な温度環境における性能試験を行った²⁾。開発・試験した磁力計を、日欧共同の水星探査計画である BepiColombo 「みお」衛星 (Fig. 1) と、地球の放射線帯の生成と消滅過程の解明を目指したジオスペース探査衛星「あらせ」 (Fig. 2) に搭載した^{3), 4)}。「あらせ」衛星の磁力計は打ち上げ後7年以上経過した現在も順調に観測を続け、多くの目覚ましい成果をあげている。「みお」衛星は2018年の打ち上げ以降、2025年12月に水星周回軌道に入るまで惑星間空間を巡行中である。これまで水星とのフライバイを既に3回行い (2024年6月時点)、内部太陽圏の高温・高放射線環境にさらされているが、磁力計は順調に動作している。本講演では、このように宇宙の特に厳しい環境における磁場観測を可能にした磁力計の開発と成果を紹介する。

火星衛星探査計画 MMX と長周期彗星探査計画 Comet Interceptor

磁場観測に限らず、宇宙機で挑戦的なミッションを実施する時、厳しい質量や電力の制約に直面する。我々は、従来の二次高調波による平



Fig. 1 水星探査計画 BepiColombo 「みお」衛星と搭載磁力計センサ (衛星の図は JAXA 提供)

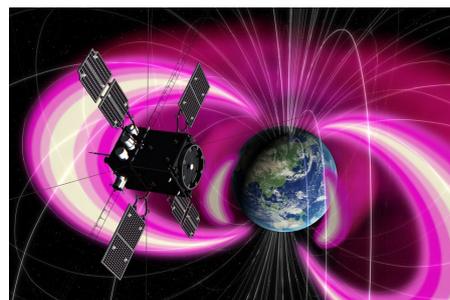


Fig. 2 ジオスペース探査衛星「あらせ」 (提供: JAXA)



Fig. 3 「あらせ」衛星に搭載した磁力計⁴⁾。左: 回路部、右: センサ部

行フラックスゲート方式よりも軽量・省電力を可能とする、宇宙機搭載用の基本波型直交フラックスゲート磁力計（FM-OFG）を開発し、将来ミッションに搭載する計画を進めている。FM-OFG は、極細のアモルファスワイヤをコアとして用いることにより、超軽量のセンサを実現している。2026年に打ち上げて火星の衛星フォボスの探査を行う Martian Moons Exploration (MMX)と、2029年頃に打ち上げて長周期彗星の探査を行う Comet Interceptor (CI) に FM-OFG を搭載する準備を行っている^{5),6)}。MMX は火星衛星の成因を解き明かすことを目的としたミッションであり、CI は太陽による変性を受けていない長周期衛星を調査し初期の太陽系についての情報を得ることを目指したミッションである。我々は磁場を測定することによって、これらのミッションの達成に貢献する。本講演では、FM-OFG の特徴とそれにより可能となる将来の宇宙ミッションを紹介する。

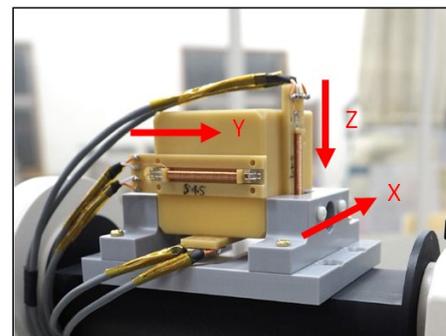


Fig. 4 FM-OFG センサ試験モデル⁵⁾

参考文献

- 1) D. Gordon and R. Brown, IEEE Transactions on Magnetics, MAG-8, 1 (1972) 76.
- 2) A. Matsuoka *et al.*, An Introduction to Space Instrumentation, (2013) 217.
- 3) W. Baumjohann *et al.*, Planetary and Space Science, 58 (2010) 279.
- 4) A. Matsuoka *et al.*, Earth, Planets and Space, (2018) 70:43.
- 5) S. Yokota *et al.*, Earth, Planets and Space, 73 (2021) 216.
- 6) G. Jones *et al.*, Space Science Reviews (2024) 220:9.

磁気インピーダンスセンサーによる地磁気微小変動観測

能勢正仁

(名古屋市立大学データサイエンス学部)

Geomagnetic Field Measurements with Magneto-Impedance (MI) Sensor

Masahito Nosé

(Department of Data Science, Nagoya City University)

基礎実験

磁気インピーダンス(Magneto-Impedance, MI)効果は約30年前に発見され、この効果を利用したマイクロサイズの磁気センサーが市販されている。こうした磁気センサーは、電子コンパス、食品工場での金属製異物検知や駐車場で車体検知などに用いられており、自然の微小な磁場変動を計測する用途にはほとんど使われてこなかった。そこで、市販のMIセンサーにいくつかの改良を加え、地磁気のダイナミックレンジ($\pm 50,000$ nT)をカバーし、数秒~1日の時間スケールで1 nT~数10 nT程度の振幅を持つ微小地磁気変動を計測できるセンサーを作製した。地磁気はベクトル量なので、その変動を表すには3つのMIセンサーが必要であるが、それらの総コストは、改良費用を含めても3軸フラックスゲート磁力計(Fluxgate Magnetometer, FGM)センサー標準価格の約1/3である。

2018年3月30日から4月27日の約1か月間、京都の北西約100 kmに位置する峰山観測所において、MIセンサー磁力計(MI Magnetometer, MIM)による地磁気変動のテスト観測を行った。MIMで得られたデータを、同観測所のFGMで得られたデータと比較したところ、磁気嵐、太陽静穏時(Solar quiet, Sq)変動、低緯度湾型変化、磁気嵐突発現象(SSC)、長周期地磁気脈動といった様々な自然現象について、MIMはFGMと同様に、微小な変動をきちんと計測できることが明らかになった(Figure 1)。計測した地磁気変動のパワースペクトルについて両者を比較すると、0.1 mHz~30 mHzの広い周波数範囲でほぼ同じであった。これは、数十秒から数時間の地磁気変動の測定において、MIMは安価であるのにも関わらず、その性能はFGMの性能に匹敵し、超高層物理学や太陽地球物理学の研究に利用できることを示している。一方で、気温に対する安定性を調べたところ、MIMの温度係数は10~18 nT/degとなり、FGMよりもかなり大きな温度ドリフトを持つため、温度計測データによる補正が必要であることが分かった。

廉価な磁場観測システムの製作と関東-東北-北海道への稠密観測ネットワークの構築

上記の基礎実験では、A/Dコンバーター(ADC)やデータロガーなどは計測メーカー品を用いていたが、それらを一般電子部品やRaspberry Pi4を用いて自作し、データ収録プログラムもPythonで開発することで、廉価な自然磁場観測システムを製作することにした。センサー、ADC、ロガー、ケーブルなどを含めて一式約40万円に抑えることができ、これをMIM-Pi(MI Magnetometer using Raspberry Pi)と名付けている。これまでに、MIM-Piを4台製作し、2022年9月から川渡(宮城県大崎市)、2022年11月から白神(青森県西目屋村)、2023年6月からむつ(青森県むつ市)、2023年11月から苫小牧(北海道苫小牧市)にて観測を継続している。観測データは1日1度の頻度でクラウドサーバー上にアップロードされている。

これらの4観測所のMIM-Piによる地磁気変動データに加え、関東-東北-北海道地域に分散する9観測所では気象庁、国土地理院、名古屋大学がフラックスゲート磁力計による地磁気変動データを取得しており、最大13観測所からの地磁気同時観測データが利用可能になっている(Figure 2)。緯度方向に展開した観測ネットワークとしては、世界でも類を見ないほど稠密なものであり、これらのデータを使って地磁気脈動の性質を調べれば、宇宙空間プラズマの質量密度の微細構造を可視化できると期待している。

科学観測ロケットへの搭載と電離圏での磁場変動観測

MIセンサーの飛翔体上での機能実証を目的の一つとして、2022年3月5日に米国アラスカ州のPoker Flat Research Range上空で、世界で初めて科学観測ロケットに搭載したMIセンサーによる地磁気観測を行っ

た。このロケットは、明滅するオーロラとそれを発光させる電子を計測することを目的としたLAMP (Loss through Auroral Microburst Pulsations)ロケットと呼ばれるもので、高度約430 kmの電離圏に到達するような放物線軌道で飛翔した。約10分間の飛翔中、搭載したMIセンサーは継続して地磁気データを取得できた。

データを解析したところ、明滅オーロラの輝度上昇時には15–25 nT程度の磁場変動が現れていた(Figure 3)。モデル計算との比較から、明滅オーロラの小区画(パッチ)に伴う沿磁力線電流の構造、すなわち小区画の端に電流が流れており、その向きは高緯度側で下向き、低緯度側で上向きであることが明らかになった。

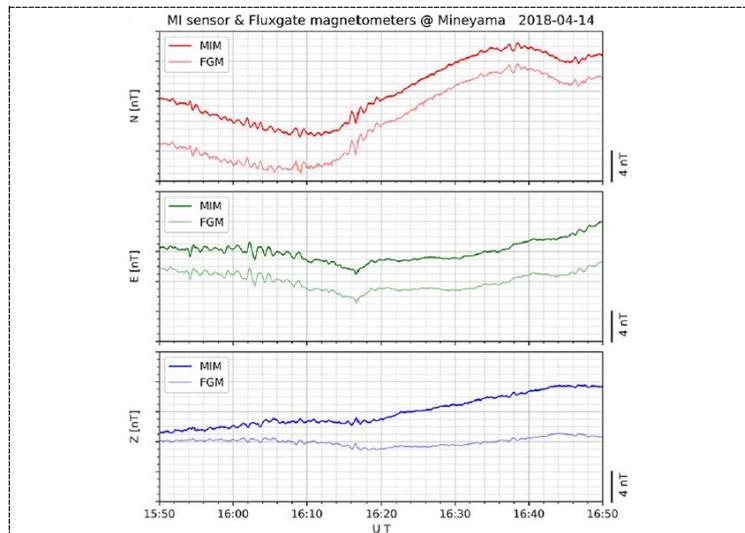


Figure 1. A plot of geomagnetic field variations measured with the MIM and FGM at Mineyama for 15:50–16:50 UT on April 14, 2018. A series of geomagnetic pulsations appeared. (Adapted from Nosé et al. (2022))



Figure 2. Latitudinal geomagnetic observatory network composing of 4 MIM stations (red) and 9 FGM stations (orange).

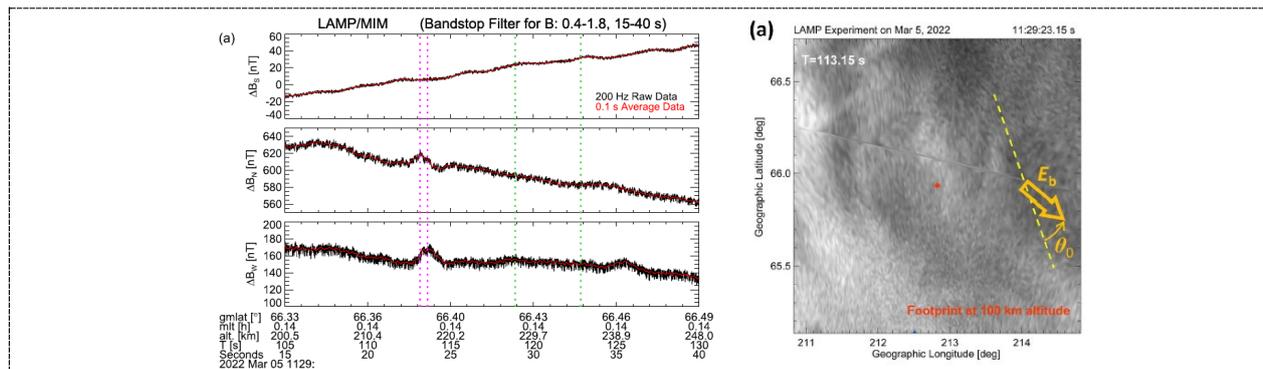


Figure 3. (Left) The magnetic field deviation from the model field measured with MIM during 11:29:15–40 UT ($T = 105$ – 130 s). Data are displayed in despun coordinates. Black lines delineate the 200 Hz raw data and red lines show 0.1-s average data. (Right) A composite image of a pulsating aurora captured at Venetie and Poker Flat at 11:29:23.15 UT ($T = 113.15$ s). The image is projected onto 100-km altitude plane. A yellow dotted line shows the direction of the major axis of the pulsating auroral patch. (Adapted from Nosé et al. (2024))

参考文献

- 1) [Nosé, M.](#), T. Kawano, and H. Aoyama, Application of magneto-impedance (MI) sensor to geomagnetic field measurements, *Journal of Geophysical Research*, 127, 2022. doi:10.1029/2022JA030809
- 2) [Nosé, M.](#), K. Hosokawa, R. Nomura, M. Teramoto, K. Asamura, Y. Miyoshi, T. Mitani, T. Sakanoi, T. Namekawa, T. Kawano, Y. Iwanaga, S. Tatematsu, M. Hirahara, A. Halford, M. Shumko, M. R. Lessard, K. Lynch, N. Paschalidis, A. N. Jaynes, and M. G. McHarg, Field-aligned currents associated with pulsating auroral patches: Observation with Magneto-Impedance Magnetometer (MIM) onboard Loss through Auroral Microburst Pulsations (LAMP) sounding rocket, *Journal of Geophysical Research*, 129, 2024. doi:10.1029/2023JA032232

地球惑星科学における磁気センシング技術

空中・海上・海中探査と微小領域分析の現状と将来可能性

小田啓邦

(産総研 地質調査総合センター)

Magnetic sensing technologies in Earth Sciences: Current status and future prospects
on explorations in air, on sea-surface and under-water, and microanalyses of geological samples

H. Oda

(Geological Survey of Japan, AIST)

本講演では、地球惑星科学における磁気センシング技術、その現状と将来可能性について紹介と解説をさせていただきます。最初に、空中・海上・海中における磁気探査（本講演では講演者が専門とする静磁場のみ）を紹介させていただき、次に微小領域における磁気分析について紹介をさせていただきます。また、これらに先だって、考え方の基礎となる知識を解説させていただきます。

地球惑星科学において、それぞれの地域に分布する地質体を構成する岩石・鉱物・物質を知るには、地表面に露出している物質や構造を観察し、試料を採取して必要な分析を行うことが調査の出発点となる。地質調査総合センターでは、これら情報を空間的・時間的に統合解釈し、地質図幅を作成するとともに、地質発達史の復元と解説を試みる。現代では、人工衛星や航空機などから電磁波を用いたリモートセンシングによって、地表面や海面・海中の様々な情報を得ることも可能であり、広範囲にわたる地質体の効率的な情報収集も可能となってきた。また、地下の情報を得るために様々な物理探査手法が開発されてきたが、特に弾性波（地震波あるいは音波）探査・磁気探査・重力探査は伝統的かつ主要な手法である。これら手法はある地域の地質体に同時に用いることによって補完的に地質体の情報を有効に引き出すことが可能となる。

本講演では、特に磁気センシング技術を用いた磁気探査に注目をするが、その上で、現在と過去の地球磁場および岩石の磁気特性について理解をすることは重要である。地球磁場は地球の中心に置かれた磁気双極子で近似されるが、地表の各観測点における磁場強度と方位は、刻一刻と変化している（地磁気永年変化）。この変化しつつある地磁気の標準値と予測値が国際標準地球磁場（IGRF）であり、専門家によって5年に一度決定される（IGRF-13; Alken et al., 2021¹⁾）。各地点で実際に観測される地磁気から国際標準地球磁場を差し引いた値が磁気異常となる。この磁気異常のうち長波長成分を世界的にとりまとめたものが世界デジタル磁気異常図（WDMAM v2.1; Choi et al., 2023²⁾）である。人工衛星のデータなどによって精度が上がってきているが、陸域から遠い海域などの精度にはまだ改善の余地がある（小田, 2022³⁾）。磁気異常には全磁力異常と三成分磁気異常が存在するが、周波数計測に基づく光ポンピング磁力計などが高精度であることもあり、地球惑星科学分野では全磁力異常値を用いる場合が多い。また、岩石の磁気異常成分には常に地磁気方向を向く誘導磁化とそうでない残留磁化がある。残留磁化には正帯磁と逆帯磁（現在の地磁気と逆方向）があるため、これらの解釈も重要となる。空中・海面・海中での磁気探査では、電磁ノイズのみならず、移動体が静磁場を発生するため、これらの低減や補正も重要となる。さらに本講演では、講演者達が開発した走査型 SQUID 磁気顕微鏡（Oda et al., 2016⁴⁾）の紹介と、海底鉄マンガングラスト試料などへの応用研究事例を紹介する。

参考文献

- 1) Alken, P., et al. (2021) International Geomagnetic Reference Field: 13th generation. *Earth Planets Space*, **73**, 49.
- 2) Choi, Y., et al. (2023) World Digital Magnetic Anomaly Map version 2.1, map available at <https://www.wdmam.org/>.
- 3) 小田啓邦 (2022) 世界磁気異常図と日本の貢献, *GSJ 地質ニュース*, **11**, 31-41.
- 4) Oda, H., et al. (2016), Scanning SQUID microscope system for geological samples: system integration and initial evaluation, *Earth Planets Space*, **68**, 179.

海洋における磁気センサの利用と今後の期待

西村直喜

(株) 島津製作所 産業機械事業部 ジオサイエンス部

Use of magnetic sensors in the ocean and future prospects

N.Nishimura

Shimadzu Corporation

Geoscience Department

Industrial Machinery Division

はじめに

近年、場としての海洋領域が、地政学的リスク、地球温暖化等で注目されている。そこで、地球科学的観点からこれまで海洋で利用されてきた磁気センサを整理し、企業側から見た、地磁気環境下で利用可能な磁気センサについて、これからの使われ方と新しい技術によるセンサに期待する機能、性能を当社の事例を交えながら、研究サイドへの要望も含めて解説してみたい。

海洋等の地磁気下における磁気計測

磁気センサを地磁気環境下で使う場合、ご承知の通り測定対象物の磁気+地磁気がセンサに入力される。そのため必要なゲインは地磁気より広くなければ、センサ出力は飽和するため、測定対象物の磁気は測定できない。地磁気は連続的に、国土地理院、気象庁で測定されており、日本近辺での全磁力の値は、45,000nT ~ 51,000nT とされている (図 1)。

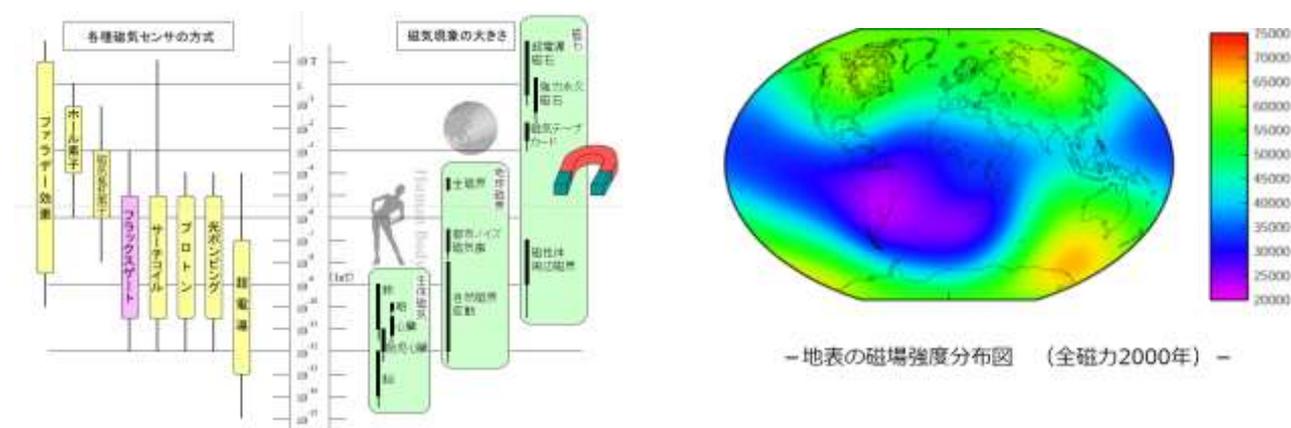


図 1. 磁気センサの種類, および, 地表の磁場強度分布図¹⁾

地磁気の観測にはこれまで、プロトン磁力計 (全磁力) およびフラックスゲート三軸磁力計 (地磁気の三成分) を用いて測定されることが多かったが、水中環境下において、特に感度、大きさ、消費電力の課題があった。課題解決のためには、SQUID の感度に迫りかつ、小型低消費電力な磁気センサが必要であり、最近開発が進んでいる量子磁気センサへの期待が大きい。本講演では、当社で販売している従来磁気センサ (フラックスゲート三軸磁力計) を用いた海中等の地磁気環境下での磁気計測に関する結果とその課題、新規磁気センサおよびセンシング技術への期待について述べる。

参考文献

- 1) 気象庁 地磁気観測所 HP より

海中における電磁波センシング

高橋 応明
(千葉大学)

Sensing using RF signals under the sea

Masaharu Takahashi
(Chiba University)

近年、我が国では海洋の様々な利用方法が検討され始め、新たな海洋産業の創出を支えるための技術開発が進んできている。従来、海洋における無線通信では一般的に音波が利用されてきた。これは音波が電波や光波に比べて海水中における減衰が小さく、遠方での通信に適しているためである。しかし、音波の海水中における伝搬速度は約 1.5 km/s であり、海中の電磁波伝搬速度に比べて 20 万分の 1 程度とかなり低速である。また、海面や海底などからの多重反射の影響も大きく、海水温度や塩分濃度、深度による回折の影響も考慮すべき問題である¹⁾。最近では光波に関する研究も盛んであるが、海水中の濁りによる散乱減衰が大きく、通信速度の不安定性といった観点から限定的な仕様に限られている。電波は海水中での減衰が大きいため、海水中の通信は困難だと考えられていた。しかしながら、昨今は国内外における海中電磁界応用に関する研究は、精力的に行われている。これは、デバイスや通信技術、解析技術の進展により、測定や解析のダイナミックレンジを十分に確保することが可能になったことが大きい。

我々は、海水の減衰量の大きさを逆手にとり、近距離ではあるが海水中の反射波や回折波の影響が少なく音波よりは高速な通信が可能と判断し、海水中、特に浅海における電磁波利用を考えている²⁾。海水中における電波利用の 1 つとして、インフラの点検や水難救助の補助などへの適用を考えており、ダイバーや AUV(Autonomous Underwater Vehicle)との通信や位置推定に有用と考える。

海中の電磁波伝搬は、河川とは大きく異なる。海水の電気定数は $\epsilon_r = 80$, $\sigma = 4.0 \text{ S/m}$ 、淡水では $\epsilon_r = 80$, $\sigma = 11.15 \text{ mS/m}$ 程度となっており、比誘電率が非常に高いだけでなく、海水では導電率つまり伝搬損が桁違いに大きい。最近の測定器のダイナミックレンジを 100dB とすると、電磁波の伝搬距離と周波数の関係は図 1 のようになる。30m の距離を伝送するためには、河川では 3MHz、海中では 10kHz 以下の電波を使用する必要がある。また、海水の伝搬損が大きいいため、図 2 に示すように、海中を直接伝わる直接波と、海面まで直上に伝わり海面を伝搬するラテラル波が存在し、深度に応じてこの割合が変化する。

電磁波を送受信するアンテナが必要となるが、kHz 帯の電磁波の波長は海水の波長短縮を考慮しても数 km となるため、AUV や人に装備するためには電氣的に極微小アンテナとなり、受信効率が悪くなる。そのため、電磁波を検出する小形で高感度な電界もしくは磁界センサが望まれるが、透磁率が空気中と変わらない磁気センサの方が有望と考える。

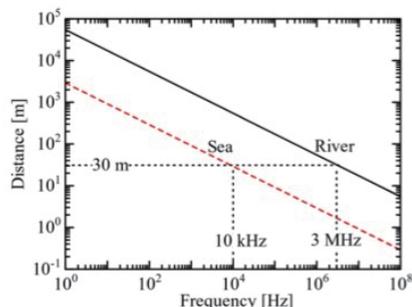


図 1 海中と河川での 100dB 減衰の伝搬距離

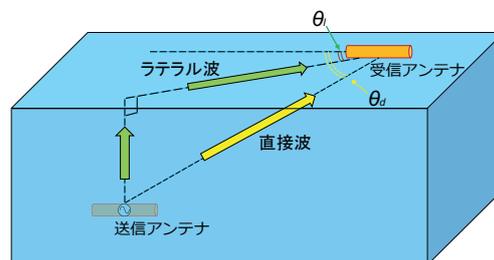


図 2 微小ダイポールアンテナ間の伝搬

参考文献

- 1) 大浜俊樹, 滝沢賢一, 井家上哲史, “海中における電磁波利用無線通信に関する一検討”, 電子情報通信学会技術研究報告, vol.113, no.275, WBS2013-32, pp.k65-70, Oct. 2013.
- 2) Ryosuke Kato, Masaharu Takahashi, Nozomu Ishii, Qiang Chen and Hiroshi Yoshida, “Investigation of a 3D undersea positioning system using electromagnetic waves”, IEEE Transaction on Antennas and Propagation, vol.69, no.8, pp.4967-4974, Jan. 2021.

EV 社会におけるワイヤレス電力伝送技術と磁気技術

藤崎 敬介
(豊田工業大学)

Wireless Electric Power Transmission Technology and Magnetics in EV Society
Keisuke Fujisaki
(Toyota Technological Institute)

EV の構成要素

環境負荷低減技術として EV 社会の実現が期待されており、現時点の現実解としてハイブリッド EV 車が普及している。図 1 は、従来のガソリン車から、HEV 車、BEV 車、走行充電 EV 車、超電導リニアまでの構成の変遷を示したものである。機械工学から電気工学への主要技術の変遷、および車両技術から地上（インフラ）技術への変遷といった潮流がうかがえる。これらの中で経済原理的に実用化するのは、最初のエンジン車と建設中の超電導リニアと言え、部品点数の少なさからいって納得できる^{1,2)}。

車両は移動体で、エネルギーを供給し続ける必要があり、エンジン車ではガソリンなどを車に搭載して移動しているが、超電導リニアでは地上のインフラ設備より車両に電気エネルギーを供給して駆動している。ガソリンなどはエネルギー密度が高いので、車の搭載は可能であるが、現行のバッテリーのエネルギー密度の低さを考えると、バッテリーのみ駆動は現時点では難しいところがある。

ワイヤレス電力伝送と磁気技術

電気エネルギーのエネルギー伝達方法は、電磁場を介しての非接触作用で、モータがその例といえる。移動体へのエネルギー供給を機械的な接触で行うと、アークの発生や摩耗が発生し、メンテ、大きさ、安全性の点で望ましくない。DC モータから AC モータへの実質的な推移は DC-M のもつブラシの存在である。このため、地上にある電気エネルギーを車両に供給する方法は、電磁場を介しての非接触作用、つまり非接触充電（ワイヤレス電力伝送）が電気工学の本質的な動向といえる。非接触の充電ができれば、走行充電も実現可能であり、超電導リニアは地上からのエネルギー供給を電磁力付与にしたものといえる。

ワイヤレス伝送では、電磁場現象ではあるが、高周波とは言えそこではモータ同様に「磁気」を介してのエネルギー伝送であり、大きな磁束密度を得、漏れ磁場を少なく集中させるためには、強磁性体の使用が期待される。

しかしここでも動作周波数が MHz 程度と極めて大きく、高周波磁気の問題がパワエレ磁気同様に生じてしまう。本シンポジウムを磁気学会にて開催する意義はそこにあり、多くの研究者への期待がかかっている。

参考文献

- 1) 藤崎敬介編著「モータ駆動システムのための磁性材料活用技術」コロナ社, 2018.9.
- 2) Editor: Keisuke Fujisaki, "Magnetic Material for Motor Drive System", Springer-Nature, 2019.12.

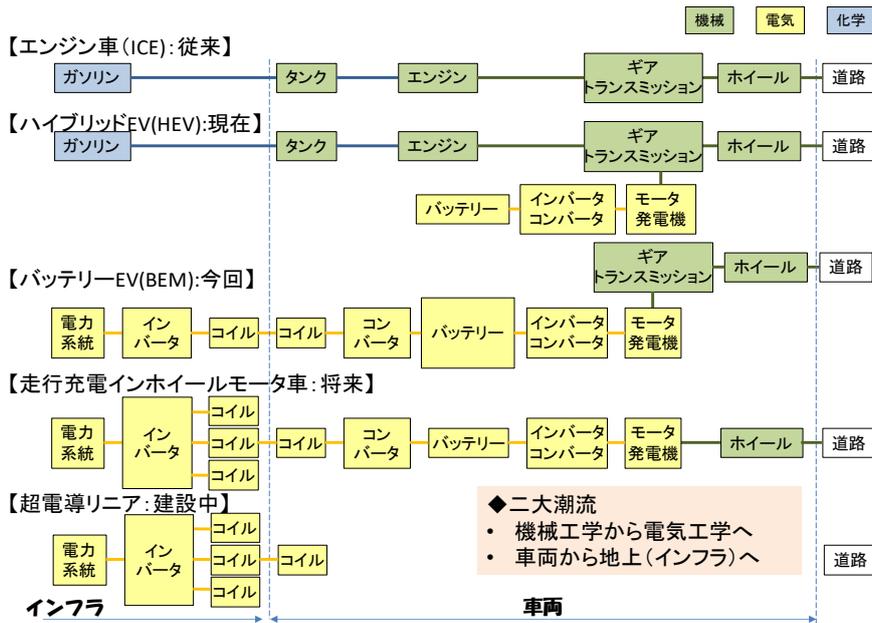


図 1. エンジン車からガソリン車への構成の変遷
(車両とインフラの形態, 主要な要素技術)

温故知新-SDGs ワイヤレス給電の未来への道程

松木英敏、佐藤文博*
(東北大、*東北学院大)

New insights through old experiences: sustainable future of WPT

H. Matsuki and F. Sato*

(Tohoku Univ., *Tohoku Gakuin Univ.)

はじめに

スマートフォンへの WPT が身近に大きな市場を形成し、機械的接触・電気的非接触が主流になっている。WPT のさらなる進展のためには改めてワイヤレスの持つ特質を振り返ることも必要かもしれない。それはやはり「電波」ではなく「場」による機械的非接触 WPT の実現であり、交通分野を例に紹介する。

非接触給電と交通システムとの相性

いわゆる EV に対する給電目的は、電車とは異なり、電動力への給電ではなく搭載蓄電池への充電である。したがって WPT による走行中給電目的は搭載蓄電池の蓄電容量維持とみなすのが適当である。

まず一人乗り EV (以後モビリティと称する) を対象とし、走行中給電区間通過前後で蓄電容量が変化しない条件を求める (Fig. 1)。単位距離走行時の消費電力量 S_{uk} を定義し、給電区間通過時に消費する電力量を走行中 WPT 充電電力で補償したとすればその値 P_c は Fig.1 中に示すようにモビリティ速度 v に比例する値となり、走行中給電区間長 L には依存しない値となる。

給電区間を走行する速度を設定速度 v_c とすれば、その速度前後で蓄電容量の維持状態を制御できることになる。このことを示すのが Fig. 2 である。モビリティ速度 v が設定速度 v_c よりも速ければ電池残量は減少するが、反対に遅ければ電池残量は増加し「満タン」状態に向かうこととなる。したがって制御のための設定値は v_c となる。

Fig. 2 では供給電源を太陽光パネル(ソーラー)とした。ソーラーは電流源であるため、その制御にはもともと蓄電池が必須であり、走行中給電をオフグリッドで構成できる長所がある。

Fig. 3 はそのことを実証するための予備試験結果である。給電区間一カ所を有する走行路を設定し、モビリティによる往復走行を繰り返した結果、給電区間のない場合に比べ往復回数が 2 往復分増加したことが認められた。

Fig. 3 はそのことを実証するための予備試験結果である。給電区間一カ所を有する走行路を設定し、モビリティによる往復走行を繰り返した結果、給電区間のない場合に比べ往復回数が 2 往復分増加したことが認められた。

電動
モビリティ単位距離(1km or 1m)走行時の消費電力量 $S_{uk} \equiv \frac{S_b \text{ [kWh]}}{L_n \text{ [km]}}$
カタログ値で決まる

モビリティ搭載蓄電池定格容量: S_b [kWh]
モビリティ満充電航続走行距離: L_n [km]
モビリティが1km走行するときの単位距離消費電力量: S_{uk} [kWh/km]

消費補償走行中充電電力[kW]
 $P_c \text{ [kW]} = \frac{S_b \text{ [kWh]}}{L_n \text{ [km]}} \times v \text{ [km/h]}$

Fig.1 Power-consumption per unit distance of the mobility.

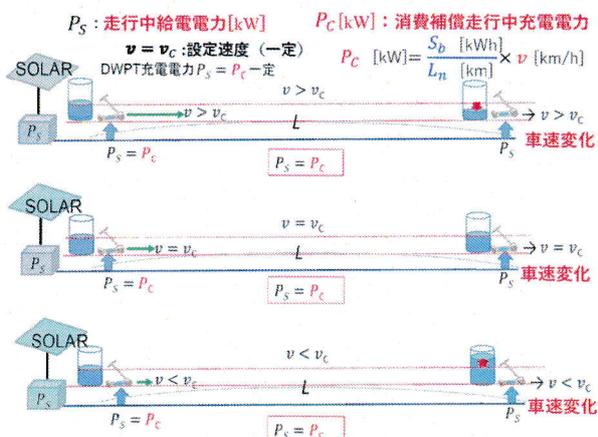


Fig.2 Driving power-consumption compensation utilizing WPT.

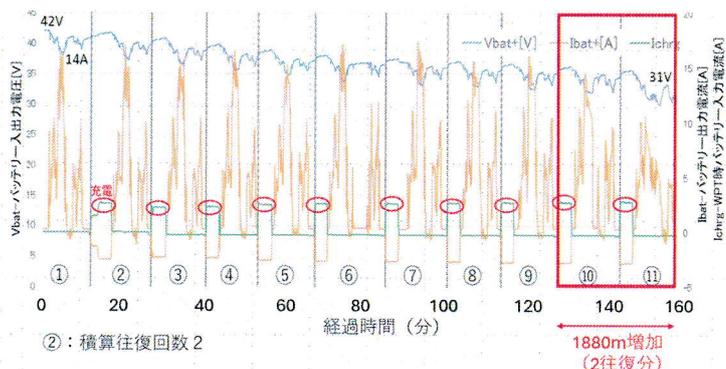


Fig.3 Power consumption compensation effect by the WPT repetition charge.

イノベーションに向かう先進磁気応用の磁界共鳴ワイヤレス給電

細谷 達也

(株式会社村田製作所, 名古屋大学)

Magnetic field resonance wireless power transfer using advanced magnetic applications for innovation

Tatsuya Hosotani

(Murata Manufacturing Co., Ltd., Nagoya University)

はじめに

近年、ワイヤレス給電 (WPT, wireless power transfer) の研究開発は活発化している。電気接続なしに電力を供給するワイヤレス給電の機能は、様々な製品や用途に展開できる。これまでにない製品や新しいビジネス、そして新産業を期待する。革新的な技術や発想により新たな価値を生み出して社会に大きな変化をもたらすイノベーションにより、未来社会や産業の発展に貢献することを目指す。

本稿では、イノベーションを志向するワイヤレス給電テクノロジーの概要を示し、磁気応用による先進的な磁界共鳴ワイヤレス給電の開発事例を解説する。

ワイヤレス給電テクノロジーと新しい事業開発

ワイヤレス給電による新しい事業開発では、提供技術による顧客価値の創造が必要である。商品やサービスによる付加価値と収益とを整合させ、社会価値と経済価値の好循環を生み出す。用途開拓では、多くの場合、利便性だけでは経済合理性の成立は難しい。有線給電は、①電力効率、②シンプルさ、③コストにおいてワイヤレス給電よりも圧倒的に優れる。イノベーションを目指す新規事業開発では、市場や顧客のニーズよりも強いペインポイントが必要である。ペインポイントは、「お金を払ってでも解決したいポイント」と定義できる。新しい事業開発では、1.テクノロジーの進化、2.ペインポイントを捉えた課題設定、3.複数企業が協働して新しい価値を創る共創事業の3つが成功の鍵となる。開発プロセスでは、①優れた課題発見、②課題の深い理解、③技術開発と試作評価のサイクルを回し、仮説検証による軌道修正を繰り返して成功に導く。

ワイヤレス給電テクノロジーをFig.1に示す。事業展開に向けて技術は進化している。筆者らは、ワイヤレス給電の開拓者として、世界に先駆けて、1994年に磁界共鳴技術、1995年に電界共鳴技術を開発し、2011年には産業発展を目的に、磁界・電界共鳴技術の実用化に必要な基本的な特許を出願して登録している。ペインポイントを捉えた技術開発により社会課題の解決を目指す。ワイヤレス給電分野では、現在までに国内外300件以上の特許を登録し、新たに特許ライセンス事業なども進めている。

磁界共鳴ワイヤレスの先進開発

磁界共鳴ワイヤレス給電技術の先進開発の事例①、②を解説する。

事例①では、「紙の電子化」、「カード多機能化」を狙う。厚さ0.75mmのカードに受電ユニットを搭載し、例えば、指紋認証電子機能により本人のみが使用できる。高度セキュリティの社会課題を解決する。二次電池ありとなしの両方を開発している。送電では、既存の誘導式読み書き装置 (NFC, Near Field Communication) を利用できる。送電装置の用意は不要である。

事例②では、世界に先駆けて、BMI (Brain Machine Interface) 脳波計装置の開発と、筋萎縮性側索硬化症 (ALS) 患者に向けた臨床試験の準備を進めている。頭蓋骨内インプラントワイヤレス給電によりQOL (Quality of life) を向上させ、有線給電における感染症問題の社会課題を解決する。

先進磁気応用により、事例①は、NFC装置がつくる磁束を利用し、距離40mmの電力伝送に成功している。事例②は、電磁界共鳴の形成により生体適合金属チタン筐体内への給電に成功。解析と実験より、電磁誘導技術と比較して、①脳波計の体積70%以上低減、②金属チタン筐体での電力損失90%以上低減、③温度上昇2℃以内を達成する画期的な成果を得ている。



Fig.1 WPT technology

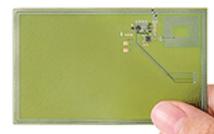


Fig.2 WPT Electronic card

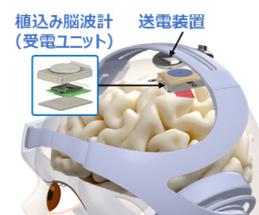


Fig.3 WPT BMI system

走行中ワイヤレス給電の課題と実現可能性についての紹介

居村 岳広
(東京理科大学)

Introduction to the Challenges and Feasibility of Dynamic Wireless Power Transfer

Takehiro Imura
(Tokyo University of Science)

はじめに

走行中ワイヤレス給電 (DWPT : Dynamic Wireless Power Transfer) の実現可能性について、経済成立性、DWPT 用高速独立協調制御、電気特性と機械特性を両立したコイル埋設技術について紹介する。

経済成立性

高速道路に DWPT を導入するに当たって必要な費用算出は DWPT 実現において非常に重要である。透明性のある合理的な情報に基づいた算出を行った結果、現在の技術において約 3 億円/km 程度の見通しを立てることが可能となった。コストの内訳からコイル価格の重要性が示唆される。そして、コイル構成を変更するコスト低減効果が高いことも分かった。

高速独立協調制御

DWPT は 100km/h の高速走行をしながら走行中ワイヤレス給電を行う。1m のコイルの場合、100km/h では 36ms でコイル上を通過する。この間に送電側システムは車両側の受電コイルを検出して電力を送り、受電側は受電電力を制御し、更に車が過ぎ去ったら送電側は電力供給を終えないといけない。これらを通信を基に行うことは安全面、技術面から難易度が高いため、強調しつつお互い独立制御をしなければならない。待機電力を大幅に低減できる速度推定を用いた電力供給技術を開発した。

電気と機械特性を考慮したコイル埋設技術

道路面は走行安全性を担保するため、DWPT はコイルをアスファルト下に埋設する必要がある。停車中ワイヤレス充電はコイルは地面上に設置するために、伝送距離は短く出来るが、DWPT に関しては停車中ワイヤレス充電より必然的に伝送距離がのびるため、効率の低下が生じる。また、道路の影響でコイルの電気特性は悪化する。そのため、効率を向上させ DWPT に必要な電力供給が可能なシステム開発が必要である。一方で、機械特性の観点から最低 10 年以上使える道路設計が必要であり、道路の耐久性についても考慮する必要がある。この電気特性と機械特性の両立が重要となり、20 年を超えるコイルとその埋設方法を開発した。

まとめ

DWPT を実現するに当たって重要な 3 つの課題は、経済成立性、DWPT 用高速独立協調制御、電気特性と機械特性を両立したコイル埋設技術である。これらに対する研究開発の成果について紹介した。

参考文献

- 1) Kanta Kobayashi, Takehiro Imura and Yoichi Hori, "A Method for Reducing Standby Losses by Vehicle Detection and Switching Control in a System Configuration for Multiple Vehicles in Dynamic Wireless Power Transfer", IEEE Wireless Power Technology Conference and Expo 2023(WPTCE), San Diego CA USA, June. 2023.
- 2) Naoya Sasa, Takahiro Yamahara, Seho Kim, Takehiro Imura, Grant Covic, Yoichi Hori, Hiroyuki Mashito, Hiroki Tanaka, "Thermal Modelling of IPT Coil Embedded in Resin for the Roadway", 2024 IEEE WIRELESS POWER TECHNOLOGY CONFERENCE AND EXPO (WPTCE2024), Kyoto, Japan, May. 2024.

MHz 帯 WPT におけるコイル設計例

関屋 大雄

(千葉大学大学院情報学研究院)

Design example of coupling coils for WPT at MHz band

Hiroo Sekiya

(Graduate School of Informatics, Chiba University)

はじめに

6.78MHz, 13.56MHz 等は ISM(Industrial Scientific and Medical Band)バンドと呼ばれる。この周波数帯はパワーエレクトロニクス (以降、パワエレ) においては高周波帯に分類され、したがって、無線電力伝送 (Wireless Power Transfer: WPT) においても高周波パワエレの技術を適用することが重要である。高周波帯パワエレ回路において、もっとも重要なのはスイッチング損失を低減することであり、磁性素子設計はソフトスイッチング条件に拘束される。一方で、結合コイルはそれ自身の損失を最小化することも求められ、高周波 WPT のコイル設計にはこの両面からの条件を満足する最適化が必要である。本稿では、それを実現するための一方法を示し、設計例によりその妥当性を示す。

高周波 WPT

図 1 に WPT の回路モデル例を示す。WPT において、結合コイルは自己インダクタンス、結合係数、等価直列抵抗でモデル化される。ISM バンド WPT においては、磁界共鳴方式を採用し、結合コイルは空芯となる。磁界共鳴方式は受電側で結合コイルの自己インダクタンスと完全共振を取ることで、送電側から見た受電回路の等価抵抗 R_r を大きくする。この等価抵抗 R_r と送電コイルの等価直列抵抗 r_t は直列関係となり、かつ、同じ送電電流が流れることから、この抵抗の比が効率を決める。このとき R_r 、 r_t はともに結合コイルパラメータの関数で表されるため、最適なコイル設計パラメータが存在する。さらに送電コイルの自己インダクタンスはスイッチング損失を低減するための条件を満足しなければならない。

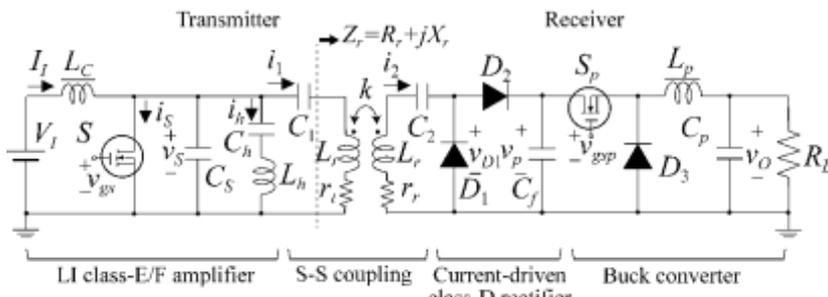


図 1 : WPT 回路構成例[1]

設計例と実装

例えば結合コイルをソレノイド型とする場合、自己インダクタンスは長岡係数を用いた近似式、結合係数 (相互インダクタンス) は Neumann の式、そして、等価直列抵抗は Dowell の式でモデル化することにより、コイルの物理パラメータ (コイル径、コイル長、線径、巻数) から電気パラメータに変換できる。これにより、結合コイルと回路の最適設計を同時に行える。設計仕様として、入力電圧 80V、出力電圧 16.8V、送電周波数 6.78MHz、コイルの許容サイズ直径 50mm、高さ 16mm 中で電力伝送効率を最大化する最適化を行った。その結果表 1 の最適設計値を得た。図 2 に実装回路を示す。実験波形は理論予測と良好な一致を見せ、実験検証により、最適設計が行えていることが確認できる[1]。

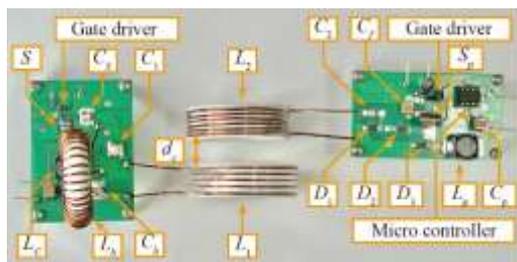


図 2 : 実装回路

表 1 : 最適コイル設計値

N_t	N_r	d_{wt}	d_{wr}
6	6	1.22 mm	1.02 mm

[1] Y. Komiya, et. Al. "Analysis and Design of High-Frequency WPT System Using Load-Independent Inverter With Robustness Against Load Variations and Coil Misalignment," *IEEE Access*, Jan. 2024.