

## 探査機による惑星と宇宙空間の磁場観測

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

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

A. Matsuoka<sup>1</sup>, M. Shinohara<sup>2</sup>, Y. Tanaka<sup>3</sup>, A. Fujimoto<sup>4</sup>, M. Teramoto<sup>4</sup>, R. Nomura<sup>5</sup>, N. Murata<sup>5</sup>  
(<sup>1</sup>Kyoto Univ., <sup>2</sup>Kagoshima Nat. Inst. Tech., <sup>3</sup>NIPR, <sup>4</sup>Kyushu Inst. Tech., <sup>5</sup>JAXA)

### 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<sup>2)</sup>。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<sup>3), 4)</sup>。「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)

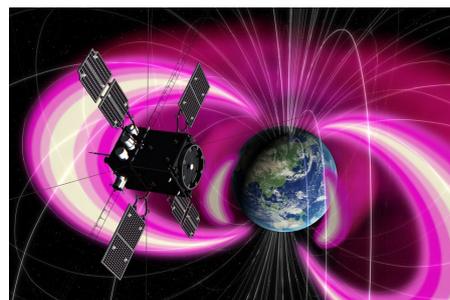


Fig. 2 ジオスペース探査衛星「あらせ」 (提供: JAXA)



Fig. 3 「あらせ」衛星に搭載した磁力計<sup>4)</sup>。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<sup>5),6)</sup>。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。

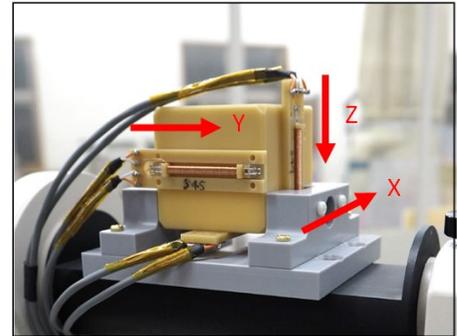


Fig. 4 FM-OFG センサ試験モデル<sup>5)</sup>

### 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。

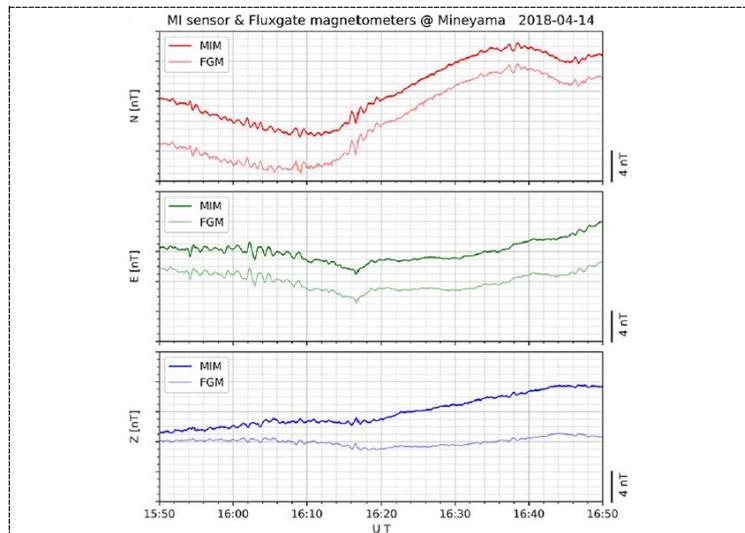
これらの4観測所のMIM-Piによる地磁気変動データに加え、関東-東北-北海道地域に分散する9観測所では気象庁、国土地理院、名古屋大学がフラックスゲート磁力計による地磁気変動データを取得しており、最大13観測所からの地磁気同時観測データが利用可能になっている(Figure 2)。緯度方向に展開した観測ネットワークとしては、世界でも類を見ないほど稠密なものであり、これらのデータを使って地磁気脈動の性質を調べれば、宇宙空間プラズマの質量密度の微細構造を可視化できると期待している。

## 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。

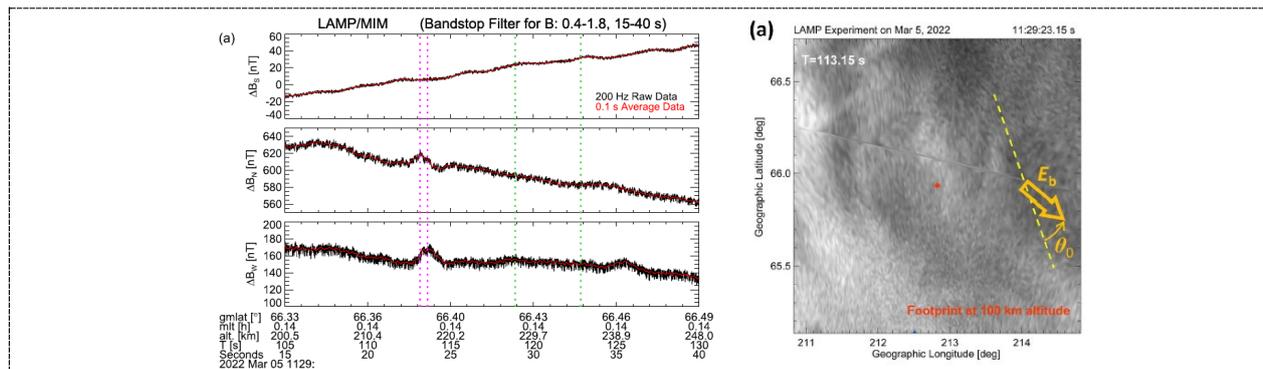
データを解析したところ、明滅オーロラの輝度上昇時には15–25 nT程度の磁場変動が現れていた(Figure 3)。モデル計算との比較から、明滅オーロラの小区画(パッチ)に伴う沿磁力線電流の構造、すなわち小区画の端に電流が流れており、その向きは高緯度側で下向き、低緯度側で上向きであることが明らかになった。



**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., 2021<sup>1)</sup>）。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., 2023<sup>2)</sup>）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, 2022<sup>3)</sup>）。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., 2016<sup>4)</sup>）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)。

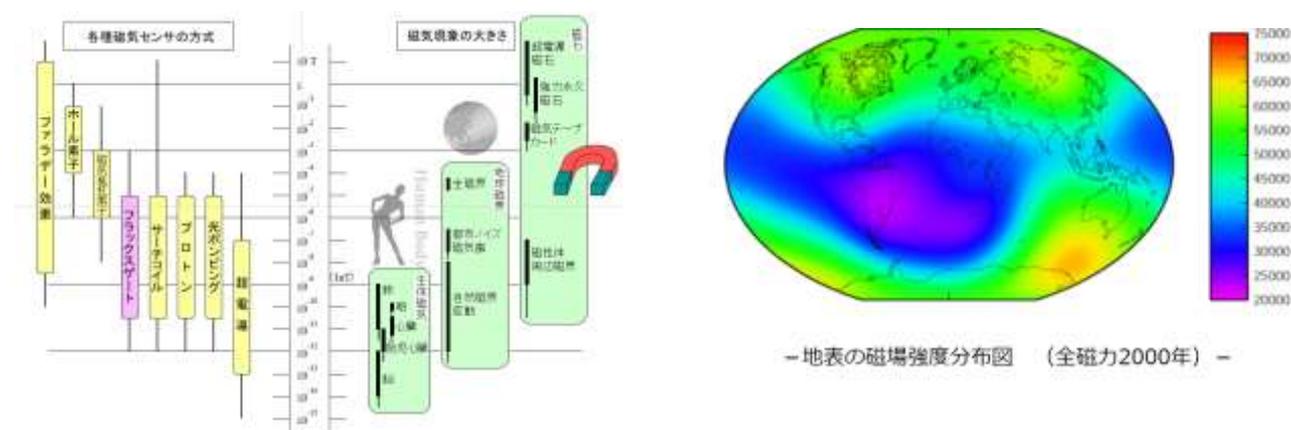


図 1. 磁気センサの種類, および, 地表の磁場強度分布図<sup>1)</sup>

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<sup>1)</sup>。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<sup>2)</sup>。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。

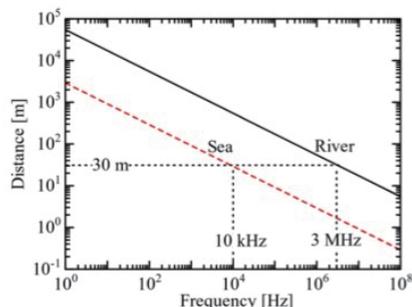


図 1 海中と河川での 100dB 減衰の伝搬距離

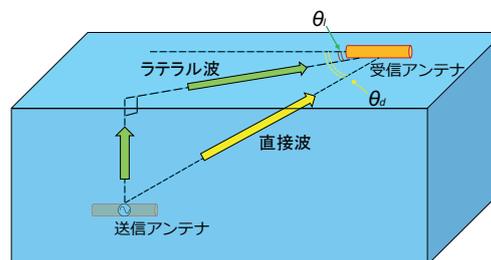


図 2 微小ダイポールアンテナ間の伝搬

## 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.