

磁気インピーダンスセンサを用いた廉価な磁力計の開発: 関東-東北-北海道への稠密磁場観測ネットワークの展開

前田 大輝^{*1}, 能勢 正仁^{*1,2}, 野村 太志^{*1}, 足立 匠^{*1}, 山本 優佳^{*1}, 熊本 篤志^{*3},
石田 祐宣^{*4}, 市原 寛^{*5}, 河野 剛健^{*6}, 岩永 吉広^{*6}, 立松 峻一^{*6}, 浅利 晴紀^{*7},
平原 秀行^{*7}, 海東 恵美^{*7}, 長町 信吾^{*7}, 渡邊 修一^{*8}, 山内 大輔^{*1}

Development of low-cost magnetometer using magneto-impedance sensors: Deployment of dense observation network to Kanto-Tohoku-Hokkaido regions

MAEDA Taiki^{*1}, NOSE Masahito^{*1,2}, NOMURA Hiroshi^{*1}, ADACHI Takumi^{*1}, YAMAMOTO Yuka^{*1},
KUMAMOTO Atsushi^{*3}, ISHIDA Sachinobu^{*4}, ICHIHARA Hiroshi^{*5}, KAWANO Takeshi^{*6},
IWANAGA Yoshihiro^{*6}, TATEMATSU Shunichi^{*6}, ASARI Seiki^{*7}, HIRAHARA Hideyuki^{*7},
KAITO Megumi^{*7}, NAGAMACHI Shingo^{*7}, WATANABE Shuichi^{*8}, YAMAUCHI Daisuke^{*1}

ABSTRACT

In the field of Earth-space science, fluxgate magnetometers have been used to observe variations of the Earth's magnetic field. Fluxgate magnetometers generally cost several million yen or more, making it difficult to deploy an observation network that consists of many observation sites with a limited research budget. On the other hand, magneto-impedance (MI) sensors were invented at Nagoya University in 1993 [Mohri, 1994; Panina and Mohri, 1994]. Nosé et al. [2022] improved MI sensors for scientific applications and showed that they can be used for geomagnetic field measurements. In this study, we developed an inexpensive 3-axis magnetometer (Magneto-Impedance Magnetometer using Raspberry Pi, MIM-Pi) with a price of approximately 1/5 to 1/10 of fluxgate magnetometers, using MI sensors and a one-board PC (Raspberry Pi), and tried to construct a dense observation network in Kanto-Tohoku-Hokkaido regions.

Keywords: Magneto-impedance sensor, Low-cost magnetometer, Dense observation network, Geomagnetic pulsation

* 2023 年 11 月 30 日受付 (Received November 30, 2023)

^{*1} 名古屋大学 宇宙地球環境研究所 (Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University)

^{*2} 名古屋市立大学 データサイエンス学部 (School of Data Science, Nagoya City University)

^{*3} 東北大学大学院 理学研究科 (Graduate School of Science, Tohoku University)

^{*4} 弘前大学大学院 理工学研究科 (Graduate School of Science and Technology, Hirosaki University)

^{*5} 名古屋大学大学院 環境学研究科 附属地震火山研究センター
(Earthquake and Volcano Research Center, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University)

^{*6} 愛知製鋼株式会社 (Aichi Steel Corporation)

^{*7} 気象庁 柿岡地磁気観測所 (Kakioka Magnetic Observatory, Japan Meteorological Agency)

^{*8} 日本海洋科学振興財団むつ海洋研究所 (Mutsu Marine Laboratory, Japan Marine Science Foundation)

概要

宇宙地球科学分野では、地球磁場の微小な変動を観測するためにフラックスゲート磁力計(Fluxgate Magnetometer, FGM)と呼ばれる磁力計が用いられてきた。一般的に FGM は数百万円以上で販売されており、高価であるため、限られた研究費で多くの観測点からなるネットワーク観測を展開するのは難しい。一方、磁気インピーダンス(Magneto-impedance, MI)センサは 1993 年に名古屋大学で発見された磁気インピーダンス効果を利用した磁気センサである[Mohri, 1994; Panina and Mohri, 1994]。Nosé et al. [2022] では、科学利用を目的に MI センサを改良し、自然磁場計測に転用できることが示された。本研究では、MI センサとワンボード PC(Raspberry Pi)を用いて、FGM の 5 分の 1 から 10 分の 1 程度の廉価な 3 軸磁力計(Magneto-Impedance Magnetometer using Raspberry Pi, MIM-Pi)を開発し、稠密な磁場観測ネットワークの構築を試みた。

1. はじめに

MI センサは磁気インピーダンス効果を利用したセンサである。Mohri [1994]と Panina and Mohri [1994] は、アモルファスワイヤのインピーダンスが外部磁場の大きさに敏感に反応することを発見した。この時のインピーダンス Z は以下の式によって表される[Mohri et al., 2015]。

$$Z = \frac{ka}{2} R_{DC} \cdot \frac{J_0(ka)}{J_1(ka)}$$

$$k = \frac{1+j}{\delta}$$

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu(H_{ext})}}$$

ただし、 R_{DC} , a , ρ はそれぞれワイヤの DC 抵抗、半径、抵抗率である。また、 δ は表皮深さ、 ω は印加電流の角周波数、 μ は外部磁場 H_{ext} に依存する周方向の最大微分透磁率であり、 J_0 と J_1 は第一種の Bessel 関数、 j は虚数単位である。電流の周波数が十分に高い場合、表皮効果が現れ、電流はアモルファスワイヤの表面付近を流れる。その際、 $\delta \ll a$ であるなら、インピーダンス Z は以下の式で表される。

$$Z = \frac{a}{2\sqrt{2\rho}} R_{DC} (1+j) \sqrt{\omega\mu(H_{ext})}$$

この式からわかるように、 Z の変化を検知することで、外部磁場の強さを確認することができる。実際の MI センサにおいては、アモルファスワイヤにピックアップコイルを巻き、パルス電流を流した際に生じる誘起電圧を検知することで外部磁場の向きと大きさを検出するように作られている。

MI センサはスマートフォンの電子コンパスや食品工場における金属などの異物検知、投げたボールの回転速度の計測、車の自動運転など一般社会において広く活用されている。Nosé et al. [2022]は一般利用されている MI センサに着目し、愛知製鋼株式会社との共同で MI センサを科学利用できるように改良した。また、野村 [2021]では、MI センサを用いた廉価な磁力計のプロトタイプを作成し、多数のテスト計測を行った。この研究では、このプロトタイプをさらに実地展開するために改良することを目標とし、稠密磁場観測ネットワークの構築を開始した。

2. 開発機器

Magneto-Impedance Magnetometer using Raspberry Pi (MIM-Pi)はMI センサを3つ用いており、以下のブロック図に示すような構成である。3軸分のMI センサと温度センサをまとめてセンサ部、電圧変換用の回路基板とADコンバータ、Raspberry Piをまとめて制御部とする。センサ部と制御部は100 mのケーブルで接続している。MI センサは、 ± 80000 nTの範囲の磁力を ± 15 Vの電圧に変換して出力する。一方で、今回用いたADコンバータは0~5 Vの電圧を入力に受け付け、デジタルデータに変換する。そのため、 ± 15 Vから0~5 Vに電圧変換(降圧)する回路が必要になる。また、センサを駆動するための電圧は ± 15 Vであるため、外部電源に接続したACアダプターが出力する9 V電圧を変換(昇圧)する回路が必要になる。この電圧変換回路が図1中の基板に実装されている。図2はその回路図である。レギュレータは、温度センサおよび減衰器の電源入力に必要な5 Vを9 V電源から安定して供給するために用いた。Raspberry PiはADコンバータによりデジタル変換されたデータを読み込み、その都度タイムスタンプと共にファイルに書き込んでいる。サンプリングレートは約33 Hzであり、データ解析時には1秒ごとに移動平均をとることで、ノイズの低減を図った。

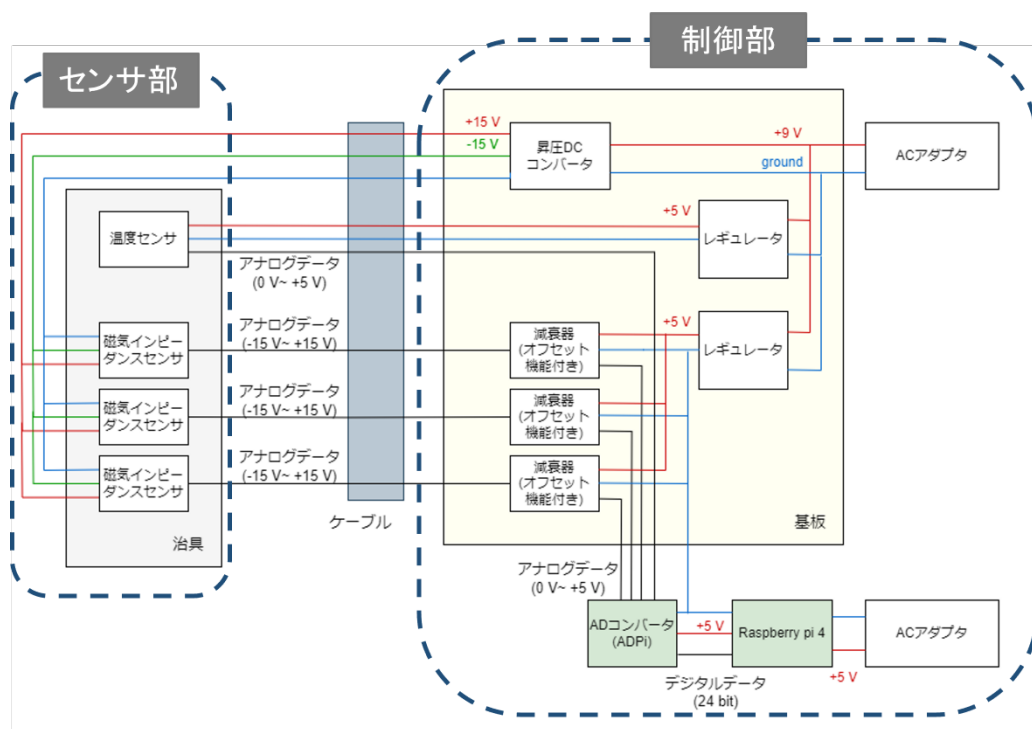


図1 MIM-Piのブロック図

図3はMIM-Pi センサ部および制御部の外観と内部の写真である。センサ部は、3つのセンサがそれぞれ90度をなすように治具に取り付けられており、防水かつ低重心の筐体に治具ごと入っている。筐体の下部はアルミ製、上部はポリ塩化ビニル製であり、非磁性である。ねじなども真鍮製を採用しており、非磁性を保証している。制御部はアルミケースの中に電圧変換回路やレギュレータが搭載された基板、Raspberry Pi等を固定し、USB, LAN, HDMIなど必要なインターフェイスをケース表面に備えている。

MIM-Piは約38万円で製作可能であり、これはフラックスゲート磁力計(Fluxgate Magnetometer, FGM)の5分の1から10分の1程度の価格である。MIM-Piは低コストであるため、多数の観測装置による磁場観測ネットワークの構築が容易になる。

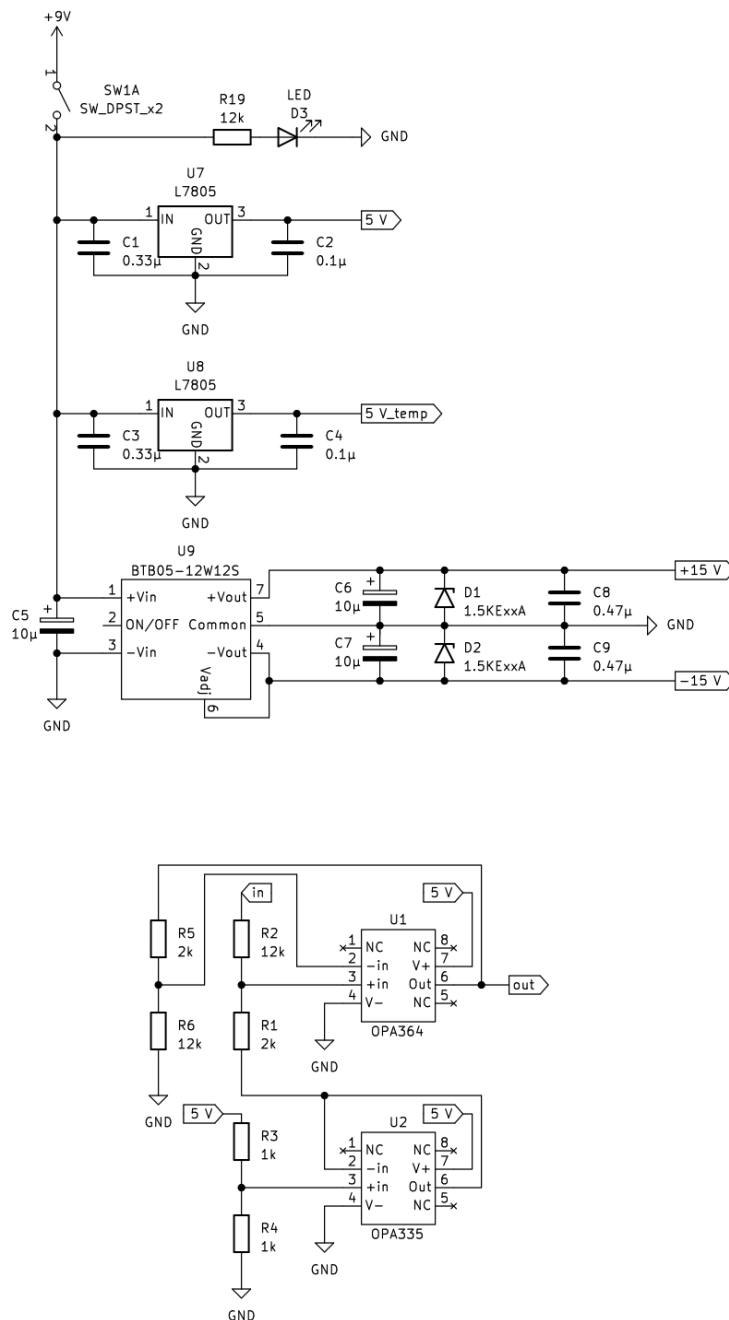


図2 MIM-Pi 基板部の回路図。上が昇圧回路、下が降圧回路である。実際の回路では、降圧回路を3つ実装している。



図 3 MIM-Pi の写真。(左)センサ部、(右)制御部。

3. 観測

3.1. テスト観測

3.1.1. 稲武でのテスト観測

MIM-Pi が自然微小磁場を観測可能であることを確かめるため、愛知県豊田市に位置する稲武観測所(地磁気緯度 26.8° , 地磁気経度 -152.5°)にてテスト観測を行った。稲武観測所は名古屋大学・地震火山研究センターが管理している施設であり、山の側面から掘削されたトンネル内で、水晶管伸縮計を用いて地殻変動の連続観測が行われている。トンネル入り口前に道路が通っているが、車の通りはそれほど多くはなく、山の中であるため人通りも少ない。また、電車の路線から 30 km 以上離れているため、人工ノイズの影響を受けにくい観測点である。ここでは 2019 年 1 月から Bartington 社製の FGM Mag-03 による連続観測が行われており、本研究では 2021 年 11 月 19 日から 2022 年 1 月 14 日までの約 2 カ月にわたり 2 台の MIM-Pi と 1 台の FGM との並行観測を実施した。

図 4 は 2021 年 12 月 17 日の 1 日プロットである。左から順に MIM-Pi No. 1, MIM-Pi No. 2, FGM の観測結果を示している。また、上段から地磁気 X(北向き)成分, Y(東向き)成分, Z(鉛直下向き)成分が表示されている。どの観測機器にも、地磁気の日変化である Solar quiet (Sq)変動が良く見て取れる。また、15:00 UT 前後に現れている数十分程度の周期的な変動も MIM-Pi と FGM の両方で確認できる。このことから、MIM-Pi は FGM と同様に自然微小磁場変動を観測できているといえる。

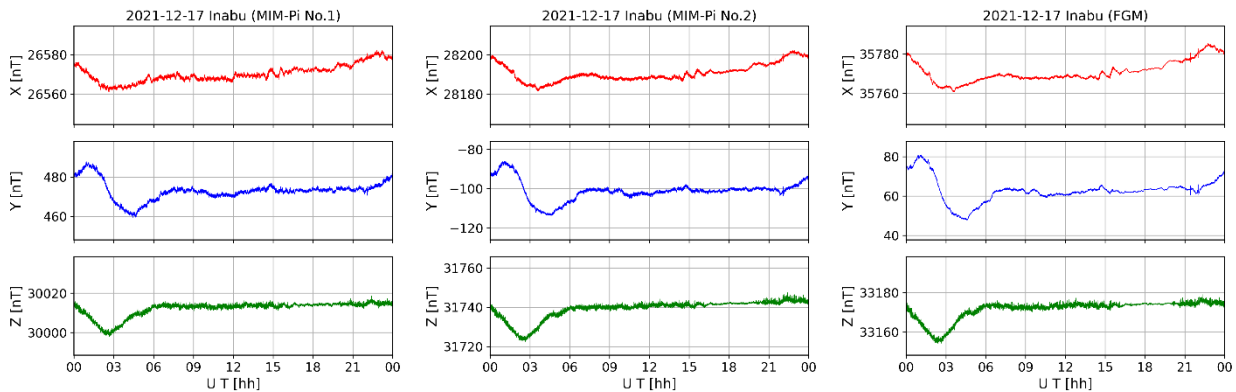


図 4 稲武観測所における観測例。2021 年 12 月 17 日の 1 日プロット。左から MIM-Pi No. 1, MIM-Pi No. 2, FGM。すべての観測機器で同様の日変動および 15 UT 頃の周期的な変動が観測されている。

3.1.2. 柿岡でのテスト観測

稲武観測所において MIM-Pi によって比較的良好的な地磁気データが得られることがわかったため、続いて茨城県石岡市に位置する柿岡地磁気観測所(地磁気緯度 28.00°, 地磁気経度 209.80°)にてテスト観測を行った。柿岡地磁気観測所は気象庁に属する施設であり、人工ノイズの影響が限りなく抑えられた環境で FGM により地磁気観測が行われている。そこで、こうした理想的な環境下での MIM-Pi と FGM の比較、および MIM-Pi が安定して長期観測を継続できるかの確認を目的としてテスト観測を実施した。観測期間は 2022 年 1 月 28 日から 2022 年 10 月 18 日まで約 9 カ月間である。MIM-Pi No. 1 は、実際の観測ネットワーク構築へ向けて、実地展開の準備を行っていたため、柿岡でのテスト観測には MIM-Pi No. 2 のみを用いた。

図 5 に 2022 年 2 月 3 日の 1 日プロットを示す。左が MIM-Pi で、右が FGM により取得されたデータのプロットである。MIM-Pi の観測結果には、00:00–09:00 UT にかけて、数時間の時間スケールを持つ上昇トレンドが Z 成分に見られる。それに加え、同時帯における FGM の X 成分には明らかな下降トレンドが見られるが、MIM-Pi の X 成分にはそのような下降トレンドは見られない。これは MIM-Pi を屋外の小屋内に設置したことにより、センサ周辺の温度変化が影響を及ぼしたためであると考えられる。それ以降の時間帯では、地磁気の激しい変動が MIM-Pi と FGM の両方で同じように観測できていることがわかる。

図 6 に 2022 年 2 月 19 日 13:00–14:00 UT における 1 時間プロットを示す。プロットのフォーマットは図 5 と同様である。このプロットを見ると、観測機器のノイズレベルの違いにより MIM-Pi のプロット線が太くなっているが、両方に共通して X 成分の 13:00–13:40 UT に地磁気の振動が見られる。これは地磁気脈動と呼ばれる変動であり、その周波数から Pc4 脈動に分類される。稠密磁場観測ネットワークによる観測対象の一つがこの地磁気脈動であり、柿岡地磁気観測所において MIM-Pi が FGM と同様に脈動を観測できたことは MIM-Pi が観測ネットワークの構築に利用可能であることを意味する。

柿岡地磁気観測所での長期観測において、停電がないにもかかわらず、観測が中断してしまう事例が何回も見られた。原因は明らかにはなっていないが、データ収録プログラムが何らかの理由で異常停止したためと思われる。そこで、この対処策として、データ収録プログラムのプロセスが動いているかどうかを確認し、その結果に応じてデータ取得を再開させるスクリプトを作成した。このスクリプトを定期的に自動実行させ、継続観測ができることを確認した。

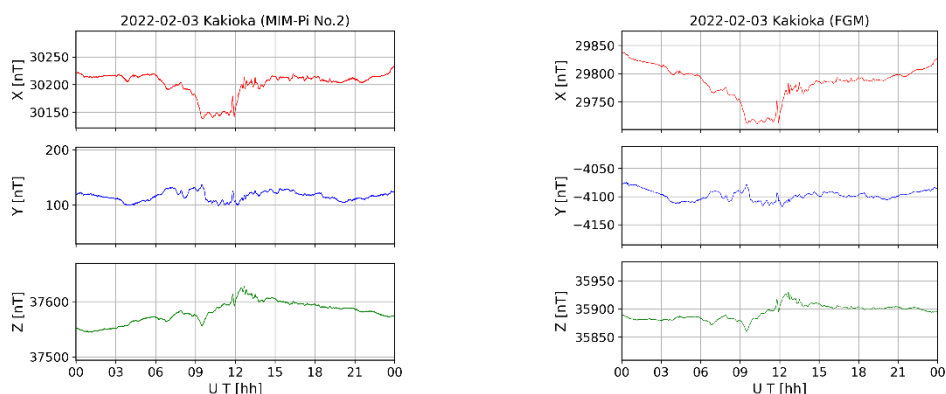


図 5 柿岡地磁気観測所における観測例。2022年2月3日の1日プロット。左から MIM-Pi No. 2, FGM。地磁気が荒れている様子が確認できる。

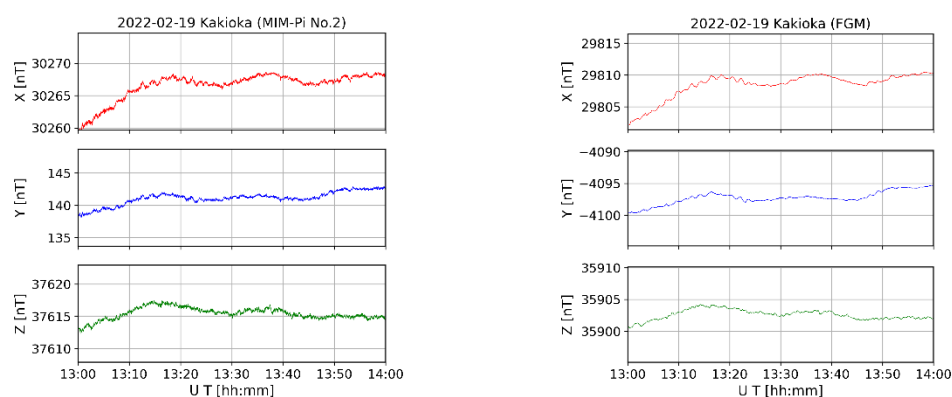


図 6 柿岡地磁気観測所における観測例。2022年2月19日13:00–14:00 UTの1時間プロット。フォーマットは図5と同様。両方の観測機器で同様の地磁気脈動が観測されている。

3.2. 稠密磁場観測ネットワークの構築

前節で説明した稲武、柿岡におけるテスト観測の結果を元に、実際に日本の東北地方へ MIM-Pi を設置することにした。図 7 は現在構築中の稠密磁場観測ネットワークである。気象庁、国土地理院、名古屋大学がすでに FGM を設置している観測点(黄色)に加え、MIM-Pi を宮城県川渡、青森県白神、青森県むつ(赤色)に設置し、合計で 12 観測所から構成される。表 1 は各観測所の位置を示している。川渡は 2022 年 9 月、白神は 2022 年 11 月、むつは 2023 年 6 月から定常観測を開始した。既設の FGM だけでは、赤井川–水沢間に大きな観測空白域があったため、その間を埋めるように新たに MIM-Pi を 2 台設置している。また、水沢–原町間も地磁気緯度で約 1.5° の間隔があったため、MIM-Pi で緯度間隔を狭めることにした。これにより、緯度間隔約 10 度内に 12 個の観測所が展開されているため、平均で観測所同士の間隔は 1 度以下となる。現在世界で展開されている緯度方向に並んだ磁場観測ネットワークでもこれほど稠密なものはない。

図 8 に上記の稠密磁場観測ネットワークで観測された地磁気変動の一例を示す。左上から右下にかけて観測所の地磁気緯度の降順で並んでいる。ただし、むつ観測所においては、図 8 に示した期間には観測が始まっていないため、掲載していない。また、白神のデータは温度変化による上昇トレンドが大きかったため、2022 年 11 月中の地磁気データと温度データから MIM-Pi の温度依存性を求め、その結果(X 成分:31.98 nT/°C, Y 成分:22.07 nT/°C, Z 成分:26.95 nT/°C)を用いて温度補正を行っている。これらのプロットから、22:00–22:30 UT で鹿野山観測所を除く 10 観測所の X 成分において振幅約 0.5 nT、周期約 50 秒の Pc4 地磁気脈動が観測されていることがわかる。鹿野山のデータについては、観測所が比較的都市部に位置するため、電車等による人工ノイズが大きく、発生した波動がノイズに埋もれてしまっていると予想される。これらのデータから、地磁気脈動の周波数を同定し、モデル計算を行うことにより、地球周辺のプラズマ質量密度の分布を調査することを計画している。

表 1 各観測所の位置

観測所		コード	地理緯度 [°]	地理経度 [°]	地磁気緯度 [°]	地磁気経度 [°]	L-shell
稚内	Wakkanai	WAK	45.40	141.75	37.36	210.06	1.583
母子里	Moshiri	MSR	44.37	142.27	36.38	210.66	1.543
女満別	Memambetsu	MMB	43.91	144.19	36.09	212.43	1.531
陸別	Rikubetsu	RIK	43.46	143.77	35.60	212.43	1.513
赤井川	Akaigawa	AKA	43.07	140.81	34.97	209.55	1.489
むつ	Mutsu	MTS	41.45	141.12	33.39	210.04	1.434
白神	Shirakami	SRM	40.52	140.22	32.39	209.34	1.402
水沢	Mizusawa	MIZ	39.11	141.20	31.07	210.4	1.363
川渡	Kawatabi	KWT	38.75	140.76	30.68	210.05	1.352
原町	Haramachi	HAR	37.62	140.95	29.57	210.35	1.322
柿岡	Kakioka	KAK	36.23	140.19	28.13	209.82	1.286
鹿野山	Kanozan	KNZ	35.26	139.96	27.15	209.72	1.263



図 7 現在構築中の稠密磁場観測ネットワークの観測点分布

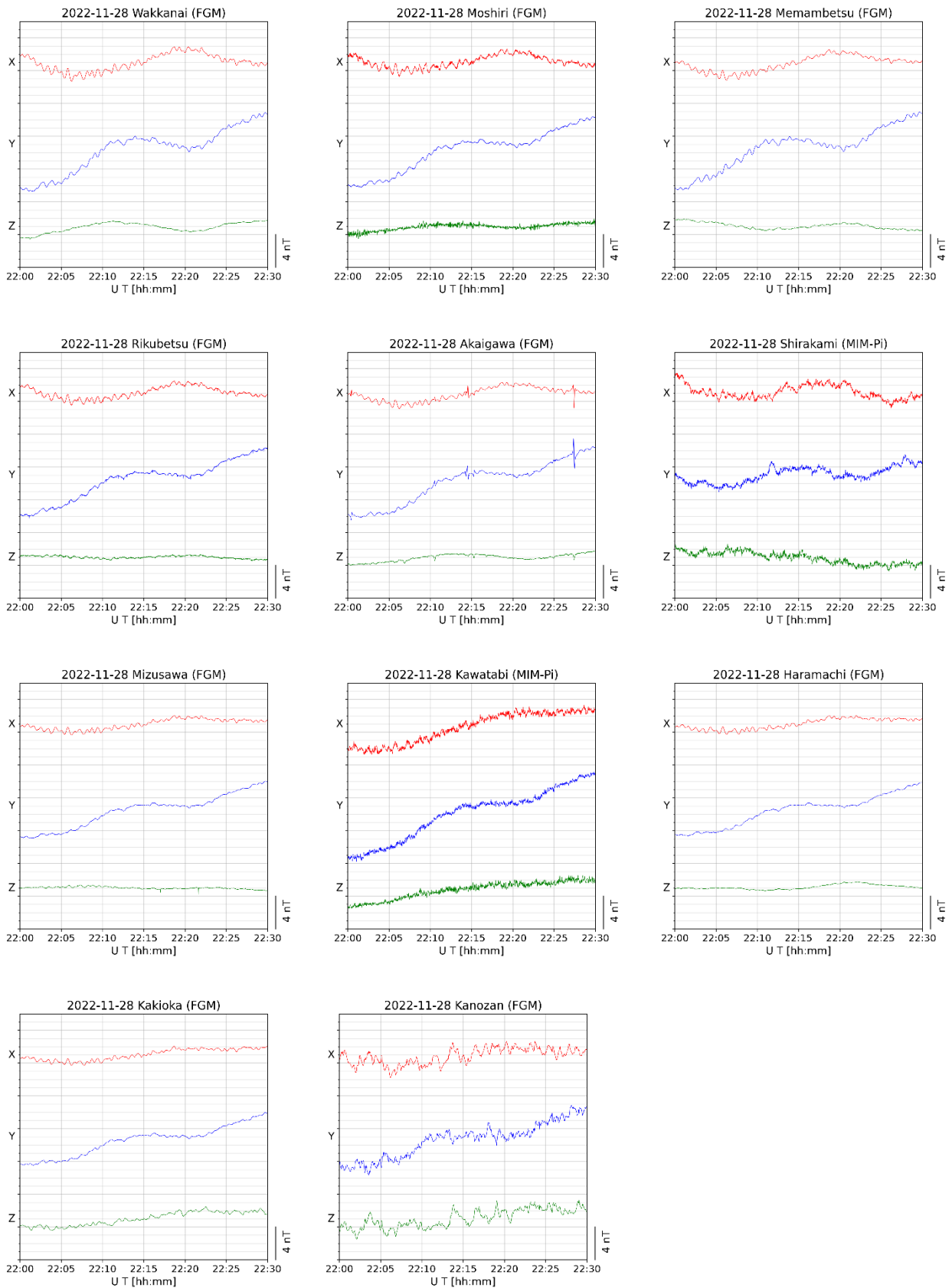


図 8 観測ネットワークによる観測例。2022年11月28日22:00–22:30 UTの30分間のプロット。鹿野山観測所以外のすべての観測所で同様の地磁気脈動が観測されている。

3.3. 過去の地磁気脈動観測に基づく MIM-Pi の観測性能評価

これまでに低緯度における Pc3-4 地磁気脈動の観測報告がなされてきた。Sutcliffe et al. [2011]は、地磁気緯度 -32° ~ -34° に位置する Hermanus および Sutherland において、振幅が約 1 nT で周波数が 50 mHz の磁力線共鳴現象が観測されたことを報告している。Villant and Tiberi [2016]は、地磁気緯度 36.3° に位置する L'Aquila のデータを統計的に調べ、磁力線共鳴の周波数は 55-60 mHz であることを報告している。Ziesolleck et al. [1993]は、オーストラリア西岸のネットワーク観測から、地磁気緯度 -42° の Newcastle あたりで磁力線共鳴が起こっている例を解析している。その振幅は約 0.5 nT、周波数は約 30 mHz である。Yagova et al. [2017]は、地磁気緯度が約 -33° の Learmonth で、振幅が約 0.5 nT で周波数が 25 mHz 程度の脈動が観測された例を示している。

以上のことから、今回構築した稠密磁場観測ネットワークの緯度領域では、振幅が 0.5 nT 以上で周波数が 60 mHz より低い(周期が 17 秒より長い)脈動が発生すると想定される。Nosé et al. [2022]によれば、科学解析用途で改良した MI センサは、 10^4 Hz から 0.5 Hz の間の広い周波数範囲で FGM と同じようなパワースペクトルを持つ観測結果が得られている。(ただし、一部の例では、30 mHz から 0.5 Hz のパワーが FGM より高い場合もある。) また、0.5 nT 程度の振幅の地磁気脈動について、FGM と同じような波形を観測できていることも示されている。したがって、関東-東北-北海道地域で発生する地磁気脈動のほとんどを図 8 で示したように MIM-Pi でも十分に検出できると考えている。

4. まとめ

本研究では、低価格で購入できる MI センサと Raspberry Pi を用いることで、FGM の 5 分の 1 から 10 分の 1 程度の価格で製作可能な磁力計 MIM-Pi を開発した。そして、稲武観測所および柿岡地磁気観測所でのテスト観測を通じて MIM-Pi がフィールドワークに利用可能であることを確認した。この結果を元に、実際に稠密磁場観測ネットワーク構築のため MIM-Pi の設置を開始した。現状では東北地方の 3 か所(川渡、白神、むつ)に設置が完了しており、今後は北海道の苫小牧をはじめ、MIM-Pi を設置する観測所の数を増やしていく計画である。また、稠密磁場観測ネットワークで得られたデータを解析することで、宇宙現象の調査も進めていく予定である。

謝 辞

稚内、赤井川、水沢、原町、鹿野山のデータは国土地理院より提供いただきました。

名古屋大学 宇宙地球環境研究所 栗田直幸准教授には白神観測所とむつ観測所に関して、情報を提供いただきました。

この研究は、日本学術振興会科学研究費 21H01147, 17K18804, 16H06286, 21H04518, 22H00116, JPJSCCB20210003 の助成、および伊藤科学振興会と山田科学振興財団からの研究助成を受けたものです。

参考文献

- Mohri, K. (1994). Application of amorphous magnetic wires to computer peripherals. *Materials Science and Engineering*, A185(1994), 141–146. [https://doi.org/10.1016/0921-5093\(94\)90937-7](https://doi.org/10.1016/0921-5093(94)90937-7)
- Mohri, K., Uchiyama, T., Panina, L. V., Yamamoto, M., & Bushida, K. (2015). Recent advances of amorphous wire CMOS IC Magneto-Impedance sensors: Innovative high-performance micromagnetic sensor chip. *Journal of Sensors*, 2015, 718069. <https://doi.org/10.1155/2015/718069>
- 野村太志, 磁気インピーダンスセンサを用いた低コスト地磁気観測システムの開発と多点観測への応用, 名古屋大学工学部, 修士論文, 2021
- Nosé, M., Kawano, T., & Aoyama, H. (2022). Application of magneto-impedance (MI) sensor to geomagnetic field measurements. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 127, e2022JA030809. <https://doi.org/10.1029/2022JA030809>
- Panina, L. V., & Mohri, K. (1994). Magneto-impedance effect in amorphous wires. *Applied Physics Letters*, 65(9), 1189–1191. <https://doi.org/10.1063/1.112104>
- Sutcliffe, P. R., Ndiitwani, D. C., Lühr, H., Heilig, B. (2011). Studies of geomagnetic pulsations using magnetometer data from the CHAMP low-Earth-orbit satellite and ground-based stations: A review. *Data Science Journal*, 10. <https://doi.org/10.2481/dsj.IAGA-03>
- Villante, U., and P. Tiberi (2016), Occurrence and characteristics of nighttime ULF waves at low latitude: The results of a comprehensive analysis, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 121, 4300–4315. <https://doi.org/10.1002/2015JA022137>
- Yagova, N. V., Heilig, B., Pilipenko, V. A., Yoshikawa, A., Nosikova, N. S., Yumoto, K. and Reda, J. (2017). Nighttime Pc3 pulsations: MM100 and MAGDAS observations. *Earth Planets Space*, 69:61. <https://doi.org/10.1186/s40623-017-0647-x>
- Ziesolleck, C. W. S., Fraser, B. J., Menk, F. W., and McNabb, P. W. (1993). Spatial characteristics of low-latitude Pc3–4 geomagnetic pulsations. *Journal of Geophysical Research* 98(A1), 197–207., <https://doi.org/10.1029/92JA01433>