法政大学学術機関リポジトリ

HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

PDF issue: 2025-07-01

静磁界自動計測器の開発に関する研究 : 永 久磁石磁化推定のシステム化

塩山, 将英 / SHIOYAMA, Masahide

(出版者 / Publisher)
法政大学大学院理工学研究科
(雑誌名 / Journal or Publication Title)
法政大学大学院紀要.理工学研究科編
(巻 / Volume)
65
(開始ページ / Start Page)
1
(終了ページ / End Page)
8
(発行年 / Year)
2024-03-24
(URL)
https://doi.org/10.15002/00030704

静磁界自動計測器の開発に関する研究 —永久磁石磁化推定のシステム化—

DEVELOPMENT OF MEASUREMENT INSTRUMENT FOR MAGNETOSTATIC FIELDS -SYSTEMATIZATION OF MAGNETIZATION ESTIMATION-

塩山将英

Masahide SHIOYAMA 指導教員 岡本吉史

法政大学大学院理工学研究科電気電子工学専攻修士課程

Because the performance of permanent magnet motors depends on the magnetization distribution of the permanent magnet particularly, the estimation of the magnetization distribution is a crucial process to enhance the quality of permanent magnet motors. Therefore, useful nondestructive system to identify the magnetization distribution is strongly required. In this paper, the measurement instrument for the magnetostatic fields is developed with high accuracy and low-cost, and it is combined with the nondestructive magnetization estimation method. To verify the validity of the magnetization estimation system, its performance is compared with other high-accuracy instruments.

Key Words : Magnetization estimation, measurement instrument, permanent magnet

1. はじめに

近年,脱炭素社会に向けて,自動車や航空機等の電動 化が盛んに進められており,永久磁石モータの需要が, 益々,高まっている.永久磁石モータの性能は,装荷さ れる永久磁石の磁化分布に強く依存する^{[1],[2]}.例えば, 表面磁石型同期モータの界磁磁束は,磁石磁束が主成分 であるため,不完全な着磁が施された永久磁石の使用は モータ効率を下げるばかりか,予期せぬ振動を発生させ る要因となる^[3].したがって,永久磁石の磁化分布を把 握することは,永久磁石モータの品質を高める上で重要 である.

永久磁石の磁化分布を評価する方法として,電子線後 方散乱回折法^[4] や X 線回折法^[5] が提案されている.こ れらの手法は,磁石表面の磁化分布を詳細に観察するこ とができるが,磁石内部の磁化分布まで観察する場合, 磁石を切断する必要があるため,磁石の再利用は困難で ある.また,磁石の全領域の磁化を評価する場合は,全 工程に数日程度を要する.そこで,永久磁石近傍の磁束 密度の実測値から,数値解析により磁化分布を推定する 手法が提案されている^{[6]~[9]}.これらは,非破壊的な手 法であり,数時間程度で全工程が完了する.結果,設備 投資の金額と推定精度の観点から,有力な手段といえる.

永久磁石近傍の磁束密度から磁化分布を推定する場合, ホールセンサ等の磁気センサにより,磁束密度を計測す る必要がある.特に,逆問題の定式化上,計測点数は永 久磁石のセル数に対して十分多くしなければならない. さらに,磁束密度の計測では,様々な形状および寸法の 永久磁石に対応するため,対象とする永久磁石に合わせ て計測点の座標を算出し,その座標へ磁気センサを正確 に移動させ,計測する装置が求められる.これらの条件 を満たす市販の計測器は非常に高価であり,研究室への 導入は容易でない.また,市販の計測器は磁化分布の推 定までシステム化されておらず,計測後にユーザが磁束 密度の実測データを後処理した上で,別途,磁化推定の プログラムへ入力する必要がある.

そこで本研究では、磁気センサを高精度に位置決めで きる計測器を安価に開発し、GUI アプリにより、磁束密 度の計測から磁化分布の推定までをシステム化した. 位 置決め機構には、ステッピングモータを採用し、開発が 容易な Arduino Nano^[10]で制御した.磁気センサは、安 価な3軸ホールセンサ IC を採用したが、市販のテスラメ ータ等も搭載できる構造にし、計測器の汎用性を高めた. 以上の構成に基づき、本研究で開発した計測器および市 販の計測器で、フェライト磁石およびネオジム磁石周囲 の磁束密度を計測し、本研究で開発した計測器の精度を 検証した.その結果、市販の計測器と同等の精度で計測 できることが明らかになった.また、これらの実測値か ら磁石内部の磁化分布を推定し、平均的な磁化の値が、 市販の計測器で計測された残留磁束密度と概ね一致する ことを確認した. すなわち,本研究で開発した計測器は, 十分高い精度で永久磁石近傍の磁束密度を計測でき,一 連のシステムにより磁化分布を推定できることを確認し たので,その子細を報告する.

2. 計測・磁化推定システム

(1)システムの概要

図1に計測・磁化推定システムの概要を示す.本シス テムは,計測器とPC上のGPUアプリで構成されている. 計測器には,ステッピングモータが搭載されており,制 御用のマイコンと通信することで,磁気センサの位置決 めが可能である.アプリは,計測器の手動の操作に加え て,永久磁石の寸法等を入力することで自動計測ができ る.計測終了後は,座標変換等の後処理もされるため, 速やかに磁化推定の工程へ移ることができる.



Fig. 1 Measurement and magnetization estimation system.

(2)計測器の構成

図 2 に計測器を示す.計測器には、マイコンや周辺回路が実装された基板である Arduino Nano^[10]を採用し、磁気センサとの通信やモータドライバを介してステッピングモータの制御をする.磁気センサは、インターフェースに I²C^[11]を備えた Infineon 社製の 3 軸ホールセンサIC である TLE493D-W2B6^[12]を採用した.測定範囲は、 $\pm 160 \sim 230$ mT である.また、分解能は 0.13 mT、最大誤差は読み取り値 × 0.15 \pm 0.45 mT である.ホールセンサの位置決めには、合計 5 個のステッピングモータを使用している.本来、3 次元の位置決めには、3 個のモータがあれば十分であるが、y 軸および z 軸のモータをそれぞれ 2 個に増やすことで、位置決めの安定性を高めた.



Fig. 2 Overview of measurement instrument.

3. 磁化推定手法

(1)Biot-Savart 則

永久磁石内部の磁化*M*と永久磁石外部の磁東密度*B*には、次式のBiot-Savart 則の関係が成り立つ.

$$\boldsymbol{B} = \boldsymbol{A}\boldsymbol{M} \tag{1}$$

ここで、A は解析積分公式^[13]により計算される長方行列 である. 永久磁石外部の計測点数 Nm, 永久磁石のセル数 N_cに対し、A の型は 3Nm×3N_cである.

(2)目的関数

本研究では、計測器により計測された磁束密度 B₀と、 推定された磁化分布が Biot-Savart 則に基づいて構成する 磁束密度 B の二乗和誤差を目的関数とする. 各手法によ り、この目的関数を最小化し、最適な磁化 M を決定する.

min.
$$W = \sum_{k=1}^{N_m} (\boldsymbol{B}^{(k)} - \boldsymbol{B}_0^{(k)})^2$$
 (2)

ここで, kは計測点の番号である.

(3) 打ち切り特異値分解

一般的に、式(1)のAのような長方行列に逆行列は存在しない.そこで、行列分解手法の一つである打ち切り
 特異値分解(TSVD)^{[7],[8]}により、疑似逆行列A⁺を生成し、磁化Mを求解する.Aは次式のように分解できる.

$$A = USV^T \tag{3}$$

ここで,Sはシフト付き QR 法^[14]により計算される特異 値が降順に並ぶ $3N_m \times 3N_c$ の対角行列,Uは $3N_m \times 3N_m$ の 直交行列,Vは $3N_c \times 3N_c$ の直交行列である. $V \ge U$ の性 質から,それぞれに転置行列 V^T , U^T を掛けることにより 単位行列が得られる.また,Sは対角行列であるため,特 異値を全て逆数に置き換えた S^{-1} が存在する.よって,磁 化Mは次式のように計算される.

$$\boldsymbol{M} = \boldsymbol{A}^{+} \boldsymbol{B} = \sum_{i=1}^{j} \boldsymbol{v}_{i} \boldsymbol{s}_{i}^{-1} \boldsymbol{u}_{i}^{T} \boldsymbol{B} \qquad (1 \le j \le r) \qquad (4)$$

ここで, *j* は疑似逆行列*A*⁺を再構成する際に, 足し合わせ る特異値の固有モード数である.式(6)を計算するため には,特異値の逆数を使用するため,小さな特異値まで 足し合わせると,解が発散する可能性がある.そこで, 全ての固有モードを加算せずに,小さな特異値を持つ*j* 以降のモードを打ち切る.その結果,*S*の条件数の悪化を 防ぎ,非物理的な解を抑制した磁化分布が得られやすい [15].

(4)シグモイド関数を援用した勾配法

TSVD 以外にも、非物理的な磁化分布を抑制して磁化 推定する手法として、シグモイド関数により磁化ベクト ルに制約を与え、勾配法で最適な磁化分布を求解する手法(SiGrad)が提案されている^[9].本手法は、磁化ベクトルを球座標系で表現し、磁化ベクトルの大きさと角度 に陰的な制約を考慮する.式(2)の目的関数に加え、次 式の不等式制約条件を定義する.

min .
$$W = \sum_{k=1}^{N_m} (\boldsymbol{B}^{(k)} - \boldsymbol{B}_0^{(k)})^2$$

s.t.
$$M_{\min} \leq |\boldsymbol{M}^{(i_c)}| \leq M_{\max}$$
$$\theta_{\min} \leq \theta^{(i_c)} \leq \theta_{\max}$$
$$\varphi_{\min} \leq \varphi^{(i_c)} \leq \varphi_{\max}$$
(5)

ここで、 θ_{\min} , θ_{\max} , φ_{\min} , φ_{\max} は、それぞれ球座標系にお ける極角と方位角に対する最小値と最大値である.本手 法では、磁化ベクトルのx, y, z 成分を球座標系のパラメ ータで表すため、セル i_c の磁化 $M^{(i_c)}$ を、次式のように定 式化する.

$$\boldsymbol{M}^{(i_c)} = \boldsymbol{i} \left(|\boldsymbol{M}^{(i_c)}| \sin\theta\cos\phi \right) + \boldsymbol{j} \left(|\boldsymbol{M}^{(i_c)}| \sin\theta\sin\phi \right) + \boldsymbol{k} \left(|\boldsymbol{M}^{(i_c)}| \cos\theta \right)$$
(6)

ここで, *i*, *j*, *k* は *x*, *y*, *z* 方向の単位ベクトルである. 非物理的な磁化分布の発生を抑制するために,磁化の大 きさと角度に対し,陰的に式(5)の不等式制約条件を考 慮できるシグモイド関数を用いる. *M*, θ , φ を一意に決 定するための実際の設計変数 *M*', θ ', φ 'を次式のシグモ イド関数に代入する.

$$M(M') = \frac{M_{\max} - M_{\min}}{e^{-aM'} + 1} + M_{\min}$$
(7)

$$\theta(\theta') = \frac{\theta_{\max} - \theta_{\min}}{e^{-a\theta'} + 1} + \theta_{\min}$$
(8)

$$\varphi(\varphi') = \frac{\varphi_{\max} - \varphi_{\min}}{e^{-a\varphi'} + 1} + \varphi_{\min}$$
(9)

ここで, *a* はシグモイド関数のゲインである. シグモイド 関数により,式(5)の不等式制約条件付き最適化問題は, 無制約条件最適化問題へ変換される.以上を最急降下法 (SDM)により求解する場合,修正ベクトル *d*_n は次式と なる.

$$\boldsymbol{d}_n = -\nabla W_n \tag{10}$$

ここで、 ∇W_n は、反復 n 回目における変数 (M', θ' , φ') で構成されるベクトル c_n による目的関数 Wの一階微分で ある.一方、準ニュートン法 (QNM) により求解する場 合、修正ベクトル d_n は次式となる.

$$\boldsymbol{d}_n = -\boldsymbol{H}_n \nabla \boldsymbol{W}_n \tag{11}$$

ここで, *H*_nは反復 *n* 回目におけるヘッセ行列の近似逆行 列であり, BFGS 公式より算出する^[16]. 以上の *d*_nにより, *c*_nは次式によって更新される.

$$\boldsymbol{c}_{n+1} = \boldsymbol{c}_n + \boldsymbol{\alpha}_n \boldsymbol{d}_n \tag{12}$$

ここで, *a*_nは *n* ステップ目のステップ幅であり, 直線探 索^[17] により算出する. *c*_n の更新は, SDM または QNM で算出される *d*_n の最大値が, 収束判定条件*c*_{opt} より小さく なるまで繰り返す.

4. 計測対象の概要と計測条件

(1)計測対象の概要

本研究では、フェライト磁石およびネオジム磁石周囲 の磁束密度を計測した.フェライト磁石の材質は Y35 で、 残留磁束密度は 400 ~ 440 mT である^[18].また、ネオジ ム磁石の材質は N40 で、残留磁束密度は 1,260 ~ 1,300 mT である^[19].図3(a)にフェライト磁石、図3(b)にネ オジム磁石の外観を示す.寸法はどちらも x 方向が 30 mm、 y 方向が 20 mm, z 方向が 10 mm である.なお、磁石の重 心を原点とする.



Fig. 3 Overview. (a) Ferrite magnet. (b) Neodymium magnet.

(2)計測条件

本研究で開発した計測器の精度検証のため, 市販の計 測器であるアイエムエス社製 MTX-6R^[20]でも計測し, 磁束密度の値を比較する. MTX-6R の測定範囲は, ±2,000 mT である.また,分解能は0.1 mT,最大誤差は読み取り 値 ×0.005±0.3 mT である.

図 4 に計測点の分布を示す.フェライト磁石は空気層 を 3 mm,計測点の間隔を 1 mm,計測点数を 3,858 点と する.一方,ネオジム磁石は空気層を 6 mm,計測点の間 隔を 1 mm,計測点数を 5,946 点とする.ネオジム磁石は 磁石近傍の磁束密度が大きく,TLE493D-W2B6 は,空気 層 3 mm では値が飽和するため計測できない.したがって, ネオジム磁石の計測では,空気層を 6 mm としている.

図 5 に精度検証に使用する線分を示す.これらの線分 上において,各計測器から得られた値を比較する.



Fig. 4 Measurement points. (a) Ferrite magnet. (b) Neodymium magnet.



Fig. 5 Lines to compare the measured magnetic flux density. (a) Line α for ferrite magnet. (b) Line β for neodymium magnet.

5. 計測結果

(1)フェライト磁石

フェライト磁石の全面計測には、自作の計測器が約 1 時間 50 分, MTX-6R が約 20 分要した.図6 にフェライ ト磁石の計測結果を示す.概ね近い分布が得られている が,磁石上面の中心付近において、自作の計測器の値が 小さくなっていることがわかる.原因として、ホールセ ンサの計測誤差や計測器の位置決め誤差などの影響が考 えられる.

図7 (a) に line $\alpha \perp O B_x$, 図7 (b) に B_y , 図7 (c) に B_z , 図7 (d) に |B| を示す.最大誤差は, B_x が 2.5 mT, B_y が 2.1 mT, B_z が 4.9 mT, |B| が 3.5 mT である.磁束密 度の分布は概ね一致しており,精度良く計測できている ことがわかる.

(2) ネオジム磁石

ネオジム磁石の全面計測には,自作の計測器が約2時間50分,MTX-6Rが約30分要した.図8にネオジム磁石の計測結果を示す.概ね近い分布が得られているが,フェライト磁石と同様に,磁石上面の中心付近において,自作の計測器の値が小さくなっていることがわかる.

図9(a) に line $\beta \perp \sigma B_x$, 図9(b) に B_y , 図9(c) に B_z , 図9(d) に |B|を示す.最大誤差は、 B_x が5 mT, B_y が 2.4 mT, B_z が 6.9 mT, |B| が 7.1 mT である.フェラ イト磁石と同様に、磁束密度の分布は概ね一致しており、 精度良く計測できていることがわかる.

6. 磁化推定結果

本研究の磁化推定には、Intel Core i7-9700K 3.6GHz & 64GB RAM の PC を使用した. また、TSVD の計算には、 MATLAB のライブラリ^[21]を使用した. メッシュの *Nc* は 750 であり、セルは辺の長さが 2 mm の立方体である.

磁化推定の入力データには、自作の計測器および MTX-6Rの実測値を使用し、磁化推定手法として、TSVD、 SiGrad (SDM), SiGrad (QNM)を採用した.以上、計 測器と磁化推定手法の組み合わせで、合計 6 ケースの磁 化推定結果を比較する.さらに、TSVD および SiGrad で 推定された磁化の精度検証のため、次式により平均的な 磁化強度 *M* を算出し、Matesy GmbH 社の m-axis L^[22]で



Fig. 6 Distribution of measured magnetic flux density. (a) In-house instrument. (b) MTX-6R.



Fig. 7 Measured magnetic flux density on line α . (a) B_x . (b) B_y . (c) B_{z} . (d) $|\mathbf{B}|$.



Fig. 8 Distribution of measured magnetic flux density. (a) In-house instrument. (b) MTX-6R.

計測された残留磁束密度と比較する.

$$M = \frac{1}{N_c} \sum_{k=1}^{N_c} \sqrt{M_x^{(k)^2} + M_y^{(k)^2} + M_z^{(k)^2}}$$
(13)

(1) フェライト磁石

表1に SiGrad で使用した条件を示す. 初期磁化ベクト ルは,+x 軸方向に 400 mT でパラレルに設定した.

表2に磁化推定に要した計算コストを示す.SiGradは, TSVDよりも短時間で推定が完了することがわかる.

図 10 に各手法により推定された磁化分布を示す. TSVDは、120モードまでを足し合わせた.全ての推定結 果が概ね一致していることがわかる.自作の計測器と TSVD の組み合わせにおいて、端部の磁化が小さくなっ ているが、計測誤差が影響していると考えられる.

表3に各手法で得られた磁化強度を示す.m-axisLを真 値とした場合,他手法で得られた値は誤差5.3 mT,相対 誤差1.4%以内に収まっている.



Fig. 9 Measured magnetic flux density on line β . (a) B_x . (b) B_y . (c) B_z . (d) $|\mathbf{B}|$.

TABLE I PARAMETERS FOR SIGRAD

\mathcal{E}_{opt}	а	M _{min} [mT]	M _{max} [mT]	θ_{\min} [rad]	$\theta_{\rm max}$ [rad]	φ_{\min} [rad]	<i>φ</i> _{max} [rad]
10^{-3}	1.0	200	600	0	π	$-\pi$	π

TABLE II RESULT OF MAGNETIZATION ESTIMATION

Instrument	Method	Iteration	Result W[mT ²]	Elapsed time [s]
In-house	TSVD (120 modes)	-	4.88×10^{4}	208
MTX-6R	TSVD (120 modes)	-	7.38×10^4	201
In-house	SiGrad (SDM)	2	1.12×10^{5}	25
MTX-6R	SiGrad (SDM)	3	3.23×10^{4}	29
In-house	SiGrad (QNM)	13	$7.90 imes 10^4$	32
MTX-6R	SiGrad (QNM)	14	3.07×10^{4}	32



Fig. 10 Estimated magnetization distribution of Ferrite permanent magnet. (a) In-house instrument & TSVD (120 modes). (b) MTX-6R & TSVD (120 modes). (c) In-house instrument & SiGrad (SDM). (d) MTX-6R & SiGrad (SDM). (e) In-house instrument & SiGrad (QNM). (f) MTX-6R & SiGrad (QNM).

Instrument	Method	Magnetization [mT]
In-house	TSVD (120 modes)	376.6
MTX-6R	TSVD (120 modes)	372.3
In-house	SiGrad (SDM)	372.3
MTX-6R	SiGrad (SDM)	376.9
In-house	SiGrad (QNM)	378.4
MTX-6R	SiGrad (QNM)	373.4
m-axis L	-	373.1

TABLE III COMPARISON OF MAGNETIZATION

(2) ネオジム磁石

表 4 に SiGrad で使用した条件を示す. 初期磁化ベクト ルは,+x 軸方向に 1,300 mT でパラレルに設定した.

表5に磁化推定に要した計算コストを示す.SiGradは、 TSVDよりも短時間で推定が完了することがわかる.

図 11 に各手法により推定された磁化分布を示す. TSVD は、35 モードまでを足し合わせた. 各手法で磁化 分布にばらつきがあるが、その原因として、計測時に空 気層を 6 mm と大きくしたため、空気層が小さい場合より も計測誤差の影響が出やすいことが考えられる.

表6に各手法で得られた磁化強度を示す.m-axisLを真 値とした場合,他手法で得られた値は誤差23.9 mT,相対 誤差1.9%以内に収まっている.

TABLE IV PARAMETERS FOR SIGRAD

\mathcal{E}_{opt}	а	M _{min} [mT]	M _{max} [mT]	θ_{\min} [rad]	θ_{\max} [rad]	φ_{\min} [rad]	$\varphi_{\rm max}$ [rad]
10^{-3}	1.0	1,100	1,500	0	π	$-\pi$	π

|--|

Instrument	Method	Iteration	Result W[mT ²]	Elapsed time [s]
In-house	TSVD (35 modes)	-	1.83×10^{5}	346
MTX-6R	TSVD (35 modes)	-	1.78×10^4	344
In-house	SiGrad (SDM)	1	3.44×10^{5}	38
MTX-6R	SiGrad (SDM)	1	8.91×10^{4}	39
In-house	SiGrad (QNM)	3	4.60×10^{5}	37
MTX-6R	SiGrad (QNM)	3	1.10×10^{5}	37



Fig. 11 Estimated magnetization distribution of Ferrite permanent magnet. (a) In-house instrument & TSVD (35 modes). (b) MTX-6R & TSVD (35 modes). (c) In-house instrument & SiGrad (SDM). (d) MTX-6R & SiGrad (SDM). (e) In-house instrument & SiGrad (QNM). (f) MTX-6R & SiGrad (QNM).

TABLE VI	COMPARISON OF MAGNETIZATION

Instrument	Method	Magnetization [mT]
In-house	TSVD (35 modes)	1,229.9
MTX-6R	TSVD (35 modes)	1,252.0
In-house	SiGrad (SDM)	1,245.2
MTX-6R	SiGrad (SDM)	1,266.7
In-house	SiGrad (QNM)	1,271.5
MTX-6R	SiGrad (QNM)	1,270.7
m-axis L	-	1,253.8

7. まとめ

本研究では、永久磁石周囲の磁束密度を計測する計測 器を開発し、計測から永久磁石の磁化分布まで推定でき る一連のシステムを構築した.また、フェライト磁石お よびネオジム磁石で計測し、市販の計測器と比較するこ とで、計測精度を検証した.さらに、TSVD および SiGrad に実測値を入力し、磁化分布を推定した.そして、推定 された磁化分布から平均的な磁化強度を算出し、市販の 計測器から得られた残留磁束密度の値と比較した.本研 究から得られた知見を要約すると、以下のようになる.

(1)本研究で開発した計測器は、市販の計測器と概ね 近い結果が得られたことから、十分高い精度で計 測可能であることが明らかになった。

- (2) 各計測器の実測値から磁化推定をした結果、パラレル配向の磁化分布が推定できた.また、平均的な磁化は、市販の計測器から得られる残留磁束密度を真値として、相対誤差が約2%以内であった.
- (3) 本研究で開発したシステムは、計測から磁化推定 まで、一つのアプリで容易に実行でき、非破壊的 かつ数時間程度で、計測から磁化推定までできる ことが明らかになった。

参考文献

- [1] R. E. Clark, D. Howe, and G. W. Gewell, "The influence of magnetization pattern on the performance of a cylindrical moving-magnet linear," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 36, no. 5, pp. 3571-3574, Sep. 2000.
- [2] 大穀晃裕、山口信一:「PM モータの磁極の非対称 性に起因するコギングトルクの検討-永久磁石の 個体間ばらつきの影響評価-」,電気学会論文誌 D, vol. 127, no. 1 pp. 95-102, 2007.
- [3] S. Leitner, H. Gruebler and A. Muetze, "Effects of manufacturing imperfections and design parameters on radial magnetic forces in the BLDC claw-pole motor," 2019 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), pp. 2167-2173, May 2019.
- [4] 北井伸幸,松浦裕,石井倫太郎,棗田充俊,星島 順:「Nd-Fe-B 焼結磁石の保磁力減少率の配向依存 度と保磁力メカニズム」,日立金属報,vol. 30, pp. 20-27, 2014.
- [5] Y. Zhang, J. Song, X. Qi, J. Du, W. Xia, J. Zhang, A. Yan, and J. Liu, "Magnetic domain structure of Sm(Co, Cu, Fe, Zr)_x thick permanent magnetic films," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 49, no. 7, pp. 3360-3363, July 2013.
- [6] H. Igarashi, T. Honma, and A. Kost, "Inverse inference of magnetization distribution in cylindrical permanent magnets," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 36, no. 4, pp. 1168-1171, July 2000.
- [7] L. Arbenza, O. Chadebec, C. Espanet, Y. Rtimi, and G. Cauffer, "Characterization of permanent magnetization," *IEEE Trans. Magn.* vol. 53, no 11, art. no. 8109504, Nov. 2017.
- [8] K. Haragashira, Y. Hibino, H. Yano, K. Sugahara, and Y. Kondo, "Magnetization reconstruction of ferrite magnets based on the truncated singular value decomposition method," Proceedings The of Eighteenth Biennial IEEE Conference on Electromangeit Field Computation (CEFC 2018), WPA4-14, Oct. 2018.
- [9] N. Nakamura, Y. Okamoto, K. Osanai, S. Doi, T. Aoki, and K. Okazaki, "Magnetization estimation method for permanent magnet based on mathematical programming combined with sigmoid function," *IEEE*

Transactions on Magn., vol. 58, no. 9-6000704, Sep. 2022.

- [10] Arduino Nano, Arduino Documentation: https://docs.arduino.cc/hardware/nano/
- [11] I²C, NXP Semiconductors: https://www.nxp.com/docs/en/user-guide/UM10204.pd f
- [12] TLE493D-W2B6 A0, Infineon Technologies AG: https://www.infineon.com/cms/jp/product/sensor/magn etic-sensors/magnetic-position-sensors/3d-magnetics/tl e493d-w2b6-a0/
- [13] 高速大規模電磁界数値解析技術報調査専門委員 会:「電磁界解析における高速大規模数値計算技 術」,電気学会技術報告, No 1043, 2016.
- [14] G. Golub, and W. Kahan, "Calculating the singular value and pseudo-inverse of a matrix," *SIAM J. Numeri. Anal.*, vol. 2, pp. 205-224, 1965.
- [15] 阿部充志:「特異値分解固有モードを利用した磁 場設計(核融合装置技術から応用した磁場設計)」、 プラズマ核融合学会誌, Vol.95, No. 4, pp.155-172, 2019.
- [16] C. G. Broyden, "The convergence of a class of double-rank minimization algorithms 2. the new algorithm," J. Inst. Maths. Applics., vol. 6, pp. 222-231, 1970.
- [17] Y. Okamoto, K. Fujiwara, and R. Himeno, "Exact minimization of energy functional for NR method with line-search technique," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 45, no. 3, pp. 1288-1291, Mar. 2009.
- [18] 株式会社アクタス: http://www.kk-actus.jp/ferrite-magnet
- [19] ネ オ マ グ 株 式 会 社 : https://www.neomag.jp/mag_navi/items_spec.php?ite mno=NB03002001011
- [20] MTX-6R, 株式会社アイエムエス: https://ims-jp.com/mtxsp/
- [21] 特 異 値 分 解 , MathWorks: https://jp.mathworks.com/help/matlab/ref/double.svd.h tml
- [22] M-axis L, Matesy GmbH: https://matesy.de/en/products/m-axis

研究業績

- A. 査読付き学術論文
- [1] <u>M. Shioyama</u> and Y. Okamoto, "Fast-sensing system of permanent magnet magnetization using matrix-arranged Hall sensors combined with deep neural network," *IEEE Sensors Letters*, 2024 (to be published).

- [2] N. Nakamura, <u>M. Shioyama</u>, and Y. Okamoto, "Nondestructive magnetization estimation of permanent magnets loaded on PMSM using leakage flux in the actual device," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2024 (to be submitted).
- B. 国際学会発表(査読無し,〇印:発表者)
- [3] O.M. Shioyama, N. Nakamura and Y. Okamoto, "Development of Automatic Measurement Apparatus for Magnetostatic Field -Nondestructive Magnetization Estimation System for Permanent Magnet-," *The 20th International IGTE Symposium 2022 (IGTE 2022)*, Graz, Austria, Sep. 2022.
- [4] OS. Yamaguchi, N. Nakamura, M. Shioyama and Y. Okamoto, "Estimation of Demagnetized Regions in Permanent Magnet Using Pinching-type Sigmoid-Function-based Gradient Method (P-SiGrad)," The 17th International Workshop on Problems **Optimization** and Inverse in Electromagnetism 2023 (OIPE 2023), Graz, Austria, Sep. 2023.
- C. 国内学会発表(査読無し,〇印:発表者)
- [5] 〇<u>塩山将英</u>,中村勢到,岡本吉史:「静磁界自動 計測器の開発 一永久磁石磁化推定手法のシステ ム設計一」,2022年電気学会産業応用部門大会, オンライン,2022年8月.
- [6] 〇<u>塩山将英</u>,中村勢到,岡本吉史:「永久磁石非 破壊磁化推定システムの構築 —自動静磁界計測 器と SiGrad の連携—」,令和4年度表面三部門合 同研究集会,三重,2022年11月.
- [7] 〇山口俊輔,中村勢到,<u>塩山将英</u>,岡本吉史:「シ グモイド関数を援用した勾配法(SiGrad)による 種々の永久磁石磁化推定に関する検討」,令和 4 年度表面三部門合同研究集会,三重,2022 年 11 月.
- [8] ○<u>塩山将英</u>,中村勢到,岡本吉史:「永久磁石近傍の静磁界自動計測器の開発 —パラレル配向セ グメント永久磁石の磁化推定への応用─」,計測 自動制御学会 2022 年度産業応用部門大会,オンラ イン, 2022 年 11 月.
- [9] ○山口俊輔,中村勢到,<u>塩山将英</u>,岡本吉史,後藤雄治:「シグモイド関数を援用した勾配法 (SiGrad)を用いた固体高分子形燃料電池の電流 源推定」,令和5年電気学会全国大会,愛知,2023 年3月.
- [10]○黒田優輝,<u>塩山将英</u>,岡本吉史:「ヘルムホル ツコイルを用いた二次元磁気特性測定用Hコイル の誤差角度測定に関する検討」,令和5年電気学 会全国大会,愛知,2023年3月.

- [11] 〇五十嵐一輝, 佐々木秀徳, <u>塩山将英</u>, 中村勢到,
 岡本吉史:「深層学習を用いた非破壊による永久
 磁石の磁化逆推定」, 令和5年電気学会全国大会,
 2-086, 愛知, 2023年3月.
- [12] 〇山口俊輔, <u>塩山将英</u>, 中村勢到, 岡本吉史:「シ グモイド関数を援用した勾配法(SiGrad)による永 久磁石の未着磁領域の推定」, 2023 年度非破壊検 査総合シンポジウム, 東京, 2023 年 6 月.
- [13] ○五十嵐一輝,佐々木秀徳,塩山将英,岡本吉史: 「畳み込み処理を活用した深層学習モデルによる 永久磁石内部磁化分布の逆推定」,2023年電気学 会産業応用部門大会,Y-112,愛知,2023年8月.
- [14] ○<u>塩山将英</u>, 岡本吉史:「非破壊磁化推定システムについて 一永久磁石磁化状態の高速推定器の開発─」,第1回「電機システム×AI」ワークショップ,大阪, 2023年12月.
- [15] ○<u>塩山将英</u>, 岡本吉史: 「マトリクスホールセン

サ基板と DNN の連携による永久磁石の高速磁化 推定器の開発」,令和6年電気学会全国大会,徳 島,2024年3月.

- [16] ○中村勢到,<u>塩山将英</u>,岡本吉史:「MELF による IPMSM 回転子の表面磁束計測値を用いた永久 磁石磁化推定に関する検討」,令和6年電気学会 全国大会,徳島,2024年3月.
- [17] ○広瀬友人,<u>塩山将英</u>,岡本吉史:「永久磁石周 囲における磁東密度の多点同時計測回路基板の開 発と磁化推定への応用」,令和6年電気学会全国 大会,徳島,2024年3月.
- [18] ○中村勢到,<u>塩山将英</u>,岡本吉史:「IPMSM回転 子における漏れ磁束の実測値を用いた永久磁石磁 化推定」,第 27 回電磁気応用部門/磁粉・浸透・ 目視部門/漏れ試験部門合同シンポジウム,東京, 2024年3月.