

高周波磁化測定の精度評価と高精度化

小野寺礼尚¹, 喜多英治², 柳原英人²

(¹茨城高専, ²筑波大)

Improvement of Precision and Accuracy Evaluation for Radiofrequency Magnetization Measurement

Reisho Onodera¹, Eiji Kita², Hideto Yanagihara²

(¹NIT, Ibaraki College, ²University of Tsukuba)

はじめに

電気自動車の発展に伴い、インバータの高周波化、高電圧化が進んでいる。これに応じて、電源トランスなどインダクタのコア材料も高周波数特性の性能向上、特性評価が求められている。一般的な B - H ループアナライザーでは、リングコアに成形された材料の交流磁気特性を評価する。リングコアを用いることによって、反磁場を考慮する必要なく小さな磁場振幅で特性を評価することができるが、コアの成形など工程も多い。

一方、我々はハイパーサーミア用磁性流体の開発を目的に 20 kHz-1 MHz の交流磁場で材料磁化 M を測定できる交流磁化測定装置の開発を進めてきた¹⁾⁻³⁾。この装置の特徴として、リングコアの成形を必要としない試料の測定が挙げられる。本装置での測定では、直流バイアス下での交流特性評価時にヒステリシスループの原点を定められるなど、材料磁化を直接測定することの利得も大きい。一方で、軟磁磁気特性の測定に対応できる精度がないという問題がある。

この交流磁化測定装置を小さな保磁力をもつ軟磁性コア材料の高周波特性の評価に応用するためには、磁化の絶対値評価のための高精度(高分解能)化が必要となる。本研究では、測定精度を向上させるために現状の精度を厳密に評価し、改良すべき点の洗い出し・改善を行い、高精度化を目指した。

実験

磁化 M 、磁場 H の測定には、ピックアップコイルを用いた。 H には 1 回巻きコイルを用い、 M には Fig. 1 に示すような、5 回巻きの 8 の字コイルを用いた。8 の字コイルは 2 個のコイルを逆向きに接続しており、 H の変化で生じる誘導起電力はキャンセルされ、一方のコイルに置いた試料磁化 M の時間変化 (dM/dt) による起電力を測定できる。

高精度化で問題となる測定検出系での位相回転を見積もるためには、履歴のない磁化過程を示す物質を標準試料とすることが望ましく、 Dy_2O_3 粉末を選択した。Fig. 2 に示したように、得られたループは原点付近で膨らみをもち、保磁力があるように見えている。 Dy_2O_3 は常磁性であり、渦電流の影響も無視できると考えられるので、この原因が測定系の位相ずれに起因するものと考えられる。

この位相ずれについて、ピックアップコイルおよび電源の動作周波数について検証した結果を当日報告する。

参考文献

- 1) A. Seki et al., J. Phys. Conf. Ser. **521**, 012014 (2014).
- 2) R. Onodera, E. Kita, M. Kishimoto, T. Kuroiwa, and H. Yanagihara, IEEE Trans. Mag. **57**, 6100605 (2021).
- 3) R. Onodera, E. Kita, T. Kuroiwa, and H. Yanagihara, JJAP **61**, 065003 (2022).

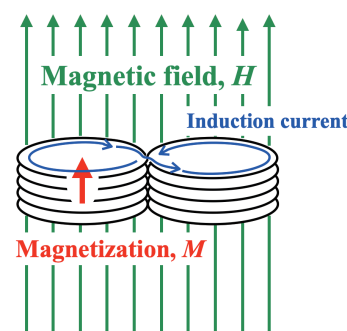


Fig. 1 ピックアップコイルの概念図。

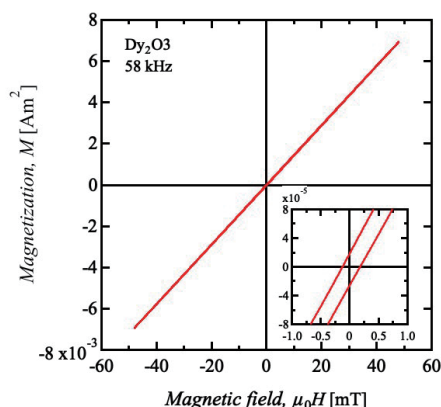


Fig. 2 Dy_2O_3 の M - H ループ。挿入図は原点近傍。

高周波高磁場における鉄損計測

田中大暁, 萬年智介, 磯部高範, 喜多英治, 柳原英人

(筑波大)

Measurement of iron loss at high frequency and high magnetic field

H. Tanaka, T. Mannen, T. Isobe, E. Kita, and H. Yanagihara

(Univ. of Tsukuba)

1 はじめに

パワーエレクトロニクス分野では、次世代パワー半導体デバイスの活用が進んでおり、これに合わせてインダクタ・トランスのコアの高周波損失の低減が求められている。このためには高性能なコア材料の開発と、これを評価するための磁化過程、鉄損評価手法が必要である。我々は LC 共振回路を組み込んだ励磁コイルと 1 次微分型ピックアップコイルを用いて、数 MHz の全動的磁化過程の計測が可能であることを確認している¹⁾。本研究では、標準試料としてイットリウム鉄ガーネットおよび酸化ジスプロシウムを用いることで計測系の較正を行い、ソフトフェライトの数 MHz の大振幅磁化過程と鉄損を計測したので報告する。

2 方法

Fig. 1 に本研究で構築した磁化過程計測装置の概念図を示す。磁性体試料を励磁するために、GaN インバータ電源と LC 共振回路を用いることで、励磁コイル内に大振幅磁界を発生する。また、試料の磁化を 1 次微分型ピックアップコイルで検出する。励磁コイル電流とピックアップ信号をオシロスコープで計測し、PC で処理することで、磁化曲線を得る。装置を較正するために、標準試料としてイットリウム鉄ガーネット (YIG) 球と酸化ジスプロシウム (Dy_2O_3) を用いた。YIG は高周波用の軟磁性体であり、絶縁物であるため数 MHz 域では渦電流の影響も無視できると仮定すると、飽和磁化 M_S は既知であり、また飽和磁界は $H_S = M_S/3$ で与えられることから磁化と磁界の絶対値較正が可能となる^{2,3)}。一方、 Dy_2O_3 は絶縁物常磁性体であることから、磁気モーメントが印加磁界に対して線形に応答し、ヒステリシスを生じないと仮定することで、電流 (磁界) 測定と電圧 (磁化) 測定のための位相補正が可能となる²⁾。

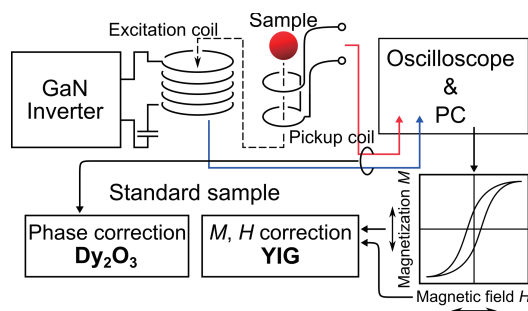


Fig. 1 Conceptual diagram of the system

3 結果および考察

Fig. 2 に Fig. 1 の実験系を用いて計測した 4.8 MHz における NiZn フェライト (直径約 1 mm のほぼ球状) の動的磁化曲線を示す。数 MHz の周波数においても、線形領域から磁化飽和に至るまでの全磁化過程の計測が可能であることが確かめられた。講演では、これらの磁化過程の測定結果から計算した鉄損の振幅依存性とその妥当性について発表する。

References

- 1) 田中大暁 他, 第 47 回日本磁気学会学術講演会, 27aD-10 (2023)
- 2) P. Lenox, L. K. Plummer, P. Paul, J. E. Hutchison, A. Jander, and P. Dhagat: *IEEE Magnetics Letters*, **9**, 6500405 (2017).
- 3) R. Onodera, E. Kita, T. Kuroiwa, and H. Yanagihara: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **61**, 065003 (2022).

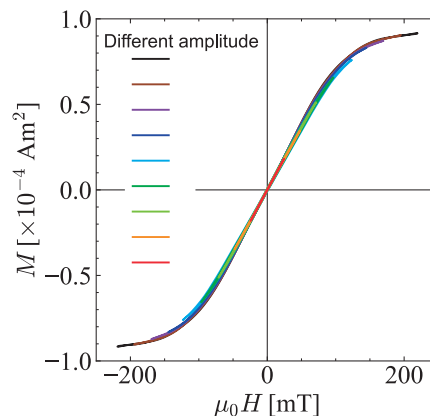


Fig. 2 Dynamic magnetization curve of NiZn ferrite sample (4.8 MHz)

電解鉄粉からなる磁心の Lasso 回帰を用いた損失推定

松本駿佑¹, 室賀翔², 児玉雄大², 阿加賽見², 遠藤恭^{2,3}

(¹ 東北大学工学部, ² 東北大学工学研究科, ³ 東北大学先端スピントロニクス研究開発センター)

A loss estimation based on lasso regression for toroidal cores composed of electrolytic iron powders with different shapes

S. Matsumoto¹, S. Muroga², Y. Kodama², S. Ajia², Y. Endo^{2,3}

(¹Sch, Eng., Tohoku Univ. ²Grad, Sch, Eng., Tohoku Univ. ³CSIS, Tohoku Univ.)

はじめに 高周波トランスやインダクタ用の磁性材料の有力な選択肢として、金属系軟磁性粉末からなる圧粉磁心が挙げられる。圧粉磁心はフェライトよりも高飽和磁束密度であるが、高周波帯域で損失が大きいという課題がある。交流損失の低減を目指して、様々な実験的、解析的アプローチが検討されている。しかしながら、考慮すべきパラメータが膨大であり、設計指針の構築が困難という課題がある。この解決法の一つとして、機械学習の利用によって交流損失をプロセスパラメータや静的磁気特性から推定できる可能性が示された¹⁾。しかしながら、分類機能を持たない回帰モデルの精度が低く、損失発生機構の明確化に至っていない。本研究では、スタインメッツの実験式²⁾にある損失分離の考えに基づいて、変数を対数で扱うことにより、推定精度の向上を試みた。

評価方法 電解鉄粉の形状、プレス圧および熱処理温度がそれぞれ異なる9種類の圧粉磁心¹⁾を評価に用いた。

目的変数は、交流損失とし、その値はB-Hアナライザを用いて測定したB-Hループの面積から算出した。説明変数は、B-Hアナライザの印加磁束密度の振幅および周波数、磁心作製時におけるプレス圧および熱処理温度、4端子法によって測定した磁心の抵抗率、VSMを用いて測定した磁化曲線(図1)から求めた飽和磁化および保磁力、磁化曲線から抽出した主成分スコア(PC1-3)および次元削減後の座標(UMAP(X, Y, Z))とした。

データセットの総数は354であり、75%を学習用(Train)、25%を検証用(Test)に使用した。これらのデータは、PC1-3, UMAP(X, Y, Z)を除き、すべて対数値とした。

結果 学習の結果、印加磁束密度の2.2乗、周波数の1.4乗、熱処理温度の1.7乗に比例する交流損失の予測関数が得られた。交流損失が熱処理温度の関数として表されたことは、交流損失とプロセスパラメータの関係を定量化するために本手法が有効である可能性を示している。図2に、予測値を実測値と比較して示す。対数値を用いた場合の決定係数は0.96であり、真数値の場合(決定係数:0.08)¹⁾に比べ、交流損失の推定精度が向上した。この結果より、スタインメッツの実験式等の経験則に基づいた学習データの準備には、機構解析のために重要である。

謝辞 本研究の一部は、文部科学省革新的パワーエレクトロニクス創出基盤技術研究開発事業 JPJ009777 およびデータ創出・活用型マテリアル研究開発プロジェクト JPMXP1122715503 のもとで行われた。また、東北大学 CIES および東北大学 CSIS の支援のもとで行われた。

参考文献

- 1) S. Muroga et al., "An AC loss Estimation Based on Machine Learning for Toroidal Cores Composed by Electrolytic Iron Powder," 38th JIEP 2024, 15D2-3, 2024.
- 2) C. P. Steinmetz, "On the Law of Hysteresis", TAIEE, vol.IX, no.1, pp.1-64, 1892.

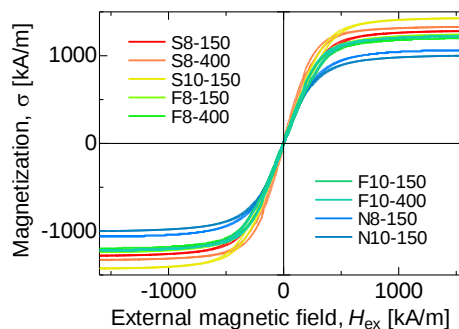


Fig. 1: Magnetization curves of the toroidal cores with different process parameters

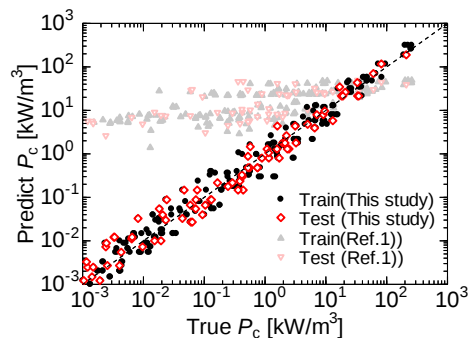


Fig. 2: Relationship between measured and predicted loss based on lasso regression

高周波磁界印加によるボンド磁石の渦電流損失評価

阿部 将裕、多田 秀一、山本 宗生、平澤 英之*
(日亜化学工業株式会社、*新居浜工業高等専門学校)

Evaluation of Eddy Current Loss in Bonded Magnets Under High Frequency Magnetic Field
M. Abe, S. Tada, M. Yamamoto, H. Hirazawa
(Nichia Corporation, *National Institute of Technology, Niihama College)

まえがき

近年、モータの小型・高効率化がより一層望まれている。モータは高速回転させることで同一体格のまま高出力化が可能である。しかし高速回転させることによって生じる渦電流が急激に大きくなり、モータの磁石の温度上昇を引き起こし、これが熱減磁につながる¹⁾。これに対して、磁粉と樹脂で構成されるボンド磁石は高い電気抵抗を有するため、高速回転への適用が検討されている²⁾。ボンド磁石は、磁粉やバインダ樹脂の組合せによって様々な種類があるが、高周波磁界印加による渦電流損失に関する系統的な検討はなされていない。今回、種々の異なる磁粉（組成違いならびに表面コートの有無）を用いたボンド磁石を作製し、高周波磁界を印加してその上昇温度から渦電流損失の影響を評価した。

実験方法

Table 1 に示す 4 種の磁粉を使用し、磁場中射出成形で $\Phi 10\text{-L7}$ ($P_c \approx 2$) の異方性ボンド磁石を作製した後、磁界: 4800 kA/m にて飽和着磁した試料を準備した³⁾。この試料に磁界強度: ± 8 kA/m、周波数: 100 および 370 kHz の高周波磁界を印加し、その時のボンド磁石の上昇温度を放射温度計で計測した。各印加周波数 f における ΔT (磁界印加 5 min 後の温度上昇量) を用い、2 周波法による鉄損分離を行い、得られた $\Delta T/f$ の傾きから発熱量における渦電流損失を評価した。

実験結果

実験結果を Fig. 1 に示す。A は f に対する $\Delta T/f$ の挙動が 1 次関数的に変化し、渦電流損失の存在を示している。同じく B-1 も 1 次関数的な挙動を示すが、その傾きは A と比べて小さく、また B-2 は傾きがさらに小さくなり、絶縁体である酸化物磁石 C に近い変化を示した。A: $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ と B-1: $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_3$ の差は材質による電気抵抗の違い、また B-1: $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_3$ (コート無) と B-2: $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_3$ (コート有) の差は表面コートの有無による磁粉粒子間の渦電流発生の違いが影響しているものと考えている。講演ではさらに詳しく解析した結果について報告する。

Table 1 Sample List of Bonded Magnets		
Sample	Magnetic Powder	Classification
A	$\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$	Rare Earth Magnet (Metallic)
B-1	$\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_3$	Rare Earth Magnet (Nitride)
B-2	$\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_3$ (Phosphate coated)	
C	Sr-Ferrite	Oxide Magnet

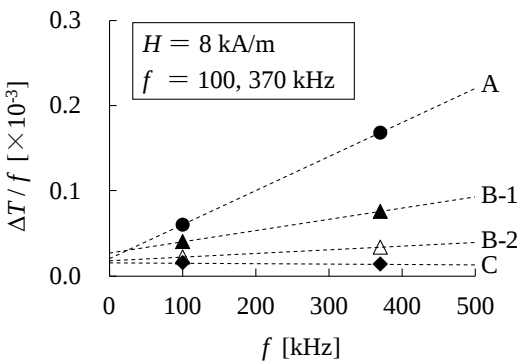


Fig.1 Exothermic Behavior of Bonded Magnets

【参考文献】

1) K. Yamazaki: *IEEE Journal*, Vol.127, No.11, pp.715-718 (2007).
2) Y. Yoshikawa, T. Ogawa, Y. Okada, S. Tsutsumi, H. Murakami, S. Morimoto: *IEEEJ. Trans. IA*, Vol.136, No.12, pp.997-1004 (2016).
3) K. Itoh, Y. Hashiba, K. Sakai, T. Yagisawa: *T.IEE Japan*, Vol.118-A, No.2, 98 (1991).

集磁ヨーク付ツインヘッド型光プローブ電流センサの基礎検討

金子 秀太¹, 曾根原 誠¹, 平井 大地¹, 須江 聡^{2,1}, 佐藤 敏郎¹, 宮本 光教², 久保 利哉²
(¹信州大学, ²シチズンファインデバイス)

Fundamental study of twin head type optical probe current sensor with magnetic yoke
S. Kaneko¹, M. Sonehara¹, D. Hirai¹, S. Satoshi^{2,1}, T. Sato¹, M. Miyamoto², T. kubo²
(¹Shinshu University, ²Citizen Finedevice Co.,Ltd.)

はじめに

SiC や GaN の実用化に伴い、大容量（高電圧・大電流）の電源や数十 MHz 以上の超高速スイッチング電源が開発・使用されつつあり、これらの電源における電流を精度良く計測できる電流センサの要求が高まっている。筆者らは、in-situ で直流から数百 MHz の交流までの大電流を測定することが可能な Faraday 効果型光プローブ電流センサの開発を進めてきた^[1]。しかし本センサは被測定電流との距離にセンサ出力が依存する相対センサであるため電流の絶対値計測が困難という課題があった。本稿では、電流の絶対値計測を目指し集磁ヨーク付ツインヘッド型光プローブ電流センサを検討し、その試作・結果について述べる。

集磁ヨーク付ツインヘッド型光プローブ電流センサの構成

Fig. 1 にツインヘッド型光プローブ電流センサの干渉光学系の概略図を示す。本センサは光源、干渉計、センサヘッドおよび差動アンプからなり、片方のセンサヘッドの途中で PMF を 90° 回転融着することで Faraday 回転の符号を反転させている。これによって Faraday 回転角の合成を出力とすることができ被測定磁界を検出可能になる。この 2 本のセンサヘッドに Fig. 2 に示すように比透磁率 20 の Fe 系メタルコンポジットからなる集磁ヨークを用いることで、被測定電流が流れる導線の位置による出力の変化を抑制し、電流の絶対値計測を可能にする。また、外乱ノイズに対して差動となるためノイズの影響を軽減する効果も期待できる。

実験結果

Fig. 2 における集磁ヨークの開口部に導線(φ0.5 mm)を通し、その導線に 20 A のパルス電流を流し、電流計測を行なった。Fig. 3 に示す①の位置に導線を通した場合の電流値（センサ出力）に対する②～⑤における電流値の変化率の結果を Table 1 に示す。同表にシングルヘッド型およびツインヘッド型の J-MAG Studio による解析値も併記する。ツインヘッド型にすることで電流の変化率は 5%程度に抑えられたことが確認された。④と⑤で解析値と実測値に差が出た理由は、2 本のセンサヘッドの感度が一致していなかったためであると考えられる。発表当日は集磁ヨークの作製方法や解析・測定条件について詳細に述べる。

謝辞

本研究は、NEDO「官民による若手研究者発掘支援事業」共同研究フェーズ（2023 度新エネルギー第 1002006 号）の助成を受けたものである。

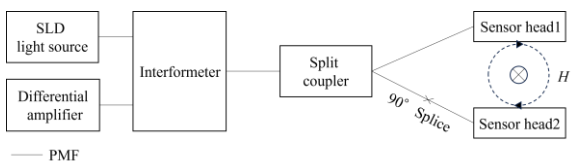


Fig. 1 Configuration of twin head type optical probe

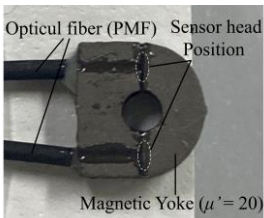


Fig. 2 Photograph of sensor head with magnetic yoke

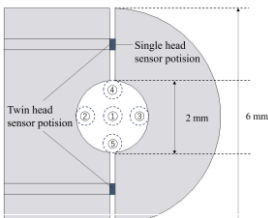


Fig. 3 Measurement position in sensor head

Table 1 Sensor output deviation in point② to ⑤ from point① in Fig. 3

Position	Single head simulation	Twin head simulation	Twin head measurement
②	-2.31 %	-2.45 %	-1.19 %
③	-2.53 %	-2.36 %	-2.4 %
④	+15.67 %	+3.54 %	+5.25 %
⑤	-8.4 %	+3.57 %	-2.46 %

参考文献

[1] T. Murakami, et al., “Investigation of sensor head with quadrangular pyramid magnetic yoke for optical probe current sensor with high sensitivity”, *The papers of tech. meeting on magn., IEEJ*, MAG-23-010, 2023.

近傍磁界情報の機械学習によるオブジェクト検出を用いた プリント配線板上の磁界源推定

佐藤 雄亮¹, 室賀 翔², 鴨澤 秀郁¹, 田中 元志¹
(¹秋田大学, ²東北大学)

Estimation of magnetic field sources on printed circuit boards using object detection by machine learning of
magnetic near-field information

Y. Sato¹, S. Muroga², H. Kamozaawa¹, M. Tanaka¹
(¹Akita Univ., ²Tohoku Univ.)

はじめに 電子機器内のプリント配線板(PCB)上における電磁ノイズの発生源や伝搬経路の推定のためには、配線や素子間の電磁界結合に関する定量的な情報が必要である。筆者らは、基板内の磁界源を、配線を通る電流とそのリターン電流で形成される単純な等価ループ電流としてモデル化することにより、ループ間の磁界結合を定量化する手法を提案した¹⁾。また、PCB上の伝送線路を磁界源とした場合の近傍磁界マップより、磁界源の面内の位置および寸法情報を抽出し、ループの高さと傾きの推定を試みた²⁾。その結果、磁界源の中心座標の誤差は最大 10 mm、長さの誤差は最大 34 mm であり、その検出精度向上が課題となった。本研究では、PCB上の配線から生じる磁界分布から磁界源のオブジェクト検出を行い、その位置座標および長さを推定する方法について、電磁界シミュレータ(HFSS, Ansys)と YOLO v4³⁾を利用して検討した。

評価対象 Fig. 1 に、評価対象とする PCB の概略図を示す。比誘電率 3.1、厚さ 1.5 mm の変性ポリフェニレンエーテル基板に、幅 $w_s = 0.8$ mm、厚さ 35 μm の MSL (microstrip line) を設計した。ここで、Fig. 1 の y 方向の信号線の長さを $l_s = 5, 10, \dots, 45$ mm (9 パターン) と変化させた。MSL に 1 GHz、-5 dBm の電力を印加することを想定し、MSL からの距離 $h_p = 1.5$ mm における x 方向の磁界分布 (磁界マップ) を電磁界シミュレータより取得した。磁界マップは、磁界強度の最大値が 0 dB となるよう規格化し、-60~0 dB の範囲でグレースケール画像とした。画像の寸法は磁界源中心から ± 25 mm の範囲とした。

オブジェクト検出器の学習 磁界源を、幅 w_m (0.8, 1.6, $\dots$ 5.6 mm)、長さ l_m (10, 15, $\dots$ 95 mm) が異なるループ電流モデルとし、近傍磁界分布の理論値を算出して学習データとした。ループの高さについては、評価対象とする配線基板厚の 2 倍の $h_m = 3.0$ mm、磁界観測面の高さを $h_p = 1.5$ mm として、磁界分布をビオ・サバルの法則に基づき算出した。このとき、磁界測定におけるノイズフロアのばらつきを考慮し、-30, -25, -20 dB のノイズフロアに対応するマップを作製した。各画像について、モデルの中心から横方向 ± 15 mm、縦方向 $\pm l_m/2$ の範囲を磁界源の範囲 (バウンディングボックス) としてアノテーションを行った。合計 378 個のデータを用いて、オブジェクト検出器 (YOLO v4) を学習した。

磁界源の検出 9 パターンの磁界マップを検出器に入力し、得られたバウンディングボックスから磁界源の中心座標と長さを推定した結果、すべての磁界源を正しく検出できた。検出例を Fig. 2 に示す。磁界源の中心座標と長さの平均誤差はそれぞれ約 0.10 mm, 1.6 mm であり、おおむね推定できることが確認された。

おわりに プリント配線板上の近傍磁界情報の機械学習を利用し、磁界源の検出を検討した。近傍磁界情報に加え、線路の寸法や配置に関する情報をオブジェクト検出器に学習させることで、磁界マップからの磁界源の長さおよび位置座標の推定精度が向上した。今後は、実測における検出について検討する。

参考文献

1) Y. Sato, et al., IEEE Trans. Magn., vol.59, no.11, #4000704, 2023. 2) 佐藤他, 第 38 回 JIEP 春大, 14B2-3, 2024. 3) A. Bochkovskiy, et al., arXiv preprint arXiv: 2004. 10934, 2020.

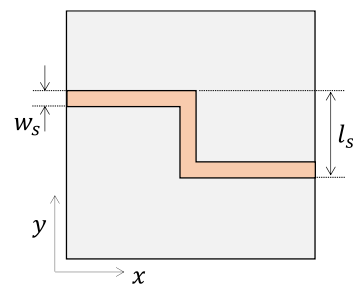


Fig. 1 Top view of PCB

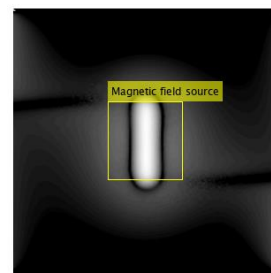


Fig. 2 An example of detected result ($l_s = 15$ mm)