

熱流センサを用いた運転中の磁気部品で生じる 銅損と鉄損の分離測定 —簡易構造を有するリアクトルにおける検証—

平尾 宗之* 正 員 日下 佳祐（長岡技術科学大学）

Separated Measurement of Copper and Core Losses of Magnetic Components under Operation with Heat Flux Sensors – Verification Using a Reactor with a Simple Structure–

Kazuyuki Hirao*, Keisuke Kusaka Member (Nagaoka University of Technology)

This paper proposes a new method for measuring losses in magnetic components using a heat flux sensor. The method involves attaching a heat flux sensor to the passive component. Power loss is calculated by integrating the measured heat flux along the component's surface area. Using multiple heat flux sensors simultaneously enables separation of losses caused by different factors. By applying the proposed method to magnetic components, copper and iron losses can be measured separately. The paper validates the method by measuring the power loss of test resistors with a known power consumption. A minimum error of 0.195 W is obtained for a 3 W power loss, which is lower than the measurement error of the conventional calorimetric method. Additionally, copper loss and iron loss in the magnetic component are measured using multiple heat flux sensors. The measurement results demonstrate that the copper and iron losses can be measured separately with errors of 0.253 W and 0.164 W, respectively.

キーワード：カロリー法，損失測定，熱流センサ
(Calorimetric method, Loss measurement, Heat flux sensor)

1. はじめに

近年，動作周波数の増加や磁気部品設計の最適化によって，電力変換器の高パワー密度化が進んでいる。さらなる高パワー密度化に向け，回路内で大きな体積割合を占めている磁気部品の損失解析は必要不可欠である。

磁気部品の損失測定手法として，電氣的測定法が一般的に知られている。電氣的測定では磁気部品の入出力電圧及び電流を計測することで損失を測定する⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾。しかしながら，電力変換回路に使用される昇圧用リアクトルなどの磁気部品は強い誘導性を示すため，位相誤差による測定値の誤差が大きくなる⁽¹⁾。

電氣的測定法における位相誤差の影響を低減する技術が提案されている⁽²⁾⁻⁽⁴⁾。しかしながら，被測定デバイス(DUT)に合わせて測定系を調整する必要がある。

DUTの特性や動作周波数に依存しない測定方法として，カロリー法が提案されている^{(1),(5)-(8)}。本手法では，DUTで生じる損失起因の熱を観測することで間接的に損失を測定する。DUTから発生する熱を高精度に測定するためには，

測定空間への流入熱および流出熱を最小化する必要がある。そのため，二重チャンバー構造や，測定空間の温度制御などの手法が提案されている。提案されてきたカロリー法は位相誤差や動作周波数の影響を受けず，電氣的測定法と比較して高い測定精度を有する。一方で，DUTの総損失のみが測定可能とされるため，磁気部品の銅損や鉄損といった各損失成分を分離して測定することはできない。

本論文では上記の問題を解決するため，熱流センサを用いた新たなカロリー法を提案する。熱流センサは，対象物の熱流 q [W/m²] を測定可能なセンサである。センサで取得した熱流を対象物の表面積 S [m²] により面積分することで，電力損失 P_{loss} [W] を測定する。本手法ではセンサを複数使用することで，異なる発熱量の熱流を個別に測定することが可能である。そのため，高精度な測定を維持しつつ，損失要因の分離測定を実現できる。

本論文ではまず，既知の電力損失を有する抵抗器を用いて，熱流センサによる損失測定精度を評価する。次に，複数の熱流センサをインダクタに適用し，銅損と鉄損の分離測定について実験的に検証する。

2. 提案する損失測定手法

本章では熱流センサを用いた損失測定手法について述べる。提案する損失測定法では、センサを用いて素子発熱に起因する熱流を取得し、得られた熱流と素子形状に基づいて損失を測定する。Fig. 1 に熱流センサの構造を示す。本熱流センサはゼーベック効果を利用しており、DUT の熱流 q [W/m²] は(1)式で示すフーリエの法則より算出される。センサ表裏の温度差 $T_1 - T_2$ [K] は、ゼーベック効果によって生じる電圧 V [V] より算出される。ここで λ [W/mK] はセンサの熱伝導率、 d [m] はセンサの厚さである。

$$q = \frac{\lambda}{d}(T_1 - T_2) \dots\dots\dots (1)$$

熱流センサによって検出された熱流 q を DUT の放熱に寄与する表面積 S で面積分することによって損失 P_{loss} を測定する。

$$P_{loss} = \int_S q dS \dots\dots\dots (2)$$

Fig. 2 に提案する損失測定法を示す。複数の熱流センサを使用することで、損失要因別に測定することが可能となる。磁気部品の損失測定では、熱流センサをコア部および巻線部に取り付ける。各センサから鉄損に比例する熱流 $q_{Ironloss}$ [W/m²]、銅損に比例する熱流 $q_{Copperloss}$ [W/m²] を取得する。得られた熱流と各部の放熱表面積に基づき、銅損および鉄損を物理的に分離して測定することが可能となる。

3. カロリー法による損失測定

〈3.1〉従来のカロリー法 本節では温度チャンバーを用いたカロリー法⁽⁵⁾の測定原理を説明する。Fig. 3, Table 1 に測定環境⁽⁵⁾を示す。本手法では熱交換器を用いて周囲温度 T_{amb} とチャンバー内温度 T_{cmb} との温度差が 0 となるようペルチェ素子を用いてフィードバック制御を行う。DUT の発熱と釣り合っている状態のペルチェ素子における駆動電力を測定することで、間接的に DUT の発熱を測定することが可能である。

ペルチェ素子の吸発熱量は(3)式の第 1~3 項で表され、恒温槽内のファンモータ消費電力 Q_{FC} は第 4 項で表される。各項の差を計算し DUT 損失 P_{loss} を求める。ここでペルチェ素子に流入する電流を I_p [A] とする。

$$P_{loss} = S_p T_c I_p - \frac{1}{2} r_p I_p^2 - \frac{T_h - T_c}{R_p} - Q_{FC} \dots\dots\dots (3)$$

従来のカロリー法では熱交換器で吸熱する前に空気などの流体を介す必要があり、高精度な温度チャンバーが不可欠であった。加えて、実際の駆動状態とは異なる条件下での温度のみが観測されることとなる。

〈3.2〉提案するカロリー法 本節では提案するカロリー法の従来の手法との相違点を説明する。提案手法では DUT 表面部への熱流センサ貼付のみで損失測定が可能となる。Fig. 4 に提案カロリー法の実験環境を示す。

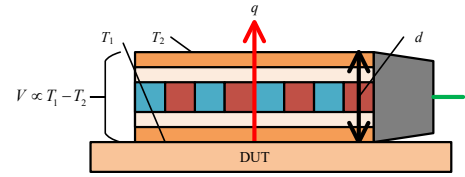


Fig. 1. Schematic diagram of a heat flux sensor.

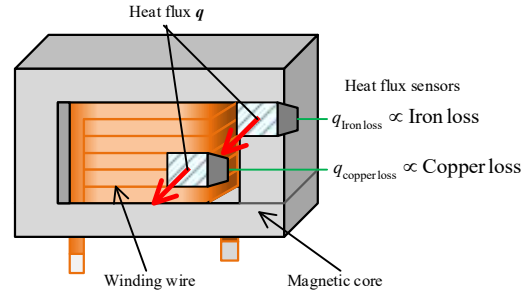


Fig. 2. Proposed method for measuring power loss in magnetic components.

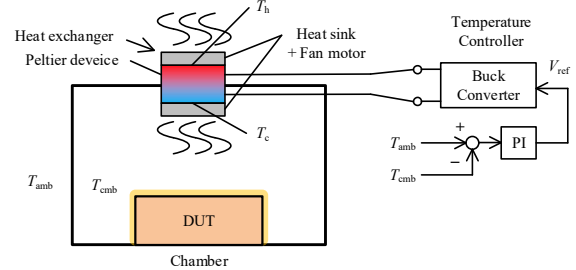


Fig. 3. Experimental setup of the conventional calorimetric method.

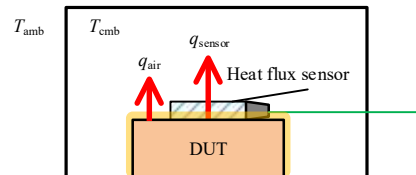


Fig. 4. Experimental setup of the proposed calorimetric method.

Table 1. Thermal characteristics of the constant temperature chamber.

Parameter	Symbol	Value
Heat flux sensor		TOYOTA Energy Flow T - Built-in S
Model number		
Peltier device		TEC1-12706 0.03395 V/K 5.400 K/W 3.5 Ω
Model number		
Thermopower	S_p	
Thermal resistance	R_p	
Resistance	r_p	
Fan motor		1.752 W
Power dissipation	Q_{FC}	

前述したとおり、DUT 表面から熱流センサへは直接熱が伝導される。ゆえに提案する手法では流体を介す必要がなくなり、熱交換器、温度チャンバーが不要となる。このことから、提案するカロリー法では測定精度を維持しながら、環境構築を容易にすることが可能である。また複数センサの併用による損失分離が可能となる。

なお本論文では、提案法と従来法との比較を行うため、従来のカロリー法において必要とされるチャンパー壁を DUT 周囲の温度及び対流を一致させる目的で用いる。

4. 実験結果

〈4.1〉従来法と提案法の測定精度比較 提案手法の測定精度を検証するために、DUT として抵抗器を用いて実験を行った。Table 2 に DUT の特性を示す。Fig. 6 に時間に対する測定損失を示し、Fig. 7 に定常状態における平均値から算出した測定誤差を示す。平均値は、実験開始後 600 秒から 1800 秒の間の測定値からそれぞれ導出し、従来法および提案法の損失測定精度を評価した。

Fig. 6(b)より、提案カロリー法は損失測定において時間経過に対して一貫した測定精度を維持している。一方、従来法である Fig. 6(a)では測定電力が時間によって大きく変動する結果となった。これは従来法では温度チャンパーからの熱漏れを防止するために、熱交換器によって周囲温度への追従するよう制御が行われているものの、チャンパー外の実験環境変化等がチャンパー内の温度に影響を与えるためである。

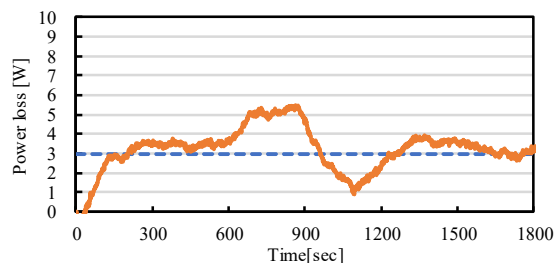
Fig. 7 は抵抗の消費電力を変化させた場合の測定電力誤差である。従来法と比較して、損失 5 W までの測定で提案手法が優位性を示し、最小誤差は 0.195 W であることを示した。一方で、提案法では損失の増加とともに誤差が増加する傾向を示した。これは熱流センサの熱抵抗 R_{th_sensor} が放熱経路に影響を与えるためである。したがって、熱抵抗の低い熱流センサを用いることでさらに高精度な損失測定が可能であることが示唆された。

Fig. 8 に提案法における DUT 表面熱流を表した熱等価回路である。センサを通過する熱流 q_{sensor} はセンサ熱抵抗 R_{th_sensor} とセンサ貼付時の接触熱抵抗 $R_{th_contact}$ 、周囲空気との対流 R_{th_air} によって決定される。 R_{th_sensor} 、 $R_{th_contact}$ はチャンパー内の対流に依らず一定の値をとる。結果として熱交換器や対流の影響を受けず、測定時間に対して高い安定性を示した。

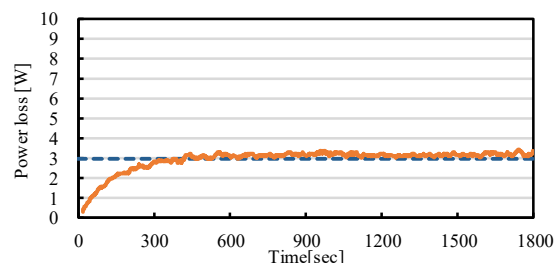
〈4.2〉磁気部品の損失分離 本節では、複数の熱流センサを用いて銅損と鉄損を分離する提案手法の実験結果について述べる。Fig. 9 にインダクタ及び熱流センサの設置位置と実験環境を示す。また Table 3 に製作したインダクタの仕様を示す。各熱流センサはインダクタで発生する銅損 P_c による熱流 q_c および鉄損 P_i による熱流 q_{i1-3} を測定する。ここで銅損 P_c に起因する熱流は巻線表面に様に分布すると仮定した。一方で Fig. 10 に示すインダクタ表面温度から、コア表面温度が不均一であることを確認した。特に下部の

Table 2. Parameters of resistors.

Parameter	Symbol	Value
Model number		SQP10AJB-47R
Resistance	R_{cem}	47 Ω
Surface area	S_{cem}	0.001947 m ²
Input power	P_{cem}	3~6.65 W



(a)



(b)

Fig. 6. Comparison of loss measurements at 3 W against measurement time. (a) Conventional method.

(b) Proposed method.

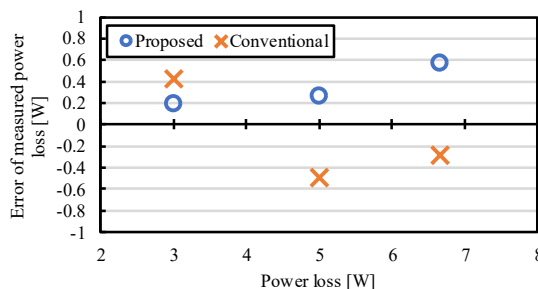


Fig. 7. Comparison of measurement error between the conventional method and the proposed method.

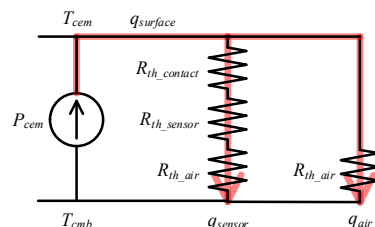


Fig. 8. Thermal equivalent circuit model of the resistor and heat flux sensor.

コア接合部付近でフリンジング損失による発熱が見られた。したがって単一の測定箇所では鉄損 P_i を正確に測定することは困難となる。そのため本測定では鉄損 P_i による熱流

を 3 箇所から取得し、その総和から鉄損を算出した。算出式を(4)(5)式に示す。

$$P_c = \int_{S_c} q_c dA = q_c S_c \dots\dots\dots (4)$$

$$P_i = \int_{S_i} q_i dA = \sum_{n=1}^3 q_{i_n} S_{i_n} \dots\dots\dots (5)$$

各損失の測定値 P_c 、 P_i は、測定開始後 2.5 から 3.0 時間の間に取得した値から平均値を算出した。

Fig. 11 に測定時間に対する各部損失の測定結果を示す。結果より、熱流センサを複数使用することで、磁気部品における銅損と鉄損を同時に分離して測定が可能であることを確認した。銅損の測定値は 0.656 W であり、測定誤差は 0.253 W であった。また鉄損の測定値は 3.378 W であり、測定誤差は 0.164 W であった。

以上の結果より、損失の真値に対する誤差は依然として残存するものの、電力変換回路に使用される磁気部品の効率評価用途としては高い精度で評価が可能であることが実験的に示された。

5. まとめ

本論文では、熱流センサを用いた新たなカロリー法による損失測定を提案した。提案法では、部品損失により発生する熱流から損失を測定する。提案法の妥当性を DUT として抵抗およびインダクタを用いた実験により検証した。抵抗による実験では、測定時間に対する測定精度で優位性を示し、3 W の電力損失を 0.195 W の誤差で測定可能であることを示した。インダクタによる実験では、銅損を 0.256 W の誤差で測定し、鉄損を 0.164 W の誤差で測定した。これらの結果から、提案法により動作中の磁気部品の銅損および鉄損を個別に測定できることが示された。

提案法で得られた測定精度は、従来のカロリー法と同様でありながら、既存手法では困難であった損失分離を可能としている。また、電力変換回路の動作中における鉄損及び銅損を測定可能である。

文 献

- (1) C. Xiao, G. Chen and W. G. H. Odendaal : “Overview of Power Loss Measurement Techniques in Power Electronics Systems”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.43, No.3, pp.657-664 (2007)
- (2) F. Zhu, Q. Li and F. C. Lee : “Improved Partial Cancellation Method for High Frequency Core Loss Measurement”, 2019 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), pp.1430-1435 (2019)
- (3) Y. Han, G. Cheung, A. Li, C. R. Sullivan, and D. J. Perreault : “Evaluation of Magnetic Materials for Very High Frequency Power Applications”, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol.27, No.1, pp.425-435 (2012)
- (4) D. Xiang, Z. Sun, H. Li, H. Hu, H. Zhong, G. Lu : “Improved Oscillation Method for High-Frequency Magnetic Core Loss Measurement”, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol.40, No.1, pp.1577-1588 (2024)
- (5) K. Mitsugi, Y. Noge and M. Deng : “Simple Calorimetric Power Loss Measurement System Using Single Chamber and Peltier Device with Ambient Temperature Tracking Control”, 2020 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), pp. 393-398, (2020)
- (6) S. Coday and R. C. N. Pilawa-Podgurski : “Characterization and modeling of ceramic capacitor losses under large signal operating conditions”, IEEE

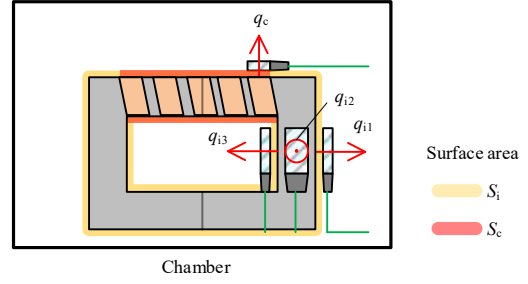


Fig. 9. Loss separation measurement setup and heat flux sensor placement for the magnetic component.

Table 3. Parameters of the magnetic component

Parameter	Symbol	Value
Core material		PC40 (TDK)
Frequency	f	25 kHz
Number of turns	N	5
Inductance	L_{sim}	140.5 μ H
AC resistance	R_{ac}	260.60 m Ω
Maximum magnetic flux density	B_s	0.099T
Surface area of winding wire	S_c	0.009043 m ²
Surface area of ferrite core	S_i	0.03816 m ²
Theoretical copper loss (2.5~3.0 hour)	P_c	0.909 W
Theoretical iron loss (2.5~3.0 hour)	P_i	3.5 W

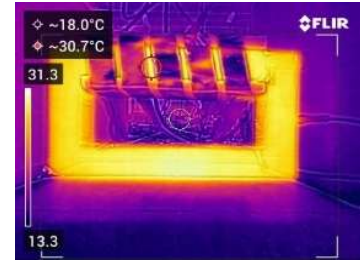


Fig. 10 Inductor surface temperature.

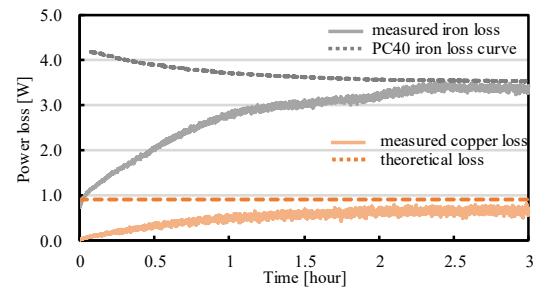


Fig. 11. Loss separation measurement result for copper loss and iron loss.

- Open J. Power Electron., Vol. 4, pp. 24–33, (2023)
- (7) J. Wang, P. Fan, S. Lin, F. Huang and W. Chen : “Comparative Calorimetric Method for Magnetic Component Losses Measurement With High Frequency”, IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, Vol.12, No.5, (2024)
- (8) D. Christen, U. Badstuebner, J. Biela and J. W. Kolar : “Calorimetric Power Loss Measurement for Highly Efficient Converters”, 2010 International Power Engineering Conference (IPEC), pp. 1438-1445, (2010)