

パワー半導体デバイスを熱源とした 感温性磁性流体熱輸送システムの熱輸送特性評価

穴澤 正隆, 野本 俊作, 日下 佳祐 (長岡技術科学大学)

Evaluation of Heat Transport Characteristics of a Temperature-Sensitive Magnetic Fluid System with Power Semiconductor Devices as Heat Sources

Masataka Anazawa*, Shunsaku Nomoto, Keisuke Kusaka (Nagaoka University of Technology)

The heat transport characteristics of a pumpless system using a temperature-sensitive magnetic fluid were evaluated for power semiconductor cooling. The system circulates the fluid in a closed-loop channel by applying an external magnetic field near the temperature boundary formed between the heating and cooling sections, without mechanical pumps or fans. A synchronous buck converter served as the heat source. After steady-state heating, exciting the electromagnet reduced device temperatures by 9.2°C and 7.0°C. In addition, increasing the magnetic flux density reduced the system's thermal resistance, suggesting that the heat exchange performance of the cooling section is important for further improvement.

キーワード : 冷却技術, 磁性流体, 熱輸送, 信頼性
(Cooling method, Magnetic fluid, Heat transport, Reliability)

1. はじめに

近年, 電力変換器には高効率化, 高パワー密度化に加えて, 長寿命化および高信頼性が求められている。特に, 産業機器, 再生可能エネルギーシステム, モビリティなどの用途では, 電力変換器の長時間運転や保守性が重要視されており, パワーエレクトロニクス機器の信頼性向上が課題となっている⁽¹⁻³⁾。SiC や GaN などのワイドバンドギャップ半導体は, 従来の Si 半導体と比べて低損失化, 高温動作, 高周波動作に有利であり, 電力変換器の高効率化および高パワー密度化を実現する技術として注目されている。一方で, デバイスの小型化や高密度実装に伴い, 発熱密度の増加が課題になっている。

電力変換器の寿命および信頼性は, 半導体デバイスや受動部品に生じる熱ストレスと密接に関係する。半導体デバイスでは温度上昇や熱サイクルにより, ワイヤボンド, はんだ接合部などの劣化が進行し, 信頼性が低下することが報告されている⁽⁴⁻⁶⁾。加えて, パワー半導体デバイスの寿命は冷却システムの能力にも影響されることが報告されている⁽⁷⁾。したがって, 電力変換器の長寿命化および高信頼性化には, 半導体デバイスからの熱を効果的に除去し, 温度上昇および熱ストレスを低減する熱管理が不可欠である。

パワー半導体デバイスの熱マネジメントを行う冷却方式として, 自然空冷, 強制空冷, 水冷が広く用いられている。

自然空冷は, ファンやポンプなどの機械可動部を必要としないため, 構成が簡単で信頼性に優れる。一方で, 自然空冷の放熱性能は, ヒートシンクの体積や表面積に大きく依存するため, 小型化や高発熱密度化が進むパワー半導体デバイスへの適用には限界がある。強制空冷や水冷は, ファンやポンプを用いて冷媒を強制的に流動させることで自然空冷よりも高い放熱性能を得ることができるため, 高発熱密度システムの放熱に有効である。しかしながらこれらの方式では, ファンやポンプなどの機械的可動部が必要となる。これらの機械的可動部は, 潤滑不良や汚損などに起因して軸受故障が発生することから, 長期信頼性および保守性の課題を有する⁽⁸⁻¹⁰⁾。

このように, 冷却システムは電子機器や半導体デバイスの熱ストレスを低減するために不可欠である一方, 冷却機構自体が寿命を有する部品に依存する場合, その劣化や故障がシステム全体の信頼性を制限する可能性が考えられる⁽¹⁰⁾。したがって, 現代の電力変換器の高発熱密度化に適応しつつ, 冷却システム自体の信頼性を向上させるためには, 機械的可動部を用いない熱輸送方式の検討が重要である。

機械的可動部を用いない熱輸送方式として, ヒートパイプなどの受動的な熱輸送装置がある⁽¹¹⁾。しかし, これらの方式は主に温度差に起因する作動流体の相変化を利用して熱を輸送する⁽¹¹⁾ため, ファンやポンプを用いる方式と比較して, 熱輸送量や熱抵抗を能動的に制御することが難しい。そ

ここで、機械的可動部を有さず、外部磁界により熱輸送能力を変化させられる可能性を有する方式として、磁性流体を用いた循環熱輸送システムが検討されている⁽¹²⁻¹⁵⁾。磁性流体とは流体でありながら磁性を有する機能性流体である。特に、磁性流体の一種である感温性磁性流体は常温域の温度変化によって磁化が変化するため、外部磁界と磁化の温度依存性を利用してポンプレスで駆動可能であることが知られている⁽¹²⁻¹⁵⁾。しかしながら、従来の磁性流体熱輸送システムに関する検討は、ヒーターを熱源とした評価が中心であり、電力変換回路に用いるパワー半導体デバイスを熱源とした評価は十分に行われていない。特に、供給磁界の増加により感温性磁性流体の駆動力および熱輸送は促進される⁽¹²⁻¹³⁾ものの、実際のパワー半導体デバイス冷却において、磁界条件の変化がデバイス温度の低減に有効であるか、またシステム全体の熱抵抗にどのような影響を及ぼすかについては十分に明らかでない。

そこで本論文では、感温性磁性流体熱輸送システムをパワー半導体デバイス冷却へ適用するための基礎検討として、降圧チョッパ回路に用いられるパワー半導体デバイスを熱源とする実験系を構築する。実際の電力変換回路への適用を想定し、システム全体に断熱処理を施さない条件で、磁界印加時のデバイス温度応答を測定する。さらに、電磁石により発生させる磁束密度を変化させた際の熱源部温度、冷却部温度およびシステム全体の熱抵抗を評価し、本システムの冷却性能向上に必要となる課題を明らかにする。

2. 磁性流体熱輸送システム

〈2・1〉 **感温性磁性流体** 本システムは、熱輸送を行う作動流体として感温性磁性流体 (Temperature-sensitive magnetic fluid, 以下 TSMF) を用いる。TSMF は従来の磁性流体が持つ、液体と磁性の両方の特性に加え、常温域における温度上昇に伴い磁化が著しく低下する特徴を有する。本研究では、表 1 に示す物性値、図 1 に示す磁化温度依存性を持つ TSMF (フェローテック, TC3030W) を用いる。なお、本 TSMF は水をベースとしたものである。

〈2・2〉 **磁性流体熱輸送システムの駆動原理** 図 2 に TSMF を用いた熱輸送システムの駆動原理の模式図を示す。TSMF を満たした流路に低温部と高温部を形成する。その温度境界付近に外部より磁界を印加する。このとき、磁場勾配の大きい領域に向かう磁気体積力が発生する。磁気体積力は、磁化 $\mathbf{M}$ と磁界 $\mathbf{H}$ の勾配に依存し、次式で示される⁽¹³⁻¹⁴⁾。

$$\mathbf{F}_m = \mu_0 (\mathbf{M} \cdot \nabla) \mathbf{H} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $\mathbf{F}_m$ は磁気体積力 [N/m³]、 μ_0 は真空の透磁率 [H/m]、 $\mathbf{M}$ は磁化 [A/m]、 $\mathbf{H}$ は磁界 [A/m] である。

低温側および高温側の TSMF が磁界供給部に引き寄せられる。しかし、高温側では図 1 に示す磁化の感温性に従い、

表 1 TC3030W の物性値

Table 1. Physical properties of TC3030W.

Properties	Symbol	Value
Saturation magnetic flux density @25°C	B_{sat}	30.0 mT
Density @25°C	ρ	$1.34 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
Viscosity @27°C	η	< 4 mPa·s
Thermal conductivity @22°C	λ	> 0.6 W/(m·K)

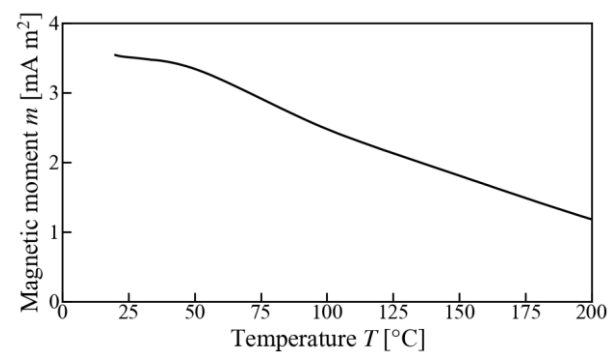


図 1 TC3030W の磁気モーメントの温度依存性

Fig. 1. Temperature dependence of the magnetic moment of

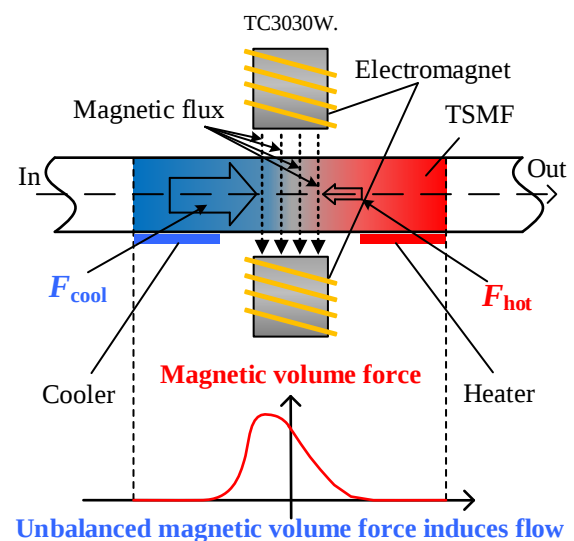


図 2 磁性流体駆動原理

Fig. 2. Driving principle of the magnetic fluid heat transport system.

温度上昇により磁化が低下するため、高温側に働く磁気体積力は低温側に比べて小さくなる。その結果、低温側と高温側で磁気体積力の非平衡が生じ、低温側から高温側へ向かう圧力差 ΔP が発生する。

$$\Delta P = P_{cool} - P_{hot} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで P_{cool} および P_{hot} は、それぞれ低温側および高温側の磁気体積力に起因する圧力 [Pa] である。この圧力差が流体の

駆動力として作用することで閉ループ流路における TSMF の循環動作が可能となる。

また、(1)式より、TSMF に作用する磁気体積力は磁界および磁場勾配に依存する。そのため、外部磁界の大きさは、駆動力および熱輸送能力を決定する重要なパラメータである。先行研究では、電磁石を用いて磁束密度を変化させた結果、外部磁界の上昇に伴い TSMF の駆動力が単調に増加することが報告されている。閉ループ熱輸送システムにおいても、供給磁界の増加に伴い熱輸送能力が向上することが示されている⁽¹²⁻¹⁴⁾。

以上により、本熱輸送システムは、ポンプやファンなどの機械的可動部を用いずに、外部磁界と温度差によって流体を循環させることが可能である。加えて、電磁石などにより外部磁界を調整することで駆動力および熱輸送能力を制御可能である点が本システムの特徴である。

3. システム構成・実験方法

〈3・1〉 システム構成 図 3 に本研究で用いた TSMF 熱輸送システムの構成を示す。本システムは、TSMF を封入した閉ループ流路、加熱部、冷却部、磁界供給部で構成した。流路は、内径 7mm の銅管、内径 6mm のポリテトラフルオロエチレン (PTFE) チューブおよび PTFE 継手により構成した。加熱部、冷却部および磁界供給部には銅管を用い、その他の接続部には PTFE チューブおよび PTFE 継手を用いた。本流路の全長は約 1.2m である。閉ループ流路内への TSMF の充填は、流路内の気泡を除去するため TSMF の注入と真空引きを繰り返すことで行った。流路内の TSMF に温度差および外部磁界を与えることで、TSMF を循環させる構成とした。

冷却部には、内部に冷却水流路を有するアルミニウム製冷却板を配置した。図 4 に示すように銅管から伝熱シートを介してアルミニウム製冷却板で挟み込むことで、TSMF から冷却水へ熱を移動させる構造とした。これにより、TSMF が加熱部から輸送した熱を、冷却水を介して外部へ放熱する構成とした。

加熱部には、熱源として同期整流方式の降圧チョッパ回路に用いるパワー半導体デバイスを配置した。図 4 に示すようにパワー半導体デバイスは真鍮板に取り付け、デバイスで発生した損失が真鍮板を介して銅管内の TSMF へ伝達する構造とした。これにより、回路動作時にパワー半導体デバイスで発生する損失を TSMF 熱輸送システムへの熱入力として用いた。

磁界供給部には C 字型電磁石を用い、加熱部および冷却部から等距離となる位置に配置した。これにより、温度境界部近傍の流路に外部磁界を印加し、TSMF に駆動力を発生させる構成とした。

温度測定は、図 4 に示す加熱部および冷却部の各所に熱

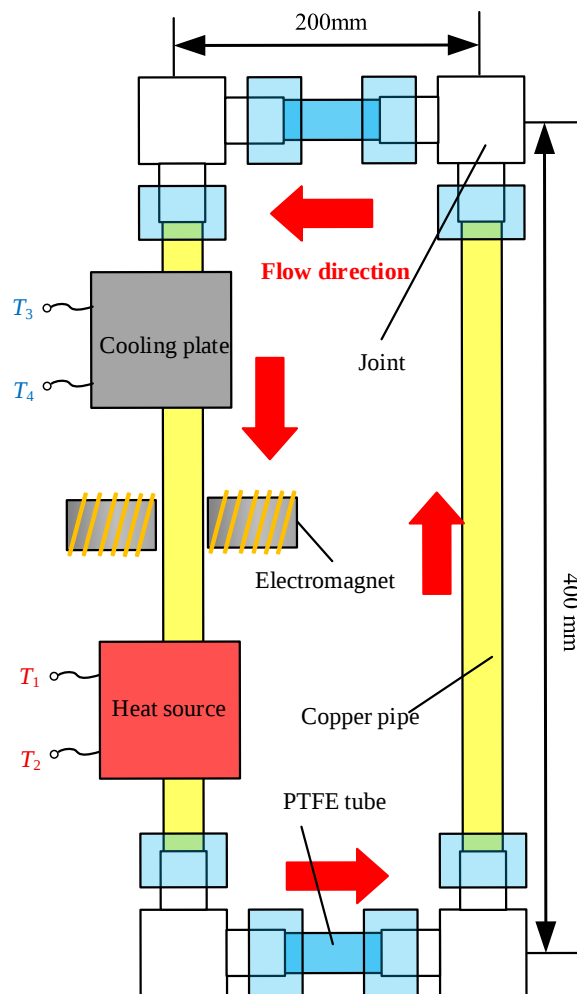


図 3 磁性流体熱輸送システム構成図

Fig. 3. Schematic diagram of a magnetic fluid heat transfer system.

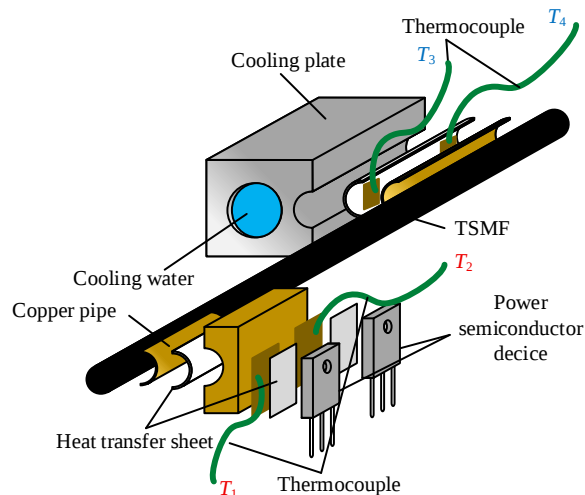


図 4 加熱部および冷却部の構造と温度測定点

Fig. 4. Structures of the heating and cooling sections and temperature measurement points.

電対を配置することで行った。加熱部では、降圧チョッパ回路の上下アームに配置したデバイスの裏面に熱電対を設置し、その測定値をデバイス温度 T_1, T_2 とした。デバイス裏面の熱電対はカプトンテープにより絶縁を施した。冷却部では、銅管とアルミニウム製冷却板の間に熱電対を挟み込む形で2か所配置し、その測定値を冷却部温度 T_3, T_4 とした。

また、本研究では実際の電力変換回路への適用を想定し、流路外周に断熱処理を施さない条件で実験を行った。したがって、本実験で得られる温度応答には、TSMF による熱輸送に加えて、装置周囲への放熱の影響も含まれるものとして評価した。

〈3・2〉 熱源（降圧チョッパ回路） 本研究では、パワー半導体デバイスを実動作条件で発熱させるため、図 5 に示す同期整流方式の降圧チョッパ回路を用いた。回路は、上側スイッチ、下側スイッチ、インダクタ、負荷抵抗により構成した。

本実験では、TSMF 熱輸送システムの熱応答を評価するため、加熱部において十分な温度上昇を得る必要がある。そこで、熱源として用いるパワー半導体デバイスには、ドレイン・ソース間オン抵抗 $R_{DS(on)}$ の大きいデバイス（ルネサスエレクトロニクス、FK25SM-6）を使用した。本実験では、デューティを 50% に固定し、入力電圧および負荷条件を変更することで発熱条件を変化させた。これにより、主に導通損失の変化に起因するデバイス発熱の変化を与えた。各条件において、デバイス温度、冷却部温度、流路各部の温度、ならびに電圧・電流波形を測定した。

〈3・3〉 C 字型電磁石 本研究では、流路構造および磁界供給部の位置を変更することなく、磁界印加条件を再現性よく切り替えるため、磁界供給部として C 字型電磁石を用いた。本電磁石は、ブロック状の磁性体コアを C 字型に組み合わせた構造であり、流路を挟み込むように配置することで TSMF に外部磁界を印加した。本実験では、磁界印加の有無および発生磁束密度を変化させ、それらが TSMF 熱輸送システムの熱応答に及ぼす影響を評価した。

図 6 に示す電磁石の発生磁束密度は、事前に測定した励磁電流と磁束密度の関係に基づいて推定したものである。50 Hz 交流励磁により取得した励磁電流-磁束密度特性を近似し、その近似式を用いて直流励磁時の励磁電流から発生磁束密度を算出した。交流励磁と直流励磁では厳密には磁束密度が異なる可能性があるが、本研究では 50 Hz の低周波で取得した特性を直流励磁時の特性の近似として扱った。

〈3・4〉 熱抵抗評価法 TSMF 熱輸送システムの性能評価指標として、システム等価熱抵抗 R_{th} を用いた。熱抵抗 R_{th} は加熱部温度 T_h と冷却部温度 T_c の差を、デバイス損失 P_{loss} で除することで算出した⁽¹⁶⁾。

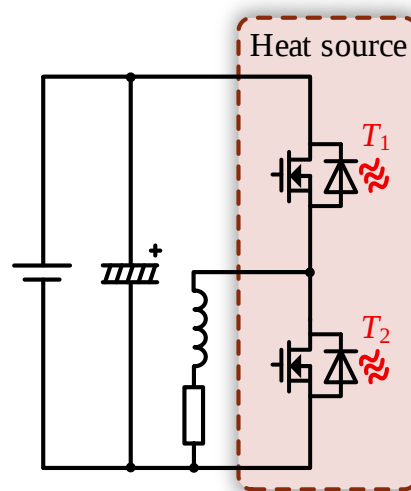


図 5 熱源とする電力変換回路

Fig. 5. Power conversion circuit used as a heat source.

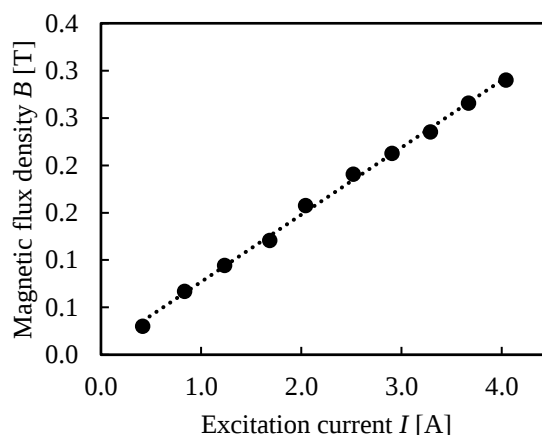


図 6 励磁電流と C 字型電磁石の発生磁束密度の関係

Fig. 6. Relationship between excitation current and magnetic flux density generated by the C-shaped electromagnet.

$$R_{th} = \frac{T_h - T_c}{P_{loss}} = \frac{\frac{T_1 + T_2}{2} - \frac{T_3 + T_4}{2}}{P_{loss}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 R_{th} はシステム等価熱抵抗[K/W]、 T_h [°C]は加熱部温度、 T_c [°C]は冷却部温度、 P_{loss} [W]はパワー半導体デバイスで発生した損失である。加熱部温度 T_h は、デバイス温度 T_1, T_2 の平均値とした。冷却部温度 T_c は冷却部温度 T_3, T_4 の平均値とした。本論文では、実験時に取得した電圧・電流波形に基づいて算出したデバイス損失を熱入力として用いた。

4. 実験結果

〈4・1〉 **動作試験** 半導体デバイスを熱源とした場合において、本システムによりデバイス温度が低下することを確認するため、図 7 に示す磁性流体熱輸送システムにて熱輸送動作確認試験を行った。図 8 に、熱輸送動作確認試験におけるデバイス温度応答を示す。降圧チョッパ回路は、入力電圧 70 V、スイッチング周波数 20 kHz、抵抗負荷 6.7 Ω で動作させた。まず、電磁石を OFF とした状態でデバイスを発熱させ、デバイス温度が定常状態に達した後、電磁石を ON し、磁束密度 300 mT を発生させた。実験中は常にチラーを稼働させ、供給冷却水温度を 15°C に設定した。

図 8 より、電磁石を ON とした後、Device1 および Device2 の温度がともに低下していることが確認できる。温度低下幅は、Device1 で 9.2°C、Device2 で 7.0°C であった。これは外部磁界により TSMF が循環し、加熱部から冷却部への熱輸送が促進されたためであると考えられる。

一方で、Device1 と Device2 では定常温度および温度低下幅に差がみられた。本実験ではデューティを 50% に固定しているため、上下アームのデバイスで発生する損失は約 3.4 W で概ね同程度である。そのため、両デバイス間の温度差は、主にデバイス裏面に熱電対を挟み込む測定構造に起因する接触熱抵抗の差や、デバイスと真鍮板間の熱的接触状態の差によるものと考えられる。

〈4・2〉 供給磁界増加による熱輸送能力向上の限界

TSMF 熱輸送システムでは、印加磁界や温度差の増加に伴い TSMF の駆動力が増加し、熱輸送能力が向上することが報告されている。一方、従来研究では、供給磁界の増加に対する熱輸送量の増加幅は次第に小さくなる傾向が示されており⁽¹²⁻¹³⁾、供給磁界の増加のみによる熱輸送能力向上には限界があると考えられる。特に、半導体デバイスを熱源とする場合、TSMF による熱輸送が促進されたとしても、冷却部での熱交換が十分でなければ、デバイス温度の低減効果は制限される可能性がある。

そこで本研究では、冷却水温度およびデバイス発熱条件を一定とし、電磁石の発生磁束密度を変化させた際の熱源部温度、冷却部温度およびシステム等価熱抵抗を測定した。図 8 と同様の降圧チョッパ回路の動作条件において、電磁石の発生磁束密度を 100, 200, 300 mT と変化させた際の温度および熱抵抗の時間応答を図 9 に示す。

図 9 より、発生磁束密度を 100 mT から 200 mT に増加させた際、熱源部温度 T_h は低下し、冷却部温度 T_c は上昇した。また、これに伴い熱抵抗 R_{th} も低下した。このことから、磁束密度の増加により TSMF の駆動力が増加し、デバイスから冷却部への熱輸送が促進されたと考えられる。

一方で、発生磁束密度を 200 mT から 300 mT に増加させた場合、冷却部温度 T_c はさらに上昇したが、熱源部温度 T_h

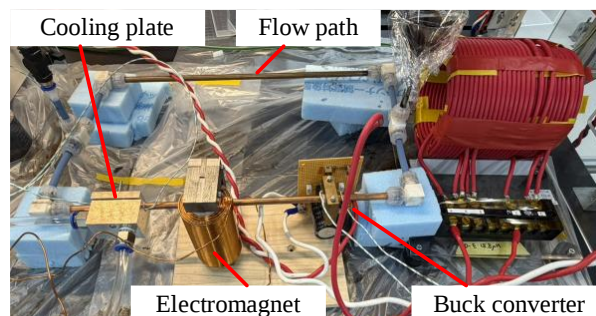


図 7 実験に用いた磁性流体熱輸送システム

Fig. 7. Experimental setup of the magnetic fluid heat transport system.

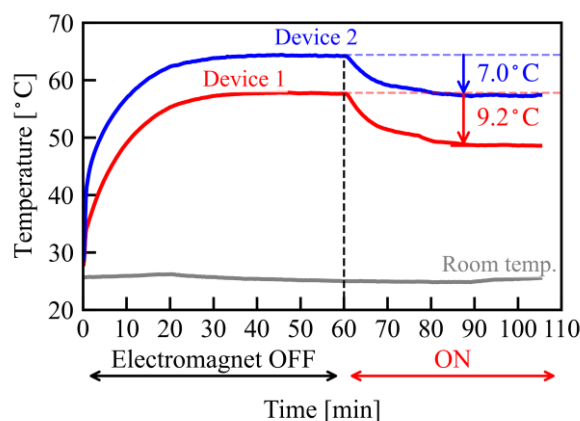


図 8 熱輸送動作確認試験におけるデバイス温度応答

Fig. 8. Device temperature response during heat transport operation test.

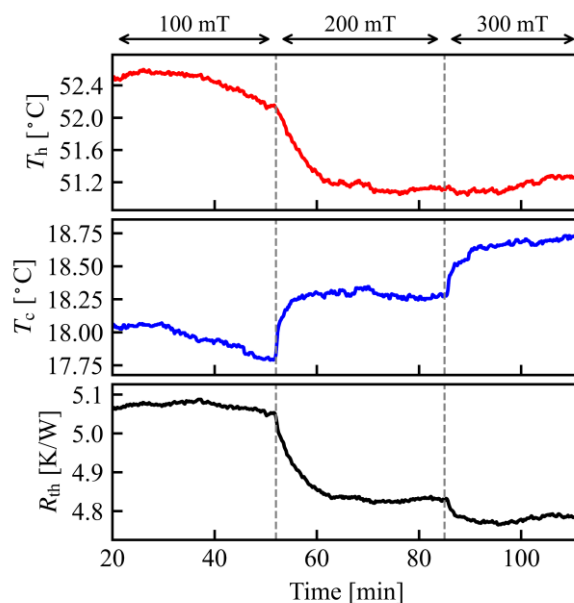


図 9 供給磁界条件変化時の熱輸送特性

Fig. 9. Heat transport characteristics under varying magnetic field conditions.

文 献

は低下せず微増している。また、熱抵抗 R_{th} は低下したが、100 mT から 200 mT に変化させた場合と比較して、その低下幅は小さい。この結果は、磁束密度の増加により TSMF の熱輸送は促進されたものの、冷却部に輸送された熱を冷却水側へ十分に放熱できず、冷却部における熱交換性能が、デバイス温度の低減効果を制限した可能性を示している。したがって、本実験では、磁束密度の増加によりシステム等価熱抵抗は低下するものの、デバイス温度の低減効果には限界があることが確認された。

以上より、本システムの冷却性能をさらに向上させるためには、TSMF の駆動力向上だけでなく、冷却部における熱交換性能の向上が重要であると考えられる。

5. まとめ

本論文では、感温性磁性流体を用いたポンプレス熱輸送システムのパワー半導体デバイス冷却への適用を目的として、降圧チョップ回路に用いるパワー半導体デバイスを熱源とする実験系を構築し、熱輸送特性を評価した。

電磁石を OFF とした状態でデバイスを発熱させ、定常状態に達した後に電磁石を ON とした結果、Device 1 および Device 2 の温度はそれぞれ 9.2°C、7.0°C 低下した。これにより、半導体デバイスを熱源とした場合においても、磁界印加により TSMF が循環し、加熱部から冷却部への熱輸送が促進されることを確認した。

また、電磁石の発生磁束密度を 100, 200, 300 mT と変化させた結果、磁束密度の増加に伴いシステム等価熱抵抗は低下した。一方で、200 mT から 300 mT へ増加させた場合には、冷却部温度は上昇したものの、熱源部温度の低下はみられず、熱抵抗の低下幅も小さかった。このことから、磁束密度の増加により TSMF の熱輸送は促進されるが、冷却部における熱交換性能がデバイス温度の低減効果を制限する可能性が示された。

以上より、供給磁界の増加により TSMF のシステム等価熱抵抗が低下し、熱輸送は促進されるものの、デバイス温度の低減効果には冷却部の熱交換性能が影響することを確認した。したがって、デバイス温度のさらなる低減には、TSMF の駆動力向上だけでなく、冷却部の熱交換性能向上が重要である。今後は、冷却部構造、流路形状および受熱・放熱面積を変更し、パワー半導体デバイス冷却に適した TSMF 熱輸送システムの設計指針を検討する。

謝 辞

本研究は、JSPS 地域中核・特色ある研究大学強化促進事業 JPJS00420240017 の支援を受けたものである。

- (1) Y. Song and B. Wang, "Survey on Reliability of Power Electronic Systems," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 28, no. 1, pp. 591-604, Jan. 2013.
- (2) H. Wang, M. Liserre and F. Blaabjerg, "Toward Reliable Power Electronics: Challenges, Design Tools, and Opportunities," in IEEE Industrial Electronics Magazine, vol. 7, no. 2, pp. 17-26, June 2013.
- (3) H. Wang, F. Blaabjerg, K. Ma and R. Wu, "Design for reliability in power electronics in renewable energy systems – status and future," 4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, pp. 1846-1851, 2013.
- (4) S. Fukunaga, Y. Nakamura and T. Funaki, "Evaluation of Electrical Model Parameter Changes in SiC Power MOSFETs During Power Cycling Test," IEEJ Journal of Industry Applications, vol. 13, Issue 6, pp. 731-740, 2024.
- (5) E. Agirrezabala, I. Aizpuru, D. Garrido and A. Portillo, "Reliability of Power Semiconductor Modules: A State-of-the-Art Review," in IEEE Open Journal of Power Electronics, vol. 6, pp. 1036-1067, 2025.
- (6) J. Zhang, H. Shen, H. Sun and Z. Wang, "Review on the Thermal Models Applications in the Reliability of Power Semiconductor Device," IET Power Electronics, vol. 18, Issue 1, 2025.
- (7) S. M. I. Rahman, A. Moghasssemi, A. Arsalan, L. Timilsina, P. K. Chamarthi, B. Papari, et al., "Emerging Trends and Challenges in Thermal Management of Power Electronic Converters: A State of the Art Review," in IEEE Access, vol. 12, pp. 50633-50672, 2024.
- (8) Q. Miao, C. Tang, W. Liang and M. Pecht, "Health Assessment of Cooling Fan Bearings Using Wavelet-Based Filtering," Sensors, vol. 13, no. 1, pp. 274-291, 2013.
- (9) M. Afshar, C. Li and B. Akin, "Real-Time Current-Based Distributed Bearing Faults Detection in Small Cooling Fan Motors," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 60, no. 2, pp. 3188-3199, 2024.
- (10) J. Del Gatto, A. Bani Milhim and H. Sadjadi, "Cooling Fan Failure Mode Analysis to Enable Development of Automotive ECU Fan Health Monitoring System," Annual Conference of the PHM Society, vol. 15, no. 1, 2023.
- (11) A. Faghri, "Review and Advances in Heat Pipe Science and Technology," ASME Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 134, no. 12, Art. no. 123001, 2012.
- (12) M. Anazawa and K. Kusaka, "Experimental Validation of Driving Force for a Temperature-Sensitive Magnetic Fluid Heat Transport System Utilizing an Electromagnet," The 2026 International Power Electronics Conference (IPEC-Nagasaki 2026 -ECCE Asia-), Nagasaki, Japan, 2026.
- (13) K. Fumoto, M. Ikegawa and H. Yamagishi, "Study on Mini-Heat Transfer Device Using Temperature-Sensitive Magnetic Fluid," Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B, vol. 72, no. 723, pp. 179-185, 2006.
- (14) B. A. Finlayson, "Convective Instability of Ferromagnetic Fluids," Journal of Fluid Mechanics, vol. 40, no. 4, pp. 753-767, 1970.
- (15) A. Mukhopadhyay, R. Ganguly, S. Sen and I. K. Puri, "A Scaling Analysis to Characterize Thermomagnetic Convection," International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 48, no. 17, pp. 3485-3492, 2005.
- (16) E. Sadeghinezhad, A. R. Akhiani, H. S. C. Metselaar, S. T. Latibari, M. Mehrali and M. Mehrali, "Parametric study on the thermal performance enhancement of a thermosyphon heat pipe using covalent functionalized graphene nanofluids," Applied Thermal Engineering, vol. 175, Art. no. 115385, 2020.