

磁性流体を用いた熱輸送器における 駆動圧力を向上する電磁石構造の一検討

出野 聡史* 穴澤 正隆 日下 佳祐（長岡技術科学大学）

Magnetic Field Design for Improving Driving Pressure in a Heat-Transport Device Using Magnetic Fluid

Satoshi Deno*, Masataka Anazawa, Keisuke Kusaka, (Nagaoka University of Technology)

To address local heat concentration in WBG semiconductors, this paper proposes a novel heat-transport device using a temperature-sensitive magnetic fluid (TSMF). Using theoretical equations, the ideal magnetic-field distribution for maximizing driving pressure is derived, leading to a new electromagnet structure featuring a conical coil with a magnetic core. Coupled thermal-magnetic finite element analysis and experimental evaluations were conducted to assess the performance of the proposed structure. The results demonstrate that the proposed electromagnet increases driving pressure by 23.1% compared with conventional solenoid structures, owing to the synergistic effects of a steep magnetic field gradient and reduced magnetic reluctance.

キーワード：磁性流体, TSMF, 電磁石, 冷却技術, 熱輸送
(magnetic fluid, TSMF, electromagnet, cooling device, heat transfer)

1. はじめに

近年、電力変換回路の高周波・大電力化のため、高速スイッチングかつ低損失動作を可能にする GaN をはじめとするワイドバンドギャップ半導体の活用が進んでいる。特に近年では、高周波動作に優れる GaN デバイスを並列駆動させることにより、回路全体の体積あたりの大電流化および高パワー密度化を図る手法が提案されている⁽¹⁻²⁾。しかしながら、素子特性のばらつきや回路実装上の寄生成分等に起因して電流の分流にアンバランスが生じ、特定の素子への局所的な熱集中を引き起こし、GaN デバイスの熱破壊やシステム全体の信頼性を低下させるという問題がある⁽³⁻⁵⁾。

この問題に対処するためには、個々の GaN デバイスの発熱状態に対して異なる冷却能力を提供可能な熱マネジメント技術⁽⁶⁻¹¹⁾が必要となる。これに対し、本研究では感温性磁性流体（Temperature-Sensitive Magnetic Fluid: TSMF）を用いた自律型熱輸送技術に着目している。本手法は、わずかな温度上昇に伴い磁化が急激に減少する TSMF の温度依存特性⁽¹²⁻¹⁵⁾を利用したものである。発熱部（加熱部）付近に TSMF を満たした流路を設け、外部から電磁石や永久磁石等により磁場を印加することで、GaN デバイスの発熱に伴う局所的な磁化差を生成させる。これにより流体内部に誘起される磁気体積力の不均衡が駆動圧力を生み出し、機械的ポンプ等の動力を必要とすることなく、デバイスの発熱量に応じたアクティブな自律型の熱輸送が可能となる⁽¹⁶⁻¹⁸⁾。この時、発熱量が大きいデバイス付近の磁性流体の流速が変化

することから、局所的な熱集中の緩和および温度均一化が期待される。

しかしながら、TSMF により発生する駆動圧力は小さく、実用的なパワーデバイスの発熱を処理するだけの熱輸送能力を十分に確保できていない点が課題である。駆動圧力の発生メカニズムに関する先行研究⁽¹⁹⁻²⁶⁾では、外部磁場の磁場強度、磁場勾配、および温度変化部における温度差が駆動圧力に与える影響が詳細に解析されている。具体的に、駆動圧力の増大には、加熱部と冷却部間の温度差を大きく保つことに加え、温度変化部に対して的確に強い磁場を印加し、かつ磁場勾配をより急峻に形成することが必要となる。しかしながら、これらの条件を同時に満たし、駆動圧力を効果的に向上させる具体的な磁石構造は未だ確立されていない。

そこで本論文では、TSMF に働く駆動圧力の理論式に基づき、駆動圧力を増大させる磁場分布を導出し、所望の磁場分布を具現化する新たな電磁石および熱輸送器の構造を提案する。有限要素法を用いた熱・磁場連成解析および実器実験の両面から、提案構造における駆動圧力の優位性を定量的に評価し、その有効性を実証する。

2. TSMF を用いた高駆動熱輸送器

〈2・1〉 熱輸送原理 本節では TSMF を用いた熱輸送器の熱輸送原理について説明する。TSMF の単位体積あたりに働く力として定義される磁気体積力 f_m は円筒座標上で式(1)により表される。

$$f_m = \mu_0 (\mathbf{M} \cdot \nabla) \mathbf{H}$$

$$= \mu_0 \left\{ \left(M_r \frac{\partial H_r}{\partial r} + \frac{M_\theta}{r} \frac{\partial H_r}{\partial \theta} + M_z \frac{\partial H_r}{\partial z} - \frac{M_\theta H_\theta}{r} \right) \mathbf{e}_r \right. \quad \dots (1)$$

$$+ \left(M_r \frac{\partial H_\theta}{\partial r} + \frac{M_\theta}{r} \frac{\partial H_\theta}{\partial \theta} + M_z \frac{\partial H_\theta}{\partial z} + \frac{M_\theta H_r}{r} \right) \mathbf{e}_\theta$$

$$\left. + \left(M_r \frac{\partial H_z}{\partial r} + \frac{M_\theta}{r} \frac{\partial H_z}{\partial \theta} + M_z \frac{\partial H_z}{\partial z} \right) \mathbf{e}_z \right\}$$

ここで、真空中の透磁率を μ_0 、磁化ベクトルを $\mathbf{M}$ 、磁場ベクトルを $\mathbf{H}$ 、半径方向の距離を r 、円筒座標系における各軸の基底ベクトルをそれぞれ $\mathbf{e}_r$ 、 $\mathbf{e}_\theta$ 、 $\mathbf{e}_z$ 、各方向成分の磁化をそれぞれ M_r 、 M_θ 、 M_z 、各方向成分の磁場をそれぞれ H_r 、 H_θ 、 H_z とする。式(1)より、磁気体積力は真空中の透磁率、磁化および磁場勾配の積によって決定され、空間的に不均一な磁場分布が存在する環境下において生じる。

本熱輸送器における TSMF の駆動原理を図 1 に示す。ここで、流路（パイプ）内部は図 2 に示す感温磁化特性を持つ TSMF（代表例としてフェローテック製 TC3030S）で満たされている。なお、磁気体積力の大きさを f_m 、磁化の大きさを M 、磁場の大きさを H 、磁化率を χ 、温度を T とする。パイプの右側に加熱部を設けることで、TSMF に温度勾配が生じる。この状態で、外部より不均一な外部磁場を印加すると、式(1)に従い、点 A と点 B で互いに逆方向の磁気体積力が作用する。さらに、両点は局所的な温度が異なるため、TSMF の温度特性によってそれぞれの磁化の大きさに差異が生じ、両点に作用する磁気体積力に不平衡が生じる。その結果、加熱部に向かう駆動圧力が発生する。このときの駆動圧力 F_m は式(2)によって表される。

$$F_m = \frac{\mu_0}{2} \left(\int_0^r \chi \frac{\partial}{\partial r} H^2 dr + \int_0^{2\pi} \chi \frac{\partial}{\partial \theta} H^2 d\theta + \int_{-\infty}^{\infty} \chi \frac{\partial}{\partial z} H^2 dz \right) \dots (2)$$

したがって、本原理を用いることで、ポンプなどの機械的な可動部を必要とせず、TSMF の自己駆動による効果的な熱送が可能となる。

〈2・2〉 高駆動熱輸送器の提案 式(1)、(2)から、より高い駆動圧力を実現するためには、温度変化部において流体を駆動させる正の磁気体積力を増大させる必要がある。そこで本研究では、図 3 に示す新たな電磁石構造を提案する。提案構造は、パイプの外周に円錐状にコイルおよび磁性体コアを配置したものである。従来⁽²⁵⁻²⁶⁾のソレノイド型（円筒状）コイルに代わり円錐型コイルを採用することで、加熱部に向かって空間的に強度が増加する磁場分布を形成することが可能となる。さらに、コイルの周囲を覆うように磁性体コアを配置し、磁気抵抗を低減することで、同一の印加電流であってもコアを持たない構造と比較して効果的に磁束を集中させることができる。これにより、磁場強度を向上させると同時に、駆動に寄与する磁場勾配をより急峻にすることが可能となる。これらの構造的な工夫により、温度変化部における正の磁気体積力を増大させるだけでなく、加熱

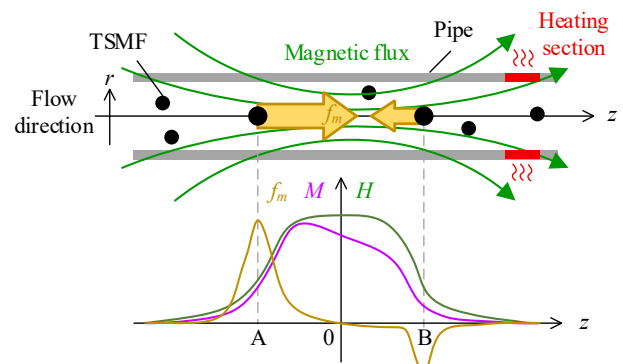


図 1 TSMF を用いた熱輸送器の駆動原理

Fig. 1. Driving principle of TSMF.

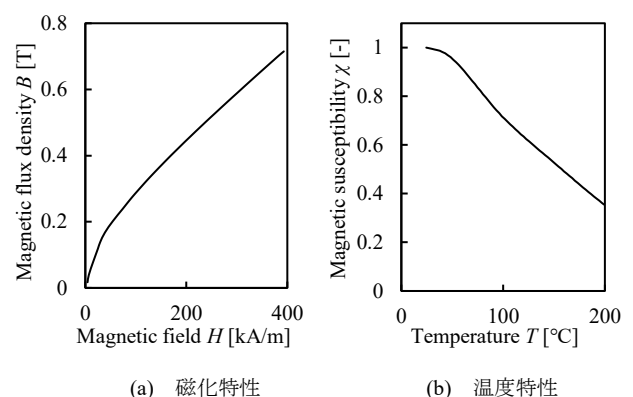


図 2 TSMF(TC3030S)の特性

Fig. 2. Characteristics of TSMF (TC3030S).

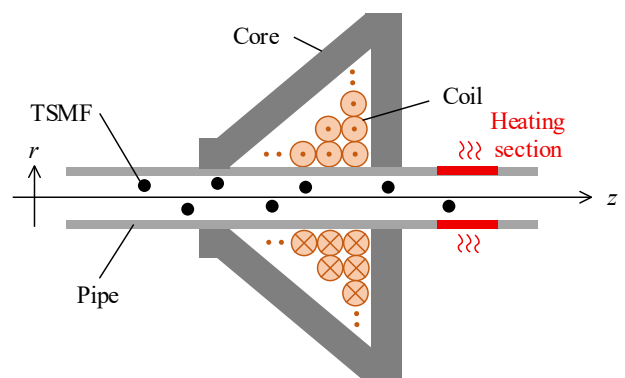


図 3 高駆動圧力を実現する熱輸送器の構造

Fig. 3. Heat transport device achieving high driving pressure.

部で生じうる流体の循環を阻害する負の磁気体積力を局所的な範囲に抑制した熱輸送器が実現される。

3. 提案構造による熱輸送器

〈3・1〉 解析条件 円錐型コイルと磁性体コアを採用

したことによる駆動圧力への影響を評価するため、従来構造であるソレノイドコイル (Case 1)、コア付きソレノイドコイル (Case 2)、円錐型コイル (Case 3)、コア付き円錐型コイル (Case 4) の 4 条件を設定し、比較評価を行う。これら各条件の解析モデルを図 4 に示す。なお、ソレノイドコイルと円錐型コイルの巻線断面積を同一とするため、円錐型コイルの r 方向の寸法をソレノイドコイルの 2 倍に設定し、全条件において $10 \text{ A} \times 360 \text{ turns}$ の電流を流通している。また、磁性体コアを配置する条件 (Case 2 および Case 4) では、厚さ 15 mm のコアを設置した。さらに、流路内は表 1 に示す物性値を有する TSMF で満たされているものとし、 $z = -50 \sim 50 \text{ mm}$ の範囲において、 50°C の温度差を持つ線形な温度勾配を近似して与えている。解析には有限要素解析ソフトウェア (JSOL 製 JMAG) および数値解析ソフトウェア (MathWorks 製 MATLAB) を使い、流路内を固体領域と仮定した上で、上記 4 条件における磁場分布、磁気体積力、ならびに駆動圧力を熱・磁場連成解析により算出する。

〈3・2〉 提案構造による有限要素解析 中心軸上における磁場分布を図 5 に示す。従来構造である Case 1 では、 $z = 0 \text{ mm}$ をピークとする対称な分布となっている。これに対して、磁性体コアを配置した Case 2 では、Case 1 と比較し

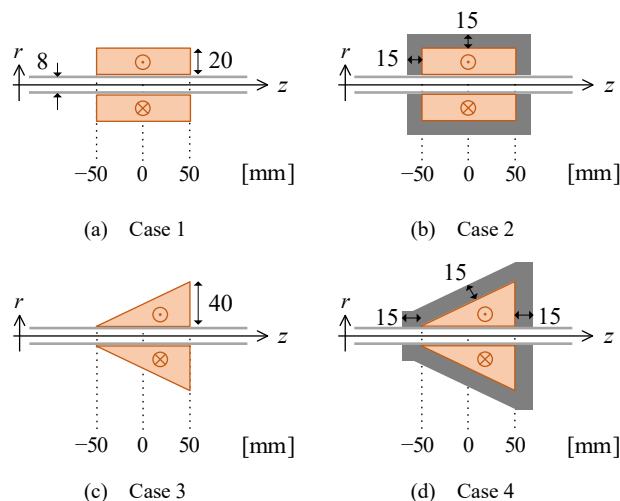


図 4 解析モデル

Fig. 4. Analysis models.

表 1 TC3030S の物性値

Table 1. Physical Properties of TC3030S.

Variable	Symbol	Value
Saturation magnetic flux density @25°C	B_m	30.0 mT
Density @25°C	ρ	$1.17 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
Thermal conductivity @22°C	λ	0.143 W/(m·K)
Specific heat	C_p	1420 J/(kg·K)

て最大磁場強度が向上するとともに、 $z = -50 \text{ mm}$ および 50 mm 付近における磁場勾配が急峻になっていることがわかる。一方、円錐型コイルを用いた Case 3 では、磁場強度のピークが加熱部側へシフトしており、温度変化部において流体の駆動に寄与する正の磁場勾配がより広範に分布している。さらに、提案構造である Case 4 では、Case 3 に比べて磁場強度のピークが加熱部側へより顕著にシフトしており、温度変化部における磁場勾配および最大磁場強度の双方が向上している。以上の結果から、円錐型コイルおよび磁性体コアを採用したことによって磁場分布が意図した通りに表れていることが確認できる。

中心軸上における磁気体積力 (z 軸方向成分) の分布を図 6 に示す。Case 1 と Case 2 の比較より、磁性体コアを配置することで磁気体積力が作用する領域は縮小するものの、磁束の集中により磁気体積力のピークは大きく向上することがわかる。また、Case 1 と Case 3 の比較から、円錐型コイルの採用によって正の磁気体積力が作用する領域が拡大していることが確認できる。これら両者の特徴を併せ持つ Case 4 では、Case 1 と比較して正の磁気体積力が発生する領域が拡大しつつ、負の磁気体積力の発生する領域が減少している。加えて、磁性体コアによる磁場勾配の急峻化によって、磁気体積力の絶対値そのものも大幅に増加している。

各解析条件において得られた z 軸方向成分の駆動圧力を図 7 に示す。図 7 より、Case 1 に対する駆動圧力の増加率は、Case 2 で 19.8%、Case 3 で 4.4%、Case 4 で 41.9% となり、いずれの条件においても駆動圧力の向上が確認できる。特に、円錐型コイルと磁性体コアの双方を採用した Case 4 において最も高い増加率が得られている。したがって、提案構造が従来構造と比較して高駆動圧力を実現する上で有効であることが結論付けられる。

4. 提案構造による性能評価

〈4・1〉 実器モデルおよび比較条件 本章では、シミュレーション結果の妥当性を実証するため、実器を用いて、Case 1 (従来構造) と Case 4 (提案構造) の比較検証を行う。作製した電磁石の外観を図 8 に示す。各コイルは巻線断面積が概ね一致するように自作した。また、磁性体コアは厚さ 15 mm とし、コイルの外周全体を覆う構造としている。これらの実器を用いて、提案構造における駆動圧力を定量的に評価する。

〈4・2〉 駆動圧力評価 駆動圧力を検証するための測定モデルを図 9 に示す。本測定系は文献(12)に示される手法に準拠している。駆動圧力の評価実験では、TSMF で満たされた U 字型の流路において、左右に配置された冷却部と加熱部により任意の温度差に設定する。この状態で、電磁石による磁場を冷却部側から加熱部側に向かって印加することで、加熱部へ向かう磁気体積力が TSMF に作用し、流体を

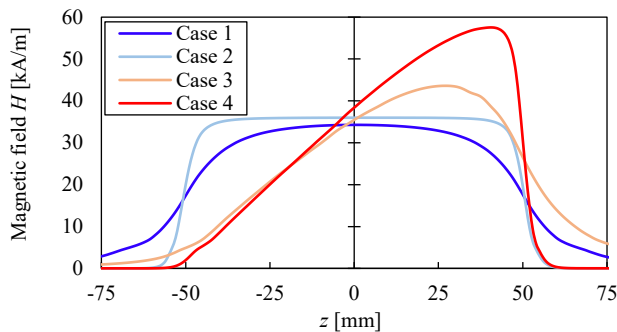


図 5 各場合の磁場

Fig. 5. Magnetic fields in each case.

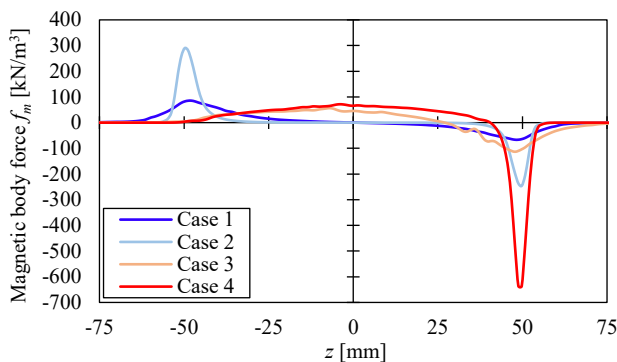


図 6 各場合の磁気体積力

Fig. 6. Magnetic body forces in each case.

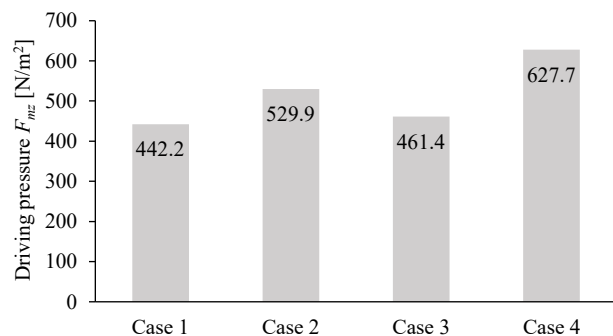


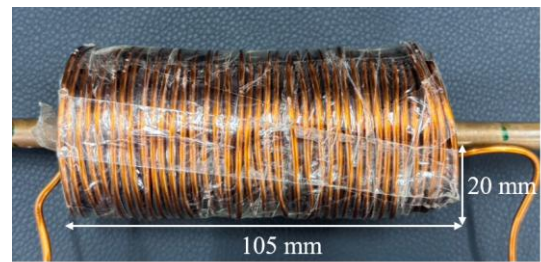
図 7 各場合の駆動圧力

Fig. 7. Driving pressures in each case.

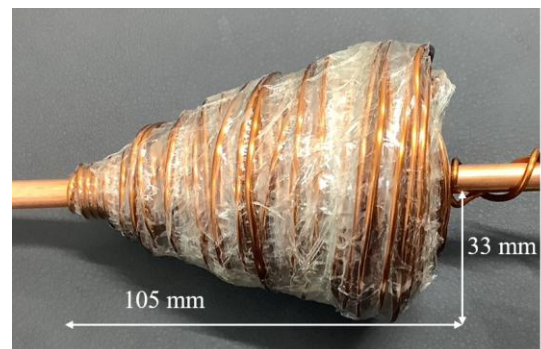
押し上げる駆動圧力が発生する。この駆動圧力 F_m は、静水圧平衡の原理に基づき式(3)によって算出される。

$$F_m = \int_{h_0}^{h_1} f_m \cdot dh = \rho g \Delta h \dots\dots\dots (3)$$

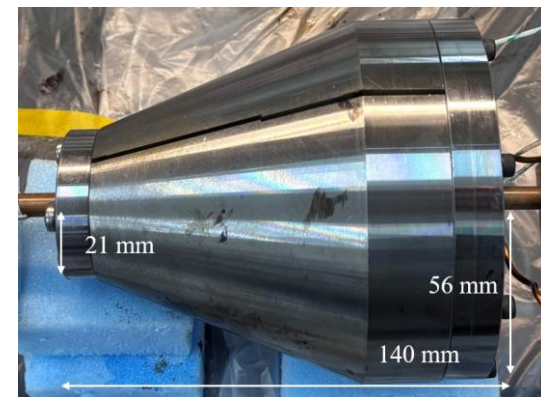
ここで、TSMF の重量密度を ρ 、重力加速度を g 、磁場印加前における加熱部側の液面高さを h_0 、磁場印加後における加熱部側の液面高さを h_1 、加熱部側における液面高さの変化分を Δh とする。式(3)が示すように、磁場印加前後での水位変化分 Δh を測定することで、TSMF に作用する駆動圧力



(a) 従来コイル



(b) 提案コイル



(c) 提案コア

図 8 作成した電磁石

Fig. 8. Hand-wound electromagnet.

を定量的に評価することができる。

実際の駆動圧力評価に使用した測定系の外観を図 10 に示す。実験では、加熱部と冷却部の温度差を 50°C (冷却部: 28°C , 加熱部: 78°C) に設定し、駆動圧力の測定を行った。Case 1 および Case 4 の構造における駆動圧力の測定結果を図 11 に示す。図 11 より、Case 1 における駆動圧力は 59.6 N/m^2 であったのに対し、Case 4 では 73.4 N/m^2 であり、Case 1 と比較して 23.1% の駆動圧力向上が実証された。なお、シミュレーション結果と実験結果との間に生じた差異については、以下の要因が挙げられる。

- シミュレーションでは流路内の温度分布を線形近似

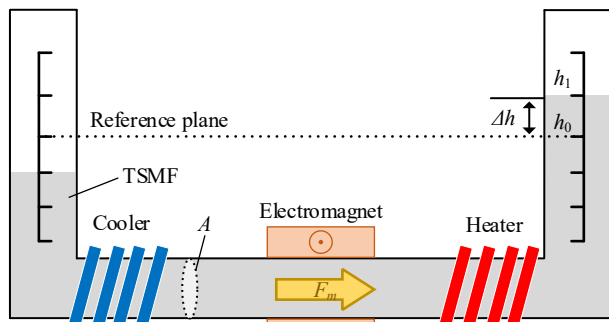


図9 駆動圧力測定の実験モデル

Fig. 9. Experimental model for driving pressure measurement.

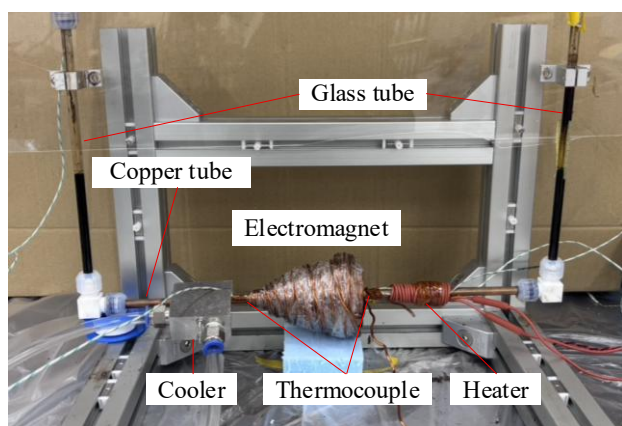


図10 駆動圧力測定の実験環境

Fig. 10. Experimental setup for driving pressure measurement.

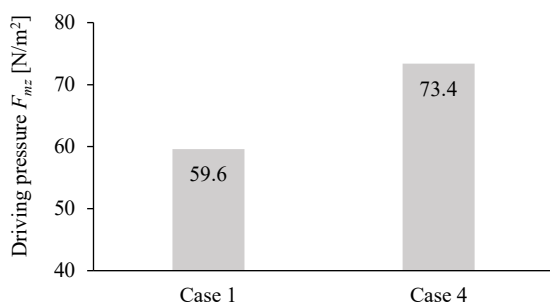


図11 従来構造と提案構造の駆動圧力

Fig. 11. Driving pressure of the conventional and proposed structures.

している点。

- 実験用電磁石の寸法（高さ）が解析モデルと厳密に一致していない（完全な2倍比ではない）点。
- シミュレーションがTSMFの流動現象を考慮しない熱・磁場連成解析に留まっている点。

しかしながら、両者の結果に差異が見られるものの、Case 1に対するCase 4の優位性という傾向は一致しており、提案

構造がTSMFを用いた熱輸送器の駆動圧力を効果的に向上させる上で有効であることがわかる。

5. まとめ

本論文では、WBG半導体における局所的な熱集中を均一化するため、感温性磁性流体を用いた熱輸送器に着目し、高い駆動圧力を実現するための新たな電磁石構造を提案および検証した。得られた主な知見は以下の通りである。

- ① TSMFの駆動圧力に関する理論式に基づき、温度変化部において加熱部へ向かって磁場強度が増加する磁場分布が駆動圧力向上に有効であることを示し、これを具現化する新たな電磁石構造（磁性体コア付き円錐型コイル）を考案した。
- ② シミュレーションの結果、提案構造は従来のソレノイドコイルを用いた構造と比較して、コアによる磁気抵抗の低減と円錐型コイルの相乗効果により急峻な磁場勾配を形成し、駆動圧力が41.9%向上することを明らかにした。
- ③ 駆動圧力評価において、解析結果と同様に提案構造の優位性を定量的に確認し、従来構造と比較して23.1%の駆動圧力向上が得られることを実証した。

以上の結果から、提案構造はTSMFを用いた熱輸送器の駆動圧力を向上させる手法として有用であることが確認された。今後は、本熱輸送器の冷却性能を詳細に評価するとともに、熱の均一化を達成するための流路形状および磁場配置を考慮した構造の最適化を進める。さらに、本熱輸送器を実際の高周波電力変換回路へ実装し、高周波化に伴う寄生成分とパワー半導体デバイスの発熱特性を考慮したシステム全体の統合的な評価を進める予定である。

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す。

文 献

- (1) H. Li, X. Zhang, L. Wen, J.A. Brothers, C. Yao and C. Han, "Paralleled Operation of High-Voltage Cascode GaN HEMTs," *IEEE J. Emerg. Sel. Topics Power Electron.*, Vol. 4, No. 3, pp.815–823, 2016.
- (2) T. Sawada, H. Tadano, K. Shiozaki and T. Isobe, "Continuous Operation of a Half-Bridge with Multi-Parallel GaN Power Devices for Increased Current Capability," *IEEE J. Ind. Appl.*, Vol. 12, No. 4, pp.695–700, 2023.
- (3) S. Fukunaga, Y. Nakamura and T. Funaki, "Evaluation of Electrical Model Parameter Changes in SiC Power MOSFETs During Power Cycling Test," *IEEE J. Ind. Appl.*, Vol. 13, No. 6, pp. 731–740, 2024.
- (4) E. Agirrezabala, I. Aizpuru, D. Garrido and A. Portillo, "Reliability of Power Semiconductor Modules: A State-of-the-Art Review," *IEEE Open J. Power Electron.*, Vol. 6, pp. 1036–1067, 2025.
- (5) J. Zhang, H. Shen, H. Sun and Z. Wang, "Review on the Thermal Models Applications in the Reliability of Power Semiconductor Device," *IET Power Electron.*, Vol. 18, No. 1, 2025.

- (6) A. Faghri, "Review and Advances in Heat Pipe Science and Technology," *ASME J. Heat Mass Transf.*, Vol. 134, No. 12, pp.123001–123018, 2012.
- (7) T. Yang, F. Diao, H.A. Mantooth, Y. Zhao, W.P. King and N. Miljkovic, "Heat Spreader Thermal Switch for Power Converter Isothermalization," *IEEE Trans. Compon., Packag., Manuf. Technol.*, Vol. 12, No. 7, pp.1063–1081, 2022.
- (8) D.Shin, S.W. Chung, E.-Y. Chung and N. Chang, "Energy-Optimal Dynamic Thermal Management: Computation and Cooling Power Co-Optimization," *IEEE Trans. Ind. Inform.*, Vol. 6, No. 3, pp. 340–351, 2010.
- (9) A. Iranfar, F. Terraneo, G. Csordas, M. Zapater, W. Fornaciari and D. Atienza, "Dynamic Thermal Management with Proactive Fan Speed Control Through Reinforcement Learning," *Design, Autom. Test Eur. Conf. Exhib. (DATE)*, pp. 418–423, 2020.
- (10) R.K. Sharma, C.E. Bash, C.D. Patel, R.J. Friedrich and J.S. Chase, "Balance of power: dynamic thermal management for Internet data centers," *IEEE Internet Comput.*, Vol. 9, No. 1, pp. 42–49, 2005.
- (11) B.R. Park, Y.J. Choi, E.J. Choi and J.W. Moon, "Adaptive control algorithm with a retraining technique to predict the optimal amount of chilled water in a data center cooling system," *J. Build. Eng.*, Vol. 50, No. 104167, pp. 1–15, 2022.
- (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-)*, No. P2-2-15, 2026.
- (13) 山口 博司, 「磁性流体の歴史と今後」, 日本 AEM 学会誌, 29 巻, 3 号, pp.516–520, 2021.
- (14) T. Upadhyay, R.V. Upadhyay, R.V. Mehta and V.K. Aswal, "Characterization of a temperature-sensitive magnetic fluid," *Physical Review B*, Vol. 55, No. 9, pp. 5585–5588, 1997.
- (15) H. Matsuki and K. Murakami, "Performance of an automatic cooling device using a temperature-sensitive magnetic fluid," *J. Magn. Magn. Mater.*, Vol. 65, No. 2, pp.363–365, 1987.
- (16) 麓 耕二, 池川 昌弘, 山岸 英明, 「感温磁性流体を用いた小型熱輸送機器に関する研究」日本機械学会論文集 (B 編), 72 巻, 723 号, pp. 2767–2773, 2006.
- (17) B.A. Finlayson, "Convective instability of ferromagnetic fluids," *J. Fluid Mech.*, Vol. 40, No. 4, pp. 753–767, 2006.
- (18) A. Mukhopadhyay, R. Ganguly, S. Sen and I.K. Puri, "A scaling analysis to characterize thermomagnetic convection," *Int. J. Heat Mass Transf.*, Vol. 48, No. 17, pp. 3485–3492, 2005.
- (19) K. Fumoto, M. Ikegami and T. Kawanami, "Heat Transfer Characteristics of a Thermo-sensitive Magnetic Fluid in Micro-channel," *J. Therm. Sci. Technol.*, Vol. 4, No. 3, pp. 332–339, 2009.
- (20) H. Matsuki, K. Yamasawa and K. Murakami, "Experimental considerations on a new automatic cooling device using temperature-sensitive magnetic fluid," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 13, No. 5, pp. 1143–1145, 1977.
- (21) M. Petit, Y. Avenas, A. Kedous-Lebouc, W. Cherief and E. Rullie`re, "Experimental study of a static system based on a magneto-thermal coupling in ferrofluids," *Int. J. Refrig.*, Vol. 37, pp. 201–208, 2014.
- (22) G. Zhu, D. Zeng, S. Liu and Y. Huang, "Numerical study of thermomagnetic drive characteristics of temperature-sensitive magnetic fluids," *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, Vol. 165, part B, p. 109100, 2025.
- (23) Y. Iwamoto, Y. Fuji, K. Takeda, X.-D. Niu and H. Yamaguchi, "Application of a Binary Temperature-Sensitive Magnetic Fluid for a Mini Magnetically-Driven Heat Transport Device," *J. JSEM*, Vol. 13, Special Issue, pp. s18–s23, 2013.
- (24) H. Yamaguchi and T. Bessho, "Long distance heat transport device using temperature sensitive magnetic fluid," *J. Magn. Magn. Mater.*, Vol. 499, p. 166248, 2020.
- (25) P.K. Papadopoulos, P. Vafeas, P.M. Hatzikostantinou, "Ferrofluid pipe flow under the influence of the magnetic field of a cylindrical coil," *Phys. Fluids*, Vol. 24, No. 12, p. 122002, 2012.
- (26) 桑原 拓也, 大西 雅志, 山口 博司, 須知 成光, 「磁性流体を用いた熱輸送装置の磁場分布形状による熱輸送および駆動力特性への影響」日本機械学会論文集 (B 編), 73 巻, 734 号, pp. 2085–2091, 2007.