

磁性流体を用いた熱輸送デバイスの温度差駆動力に関する実機検証

穴澤 正隆* 鈴木 政人 馬場 将亮 日下 佳祐 (長岡技術科学大学)

Experimental Verification of Temperature Difference-Induced Force in a Heat Transport Device Utilizing Magnetic Fluid

Masataka Anazawa*, Masato Suzuki, Masaaki Baba, Keisuke Kusaka (Nagaoka University of Technology)

The driving characteristics of a heat transport device utilizing magnetic fluid were examined to improve the lifetime and reliability of semiconductor devices and cooling systems. This device operates based on the effects of magnetic fields and temperature differences, allowing for liquid circulation without mechanical components and ensuring durable heat transport. Electromagnetic simulations and pressure measurement tests established that the driving force is proportional to the temperature difference. Additionally, fluid circulation and heat transport were demonstrated by applying a magnetic field and a temperature difference in a closed-loop system.

キーワード：冷却技術, 磁性流体, デバイス寿命, 半導体冷却

(Cooling technology, Magnetic Fluid, Power supply life, Semiconductor Cooling)

1. はじめに

近年、カーボンニュートラル社会実現に向けて、電力変換回路の高効率化技術が注目されている。電力変換回路の高効率化を実現するため、電力変換回路に使用される半導体デバイスは、従来のSi半導体からワイドバンドギャップ半導体であるSiC、GaN半導体への移行が進みつつある。ワイドバンドギャップ半導体は、従来のSi半導体に比べて低損失であり、さらにSi半導体の動作温度の3倍という高温下での動作が可能である⁽¹⁾。

前述したように、スイッチング素子をSi半導体からワイドバンドギャップ半導体に置き換えることで、低損失かつ高温での動作が可能となる。しかしながら、ワイドバンドギャップ半導体のチップ面積は従来のSi半導体よりも小さくなる傾向にあり、半導体デバイスで生じる損失に起因して熱密度が増加する課題がある。半導体デバイスの寿命は素子の熱サイクルに強い依存性を有することから⁽²⁾、ワイドバンドギャップ半導体を用いた電力変換回路では効果的な冷却手法が求められる。

電力変換回路に使用されるの冷却方式として自然空冷、強制空冷、液冷(水冷)があり、発熱量と使用環境、製品寿命等に応じて適切に選択する必要がある。自然空冷はヒートシンクのみを用いて冷却する手法であり、可動部品を有さないため長寿命であるが、体積あたりの冷却性能には制限がある。強制空冷方式はファンなどを用いて空気を強制的に対流させるため、自然空冷より高い冷却性能を得られる。液冷方式は、水などの液体をポンプなどで循環すること

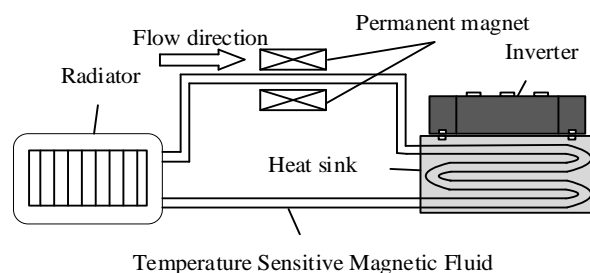


図1 熱輸送デバイスの構成

Fig. 1. Configuration of thermal transport device.

で発熱体と板や管などを介して間接的に熱交換を行う。この構造により、熱交換に空気を介さないため空冷方式より高い冷却性能を有する⁽³⁾。したがって次世代半導体を用いたモジュールを高出力で長期間運用するには、より高い冷却性能を有する強制空冷もしくは液冷が適切である。

しかしながら、強制空冷や液冷はいずれもファン、ポンプといった機械的動力による冷媒の循環が必要である。これらの機械部品は粉塵による汚損、軸受けのグリスの消耗による回転数の低下を招き、電源回路全体としてはコンデンサに次いで故障率が高い⁽⁴⁻⁵⁾。このように冷却装置の冷却性能と寿命がトレードオフの関係にある。

上記の問題を解決することを目的とし、機械部品を用いない冷却システムの開発が検討されている。その一つとして、磁性流体を用いた循環熱輸送デバイスが挙げられる⁽⁶⁻⁷⁾。磁性流体とは流体でありながら磁性を帯びている機能性流

体である⁽⁶⁾。特に、磁性流体の一種である感温性磁性流体は温度によってその磁化の有無が変化するため、外部磁場と磁化の温度変化を用いて磁性流体ポンプとして駆動可能であることが知られている^(6,7)。長年、電子機器などの冷却器として小型化、大量熱輸送に向けた研究開発が進められている⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾が、半導体デバイスの冷却に適用するにあたっては、外部磁場と発生する圧力等の関係が明らかになっておらず、設計手法が確立されていない。

本論文では、磁性流体の駆動力と熱源温度および温度差の関係を明らかにするために、電磁界シミュレーションを利用した駆動力解析を行い、駆動力測定器を開発して温度に対する駆動力特性を取得した。その後、この駆動力で流体を循環させることで熱輸送動作を確認し、熱輸送デバイスとして機能することを確認したため報告する。

2. 磁性流体による熱輸送技術

(2.1) 感温性磁性流体

本研究では、循環用の磁性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しての特性および磁性体としての特性に加え、常温域における温度上昇に伴い磁化が著しく低下するという特徴を有する^(7,8)。本研究では図 2 に示す磁化の温度特性をもつ TSMF (フェロテック, TC3030S) を用いた。図 2 は常温時の磁化特性を基準とした磁化の温度変化を示しており、温度上昇に伴って磁化が低下することを示している。したがって、TSMF は磁場中で加熱されることで吸引力が低下する。

(2.2) 感温性を用いた熱輸送デバイスの駆動原理

図 3 に駆動原理の模式図を示す。TSMF を満たした流路に高温部と低温部を形成し、その温度境界付近で流路を挟み込むように磁石を対向配置した構造をとる。この配置により磁界が大きい温度境界部に TSMF が両側から引き寄せられる。この流体が引き寄せられる力を磁気体積力と呼ぶ。この磁気体積力は圧力として表される。この磁気体積力 P [N/m²] は磁界 H [A/m] の勾配と磁化 M [A/m] の積によって決まる⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾。

$$P = \mu(M \cdot \Delta H) \dots \dots \dots (1)$$

先述したとおり、高温部では温度上昇に伴い TSMF の磁化が小さくなることで、低温側と高温側で磁気体積力に非平衡が生じる。この低温側と高温側の磁気体積力の差によって低温側から高温側への流動力を得る。

3. 駆動力の検討

(3.1) 磁気体積力解析法

熱輸送デバイスの冷媒に TSMF を利用するためには、温度および磁界に対する駆動力の特性を把握する必要があ

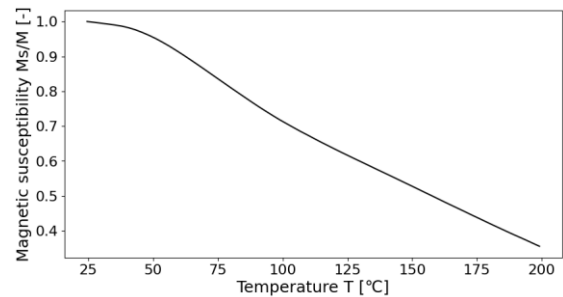


図 2 TC3030S の磁化特性の温度変化
Fig. 2. Temperature dependence of magnetization characteristic of TC3030S.

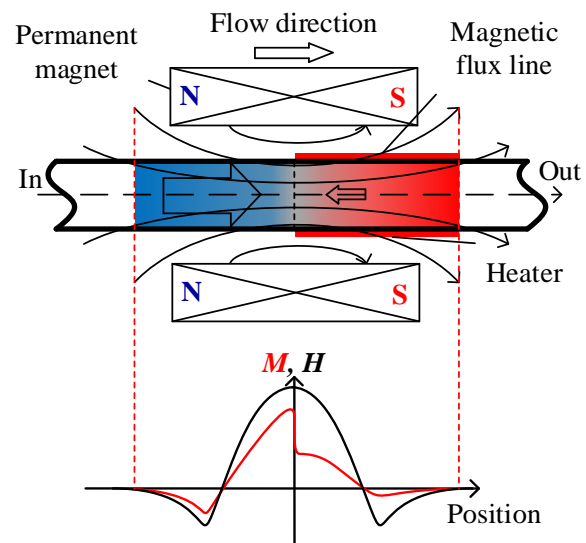


図 3 磁性流体の駆動原理
Fig. 3. Driving principle of magnetic fluid.

る。本研究では、温度に対する TSMF の磁化範囲と、磁気体積力が発生するかの解析を行った。なお、電磁界解析ソフトウェアの制約上、磁性流体を固体としてモデル化し、解析を行った。

図 3 と同様に TSMF を磁石で挟み込む構造の 2 次元モデルで解析を行った。磁石には 40×10 mm のネオジウム磁石を使用し、TSMF の流路径は 8 mm とした。また、磁石と TSMF の間には 1mm の空気領域を設けた解析モデルを作成した。この際に TSMF を流路中央で領域ごとに分割することで、各領域に異なる温度を設定可能とし、左右で理論的に温度差をつけられるよう構成した。

TSMF と磁石以外の領域はすべて空気とし、TSMF モデルには軟磁性体を採用した。この TSMF は、磁化特性に図 2 の温度特性および BH カーブを登録したものを使用した。また、事前に TSMF が強く磁化する範囲を解析により明らかにし、横方向 60mm の範囲で解析した。解析を簡略化するため、磁場が最も強く作用する流路中心の領域の解析結果を採用する。TSMF の領域は 1 mm² の正方形メッシュを

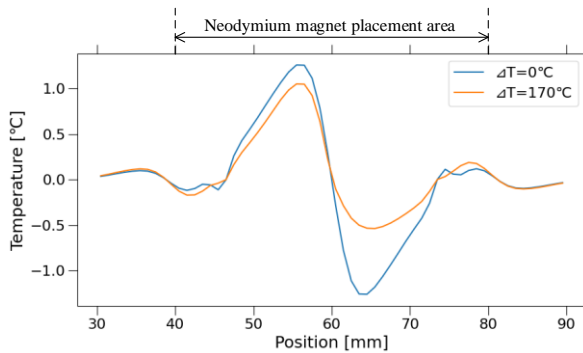


図 4 磁界作用範囲の圧力分布

Fig. 4. Pressure distribution in the range of magnetic field action.

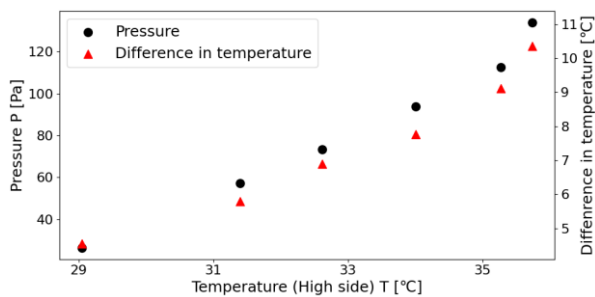


図 5 圧力・温度特性 (シミュレーション)

Fig. 5. Pressure-Temperature Characteristics. (simulation)

生成し、そのメッシュごと磁化とよび磁場の分布を絶対値で取得した。これにより、一定間隔に区切られたデータを取得可能にした。

磁場分布は、流路内の各メッシュの磁場を取得し、現地点とその前後 2 点の計 3 点を用いて回帰直線の傾きを計算することで磁場勾配を算出した。同様に磁化分布も各メッシュで取得した。これらの磁場勾配と磁化、さらに真空の透磁率で積を取ることでメッシュ単位の圧力を算出した。ここで計算される圧力はメッシュ単位の値であるため、TSMF 全体で生じる駆動力を求めるには、流路端から端までの積分値を計算する必要がある。流路の左右に温度差を設けた解析結果を基に、これらの計算過程を行い、TSMF の駆動力を評価した。

〈3・2〉 圧力分布および温度特性の解析結果

図 4 には、解析結果の一例として、低温側と高温側の温度差 ΔT が 0°C および 170°C の場合における流路中心部の圧力分布の計算結果を示す。正の圧力は右方向への圧力、負の圧力は左方向への圧力を示している。前述の通り磁性流体の駆動力は全流路の積分値であることから、求まる圧力値は圧力の大きさと向きが表現できる。温度差が無い場合と温度差が存在する場合で比較すると、高温側での圧力が $60 \sim 70\text{mm}$ の領域で圧力が低下していることが読み取れる。

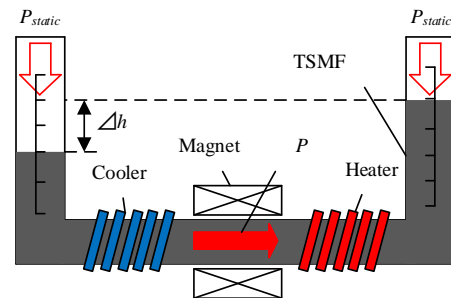


図 6 圧力測定器モデル

Fig. 6. Pressure Measuring Instrument Model.

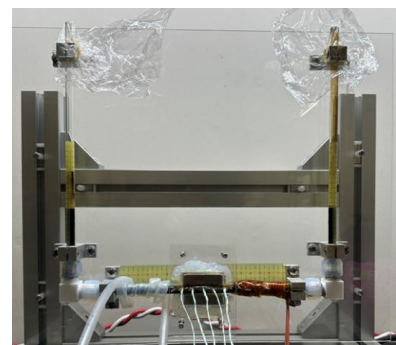


図 7 圧力測定器

Fig. 7. Pressure Measuring Instrument.

この高温側の圧力低下により左右の圧力の平衡状態が崩れるということが視覚的に確認することが出来る。本解析では、磁界作用範囲内に左右の温度差を設けることで、高温側に向かう圧力が得られることが確認された。

図 5 に温度差の変化に対する圧力変化を示す。ここでは、左右の TSMF の温度を、後述する圧力測定の実施時に取得した磁石両端部の温度に基づいて設定した。冷却側は約 26°C 、高温側も同様に実測に基づき温度を設定した場合の解析結果となっている。結果より低温側と高温側の温度差におおよそ比例した圧力が発生することを確認した。これにより温度差の拡大によって圧力が大きくなることを確認した。

〈3・3〉 圧力測定器

先述した解析で用いた JMAG の基本機能では固体かつ、理論的な温度差での解析しか行うことができないため、圧力測定器によって TSMF に働く駆動力の測定を実施した。図 6 に圧力測定器の原理図を示す。本装置では液柱高さを測定することで TSMF に発生している圧力の測定を行う。

本圧力測定器の原理を説明する。U 字型に組み合わせたガラス管を用いて、管内に液体を封入して地面と平行な場所に配置することで初期状態では左右の液柱の高さが等しくなるよう設定する。磁石の両側に温度差を与えることで TSMF は冷却側から加熱側に流動力を得るため、冷却側の

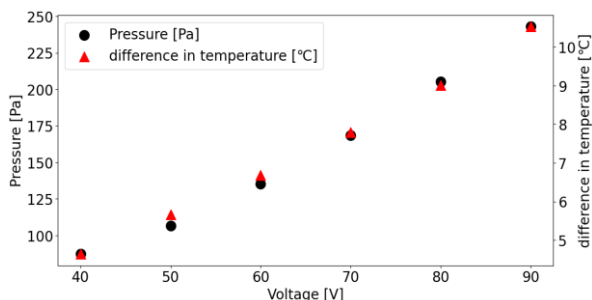


図 8 圧力-温度特性

Fig. 8. Pressure-Temperature Characteristics.

液柱が下降し、加熱側の液柱が上昇することで左右の液柱の高さに差が生じる。この高さの差が液体の駆動力を表すこととなる。したがって、液体の質量が既知であれば液面の高さから圧力を等価的に測定可能である。圧力は液体密度 ρ [kg/m³]、重力加速度 g [m/s²]、高さ h [m] の積で求まる。ただし、ここでは液体の TSMF の熱膨張率が十分小さいものとして無視した。

$$P = \rho gh \dots\dots\dots(2)$$

なお、本装置ではガラス管を用いて外部から温めている関係上、熱伝導率の観点から温度を変えてから 30 分以上放置した後の液柱高さおよび温度データを採用している。

本装置は TSMF を封入した U 字型のガラス管、流路中央に磁界供給部、両端に冷却部と加熱部、加えて液柱高さ測定部で構成される。冷却は冷却水を循環させたシリコンチューブをガラス管に巻き付けることで行い、加熱はスパイラルヒーターを巻きつけることで行った。磁界供給にはシミュレーションと同様の寸法と磁束密度（公称磁束密度 590mT）のネオジウム磁石を用いてアクリル板を加工した治具にて流路を挟み込むように固定した。また、液柱高さ測定を目視で可能にするため、左右の縦に配置したガラス管に貼り付けたスケールテープを用いて測定する。

〈3・4〉 圧力特性

図 8 に、冷却水の温度を 20°C 一定とし、ヒーター温度を変化させた際の圧力および磁石両端の流路温度差の変化を示す。図 8 より、ヒーター温度の上昇に圧力が比例していることに加え、磁石両端の温度差と圧力に強い相関があることが読み取れる。これによりシミュレーションで確認された磁石両端の温度差と TSMF の流動力が比例関係にあることが実機実験においても確認された。

さらに実験結果において冷却側の液柱の下降分と加熱側の上昇分が若干の不一致が見られたことから、TSMF の熱膨張が生じていたことが確認された。一方、シミュレーションで得られた圧力値とは一致しなかった。この不一致の原

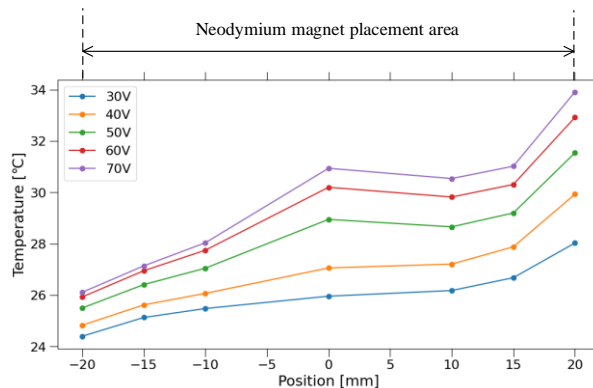


図 9 磁化領域の温度分布

Fig. 9. Temperature distribution of magnetization area.

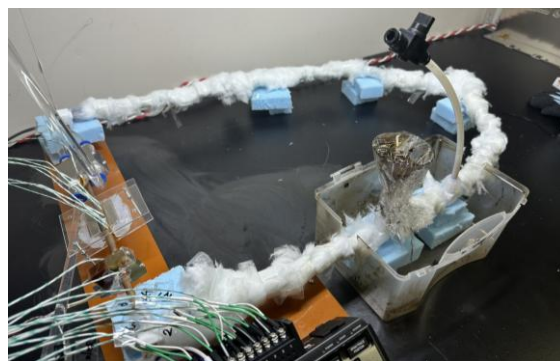


図 10 熱輸送量測定器

Fig. 10. Thermal Transport Analyzers.

因として、シミュレーションでは理論的に設定した 2 つの領域間の温度差に基づく磁化分布を用いて圧力を計算しており、熱流体解析ではなく、熱分布および流体の各特性などを考慮していないことが挙げられる。

〈3・5〉 磁界作用範囲の温度分布

磁石近傍の TSMF が強く磁化する領域の温度分布を測定した。冷却水温度を 20°C に設定し、ヒーター供給電力を変化させた際の温度分布を図 9 に示す。測定においては、磁石中央（位置 0mm）を基準とし、冷却側および加熱側に向かってそれぞれ 10~20mm の範囲に 5mm 間隔で熱電対を配置し、計 7 点の温度を測定した。位置が負の方向は冷却側、正の方向は加熱側を表している。

供給電圧の上昇に従い、磁化領域全体の温度が上昇していることが読み取れる。また、冷却側と加熱側で温度勾配が異なることが読み取れる。この温度勾配の差異は、伝熱の違いに起因しており、冷却側では熱伝導、加熱側では熱伝達（対流）が生じていることが原因とみられる。冷却側から加熱側の温度差がある限界を超えると液体内の熱伝導だけではなく、流体の移動の対流による熱の移動が発生する。この対流の発生により加熱部と流体間の熱が移動し、加熱側では

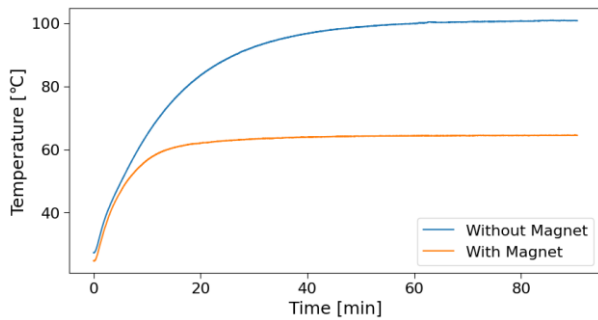


図 11 均熱板後方の流路温度変化

Fig. 11. Temperature Variation in the Flow Path Behind the Heat Spreader.

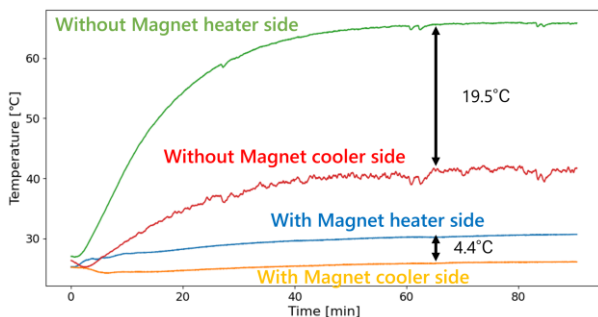


図 12 磁石両端部の温度比較

Fig. 12. Temperature comparison at both ends of the magnet.

指数関数的な温度勾配を形成する。したがって、図 9 の加熱側の温度分布は対流による熱伝達の影響が見えていると考えられる。

4. 熱輸送動作の検討

〈4・1〉熱輸送量測定器

図 10 に熱輸送量測定器を示す。本装置は、最終的に TSMF の冷却性能を熱抵抗および熱輸送量で評価することを目的として設計された。しかし、現時点では熱輸送量の測定をもとにした冷却性能の評価は行えていないため、代わりに磁性流体の流動させることの成否のみ検証を行った。

本装置は TSMF を封入した閉ループ流路、冷却部および加熱部、それらの間に配置した磁界供給部で構成される。冷却部は穴が開いたアルミ板に冷却水を流し、この板で銅パイプを挟み込む構造により冷却を行う。一方、加熱部は均熱用の真鍮板に窒化アルミヒーターを貼り付けることで加熱を行う。磁界作用部および加熱、冷却部が設置されている箇所は、熱伝導率に優れた銅パイプ（内径 7mm）を使用し、それ以外の部分には圧力測定器を流用したガラス管および PTFE チューブを用いて閉ループを構成している。磁界供給にはネオジウム磁石を採用しており、圧力測定器と同様の仕様のものを用いている。

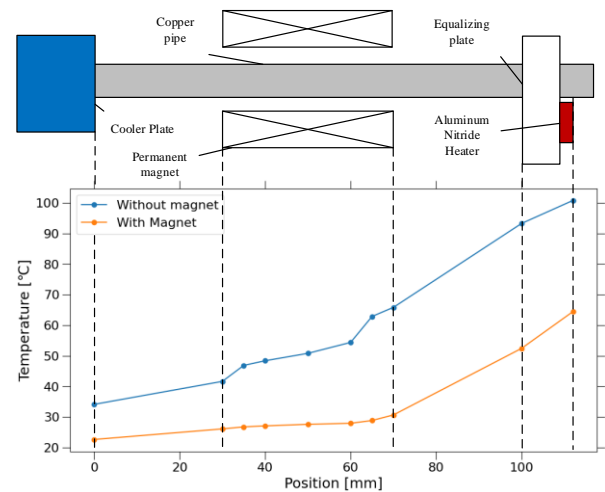


図 13 駆動力発生に関わる流路の温度分布

Fig. 13 Temperature distribution of flow paths involved in driving force generation.

なお、図 10 では駆動に関わる箇所を明確にするため一部の断熱材を取り外しているが、本装置では熱輸送媒体を TSMF のみとするために、装置を設置した実験台および空気と断熱する必要がある。そのため、流路管にグラスウールを巻き、継手と実験台の間に断熱材（デュポン・スタイロ、スタイロフォーム）を挟むことで断熱を行った。流路全長は約 2130mm であり、銅パイプ部の内径は 7mm、その他の箇所は 6mm である。温度測定には K 型熱電対を使用し、磁界供給部に 7 点、冷却板通過後に 1 点、加熱部の均熱板の前後にそれぞれ 1 点配置している。この配置により、銅パイプの温度変化および温度分布を測定可能とした。

〈4・2〉熱輸送動作の確認

図 11 にヒーターに約 15W を供給し、冷却水温度を 20°C に設定した条件での加熱部通過後の流路温度変化を示す。この結果より、磁石の有無により飽和温度が異なることが読み取れる。飽和温度はそれぞれ、磁石がある場合は 60°C 程度、磁石が無い場合は 100°C 程度となっている。

以上のことから、温度差が発生することで加熱部通過後の流路温度を低減することが可能であることを確認した。この現象は、磁性流体の駆動により熱輸送が行われたことを意味する。

〈4・3〉磁場作用範囲の温度推移の比較

図 12 は、ヒーターに約 15W 供給し、磁性流体に温度差を与え、磁石両端の流路温度を磁石の有無で比較した結果である。磁石がある場合は、両端の温度差が時間経過でほぼ変化せず、約 4.4°C 程度で一定に保たれる傾向が見られた。一方、磁石が無い場合は、時間経過に伴い温度差が拡大する傾向が見られる。これは、TSMF が温度差に起因する圧力の不平衡によって流動力を生じる特性が持続的に表れている。

ることを示している。したがって測定された温度差は、本装置において流体が持続的に駆動するために必要な温度差であるといえる。

〈4.4〉循環型熱輸送デバイスとしての有効性

〈4.3〉節までの結果により熱輸送が行われていること及び、駆動力が発生していることが確認された。そのため次に、熱輸送の傾向を調査するため、駆動力に関わる流路中の温度分布を測定した。図 13 は冷却水温度を 20℃とし、ヒーターに 15W の電力を供給した後十分な時間が経過した際の流路の温度分布を磁石の有無と比較したものである。

磁石による磁界が存在し、TSMF が駆動している場合には、流路全体の温度が低いことが読み取れる。加えて、駆動している場合は、磁石配置範囲を通過するまでは温度が低く、高温部が近づくと急激に温度が上がるといった特性が見られる。この結果は、本装置が冷却側から熱源に向かって駆動力を発生させる駆動原理に基づいていることを示しており、流路全体の温度低下は冷却部の冷熱が熱源側に運ばれていることを表していると考えられる。すなわち、〈4.2〉節の均熱板後方の流路温度低下は、冷却された TSMF が熱源側へ移動したことが原因であるといえる。したがって、冷却された液体によって均熱板の熱を除去したとも考えられる。

以上より、冷却側から加熱側へ TSMF が流動していることが確認された。これら熱輸送動作の確認の実験結果より、温度差を与えることで駆動力が発生し、冷却された TSMF が加熱部に移動して熱を除去しているといった一連の動作が確認された。したがって、本デバイスは機械部品を使用せずに冷媒を循環させる熱輸送デバイスとして機能することを確認した。

5. むすび

本論文では、TSMF を用いた熱輸送デバイスについて、電磁界シミュレーションを用いた圧力解析を行い、その後圧力測定器を開発して各特性を測定した。また、TSMF が循環可能であることを確認した。

電磁界シミュレーションでは、固体による圧力解析を行い、TSMF にネオジウム磁石を用いて磁界を与えた状態で温度差を発生させることにより、温度差に比例する圧力が得られることを確認した。さらに、圧力測定器を用いた圧力測定試験においても、同様に温度差に比例した圧力が発生することを確認した。また、圧力測定器の流路温度を詳細に調査することで対流現象を表す温度分布を確認した。

駆動力特性の結果をもとに、TSMF が循環可能な装置を開発し、同様に磁界と温度差を与えることで約 2m 程度の流路内で TSMF が循環可能であることを確認した。この際、熱源付近の温度を低下することを確認した。これは駆動原理に基づき、冷却側の液体が加熱側に移動したことによる

ものであり、機械部品を用いず冷媒を循環可能であることを示している。

TSMF の駆動力と温度差には強い相関があること、閉ループ構造において循環可能であり、循環型の熱輸送デバイスとして機能することが明らかとなった。一方で、熱輸送デバイスとして評価するためには、熱流量、熱輸送効率および流路の温度分布の測定が必要である。また、本装置は温度差だけでなく磁界も駆動力に関係するため、磁界と駆動力の関係も明らかにする必要がある。実デバイスへの実装は、これらの検証を踏まえ、適切な流路構成および供給磁界を設計することが求められる。

今後は、熱源の配置による温度差の付与方法、磁界の強さが駆動力に及ぼす影響、熱流量の測定などを通じて本装置の評価し、磁性流体を用いた熱輸送デバイスとしての具体的な設計指針を確立していきたい。

文 献

- (1) 松波 弘之:「SiC パワー半導体への期待と課題」, 電気学会論文誌 B, vol. 135, No. 2, p. NL2_6 (2015)
- (2) H. Huang and P. A. Mawby: "A lifetime calculation technique for voltage source inverters," IEEE Trans. Power Electron., vol. 28, no. 8, pp. 4113-4119 (2013)
- (3) J WEI: "Thermal Design of Supercomputers", Journal of the Heat Transfer Society of Japan, Vol.59, No.249 pp.9-14 (2020)
- (4) 中尾 宏, 米澤 遊, 中島 善康, 黒川不二雄:「ICT 機器用電源の劣化検出/寿命予測技術」, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J101-B, No.11 p.893-901 (2018)
- (5) D. Hill, "Why power supplies fail: A real world analysis," [online] <https://ieeetv.ieee.org/ieeetv-specials/apec-2016-david-hill-why-power-supplies-fail-a-real-world-analysis>, in plenary session of APEC2016: 2016 the 30th IEEE Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition, Long Beach, USA, Marth 2016, last accessed at Feb. 2nd (2025).
- (6) 元木 浩:「小型化・集密化する電子デバイスを支える熱輸送・冷却技術の進化と新展開」, サイエンス&テクノロジー株式会社, pp.129-135 (2021)
- (7) 麓 耕二, 池川 昌弘, 山岸 英明:「感温性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), Vol.72, No.723 pp.179-185 (2006)
- (8) 栄 中武:「感温性磁性流体を用いた自己駆動熱輸送に対する二次元熱流動解析」, 名古屋工業大学大学院工学研究科電気・機械工学専攻博士論文 (2023)