

磁性流体・ペルチェ素子・絶縁放熱基板の利点を活かした自動車分野での応用

(株)フェローテック オートモーティブプロジェクト長 水杉 一史 氏

サーマルマテリアル部長 八田 貴幸 氏

マグネティックマテリアル部長 廣田 泰丈 氏

オートモーティブプロジェクト 二ノ瀬 悟 氏

オートモーティブプロジェクト 鐘 享璟 氏 に聞く



左から、八田氏、鐘氏、水杉氏、二ノ瀬氏、廣田氏

1. オートモーティブプロジェクト

当社は2018年1月に「オートモーティブプロジェクト」を立ち上げた。それから3年目を迎えた本年4月にはオートモーティブプロジェクトが組織として独立、自動車のマーケットの部門横断的な攻略が本格化してきている。この間、自動車用温度調節シート向けで多くの採用実績を持つ「サーモモジュール（ペルチェ素子）」や、創業の技術であり車載スピーカーで実績のある「磁性流体」、さらには自動車のエンジンやモータ、パワーステアリング、ヘッドライトなどの制御装置の基板として採用されている絶縁放熱基板を中心に、自動車市場の様々な課題へのソリューションを提起し、徐々に具体的な適用に向けた検討案件が増えている。

ここでは、それらコア技術の適用によるメリットと、自動車分野での各種課題解決のためのソリューションについて紹介する。

2. フェローテックのコア技術

2.1 磁性流体

磁性流体は、流体でありながら外部磁場によって磁性を帯び、磁石に吸い寄せられる機能性材料で、磁性微粒子、界面活性剤、



図1 磁性流体

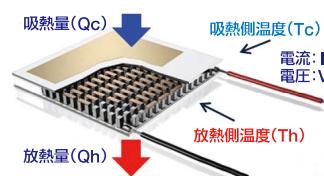
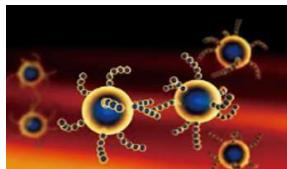


図2 ペルチェ素子

キャリアとなるベース液（潤滑油）からなる。直径約10nmの極小の酸化鉄粒子が、凝集を防ぐ界面活性剤で被膜され、安定的に分散したコロイド状の液体となっている（図1）。

自動車分野ではすでに、磁性流体の放熱効果やダンピング効果などによる高音質化や小型化などからスピーカーに採用されている。

2.2 ペルチェ素子

ペルチェ素子は、対象物を温めたり冷やしたりする半導体冷熱素子のこと。N型とP型という異なる性質を持った半導体素子を組み合わせたモジュールに、直流の電気を流すと熱が移動し、一方の面が吸熱（冷却）し、反対の面が放熱（加熱）するというペルチェ効果を応用したもの（図2）。電源の極性を逆にすると、吸熱と放熱を簡単に切り替えることができる。ペルチェ素子のこうした特性を活かし自動車分野では温調シートで多数の実績を持つ。

2.3 絶縁放熱基板

絶縁放熱基板（図3）は、セラミックス基板に銅回路板を接合したもので、放熱性・絶縁性・耐久性が高いアルミニナセラミックス基板に銅製（Copper）の回路と放熱板を共晶反応で直接接合させた構造のDCB（Direct Copper Bonding）基板を自社開発し世界第2位のシェアを持つ。最近では、窒化ケイ素や窒化アルミニウムを基板とした、より信頼性の高いAMB（Active Metal Brazing：活性ロウ付け法）方式の技術を開発。新工場に量産設備を導入してサンプル出荷を開始している。自動車分野では、電動パワーステアリング用など各種モータの制御用インバータの基板などで採用されている。

3. 自動車における磁性流体適用のメリットと課題解決のソリューション

磁性流体の自動車分野でのアプリケーションとしては、圧倒的に高いシェアを持つ車載用スピーカー向け磁性流体に加えて、セミアクティブダンパー・リニア振動・触覚（ハaptivick）デバイスへの応用など、新しい用途での検討が進んできている。ここでは、2018年以来、3回にわたり出展した「EV/HEV駆動システム技術展」を通じて具体的なサンプル要求が増えてきている「感温性磁性流体を用いた熱輸送システム」の利点と、自動車の課題解決のためのソリューションについて紹介する。

3.1 感温性磁性流体を用いた熱輸送システム

3.1.1 自動車での課題と感温性磁性流体適用のメリット

自動車においては、エンジンのオーバーヒートを防止するためのラジエーターによる冷却など、熱マネジメントが早くからなされているが、電気自動車（EV）など電動車両の本格化に伴い、例えばバッテリーとなるリチウムイオン電池が温度にセンシティブであり、高温／低温のいずれにおいても特性が大きく変化したり劣化が進みやすいといった、熱関連の新たな問題が顕在化している。



図3 絶縁放熱基板

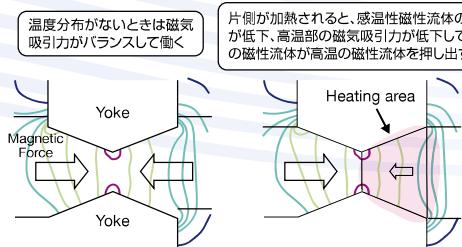


図4 感温性磁性流体を用いた熱輸送システムの駆動メカニズム

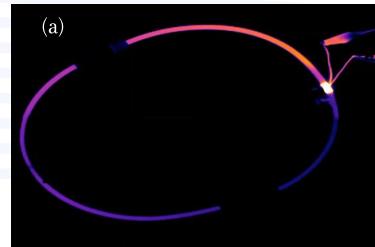


図5 感温性磁性流体を用いた熱輸送システムの(a)実験での駆動確認と(b)加熱位置による駆動の向き

バッテリーやインバータなどの発熱を伴う機器の冷却において、熱の集中を防ぐためのループ循環系の熱輸送システムを構築するには、一般的に流体を循環させるためのポンプといった機械的駆動力が必要となり、そのための設置スペースが必要となる上、バッテリーの消費にもつながる。さらにポンプなどの重量が加算されることで電力消費(電費)は増大する。

これに対し当社では、温度に反応して磁化が大きく変化する「感温性磁性流体」を開発。これを用いた熱輸送システム(図4、図5)を提案している。感温性磁性流体を用いた熱輸送システムでは、磁性流体を封入した流路に、冷却される区間の「低温部」と加熱される区間の「高温部」を設けて、磁性流体に温度勾配を作る。それから、低温部と高温部の間に磁石を設置。高温部の磁性流体中の磁性微粒子は温度上昇に伴って磁化が減少する一方で、低温側の磁性流体は磁化が変わらずに磁石へと強く引き寄せられる。これによって、低温側から高温側へと感温性磁性流体の流れ(駆動力)が発生して、流体の自己循環が可能となる。つまり、機械的な動力なしに、熱を輸送できるというわけである。

局部的に熱が偏在することによる問題を低減するため、全体的な熱マネジメントを進めたい自動車メーカー、電源を使用せずに熱効率を高めるヒートパイプを構築して自動車メーカーに提示したい自動車部品メーカー、さらには発熱密度の増大によって処理速度の低下や高温による故障など多くの熱問題を抱える電子機器メーカーなどから、具体的な引き合いが増えており、実用を想定した研究が活発になっている。

すでに挙げたバッテリーやインバータをはじめ、自動車内部には多くの場所で熱源が存在するため、熱的に相互を補填し合うことで効率を追求することが重要になってくる。例えば冬場の暖房は、熱機関駆動の自動車では容易にエンジンからの熱を活用できるが、電気自動車ではPCTヒーターな

ど電熱線で発熱させたりしておる冬場の電費効率は著しく下がるが、他の部位からの熱源を活用することで効率改善が期待できる。後述のペルチェ素子とのコンビネーションなど、他の熱管理技術との組み合わせによっても、さらなる領域での活用を考えることができる。

また自動車からの水平展開として、熱が問題となる身の回りの課題にも着目すべきである。身近ではスマート、ノートPC、フラットパネルTVの発熱などは日常気になるものであるし、産業分野においてもLED、レーザー、ロボット、製造装置、サーバーといったように、チラーなどで強制的に冷却を行っている用途に展開できると考えられている。

3.1.2 実用に向け大きな進展となる新たな感温性磁性流体を開発

感温性磁性流体の基礎研究は国内外の拠点で長年進められてきたが、製品レベルの設計開発は約5年前から加速している。磁性流体は前述のとおり、磁性ナノ粒子、界面活性剤、キャリアとなるベース流体からなるが、感温性磁性流体のベース流体にはケロシンなどの有機溶剤が主に用いられてきた。有機溶剤が用いられてきたのは、磁性ナノ粒子を分散することが比較的容易であるためであるが、ガソリンを使う内燃機関とは違い、EVや家電製品では、そうした可燃性流体の使用は避けたいとの要望が強く、不燃性流体をキャリアにした感温性磁性流体は長年の目標であった。

今回、磁性ナノ粒子および界面活性剤の組成、分散に関するコーティング技術・工程ノウハウを駆使して、初めての「水ベース感温性磁性流体」を開発することに成功した。水単体は当然のことながら0°Cで凝固し100°Cで沸騰するが、独自の配合技術によって、最新の開発試作品では-70°Cという凝固点を実現。概ねの用途における使用温度範囲は-40°C~+80°C程度のため、低温側の要求も高温側の要求もカバーでき

ると見ている。

ここでコーティング技術は、10nmという極めて小さいナノ磁性粒子を個々に界面活性剤で覆うもので、これによって各磁性ナノ粒子が凝集することも沈降することもなく、非常に優れた分散性を実現できる。本

来、水は極性が強い特殊な液体のため、安定な分散を得るのは難しい材料であるが、今回は開発グループにより比較的最近に見出した材料・工程を積極的に適用し、有機溶剤ベースと比べても遜色ないレベルに分散性に優れた水ベース感温性磁性流体を世に出せることに至った。

また、磁性流体中の磁性ナノ粒子の濃度は、熱輸送のために駆動させるためには重要なパラメータである。すなわち粒子濃度が高いほど、ヒートパイプ中の感温性磁性流体の駆動力は強まるところになる。スピーカーなど一般産業機器向けの磁性流体の粒子濃度は100~200ガウス程度、また水ベース磁性流体としての粒子濃度上限も300ガウス程度がこれまでの上限であったが、今回開発した感温性磁性流体は、これまでに類を見ない600ガウス以上という高い粒子濃度を達成。また米国拠点では、別の用途向けの水ベース磁性流体をtonレベルで大量生産できる施設を所有しており、量産時の供給能力とコスト対応能力も充分に確保できていると思われる。

一方、具体的な熱輸送システム全体の効率を上げるには、高性能の感温性磁性流体を使用するだけでなく、熱輸送の効率を高めるために適切に温度勾配を持つように設計されたループが構築されることになるが、そういった個々の熱輸送システムでの性能を保証することも材料メーカーの責務の一つである。そのため、駆動環境による熱輸送効率の違いなど、熱輸送実用に向けた各種試験データを取得し知見を高める活動も大学と共同で進めている。

直近では、本年6月をめどに開発品のサンプル販売を開始すべく、最終的な準備に取り組んでいるところだ。一方、長期的な取組みにはなるが、水ベースの感温性磁性流体という今まで世の中には全く新規の製品となるため、分類や試験評価手法を含めた国際標準化についても研究機関と協力しながら進めていく考えだ。

4. 自動車におけるペルチェ素子適用のメリットと課題解決のソリューション

ペルチェ素子を用いた自動車でのアプリケーションとしては、自動車用温度調節シート向けで多くの採用実績を持つほか、近年では、海外の自動車OEMで採用実績がある温度制御が可能な車載用カップホルダーや、バッテリーおよびキャビンの温調システム、車載カメラのCMOSイメージセンサ用クーラーなどで引き合いが増えてきている。ここでは、具体的な採用に向けて検討が進んできているバッテリーの温度コントロールのアプリケーションを中心に、ペルチェ素子採用の利点と、自動車の課題解決のためのソリューションについて紹介する。

4.1 バッテリー／キャビンの温度コントロール

4.1.1 温調システムとしての高い効率

ペルチェ素子は、冷却・加熱の双方に対し既存の手法に比べて、微妙な温度制御が可能であることや電力消費抑制につながる軽量・小型化が図れるなど優位性が多い一方で、特に過熱に使用した際の吸熱の利得が大きいことはあまり知られていないようだ。ペルチェ素子から放熱される熱量(Q_h)は、吸熱量(Q_c)と総消費電力($VI=ジュー$ ル熱)との総和となるため、ジュー効果によって発生する熱エネルギー(ジュー熱)に比べ、小さな電気で大きな加熱ができる省エネヒーターを構成できる。キャビンヒーターにおける Q_c の利得による効果(図6)を周知させ、自動車分野での適用を進めていきたいと考えている。

一方で、ペルチェ素子の放熱面の温度(T_h)と吸熱面の温度(T_c)が逆転すると冷却効率(COP)が極端に上がる(図7)、というメリットも浸透しているとは言えない。特に、夏場にペルチェ素子の放熱側である環境温度 T_h が30°Cでペルチェ素子の吸熱面となるバッテリーの温度 T_c が60°Cといった場合には、温度差が ΔT となりCOPは200%、250%という高効率クーリングシステムを構成できる。こうした高効率の温調システムとしてのペルチェ素子の有用性を訴求していきたい。

4.1.2 パーソナル冷暖房システムとしてのメリット

自動車の断熱性能には限界があり、窓が増えたり大型車になると表面積が大きくな

るため、放出され損失となる熱も大きい。つまり、エアコンでは熱貫流量Qが、熱貫流率Kや、車内温度 T_i と外気温 T_o との差、冷暖房の対象となる自動車表面積Aによって左右されるため、自動車の燃費や電費の観点からは効率の良い冷暖房システムとは言えない。

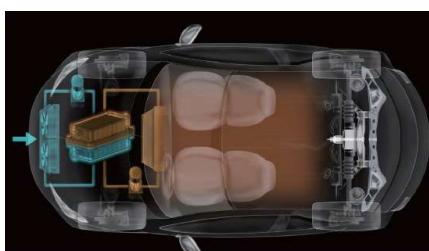
そこで、燃費や電費を抑制する観点や室内の快適性を高める観点から、ペルチェ素子を採用した現在のシート温調システムの進化系のような、パーソナルに乗員の体を温めたり冷やすというシステムも一部検討されており、そうした中でペルチェ素子採用の可能性も拡大してきている。

エアコンでの冷暖房は上述のとおり表面積に比例して熱効率のロスが発生することに加えて、たとえばキャビンの温度が低くエンジンおよびエアコンユニットが冷えている状態で暖房運転を開始した場合、エアコンユニット内の空気を暖めてから暖かい風が出てくることから、数分程度の立ち上がり時間要する。これに対してパーソナルな冷暖房システムであるペルチェ素子では、システムがコンパクトなこともあり、数秒でドライバーや同乗者の体を温めたり冷やしたりすることが可能となっている。

自動運転ではドライバーもリラックスした状態に置かれ、室内の快適化がますます要求されることから、欧州の高級車ではすでに、アームレストや屋根やダッシュボードにまでペルチェ素子を搭載してパーソナルな冷暖房を実現しようという取組みも始まっている。“高級ホテル空間”とでも言える車室内の快適性向上では、ペルチェ素子を用いたパーソナル温調システムの果たす役割は増えてくるものと見ている。

5. 自動車における絶縁放熱基板適用のメリットと課題解決のソリューション

パワー半導体用の放熱基板として用いら



$$Q_h = Q_c + I^2 R$$

放熱側へは、サーモモジュールへ入力した電力に加えて、吸熱側(車外)から吸収された熱エネルギーが放出される

図6 キャビンヒーターにおける Q_c の利得効果

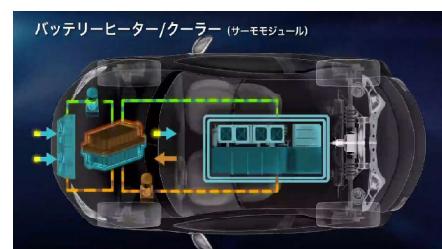
れるDCB基板は、内燃機関車からHEV(ハイブリッド車)やPHEV(プラグインハイブリッド車)といった電動化、さらには先進運転支援システム(ADAS)の搭載などを背景に、需要の増加するモータ制御用インバータ回路の基板として引き合いが増えてきている。さらに、高圧バッテリーに蓄えた直流電力を交流に変換し走行用モータを駆動するための動力変換装置IGBTなど放熱が必要な新しいアプリケーションでも、攻略を進めている。

特に窒化ケイ素基板を用いた新開発のAMBは、高い信頼性に加えて、車載のパワーデバイスとして用いられる炭化ケイ素(SiC)と熱膨張係数の点で相性が良いといったことから、車載向けの各種アプリケーションで引き合いが増えてきている。自動車メーカーからは、−55~300°Cといった温度変化を1000~2000サイクル実施しても、銅パターンのはく離やセラミックス基板のクラックが発生しないといった、強度の向上や寿命の延長を要求されており、設備や工程の改善、技術の確立を急いでいる状況だ。

6. 今後の展開

自動車分野では電動化へと向かう大きな変革の中にあって、新規参入の機会が増えている。ペルチェ素子、磁性流体、絶縁放熱基板という各製品事業では自動車分野での採用実績も少なくないものの、自動車の新しい潮流の中での新たな課題に対して、部門独立し人員も増強された横断的な組織である「オートモーティブプロジェクト」として、最適なトータルソリューションを提供して課題解決に努めつつ事業を拡大していきたい。

上述のような具体的な案件を成約することで今年度は数千万円程度のビジネス獲得から始めて、3年後には50億円程度のビジネスに育てていきたい。



$$Q_c = \alpha T_{cl} - \kappa (T_h - T_c) - 0.5 \times I^2 R$$

図7 バッテリークーラーにおける $\kappa (T_h - T_c)$ の利得効果: T_c が T_h よりも高い場合、熱伝導による損失 $\kappa (T_h - T_c)$ が逆に利得となり効率が大きく改善