

# 磁性対流を応用した マグネチックヒートポンプ

株式会社ダ・ビンチ 代表取締役

東 謙治

「未来材料」第5巻第10号 32～36頁 (2005)

発行：(株)エヌ・ティー・エス

# 磁性対流を応用した マグネチックヒートポンプ

永久磁石の磁場に磁性流体(磁性を有する液体)を置き、熱を加えると、温度によって磁性体の飽和磁化値が変化して、温度の低い磁性体が温度の高い磁性体を磁場の弱いところへと押し動かすため、対流(磁性対流)が生じる。この原理を応用して、磁場と温度勾配により作動する熱移送素子を開発した。

東 謙治 Kenji Higashi

株式会社ダ・ビンチ 代表取締役

## 1 はじめに

廃棄されて活躍の場もなくさまよう廃熱の再利用は、今重要な問題であると考えます。効率100%の機器は存在しないし、また、燃焼して高温の熱エネルギーを運動エネルギーや電気エネルギーに変換する行為を止めるわけにはいかないが、不要とされる低温の熱エネルギーを再利用できれば、全体の効率は向上し、また二酸化炭素量も減少する。そのような意味でコージェネレーション化が進めばよいと思うが、現実には理想とはかなり異なるようである。

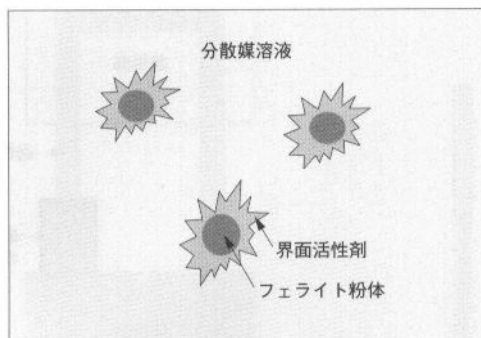
筆者は、バランスのとれた地球環境の実現に向けた一つの取り組みとして、一定量の熱移送法の確立と80°C以下の廃熱で動作する熱発電装置の開発を目指している。また、強力な永久磁石の磁場による熱交換技術などは今後非常に興味深い技術であるかもしれない。たとえば夏が少しでも凌ぎやすくなる程度の磁気冷却クーラーなど可能性が

ないとはいえない。永久磁石の磁力が消磁するには膨大な時間を要するので、その磁力と身の周りにある温度差とを利用した省エネルギー機器があふれる時代を夢見て未来を創造したいと考えている。

## 2 開発の視点

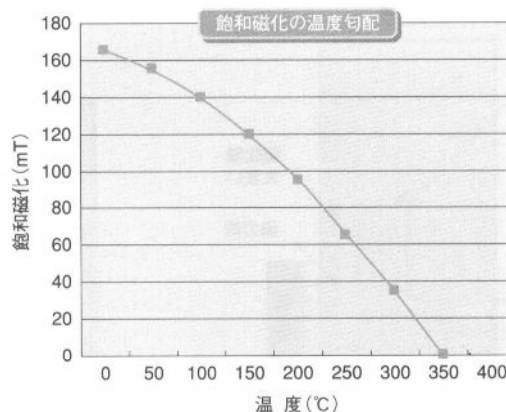
熱は非常に身近な存在でありながら、廃熱という言葉に代表されるようにエネルギーの最終形態であり、厄介な存在と考えられている。しかし、地球温暖化の抑制やコージェネレーション・システムなどでは熱をいかに再利用するかが課題となり、最近になってようやく、熱を科学する時代に入ってきたように思われる。

とくに熱を制御するのは非常に重要なことであり、熱の再資源化には欠かせない技術である。なぜならば、金属などを熱伝達材として利用する場合、



分散媒中に強磁性体が界面活性剤でコートされた状態で混合された様子を示す。

図1 磁性流体の構成



マンガン亜鉛フェライトの飽和磁化値が温度とともに変化することを表す。

図2 飽和磁化の温度依存性

熱伝導率と入力された熱量とにより受熱部と放出部の温度差が決まるが、一定の温度差を保つためには入力された熱量に見合う放熱構造が必要となる。しかし、入力される熱量が変化した場合には、一定の温度差を放熱性能を可変として保つたとしても、一定の熱量を運ぶことはできない。従来よりある技術としてヒートパイプなどでは熱移送能力の限界に達すると飽和してしまうので、その飽和する点では前記した金属とは異なり定量的熱移送能力があると考えられることができるが、飽和する点を任意に設定することは大変困難なことである。また、水冷などではポンプの回転数を制御して定量的熱を運ぶこともできるが、熱を再資源化するために新たにエネルギーを消費する考え方はいかがなものかと考える。

次になぜ定量的熱を運ぶことが重要であるかについてであるが、熱起電力発電を行う場合に入力側の熱量が定まらないと、所定の温度差を得るための放熱性能が決まらないので、効率のよい熱起電力発電装置を設計することができなくなる。たとえばスターリン

グエンジンなども同様で定量的な熱入力が必要とする。

このように熱を制御することはきわめて困難であるが、熱を見る視点を変えることで任意の熱量を定量的に運ぶ熱移送素子を構成できないかと考えたのが磁性対流を利用した熱移送方法である。

### 3 磁性流体と対流

磁性流体の多くはポリ $\alpha$ オレフィンやイソパラフィンなどの炭化水素系の油を分散媒として、その溶液中に10nm程度に微細化したフェライトなどを界面活性剤でコートした強磁性体を混入したものである。とくに重要な点は、強い磁場を印加したとしても強磁性体が界面活性剤の反発力により分散媒中に均等に分布するという点である(図1)。ただし、MR流体など分散性に乏しい磁性流体もあるが、本稿では前者の磁性流体について説明する。

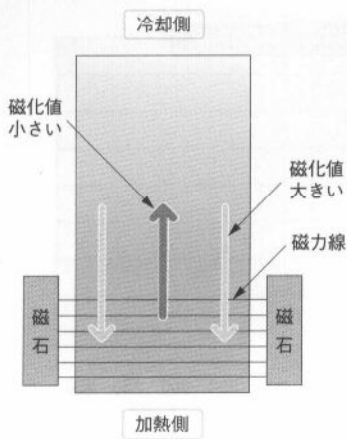
磁性流体の飽和磁化値\*は混入する強磁性体の体積に比例し、磁場変化に

よる残留磁化がほとんどなくヒステリシスを有さない。また、磁性体の飽和磁化値は温度に依存して変化し、その値は絶対零度で最大値を示すと予測され、キュリー温度に達すると0となる。一般的な磁性流体はキュリー温度が高い強磁性体で構成されており、温度による飽和磁化値の変化率を小さくしている。これはキュリー温度が低い強磁性体を使用すると、飽和磁化値の温度依存性はより顕著に発現し、温度勾配による磁性対流が生じやすくなってハードディスクや軸受けの真空シール材としては不適切な特性を示すためである。

磁性対流を有効に利用するには、強磁性体のフェライトにマンガンや亜鉛などを加えた合金で構成されたキュリー温度の低い磁性流体を製造する必要性がある。現在、当社で使用している磁性流体の飽和磁化値と温度の関係はお

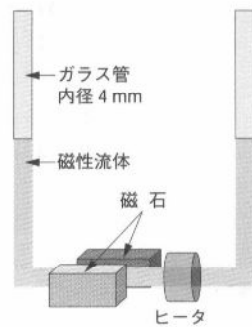
#### 【飽和磁化値】

十分に強い外部磁場により磁化が飽和に達したときの磁化の値。文中の単位はmT(ミリステラ)。



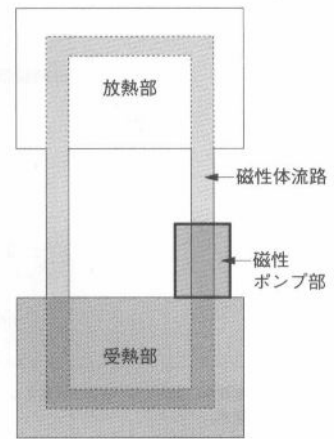
磁性対流が生じる要因を示している。

図3 磁性対流の原理



磁性対流による差圧を計測するための装置

図4 磁性対流の静的性能検証



受熱部と放熱部を配したマグネチックヒートポンプの構成

図5 マグネチックヒートポンプ

およそ図2で示したような温度勾配を有している。

#### 4 磁性対流の原理および性能評価と可能性

磁性対流の原理について図3を参考に説明する。磁性流体を2個の磁石で挟むように磁性流体に磁場を印加し、磁場が印加されている側を加熱すると、加熱された磁性流体の飽和磁化値が低くなり、飽和磁化値の高い磁性流体が磁場強度の強いところに引き寄せられるため、前者の磁性流体は磁場の弱いところに押し出されて対流が生じることになる。

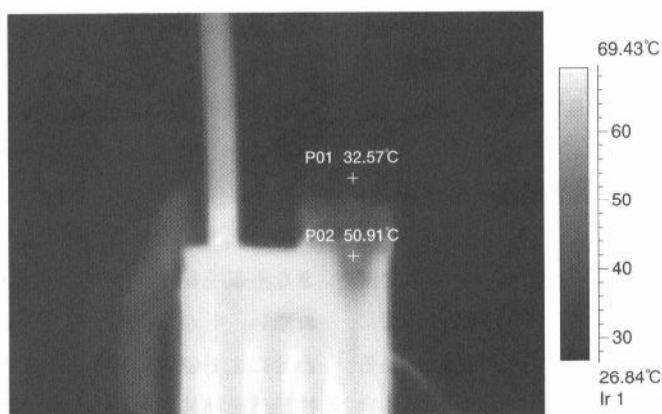
この対流による圧力を簡易的に計測するため、図4に示すような計測治具を製作した。ガラス製のU字管に磁性流体を充填して、表面磁束密度3,600 Gaussの磁石をU字管を挟むように配置し、磁石の右側よりヒータによる加熱を行うことで、磁石の両端に約30度の温度勾配をつけて、U字管左右の磁性流体の水位の差を計測した。使用

した磁性流体はシグマハイケミカル社製のT-334(使用磁性体マンガン亜鉛フェライト・飽和磁化33mT・粘度190mPa・sec・比重1.51)で、その差分より、圧力を求めたところ約480Pa程度であった。市販されているスピーカー用磁性流体のAPG-810(使用磁性体マグネタイト・飽和磁化11mT・粘度180mPa・sec・比重1.2)で同様の計測をしたところ、約44Paの差圧しか計測できなかった。また、飽和磁化値は大きく異なるものの、温度による飽和磁化値の変化率が大きいT-334の方が断然有利であった。このU字管を水平にして両端をチューブで接続して、閉ループの流路を構成したとして、流量を試算したところ480Paの圧力では配管全長50cmの閉ループで毎秒0.03ccしか移動しないのであまり有用ではないようにも思えた。しかし、この簡易治具による計測での問題は、磁性流体がほとんど動かない状態にあり、伝導伝熱により温度勾配が発生しているのに、磁性流体が流動して動的な動きに伴う急峻な温度勾配とは異なる。したがって、この実験は磁性流体が静的な状態

にある性能として評価することとした。

#### 5 磁性対流でポンプを構成する考え方

磁性流体を流動させながら急峻な温度勾配を磁石の両端に付けることはできないが、磁石両端の内側に急峻な温度勾配をつくることは可能なので、伝導伝熱による熱入力と磁性対流の圧力による磁性流体の流入量のバランスが取れる点を磁場内に構成すれば、飽和磁化値の異なる磁性流体がより近傍に存在することになり、前記した静的な状態の性能とは大きく異なると考えた。この考え方に基づき図5に示すような原理モデルを製作し、磁性流体の動きをサーモグラフィーで観察しながら、試行錯誤を繰り返してポンプ構造を形成することの重要性を認識し実験を繰り返した。そのポンプ構造に必要な要件としては、①磁場内に急峻な温度差を有すること、②その温度差が恒常的に取れること、③流体の流れを阻害しないポンプ形状であること、④磁



この画像は図5に示した形態のマグネチックヒートポンプ受熱部に15Wの熱量を印加し、その熱量が画像左側のチューブより放熱部に搬送されている様子をサーモグラフィーで撮影したもの。

図6 サーモグラフィー

場による流路抵抗を最小限に止める磁気回路の構成、などの4項目であると想定した。これらの要素から最良の磁性ポンプ構造を導き出すのは容易なことではないが、継続は力なりと、繰り返し繰り返し磁性流体の動向を観察した。その結果、温度差と流量は比例関係にあるので、想定される最小の温度差=0°Cから最大温度差を50°Cと定めて、入力する熱量を増減して温度差を変化させると急峻な温度差が取れる点(以下、温度変化点とする)が移動することが確認できた。したがって、温度差0~50°Cまでの温度変化点の移動範囲を求めれば、その範囲をカバーする有効磁場を印加すればよいということになる。また、温度変化点は温度差と流量の比例関係の差分に依存している。このため、入力される熱量の最大値を決めれば、必要な磁場の範囲がおのずと定まり、効率のよいポンプ構造の設計が可能となると想定された。ここで、最も重要なポイントは磁性流体の流速と熱伝導の速度を知ることである。温度変化点では流速と熱伝導の速度が飽和している状態と考えられる

ので、流速を計測すればその流量と温度差により、単位時間あたりの熱伝達量を求めることができる。また、簡易的には入力される熱量と磁性流体の熱容量と、生じた温度差から熱伝達量を求めて流速を推定することも可能である。そして、それらのデータを基にしたシミュレーションと実測値との比較を行い、ポンプ形状と特性の変化などを知る必要がある。

## 6 マグネチックヒートポンプの誕生

2004年の秋に磁性ポンプ構造で熱を移送するマグネチックヒートポンプの原型が誕生したが、当初はなかなか理屈どおりに作動するものではなかった。その後、試作機の検証により得たデータから磁性ポンプ構造の改良を行ってきている。いまだに原理モデルの域を出ていないが、受熱部と放熱部とを接続するフッ素樹脂からなる3φの磁性流路で接続したモデルと、受熱部と放熱部を磁性流路と同じ長さの3φの

銅棒で接続したタイプのモデルとの比較から銅棒と磁性流路による熱伝達率を求めて、熱伝達率という視点から見ると銅の熱伝達率の2倍近くに達した。

図6はサーモグラフィーで撮影したマグネチックヒートポンプの作動状態であるが、磁性ポンプの温度差を計測しているポイントの温度はP01=33°C、P02=51°Cであり、温度差18°C程度で安定しており、流速の方が伝導伝熱よりも速い状態にあるが、入力する熱量を大きくすると温度変化点が図の上方向に移動して流速とのバランスが取れてくる。そして、温度差が大きくなると、流速は温度差に比例して速くなり、受熱部から放熱部への熱伝達率は向上する。また最大温度差を超えた場合、温度変化点が磁場の弱いところに達するように設計すると、過大な熱入力に対してはポンプの出力が低下して流速が遅くなるため、移送する熱量は大きく変化せずほぼ定量の熱移送を意図的に実現することが可能である。

実際にマグネチックヒートポンプが実用化されるのは2006年になってからと思われるが、当社の単独であった研究も2004年12月より東京大学との共同研究案件となり、同大学の中須賀真一教授からアドバイスをいただき、また、専門家による流体解析・磁場解析なども開始されたことから、研究開発期間の大幅な短縮を期待している。

本題と離れるが、磁場に置かれた磁性体は磁場の影響で磁化されて磁化方向が揃うため、熱力学的にいうとエントロピーが低くなった状態となり、熱的には吸熱方向に進む。この現象は磁気冷却装置などに応用されているが、磁性ポンプ自体に吸熱的な要素を加味して設計しても興味深いと考えている。

## 7 マグネチックヒートポンプの活躍する場面

たとえばノートパソコンの多くはCPUの放熱のため、ヒートパイプをほぼ水平に配置してその熱をよそに移動して放熱器で放出しているが、一般的なヒートパイプは水平かもしくは熱入力部が放熱部より下になるようにして使用しないと動作しない。ノートパソコンを膝の上に載せて使用すると単純に考えれば50%の確率で放熱器は動作していないと考えられる。マグネチックヒートポンプの場合は極端な場合を除いて正常に動作するので、ノートパソコンのCPUの熱移送手段として優れている。熱を移送する能力はヒートパイプを水平に使用した場合とほぼ同等もしくはそれ以上になる可能性が非常に高く、近い将来マグネチックヒートポンプを搭載したノートパソコンが出現するかもしれない。

また、最近の電子部品の小型化は著しく、表面積が小さくなり発熱量が増大してワット密度が非常に高くなっている。とくにデジタルカメラのフォーカス用モーターや光デバイスの熱移送などは形状も複雑であり、熱移送素子の設計的な柔軟性が求められるが、マグネチックヒートポンプの場合、そのような要求にも対応することができる。それはまず配管をフレキシブルにすることが可能であり、磁場を構成するた

めの磁石は微小な形状にも対応可能であるので、設計的な柔軟性を確保することができるからである。

## 8 一定の熱量を移送する必要性

恒常的な温度差を得るために入力側の熱量を定めることの必要性は冒頭に記載したが、ゼーベック効果<sup>※</sup>による発電・スターリングエンジンによる発電などでは熱伝導率より一義的に決まる熱抵抗を有しないため、入力された熱量により可変する抵抗成分により熱流量が決まり、放熱側の温度が変化して発電効率に影響を与えるため、一定量の熱入力をより必要としている。とくに温度が80°C以下の廃熱を再利用するには温度差を厳格に取る必要があり、効率を上げるためには入力される熱量を一定に保つ必要がある。このような一定熱量の移送は今後さらに多くの分野で必要とされる重要な技術でもある。マグネチックヒートポンプの構成と熱移送量との関係のシミュレーションや、一定熱量移送のための条件などの検証など課題は山積しているが、筆者は、電気などのエネルギーを使用せずに温度差で動作する一定熱量の移送を目的とした素子の開発を目指している。

## 9 未来に向けて

マグネチックヒートポンプは磁場強度に依存しているため、現時点で一般的に手に入るネオジムの3,600ガウス程度の磁石を利用している状況では、大きな熱量を輸送するだけの出力を得られない。しかし、強力な磁石の組み合わせによる磁気回路を構成すれば、磁性流体を熱移送と同時に蓄熱材として利用して、温度変化を検知して均熱化を自動的に行う廃熱を利用した暖房機器などを構成できる可能性がある。さらに熱源を地熱に求めて地熱の熱量を地上に移送することも可能となるかもしれない。とくに磁気冷却効果により、熱交換を行えばマグネチックヒートポンプのクーラーなども考えられる。しかし、このような技術を実現するには現在の熱力学的発想からの転換が必要であると感じている。筆者自身は独学ということもあり、特殊な目で熱をとらえているのかもしれないが、絶対零度の環境から見た場合に30°Cの熱量は膨大なエネルギー量に相当し、そのエネルギー量に対して有効磁場を作用させることで生じるエントロピーの変化量を計測してより有効に利用すれば、最終的には大きく省エネルギーおよび地球温暖化抑制につながると思っている。

謝辞：本稿の内容に関しては、東京大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻 中須賀真一教授に多大なご指導をいただいた。ここに記して謝意を表す。

### 【ゼーベック効果】

異種金属の接合部に温度勾配がある場合に生じる熱起電力効果で、その効果を利用した半導体で構成された熱起電力モジュール(ゼーベック素子)が知られている。



東 謙治 Kenji Higashi

株式会社ダ・ビンチ 代表取締役

略 歴：1974年和歌山県立向陽高等学校卒業。1989年株式会社ユックインターナショナル設立、代表取締役就任。1999年株式会社ダ・ビンチに名称変更、現在に至る。

専 門：熱構造設計

最先端の材料科学誌

月刊

# 未来材料

Expected Materials for the Future

研究・開発の成果から、信頼できる価値ある情報を毎月お届けします。

- 毎月10日発行 ■定 価： 3,990円（本体 3,800円+税5%）
- 年間講読 一 般： 44,100円（本体42,000円+税5%）  
アカデミックプライス： 31,500円（本体30,000円+税5%）  
（継続講読の場合：2年目 5,000円引き、3年目以降 10,000円引き）
- 発 行 (株)エヌ・ティー・エス 〒113-8755 東京都文京区湯島2-16-16  
Tel.03-3814-9151 Fax.03-3814-9152 <http://www.nts-book.co.jp/>