

異なる動作温度の磁気作業物質を直列配置した 磁気ヒートポンプ

宮崎 佳樹* 脇 耕一郎* 池田 和也*

Magnetic Heat Pump to Use Multi-layered Magnetic Materials

Yoshiki MIYAZAKI Koichiro WAKI

Kazuya IKEDA

Present air conditioner systems are based on traditional vapor compression technology. However, since the refrigerants are greenhouse gases, a lot of efforts have been made to reduce the use of the conventional refrigerant from the viewpoint of global warming. Magnetic heat pump (MHP) technology which has the potential for high efficiency without greenhouse gas emissions has attracted attention. The purpose of this study is to examine how to design a multi-layered active magnetic regenerator. Some experiments and, as a result the numerical analysis of the multi-layered AMR were carried out and the relationship among the number of the layered materials of the AMR, the difference of the Curie temperature and the AMR dimensions is presented in this paper.

キーワード：車両空調，省エネルギー，ノンフロン，磁気ヒートポンプ，AMR，ハルバツハ

1. はじめに

現在の冷房システムは代替フロン等を用いた蒸気圧縮式冷凍が主流である。しかし、地球温暖化防止の観点からも、代替フロンを使わない製品の開発や温室効果の低い物質への転換が求められている¹⁾。このような情勢の中、ノンフロンで高冷凍効率が期待できる磁気ヒートポンプ技術が注目されている。我々は鉄道車両空調のノンフロン・省エネルギー化の観点から、現行の蒸気圧縮式冷凍に変わり得る冷房技術として、磁気ヒートポンプ技術の開発を目指しており、大型冷凍・冷房装置への磁気ヒートポンプ技術の適用可能性を検証するため、これまでにkW級磁気ヒートポンプシステムを開発し、最大冷凍能力1.4kW、最大冷却温度差23°Cを得ている^{2) 3)}。

前報では、新たに熱損失を考慮したサイクルの数値計算を用いて磁気ヒートポンプにおける、特に磁気作業物質充填槽を中心とした熱損失の検討を行った。複数の熱損失を含めた検討を行うことで、磁気ヒートポンプシステムの特性を説明できることを報告した⁴⁾。

鉄道車両空調は、たとえば外気温35°C程度のときに車内温度を25～28°C程度に維持している。この場合、熱交換を考慮すると、空調に用いられる冷凍機の高温度端と低温端の温度差は20～30°C以上が必要と考えられる。一方、磁気ヒートポンプで生成できる温度差は、単一の材料を用いた場合には無負荷の場合で15～20°C程度であり、熱負荷を加えると生成温度差は減少する。磁気ヒートポン

プを空調へ適用するためには、生成温度差の拡大が必須である。磁気ヒートポンプの生成温度差を拡大する手法としては、異なる動作温度を持つ複数の材料を組み合わせ、直列配置（積層）する方法がある。そこで今回、異なる動作温度を有するガドリニウム（Gd）系磁気作業物質を組み合わせた磁気ヒートポンプの基礎試験を行い、得られた特性について解析と比較検証を行ったので報告する。

2. 磁気ヒートポンプサイクル

磁気ヒートポンプは、ある種の磁性体に磁場変化を与えた場合に、磁性体内部でエントロピー変化と断熱温度変化が生じる「磁気熱量効果」を利用した新しいヒートポンプである⁵⁾。気体冷凍では冷媒となるガスを作業物質、作業流体などと呼ぶが、磁気ヒートポンプに用いられる磁気熱量効果の顕著な磁性体は磁気的な作業物質ということで「磁気作業物質」と呼ばれる。

室温域においては、磁気作業物質の熱容量が大きくなるため、磁気熱量効果によって生じる断熱温度変化が小さくなる。比較的小さな磁場でも大きな冷却温度を得るために考えられたのが、蓄熱および再生サイクルを用いたAMR（Active Magnetic Regenerator）と呼ばれる冷凍方式である⁶⁾。AMRでは磁気作業物質である磁性体を蓄熱器および再生器として用い、磁気熱量効果による磁気作業物質の温度変化を蓄積させ大きな冷却温度差を得るもので、現在室温磁気ヒートポンプを構成するために最も有効な方法とされており、本研究においても

* 浮上式鉄道技術研究部 低温システム研究室

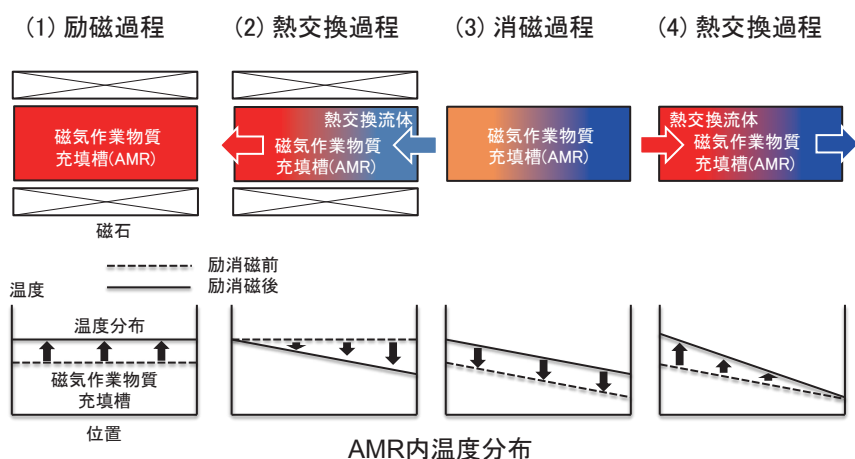


図1 AMRの動作原理

AMRを用いた冷凍サイクルを採用している。磁気熱量効果とAMRについて、図1, 2を用いて説明する。図1の磁気作業物質充填槽には、磁気作業物質の空間的な温度プロファイルが示してある。

図1(1)：磁石によって磁気作業物質充填槽内の磁気作業物質を断熱的に励磁すると、磁気熱量効果により磁気作業物質の温度が一樣に上昇し、室温より高温となる。温度プロファイルは点線が励磁前、実線が励磁後を示す。図1(2)：そのあと室温の熱交換流体（たとえば水）と熱交換することにより、磁気作業物質充填槽に温度勾配が生じる。

図1(3)：この状態で断熱的に消磁を行うと、磁気作業物質の温度は勾配を保ったまま全体的に低下する。

図1(4)：最後に高温側の熱交換流体と熱交換することにより、さらに温度勾配が拡大する。

(1)～(4)の過程を1サイクルとして、このサイクルを繰り返すことにより、AMRはその両端に大きな温度差を生成することができる。図2は、この過程を数値計算でシミュレートしたものである。図にはAMRの両端温度が示されており、(1)～(4)の過程を繰り返すことにより、AMRの両端温度差が拡大していく様子がわかる。

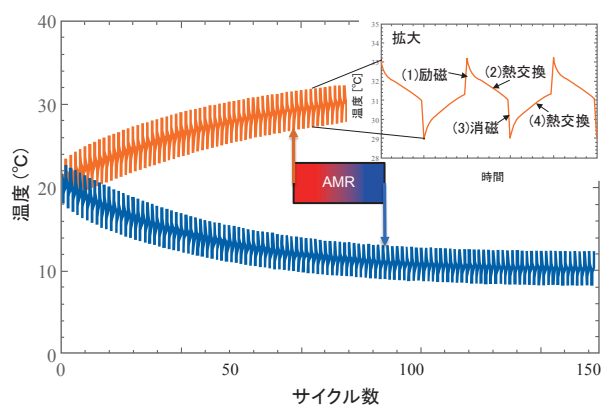


図2 AMR温度プロファイルの例（数値計算）

3. 基礎試験装置を用いた積層AMRの評価

3.1 基礎試験装置

室温磁気ヒートポンプサイクルに用いられるAMRの評価を行うための基礎試験装置の概略図を図3、装置の全体写真を図4に示す。本装置は、永久磁石が回転することにより固定されたAMRを励消磁することができる。永久磁石は内径104 mm、外径154 mm、一方向に磁界を集中できるハルバツハ配列を用いた2極磁石で、表面磁束密度は1.0 Tである⁷⁾。ディスプレイサをAMRの励消磁に合わせて動かすことで、AMR内の磁気作業物質と熱交換流体（水）を熱交換させることがで

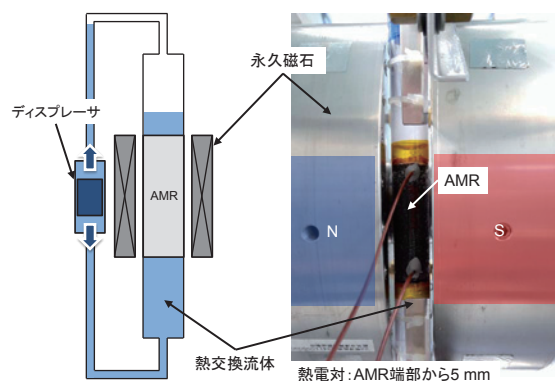


図3 AMR評価用基礎試験装置

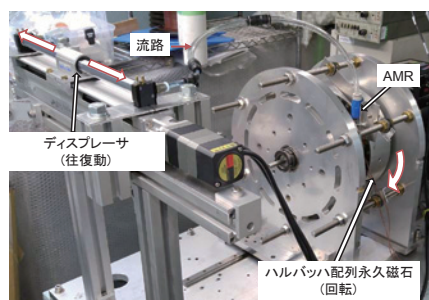


図4 AMR評価用基礎試験装置外観

きる。AMR 端部に続く配管部では、AMR で磁気作業物質と熱交換した流体の出入りがあるが、この部分で流体の攪拌が発生すると、AMR の温度勾配に大きな影響を及ぼすことが指摘されている⁸⁾。このような配管部はデッドボリュームと呼ばれ、攪拌による損失を混合損失と呼ぶ。著者らは前報で、混合損失を含めた熱損失の定量評価および低減手法を提案している⁴⁾。今回は図3のようにAMRを縦置きに配置した。このようにすれば、ディスプレイサ下部からAMR下部につながる部分の流体のみを駆動してAMRと流体を熱交換することができ、AMR上部のデッドボリュームを最小化できる。AMR上部のデッドボリュームは15mm程度、下部は60mm程度である。

AMR 容器はアクリル製で内径15mm、外径20mm、磁気作業物質充填長さは60mmである。生成温度差は、AMR 両端部に熱電対を挿入して評価した。以下、温度の単位については、摂氏温度を℃、温度差をKと表記する。

3.2 磁気作業物質

磁気作業物質にはベンチマーク材料としてよく用いられているGdを採用した。Gdの磁気転移温度であるキュリー温度は20℃付近にある^{9) 10) 11)}。Gdにイットリウム(Y)を1.5wt%添加することで、キュリー温度を15℃付近に調整することができる。図5にGd、 $Gd_{98.5}Y_{1.5}$ の磁気エントロピー変化(2T印加時)の環境温度依存性を示す。磁気エントロピー変化、すなわち磁気作業物質の吸発熱能力はキュリー温度近傍で最大値を持つことがわかる。例えばGdを充填したAMRは、20℃を中心として図2のように動作することになる。このように、磁気ヒートポンプは用いる磁気作業物質によって動作温度領域が決まることが特徴である。同様にGdにYを3wt%添加することで、キュリー温度を10℃程度に調整することができる。このような異なる動作温度の磁気作業物質を直列配置したAMRの特性を調べるために、2層積層として、Gd/ $Gd_{98.5}Y_{1.5}$ 、Gd/ $Gd_{97.0}Y_{3.0}$ (いずれも1:1の比率で充填)を用意し、Gd単層AMRと生成温度の環境温度依存性を比較した。図6に単層、図7に2層積層AMRの写真を示す。ひとつのAMRに充填する磁気作業物質の総量は52.9g、充填率は63%程度とした。磁気作業物質はいずれも粒子状のもので、平均粒径は0.6-0.85mm程度である。

3.3 試験結果

基礎試験装置を用いて、図1に示したAMR動作試験を実施した。磁気作業物質と熱交換流体の熱交換時間は0.1sec一定とし、熱交換流体の移動速度と移動距離で決まる熱交換流体流量は0.54 liter/minとした。

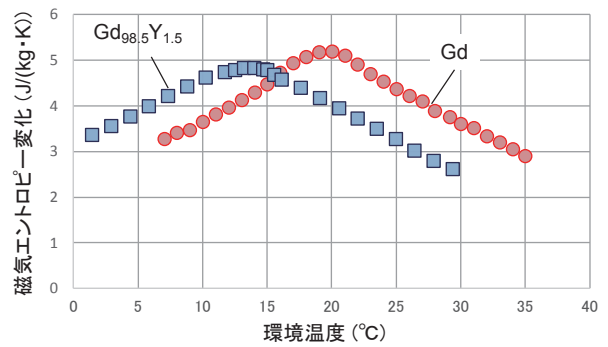


図5 磁気作業物質の磁気エントロピー変化(2T)

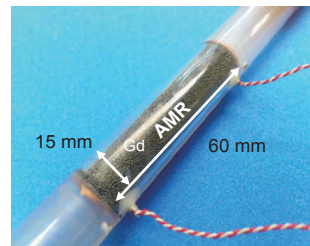


図6 単層AMR

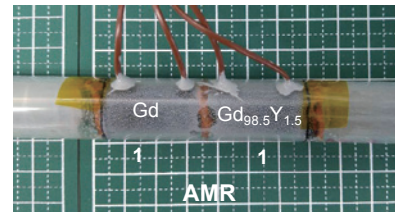


図7 積層AMR(2層)

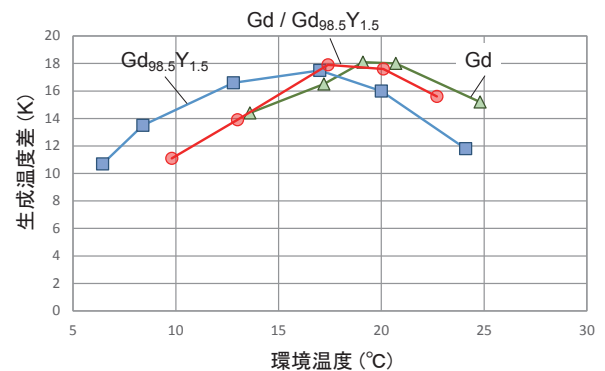


図8 Gd / $Gd_{98.5}Y_{1.5}$ を積層した場合の生成温度差

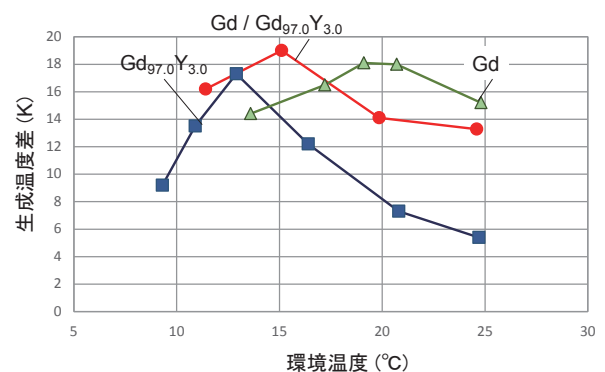


図9 Gd / $Gd_{97.0}Y_{3.0}$ を積層した場合の生成温度差

特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

図8, 9に、環境温度を変えた場合の単層 AMR と積層 AMR の生成温度差を示す。図8は、キュリー温度間隔を 5 K 程度とした Gd, Gd_{98.5}Y_{1.5}, Gd / Gd_{98.5}Y_{1.5} の生成温度差, 図9はキュリー温度間隔を 10 K 程度とした Gd, Gd_{97.0}Y_{3.0}, Gd / Gd_{97.0}Y_{3.0} の生成温度差を示している。図8, 9のいずれの結果からも、単層 AMR の生成温度差がキュリー温度近傍で最大値をとることがわかる。これは、磁気エントロピー変化がキュリー温度近傍で最大となることに対応している。積層 AMR の生成温度差については、単層 AMR の中間温度を補完するように動作しているが、各単層 AMR が最大値を持つ温度領域では逆に生成温度差が小さくなる傾向が見られる。このような傾向はキュリー温度間隔を 10 K とした図9のほうがより顕著となっている。

以上のことから、異なる動作温度を持つ磁気作業物質を積層した場合には、生成温度差が拡大する運転温度域は各単層 AMR の中間になることがわかった。しかし、積層 AMR による生成温度差は、各単層 AMR の生成温度差に比べ有意差がないという結果となった。

4. 数値解析

4.1 解析条件

数値計算は磁気作業物質、熱交換流体の熱バランスに関する偏微分方程式を差分化して行った。また、侵入熱項を導入し、AMR 部とデッドボリューム部への侵入熱を考慮した^{4) 12) 13)}。境界条件はデッドボリューム端部で断熱条件とした。これは測定された温度分布からも妥当な条件であることを確認している。熱侵入項は、環境温度、AMR 表面温度、AMR 内部温度の測定結果から AMR 部、AMR 両端部の熱通過率を見積り、数値計算に反映した。数値計算では AMR 両端部まで計算領域としているが、一次元流れのため混合損失は含んでいない。

磁気作業物質は実験で用いた Gd 系材料を想定し、それぞれの断熱温度変化がキュリー温度近傍となるような断熱温度変化の環境温度依存性を、フィッティング関数を用いて取り入れた(図10)。そのほか、消磁、励磁中では比熱が変化することなどを考慮した¹⁴⁾。AMR 直径、長さおよび AMR に接続するデッドボリューム長さなどは試験条件を元に設定した。磁気作業物質と熱交換流体の熱交換時間は実験条件と同じ 0.1 sec 一定とし、熱交換流体の移動速度と移動距離で決まる熱交換流体流量は 0.54 liter/min とした。

4.2 解析結果と実験結果の比較

図11に、Gd, Gd_{97.0}Y_{3.0} の物性を模擬した単層 AMR, Gd / Gd_{97.0}Y_{3.0} の物性を模擬した積層 AMR の環境温度依存性を示す。①単層 AMR がキュリー温度近傍で最大

温度差となること、②積層 AMR が単層 AMR の中間温度を補完するように動作すること、③各単層 AMR が最大値を持つ温度領域では生成温度差が小さくなる傾向が見られることなど、実験の傾向とよく一致しているといえる。実験結果よりもやや大きな生成温度差になっているのは、AMR 外の流体における混合損失などが1次元解析には含まれないためと考えられる。

実験結果と同様に、数値解析においても動作温度の異なる材料の積層による生成温度の優位性は得られなかった。この要因として、次のことが考えられる。

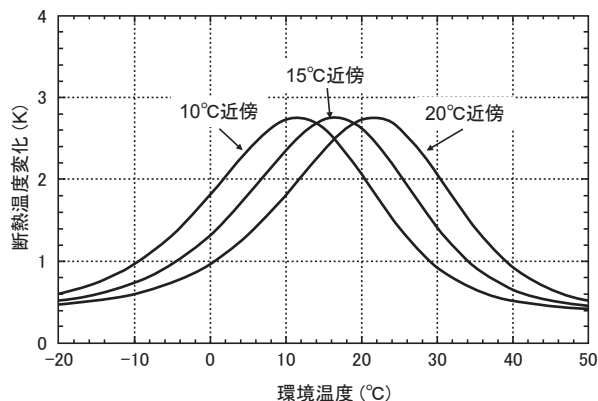


図10 数値計算に用いた断熱温度変化の環境温度依存性

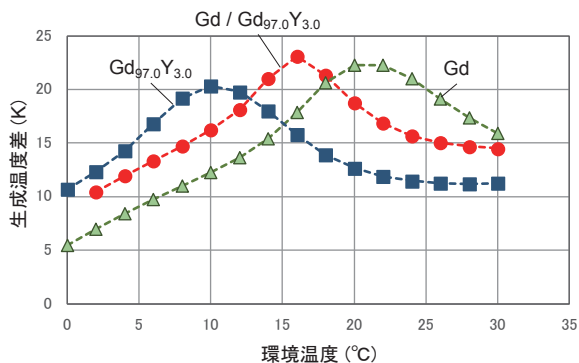


図11 2層 AMR の生成温度差 (数値解析)

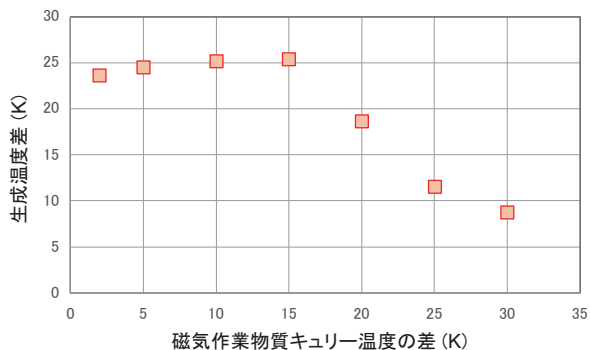


図12 2種類の積層におけるキュリー温度の差

①積層した磁気作業物質のキュリー温度間隔が適切でないため、うまく温度勾配が生成されていない。

② AMR の積層数を増やすごとに、ひとつの材料の充填量が減少し、充填長さが短くなるため、十分な吸発熱効果が得られていない。

これらを検証するため、キュリー温度間隔と生成温度差、充填長さとの生成温度差を、単層、積層 AMR について計算した。単層、積層 AMR の特性をみるため、計算は熱損失のない条件で行った。

4.3 2種類の積層におけるキュリー温度間隔

積層 AMR の最適動作点を調べるため、磁気作業物質のキュリー温度間隔を 2 ~ 30 K に変更した場合に得られる生成温度差を計算した。

図 12 に、2 層 AMR のキュリー温度の間隔を変更した場合の、生成温度差の最大値を示す。キュリー温度の間隔が 15 K の場合に最大値となるが、5 ~ 10 K までは大きな変化はない。一方で 15 K 以上離すと、生成温度差は急激に減少傾向となる。これはそれぞれの材料の動作温度領域が離れすぎることにより、中間温度をカバーできなくなるためと考えられる。今回積層 AMR に用いた材料のキュリー温度間隔は 5 K, 10 K であり、大きな温度差が得られていないのはキュリー温度間隔の問題ではないことがわかる。

4.4 積層数と AMR 長さ

積層数と AMR 長さの関係を見るため、AMR の長さを変えた場合の生成温度差を計算した。AMR の動作開始温度（基準温度とする）を 15℃とし、2 種類の AMR 積層については、キュリー温度を 22.5℃, 7.5℃（キュリー温度の差を 15 K）とした。3 種類の AMR 積層では、キュリー温度間隔を 7.5 K 刻みとし、22.5℃, 15℃, 7.5℃と 2 層 AMR の中間温度に追加配置することとした。AMR 長さは、たとえば 60 mm の場合、1 種類ならひとつの材料の充填長さが 60 mm となる。2 種類ではそれぞれ 30 mm, 3 種類ではそれぞれ 20 mm ずつ充填されている。

図 13 に数値解析結果を示す。実験条件である 60 mm 程度の AMR 長さでは、積層の有意差が明瞭ではない。AMR 長さが 100 mm 以上の領域では、積層数を増やすと生成温度差が拡大することがわかる。AMR 長さとの生成温度差については、特徴的な以下の 3 つの領域が存在する。

・AMR 長さが短い領域

AMR 長さが短い領域は、それぞれの材料の充填量が少なく、材料の温度勾配を維持できないために、生成温度差が拡大しない領域となっていると考えられる。この領域では、1~3 層 AMR の生成温度差は大差なく、

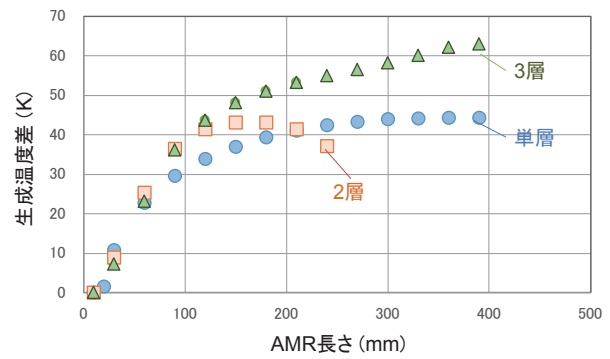


図 13 磁気作業物質積層数と AMR 長さの計算結果

AMR の積層効果が得られないことがわかる。今回用いた実験条件はこの領域に入っていた可能性が高い。

・2層 AMR の生成温度差が減少する領域

ある程度の AMR 長さがあれば、単層、2 層、3 層の生成温度差の有意差が現れてくるが、2 層 AMR は他の AMR と異なり、途中で生成温度差が減少傾向に転じる。単層、3 層との違いは、AMR の中心動作温度となる基準温度（この場合 15℃付近）をカバーする材料が充填されていないことである。そのため、AMR 長さが長くなるほど基準温度付近をカバーできない領域が長くなるため、生成温度差が減少していくものと考えられる。このことは、キュリー温度間隔は AMR 長さを考慮して設定する必要があることを示唆している。

・AMR 長さが十分ある領域

AMR 長さが十分にある領域では、3 層 AMR の生成温度差の優位性が顕著になる。一方、単層 AMR の生成温度差は飽和傾向を迎えている。これは単層 AMR でカバーできる温度領域の限界に近づいているためと考えられ、この領域では積層 AMR が有利であるといえる。

5. まとめ

鉄道空調に必要な生成温度差を得るため、異なる動作温度を有する Gd 系磁気作業物質を組み合わせた磁気ヒートポンプの基礎試験を行い、得られる特性について数値解析と比較検証を行った。得られた実験結果は次のようなものであった。

- 単層 AMR はキュリー温度を中心とする運転温度領域を持つ。
- 積層 AMR の生成温度の最大値は、単層 AMR の動作温度領域の中間を補完する形になる。

一方で、実験結果からは積層 AMR による生成温度差の単層 AMR に対する優位性は得られなかった。そこで単層、積層 AMR の動作温度について特性を把握するた

特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

め、実験条件を考慮した数値計算を実施した結果、次のようなことがわかった。

- 積層 AMR の生成温度差が優位性を持つには、ある程度の AMR 長さが必要である。一方、単層 AMR はある長さ以上にしても、生成温度差が飽和傾向を示すことから、積層 AMR はこの長さ以上で設計すべきである。
- 基準温度にキュリー温度を持つ材料を配置していない 2 層 AMR では、他の AMR と異なり途中で生成温度差が減少傾向に転じる特性を持つ。積層 AMR は基準動作温度をカバーするよう設計するのが良い。
- キュリー温度間隔は AMR 長さを考慮して設定する必要がある。

実際には AMR 長さを実験条件と同じ断面積で 200 ~ 300 mm にすると熱交換媒体を流す際の圧損が大きくなり効率が低下するため、適切な断面積と長さを検討する必要がある。

以上のことから、積層 AMR の特性を十分に引き出すには、単に積層数を増やすだけでなく、AMR 形状を合わせて設計する必要があることがわかった。今回実験に用いた磁気作業物質は動作温度域が 10 ~ 20°C であったが、数値解析により得られた積層 AMR の特性を考慮することで、鉄道車両空調に必要な動作温度域ならびに生成温度差を十分カバーできるような AMR を設計できる指針が得られたと考える。今後は冷凍能力についても検討を進め、熱損失低減手法を組み合わせ、鉄道車両空調に適用可能な磁気ヒートポンプシステムを提案したい。

謝辞

本研究を進めるにあたり、神戸大学 川南剛先生にご協力を頂いた。また、材料の磁気エントロピー変化のデータ提供を、株式会社 三徳 高田裕章氏から頂いた。ここに記して謝意を表します。

文献

- 1) たとえば経済産業省ホームページ
http://www.meti.go.jp/policy/chemical_management/ozone/law_furon_outline.html

(参照日：2016 年 12 月 9 日)

- 2) 宮崎佳樹, 脇耕一郎, 水野克俊, 池田和也: 車両空調向け磁気ヒートポンプシステムの冷凍能力向上, 鉄道総研報告, Vol. 28, No. 9, pp. 35-40, 2014
- 3) 宮崎佳樹, 池田和也, 長谷川均, 平野直樹, 野口芳直, 岡村哲至, 裏相哲, 川南剛: 1 kW 級室温磁気ヒートポンプの開発, 低温工学, Vol. 50, No. 2, pp. 80-87, 2015
- 4) 宮崎佳樹, 脇耕一郎, 池田和也: 車両空調向け磁気ヒートポンプシステムの熱損失評価, 鉄道総研報告, Vol. 29, No. 11, pp. 29-34, 2015
- 5) 大塚泰一郎, 橋本巍洲: 磁気冷凍, 未踏加工技術協会, pp.63-65, 1984
- 6) Barclay, J. A., Steyert, W. A., "Active Magnetic Regenerator," US patent, 4,332,135, 1981.
- 7) 脇耕一郎, 長嶋賢, 荒井有気, 水野克俊, 伊藤孝治, 秋山慎一, 池田雅史, 村上雅人: 磁気冷凍装置, 特開 2011-226735, 2011
- 8) P. Nikkola, C. Mahmed, M. Balli, O. Sari, IIF-IIR International Conference on Magnetic Refrigeration at Room Temperature, pp. 549-556, 2012.
- 9) S. Yu, Dan' kov, A. M. Tishin et al, "Magnetic phase transitions and the magnetothermal properties of gadolinium," *PHYSICAL REVIEW B*, Vol.57, No.6, pp. 3478-3490, 1998.
- 10) R. Grossinger, M. Haas, R Sato Turtelli, Fourth IIF-IIR International Conference on Magnetic Refrigeration at Room Temperature Baotou, China, 23-28 August 2010, pp. 15-29.
- 11) J. A. Lozano, K. Engelbrecht, C. R. H. Bahl, K. K. Nielsen, J. R. Barbosa Jr. A. T. Prata, N. Pryds, Fifth IIF-IIR International Conference on Magnetic Refrigeration at Room Temperature Thermag V, Grenoble, France, 17-20 September 2012, pp. 373-379.
- 12) 宮崎佳樹, 池田和也, 脇耕一郎, 川南剛, 岡村哲至, 平野直樹, 裏相哲, 車両空調を目指した磁気ヒートポンプシステムの熱損失評価, 第 91 回 2015 年度春季低温工学・超電導学会講演概要集, p193
- 13) 宮崎佳樹, 池田和也, 脇耕一郎, 川南剛, 車両空調を目指した磁気ヒートポンプの損失評価, 第 92 回 2015 年度秋季低温工学・超電導学会講演概要集, p238
- 14) 宮崎佳樹, 池田和也, 脇耕一郎, 複数の磁気作業物質を用いた場合の磁気ヒートポンプの特性, 第 93 回 2016 年度春季低温工学・超電導学会講演概要集, p47