

新規磁気作業物質を用いた磁気冷凍機の特性

宮崎 佳樹* 脇 耕一郎* 荒井 有気*
水野 克俊* 吉澤 佳祐* 長嶋 賢**

Characteristic of a Magnetocaloric Refrigerator with New Magnetocaloric Materials

Yoshiki MIYAZAKI Koichiro WAKI Yuuki ARAI

Katsutoshi MIZUNO Keisuke YOSHIZAWA Ken NAGASHIMA

The aim of this study is a practical use of a cooling technology by a magnetocaloric effect for air conditioners of railway vehicles in order to save energy. New magnetocaloric materials which have larger magnetocaloric effect compared with Gd have been developed in the region of room temperature. Nevertheless, it has not been discussed so much how the new materials affect properties of a magnetocaloric cooler system. Therefore, characteristics of the cooling system with Gd and La ($\text{Fe}_{0.84}\text{Co}_{0.06}\text{Si}_{0.10}$)₁₃ have been studied experimentally and analytically.

キーワード：車両空調，省エネルギー，磁気冷凍，Gd，LaFeCoSi，冷凍能力

1. はじめに

現在の冷房システムの主流は代替フロン等を用いた蒸気圧縮式冷凍である。特定フロンは、オゾン層保護の観点からモントリオール議定書により、生産の段階的な廃止が義務付けられている。温室効果ガスである代替フロン等についても京都議定書において排出削減対象ガスに指定され、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⁾。

一方で、昨今の電力事情や環境問題から、省エネルギーなどの環境負荷低減に対する要求は一段と厳しくなっており、より環境影響の少ない空調システムの研究・開発が進められている。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冷凍が注目されている。

本研究では、鉄道車両空調の省エネルギー化の観点から、現行の蒸気圧縮式冷凍に代わり得る冷房技術として、磁気熱量効果を用いた kW 級、成績係数 (COP) 6 以上の磁気冷凍技術の開発を目指している。

磁気冷凍とは、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が生じる「磁気熱量効果」を利用して冷凍作用を生じさせる冷凍方式である²⁾。気体冷凍では、断熱圧縮され排熱した作業流体は、断熱膨張過程で寒冷状態を生成する。低温となった作業流体はエントロピーを増加させながら吸熱をし、冷凍能

力を発現する。一方、磁気冷凍で断熱圧縮に対応するのは断熱励磁であり、この過程で磁気系の温度は上昇する。断熱膨張に対応するのは断熱消磁であり、この過程で磁気系の温度が降下する。磁気冷凍システムでは、この磁気熱量効果による磁性体自身に生じる温度低下を効率よく外部へ取り出すことで冷凍を行なう。

磁気冷凍において、現行の圧縮膨張冷凍サイクルにおける「作動ガス」の役割を担うのは、「磁気作業物質」と呼ばれる磁性体である。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磁気系の温度変化に対し、外部に取り出し冷凍に利用することができる温度変化が小さくなる。従って、実際の冷凍に必要な低温を得るには、より強い磁場を加えることで、磁気熱量効果による磁性体の温度変化を大きくすることが必要である。

また、磁気作業物質の動作点は、その物質のキュリー点付近の温度に限られるため、空調に要求される動作温度を得るためには、動作温度の異なる磁気作業物質を複数組み合わせる方法が提案されている。しかし、磁気作業物質の材料特性が磁気冷凍のシステム特性にどのような影響を与えるかについての検討はまだ少ない。

そこで本稿では、室温領域の磁気冷凍の評価に多く用いられてきた Gd と、新規磁気作業物質である La ($\text{Fe}_{0.84}\text{Co}_{0.06}\text{Si}_{0.10}$)₁₃ (以下、LaFeCoSi と称する) を磁気冷凍装置に搭載し、冷凍能力、消費動力について測定を行い、得られた結果について両者を比較した内容について報告する。

* 浮上式鉄道技術研究部 低温システム研究室

** 浮上式鉄道技術研究部

2. 冷凍能力評価試験

2.1 磁気作業物質の磁気エントロピー変化

GdおよびLaFeCoSiは、それぞれ293K、281Kにキュリー点を持つ2次相転移材料である。磁気作業物質として重要な物性は、磁気エントロピー変化、比熱および断熱温度変化である。以下にGdとLaFeCoSiについてこれらの物性を比較する。なお、Gdの物性は多くの研究によって調べられており、本稿では文献3)のデータを参照した。LaFeCoSiについては磁化測定から磁気エントロピー変化を求めた。

図1にGdおよびLaFeCoSiの磁気エントロピー変化 ΔS_M の温度依存性(2T印加時)を示す。Gdの磁気エントロピー変化はキュリー点である $T_C = 293K$ 付近にピークを持ち、その値は最大 $|\Delta S_M| = 5J/(kg K)$ となること

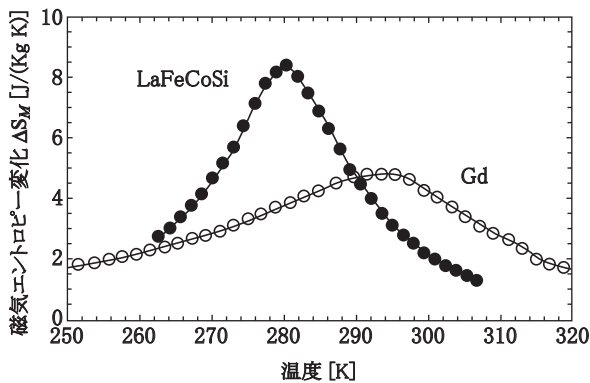


図1 GdとLaFeCoSiの磁気エントロピー変化(0-2T)

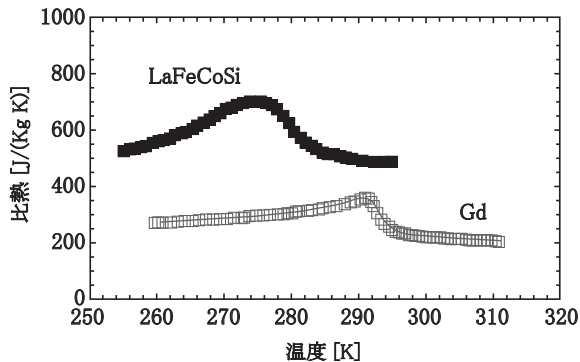


図2 GdとLaFeCoSiの比熱(0-2T)

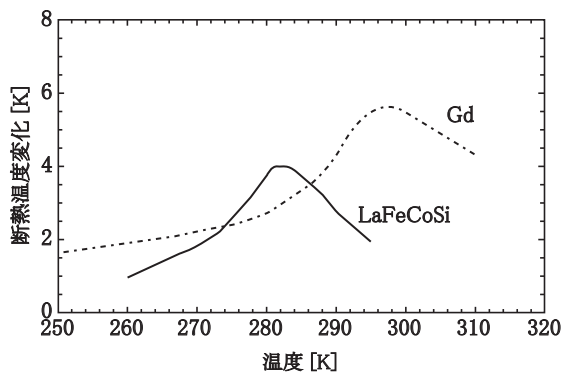


図3 GdとLaFeCoSiの断熱温度変化の算出値(0-2T)

分かります。一方LaFeCoSiは、 T_C において $|\Delta S_M| = 8J/(kg K)$ を超える大きな磁気エントロピー変化が観測された。

2.2 磁気作業物質の比熱および断熱温度変化

GdとLaFeCoSiの比熱をそれぞれ図2に示す。LaFeCoSiは、Gdと比較して比熱も大きいことがわかる。

断熱条件のもとで磁気作業物質に磁場を印加した際の、磁気作業物質の温度変化を断熱温度変化 ΔT_{ad} と呼ぶ。比熱の測定により材料のエントロピー変化がどれくらいの温度変化に対応するのか知ることができる。 ΔT_{ad} は以下の近似式を用いて算出した。

$$\Delta T_{ad} = -\frac{\Delta S_M T}{c} \quad (1)$$

c : 比熱, T : 測定温度

Gdの断熱温度変化および式(1)を用いて求めたLaFeCoSiの断熱温度変化を図3に示す。LaFeCoSiの断熱温度変化は、Gdと比較して小さい値となっており、一定磁場を印加した際に得られる温度変化が小さいことを示す。これは(1)式からわかるように、LaFeCoSiの比熱がGdよりも大きいことによる。

2.3 冷凍サイクル

室温域においては、磁性体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磁気系の温度変化に対し、外部に取り出し冷凍に利用することができる温度変化が小さくなる。従って、実際の冷凍に必要な低温を得るには、より強い磁場を加えることで、磁気熱量効果による磁性体の温度変化を大きくすることが必要である。一方、永久磁石を用い、超電導磁石の数分の一という小さな磁場で大きな冷却温度を得るために考えられたのが、1981年にBarclayら⁴⁾によって提案された、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。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スパンを得るもので、現在室温磁気冷凍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AMRを用いた冷凍サイクルを採用している。AMRの動作原理を図4に示す。図4(a)において、磁気作業物質は断熱的に励磁され、温度が上昇する。そのあと、(b)の過程で低温の熱交換媒体(たとえば水)と熱交換することにより、温度勾配が生じる。この状態で(c)のように断熱消磁を行うと、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。最後に(d)の過程で高温側の熱交換媒体と熱交換することにより、さらに温度勾配が拡大する。

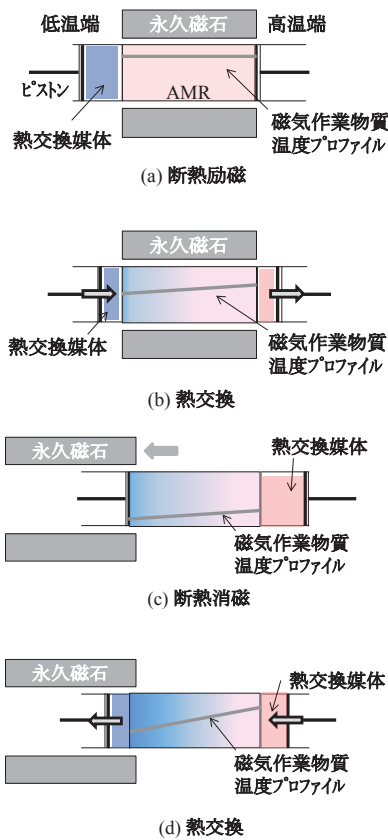


図4 AMR サイクルの原理

AMR システムでは、磁気熱量効果により生じる温度変化を磁性体自身に蓄熱し、熱交換媒体により効率よく外部へ取り出すことで冷凍を行なう。AMR サイクルに用いる磁気作業物質充填槽を AMR ダクトと称する。

2.4 磁気冷凍試験装置

磁気作業物質に Gd, LaFeCoSi を用いた場合の冷凍能力評価試験には、円環状ハルバツハ配列磁気回路を用いた室温磁気冷凍試験装置^{5) 6)}を用いた。磁気作業物質を充填する AMR ダクトは 12 組あり、図 5 に示すように全体でディスク形状を有する構造となっている。

図 6 に円環状ハルバツハ配列磁石を用いた磁気冷凍システムのフロー図を示す。ハルバツハ配列させた永久磁石は、軸方向に N 極と S 極を配置した主磁極磁石と、この主磁極磁石の周方向に着磁された補助磁石を備え、全体で円筒状をなしている。磁石配列をハルバツハ配列とすることで、特定の方向の磁場（この場合主磁極）を強めることができるため、効率的に磁気作業物質を励消磁することができる。2つのハルバツハ配列永久磁石は磁気作業物質を充填したディスクを挟むように対向させて配置され、回転しながら特定の AMR ダクトに磁場を印加する。図 5 の励磁および消磁ダクトは、磁石の回転がちょうど図 6 の位置の場合について示している。

熱交換媒体となる流体は初期温度 $T = T_m$ でポンプか

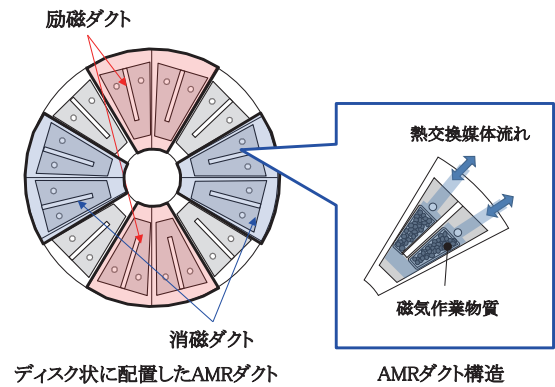


図5 ディスク形状を有する AMR ダクト

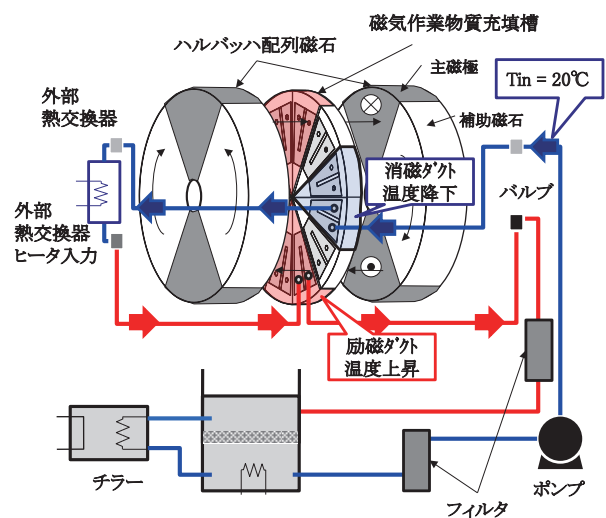


図6 ハルバツハ磁気回路を用いた磁気冷凍システム

ら消磁中の AMR ダクトへ移送され、熱交換を行うことで温度が降下する。熱交換により温度が低下した流体は、所定のヒーター熱負荷を与えられ、 $T = T_{out}$ となった後、励磁中の AMR ダクトへ移送される。そこで磁気作業物質の熱を奪ったあとは、チラーにより初期温度 $T = T_m$ に調整され、再びポンプにて消磁中の AMR ダクトへ移送される。各 AMR ダクトで上記の熱交換サイクルが実現できるよう、磁石の回転に合わせてロータリーバルブを切り替える。磁気冷凍試験装置の諸元を表 1 に示す。

表1 磁気冷凍試験装置の諸元

磁気作業物質	Gd, LaFeCoSi
磁気作業物質形状	ϕ 0.6 mm 球形状
磁気作業物質充填量	0.75 kg
AMR ダクト数	12
ダクト寸法	20 mm × 10 mm × 76 mm
熱交換媒体流量	～ 5 liter/min
磁石回転数	～ 60 min ⁻¹
永久磁石	ネオジム系磁石
磁束密度	ダクト表面 1.1 T

3. 冷凍能力評価試験結果

3.1 冷凍能力の比較

熱交換媒体の供給温度 $T = T_m$ を Gd の場合には 20°C 、LaFeCoSi では 8°C と、それぞれキュリー点近傍に設定し、所定の温度スパン $T_m - T_{out}$ が得られたときの、冷却部のヒーター電力を冷凍能力とした。本稿では、Gd と LaFeCoSi という材料の違いによるシステム特性を評価するため、温度スパン 0 K の条件における冷凍能力を評価した。

Gd, LaFeCoSi を搭載したときの冷凍能力の熱交換媒体流量依存性について、それぞれ図 7, 8 に示す。磁石の回転数が 10min^{-1} , 40min^{-1} のときには、AMR ダクトで熱交換する熱交換媒体の流量を増加するのに伴い冷凍能力が大きくなる傾向であるが、Gd の 5min^{-1} では流量に対して冷凍能力にピークが認められる。AMR ダクトを流動する熱交換媒体の流量が大きいほど磁気熱量効果によって作業物質に生じた吸発熱を多く輸送できるため、ある流量までは冷凍能力が増加するが、充填した磁気作業物質の吸発熱を吸収してなお流量を増やせば、熱

交換媒体の温度変化が小さくなるため、冷凍能力は低下するものと考えられる。

LaFeCoSi については、磁石の回転数が $5, 10, 40\text{min}^{-1}$ のいずれの場合にも $5\text{liter}/\text{min}$ の流量の範囲においては冷凍能力が増加傾向を示している。Gd の結果と比較すると、 5min^{-1} , 10min^{-1} のときの冷凍能力は大きい、 40min^{-1} では逆に Gd に比べて小さい。また、回転数を増加した際の冷凍能力の増加も、Gd に比べて小さいことが分かる。

Gd と LaFeCoSi の冷凍能力の結果は、両者の比熱を考えることで整理できる。LaFeCoSi の比熱は、Gd に比べて大きい、 $5\text{liter}/\text{min}$ の流量範囲では磁気作業物質の吸発熱を熱交換媒体が吸収していないと考えられる。また、本試験装置では、磁石の回転数に合わせてロータリーバルブが同期しており、回転数を増加させれば熱交換時間が短縮される。LaFeCoSi に対しては流量が不足している領域で熱交換時間が短くなると、さらに熱交換が不足する。そのため、回転数を増加してもその効果が相殺されてしまっていると考えられる。

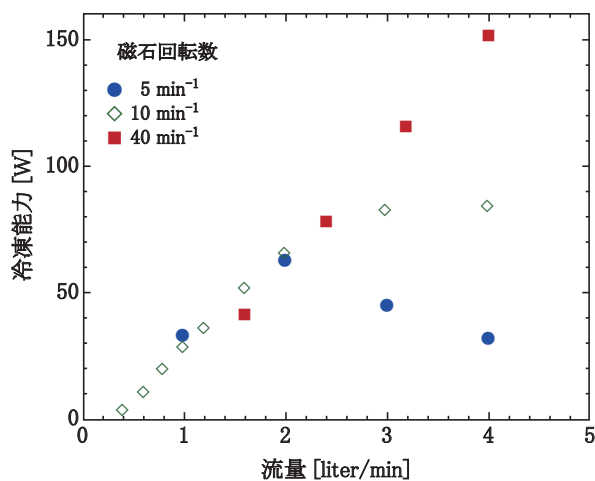


図 7 Gd 搭載時の冷凍能力の流量依存性

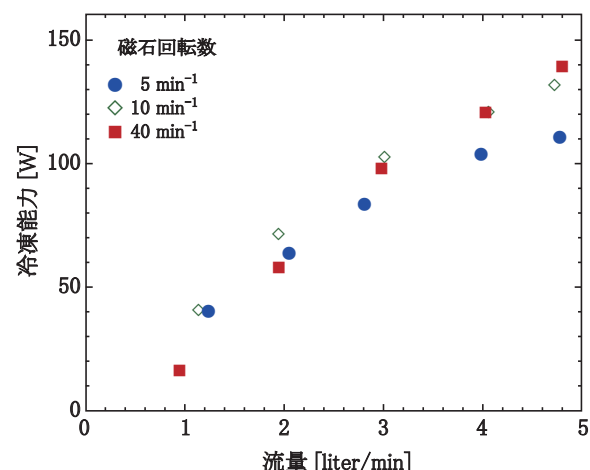


図 8 LaFeCoSi 搭載時の冷凍能力の流量依存性

3.2 モーター動力およびポンプ動力

10min^{-1} で運転した際の、磁石回転に必要なモーター動力と、熱交換媒体を流すのに必要なポンプ動力を、それぞれ駆動トルク、流量と圧力差から求め、Gd と LaFeCoSi について比較した (図 9)。モーター動力については回転に必要な駆動トルクは流量に依存しないため、Gd, LaFeCoSi のいずれの場合もほぼ一定値を示し、必要トルクの大きさも Gd, LaFeCoSi で変わらないことがわかる。

熱交換媒体を流すのに必要なポンプ動力についても Gd, LaFeCoSi の場合で同程度であることがわかる。これは今回用いた両者の粒径が同程度であること、LaFeCoSi には熱交換媒体にエチレングリコール溶液を使用

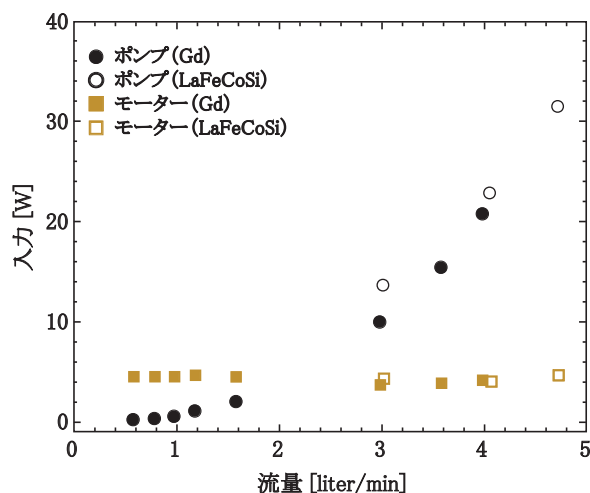


図 9 モーターおよびポンプの所要動力

したが、粘性増の影響はそれほど大きくないためだと考えられる。

4. 解析による特性把握

4.1 実機の冷凍能力特性

本試験装置は耐圧の関係から 5 liter/min 程度までしか流量をとることができず、より流量の大きな領域での冷凍能力の傾向を知ることができない。そこで、温度スパン 0 K における Gd と LaFeCoSi の冷凍能力について数値計算により比較した。

AMR の磁気作業物質、熱交換媒体のエネルギーバランスは、以下の式で与えられる。

磁気作業物質について (添え字 s) :

$$\rho_s c_{ps} \frac{\partial T_s}{\partial t} = \lambda_s A \frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} + \frac{A}{V_s} h(T_f - T_s) + \frac{Q_{mag}}{\Delta t V_s} \quad (2)$$

熱交換媒体について (添え字 f) :

$$\rho_f c_{pf} \left(\frac{\partial T_f}{\partial t} + u' \frac{\partial T_f}{\partial x} \right) = \lambda_f A \frac{\partial^2 T_f}{\partial x^2} + \frac{A}{V_f} h(T_s - T_f) \quad (3)$$

ρ : 密度, c : 比熱, T : 温度, λ : 熱伝導率, Δt : 熱交換時間, h : 熱伝達係数, x : 流路長, A : 伝熱面積, V : 流路体積, Q_{mag} : 磁気熱量効果, u' : 空塔速度

式 (2), (3) を数値的に連立して解くことにより、流量、磁石回転数に対する冷凍能力を求めた。ただし、実験で用いた AMR ダクトの熱伝達係数は不明なことや熱ロスが含まれるため、解析結果には実験係数を乗じて実験値に合うようにした。

図 10 に Gd を用いたときの計算結果を示す。実験では 5 min^{-1} のピークのみ確認できたが、 10 min^{-1} についても、流量に対して冷凍能力がピーク値を持つ傾向がわかる。

図 11 には LaFeCoSi を用いたときの計算結果を示す。LaFeCoSi は Gd に比べ比熱が大きいため、 $5, 10 \text{ min}^{-1}$ の冷凍能力ピークを示す流量はいずれも Gd よりも大きく、 40 min^{-1} の冷凍能力も 5 liter/min 以上では Gd よりも大きくなる。冷凍能力については、比熱の大きな LaFeCoSi が大流量まで熱交換媒体との温度差を保持できるために優位性があることが示唆される。

Gd, LaFeCoSi について流量、磁石回転数特性を比較するため、流量を横軸、回転数を縦軸としてそれぞれの冷凍能力を等高線図として表した結果を図 12 に示す。図中に枠線で示す数値は、冷凍能力 [W] を表している。

Gd, LaFeCoSi いずれの場合も、大流量側に冷凍能力の大きくなる領域があるが、冷凍能力が大きくなる回転

数の範囲には違いがあり、Gd では LaFeCoSi よりも回転数が高くなる。これは LaFeCoSi よりも Gd の比熱が小さく、熱交換時間を短くできるためである。システムとしては大流量、高回転数による大出力化を目指すのが、材料により適切な流量と回転数を選択すべきである。

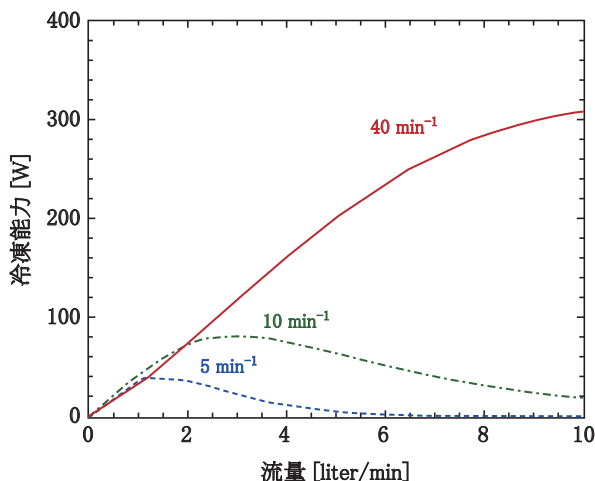


図 10 Gd を搭載した場合の冷凍能力 (数値計算)

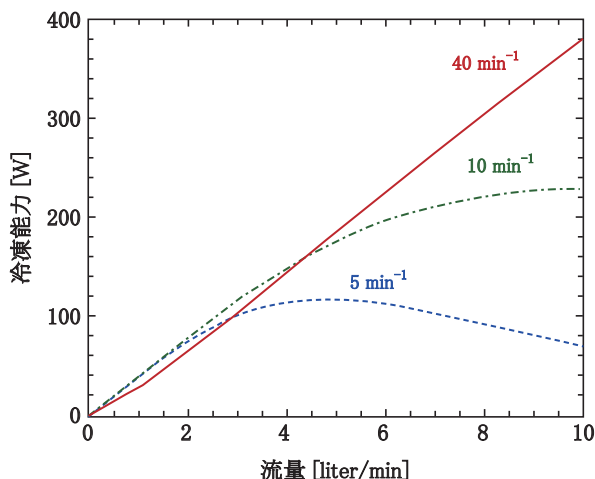


図 11 LaFeCoSi を搭載した場合の冷凍能力 (数値計算)

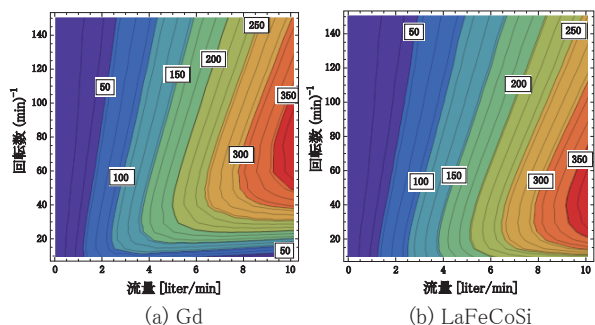


図 12 Gd と LaFeCoSi の冷凍能力 (数値計算)

4.2 磁気作業物質充填量

1 つのダクトに充填する磁気作業物質の量を増加させるほど、熱容量が増加するため、熱交換媒体の熱容量流

特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

量が必要となる。Gd を AMR ダクトに 0.75kg, 0.375kg 充填した場合についてそれぞれの冷凍能力を等高線図として表した結果を図 13 に示す。いずれも流量を増加させるのに伴い、冷凍能力が大きくなる傾向ではあるが、ピークを示す回転数、すなわち熱交換時間は充填量が 0.375 kg のほうがより高回転数側にシフトしている。

図 14 に Gd を 0.75kg, 0.375kg 充填した場合について流量 10liter/min, 回転数 150min⁻¹ の範囲における重量あたりの最大冷凍能力を比較した。材料効率の観点からは、少量の材料を素早く熱交換させ、回転数を増加させ冷凍能力を向上させるのが、消費動力を低減する観点からも効果的であることが分かる。

5. まとめ

室温領域の磁気冷凍評価に用いられている Gd と、新規磁気作業物質である LaFeCoSi を磁気冷凍装置に搭載し、冷凍能力、消費動力について評価した。また、数値解析を行い、実験で得られた結果に考察を加えた。試験装置で評価可能な流量域では、5, 10min⁻¹ の冷凍能力は LaFeCoSi のほうが大きい。しかし、磁石回転数が 40min⁻¹ の場合には、Gd の冷凍能力が LaFeCoSi よりも大きくなる傾向である。数値解析により、磁石回転数が 40min⁻¹ の場合には、より大流量域で LaFeCoSi が Gd の冷凍能力を上回る傾向が示唆された。

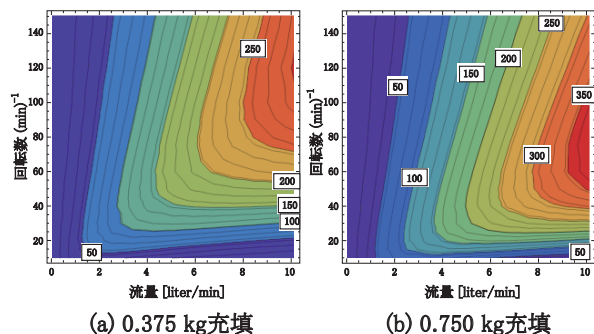


図 13 充填量を変えた場合の冷凍能力 (Gd 数値計算)

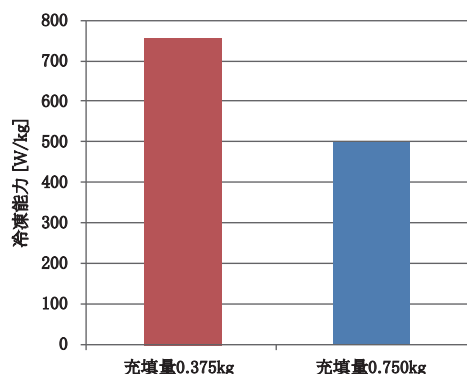


図 14 重量あたりの最大冷凍能力 (Gd 数値計算)

また、消費動力を低減する観点から、ダクト設計においては、ダクトあたりの流量を抑えることが重要である。それには 1 ダクトの充填量はいたずらに増やさず、回転数を増加させ冷凍能力を向上させるのが効果的である。

6. おわりに

冷凍能力については、比熱の大きな LaFeCoSi が大流量まで熱交換媒体との温度差を保持できるために優位性があることが示唆された。しかし、磁気冷凍は磁気作業物質と熱交換媒体との熱交換によってサイクルを構成し、熱交換は温度勾配によって生じることから、磁気作業物質の温度変化が大きいほど熱交換が速やかに行われるため効率のよいサイクルとなる。LaFe 系材料の場合は比熱が大きいため、いかに熱交換効率を向上するかが課題となる。

いずれにせよ材料によって適切な運転条件を見出すべきであるが、今回数値解析を加えた検討から、材料特性を考慮したシステム設計について指針を得ることができた。

謝 辞

本成果は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託業務の結果得られたものである。

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
- 2) 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
- 3) 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.
- 4) Barclay, J. A., Steyert, W. A., "Active Magnetic Regenerator," US patent, 4,332,135, 1981.
- 5) 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
- 6) 脇耕一郎, 宮崎佳樹, 荒井有気, 水野克俊, 長嶋賢, 川南剛: 円環状ハルパツハ配列磁気回路を用いた室温磁気冷凍機の特性, 鉄道総研報告 Vol.26, No.5, pp.47-52, 2012