

磁気冷凍サイクル高速化における線状MCMの影響

先端技術総合研究所 近藤正裕¹・上野晃太²・竹内勝彦²
野村隆次郎³・木寄剛志⁴

Effects of Magnetocaloric Wire on Increase in Magnetic Refrigeration Cycle

M. Kondo, K. Ueno, K. Takeuchi, R. Nomura, and T. Kizaki

環境に優しい次世代ヒートポンプとして、磁気冷凍技術に着目し開発を進めている。従来の磁気ヒートポンプの冷凍出力向上の課題に対し、磁気冷凍サイクルを高速にすることで高出力化を目指している。当社のコア技術の一つである伸線技術により製作した世界最小径の細線状の磁気作業物質（MCM）を使用し、サイクル周波数 10 Hzで動作させた結果、低磁場としては世界トップレベルの出力密度を達成した。今回、この概要を報告する。

We are working on the development of an environment-friendly, next-generation heat pump focusing on magnetic refrigeration technology. Conventional magnetic heat pumps, however, have a problem of insufficient cooling power. So we aim to increase the cooling power of magnetocaloric refrigerators by increasing their cycle frequency. To achieve the goal, we have developed a wire-shaped magnetocaloric material (MCM) used in a heat pump by wire drawing, which is one of Fujikura's core technologies. As the result of using the wire-shaped MCM in a heat pump and operating this device at a cycle frequency of 10 Hz, the device achieved the world's top-level specific cooling power in a weak magnetic field. This paper provides the summary of the results.

1. ま え が き

現在、多くのエアコンや冷蔵庫などの蒸気圧縮式のヒートポンプには、地球温暖化係数が高い代替フロンが使用されている。2015年にフランスで開催されたCOP 21では、温室効果ガス排出の削減を含むパリ協定が採択されるなど¹⁾、この領域に対する環境への配慮がますます重要となってきた。この背景のもと、より環境にやさしい新たなヒートポンプの実用化が求められており、我々は磁気冷凍技術に着目した。これは従来の技術とは異なり、磁場の変化により材料が温度変化する磁気熱量効果をもとにしている技術で、フロンレスの実現が期待できる。本稿では、磁気冷凍技術の冷凍出力向上の課題に関する検討状況について報告する。

2. 冷凍出力向上に向けた方策

室温領域において、磁気熱量効果で得られる温度変化は小さいため、磁気冷凍装置に使用するMCM自身に蓄熱と再生の役割を持たせて大きな温度差を得られる蓄熱・再生型磁気冷凍法（Active Magnetic Regenerator, 以下

AMRと記す）が提案されている²⁾。近年では、ワインクーラや小型冷蔵庫など向けにAMRを適用した磁気冷凍機の発表がなされているが³⁾、要求される冷凍出力が低いものに限定されており、冷凍出力の大きいエアコンの実現には技術的な課題が多い。出力向上の手段として、MCMの使用量を増やすこと、磁束密度を上げること、AMRサイクルを高速化することなどがあげられる。この中で、われわれはAMRサイクルの高速化に着目した。AMRサイクルを高速化するためには、短時間で磁気熱量効果によるMCMの温度変化が完了することと、短時間でMCMと冷媒との熱交換を行うことの両方が必要となる。前者については、磁気熱量効果によるMCMの温度変化は非常に短い時間で行われることが報告されており、磁気熱量効果だけで考えれば、50 Hzまで応答可能となる⁴⁾。後者については、磁気ヒートポンプの課題として広く認識され、研究がなされているものの、最適な回答はない状況である。

MCMと冷媒との熱交換については、一般的にMCMと冷媒との接触面積を大きくして熱交換効率を上げるため、 $\phi 0.3$ mm程度の粒状のMCMが使用されている⁵⁾。しかし、粒状のMCMを収納した状態では、冷媒の流路が狭く、複雑となり、冷媒を流す際に発生する圧力損失が大きくなるという問題点がある⁶⁾。そのため、AMRサイクルの周波数が高いと、熱交換を行うのに必要な冷媒の流速を確保することが難しくなるという問題がある。これま

1 AT部係長

2 AT部

3 材料研究部

4 材料研究部グループ長

略語・専門用語リスト

略語・専門用語	正式表記	説明
磁気熱量効果	Magnetocaloric effect	磁場の印加・除去に合わせてMCMが発熱・吸熱する現象。
磁気作業物質 (MCM)	Magnetocaloric material	磁気熱量効果を示す材料。
ガドリニウム	Gadolinium	希土類元素の一つで、室温で磁気熱量効果を示す金属。
AMR	Active Magnetic Regenerator	MCMと熱交換を行うために、磁場の印加除去に合わせて冷媒を往復運動させ、サイクルを重ねることで温度勾配を大きく拡大させるもの。
ΔS	磁気エントロピー変化	磁場を印加する前後の磁気エントロピーの差。
T_c	磁気転移温度	強磁性体が常時生体に変化する温度。この温度付近で磁気熱量効果が大きくなる。

で、圧力損失を低減可能な形状として、板材、多孔材、線材などがありシミュレーションによる検討例が報告されている⁶⁾。板材は実験例も報告されているが^{7),8)}、接触面積を確保するために薄くした板材で適切な間隔となるように材料を積層し、固定することが難しいという問題がある。

われわれは、AMRサイクルの高速化に適したMCMとして、線状MCMに着目した。線状MCMは、整列して充填することで、ストレートな流路を確実に確保できる。しかし、これまで検討されてきたMCMは加工性が悪く、線状MCMを使用した実験例は報告されていなかった。そこで、実際に線状MCMの試作を行い、高周波で動作可能なAMR実験機を製作し、性能測定を行った。



図1 ϕ 0.25 mm Gd線材の外観
Fig. 1. 0.25 mm dia. Gd wires.

3. 性能測定方法

3. 1 使用した線状MCM

線材の作製にあたり、MCMはガドリニウム (Gd) を使用した。磁気冷凍の研究用途で広く使用されるMCMであり、形状による効果を検証するのに最適と判断した。当社のコア技術の一つである電線の伸線技術を応用することで、線状MCMの製作に成功した。図1に伸線した線状MCMの外観を示す。今回の検討では、 ϕ 0.5 mm、 ϕ 0.25 mmの2種類を使用した。

3. 2 線状MCMの特性

ϕ 0.25 mmのGdを用いて、磁気的性質の評価を行った。1 T印加時の ΔS_m 、 T_c を磁気特性測定装置 (MPMS) で測定し、 ϕ 0.3 mmのGd粒材と比較した。結果を図2に示す。Gd線材の T_c における ΔS_m は -2.6 J/kg Kで、粒材の -2.8 J/kg Kよりわずかに小さく、 T_c も低温側に2~3 K程度移動していた。また、低温側での ΔS_m が粒材よりも -0.2 ~ 0.6 J/kg K程度大きくなっていった。これら

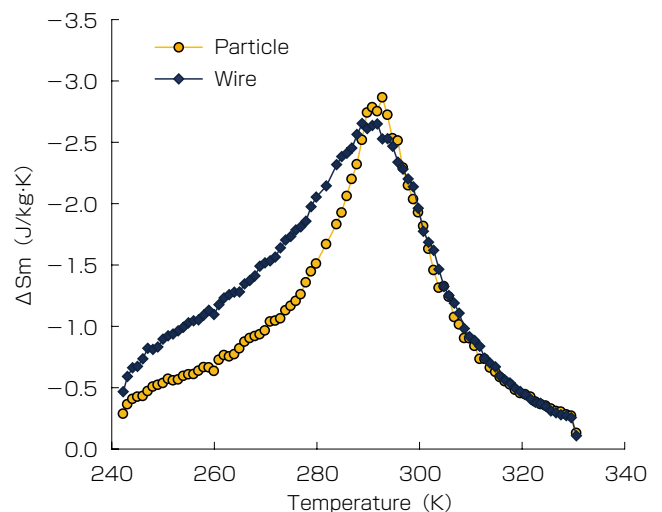


図2 Gd線材とGd粒材の ΔS_m
Fig. 2. ΔS_m of Gd wire and Gd particle.

は、形状が変わったことによる反磁場の影響によるものと推察している。

3. 3 線状MCMの収納方法

φ0.25 mmの線材をそのまま最密充填すると、粒材よりも充填率が上がり、粒材よりも流路が狭くなり、かえって圧力損失が増大する懸念があった。そこで、複数の単線を撚り線にすることで積極的に流路を確保することを考えた。撚り線にすることで生じる撚り線同士の隙間で流路を確保することができ、また、撚りに使用する本数により、充填率をコントロールすることができると考えた。今回は図3のように、3本の単線を使用して撚線化し、MCMベッドへ充填した。ここで、各形状のMCM

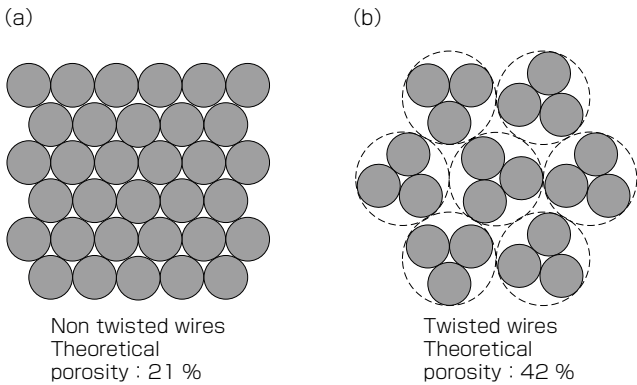


図3 空隙率 (a) 単線 (b) 撚り線
Fig. 3. Porosity (a) non twisted wires (b) twisted wires.

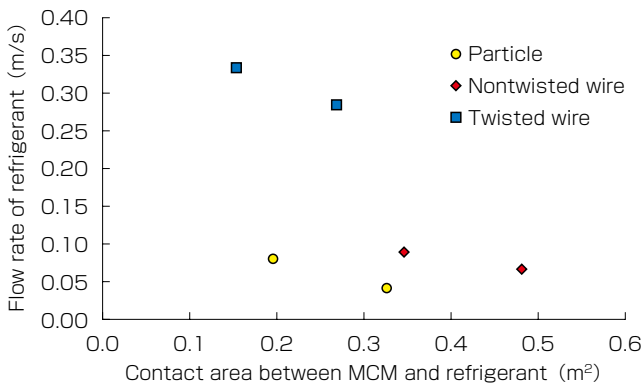


図4 各形状の接触面積と流速 (圧力差0.3 MPa)
Fig. 4. Comparison of flow rate among MCMs in each configuration at 0.3 MPa.

表1 実験サンプルの詳細
Table 1. Experiment sample details.

Material configurations	Particle	Twisted wire	Twisted wire
Diameter of MCM (mm)	0.3	0.25	0.5
Mass of MCM (kg)	0.093	0.067	0.079
Dimensions of bed (mm)	14 (height) × 14 (width) × 100 (length)		
Porosity (%)	40	57	49
Contact area (m²)	0.22	0.11	0.056

を充填したMCMベッドの両端部に圧力差が 0.3 MPaとなるように水圧を印加し、その際の流速測定した。図4に各形状の接触面積と流速の関係を示す。粒材と単線を比較すると、若干単線の流速が大きくなるが、大きな差はなかった。一方、撚り線は粒材、単線と比べて流速を大きくできることを確認した。

3. 4 測定系および測定方法

図5に実験機の模式図を、図6に外観を示す。永久磁石を往復運動させ、MCMに磁場の印加/除去を繰り返す機構と、永久磁石の往復にあわせてピストンを往復運動させ、ピストンにより押された冷媒がMCMを往復する機構を備えている。表1に実験サンプルの詳細を示

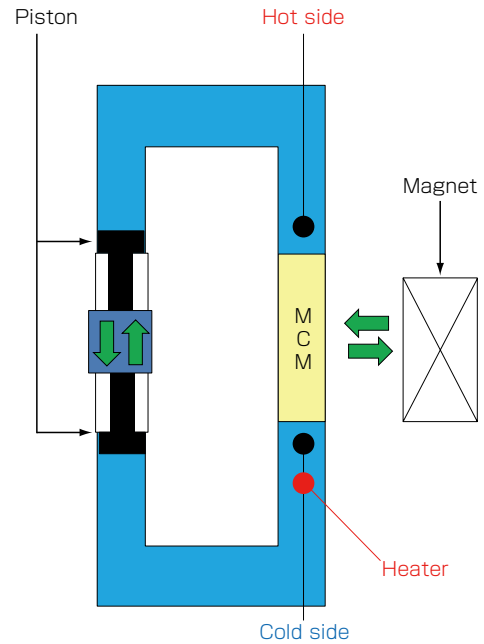


図5 実験機の模式図
Fig. 5. Schematic diagram of experimental apparatus.

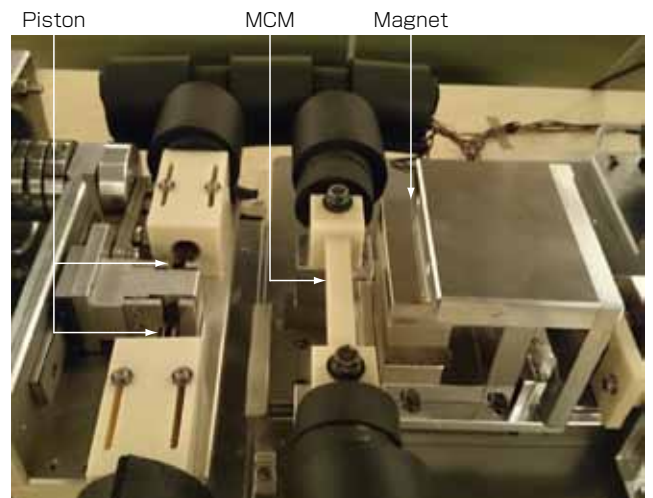


図6 実験機の外観
Fig. 6. Photograph of experimental apparatus.

し、表 2 に実験のパラメータを示す。粒材は、平均粒径 $\phi 0.3$ mm のものを充填した。重量から計算した空隙率は 40 % で、最密充填したときの空隙率の理論値である 26 % よりも高くなった。これは、粒材の形状が真球でないこと、粒径にばらつきがあることが原因と考えられる。単線、撚り線も同様に重量から空隙率を計算した。3 本撚り線の空隙率の理論値は 42 % だが、今回は $\phi 0.25$ mm、 $\phi 0.50$ mm とともに 57 %、49 % と理論値よりも高くなった。充填時に撚り線同士が密着しきれずに隙間が生じたためと考えられる。磁束密度は、実用化を考慮し、磁気回路のサイズを比較的抑えられる 0.6 T とした。

測定手順及び出力の算出方法は次の通りである。まず、装置を動作させ、MCM ベッド両端の冷媒に温度勾配を生じさせる。次に、両端の温度差が飽和した後、低温側の配管内部に設置したヒータを動作させる。ヒータは低温側の冷媒温度を打ち消すことになる。ヒータの出力を冷凍出力として見積もることができるため、冷凍出力と MCM ベッド両端の温度差の関係から、温度差ゼロのときの最大冷凍出力を算出する。最後に最大冷凍出力を、充填した MCM の重量で割り、出力密度を算出する。

4. 測定結果と考察

図 7 に出力密度とサイクル周波数の関係を示す。 $\phi 0.3$ mm 粒材では、サイクル周波数 3 Hz で出力が最大値を示し、それ以上サイクル周波数を増加させても出力密度は徐々に低下する結果となった。 $\phi 0.5$ mm の撚り線では、5 Hz で出力が最大となり、以降徐々に減少する傾向を示した。 $\phi 0.25$ mm 撚り線では装置の限界である 10 Hz で最大値 (300 W/kg) を記録したため、ピークは確認できなかった。

$\phi 0.3$ mm 粒材の接触面積は撚り線の倍以上あるものの、サイクルを高周波化することで、線状 MCM の最大出力密度は粒材の結果を上回った。これは、高周波化しても冷媒による MCM への圧力を抑えることができたことで線状 MCM が動かずに、ある程度均一に冷媒を流すことができ、効率よく熱交換が行えたためと推測している。一方、粒材は高周波化すると圧力が非常に高くなるために粒材が動き、局所的に冷媒が流れてしまい、実際に冷媒との熱交換に寄与する有効接触面積が減少していたためと推測している。

5. むすび

AMR を使用した磁気冷凍装置において、線状の MCM を使用することで、AMR サイクルの高速化による出力向上の可能性を検討した。その結果、 $\phi 0.25$ mm の Gd 線の 3 本撚り線を用いることで、サイクル周波数 10 Hz において、出力密度 300 W/kg を記録した。今後は、実用化に向けさらなる高周波化による出力向上の可能性を検討する。

表 2 実験のパラメータ
Table 2. Measurement parameters.

Operation frequency [Hz]	Max 10
Magnetic field [T]	0 - 0.6
Flow rate [l/min]	0.288 - 4.32
Refrigerant	Water
Ambient temperature [°C]	200 ± 0.5

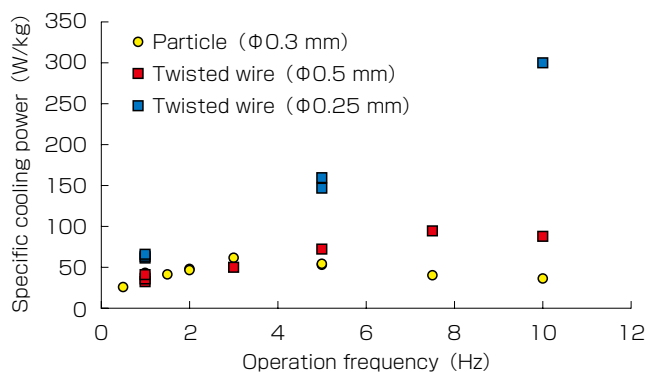


図 7 出力密度とサイクル周波数の関係
Fig. 7. Performance of Gd particle and wires in experimental device.

参考文献

- 1) UNFCCC Press : "Paris agreement", 2015
- 2) Barclay J.A., Steyert, W.A., : "Active magnetic regenerator," US patent, 4,332,135, 1981
- 3) V.Belusa : "Prototype of magnetocaloric wine cooler," BASF SE, CES2015, 2015
- 4) N. Watanabe : "Feasibility study of high frequency magnetic refrigeration cycle by fast response temperature measurement of magnetocaloric effect of La (Fe 0.88 Si 0.12) 13," S7 1516 Thermag VI, Victoria, BC, 7-10 September, 2014
- 5) Bingfeng Yu, et. al. : "A review of magnetic refrigerator and heat pump prototypes built before the year 2010," International journal of refrigeration, 33, pp.1029-1060, 2010
- 6) D.Vuarnoz, T.Kawanami : "Numerical analysis of reciprocating active magnetic regenerator made of gadolinium wires," Applied Thermal Engineering, 37, 388, 2012
- 7) B.R. Hansen, M. Katter : "Characterization study of a plate of the magnetocaloric material temperature," The 3rd IIF-IIR International Conference on Magnetic Refrigeration at Room Temperature, Des Moines, 2009
- 8) Barbara Pulko, Jaka Tusek : "Epoxy-bonded La-Fe-Co-Si magnetocaloric plates," Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 375, 65, 2015