特集 磁気冷凍

車載用磁気冷暖房空調システムの検討

Study on an In-vehicle Magnetic Refrigerator

田崎 豊^{*1}

Yutaka TASAKI

The power consumption of an air conditioner in an electric vehicle has a considerable impact on the cruising range. A high-performance magnetic refrigerator is therefore one of the important technologies needed for future electric vehicles. The requisite conditions for an in-vehicle magnetic refrigerator are higher with respect to cooling power density, temperature difference between the hot and cold sides, transient properties, and coefficient of performance than those of household refrigerators or home air-conditioners. We have devised a new model without a refrigerant in which heat is transported from the cold to the hot side through well-controlled thermal switches. A test rig to verify a heat transfer mechanism of the model has been created. The heat transfer mechanism has been experimentally verified in addition to an investigation of the heat transport characteristics. Furthermore, the refrigerating capacities also have been clarified by numerical simulation under the conditions for an in-vehicle refrigerator.

Keywords: magnetic refrigerator, in-vehicle, thermal switch, experimental verification, numerical analysis.

1 はじめに

電気自動車は、内燃機関を搭載した自動車と比較して熱損失が少なくエネルギー利用効率が高いため、エアコン電力消費量の航続距離に及ぼす影響が大きい。従来のエアコンは、冷媒ガスの圧縮による発熱と膨張による吸熱作用を利用して、加熱と冷熱を行なう方式である。

近年、環境負荷低減、高効率の期待から、磁気熱量材料を印磁・消磁した際に生ずる発熱・吸熱を取り出す磁気冷凍機の研究が進められている。磁気熱量部材と冷媒間で熱伝達して、その冷媒の往復振動流により高・低温側熱浴へ熱輸送をおこなうシステムについて、従来から数多くの研究[1-15]がなされている。

一方、磁気冷暖房エアコンを車載するには、出力密度、成績係数（以下 COP）、過渡特性など諸性能を高レベルで融合させることが求められる。これらの要求を鑑み、著者らにより冷媒を用いず磁気熱量部材および熱浴間に配置した熱スイッチにより熱伝達を制御、低温側熱浴から高温側熱浴へ熱輸送をおこなう新たなシステムが提案[16]されている。

本稿では、新システムの構成および熱輸送機構を解説する。更に新システム熱輸送機構の実験検証結果

[17]および数値解析による車載搭載の可能性検討結果[18]も併せて報告する。

2 システム構成

システム構成の概念図を Fig. 1 に示す。磁気熱量部材（以下 MC）、熱浴（以下 HB）、熱スイッチ（以下 TS）と永久磁石（以下 PM）から構成されている。TS は高・低温側 HB と MC 間、PM は MC ひとつ置きに配列されている。

PM は MC に対して往復運動をして、印磁・消磁を交番する。それに伴い発現した発熱・吸熱は TS で制御され、低温側熱浴（以下 HB_C）から高温側熱浴（以下 HB_H）へ輸送される。

3 熱輸送機構

熱輸送機構の理解促進を目的に、下記「仮定」に基

Fig. 1 System configuration.

連絡先：田崎 豊，〒237-8523 神奈川県横須賀市夏島町 1 番地，日産自動車(株)総合研究所先端材料研究所，
e-mail: y-tasaki@mail.nissan.co.jp

^{*1} 日産自動車（株）

づいた熱輸送のステップを Fig. 2 に示す。各 MC 内の数値は温度、赤は印磁、青は消磁を示す。

「仮定」

- ・HB の熱容量は MC の 10 倍。
- ・TS の熱容量はゼロ。また、ON 時の熱伝導率は無限大で OFF 時の熱伝導率はゼロ。
- ・MC の熱伝導率は無限大で、TS ON 後、隣接する各要素は瞬時に熱平衡状態に至る。
- ・磁場は MC に均一に形成され、MC の比熱は温度、磁場強さによらず一定で、その磁気熱量効果は $\Delta T = 5K$ 。
- ・各構成要素は外気断熱。

「熱輸送ステップ」

MC は HB_C 側から No.1~6, TS も同様に No.1~7 が割り振られている。

初期条件: MC と HB は均一温度分布(20°C)を呈し、PM は MC No.1, 3, 5 に配置されている。

ステップ 1: PM は MC No.1, 3, 5 から No.2, 4, 6 に移動する。それに伴い MC No.1, 3, 5 は消磁、吸熱することにより、MC 温度は低下する。一方、MC No.2, 4, 6 は印磁、発熱することにより、MC 温度は上昇する。その時、TS No.1, 3, 5, 7 は ON (伝熱)、No.2, 4, 6 は OFF (断熱) で作動する。その結果、HB_C から MC No.1, MC No.2 から No.3, No.4 から No.5, MC No.6 から HB_H へ熱(q_1)が輸送される。

ステップ 2: HB_C と MC No.1, MC No.2 と No.3, No.4 と No.5, MC No.6 と HB_H は熱平衡状態に至る。

ステップ 3: PM は MC No.2, 4, 6 から No.1, 3, 5 に移動する。それに伴い MC No.1, 3, 5 は印磁、発熱することにより、MC 温度は上昇する。一方、MC No.2, 4, 6 は消磁、吸熱することにより、MC 温度は低下する。その時、TS No.2, 4, 6 は ON (伝熱)、No.1, 3, 5, 7 は OFF (断熱) で作動する。その結果、MC No.1 から No.2, No.3 から No.4, No.5 から No.6 へ熱(q_2)が輸送される。

ステップ 4: MC No.1 と No.2, No.3 と No.4, No.5 と No.6 は熱平衡状態に至る。

4 実験検証

上記熱輸送機構を実験検証するための実験装置とその実験結果を説明する。

4.1 実験装置

4.1.1 実験装置概要

実験装置の概要を Fig. 3 に示す。No.1~No.6 の MC

と HB_H および HB_C は直列に配列され、各要素中心部には熱電対が挿入され時系列の温度計測が可能である。また、HB_C および HB_H の端部には各々セラミックヒータと冷媒との熱交換器 (以下 HE) が設置されている。セラミックヒータ加熱時の発熱量は電流と電圧の計測値より導出される。また、HE には温度一定に制御された冷媒 (水) が供給され、その流量と HE 出・入口冷媒の温度を計測する。磁場を形成するための一対の PM は MC に対して、ひとつ置きに配置されている。

4.1.2 MC 試料構成

MC 試料単体の構成を Fig. 4 に示す。熱伝導効率の向上を目的に厚さ 0.6 mm のガドリニウム (以下 Gd) 平板に厚さ 0.2 mm の銅 (以下 Cu) 平板が交互に積層され、拡散接合により一体化されている。また、その両端には Cu ブロックがはんだ付けにより一体化されている。

MC 試料単体のサイズは厚さ 7.4 mm × 高さ 20 mm × 幅 30 mm で、隣接する構成要素との接触面を除く四面は厚さ 1mm の樹脂製断熱材で覆われている。熱は幅方向に輸送される。また、構成要素各々の中心部には素線径 0.2 mm の T 型熱電対が埋め込まれている。また、厚さ 7.4 mm の MC 試料外周には、間隙が 12 mm で対をなす永久磁石がひとつ置きに配置されている。

4.1.3 実験装置作動機構

実験装置の作動機構を Fig. 5 に示す。Fig. 5 のステップは Fig. 2 の各ステップに対応する。例えば、ステップ 1 では、HB_C と MC No.1, MC No.2 と No.3, No.4 と No.5, MC No.6 と HB_H の隣接する端部が所定の面圧で接する。すなわち、TS ON の状態が形成される。一方、MC No.1 と No.2, No.3 と No.4, No.5 と No.6 の隣接する端部には所定の間隙が設けられる。すなわち、TS OFF の状態が形成される。

MC の磁場は永久磁石がポジション A, B 間を往復運動することにより印磁・消磁が繰り返し形成される。Fig. 6 に示すようにサイクル時間 (以下 t_c) はポジション A または B における各々の停止期間とその間の移動期間により構成される。今回、移動期間は 1.1 秒に固定して、停止期間を 5~30 秒間で制御して周波数を変化させた。

4.1.4 磁場強度と磁気熱量効果

Fig. 3 に示す MC No.2~5 のひとつ置きに直列配列した PM の間隙中心線における磁場強度の計測結果を

Fig. 2 Phase of cycle.

Fig. 3 Outline of test rig.

Fig. 4 Test piece.

Fig. 5 Phases of cycle in test rig.

Fig. 6 Constituent time of cycle.

Fig. 7 Distribution of magnetic field intensity.

Fig. 7 に示す。No.2(4)および No.3(5)における区間 30 mm の平均磁場強度は各々 0.75 T と 0.19 T である。すなわち、印磁・消磁による平均磁場強度変化率は 0.56 T である。

今回使用した Gd 平板単体を磁場強度 0.75 T と 0.19 T 間を移動して、印磁と消磁を交番した場合の断熱温度変化(ΔT_{ad})を計測した。MC 温度が主な評価温度領

域である 19~21℃ の間で、平均断熱温度変化 ΔT_{ad} は 1.14 K を示した。

4.2 実験結果と考察

4.2.1 熱輸送機構

$t_c = 62.2 \text{ sec}$, HB_H と HB_C の温度差 (以下 ΔT_{HB}) = 0.3 K における MC No.3 と No.4 の中心部温度 (以下 T_{TP}) と経過時間 (以下 t_c) との関係を図 8 に示す。青色実線は MC No.3, 緑色破線は MC No.4 を示す。 $t_c < 30 \text{ sec}$ は Fig.2 のステップ 3, 4 に相当する。すなわち TS ON の状態が形成され隣接する MC No.3 と No.4 間で熱(q_2)が輸送される。また、 $t_c > 30 \text{ sec}$ は Fig. 2 のステップ 1, 2 に相当する。すなわち MC No.3 は消磁後 TS ON の状態が形成され隣接する MC No.2, MC No.4 は印磁後 TS ON の状態が形成され隣接する MC No.5 間で熱(q_1)が輸送される。

このように Fig. 2 で示した本システムの熱輸送機構は実験で検証された。

4.2.2 HB 過渡特性と冷凍能力特性

t_c と HB_H と HB_C 温度 (以下 T_{HB}) の関係を図 9 に示す。青色線は HB_H 温度, 赤色線は HB_C 温度を示す。110 サイクルで $\Delta T_{HB} = 1.26 \text{ K}$ の漸近値に達する。また、その 90% には 60 サイクルで達する。

t_c とサイクル当たりの冷凍能力 (以下 q_c) の関係を図 10 に示す。 $t_c < 50 \text{ sec}$ で t_c の増加に伴い q_c は増大するが、 $t_c > 50 \text{ sec}$ で q_c は一定値(5.5J/cycle)を示す。

今回評価した MC 試料単体において、印磁・消磁によって発現した発熱・吸熱が TS ON の状態が形成され隣接する構成要素へ輸送されるに要する時間は 25 sec 程度であることを示唆している。

このように本システムの HB 過渡特性と冷凍能力特性は実験で確認された。

5 数値解析

本システムの車載搭載の可能性を探ることを目的に、運転条件として $\Delta T_{HB} = 60 \text{ K}$, システムを構成する MC の総数を 24 枚と仮定、出力密度と COP を数値解析により導出した。尚、出力密度は冷凍能力をそのシステムを構成する MC と TS の総体積で除した値である。以下解析条件と解析結果を示す。

5.1 解析条件

Table 1, 2 に各々運転条件と構成要素仕様を示す。

5.2 解析結果

運転条件と構成要素仕様各々の評価値を組み合わせた解析条件について解析した結果を図 11 に示す。 $\circ$, $\times$, $+$, $\square$ 印は MC の熱伝導率 (以下 λ_{MC}) を示し、その値はそれぞれ $\lambda_{MC} = 10, 100, 200, 400 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ である。また、10 から 200 Hz までの運転周波数は色により表示されている。

本解析条件下において、MC の高熱伝導化など構成要素仕様の最適化を図ることにより $\text{COP} > 4$, その上で高周波化を図ることにより冷凍能力 $> 30 \text{ kW/l}$ の可能性が示唆されている。

6 まとめ

(1) 車載用として冷媒を用いず磁気熱量部材間に配置した熱スイッチにより熱伝達を制御、低温側熱浴から高温側熱浴へ熱輸送をおこなう新システムを考案、その熱輸送機構を説明した。

(2) その熱輸送特性を実験的に検証するための実験評価装置を構築して、冷凍能力特性を明らかにするとともに熱輸送機構を実験で検証した。

(3) 本システムの車載搭載の可能性を探ることを目的に解析条件を仮定して、出力密度と COP を数値解析により導出した。今回の解析条件下において、 $\text{COP} > 4$, 冷凍能力 $> 30 \text{ kW/l}$ の可能性が示唆された。

(4) 本システムの実現には、熱スイッチ, MC の高熱伝導化[19], 高効率磁気回路など学際的な研究の取り組みが必要であり、多くの研究者の参画が期待される。

Fig.8 Variation in temperature of TPs.

Fig. 9 Transient response characteristics of HBs.

Fig. 10 Relation between cycle time and q_c .

Table 1 Operating condition.

Items	Conditions
ΔT_{HB} between HB_H and HB_C	60 K
Total number of MCs	24 sheets
Frequency	10, 20, 50, 100, 200 Hz

Table 2 Specifications of constituent parts.

Items		Conditions
MC	Material	Gadolinium
	Adiabatic temp. change by magnetization	5 K (constant regardless of temperature)
	Thickness (in direction of heat transport)	0.3, 0.5, 1, 2, 3, 5, 10, 20 mm
	Thermal conductivity	10, 100, 200, 400 W/(m·K)
	Specific heat	300 J/(kg·K) (constant regardless of temperature and magnetic field intensity)
TS	Thickness (in direction of heat transport)	20 % of MC thickness
	Thermal conductivity	ON: 100, 200, 400 W/(m·K) OFF: 0 W/(m·K)
	Specific heat	0, 100, 300 J/(kg·K)

Fig.11 Performance of cooling power and COP

参考文献

- [1] N. Hirano, S. Nagaya, T. Okamura, T. Kawanami, H. Wada, Development of room temperature magnetic refrigerator in Japan, *Fourth IIF-IIR International Conference on Magnetic Refrigeration at Room Temperature*, Bautou, China, pp. 23-28 August 2010.
- [2] T. Okamura, K. Yamada, N. Hirano, S. Nagaya, Performance of a room-temperature rotary magnetic refrigerator, *Int. J. Refr.*, Vol. 29, No.6, pp.1327-1331, 2006.
- [3] K.K. Nielsen, J. Tusek, K. Engelbrecht, S. Schopfer, A. Kitanovski, C.R.H. Bahl, A. Smith, N. Pryds and A. Poredos, Review on numerical modeling of active magnetic regenerators for room temperature applications, *Int. J. Refr.*, (Review Article) Vol. 34, No.3, pp. 603-616, 2011.
- [4] C.R.H. Bahl, K. Engelbrecht, R. Bjørk, D. Eriksen, A. Smith, K.K. Nielsen, N. Pryds, Design concepts for a continuously rotating active magnetic regenerator, *Int. J. Refr.*, Vol. 34, pp. 1792-1796, 2011.
- [5] K. Engelbrecht, K. K. Nielsen, N. Pryds, An experimental study of passive regenerator geometries, *Int. J. Refr.*, Vol. 34, pp. 1817-1822, 2011.
- [6] R. Bjørk, C.R.H. Bahl, A. Smith, N. Pryds, Review and comparison of magnet designs for magnetic refrigerator, *Int. J. Refr.*, Vol. 33, pp. 437-448, 2010.
- [7] K.K. Nielsen, C.R.H. Bahl, A. Smith, N. Pryds, J. Hattel, A comprehensive parameter study of an active magnetic regenerator using a 2D numerical model, *Int. J. Refr.*, Vol. 33, pp. 753-764, 2010.
- [8] T.F.Petersen, N. Pryds, A. Smith, J. Hattel, H. Schmidt, H.-J. H. Knudsen, Two-dimensional mathematical model of a reciprocating room-temperature Active Magnetic Regenerator, *Int. J. Refr.*, Vol. 31, pp. 432-443, 2008.
- [9] Steven L. Russek, Carl B. Zimm, Potential for cost effective magnetocaloric air conditioning systems, *Int. J. Refr.*, Vol. 29, pp. 1366-1373, 2006.
- [10] C. R. Cross, J. A. Barclay, A. J. Degregoria, S. R. Jaeger, J. W. Johnson, Optimal temperature-entropy curves for magnetic refrigeration, *Advances in cryogenic engineering*, Vol. 33, pp. 767-775, 1988.
- [11] J. Roudaut, A. Kedous-Lebouc, J.-P. Yonnet, C. Muller, Numerical analysis of an active magnetic regenerator, *Int. J. Refr.*, Vol. 34, pp. 1796-1804, 2011.
- [12] M. Risser, C. Vasile, T. Engel, B. Keith, C. Muller, Numerical simulation of magnetocaloric system behavior for an industrial application, *Int. J. Refr.*, Vol. 33, pp. 973-981, 2010.
- [13] C. Muller, New reversible air-conditioning magnetocaloric system, environmentally friendly and highly energy efficient, *SAE Technical Paper*, 2009-01-0313, 2009.
- [14] L.A. Tagliafico, F. Scarpa, F. Canepa, S. Cirafici, Performance analysis of a room temperature rotary magnetic refrigerator for two different gadolinium compounds, *Int. J. Refr.*, Vol. 29, pp. 1307-1317, 2006.
- [15] P. Li, M. Gong, G. Yao, J. Wu, A practical model for analysis of active magnetic regenerative refrigerators for room temperature applications, *Int. J. Refr.*, Vol. 29, pp. 1259-1266, 2006.
- [16] Y. Tasaki, H. Takahashi, Y. Yasuda, T. Okamura, K. Ito, A study on the fundamental heat transport potential of an in-vehicle magnetic refrigerator, *Fifth IIF-IIR International Conference on Magnetic Refrigeration at Room Temperature, Thermag V Grenoble, France*, pp. 445-452, 17-20 September 2012.
- [17] 田崎豊, 高橋秀和, 保田芳輝, 岡村哲至, 牧野裕人, 伊藤孝司, 日本冷凍空調学会年大会講演論文集, 車載用磁気冷暖房エアコンの研究—新システムの熱輸送機構検討—, pp. 137-140, 2012.
- [18] U. L. Olsen, C. R. H. Bahl, K.Engelbrecht, K. K. Nielsen, Y. Tasaki, H. Takahashi, Y. Yasuda, Modeling of In-vehicle Magnetic refrigeration, *Fifth IIF-IIR International Conference on Magnetic Refrigeration at Room Temperature, Thermag V Grenoble, France*, pp. 557-564, Thermag V. 2012.
- [19] 安藤良知, 宇高義郎, 田崎豊, 高橋秀和, 保田芳輝, 車載用磁気冷暖房エアコンの研究—磁気熱量材料の熱伝導特性検討—, 日本機械学会熱工学コンファレンス 2012 講演論文集, pp. 31-32, 2012.