テーマ解説

熱スイッチを用いた室温磁気冷凍システム研究の現状と取組み

田崎 豊*

Present Status and Approach to a Room-temperature Magnetic Refrigerator with Thermal Switches

Yutaka TASAKI*

Synopsis: A high-performance magnetic refrigerator is expected to serve as an alternative technology for air-conditioners in electric vehicles. The high power consumption of conventional air-conditioners in electric vehicles considerably decreases the cruising distance. In the background, the demands of cooling power density, temperature difference between hot and cold sides, COP and transient properties must be high. We have devised a novel system that doesn't require heat-transfer fluid where heat is transported from the cold side to the hot side via well-controlled thermal switches. The heat transfer mechanism has been verified both experimentally and numerically. Furthermore, the superiority of the refrigerating capacities have also been verified by numerical simulation, with specifications of the main constituent parts varied over a wide range. However, several issues remain to be solved in order to draw out even higher potential. Among the issues, a thermal switch with liquid metal driven by electro-wetting-on-dielectric (EWOD) has been introduced as an example solution for the thermal switch.

Keywords: room-temperature magnetic refrigerator, thermal switch, electro-wetting, automobile, magneto-caloric material
(Some figures in this article may appear in colour only in the electronic version)

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。現在使用されている多くのエアコンの方式は、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、加熱と冷却を行う蒸気圧縮式ヒートポンプである。

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システム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行うシステム（Active Magnetic Regenerator）について、従来から多くの研究がなされている^{1,2)}。従来システムの概念図を Fig. 1(a)に示す。

磁気冷凍システムを車載するには、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満たすことが求められる。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列した熱スイッチ（以下 TS）により熱伝導を制御、低温側熱浴から高温側熱浴へ熱輸送を行う新たなシステムが提案されている^{3,4)}。新システムの概念図を Fig. 1(b)に示す。

本稿では、新システム研究の現状と取組みについて解説する。

Fig. 1 Conceptual configurations of conventional and novel systems.

Received November 10, 2014

* 日産自動車株式会社 総合研究所
〒237-8523 神奈川県横浜須賀町1番地
Nissan Research Center, Nissan Motor Co., Ltd.,
1, Natsushima-cho, Yokosuka, Kanagawa 237-8523, Japan
E-mail: y-tasaki@mail.nissan.co.jp
DOI: 10.2221/jcsj.50.53

2. 新システムの熱輸送機構検証

新システムの熱輸送機構の検証を目的に、実験装置と数値解析モデルを構築した。

検証用のシステム構成を **Fig. 2** に示す。検証結果に一般性を持たせるため、配列総数が 6 個の磁気熱量部材（以下 MC）、7 個の TS、3 対の永久磁石（以下 PM）と両端の熱浴（以下 HB）から構成されるシステムを採用した。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・吸熱はその伝熱方向が 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。

2.1 熱輸送機構

下記仮定に基づいた熱輸送機構のフェーズを **Fig. 3** に示し、熱輸送機構の概念を説明する。

2.1.1 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、その磁気熱量効果による断熱温度変化量（以下 ΔT_{ad} ）は $\Delta T_{ad}=5^\circ\text{C}$ 。
- ・ 各構成要素は外気断熱

2.1.2 熱輸送フェーズ

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 に配列されている。

フェーズ 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（青色）して、MC 温度は低下する。一方、MC No. 2, 4, 6 は印磁、発熱（赤色）して、MC 温度は上昇する。その時、TS No. 1, 3, 5, 7 は ON（伝熱、黄色）、No. 2, 4, 6 は OFF（断熱、白色）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 ）が輸送される。

フェーズ 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。

フェーズ 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（赤色）して、MC 温度は上昇する。一方、MC No. 2, 4, 6 は消磁、吸熱（青色）して、MC 温度は低下する。その時、TS No. 2, 4, 6 は ON（伝熱、黄色）、No. 1, 3, 5, 7 は OFF（断熱、白色）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 ）が輸送される。

Fig. 2 System configuration to verify a heat-transfer mechanism.

Fig. 3 Phase of cycles.

フェーズ 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。

2.2 実験による検証

MC 試料構成、実験装置概要、実験装置作動機構を以下に説明する。

2.2.1 MC 試料構成

MC 試料（以下 TP）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。TP 単体のサイズは厚さ 7.4 mm×高さ 20 mm×幅 30 mm で、隣接する TP との接触面を除く四面は厚さ 1 mm の樹脂製断熱材で覆われている。また、構成要素各々の中心部に素線径 0.2 mm の T 型熱電対（以下 TC）が計 3 箇所埋め込まれている。また、厚さ 7.4 mm の TP 外周には、間隙が 12 mm で対をなす PM が配列されている。

2.2.2 実験装置概要

実験装置の概要を **Fig. 5** に示す。No. 1～6 の TP と HB_H および HB_C は直列に配列され、各要素中心部に挿入された TC により時系列の温度計測が可能である。また、 HB_C お

Fig. 4 Test piece.

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による HB_C への熱負荷量（以下 q_c ）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 TP に対して、ひとつ置きに配列されている。印磁・消磁における PM 間隙中心線区間 30 mm の平均磁場強度（以下 H_h , H_l ）はそれぞれ $H_h=0.75$ T と $H_l=0.19$ T である。すなわち、平均磁場強度変化代（以下 ΔH ）は $\Delta H=0.56$ T である。その時の Gd 平板単体の磁気熱量効果による断熱温度変化代は、本研究における主な評価温度領域である 19~21℃で、 $\Delta T_{ad}=1.2$ ℃を示した。

2.2.3 実験装置作動機構

実験装置の作動機構を Fig. 6 に示す。例えば、フェーズ 1 では、 HB_C と TP No. 1, MC No. 2 と No. 3, No. 4 と No. 5, TP No. 6 と HB_H の隣接する端部が所定の面圧（以下 p ）で接する。すなわち、TS ON の状態が形成される。一方、TP 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隙間（1.2 mm）が設けられ、TS OFF の状態が形成される。TP の磁場は PM 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。その往復運動と同期して、TS ON/OFF は制御される。 H_h , H_l , PM ポジション, TS ON/OFF と経過時間（以下 t_e ）との関係を Fig. 7 に示す。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。移動期間は 1.1 sec に固定して、停止期間を 5~30 sec 間で制御して t_c を変化させた。

樹脂製断熱材で覆われた TP, HB_C と HB_H が配列された部位の写真を Fig. 8 に示す。これら構成要素の間隙が上下に配列した円板カム回転により制御され、TS ON/OFF が実現される。

実験装置全体の写真を Fig. 9 に示す。磁気回路は LM ガ

Fig. 5 Outline of test rig.

Fig. 6 Phases of cycle in test rig.

Fig. 7 Constituent time of cycle.

Fig. 8 Pictures of TPs, HB_C and HB_H array.

イドに取り付けられ駆動モータに直結されたボールねじの回転により往復動が可能となる。また、円板カムはボールねじの他端に直結された減速機とタイミングプーリーを介して回転される。具体的には、磁気回路が 30 mm 移動すると、円板カムは連動して 180°回転する。このように、Fig. 7 で説明した TS ON/OFF と磁場強度の同期は実現される。

2.3 数値解析による検証

数値解析で用いた基礎方程式と数値解析で入力データとして用いる熱抵抗特性の導出方法とその結果を以下に示す。

2.3.1 基礎方程式と境界条件

Fig. 5 に示した実験装置の熱伝導解析を行うに際して、TP の基礎方程式として式(1)の 1 次元熱伝導方程式を適用した。境界条件は式(2)の通り、 $x=0, L$ において温度一定とした。また、隣り合う TP あるいは TP と HB の間の TS ON 時の伝熱特性については、次に述べるように実験計測から求めた接触熱抵抗の値を入力した。

$$\frac{\partial T_{TP}}{\partial t} = \alpha_{TP} \frac{\partial^2 T_{TP}}{\partial x^2} + \frac{\partial T_{ad}}{\partial H} \frac{\partial H}{\partial t} \quad (1)$$

$$T|_{x=0,L} = \text{const.} \quad (2)$$

因みに、 T は温度、 t は時間、 x は距離、 H は磁場強度、 α は熱拡散係数を示す。

2.3.2 熱抵抗特性導出方法

各 TP 熱抵抗（以下 $R_{TP,i}$ ）と各接触熱抵抗（以下 $R_{Cont,i}$ ）を導出するための実験装置を Fig. 10 で述べた所定の面圧 p のもと、 $R_{TP,i}$ は全て TS ON の条件下、また $R_{Cont,i}$ は TS が ON/OFF を繰り返す運転条件下で、 q_c および各部の温度 (T_{2-15}) より導出した。 $R_{Cont,i}$ は TS ON 期間の時間平均値を示す。

導出した $R_{TP,i}$ と $R_{Cont,i}$ の評価結果を Fig. 11 に示す。□ と ■ はそれぞれ $R_{Cont,i}$ と $R_{TP,i}$ 、○ と ● は $R_{Cont,i}$ と $R_{TP,i}$ それぞれの平均値 v_{Cont_mean} と v_{TP_mean} を示す。その値は $R_{Cont\_mean} = 1.29 \text{ K/W}$ と $R_{TP\_mean} = 1.80 \text{ K/W}$ である。 R_{Cont_mean} は R_{TP_mean} の 72% と比較的大きな値を呈する。これらの値を上記基礎方程式の入力データとして用いる。

2.4 検証結果と考察

熱輸送機構について、実験と数値解析結果を比較・検討する。 $t_c=62.2 \text{ sec}$ 、 HB_H と HB_C の温度差（以下 ΔT_{HB} ） $\Delta T_{HB} = 0.3^\circ\text{C}$ における TP No. 3 と No. 4 の中心部温度（以下 T_{TP_C} ）と t_c との関係を Fig. 12 に示す。

青と緑色の実線は各々 TP No. 3 と No. 4 の実験結果、同様に青と緑色の破線は各々 TP No. 3 と No. 4 の数値解析結果を示す。 $t_c < 31.1 \text{ sec}$ は Fig. 6 のフェーズ 3, 4 に相当する。すなわち TP No. 3 と No. 4 間で TS ON の状態が形成され、印磁された TP No. 3 から消磁された No. 4 へ熱 (q) が輸送される。また、 $t_c \geq 31.1 \text{ sec}$ は Fig. 2 のフェーズ 1, 2 に相当する。すなわち TP No. 2 と No. 3 間で TS ON の状態が

Fig. 9 Picture of the test rig.

Fig. 10 Test rig for measuring thermal resistance and contact thermal resistance.

Fig. 11 Experimental results for thermal resistance and contact thermal resistance.

Fig. 12 Variation in the temperatures of TPs.

形成され、印磁された TP No. 2 から消磁された No. 3 へ熱 (q) が輸送される。同様に、TP No. 4 と No. 5 間で TS ON の状態が形成され、印磁された TP No. 4 から消磁され

た No. 5 へ熱 (q) が輸送される。

実験、数値解析結果共、TS ON によって隣接する TP 間で、印磁・昇温された低温側 TP から消磁・降温された高温側 TP へ熱 (q) が輸送されることが示されている。また、実験結果と数値解析結果は比較的良い一致を示しており、本数値解析手法が熱輸送機構を充分捉えているものと推察する。

このように Fig. 2 で示した新システムの熱輸送機構は実験と数値解析の両面から検証された。

3. 新システムのポテンシャル検討

車載用エアコンに求められる要件から HB_H と HB_C の温度差は $\Delta T_{HB}=60$ K と設定した。また、磁気熱量材料としてガドリニウムを仮定して、実現の可能性があるかと推察される磁場強度から $\Delta T_{ad}=5$ K を設定した。これらの条件下で必要とされる MC の配列総数を 24 枚と設定した。

ポテンシャルを明らかにすることを目的に、TS、MC の仕様と運転周波数を広範囲にわたり変化させ、これらの因子が COP と出力密度に及ぼす影響を数値解析により明らかにした⁵⁾。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。

3.1 数値解析条件

Table 1, 2 に各々運転条件と構成要素仕様を示す。

3.2 数値解析結果

運転周波数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 Fig. 13 に示す。○, ×, +, □印は MC の熱伝導率 (以下 λ_{MC}) を示し、その値はそれぞれ $\lambda_{MC}=10, 100, 200, 400$ W/(m·K) である。また、10

Table 1 Operating condition

Item	Condition
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

Item		Condition
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.13 Performance of COP and cooling power.

から 200 Hz までの運転周波数は色により表示されている。

COP と出力密度の数値解析結果は、COP = 4, 出力密度 (冷凍能力) = 30 kW/L も含む広範囲に分布している。新システムが従来システムと比較して高いポテンシャルを有していることが示された⁵⁾。

3.3 考察

上記数値解析結果は、同時に COP と出力密度を高いレベルで実現するために解決すべき幾つかの課題も示唆している。具体的には、主に以下の課題が挙げられる。

- ① 十分な耐久性と充分小さな熱容量で高い伝熱・断熱特性を有しており、高周波運転を可能にする TS^{6,7)}
- ② MC の高熱伝導化⁸⁾
- ③ 限られた PM で充分な磁場強度を発現できる磁気回路
- ④ 低磁場でもより大きな磁気熱量効果 (特に断熱温度変化) が大きい特性を有する MC

4. TS 研究の取組み

新システムのポテンシャルを十分に引き出すには、前章で挙げた幾つかの課題を解決していくことが必要である。今回はその中の主要課題のひとつである TS (前章①) 実現に向けた研究の取組みについて紹介する。

Fig. 4~12 で示した TS は、所定の面圧で接する TP と HB の隣接する端部の間隙 (接触・非接触) を機械的に制御して、TS の ON/OFF を実現する方式である。

前章でも述べたように、TS は十分な耐久性と充分小さな熱容量で高い伝熱・断熱特性を有しており、高周波運転を可能にすること、さらに駆動エネルギーが充分小さいことが求められる。

これらの要件を踏まえて、エレクトロウェットング (以下 EWOD) 手法を用いた TS の研究が進められている^{6,7)}。

4.1 EWOD による TS の原理

誘電膜を用いる EWOD の原理を Fig. 14 に示す。誘電膜が成膜された電極とその誘電膜上の液滴の間に電位差を与えると、液滴と誘電膜間の固液界面エネルギー γ_{SL} が減少する。その結果、液滴の接触角が減少する。Young-Lippmann の式から、接触角 θ は式 (3) に示す電圧 V の関数として表される。

$$\cos \theta = \cos \theta_0 + \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{2\gamma_{SL}t} V^2 \quad (3)$$

ここで、 θ_0 は初期接触角、 ϵ_0 は真空の誘電率、 ϵ_r は誘電膜の比誘電率、 t は誘電膜の膜厚である。

本研究では TS の十分な伝熱・断熱特性を実現するため液体金属を使用する。その液滴の移動特性を評価する EWOD 仕様として 2 電極構造を採用した。その構成を Fig. 15 に示す。この構造は、左右電極の電位差による接触角 (θ_{adv} , θ_{rec}) の差が駆動力である。電極と液滴が直接接触しない構造であることより、液滴のスムーズな移動が期待される。

TS における伝熱・断熱の切替 (TS ON/OFF) は、Fig. 16 に示すような二平面間の間隙 (Gap) に液体金属を挿脱させることにより行われる。EWOD により断面 A-A に液体金属が挿入され液体金属で満たされると断面 A-A における二平面間は伝熱 (TS ON) され、液体金属が移動され真空またはガスで満たされると A-A 断面における二平面間は断熱 (TS OFF) される。また、液滴移動距離の拡大は、電極数を増やすことで可能である。

4.2 実験装置及び実験方法

Fig. 16 の構成を基本とする評価基板を使用した。基板はガラス、電極は高周波スパッタで成膜した厚さ 0.1 μm の Pt 薄膜、誘電膜には厚さ 1 μm の Parylen を使用した。低表面張力皮膜として、下面側表面には厚さ 8 μm のフッ素系コーティング剤 FS-1010、上面側表面には厚さ 15 μm の超撥水材料 HIREC1450 を塗布した。因みに、2 電極間距離は 0.1 mm である。

実験装置全体の概要を Fig. 17 に示す。2 電極にはスイッチとリレー装置を介して直流電位差 160 V を印加した。電圧の印加方法は Fig. 18 に示すように、0 V から一方の電極に 160 V を印加する。液体金属を 2 電極の中央付近に配置して、電位印加後の液滴挙動を高速カメラで記録し、画像解析を行った。今回は液体金属として水銀を使用して、EWOD による挙動特性を評価した。

4.3 実験結果

平面上 (Free) および 2 平面間の水銀の挙動を評価した。一例として、平面上で直径 2 mm の水銀とそれを間隙 (以下 Gap) Gap=0.5 mm の 2 平面間にセットした場合の液滴挙動をそれぞれ Fig. 19(a), (b) に示す。Fig. 19(a), (b) は、それぞれ Fig. 15, 16 に示した液滴挙動を再現している。

Fig. 19(a), (b) の電圧印加後の経過時間と液滴移動速度の関係を Fig. 20 に示す。●は Fig. 19(a), ○は Fig. 19(b) の液滴移動速度を示す。移動速度に振動が見られるのは、低表面張力皮膜の凹凸に液滴が引っ掛かかことが原因と推察される。いずれの仕様も電圧印加後瞬時に移動を開始して、0.01~0.03 sec の間で最高移動速度に達する。

このように EWOD を活用して二平面間の間隙にセット

Fig. 14 Phenomenon of electro-wetting-on-dielectric layer.

Fig. 15 Droplet actuation method with a two-electrode structure.

Fig. 16 Principle of thermal switch with parallel-plate EWOD.

Fig. 17 Experimental arrangement.

Fig. 18 Voltage applied.

Fig. 19 Movement of droplets.
(a) On the surface (free), (b) Gap = 0.5 mm

Fig. 20 Relationship between velocity and time.

した液体金属を俊敏に移動させることが可能である。より小さな熱容量の観点からより狭い間隙での挿脱が求められるが、現在 Gap=0.15 mm まで同様の挙動が可能であることが確認されている。

4.4 TS の将来展望

水銀は環境汚染や健康リスクを引き起こすなど毒性を有する液体金属であり、代替液体金属の探索とその検証が必須である。現在、代替液体金属としてガリウム系合金を使用した研究が進められており、水銀同様の液滴挙動が確認されつつある⁷⁾。

また、TS はシステム構成要素間の伝熱と断熱の制御を可能にする機能部品である。この機能は、磁気冷凍システムに留まらず、熱エネルギー有効利用の目的から様々な場面で活用されることが推定される。この観点からも TS の実現が期待される。

5. まとめ

冷媒を用いず磁気熱量部材および熱浴間に配列した TS により熱伝導を制御、低温側熱浴から高温側熱浴へ熱輸送を行う新たなシステムが提案されている。

この新システムの熱輸送機構は実験と数値解析の両面から検証され、その成立性が確認された。

また、車載への搭載を想定した条件下で、主要構成要素の仕様と運転周波数を広範囲にわたり変化させた数値解析結果は、従来システムと比較して高い COP と出力密度（冷凍能力）を示した。

一方、同時に COP と出力密度を高いレベルで実現するために解決すべき幾つかの課題も示唆した。例えば、TS, MC の高熱伝導化、高効率磁気回路、大きな磁気熱量効果を有する材料などが挙げられる。

今回は、EWOD 手法を活用して二平面間の狭い間隙にセットした液体金属を挿脱させ、TS の ON/OFF を実現する研究の取組みについて紹介した。

新システム実現のための研究分野は多岐にわたり、学際的な研究の取組みが必要である。多くの研究者の参画が期待される。

参考文献

- 1) 下地 崇, 牧野裕人, 岡村哲至, 平野直樹, 長屋重夫, 伊藤孝治:「連続回転型室温磁気ヒートポンプシステムの性能評価」, 2011 年度日本冷凍空調学会年次大会講演論文集 (2011)
- 2) 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” (Review Article), Int. J. Refrig. **34** (2011) 603-616
- 3) 田崎 豊, 高橋秀和, 村上 亮, 岡村哲至, 伊藤孝治, 松本裕昭:「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証)」, 日本機械学会 2013 年度年次大会 (2013)
- 4) Y. Tasaki, H. Takahashi, Y. Yasuda, T. Okamura and 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 (2012) 445-452
- 5) U.L. Olsen, C.R.H. Bahl, K. Engelbrecht, K.K. Nielsen, Y. Tasaki and H. Takahashi: “Modeling of in-vehicle magnetic refrigeration”, Int. J. Refrig. **37** (2014) 194-200.
- 6) 大井潤也, 田中耕太郎, 田崎 豊, 細井孝洋, 小林優貴, 高林 剛:「車載用磁気冷暖房空調システムのエレクトロウェットティングを用いた熱スイッチの開発 (第 1 報: 2 電極構造における小液滴の移動特性)」, 日本機械学会熱工学コンファレンス 2013 講演論文集 (2013) 373-374
- 7) 細井孝洋, 田中耕太郎, 田崎 豊, 村上 亮, 島崎智寛, 寺内夏樹:「エレクトロウェットティングを用いた熱スイッチの開発 (第 2 報: 非水銀液体金属小液滴の移動特性に関する研究)」, 日本機械学会熱工学コンファレンス 2014 講演論文集 (2014) B123
- 8) 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 (2012) 31-32

田崎 豊 1955 年 9 月生。1980 年茨城大学 大学院 修士課程 工学研究科 機械工学専攻 修了。同年、日産自動車(株)入社。主に、内燃機関、燃料電池、磁気冷凍機の研究開発に従事。自動車技術会、日本機械学会、日本伝熱学会会員。工学博士。