

車両空調への応用を目指した 磁気ヒートポンプの動作温度範囲の拡大

脇 耕一郎* 宮崎 佳樹* 大西 孝之**

Extension of Operational Temperature Range on Magnetic Heat Pump
Aimed at Application to Onboard Air-conditioner

Koichiro WAKI Yoshiki MIYAZAKI Takayuki ONISHI

Air-conditioners including those for railway vehicles, are required to reduce the use of alternative freon in order to prevent global warming. It can be possible that the heat pump cycle is constituted by, for example, a process of applying/removing a magnetic field to/from a magnetic material, rather than performing the process of compressing or expanding gas (including alternative freon). As a basic study, a magnetic heat pump was tested using Mn-based magnetic materials of different Curie temperatures, where the operational temperature range was extended to that using the magnetic material of a single Curie temperature. The result predicts that magnetic heat pump can be applicable to air-conditioners.

キーワード：地球温暖化抑制，磁界，永久磁石，ハルバツハ配列，Mn系磁性材料，キュリー温度

1. はじめに

鉄道車両向けを含む空調分野では地球温暖化抑制のために代替フロン削減が求められている。それを実現するヒートポンプの基本サイクルの一つとして、気体（代替フロンに限らない）の圧縮・膨張のサイクルでなく、磁性材料に対する磁界の印加・除去のサイクルが考えられる。

磁界の印加・除去にほぼ比例して磁性材料が発熱・吸熱するという現象は、磁気熱量効果と呼ばれる¹⁾。磁気熱量効果を利用したヒートポンプが磁気ヒートポンプである。筆者らは、高い磁気熱量効果を利用するために、強い磁界が得られる磁氣的構造を検討した。また、磁気熱量効果は、磁性材料のキュリー温度（磁性転移温度、この温度以下において強磁性となる）付近において最大となる。このため、磁気ヒートポンプの動作温度範囲が狭くなる傾向にあり、車両空調への応用範囲が限定される可能性がある。そこで、筆者らは、この傾向を緩和可能な熱的構造を検討した。

このような基礎的検討に基づいて磁気ヒートポンプ試験を行い、車両空調への応用に向けて見通しを得た。

2. 磁氣的構造の検討

2.1 磁気ヒートポンプの基本構成

図1に磁気ヒートポンプの基本構成を示す²⁾。磁界の

印加・除去は永久磁石の回転によっている。ところで、磁性材料は固体であって流動することができないので、発熱・吸熱した磁性材料からの熱の移動は、磁性材料を充填した容器（磁性材料充填槽、図1における①から④まで）における熱交換媒体（室温において典型的なものは水）の流動によっている。磁性材料充填槽①を例にとると、磁極が水平な向きである図1上のときは、磁界の除去によって磁性材料が吸熱し、回転弁の切替えとポンプによって右から左へ流動する熱交換媒体が低温になる。そして、磁極が垂直な向きである図1下のときは、磁界の印加によって磁性材料が発熱し、回転弁の切替えとポンプによって左から右へ流動する熱交換媒体が高温になる。磁性材料充填槽②から磁性材料充填槽④までも同様である。この繰返しに伴って左側と右側にそれぞれ低温端と高温端が形成されるので、左側と右側にそれぞれ冷却部と排熱部を設置すれば、冷却用の磁気ヒートポンプが構成される。

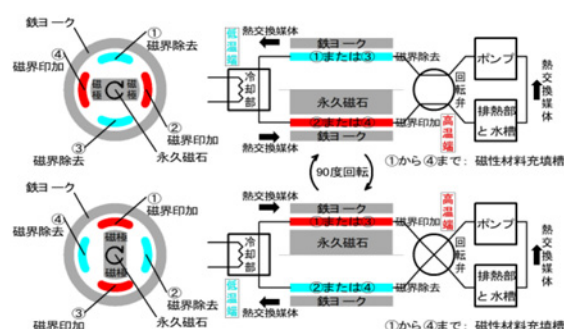


図1 磁気ヒートポンプの基本構成

* 浮上式鉄道技術研究部 低温システム研究室

** 大電株式会社

2.2 ハルバツハ配列の導入と磁気解析

永久磁石によって強い磁界が得られる磁氣的構造として、モータや発電機分野でハルバツハ配列が発展してきた³⁾。図2にハルバツハ配列の基本を示す。矢印の向きに磁化した永久磁石を90°回転させながら配列すると、紙面に垂直に磁化した永久磁石と紙面に平行に磁化した永久磁石が、紙面の前側において曲線（磁束線）のように磁界を強め合い、紙面の後側において磁界を打ち消し合う。このような配列を取ることで、紙面に垂直に磁化した永久磁石は配列の前側において永久磁石単体の時よりも強い磁極となり、配列の後側においては磁界がほぼゼロの領域だけが出現するようにできる。

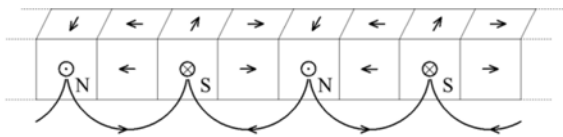


図2 ハルバツハ配列の基本
(矢印は磁化の向き、NとSは磁極)

図1の磁気ヒートポンプへ導入する例として、対のハルバツハ配列の永久磁石へ組み込む磁性材料充填槽が1本の場合の解析モデルを図3に示す。図1の永久磁石は磁極が径方向に並ぶのに対し、図3の永久磁石は磁極が軸方向に並ぶ。

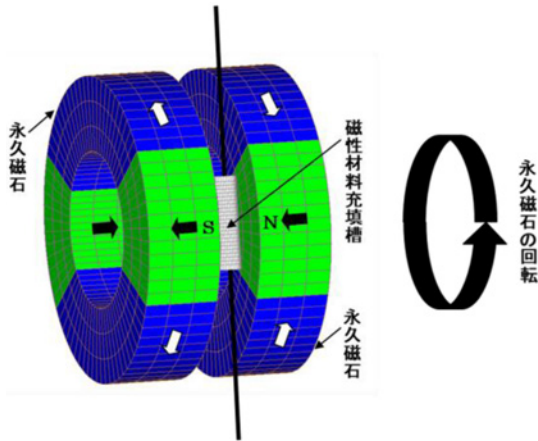


図3 対のハルバツハ配列の永久磁石へ組み込む磁性材料充填槽が1本の場合の解析モデル
(矢印は磁化の向き、NとSは磁極)

図4に図3の永久磁石の磁気解析結果を示す。1T程度の磁束密度を満たすためには、磁性材料充填槽の長さLを60mm以下にすべきであり、また、形状を円柱とすると、磁性材料充填槽の太さφを14mm以下にすべきである。これより、3.2節の熱解析において磁性材料充

填槽の長さL60mmと太さφ14mmを採用する。なお、磁気解析のソフトウェアはELF/MAGICを用いた⁴⁾。

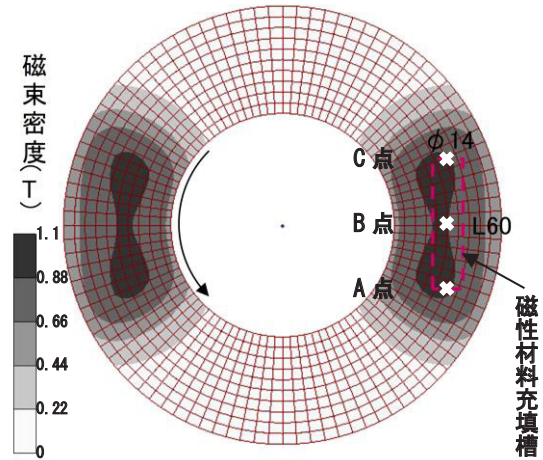


図4 永久磁石の磁気解析結果
(磁性材料充填槽の位置における磁束密度の分布、A点・B点・C点の各点は4.2節参照)

3. 熱的構造の検討

3.1 磁性材料充填槽の長さ方向への積層

磁気ヒートポンプの動作温度範囲が狭くなる傾向を緩和可能な熱的構造として、キュリー温度の異なる磁性材料を磁性材料充填槽の長さ方向へ積層することが考えられる⁵⁾。例として、長さ方向へ5積層した磁性材料充填槽を図5に示す。中央の磁性材料③のキュリー温度において、まず、磁界の印加によって中央の磁性材料③が発熱したときに右から左へ熱交換媒体を流動させる。次に、磁界の除去によって中央の磁性材料③が吸熱したときに左から右へ熱交換媒体を流動させる。この繰返しに伴って中央の磁性材料③の左側と右側にそれぞれ高温端と低温端が形成され、左隣の磁性材料②の温度が高くなり、右隣の磁性材料④の温度が低くなる。ここで、中央の磁性材料③より、左隣の磁性材料②のキュリー温度が高く、また、右隣の磁性材料④のキュリー温度が低ければ、左隣の磁性材料②と右隣の磁性材料④がそれぞれキュリー温度に至る。磁界の印加・除去と熱交換媒体の往復流動の繰返しに伴い、中央の磁性材料③と同様に高温端と低温端が左隣の磁性材料②と右隣の磁性材料④へ形成される。更に左隣の磁性材料①や更に右隣の磁性材料⑤についても同様である。このような積層配置とすることで、磁性材料充填槽の全長に渡って高温端と低温端が形成され、温度差を拡大できる。

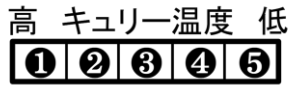


図5 長さ方向へ5積層した磁性材料充填槽

3.2 長さ方向へ積層した磁性材料充填槽の熱解析

図6に図4の磁性材料充填槽における高温端と低温端の位置を示す。また、表1に磁界変化の周波数の条件を、表2に熱交換媒体の流量の条件を、表3に磁性材料充填槽の長さ方向へ積層する条件を、それぞれ示す。ここで、磁性材料充填槽の位置における磁束密度の条件と磁性材料の条件を、それぞれ1TとMn系とした。

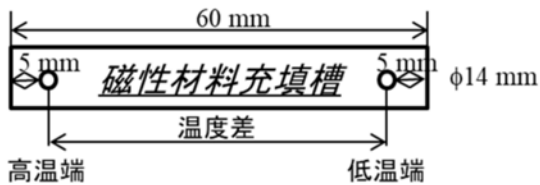


図6 磁性材料充填槽における高温端と低温端の位置

表1 磁界変化の周波数の条件

磁界変化の周波数 (Hz)
1.67
3.33
5.00

表2 熱交換媒体の流量の条件

熱交換媒体の流量 (liter/min)
0.25
0.50
1.00

表3 磁性材料充填槽の長さ方向へ積層する条件

積層数	キュリー温度の刻み(°C)
1 (積層なし)	なし
5	5
9	5

図7に長さ方向へ積層した図6の磁性材料充填槽の熱解析結果を示す。低温端と高温端の温度差の最大値が、積層数1(積層なし)の条件において7°Cであったのに対し、積層数5と積層数9の条件においては各々20°Cと36°Cに増大した⁶⁾。これより、磁気ヒートポンプの動作温度範囲を拡大できることが導かれた。なお、熱解析に用いたソフトウェアは Mathematica である⁷⁾。

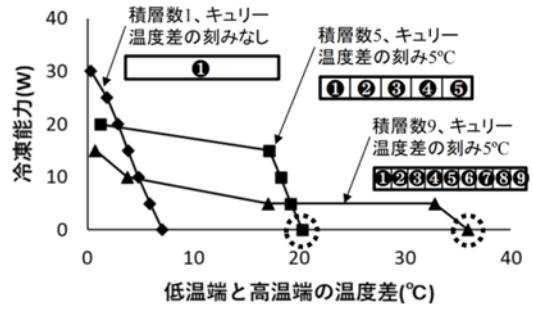


図7 長さ方向へ積層した磁性材料充填槽の熱解析結果

4. 磁気ヒートポンプ試験

3.2節の解析結果の一部を試験によって検証した。その内容を以下に示す。

4.1 試験機の構成

図3の永久磁石と図4の磁性材料充填槽による試験機の構成を図8に示す。磁性材料充填槽1本について、低温端と高温端の温度差が最大になる場合(図7において冷凍能力が0Wの場合)を想定し、図1における冷却部や排熱部などを省略した。このとき、磁界の印加・除去は、永久磁石をモータによって回転させて行うことにした。また、熱交換媒体の往復流動は、図1の回転弁とポンプより簡素なロッドレスシリンダにおいて、内側の弁体と磁氣的に結合した外側の可動部を電動スライダによって往復移動させて行うことにした。

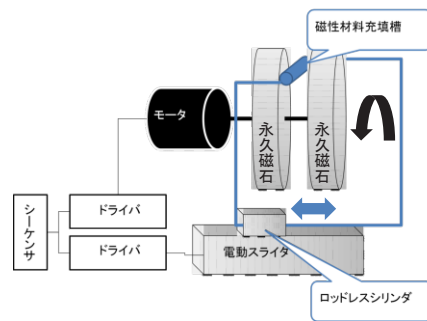


図8 永久磁石と磁性材料充填槽による試験機の構成

4.2 回転方式の変更

3.2節の熱解析は、図4の磁性材料充填槽の各点について、磁界の印加・除去と熱交換媒体の往復流動を一齐に行うものである。しかしながら、図3の永久磁石を連続回転させると、磁性材料充填槽の各点について、磁界の印加・除去のタイミングがずれてしまう。従って、磁性材料充填槽の全長に渡って磁気熱量効果を同時に利用

することはできない。図9に各点の磁束密度の履歴と規格化流量の対応（連続回転）を示す。磁性材料充填槽のA点（一端）・B点（中央）・C点（他端）の各点について流量は共通であり、規格化流量のタイミングをB点の磁束密度へ合わせると、A点やC点の磁束密度とは合わなくなってしまう。

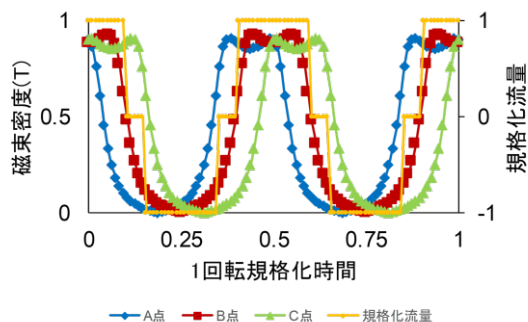


図9 各点の磁束密度の履歴と規格化流量の対応（連続回転）

そこで、磁性材料充填槽の各点について、磁界の印加・除去のタイミングずれを抑えるため、永久磁石を角度90°毎に断続回転させることにした。図10に各点の磁束密度の履歴と規格化流量の対応（断続回転）を示す。図9に比べ、規格化流量のタイミングがA点やC点の磁束密度とも合うようになってきている。また、磁束密度が矩形波になり、規格化流量との対応が良好になっている。

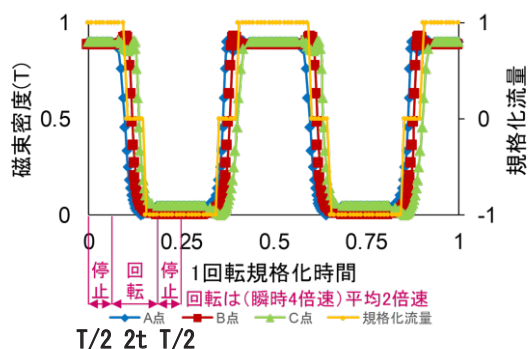


図10 各点の磁束密度の履歴と規格化流量の対応（断続回転）

4.3 回転速度の定義と磁束密度の計測

停止時間 T が含まれた平均角速度の回転速度換算を、断続回転の回転速度と定義する。そして、図10のように停止時間 T を最大角速度到達時間 t の2倍として、断続回転の回転速度 50rpm の理想的な運転パターンを表4に示す。

しかしながら、一定角加速度 ω/t は図8の試験機の最大角加速度を超えることができない。表5に図8の試験

機の回転に関する仕様を示す。

そこで、一定角加速度 ω/t は余裕を持たせて $7500\%/s^2$ とし、併せて停止時間 T を短く 80ms とし、断続回転の回転速度 50rpm の現実的な運転パターンを表6に示す。

表4 断続回転の回転速度 50rpm の理想的な運転パターン

最大角速度 ω ($^\circ/s$)	1200
回転速度換算 (rpm)	200
平均角速度 $\omega/2$ ($^\circ/s$)	600
回転速度換算 (rpm)	100
最大角速度到達時間 t (ms)	75
一定角加速度 ω/t ($^\circ/s^2$)	16000
最大角速度到達角度 $\omega t/2$ ($^\circ$)	45
停止時間 $T=2t$ が含まれた平均角速度 $\omega t/(2t+T) = \omega/4$ ($^\circ/s$)	300
回転速度換算 (rpm)	50

表5 試験機の回転に関する仕様

モータの最大トルク (Nm)	57.3
永久磁石と磁性材料充填槽の吸引トルク (Nm)	5.4
加速に有効なトルク (Nm)	51.9 (=57.3-5.4)
永久磁石の慣性モーメント (kgm^2)	0.3
最大角加速度 ($^\circ/s^2$)	9920 (=51.9/0.3*180/ π)

表6 断続回転の回転速度 50rpm の現実的な運転パターン

最大角速度 ω ($^\circ/s$)	822 =1200*(15/32) ^{1/2}
回転速度換算 (rpm)	137
平均角速度 $\omega/2$ ($^\circ/s$)	411 =600*(15/32) ^{1/2}
回転速度換算 (rpm)	68
最大角速度到達時間 t (ms)	110 =75*(32/15) ^{1/2}
一定角加速度 ω/t ($^\circ/s^2$)	7500 =16000*(15/32)
最大角速度到達角度 $\omega t/2$ ($^\circ$)	45
停止時間 $T=80ms$ が含まれた平均角速度 $\omega t/(2t+T)$ ($^\circ/s$)	300
回転速度換算 (rpm)	50

なお、図8の試験機は、永久磁石を1回転させる間に磁界の印加・除去を2回ずつ行うので、回転速度50rpmは、表1における磁界変化の周波数1.67Hzに相当する。

図11に図8の試験機における磁束密度の計測状況を示す。図4の磁性材料充填槽のB点における磁束密度をガウスメータによって計測した。

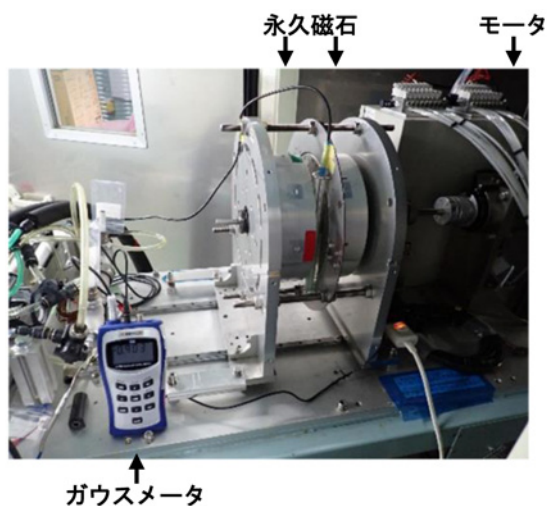


図11 試験機における磁束密度の計測状況

まず、連続回転の場合の磁束密度を計測した。図12にB点における磁束密度の履歴の計測結果（連続回転）を示す。その最大値は0.9T程度に留まったが、Mn系の磁性材料充填槽であれば磁化が加わることによって1割程度は増えるので、3.2節の熱解析における磁束密度の条件が満たされると考えられる。また、回転速度が10rpmのときは波形が図9のようになったが、回転速度が上がるに連れて時間的に先のピークが歪んだ。その歪みは回転方向に依らなかったため、磁界変化に伴う渦電流の影響を受けていると考えられる。

次に、断続回転の場合の磁束密度を計測した。図13にB点における磁束密度の履歴の計測結果（断続回転その1）を示す。表6の回転速度50rpmについて、連続回転と同じく、その最大値は0.9T程度に留まった。また、時間的に先のピークが歪み、その歪みが回転方向に依らないことも、連続回転と同じだった。しかしながら、連続回転と異なり、波形が図10のような矩形へ近付いた。図14にB点における磁束密度の履歴の計測結果（断続回転その2）を示す。表6において一定角加速度 $7500^\circ/s^2$ を保って停止時間 T を長くすることに依り、回転速度が下がると波形が更に矩形へ近付いた。これより、回転速度と磁束密度の矩形波はトレードオフの関係にあることがわかる。

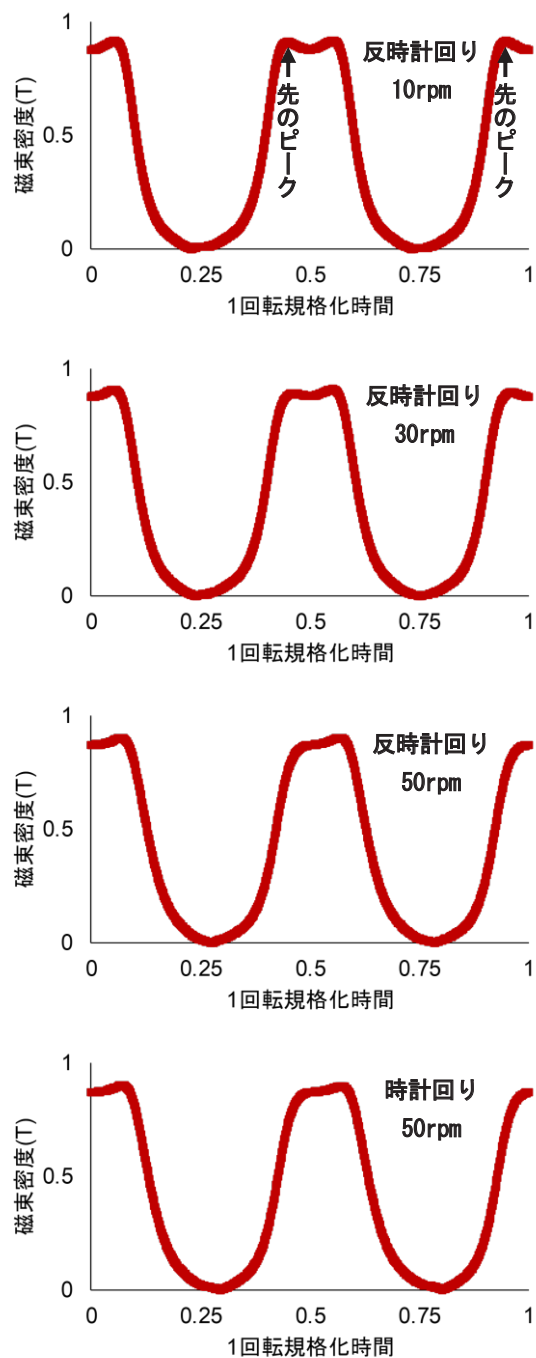


図12 B点における磁束密度の履歴の計測結果（連続回転）

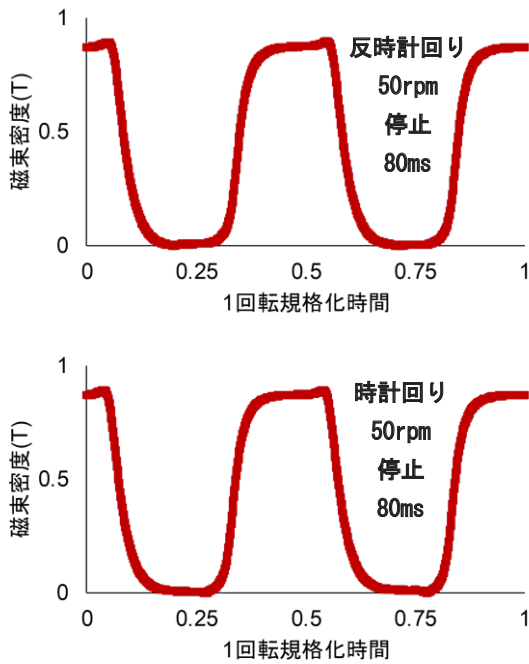


図 13 B 点における磁束密度の履歴の計測結果 (断続回転その 1)

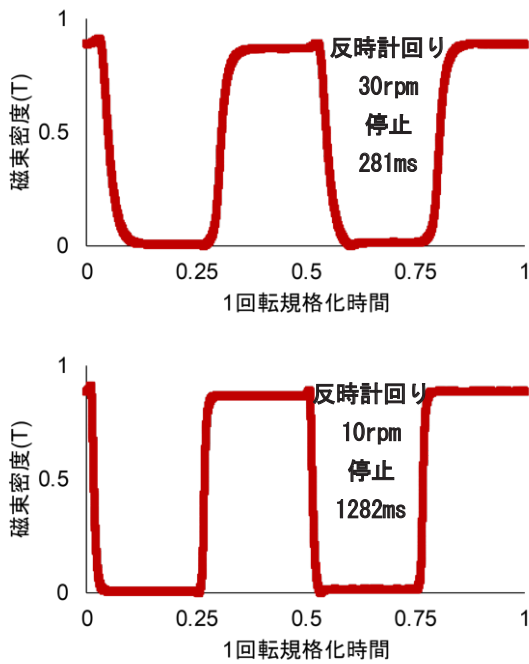


図 14 B 点における磁束密度の履歴の計測結果 (断続回転その 2)

4.4 流量波形の定義と試験機の制御

図 15 に流量波形の定義を示す。1 回転規格化時間の 4 分の 1 について、流量の立上り時間、規定の流量である時間、流量の立下り時間、流量がゼロの時間として各々 9%、72%、9%、10% を配分した。

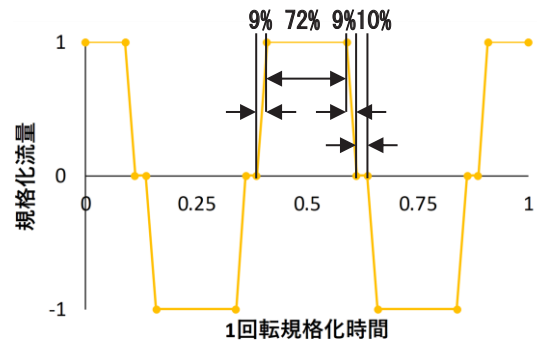


図 15 流量波形の定義

図 16 に図 8 の試験機の制御 (第 1・第 2 段階) を示す。第 1 段階として、磁極が角度 180° から角度 90° へ移動するように、永久磁石が反時計回りに回転を開始する。これより、磁性材料は磁界が印加されて高温になる。第 2 段階として、予め設定する角度 (180° より小さくて 90° より大きい) に磁極が到達したら、ロッドレスシリンダは往復移動用の一端 Pos0 へ向かって移動を開始する (やがて永久磁石は回転を完了)。磁性材料充填槽内の熱交換媒体は下側への流動を開始する。磁性材料が高温になっているので、磁性材料充填槽は下側が高温になる。

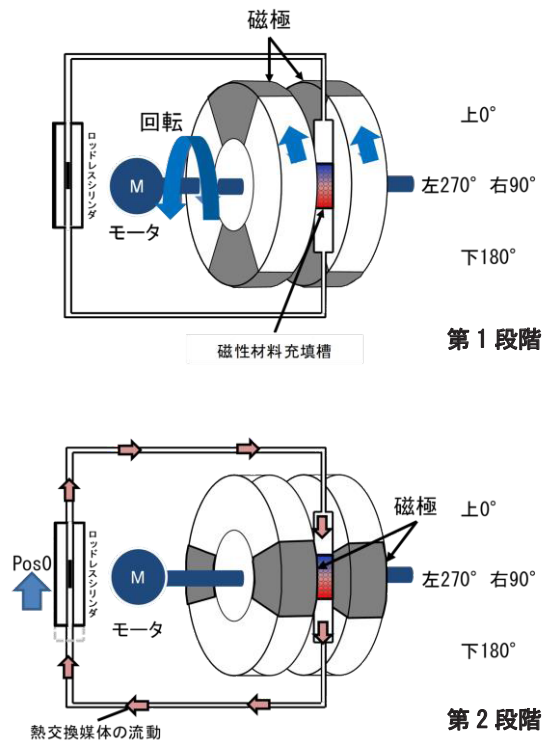


図 16 試験機の制御 (第 1・第 2 段階)

図 17 に図 8 の試験機の制御 (第 3・第 4 段階) を示す。第 3 段階として、磁極が角度 90° から角度 0° へ移動す

るように、永久磁石が反時計回りに回転を開始する。これより、磁性材料は磁界が除去されて低温になる。第4段階として、予め設定する角度（90°より小さくて0°より大きい）に磁極が到達したら、ロッドレスシリンダは往復移動用の他端 Pos1 へ向かって移動を開始する（やがて永久磁石は回転を完了）。磁性材料充填槽内の熱交換媒体は上側への流動を開始する。磁性材料が低温になっているので、磁性材料充填槽は上側が低温になる。

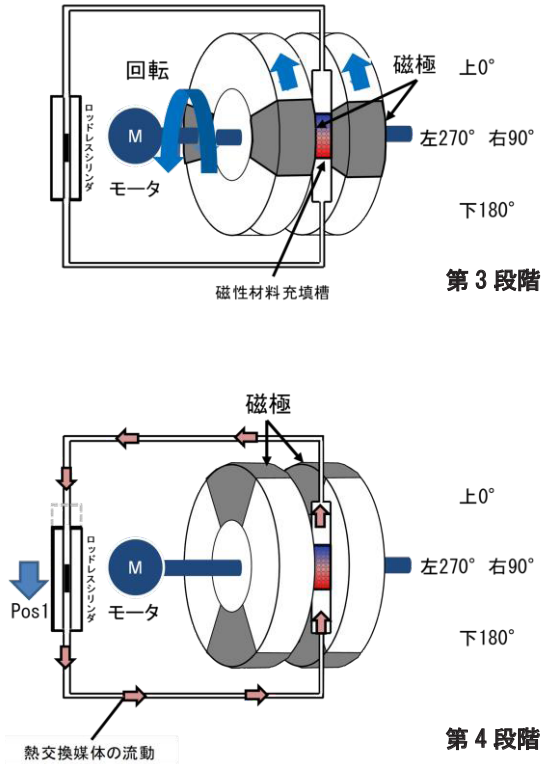


図 17 試験機の制御（第3・第4段階）

4.5 磁性材料充填槽の作製

図 18 に積層数 5（キュリー温度は 40℃から 20℃まで 5℃刻み）の磁性材料充填槽を示す。磁性材料を Mn 系とした。そして、両端からの漏れ及び隣同士での混合を防ぐべく、非磁性の金属網によって各層を仕切った。高温端と低温端のバランスを監視できるように、熱電対を高温端と低温端へ加えて中間部へも設けた。

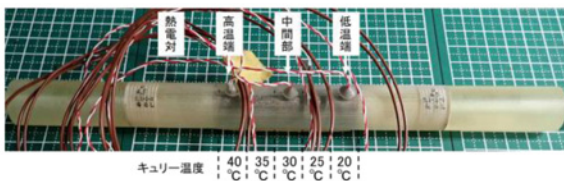


図 18 積層数 5（キュリー温度は 40℃から 20℃まで 5℃刻み）の磁性材料充填槽

4.6 予備試験と本試験

図 8 の試験機において、反時計回りの断続回転による磁気ヒートポンプ試験を行った。積層数 5 について、低温端と高温端の温度差が最大になる場合（図 7 において冷凍能力が 0W の場合、1 節参照）として、回転速度 50rpm（磁界変化の周波数 1.67Hz、3 節参照）と、表 2 における熱交換媒体の流量 0.25liter/min を設定した。

まず、予備試験として、磁性材料を実績のある Gd 系の積層数 2（キュリー温度は 20℃と 10℃）とした。そして、低温端と高温端の温度差が最大になるような、図 16 の Pos0 への移動開始角度を求めた。図 17 の Pos1 への移動開始角度は、Pos0 への移動開始角度から 90°減らして求めた。なお、予備試験において、モータへの過負荷が懸念されたので、表 6 において一定角加速度 7500°/s² を保って停止時間 T を長く 115ms とすることに依り、下げた回転速度 45rpm を再設定した。図 19 に磁性材料を Gd 系とした予備試験結果を示す。Pos0 への移動開始角度 156°～161°において、低温端と高温端の温度差が最大 23℃になった。但し、このときの周辺温度は、12℃～14℃であり、冷却用の車両空調への応用に適する温度でない。

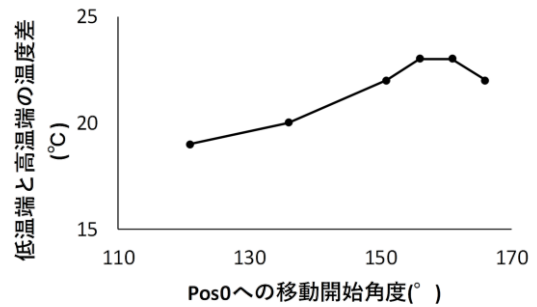


図 19 磁性材料を Gd 系とした予備試験結果

次に、本試験として、磁性材料を図 18 の Mn 系の積層数 5 とした。そして、図 19 の予備試験結果を参考にして Pos0 と Pos1 への移動開始角度を設定した。図 20 に磁性材料を Mn 系とした本試験状況とその結果を示す。Pos0 への移動開始角度 161°において、低温端と高温端の温度差が最大 17℃になり、図 7 の熱解析結果 20℃をやや下回った。本試験結果が熱解析結果をやや下回った原因は、回転速度を 50rpm から 45rpm へ下げて再設定したためと、回転速度が下がっても磁束密度の矩形波への近付きが不完全であったためと考えられる。それでも、このときの周辺温度は、30℃であり、冷却用の車両空調への応用に適する温度である。

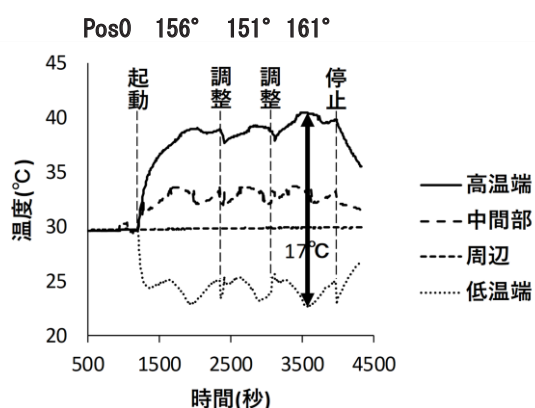
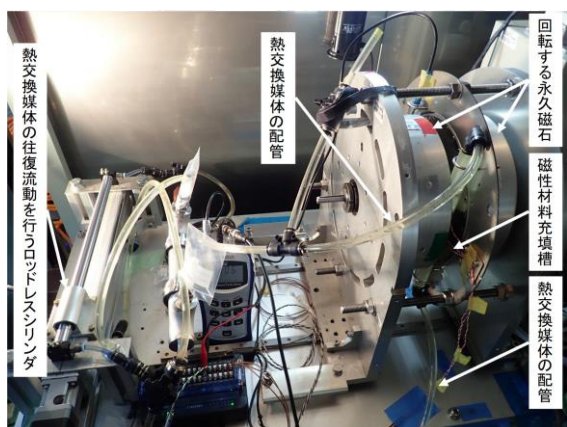


図 20 磁性材料を Mn 系とした本試験状況とその結果

5. まとめ

高い磁気熱量効果を利用するために、強い磁界が得られる磁氣的構造を検討した。また、磁気ヒートポンプの動作温度範囲が狭くなる傾向を緩和可能な熱的構造を検討した。このような基礎的検討に基づき、キュリー温度の異なる Mn 系の磁性材料を磁性材料充填槽の長さ方向へ 5°C 刻みで 5 積層し、冷凍能力が 0W の場合の磁気ヒートポンプ試験を実施した。その結果、周辺温度が冷却用の車両空調への応用に適する 30°C において、低温端と高温端の温度差 17°C が得られ、熱解析結果 20°C をやや下回った。やや下回った原因は、断続回転の回転速度と磁束密度の矩形波が理想的でなかったためと考えられる。これにより、熱解析結果の妥当性を確認し、磁気ヒートポンプの動作温度範囲が拡大し得ることを明らかにした。こうして、車両空調への応用に向けて課題の一つに解決の目途が得られた。今後は、冷凍能力が 0W 以外の場合の磁気ヒートポンプ試験を実施する予定である。

謝 辞

本研究の一部は、科学技術振興機構・戦略的創造研究推進事業（先端的低炭素化技術開発 ALCA）の助成を受けて行ったものである。ここに謝意を表する（グラント番号：JPMJAL1408）。

また、上記事業の研究課題の研究代表者である学校法人明治大学の川南 剛教授、主たる共同研究者である国立大学法人九州大学の和田 裕文教授、国立大学法人東京工業大学の岡村 哲至教授、大学共同利用機関法人自然科学研究機構の平野 直樹教授、地方独立行政法人北海道立総合研究機構の平野 繁樹主査、サンデン・アドバンストテクノロジー株式会社の斐 相哲担当部長の各位には、議論の機会をいただいた。ここに謝意を表する。

文 献

- 1) 大塚泰一郎, 橋本巍洲: 磁気冷凍, 未踏, 1984
- 2) 高橋政彦, 栗山透, 伊藤孝治, 野村俊自, 平野直樹, 長屋重夫: 永久磁石を用いた室温磁気冷凍機の開発 (2) - 回転型磁気冷凍機 -, 第 68 回低温工学・超電導学会講演概要集, p.268, 2003
- 3) 森下明平: 永久磁石ハルバツハ配列界磁の特徴と電気機器への応用, ケミカルエンジニアリング, Vol.58, No.10, pp.26-31, 2013
- 4) メーカーのウェブサイト: <http://www.elf.co.jp/> (参照日: 2020年7月27日)
- 5) 宮崎佳樹, 脇耕一郎, 池田和也: 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, 鉄道総研報告, Vol.31, No.1, pp.35-40, 2017
- 6) Y.Miyazaki, K.Waki, T.Onishi, "Numerical analyses of a Multi-layered AMR with Manganese-based Materials," presented at the Thermag VIII, Darmstadt, Germany, September 19-22, 2018.
- 7) メーカーのウェブサイト: <https://www.wolfram.com/> (参照日: 2020年7月27日)