

- 鉄道一般
- 車両
- 軌道
- 構造物
- 防災
- 電力
- 信号通信情報
- 材料
- 環境
- 人間科学
- 浮上式鉄道

磁気を利用して 空気を冷やす

近年、環境破壊への社会的な関心が高まり、鉄道分野においても省エネルギー化などの環境負荷低減が図られています。

冷房機器では、冷媒として使用されてきたフロンのおゾン層破壊や代替フロンの温室効果への影響が明らかになっています。そのため早急な技術的改善が望まれており、自然冷媒を用いた冷凍サイクルなどの研究が行われています。こうした情勢の中で、ノンフロンで高効率を期待できる磁気冷凍が注目を集めており、鉄道総研においても車載用空調への適用を目指し、研究開発を進めています。



宮崎 佳樹
Yoshiaki Miyazaki
浮上式鉄道技術研究部
低温システム研究室
副主任研究員
[専門分野] 低温工学

先人の知恵

ヒトが火を使い始めたのはいつからか、考古学的にはまだ決着していないようですが、少なくとも数万年から十数万年前といわれています。一方、低温を作り出し、利用するようになったのはこれに比べるとずっと最近の話です。紀元前2000年頃、古代エジプトでは素焼きの壺を団扇で扇ぎ、冷水を得ていました。インドでは、夜の間、敷藁に水を撒いておくことで氷を作る技術があったといえます¹⁾。

水が液体から気体に変化するのには、液体に働く分子間力に打ち勝って気体になるためのエネルギーが必要です。このエネルギーは気化熱と呼ばれています。素焼きの壺は多孔質のため、中の水は徐々に壺の表面に染み出します。表面に染み出た水が蒸発する際に、壺から熱エネルギーを得て蒸発します。熱エネルギーを奪われた壺の温度は下がり、中の水を冷却します。外から団扇で扇ぐことで、水の蒸発を促進しているのです。氷が水になる際にもやはり氷の分子間力に打ち勝つためのエネルギーが必要で、こちらは融解熱と呼ばれます。融解熱や気化熱のように物

質が相変化をする際に必要な熱エネルギーを潜熱と呼んでいます。

ところで、水が蒸発するときには、分子間力によって集合していた水の分子がバラバラになり空間に広がってきます。多数の水分子の集団が、より乱雑な状態へ変化していくこのような現象を、熱力学では「エントロピーが増大する」といいます。自然現象はエントロピーが増大する方向、すなわち乱雑さが増す方向に進んでいきます。

蒸気圧縮式冷凍サイクル

素焼きの壺はエントロピー増大の法則を上手に利用した冷却方法です。しかしその冷却効果は、中の水が蒸発しきってなくなってしまうと終わりです。一方、サイクル運転により連続的に機械仕事を行い、低温を得ることができる装置が冷凍機です。

今日の冷凍機の最も一般的な冷凍サイクルは蒸気圧縮式冷凍サイクル²⁾です。その冷却の原理として素焼きの壺と同様に気化熱が利用されています。蒸気圧縮式冷凍サイクルの構成要素を図1に示します。主な構成要素は圧縮機、凝縮器、膨張弁、蒸発器および冷

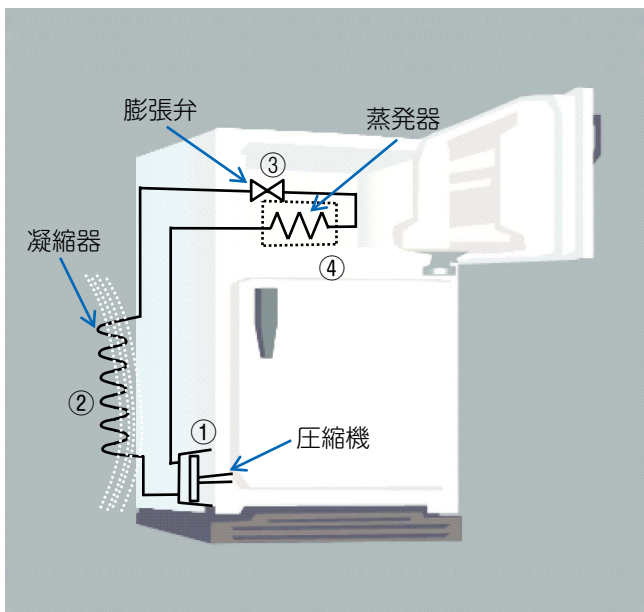


図1 標準的な冷凍機の構成

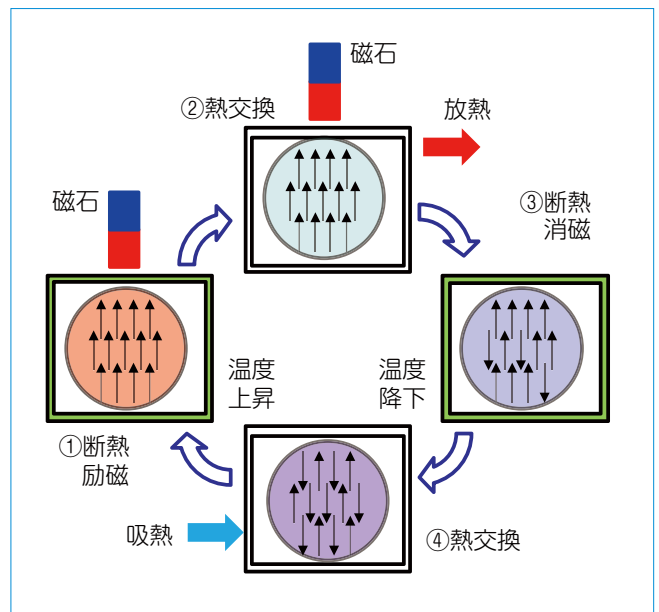


図2 磁気冷凍

媒が循環する管状流路です。

以下に、理想的な上記圧縮式冷凍サイクルについて説明します。

- ①断熱圧縮過程：低圧の飽和蒸気状態冷媒が圧縮機で可逆断熱圧縮され、高圧の加熱蒸気となります。
- ②凝縮過程：①の圧力のまま凝縮器で放熱すると、冷媒が飽和蒸気を経て凝縮を開始し、飽和液となります。この過程で冷媒のエントロピーが減少します。
- ③絞り膨張過程：冷媒が膨張弁を通過して低圧の湿り蒸気となります。ジュール・トムソン効果(☞参照)により温度が低下します。
- ④蒸発過程：③の圧力のまま蒸発器で吸熱すると、冷媒が蒸発して飽和蒸気となります。この過程で冷

媒のエントロピーが増加し、庫内から熱を吸収します。

素焼きの壺は、自然条件の中でエントロピーの増大を利用していますが、冷凍機は機械仕事を入力することによって積極的にエントロピーの小さい状態を作り出し、その状態からエントロピーが増大する過程を冷却に利用しています。

冷凍・冷房機器では、冷媒として使用されてきたフロンのおゾン層破壊や代替フロンの温室効果への影響が明らかになりました。そのため現在、早急な技術的改善が望まれており、自然冷媒を用いた冷凍サイクルなどの研究が行われています。

磁気を利用して空気を冷やす

既述の蒸気圧縮式冷凍サイクルとは異なる、磁石と磁性体を利用した新しい冷凍サイクルが磁気冷凍³⁾です。

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す。図2に磁気冷凍サイクルの模式図を示します。強磁性体は

小さな磁石が集まった性質(電子のスピン)を持っており、①強磁性体に磁石を近づける(励磁といいます)などして磁化すると、スピンの向きをそろえてエネルギーの低い状態となります。磁気エントロピー(スピンの向きの乱雑さ)は減少し、余った磁気系のエネルギーを放出します。励磁が外部と熱交換しない断熱状態であった場合には、強磁性体の温度が上昇します。その後の過程において、②外部と熱交換すれば強磁性体は放熱することになります。

次に、③強磁性体から磁石を遠ざける(消磁といいます)すると、強制的にそろえられていたスピンの向きはバラバラとなって磁気エントロピーは増加しようとし、消磁が断熱的であった場合には、そのエネルギーは強磁性体自身から提供され、強磁性体の温度が下降することになります。その後の過程において、④外部と熱交換すれば強磁性体は吸熱して初期状態に戻ります。なお、磁気冷凍に用いられる磁気エントロピー変化が大きな磁性体を「磁気作業物質」と呼んでいます。

蒸気圧縮式冷凍では、断熱圧縮され放熱した冷媒は、断熱膨張過程で低温

☞ ジュール・トムソン効果

気体が断熱管路の絞り部分を通ると膨張します。通過前後でエンタルピー(流体の持つエネルギー)は変化しませんが、圧力降下・体積膨張にともない温度変化が生じます。気体が膨張する際に分子間力に対して仕事をするためです。この現象をジュール・トムソン効果といいます。

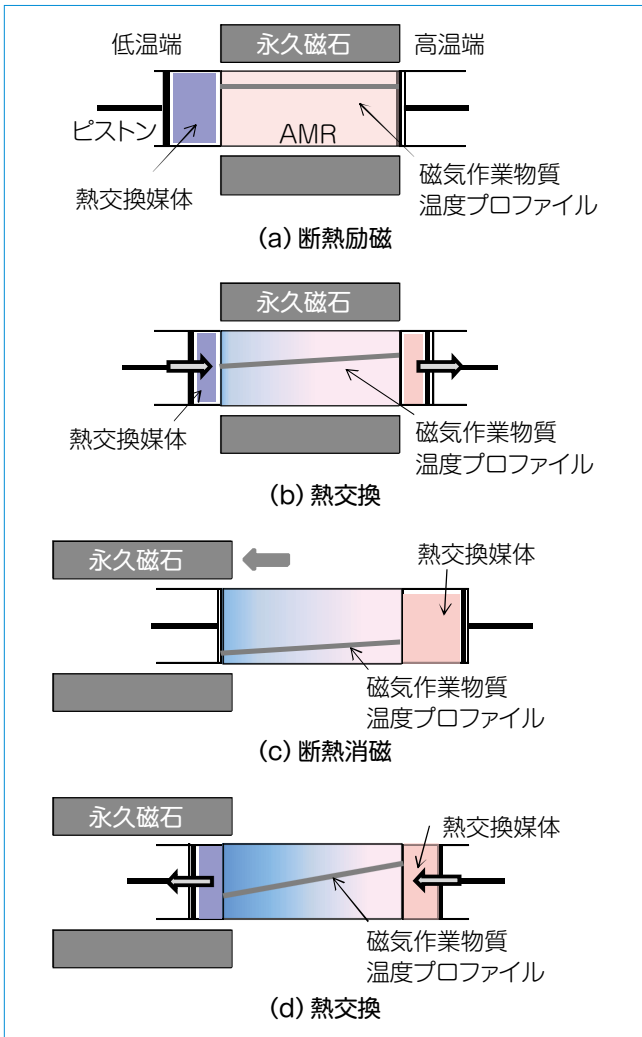


図3 AMRサイクルの原理

を生成します。低温となった冷媒はエントロピーを増加させながら吸熱をし、冷凍能力を発現します。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します。断熱膨張に対応するのは断熱消磁で、この過程で磁気系の温度が低下します。磁気冷凍が蒸気圧縮式冷凍と異なるのは、磁気熱量効果による磁気系の温度変化が生じ、次に磁気作業物質自身の温度変化となって現れることです。

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、磁気系に温度変化が生じて、磁気作業物質自身の温度変化は小さくなります。そのため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ってしま

います。したがって、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必要があります。また、磁気作業物質の動作点は、その物質において強磁性が常磁性に変化する転移温度（キュリー温度）付近に限られるため、空調に要求される動作温度幅を得るためには、キュリー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ます。

一方、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らによって提案された、蓄熱サイクルを用いたAMR (Active Magnetic Regenerator) と呼ばれる冷凍方式です。AMRでは磁気作業物質である磁性体を蓄熱器として用い、磁

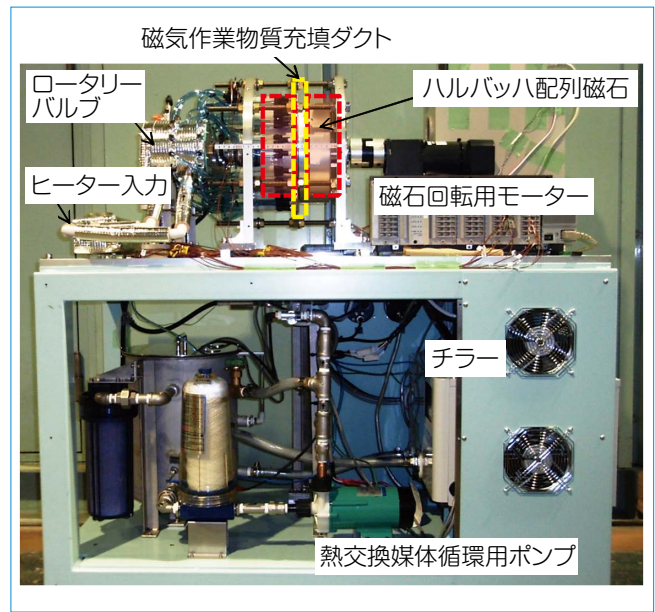


図4 磁気冷凍システム

気熱量効果による磁気作業物質の温度変化を蓄積させて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います。

AMRの動作原理を図3に示します。図3 (a) において、磁気作業物質は断熱的に励磁され、温度が上昇します。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、温度勾配が生じます。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持したまま全体的に低下します。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します。

AMRシステムでは、磁気熱量効果により生じる温度変化がサイクルが進むにつれ拡大していきます。

磁気冷凍の特徴

磁気冷凍は、冷媒にフロンや代替フロンガスを用いない新しい冷凍方式であり、蒸気圧縮式冷凍サイクルと比較して次のような特徴を持っています。

- オゾン層破壊や温暖化に関わる物

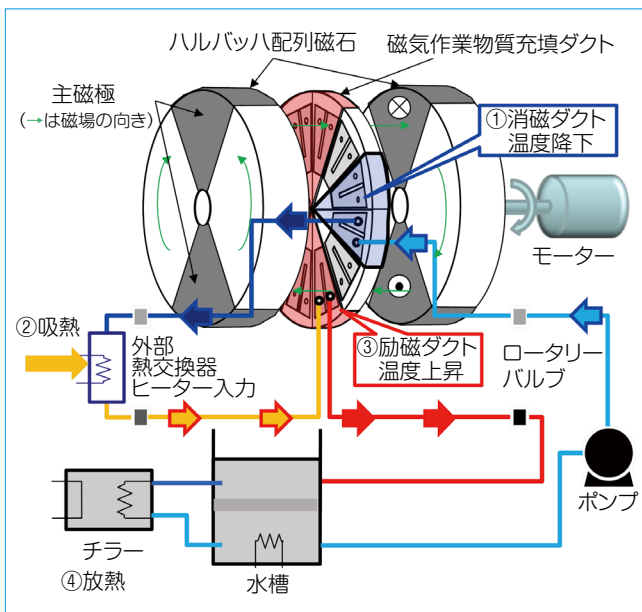


図5 磁気冷凍システムフロー

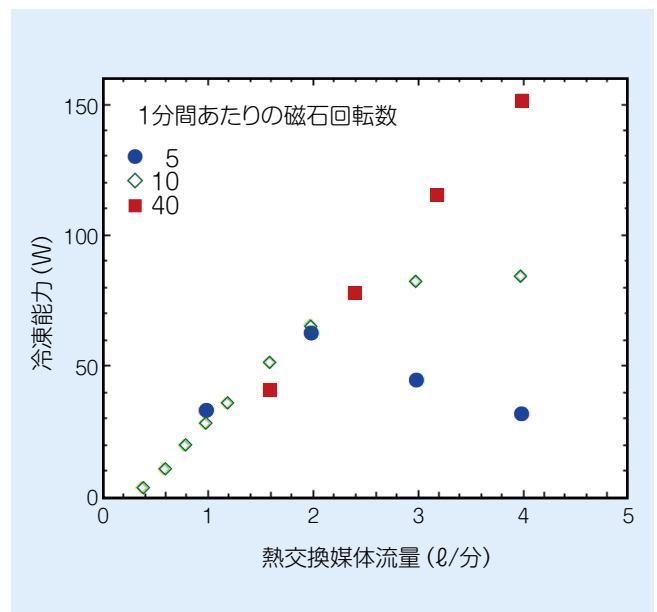


図6 磁気冷凍機の冷凍能力

- 質を用いないため、環境にやさしい。
- 可燃性のイソブタンや高圧のCO₂などを用いず、安全である。
- エントロピー密度が高いため、高効率化が可能であるとともに装置がコンパクトにできる。
- コンプレッサーを用いないため、振動、騒音が少ない。

図4に鉄道総研で開発中の磁気冷凍システムの外観を、図5にシステムフローを示します。磁気作業物質に磁場を与える永久磁石には、強力なネオジム磁石を用いました。永久磁石は、ハルバツハ配列(☞参照)と呼ばれる特定の方向の磁場(この場合主磁極)を強めることができます。ハルバツハ配列させた永久磁石は、径

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ています。図5に緑矢印でそれぞれの磁場の向きを示しています。

図2に示した①の過程で、熱交換媒体となる流体は初期温度でポンプから消磁中の磁気作業物質が充填されたダクトへ移送され、熱交換を行うことで温度が低下します。熱交換により温度が低下した流体は、②の過程で環境(例えば部屋内や冷蔵庫内)から熱を吸収し、温度上昇します。実験ではヒーターにより熱を与えることでそれを模倣しました。③の過程では今度は励磁中の磁気作業物質充填ダクトへ移送され、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に調整され、再びポンプにて消磁中のダクトへ移送されます(④→①の過程)。磁気作業物質を充填したダクトは複数ありますが、各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ています。

図6はこの冷凍機の冷凍能力を示します。小型の磁気冷凍機で、冷凍能力

は150W程度ですが、この冷凍機で得られた知見をもとに、現在kW級の磁気冷凍システムの開発を進めています。

おわりに

蒸気圧縮式冷凍機に用いられる代替フロン等については、温室効果が大きいと大幅に排出抑制・削減される方向⁴⁾であり、より環境影響の少ない空調システムの研究開発は急務となっています。室温磁気冷凍の研究開発は、新しい磁気作業物質の開発が進められるなど活発化し、次世代を担う冷凍システムとして期待が集まっています。

本研究の一部は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託業務により実施しました。[RRR]

文献

- 1) 萩原宏康：低温工学概論 超伝導技術を支えるもの、東京電機大学出版局、1999
- 2) 平田哲夫他：基礎からの冷凍空調、森北出版、2007
- 3) 橋本魏洲他：夢の磁気冷凍技術、工業調査会、1983
- 4) 経済産業省ホームページ

☞ ハルバツハ配列

矢印の向きに磁化した磁石を90°回転させながら配列すると、前側で曲線(磁束線)のように磁場を強め合い、後側で磁場を打ち消し合うため磁石単体よりも強い磁場とほぼゼロ磁場が、周期的に得られます。



ハルバツハ配列の基本