

令和 6 年 6 月 25 日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2022～2023

課題番号：22K18858

研究課題名（和文）太陽熱を利用した無電力・無重力冷凍サイクルの原理検証

研究課題名（英文）Principle Verification of a Power-Free, Zero-Gravity Refrigeration Cycle Using Solar Heat

研究代表者

長野 方星（Nagano, Hosei）

名古屋大学・工学研究科・教授

研究者番号：10435810

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、これまでに太陽熱入力により制約を受けていた宇宙機の熱設計において、太陽熱を積極的に吸収し得られる高温熱源から冷熱源をパッシブで（完全無電力）で作出す新しい冷凍サイクルの原理を確立し、その物理モデルを独自に構築した。構築した物理モデルを基に地上で動作する冷凍機の試作機を設計・製作し、性能試験を実施することでモデルの妥当性確認を行った。検証を行った物理モデルを基に、地球の1/6程度の低重力環境である月面において太陽熱入射のみで駆動するパッシブ冷凍機の成立性を確認するとともに基礎設計に向けたデータを取得した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

太陽エネルギーは宇宙空間に存在する貴重なエネルギー源であるにもかかわらず、宇宙機熱設計においては排除すべき存在であるが、太陽光熱は有用なエネルギー資源であるので太陽光熱を積極利用した新しい熱制御概念が求められている。太陽熱を用いた直接冷却手法が創出され確立されれば、宇宙機の省エネルギー化、適用可能性の拡大につながるため、宇宙機熱制御工学の体系の変革、ならびに冷凍工学分野への新たな原理提案につながるため研究成果の学術的意義や社会意義は大きい。

研究成果の概要（英文）：In this study, we established the principle of a new refrigeration cycle that produces a cold heat source from a high-temperature heat source obtained by absorbing solar heat for the thermal design of spacecraft, and developed an original physical model of this cycle. Based on the physical model, we designed and built a prototype of a refrigeration machine that operates on the ground, and conducted performance tests to confirm the validity of the model. Based on the validated physical model, we confirmed the feasibility of a passive refrigerator driven only by solar heat input on the lunar surface, which has a low gravity environment of about 1/6 that of the Earth, and obtained numerical data for the basic design.

研究分野：航空宇宙工学，船舶海洋工学およびその関連分野

キーワード：冷凍機 熱制御 無電力駆動

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、月面探査機や宇宙機の電子機器の高密度実装化に伴い、宇宙機器の放熱が重要な課題となっている。現状、放熱は太陽の当たらない面から3Kの深宇宙にふく射で放熱されるが、太陽が当たる面は断熱、場合によってはサンシールドによって熱入力を極限まで抑える施策がなされている。したがって、放熱面は太陽熱入射の多い面には取付ることができないため、熱設計の自由度が低いことが課題であった。そこで、本研究では太陽熱を積極的に吸収し、得られる高温熱源から冷熱源をパッシブ(無電力)に作り出す冷凍機サイクルの原理を確立し、地上で実証することを研究目的とする。宇宙分野で用いられる冷凍サイクルとして、スターリング冷凍機などがあるが、大電力を必要とすることがボトルネックであった。そこで、本研究では電力を一切必要とせず、熱入力と重力のみで駆動することができる吸収冷凍サイクル(無電力・拡散型吸収冷凍システム)に着目し、その物理的メカニズムを明らかにし、独自に数値モデルを構築することで、地球の1/6程度の低重力環境である月面においても、太陽熱入射のみで駆動する冷凍機的设计に向けた基礎データを取得することを目的とする。

2. 研究の目的

提案する無電力・拡散型吸収式冷凍システムの構成を図1に示す。無電力・拡散型吸収式冷凍システムは発生器(generator)、凝縮器(condenser)、蒸発器(evaporator)、吸収器(absorber)、リザーバ(reservoir)から構成されている。作動流体には冷媒(refrigerant)、冷媒を吸収するための吸収液(absorbent)、補助ガス(auxiliary gas)の3種類が封入されている。動作原理は以下の通りである。発生器では冷媒と吸収液の混合液を加熱することで、冷媒単体時よりも高沸点側で冷媒蒸気のみを取り出すことができる。これは、蒸気圧縮式冷凍機におけるコンプレッサーによる圧縮効と同等の効果をj得ることができる。その後、冷媒蒸気は凝縮器に送られ周囲に排熱することで凝縮し、その凝縮液は凝縮器下部に設置してある蒸発器へ送られる。蒸発器は補助ガスが封入されているため、冷媒の凝縮液が蒸発器に入ることで冷媒の分圧が急激に低下(沸点低下)し、凝縮液は周囲温度近傍で再び蒸発する。このときに蒸発器は外気からの吸熱反応により冷やされることで冷却(冷凍)効果が得られる。冷却温度は冷媒分圧の低下割合に応じて変化する。蒸気圧縮式冷凍機では、冷媒をポンプなどの強力な動力を用いて圧力損失の大きい膨張弁を通過させることで、冷媒圧力を低下(沸点低下)させる冷凍効果を得るが、本冷凍サイクルでは、冷媒を補助ガスと混合させることで分圧低下を誘起させるため、ポンプなどの動力源を必要とせず、50cm程度の重力水頭で駆動させることができるのが大きな強みである。蒸発器で生成された冷媒蒸気は、補助ガスと混合し混合ガスとなることで密度が大きくなり、下部に設置してあるリザーバに流下する。リザーバには冷媒濃度が低い吸収液があるため、混合ガス内の冷媒蒸気の大部分は吸収液に吸収される。その結果、混合ガスの密度は小さくなるため、蛇行した吸尿管を上昇しながら蒸発器へ還流する。吸尿管の中間部には、発生器で冷媒が蒸発した後の冷媒濃度が低くなった吸収液がサイフォンにより流れ込み、その後、吸尿管を通りリザーバに還流するが、その際に下部のリザーバから冷媒濃度の低い混合ガスが上昇してくるため対向流となる。対向流の気液界面で混合ガスに含まれる冷媒成分は、吸尿管から流下する吸収液に吸収されるため、純度の高い補助ガスが蒸発器に還流する。したがって、補助ガスは、蒸発器とリザーバ間をサーフォンにより自然循環する。リザーバにある冷媒濃度が高い吸収液は、サイフォン効果により発生器へ流れ込み、発生器で熱を受けることで冷媒成分のみを凝縮器に送る。このように、無電力・拡散型吸収式冷凍システムは3種類の作動流体を、それぞれサーモサイフォン効果で循環させることにより、無電力で冷凍を実現できる。

無電力・拡散型吸収式冷凍システムのモデル化には、3種流体の熱水力学挙動(ただし、内2種流体は相変化をするので)、結果として5流体モデルとして取り扱わなければならない。熱水力学分野においてこれまでに5流体モデルを取り扱った例はない。そのため、無電力・拡散型吸収式冷凍システムで提案されている数値モデルの多くは、流体挙動を無視し、各部の熱的状态を仮定したエネルギー収支を解くことで、冷凍温度や性能指数などを算出している。しかしながら、本冷凍サイクルでは重力を利用したサーモサイフォンにより流体を循環させているため、各流体の運動量変化などを考慮しない限りは、モデルに基づいたシステムの設計や性能を予測することはできない。したがって、本研究では各流体の運動量を経験式を用いて考慮することで、システムの設計や性能測を可能とする数値モデルを構築するとともに、無電力・拡散型吸収式冷凍システムの試作機を設計・製作・性能試験を通じてモデルの検証と妥当性確認(V&V)を実施する。

妥当性確認を済ませた独自構築したモデルを用いて、月面などの低重力下(地球の約1/6)において、太陽熱入射のみで駆動する無電力・拡散型吸収式冷凍システムの成立性検証に向けた基礎知見を得ることを目的とする。

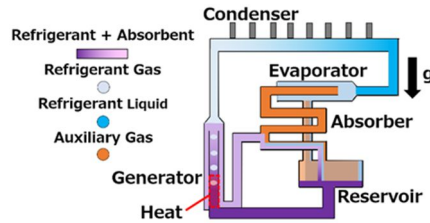


図1 無電力・拡散型吸収式冷凍システムの構成

3. 研究の方法

独自に構築した数値モデルを用いて、無電力・拡散型吸収式冷凍システムを設計・製作し、性能試験を実施した(図2)。作動流体には冷媒としてアンモニア、吸収液として水、補助ガスとしてヘリウムガスを用いた。アンモニア水(約600g, アンモニア濃度40w%)をチャージした後、ヘリウムガスで1.3MPaまで昇圧した。本冷凍機への入熱は、発生器の外側に取り付けられたカートリッジヒータより行った。蒸発器の冷却(冷凍性能)について評価をするために、蒸発器外側にはチラーに接続した液冷ジャケットを設置することで、大気から蒸発器への吸熱量を計測した。また、本試験装置各部にはT型熱電対を設置し温度計測を行うとともに、リザーバと発生器の間には時間差式超音波流量計、発生器上部には圧力計を設置することで、試験装置内の流動挙動をモニタリングした。発生器上部にある凝縮器は、室温(22-24℃)自然空冷条件下にて放熱を行い、その他の部分はグラスウール材により断熱し性能試験を実施した。



(a) 無電力・拡散型吸収式冷凍機の外観

(b) 性能試験セットアップの概要

図2 無電力・拡散型吸収式冷凍試験機と性能試験セットアップの概要

4. 研究成果

発生器に取り付けたカートリッジヒータを60Wから10W刻みで130Wまでステップアップ上に印加したときの各部の代表的な温度変化を図3に示す。熱負荷60W印加後、約2,000秒後に発生器出口温度が急激に立ち上がったことから、発生器内のアンモニア水からアンモニアが蒸発していることがわかる。その後、アンモニア蒸気は凝縮器に到達し外気に排熱することで液化し、補助ガスのヘリウムで満たされている蒸発器に流入すると、アンモニア液の分圧の低下から蒸発が誘起されることで、蒸発器の温度低下(冷却)が開始された(約3,000秒)。熱負荷70Wにおいて、蒸発器入口温度は-1.9℃であった。また、そのときの蒸発器の吸熱量は約6Wであることから、吸熱量を発生器への入熱で除した冷却性能指数は $6W/70W=0.086$ であった。熱負荷と蒸発器の吸熱量の関係を図4、熱負荷と発生器とリザーバ間で計測した冷媒と吸収液の混合流量の関係を図5示す。130Wまで熱負荷の増加とともに吸熱量及び混合流量は増加しており、混合流量と吸熱量には強い相関があることがわかった。また、吸熱量及び混合流量は数値モデル値を良く一致していることから、独自に開発した本数値モデルの妥当性を確認することができた。

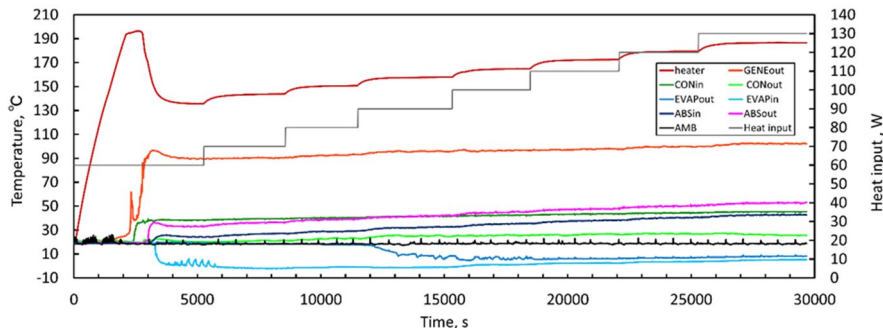


図3 無電力・拡散型吸収式冷凍試験機と性能試験セットアップの概要

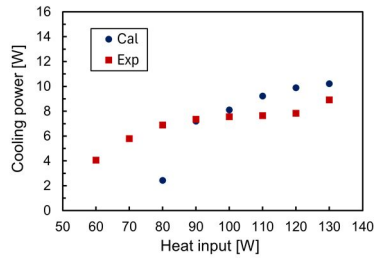


図4 熱負荷と蒸発器における吸熱量の関係

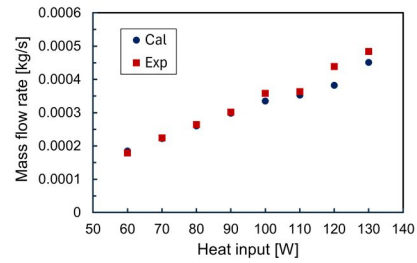


図5 熱負荷と冷媒循環流量との関係

妥当性確認したモデルを用いて、月面などの低重力下(地球の約 1/6G)において、太陽熱入射のみで駆動する無電力・拡散型吸収式冷凍システムの成立性検証を行った。検証は図2に示した冷凍機の体系で行った。具体的には、発生器を150の等温加熱をした条件下で、重力を1Gと1/6Gとした場合において、発生器の高さをパラメータとして吸熱量や性能指数(吸熱量/入熱)への影響について調べた。その結果、吸熱量に関しては重力1Gと1/6Gでそれぞれ5.2W、4.7Wであり、重力が1/6Gになることによる吸熱量の減少量は約10%程度であることがわかった。また、性能指数に関しては重力1Gと1/6Gでそれぞれ0.055、0.046であり、重力が1/6Gになることによる性能指数の減少量は約16%であった。ただし、重力が1/6Gにおいて発生器長さを6倍にしたときの性能指数は0.050(約10%減)まで回復できることがわかった。以上より、月面などの低重力下(地球の約1/6G下)においても、無電力・拡散型吸収式冷凍システムは、太陽による入射熱のみで動作することがモデルにより確かめられた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	渡邊 紀志 (Watanabe Noriyuki) (60569979)	名古屋大学・工学研究科・特任准教授 (13901)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関