

主論文の要約

論文題目 熱遷移流を利用したクヌッセンヒートポンプの開発
(Development of Knudsen heat pump using thermal transpiration)

氏名 釘本 恒

論文内容の要約

ヒートポンプ (HP) は、環境に存在する莫大な熱容量を持つものから冷熱・温熱を取り出す技術であり、HP を用いた空調や冷蔵庫は最も身近な電化製品の 1 つである。空調等に関連する冷暖房によるエネルギー消費は、例えば日本の業務他部門での用途別消費エネルギーで全体の 3 割に達するほどであり、HP の消費エネルギーの低減は重要な課題である。現在、最も普及している HP は、電動コンプレッサー式 HP であり、電動コンプレッサーにより蒸発器から凝縮器に冷媒蒸気を輸送し、その圧力差で冷媒の相変化を促し、そのときの潜熱により冷熱・温熱を発生させる。これに対し、電動コンプレッサー式 HP で最も消費電力の大きいコンプレッサー部を、吸着や吸収等を用いた化学式コンプレッサーに置き換えた、化学式 HP が提案されている。化学式 HP の利点は、化学式コンプレッサーが再生可能熱や排熱で駆動可能なため、単位出力当たりの消費電力が電動コンプレッサー式 HP に比べ少ないことである。一方で課題は、化学式コンプレッサーが定常流を発生できないため、連続駆動には多くの切換機構が必要となる点である。そのため、簡素な機構で連続駆動でき、かつ消費電力の小さなコンプレッサーが求められている。

そこで、本研究ではクヌッセンコンプレッサー (KC) に注目した。KC は、高 Knudsen 数流れ特有の現象である熱遷移流を用いた熱駆動のコンプレッサーであり、機械的な可動部を持たないという特徴を持つ。学術的な観点からの熱遷移流や KC の研究は古くから多く行われてきた一方で応用研究に関する報告は少なく、実用化が問題視されてきたが、最近では微細流路の造形技術の発展により、マイクロデバイスに適用したマイクロガスクロマトグラフィや気体分離など応用面での研究も増えてきている。KC の最大の課題は、単位

面積当たりの流量が非常に小さいことだが、近年では発生流量の大幅な向上に関する研究も報告されている。本研究では、HP のコンプレッサーとして KC を用いた、新たな可動部レスの熱駆動 HP（クヌッセンヒートポンプ、KHP）を提案し、その性能予測手法を構築するとともに、実際に構築し動作実証を行った。本論文は全 6 章からなる。以下に各章の構成を述べる。

第 1 章の前半では、本研究の背景、目的、関連する先行技術について説明し、本研究の意義、位置づけを明らかにした。また、後半では、本研究の対象である KHP の構成、動作原理、特徴について説明した。KHP は、主に KC、蒸発器、凝縮器、毛細管で構成され、冷媒には水を用いる。動作原理としては、KC が蒸発器から凝縮器に水蒸気を輸送し、その圧力差で水の相変化を促し、そのときの潜熱により冷熱・温熱を発生させる。KHP の性能は、KC の気体輸送性能に大きく依存し、KHP で発生可能な HP 温度差は KC で発生可能な圧力差、KHP で発生可能な出力は KC で発生可能な質量流量から決定づけられる。KHP の特徴は、切換機構を含む可動部が一切ないことと、電気を使わず熱のみで駆動できることである。可動部がないことにより、KHP には高耐久、メンテナンスフリー、振動レス、騒音レス等の利点がある。また電気フリーであることは、エネルギー消費の低減に貢献できるだけでなく、宇宙や砂漠といった安定した電力供給やメンテナンスが困難な場所でも使える可能性につながる。

第 2 章では、KC による水蒸気輸送の実証実験を行った。これまで KC は主に真空ポンプとしての応用を検討されていたため、内壁に付着しやすく高真空生成にとって障害となる水蒸気であえて輸送実験を行った例は報告されていない。そこで、KC を用いた水蒸気輸送実験を行った。ここで KC は、微細流路の集合体である多孔体（石英繊維フィルタ）と、多孔体表裏に温度差を与えるための熱交換器（加熱器、冷却器）で構成した。2 つの真空容器の間に KC を挿入し、真空容器と KC の内部を水蒸気で満たした。この状態で、加熱器に高温のオイル、冷却器に低温の水を流すことにより KC を駆動させ、その後の真空容器間の圧力差の時間変化を計測した。その結果、KC 駆動後、圧力差は時間とともに増加し、KC により水蒸気が輸送されていることが実験的に確かめられた。また、定容法を用いて圧力差の変動速度から KC の質量流量の算出を行った。加熱器に流すオイルの温度を制御し、多孔体表裏の温度差を変えて複数条件で計測を実施したところ、質量流量や圧力差の最大値は、多孔体表裏の温度差に対し、おおよそ比例して増加した。

第 3 章では、多段 KC の気体輸送性能予測モデルの提案と有効性検証を行った。単段の KC が発生可能な圧力差はそれほど大きくないため、実用上は KC の多段化が不可欠である。しかし、単段 KC の構成や段数を変えるたびに多段 KC を作り実験的にその性能を計測することは現実的ではないため、多段 KC の性能予測手法が必要になる。そこで、単段 KC の計測結果を用いて多段 KC の性能を予測するモデルを提案した。このモデルは、KC により仕切られた空間群を想定し、各空間の圧力の時間発展を記述する 1 次元（1D）の漸化式であり、各空間に対し質量保存則を適用することにより導出した。なお、各空間の気体の

温度と KC 内の多孔体表裏の温度差は一定とし、各空間内の気体質量の増減要因は、KC の気体輸送による流出入に限定されるものとした。この 1D モデルによる KC の質量流量は、KC の入口出口の平均圧力と圧力差の関数で表すことができる。この質量流量の関数形は、複数の圧力条件下で単段 KC の質量流量計測実験を行い、それらの結果を適当な近似関数で補間することにより与えた。また、本性能予測モデルの有効性検証のため、実際に 1, 2, 3, 4 段の KC を構築し、それらの性能を計測した。この実験結果と予測結果とを比較したところ、定常値、過渡応答ともに良く一致し、モデルの有効性が確かめられた。

第 4 章では、KHP の性能予測モデルの構築と、実用的な性能を達成するのに必要な KC の構成の見積もりを行った。KHP での HP 温度差性能、出力性能は、使用する KC の性能に依存する。つまり、多段 KC の性能予測モデルを用いれば同様に KHP の性能を予測できるはずである。ただ、多段 KC と KHP では、前提となる条件の違いが 2 つある。多段 KC では各空間の気体質量の増減要因は KC による気体輸送に限定したが、KHP では多段 KC の両端にある蒸発器、凝縮器における水の蒸発による流入、水蒸気の凝縮による流出を考慮した質量保存則を適用する必要がある。また、多段 KC では各空間の気体温度は一定としたが、KHP では蒸発、凝縮により吸発熱するため、それに応じた気体の温度変化を考慮する必要がある。このため、KHP では未知の物理量が圧力、蒸発速度（凝縮速度）、温度と 3 つあるため、これらに関連付ける 3 つの方程式が必要となる。ここでは、質量保存則から圧力と温度と蒸発速度（凝縮速度）との関係、水の飽和蒸気圧曲線から圧力と温度の関係、潜熱と熱容量から温度と蒸発速度（凝縮速度）との関係を記述することにより、未知数と方程式との数を一致させた。また実際の計算では、非線形の関係式が存在するので、ニュートン法を用いた数値解析により解を導いた。この予測モデルを用いて、面積 4 m^2 の石英繊維フィルタで構成した 30 段 KC を用いた場合の KHP の性能は、HP 温度差 6.00 K 、出力 1.27 kW と予測された。また、出力は HP 温度差の低下に対して線形に増加することが予測された。更に、多孔体の面積と段数を変えて調査を行ったところ、最大出力は面積に、最大 HP 温度差は段数に比例して増加することが分かった。

第 5 章では、KHP プロトタイプを構築し、実際に蒸発器から凝縮器に輸送される熱量を計測することによって、その動作実証を行うとともに、HP 性能を評価した。輸送される熱量（出力）は、蒸発器、凝縮器内に熱交換器を設置し、相変化により吸収、発生した熱を、熱交換器内部を流れる熱輸送媒体（水）に伝熱させ、その入口出口の温度差を計測することにより求めた。本研究では、KHP を太陽光で駆動することを想定し、KC の多孔体の片面に黒色の顔料塗料を塗布した上で、窓を通してハロゲンランプの光を照射し一面を加熱した。その結果、KC に光を照射したタイミングで、蒸発器では熱輸送媒体の出口温度が低下し、凝縮器では出口温度が上昇した。また、蒸発器内での液体の水の保持状態を、ビューポートを通して観察したところ、照射 10 分後には液体の水がなくなっていることを確認した。これらの結果から、KHP の動作を実験的に確かめることができたと言える。また、HP 温度差と出力を定量的に評価したところ、HP 温度差 0.85 K 、出力 3.08 W （蒸発器）

が得られた。蒸発器，凝縮器内に流す熱輸送媒体の温度を変化させたところ，出力は HP 温度差の低下に従い線形に増加した。これは，第 4 章で予測された結果そのものである。

KHP 実用化のため，今後行うべき主な課題は，KHP の熱効率評価と単段 KC の最適化による性能向上である。第 5 章の実験では KC への入力エネルギー，つまりハロゲンランプにより多孔体へ供給された熱エネルギーが計測できていないため，熱効率は評価できていない。そのため，入力エネルギー量を計測できる加熱源を用いた，KHP の熱効率評価が必要である。また，本研究では実用的な HP 性能を得るためには大規模な KC が必要であることが明らかとなった。そのため，実用化のためには，単段 KC の圧力差性能，単位面積当たりの流量性能を向上させることによる，装置の小型化が必要となる。

本論文では，熱遷移流を利用したクヌッセンコンプレッサーを採用したヒートポンプを提案，構築し，その動作実証と性能評価を行った。本研究により，低質な熱源でも稼働する，可動部のない HP が実現できることを示した。