

審査の結果の要旨

氏名 伊東正篤

本論文は、「パルス管冷凍機の基本動作解析および実験的検証に関する研究」と題し、構造がシンプルであり原理的に高い信頼性を持ち、移動体通信用 HTS フィルタの冷却用などへの適用が大いに期待されているパルス管冷凍機について、理論的な熱収支や動作係数 COP と蓄冷器内のガスの挙動を求める動作解析を行い、パルス管内でおこるガスの変位振動や熱振動を実験的に求め、動作解析に用いた条件や結果との定性的な検証を行うとともに、イナータンスチューブ型パルス管冷凍機について、相調整機能の特徴を計算および実験で検討し、この冷凍機の性能向上に関する指針を得ている。

本論文は、5章よりなる。第1章の「序論」では、研究の技術的背景として移動体通信における HTS フィルターに対する小型冷凍機の必要性を纏め、パルス管冷凍機を選択した理由およびパルス管冷凍機に関する研究の現状を纏め、研究の目的を述べている。

第2章「パルス管冷凍機の動作解析」では、まず等温変化として扱われていたパルス管内のガスの状態変化はむしろ断熱変化に近いとして解析モデルを設定し、寸法、圧力、温度など解析の条件となる仮定を明らかにし、パルス管冷凍機にとっての理想状態を定義し、ラグランジェ法を用いてパルス管軸方向1次元で解析を行っている。この解析により、蓄冷器内において低温側から高温側へと熱が運ばれていることを明らかにし、従来議論のあった蓄冷器の役割を明確にしている。次いで、解析よりパルス管冷凍機の熱収支および動作係数 COP を求め、COP は圧縮比が 0 に近い時だけ従来の等温モデルによる値になり、実機に通常使われる条件ではより小さくなること、圧縮比が増加すると COP が減少すること、圧縮比が一定の場合は蓄冷器長さが増加すると COP が増加することなどを初めて理論的に示している。さらに、理想状態でない実際の条件が冷凍性能に与える影響をみるため、ガスの圧力と質量流速との位相差 ϕ および蓄冷器の熱交換特性を変化させた場合について解析を進め、圧力とパルス管低温端の質量流速の位相差 ϕ が大きくなると冷凍性能が減少すること、そして蓄冷器の熱交換が悪くなると冷凍性能が低下することを明らかにした。

第3章「パルス管内の基本性能に関する実験的検証」では、オリフィス型、ダブルインレット型パルス管冷凍機として作動中のパルス管内のガス変位を、パルス管内に外径がパルス管内径より少し小さく軽量のシャトルと呼ぶ球状物体を入れて高速度カメラで撮影する方法により求めている。その結果、オリフィス型では PV 仕事の増加とともに冷凍性能が増加するがあまり大きくなり過ぎると逆に冷凍性能が低下すること、ダブルインレット型ではバイパスバルブを開くことによって変位が減少し PV 仕事は減少するが、圧力とパ

ルス管低温端のガス変位の位相差 θ が大きくなり圧力振幅が大きくなることにより PV 仕事の減少が抑えられていることを示し、解析結果を検証している。また、パルス管内のガス温度を 2 次元で精度良く計測する方法として新たにレイリー散乱を用いる方法を提案し、石英ガラス製の角型パルス管を有するパルス管冷凍機を作製して、パルス管内の温度分布を測定している。その結果、ベッシック型、オリフィス型のパルス管内のガス温度分布を可視化画像として示し、圧力と温度の位相差を明らかにするとともに、実機の低温部の温度が理論的な解析条件として用いた断熱モデルでほぼ表せることを確認するとともに、位相差 θ が大きくなると冷凍性能が向上することを示す解析結果を検証している。

第 4 章「イナータンスチューブ型パルス管冷凍機に関する検討」では、運転周波数が低いイナータンスチューブ型パルス管冷凍機のガス変位を上述のシャトル法で計測し、電気的等価回路から導かれる解と比較検討することにより実際のイナータンスチューブの抵抗値が等価変換式の値より大きくなることを明らかにするとともに、このため実機では位相調整の機能に限界があることを示している。また、運転周波数が高い場合のイナータンスチューブの圧力とガス変位との位相差 θ および圧力振幅を計測し、電気的等価回路による計算結果との比較を行い、イナータンスチューブの抵抗とインダクタンスを算出する式が十分表現できていないため両者に定量的な差が生じることを見出している。さらに、イナータンスチューブを巻いた状態と巻かない状態での差を実験的に検討することにより、実施した実験範囲ではイナータンスチューブを巻くと、ほぼインダクタンス成分だけが減少すること、イナータンスチューブの内径の異なるものを組み合わせ巻くことによりインダクタンスの減少を防ぐことができ、冷凍機の性能を低下させないことを示している。このことから 1 種類のイナータンスチューブでは達成できない位相と変位の調整が、内径の異なるイナータンスチューブを組み合わせることにより可能になり、これがパルス管冷凍機の性能向上に対する対策の一つになる可能性を見出している。

第 5 章は、以上を纏めた「結論」である。

以上要するに、本論文は移動体通信 HTS フィルター用の小型冷凍機としてパルス管冷凍機を選定し、蓄冷器の役割、パラメーターの COP への影響などを明かにできる動作解析を行い、ガスの変位や温度分布を計測する手法を提案するとともに、これらの手法による実験により動作解析を検証し、さらにイナータンス型パルス管冷凍機による性能向上法を提案しており、機械工学の発展に寄与するところが大きい。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。