

# 冷凍機用圧縮機のためのリニア振動アクチュエータの設計

## – Design of linear oscillatory actuators for cryocooler compressors–

56222 銭小飛

(指導教員 大崎 博之 教授)

Key Words: Cryocooler, Compressor, Actuator, Output, Loss

### 1. はじめに

近年、冷凍機は超電導のあらゆる応用分野にとって最も重要な支援技術として、小型軽量、低振動、高信頼性などの要求が高まっている。また、超電導技術が人工衛星など厳しい環境に利用されるために、冷凍機に対する低振動、コンパクト、メンテナンスフリーなどの要求は切実である。よって、冷凍機に使用されている圧縮機も高出力、高効率、低振動、高信頼性、コンパクトを求められている。リニア振動アクチュエータ (Linear Oscillatory Actuator, LOAと略称) はダイレクトドライブによる、高速、高信頼性、低振動、低騒音のメリットを生かした革新的な駆動源として、冷凍機用圧縮機の駆動源に応用する研究・開発が進んでいる。

LOAの分類をするのに可動体から分類すると、現在までにコイル可動形、鉄心可動形および永久磁石可動形の3種類に大別される。その中で、コイル可動形LOAは推力特性が平坦、振動が低いなどの特徴を持つため、本研究では、コイル可動形LOAを対象として、コイル、鉄心コア、永久磁石の寸法が、LOAの特性に与える影響を明らかにするとともに、これらの設計を最適化するための基礎検討を行う

### 2. 小型冷凍機の圧縮機の構造

コイル可動形LOAを用いた冷凍機の一例として、パルスチューブ冷凍機の圧縮機の構造は図1のように示されている。二つのコイル可動形LOAは対向に配置されることによって、それぞれの慣性力を相殺し発生振動を低減する。ピストンを駆動する可動部は、二組の径方向の変位を拘束するフレクシャベアリングで片側から支持され、固有周波数を有する機械振動系を構成する。動作ガスがピストンの間にあって、ピストンの往復運動により、動作ガスの周期的な圧力振動を発生して冷凍を生じさせる。コイル可動形LOAの鉄心コアと外部フレームを兼用させることによって、小型軽量を図っている。

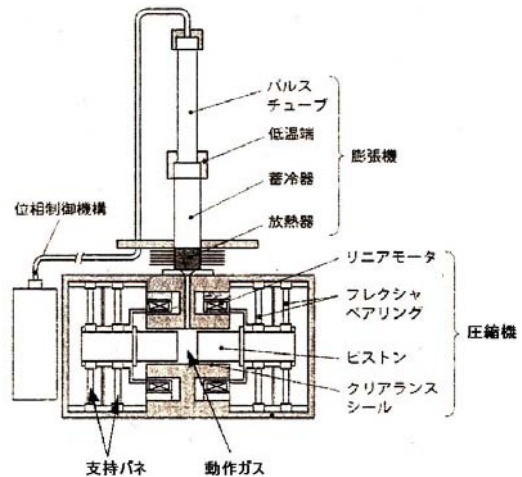


図 1 パルスチューブ冷凍機の圧縮機の構造

### 3. LOAの仕様

LOAの仕様は文献のデータから推定される。パルスチューブ冷凍機の駆動源としてのLOAは120Wattの出力と12cm<sup>3</sup>の動作ガスの体積変位を提供できる。

今回の解析モデルでのLOAはおよそ12Watt程度の仕事を発生すると推定して、上記のパルスチューブ冷凍機の圧縮機と比べて、PV仕事は1/10である。出力が増減した時に、PV線図が相似な形を保ちながら膨張・収縮すると仮定すると、圧力変位と体積変位はともに $1/\sqrt{10}$ になるはずである。従って今回のLOAが発生する体積変位はおよそ $12/\sqrt{10} \approx 3.8 \text{ cm}^3$ が適当である。フレクシャベアリングは、疲労破壊を防ぐためにあまり長いストロークを確保できないので、今回はストロークを1.0cmに設定する。するとピストン断面積は $3.8/1.0 = 3.8 \text{ cm}^2$ 、半径は $\sqrt{3.8/\pi} \approx 1.1 \text{ cm}$ とするのが適当である。冷凍機の成績係数は4~5%と推定すると、冷凍能力は約0.5Wattである。

### 4. LOAのモデル

コイル可動形LOAのモデルは図3に示される。本LOAは軸対称構造であり、シャフト、鉄心コア、コイルおよび永久磁石から構成されている。ピストンを兼用するシャフトは、径方向の変位を拘束するフレクシャベアリング (バネ定数 $k_1$ ) で支持され、機械

振動系を構成する。永久磁石で作られた固定磁場中にシャフトと直結した可動コイルを配置し、コイルに電流を流し、可動部を駆動する。動作ガスはバネダンパ系（バネ定数 $k_2$ 、ダンパ係数 $c$ ）でモデル化して、力率を向上させるために、可動体の質量とバネ定数による共振周波数が要求される駆動周波数になるように設計する。各部分の材料に関して、表1のようになる。シャフトは非磁性体、鉄心コアは非線形磁気特性を有する磁性体35H440、永久磁石は希土類磁石（残留磁束密度 $B_r=1.24$  T、保磁力 $H_c=943$  kA/m）とする。

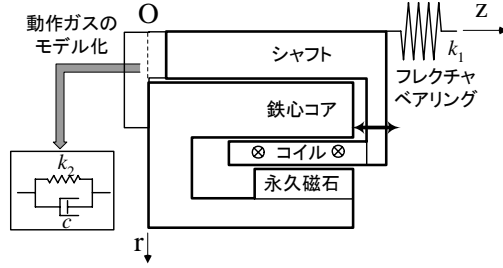


図 2 コイル可動形LOAの軸対称モデル

表 1 LOA各部分の材料特性

| 名称   | 材料名称   | 密度 [kg/m <sup>3</sup> ] | 電気抵抗率 [Ωm]            |
|------|--------|-------------------------|-----------------------|
| シャフト | ステンレス  | 7960                    | $7.1 \times 10^{-7}$  |
| 鉄心コア | 35H440 | 7700                    | $3.9 \times 10^{-7}$  |
| コイル  | 銅線     | 8960                    | $1.55 \times 10^{-8}$ |
| 永久磁石 | 希土類磁石  | 7500                    | $1.44 \times 10^{-6}$ |

系の運動方程式は次式で表される。

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} + c \frac{dz}{dt} + kz = f(t) \quad (1)$$

ここで、 $k=k_1+k_2$ である。機械振動系の共振周波数 $f_0$  [Hz]、駆動力 $f(t)=F_0 \sin \omega_0 t$  ( $\omega_0=2\pi f_0$ ) のときの可動部変位振幅 $z_0$  [mm]、機械出力 $L$  [W]は以下のように表される。

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad z_0 = \frac{F_0}{\omega_0 c}, \quad L = \frac{F_0 x_0 \omega_0}{2}$$

## 5. 解析の制約条件

LOAの鉄心コアの外径寸法は50mm、磁路中鉄心コアの断面積は相等である。駆動電流密度は $10^6$  A/m<sup>2</sup>、50Hzにして、1周期ごとに72分割である。可動体のストロークを10mmに維持するため、ダンパ係数 $c$ を変化する。また、支持バネを取り替えることができると仮定し、共振状態を保つために、バネ定数 $k$ は可動体の質量に合わせて、変化することができる。バネとダンパはすべて線形のものであると仮定した。

## 6. LOAの特性解析

電磁界解析ソフトJMAG-Studioの過渡応答軸対称解析モジュールを用いて解析を実施して、永久磁石、コイル、鉄心コアの寸法がLOAの推力、出力、渦電流損失などの特性に与える影響を明らかにした。

図3と図4に二つの解析例で、永久磁石の厚さおよびコイルの厚さとLOAの出力・損失特性を示す。

図3にはコイル領域の厚さ6mm、長さ35.5mm、永久磁石の長さ25.5mmと一定して、永久磁石の厚さを4.5mmから10.5mmまで変化して、解析した結果を示している。永久磁石が厚くなると鉄心コアが飽和し、漏れ磁束も大きくなるために、出力の最大値がある。鉄心コアの飽和によって、流れる渦電流が弱くなって、渦電流損失も小さくなる。

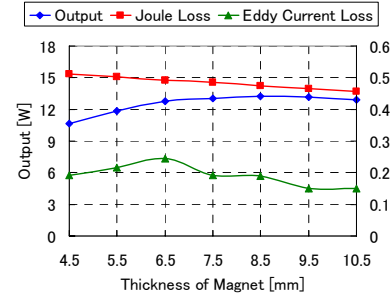


図 3 永久磁石の厚さ－LOA出力・損失特性

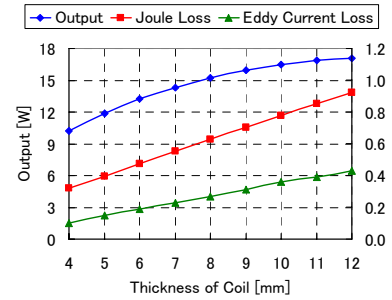


図 4 コイルの厚さ－LOA出力・損失特性

図4には永久磁石の厚さは8.5mm、長さは25.5mmと一定する。コイルの厚さを4mmから12mmまで変化して、解析した結果を示している。コイルの厚さは10mm以上になると、出力の増加量が小さくなるが、コイルのジュール損失とLOAの渦電流損失は比例的に増加している。コイルが厚くなることによって、磁路中にあるコイルの巻数が増えているが、磁気回路の磁気抵抗も増加し、空隙中の磁束密度が弱くなっている。さらに、漏れ磁束も大きくなっているのので、効果が弱くなる。

## 7. まとめ

本論文では、冷凍機用圧縮機のためのリニア振動アクチュエータを対象として、パルスチューブ冷凍機の圧縮機に使用することを想定して、コイル、鉄心、永久磁石からなるコイル可動形LOAモデルを作成した。電磁界解析ソフトJMAG-Studioを用いて、有限要素法と境界要素法によって、LOA特性の数値解析を行った。数値解析結果の妥当性を確認したうえで、各材料の寸法がLOAの動特性に与える影響を考察した。