

搾乳機用リニアモーター駆動式
パルセーターに関する研究

信州大学学位論文

1995年2月

西澤尚武



信州大学 学位論文

搾乳機用リニアモータ駆動式 パルセータに関する研究

Study on Linear Motor-Driven Pulsator
for the Milking Machine

西澤 尚武

Naotake Nishizawa

信州大学大学院 工学系研究科
システム開発工学専攻 機械システム工学講座

9 2 T H 3 1 4 H

指 導 教 官

山 田 一 教授

目次

記号表	I ~ III
第 1 章 序論	1
1.1 リニア電磁パルセータの必要性	1
1.2 搾乳機の歴史	2
1.3 搾乳機の原理と構造	4
1.4 搾乳機用パルセータの工学的課題	5
1.5 本研究の目的と概要	6
第 1 章の参考文献	7
第 2 章 円筒状リニア振動アクチュエータの構造と動作理論	8
2.1 パルセータの機能と特性	8
2.2 円筒状リニア振動アクチュエータの構造	12
2.3 円筒状リニア振動アクチュエータに必要な推力	13
2.4 円筒状リニア振動アクチュエータの動作理論	15
2.4.1 円筒状リニア振動アクチュエータの基本構造	15
2.4.2 円筒状リニア振動アクチュエータの電気回路	16
2.4.3 円筒状リニア振動アクチュエータの磁気等価回路	18
2.4.4 静推力の表現式	22
2.4.5 円筒状リニア振動アクチュエータの有効電力	23
2.4.6 波形ひずみの要因	25
2.5 有限要素法による円筒状リニア振動アクチュエータの静推力解析	27
2.5.1 円筒状リニア振動アクチュエータに使用される磁性材料	27
2.5.2 電流密度	29
2.5.3 永久磁石の保磁力	30
2.6 円筒状リニア振動アクチュエータの設計と試作	32
第 2 章の参考文献	38

第 3 章 円筒状リニア振動アクチュエータの特性解析	40
3.1 円筒状リニア振動アクチュエータの駆動装置	40
3.2 円筒状リニア振動アクチュエータの静特性	43
3.3 円筒状リニア振動アクチュエータの動特性	51
3.3.1 円筒状リニア振動アクチュエータの速度-変位特性	51
3.3.2 円筒状リニア振動アクチュエータの動推力と効率の測定 ..	55
3.3.3 円筒状リニア振動アクチュエータの温度上昇	59
第 3 章の参考文献	61
第 4 章 リニア電磁パルセータの $1/f$ ゆらぎ動作特性	63
4.1 牛の泌乳生理	63
4.2 子牛の吸引間隔に $1/f$ ゆらぎの存在の確認と搾乳機への応用	66
4.3 リニア電磁ソレノイド駆動式パルセータ	70
4.3.1 リニア電磁ソレノイド	70
4.3.2 リニア電磁ソレノイド駆動式パルセータ	73
4.4 円筒状リニア振動アクチュエータ駆動式パルセータ	73
4.5 円筒状リニア振動アクチュエータ駆動式パルセータと リニア電磁ソレノイド駆動式パルセータの比較	79
4.6 リニア電磁パルセータの $1/f$ ゆらぎ信号による動作特性	80
4.7 リニア電磁パルセータの将来性	82
第 4 章の参考文献	84
第 5 章 結論	85
謝辞	87
研究業績	88
1. 学術論文	88
2. 著書	88
3. 講演論文	88
4. 特許	90

記号表

A	: 推力作用面積 [m ²]
	: スライダ投影面積 [m ²]
B	: 磁束密度 [T]
B_s	: 飽和磁束密度 [T]
$C(\tau)$: 自己相関関数
d	: 巻線の線径 [m]
F, \mathbf{F}	: 推力 [N]
F_f	: 摩擦力 [N]
F_n	: 垂直力 [N]
F_s	: 静推力 [N]
$F_{s,max}$: 最大静推力 [N]
F_μ	: スライダの駆動に必要な力 [N]
f	: 周波数 [Hz]
g	: エアギャップ [m]
H	: 磁界の強さ [A/m]
I, i	: 励磁電流 [A]
J, \mathbf{J}	: 電流密度 [A/m]
k	: 定数
L	: ストローク [m]
L_1	: コイル 1 のインダクタンス [H]
L_2	: コイル 2 のインダクタンス [H]
l	: コイルの長さ [m]
M, \mathbf{M}	: 磁化 [A/m]
NI_1	: コイル 1 の起磁力 [A]
NI_2	: コイル 2 の起磁力 [A]

NI_m	: 永久磁石の起磁力 [A]
n	: 定数
\mathbf{n}	: 法線ベクトル
P_i	: 入力電力 [W]
P_o	: 出力 [W]
p	: (B 室, 子午の口内) 圧力, 真空度 [Pa], [mmHg]
p_o	: スライダの外側の圧力, 大気圧 [Pa]
p_v	: スライダの内側の圧力 [Pa]
$P(f)$: パワースペクトル
R_1	: コイル 1 の巻線抵抗 [Ω] : 冷状態における巻線抵抗 [Ω]
R_2	: コイル 2 の巻線抵抗 [Ω] : 熱状態における巻線抵抗 [Ω]
R_{m1}	: 磁極 1 側の磁気抵抗 [H^{-1}]
R_{m2}	: 磁極 2 側の磁気抵抗 [H^{-1}]
\mathbf{R}	: 位置ベクトル
r	: 負荷振動板の半径 [m]
T	: 周期 [s] : 定数
V	: ギャップ体積 [m^3] : 電圧 [V]
v	: 速度 [m/s]
w	: コイルの巻幅 [m]
W_m	: 磁気エネルギー [J]
x	: スライダおよび可動子の変位 [m]
x_s	: 可動子表面の位置 [m]
$\pm x_o$: 最大変位 [m]
η	: 効率
λ	: 力率

μ	: スライダの摩擦係数
μ_r	: 材質の比透磁率
μ_0	: 真空の透磁率 = $4\pi \times 10^{-7}$ [H/m]
ξ	: 占積率
θ	: 温度上昇 [°C]
θ_1	: 冷状態における巻線温度 [°C]
θ_2	: 熱状態における巻線温度 [°C]
θ_s	: 試験における冷媒温度 [°C]
τ	: 位相差 [s]
Φ_i	: 励磁コイルによる磁束 [Wb]
Φ_1	: 磁極 1 を流れる磁束 [Wb]
Φ_2	: 磁極 2 を流れる磁束 [Wb]
Φ_m	: 永久磁石による磁束 [Wb]
Φ_{m1}	: 磁極 1 を流れる永久磁石による磁束 [Wb]
Φ_{m2}	: 磁極 2 を流れる永久磁石による磁束 [Wb]
φ	: 位相差 [rad]
Ω	: 電流の存在する領域

第 1 章

序論

Introduction

第 1 章 序論

1. Introduction

1.1 リニア電磁パルセータの必要性

1.1 Necessity of the linear motor-driven pulsator

筆者は搾乳機の開発、改良に従事して 30 余年、共同研究者と共にそれぞれの成果を挙げて来たが、その間、常に念頭にあったことは、乳頭障害の無い安全搾乳と、労働生産性を向上するための高速搾乳という、二律背反の同時解決という課題であった。自然の搾乳である子牛の吸引では、乳頭障害の発生は生じないが、労働性向上のために、真空を用いる機械搾乳が導入されるに及んで、乳頭障害の発生が酪農家と共に、搾乳機の開発技術者にとっても共通の課題となった。

牛体の泌乳生理については、第 4 章において詳しく述べるが、牛体からの乳の排出は泌乳ホルモンの分泌に左右される。この分泌時間は通常、数分間であり、この間に乳房に蓄えられた乳の全量を排出しなければならない。そこで、この排出速度を高めるもっとも有効な方法は、搾乳真空圧を高め設定することである。しかしながら、このことは乳頭の鬱血を助長し、乳頭障害発生の危険性を増大し、酪農家に経済的損失を与える恐れにもなる。

近年、牛体の改良が進み、年間生産量が 10,000 [kg] に近づき、30 年前のそれと比較して 2 倍以上に向上している。このため高速搾乳と同時に安全搾乳の実現が時代の要請である。

機械搾乳の原理は、1.3 項で述べるように、真空を利用し乳頭から吸引して行われるが、牛体にとっては強く、不快な刺激であり、乳頭の鬱血を助長し乳頭障害に結び付きやすい。そこで一般的には、連続吸引方式でなく、パルセータ（拍動器）を用いて吸引と休止を一定周期で繰り返す間欠吸引方式で搾乳は行われているが、乳頭障害の発生防止には現状の性能では不十分である。

他方、 $1/f$ ゆらぎ搾乳の有効性について、筆者と共同研究者である、堀内氏^(1,1)、生井沢氏^(1,2)等の最近の研究によると、子牛の吸引間隔や親牛の心拍に $1/f$ ゆらぎ（快適性）の存在が確認されている。

そこで筆者は、搾乳機の構成要素の中で、搾乳性能を左右するバルセータの動作に、 $1/f$ ゆらぎを導入して、乳頭障害の軽減の可能性を考えた。現在、市販されているバルセータは空気圧駆動式バルセータと電磁バルセータ（リニア電磁ソレノイド駆動式）の2種類に大別される。しかしながら、空気圧駆動式バルセータではその動作が一定周期で吸引と休止を繰り返す構造上、不規則な $1/f$ ゆらぎ動作を行わせることは不可能である。一方、電磁バルセータでは $1/f$ ゆらぎ駆動装置を用いることにより、不規則な $1/f$ ゆらぎ動作を行わせることは容易に可能であるが、第4章で述べるように、その構造上、取り扱いの利便性にかけることと、信頼性にも問題を残す。

そこで筆者は、バルセータ駆動用に、製品としての新規性のある円筒状リニア振動アクチュエータ（Cylindrical linear oscillatory actuator 以下 CLOA と略記）を開発し、併せてこの CLOA を搭載した小型、軽量且つ、高信頼性のリニア電磁バルセータに $1/f$ ゆらぎ動作を与え、能率的な搾乳と乳頭障害発生の軽減の実現を試みようとするものである。

1.2 搾乳機の歴史

1.2 History of the milking machine

野生の牛を家畜化し、その搾乳は手搾りの時代が何千年もつづいた。図 1.1^(1,3) はバビロンの酪農の光景を模写したものであり、BC3000 年ごろ彫られた石灰石の像を嵌め込んだ象嵌装飾帯である。図の中央の右寄りに、牛の背後から搾乳者が手で搾乳している様子が見える。このように酪農は人間が文化と言うものを築きはじめたころより、今日までつづいている歴史の古いものである。

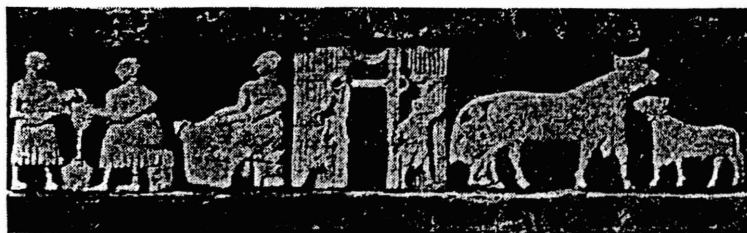


図 1.1 バビロニア時代の搾乳

Fig. 1.1 Milking spectacle in Babylonia age

このような形態の酪農が定着して以来、今日、見られるような飼育形態にどのような過程で発展して来たかは適当な資料がないので解らないが、飼育頭数がしだいに増加するにしたがい、酪農に従事する人々にとって搾乳作業は過酷な労働となり、搾乳の機械化を考えることは当然であろう。

機械による搾乳が最初に考案されたのは、1836年 Blurton によって、4本のカニューラと呼ばれる金属導管を直接、乳頭に挿入する方法^(1,4)であったが、乳頭傷害の危険性が大きであった。その後 1851年 Hodges と Brockedon が真空を利用する搾乳機を考案し特許を取得したが^(1,4)、連続吸引方式であったので、新たな乳頭障害の危険性が発生してきた。

ここで、乳頭障害とは、高い真空による搾乳によって乳頭が充血し、この状態が過度になると、乳頭孔や乳頭槽内の細胞組織までが破壊され、病原菌の侵入を容易にして乳房炎感染の危険性が大きくなることである。

その後、欧米をはじめオセアニア等の酪農先進国では、搾乳機の研究開発がすすんで、1889年 Murchland 等によって始めて牛舎内に真空配管をした搾乳機が商品化された^(1,4)。つづいて 1902年 Gillies がティートカップが 2室構造のものを発明した^(1,4)。これは乳頭に装着するゴム製のライナの内側と外側を 2室にして、パルセータを用いて吸引期と休止期とを繰り返す 2作動方式の搾乳法で、これは今日使われている搾乳機と全く同じ原理に基づいている。

その後さらに、性能向上のための研究開発がすすみ 1920年代の後半には、今日使用されている搾乳機の基本原理の完成がみられる。引き続き、各国の研究者により種々の改良が行われるなかで、労働条件の面は大幅に改善されたが、高い真空圧利用による乳頭障害を防止する課題は、いまだに十分な解決に至っていない。

一方、我が国において酪農の歴史は浅く、搾乳機の導入は戦後になってであるが、その後の急激な酪農家の経営規模拡大に伴い、近代的な大型搾乳機の導入も盛んになり、今日では先進国と肩を並べるまでになっている。

さらに近年、我が国をはじめ欧州各国では、一層の労働生産性向上の目的で、ロボットによる自動搾乳機の研究開発も活発にすすめられるようになってきている。

1.3 搾乳機の原理と構造

1.3 Principle and constitution of the milking machine

搾乳機の基本構造を図 1.2 に示す。主要構成は、牛の乳頭に装着するティートカップユニットとゴム製のライナに拍動を与えるパルセータ（拍動器）、乳頭から排出された乳を貯留する搾乳缶、真空ポンプ及びこれらを接続するゴムチューブ類と真空配管から成っている。

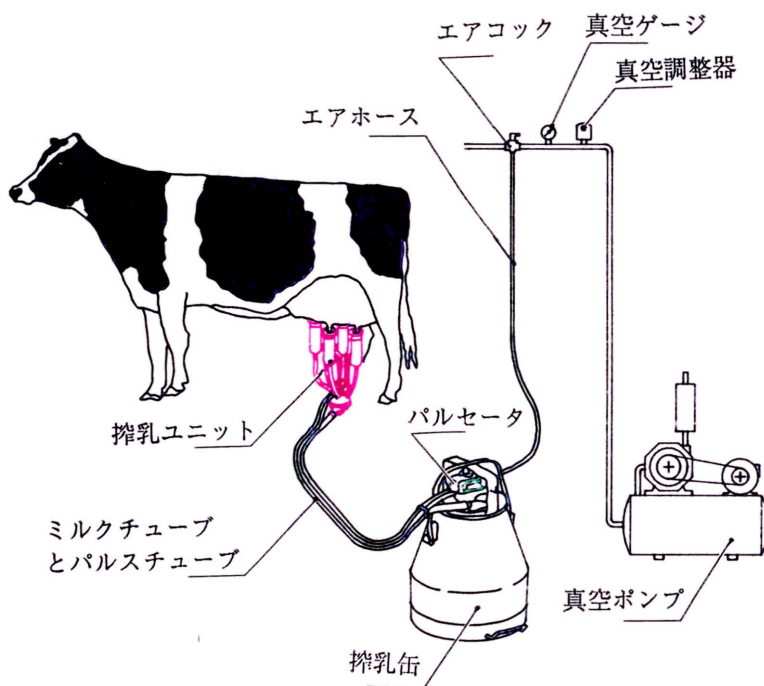


図 1.2 搾乳機の基本構成

Fig. 1.2 Basic structure of the milking machine

乳頭から排出された乳はライナを通り、ミルクチューブを経て搾乳缶に貯留される。さらに搾乳缶は、その缶内を常時、真空に維持するためにエアホースを用いて、真空配管上のストールコックに接続される。搾乳缶内の真空圧は、

真空配管上に取り付けられた真空調整機によって 380 [mmHg] に保たれる。

図 1.2 に示した搾乳機の基本構成は、飼育頭数の少ない経営規模の酪農家で使用されているシステムであるが、それぞれの牛の搾乳終了毎に搾乳缶を牛乳冷却機が置かれている離れた場所まで運ばなければならず、作業者にとってかなりの重労働である。

近年、経営規模の拡大にともない、労働力軽減の目的から上記のシステムに代わり、真空配管と併行してミルクパイプを配管し、これを通して乳を直接、牛乳冷却機まで移送するパイプラインミルクが開発され、その導入も活発であるが搾乳の原理は全く同じである。

1.4 搾乳機用パルセータの工学的課題

1.4 Technical thesis of the pulsator for the milking machine

従来の搾乳機用パルセータは、その駆動機構から空気圧駆動式パルセータと電磁パルセータとに大別されることは、すでに述べた。

空気圧駆動式パルセータの特性は、その拍動数、拍動比ともに、いかに一定の動作を繰り返すかということに主眼をおいている。その機構は機械的に極めて巧妙ではあるが、考え方の異なる不規則な $1/f$ ゆらぎ動作を、この機構によって実現することは不可能である。さらに、機械的に磨耗部分や、封入した液体の液漏れもあるために、信頼性に欠け定期的なメンテナンスが必要である。

他方、電磁パルセータでは、ゆらぎ信号発生装置を用いることにより、不規則な $1/f$ ゆらぎ動作を与えることは容易である。しかしながら、電磁弁のオリフィス口径が通常 5 [mm] と比較的小さいため、汚れた環境である牛舎内の埃や湿気を吸引して、オリフィスが詰まりやすく、時にはプランジャが弁座に固着して搾乳不能になるか、もしくは乳頭に重大な損傷を与える欠点もある。このため、上記の空気圧駆動式パルセータと同様に定期的なメンテナンスが不可欠である。以上のような弱点を補うには、大きな静推力を必要とするためリニア電磁ソレノイドが大型となり、その結果、本研究の目的であるリニア電磁パルセータと比較して、質量、容積ともに大となり、取り扱いの上で不便である。

本研究のリニア電磁パルセータではスライド弁機構を採用するため、CLOA の駆動によりスライダの往復運動する度に、滑り面を清浄化するため、弁の詰まり事故は皆無であり信頼性も高い。又小型・軽量化の可能性が大である。

1.5 本研究の目的と概要

1.5 Purposes and outline of present research

本研究の目的は、以下の 3 項目である。

1. リニア電磁パルセータ駆動用 CLOA の設計，試作とその特性評価
2. CLOA 駆動式リニア電磁パルセータの設計，試作とその特性評価
3. 動物実験による $1/f$ ゆらぎ搾乳が泌乳特性に与える影響の調査

本文では、円筒状リニア振動アクチュエータ (Cylindrical linear oscillatory actuator, 以下 CLOA と略記) の開発に関して工学的な立場から以下の章構成で検討を行っている。

第 2 章：円筒状リニア振動アクチュエータの構造と動作理論

CLOA の基本構造を決定し、その動作理論の考察を行い、さらに有限要素法 (Finite Element Method 以下 FEM と略記) を用いて、CLOA の静推力シミュレーション解析について述べる。つぎに、以上の結果にもとずいて、試作のために詳細設計を行う。

第 3 章：円筒状リニア振動アクチュエータの特性解析

試作した CLOA 1 号機 (以下 CLOA-1 と略記) の静推力および動推力をはじめその他の特性を測定し考察を加える。その結果について改良のための検討を行い、試作 2 号機、試作 3 号機 (以下 CLOA-2, CLOA-3 と略記) のそれぞれの特性を比較評価した結果について述べる。

第 4 章：リニア電磁パルセータの特性評価

リニア電磁ソレノイド駆動式パルセータと試作した CLOA 搭載のリニア電磁パルセータとの特性比較について述べる。ついで、 $1/f$ ゆらぎ信号発生装置を用いて、リニア電磁パルセータを駆動し、その動作特性について述べる。更に、動物 (牛体) で実際の搾乳実験を行い、 $1/f$ ゆらぎ搾乳が牛体の泌乳特性に与える影響と、リニア電磁パルセータの将来性について述べる。

第 5 章：結論

本研究の成果と、今後の課題についてまとめる。

第 1 章の参考文献

- (1.1) 堀内 征治・佐藤 信司・川上 隆行：1/f ゆらぎを利用した搾乳機の試作，電子情報通信学会信越支部，197，pp.393-394 (1993)
- (1.2) 生井沢 初枝・磯貝 敦・神田 修平・竹村 勇司・黒川 勇三・岩崎 博行・堀内 征治・野附 巖：乳牛心拍周期パワースペクトル解析－各種環境下における心拍周期変動について－，日本畜産学会関東支部会報，44，p.5 (1993)
- (1.3) C.W.ターナー，和田 宏：最新搾乳法，明文書房，p.6 (1971)
- (1.4) C.C.Thiel, F.H.Dodd：Machine Milking, National Institute for Research in Dairying, pp.1-21 (1977)

第 2 章

円筒状リニア振動アクチュエータの 構造と動作理論

Constitution and performance theory of
the cylindrical linear oscillatory actuator

第 2 章 円筒状リニア振動

アクチュエータの構造と動作理論

2. Constitution and performance theory of the cylindrical linear oscillatory actuator

2.1 パルセータの機能と特性

2.1 Function and characteristics of the pulsator

機械搾乳では高い真空圧 (380 [mmHg]) を利用して乳頭から乳を吸引する。この真空圧は乳頭に対して強い刺激であり、乳頭障害の発生に結びつきやすい。現在では、この強い刺激を緩和するために連続吸引方式ではなく、間欠吸引方式が採用され、一定周期で吸引期と休止期とを交互に繰り返す搾乳方式である。この拍動リズムを作り出す装置がパルセータ (拍動器) と呼ばれ、搾乳システムの中では最も重要な装置である。

従来、パルセータの種類は、その駆動方式で空気圧式と電磁弁式とに大別されることはすでに述べた。

ここで、本研究の目的であるパルセータの駆動源としての“円筒状リニア振動アクチュエータ (以下 CLOA と略記)”を開発し、これを搭載したリニア電磁パルセータと乳頭に装着するティートカップとの関連について説明する。

図 2.1 において点線で囲われた部分がリニア電磁パルセータである。また乳頭に装着したティートカップの内側は、ゴム製のライナで 2 室に区画されている。ライナの内側の A 室はミルクチューブを通して搾乳缶に接続されており、常時、真空状態である。一方、B 室はリニア電磁パルセータの作動により一定周期で真空状態と大気状態とに交互に切り換えられる。

図 2.1 (a) は吸引期の状態を示し、A 室、B 室ともに真空状態になっており、ライナはその弾性により拡張され、乳頭から乳が排出される。この時期を吸引期と呼ぶ。次に、(b) 図のように CLOA の可動子が右側に移動し、これに直結されたスライダも移動して、B 室は大気の状態になると、A 室と B 室との圧力

差によってライナは閉じられ、乳の排出は停止すると同時に、乳頭に対してマッサージ効果を与えて、刺激を緩和し乳頭の充血を軽減する働きをする。

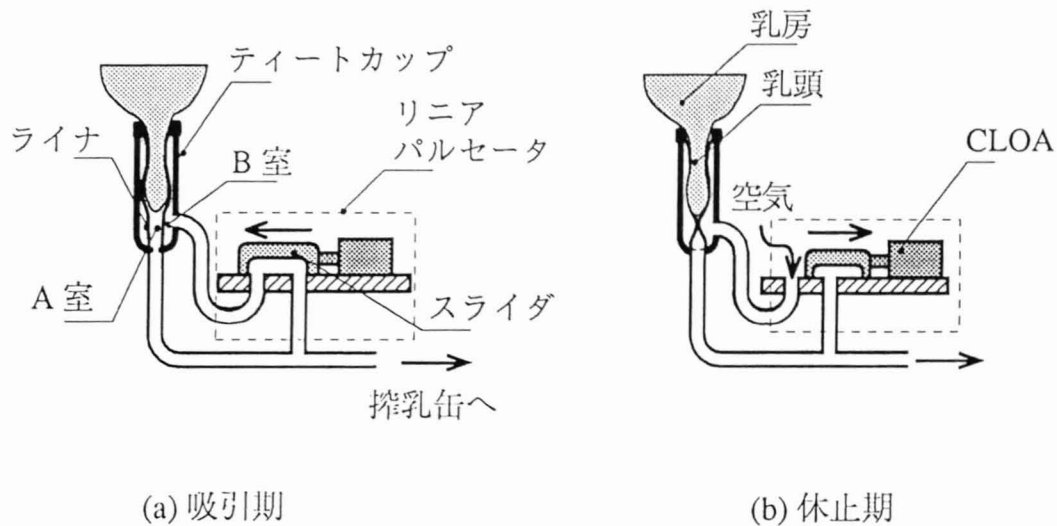


図 2.1 ティートカップの装着図
Fig. 2.1 Illustration for attaching the teat cup

つづいて、オリオン機械(株)で開発された空気圧駆動式の、リキッドパワーパルセータの動作原理を、図 2.2 にもとづいて説明する。オリフィスを備えた仕切板を中央にはさんで、2枚のゴム製のダイヤフラムで作られた空間には、液体が封入されている。今、空気室 Cが大気状態の時は、空気室 Dは真空状態である。このため両室の圧力差によりダイヤフラム 1は右側に押され、液室 E内の液体はオリフィスで絞られながら液室 Fに移動し、同時にダイヤフラム 2と、これに直結されている駆動軸とスライダも右側に移動する。この時、図 2.1におけるティートカップの拍動室 Bは真空状態となり、乳は排出されることになる。

スライダが右端に位置すると、これに連動するパイロットバルブが作動し、上記の作動は反転し、スライダは左側に移動する。拍動室 Bは大気状態となり、乳の排出は停止する。以上の往復運動を繰り返して搾乳が行われる。

尚、液室に液体を封入する目的は、スライダの運動速度を一定に保つためであり、これによりパルセータの作動は一定周期を確保することができる。

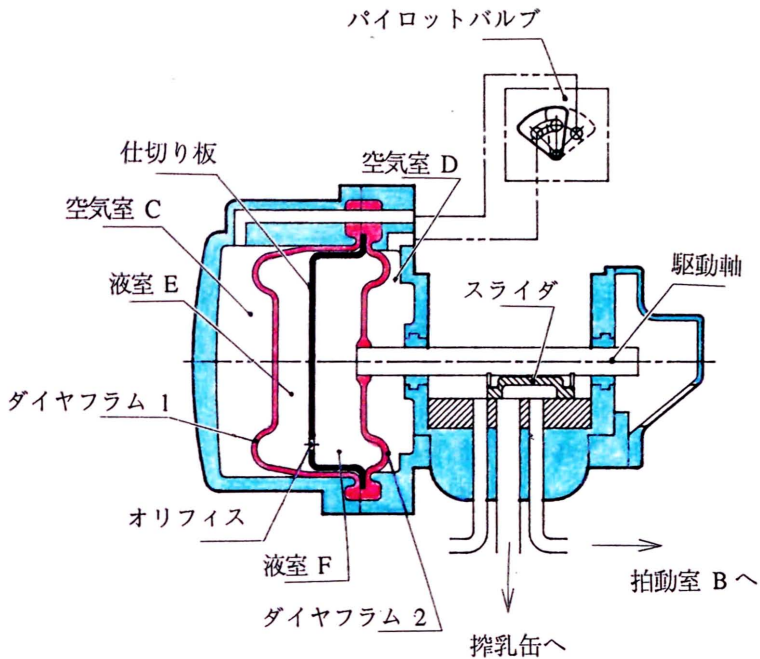


図 2.2 リキッドパワーパルセータの動作原理

Fig. 2.2 Operating principle of the liquid power pulsator

以上、極めて巧妙な機構を採用しているが、長時間の使用によるパイロットバルブの磨耗や、液漏れ事故等の問題も残している。

一般的に、パルセータの特性評価は、次の 4 要因に分けて考えられる^(2.1)。

- 1) 拍動数 : 一般的には 40~60 [回/分]
- 2) 拍動比 : 図 2.3 において、一般的には $a+b:c+d=50:50$ 若しくは $60:40$ であるが、極端なものは $75:25$ 程度まで吸引期を長くしたものもある。
- 3) 移動時間 : 休止期から吸引期まで、および吸引期から休止期までの時間。
- 4) 到達真空圧 : 搾乳真空圧が 380 [mmHg] であれば、この値も同じ。

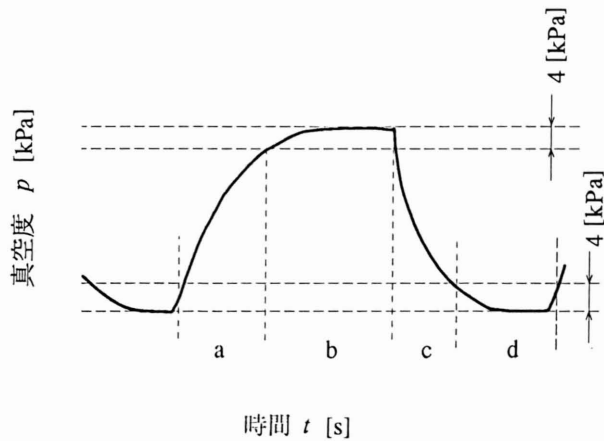


図 2.3 パルセータの特性波形の説明図

Fig. 2.3 Explanatory diagram of specific wave form of the pulsator

1920年代に、現在、使用されている搾乳機の原理の完成を見て以来、機械搾乳に用いられる真空圧は、一般的には 300~450 [mmHg] であるが、最近、高速搾乳の目的から真空圧は、高めに設定する傾向である。しかしながら、高い真空圧は乳頭障害発生の誘因となる場合が多い。

また、拍動数は 40~60 [回/分] を採用しているが、その根拠としているのは、子牛の吸引数とか、親牛の心拍数と同じとか、いろいろ述べられているが、全く理論的根拠はない。

最近 Stephen B.Spencer の報告によると^(2,2)、近年の搾乳機械に関する研究では、乳房炎と搾乳機械との関係に集中しており、その中でデンマークにおける調査データでは、牛群での感染の 6.6% が搾乳機械要素による要因であることが示されている。尚、我国においては同様な調査は行われていないので、具体的な感染率は不明であるがほぼ同じ傾向であると推定される。

2.2 円筒状リニア振動アクチュエータの構造

2.2 Structure of the cylindrical linear oscillatory actuator

本研究における，円筒状リニア振動アクチュエータの基本構造は，鉄心可動式磁石内蔵形リニア振動アクチュエータである。

図 2.4 にその基本構造を示す。同図に示すように固定子は，2 個の磁極を持つ炭素鋼 S45C 製のヨーク，2 個の励磁用コイルと，中央磁極として Nd-Fe-B 合金製のリング状永久磁石が配置されている。励磁コイルは発生する磁束の方向が同一方向になるように直列に接続されている。永久磁石は，励磁コイルで発生する磁束の方向と同一方向に合わせるため，外側は S 極に，内側は N 極となるように磁化されている。表 2.1 には，本研究の CLOA に対する要求仕様を示した。外形寸法は，パルセータに組み込むことを考慮して，直径 25 [mm] 以内，長さ 30 [mm] 以内とする。

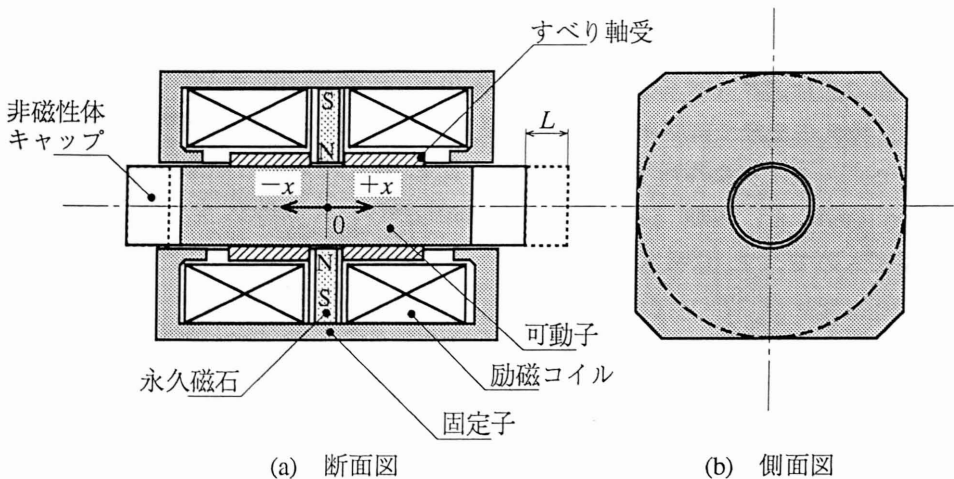


図 2.4 CLOA の基本構造

(x : 可動子変位, L : ストローク)

Fig. 2.4 Basis structure of the CLOA

表 2.1 リニア電磁パルセータ用 CLOAの要求仕様

Table 2.1 Required specifications of a CLOA for the linear electromagnetic pulsator

項 目	数 値 [単位]
長 さ	30 [mm]以内
直 径	25 [mm]以内
ストローク	±2 [mm]
静 推 力	10 [N]
拍 動 数	40～66 [回/min]

2.3 円筒状リニア振動アクチュエータに必要な推力

2.3 Required thrust of the cylindrical linear oscillatory actuator

リニア電磁パルセータ用 CLOA の必要推力を求めるために、スライダの予定寸法を基に、スライダとパルセータの台座との間の摩擦力を計算で求める。

図 2.5 はスライダに加わる、力関係を図示したものである。スライダの内側は、搾乳缶を経て真空ポンプに接続されているので、常に真空状態である。そこで、スライダに作用する垂直方向の力 F_n は、スライダの外側（大気圧＝約 100 [kPa]）と、内側（真空圧＝380 [mmHg]＝約 50 [kPa]）との圧力差により決まるので、 F_n は次式で決まる。

$$F_n = \Delta p \cdot A = (p_o - p_v) \cdot A \quad [\text{N}] \quad (2.1)$$

ここに、 F_n : 垂直方向の力 [N]

p_o : スライダの外側の圧力（大気圧）＝約 100 [kPa]

p_v : スライダの内側の圧力（真空圧）＝約 50 [kPa]

A : スライダの投影面積＝ 1.89×10^{-4} [m²]

この式により求めた、垂直方向の力 F_n は 9.45 [N] であった。次いで、この垂直方向の力 F_n を用いて、スライダを水平方向に移動するに必要な力 F_μ は次式で求めることができる。

$$F_{\mu} = \mu \cdot F_n \quad [\text{N}] \quad (2.2)$$

ここに、 μ : スライダの摩擦係数

筆者が採用を予定している、NTN 社製の弗素樹脂系のルーロン LD は、軸受の最大滑り速度が 250 [m/min] で、静摩擦係数は、0.04~0.16 の範囲であり、速度が大になるに従い摩擦係数は小さくなる特性である⁽³⁾。スライダの往復運動の滑り速度は 約 36 [m/min] であるが、余裕をみて摩擦係数は最大の 0.16 を採用する。

そこで、式 (2.2) から水平方向の力、即ち CLOA に要求される最低静推力は 1.5 [N] と求められるが、CLOA の設計に際しては、余裕を見て、設計静推力は 10 [N] とする。

なお、ルーロン LD の動摩擦係数は 0.08~0.15 であり、滑り速度が増加するに従い、動摩擦係数は小さくなる特性である。

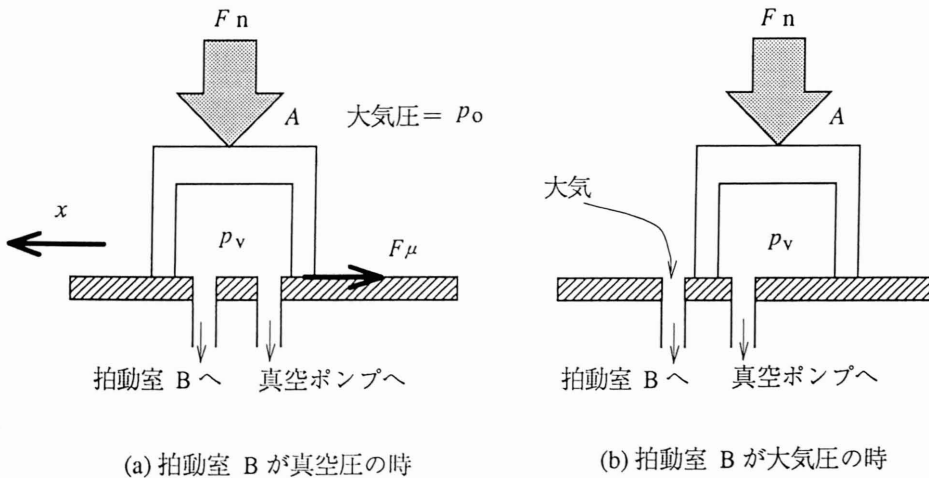


図 2.5 スライダに加わる力関係

Fig. 2.5 Relation between each forces to the slider

2.4 円筒状リニア振動アクチュエータの動作理論

2.4 Performance theory of the cylindrical linear oscillatory actuator

2.4.1 円筒状リニア振動アクチュエータの基本構造

リニアパルセータに搭載予定の CLOA の基本構造は，変位 $x = 0$ の場合，図 2.6 に示すことができる^{(2.4)-(2.6)}。

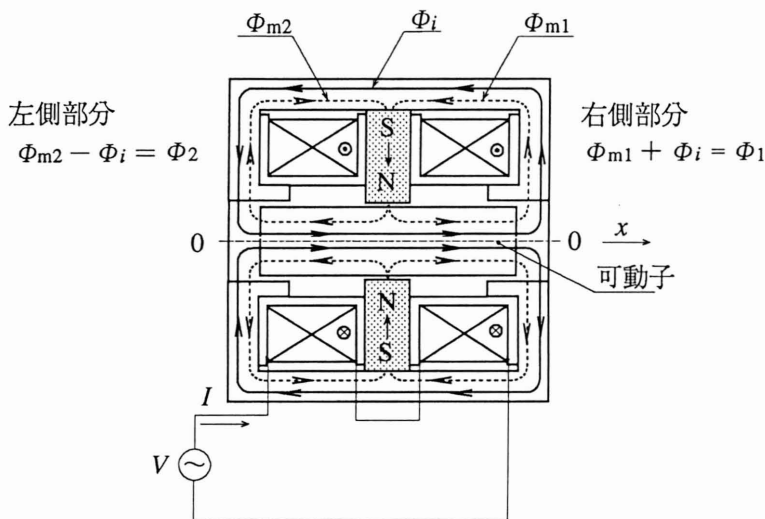


図 2.6 CLOA の基本構造 (変位 $x = 0$ の場合)

Fig. 2.6 Basic structure of the CLOA

図 2.6 において，電圧 V [V] をもつ交流電源から交流電流 I が流れたとき，この電流によって 2 個のコイルから発生する磁束を Φ_i とする。

一方，リング状の永久磁石 PM から磁束 Φ_m が発生し，左右両側に分流して， Φ_{m1} ， Φ_{m2} となる。すなわち，次式が成立する。

$$\Phi_m = \Phi_{m1} + \Phi_{m2} \quad (2.3)$$

CLOA の構造は，円筒状であり，軸対象構造となっている。

図 2.6 において，左右両部分において，右側の磁束 Φ_1 と左側の磁束 Φ_2 は，それぞれ次式のようになる。

$$\Phi_1 = \Phi_{m1} + \Phi_i \quad (2.4)$$

$$\Phi_2 = \Phi_{m2} - \Phi_i \quad (2.5)$$

上式において、次式が成立するとする。

$$\Phi_{m1} = \Phi_{m2} = \Phi_i \quad (2.6)$$

式 (2.6) によって、式 (2.4) と (2.5) は、それぞれ次の形となる。

$$\Phi_1 = 2\Phi_i \quad (2.7)$$

$$\Phi_2 = 0 \quad (2.8)$$

上の磁束 Φ_1 によって鉄心（円筒状ロッド）は、右側部分へ移動することになる。

しかし、実際には、上の式 (2.7) と (2.8) はなかなか成立しない。なぜなら、可動子が運動しているとき式 (2.6) において $\Phi_{m1} \neq \Phi_{m2}$ となるからである。

2.4.2 円筒状リニア振動アクチュエータの電気回路

CLOA の電気回路は、図 2.7 に示したように描くことができる。同図において、次式が成り立つ。

$$L \frac{di}{dt} + Ri = v \quad [\text{V}] \quad (2.9)$$

$$L = L_1(x) + L_2(x) \quad [\text{H}] \quad (2.10)$$

$$R = R_1 + R_2 \quad [\Omega] \text{ (コイル 1, 2 の巻線抵抗)}$$

$$v = V_m \sin \omega t \quad [\text{V}] \quad (2.11)$$

ここに、 V_m ：電圧 v の最大値

図 2.7 にの回路において注意すべきことは、普通のトランス回路と異なり、直流磁束 Φ_{m1} 、 Φ_{m2} に交流磁束 Φ_i が重畳して、全磁束 Φ_1 、 Φ_2 の強弱によって可動子が左右方向 (x 方向) に往復運動することである。

図 2.7 における交流電圧 i は、次式で与えられる。

$$i = \frac{v}{Z}$$

$$= \frac{V_m}{Z} \sin(\omega t - \varphi) \text{ [A]} \quad (2.12)$$

$$= I_m \sin(\omega t - \varphi) \quad (2.13)$$

ここに,

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} \quad (2.14)$$

$$\varphi = \tan^{-1} \omega L/R \quad (2.15)$$

$$I_m = V_m / Z \quad (2.16)$$

式 (2.14) におけるインダクタンスは $L = L_1(x) + L_2(x)$ であり, 変位 x に依存する。しかし, 可動子の一往復において $L_1(x) + L_2(x) \simeq \text{一定}$ となるので, 式 (2.15) の位相差 φ もほぼ一定値となる。

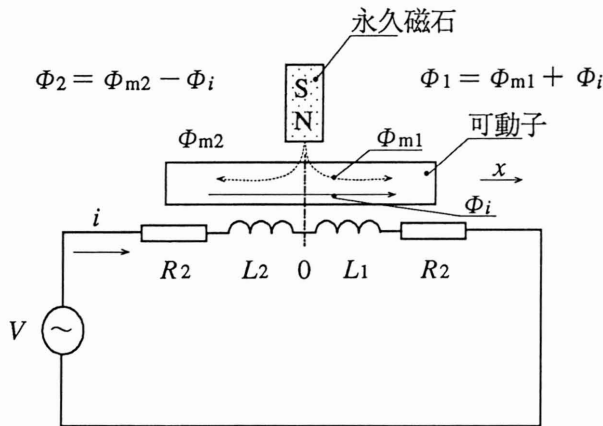


図 2.7 CLOA の電気回路 (原点 0 : $x = 0$ の中立点)

Fig. 2.7 Electric circuit of the CLOA

2.4.3 円筒状リア振動アクチュエータの磁気等価回路

本 CLOA の磁気等価回路は、図 2.8 に示すように、描くことができる^(2.4)。可動子心の変位 x によって、CLOA における左右両側の磁気抵抗 $R_{m1}(x)$, $R_{m2}(x)$ は変化し、これに伴い電流による磁束 $\Phi_i(x)$ は必ずしも一定とならない。

図 2.8 において、変位 x に関係なく、次式が成立すると仮定する。

$$\begin{aligned} \Phi_m/2 &= \Phi_{m1}(x) = \Phi_{m2}(x) = \Phi_0 \\ &= \text{const.} \end{aligned} \quad (2.17)$$

(実際には、 $\Phi_{m1}(x) \neq \Phi_{m2}(x)$ となる場合が多い。)

すなわち、図 2.9 に示したように、磁束 Φ_{m1} , Φ_{m2} は、最大ストローク $x_0 \sim -x_0$ の範囲において一定と仮定する。

図 2.8 における右側部分の磁束 Φ_1 は、次の形となる。

$$\begin{aligned} \Phi_1 &= \Phi_{m1} + \Phi_i \\ &= \Phi_0 + \Phi_i(x) \end{aligned} \quad (2.18)$$

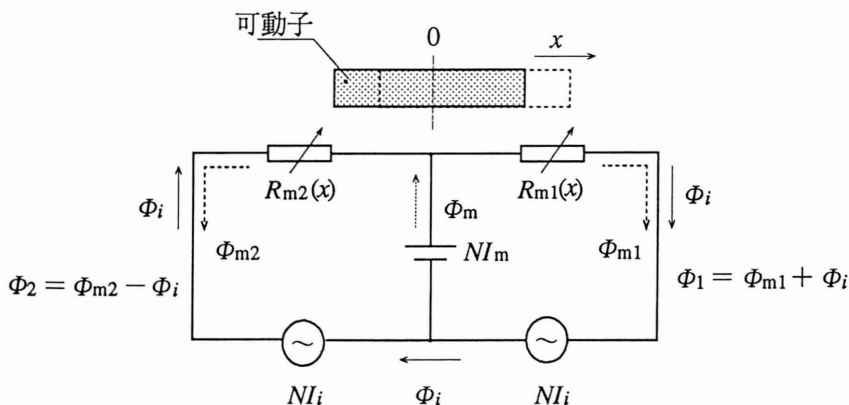


図 2.8 CLOA の磁気等価回路 ($\Phi_m = \Phi_{m1} + \Phi_{m2}$)

Fig. 2.8 Magnetic equivalent circuit of the CLOA

磁束 $\Phi_i(x)$ が図 2.9 に示したように変化したと仮定すると、 $x = x_0$ では $\Phi_i(x_0) = \Phi_0$ となるので上式は次式となる。

$$\Phi_1 = \Phi_0 + \Phi_i(x_0) = 2\Phi_0 \quad (2.19)$$

この $2\Phi_0$ が右側への推力に寄与する。

図 2.8 の左側部分での磁束 Φ_2 は、次の形となる。

$$\begin{aligned} \Phi_2 &= \Phi_{m2} - \Phi_i \\ &= \Phi_0 - \Phi_i(x) \\ &= \Phi_0 - \Phi_i(-x_0) \end{aligned} \quad (2.20)$$

図 2.9 に示したように、 $x = -x_0$ では $\Phi_i(-x_0) \neq \Phi_0$ であるので、上式は右側の推力に対しては、逆に制動力となってしまふ。

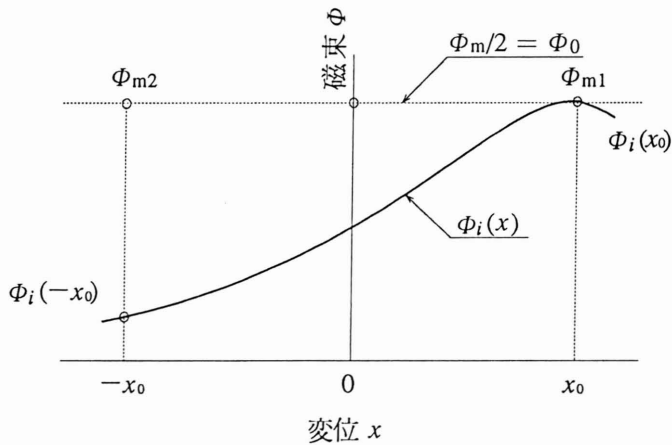


図 2.9 CLOA における可動子の変位 x に伴う磁束の変化
($\pm x_0$: 最大ストローク)

Fig. 2.9 Flux, Φ , vs displacement, x characteristics of the CLOA

一般に、インダクタンス L と磁束 Φ との間には、次式が成立している。

$$N\Phi = LI \quad [\text{Wb}] \quad (2.21)$$

ここに、 N : コイルの巻数 [回], I : コイルに流れる電流 [A]

上式から Φ は、次の形で表される。

$$\Phi = \frac{LI}{N} \quad (2.22)$$

そこで、図 2.8 における右側部分の磁束 Φ_1 は、上式を考慮に入れて次の形となる。

$$\begin{aligned} \Phi_1 &= \Phi_{m1} + \Phi_i(x) \\ &= \Phi_0 + \frac{L_1(x)}{N} i \end{aligned} \quad (2.23)$$

上式に式 (2.13) を代入すると、 Φ_1 は次式で表される。

$$\begin{aligned} \Phi_1 &= \Phi_0 + \frac{L_1(x)}{N} I_m \sin \omega t \\ &= \Phi_0 + \Phi_{i0} \sin \omega t \end{aligned} \quad (2.24)$$

ここに、 $\Phi_{i0} = L_1(x) I_m / N$

いま、 $x = x_0$ において時間 t に対する磁束 Φ_1 の波形が、図 2.10 のようになったとする。

図 2.10 (a) において、 Φ_0 の t に対する面積 A_0 は、次式となる。

$$A_0 = \Phi_0 T/2 \quad [\text{Wb} \cdot \text{s}] \quad (2.25)$$

一方、 Φ_i の t に対する面積 A_i は、次式となる。

$$\begin{aligned} A_i &= \frac{T}{2} \left\{ \frac{1}{T/2} \int_0^{T/2} \Phi_{i0} \sin(\omega t - \varphi) dt \right\} \\ &= \frac{T}{2\pi} \cdot \Phi_{i0} \cdot 2 \cos \varphi \end{aligned}$$

$$= \Phi_{i0} T \cos \varphi / \pi \quad (2.26)$$

ここに、 Φ_{i0} : 磁束 $\Phi_i(x)$ の最大値、

$$\int_0^{T/2} \Phi_{i0} \sin(\omega t - \varphi) dt = \frac{T}{2\pi} \cdot \Phi_{i0} 2 \cos \varphi$$

上式において、 $\Phi_{i0} = \Phi_0$ 、 $\varphi = 0$ とした場合の A_i は、次の形となる。

$$A_i = \Phi_0 T / \pi \quad (2.27)$$

式 (2.25) と式 (2.27) を比較してみると、明らかに $A_0 > A_i$ である。

したがって、 $\Phi_{i0} = \Phi_0$ 、 $\varphi = 0$ に設定したとしても、実際にはすでに式 (2.19) で示した $\Phi_1 = 2\Phi_0$ とは決してならない。

そこで、式 (2.19) を実現するためには、図 2.10 (b) に示したように、 Φ_i の最大値を $k\Phi_{i0}$ としなければならない。

この k の値は、次式で与えられる。

$$k = \frac{A_0}{A_i} = \frac{\Phi_0 T/2}{\Phi_0 T/\pi} = \frac{\pi}{2} = 1.57 \quad (2.28)$$

つまり、 Φ_i の最大値が $k\Phi_{i0}$ になるように電流 i を大きくして、初めて $\Phi_1 = 2\Phi_0$ となるばかりでなく、 $\Phi_2 = 0$ ともなる。

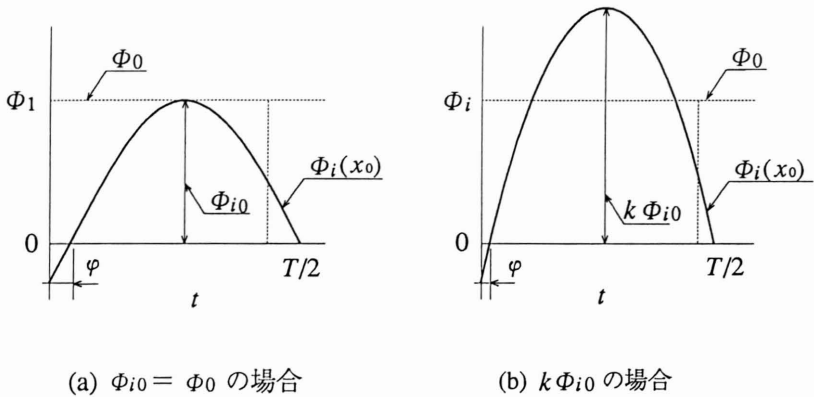


図 2.10 電流による磁束 Φ_i の時間変化

Fig. 2.10 Sequential change in magnetic flux Φ_i by electric current

2.4.4 静推力の表現式

図 2.8 において Φ_1 を次のように表してみる。

$$\Phi_1 = \Phi_{m1} + \Phi_i = B_1(x) A(x) \quad (2.29)$$

ここに、 $B_1(x), A(x)$ ：変位 x における右側部分での磁束密度 [T] とその作用面積 [m^2]

右側部分でのギャップにおける磁気エネルギー W_m は、次式となる^(2.7)。

$$W_m = \frac{1}{2\mu_0} B_1^2(x) V(x) \quad (2.30)$$

ここに、 $V(x) = A(x) \cdot x$ ：変位 x でのギャップ部分の作用体積 [m^3]

右側部分での静推力 F_1 は、次式で与えられる。

$$\begin{aligned} F_1 &= \frac{\partial W_m}{\partial x} \\ &= \frac{1}{2\mu_0} \left\{ B_1(x) \frac{\partial B_1(x)}{\partial x} V(x) + B_1^2(x) \frac{\partial V}{\partial x} \right\} \end{aligned} \quad (2.31)$$

上式が、 F_1 の一般式である。

変位 $x = x_0$ では、それぞれ次の式が成立するものとする。

$$B_1(x_0) = \frac{1}{A(x_0)} (\Phi_0 + k \Phi_{i0}) = \text{const} \quad (2.32)$$

$$V(x_0) = A(x_0) \cdot x \quad (2.33)$$

式 (2.32) と (2.33) を式 (2.31) に代入して、右側部分の静推力 F_1 は、次の形となる。

$$F_1(x_0) = \frac{1}{2\mu_0} \cdot B_1^2(x_0) A(x_0) \quad [\text{N}] \quad (2.34)$$

左側部分の静推力 F_2 は、同様の手法で次の形となる。

$$\Phi_2 = \Phi_{m2} - \Phi_i = B_2(x) A(x) \quad (2.35)$$

$$F_2 = \frac{1}{2\mu_0} \left\{ B_2(x) \frac{\partial B_2(x)}{\partial x} V(x) + B_2^2(x) \frac{\partial V}{\partial x} \right\} \quad (2.36)$$

$$B_2(-x_0) = \frac{1}{A(-x_0)} (\Phi_0 - k \Phi_{i0}) = 0 \quad (2.37)$$

$$F_2(-x_0) = 0 \quad (2.38)$$

2.4.5 円筒状リニア振動アクチュエータの有効電力

CLOA の駆動回路において、電圧 v 、電流 i が次式で与えられたとする。

$$v = \sqrt{2} V \cos \omega t \quad (2.39)$$

$$i = \sqrt{2} I \cos(\omega t - \varphi) \quad (2.40)$$

ここに、 V ：電圧 v の実効値 (rms) [V]

I ：電流 i の実効値 (rms) [A]

φ ： v と i 間の位相差 [rad]

ここで、 V_m と I_m を v と i の最大値としたとき、上の 2 式は次のように表すこともできる。

$$v = V_m \cos \omega t \quad (2.41)$$

$$i = I_m \cos (\omega t - \varphi) \quad (2.42)$$

この場合の有効電力 P は、次の形で与えられる。

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{T} \int_0^T v i \, dt \\ &= VI \cos \varphi \\ &= VI \lambda \text{ [W]} \end{aligned} \quad (2.43)$$

ここに、 $\lambda = \cos \varphi$: 力率

[参考] 式 (2.43) の導出

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{T} \int_0^T v i \, dt \\ &= \frac{1}{T} \int_0^T 2VI \cos \omega t \cos (\omega t - \varphi) \\ &= \frac{VI}{T} \int_0^T \left\{ \cos \varphi \, dt + \cos (2\omega t - \varphi) \, dt \right\} \end{aligned} \quad (2.44)$$

$$\begin{aligned} \therefore \cos (A \pm B) &= \cos A \cos B \mp \sin A \sin B \\ \cos (A + B) + \cos (A - B) &= 2\cos A \cos B \end{aligned}$$

$$\text{第 1 項} = \int_0^T \cos \varphi \, dt = T \cos \varphi \quad (2.45)$$

$$\begin{aligned} \text{第 2 項} &= \int_0^T \cos (2\omega t - \varphi) \, dt \\ &= \frac{1}{\omega} \left| \sin (2\omega t - \varphi) \right|_0^T \\ &= \frac{1}{\omega} \left\{ \sin (2\omega T - \varphi) - \sin (-\varphi) \right\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{1}{\omega} (-\sin \varphi + \sin \varphi) \\
&= 0
\end{aligned} \tag{2.46}$$

式 (2.45) と (2.46) を式 (2.44) に代入して、次式が得られる。

$$P = VI \cos \varphi \tag{2.47}$$

ここで注目すべき事項は、式 (2.43) が成立するのは、 v, i 波形がともに正弦波の場合ということである。

実際の CLOA の駆動回路では、電流 i には波形ひずみが生ずる。すなわち、 i に高調波が含まれることになる。この際でも、有効電力 P は、常に v と i の基本波同士の積で表されることに留意しなければならない。

2.4.6 波形ひずみの要因

CLOA の磁化特性が図 2.11 に示したように、 $B(NI)$ 曲線で与えられたとし、永久磁石による超磁力 NI_m を飽和磁束密度 B_s の $B_s/2$ に設定したとする。

さらに、コイルによる電流の起磁力 NI_i を無理して $NI_i = NI_m$ に設定して、作動させた場合、同図に示したように時間に対する磁束密度の波形 $B(t)$ は上下非対称となる。

$B(t)$ の非対称は、以下のようなデメリットを CLOA にもたらすこととなる。

(1) 有効電力の低減

非対称な $B(t)$ は、電流波形に高調波成分を含ませることとなり、有効電力が低減するばかりでなく、高調波成分による渦電流損を増加させる。

(2) 不均一な往復運動

$B(t)$ の振動が 1 周期において異なるため、不均一な往復運動となる。つまり、右側では推力 F_s は弱く、左側では F_s が強くなり、ギクシャクな運動となる。

これらを解決する方法として、 NI_s の動作点 $B_s/2$ を低くすることとなる。

$B_s/2$ を低くすると、当然 F_s の低減を招くことになるから、高い B_s をもつ磁性材料の採用が望まれることとなる。

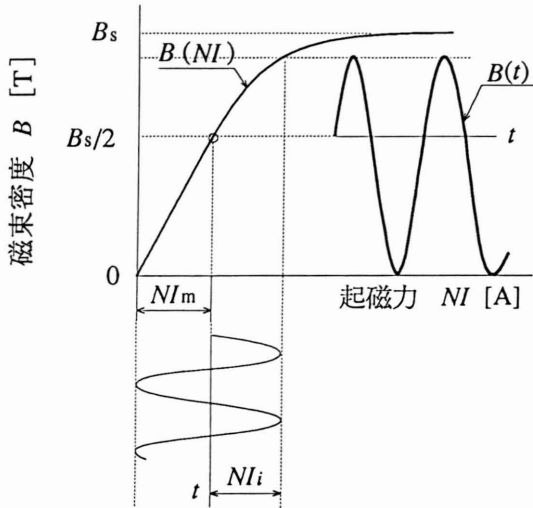


図 2.11 CLOA の駆動回路の波形ひずみ

Fig. 2.11 Wave distortion of driving circuit of CLOA

2.5 有限要素法による円筒状リニア振動アクチュエータの静推力解析

2.5 Static thrust analysis of the cylindrical linear oscillatory actuator by the Finite Element Method

一般的に、アクチュエータの数値解析には、有限要素法 (Finite Element Method, 以下 FEM と略記), あるいは境界要素法を用いた方法が行われている^{(2.8)-(2.11)}。アクチュエータの推力シミュレーションする利点として、リニアモータの試作前にその推力特性が明らかになること、また磁性材料、形状の変更をしたとき、それぞれに応じた特性が容易に求められることが挙げられる。

本研究の CLOA に対して、FEM を用いたシミュレーション解析を行なった。本節では、FEM に入力するデータの設定方法と、その計算方法について述べる。

CLOA の数値解析に際しては、以下の 3 項目を入力しなければならない。

- 1) 各磁性材料の初期磁化特性
- 2) 電流密度
- 3) 永久磁石の保磁力

2.5.1 円筒状リニア振動アクチュエータに使用される磁性材料

図 2.13 には、CLOA に用いる磁性材料の初期磁化特性を示した^(2.12)。CLOA には 2 種類の磁性材料、すなわちパーメンジュールと、炭素鋼 S45C とを用いている。同図の初期磁化特性は、環状磁心である測定試料に、励磁コイル、検出コイルをそれぞれ 200 [回]、30 [回] 巻き、アナライジングレコーダを用いて測定した。最大磁束密度は、それぞれパーメンジュール では 2.15 [T]、S45C では 1.62 [T] であった。

FEM に入力するときは、図 2.13 で示した初期磁化特性を $B-H$ 特性から $B-M(B)$ 特性に変換する必要がある。その変換式を以下に示した。

$$M(B) = \frac{B_s}{\mu_0} - H_s (= \text{const}) \quad (H \geq H_s) \quad [\text{A/m}] \quad (2.48)$$

$$M(B) = \frac{B}{\mu_0} - H = \frac{B}{\mu_0} \left(1 - \frac{1}{\mu_r}\right) \quad (0 \leq H \leq H_s) \quad [\text{A/m}] \quad (2.49)$$

- ここに、 $M(B)$: 初期磁化特性の磁化 [A/m]
 B : 初期磁化特性の磁束密度 [T]
 μ_0 : 真空の透磁率 [H/m]
 μ_r : 材質の比透磁率
 H : 磁界の強さ [A/m]
 H_s : 飽和磁界の強さ [A/m]
 B_s : 飽和磁束密度 [T]

我々の使用している FEM のソフトは磁化 M を [A/m] の単位として扱っている。

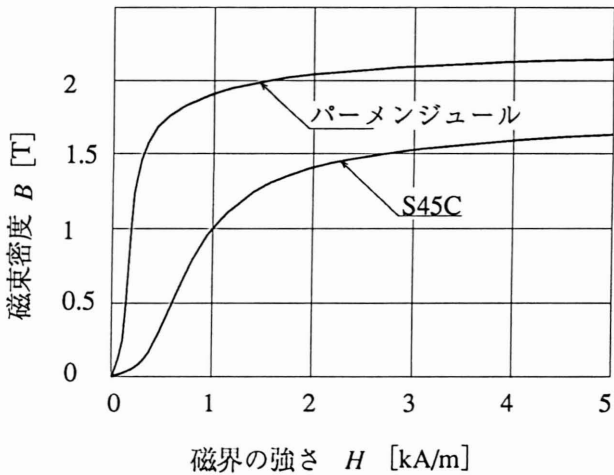


図 2.13 CLOA-1 に用いた磁性材料の直流磁化特性 (実測値)

Fig. 2.13 Static magnetization characteristics of magnetic materials used in the CLOA-1

図 2.14 には、その 2 種類の磁性材料の $B-M(B)$ 特性を示した。同図では、 $H = 5$ [kA/m] における最大磁束密度を飽和磁束密度として扱った。

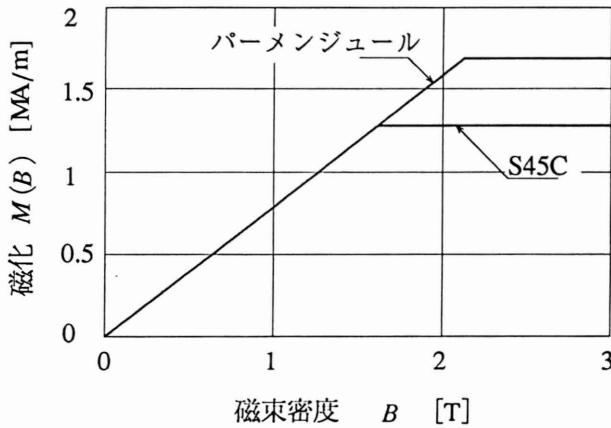


図 2.14 初期磁化曲線の $B-M(B)$ 特性

Fig. 2.14 Characteristic of magnetizing curve of $B-M(B)$

2.5.2 電流密度

FEM に入力する電流密度 J [A/m²] は、以下の式から求められる。

$$J = \frac{NI}{\pi (d/2)^2 N \times 100 / \xi} = \frac{NI}{l \cdot w} \quad [\text{A/m}^2] \quad (2.50)$$

ここに、 NI : コイルの起磁力 [A]
 d : 巻線の線径 [m]
 N : コイルの巻数 [回]
 ξ : 占積率 %
 l : コイルの長さ [m]
 w : コイルの巻幅 [m]

電流密度は、式 (2.50) からコイルの起磁力とコイルの仕様から求める方法と、起磁力とボビン形状から求める方法とである。

2.5.3 永久磁石の保磁力

CLOA の中央部分に永久磁石を配置してある。CLOA の磁路は 図 2.15 に示したように、永久磁石を減磁させる方向には流れない。したがって理想的な永久磁石として取扱うことが可能である。

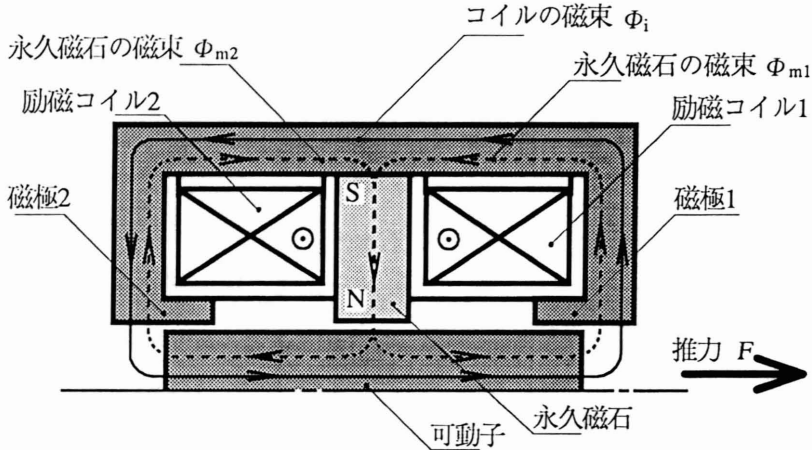


図 2.15 CLOA の磁路構成

Fig. 2.15 Magnetic flux route of the CLOA

図 2.16 には、永久磁石の概念図を示した。上述の考察から永久磁石の内部を真空として扱うことができるので、飽和領域において永久磁石の比透磁率を 1 として近似できる。したがって図 2.16 に示した永久磁石の $B-H$ 特性で、傾き μ_0 の残留磁束密度 B_r を通る直線の保持力の値が、FEM に入力する保持力となる。したがって CLOA の永久磁石 (Nd-Fe-B 合金) の保磁力 H_c' を 9×10^2 [kA/m] と設定した。この前提として動作点が飽和領域にあることが挙げられる。

FEM の計算は、以下のようにして行なった。

まず、電流により生じる磁束密度 B_i [T] はビオサバルの式から求めることができる。

$$B_1 = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{\Omega} \frac{J \times R}{R^3} d\Omega \quad [\text{T}] \quad (2.51)$$

ここに、 Ω : 電流の存在する領域
 J : 起磁力と形状による電流密度 [A/m²]
 R : 積分点を起点とした位置ベクトル

$B - M(B)$ 特性と B_1 から、各要素の磁化 M [A/m] は、以下の式から求めた。

$$M = M(B) \frac{B_1}{B} \quad [\text{A/m}] \quad (2.52)$$

ただし、等方性磁性体としているので $M(0) = 0$ が成立
各要素のベクトルを考慮した磁束密度 B [T], 推力作用面の推力 F [N] は以下の式から求められる^(2.13)。

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{\Omega} \frac{3(M \cdot R)R - R^2 M}{R^5} d\Omega \quad [\text{T}] \quad (2.53)$$

$$F = \frac{1}{\mu_0} \int_{\Delta\Omega} \left\{ (B \cdot n) B - \frac{1}{2} |B|^2 n \right\} dA \quad [\text{N}] \quad (2.54)$$

ここに、 n : 推力作用面の法線ベクトル
 A : 推力作用面積 [m²]

したがって、CLOA の静推力 F_s は、上式の推力 F の可動子進行方向成分の総和となる。

また FEM では、近接の要素の値を比較しながら解を求めて行くニュートンラプソン法と収束を繰り返しながら真値を求める反復修正法に基づいて、上述の計算を行なった。

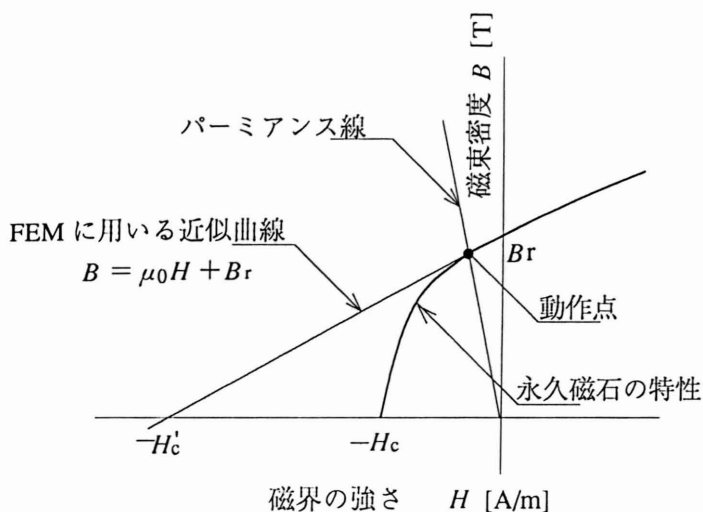


図 2.16 永久磁石の特性と FEM に用いる近似直線

Fig. 2.16 Property of permanent magnet and approximated Characteristic line used in FEM

2.6 円筒状リニア振動アクチュエータの設計と試作

2.6 Design and trial manufacture of the cylindrical linear oscillatory actuator

表 2.1 の CLOA の要求仕様を満たす CLOA の試作 1 号機（以下、CLOA-1 と略記）の詳細設計を行うにあたり、その設計仕様を表 2.2 に示した。図 2.17 には試作した CLOA-1 の外観図を、図 2.18 には組立図を、図 2.19 (1) 及び図 2.19 (2) には部品図を示した。

2.3 円筒状リニア振動アクチュエータの構造の項で述べたように、固定子は 2 個の磁極をもった炭素鋼 S45C 製のヨークと、中央磁極に Nd-Fe-B 合金製の永久磁石、この両側に 2 個の励磁用コイルを配置した構造となっている。

励磁コイルは線径 0.25 [mm] の銅線を使用して、1 相当あたり 530 [回] 巻いて、発生する磁束の方向が同一方向となるように、直列に接続されている。定格電流は 0.4 [A] である。永久磁石は図 2.20 に示すように、外形 22 [mm]、

内径 8 [mm], そして厚さ 2 [mm] で, 円周方向に 4 分割されている。磁石の外側は S 極に, 内側は N 極に磁化し, 励磁コイルで発生する磁束の方向と同一方向に合わせてある。図 2.21 は S 極表面の磁束密度分布を示しており, 4 分割された磁石の, それぞれの接触面で N 極側に突出しており, CLOA-1 に組み込まれたとき, 発生する磁束が有効に作用しない部分もある。永久磁石の最大エネルギー積 $(BH)_{max}$ は 277 [kJ/m³] である。

他方, 可動子の形状は, 鉄心可動式 CLOA では, その両端に緩やかなテーパ角を有するものもあるが^(2,4), 本 CLOA では加工上の理由から, テーパ角は採用せず円柱状とし, 材質はパーメンジュールと S45C との 2 種類を考えた。可動子の外形寸法は, $\phi 7.5 \times 27$ [mm] とした。可動子のストロークは, リニア電磁パルセータとの関係から, 4 [mm] とした。

固定子と可動子とのエアギャップは, 固定子内の滑り軸受けにより 0.25 [mm] に保持されている。

表 2.2 CLOA-1 の主な仕様

Table 2.2 Principal specifications of the CLOA-1

機械的仕様		電氣的仕様		
項目	数値 [単位]	項目	数値 [単位]	
固定子	大きさ	$\phi 25 \times 35$ [mm]	コイル巻数	530 [回]
	質量	100 [g]	線径	0.25 [mm]
	材質	S45C	励磁電流	0.4 [A]
可動子	大きさ	$\phi 7.5 \times 27$ [mm]	永久磁石	Nd-Fe-B合金
	質量	14 [g]	エアギャップ	0.25 [mm]
	材質	Permendur		

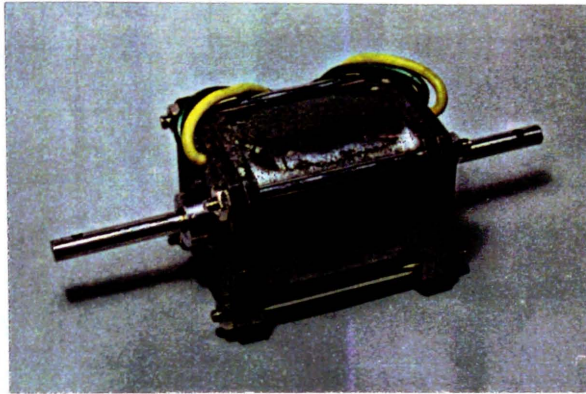


図 2.17 CLOA-1 の外観
 Fig. 2.17 Configuration of the CLOA-1

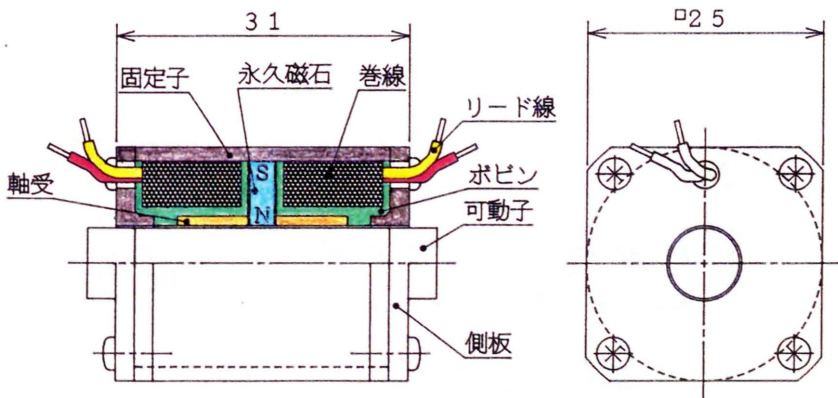
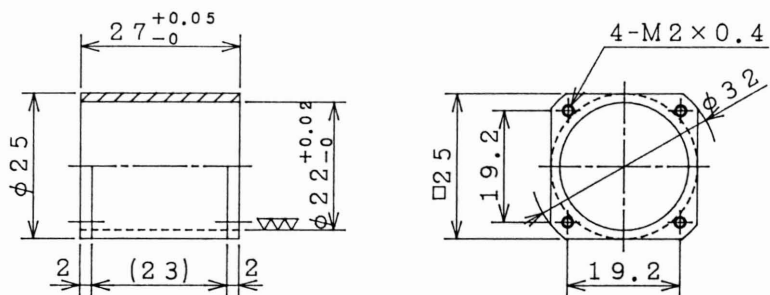
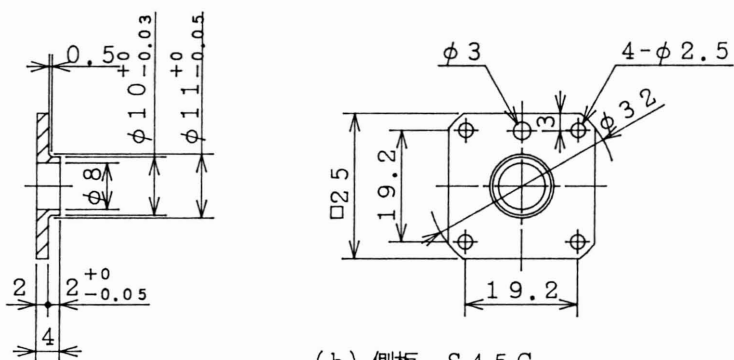


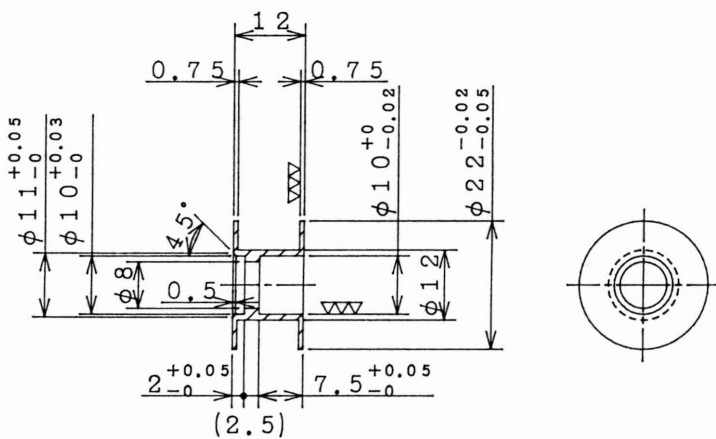
図 2.18 CLOA-1 の組立
 Fig. 2.18 Assembling of the CLOA-1



(a) 固定子 S45C



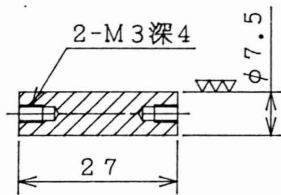
(b) 側板 S45C



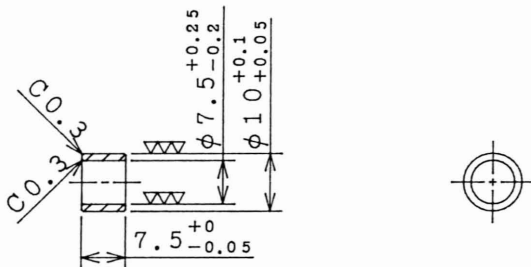
(c) ポビン A5052

図 2.19 (1) CLOA-1の部品図

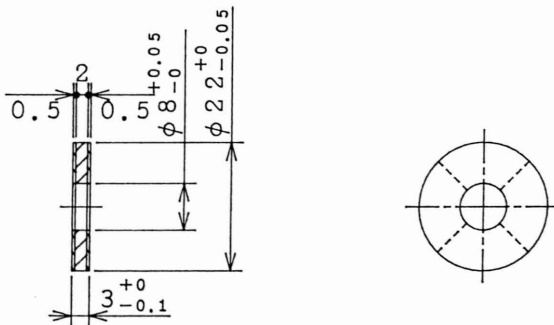
Fig. 2.19 (1) Parts of the CLOA-1



(d) 可動子 パーマネンジュール
及びS45C



(e) 軸受 フッソ樹脂系ルーロンLD



(f) 永久磁石 Nd-Fe-B合金(Neomax)

図 2.19(2) CLOA-1の部品図

Fig. 2.19 (2) Parts of the CLOA-1

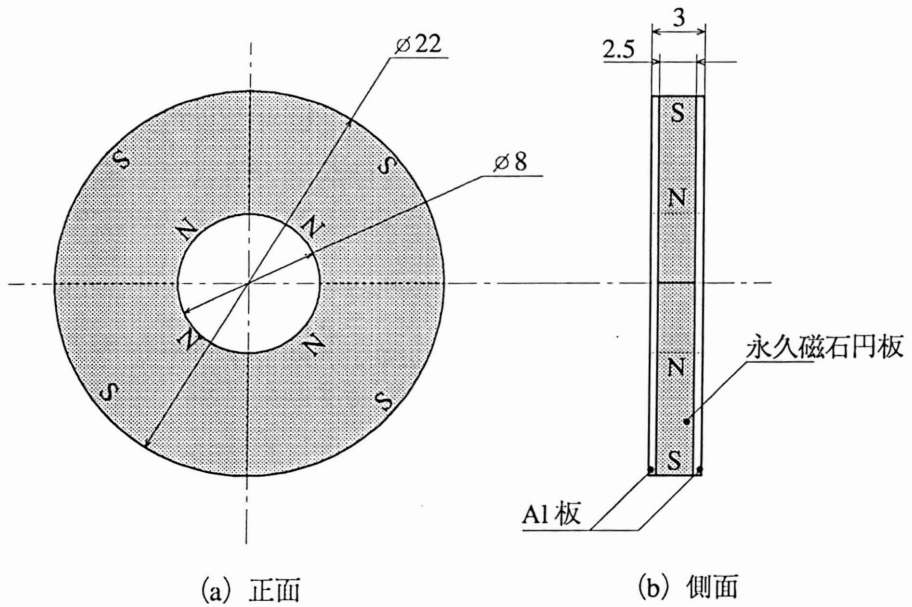


図 2.20 永久磁石の構造 (単位: [mm])

Fig. 2.20 Structure of the permanent magnet

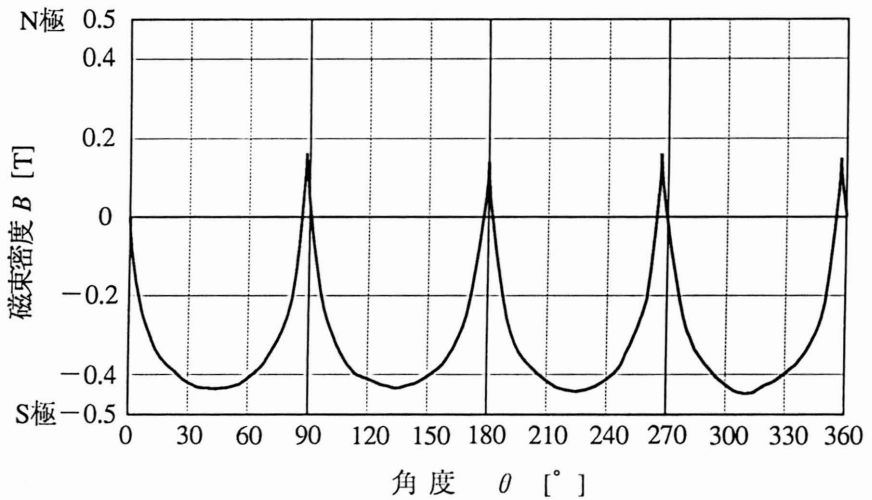


図 2.21 永久磁石のS極表面の磁束密度分布

Fig. 2.21 Flux distribution density on S-pole surface of permanent magnet

第 2 章の参考文献

- (2.1) ISO 3918 INTERNATIONAL STANDARD , Milking machines installations-Vocabulary , First edition-1977-07-1 , p.4 (1977)
- (2.2) Stephen B.Spencer : Recent Research and Development in Machine Milking a Review, Journal of Dairy Science , Vol.72, No.7 , pp.1907-1917 (1989)
- (2.3) NTN 東洋ベアリング株式会社 : NTN ルーロン カタログ , CAT.NO.8005 (1986)
- (2.4) 山田 一, 太田 浩, 竹内 勝広, 千村 誠, 小笠原 恒夫, 阿久津 哲造 : 長いストロークをもつ円筒状リニア振動アクチュエータの特性解析, 電気学会論文誌, Vol.108D, pp.501-508 (1988)
- (2.5) 西澤 尚武, 石井 丈士, 山田 一 : 搾乳ユニットに用いるリニア振動アクチュエータの特性解析, 日本応用磁気学会誌 Vol.18, No.2, pp.543-546 (1994)
- (2.6) 西澤 尚武, 八重崎 昌治, 石井 丈士, 山田 一 : 搾乳機に用いる円筒状リニア振動アクチュエータの動特性解析, 電気学会リニアドライブ研究会資料, LD-94-5, pp.35-42 (1994)
- (2.7) 山田 一, 宮澤 永次郎, 別所 一夫 : 基礎磁気工学, pp.164-167 (1975), 学献社
- (2.8) 沢 孝一郎, 鯉淵 鋼一, 石野 裕嗣, 津村 高志 : 有限要素法を用いたプランジャ形ソレノイドの最適設計に関する検討, 電気学会論文誌, Vol.112D, No.1, pp.45-54 (1992)
- (2.9) 河瀬 順洋, 村井 山宏, 伊藤 昭吉 : 単相交流電磁石の吸引力特性の解析, 電気学会論文誌, Vol.109D, No.7, pp.500-506 (1989)
- (2.10) 河瀬 順洋, 菊池 春秀 : 四面体辺要素を用いた三次元有限要素法による直流電磁石の過渡動作特性の数値解析, 電気学会論文誌, Vol.113D, No.8, pp.995-1001 (1993)
- (2.11) 天沼 克之, 榎 陽 : 電磁ソレノイドの推力特性解析, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-92-144, pp.57-64 (1992)
- (2.12) 鈴木 健治, 脇若 弘之, 水野 勉, 宮沢 永次郎, 山田 一 : 高速応答 LDM

- に用いる 5 磁性材料の直流磁化特性, 電気学会リニアドライブ研究会資料, LD-94-23, pp.49-56 (1994)
- (2.13) 野瀬 由喜男, 川原 敦志, 大戸 基道, 桃島 武文: 三次元磁界解析を用いたリニアモータモデルの力計算検証結果, 電気学会静止器・回転機合同研究会資料, SA-92-31, RM-92-66, pp.115-122 (1992)

第 3 章

円筒状リニア振動アクチュエータの特性解析

Characteristics analysis of
the cylindrical linear oscillatory actuator

第 3 章 円筒状リニア振動

アクチュエータの特性解析

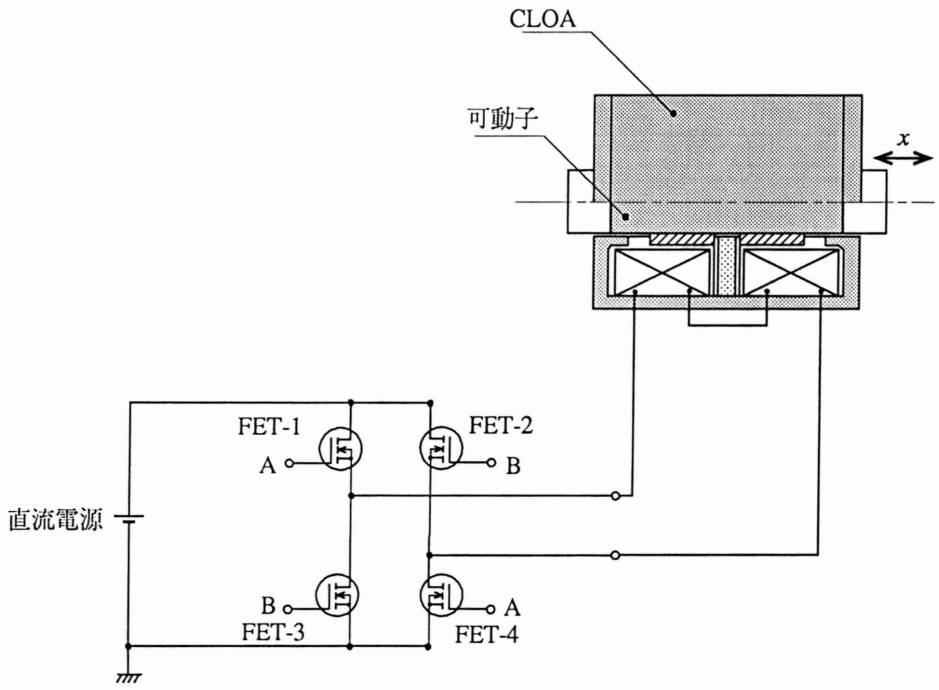
3. Characteristics analysis of the cylindrical linear oscillatory actuator

3.1 円筒状リニア振動アクチュエータの駆動装置

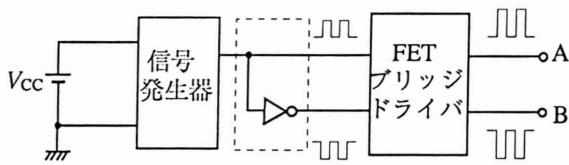
3.1 Driving system for the cylindrical linear oscillatory actuator

CLOA 用の駆動装置のブロックを、図 3.1 に示した^{(3.1)(3.2)}。ブロック (a) は駆動回路を、ブロック (b) は制御回路を示す。制御回路の信号発生器から出力されるパルスにより、駆動回路の端子 A と、端子 B を交互に H レベルにすることにより、電流の向きを交互に変換して、可動子を往復運動させる。この時の CLOA 駆動周期は、信号発生器の出力の周期と同一である。そのため信号発生器の出力特性を任意に変えることにより、CLOA の周期もこれに対応して変えることができる。このことから信号発生器に $1/f$ ゆらぎデータを組込むことにより、CLOA の可動子にこれに対応した $1/f$ ゆらぎ動作を与えることも可能となる。また、一周期において可動子の停止時間の比率が大きいので、図 3.1 (b) の点線の部分に図 3.2 に示した断続回路により一周内の通電時間の比率を小さくすること、いわゆる断続通電することにより CLOA の温度上昇を低く抑さえ、かつ効率も向上することができる。

図 3.3 には信号発生器内の回路構成を示した^(3.1)。本回路は一定波データ及び $1/f$ ゆらぎデータを書き込んだ ROM、ダウンカウンタ、アップカウンタ、基本クロック発生回路とフリップフロップで構成されている。ROM 内のデータをダウンカウンタの初期値として送り、ダウンカウンタでは基本クロックからの信号により、この初期値からカウントダウンされる。ダウンカウンタ内のデータが零になったとき“0”信号が出力される。この“0”信号はアップカウンタとフリップフロップの双方へ送られる。アップカウンタでは ROM のアド



(a) 駆動回路



(b) 制御回路

図 3.1 CLOA の駆動回路の構成

Fig. 3.1 Driving circuit of the CLOA

レスとして使用されるデータがインクリメントされ、次のゆらぎデータがダウンカウンタに送られる。一方、フリップフロップでは“0”信号が入るごとに出力信号が H レベルと L レベルを交互に切り替わる。

以上が信号発生器の基本構成であるが、CLOA がリニア電磁パルセータに組み込まれ実用化されるときには、この信号発生器をワンチップマイコンとすることにより、極めて小型化され、低コスト且つ高信頼性を図ることができる。さらにワンチップマイコンの記憶容量が大きいので、個々の牛体の泌乳特性に対応した $1/f$ ゆらぎ搾乳の実現も可能であると考えられる。さらに、電子回路的要素として、ASIC(Application Specific IC)を採用することにより、機能強化と独自機能を搭載することが可能となり、本システムのメリットが一層向上されよう。

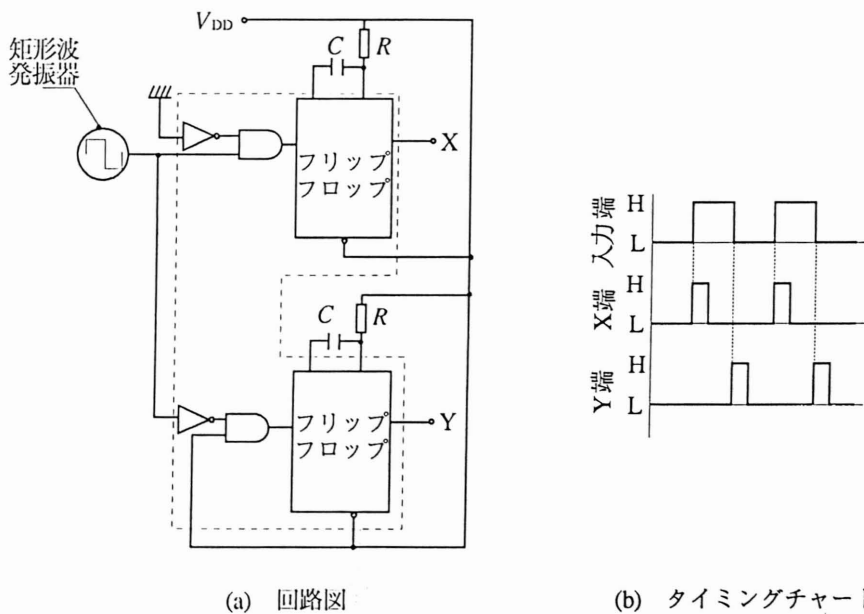


図 3.2 CLOA の断続駆動回路

Fig. 3.2 Intermittent driving circuit of the CLOA

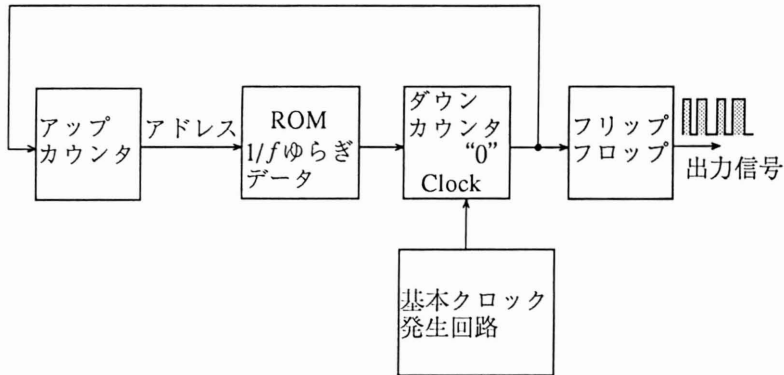


図 3.3 $1/f$ ゆらぎ信号発生器のブロック図

Fig. 3.3 Block diagram of $1/f$ fluctuation signal oscillator

3.2 円筒状リニア振動アクチュエータの静特性

3.2 Static characteristics of the cylindrical linear oscillatory actuator

図 3.4 に CLOA の「静推力-変位特性」測定ブロックを示した。CLOA-1 の固定子を固定台上に固定し、可動子と推力測定用ロードセルを連結する。ロードセルの固定台はハンドルにより、 x 方向に移動することができる。直流電源を用いて、一定電流で励磁し、CLOA-1 に静推力 F_s を発生させる。ロードセルの固定台を移動させると、可動子も x 方向に変位し、静推力 F_s がロードセルに出力される。可動子の変位はポテンシオメータにより測定する。

可動子の変位 x は、固定子の中央磁極直下の点を原点 0 として、可動子の中心点の変位で表している。

上記の測定ブロックにおいて、パーメンジュール製可動子を励磁電流 0.4 [A] によって駆動したときの、静推力-変位特性の実測波形を、図 3.5 に示した。ロードセルの出力は、CLOA-1 が発生する静推力 F_s と可動子の摩擦力 F_f を合計した値である。可動子の往路（右方向）では $F_s + F_f$ となり、復路では $F_s - F_f$ となる。また、往復の出力の差の $1/2$ より摩擦力-変位特性が得られ

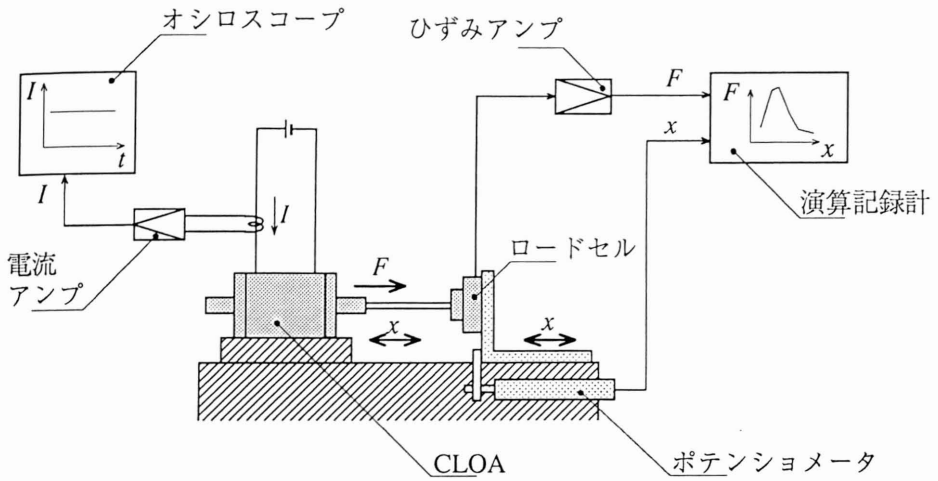


図 3.4 静推力特性の測定ブロック線図

Fig. 3.4 Measurement block for static thrust

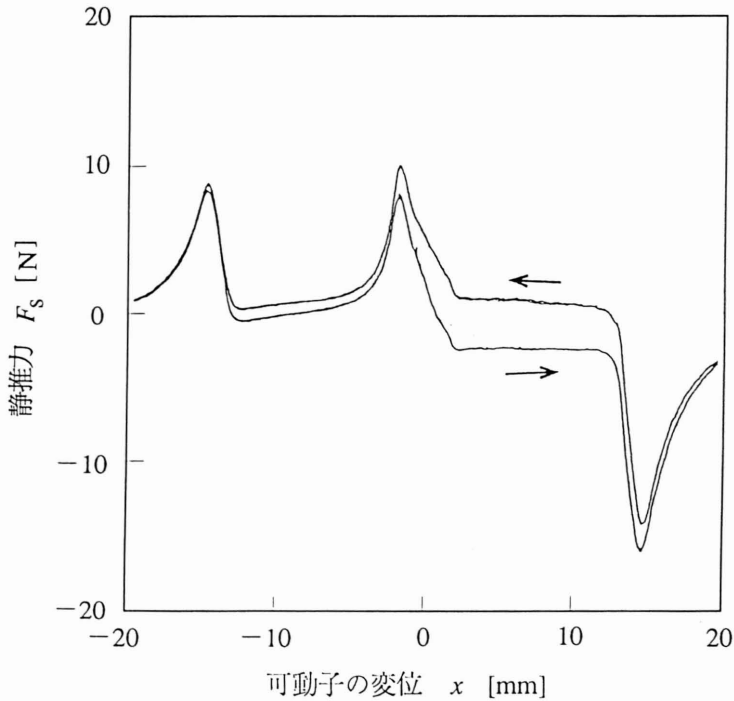


図 3.5 静推力-変位特性の実測波形

(パーメンジュール製可動子：励磁電流 $I = 0.4[A]$)

Fig. 3.5 Measured waveform of static thrust, F_s ,
- displacement, x , characteristics of the CLOA-1

る。図 3.6 に示すように CLOA-1 の可動子には、 $x = \pm 2$ [mm] の範囲で約 1.5 [N] の摩擦力が加わっていることがわかる。

ここで CLOA に発生する静推力 F_s は図 3.5 の静推力-変位特性の実測波形において、往復曲線の中央の値から求めることができる。

図 3.7 および、図 3.8 には、それぞれパーメンジュール製可動子および、S45C 製可動子の「静推力-変位特性」を示した^(3,3)。いずれも、静推力 F_s は、可動子の端面と固定子の磁極の先端とが一致する、即ち $x = -2$ [mm] の位置で最大値を示している。 $x \geq 2$ [mm] の範囲では、可動子の先端が固定子の外に出てしまうので F_s は、ほぼ 0 となっている。

最大静推力 $F_{s,max}$ は、定格励磁電流 $I = 0.4$ [A] の時に、パーメンジュール製可動子では 9.2 [N] が得られ、S45C 製可動子では 7.4 [N] が得られた。いずれも目標とした 10 [N] より低い値であるが、リニア電磁パルセータ用としては、パーメンジュール製可動子を採用することにする。

パーメンジュール製可動子の最大静推力は、S45C 製可動子の最大静推力と比較して、約 24 % 大きい値であるが、図に示すように、両者の傾向には大き

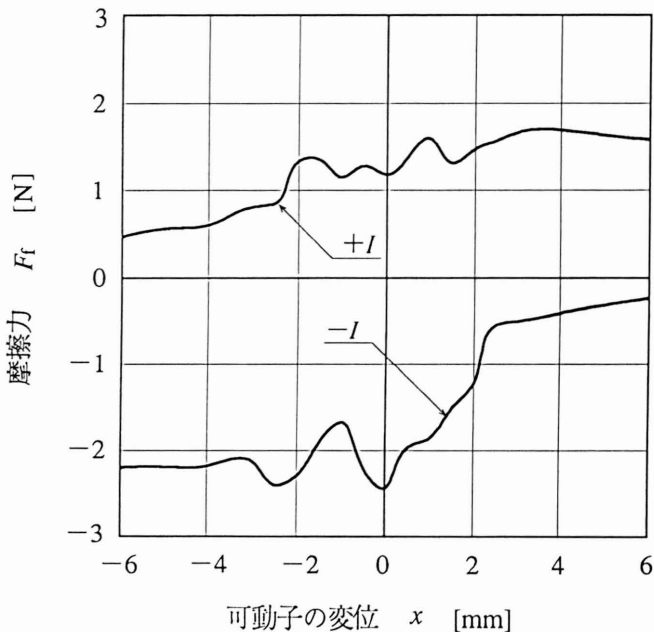


図 3.6 CLOA-1 の摩擦力-変位特性 ($I = 0.4$ [A])

Fig. 3.6 Friction force - displacement characteristic of the CLOA-1

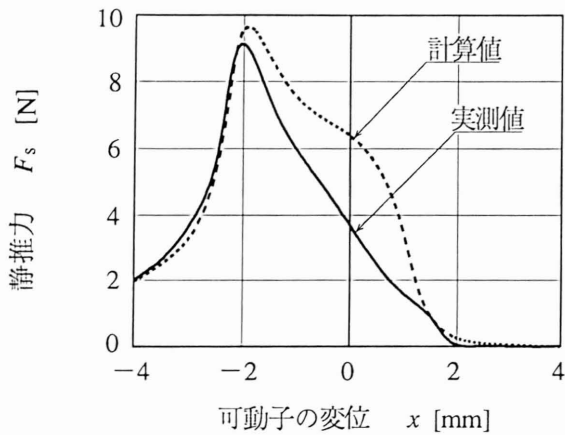


図 3.7 CLOA-1 の静推力-変位特性
(パーメンジュール製可動子)

Fig. 3.7 Static thrust, F_s , - displacement, x , characteristics of the CLOA-1 (mover is Permendur)

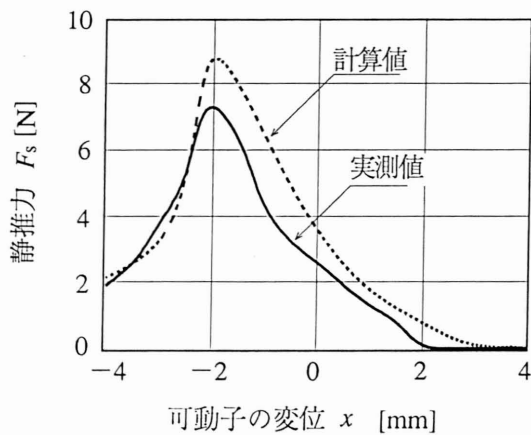


図 3.8 CLOA-1 の静推力-変位特性
(S45C 製可動子)

Fig. 3.8 Static thrust, F_s , - displacement, x , characteristics of the CLOA-1 (mover is S45C)

い差は見られない。しかしながら、高磁束密度材料を用いたパーメンジェール製可動子は、その容積が CLOA-1 の全容積の 7.8 % と小さいため、その特性が十分に活かされなかつたものと考えられるので、実用機ではこの点を改良する必要があろう。

CLOA-1 の可動子に発生する力は、静推力 F_s のみでなく、運動方向に垂直な分力 F_v も存在する。ここで垂直力 F_v は測定困難であるので、FEM により計算で求めた結果を図 3.9 に示した^(3,4)。垂直力 F_v は中央磁極の直下と、磁極 1 直下で大きな値を示している。この垂直力 F_v は理想的に組み立てられている場合には、可動子の中心軸上で釣り合うことができるが、バランスが崩れると、摩擦力発生の原因となり、可動子のストロークの精度を左右するので、実用機の設計上は、この点を考慮する必要がある。

ここで、CLOA-1 の最大静推力は、前述のように目標とした値よりも、若干低い値となったが、特に可動子の変位が 2 [mm] の位置で 0 になっている。このことは負荷駆動時に、所定のストロークを確保する上で極めて不安定な要素となる。

そこで、CLOA-1 の上記の弱点を改良する目的で、試作 2 号機(以下 CLOA-2 と略記)を設計した。CLOA-2 において目標としたことは、変位 $x = \pm 2$ [mm] の範囲で静推力 F_s が常に 3 [N] 以上を確保することである。このために、固定子両側の磁極先端の補極の長さを、それぞれ内側に 2 [mm] 長くした。したがって固定子の全長は CLOA-1 に比較して 4 [mm] 長く、35 [mm] となった。更に、最大静推力 $F_{s,max}$ は CLOA-1 と同等の 10 [N] とし、可動子及び、他の仕様については、特性の比較上 CLOA-1 の部品を用いた。FEM による計算結果を図 3.10 に点線で示した。 $x = 0$ から $x = 4$ [mm] の範囲で x 軸に平行な推力発生を考えたが、 $x = 2$ [mm] の近辺で凸状となった。

試作した CLOA-2 の静推力-変位特性を図 3.10 に実線で示した。 $x = -2$ [mm] の位置での静推力は最大値を示し、7.7 [N] がえられたが、これは CLOA-1 の最大静推力 9.2 [N] と比較して 16% 低い結果となった。 $x = 2$ [mm] の位置では 1.5 [N] となり、目標とした計算値 3 [N] と比較して 50% 低い値となった。

ここで、CLOA-1 と比較して、その静推力が大幅に低下した、CLOA-2 の特性を改良する目的で、固定子の中央に配置してある永久磁石の最大エネルギー密度を 277 [kJ/m³] のものから 296 [kJ/m³] のものに変更したものを試作 3 号機(以下 CLOA-3 と略記)とした。図 3.11 には、測定した静推力特性を示した。

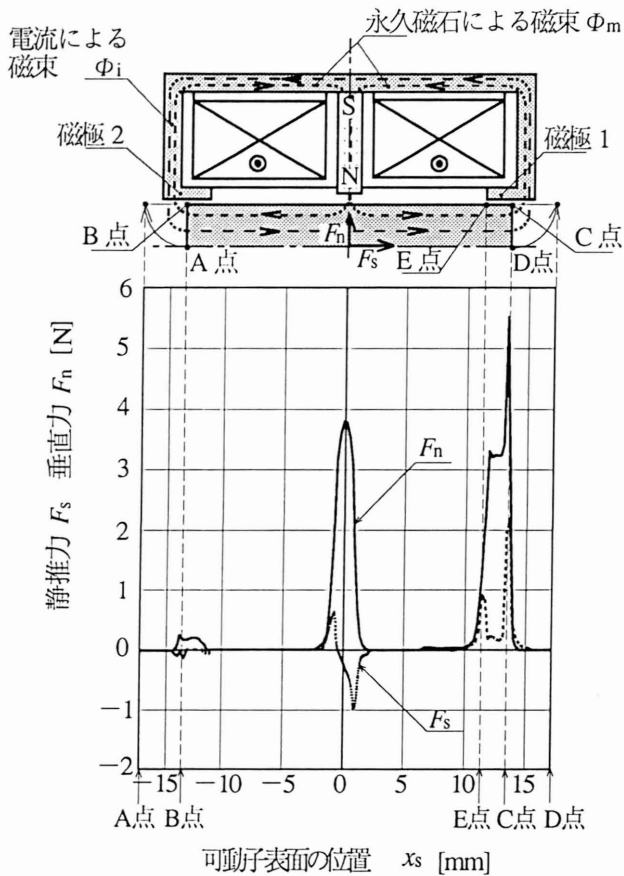


図 3.9 可動子表面の推力分布特性の計算結果
(励磁電流 $I = 0.4$ [A], 可動子変位 $x = 0$ [mm])

Fig. 3.9 Calculated result of the forces, F_n , F_s , - position, x , of the mover's surface characteristics (exciting current $I = 0.4$ [A], displacement of the mover $x = 0$ [mm]).

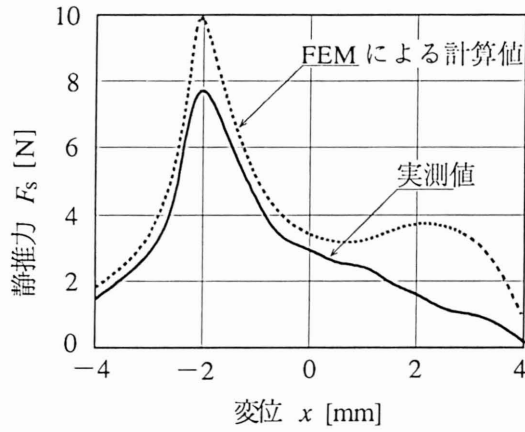


図 3.10 CLOA-2 の静推力-変位特性
(励磁電流 $I = 0.4$ [A])

Fig. 3.10 Static thrust, F_s , - displacement, x , characteristics of the CLOA-2
(exciting current $I = 0.4$ [A])

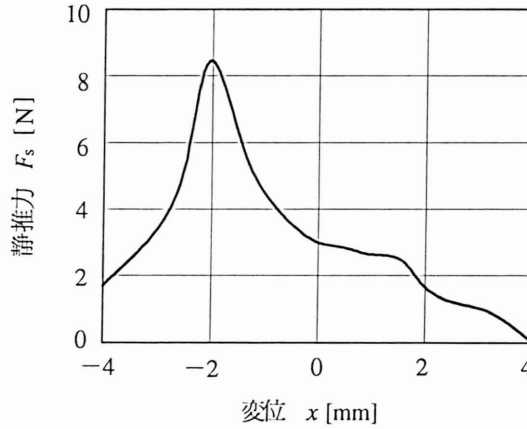


図 3.11 CLOA-3 の静推力-変位特性
(励磁電流 $I = 0.4$ [A])

Fig. 3.11 Static thrust, F_s , - displacement, x , characteristics of the CLOA-3
(exciting current $I = 0.4$ [A])

$x = -2$ [mm] の位置で、最大静推力が 8.5 [N] が得られ、CLOA-2 と比較して 10.5% 改良された。また $x = 2$ [mm] の位置では、1.75[N] となり、16% 向上した。

表 3.1 には、本研究で試作した 3 機種 (CLOA-1, CLOA-2 および CLOA-3) の特性の比較を示し、参考として、人工心臓用として開発された CLOA ST87^(3,5) の特性を併記した。表に示すように CLOA-1 に比較して、CLOA-2, CLOA-3 は $x = 2$ [mm] の位置での静推力は、それぞれ 1.5 [N], 1.75 [N] を確保できたが最大静推力は、それぞれ 7.7 [N], 8.5 [N] と低下する結果が得られた。

表 3.1 人工心臓用 LOA と CLOA-1, CLOA-2, CLOA-3 の特性比較

Table 3.1 Characteristics comparison of the CLOA ST87 , the CLOA-1, the CLOA-2, and the CLOA-3

項目 [単位]	人工心臓用 CLOA-ST87	CLOA-1	CLOA-2	CLOA-3
外形寸法 [mm]	∅60×40	∅25×31	∅25×35	∅25×35
容積 [mL]	130	15.2	17.2	17.2
質量 [g]	820	94	103	105
最大静推力 [N]	19.5	9.2	7.7	8.5
$x = 2$ の静推力 [N]	—	0	1.5	1.75
推力／容積比 [N/mL]	0.15	0.61	0.45	0.49
推力／質量比 [N/g]	0.02	0.10	0.07	0.08
推力／入力比 [N/W]	1.39	2.56	2.14	2.36

3.3 円筒状リニア振動アクチュエータの動特性

3.3 Kinetic characteristics of the cylindrical linear oscillatory actuator

3.3.1 円筒状リニア振動アクチュエータの速度－変位特性

CLOA-1 を駆動した時の可動子の速度－変位特性を測定した^{(3.6)(3.7)}。図 3.12 の (a) 図は無負荷条件の測定ブロックであり、(b) 図は負荷条件の測定ブロックである。(b) 図における負荷はチャンバ A を 380 [mmHg] の真空状態にして、可動子に連結したパルセータのスライダを駆動した。無負荷時、負荷時ともに可動子の変位 x は、レーザ式変位計を用いて測定した。可動子の駆動速度は、無負荷時では変位信号を OP アンプを用いた微分器による時間微分で求め、負荷時では演算記録計の内部演算による時間微分により求めた。

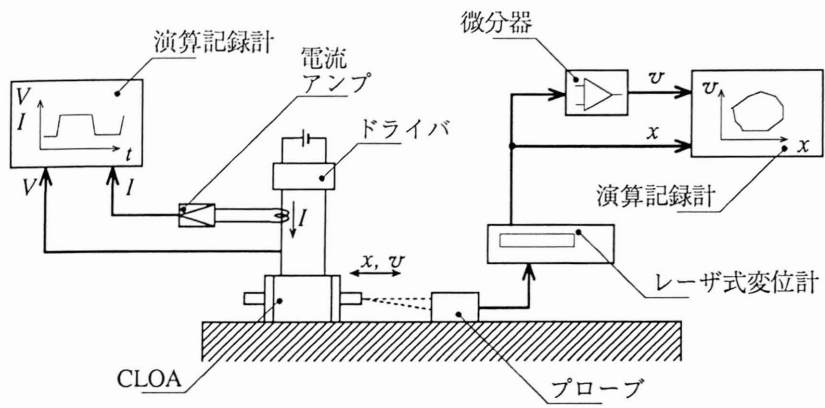
図 3.13 には、駆動周波数 1 [Hz] における速度－変位特性を示した。図に示すように、無負荷時の最大速度は往路で $v = 0.86$ [m/s]、復路では $v = 0.73$ [m/s] であり、負荷時における最大速度は往路、復路ともに $v = 0.39$ [m/s] であった。

無負荷時の往路と復路の最大速度に差が生じたのは、可動子の偏芯により軸受けの摩擦力の差によるものと考ええる。また、負荷時に往路、復路ともに最大速度に差が生じなかったのは、スライダの摩擦力が一定に作用したことによるものと考ええる。しかしながら、負荷時の最大変位 x_{max} は往路では 2 [mm] であり、復路では 1.85 [mm] と要求仕様の ± 2 [mm] に対して若干低い値で不安定である。

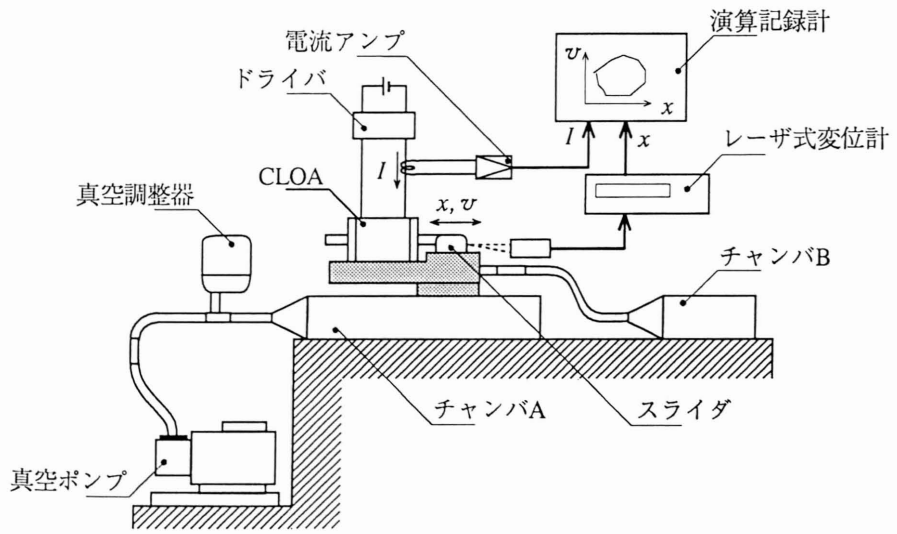
この原因は 3.2 円筒状リニア振動アクチュエータの静特性測定の項で述べた如く、CLOA-1 の設計時に、スライダの摩擦力への考慮不足から、ストロークの両端での推力を 0 としたことによるものとかんがえる。

これに対して CLOA-2, CLOA-3 の負荷時の最大変位 x_{max} は図 3.14, 図 3.15 に示すごとくそれぞれ ± 2.65 [mm], ± 2.55 [mm] となり要求仕様を満足する値が得られた。

図 3.16 は、CLOA-1, CLOA-2, CLOA-3 の「ストローク－周波数(拍動数)」特性の測定結果を示した^{(3.2)(3.8)(3.9)}。ストロークはレーザ変位計を用いて測定した。励磁電流 $I = 0.4$ [A] の時、周波数 1 [Hz] の近辺で、ストロークは要求仕様の 4 [mm] が確保されており、CLOA-1, CLOA-2, CLOA-3 によるリニア電磁パルセータの駆動が、可能であると判断する。



(a) 無負荷



(b) 負荷有り

図 3.12 CLOA の速度 - 変位特性測定ブロック

Fig. 3.12 Measurement block of velocity-displacement characteristic of the CLOA

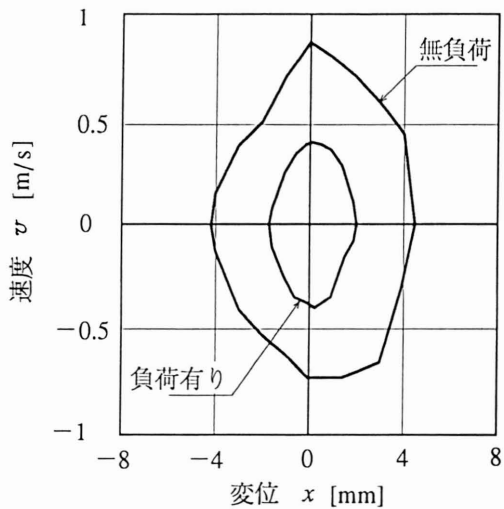


図 3.13 CLOA-1 の速度 - 変位特性
 ($f = 1$ [Hz], $I = 0.4$ [A])

Fig. 3.13 Characteristic of velocity-displacement
 of the CLOA-1

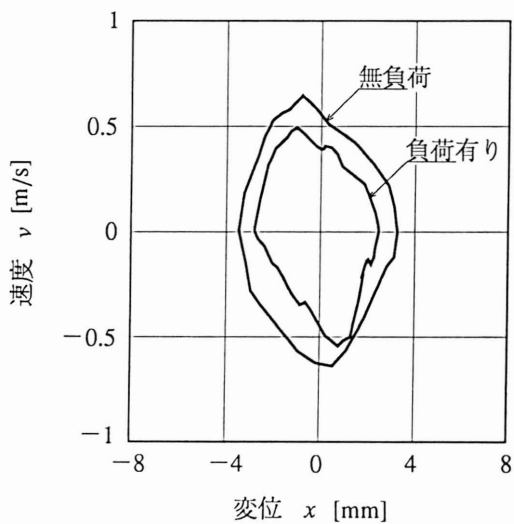


図 3.14 CLOA-2 の速度 - 変位特性
 ($f = 1$ [Hz], $I = 0.4$ [A])

Fig. 3.14 Characteristic of velocity-displacement
 of the CLOA-2

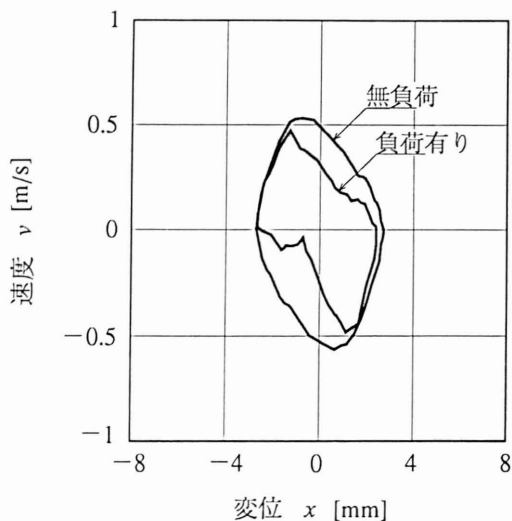


図 3.15 CLOA-3 の速度-変位特性
 ($f = 1$ [Hz], $I = 0.4$ [A])

Fig. 3.15 Characteristic of velocity-displacement of the CLOA-3

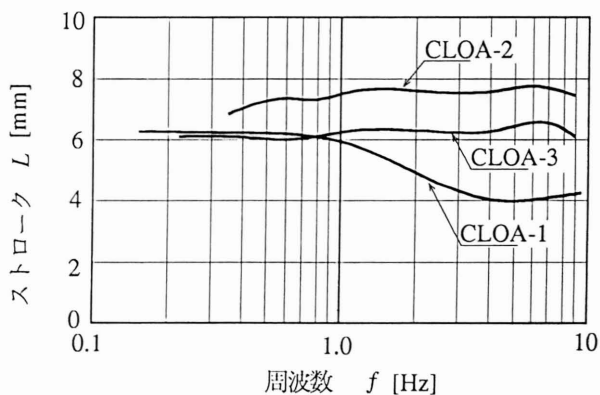


図 3.16 CLOA の周波数-ストローク特性 (無負荷)

Fig. 3.16 Stroke, L , - frequency, f , characteristics of the CLOA with no load.

3.3.2 円筒状リニア振動アクチュエータの動推力と効率の測定

CLOA の効率を測定するためには、それ単体ではできないので何らかの負荷を与える必要がある。一般的な方法としては、試作した CLOA に適したエアコンプレッサを選択して、これを負荷とした、いわゆる 流量-圧力計法 (flow-rate-pressure gauge method) がある^(3.10)。しかしながら本研究の CLOA は極めて小型であるため、これに適したエアコンプレッサを設計、試作するためには複雑な手続きと加工を要し、特に弁機構のそれは筆者にとっては至難なことである。

そこで本研究では、より簡便な方法として、変位-力センサ法 (displacement-force sensor method) にもとづいて測定した^{(3.6)(3.11)(3.12)}。図 3.17 にはこの変位-力センサ法による効率測定ブロックを示した。すなわち、測定する CLOA-1 の可動子に連結棒を介して力センサと、負荷を与える振動円板を連結する。負荷としては、水の振動を選び、変位はレーザ式変位計を用いて測定した。可動子に与える負荷の大きさは、半径 r の異なった振動円板を用いることで変化させることができる。

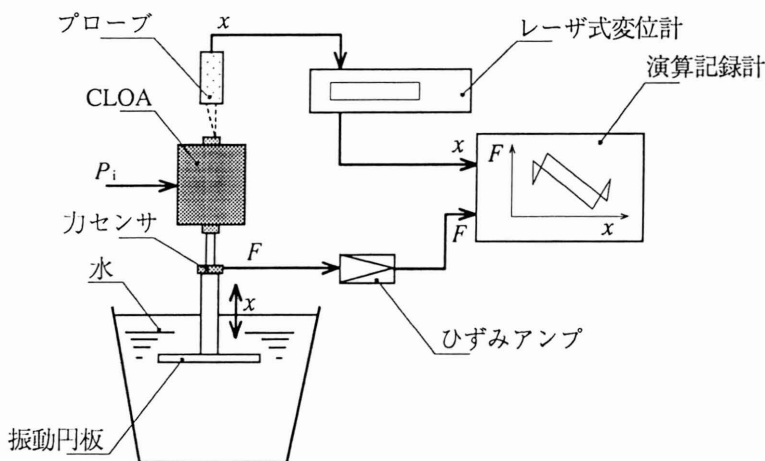


図 3.17 CLOA の変位-力センサ法を用いた効率の測定ブロック

Fig. 3.17 Measurement block for efficiency by displacement-force sensor method of the CLOA

CLOA-1 の出力 P_0 の測定結果を図 3.18 に示した。同図において (b) の動推力－時間特性と、(c) の変位－時間特性を用いて、(a) のような動推力－変位曲線のリサージュ特性が得られる。このリサージュの面積と駆動周波数 f から出力 P_0 は次式から求めることができる。

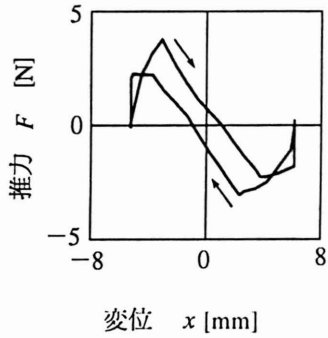
$$P_0 = f \oint F dx \quad [\text{W}] \quad (3.1)$$

ここに、 f : 駆動周波数 [Hz]
 F : 推力 [N]
 x : 変位 [m]

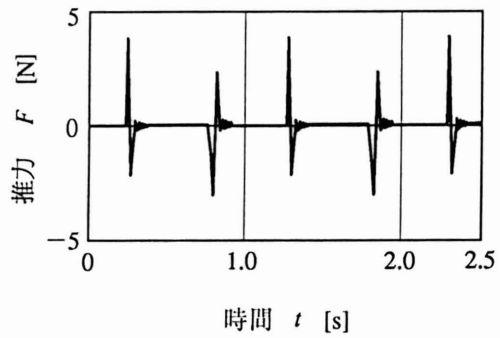
図 3.18 (b) の推力－時間特性において、推力が正の方向に動推力が発生し、次の瞬間に大きな負の方向の推力が発生し、次第に減衰している。これは可動子に連結されている負荷発生用の振動板が水中で急激に移動する時に、その背後に負圧を生じ、この負圧によって可動子が押し戻されることが原因である。この現象はリサージュ特性にも影響を与え、CLOA の効率を大きく悪化させる原因となっている。

図 3.19 には、振動円板の半径 r を変化させた負荷をパラメータとした、効率－駆動周波数特性を示した。図に示すように最大効率は $r = 30$ [mm] の時 $\eta = 0.95\%$ 、 $r = 40$ [mm] の時は $\eta = 2.3\%$ 、そして、 $r = 50$ [mm] の時は $\eta = 1.76\%$ であったが、本 CLOA-1 の使用駆動周波数である 1 [Hz] 付近では $\eta = 0.15\%$ と極めて低い値を示しているが、実用機としてリニア電磁パルセータに搭載する際には、可動子が往復するに要する時間のみ通電する、いわゆる断続通電方式とすることで、若干の効率の改善を期待できる。

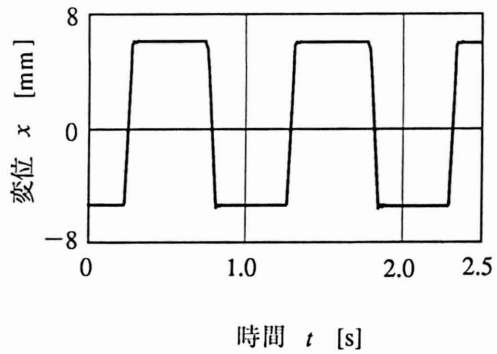
CLOA-2、CLOA-3 についても同様の試験を行い、図 3.20 に示すように周波数 1 [Hz] ではそれぞれ 0.34% と 0.2% が得られた。CLOA-1 に比較すると改善されたが大きな効果ではなかった。



(a) 動推力-変位特性



(b) 動推力特性



(c) 変位特性

図 3.18 CLOA の変位-力センサ法を用いた効率測定による動推力の実測例
 ($f = 1[\text{Hz}]$, 振動円板の半径 $r = 40[\text{mm}]$)

Fig. 3.18 Kinetic thrust examples of efficiency measurement
 of the CLOA by displacement-force sensor method

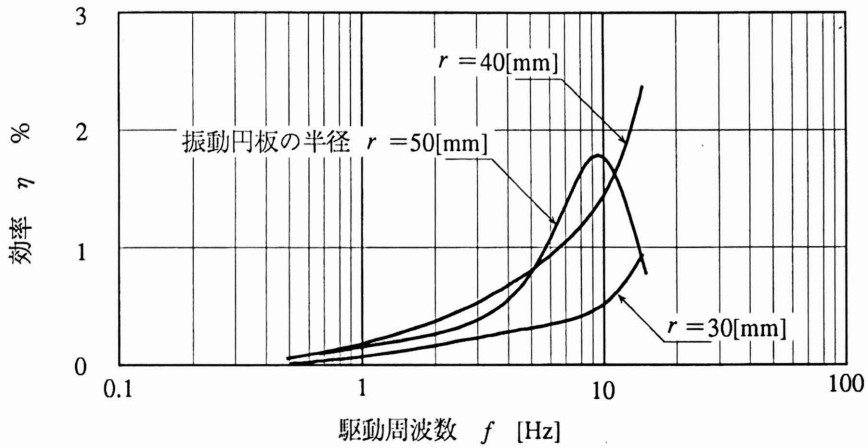


図 3.19 負荷振動板の半径 r をパラメータとした CLOA-1 の効率の周波数特性

Fig. 3.19 Efficiency-Frequency characteristics of the CLOA-1 as a parameter of load oscillating plate radius r

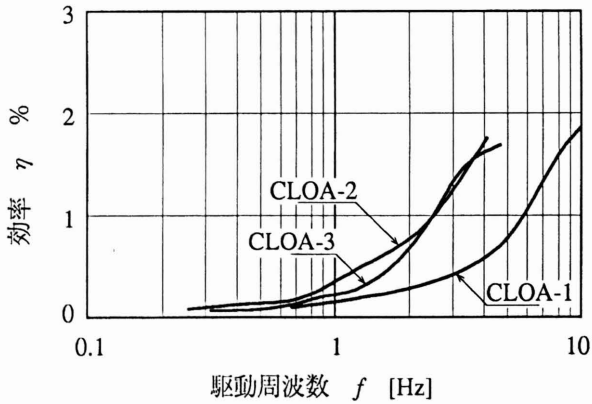


図 3.20 CLOA の効率-周波数特性

Fig. 3.20 Efficiency-Frequency characteristics of the CLOA

3.3.3 円筒状リニア振動アクチュエータの温度上昇

電気機器の温度上昇は、機器の信頼性を確保する上で重要な要素である。コイルの巻線温度は、その内部抵抗のため温度が上昇する。上昇しすぎると巻線の絶縁物の劣化をはやめ、はなはだしい時は焼損することもある。経験的には温度が 7~10 [°C] 高くなるごとに寿命が半減するといわれている。

そこで、筆者は CLOA-1 をパルセータに搭載し、真空源に接続して連続運転を行い、固定子表面温度上昇と、コイルの巻線温度上昇を測定した結果を、図 3.21 に示した。

固定子表面温度は、熱電対温度計を用いて測定した。巻線温度上昇は、抵抗法にもとずき、次式によって計算で求めた^(3.13)。

$$\theta = \theta_2 - \theta_a = \left(\frac{R_2}{R_1} - 1 \right) (T + \theta_1) + (\theta_1 - \theta_a) \quad (3.2)$$

ここに、 θ : 巻線の温度上昇 [°C]
 R_2 : 熱状態 (温度 θ_2) における巻線抵抗 [Ω]
 R_1 : 冷状態 (温度 θ_1) における巻線抵抗 固定子 [Ω]
 θ_2 : 試験直後における巻線温度 [°C]
 θ_1 : 冷状態における R_1 を測定したときの温度 [°C]
 θ_a : 試験における冷媒温度 [°C]
 T : 定数 (銅に対しては $T=235$)

測定開始時の室温 (θ_1 に同じ) は、27 [°C] であり、且つ、その時の巻線抵抗値は 23.6 [Ω] であった。測定開始後、約 30 分経過後、固定子表面温度が 60 [°C] で平衡状態に達し、温度上昇値 33 [°C] を得た。直ちに、結線をはずして巻線の抵抗値 R_2 を測定し 27.2 [Ω] を得た。以上の結果を、式 3.2 に代入し巻線温度上昇 37.4 [°C] を求めた。

この温度上昇値を、搾乳機の使用場所である畜舎内の最高環境温度 40 [°C] との関連で計算すると、固定子の最高表面温度は 73 [°C]、最高巻線温度は 77.4 [°C] となる。

ここで、CLOA-1 に用いた巻線の絶縁の種類は E 種絶縁であり^(3.14)、この絶縁材の温度上昇限度は 80 [°C] であり、且つ許容最高温度は 120 [°C] であ

るので^(3,13)、コイルの巻線温度は温度上昇、最高温度とも、いずれも許容範囲内であり、絶縁の劣化を考慮する必要はないと考える。

しかしながら、パルセータを取り扱う、搾乳作業者にとっては、固定子の表面温度が 50 [°C] を越えることは好ましくない。

そこで、CLOA-1 への通電を、連続通電から断続通電として、再度、温度上昇を測定した。駆動周期を 1 [Hz] としたときの通電時間は全体の 20 % の 200 [ms] である。測定開始から約 40 分経過後、温度は平衡状態となり、その時の最高温度上昇は 7 [°C] であったので、要求を十分に満足する結果が得られた。

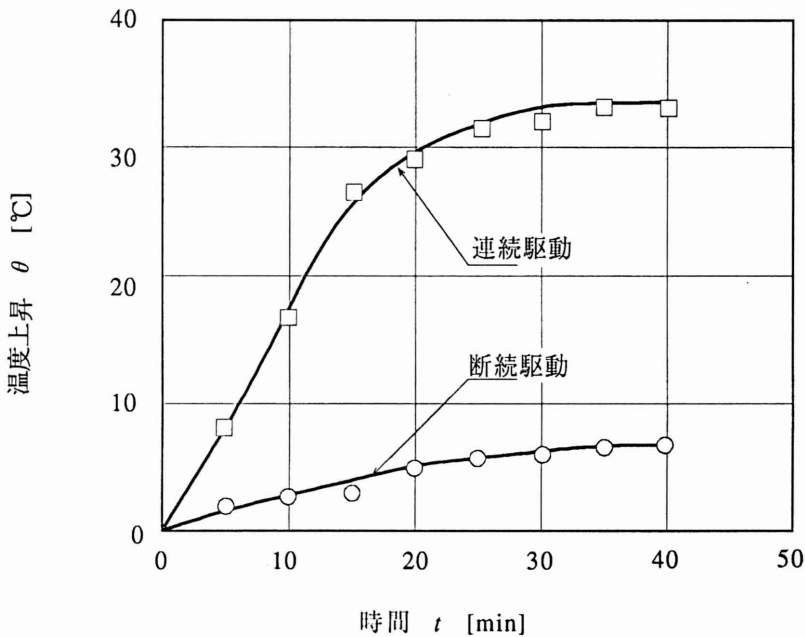


図 3.21 CLOA-1 固定子表面の温度上昇
(電圧 10 [V], 周波数 1 [Hz])

Fig. 3.21 Temperature rise of the CLOA-1 stator surface

第 3 章の参考文献

- (3.1) 西澤 尚武, 八重崎 昌治, 岩崎 博行, 岡田 寛, 山田 一: リニアモータ駆動式搾乳機用パルセータのゆらぎ信号による動作特性, 電気学会マグネティックス・リニアドライブ合同研究会資料, MAG-94-128, LD-94-73, pp.25-34 (1994)
- (3.2) 山田 一, 太田 浩, 竹内 勝広, 千村 誠, 小笠原 恒夫, 阿久津 哲造: 長いストロークをもつ円筒状リニア振動アクチュエータの特性解析, 電気学会論文誌 vol.108D, pp.501-508 (1988)
- (3.3) 西澤 尚武, 石井 丈士, 山田 一, 松木 清高, 岩崎 博行, 鈴木 弘也: リニア振動アクチュエータの搾乳機への応用, 電気学会リニアドライブ研究会資料, LD-92-99, pp.11-20 (1992)
- (3.4) 石井 丈士, 西澤 尚武, 山田 一: 搾乳機に用いる円筒状リニア振動アクチュエータの基礎特性, 第 5 回リニアドライブ若手研究者シンポジウム予稿集, 11, pp.77-82 (1993)
- (3.5) H.Yamada, M.Nirei, H.Ota, K.Kawakatsu, M.Karita, T.Maruyama, M.Chimura, T.Ogasawara, N.Nishizawa, T.Takeuchi, Y.Yamamoto and T.Akutsu : Linear electromagnetic actuators for implantable artificial heart, Proceeding of the 2nd International Symposium on Artificial Heart and Assist Device, August, pp.13-14, 1987, Tokyo, Japan.
- (3.6) 西澤 尚武, 八重崎 昌治, 山田 一: リニアモータ駆動式搾乳機用電磁パルセータに関する研究—学位論文の目次試案—, 電気学会リニアドライブ研究会資料, LD-94-41, pp.83-92 (1994)
- (3.7) 西澤 尚武, 八重崎 昌治, 石井 丈士, 山田 一: 搾乳機に用いる円筒状リニア振動アクチュエータの動特性解析, 電気学会リニアドライブ研究会資料, LD-94-5, pp.35-42 (1994)
- (3.8) 西澤 尚武, 石井 丈士, 山田 一: 搾乳ユニットに用いるリニア振動アクチュエータの特性解析, 日本応用磁気学会誌, Vol.18, No.2, pp.543-546 (1994)
- (3.9) 石井 丈士, 西澤 尚武, 山田 一: 搾乳機に用いる円筒状リニア振動ア

クチュエータの基礎特性，第 5 回リニアドライブ若手研究者シンポジウム予稿集，11， pp.77-82 (1993)

- (3.10) 電気学会編：リニアモータとその応用， pp.46-48 (1987) オーム社
- (3.11) 山田 一編著：リニアモータ応用ハンドブック，工業調査会， pp.356～357 (1986)
- (3.12) 山田 一，竹内 郁夫：リニア振動アクチュエータの効率の一測定法，電気学会論文誌， vol.103-B， No.2， p.77 (1983)
- (3.13) JIS ハンドブック 電気 C4004-1977，回転電気機械通則，日本規格協会 pp.618-619 (1988)
- (3.14) JIS ハンドブック 電気 C4003-1977，電気機器絶縁の種類，日本規格協会 p.213 (1988)

第 4 章

リニア電磁パルセータの $1/f$ ゆらぎ動作特性

$1/f$ fluctuation performance characteristics of
the linearelectro-magnetic pulsator

第4章 リニア電磁パルセータの $1/f$ ゆらぎ 動作特性

4. $1/f$ fluctuation performance characteristics of the linear electro-magnetic pulsator

4.1 牛の泌乳生理

4.1 Physiology of the udder

搾乳機と牛（生体）との関わりあいにおいて、搾乳機による刺激が牛にとって良い刺激であるか否かが、搾乳の生産性を決定すると同時に、牛の乳房の健康をも左右する重要な事項である。

ここで牛の泌乳生理について説明する。図 4.1^(4.1) に牛の乳房の模型断面図を示す。乳房の組織は図 4.1 の右側に示すようにスポンジ状の乳腺葉で構成され、ここに乳は蓄えられている。さらに、これを詳細に説明すると図 4.1 の左側に示すように乳が蓄えられる組織の最小単位は、腺胞腔の外壁に無数に配列された乳腺細胞であり、さらにこの乳腺細胞は図 4.2 で示すように、その周囲は筋上皮細胞で取り巻かれている。

搾乳ユニットを乳頭に装着する前の作業として、乳房全体を温水を用いて洗浄したり、マッサージのような心地よい刺激を与えると図 4.3^(4.1) に示すように、この刺激が牛の脳下垂体に伝達され、泌乳ホルモンであるオキシトシンが血液中に分泌され乳房組織に達すると、小さな輪ゴム状の筋上皮細胞は収縮を起し、乳腺細胞内の乳は丁度、水を含んだスポンジを絞るように乳腺腔に排出される。さらに、この乳は小乳管、大乳管を経て乳腺槽に蓄えられ、次いで、乳腺槽も満たされると乳房内圧は次第に上昇する。この時、真空源に接続された搾乳ユニットを乳頭に装着すると、乳は体外に排出される。さらに、連続して乳を排出するためには、上記のオキシトシンが連続して分泌されなければならない。牛にとって良い刺激を与えると、多量のオキシトシンが分泌され、その結果として乳の排出が容易になり産乳量も最大となる。

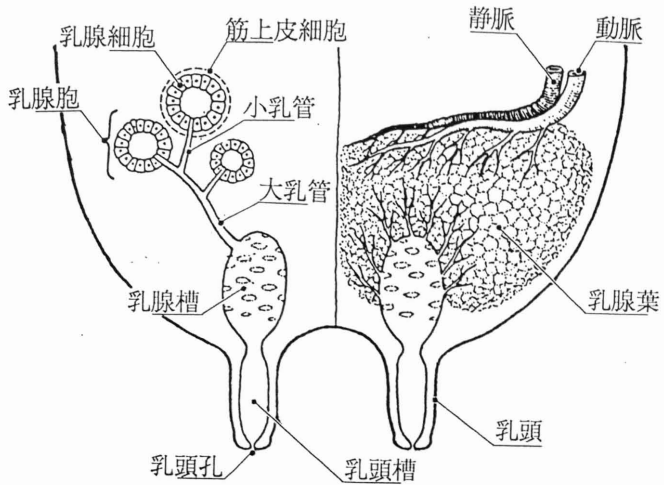


図 4.1 牛の乳房の模型断面図

Fig. 4.1 A section diagram of the cow's udder model

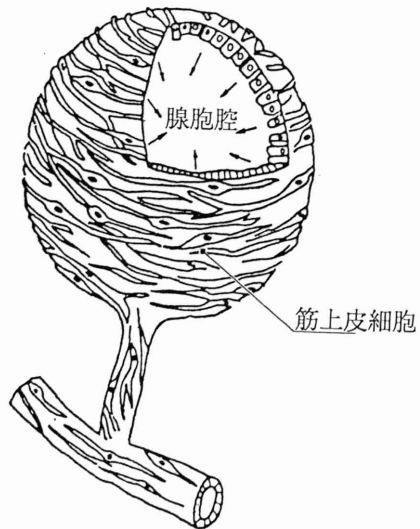


図 4.2 乳腺細胞の外形模型図

Fig. 4.2 Diagram of a cluster of alveoli

搾乳時に重要な役割を果たすこのオキシトシンの分泌は、牛にとっては無意識に行われるものであって、乳の排出がスムーズに行われるためには、搾乳機の刺激が牛にとって心地好いものでなければならない。また脳下垂体から分泌されるオキシトシンの分泌持続時間は比較的短く、通常、数分間と言われているので、その間に乳房に蓄えられた乳を排出させることが肝要である。ところが牛に不適正な刺激を加えると、交感神経の働きによって副腎から、抑制ホルモンであるアドレナリンが分泌されることになり、乳の排出がスムーズでなくなるばかりでなく、排出が不可能になる。ひどい場合には乳頭孔や乳房内の細胞組織を破壊し、酪農家が最も恐れている乳房炎感染の危険性が増すばかりでなく、産乳量の減少を招き経済的損失も大きくなる。

そこで牛に良い刺激を与える搾乳機が強く求められているし、研究者にとっても重要な課題である。

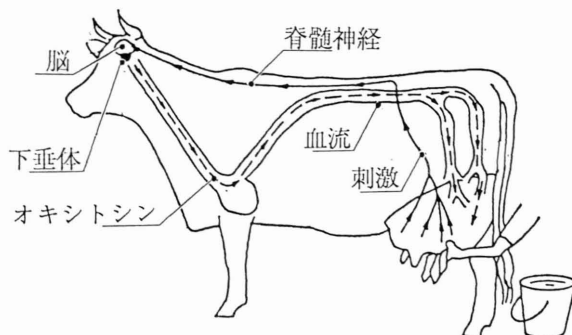


図 4.3 牛における刺激の伝達経路と脳下垂体からオキシトシンの放出

Fig. 4.3 Communication channel of stimulus and release of oxytocin pituitary gland in cow

4.2 子牛の吸引間隔に $1/f$ ゆらぎの存在の確認と搾乳機への応用

4.2 Confirmation of existence on suction interval of calf and application for the milking machine

$1/f$ ゆらぎは、磯に吹く松風の風速変動や、人体の生理信号（脳波、心拍等）などの、自然現象の基本リズムの中に広く見られることが発見され、人の快適感（こちよさ）との間に深い関りをもっていることはよく知られている^(4.2)。最近、この $1/f$ ゆらぎが家電製品（扇風機、電気コタツなど）に応用したものが市販されている。これらの機器を日常生活の中に取り入れることで、「より快適な生活」を求めることが時代の要求のようである。

一方、堀内氏等^(4.3)の研究によると、擬似乳頭に圧力センサを取り付けて、子牛の吸引間隔を測定した典型的な一例を図 4.4 に示す。図からは、最初は弱く、次いで強く、激しく再び弱く吸引しており、約 10~20 [s] 間隔で繰り返していることが読みとれる。3つの図は連続して記録されたものである。この図では一見ランダムのように見えるけれども、このデータに FFT 処理を施し、パワースペクトルを得た結果、図 4.5 に示すように $1/f$ ゆらぎの存在が実証されている。

他方、生井沢氏等^(4.4)の研究では、親牛の心拍間隔等にも $1/f$ ゆらぎの存在が確認され、さらに、通常的环境条件下と、不適と考えられる条件下との間で、心拍周期変動に違いがあることが示唆されている。同時にパワースペクトル解析を行った結果、乳牛に対して、より良い環境を提供する時の、新たな生理的指標を策定するための方法の一つとして、今後一層研究する価値があると報告されている。

そこで筆者は、子牛の吸引間隔に存在する $1/f$ ゆらぎを、搾乳機を構成する要素の中で最も重要であるパルセータの拍動特性に取り入れ、より自然の搾乳に近づけることで、乳頭に対する刺激を大幅に緩和して、乳頭障害の発生を軽減することに着目した。

ここで、 $1/f$ ゆらぎについて説明する。 $1/f$ ノイズについての最初の論文は 1925 年、J.B.Johnson の “The Schottky Effect in Low frequency Circuits” であり、電流雑音の分野では、よく知られている現象である。

「ゆらぎ (Fluctuation)」とは、ある物理量 $x(t)$ が巨視的な平均値の回りで

ランダムに変動すること，として定義されている^(4.5)。この時，時間的相関のある，ゆらぎを $1/f$ ゆらぎという。ここで物理量の変動をかたちずくる成分波の度合をパワースペクトルという。パワースペクトル $P(f)$ は，その物理量の自己相関関数 $C(\tau)$ をフーリエ変換したもので，それぞれ次式で表すことができる。

$$C(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) x(t-\tau) dt \quad (4.1)$$

ここに， t : 時間 [s]
 τ : 位相差 [s]
 T : 周期 [s]

$$P(f) = \int_{-\infty}^{\infty} C(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (4.2)$$

ここに， j : 虚数

$1/f^n$ ゆらぎには，このパワースペクトル $P(f)$ と周波数との間に次の関係がある。

$$\log P(f) = -\log f^n + k \quad (4.3)$$

ここに， n, k : 定数

上式で $n = 1$ の時のゆらぎを $1/f$ ゆらぎという。

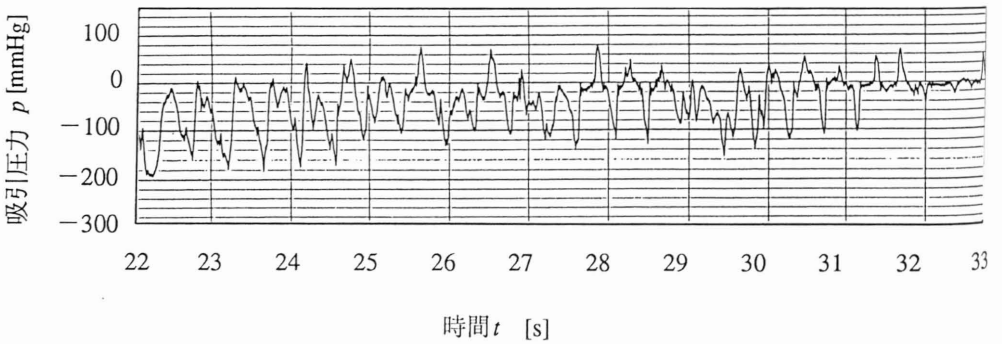
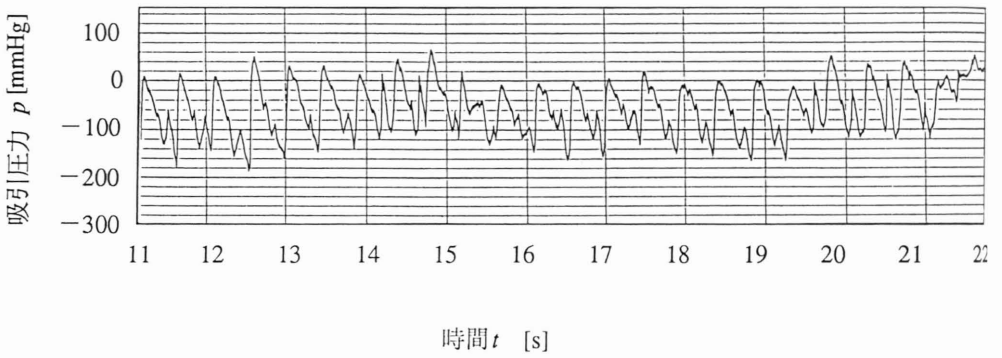
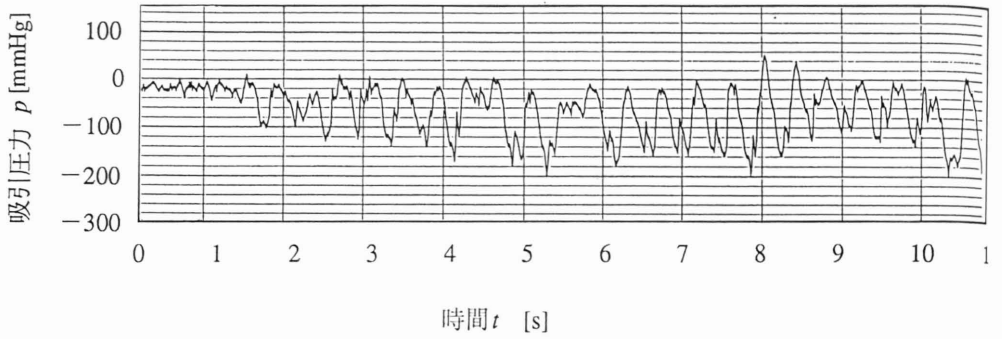


図 4.4 子牛の哺乳時の吸引圧力波形
 Fig. 4.4 Sucking pressure change by calf

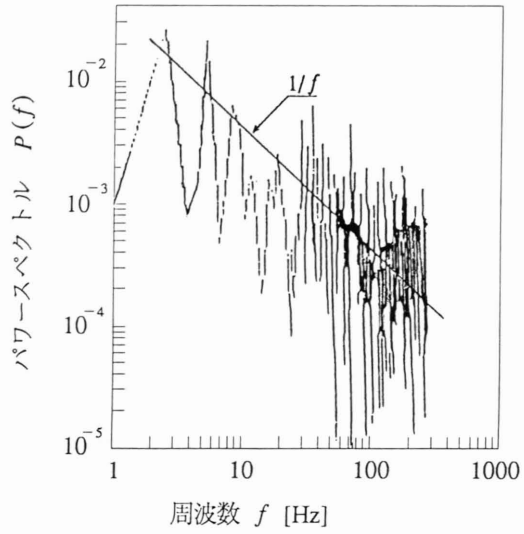


図 4.5 子牛の吸引周期のパワースペクトル
 Fig. 4.5 Powerspectrum of calf's sucking interval

4.3 リニア電磁ソレノイド駆動式パルセータ

4.3 Linear electromagnetic solenoid-driven pulsator

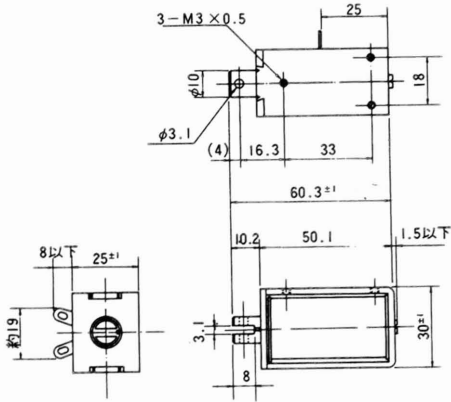
4.3.1 リニア電磁ソレノイド

現在、市販されているパルセータの駆動方式には、リニア電磁ソレノイド (Linear electromagnetic solenoid: 以下 LES と略記) 駆動式と空気圧式とに大別されることは、すでに述べた。

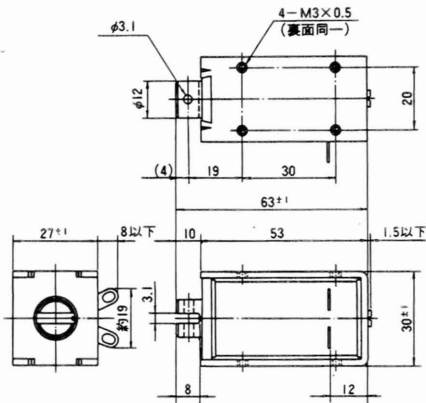
LES では、その励磁コイルに直流電圧を印加することにより、可動鉄心(プランジャ)を磁気力によって、直線運動を生じさせることを目的としている。可動鉄心のストロークは通常、数 [mm] 程度と、あまり大きくはないが、比較的大きな推力が得られるという特徴を有しているのでパルセータ駆動用として多く用いられている。

本節では、筆者が入手した、BBCO 社の LES 駆動式パルセータでは、その LES 部分が樹脂でモールドされているので、詳細な仕様は把握できないので、ほぼ、この LES と同等の仕様と推定される手元の LES を選び、その特性を実測した結果について述べる。図 4.6 は LES の外観図と外形寸法を示した。

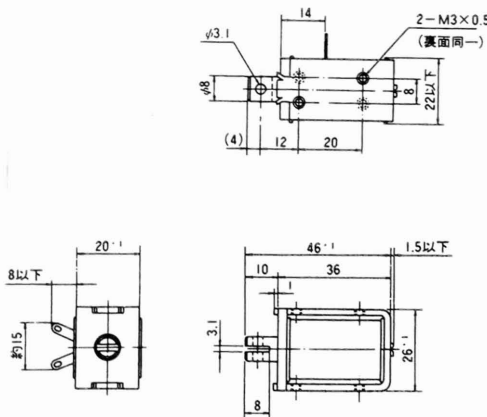
図 4.7 には、静推力-変位特性を示した。変位 0 の時、推力は最大値を示し、変位が増大するに従い、推力は指数関数的に減少している。表 4.1 に 3 種の LES と CLOA-1 の特性の比較を示した。LES は 3 種共 CLOA-1 より大きな推力が得られている。



(a) SDC-1051



(b) SDC-1253



(c) SDC-0836

図 4.6 LES の外観

Fig. 4.6 Configuration of the LES

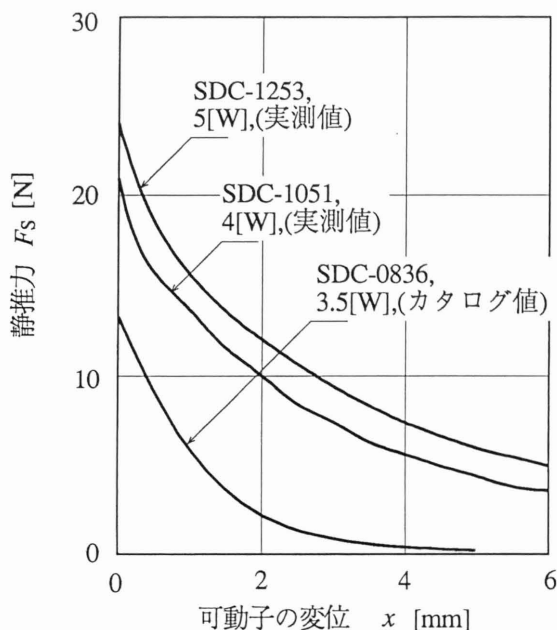


図 4.7 LESの静推力-変位特性

Fig. 4.7 Static thrust - displacement of the LES

表 4.1 LES と CLOA-1 の特性値

Table 4.1 Characteristics of the LES and the CLOA-1

項 目	L E S			CLOA-1
	SDC1051	SDC1253	SDC0836	
外形寸法 [mm]	23×30×50.1	27×30×53	20×26×36	∅25×31
体 積 [mL]	37.58	42.93	18.72	15.22
固定子質量 [g]	154	180	82	79.5
可動子質量 [g]	21	30	11	14
可動子の直径 [mm]	10	12	8	7.5
コイルの巻数 [回]	2000	1850	1900	530×2
コイルの線径 [mm]	0.29	0.32	0.22	0.25
コイルの抵抗 [Ω]	29	24	40	22.5
定格電力 [W]	5	6	3.5	3.6
電 圧 [V]	12	12	12	9
最大推力 [N]	20.9	24.01	13.72	9.2
推力/体積比 [N/mL]	0.556	0.559	0.733	0.604
推力/入力比 [N/W]	4.18	4.00	3.92	2.42

4.3.2 リニア電磁ソレノイド駆動式パルセータ

LES を用いたパルセータの模型図を図 4.8 に示した。この LES 駆動式パルセータは、 $1/f$ ゆらぎ信号発生装置により、その特性に $1/f$ ゆらぎ動作を与えることは容易であると既に述べた。しかしながら、パルセータへの応用を考えたときその要求仕様に合致しなければならない。

パルセータの基本機能は、図 2.1 に示すようにスライダをアクチュエータにより往復運動させることにより、同図の B 室を真空と大気に交互に切り換えるものである。この時、拍動特性に要求されることは、B 室内圧力を可能な限り短時間に、大気から真空に切り換えなければならない。このことは、図 2.3 において、時間 a を短くすることを意味している。この為には、図 2.1 において、スライダの下のサクシヨンポートの開口面積が、より大きい方が有利である。ここで、本研究で計画した、リニア電磁パルセータの開口面積は $90 [\text{mm}^2]$ であり、スライダを駆動するために、CLOA に要求される最低静推力は、2.3 項で求めた $1.5 [\text{N}]$ である。これに対して、LES を用いて同一面積を開口するためには、 $5 [\text{N}]$ が必要であり、CLOA に比較して 3 倍以上の静推力が要求される。このため、市販されている LES 駆動式の電磁パルセータでは、開口面積を $30 [\text{mm}^2]$ 程度を採用し、拍動特性を犠牲にしなければならず、このため畜舎内の汚れた環境下で使用した場合、サクシヨンポートが詰まりやすく、動作不良を発生しやすい弱点も有している。

4.4 円筒状リニア振動アクチュエータ駆動式パルセータ

4.4 Cylindrical linear oscillatory actuator-driven pulsator

試作した CLOA を搭載するリニア電磁パルセータの本体を設計、試作した。これに必要な部品の詳細を図 4.9 に示した。完成図は図 4.10 と外観は図 4.11 (a) に示す。前述の図 2.2 で示した従来のリキッドパルセータの部品点数 48 個と比較して、試作したリニア電磁パルセータでは 36 個と少なくなり、又図 4.10 で比較したように、他のパルセータよりも大幅な小型化が可能になった。

図 2.12 は、本研究で試作したリニア電磁パルセータと筆者が 1982 年に最初に試作したリニア電磁パルセータとの比較であり、その間の性能向上に関する CLOA の理論的解明と永久磁石の性能向上等により、CLOA と同時にこれを搭載するリニア電磁パルセータも小型化・軽量化が可能となったことを示す比較例である。

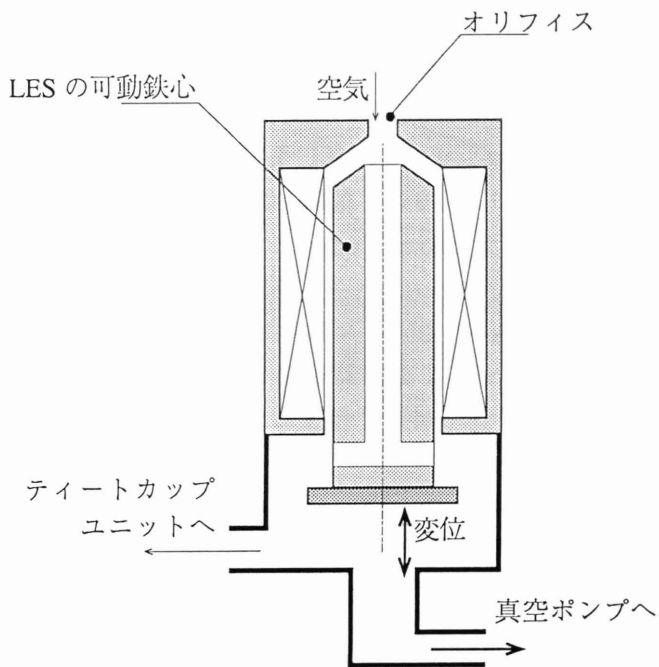
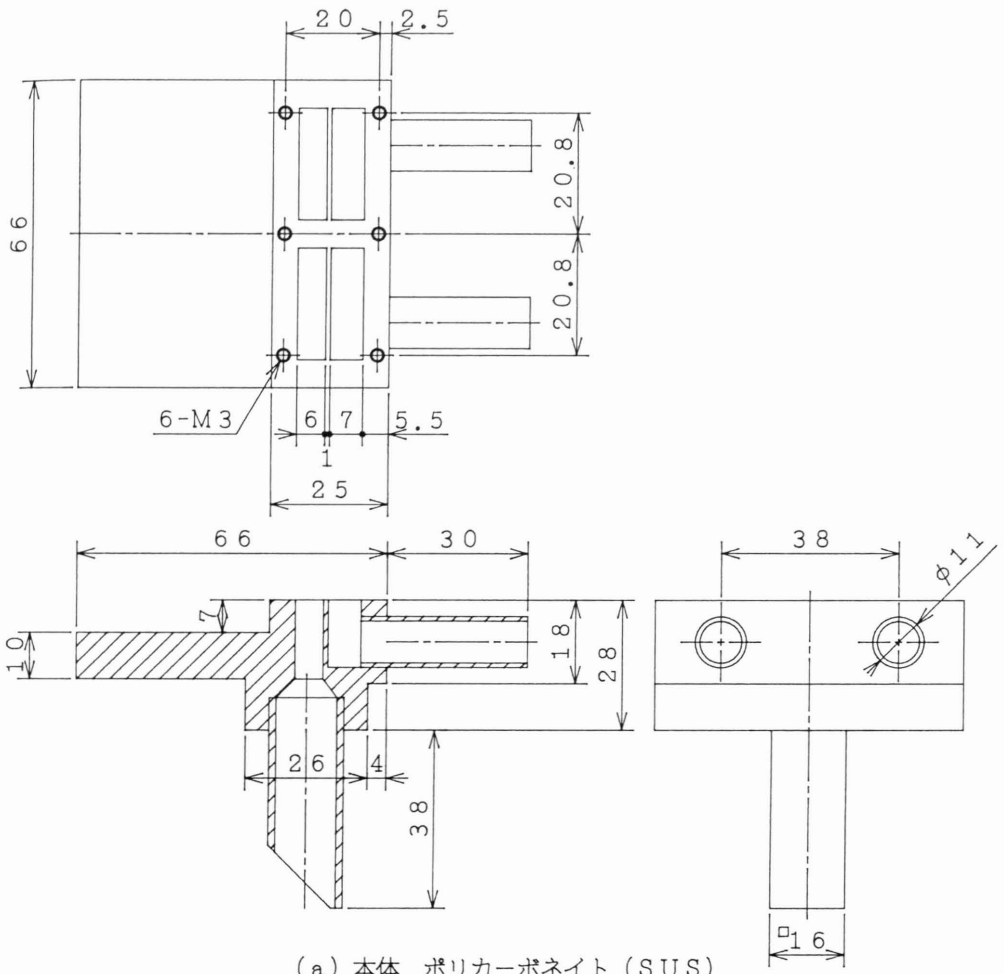
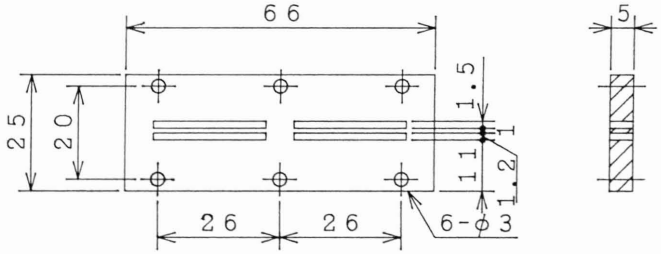


図 4.8 LES 駆動式パルセータの基本構造

Fig. 4.8 Explanatory diagram of the LES -driven pulsator

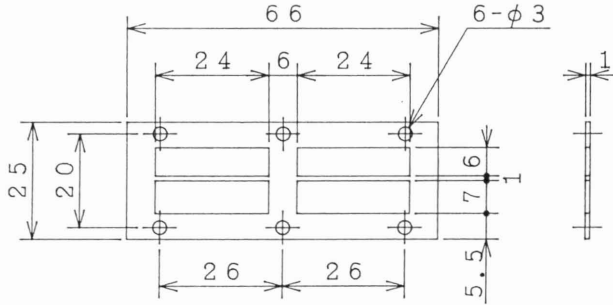


(a) 本体 ポリカーボネイト (SUS)

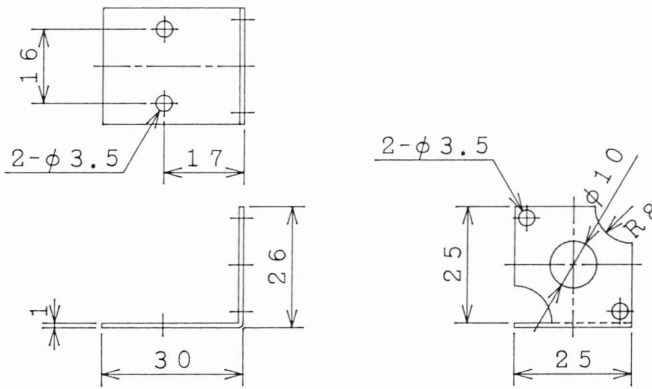


(b) スライドシート SUS

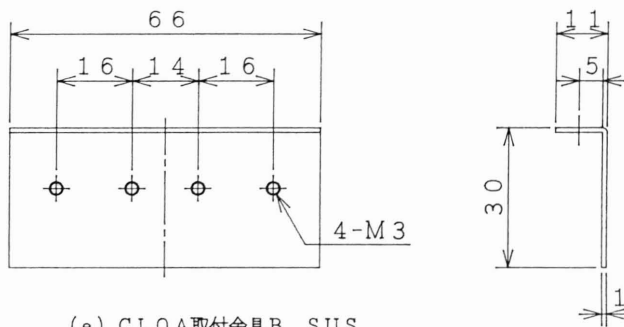
図 4.9 (1) リニア電磁パルサーの部品図
 Fig. 4.9 (1) Parts of linear electromagnetic pulsator



(c) パッキン ゴム



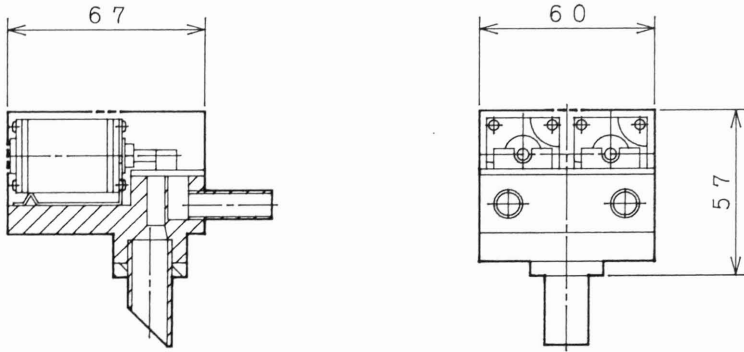
(d) CLOA取付金具A SUS



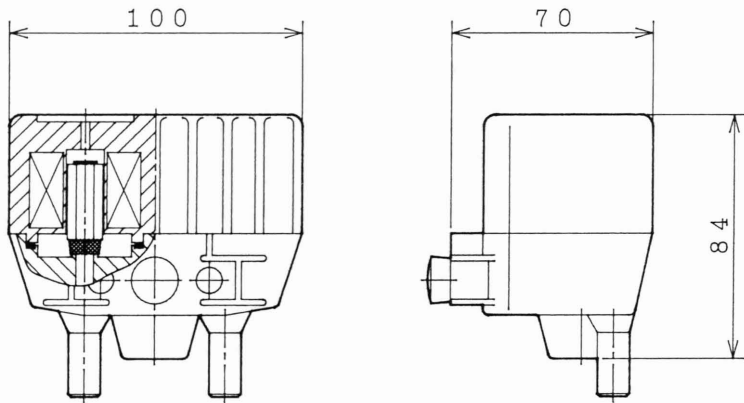
(e) CLOA取付金具B SUS

図 4.9 (2) リニア電磁パルセータの部品図

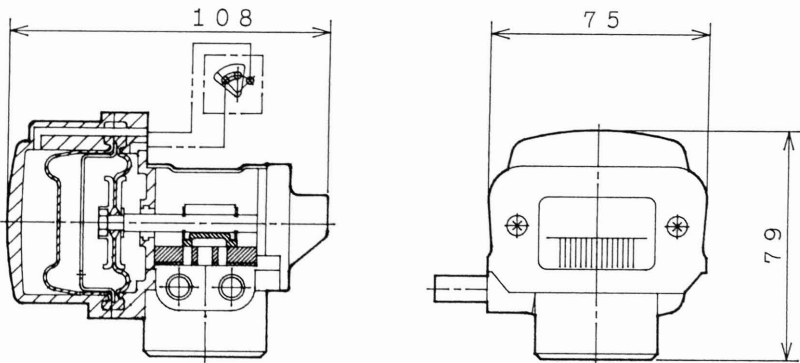
Fig. 4.9 (2) Parts of linear electromagnetic pulsator



(a) リニア電磁パルセータ



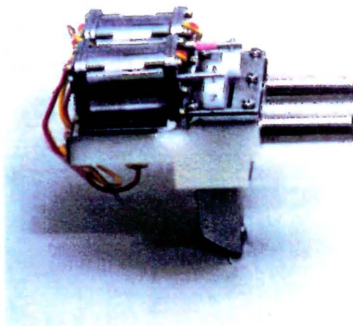
(b) LES 駆動式パルセータ



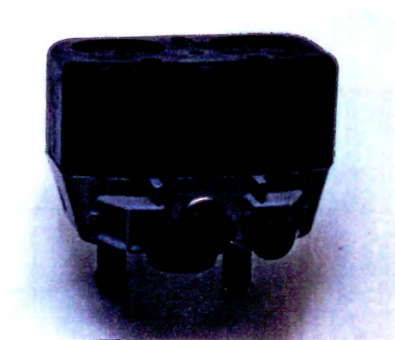
(c) リキッドパワーパルセータ

図 4.10 各種パルセータの外形寸法

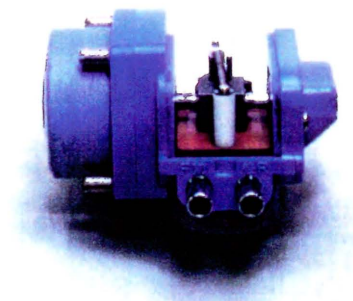
Fig. 4.10 External dimensions of each pulsator



(a) リニア電磁パルセータ



(b) LES 駆動式パルセータ



(c) リキッドパワーパルセータ

図 4.11 各種パルセータの外観写真
Fig. 4.11 Pictures of each pulsator

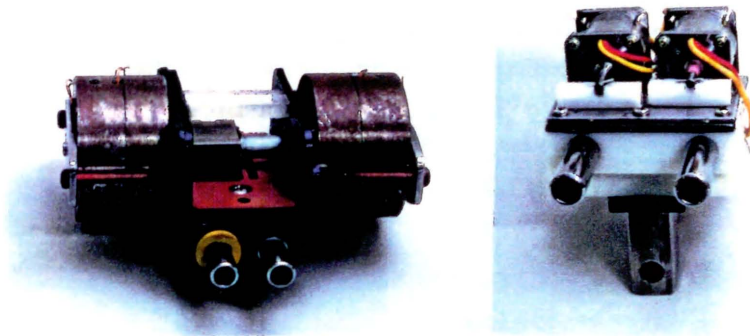


図 4.12 リニア電磁パルセータの試作 1号機と 1982 年の試作機

Fig. 4.12 The first trial of the linear electromagnetic pulsator and 1982 years trial

4.5 円筒状リニア振動アクチュエータ駆動式パルセータと リニア電磁ソレノイド駆動式パルセータの比較

4.5 Comparison of cylindrical linear oscillatory actuator-driven pulsator and linear electromagnetic solenoid-driven pulsator

図 4.11 (a) には、本研究の CLOA 駆動式パルセータ（リニア電磁パルセータ）を、(b) には、筆者が入手した BBCO 社の LES 駆動式パルセータの外観図を示した。また図 4.10 には、それぞれの外形寸法図を示している。さらに、参考として現在オリオン機械(株)が市販している空気圧駆動式パルセータ（リキッドパワーパルセータ）も併記した。また、表 4.2 は、以上の 3 種類のパルセータの概略の仕様の比較を示している。

以上のことから、リニア電磁パルセータは LES 駆動式パルセータと比較して、容積で約 60 % 小さく、リキッドパワーパルセータとは 65 % も小型である。また質量の比較では LES 駆動式パルセータの約 1/2 であり、本研究の目標であった小型、軽量化の可能性が大きいことが理解できる。

表 4.2 各種パルセータの仕様の比較
 Table 4.2 Specifications comparison of various pulsator

項目 [単位]	リニア電磁 パルセータ	サージ電磁 パルセータ	リキッドパワー パルセータ
駆動方式	CLOA 式	電磁弁式	空気圧式
静推力 [N]	10	—	10
外形寸法 [mm]	67×60×57	100×70×84	108×75×79
容 積 [mL]	229	588	640
質 量 [g]	420	740	470

4.6 リニア電磁パルセータの $1/f$ ゆらぎ信号による動作特性

4.6 Working characteristic of the linear electromagnetic pulsator by $1/f$ fluctuation signal

試作した CLOA 搭載のリニア電磁パルセータを、3.1 節の CLOA 駆動装置を用いて、 $1/f$ 信号により駆動したときの動作特性の一部分を図 4.13 に実線で示した^(4,6)。これは図 2.1 における、ティートカップの拍動室 B 内の圧力変化を実測した、いわゆるパルセータの特性波形である。これと比較するうえで、ゆらぎのない通常のパルセータの特性波形を点線で示した。その結果、 $1/f$ 駆動が一周ごと、その周期が変化していることが理解できる。

さらに、このデータを FFT 解析したパワースペクトル-周波数特性を図 4.14 に示した。この結果からリニア電磁パルセータの拍動特性も、ゆらぎ動作をしていることが確認され、 $1/f^n$ における指数 n は 1.0 であった。

以上の結果から、試作したリニア電磁パルセータを用いて搾乳する、動物実験を行うことは可能である。

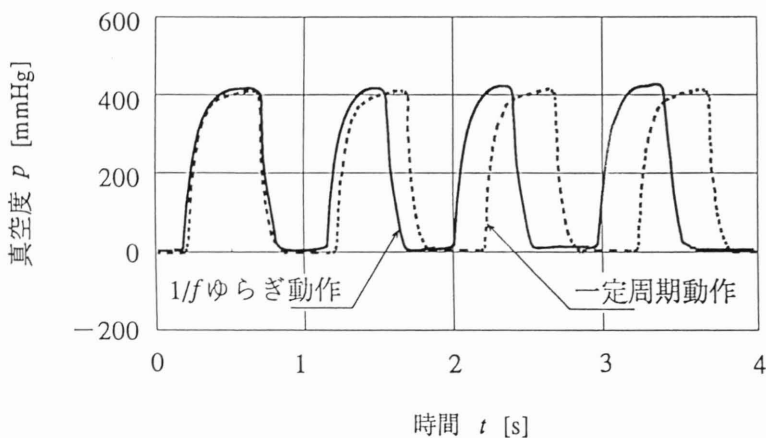


図 4.13 $1/f$ ゆらぎ信号による拍動室 B の圧力波形

Fig. 4.13 Pressure change of pulsating chamber B by $1/f$ fluctuation signal

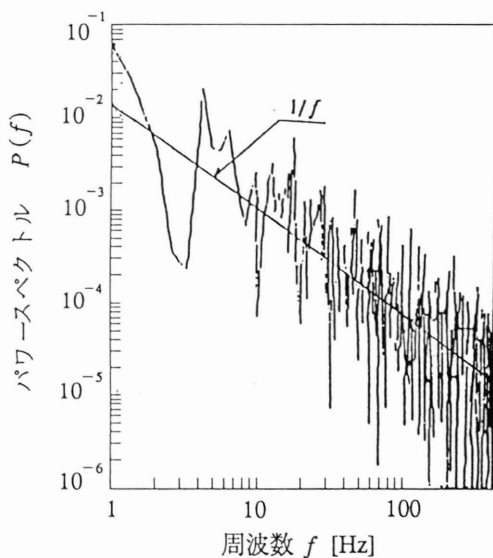


図 4.14 $1/f$ ゆらぎ信号による拍動室 B の圧力波形のパワースペクトル

Fig. 4.14 Powerspectrum of pressure change of pulsating chamber B by $1/f$ fluctuation signal

4.7 リニア電磁パルセータの将来性

4.7 Future of the linear electromagnetic pulsator

本研究の第一目的は、リニア電磁パルセータ駆動用 CLOA の開発であり、4.6 節で述べたように、試作したリニア電磁パルセータの動作に、 $1/f$ ゆらぎ動作を与える成果は確認された。

次いで本研究の最終目的は、このリニア電磁パルセータを用いて $1/f$ ゆらぎ搾乳を行い、機械搾乳に起因する乳頭障害発生の軽減を確認することである。しかしながら、真空による吸引の強い刺激が、牛体に与える影響を、直接、且つ簡便に測定する方法は無いのが現状である。このための搾乳実験には、綿密な計画のもとに、多数の牛を対象としてその結果を比較しなければならない。実験期間も長い年月にわたると同時に、高度の専門技術を必要とするので、筆者単独の実験は困難である。

そこで、リニア電磁パルセータの試作完了以前に、筆者は本研究と併行して、前述の堀内氏、生井沢氏等と BBCO 社の LES 駆動式パルセータを用いて、 $1/f$ ゆらぎ搾乳が牛体に与える影響の予備実験を行っているので^(4,7)、その結果について述べる。

実験では、泌乳と関係の深い循環器系機能への効果を推測するため、乳牛の心拍変動に着目し、パルセータの拍動周期を $1/f^*$ ゆらぎとした場合と、一定拍動とした場合とで比較した。

実験に用いたパルセータは $1/f^*$ において、 $n=1.0$ および $n=1.5$ の ゆらぎパルセータを 2 種類とし、拍動数は、いずれも 39.8 [回/分] ~ 66.2 [回/分] の間で ゆらぎ を与えた。一方、拍動数 53 [回/分] を一定としたパルセータを対象として比較実験を行った。測定に当たって牛体に電極を固着し、心拍メモリ装置を用いて、心拍周期を検出記録すると同時に、ECG プロセッサにより心電図形をも記録した。搾乳前、搾乳中は反芻等の行動観察を行い、搾乳後に乳量を計量した。

以上の実験を朝の搾乳時に 4 日連続して行った結果、乳量の平均値には有意差は認められなかった。同時に反芻行動の観察の結果、本実験の搾乳刺激とが、いずれも反芻行動に大きく影響するような、不快なストレスを与えていなかったと推測される。心拍変動の解析は、牛体の生理状態を知るための有効な手段

と思われるが、搾乳を開始すると n の絶対値が増加する傾向が見られた。これは搾乳時に循環器系機能が賦活するものと推測される。

いずれの搾乳条件においても、各々のパラメータの平均値どうしの比較では有意差は認められず、ゆらぎパルセータと一定拍動パルセータとの違いは見られなかった。しかし、前半を一定拍動パルセータで、後半を $n=1.0$ のゆらぎパルセータで搾乳した場合に限って、搾乳後半が $n=1.623$ の結果となり、搾乳前の値 $n=1.013$ および 1.217 と比較して、有意差は大きい値を示した。

以上の結果から、傾きが 1.0 のゆらぎパルセータによる搾乳は、搾乳時の循環器系機能亢進を、強く惹き起す効果が期待され、結果的に搾乳量を増加させる可能性があるものと考えられる。

以上のように、これまでの少ない実験の結果のみでは、 $1/f$ ゆらぎ搾乳が、牛の泌乳生理に及ぼす影響、即ち産乳量の増加、搾乳時間の短縮及び乳房炎発生の抑制等に対して明確な判定をするに至っていない。

そこで、筆者は本研究に引き続き、試作したりニア電磁パルセータを用いた搾乳実験を行う計画であり、 $1/f$ ゆらぎ搾乳の成果に大きな期待が持たれるものである。

第 4 章の参考文献

- (4.1) C.W.ターナー, 和田 宏:最新搾乳法, 明文書房, pp.46-47 (1971)
- (4.2) 佐治 晴夫:快適空間の物理, 応用物理, No.60, Vol.3, pp.247-253 (1991)
- (4.3) 堀内 征治・佐藤 信司・川上 隆行:1/f ゆらぎを利用した搾乳機の試作, 平成 5 年度電子情報通信学会信越支部大会論文講演集, 197, pp.393-394 (1993)
- (4.4) 生井沢 初枝・磯貝 敦・神田 修平・竹村 勇司・黒川 勇三・岩崎 博行・堀内 征治・野附 巖:乳牛心拍周期パワースペクトル解析-各種環境下における心拍周期変動について-, 日本畜産学会関東支部会報 第 44 号, p.5 (1993)
- (4.5) 日野 幹雄:スペクトル解析, 朝倉書店, pp.40-47 (1980)
- (4.6) 西澤 尚武, 八重崎 昌治, 岩崎 博行, 岡田 寛, 山田 一:リニアモータ駆動式搾乳機用パルセータのゆらぎ信号による動作特性, 電気学会マグネティックス・リニアドライブ合同研究会資料, MAG-94-128, LD-94-73, pp.25-34 (1994)
- (4.7) 岩崎 博行, 生井沢 初枝, 竹村 勇司, 神田 修平, 野附 巖, 西澤 尚武:ゆらぎパルセータが乳牛の心拍変動に及ぼす影響, 日本畜産学会関東支部会報 第 45 号, p.11 (1994)

第 5 章

結論

Conclusion

第 5 章 結論

5. Conclusion

搾乳機用リニアモータ駆動式パルセータ（リニア電磁パルセータ）に関する本研究で明らかになった成果を各章毎に以下にまとめる。

1. 第 2 章では CLOA に要求される静推力発生 of 理論的考察を行い、つづいて有限要素法を用いた静推力のシミュレーションを行った。更にこの結果に基づいて CLOA の詳細設計を行った。
2. 第 3 章では、第 2 章で求めた、最大静推力の要求仕様である 10 [N] に対して、試作 1 号機（以下 CLOA-1 と略記）ではパーメンジュール製可動子を用いたときに 9.2 [N] が得られたが、可動子の変位 $x=2$ [mm] の位置で、静推力が 0 [N] となった。この結果、実負荷時の駆動時に不安定な動作をとり、この不具合を改良すべく試作を重ねた。試作 2 号機（以下 CLOA-2 と略記）、試作 3 号機（以下 CLOA-3 と略記）では、パーメンジュール製可動子での最大静推力は、それぞれ 7.7 [N]、8.5 [N] と若干低い値となったが変位 $x=2$ [mm] の位置では、それぞれ 1.5 および 1.75 [N] を確保することができた。その結果、リニア電磁パルセータの駆動に際して、安定化が図られたが、エアギャップの大きさ等に更に改良を要することが明らかとなった。
更に、CLOA の実負荷駆動時のストロークが、CLOA-1 では 3.85 [mm] が得られ、これは要求仕様を満たしたが、軸受けの摩擦力の軽減と支持機構の再検討が必要であり、実用機では、そのストロークが正確に 4 [mm] を確保する CLOA の開発が課題である。
3. 第 4 章では試作したリニア電磁パルセータと LES 駆動式パルセータおよび従来の空気圧駆動式パルセータとの仕様比較を行い、その容積で約 60 % 小型で、且つ質量で約 1/2 と改善され、本研究の目的の一つである小型、軽量化の可能性が確認された。

更に、リニア電磁パルセータによる実搾乳試験を試行した。その結果は、実験回数が少ないため、 $1/f$ ゆらぎ搾乳が、牛の泌乳特性に与える影響には、明らかな有意差は認められなかった。しかしながら、1回の搾乳時間の前半を一定拍動で行い、後半を $1/f^n$ の指数 $n=1$ のゆらぎ拍動で搾乳した場合に限って、搾乳後半の心拍のゆらぎ指数が $n=1.623$ の結果となり、有意差は大きい値を示した。このことはリニア電磁パルセータをによる $1/f$ ゆらぎ搾乳の成果に大きな期待が持てることを示している。

以上、リニア電磁パルセータに搭載する円筒状リニア振動アクチュエータの研究は、所期の成果を得た。

しかしながら $1/f$ ゆらぎ搾乳が、牛の泌乳生理に与える影響、即ち搾乳時間の短縮および乳房炎発生の抑制に対しては、実験回数が少ないため、明確な判定に至っていない。

筆者は、本研究に引き続き試作したリニア電磁パルセータを用いた搾乳実験を計画しており、大きな成果を確信している。

謝 辞

Acknowledgments

信州大学工学部の山田 一 教授 には、昭和 57 年、本研究の端緒になった最初の CLOA 搭載のパルセータの試作以来、数々の共同研究に参加させて頂きました。この度、博士後期課程が社会人に門戸が開かれるにあたり、博士号取得について暖かいご助言を頂きました。そのうえ本研究を遂行し、論文をまとめるにあたり、終始暖かく、ご懇切なるご指導と、ご鞭撻を賜りました。ここに心から深甚の謝意を捧げる次第である。

査読して頂いた、遠藤 守信 教授、平田 哲夫 教授、山沢 清人 教授並びに脇若 弘之 助教授には、ご懇切なるご指摘とご指導を賜りました。ここに心からの謝意を表する次第である。

東京農工大学の野附 巖 教授、竹村 勇司 助手、神田 修平助手、生井沢 初枝氏、並びに、長野工業高等専門学校の堀内 征治 教授、学生の 佐藤 信司氏、川上 隆行氏 には、 $1/f$ ゆらぎの解析と、動物実験に際してご懇切なご教示と絶大なご協力を頂きました。ここに深く感謝の意を表する次第であります。日立金属テクノス株式会社の 鈴木 弘也氏には、可動子と永久磁石の設計と製作にあたって、ご協力を頂きました。ここに心から感謝の意を表します。

筆者の所属するオリオン機械株式会社の太田 三郎 会長、太田 哲郎 社長には、本研究を遂行する機会と環境を与えて頂くと同時に多大のご支援を頂きました。企画室の柳沢 課長、並びに開発本部の玉井 秀男 課長と山岸 由香 氏には論文構成の面で、いろいろご協力を頂きました。ここに心からお礼を申し上げる次第である。

株式会社エム・エー・ティー (Milking Automation Technology Co, Ltd,.) の松木 清高 取締役 所長、岡田 寛 部長、岩崎 博行 課長、井沢 理香氏には、リニアパルセータの試作と動物実験に際してのご協力と、資材の提供を頂きました。心から謝意を表します。

信州大学 工学部 山田研究室においては、本研究を遂行するにあたり 3 年間 CLOA の研究に、共に取り組んだ博士前期課程学生 石井 丈士 氏、八重崎 昌治 氏、木原 秀氏、また共に学んで、先に博士号を取得された、山上 広 博士、山口 昌樹 博士、博士後期課程学生 小林 学氏、学部生の松本 好司 氏、および一瀬 貴行 技能補佐員をはじめとする諸氏に感謝とお礼を申し上げる次第である。

研究業績

1. 学術論文

- (1) H.Yamada, M.Nirei, H.Ohta, K.Kawakatu, M.Karita, T.Maruyama, M.Chimura, T.Ogasawara, N.Nishizawa, T.Takeuchi, Y.Yamamoto and T.Akutsu : Linear electromagnetic actuators for implantable artificial heart, Proceeding of the 2nd International Symposium on Artificial Heart and Assist Device, No.29, pp.273-278, August 13-14, 1987, Tokyo, Japan.
- (2) H.yamada, T.Hamajima, S.Xiang, N.Nishizawa : Six-phase Cylindrical Linear Pulse Motor as Linear Oscillatory Actuator, IEEE TRANSACTION ON MAGNETIC, Vol.MAG-23, No.5, pp.2840-2843, September 1987.
- (3) H.Yamada, K.Kawakatu, M.Karita, Y.Yamamoto, H.Fukumasu, S.Yuasa, H.Wakiwaka, N.Nishizawa and T.Akutsu : Linear Pulse Motor for Implantable Artificial Heart, ICEM 88, International Conference on Electric Machines, Sept.1988, Italy.
- (4) 西澤 尚武, 石井 丈士, 山田 一 : 搾乳ユニットに用いるリニア振動アクチュエータの特性解析, 日本応用磁気学会誌, Vol.18, No.2, pp.543-546 (1994)

2. 著書

- (1) 上野 克美, 小川 益男, 片山 耕司, 金津 豊彦, 菊地 政則, 桑名 隆, 下条 菊次郎, 河内 清, 今野 喜市, 下村 正巳, 西澤 尚武, 春日 三佐夫, 矢野 信礼 : 生乳の冷却, (社)全国乳質改善協会, pp124-166 (1974)

3. 講演論文

- (1) 西澤 尚武 : 酪農管理施設, 機器の現況と展望, 家畜管理, Vol.11, No.3, pp.75-77 (1976.5)
- (2) H.Yamada, M.Yamamoto, K.Murata, S.Fukunaga, Y.Yamamoto and N.Nishizawa, : Fundamental Characteristics of a Cylindrical Linear Pulse Motor for the Artificial Heart, 信州大学工学部 紀要 第 56

- 号, pp.59-71 (1984.9)
- (3) 山田 一, 村田 究, 曾根 康正, 西澤 尚武, 山本 行雄, 脇若 弘之, : リニアパルスモータ形人工心臓用アクチュエータの動特性, 電気学会全国大会, No.846, p.1026 (1985)
 - (4) H.Yamada, K.Murata, Y.Sone, Y.Yamamoto, N.Nishizawa, S.Fukunaga : Application Problems of a Linear Pulse Motor for the Artificial Heart Actuator, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-85-22, pp.9-17 (1985.2)
 - (5) 山田 一, 村田 究, 楡井 雅巳, 尾形 幸雄, 福永 信一郎, 三輪 善一郎, 山本 行雄, 西澤 尚武 : 平板状リニアパルスモータ形人工心臓用アクチュエータ(AHA-S34)の開発, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-86-9, pp.77-86 (1986.2)
 - (6) 西澤 尚武, 石井 丈士, 山田 一, 松木 清高, 岩崎 博行, 鈴木 弘也 : リニア振動アクチュエータの搾乳機への応用, 電気学会リニアドライブ研究会資料, LD-92-99, pp.11-20 (1992)
 - (7) 石井 丈士, 西澤 尚武, 山田 一 : 搾乳機に用いる円筒状リニア振動アクチュエータの基礎特性, 第5回リニアドライブ若手研究者シンポジウム予稿集, 11, pp.77-82 (1993.7)
 - (8) 石井 丈士, 西澤 尚武, 山田 一, 松木 清高 : 搾乳機に用いる円筒状リニア振動アクチュエータの負荷に関する考察, 平成4年度電気関係学会東海支部連合大会, No.181, p.91 (1992.10)
 - (9) 西澤 尚武, 石井 丈士, 山田 一, 岩崎 博行 : 円筒状リニア振動アクチュエータの搾乳機への応用に関する検討, 平成5年度電気関係学会東海支部連合大会, No.182, p.91 (1993.10)
 - (10) 藤澤 晃, 頼 俊樹, 峰村 勇, 深見 龍夫, 月岡 徹, 山本 泰正, 馬場 美孝, 山下 昌三, 西澤 尚武, 中村 由美夫 : マグネトロンスツパタリングにおける磁界分布と放電特性, 第4回粒子線の先端的応用技術に関するシンポジウム ISSN, pp.917-928 (1993.11)
 - (11) 西澤 尚武, 八重崎 昌治, 石井 丈士, 山田 一, 松木 清高, 岩崎 博行, : 搾乳機に用いる円筒状リニア振動アクチュエータの動作特性解析, 電気学会リニアドライブ研究会資料, LD-94-5, pp.35-42 (1994.2)
 - (12) 岩崎 博行, 生井沢 初枝, 竹村 勇司, 神田 修平, 野附 巖, 西澤 尚武 : ゆらぎバルセータが乳牛の心拍変動に及ぼす影響, 第88回日本畜産学

会大会講演要旨 p.91 (1994.3)

- (13) 西澤 尚武, 八重崎 昌治, 山田 一: リニアモータ駆動式搾乳機用電磁パルセータに関する研究, 電気学会リニアドライブ研究会資料, LD-94-41, pp.83-92 (1994.6)
- (14) 西澤 尚武, 八重崎 昌治, 岩崎 博行, 岡田 寛, 山田 一: リニアモータ駆動式搾乳機用パルセータの ゆらぎ信号による動作特性, 電気学会マグネティックス・リニアドライブ合同研究会資料, MAG-94-128, LD-94-73, pp.25-34 (1994.10)

4.特許

- (1) 田口 一美, 山田 一, 西澤 尚武: リニアモータ型携帯型人工心臓駆動装置, 特許 1427464 番
- (2) 田口 一美, 山田 一, 西澤 尚武: リニアモータを使用した人工心臓, 特許 1427465 番
- (3) 涌井 明男, 白田 昌裕, 西澤 尚武: 搾乳機用乳量測定装置及び測定する方法, 特許 1381105 番
- (4) 西澤 尚武, 松木 清高, 岩崎 博行: 搾乳機 1, 特開平 05-268847 (備考 ゆらぎパルセータ 1)
- (5) 西澤 尚武, 松木 清高, 岩崎 博行: 搾乳機 2, 特開平 05-268848 (備考 ゆらぎパルセータ 2)
- (6) 西澤 尚武, 松木 清高, 岩崎 博行: 搾乳機 3, 特開平 05-268849 (備考 ゆらぎパルセータ 3)
- (7) 西澤 尚武, 松木 清高, 岩崎 博行: 搾乳機 4, 特開平 05-268850 (備考 ゆらぎパルセータ 4)