

令和 6 年 6 月 12 日現在

機関番号：32692

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2023

課題番号：20K20252

研究課題名(和文) リニア振動アクチュエータ(LOA)を用いた高頻度振動換気アクチュエータの開発

研究課題名(英文) Development of high frequency oscillation ventilation motor using linear oscillatory actuator

研究代表者

島峰 徹也 (Shimamine, Tetsuya)

東京工科大学・医療保健学部・講師

研究者番号：10842015

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：慢性肺疾患(CLD)の予防として高頻度振動換気(HFOV)によるCLD予防が模索されてきている。本研究ではリニア振動アクチュエータ(LOA)を用いたHFOVモータの性能評価を目的とした。HFOVのアクチュエータとして構造が簡単なLOAに着目し、小型化を目的としたHFOV用人工呼吸器のアクチュエータを設計し、動作を検証した。サマリウムコバルト磁石を用いた単巻線形LOAの安定した出力にはVCMよりも大きな電力での駆動が必要となるが、単巻線形LOAによりHFOV用人工呼吸器のアクチュエータを小型化できる可能性を示唆した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

在宅人工呼吸器管理を必要とする子どもが急増しており、2008年の468人から2018年の4,178人まで10年間で約10倍に増加している。年齢別にみると、HFOV用人工呼吸器の対象年齢である0～4歳の割合がおよそ33.2%を占め、一番多い。HFOV用人工呼吸器の在宅用は発売されていない。現行のHFOV用人工呼吸器は在宅での使用を想定した人工呼吸器としては大型であり、HFOVを使用できる在宅用人工呼吸器を開発するためには人工呼吸器自体の小型化が必須である。本研究にて、単巻線形LOAによりHFOV用人工呼吸器のアクチュエータを小型化できる可能性を示唆した。

研究成果の概要(英文)：High-frequency oscillatory ventilation (HFOV) has been explored for the prevention of chronic lung disease (CLD). The purpose of this study is to evaluate the performance of an HFOV motor using a linear oscillatory actuator (LOA), focusing on the simple structure of the LOA as an actuator for HFOV, an actuator for a ventilator for HFOV was designed and its operation was verified in order to reduce its size. Although a single-winding LOA with a samarium-cobalt magnet requires a larger power drive than a VCM for stable output, the single-winding LOA suggests the possibility of downsizing the actuator of the ventilator for HFOV.

Translated with DeepL.com (free version)

研究分野：臨床工学、生体計測、治療機器

キーワード：リニア振動アクチュエータ 高頻度振動換気 LOA HFOV

1. 研究開始当初の背景

新生児の肺は成熟過程にあり脆弱である。よって通常の陽圧による人工呼吸器管理では、過剰な吸気圧と過度の吸気時間による圧損傷 (barotrauma) や容量損傷 (volutrauma) があり、容易に慢性肺疾患 (chronic lung disease : CLD) を発症すると考えられている。CLD を発症した新生児の呼吸管理は長期にわたり、入院期間の延長だけでなく、身体的および「うつ」の発症などの精神的予後も問題になってくることが多く、その予防は重要であり、高頻度振動換気法 (high frequency oscillatory ventilation : HFOV) による CLD 予防が模索されてきている。

HFOV とは生理的な呼吸回数を著しく超えた換気回数で行う人工換気法であり、気胸や慢性肺疾患などの肺損傷発生の危険性が少ない換気法である。日本では新生児に多く使用し、通常換気回数は 900 回/分 (15 Hz)、また気道内のガス拡散が促進されるために、生理学的死腔を下回るような非常に小さな 1 回換気量 (1.5 ~ 2 mL/kg) で正常な肺胞換気が実現できる。また、在宅人工呼吸器管理を必要とする子どもが急増しており、在宅人工呼吸器管理が必要な児童数が 2008 年の 468 人から 2018 年の 4,178 人まで 10 年間で約 10 倍に増加している。年齢別にみると、HFOV 用人工呼吸器の対象年齢である 0 ~ 4 歳の割合がおよそ 33.2% を占め、一番多い。

2. 研究の目的

HFOV 用人工呼吸器の在宅用は発売されていない。現行の HFOV 用人工呼吸器は在宅での使用を想定した人工呼吸器としては大型であり、HFOV を使用できる在宅用人工呼吸器を開発するためには人工呼吸器自体の小型化が必須である。

我々は HFOV 用人工呼吸器に使用され、多くの体積を占めているモータに着目した。現在臨床で使用されている HFOV 用人工呼吸器にはボイスコイルモータ (voice coil motor : VCM) が使用されているが、リニア振動アクチュエータ (linear oscillatory actuator : LOA) を応用して開発を行うこととした。また本研究ではモータの小型化が目標のため、2 個の励磁コイルによる方式を採用せず、1 個の励磁コイルにより可動体の往復運動が可能で、両方向に同一の推力を発生させる機構である、単巻線形 LOA にて開発を行うこととした。本稿で提案する単巻線形 LOA は、1 個の励磁コイルの使用、さらにはバネも使用しないため、VCM より十分な小型化を達成し、さらには可変周波数での運転が可能である。HFOV 人工呼吸器用アクチュエータとして構造が簡単な単巻線形 LOA に着目し、小型化の開発を行った。

3. 研究の方法

(1) ボイスコイルモータと単巻線形 LOA の、軸対称 2 次元モデルの作成と動推力特性

現在臨床で使用している HFOV 用人工呼吸器はボイスコイルモータ (Voice coil motor: VCM) を採用している。現行の HFOV 用の人工呼吸器の VCM の特性を明らかにするために、電磁界解析ソフトウェアである JMAG を用いて HFOV 用人工呼吸器の VCM 軸対称 2 次元モデルを作成した。この軸対称 2 次元モデルを使用し、メッシュモデル作成の後に磁気ベクトルポテンシャルを用いた有限要素法にて動推力特性のシミュレーションを実施した。作成した VCM 軸対称 2 次元モデルを図 1 に示す。

その後単巻線形 LOA モデルを設計し、移動子・固定子のピッチ幅やマグネットの高さ、固定子のティース長さ等を変更して動推力特性のシミュレーションを実施し、最適な設計を検討した。作成した単巻線形 LOA 軸対称 2 次元モデルを図 2 に示す。

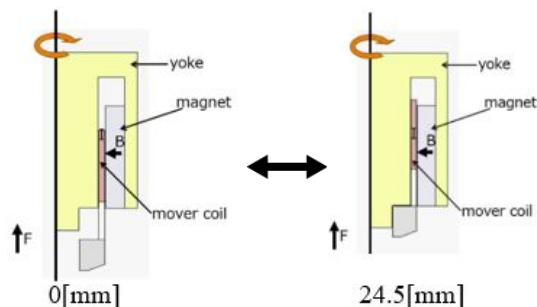


図 1 VCM 軸対称 2 次元モデル

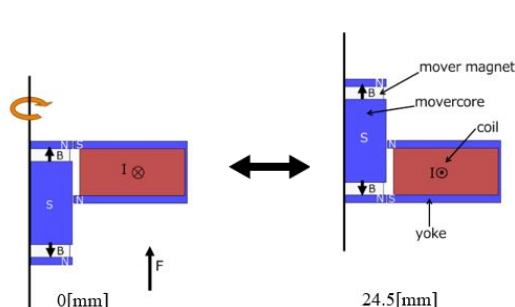


図 2 単巻線形 LOA 軸対称 2 次元モデル

(2)単巻線形 LOA の実験システム作成と HFOV としての性能評価

(1)で検討した設計を参考として図 3 に示す単巻線形 LOA 試作機を作成し、その試作機を用いて回路内圧、流量、1 回換気量を評価できる実験システムを構築した。構築した実験システム模式図を図 4 に示す。HFOV 用人工呼吸器は VCM に位置決め制御を付加してフィードバックをかけることによって、大きな Stroke となるように調整している。よって入力条件を揃えるために、HFOV 用人工呼吸器は駆動させずに、KENWOOD 製ファンクションジェネレータ FG-275 にて 15 Hz 正弦波信号を発生させ、その信号をエヌエフホールディングス製アンプ HSA4011(最大振幅±75 Vpp)にて増幅させた電圧を入力信号とした。また入力信号は Tektronix 社製オシロスコープ TDS 3012B を用いて電圧振幅と周波数 15 Hz 正弦波を調整、確認した後 LOA 試作機に接続した。単巻線形 LOA 試作機の先には Piston を装着し、HFOV 用純正人工呼吸器リユース回路の口元 Y ピース部分に imt メディカル社製フローアナライザ PF-300 を装着、フローアナライザの先には新生児用テストラング(コンプライアンス 0.60 mL/cmH₂O(計算値)、抵抗 75 cmH₂O/L/s(計算値)、容量 50 mL)を装着した。臨床使用では吸気側に加温加湿器を挿入するが、今回の実験モデルでは除外している。フローアナライザ PF-300 の設定は、湿度 0%、実測している大気圧(1004 mbar)とガス温度(24.5)によって換気量を計算する ATPD (Ambient Temperature and Pressure Dry)とし、HFOV 駆動中の回路内圧、流量、1 回換気量をサンプリング 200 Hz でそれぞれ測定した。

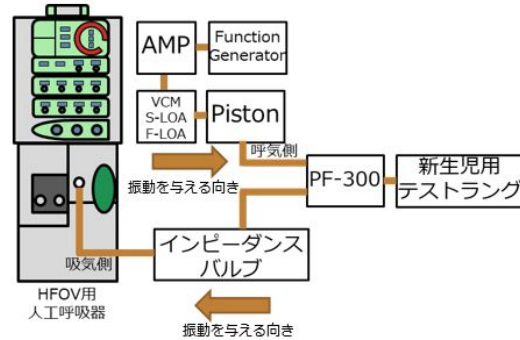
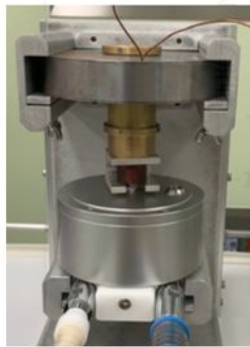
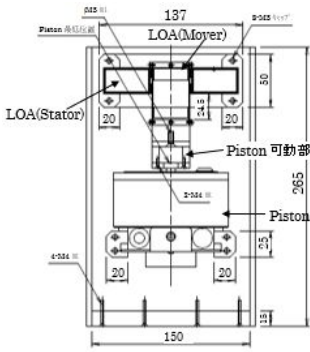


図 3 LOA 試作機 1 の図面と実機(Piston 装着済) 図 4 HFOV 性能評価の実験システム

4 . 研究成果

(1)単巻線形 LOA 軸対称 2 次元モデルの動推力特性結果

シミュレーションした単巻線形 LOA の各電流値における移動距離による動推力特性を図 5 に、到達時間による動推力特性を図 6 に示す。(「VCM9.3A」はボイスコイルモータの動推力特性である。) 最大振幅 9.3 A の設定で最大 100 N を超える VCM の動推力特性と近似した特性が示された。LOA はマグネットとコイルのリアクタンスの合成で推力を規定しているため、コイルのリアクタンス成分だけで推力を出している VCM と比べてどうしても複雑な波形となってしまう。しかし HFOV 用人工呼吸器はモータからピストン、人工呼吸器回路を経由して患者へ推力が伝わり、ダンピングされるので患者への大きな障害へはならないと考える。また図 6 より、VCM の動推力特性のような安定した正弦波出力とはならないが、Mover の往復運動を実現できる可能性が示唆された。採用した単巻線形 LOA モデルの体積比としては、VCM と比較して、Stator で 19.6%、Mover で 9.2%まで縮小することが可能であった。

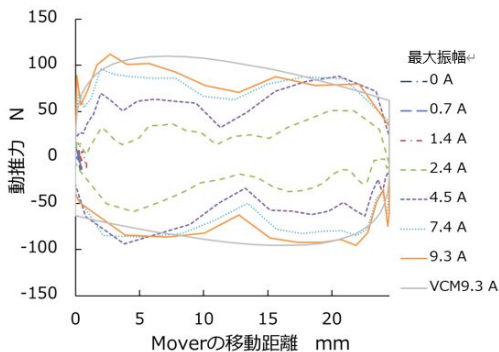


図 5 単巻線形 LOA の各電流値における移動距離による動推力特性

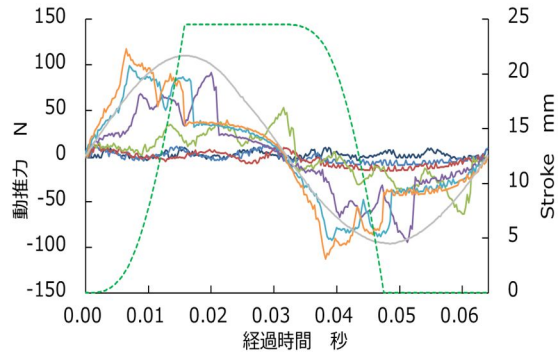


図 6 単巻線形 LOA の各電流値における到達時間による動推力特性

(2)単巻線形 LOA 実験システムの HFOV としての性能評価結果

図7はサマリウムコバルト磁石を用いた単巻線形 LOA(S-LOA)を、図8はVCMを15 Hz 正弦波入力電圧振幅 ± 70 Vppで駆動させた時の、HFOV 開始5秒後、測定値が安定してから1秒間での、フローアナライザで測定した回路内圧と流量、1回換気量の測定値である。このグラフより、S-LOAでもVCMと同等以上の回路内圧、流量、1回換気量の変動が得られていることを確認した。位置決め制御を付加してフィードバックをかけることによって、よりStrokeが安定した駆動ができる事が予想される。

しかしHFOVの性能評価の実験では、図9、図10に示すようにS-LOAでは ± 40 Vpp程度まで移動子がStrokeを開始しなかった。これは少ない電圧では単巻線形 LOAの重さとディテント推力を上回る推力を生み出せなかったことによって初期駆動ができなかったためと考えられる。またVCMでは振幅 ± 10 Vppにて最大回路内圧11.4 cmH₂O、最大流量8.1 L/minとなり、その後入力電圧を上げて最大回路内圧と最大流量は上昇しなかった。VCMは構造的に発生推力(磁石による磁気力+コイル励磁による電流力)が飽和して、最大回路内圧と最大流量の上昇が停止したものと考えられる。一方、最大エネルギー積(BHmax)が大きいS-LOAでは発生推力による飽和を起こさず、入力電圧を上げることによってVCM以上の最大回路内圧と最大流量を得ることが可能であった。よりBHmaxの大きいネオジム磁石を使用することによって最大回路内圧と最大流量をさらに増やすことは可能であると考えられるが、ディテント推力により初期駆動させるまでの電圧値も大きくなってしまふ。ディテント推力との関係も考慮したMagnet選定を今後さらに検討する必要がある。また本研究はメカニカルなStroke制限を24.5mmとしたが、メカニカルなStroke制限を24.5 mmより長く設定し、パネで固定する方法でディテント推力の影響の少ないところへMoverを持ってくることが可能である。そうすればより強いMagnetも採用することができる。今回は機器の都合上 ± 75 Vppの入力電圧が限界値であったが、今後はより入力電圧を高くできる機器を使用してS-LOAの最大回路内圧と最大流量の限界値も検討していく必要がある。

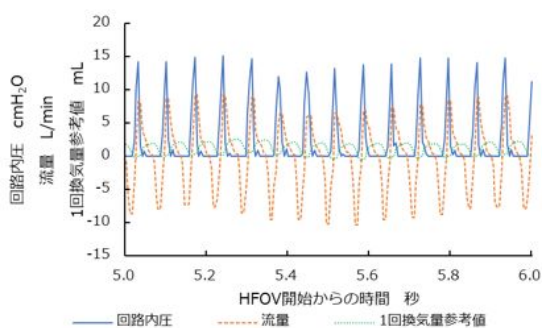


図7 S-LOAの15 Hz 入力電圧振幅 ± 70 Vppでの各測定値

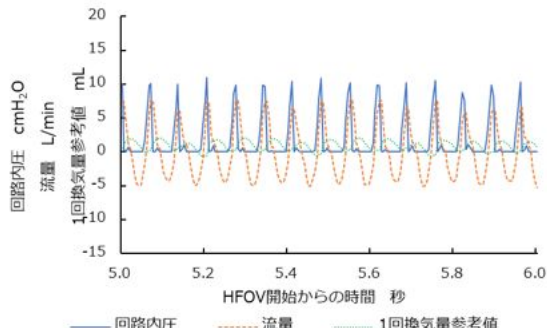


図8 VCMの15 Hz 入力電圧振幅 ± 70 Vppでの各測定値

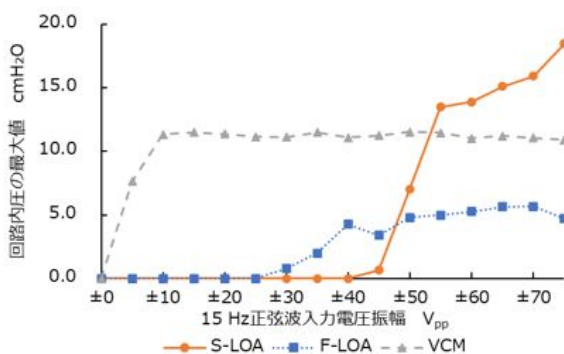


図9 15 Hz 入力電圧振幅での回路内圧最大値

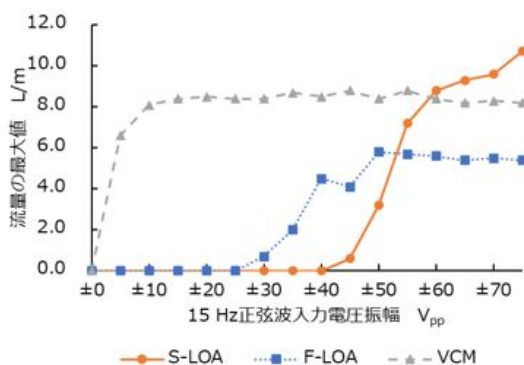


図10 15 Hz 入力電圧振幅での流量最大値

<引用文献>

茨聡, 一ノ橋祐子: 新生児呼吸管理における Lung protective ventilation(LPV) . Inspiration2005 ; 3 : 6-8 .

Christian J. Roth, Kai M. Förster, Anne Hilgendorff, Birgit Ertl-Wagner, Wolfgang A. Wall & Andreas W. : Gasexchange mechanisms in preterm infants on HFOV - a computational approach. Scientific Reports2018 ; 8 : 13008 .

田村正徳: 医療的ケア児に対する実態調査と医療・福祉・保健・教育等の連携に関する研究 . 平成30年度厚生労働科学研究費補助金障害者政策総合研究事業2020 .

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 SHIMAMINE Tetsuya, KASAI Ryosuke, KANO Takashi, KAMIJO Fuminori, OGINO Minoru, HINATA Nae, TANAKA Kohei, SHINOHARA Kazuhiko, WATADA Masaya	4. 巻 29
2. 論文標題 Development of High Frequency Oscillatory Ventilation Motor Using Linear Oscillatory Actuator	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Japan Society of Applied Electromagnetics and Mechanics	6. 最初と最後の頁 302 ~ 308
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14243/jsaem.29.302	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 島峰 徹也, 笠井 亮佑, 加納 敬, 上條 史記, 荻野 稔, 安藤 ゆうき, 田中 裕香子, 苗村 潔, 田仲 浩平, 篠原 一彦, 和多田 雅哉	4. 巻 35
2. 論文標題 リニア振動アクチュエータを用いた高頻度振動換気モータの性能評価	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 医工学治療	6. 最初と最後の頁 89 ~ 97
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 島峰 徹也, 笠井 亮佑, 加納 敬, 上條 史記, 荻野 稔, 日向 奈恵, 田仲 浩平, 篠原 一彦, 和多田 雅哉
2. 発表標題 リニア振動アクチュエータを用いた高頻度振動換気モータの開発
3. 学会等名 第29回MAGDAコンファレンス in 大津
4. 発表年 2020年

〔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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------