

〔論 文〕

呼吸管理中の患者が発声を可能とするための 吸気供給システムの提案 — 真空エジェクタ形状の有効性の検討 —

大恵 克俊*, 青井 宏樹*, 平川 皇樹*, 中茂 睦裕*², 内村 俊二*³

*日本文理大学工学部機械電気工学科

*²湘南工科大学情報学部情報学科

*³第一工科大学工学部情報・AI・データサイエンス学科

Proposal of an Inspiratory Air Supply System to Enable Vocalization in Mechanically Ventilated Patients — An Evaluation of the Effectiveness of Vacuum Ejector Geometry for Performance Enhancement —

Katsutoshi OE*, Hiroki AOI*, Misaki HIRAKAWA*, Mutsuhiro NAKASHIGE*², Shunji UCHIMURA*³

*Department of Mechanical and Electrical Engineering, School of Engineering, Nippon Bunri University

*²Department of Informatics, Faculty of Informatics, Shonan Institute of Technology

*³Department of Information, Artificial Intelligence and Data Science, Faculty of Engineering,
Daiichi Institute of Technology

Abstract

Patients requiring respiratory management due to conditions such as amyotrophic lateral sclerosis (ALS) who use a tracheotomy-mediated ventilator are unable to vocalize, as air cannot be supplied to their vocal cords. For these patients, vocalization can be achieved by delivering air into the trachea through the tracheal orifice using an oxygen cylinder or a hospital room's oxygen supply system, thereby vibrating the vocal cords. Our research has focused on developing a control system for an electric artificial larynx utilizing muscle potential signals from the neck. We have previously proposed a system that incorporates this control to activate a small pump for air supply. While we have also proposed a pump unit design employing multiple small pumps with piezoelectric elements, this paper reports on the results of finite element simulations for a novel shape. This new design demonstrates the potential to enhance flow rate and pressure by applying the principles of vacuum ejectors.

キーワード：呼吸管理, 空気供給システム, 真空エジェクタ, 筋電位信号, 筋萎縮性側索硬化症, 圧電ポンプ

Keywords : respiratory management, air supply system, vacuum ejector, myoelectric signal, amyotrophic lateral sclerosis, piezoelectric pump

1. はじめに

わが国では嚥下障害や ALS（筋萎縮性側索硬化症）等の疾患により、人工呼吸器を用いた呼吸管理を行うために気管切開を行った患者が約7,400人いると言われて⁽¹⁾いる。人工呼吸器は外科的手術により頸部に開けた気管孔にカニューレを装着し、それを介して機械的に空気を肺に送り込み呼吸を行うものである。しかし気管孔を開けることで呼気・吸気が声帯のある咽頭上部を通過しなくなるため声帯を振動させることができなくなり、声の基となる喉頭原音を発生することが不可能となる。その結果、声帯、舌、口腔、鼻腔等の構音器官が健在であるにも関わらず声を失うこととなる。また人工呼吸器から離脱できる状況になった際にも、長期間に渡り声帯を使用しないため上手く発声することができない場合もある。またカニューレは嚥下機能の低下により誤嚥を起こす患者に対して予防策として使用される場合もあり、この状況においても上記と同じ理由で発声が可能となる。

音声は人間にとって非常に重要なコミュニケーション手段であり、それを失うことは非常に不便であるだけでなく精神的なストレスにもつながる。そこでカニューレを装着した状態でも発声が可能となるよう、カニューレに設けられた吸引用のラインから空気を気管内に送り込み、その気流により声帯を振動させて発声する手法を用いる場合もある⁽²⁾⁽³⁾。しかしこの手法は空気の供給源として酸素ボンベやベッドサイドに設けられた酸素供給口を使用するため、コストや可搬性に関して問題がある。

これらの問題点を解決するため、我々は酸素ボンベ等に代わる空気供給装置として小型ポンプに着目し、これまでに株式会社村田製作所の小型ポンプ「圧電マイクロプロア」を使用したポンプユニットを提案してきた。特に流路形状の改良によるユニットとしての性能向上を進めてきたが、吐出圧力、吐出流量ともに必要性能を満たすことができなかった⁽⁴⁾。そこで本報告では、本来真空ポンプとして使用される真空エジェクタの原理を応用した、小型、高圧、高流量が期待されるポンプユニット形状を提案、有限要素シミュレーションにより特性の評価を行ったので、その結果について述べる。

2. 呼吸管理による発声障害と従来の発声方法

2-1 呼吸管理による発声障害

ALSや筋ジストロフィー等の疾病や、事故によるけが等により自力での呼吸が困難な患者は人工呼吸器により呼吸管理を行う。その際、頸部付け根前面に気管切開を行い気管孔を形成、気管カニューレを挿入・留置する。しかしこの状態では呼気・吸気ともに気管孔を通過するため、その上部に位置する声帯を気流が通過しなくなる。そのため声帯を振動させる気流が存在せず、音声の基となる喉頭原音の発生ができなくなり、結果として発声が可能となる。しかし多くの場合は声帯をはじめ口腔、鼻腔、舌、口唇などの発声に関わる器官に機能上の問題がないため、声帯に気流を通すことで再び発声が可能となる。

2-2 従来の発声方法

図1にカニューレの吸引ラインと酸素ボンベを用いた発声方法（吸引ライン・コンスタントフロー法）の模式図を示す。酸素ボンベからの気流は吸引ラインを通り気管内に導かれ放射される。本発声方法はその気流を用いて声帯を振動させ喉頭原音を生成するものである。この酸素ボンベの代わりに室内の酸素供給口を使う場合もあるが、酸素ボンベの場合はその重量や大きさが、酸素供給口の場合は設置されている室内でしか使用できない点の問題となる。そこでボンベや酸素供給口などの代替となる空気供給装置を小型化し、可搬性を高めることで屋外や外出先でも使用可能なものの実現が期待される。

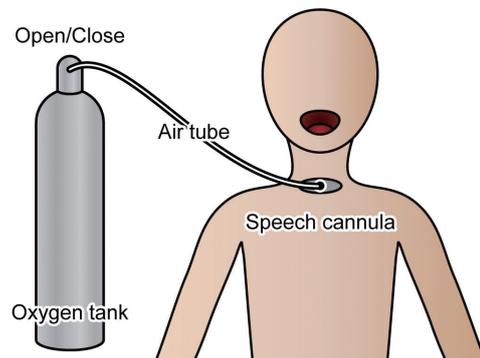


図1 吸引ライン・コンスタントフロー法

2-3 小型ポンプを用いた発声方法

前節で述べた通り、従来手法は気流源となる機構の問題により実用において非常に不便であることが明らかであり、普及させることは困難であると考えられる。そこ

で軽量小型で気流のオンオフが電氣的に容易に制御可能な電動ポンプを用いた空気供給装置を提案する。空気供給装置を発声時にスイッチが入る軽量・小型のポンプユニットに置き換えることで、可搬性および経済性の向上が見込まれる。ここで使用する発声時にオン、非発声時にオフとする制御システムは、我々のこれまでの研究成果により作製済みであり⁽⁵⁾、本制御システムをほぼそのまま使用可能であると考えられる。

3. マイクロプロアを用いた小型ポンプユニット

3-1 概略

図2に小型ポンプユニットを用いた発声方法の模式図を示す。従来の酸素ポンペに代わり、空気供給装置として小型のポンプユニットを採用、オンオフ制御は頸部筋電位信号により行う。この制御システムは電気式人工喉頭を制御するために作製したが、頸部筋の一つである胸骨舌骨筋の筋電位信号を測定することにより、発声時にオン、非発声時にオフの制御用信号を生成することが可能であり、このまま本発声システムに適用可能である。小型ポンプユニットの作製にあたり、株式会社村田製作所の圧電マイクロプロアMZB1001T02に着目した。これは圧電セラミックスで駆動されるポンプであり、一つの寸法が $20 \times 20 \times 1.85$ [mm]と小型である。これを複数連結することで、発声に必要な流量を確保することを目的とする。

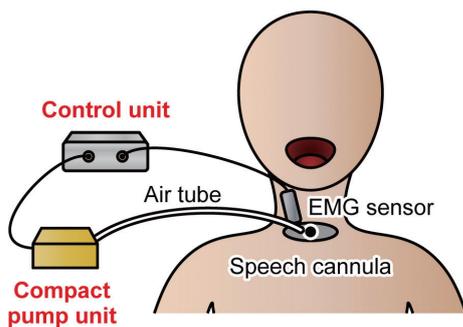


図2 小型ポンプユニットを用いた発音法

3-2 ポンプユニットの必要仕様

川島らは酸素ポンペを用いた発声法を試みており、酸素流量3L/minから5L/minにおいて発声が可能であったと報告している⁽³⁾。そこで我々は空気供給装置に必要な性能を求めるために、気流阻止法を用いて上記の2条件の際の呼気流量および呼気圧力と、比較のために健常男性の発声時における呼気流量、呼気圧力を測定した⁽⁴⁾。その結果を表1に示す。使用予定の圧電マイ

クロプロアは、21Vの電圧を印加した際の流量が11.6 mL/s、圧力が1.5kPa⁽⁶⁾であるため、5L/minの酸素ポンペと比較すると圧力がやや不足するが、流量は10個程度を並列で使用することで十分な性能が得られると考えた。従ってポンプユニットとしての目標値を流量100 mL/s、圧力1.5kPaと設定した。

表1 気流阻止法により測定した酸素ポンペ使用時と健常男性の発声時の呼気流量と呼気圧力

	Oxygen tank		Healthy male
	3L/min	5L/min	
Flow rate (mL/s)	55.5	84.6	159.2
Pressure (kPa)	1.10	2.211	0.218

3-3 試作ポンプユニット

これまでにサイズの関係からマイクロプロアを8個使用したものを試作、その性能評価を行った。その際、流路形状を変更することで圧力が少し低下するものの流量が増加することが確認された⁽⁷⁾。そこでFEM解析を用いた流路形状の改良を行った結果、流量、圧力の改善が見られたが、所望の数値を得ることはできなかった。

4. 真空エジェクタ型ポンプユニット

4-1 真空エジェクタ

小型で高圧力・大流量のポンプユニットを実現するために、真空エジェクタの原理を応用した新しい形状を考案した。図3に真空エジェクタの模式図を示す。真空エジェクタの原理は、流体の速度が上がると圧力が低下するベルヌーイの定理を利用したものであり、高圧流体を駆動源とし、それをノズルから高速噴射することでボディ内に低圧空間を生成、インレットより外部流体を吸引する。駆動流体は吸引された流体を伴いながら出口へ向かい、ディフューザ部において減速しながらほぼ損失無く運動エネルギーを圧力エネルギーに回復、昇圧する。

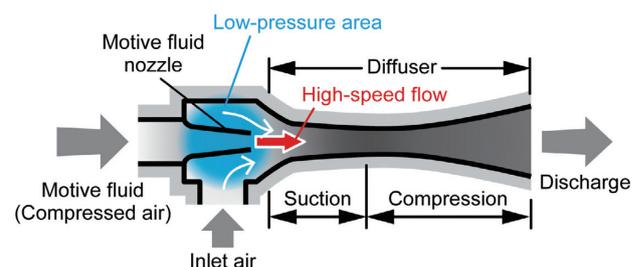


図3 真空エジェクタの模式図

4-2 真空エジェクタを応用したポンプユニット

我々が提案する真空エジェクタ型空気供給装置を図4に示す。図中のインレットより駆動流体を流し込み、アウトレットより拡散・排気、その過程でサイドインレットより外部流体を吸引することで、アウトレットにおいて高流量の気流の生成が期待される。声帯の振動にはアウトレットからの気流を気管内に導入し使用する。駆動流体としては先述の圧電マイクロプロアを直列に接続したものの使用を想定している。真空エジェクタの標準供給圧力は300kPaとされており、これまで使用してきたMZB1001T02では1個当りの吐出圧力が1.5kPaと低く、必要な圧力を得るためには20個以上必要となり、可搬性が低下する。そこで吐出圧力を30kPaに高めたMZB3004T04⁽⁸⁾に変更し、10個直列で使用することで所望の300kPaの供給圧力を得ることが可能となる。本報告で提案する空気供給装置の主要寸法を図5に示す。全長は24.5mm、直径は8mmとかなり小型であることが分かる。図左端が圧電マイクロプロアアレイに接続される。

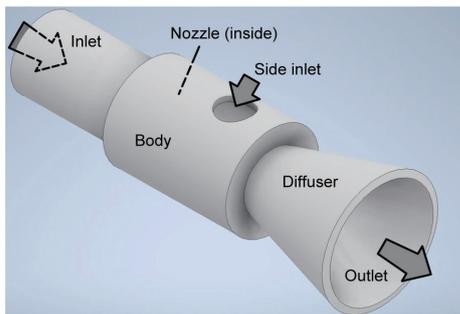


図4 真空エジェクタ型空気供給装置

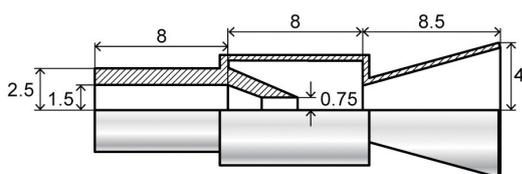


図5 提案する空気供給装置の主要寸法

5. 有限要素解析による性能評価

5-1 目的

提案した真空エジェクタ型ポンプユニットの性能を有限要素解析により評価する。

5-2 方法

図4および図5のボディ部にサイドインレットとして直径10mmの穴を開けたモデルを作成、下記条件にて有限要素解析を行う。

1) 使用ソフト：ANSYS2024 R1 アカデミック版

2) 解析条件

使用気体：空気、入口圧力：300kPa。出口圧力：大気圧開放、サイドインレット圧力：大気圧開放、温度：27℃、壁面滑り無し

3) サイドインレット個数：0, 2, 4個

4) 要求性能

出口圧力：1.4kPa+大気圧、出口流量：100mL/s

5-3 解析結果および考察

図解析結果の1例として、図6にサイドインレットが4個のときの流線および出口圧力分布のコンター図を示す。図6よりサイドインレットからの吸込が確認された。

サイドインレットの個数を変えた際の出口圧力（出口前面での平均値）を表2に示す。穴がない場合の出口圧力が98.059kPaであるのに対し、2個の場合は102.932kPa、4個の場合は104.992kPaとなった。この結果から穴を増やすことで出口圧力が増加することが確認された。さらに4穴において出口圧力と大気圧101.325kPaとの差をゲージ圧とし、声門下圧と比較したところ、3.667kPaとなり標準的な声門下圧である0.57~1.4kPaと比較して過大であることが明らかとなった。また出口における流速と断面積を乗して流速を求めると1830mL/sとなり、呼気流量の目標値である100mL/sと比較して

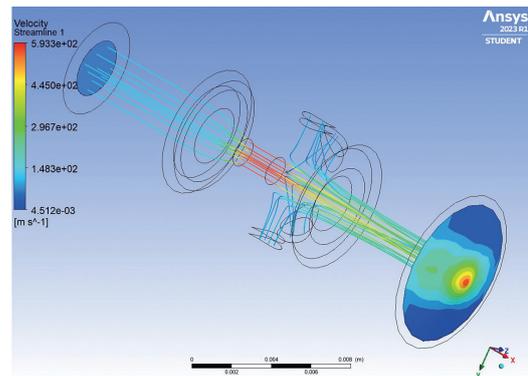


図6 入口圧力300kPa、サイドインレット4穴の際の解析結果

表2 入口圧力300kPa、サイドインレットの個数0, 2, 4個の際の出口圧力

	Number of side inlets		
	0	2	4
Outlet pressure (kPa)	980.59	102.932	104.992

大幅に過大であることが分かった。この結果から駆動圧力を減じて必要な出口圧力および流量が得られることが推測される。そこで使用する圧電マイクロプロアの個数を減らした条件についての解析を行うこととした。

5-4 入口圧力を減じた際の有限要素解析

前節の結果に基づき、入口圧力を圧電マイクロプロアの個数を8個および5個とした場合の圧力である240kPa、150kPaとして解析を行った。またサイドインレットの個数は多いほど出口圧力が高いという結果が得られているため、本節では4穴の場合について解析を行う。入口圧力、サイドインレットの個数以外は5-2節と同じ解析条件を使用する。

5-5 解析結果および考察

表3に各入口圧力における出口圧力と大気圧との差（ゲージ圧）および流量を示す。入口圧力が240kPaの条件においては要求性能に対して必要十分な出口圧力と過大な流量が、入口圧力150kPaの条件においては最低限の出口圧力と過大な流量となることが確認された。以上の点から現状の出口圧力を維持しつつ流量を減らす形状を模索することで、使用する圧電マイクロプロアの数減らすことが可能であると考えられ、将来的な小型・軽量化を実現できることが予測される。

表3 入口圧力を変化させた際の出口でのゲージ圧と流量

	Inlet pressure (kPa)		
	300kPa	240kPa	150kPa
Gauge pressure (kPa)	3.667	1.506	0.584
Flow rate (mL/s)	1830	1469	915

6. まとめ

本報告において以下の知見が得られた。

- 1) 提案したポンプユニット形状は圧力および流量の増加に有効であることが確認された。
- 2) サイドインレットの個数を増やすことで出口圧力の向上が確認された。
- 3) さらに形状を改良することで、より小型・軽量な空

気供給システムの実現が期待される。

今後はサイドインレットと内部ノズルの相対位置や、ディフューザ部の寸法および形状などを変更して、より優れた特性を持つポンプユニットの実現を目指す予定である。またシミュレーションで結果が得られた後には実際に試作し、その特性の評価を行う計画である。

謝辞

本研究の一部は、文部科学省科学研究費補助金（基盤研究（C）23K11974）の補助を受けたものである。

参考文献

- (1) 宮地隆史：「全国都道府県別の在宅人工呼吸器装着差調査（2018年）」、北海道立工業試験場報告、<https://plaza.umin.ac.jp/nanbyo-kenkyu/asset/content/uploads/2019/04/全国都道府県別在宅人工呼吸器装着者調査2018.pdf>（2024. 6. 15閲覧）
- (2) 太田昭生他：「脳出血患者に発声用サイドライン付き気管カニューレ（ポーカレイドTM）を利用した発声訓練の経験」、リハビリテーション医学、Vol. 43 (Suppl) pp. S189（2006）
- (3) 川島広明他：「気管切開患者における吸引チューブを使用した発声訓練の検討」、音声言語医学、Vol. 51, No. 1 pp. 87（2010）
- (4) 木場智美他：「圧電振動子を用いた発声補助用小型ポンプの研究」、日本機械学会講演論文集、No. 218-2 演題番号716（2021）
- (5) K.Oe：「An electrolarynx control method using myoelectric signals from the neck」、Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 33, No. 4 pp. 804-813（2021）
- (6) 株式会社村田製作所、製品情報マイクロプロア MZB1002T02、https://www.murata.com/ja-jp/products/mechatronics/fluid/overview/lineup/microblower_mzb1001t02（2024. 6. 15閲覧）
- (7) 株式会社村田製作所、製品情報マイクロプロア MZB3004T04、https://www.murata.com/ja-jp/products/mechatronics/fluid/overview/lineup/microblower_mzb3004t04（2024. 6. 15閲覧）

