二枚の共振平板間に進行波状の移動空間を生成する原理を利用した薄型送風機*

松村 雄一^{*1}, 古屋 耕平^{*1}, 山田 尚人^{*2}
芝田 祐樹^{*3}, 米山 浩司^{*3}, 安田 孝宏^{*4}Thin Profile Fan Using the Generation Principle of Travelling Space
between Two Resonantly-Driven PlatesYuichi MATSUMURA^{*1}, Kohei FURUYA, Naoto YAMADA,
Yuuki SHIBATA, Koji YONEYAMA and Takahiro YASUDA^{*1} Department of Mechanical Engineering, Gifu University
1-1 Yanagido, Gifu-City, Gifu, 501-1193 Japan

As the size of electronic mobile devices decreases, the size reduction of cooling components becomes valuable. Because of rotation radius, conventional rotary fans occupy columnar space with some thickness. This occupation is an issue for size reduction of electronic devices. This paper proposes a fan that uses the generation principle of travelling space between two resonantly-driven plates. As the profile of this fan is parallelepiped and thin, the fan can be efficiently inserted in small and thin space of parallelepiped devices. This paper also addresses a realization method of the proposed fan principle. The principle needs two plates and excitation of a sine-shaped mode on each plate. Therefore desired excitation conditions and relative position of the two plates were clarified. Then the principle was realized by an experimental apparatus, and consequently airflow with pulsation was confirmed.

Key Words : Vibration of Continuous System, Mechanism, Modal Analysis, Natural Frequency, Fan

1. 緒 言

携帯用電子機器の小型化や高集積化に伴い、機器を冷却するための送風機も、性能を確保しつつ小型化することが求められている。従来の回転型ファンは、その設置に円柱状の空間を必要とする。直方体状が多い電子機器の狭い空間に効率よく設置するには工夫が必要となる。また、回転型ファンは、その原理上、小型化の限界に近づきつつあるとされる。近年、小型・薄型の筐体内に実装可能で、回転型ではない形式の送風機の研究が盛んである。例えば、圧電素子に取り付けた羽根の振動による送風を利用した圧電ファン^{(1),(2)}や、シンセティック・ジェットを利用した圧電ファン^{(3),(4)}などが提案されている。前者は構造が単純であり、小型化に適しているが、ケーシングをつけても昇圧性能が低いという課題がある。後者は昇圧性能が高い反面、噴流を生成するための大きな空気溜めと、溜めこんだ空気を一気に吐き出すための大型圧電素子が必要であり、小型化には不利な点もある。

本論では、共振現象を利用して2枚の対向する平板上に、それぞれ正弦波状の定在波を発生させた場合ある条件において、2枚の平板間に生成される進行波状の移動空間を利用した送風原理を提案する。この送風原理は2枚の平板と、これらを固定する台座、平板の調和加振に必要な機器のみの単純な機構で実現されるという利点を有する。また、薄い直方体の形状で実現されることから、直方体の形状が多い電子機器の狭い空間中に、効率よく設置できる。本報告では、この送風機を実現する設計手法を整理した後、実際に実験装置を製作して送風性能を検証する。また、送風原理に忠実な送風機を実現する上での課題を整理する。

* 原稿受付 2013 年 4 月 22 日

^{*1} 正員, 岐阜大学 工学部 機械工学科 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸 1-1)^{*2} 学生員, 岐阜大学大学院 工学研究科 機械システム工学専攻^{*3} 元山梨大学大学院 医学工学総合教育部 機械システム工学専攻^{*4} 正員, 滋賀県立大学 工学部 機械システム工学科

E-mail: y_matsu@gifu-u.ac.jp

2. 送風の実現方法

2・1 定在波を利用した送風原理⁽⁵⁾

進行波を利用した物体の搬送原理に基づいて定在波を利用した物体の搬送原理を導き、この原理で空気を搬送する方法について述べる。はじめに、進行波を利用した物体の搬送原理をまとめる。図1に示すように、位相速度 $v = \omega/k$ で x 軸の正方向へ進む振幅 A 、波数 k 、角振動数 ω の進行波 u_1 と、進行波を上からふさぐ直線 u_2 で囲まれた領域に着目する。

$$u_1(x, t) = A \cos(\omega t - kx) \quad (1)$$

$$u_2(x, t) = A \quad (2)$$

図1の斜線部に示される進行波 u_1 と直線 u_2 で囲まれた領域の面積は、次式の差分を x 方向に積分することで表される。

$$u_2(x, t) - u_1(x, t) = A - A \cos(\omega t - kx) \quad (3)$$

本式は、進行波 u_1 の位相速度と同じ速度で x 軸の正方向に移動する。この移動領域に奥行きを与えると、この空間は進行波の伝播と共に移動することから、この空間内の物体を搬送できる。これが、進行波を利用した搬送原理であり、進行波ポンプなどに利用されている⁽⁶⁾。一方、進行波状の移動領域は、加法定理により次式のように変形できる。

$$u_2(x, t) - u_1(x, t) = w_2(x, t) - w_1(x, t) \quad (4)$$

ここに、

$$w_1(x, t) \equiv A \sin kx \sin \omega t \quad (5)$$

$$w_2(x, t) \equiv A - A \cos kx \cos \omega t \quad (6)$$

式(5)の w_1 は振幅 A 、固有モード形が $\sin kx$ の定在波、式(6)の w_2 は、振幅 A 、固有モード形が $\cos kx$ の定在波を y 方向に A だけシフトしたものと考えてよい。この式展開により、進行波 u_1 と直線 u_2 で囲まれる進行波状の移動領域は、2つの定在波 w_1 と w_2 を用いても生成できることが示された。2つの定在波の差分で表される進行波状の移動領域に奥行きを与えれば、この空間で物体を搬送できる。これが、本論で提案するところの定在波を利用した搬送原理である。

本研究で提案する送風機は、2枚の対向する平板上に生成された定在波による搬送原理によって、空気を搬送することで実現される。平板の長手方向に、正弦波状のモード形を励起させると、振動する平板には奥行きがあるため、平板の隙間が搬送される状態となる。この移動空間で空気を搬送することで、送風機が実現する。

Fig. 1 Traveling space by travelling wave

2・2 実機で送風を実現するための条件

実際に送風機を実現することを念頭におき、定在波で移動空間を生成するための条件について整理する。

2・2・1 正弦波状の固有モード形の生成

送風機を実現するには、式 (5), (6) で表された定在波 w_1, w_2 を平板状の媒質の上に発生させる必要がある。本報告では、定在波を発生させる媒質として、細長い形状の薄膜を採用する。薄膜の長手方向に張力をかけ、境界条件が両端固定とみなせるように、長手方向の両端を台座に接着固定する。この薄膜を長手方向に見た場合の横振動は、張力を主な復元力とすることから、弦の横振動と同様と見なせる。両端固定弦の横振動の固有モード形は正弦波形であり、 r 次モードの固有モード形は、 r 次モードの固有振動数における波数を k_r として $\sin(k_r x)$ で表せる。従って、 r 次固有角振動数 ω_r で加振された薄膜の横振動の変位 $s(x, t)$ は、次式で近似できる。

$$s(x, t) \cong S \sin(k_r x) \sin(\omega_r t) \quad (7)$$

ここに、 S は横振動の振幅である。弦の強制振動では、低次モードにおけるモード密度が低く、固有振動数での加振応答において r 次以外のモードの影響が小さいと考えられるため、 r 次モードだけが励起されると近似した。

両端固定弦の横振動の固有モード形を念頭におき、前節で求めた送風原理の数式を、実機の振動の形に整理し直す。以下では式 (5), (6) の w_1, w_2 を表現する薄膜をそれぞれ薄膜 1, 薄膜 2 と呼ぶ。また、実機における 2 枚の薄膜の変位をそれぞれ s_1, s_2 とする。これらの変位の振幅は、式 (5), (6) から、同振幅であることが必要なので、これを A とする。このとき、薄膜は、次式の変位をそれぞれ実現すればよいことがわかる。

$$s_1(x, t) = A \sin(k_r x) \sin(\omega_r t) \quad (8)$$

$$s_2(x, t) = A - A \sin\left(k_r x + \frac{\pi}{2}\right) \sin\left(\omega_r t + \frac{\pi}{2}\right) \quad (9)$$

式 (9) に示される薄膜の固有モード形は、位相 90° だけ x 方向にシフトしているため、このシフト量をわかりやすくするために、波数 k_r を固有モード形 $\sin(k_r x)$ の波長 λ_r で置き換える。波数と波長の関係は、 $\lambda_r = 2\pi/k_r$ であるので、式 (9) は次式に変形できる。

$$s_2(X, t) = A - A \sin(k_r X) \sin\left(\omega_r t + \frac{\pi}{2}\right) \quad (10)$$

ここに、座標 X は次式の変換式に基づいて、座標 x を座標変換して求まる。

$$X = x + \frac{\lambda_r}{4} \quad (11)$$

本式は、正弦波状の固有モード形の 4 分の 1 波長分だけ、薄膜 2 を薄膜 1 よりも x 方向にシフトさせれば、式 (8) と式 (9) で表される 2 枚の薄膜の実稼働モード形は、いずれも同じ正弦波状にできることを表す。

2・2・2 薄膜の設置と駆動

2 枚の薄膜の設置に必要な条件を図 2 に示す。式 (8), (9) より、薄膜 1, 2 を y 方向に離す距離は、薄膜の振動振幅 A と等しくすべきである。また、薄膜 1, 2 を x 方向に離す距離は、式 (10), (11) に基づき、固有モード形の 4 分の 1 波長分だけずらして設置する必要がある。これらの 2 条件を満たして薄膜を設置することで、式 (8), (9) の実現に必要とされる空間軸 x に関係する条件を満足できる。

2 枚の薄膜の加振方法に必要な条件を説明する。式 (8), (9) に示したとおり、 r 次固有振動数 ω_r で加振した際の、2 枚の薄膜上の任意の位置における振動は、 w_2 の方が時間的に位相 90° 分だけ進んでいる必要がある。そこで、2 枚の薄膜に与える加振力に位相差を持たせるため、これらを個別に加振する方法を採用する。また、点加振に伴う加振点付近の近接波の影響を排除するため、薄膜の固定台座を加振する方法を用いた。このような慣性加振により、式 (8), (9) に示した理想振動に近い状態を実機で実現する。さらに、加振力は、薄膜 1, 2 にそれぞれ同じ振幅 A の振動を励起するように調整する必要がある。これら 3 つの方法を用いて薄膜を加振することで、式 (8), (9) の実現に必要とされる時間軸 t に関係する条件を満足できる。

送風機の実現に必要な条件を整理する。以上に示した通り、長方形の薄膜に張力を負荷し、薄膜の長手方向の両端を固定した装置で送風を実現する場合には、次の諸条件が揃えばよいことがわかる。

1. 同寸法、同一材料からなる長方形の薄膜を用意
2. 薄膜に張力を与えるようにして薄膜を設置
3. 薄膜 1, 2 の対向面の隙間は、振動振幅と同じ A に決定
4. 正弦波状の固有モード形における波長の 4 分の 1 だけ、薄膜 1 よりも薄膜 2 を x 方向にずらして設置
5. 固有振動数にほぼ一致する周波数で薄膜を加振し、波数 k_r の正弦波状固有モード形 $\sin(k_r x)$ を生成
6. 薄膜 1, 2 には、それぞれ同じ振幅 A の振動を励起するように加振力を調整
7. 薄膜 1 よりも薄膜 2 の位相が 90° 進むように加振力を調整

このとき、例えば長手方向の 3 次モードを励起するように薄膜を加振したとすると、図 3 の通り、時間の進行と共に薄膜 1 と薄膜 2 の間の接触点が移動することで、接触点に挟まれた空間が左から右に移動し、接触点に押し出されるようにして内部の空気を搬送できる。

Fig. 2 Realization method of proposed principle by using third operating deflection shapes

Fig. 3 Travelling space generated by two standing waves

2・3 移動空間の速度と送風量の理論式

移動空間の速度の理論式を求める。2・1 節で説明したように、移動空間の速度 v_r は進行波 u_1 の速度に等しい。 r 次モードの定在波を利用して進行波を発生させた場合、固有角振動数 ω_w と移動空間の速度 v_r は次式で結ばれる。

$$v_r = \frac{\omega_w r}{k_r} \quad (12)$$

ここに、薄膜を弦とみなしたときの両端固定弦の固有角振動数 ω_{nr} と固有モード形の波数 k_r は、弦の長さ l 、張力 T 、線密度 μ を用いて、それぞれ次式で表される。

$$\omega_{nr} = \frac{r\pi}{l} \sqrt{\frac{T}{\mu}} \quad (13)$$

$$k_r = \frac{r\pi}{l} \quad (14)$$

これらの式を式(12)へ代入すれば、 r 次モードを利用する際の移動空間の速度 v_r は、次式で求められる。

$$v_r = \frac{\omega_{nr}}{k_r} = \sqrt{\frac{T}{\mu}} \quad (15)$$

送風量の理論式を求める。図3に示したように、移動空間は正弦波状の固有モード形の1波長で閉じる瞬間がある。図1に立ち返れば、この閉じた空間の体積 V_c は、変位 u_2 と u_1 の差分に、薄膜の奥行き方向の幅 b を乗じ、1波長 λ_r にわたって積分した次式で表されることがわかる。

$$V_c = b \int_0^{\lambda_r} (u_2(x, t) - u_1(x, t)) dx = b \int_0^{\lambda_r} (A - A \cdot \cos(\omega_{nr}t - k_r x)) dx = b A \lambda_r \quad (16)$$

図1からわかる通り、この体積 V_c は時間によらずに一定である。この移動空間は、1秒間に駆動周波数と同じ回数だけ排出されるので、1秒あたりに送風できる体積量 V_f は、次式で表せる。

$$V_f = V_c \frac{\omega_{nr}}{2\pi} \quad (17)$$

ただし、本式は1秒あたりの送風量の総量を表しており、図3からわかる通り、実際の送風では1秒あたりにして、駆動周波数と同じ回数の脈動が生じる。

3. 送風装置

前章の原理に基づいた送風装置を製作した。以下、送風装置の概要、および設計上の注意点を説明する。また、2・2・2項の最後の段落で述べた7つの条件のうち、条件1～3を満たす装置を作成し、本装置の駆動において、特に実現が困難と考えられる5～7の条件を、本装置が満足していることを確認する。

3・1 実験装置の概要

図4に実験装置の全体像を示し、図5に薄膜を z 方向から見たときの拡大図を示す。図4において黄色の破線の鉛直下方に薄膜2枚が設置されている。図5に示す通り、上下の薄膜をそれぞれ薄膜1、2とする。以下、薄膜の長手方向の横振動3次モードを利用して送風を行うこととする。図3に示したように3次モードは本原理において閉空間が生成される最低次数のモードであることから採用した。薄膜は厚さ0.05mm、幅15mm、長さ83mmのシリコンゴムシートを利用している。この薄膜を1mm伸ばし、長さ84mmの状態でコの字形の台座（以下、コの字台座）に接着した。これにより、薄膜の長手方向の横振動は、両端固定弦と同じとみなしてよい。2つのコの字台座をそれぞれ別のボイスコイルモータ（東芝機械製VCM10-12R）で、図5の上下方向に加振し、3次モードを励起させる。コの字型台座の材質にはアルミニウム（A5052）を採用した。また、移動空間の側面から空気が漏れないように、2枚の薄膜の側面にサイドプレートを取り付けた。図4に、青色の実線でサイドプレートの位置を示してある。上側サイドプレートは透明なアクリル製として、薄膜の振動が観察できるようにした。一方、下側にはアルミニウム製のサイドプレートが設置されている。また出口に風を集めるためのロートを設置した。送風量は、ロートの先1点に設置した熱線型流量計（Honeywell製AWM5104）で計測した。

薄膜の設置位置の設計法についてまとめる。2・2・2項で述べた条件3、4より、設置位置は以下のように決定できる。今回用いた薄膜の長さは84mmであり、この長手方向の横振動3次モードは、長手方向に1.5波長分の正弦波状の固有モード形である。この波長 λ_3 は56mmと計算できることから、図5に示すように、2枚の薄膜間

の x 方向のシフト量は、波長の 4 分の 1 の 14mm とした。送風実験の際の振動振幅 A を簡単のために 1.0mm とするならば、図 5 に示すように、2 枚の薄膜は y 方向に 1.0mm だけシフトさせて設置すればよい。以上のように薄膜を設置することで、薄膜の間に接触点が形成され、移動空間が生成される。

Fig. 4 Experimental equipment

Fig. 5 Rubber sheets and the Aluminum pedestals

3・2 駆動力の与え方

はじめに、ボイスコイルモータに流れる電流と、薄膜の振動変位の間の周波数応答関数 G を求める。ボイスコイルモータ内の電流に推力定数を掛けると、このボイスコイルモータの発生力がわかることから、この周波数応答関数 G は加振力と応答の関係を表す。周波数応答関数 G は直接計測することが困難であったため、入力電流からコの字台座の変位までの周波数応答関数である G_1 と、コの字台座の変位から薄膜の振動変位までの周波数応答関数である G_2 を計測し、それらを積算することにより G を求めた。 G_1 は、アクチュエータへの入力電流を電流計で、変位をレーザー変位計で計測して求めた。 G_2 は、薄膜の振動変位とコの字台座の振動をそれぞれ高速度カメラで撮影し、その画像解析による変位の計測から求めた。図 6 に得られた周波数応答関数 G を示す。図 6 (a) が薄膜 1、図 6 (b) が薄膜 2 に対応し、薄膜の 3 次固有振動数の近傍だけを表示している。図 6 より、薄膜 1、2 の共振周波数は、それぞれ 94Hz および 97Hz 付近にあり、差が生じていることがわかる。また、シリコンゴムシート製の薄膜を利用していることもあり、共振峰の低さや、位相変化のなだらかさに示されるように、比較的減衰が大きいことがわかる。

駆動条件を決定する．アクチュエータの駆動周波数を薄膜 1, 2 の固有振動数から数ヘルツずらした 99Hz とした．固有振動数から外した理由は，温度雰囲気などによって固有振動数が変化した場合にも安定した駆動を維持させるためである．固有振動数に一致させた加振では，わずかに固有振動数が変化しただけで，応答の振幅と位相が急激に変化してしまい，安定した駆動とならない．また，薄膜 1, 2 の固有振動数が異なるために，単一周波数での加振では，両方の薄膜に同時に共振状態を形成できないことも，駆動周波数を固有振動数から外した理由の一つである．99Hz における周波数応答関数 G の大きさは，薄膜 1, 2 でそれぞれ約 0.48mm/A，約 0.58mm/A あり，入力電流に対する位相遅れは薄膜 1, 2 共に約 -110° である．そこで，同じ加振力を与えるのではなく，アクチュエータへの指令電圧の振幅と位相を調整することで，薄膜 1, 2 上に同振幅 1.0mm の正弦波状固有モード形の振動を位相差が 90° で励起させた．

Fig. 6 Frequency response functions from a current of VCM to amplitude of vibrating sheets

3・3 正弦波状固有モード形の生成確認

送風装置を駆動した際に，薄膜に励起される振動変位が正弦波状の 3 次固有モード形となっていることを検証する．本実験では変位振幅の目標値を 0.9mm とした．まず図 7 (a) に示すように，正弦波状の 3 次固有モード形の波長 λ に対して，2 分の 1 波長の区間内の 4 点 $x=\lambda/8, \lambda/4, 3\lambda/8, \lambda/2$ （それぞれ Point 1 から 4 と呼ぶ）における変位を高速度カメラ（Photoron 製 FASTCAM SA3 120K-M2）で撮影した．この動画を，Photoron 製 TEMA Lite で画像解析して 4 点での変位を求め，3 次固有モードの理論値と比較する．撮影条件は撮影速度 3000fps，解像度 1024×128 である．99Hz での加振応答を解析することから，1 周期あたり 30 回の画像取得を満たすように撮影条件を設定した．図 7 (b) に画像解析で求めた Point 1 から 4 の変位を示す．図中の一点鎖線は各位置における振幅の理論値を示している．図 7 (b) から，3 次モードの腹にあたる Point 2 で最も振幅が大きく，目標値 0.9mm とほぼ等しい変位が発生していることがわかる．また，Point 1, Point 3 も理論値 0.64mm とほぼ等しいことや，3 次モードの節にあたる Point 4 では変位が非常に小さいことが確認できる．

続いて 3 次固有モードのすべての腹の位置における振幅の実測値と目標値との比較を行った．図 8 (a) に 3 つの腹の位置を示し，図 8 (b) に比較結果を示す．Point 1～3 は振幅 0.9mm であるべき腹の位置であり，実測値と目標値はほぼ等しいことがわかる．また，図 8 (a) の Point 4 は台座中央の振動を計測する位置を示す．図 8 (b) に示すように Point 4 の両振幅は 0.18mm であり，薄膜の片振幅 0.9mm と比較して 10 分の 1 の片振幅 0.09mm で振動している．駆動周波数 99Hz におけるコの字台座は十分に剛とみなせ，コの字台座の振幅は薄膜の固定端の振幅と等しいと考えられる．第 2 章で説明した送風原理では，薄膜固定端は振動しないとして式展開を行った．しかし，図 8 (b) の Point 4 の計測結果に示すように，今回の実験装置ではコの字台座を強制振動させているため，薄膜両端は振動している．ただし，その振幅は薄膜の振幅に対して 10 分の 1 と小さく，第 2 章で説明した送風原理とほぼ等しい状態で送風できると考えられる．以上，図 7, 図 8 より，製作した送風装置において，正弦波状の固有モード形をほぼ生成でき，送風原理に基づいた送風が実現できる状態にあることを確認できた．

Fig. 7 Comparison between measured displacements and theoretical ones (first half wavelength region)

Fig. 8 Comparison between measured displacements and theoretical ones (comparison of amplitude of antinodes)

3・4 薄膜の振幅と位相差

3・2節に示した条件で駆動した際に、変位振幅が1.0mmとなり、薄膜2の位相が薄膜1に比べて90°だけ進んでいることを確認する。図9(a)に示すように、2枚の薄膜それぞれについて、3次モードの中央の腹の変位を高速カメラで撮影した画像から求めた。図9(b)に求めた結果を示す。図より、各薄膜の変位振幅は1.0mmとほぼ等しく、所望の振幅を得られている。また、薄膜2の方が薄膜1よりも、約2.5msだけ進んだ正弦波となっている。加振周波数が99Hzであることから、振動の周期は約10msであるのに対して、その4分の1周期である90°だけ薄膜2の位相が進んでいる。以上より、所望の振幅と位相差を実現できていることが確認できた。

(a) Measurement points

(b) Displacements at measurement points

Fig. 9 Displacements of two sheets after adjustment

4. 送風実験

前章で説明した送風装置により、送風できることを確認する。この検証では移動空間の移動速度、送風量の理論値と実測値の比較を行い、その差についても考察する。

4・1 移動速度の検証

2枚の薄膜によって生成される移動空間の移動速度を求める。図10に、高速度カメラで撮影した薄膜の挙動を時系列で上から順に並べた。2枚の薄膜の間には接触点が形成され、理論通りに左から右に移動している様子が確認できる。3・3節に示した通り、薄膜の実稼働モード形が完全に正弦波ではないことから、4～6msのあたりでは接触点が形成されておらず、完全に理論通りの駆動とはなっていないが、7ms以降は再び接触点が形成されている。図10に示した黄色の矢印は、目測で得た接触点の位置を結んで得た。この矢印より、約43mmの距離を、8msで移動していることがわかる。この結果より、本実験での移動速度は約5.4m/sと算出される。両端固定弦の3次モードを生成した場合の移動空間の速度の理論値は、式(15)より5.4m/sとなる。従って、移動空間の速度の実測値と理論値はほぼ等しく、理論と同様の駆動が実現できていることが確認できる。

Fig. 10 Observed traveling space between two standing waves

4・2 送風量の検証

本節では移動空間によって得られた送風量の確認を行う。前節と同様に、3次固有モード形を利用（加振周波数 99Hz）、変位振幅 1.0mm の条件で送風機を駆動した際の送風量を計測した。結果を図 11 中の赤実線に示す。平均送風量は 7.5ml/s、瞬間最大送風量は 41ml/s であった。平均送風量の理論値を式 (17) から求めると $V_f=83.1\text{ml/s}$ が得られる。これに対し、実測した平均送風量は不足しているが、送風は実現していることがわかる。また、送風量には脈動が見られる。これは移動空間を断続的に送り出すという本送風理論の特性により生じるものである。脈動の周期は約 0.01s であり、駆動周波数の周期 99.0Hz とほぼ一致することから、原理通りに送風できていることが確認された。

送風量の理論値と実測値に差が生じた原因として大きく以下のような理由が考えられる。まず、図 4 に示す上下のサイドプレートと薄膜の隙間から、送風中の空気の一部が漏れ出している可能性が挙げられる。また、3・1 節に示した通り、流量計測装置は、吐出口から出た空気をロートで捕集して流量計に送っているだけの簡易装置であるため、以下の 2 つの影響により、十分な精度で流量が計測されていない可能性も挙げられる。

Fig. 11 Measured airflow

- (1) 一般的な微小流量の計測でなされるような出口側の圧力調整がなされておらず、吐出された空気を流量計に引き込めていないことの影響
- (2) 吐出口と流量計の間の密封が不十分であり、流量計に達するまでに、一部の空気が拡散してしまったことの影響

これら以外には、第3・3節に示した通り、コの字台座に強制変位を与えている関係で、2枚の薄膜間にわずかな隙間が生じてしまい、厳密に閉じた搬送空間が生成されなかった可能性も考えられる。今後の研究では、上記の点に留意して、送風中の空気の漏れ出しを抑えるための機械設計・製作技術を高めると共に、微小な送風量を正確に計測するための技術についても検討を行う予定である。

5. 結 言

従来にない薄型で直方体状の送風機を実現するため、新たな原理に基づく送風機を提案し、その実現可能性を検証した。以下に、得られた知見をまとめる。

- (1) 2枚の対向する平板上に、その共振現象を利用することで正弦波状の定在波を発生させた際に、その隙間に生成される進行波状の移動空間による送風原理を提案した。
- (2) この原理を実現するため、張力を主な復元力とする2枚の対向薄膜上に3次固有モードの定在波を励起することにより、対向面の隙間には進行波状の移動空間が生成されることや、この移動空間で空気を搬送することにより、送風が可能であることを実験で確認した。
- (3) 送風を実現するための、機械設計上の必要条件、および本装置を励起するための必要条件を整理した。

謝 辞

本研究は、科学技術振興機構（JST）の平成24年度研究成果最適展開支援プログラム（A-STEP）課題番号AS242Z02914Kにより助成を受けたものです。ここに記して謝意を表します。

文 献

- (1) Ju, H.Y., Jae, I.H. and Wenwn, C., “Piezoelectric Ceramic Bimorph Copled to Thin Metal Plate as Cooling Fan for Electronic Devices”, *Sensors and Actuators A*, Vol. 79, (2000), pp. 8-12.
- (2) Chung, H., Kummari, K.L., Croucher, S.J., Lawson, N.J., Guo, S., and Huang, Z., “Coupled Piezoelectric Fans with Two Degree of Freedom Motion for the Application of Flapping Wing Micro Aerial Vehicles”, *Sensors and Actuators A*, Vol. 147, (2008), pp. 607-612.
- (3) Nishibe, K., Fujita, Y., Sato, K., Yokota, K. and Koso, T., “Experimental and Numerical Study on the Flow Characteristics of Synthetic Jets”, *Journal of Fluid Science and Technology*, Vol. 6, No. 4 (2011), pp. 425-436.
- (4) 増淵寿, 秋山光庸, 杉山均, “振動する弾性平板によって誘起される噴流状流れの特性”, 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 68, No. 665 (2002), pp. 22-29.
- (5) 松村雄一, 岩本久和, 共振駆動による進行波ポンプ, 進行波搬送装置, 日本国特開 2010-196660.
- (6) 鈴木孝明, 泰秀敏, 新宅博文, 神野伊策, 小寺秀俊, “圧電アクチュエータを用いた進行波形バルブレスマイクロポンプの開発”, 日本 AEM 学会誌, Vol. 13, No. 4 (2005), pp. 310-315.