7 二次元シート状空気噴流による 閉管内気柱励振

川橋正昭[○]、鈴木 九 (埼玉大・工)

千葉裕司 (キャノン)、諏訪 透 (川崎重工)

EXCITATION OF AIR COLUMN IN A CLOSED TUBE BY TWO-DIMENSIONAL JETS

MASAAKI KAWAHASHI*, MAKOTO SUZUKI*,
YUJI CHIBA** AND TOHRU SUWA***

The air column in the organ pipe is excited in acoustic oscillations by two-dimensional jets issuing from the flue slit. The large amplitude oscillations of the air column in the Hartmann generator or the Hartmann-Sprenger tube is also produced by air jets issuing from a cylindrical nozzle. The jet-drive mechanism of these oscillations has been investigated by many authors, and now we have reasonable explains for the fundamental mechanism of excitation. However, there is no complete explain on the mechanism of the change of oscillation modes or the transition of linear to non-linear oscillations caused by increasing of jet speed. The visualization results of two-dimensional jets driving the air column in the closed tube obtained in the present paper give useful informations for the analysis on the mechanism of the transition of linear to non-linear oscillations.

1. まえがき

パイプオルガンやフルートなど、空気噴流によって励振される楽器の発音メカニズムについては古くから興味をもたれていたが、その理論的研究の基礎は、H. von Helmholtzや Lord Rayleigh に始まる。その後1960年代後半になって実験的検証を伴った解析が行われるようになり、現在に至るまで多くの研究報告がある^{(1)~(4)}。またそれに類似の現象として、高速噴流で励振された閉管内気柱が大振幅で振動し、その結果大出力音波を放射するハルトマン振動子や、熱効果現象を合わせ伴う Hartmann-Sprenger (HS) チューブの励振メカニズムについても調べられている⁽⁵⁾。これらの研究によって、それぞれの基本的な管内気柱励振メカニズムについては、ある程度明らかにされているが、噴流速度の増加による振動モードのシフトや線形現象から非線形現象への移行過程、さらに非線形振動維持のメカニズムなどについて十分な説明はない。また現象の可視化例もほとんど見られない。

本研究ではこれらの問題点を明らかにする糸口を求めるため、一端を閉じた管内の気柱が、二次元ノズル(スリット)から流出するシート状空気噴流によって励振さるときの励振噴流を可視化して観測し、管開口端付近および管内の圧力変動との関係を調べることを目的とする。本報告では先ず比較的ノズル入口圧力が高い場合の噴流の可視化例を示す。

2. 実験装置

本実験に用いた装置の概略図が図1に示されている。装置の各部の名称はパイプオルガンの例にならってつけられている。現象は下層と上層の間隔(カットアップ)や上層の底

* Faculty of Engineering, Saitama University, Urawa, Saitama, Japan.

** Research Institute, Canon Co., Ltd., Atsugi, Kanagawa, Japan.

*** Kawasaki Heavy Industry Co., Ltd., Koutoh-ku, Tokyo, Japan.

面からの高さなどによって変化するが、本実験では各部の寸法を以下のように固定する。すなわちスリット隙間1mm, 幅10mm, 下唇および上唇の底面からの高さ6mm, マウス開口部の長さ(カットアップ)10mm, 幅10mm, 管部の長さ80mm, 断面形状6mm×10mmである。なお側壁には噴流の可視化のために光学ガラスを用いた観測窓が設けられており、マウス部(舌から7mm)および管内閉端部付近(閉端手前3mm)に圧力測定孔が設けられている。噴流の可視化はシュリーレン法で行い、パルス発光光源(発光時間約6 μ s)を用いて写真撮影する。マウス部および管内の変動圧力は半導体圧力変換器により測定され、発音周波数はコンデンサーマイクロホンおよび周波数分析器により測定される。なお変動圧力は光源の発光パルスに同期して測定・記録され、圧力履歴と噴流の動きとの関係が調べられる。

3. 実験結果

パイプオルガンにおける吹奏圧(スリット入口ゲージ圧力: p 、以下単に入口圧力)は通常0.5~1kPa(約50~100mmHg)であるが、本実験に用いた装置の幾何形状(特にカットアップ値およびスリット中心高さに対する上唇高さの関係など)は高入口圧力向きであり、入口圧力1kPa以下では現象が不安定になる。本報告では入口圧力範囲を1~80kPa(約7mmHg~600mmHg)としたときの実験結果を示す。

スリットからのシート状噴流による管内気柱の励振メカニズムの解析では、噴流をどのようにモデル化するかおよび噴流の安定性の問題、また噴流と上唇がマウス部圧力変動とどのような位相関係のもとで干渉するかなどが基本的問題となる。スリットから流出した噴流の拡散・減速の厳密なモデルを考慮することは困難なため、通常はその厚さを変えずに管内圧力変動に応じて揺動する噴流のモデルが用いられる。噴流の安定性の問題は粘性を無視したLord Rayleighの解析⁽⁶⁾およびH. SatoのOrr-Sommerfeld方程式による解析⁽⁷⁾などがあり、それらがオルガン管発音メカニズムの解析に拡張して適用されている。また噴流の管内流入と管内圧力変動との位相関係についてはH. von HelmholtzとLord Rayleighの説明に相違点があり、それぞれの説明と実際の現象との関係が励振条件や管の形状について検討されその妥当性が調べられている。しかし本実験条件範囲での現象に対する解析例はみあたらない。そこで本実験では、図1に示されるような装置での基本的現象を調べ今後の解析のための基礎データを得る。

はじめに、入口圧力に対する発音周波数および変動圧力振幅、波形の変化を調べる。入

Fig.1 Schematic view of experimental apparatus

Fig.2 Frequency of sound.

口圧力による発音周波数の変化が図2に示されている。入口圧力約1kPa付近での発音周波数はオルガン管の固有振動数を求める式から得られる値にほぼ等しいが、圧力の増加と共に急激に高くなり、10kPa 付近で一たん下がった後再びゆるやかに上昇して30kPa 付近でほぼ一定となる。このような入口圧力に対する発音周波数変化に対応してマウス部および管内の変動波形が特徴的に変化する。そこで入口圧力によるマウス部および管閉端付近の変動圧力振幅および圧力波形の変化を示す。入口圧力による変動圧力振幅の変化が図3に示されている。入口圧力の増加と共にマウス部の変動圧力振幅は線形的に増加するが、管内閉端付近での振幅は入口圧力20kPa 以上になるとその増加率が減少する。変動圧力波形の実測結果は、以下のとおりである。入口圧力1kPa以下のとき現象は安定ではないがマウス部及び管内閉端付近の圧力波形は共に正弦波状に近い。入口圧力が増加しても閉端付近の変動圧力波形はほぼ正弦波状であるがマウス部の波形は著しく変化する。そこでマウス部変動圧力波形の例を図4に示す。図4(a)は入口圧力1~10kPa の範囲での特徴的な波形を示し、(b)は入口圧力10kPa 付近、すなわち発音周波数がいったん下がる部分での圧力波形、さらに(c)は入口圧力10kPa 以上での特徴的な波形を示す。入口圧力1kPa 以上での安定した気柱振動状態ではマウス部の圧力波形にはレベルの高い三次高調波成分が顕著に現れ、入口圧力に応じその形を変えていく。また入口圧力30kPa 以上では管内閉端付近の圧力波形に急しゅんな立ち上がりがみられるようになり、マウス部の圧力波形に高い周波数成分が重畳する。

Fig.3 Amplitude of pressure.

Fig.4 Pressure histories at mouth.

つぎに励振噴流状態の、気柱振動一周期にわたっての変化をマウス部変動圧力と同期して撮影した可視化写真によって調べ、図5に示す。図5(a)~(c)はそれぞれ入口圧力が約8kPa, 36kPa および80kPa での可視化写真である。図5(a)についてはマウス部圧力履歴と噴流状態の関係を示す。入口圧力が低い場合の比較的単純な噴流の動きに対して、入口圧力の増加とともに噴流は上唇のエッジと複雑に干渉し、とくに入口圧力が80kPa の場合には顕著な渦形成がみられる。図2に示されている発音周波数の単調でない変化は、噴流と上唇との干渉のしかたの変化にともなうマウス部での境界条件の変化と考えられる。噴流はマウス部圧力がほぼ極小になったとき管内に入り込み始めることがわかるが、その動きのマウス部圧力変動との関係はオルガン管の発音メカニズム解析のモデルと

Fig.5 Instantaneous photographs of wafting jets.

比較して単純ではない。

4. あとがき

管内気柱が二次元シート状噴流により励振されて生じる発音現象では、いまだに十分説明されていない部分がある。そこで改めて現象を実験的に詳細に調べるための手始めに、管内気柱振動時の噴流を可視化して観測した。その結果今後の解析に有用なデータが得られたが、さらに装置の幾何形状や励振条件などの影響についても調べていく必要がある。

おわりに、本実験に協力された本学学生毛利菊男、中野正章の両君に謝意を表します。

(参考文献)

- 1) J.W.Coltman, "Sounding Mechanism of the Flute and Organ Pipe.", J.Acoust.Soc.Amer., 44-4(1968), 983.
- 2) S.A.Elder, "On the mechanism of sound production in organ pipes.", J.Acoust.Soc.Amer., 54-6(1973), 1554.
- 3) N.H.Fletcher, "Jet-drive mechanism on organ pipes.", J.Acoust.Soc.Amer., 60-2(1976), 481.
- 4) S.Yoshikawa and J.Saneyoshi, "Feedback excitation mechanism in organ pipes.", J.Acoust.Soc.Jpn., 1-3(1981), 175.
- 5) M.Kawahashi and M.Suzuki, "Generative Mechanism of Air Column Oscillations in a Hartmann-Sprenger Tube Excited by an Air Jet Issuing from a Convergent Nozzle.", Zeit.Angew.Math.Phys., 30(1979), 797.
- 6) Lord Rayleigh, Theory of Sound (Dover, New York, 1945), Vol.2, Chapt.21.
- 7) H.Sato, "The stability and transition of a two-dimensional jet.", J.Fluid Mech., 7-1(1960), 53.