A209

尺八演奏時の呼気流れのダイナミックPIV計測

染矢 聡[○](東大), [○]岡本 孝司(東大), 飯田 将雄(こうなん技術サービス)

DPIV Measurement on sound vibration in Japanese bamboo flute

Satoshi SOMEYA, Koji OKAMOTO and Masao IIDA

ABSTRACT

Any wind instrument can sound due to the vibration of the air, expiration flow inside of the wind instrument. In case of a trumpet or a clarinet, a mouth or a reed helps to sound variable tones. In case of a flute, there is no mechanical vibration. We would like to investigate more detail about the flow and the vibration with sound inside or outside of the flute, in order to understand the mechanism of the wind instrument and to aid in the manufacture of the good instrument. In this report, a Japanese traditional bamboo flute was used in the experiment. The dynamic PIV technique was applied to measure the vibration. 2 kinds of experiments were done. The Argon-gas flow with different tone inside/outside of the bamboo flute was measured using a high frequency pulse laser. Oil mist was used as the tracer particles. Then, we also tried to measure the flow in bamboo flute when a human player played, using a CW-laser and the water-mist as the tracers. We successfully measured that the periodical flow near a hole of the bamboo flute went out from and came into the flute at 200-500Hz dependent on the tone.

Keywords: Water, Ethanol, Micro-channel

1. 緒 論

非電子楽器の音は数百ヘルツ以上の空気の振動とみなすことができる。楽器のチューニングなどのため、音そのものの点計測は当たり前に行われている。また、音の出る仕組みについても LDV などの点計測器を用いた実験や簡潔な数値シミュレーション、理論的な考察に基づいた研究が行われてきた。楽器の音が出る基本的な仕組み自体については多くの研究例があるが、一方で、楽器から出る音のわずかな違いについての詳細な検討例はあまりない。周波数が数百ヘルツと速いことから、今まで気柱振動の測定に適用可能な計測機器が限られ、PIV などの多次元計測を有効に活用する機会が少なかったことも、検討例が少ない理由の一つと考えられる。本研究では、日本の伝統楽器の一つである尺八を例に、ダイナミック PIV を適用することによって、楽器内外の高周波数気柱振動を測定し、楽器の音がでる仕組みを明らかにする。

2. 実験および考察

2.1 尺八の音がでる仕組み

気流の振動現象として、エッジトーン現象がよく知られている。これは狭いスリットから出た平面的な空気ジェットが、平面的でシャープなエッジに当たると、そのエ

ッジの上下どちらか一方に蛇行しながら振動する現象である。参考として Fig.1 にエッジトーンの仕組み(下)と共鳴器エッジトーン概念図を示した。エッジの両側での圧力変動が Jet の根元部にフィードバックされて Jet が周期的に振動し、このとき形成される渦がエッジ上下に分断されて発生する音がエッジトーンである。エッジトーンの周波数はスリットからエッジまでの距離や風速に依存し、通常はほとんど聴こえない高い音になる。

フルート(尺八)の音が出る仕組みは 1950 年代後半ごろから研究が続けられ、一般的に「共鳴器付きエッジトーン」であると考えられている。尺八という竹筒の共鳴器がつくと、気柱振動の振動数はエッジトーンの周波数と無関係に共鳴器の振動数になり、気柱振動=音は、あくまでも尺八本体の個性によって決まる。エッジトーン、つまり、スリットから出る Jet とエッジの相互作用によって発生する渦の役目は、1)音が生じるきっかけとなる振動を与えること、2)音を持続させるための渦を共鳴器(尺八)の周波数に合わせながら提供すること、3)そして異なる音域にシフトさせることの3つである。尺八は筒の両端が開放されているため、空気の振動がエッジの部分で腹になり、5つの孔を押さえて気柱の長さ=音を変えられることができる。更に息の速さやエッジまでの距離、つまりエッジの部分での渦の状態を変え、振動の腹の状態を変化させ、音量、音色や音階を変えることができる。

Fig.1 Mechanism of the sound of flute

Fig.2 Visualized images in the rectangular bamboo flute. (left: a human player sounded the flute. Water mist and CW-laser were used. right: Oil mist and pulse-lasers were used and the Ar⁺ gas was substituted for the human breath.)

Fig.3 Example of visualized flow field.

Fig.4 Example of measured velocity fluctuation.

2.2 実験

実験では透明アクリル製の矩形容器に吹き込み口や孔をあけた簡単な笛モデルを用いた。防護メガネをかけた2名の尺八師範にこの笛モデルを吹いてもらい、横側から吹き込み口近くに向けて、加湿器で作成した水ミストを送り込む。このときのミスト流れをCWレーザーと高速カメラ(フォトリソ製 FASTCAM APX-RS)を用いて撮影した。シート光は厚さ 1mm 以下で、十分注意しながら口元に照射した。また、実験ではミスト濃度を上げることが困難で、尺八内部での気柱振動の様子を詳細に調べることが困難であった。そのためラスキンノズルで作成したオイルミストとアルゴンガス、高周波ダブルパルスレーザーを用いて管内の気柱振動の様子も測定した。可視化写真の例をそれぞれ Fig.2 に示した。

2.3 実験結果

まず、師範による演奏時の映像から、楽器内に吹き込まれる Jet が鹿おどしのような非正弦波的な振動をしている様子が明らかとなった。これは単なる共鳴器つきエッジトーンに限定しないメカニズムで Jet と尺八が共鳴している可能性を示しており、呼吸の乱れや揺らぎを取り除いたガスボンベからのガス流れを用いて再検討する必要がある。

次に、通常、右手親指で開閉する吹き込み口に最も近い孔(第1孔)の周囲での気流の様子を調べた。全ての孔を開放した状態で実験を行い、そのときの音の周波数は約 650Hz、実験の測定周波数は 5kHz とした。その結果、この孔からガスが流出することはほとんどなく、尺八内部に気柱振動の腹を作るように、この孔を通じてガスが周期的に出入りすることが明らかになった。このときの速度分布測定例を Fig.3 に示した。また、下流側と孔の外側の適当な点における速度の時系列データを Fig.4 に示した。ここには示していないが、吹き込み口(上流側)からのガス流速は比較的速く、最大 3m/s 程度であった。しかし、この場合も Fig.4 に示した下流側でのガス流速と平均流速はほぼ等しく、1m/s であった。また、この孔の周辺での平均速度がほぼ 0m/s であることもわかる。つまり、管内のガスは約 1m/s で下流に流れ、第1孔からはほとんどガスの流出がないといえる。また、管内流は正弦波的な振動をしていること、この孔の上流と下流では、その振動振幅が大きくことなり、この孔の位置で大きくダンピングしていることがわかった。

3. 結論

ダイナミック PIV を用いて、可視化実験用の尺八内でのガス流れを測定した。機械装置だけではなく、演奏家の協力も得て、実際の演奏時の空気の流れを明らかにできた。また、楽器内部の気流の様子を高周波で多次元計測することにより、気流振動の挙動を明らかにした。