



平成31年度研究助成 【サウンド技術振興部門】より

## 管楽器の大規模流体音響解析

九州工業大学 大学院情報工学研究院

高橋 公也

### 1. 管楽器のモデルとその問題点

この小論では、管楽器の発音機構の解明に圧縮流体のシミュレーションを用いた流体音響解析がなぜ必要かについて考察する。管楽器の管体の主要部分は、直径が2 cm以下の細い管の場合が多い<sup>1)</sup>。音波の波長が直径よりもある程度以上長い場合は、音波は管の軸方向に伝搬する1次元的な波動になり、音楽に使われる音波の周波数帯の多くはこの条件を満たす。唄口から送り込まれた音波は、開口端や音孔において、一部は演奏音として放射されるが、大部分は反射して唄口に戻ってくる。クラリネットのような円筒管体の楽器で音孔を全て閉じた状態では、反射波が戻ってくる時間は、管長の2倍を音速で割ったものになる。開いた音孔がある場合は、荒っぽく言えば、音孔までの距離の2倍を音速で割った時間で戻ってくる波が付け加わる。したがって、唄口から見ると、管体は遅延フィードバックを作り

出す線形素子のように見える。

このような考察から、McIntyreらは、管楽器は図1に示すように遅延方程式としてモデル化できることを示した<sup>2)</sup>。管体を作り出す遅延フィードバックは、反射関数と呼ばれる応答関数によって特徴づけられる。唄口では口（またはノズル）から流入した空気流が音波に変換され、それが管体を駆動する。この部分は非線形振動子としてモデル化される<sup>3)</sup>。口腔（オルガンの場合はフット）の吹鳴圧を上昇させると、振動のない状態から分岐現象により振動状態に遷移し、楽器の発振が始まる<sup>3)</sup>。したがって、楽器の発音機構は遅延方程式モデルでうまく説明できているように見える。しかし、唄口において流入する空気流がどのようにして音波に変換されるかについては、ある種の仮定のもとに計算しているに過ぎない。リード木管楽器や金管楽器のモデルでは、体積流量（流速×断面積）の保存則を用いて唄口内で広がった体積流がすべて音響的な粒子速度に変換されるとしている

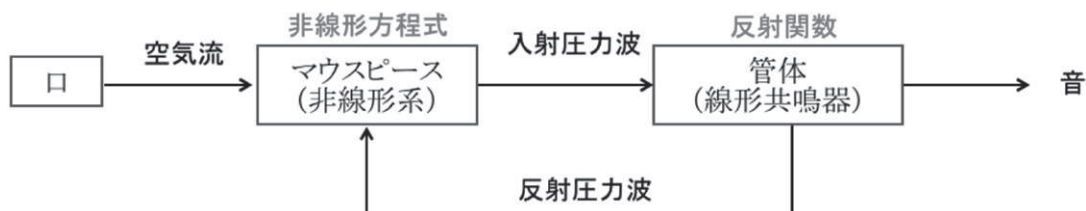


図1 管楽器の遅延方程式モデルの概念図

<sup>1), 3)</sup>。エアジェット楽器（エアリード楽器）では、体積流量の保存や運動量と力積の関係を使い、振動するジェットの音響的インピーダンスを求める<sup>1)</sup>。このような計算のもとでは、流体がどの場所で、どの様に、どの程度、音に変換され、それが発音機構にどのような影響を与えるかを議論することができない。特に、エアジェット楽器の発音機構の解析では、この問題は重要である<sup>1)</sup>。

## 2. 流体音と流体音響解析

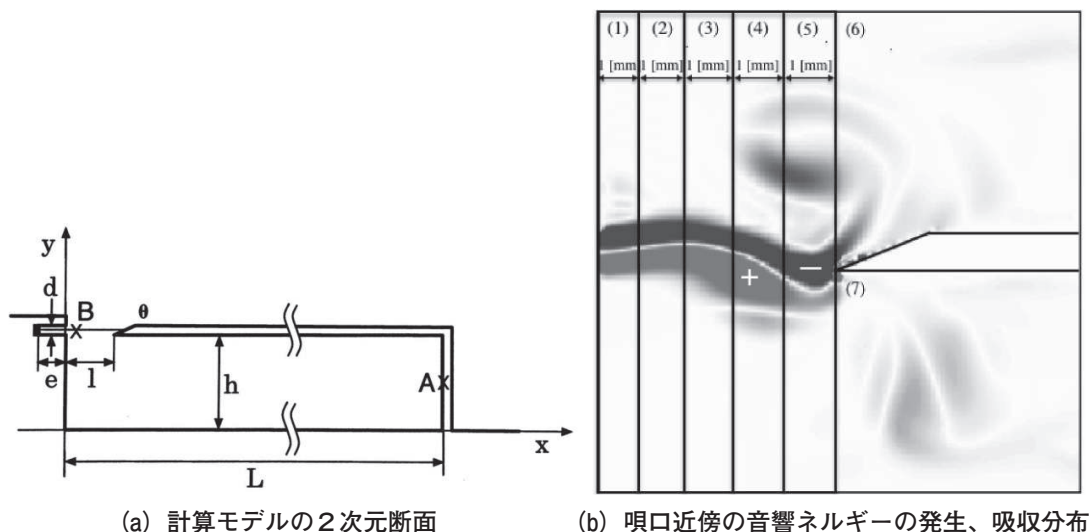
非定常な流体運動から発生する音を流体音（空力音）と呼び、その基礎方程式は、1950年代にLighthillによって提唱された音響的類推理論によって非同次波動方程式の形にまとめられた<sup>4), 5)</sup>。Lighthillの方程式の右辺の非同次項が音源項になるが、それを求めるには、圧縮流体の支配方程式を解く必要がある。さらに、Lighthillの音源項は複雑な4重極音源でその解釈は簡単ではない。そこで、非圧縮流体の支配方程式を数値的に解き、流体音の発生過程を近似的に再現する方法がとられるが精度は落ちる。楽器の研究では、圧縮流体を直接解き、流体と音波を同時に再現される方法がとられる<sup>6)-14)</sup>。

流体の運動を最も正確に数値的に解く方法としてDirect Numerical Simulation (DNS) があるが、圧縮流体の3次元計算でこれを実行

するのは現状では不可能である<sup>15)</sup>。空気の流れは0.1mm以下のものがあり、それを再現するには $\mu\text{m}$ オーダーの精度のメッシュが必要となり、メッシュの総数は兆を超える。また、音波を正確に再現するには10万Hz程度まで考える必要があり、そのためには $10^{-8}\text{s}$ の程度の時間刻みが必要である。このような計算は現在のスーパーコンピュータでは不可能である。そこで、Large Eddy Simulation (LES)、Lattice Boltzmann Method (LBM)、人工粘性を取り込んだDNS等の多少粗いメッシュを用いる近似的な計算が使われる<sup>6)-14)</sup>。しかし、十分な精度を得るためには、0.1mm程度の精度のメッシュが必要であり、メッシュの総数は数億を超え必然的にスーパーコンピュータを用いた大規模な並列計算が必要となる。以下、その例を紹介する。

## 3. 流体音響解析の実例

管楽器の流体音響解析は、90年代のSkordosによるLBMを用いたフルーオルガンパイプの解析と、これを受け継いだKühneltの研究に端を発する<sup>6), 7)</sup>。その後の計算機の発展と解析コードの改良により、過去15年の間に、フルーオルガンパイプ、リコーダー、オカリナ等のエアジェットの楽器の解析、シングルリード木管楽器のマウスピース内の流体場音場の解析、音孔の開閉に伴う流体場音場の再現等が行われてい



(a) 計算モデルの2次元断面

(b) 噴口近傍の音響エネルギーの発生、吸収分布

図2 Howeのエネルギー推論の数値計算

表1 音響エネルギーの発生率 [mW/m]

領域	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	合計
平均発生率	-30.61	-22.03	26.39	81.38	40.35	-17.52	2.02	79.98

る<sup>8)-14)</sup>。ここでは、その一例として、Howeのエネルギー推論を用いた小型オルガンパイプの噴口近傍の音響エネルギーの発生と吸収の数値的評価の研究を紹介する<sup>9),16)</sup>。Howeのエネルギー推論は近似的な手法であるが、定量的な評価が比較的容易に行える点に利点がある<sup>5)</sup>。

図2(a)に、解析に用いた管長9cmの小型オルガンパイプモデルの断面図を示す。これに奥行き方向に1cmの厚みをつけた擬似3次元モデルである。解析には、圧縮性LESと音響ソルバーFDTDを用いた。音響ソルバーを用いるのは、Howeのエネルギー推論では、流体場から切り離された音場のデータが必要だからである。図2(b)に、ある時刻の噴口近傍での音響エネルギー発生、吸収分布を示す。+の符号で示した部分で音波の発生が起き、-の符号の部分で音波の吸収が起きている。ジェットの変動と管内の共鳴音場の変化により、この分布

は複雑に変化する。そこで、図に示す各領域での空間平均を取り、さらにその時間平均を取ったものを表1に示す。エッジに近いジェットの後流部分で音響エネルギーが発生していることがわかる。ジェットの上流で吸収される音響エネルギーは、共鳴音場がジェットの変動を同期させるために使われていると推測される。これらの結果は、吉川らの実験結果とHoweの理論予測と良い一致を示す<sup>5),17)</sup>。

#### 4. まとめ

この小論では、管楽器の発音機構の解明に圧縮流体のシミュレーションを用いた流体音響解析がなぜ必要かについて考察し、その実例を紹介した。管楽器の発音機構の解明に流体音響解析は欠かせないものであるが、現状では音源となる流体音の発生機構について十分に解析ができていない。計算機の発展、解析コード改良、

理論的な発展により、今後の発展が期待される研究テーマであると考えられる。

### 謝辞

本研究は、カワイサウンド技術・音楽振興財団の支援、JSPS科研費基盤(C)19K03655の支援、学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点および革新的ハイパフォーマンス・コンピューティング・インフラの支援（課題番号：jh190010-MDH）、東北大学流体科学研究所における公募共同研究の支援を受けて実施しました。心より感謝申し上げます。

### 参考文献

- 1) N. H. Fletcher and T. D. Rossing, *The Physics of Musical Instruments*, 2nd ed. (Springer-Verlag, New York, 1998).
- 2) M. E. McIntyre, R. T. Schumacher, and J. Woodhouse, "On the oscillations of musical instruments", *J. Acoust. Soc. Am.* **74**, 1325-1345 (1983).
- 3) A. Hirschberg, J. Kergomard, G. Weinreich (eds.), *Mechanics of Musical Instruments* (Springer-Verlag, Vienna and New York, 1995).
- 4) M. J. Lighthill, "On sound generated aerodynamically I. General theory", *Proc. R. Soc. Lond. A*, **A211**, 564-587 (1952).
- 5) M. S. Howe, *Acoustics of Fluid-Structure Interactions* (Cambridge University Press, Cambridge, 1998).
- 6) P.A. Skordos, "Modeling flue pipes: subsonic flow, lattice Boltzmann, and parallel Distributed computes", Ph. D. thesis, MIT (1995).
- 7) H. Kühnelt, "Simulating the mechanism of sound generation in flutes using the Lattice boltzmann method", *Proceedings of the Stockholm Music Acoustics Conference 2003, Stockholm*, (4pages).
- 8) M. Miyamoto, Y. Ito, T. Iwasaki, T. Akamura, K. Takahashi, T. Takami, T. Kobayashi, A. Nishida and M. Aoyagi, "Numerical study on acoustic oscillations of 2D and 3D flue organ pipe like instruments with compressible LES", *Acta Acust. united Ac.*, **99**, 154-171 (2013).
- 9) T. Kobayashi, T. Akamura, Y. Nagao, T. Iwasaki, K. Nakano, K. Takahashi and M. Aoyagi, "Interaction between compressible fluid and sound in a flue instrument", *Fluid Dyn. Res.*, **46**, 061411 (2014).
- 10) S. Tateishi, S. Iwagami, G. Tsutsumi, T. Kobayashi, T. Takami and K. Takahashi, "Role of the foot chamber in the sounding mechanism of a flue organ pipe",

- Acoust. Sci. & Tech., **40**, 29–39 (2019).
- 11) N. Giordano, “Direct numerical simulation of a recorder”, *J. Acoust. Soc. Am.*, **133**, 1111–1118 (2013).
  - 12) H. Yokoyama, A. Miki, H. Onitsuka and A. Iida, “Direct numerical simulation of fluid–acoustic interactions in a recorder with tone holes,” *J. Acoust. Soc. Am.*, **138**, 858–873 (2015).
  - 13) A. R. da Silva, G. P. Scavone, M. van Walstijn, “Numerical simulations of fluid–structure interactions in single-reed mouthpieces.” *J. Acoust. Soc. Am.*, **122**, 1798–1809 (2007).
  - 14) M. Kobayashi, H. Yokoyama, A. Iida, “Direct numerical simulation of flow and acoustic fields around woodwind instruments with reed oscillations”, INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings, InterNoise17, Hong Kong CHINA, 4554–4565 (2017).
  - 15) R. Komatsu, W. Iwakami, Y. Hattori, “Direct numerical simulation of aero-acoustic sound by volume penalization method”, *Computers and Fluids*, **130** 24–36 (2016).
  - 16) K. Takahashi, S. Iwagami, T. Kobayashi and T. Takami, “Theoretical estimation of the acoustic energy generation and absorption caused by jet oscillation,” *J. Phys. Soc. Jpn.*, **85**, 044402 (2016).
  - 17) S. Yoshikawa, H. Tashiro and Y. Sakamoto, “Experimental examination of vortex-sound generation in an organ pipe: A proposal of jet vortex-layer formation model,” *J. Sound Vib.*, **331**, 2558–2577 (2012).