令和５年度研究助成【サウンド技術振興部門】より

動作・姿勢がクラリネット発音に与える影響分析を実現する奏者生体ー楽器連成モデルの開発

愛媛大学大学院理工学研究科
准教授　松浦　一雄

（共同研究者、共同執筆者）
愛媛県立松山東高等学校３年生
永田　真悠

クラリネットを上手に操り観客に優雅な演奏を届けるためには、奏者は正しい姿勢で腹式呼吸して吹き、キーをスムーズに操作することが大切である。その発音機構を不変的な数式を用いてモデル化しシミュレーションにより直観的かつ定量的に提示できれば、クラリネットに対する理解や親しみが増すと同時に、この楽器を永遠に後世に伝える上でも貢献すると考えられる。往々にして他者と共有が難しい主観的な感覚や自分で直接見ることができない事象も法則に基づき説明することで、共有しやすい情報に繋がることも期待される。そこで我々は、姿勢変化も考慮した呼吸に基づく、クラリネット発音の数理モデリングとシミュレーションを、実際の演奏と照らし合わせながら研究している（図１）。

この問題に取り組むにあたり２つの方法論が考えられる。一つは、生体やクラリネットの詳細形状や動きを直接的には扱わず、全体的な積分量を主体にしてそれら物理量相互間の関係を議論するマクロモデルによるアプローチであり、他方は詳細形状や動きを直接的に扱うメソモデルによるアプローチである。マクロモデルは、機構の詳細はモデル定数として考慮し、機構の本質をなるべく簡潔な関係式で表す立場のモデルであり、メソモデルは物理的な忠実度合いを高めることで、そのモデルの適用性をより一般的に拡張する立場である。両者の立場を同時に推進することで、全体的な仕組みを良く説明できると期待される。本研究でも両モデルを構築する研究を実施している。

解析対象として姿勢変化をパラメータに含めたクラリネットおよび奏者の連成システムをイメージするのは自然であろうが、過去文献を調べてみると数理・シミュレーション解析によって解析した文献は、著者の知る限り極めて少ない。そのような中でも、文献１）や２）が我々の目的意識に近い。文献１）は、空気柱（唇やリードより上流側にある呼吸系や声道）、リードおよびクラリネットの３要素からなる時間領域シミュレーションモデルを開発した。奏者の空気柱をアナログ回路のアナロジーでモデルし口腔内圧を求めている。文献２）は、金管楽器奏者の姿勢が呼吸に与える影響を報告している。スパイロメトリーにより肺機能を調べた。筋電図と誘導プレチスモグラフィーを用いてさまざ

ま演奏中の筋活動と呼吸運動を報告している。

マクロモデルを構築する材料として、クラリネットや呼吸機構、声道それぞれでは、長きに亘り研究が報告されている[3)-12)]。例えば、クラリネットは1960年代以降音響学者によって詳しく研究されてきた[3)-6)]。中でも特にSchumacherは、リード振動、空気流入およびマウスピース内圧力を関係づけた発音機構に関する微積分方程式系を提案した[5),6)]。呼吸機構に関しては、肺胞部、胸膜腔、胸壁、横隔膜や気道の各圧力と体積を関係づける数理モデルが提案されている[7)-11)]。実験的な統計データではあるが、呼吸に対する姿勢の影響も報告がある[13)-16)]。Schumacher方程式と呼吸機構の方程式系を連立することにより、Schumacher方程式で外部入力変数となっている吹鳴圧力を他変数の仮定次第で自動的に値が決まる内部変数に変え得る。

一方、メソモデルの構築に関しては、CTやMRIの普及により、生体の詳細形状モデリングが進展している[17)-20)]。Image Registration Technique[21)]により動的な肺変形が規定され、有限要素モデリングが行われている。また数値流体力学予測では、渦運動に起因する空力自励音の直接シミュレーションによる周波数予測も成熟してきた。特に、著者は噴流速度約10m/sの低速域で、笛吹やかんの原理にもなっているホールトーンの卓越周波数の予測に世界で初めて成功した[22)]。共鳴体付きホールトーン[23)]やリングトーン[24)]の予測など、形状的に複雑な空間における予測も容易になりつつある。多少の計算コストは要求されるものの、圧縮性Navier-Stokes方程式に粗視化から必要とされる付加項を必要としない直接計算はSchumacher方程式で必要とされる音響インピーダンス、反射関数の必要性から解放されるなどメリットが大きい。目的とするメソモデリングを実現するデジタル技術環境は整って来ている。

数理モデリングとシミュレーションにより動作・姿勢がクラリネット発音に与える影響が解明され、これら知見を通して演奏がより身近になると同時に、クラリネットが作る広い音域に亘る優美で独特な音環境を聴衆が楽しめる機会が増えると期待される。統計的に、女性は胸式呼吸の機会が多く、男性に比べて肺活量がより少ないため、クラリネット演奏に不利と言われることもある。また、世界的にもプロの女性奏者が少ない。本研究は、女性にも優しい演奏法や楽器設計にも繋がる。SDGsにおける目標第５番ジェンダー平等にもかなう取り組みでもある。

最後に、本研究の遂行にあたり、東京藝術大学専門研究員の柳下柚子博士に木管楽器の演奏について様々情報提供頂いた。ここに記して謝意を表する。

(a) 良い姿勢　　(b) 悪い姿勢

図１　クラリネット演奏時の姿勢（提供：永田真悠）

引用文献

1）S.D. Sommerfeldt, W.J. Strong, Simulation of a Player-Clarinet System, J. Acoust. Soc. Am., 83(5), pp.1908 − 1918 (1988).

2）K. Price, P. Schartz, A.H. Watson, The Effect of Standing and Sitting Postures on Breathing in Brass Players, SpringerPlus, 3(210), pp.1 − 17 (2014).

3）N.H. Fletcher, T.D. Rossing, The Physics of Musical Instruments, Second Edition, Springer (1998).

4）A.H. Benade, Fundamentals of Musical Acoustics, Second, Revised Edition, Dover Publication, Inc., New York (1990).

5）T. Schumacher, Self-Sustained Oscillations of the Clarinet: An Integral Equation Approach, Acustica, 40(5), pp.298 − 308 (1978).

6）T. Schumacher, Ab Initio Calculations of the Oscillations of a Clarinet, Acustica, 48 (2), pp.71 − 85 (1981).

7）D.N. Ghista, K.M. Loh, M. Damodaran, Lung Ventilation Modeling and Assessment, Chapter 4, In Human Respiration: Anatomy and Physiology, Mathematical Modeling, Numerical Simulation and Applications, V. Kulish ed., pp.95 − 115 (2006).

8）A. Athanasiades, et al., Energy Analysis of a Nonlinear Model of the Normal Human Lung, J. Biological Systems, 8(2), pp.115 − 139 (2000).

9）R.K. Lambert, et al., A Computational Model for Expiratory Flow, J. Appl. Physiol. Respir. Environ. Exerc. Physiol., 52(1), pp.44 − 56 (1982).

10）R.K. Lambert, A New Computational Model for Expiratory Flow from Nonhomogeneous Human Lungs, Trans. ASME, J. Biomech. Eng., 111(3), pp.200 − 205 (1989).

11）R. Scott Harris, Pressure-Volume Curves of the Respiratory System, Respiratory Care, 50(1), pp.78 − 98 (2005).

12）J.L. Flanagan, Speech Analysis Synthesis and Perception, Second Expanded Edition, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg,

New York, 1972.

13) G.M. Barnas, et al., Effect of Posture on Lung and Regional Chest Wall Mechanics, Anesthesiology, 78(2), pp.251 – 259 (1993).

14) R. Sonpeayung, et al., Which Body Position is the Best for Chest Wall Motion in Healthy Adults? A Meta-Analysis, Respiratory Care, 63(11), pp.1439 – 1451 (2018).

15) K. Yugesh, S.S.Kumar, Effect of Peak Expiratory Flow Rate in Different Postures, Biomedicine, 33(3), pp.182 – 186 (2013).

16) S. Shah, P.H. Patil, Effect of Posture Correction and Moderate Intensity Exercises on Respiratory System in Teenagers, Int. J. Life Science and Pharma Research, 10 (4), pp.L41 – 45 (2020).

17) V. Sauret, et al., Study of the Three-Dimensional Geometry of the Central Conducting Airways in Man using Computed Tomographic (CT) Images, J. Anat., 200(2), pp.123 – 134 (2002).

18) A. Singh, et al., Modelling of Chest Wall Motion for Cardiorespiratory Activity for Radar-Based NCVS Systems, Sensors 2020, 20, 5094, pp.1 – 13 (2020).

19) M. Nakao, et al., Deformation Analysis of Surface and Bronchial Structures in Intraoperative Pneumothorax using Deformable Mesh Registration, Medical Image Analysis, 73, 102181, pp.1 – 11 (2021).

20) S. Neelakantan, et al., Computational Lung Modelling in Respiratory Medicine, J. R. Soc. Interface 19: 20220062.

21) S. Nag, Image Registration Techniques: A Survey, arXiv: 1712.07540, pp.1 – 10 (2017).

22) K. Matsuura, M. Nakano, A Throttling Mechanism Sustaining a Hole Tone Feedback System at Very Low Mach Numbers, J Fluid Mech, 710, pp.569 – 605 (2012).

23) K. Matsuura, M. Nakano, Experimental and Direct Computational Study on Flow-Acoustic Resonance of a Hole Tone System with a Tail Pipe, Proc. of ICFD2016, Sendai, Tohoku University, pp.1 – 2 (2016).

24) K. Matsuura, K. Mukai, M.A. Langthjem, Computational and Experimental Study on the Mechanism of Ring Tone, Int. J. Comp. Meth. and Exp. Meas., 11(1), pp.9 – 16 (2023).