

レーザスペckルを利用したリード振動計測の検討*

☆ 内川耕輔, 新美智也, 矢田部浩平 (農工大)

1 はじめに

サクソフォン等のシングルリード木管楽器において、演奏時のリード振動を計測することは、吹奏圧や口腔形状などの演奏条件の定量化に有効である。これにより、客観的指標に基づく練習支援等への展開が期待される。先行研究では、リードへのセンサ貼付による計測や人工口腔による模擬計測が行われてきた [1]。しかし、センサ貼付は振動に干渉し、人工口腔は口唇や口腔の拘束条件を演奏環境と同一に再現することが困難である。そのため、人の演奏時のリード振動の計測は難しい。そこで本稿では、レーザスペckルを用いたリード振動計測手法を提案する。リード表面に形成されるスペckルパターンを高速カメラで撮影し、画像相関により得られるパターンの変位のスペクトル解析から、リード振動に由来する周波数成分を推定する。本手法は、口元近傍でも簡易な光学配置で適用できることから、人の演奏時を対象とした非接触計測が期待できる。実験により、基本周波数および倍音成分の抽出可能性を確認した。

2 シングルリード木管楽器

リード木管楽器は、葦や合成樹脂等によって作られたリードの開閉により、気柱が振動して発音する。リードが1枚のものをシングルリード木管楽器と呼び、サクソフォンやクラリネットが該当する。図-1左にマウスピース周辺の構成を示す。リード振動はマウスピース内部の圧力変動により生じ、その周波数成分は楽器から鳴る音と一致する。先行研究では、歪みゲージをリードに貼付する方法 [1] で人の演奏時のリード振動計測が行われてきた。しかし、貼付センサは振動へ干渉してしまうため、非接触な計測手法が求められている。

3 スペckルを用いた物体振動の計測

レーザ光を物体の粗面に照射すると、スペckルパターンと呼ばれる不規則なパターンが観測される。これは、表面のそれぞれの点で散乱された光が、不規則な位相によって干渉することで生じる [2]。スペckルの強度分布や大きさの平均などの統計的性質は、光の波長が表面粗さに対して十分小さい場合、粗面の違いに強く依存しない一方、物体の変位や振動の

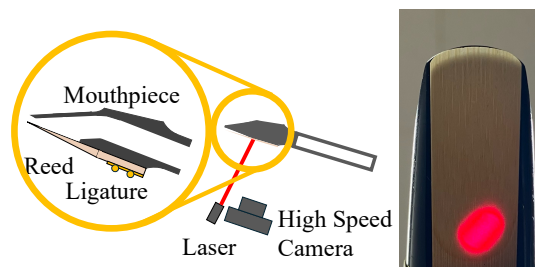


図-1 マウスピースの断面図と提案手法の模式図（左図）とレーザの照射範囲（右図）

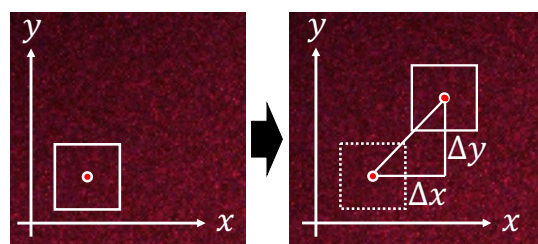


図-2 デジタル画像相関法の計算。スペckルパターンの変位前（左図）と変位後（右図）。基準に設定したパターンを白枠で囲った。

影響を強く受ける。物体の変位が微小で粗面構造が変化しないとき、照射方向および観測方向が固定であれば、スペckルパターンは形状を保持したまま、物体の変位方向や振動方向へ移動する [3]。このようなスペckル移動を定量化する代表的手法として、デジタル画像相関法（DIC）がある。

以下では、DICの基本手順を、図-2に示すスペckルの変位前後の画像に基づいて説明する。まず、図-2左図のように参照領域を設定する。次に、図-2右図のようにスペckルパターンが移動した画像を取得し、参照領域と相関が最大となる位置を相関関数により探索する。最後に、変位前後に推定された参照領域中心座標の差から、参照領域の変位量を算出する。スペckルパターンを物体がもつ固有パターンとして扱えば、この移動量を実空間のスケールと対応付けることで、物体の変位、振動、ひずみ、速度を非接触で計測できる [2]。

本稿では、高速カメラを用いたレーザスペckルによるリード振動の計測手法を提案する。提案手法の模式図を図-1左に示す。まず、図-1右に示すように、リード表面に対してレーザを照射すると、リガチャー固定側の表面でレーザスペckルが生じる。演奏者がリードを咥えて吹鳴する状態では、口腔やリガチャーによりリードが拘束されるため、リードは微

*Study of reed vibration measurement using laser speckle pattern. By Kosuke UCHIKAWA, Tomoya NIIMI and Kohei YATABE (Tokyo University of Agriculture and Technology).

表-1 使用機材

製品名	メーカー
マウスピース	アルトサックス用 S80C ☆ Selmer
リガチャー	アルトサックス用ゴールドラッカー Selmer
リード	Anches Traditionnelles 3 Vandoren PARIS
カメラ	FASTCAM Mini AX50 Photron
レンズ	25 mm F2.8 ULTRA MACRO 5X LAOWA
レーザ	RP650AD5-4C Changchun Realpoo
	PhotoelectricCo.,Ltd
レコーダー	TASCAM Portacapture X8 TEAC
マイクロホン	AT4050 audio-technica

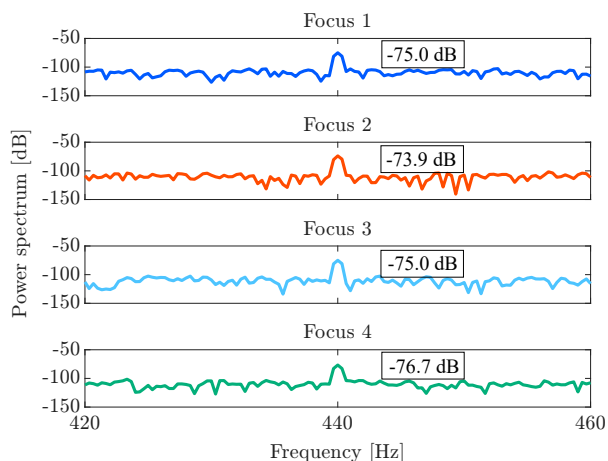


図-3 スピーカで観測したスペックルパターン変位の周波数成分. Focus 1 は焦点を表面に合わせ, Focus 2, 3, 4 の順で焦点を手前にずらした.

小振動に留まる. このとき観測されるスペックルパターンは形状を概ね保持したまま, リードの微小振動に伴い撮影画像内で移動することが期待される. そこで, スペックルパターンの動画像を撮影し, フレーム間の相関に基づいて振動の周波数成分を推定する.

4 実験

4.1 焦点距離による計測結果の比較

本実験で使用した機材を表-1 にまとめる. マウスピースは直径 29 mm, 高さ 228 mm の筒に, 3D プリンタで作成したアタッチメントで接続した. レーザと電池ケースも, 同様に作成したアタッチメントを用いてネジで三脚に固定した. 撮影は解像度 256×256 pixel, フレームレート 5000 fps で行い, 同時に筒の開放側で演奏音を 48 000 Hz で録音した. 撮影したスペックル画像から基準となるフレームを決め, 連続するフレーム間でスペックルパターンの変位を計算し得られた周波数成分と, 演奏音の周波数成分より, パワールのピーク位置を比較した.

リード表面に焦点を合わせると, 表面の形状が画像相関に影響を与える可能性がある. そのため, 物体表面に焦点を合わせた場合と, 手前にずらした場合を比較した. 実験ではスピーカの表面に白い紙を貼り, そこにレーザを照射し, スピーカから 440 Hz の正弦

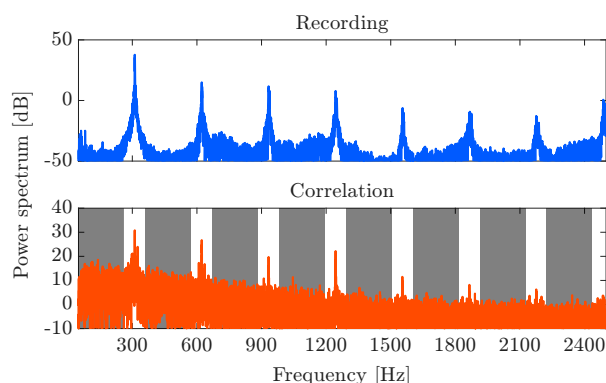


図-4 録音音源 (上段) とスペックルの変位 (下段) の周波数成分の比較. 特に, 基本周波数から 8 倍音までの各倍音の周波数の周辺を白背景で強調した.

波を再生した時のスペックルを撮影した.

スピーカで行った実験結果を図-3 に示す. Focus 1 はスピーカ表面に焦点を合わせ, Focus 2, 3, 4 の順で焦点を手前に移動した. ぼかすことにより, ピークのパワーが大きく変わることは確認できなかった.

4.2 リード振動の計測

スピーカで行った実験結果より, リード表面の凹凸の影響を抑えるため, 焦点をリード表面からずらして計測した.

録音音源とスペックルの時間変化の周波数成分を図-4 に示す. 録音音源の基本周波数は 311 Hz であった. 録音音源とスペックルを用いた振動計測手法で得られた周波数成分を比較すると, 基本周波数から第 8 倍音までピークが生じる周波数が対応することが確認できた. これは, スペックルの変動に, 録音音源に対応する周波数成分が含まれていることを示している.

5 むすび

本稿では, リード振動によるレーザスペックルの変化を計測した. 人の吹鳴時のリード振動によるレーザスペックルの変位の周波数成分に, 録音音源の基本周波数と倍音に対応する成分を確認した. 実験では, 録音音源とレーザスペックルの変位の周波数成分は, 8 倍音成分までピークが対応することが確認できた. 今後は, リード振動の定量的評価を目指す.

参考文献

- [1] M. Pàmies-Vilà, A. Hofmann and V. Chatziioannou, "Strain to displacement calibration of single-reeds using a high-speed camera," *Proc. Int. Symp. Music. Acoust.*, pp. 5-8 (2017).
- [2] 山口一郎, "電子式スペックル相関法による変位・ひずみ測定," *応用物理*, **61**(6), pp. 584-587 (1992).
- [3] 谷田貝豊彦, 第二版応用光学光計測入門, (丸善株式会社, 東京, 2005) pp. 169-170.