原 著

スキャニングレーザドップラ振動計による歌唱時の 皮膚振動計測における再現性の検証

北村 達也

要 約：本研究では、スキャニングレーザドップラ振動計を用いて歌唱時の顔面の皮膚振動を複数回計測し、計測間の差異を評価した。レーザドップラ振動計とは、対象物にレーザ光を当て、振動によって反射光に生じるドップラ効果を利用して対象物の振動速度や変位を計測するシステムである。また、スキャニング型の振動計は、事前に指定した複数の計測点を自動的に走査して振動を計測することができる。本研究には声楽経験者3名が参加した。実験は坐位にて行い、前額をあご台のフレームに当てることによって頭部を固定した。そして、各自の出しやすい高さにて母音/a/を連続歌唱させ、歌唱区間における皮膚振動速度を計測した。3回の計測結果を比較した結果、平均二乗誤差は4.0 dB以下であった。また、3回の計測値の中央値から6 dB外れている計測点は全計測点の2.4%であり、これらの多くはレーザ光が垂直に当たりにくい部分であった。

索引用語：スキャニングレーザドップラ振動計、歌唱、皮膚振動、振動速度、再現性

Verification of Reproducibility of Measurements of Skin Vibration during Singing by Scanning Laser-Doppler Vibrometer

Tatsuya Kitamura

Abstract: This study evaluated the reproducibility of measurements of facial skin vibration during singing by a scanning laser-Doppler vibrometer. A laser-Doppler vibrometer is an optical transducer capable of measuring the vibration velocity and the displacement of a certain point of a vibrating object on the basis of optical Doppler effect. A scanning vibrometer can scan and probe multiple predetermined points of a vibrating surface automatically. Three trained singers participated in this study. They sat with their head in a fixed position by attaching their forehead to the frame of a chin receiving stand. During the measurement, they were asked to sing the Japanese vowel /a/ in their comfortable pitch height continually, and the vibration velocity of the facial skin surface was obtained only during voicing. The results of three measurements for each participant showed that the root mean square errors of the vibration velocity were less than 4.0 dB. Moreover, the probability of outliers of the measurements, which were defined as measurement points whose vibration velocity was more than 6 dB apart from the median of the measured values, was 2.4%. Many of the outliers occurred at rounded facial surfaces where it was difficult to observe a reflected laser beam.

Key words: scanning laser-Doppler vibrometer, singing, skin vibration, vibration velocity, reproducibility

はじめに

発話や歌唱の際には声道内の空気の振動に起因して皮膚や骨格も振動する。この振動は、話者に響きの感覚をもたらしていると考えられる。発話や歌唱の訓練には振動感覚や響きに意識を向けることを重視する手法があるため、皮膚振動を簡便かつ正確に計測することができれば、その結果を訓練対象者へのフィードバックとして活用できる可能性がある。さらに、発話や歌唱の優劣の判定に利用できる可能性もある。そこで、本研究では発声時の皮膚振動計測法について検討する。

発話訓練法の一つである Lessac-Madsen 共鳴強調訓練では患者の振動感覚を重視する¹⁾。また、音楽指導者として著名な Miller は、「スペクトルのバランスが完全であれば、歌い手の頭部の骨格に共振の感覚が生まれます。それは、バランスの悪い発声の場合とは全く異なる感覚です (p. 115)」と述べている²⁾。このように、発話や歌唱の訓練においては振動や響きに対する感覚がフィードバックの一種として利用されている。

発話の際の皮膚振動に関しては Kirikae ら³⁾ が詳細に報告している。彼らは振動計を用いて身体の 40 点以上の点の振動を計測した。また、Sundberg⁴⁾、鈴木ら⁵⁾ は加速度センサを用いてそれぞれ歌唱時の胸部の振動、発話時の鼻、首、頬 3 点の振動を計測した。さらに、Toyoda and Fujinami⁶⁾ は光ファイバセンサを用いて歌唱時の頭部および胸骨部の皮膚振動を計測した。しかし、これらの研究で用いられているセンサは皮膚に接触させて使用するものであるため、少なからず皮膚振動に影響を及ぼす可能性がある。

一方、Pawluczyk and Kraska⁷⁾ や Kitamura⁸⁾ は光を用いた非接触な手法で皮膚振動を計測する手法を報告している。彼らの手法は計測対象の振動に影響を与えない。Kitamura⁸⁾ の研究ではスキヤニングレーザドップラ振動計を用いて発話時の皮膚振動速度パターンを計測可能であることを示した。この装置は、測定対象にレーザ光を当て、反射光に生じるドップラ効果を利用して測定対象の振動速度や変位を計測するものである。彼は、母音/a/と鼻音/ŋ/の発話時のそれには明確な差異があり、後者では鼻および前額の振動速度が大きくなることを明らかにした。しかし、

この研究は実験参加者が 1 名のみである点、結果の再現性について検討されていない点に課題を残している。

そこで、本研究では複数の実験参加者を対象にしてスキヤニングレーザドップラ振動計を用いた皮膚振動速度パターン計測の再現性を調査する。実験参加者としては音楽経験者を選択した。その理由は、第一に彼らが一定の基本周波数で安定した音声（歌声）を発することができるためである。第二には、将来的に皮膚振動速度パターンを歌唱訓練における視覚的フィードバックとして用いる可能性を視野に入れているためである。

方 法

1. スキヤニングレーザドップラ振動計

本研究では、スキヤニングレーザドップラ振動計 Polytec PSV-500 を利用して発声時の皮膚振動速度を計測した。振動する物体にレーザ光を照射しその反射光を観測すると、ドップラ効果により光の周波数が変化する。レーザドップラ振動計は、この変化量に基づいて計測対象の光軸方向の振動速度や変位を計測することができる。光を用いるため、センサを計測対象に貼り付けてその振動を計測する手法と異なり、計測対象に非接触で計測することが可能である。さらに、本研究で使用したスキヤニング型の振動計は、計測対象上の複数の計測点を自動的に走査して連続的に計測することができる。

本研究で利用した振動計のハードウェアは、レーザ光を照射・受光するスキヤニングヘッドおよびコントローラから成る (図 1)。さらに、ハードウェアの制御、結果の表示・分析等を担うソフトウェアを加え、全体のシステムを構成する。

2. 実験参加者

男性音楽家 1 名および音楽を学ぶ大学院生の男女各 1 名の計 3 名 (男性 2 名、女性 1 名) が実験に参加した。すべての実験参加者の母語は日本語である。彼らには実験前に実験内容について説明し、同意書に署名してもらったうえで実験に参加してもらった。以下では、各実験協力者をそれぞれ A (男性音楽家)、B (男子大学院生)、C (女子大学院生) と呼ぶ。

3. 実験課題

各実験参加者の出しやすい音程にて日本語母音/a/

図1 スキャニングレーザドップラ振動計 Polytec PSV-500. スキャニングヘッド(左)とコントローラ(右)から成る.

を連続歌唱させ、その間に顔面の皮膚振動速度を計測した。彼らには「響きの高い」声で歌うよう依頼した。彼らはこの依頼のみでどのような歌声で歌うべきか理解できたので、実験者からの指示は「響きの高い」声というもののみであった。歌声が実際に「響きの高い」声であったか否かは本人の判断に任せた。計測の直前にピアノでその高さの音を提示し、音の高さを確認させた。

実験当日はこの他にも異なる声質や高さで歌った際の計測も1, 2回実施したが、本稿では上記の「響きの高い」歌声3回分の計測結果についてのみ報告する。

4. 手続き

実験は防音機能を有する音楽室にて実施した。

実験参加者はレーザ光が眼に入ることを防ぐゴーグル(水泳用のゴーグルに布テープを2重に貼ったもの)をかけた状態で実験に参加した。したがって、実験中は周りの状況を視覚的に確認することができない。

彼らは各自の体格に合わせて高さを調整した椅子に座り、その前に置いた机に固定したあご台(SR Research SR-HDR)にて前額を固定した。このあご台はあごを載せるパーツを外してあり、歌唱に伴うあごの動きを阻害することはなかった。

振動計のスキャニングヘッドは実験参加者の顔正面に正対する位置と高さに三脚で固定した。この間の距離はおおよそ1 mである。

本研究では、すべての実験参加者について鼻腔と副鼻腔の表面にあたる部分、および口唇周辺の計59点の皮膚振動速度を計測した。これらは発声に伴って振

動すると予想した部分の代表点である。計測点の位置は、実験参加者間でできるだけ一致するように、解剖学的なランドマークを基準に決定した。しかし、本研究における計測点の解剖学的な位置関係が実験参加者間で完全に一致しているとはいえない。計測点の位置決定に関する一連の作業は振動計に付属するソフトウェア上で目視により行われた。なお、実験中の口の開きが増加した場合には計測点の位置を調節した。

各計測点では100 Hzから5 kHzまでの振動速度を計測した。周波数の範囲を100 Hzからに設定したのは、建物の暗振動や実験参加者の身体の揺れの影響を除去するためである。各点では3回計測を行い、それらの値の平均値を当該の点の計測値とした。59点の計測の順序は、総計測時間が最短になるよう、振動計の計測用ソフトウェアにより自動的に決められた。1つの平均値を得て次の計測点に移動するのに要する時間は1~2 secであり、すべての計測点の計測には90 sec程度を必要とした。したがって、実験参加者は測定のために数回吸気を行うことになる。吸気中を避け、発声中のみ皮膚振動を計測するため、実験参加者の口元から約50 cmの位置にマイク(Sony ECM-77B)を置き、アンプ(Edirol UA-5)を介して振動計のコントローラに入力し、音声をトリガとして計測を行った。吸気の時間を含めると顔面全体の1度の計測に約2分を要した。なお、本研究では、計測点間の時間差を考慮しなかった。すなわち、発声区間内における皮膚振動速度の変化が計測結果に影響してしまう。

以上の計測を1名につき連続して3回実施した。計測中に頭部が動いて計測点がずれた場合には中断し、計測をやり直した。また、個々の計測の間に必要に応じて計測点の位置を調整した。

皮膚振動計測と同時に歌声の等価騒音レベルを計測した。騒音計(リオンNL-20)を実験参加者から約1 mの位置に配置し、デジタル表示される等価騒音レベルの最大値を目視にて記録した。

以上の実験方法は、「甲南大学におけるヒトを対象とした研究審査」により承認されている。

5. 分析方法

3回の計測結果の分散を調べるため、平均二乗誤差を計算する。i回目の計測における顔面上のj番目の点における振動速度を v_{ij} とする($i=1, 2, 3, j=1, 2, \dots, N$)。このとき、i回目の計測における平均二乗誤差 e_i は以下の式で与えられる。

$$e_i = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (v_{ij} - \bar{v}_j)^2}{N}}$$

$$\bar{v}_j = \frac{\sum_{i=1}^3 v_{ij}}{3}$$

ここで、N は計測点数で、本研究では 59 である。

さらに、計測間の差異が特に大きい計測点を明らかにするため、3 回の計測の中央値との差を計算する。ここで中央値を用いたのは、単純な平均（相加平均）値は外れ値の影響を受けやすいためである。そして、この中央値との差が 6 dB を超える点（6 dB は約 2 倍に相当する）を計測間の差異が特に大きい計測点とした。

結 果

実験参加者 A, B, C は、それぞれ C4 (261.6 Hz), A3 (220.0 Hz), E5 (659.3 Hz) の音程で発声した。歌声の等価騒音レベルの最大値を表 1 に示す。3 回の計測における差異は、すべての実験参加者で 2 dB 以内に収まっており、実験中の発声が安定していたことを間接的に示している。

各実験参加者の皮膚振動速度の二乗平均平方根

表 1 歌声の等価騒音レベルの最大値(dB)

	1 回目	2 回目	3 回目
実験参加者 A	92	93	92
B	95	96	97
C	88	89	88

(root mean square, RMS) 値を図 2-4 に示す。図中の格子点は計測点で、グレースケールで色が付けられている点の値は補間により求められている。色が白に近いほど皮膚振動速度が大きく、黒に近いほど小さいことを意味している。すべての実験参加者において口唇周辺および鼻の皮膚の振動速度が相対的に大きいことがわかる。これらの計測結果は、皮下組織の量や質、頭蓋骨の構造等の頭部の解剖学的な特性の影響を受けている。皮膚振動速度パターンには、実験参加者による差異も見られ、たとえば、実験参加者 B は鼻の部分の振動速度が相対的に大きい。

皮膚振動速度の平均二乗誤差を表 2 に示す。本研究においては最小 1.7 dB、最大 4.0 dB の範囲で変化していた。さらに、3 回の計測の中央値との差が 6 dB を超える点を求めたところ、実験参加者 A で 4 点、実験参加者 B で 3 点、実験参加者 C で 6 点存在した。したがって、本研究における全計測点数 531 点 (=59 点×3 回×3 名) 中 13 点、すなわち 2.4% が外れ値であった。これらの計測点は図 2-4 の中に小さい矢印で指し示してある。これらの多くは鼻、頬骨、オトガイの曲面部であり、計測中の頭部の位置や方向の変化によってレーザー光が垂直に当たらなくなってしまう点である。それ以外の点（実験参加者 A の上唇、実験参加者 C の頬）で外れ値が生じている原因は定かではないが、計測中に頭部が動いたことによる可能性が高い。これに関しては、今後引き続き調査が必要である。

図 2 実験参加者 A (男性声楽家) の 3 回分の歌唱時の皮膚振動速度パターンおよびカラーバー。カラーバーの数値の単位は m/s (dB) で、0 dB は 1 m/s に対応する。矢印は 3 回の計測の中央値から 6 dB 以上外れた値が得られた点を示している。

図3 実験参加者 B（男性大学院生）の3回分の歌唱時の皮膚振動速度パターンおよびカラーバー。矢印は3回の計測の中央値から6 dB 以上外れた値が得られた点を示している。

図4 実験参加者 C（女性大学院生）の3回分の歌唱時の皮膚振動速度パターンおよびカラーバー。矢印は3回の計測の中央値から6 dB 以上外れた値が得られた点を示している。

表2 皮膚振動速度の平均二乗誤差 (dB)

	1回目	2回目	3回目
実験参加者A	2.1	1.7	1.7
B	2.8	2.6	4.0
C	3.2	2.8	2.8

考 察

3回の計測における皮膚振動速度の平均二乗誤差は4.0 dB 以下であり、本研究で用いた計測法はおおむね再現性があると考えられる。しかし、特に顔の曲面部にて

外れ値が生じることがあり、計測点の選定や実験参加者の頭部の固定法にはさらなる検討が必要である。実験参加者からは、ゴーグルによって両眼がふさがれるため自身の体位の変化に関する情報が視覚的に得られないという意見が聞かれた。今後、レーザ光を透過しないフィルタを採用したレーザ保護メガネを利用したり、ヘッドマウントディスプレイを用いて頭部の動きを画面上に提示したりする方法などを検討する。

本研究では発声区間内における皮膚振動速度の変化を考慮していなかった。したがって、発声の立ち上がり区間、定常区間、立ち下がり区間における差異が計

測結果に影響を与えていた可能性がある。この点については今後調査する予定である。

また、本研究では実験協力者ごとに声の高さおよび大きさを固定して計測を行った。Kitamura ら⁹⁾ は、発声時の皮膚振動速度が歌声の基本周波数およびその倍音の周波数において大きくなることを報告している。よって、皮下組織の音響インピーダンスに周波数依存性があれば、上記の結果は声の高さに依存したものとなる。声の大きさも皮膚表面の振動速度に非線形な影響を及ぼす可能性がある。したがって、本研究で示した結果はあくまでも実験協力者ごとの声の高さおよび大きさに依存したものといえる。

この他、計測法に関してさらなる検討を要する点が存在する。まず、本研究では計測点の解剖学的な位置関係を実験参加者間で厳密に統一することはできなかった。事前に解剖学的なランドマークにマーカーを貼っておき、その点を計測するような工夫が必要である。

おわりに

本研究では、スキヤニングレーザドップラ振動計を用いた発声中の皮膚振動速度パターンの計測における再現性について検討した。声楽経験者3名による持続歌唱中に3回の計測を行い、その計測結果を報告した。今後、発話や歌唱の際の皮膚振動の全容解明や皮膚振動パターンの訓練への応用などに関する研究を進めていく予定である。

謝辞 本研究は平成24年度科学研究費補助金(24650088)にて実施された。実験にご協力いただきました京都市立芸術大学 津崎 実先生および学生の皆様、飯島聡志様、ポリテックジャパン(株)若月祥子様、甲南大学知能情報学部 金澤咲弥様に感謝いたします。

文 献

- 1) 廣瀬 肇, 城本 修, 小池三奈子, 他: STのための音声障害診療マニュアル, インテルナ出版, 東京, 2008.
- 2) Miller R: 上手に歌うためのQ & A 歌い手と教師のための手引書(岸本宏子, 長岡 英訳), 音楽之友社, 東京, 2009.
- 3) Kirikae I, Sato T, Oshima H, et al: Vibration of the body during phonation of vowels. Rev Laryngol Otol Rhinol, 85: 313-345, 1964.
- 4) Sundberg J: Chest wall vibrations in singers. J Speech Hear Res, 26: 329-340, 1983.
- 5) 鈴木久喜, 党 建武, 中井孝芳, 音声発声時の口唇, 鼻孔, 咽頭部の音と振動の測定および非鼻音化音声における鼻腔口腔間の音響漏えいのシミュレーション. 信学論 A 基礎・境界, 74: 1705-1714, 1991.
- 6) Toyoda K and Fujinami T: An effective singing for musical expressions, Proceedings of 10th International Conference on Music Perception and Cognition: 372-380, 2008.
- 7) Pawluczyk R and Kraska Z: Diffuse illumination in holographic double-aperture interferometry. Applied Optics, 24: 3072-3078, 1985.
- 8) Kitamura T: Measurement of vibration velocity pattern of facial surface during phonation using scanning vibrometer. Acoust Sci Tech, 33: 126-128, 2012.
- 9) Kitamura T, Hatano H, Saitou T, et al: Pilot study of vibration pattern measurement for facial surface during singing by using scanning vibrometer, Proceedings of Stockholm Music Acoustics Conference 2013: 4, 2013.

別刷請求先: 〒658-8501 兵庫県神戸市東灘区岡本 8-9-1
甲南大学知能情報学部
北村達也