

Semi-Occluded Vocal Tract による 声帯振動への影響 —光電声門図による解析—

原著▶

青木良太¹⁾ | 城本 修²⁾ | 土師知行²⁾ | 吐師道子²⁾
Ryota Aoki | Osamu Shiromoto | Tomoyuki Haji | Michiko Hashi

要旨 声道の準狭窄による発声技法 semi-occluded vocal tract (SOVT) であるチューブ発声、ハミングと通常の母音発声の間に、どのような声帯振動様式の差異があるか、photoglottograph (PGG) を使用して比較検討した。

1. ハミングは、母音発声やチューブ発声に比して声門の開放時間率 (Open Quotient : OQ) の短い声帯振動に変化する可能性を示した。
2. チューブ発声は、ハミングと比して声門の開放時間率が有意に長く、同じ SOVT でも声帯振動に差がある可能性が示唆された。
3. 鼻腔経由で PGG 計測を実施し、一部女性例でもデータ集積が可能であり、計測の信頼性が示唆された。

キーワード semi-occluded vocal tract (SOVT), チューブ発声, ハミング, photoglottograph (PGG), Open Quotient (OQ)

I. はじめに

音声治療の分野では、多くの音声治療技法が存在する^{1,2)}。たとえば、症状対処の音声治療技法の一つとして、チューブ発声がある。チューブ発声は、鼻咽腔閉鎖機能不全症例に対して実施するブローイング訓練から派生した技法とされている^{3,4)}。また、声道の準狭窄を用いる発声技法「semi-occluded vocal tract (SOVT)」としても位置づけられている^{4,5,6)}。近年、リハビリテーション領域においても、チューブ発声に関する報告例が増えてきている。Titze^{5,7)} は、チューブ発声の効果について、コンピュータシミュレーションから、声道を二次的に狭めることによって、声帯振動を起こす呼気流と声道共鳴特性との間の相互作用がさらに強くなり、声門上・声門の圧力が高まると述べている。すなわち、SOVT は声道の二次的狭め (準狭窄) を使い生成された音声により、呼気圧が上昇することで口腔内圧が高まり、声帯の過内転を生じることなく、両側声帯の衝突する力も最適となり、効率の良い発声を導くとされている。また、中村ら⁸⁾ は電気声門図 (electroglottograph ; EGG), 村上⁹⁾ は光電声門図 (photoglottograph ; PGG) を使用して、チューブ発声時の訓練回数による差異やチューブ径の差異が声帯振動に及ぼす影響を報告している。さらに実際の効果を検証した症例報告^{10,11)} も散見さ

れる。しかし、いずれの先行研究も声帯振動にチューブ発声がどのような影響を及ぼすのか必ずしも一定の見解は得られていない。

一方、従来からヴォイストレーニングなどで使用される発声技法の一つとして、ハミングが挙げられる。ハミングはチューブ発声同様に、SOVT に分類されており⁵⁾、声帯の緊張緩和を目的とするともいわれている。しかし、チューブ発声同様に、ハミング時の声帯振動様式の解析報告は少ない。これは、実際の声帯振動様式を確認することに侵襲性や測定精度の問題が存在していたからであると推察される¹²⁾。

声帯振動様式の視認手段として、代表的なものに、超高速映画、各種声門図、デジタルイメージング法などが挙げられる。それぞれ一長一短あり、使い分けをすることが必要とされる^{13,14)}。超高速映画など直接的観測方法では、経口挿入が主流であり、開口で実施する必要がある。そのため、チューブ発声やハミング時の声帯振動は声道の準狭窄が生じず、準狭窄の影響を確認できない。また、経口挿入するため、侵襲性も伴うので実施が困難である。一方、声門図の一つである PGG など間接的観測方法では、声帯振動の接触の程度や音声波形の開大期などの長さを測るといったある特定の変数を検出する。直接的観測方法に比べて、声帯振動の視認に制限は少ないが、測定精度は低い。しかし、侵襲性は低いという大きな利点がある。さら

¹⁾ 森之宮病院リハビリテーション部言語療法科

²⁾ 県立広島大学保健福祉学部コミュニケーション障害学科

[連絡先] 青木良太: 森之宮病院リハビリテーション部言語療法科 (〒536-0025 大阪府大阪市城東区森ノ宮2丁目1-88)

TEL : 06-6969-9628 FAX : 06-6969-9689 E-mail : kinki2011_dys@zb.ztv.ne.jp

受稿日: 2017年5月22日 受理日: 2017年10月31日

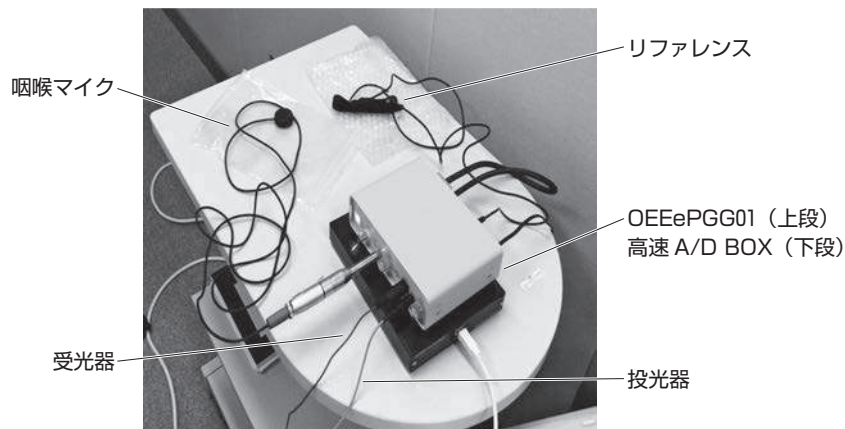


図1 本研究で使用した改良型の光電声門図 (PGG) の機器一式

に、実際の研究や臨床において、操作が簡便で、高価な装置を必要とせず、可能なかぎり非侵襲的に実施できる。これらの点から、近年、機器の改良が進み、経皮的に近赤外線光を利用した侵襲性の低い改良型 PGG が開発された。

本研究では、声道の準狭窄とされる「チューブ発声」と「ハミング」、発声様式が似ている「母音/u/発声」の3つの発声技法における、声帯振動様式について、改良型 PGG¹⁵⁾ を使用して比較検討する。

Ⅱ. 方 法

1. 対象者

研究対象者は、聴覚的に嗄声のない大学生 10 名 (男性 3 名, 女性 7 名) で、平均年齢は 21.8 歳 (21~22 歳) であった。本研究に際し、研究協力者を募り、研究の趣旨を口頭および紙面を通して伝え、文書にて同意を得た。なお、女性 7 名のうち、2 名が途中で研究を中止した。1 名は慢性鼻炎による鼻腔挿入困難、もう 1 名は課題途中の疲労からの気分不良により研究実施者が継続困難と判断し中止とした。

2. 使用機器

使用機器を以下に示す。

- ・ OEEePGG01 (有限会社追坂電子機器) 図 1
- ・ 高速 A/D BOX (有限会社追坂電子機器) 図 1
- ・ 透明アクリルパイプ (株式会社菅原工芸) 図 2
- ・ 騒音計 (Digital Sound Level Meter AR824)
- ・ IC レコーダ (OLYMPUS Voice-Trek DS-750)

3. 改良型 PGG について

本研究で使用した改良型 PGG は、特定の近赤外光を光源とし、特定周波数の近赤外光のみを感知するフォトセンサーを用いた声帯振動の解析装置である。県立広島大学と有限会社追坂電子機器との共同開発により製品化された。基本システムは、投光器を甲状軟骨の両側、受光器を輪状軟骨に装着し近赤外光を利用し、非侵襲的に声門の開閉運



図2 透明アクリルパイプ (長さ 28 cm, 内径 10 mm)

動を間接的に観察できる。

しかし、予備研究において、メーカー指定の計測方法で実施したところ、対象者のなかに声帯振動の観測が困難な女性対象者が存在した。観測困難な要因には、咽喉頭における構造上の問題が示唆された。なお、予備研究は、今回のように発声技法 3 者間による比較検討ではなく、チューブ発声を主とする内容であった。そこで、本研究では、軽微な侵襲を伴うものの、鼻処置を行なったうえで、潤滑剤を投光器に塗布し、鼻腔経路で咽喉頭まで挿入して (図 3) 計測することにした。図 4 に指定の測定方法と、本研究で実施した新しい測定方法を比較した。なお、今回使用した投光器 (径 10 Fr) は、鼻腔経路で代替栄養を確保する際のチューブとほぼ同等径である。投光器の挿入については、著者の一人である耳鼻咽喉科医師が鼻腔から施術した。

図 5 は、実際に PGG を使用した記録画面であり、各波形がパソコン上に表示される。中央部の直線上に位置する波形は音声、凹凸に位置する波形は PGG を示している。

4. 実施課題

チューブ発声・ハミング・母音/u/発声の 3 つの発声法による発声様式課題を実施した。発声様式の提示順序の影響を除外するために、各発声様式課題を以下のように A 順・B 順・C 順に振り分け、各様式で 3 秒程度発声してもらった。ただし、途中でモニター画面の波形視認が困難と

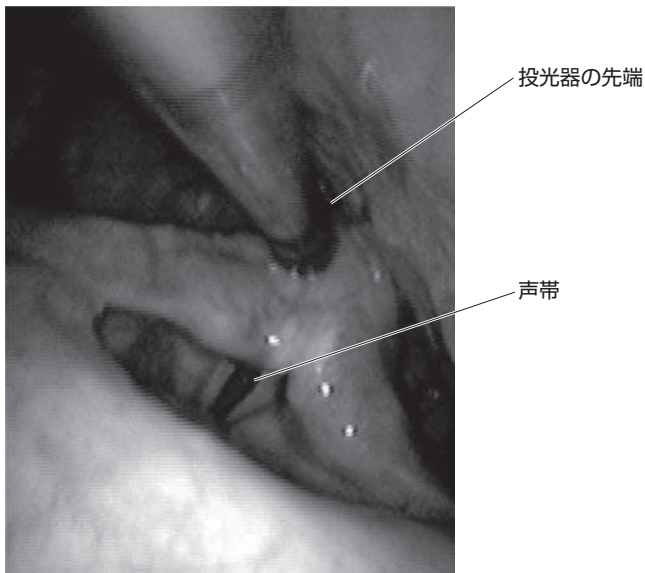


図3 実際に投光器が咽喉頭に達している位置を、内視鏡から撮影

なった場合は、視認できるまで繰り返してもらった。

A：母音発声→チューブ発声→ハミング

B：チューブ発声→ハミング→母音発声

C：ハミング→母音発声→チューブ発声

さらに、各様式を合計3回繰り返すために、A・B・Cの発声順序を以下のようにランダムに設定した。

①：A→B→C

②：B→C→A

③：C→A→B

各対象者に、以上の3つの発声順序のうちから、無作為な順で実施し、各発声様式で計3回となるようにした。

声の大きさ、高さについては、先行研究¹⁶⁾と同様に、「各対象者が出しやすい声で出してもらおう」ように教示した。各対象者内で発声課題によって声の大きさにばらつきが生じないように、騒音計にて発声時の音圧モニターを行った。

なお、課題前には対象者全員にチューブ発声の練習を数回実施した。チューブをくわえた状態で、ただ呼吸だけでなく、音としては/u/を意識してもらい、口唇周囲に振動を感じてもらおうように教示した。ハミングと母音発声についても事前に練習を行った。なお、ハミングと母音発声に

ついては、チューブ発声と比較すると、親和性の高い発声課題であり、上述したチューブ発声のように詳細な教示は実施していない。そのため、その場でウォーミングアップ程度に発声してもらい、研究実施者の聴覚印象上特に問題ないと判断すれば、課題本番に移行することにした。なお、研究実施者はその場に2人以上同席している。

5. 手続き

1) データ解析

パソコン上の PGG モニター画面を通して、各発声技法の PGG 波形 (図6) から、視認できる安定部分から約1秒間分を抽出した。その際、ICレコーダで録音した音声とも照合し波形抽出の誤りを防いだ。波形データは CSV 形式に変換し、さらに Excel ファイルに数値変換し解析を行った。各波形について、Scherer ら¹⁶⁾の EGG 波形解析に準じて25%の値(最大値と最小値の差の25%値)(図7)を算出した。続いて、各発声技法の連続した5波形より、25%値の声門開放率(25% Open Quotient: 25% OQ)の平均値を算出した。

なお、声門開大面積の時間的な変化を表す OQ は、声帯振動の1周期内で、声門が開いている時間の割合、つまり声門の開放時間率を示している¹⁷⁾。計算式としては、声門開大時間 A を周期 C で割ったものが、OQ に該当する(図7)。OQ 値を得るためには、EGG よりも PGG の使用が最適であるといわれている¹⁸⁾。そのため、本研究では PGG による OQ 値を採用した。

統計解析には、連続した5波形分の25% OQ の平均値を算出して使用した。最終的に各対象者で各9個の25% OQ の平均値が算出される。

この25% OQ 平均値から、チューブ発声・ハミングと、口型が類似する/u/の母音発声間の発声技法による声帯振動の差異について比較検討をした。

2) 統計学的解析

対象者5名について、発声技法を独立変数とする Friedman 検定を、さらに多重比較として、scheffe 法を実施した。それぞれ有意水準5%未満の場合に統計学的有意とした。統計ソフトウェアは FreeJSTAT を使用した¹⁹⁾。

なお、女性対象者のうち3名が課題内にてデータ欠落を



図4 ①(左側)本機器による指定の測定方法。②(右側)鼻腔経路で投光器を挿入した本研究の測定方法

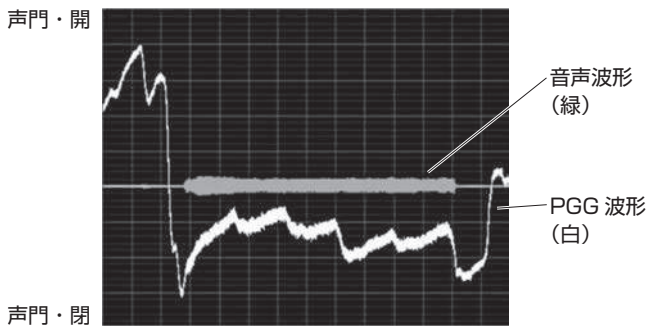


図5 課題中パソコン上で確認できる画面

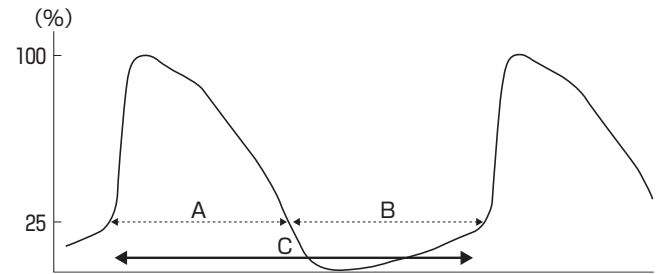


図7 声門面積波形. Aは開放期(開大期+閉小期), Bは閉鎖期, Cは1周期を示す(文献17を一部改変)

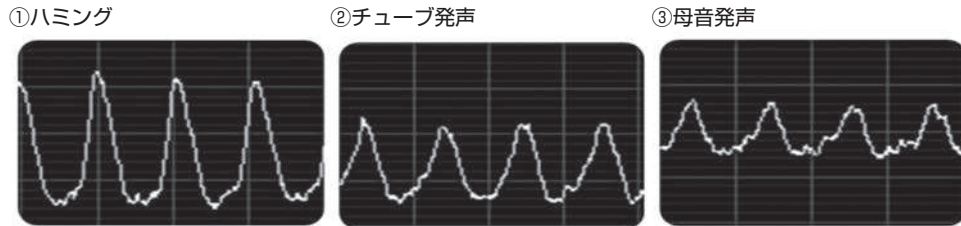


図6 データ解析途中で確認できる画面

一部生じたため、本研究の統計解析には含めていない。そのため、対象者は男性3名、女性2名の合計5名となった。

3) 波形抽出の信頼性と妥当性

安定波形部分の抽出については、第一著者が日時を改め、再度、ランダムに安定波形抽出を行い、波形解析の手続きの一致度を検討し、検者内信頼性を算出した。その結果、再検査信頼性は0.99と高い信頼性が認められた。同様に、初回の安定波形の抽出部分を前後にずらして、抽出波形の安定性を初回波形との一致度を算出して検討した。その結果、0.98と高い安定性が認められ、抽出波形の妥当性が示された。

4) 倫理的配慮

本研究は、県立広島大学大学院倫理委員会にて、事前に承認を得た(県立広島大学大学院倫理委員会 第15MH1062号)。

Ⅲ. 結 果

1. 発声技法による差

図8は対象者5名の各発声技法における25% OQ 平均値を示した箱ひげ図である。発声技法の違いによるOQの差を検定するため、まずFriedman検定を行い、さらに多重比較として、scheffe法を用いた結果、発声技法間で25% OQ 平均値に有意差を認めた($\chi^2=10.89$, $p=0.004$)。さらにハミングは母音発声よりも25% OQ 平均値が有意に低かった($p<0.05$)。また、ハミングはチューブ発声よりも25% OQ 平均値が有意に低かった($p<0.01$)。チューブ発声と母音発声の間には、有意差は認められなかった。

2. 鼻腔経路による改良型 PGG の適応

全男性対象者3名では、波形データがすべて回収できた。一方、女性対象者では7名中2名で途中中止が生じ、さらに中止しなかった対象者の中にも波形データの一部欠落が認められた。

Ⅳ. 考 察

1. 発声技法による差について

チューブ発声とハミングは、舌・口唇のトリルとともに、SOVTに分類されている⁹⁾。しかし、今回の研究からチューブ発声とハミングは同じ特徴を有しているとはいえない結果を示した。具体的には、各発声技法間に、発声時の声道狭窄部位、声道長延長など構造上の差異が考えられる。つまり、発声様式が類似した母音/u/発声と比較すると、チューブ発声とハミングでは声道の狭窄部位が異なる。また、声道長延長についても、母音/u/発声と比較すると、チューブ発声とハミングは、チューブ発声の声道長延長が最も長く、ハミングは母音/u/発声と声道長はそれほど変わらないと考えられる。本研究においては、チューブ発声、ハミングいずれにもSOVTにおける声道の準狭窄は共通する。すなわち、SOVTにおける声道の準狭窄は、母音/u/発声に比して25% OQ 平均値が小さくなる傾向を示し、声門開放時間率が短くなると考えられる。つまり、声道の狭窄部位と声道長の差異がチューブ発声とハミングの25% OQ 平均値の差異に影響したと考えられる。こうした構造上の差異は、少なからず声道の形状の違い(声道容積)に繋がり、結果的に声帯振動にも影響を及ぼしたと推察できる。すなわち、声帯振動への影響は、声道長延長や

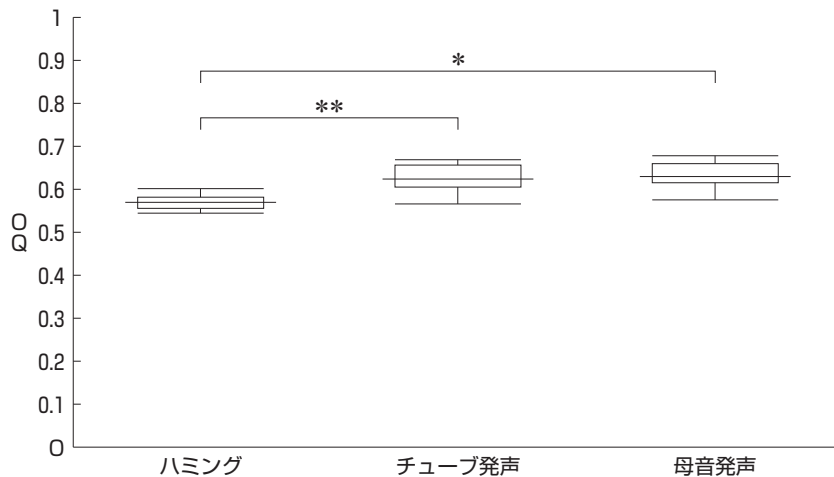


図8 発声技法の違いによる OQ の比較. 統計手法として Friedman 検定, scheffe 法を用いた ($\chi^2=10.89$, $p=0.004$). (* $p<0.05$ ** $p<0.01$) (n=5)

口唇の径を小さくすることではなく、ハミングで口唇を完全に閉じることにより、閉じた声道側から何らかの呼気の逆流を生じ、呼気圧を上昇させ口腔内圧をより高めることとなり、結果的に声門開放時間率の短縮につながったのではないかと示唆される。

また、チューブによる声道長の延長は、Titze^{5, 20})によれば、第一フォルマント周波数の低下を認めたと報告している。本研究では、使用したチューブは、原法に沿って 28 cm で施行したが、25% OQ 平均値はチューブ発声と母音/u/発声では有意差を認めなかった。この要因としては、まず、シミュレーションでは、男性の声道長モデルが使用されている。しかし、本研究では、対象者に女性も含まれている。したがって、声道長の異なる性差による影響も反映していると考えられる。さらに、使用したチューブの長さの違いがある。シミュレーション上ではチューブ長は 10 cm であり、本研究では 28 cm で実施した。これによって、全体の声道長が変わるため、チューブ長の影響も生じた可能性がある。チューブ発声を検討する際には、チューブの長さの条件も考慮すべきである。さらには、研究対象者の性別も考慮に入れる必要がある。

また、音声治療の対象となる音声障害患者についてはさらなる検討が必要と思われる。

2. PGG と OQ について

PGG の原法²¹⁾は Sonneson によって考案され、従来は口腔経由で声門上から内視鏡の照明光を入れていた。のちに沢島によって、鼻腔経由で照明光を入れる形となり、自然な構音なども観察できるようになった。一方、開発当時は、軽微な侵襲を伴った。しかも PGG の光源として内視鏡の通常光源を使用しており、環境光に大きく影響された。そのため、PGG を使用するには、暗室などの特別な環境が必要とされ、日常臨床では利便性に問題が残った。

本研究では、沢島らの原法に近い PGG の測定方法であ

る鼻腔経由で声帯振動様式を確認した。この方法では、軽微な侵襲は伴うが、特定の近赤外光を使用しているため、使用場所は問わない。しかも、先行研究では、PGG による OQ の検討を行った報告はほとんどない^{22, 23)}。したがって、標準化された OQ の算出方法はなく、測定条件の異なる先行研究を比較するという現状であり、解釈には十分な注意が必要である。

また、PGG については、改良型 PGG を用いてチューブ発声の使用チューブ径や訓練回数による影響を測定した報告⁹⁾や高速度カメラと旧型 PGG を併用した報告²⁴⁾などがある。しかし、女性を対象とした報告はほとんどみられず、男性数例に代表されることが多い^{13, 24, 25)}。なぜなら、男女の喉頭軟骨や声帯長など構造上の性差^{26, 27)}は、よく知られており、従来、女性対象者の測定は難しいとされてきたからである。たとえば、甲状軟骨の大きさや厚み、角度を取り上げてみると、男性に比べ小さくて薄い、角度は鈍角といった特徴が列挙できる。これらの特徴を踏まえたうえで、今回のように声帯振動を音声波形、声門面積から評価するとなると、女性における声帯振動様式を確認することの難しさが想定される。くわえて、経口経由など侵襲性が伴うとなれば、咽喉頭の構造上の性差を考慮し、声門面積波形が確認しやすい男性例が基本となるのも理解可能である。

今回、女性対象者の一部に中止例やデータの一部欠落を認めたものの、改良型 PGG による女性対象者のデータ集積が可能であることが示された。

軽微な侵襲を伴う研究であるため、研究対象者の数は限定され、本研究の結果を汎化するには限界がある。さらに、本研究では対象者は若年健常成人であった。今後、学習が難しいと推察できる高齢者や研究対象の少ない女性対象者の報告を積み上げることが必要と思われる。

謝 辞

本研究を実施するにあたり、快く研究協力を申し出て頂いた、県立広島大学の学部生に心から感謝申し上げます。また、通常勤務の傍ら、本論文の作成にご理解、ご支援頂いた森之宮病院リハビリテーション部の椎名英貴先生をはじめとする言語療法科の同僚に感謝申し上げます。

なお、本論文は第一著者の修士論文の一部を加筆・修正し、再構成したものである。

文 献

- 1) Boone DR, McFarlane SC : 音声障害と音声治療 (廣瀬肇, 藤生雅子訳), 医歯薬出版, 東京, 1992.
- 2) 西尾正輝 : ディサースリアの基礎と臨床 第3巻 臨床実用編, インテルナ出版, 東京, 27-74 頁, 2006.
- 3) Simberg S, Laine A : The resonance tube method in voice therapy: Description and practical implementations. *Logopedics Phoniatrics Vocology*, 32 : 165-170, 2007.
- 4) 城本 修 : 症状対処の音声治療 : チューブ発声法, 「STのための音声障害診療マニュアル (廣瀬肇監修)」, インテルナ出版, 東京, 87-89 頁, 2008.
- 5) Titze IR : Voice training and Therapy With a Semi-Occluded Vocal Tract : Rationale and Scientific Underpinnings, *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 49 : 448-459, 2006.
- 6) Behrman A, Haskell J : 実践音声治療マニュアル (城本 修, 生井友紀子訳), インテルナ出版, 東京, 41-54 頁, 2012.
- 7) Titze IR, Laukkanen AM : Can vocal economy in phonation be increased with an artificially lengthened vocal tract? A computer modeling study, *Logopedics Phoniatrics Vocology*, 32 : 147-156, 2007.
- 8) 中村静華, 山本有紀子 : 音声訓練におけるチューブ発声の効果-電気声門図 (EGG) による検討-, 県立広島大学保健福祉学部コミュニケーション障害学科卒業論文集, 54-60, 2004.
- 9) 村上亜貴 : 光電声門図 (PGG) によるチューブ発声時の声帯振動の検討-チューブ径と訓練回数による影響-, 県立広島大学保健福祉学部コミュニケーション障害学科卒業論文集, 70-78, 2014.
- 10) 柳有紀子, 駒沢大吾, 菅野倫子他 : muscle tension dysphonia (MTD) 症例の音声治療について-チューブ発声法を用いた1症例についての考察-, *音声言語医学*, 54 : 40-44, 2013.
- 11) 南 和彦, 丸山萩乃, 土師知行 : チューブ発声法による声帯振動への影響. *音声言語医学*, 56 : 180-185, 2015.
- 12) 宇高二良 : 音声障害の検査と診断 4-1 問診と内視鏡検査 「音声治療学 (小池 靖夫編)」, 金原出版, 東京, 25-32 頁, 1999.
- 13) 山中 盾 : 声帯振動の解析における電気声門図 (EGG) 及び光電声門図 (PGG) の有用性-声帯超高速デジタル撮影法による検討-, *日耳鼻*, 103 : 905-915, 2000.
- 14) 新美成二 : 音声障害と声帯振動. *音声言語医学*, 40 : 242-247, 1999.
- 15) 光電グロトグラフィー非侵襲型光電声門図計測装置 OEEePGG001 ユーザーズガイド, 有限会社追坂電子機器, 広島, 4-12 頁, 2013.
- 16) Scherer R, Vail V, Rockwell B : Examination of the laryngeal adduction measure EGGW. *Natl Cent Voice Speech Status Prog Rep*, 5 : 73-82, 1993.
- 17) 新美成二 : 5 発声の物理 「新編 声の検査法 (日本音声言語医学会音声情報委員会 編)」, 医歯薬出版, 東京, 27-32 頁, 2009.
- 18) 石毛美代子, 新美成二, 森 浩一 : Electroglottography (EGG). *音声言語医学*, 37 : 347-354, 1996.
- 19) 勝平純司, 下井俊典, 窪田 聡 : すぐできる! リハビリテーション統計 (監修 山本澄子, 谷浩明), 南江堂, 東京, 2012.
- 20) Titze IR : Phonation Threshold Pressure Measurement With a Semi-Occluded Vocal Tract. *JSLHR*, 52 : 1062-1072, 2009.
- 21) 磯貝 豊 : 2) 声門波形の観察 (超音波・光電・電気グロトグラフィー) 「新編 声の検査法 (日本音声言語医学会音声情報委員会 編)」, 医歯薬出版, 東京, 100-103 頁, 2009.
- 22) Echternach M, Dippold S, Sundberg J, et al : High-Speed Imaging and Electroglottography Measurements of the Open Quotient in Untrained Male Voices' Register Transitions. *J Voice*, 24 : 644-650, 2010.
- 23) Winkler R, Sendlmeier W : EGG open quotient in aging voices-changes with increasing chronological age and its perception. *Logopedics Phoniatrics Vocology*, 31 : 51-56, 2006.
- 24) 藤本雅子 : 促音の喉頭調節の高速度カメラと PGG による検討 : ケーススタディー. *音声研究*, 第18巻2号 : 44-53, 2014.
- 25) 沢島政行 : ファイバースコープによる音声器官の動的観測. *日本音響学会誌*, 27 巻9号, 425-434, 1971.
- 26) Case JL : 音声障害の臨床的マネジメント (濱村真理, 溝尻源太郎, 熊倉勇美訳). 医歯薬出版, 東京, 26-28 頁, 2001.
- 27) Titze IR : 音声生成の科学 発声とその障害 (新美成二 監訳). 医歯薬出版, 東京, 128-142 頁, 2003.