

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 4 日現在

機関番号：14401
研究種目：若手研究
研究期間：2021～2023
課題番号：21K16857
研究課題名（和文）大声発声の喉頭抵抗・呼気努力への依存優位性評価のための新空力学的検査法の開発

研究課題名（英文）Development of new aerodynamic testing methods for evaluating the dependency ratio of loud vocalization on laryngeal resistance and expiratory effort

研究代表者
馬谷 昌範（UMATANI, MASANORI）
大阪大学・大学院医学系研究科・特任研究員

研究者番号：00804353
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：消化管マノメトリーを用いることにより、呼気努力を評価することができ、発声中の頸部表面加速度計、消化管マノメトリー、発声機能検査装置による同時計測により、クレシェンド発声遂行中の音声の強さ、気流量の連続的变化を評価しえた。また、クレシェンド発声において、成功例では発声直前吸気のピーク時、起声時、発声中の音圧レベルピーク時のいずれの点においても、胸部食道内圧および胃内圧の両方に圧の有意差を認めたと、失敗例では、起声時の音圧レベルが大きかった。また、呼気努力の様式の個人内差違、および個人間差違が存在することが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義
消化管マノメトリーを用いることで、呼気努力の評価が可能であり、呼気努力の評価方法の一つとして、消化管マノメトリーの有用性を証明しえた。クレシェンド発声では、発声直前吸気時、起声時、発声中で、胸部食道内圧および胃内圧の両方に圧差を認めており、胸腹部を用いた発声を行っていることが証明された。また、母音クレシェンドでは、呼気努力の様式の個人内差違、および個人間差違が存在したことも明らかとなった。

研究成果の概要（英文）：To use manometry, expiratory effort can be evaluated. Also use accelerometer and manometry, and a vocal function testing device allowed us to evaluate continuous changes in voice intensity and airflow during crescendo vocalization. In addition, in successful cases of crescendo vocalization, significant differences were observed in both the thoracic esophageal pressure and the gastric pressure at the peak of inspiration immediately before vocalization, at the time of vocalization, and at the peak of the sound pressure level during vocalization. However, in the failed cases, the sound pressure level when starting the voice was high. It was also revealed that there are intra-individual and inter-individual differences in expiratory effort.

研究分野：音声

キーワード：呼気努力 喉頭抵抗 胸腔内圧 腹腔内圧 皮膚加速度レベル

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

大声発声は、声帯ポリープや声帯結節などの器質性音声障害、過緊張性発声障害などの機能性音声障害の両方の発症に関与するため、大声発声を含む音声酷使は音声障害の最大の主因であると言える。しかしながら、大声発声を習慣的に行う人の全てが音声障害を発症するわけではない。このことは、音声障害の発症リスクには個人差が存在することを示しているが、その個人差を決定する要因は、学問上において未だ明らかとはなっていない。

しかしながら、日常において、「お腹を使って声を出す」、および「のど詰め発声」などの表現が使用されていることから、腹筋を用いた呼気努力、および喉頭閉鎖の程度が、発声様式の適切性に関与していること、および、発声時には、喉頭閉鎖の強化よりも腹筋収縮の強化を優先すべきであることが、一般の人々に受け入れられていることが理解できる。にもかかわらず、これまで耳鼻咽喉科診療においては、音声障害を有する患者の診療において、声帯の病変を観察することはあっても、発声中の腹筋収縮を介した呼気努力の強さ、および喉頭閉鎖の程度を評価することはあまり行われてこなかった。

またこれらの要因を客観的に評価する検査方法も未確立であった。特に呼気努力の強さの評価に関して、従来の発声機能検査においては、持続母音発声中の音圧レベル、平均呼気流量、および声門下圧の同時測定が行われてきたが、平均呼気流量、および声門下圧ともに、呼気努力と喉頭抵抗により決定される二次的な変数であり、呼気努力の程度、および喉頭抵抗の程度を評価することはできなかった。これらの問題に対して、本検討では、発声中の腹筋収縮を介した呼気努力の評価のために、胸部食道内圧、および胃内圧を測定するため、消化管内圧計を導入し、大声発声中の、音声の強さの増大が、呼気努力の強さ、および喉頭閉鎖の程度のどちらに優位に依存するのかを評価しうる検査法を開発することを試みた。

2. 研究の目的

(1) 大声発声時に、腹筋収縮を介した呼気努力の程度、および喉頭閉鎖の程度(喉頭抵抗)を同時、かつ連続的に評価できる方法を開発する

(2) 健常者、および、音声酷使を背景に発症する音声障害を有する患者を対象に、大声発声時の音圧レベルの増強が、腹筋収縮の程度と喉頭閉鎖の程度(喉頭抵抗)のいずれに優位に依存しているのか、そのバランスを評価する

(3) 音声訓練法であるハミングを用いた場合に、上記のバランスが即時的にどのように変化するのかを検討する

(4) 音声障害の発症リスクが高い学校教師・幼稚園教諭・保健師を対象に、上記のバランスの優位性を、現在の嘔声の有無により分類した2群間で比較する

3. 研究の方法

(1) 嘔声のない健常人を対象に、発声機能検査装置、頸部表面加速度計、電気声門図(あるいは光電声門図)、消化管内圧計を用いて、音響エネルギー量・胸腔/腹腔内圧・声門下圧・呼気流量・声門閉鎖時間率を同時かつ連続的に記録するための条件設定を行う。次に、記録された上記変数と基とする呼気努力/喉頭閉鎖のバランスの評価方法を確立する。

(2) 嘔声のない健常人、声帯ポリープ/結節症例、声帯に病変のない過緊張性発声障害症例あるいは誘発した過緊張発声を対象として、通常母音の持続母音発声時の上記の評価指数を比較する。

(3) 通常母音の持続発声時とハミング発声時の間で比較する。

(4) 音声障害の高リスク者を対象者として、上記指数を比較する。

4. 研究成果

(1) COVID-19 大流行の影響

最初に、従来の発声時呼気動態の評価方法である発声機能検査装置との比較を行うために、本科研費を使用して永島医科器械製の発声機能検査装置 PS-3000 を購入した。しかしながら、2020年3月より始まった COVID-19 大流行の影響により、メーカーの担当者との面談の機会を持てなかったために機器選定が遅れ、また発注後もメーカーにおいて発声機能検査装置の製造に大幅な遅れが生じたために、2022年1月ようやく発声機能検査装置が納入された。その後、健常被験者5例に、声を徐々に大きくしていくクレシェンドタスクを施行させ、音圧レベル・平均呼気流量を同時、かつ連続的に評価できることを確認した。次に、健常者15例を対象に、5回ずつのクレシェンド発声タスクを行わせた際の発声機能検査装置と消化管内圧計の同時記録にも成功した。

また特に COVID-19 大流行開始直後は、ソーシャルディスタンスの遵守のため、大声発声のタスクを施行しての発声機能検査は、研究参加者への感染を誘発する危険性があるために施行が困難であった。また発声機能検査装置が導入された2022年においても、所属施設の感染コントロールチームより、耳鼻咽喉科診療、および検査施行時に、個人防護具のフルを着用することが義務づけられ、大声発声を行う発声機能検査装置の使用に関しても、密閉された防音室で、計測者

が個人防護具のフル着用して行うことが義務づけられ、研究の遂行が困難となった。その後、2023年5月のCOVID-19の5類移行以降制限が緩和されて、ようやく防護服なしでの計測が可能となった。

(2)口型に依存しない音圧レベル評価法の確立のための予備実験

騒音計を使用して発声中の音圧レベルを計測する場合、音圧レベルの計測値は口の大きさに依存するため、母音発声時とハミング発声時の間で差が生じる。また発声機能検査装置を使用する際には、筒をくわえながら発声するため、発声機能検査装置を使用しての発声時と通常の母音発声時との間で音圧レベルを比較することが困難となる。これらの問題に対して、母音発声時とハミング発声時との間の比較、発声機能検査装置の有無間での比較を可能にするために、頸部表面加速度計の信号より算出されるskin acceleration level (SAL)と、音圧レベル(SPL)を比較する研究を行った。その結果、呼吸努力を一定に保ったまま口型をスムーズに変化させて母音/a/と母音/u/を繰り返した際、あるいは母音/e/とハミング/m/を繰り返した場合、SPLは変化する一方でSALは変化しないことが示された(図1)。また母音/e/で徐々に呼吸努力を強めて声の強さを徐々に高めた場合(母音クレシェンド)、あるいは母音/e/をいろいろな強さで発声した場合のいずれにおいても、SPLとSALはほぼ線形的な関連性を示したことが明らかとなった(図2)。さらに発声中に頸部運動を行った場合、SPLは変化しない一方でSALは、頸部前傾時などの頸部皮膚の弛緩により減少し、一方、頸部後傾時などの頸部皮膚の伸展により増加することが示され、頸部皮膚の物性により影響を受けることが明らかとなった(図2-2)。

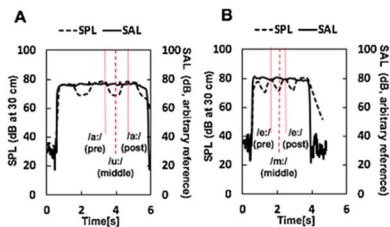


図1 口型を滑らかに変化させた時のSPL/SALの変化

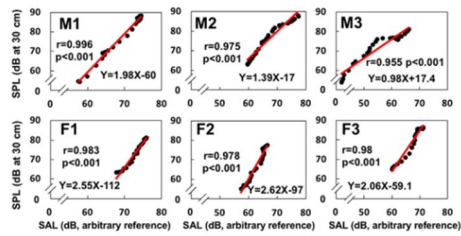


図2 母音クレシェンド施行中のSPL/SALの変化、および相関性

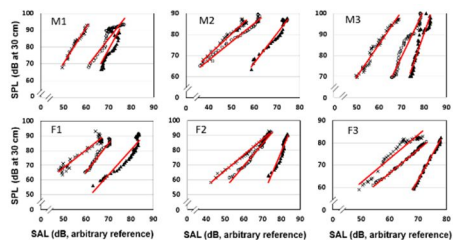


図2-2 ×: 頸部前傾時 ○: 自然体 ▲: 頸部後傾時

(3)消化管マノメトリーを使用した呼吸努力の評価のための予備実験

4チャンネルの圧センサーを備えたプローブを経鼻的に挿入し、下咽頭、頸部食道、胸部食道、胃に各圧センサーを位置させ、浅い呼吸、続いて深い呼吸を施行させた時の消化管内圧の変化を図3に示す。

	Pressure value (mmHg)		
	(n=10)		
	P _{eso}	P _{eso}	P _{ga}
呼吸後安静時	-3.2 ± 4.0	-5.2 ± 3.4	5.8 ± 3.0
吸気中ピーク値	-7.0 ± 5.2	-10.8 ± 4.6	20.0 ± 21.8

表1 浅い呼吸中の消化管内圧の極小・極大値

健常者10例を対象とした呼吸直後の安静時、および吸気中の圧のピーク時における胸部食道内圧(Pt-eso)/胃内圧(Pga)の平均値はそれぞれ-5.2/5.8mmHg、および-10.8/20.0mmHgであり、これより、Pt-eso、およびPgaはそれぞれ胸腔内圧、および腹腔内圧を反映しているものと考えられた(表1)。次に母音/e/を発声しながら声の強さを徐々に大きくしていくタスク(母音クレシェンドタスク)を行った際の圧を連続的に記録したところ、Pt-eso、およびPgaは、それぞれ-5~-10mmHg、および6~20mmHgの範囲で変化した。しかしながら、ほとんどのサンプルにおいて、消化管内圧の変化に、何らかの非定型的変動が含まれていた(図4)。図4左上は下咽頭内圧(Ppha)、および頸部食道内圧(Pc-eso)の計測値の大きな離散を示しており、声帯の振動が近接した下咽頭、および頸部食道の粘膜を振動させ、直接圧センサーに影響を与えたものと考えられた。図4右上はPgaの急激な一過性上昇を示しており、消化管蠕動によるものと考えられた。

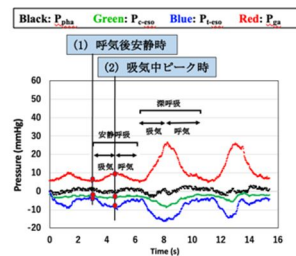


図3 浅い呼吸、および深い呼吸を行った際の消化管内圧の変化

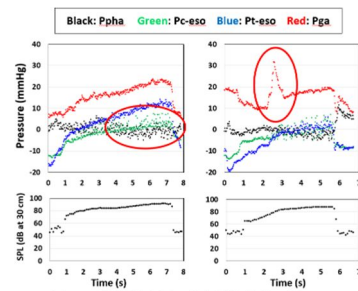


図4 消化管内圧の非定型的変化の例

(4)健常話者を対象にした母音クレシェンドの成功・失敗サンプルの比較

母音クレシェンドタスクの成否と判定する条件について、音圧レベルの漸増、80dB SPL以上の十分な増大、15dB SPL以上の増加を3条件を満たした場合を「成功」と定義し、図5に認められるような急激な増大、不十分な増大、不整な増大のいずれかが認められれば「失敗」と判定するよう定義を行った。

健常者19例に母音クレシェンドタスクを施行させて得られたサンプルより、前項(3)の消化管蠕動に起因すると考えられるPt-eso、およびPgaの一過性上昇が含まれるサンプルは除外し、

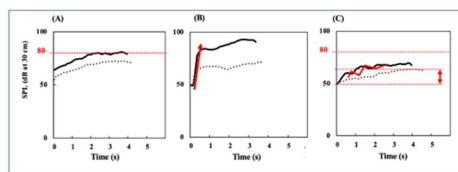


図5 母音クレシェンドタスク施行の失敗の3型 (A)不十分な増大, (B)急激な増大, (C)不整な増大

結果として 27 サンプルが採用となり、11 例が成功、16 例が失敗と判定された。図 6 が示すように、発声開始直前の圧のピーク時、起声時、母音クレシェンドタスク施行中の SPL のピーク時の 3 点における計測値を抽出し、成功サンプルと失敗サンプルの間で比較したところ、発声直前吸気時の胃内圧、および横隔膜間

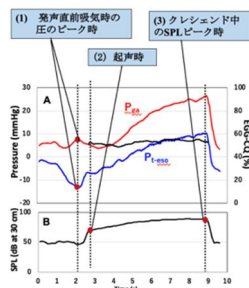


図6 母音クレシェンドタスク施行中の消化管内圧・音圧レベルの変化

圧(Pt-eso、および Pga の差: 横隔膜の作用を反映)は失敗例の方が有意に低く、起声時の SPL は失敗例の方が有意に大きく、また起声時の Pga は失敗例の方が有意に低く、SPL ピーク時の Pga は失敗例の方が有意に低く、声帯接触時間率が有意に低いことが明らかとなった (表 2)。以上の結果より、失敗例においては、吸気前の横隔膜、および腹筋群の収縮が弱いこと、および、起声時・発声中の腹筋群の収縮が弱いこと、さらに起声時に、声帯振動を開始させるための呼気努力が不足しているために、代償的に喉頭抵抗依存性に SPL が増大していることが示唆された。

Time point	Success/ Failure (n=11/16)	Variable				
		SPL (dB at 30cm)	EGG-CQ (%)	Pt-eso (mmHg)	Pga (mmHg)	Ptrans (Pga-Pt-eso) (mmHg)
発声前吸気 ピーク時	Success (n=10)	×	×	-13.5±4.3	34.9±26.7	48.4±30.1
	Failure (n=14)	×	×	-12.8±3.0 **	11.0±6.3 **	23.8±6.6 **
起声時	Success (n=11)	65.3±1.6	43.0±9.8	-7.9±3.2	17.9±10.7	25.8±12.0
	Failure (n=16)	70.5±6.0 **	45.7±7.5 **	-4.8±4.1 **	11.0±8.9 *	15.8±9.2 *
SPLピーク時	Success (n=11)	86.7±3.9	58.2±3.5	3.3±2.3	33.9±16.3	30.6±15.8
	Failure (n=16)	83.8±7.6 **	52.5±10.6 *	5.5±5.0 **	21.7±4.2 **	16.2±5.8 **

表 2 母音クレシェンドタスク施行中の音圧レベル・声帯接触時間率・消化管内圧の、タスク施行成功、および失敗サンプル間の比較

(5) 健常話者を対象にした母音クレシェンドタスク施行中の呼気努力の様式の個人内安定性の検討

前項の(4)の検討においては、対象者 1 例に対して記録するサンプル数を明確にしておらず、タスクが聴覚的に上手く遂行できていて、かつ非定型的な圧変化が含まれていない波形が得られるまで記録を続けていた。その結果、最終的に対象者毎の採用されたサンプル数が 0~4 となり、大きな幅が生じた。そこで対象者毎の記録サンプル数を可能な限り一定にするために、また母音クレシェンドタスク施行時の消化管内圧の変動パターンの個人内の安定性、および変動の実態について検討を行った。また同時に個人間差違の実態についても検討を行った。

健常者 5 例を対象に、母音クレシェンドを 6 回ずつ行わせ、うち 3 例の Pt-eso、および Pga の変化を示したものが図 7 である。その結果、Pt-eso は 3 例全てにおいて、滑らかに漸増している一方、Pga の変化の様式には明確な個人差が認められ、症例 1 では母音クレシェンドタスクの施行中に漸増していたが、症例 2/3 においては発声直前に一過性の増大が認められ、また症例 2 においては、タスク施行中の圧の変動が大きく、一方、症例 3 においては増大が乏しかった。また同一個人内において、発声前の一過性の Pga 増大は、症例 1 で 6 回中に 2 回、また症例 2/3 では 6 回中 3 回認められ、個人内でも差違が大きかった。

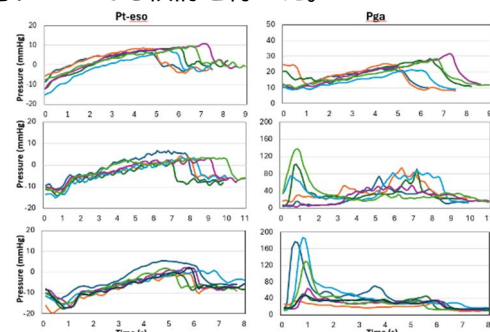


図7 症例毎の母音クレシェンド複数回施行時の胸腔内圧・胃内圧の変化
上段: 症例1、中段: 症例2、下段: 症例3

これらの結果より、症例 1 は、腹筋群の収縮の増強により Pt-eso を増大することで、声帯振動の駆動力としての肺胞内圧を増大させていたことが示唆され、また症例 2/3 においては、他の要因、例えば肋間筋の収縮などにより Pt-eso を増大させていることが推測された。また症例 1 では Pt-eso は約 10mmHg まで達していたが、症例 2/3 においては、Pt-eso の最高値は約 5mmHg であった。以上より、結論として、母音クレシェンドタスク施行中において、呼気努力の様式の個人内差違、および個人間差違が存在することが明らかとなった。以上の結果は未発表である。特に Pga の変動パターンに関して、症例 1 のように理想的に漸増していき、それに伴って横隔膜の受動的挙上を介して Pt-eso が増大していく、理想的な「漸増型」、症例 2 のように、Pga は増大しているものの変動が大きく、横隔膜の不安定な挙上により Pt-eso が揺れを伴う「有効性に乏しい腹筋群収縮型」、また症例 3 のように、Pga の増大に乏しい「腹筋群収縮不足型」が認められた。おそらく、対象症例数を増加させれば、さらに多くの「型」が存在する可能性が高い。今後、健常話者の症例数を増やして、母音クレシェンドタスク施行中の腹筋群収縮の関与の個人差の様式の多様性について定性的に明らかにし、その後、定量的に解析可能な評価方法の確立を目指す。

今回の科研費の目標は、大声発声時の呼気努力と喉頭閉鎖の程度のバランスを検討することであったが、COVID-19 の大流行により研究の進行に大幅な遅れを生じ、現在、健常話者の呼気努力の評価法の確立に関しても道半ばの状態となった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Umatani Masanori, Ogawa Makoto, Iwahashi Toshihiko, Hosokawa Kiyohito, Kato Chieri, Inohara Hidenori	4. 巻 36
2. 論文標題 The Feasibility of a Neck-Surface Accelerometer for Estimating the Amount of Acoustic Output During Phonation Regardless of the Difference in the Mouth Configuration	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Voice	6. 最初と最後の頁 297 ~ 308
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jvoice.2020.06.002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Umatani Masanori, Ogawa Makoto, Hosokawa Kiyohito, Kato Chieri, Okajima Eri, Iwahashi Toshihiko, Inohara Hidenori	4. 巻 S0892-1997(21)
2. 論文標題 Skin Acceleration Levels Estimated by a Neck-surface Accelerometer during Phonation Are Affected by The Mechanical Properties of The Anterior Cervical Skin	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Voice	6. 最初と最後の頁 00111-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jvoice.2021.03.016	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Umatani Masanori, Ogawa Makoto, Hosokawa Kiyohito, Kato Chieri, Okajima Eri, Iwahashi Toshihiko, Inohara Hidenori	4. 巻 37
2. 論文標題 The Feasibility of Gastroesophageal Manometry for Continuously Evaluating the Degree of Expiratory Effort During Successful Crescendo Phonation	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Voice	6. 最初と最後の頁 470.e7 ~ 470.e16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jvoice.2021.02.001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Umatani Masanori, Ogawa Makoto, Hosokawa Kiyohito, Kato Chieri, Okajima Eri, Iwahashi Toshihiko, Inohara Hidenori	4. 巻 -
2. 論文標題 The Feasibility of Gastroesophageal Manometry for Continuously Evaluating the Degree of Expiratory Effort During Successful Crescendo Phonation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Voice	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jvoice.2021.02.001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Umatani Masanori, Ogawa Makoto, Hosokawa Kiyohito, Kato Chieri, Okajima Eri, Iwahashi Toshihiko, Inohara Hidenori	4. 巻 -
2. 論文標題 Skin Acceleration Levels Estimated by a Neck-surface Accelerometer during Phonation Are Affected by The Mechanical Properties of The Anterior Cervical Skin	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Voice	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jvoice.2021.03.016	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------