

報告番号	甲 第 14068 号
------	-------------

主 論 文 の 要 旨

論文題目 声帯およびボイスプロステーシスによって形成される流動場構造と空力音に関する実験的研究
(Experimental Study on the Flow Field Structure and Aerodynamic Sound formed by the Vocal Cords and Voice Prosthesis)

氏 名 小迫 誠弥

論 文 内 容 の 要 旨

空気（流体）の乱れに起因して発生する音は空力音と呼ばれ、人間の発声において重要な役割を担っている。人間の発声において声の伝播元となる原音が生成される器官は喉頭であり、喉頭内の組織である声帯が肺からの呼気流を受けて振動し、呼気流を乱すことで原音が生成されると考えられている。そのため、病気等が原因で喉頭を摘出した場合、声を失うこととなる。こうした患者が音声を再獲得する手法として近年最も期待されているのがシャント発声法である。シャント発声法では、喉頭の代わりとなる一方弁（ボイスプロステーシス）を気管-食道間に挿入する。発声時にはボイスプロステーシスを通して肺からの呼気流を食道に送り込み、呼気流が食道（下咽頭）を振動させることで原音が発生すると考えられている。シャント発声法は他の代替発声手法に比べて自然に近い声を出せ、習得が容易といった利点を持つ。しかし、音声の明瞭度において十分な満足度を得られているとは言えず、そもそも音声再獲得が行えない事例もある。そこで、人間本来の発音器官である喉頭とボイスプロステーシスにおける空力的な音源生成メカニズムの特徴を比較し、より自然な声を再現できるボイスプロステーシス開発のための指標を得ることが重要である。

本研究では、喉頭およびボイスプロステーシス周囲の流動場構造の特徴と流れが原音を生成するメカニズムを解明することを目的として実験的検証を行った。喉頭内の声帯振動

を再現したモデル下流およびボイスプロステシスを挿入した気管-食道モデル内の流れを対象に、Particle Image Velocimetry (PIV) を用いた流速測定によって各モデル周囲に形成される流動場構造の時間・空間的な性質を明らかにした。声帯モデルの振動およびボイスプロステシス弁の挙動についても光学的な測定を行い、流動場構造と振動する開口部の関連性を調べた。空力音基礎方程式の解析解である Ffowes Williams-Hawking の理論 (FW-H 式) に基づいて測定流速場から音圧を推定し、マイクロホンによる実測音圧との比較を行うことで、各モデルからの発生音において支配的な音源要因をそれぞれ特定した。また、流体の回転運動の大きさを評価する値である Q 値を用いて流れから渦構造を抽出し、モデル周囲の圧力変動と併せて統計的に整理することで支配的な音源に関連する流動場構造について考察を行った。最後に全体のまとめとして喉頭とボイスプロステシスにおける音源生成メカニズムの比較を行った。論文は全 6 章で構成される。各章の概要を以下に示す。

第 1 章では、喉頭およびボイスプロステシスにおける流れと発生音に関する既往研究について調査を行った。喉頭については自励振動する声帯周りの流れから発生する音の支配要因およびそれに関連する流動場構造が実験的に明らかとなっていない。ボイスプロステシスについては経験的に流体との発生音の関連性が示されながらも、流れが下咽頭・食道を振動させるメカニズムや具体的な音源生成機構だけでなく、ボイスプロステシス下流の流動場構造自体についての知見がない。これらの背景を踏まえた上で、本研究の目的および論文の構成について述べた。

第 2 章では、空力音の理論および各章で共通する実験手法についてまとめた。流体の基礎式から空力音の理論 (Lighthill 方程式) を説明し、移動物体周りの Lighthill 方程式の解析解である FW-H 式を導出した。また、各章で共通する実験の概要および解析パラメータの詳細について記した。実験の精度に関する基礎的な検証として、PIV 測定で流体の可視化に用いるオイル (DEHS) の本研究におけるトレーサー粒子としての妥当性を確認した。また、マイクロホン測定位置における音と流れの影響について説明した。

第 3 章では、喉頭で原音が生成されるメカニズムについて実験的な考察を行った。喉頭では声帯振動に影響を受けた流れに起因した種々の音源要因が混在しているが、喉頭発生音として最も支配的な要因およびその音源要因に関連した流動場構造が実験的に明らかになっていない。そこで、声帯振動を模して自励振動する声帯モデル周囲の流れを対象として、声帯モデル発生音における支配因子を調査した。ステレオ PIV およびトモグラフィック PIV を用いて測定した声帯モデル下流流速場およびハイスピードカメラで画像撮影した声帯モデルの振動解析から FW-H の式に基づいて音圧を推定した。推定された音圧とマイクロホンによる実測音圧は定量的に一致しており、各音源要因のうち、空力音源から推定される音圧が他の音源からの推定音圧に比べて非常に大きいことがわかった。よって、声帯モデル下流流動場中の渦構造からの直接的な音が発生音として支配的であることが明らかとなった。声帯モデル下流近傍では流速および流れの中の渦構造の Q 値強度が声帯モデ

ルの振動と同じ周波数で時間的に変動しており、同領域の圧力を大きく変動させ、音波を発生させると考えられる。一般的に流れの中の渦構造からの発生音は四重極音に分類され、大きな音を発生させないとされるが、声帯モデルの流れでは下流近傍の渦構造のみが局所的に Q 値を増大し、四重極子を構成する音源間に強度差が生じるために、四重極音に加えて単極音や双極音が加わることで大きな音が発生していると考えられる。

第 4 章では、シャント発声時にボイスプロステシス (Provox® Vega) 周囲に形成される流動場構造およびその流動場構造を生む要因を明らかにすることを目的とした。シャント発声の声質とボイスプロステシス周囲の流動場の関連性は示唆されているが、実際に流速測定を行った事例はない。そこで、ボイスプロステシスによって変調される最も基礎的な流れとして開放系におけるボイスプロステシス周囲の流れを対象に PIV を用いて空間流速測定を行った。光学的に測定したボイスプロステシスの時間周波数解析との比較から、呼気流量範囲内の流量を印加すると、ボイスプロステシスの弁はシャント発声の音声の周波数に近い周波数である 100 Hz 付近で振動することが確認され、この弁の構造的影響を受けた結果としてボイスプロステシス下流の流れは上下に波打つような分布となり、弁近傍の流速が局所的に大きく時間変動することがわかった。呼気流量範囲外では、ボイスプロステシス弁は振動しないため、流速に周期的な変動は確認されず、分布も通常に定常噴流に近い形となる。また、呼気流量条件において、ボイスプロステシス周囲から流速の時間変動と同じ周波数の大きな発生音が確認され、流量の増加に伴い音圧は増加し、基本周波数は高周波へシフトすることがわかった。そこで、FW-H 式に基づいて測定流速分布から音圧を推定した。その結果、呼気流量条件ではボイスプロステシス下流の流れの渦構造から、弁振動の基本周波数 (100 Hz 付近) と同じ基本周波数の直接音が発生することがわかった。呼気流量条件におけるボイスプロステシス下流の渦構造分布は、振動する噴出口近傍の渦構造の Q 値強度が時間的に変動するという第 3 章の声帯モデル下流の渦構造分布の特徴と高い類似性を持ち、大きな音を発生させる。呼気流量範囲外では弁が振動せず、流れに局所的な Q 値変動を生まないため、流れからの発生音は四重極音となり、音としての効果は小さくなったと考えられる。

第 5 章では、シャント発声における原音が生成されるメカニズムについて実験的考察を行った。シャント発声では、ボイスプロステシスを通過した呼気流が食道粘膜を振動させることで原音が生成されることが考えられているが、この具体的なメカニズムは明らかではない。また、第 4 章で確認されたボイスプロステシス下流の流れ自体からの直接音の寄与も知る必要がある。そこで、シャント発声時にボイスプロステシス下流の流れが食道壁に及ぼす影響および食道内で発生する音 (シャント発声における原音) の支配要因を明らかにすることを目的とした。ボイスプロステシスを設置した食道セクション内の流れを PIV を用いて測定し、ポアソン方程式を解くことで食道セクション内の圧力分布を計算した。流速分布および圧力分布の空間・時間的な特徴の比較から、ボイスプロステシスの弁振動に起因して、時間的に流速が変動する主流の流れが食道壁面に衝突して時間変動

する強いせん断領域を生み出し、衝突位置付近の食道壁面にボイスプロステシス弁の振動周波数と同じ周波数の圧力変動を与えることがわかった。これがシャント発声時に食道壁が振動するメカニズムであり、食道壁面がボイスプロステシス下流の流れから受ける圧力変動が音源になることが示唆される。測定流速場から **FW-H** の式に基づいて推定した音圧とマイクロホンによる実測音圧の比較から、呼気流量範囲において、食道セクション内から発生する音の主要因は、ボイスプロステシス下流の流れが食道壁面との衝突位置に与える圧力の時間的な変動から発生する音であり、その周波数はボイスプロステシス弁の振動周波数に依存することがわかった。ボイスプロステシス弁の細かな振動周波数は流量条件によって決まるが、全体としてシャント音声で報告されている値と同じ 100 Hz 付近の値をとる。また、ボイスプロステシス下流に形成される渦に起因した渦放出周波数帯（高周波数）の音も発生することが示唆された。

第 6 章では、各章で得られた結果を総括し、喉頭とボイスプロステシスにおける原音生成機構の比較を行った。双方ともに振動する開口部を通過することで下流の流れに局所的な流速変動が生じ、発生音および流速変動は開口部の振動周波数と同じ周波数を得ることは共通するが、音の発生要因および関連する流動構造が異なることを示した。また、声帯とボイスプロステシス弁は流量に対する振動周波数の依存性が異なる。これらの違いが通常の発声とシャント発声の音声の違いを生む要因であると考えられる。