

氏名・(本籍)	JORGE CARLOS LUCERO (アルゼンチン)
学位の種類	博士 (工学)
学位記番号	工博甲第 88 号
学位授与の日付	平成 5 年 3 月 24 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
研究科・ 専攻の名称	電子科学研究科 電子応用工学専攻
学位論文題目	THE DYNAMICS OF THE VOCAL FOLD OSCILLATION (声帯振動の力学)

論文審査委員

(委員長)

教授	野 飼 享		
教授	水 品 静 夫	教授	鈴 木 久 喜
教授	後 藤 敏 幸	教授	森 田 信 義
教授	松 田 孝		

## 論 文 内 容 の 要 旨

本論文では、胸声における声帯振動について、従来取り扱っていなかった大振幅振動まで一般化して考察し、解析的にその振動力学を明らかにしている。

論文は 8 章で構成している。

第 1 章では、研究の動機と目的が紹介され、また、その構成が概略されている。

第 2 章では、声帯モデルを構築するために、声帯の生理学や声帯振動の主な特徴、従来の声帯振動の観測結果や測定値などの研究を紹介している。つぎに、従来の振動理論および主な力学モデルについてその功罪を議論し、声帯振動の力学を完全に明らかにするためには、まだ、大振幅振動に関する解析的研究が必要であることが結論された。

第 3 章では、声帯振動の解析のために、新しい力学モデルが提案されている。そこでは、振動における声門の開閉運動パターンを生理学観測結果に忠実に表現するため、声帯を 2 自由度の厚板によって表わし、声帯の内組織に（筋肉、靭帯）の粘弾性は厚板を下刃と上刃に維持する線形ばねとダッシュ・ポットによって表わす。また、両声帯の衝突を表現するため、声帯の表面組織（上皮、粘膜）を表すばねとダッシュ・ポットを厚板上に加えている。声門の空気力学は低い振動周波数を仮定し、声門上・下の負荷を無視して誘導されている。厚板モデルの運動方程式は、数値計算の結果、モデルの振動が従来の実験値と一致し、実際の声帯振動をよく表現できることが示されている。

第4章では、振動における平衡点とその分岐現象が解析されている。初期平衡点以外に、もう1つの平衡点が開声門時に存在することが発見された。各平衡点の安定性がその特性方程式によって調べられ、3つの分岐が発見された：すなわち、2つの平衡点に関連する振動のリミット・サイクルを起こすホップ分岐と、両平衡点の交代分岐である。この結果は分岐図によって説明され、従来モデルになかった声帯振動の振る舞いを明らかに示している。振動の領域は両ホップ分岐が限定するリミット・サイクルの存在領域として得られる。初期点に関連するホップ分岐から必要な最低声門下圧が存在することがわかる。また、2つ目のホップ分岐が声帯の下刃のスチフネスが上刃のスチフネスより高いことが必要であることを指し、これによって、振動領域が従来知見より狭いことが明らかにされている。

第5章では、声門の開閉運動パターンによる呼吸流の作用が解析されている。まず、小振幅振動時、呼吸流が負性減衰をもつ要素として働き、この負性減衰が声帯組織の減衰に打勝つときに振動が発生することが示される。この条件より、必要な最低声門下圧の単純な方程式が誘導される。また、上記のスチフネスの大小関係が声門の開閉運動パターンを決める条件であることが明らかにされている。つぎに、大振幅振動時の非線形現象を解析し、振動発生後の振動最低維持声門下圧の減少は、呼吸流の負性減衰が振動振幅とともに増加することによって説明されることを見いだした。さらに、声門下圧の増加による振動周波数の増加は、従来の声帯組織の非線形弾性に基づいた説明に加えて、呼吸流の作用が正スチフネスの要素も含み、またこのスチフネスが声門下圧、および振動振幅とともに増加することによって説明されることを見いだした。

第6章では、声帯振動における呼吸流から伝達されるエネルギーと声帯組織の減衰で損失するエネルギーの平衡を解析し、エネルギーの観点からも振動発生とそのリミット・サイクルの存在を示している。

第7章では、従来の説として云われた声門に存在する空気力学負性抵抗の振動への関係が見直され、負性抵抗の存在領域が振動領域とは全く異なることを見つけ、振動の負性抵抗説が疑問視されることを指摘している。

最後に、第8章では、本論文の主な結果が要約され、また将来の研究方向が提案されている。

## 論文審査結果の要旨

本論文では、胸声発生時の声帯振動について、大振幅振動まで一般化して力学的に解析したものである。

論文は8章で構成している。

第1章では研究の動機と目的が紹介され、また、その構成を概説している。

第2章では、声帯の新力学モデルの構築のため声帯の生理学や観測結果を調べる。従来の学説についてその功罪を議論して大振幅振動時の解析の必要性を結論する。

第3章では、声帯力学モデルを提案。声帯を2自由度の厚板とし、内組織の粘弾性は厚板の下刃と上刃に付けた線形ばねとダッシュ・ポット、声帯の衝突時に働く表面組織はばねとダッシュ・ポットとする。低周波、声門上・下の負荷を無視の条件で、厚板モデルの運動方程式をたて、数値計算により式の有効性を検証している。

第4章では、このモデルを使い、振動の平衡とその分岐現象を解析する。初期平衡点以外に、もう1つの平衡点が開声門時に存在すること、3つの分岐があることが発見された：すなわち、振動のリミットサイクルを起こす2つのホップ分岐と、両平衡点の交代分岐である。分岐図から、初期点に関連するホップの分岐から振動発生に必要な最低声門下圧が存在すること、また、2つ目のほっふ分岐から声帯の下刃の stiffness が上刃の stiffness より高いことが必要であることが誘導され、振動領域が従来知見より狭いことを明らかにしている。

第5章では、①呼吸流は小振幅振動時には負性減衰要素として働き、この力が声帯組織の減衰力に打勝つときに振動が発生しこの条件が最低声門下圧を決定、②上・下刃の stiffness の大小条件が声門の開閉運動パターンを決定、③大振幅振動時の振動を保つ最低声門下圧の減少は振動振幅の増大とともにこの負性減衰の増大が要因、④声門下圧の増加に伴う振動周波数の増加は従来説の声帯組織の非線形弾性に加えて、声門下圧および振動振幅の増大とともに呼吸流作用の stiffness の増加が要因、など従来事実の理論的確認や新知見を結論している。

第6章では、声帯振動における呼吸流から伝達されるエネルギーと声帯組織の減衰で損失するエネルギーの平衡を解析し、エネルギーの観点からも振動発生とそのリミットサイクルの存在を裏付けている。

第7章では、声帯振動の従来の呼吸流の負性抵抗説を見直し、負性抵抗の存在領域は声帯の振動領域とは全く異なるので、負性抵抗説は疑問であると指摘している。

最後に、第8章では、本論文の主な結果を要約し、また将来の研究方向について提案している。

以上のように、声帯の生理学的運動知見に想を発する厚板モデルの提案と検証から、比較的簡潔な力学的解析から大振幅時の現象に関する多数の新事実を発見・現象の説明をすることができたことは、音声発生機構の学門領域に対して寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。