

A NUMERICAL SIMULATION OF SOUND PRODUCTION IN THE VOCAL TRACT

メタデータ	言語: en 出版者: 静岡大学大学院電子科学研究科 公開日: 2008-04-17 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 陸, 成湘 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10297/1721

氏名・(本籍)	陸 成 湘 (中 国)
学位の種類	博 士 (工 学)
学位記番号	工博甲第 87 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	A NUMERICAL SIMULATION OF SOUND PRODUCTION IN THE VOCAL TRACT (声道内音声生成の数値シミュレーション)

論文審査委員	(委員長)			
	教授	後 藤 敏 幸		
	教授	鈴 木 久 喜	教授	福 田 明
	教授	深 林 太計志	助教授	中 山 顯

論 文 内 容 の 要 旨

音声波形の生成構成は音源の生成、声道の形による調音、口唇または鼻孔からの放射 3 つの作用に分離して考えることができる。さらに、電気・音響系の対応関係により電氣的な等価回路でモデル化することができる。本論文は、数値解析法（有限要素法と有限体積法）を用い、音声生成における音源、声道の伝達特性および口唇の放射特性を考察した。

声道中の音波の伝搬において 4～5 kHz 以下の周波数帯域では、声道を、断面積がほぼ連続的に変わっている 1 次元音響管と考え、分布定数系として扱うのが適当である。この時、音波の伝搬は平面波とみなすことになる。しかし、5 kHz 以上の高い周波数に対しては、声道外形による声道の音響伝達と放射特性の変化について検討する必要がある。また、音源に関しても、これまでは声帯振動と声門流との相互作用などについての検討はまだ不十分である。

本研究は、これらの問題点を数値解析法で考察した。まず、異なる環境気圧、空気密度および壁インピーダンスなどによって声道内の正中断面上の音場に対する影響を定性的に検討した。声道内の正中断面上の音場を声道の 2 次元有限要素モデルで模擬し、その結果、普通の発声の場合、壁振動による影響はわずかであるが、潜水時の発声の場合（31 気圧）、この影響はより大きいことが分かった。5 kHz 以上の周波数領域では、高次モード音波の伝搬が確かめられた。これらは従来から現象論的には知られていたことであるが、本数値解析により明確に裏付けられたことになる。

複雑な断面形状を持つ声道の伝達特性は、上述の2次元有限要素モデルだけでは定量的に評価できないので、3次元有限要素モデルを用いて声道断面形状による口腔内音場と伝達特性の変化を検討した。これにより、高周波数領域において、平面波モードの他、高次モード音波が励起され、複数モードの音波が伝搬していることを声道内音圧の分布などで明らかにした。また、高次モード音波の励起と伝搬に対して、声道断面形状の影響が無視できないことを明らかにした。

従来の電気等価回路モデルは低周波数領域で有効性が確認されたものの、約5 kHz以上の高周波数領域においては高次モード音波の伝搬によって、声道伝達特性に種々の変化が生じ、電気等価回路モデルでは十分対応できないことが分かった。

次に、放射および声道伝達特性に対する唇形状の影響を有限要素法により検討した。母音/a/とi/を発する時の3次元声道有限要素モデルで、声道伝達特性と声道内外音圧の分布に対する唇形状の影響を評価した。唇放射インピーダンスを無限大パッフル中の円形ピストンの等価放射インピーダンスで近似できるのは低周波数領域のみであり、約2 kHz以上の周波数領域においては、唇の放射面の曲がりと唇近傍の非平面波の伝搬などの影響が現れ、等価放射インピーダンスで近似したモデルのホルマント周波数は実際より低くなっている。母音/a/の場合、第三ホルマントは85 Hz低くなり、また母音/i/の場合、第三、第四ホルマントはそれぞれ約250 Hz、125 Hz低くなることがわかった。唇形状の影響は平面放射口を持つ管で近似できるが、この管の最適長さは唇の部分の長さの1/2であることを確認した。また、高周波数領域においては口の放射面上の音圧の分布が一様ではなくなるので、無限大パッフル中の円形ピストンの放射モデルでは十分対応できないことが分かった。

声道の音響伝達と放射特性のほか、音声生成における重要な部分は音源を生成する声門流の働きである。本研究では、声門流れに対する声門の動き及び声門形状による影響を有限体積法でシミュレーションした。声門流を直接的な方法で測定することは現在の測定技術では殆ど不可能なので、本研究ではダイナミックな3次元の喉頭有限体積モデルを構成し、有限体積法によって、粘性、非圧縮性のナビエーストークス方程式を解き、気圧の分布および声門流れの変化などを求めた。その結果、声門下圧の増加または声帯振動周波数の減少とともに、声門流れに渦が多く発生するようになり、渦による気圧の変動によりは音源に影響を及ぼすことを明らかにした。声帯が振動することによって、声門体積流の波形が右に傾き、声帯振動周波数の増加とともに、この傾向が強くなることを示した。またこのように声門体積流の波形が変化することによって、音源の周波数スペクトルがどのように変わるかを検討した。

声門流に関して従来行われていた声門のスタティックモデルと比べ、本研究ではじめて導入した声門のダイナミックモデルにより、声帯振動の気圧分布に与える影響は無視できず、声帯の形状も声門体積流と気圧分布に一定の影響を与えていることを明らかにした。石坂らの理論式と比べ、本研究で有限体積法を用いて求められた声門体積流の波形は声帯振動の影響を受け、理論式より更に右に傾いていることが分かった。

論文審査結果の要旨

本論文は、最近めざましく進歩しつつある数値計算の技法を用い、発声器官の主要部である声道と声帯の音響波動と空気流について行った研究結果を述べている。

論文は九つの章と付録からなる。第1章は序論である。第2章では音波の基本方程式である3次元Helmholts方程式の有限要素解析法を導入し、著者の開発した算法を付録で述べている。第3-5章は声道伝達特性に関する章である。まず人間の声道模型を使って実測された口腔内音圧の分布と本計算による結果を比較し、両者が酷似している事を確認した。さらに声道壁のインピーダンス、呼吸気体の圧力と密度などの影響で声道壁面の振動量が変化し伝達特性も変化する事を示した。これらにより著者の算法が音声に十分適用できる事を示した。第4章では声道の断面形状が音声に及ぼす影響を検討した。従来の音響学における声道モデルでは軸方向への1次元平面波伝搬が仮定され、断面形状は無視されていた。しかし実際の声道断面は複雑であり、軸方向以外のモードの波動が生じた場合伝達特性について全く未知であった。本研究ではこの問題に対して、実際の母音発声時の声道と同じ断面形状とし、断面形状を円形、楕円形、弓形の3種類に単純化して3次元波動を求めた。その結果、楕円や弓形のように軸方向と直角な方向の寸法が大きい場合、5 kHz以上では高次モードの波動が生じ、甚だしいときは伝達特性に深い谷が生ずる事が示された。これは一般に伝達関数に極しかなないとされる母音型の声道でも高次モードによって零点が惹起され得る事を具体的に示したものであり、極めて重要な発見である。第5章では唇の形が音響放射に及ぼす影響を検討している。

第6-8章では声門部を通る気流について述べている。声門流を直接観測する事は現在の音響測定技術では不可能であり、本研究のような計算音響学的検討が不可欠である。声帯の振動しないステティックな2次元気流を取り扱った研究はすでにあるが、本研究は声帯振動を伴うダイナミックな3次元モデルを取り扱っている点で画期的である。気流としては粘性・非圧縮性を仮定し、3次元Navier-Stokes方程式を有限体積法で解いている。声帯上下端の開口面積が等しい様声門と、上下で位相の異なる振動をする非一様声門について、流れのパターン、声門部の気圧、体積流などを検討した結果、従来の声門気流のモデルでは不十分であり、3次元ダイナミック非一様声門モデルが必要なが示された。第9章は結論で結果の要約と今後の課題を述べている。

本論文において著者は、従来見落とされあるいは困難なために省略されていた音声現象に対して数値シミュレーション法を武器として果敢に取り組み、新しい事実の発見と手法の有用性を示した。本研究で得られた知見の価値は高く、今後の音声の研究に対して大きな刺激を与える。よって博士(工学)の学位論文として合格と認める。