

## 学位論文題名

## 喉頭付近における物理現象の3次元数値解析に関する研究

## 学位論文内容の要旨

発声能力は人間にとって、基本的かつ重要な能力の一つである。人間の意思伝達の手段である言語の主たる表現方法である「話す」という動作はこの発声能力によって生成される音声を紹介して行われる。従って音声は、人間にとって極めて重要で且つ基本的な意思伝達路であると言える。さらに、人間は、音声によって相手を識別したり、音声を介して、相手の性別、年齢や感情といった情報を得ることが可能である。このように人間のさまざまな情報を伝達する媒介として重要な音声を時間や空間の隔たった点で再現することは、人間に実に様々な利益をもたらす。現在の我々は、その実例として電話や様々な録音再生装置による恩恵を享受している。また、音声を機械によって作ったり、理解したりすることも多くの利益を我々にもたらすであろう。実際にこれまで、このような技術実現の努力がなされてきた。

1960年代までに、音声の生成機構は、音源の生成、声道の形による調音、口唇または鼻腔からの放射の3つの作用に分離して考えられることが明らかになった。1970年代には、今日の音声処理技術の基礎となる2質量モデルやPARCOR分析法が提案された。前者は、音源を生成する声帯の振動を説明する有力なモデルであり、後者は、音声波形を分析し声道の伝達特性を分析する有力な手法である。1980年代以降、これらの研究成果の工学的応用として、音声合成、音声認識といった技術が可能となってきた。今日では、計算機の性能の向上により、これらの技術は、小規模な個人向け計算機上でも実現可能となっている。しかしながら、現在、1970年代に行なわれた主に1次元の近似モデルによる技術の成果は合成音の自然性や、音声認識の認識率に限界をもたらしていると考えられる。従来のモデルが近似のために切り捨ててきた部分にも、重要な要因が含まれていると考えられるのである。今日、合成音の自然性や、音声認識の認識率の向上のために、音声生成機構を解明し音声生成系のモデルを再構築することが求められていると言える。

従来、音声生成機構を解明するために、カメラなどにより発声の状態を観測する研究が行なわれている。しかし、音声の生成は主に人体の内部で行なわれるために、直接観測することは困難を伴う。現象を支配する方程式の解を計算機を用いて求め、その現象を計算機上で模擬する数値シミュレーションは、このような観測に困難を伴う場合には、有力な方法の一つである。このような試みの1つとして、声門部付近の空気の流れを、有限要素法を用いて数値解析する研究が行われている。しかし、この研究は2次元空間について行われたものである。さらに実体に近い現象について知るためには、3次元空間における解析が不可欠である。3次元解析は2次元解析に比べ扱うデータ量が増大し、困難が予想される。従って、まず、有限要素法によって音声生成系、特に喉頭付近で生じる声帯の振動や空気の流れといった物理現象を3次元解析するための基礎的な研究が期待される。

本研究では、音声生成過程における物理現象を有限要素法によって解析するために、その前処理として必要な有限要素メッシュの作成方法について検討する。また、声帯付近の空気の流れを解析するためのソルバ、声帯の挙動を解析するためのソルバの開発し、声帯振動の3次元数値解析の可能性を探る。

本論文は、全7章より構成されている。以下に各章の概要を述べる。

第2章では、本研究と関わりの深い他の研究について触れ、本研究が果たす役割について検討する。音声の生成過程を解明する研究は、さまざまな学問分野の複合的な領域に属している。歴史的な経緯から、音声生成過程は主に、1次元でモデル化され、特に、電気回路的な取扱いが多く行われている。しかしながら、音声の生成は、実際には空気流体力学の問題などを含む複雑な現象である。より基礎的な音声科学といった立場から、1次元モデルでは表現しきれない複雑な現象を解明しようとする研究が数多く行なわれており、同様の立場に立つ本研究の果たすべき役割や、期待される成果について議論される。

第3章では、音響問題を想定した2次元問題を例として、有限要素法の基本的な扱い方を説明する。空気の粘性損失を無視し、密度や、音圧変化が微小であると仮定すると、音響問題はHelmholtz方程式で表される。この方程式は、本論文で扱う他の方程式よりも簡単であり、特に、1次元の場合の解はよく知られているので、例題としてここで扱う。偏微分方程式の有限要素法による近似方程式を導く。

第4章において、新たに提案する3次元形状を有限要素へ分割する方法について説明する。音声生成系の複雑な形状について有限要素メッシュを作成する効率的な方法について検討する。実際に、口腔部のレプリカ形状に対して、この方法を適用して有限要素に分割した結果、上記の要件を満たす有限要素メッシュを作成法であることが確認できた。一方、形状が大きく変化する部分の形状境界近くに、計算精度を劣化させる潰れた要素が生じる可能性があることがわかった。

第5章において、声帯付近の空気流れを解析することを想定して開発した空気流れについてのソルバについて検討する。特に、採用したあるごリズムにおいて数値計算の収束を促す係数の定め方について検討を行っている。この係数の定め方は2次元問題の場合より難しく、数値計算を収束させることはできなかった。3次元における非定常非圧縮粘性流れ解析は難しく、実現のためには様々な要素、計算法について検討する必要がある。

第6章では、声帯の振動現象を再現することを想定して開発した、弾性体の挙動を解析するソルバについて検討する。6面体要素を用いることにより計算を安定に行なえることがわかった。単純化した声帯形状についてのシミュレーションから、境界条件に設定によって再現される現象が変化し、その設定によっては、2次元問題では扱えない状況がある可能性が示された。また、声帯を押し上げるだけの力だけでは、声帯の周期的な開閉は生じない、すなわち、空気流から受ける力を考慮しなければ、声帯の周期的な開閉が導かれないということがわかった。

第7章では、これまでの章を総括し、本研究の成果について要約している。さらに残された課題について述べる。

以上、本論文では、音声生成過程における物理現象を有限要素法による解析に、適した有限要素メッシュの作成方法について提案した。また、声帯付近の空気の流れを解析するためのソルバ、声帯の挙動を解析するためのソルバの開発し、声帯振動の3次元数値解析を試みた結果について報告している。

## 学位論文審査の要旨

主査	教授	永井信夫
副査	教授	小川吉彦
副査	教授	栃内香次
副査	教授	小柴正則
副査	助教授	三木信弘

### 学位論文題名

## 喉頭付近における物理現象の3次元数値解析に関する研究

音声は、人間にとって極めて重要で且つ基本的な意思伝達路であると言える。人間は、音声によって相手を識別したり、音声を介して、相手の性別、年齢や感情といった情報を得ることが可能である。このように人間のさまざまな情報を伝達する媒介として重要な音声を時間や空間の隔たった点で再現すること、すなわち、音声の合成や認識の研究は工学上重要であり、今日では、計算機の性能の向上により、小規模な個人向け計算機上でも実現可能となっている。しかしながら、現在、1970年代に行なわれた主に1次元の近似モデルによる技術の成果は合成音の自然性や、音声認識の認識率に限界をもたらしていると考えられる。従来モデルが近似のために切り捨ててきた部分にも、重要な要因が考えられ、今日、合成音の自然性や、音声認識の認識率の向上のために、音声生成機構を解明し音声生成系のモデルを再構築することが求められている。

著者は音声生成過程解明を目的として、音声生成過程における物理現象の有限要素法による3次元解析について基礎的な研究を行なった結果について述べている。

従来、音声生成機構を解明するために、カメラなどにより発声の状態を観測する研究が行なわれている。しかし、音声の生成は主に人体の内部で行なわれるために、直接観測することは困難を伴う。現象を支配する方程式の解を計算機を用いて求め、その現象を計算機上で模擬する数値シミュレーションは、このような観測に困難を伴う場合には、有力な方法の一つである。このような試みの1つとして、声門部付近の空気の流れを、有限要素法を用いて数値解析する研究が行われている。しかし、この研究は2次元空間について行われたものである。さらに実体に近い現象について知るためには、3次元空間における解析が不可欠である。3次元解析は2次元解析に比べ扱うデータ量が増大し、困難が予想される。従って、まず、有限要素法によって音声生成系、特に喉頭付近で生じる声帯の振動や空気の流れといった物理現象を3次元解析するための基礎的な研究が期待されている。音声生成過程における物理現象の有限要素法による3次元解析はほとんど例がないため、まず、前処理として必要な有限要素メッシュの作成方法について検討がなされている。また、声帯付近の空気の流れを解析するためのソルバ、声帯の挙動を解析するためのソルバを開発し、声帯振動の3次元数値解析の可能性について議論してい

る。以下にこの3点について要約する。

本論文では3次元形状を有限要素へ分割する方法について新たに提案し、音声生成系の複雑な形状について有限要素メッシュを作成する効率的な方法について検討し実現している。実際に、口腔部のレプリカ形状に対して、この方法を適用して有限要素に分割した結果、その計算精度を劣化させる潰れた要素が生じる可能性があることを明らかにしている。

次に声帯付近の空気流れを解析することを想定して開発した空気流れについてのソルバについて検討がなされている。特に、採用したアルゴリズムにおいて数値計算の収束を促す係数の定め方について検討を行っている。この係数の定め方は2次元問題の場合より難しく、数値計算を収束させること困難であることが明らかにされている。3次元における非定常非圧縮粘性流れ解析は難しく、実現のためには様々な要素、計算法について検討する必要があることを明らかにしている。

声帯の振動現象を再現することを想定して開発した、弾性体の挙動を解析するソルバについて検討が行なわれている。6面体要素を用いることにより計算を安定に行なえることが実験により確認されている。単純化した声帯形状についての3次元シミュレーションが行なわれその結果から、境界条件の設定によって再現される現象が変化し、その設定によっては、2次元問題では扱えない状況がある可能性が示されている。また、声帯を押し上げるだけの力だけでは、声帯の周期的な開閉は生じない、すなわち、空気流から受ける力を考慮しなければ、声帯の周期的な開閉が導かれないことを示している。

以上のように、著者は、音声生成過程における物理現象の有限要素法による3次元解析を試み、音声生成系の解析に適した有限要素メッシュ作成法を新たに提案し、さらに、3次元形状が音声に与える影響について新知見を得るなど、音声信号処理および電子工学に寄与するところが大きい。よって著者は、博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。