

早稲田大学スポーツ科学部、教授

誉田 雅彰

「発声力学に基づくタスクプランニング機構の  
構築」

研究期間：平成10年12月1日～平成15年11月30日

## 1. 研究テーマ

- (1) 研究領域 : 脳を創る
- (2) 研究総括 : 甘利俊一
- (3) 研究代表者 : 誉田雅彰
- (4) 研究課題名 : 発声力学に基づくタスクプランニング機構の構築
- (5) 研究期間 : 平成10年12月～平成15年11月

## 2. 研究実施の概要

本研究は、人間の発声力学系と発声運動制御系に着目して、音声生成過程の生理的、力学的、及び音響的な機構に関するモデルを解明・構築するとともに、これら発声系のモデルを基に発声運動計画機構に関する数理モデルを構築することにより脳における音声情報生成処理系を明らかにし、音声の生成メカニズムに基づく音声情報処理の基礎技術を確立することを目的として進められた。

発声動作は発声器官の運動にとどまらず、口の構え（声道）の形成とそれに伴う声道内の流体音響現象を介して言語情報として聴覚に受容される音響信号を生成する人間固有の動作である。本研究では、まず運動から音響に至るまでの階層的なタスク構造に着目し、発声系の力学的環境を変化させる発声動作摂動実験に基づいて発声動作の運動タスクの所在、および触覚や聴覚による感覚フィードバックが発声動作に及ぼす影響を実験的に明らかにする研究に着手した。そのために、発声中に下顎に力学的外力を加える下顎摂動実験装置、および口蓋の形態を瞬時に変化させる口蓋摂動実験装置を新たに構築し、発声時に摂動外力を与えた時に生じる発声補償動作の解析により、発声動作の運動タスクが個々の発声器官の位置制御ではなく、より上位の声道の局所的な形態の形成、さらには発声される音声の音響的特徴であることが明らかになった。また、感覚フィードバックの抑制効果が、通常の発声環境下では生じず、摂動環境下でのみ生じることから、発声力学系及び音響系に関する脳内の内部モデルに基づいて運動計画が行われていることが示唆された。

次に、これらの実験的結果を踏まえ、運動より高いレベルの運動タスクから発声動作を生成する運動計画モデルの研究に着手した。まず、発声動作の階層的なタスク構造に着目して、声道の局所的形態を運動タスクとして発声器官の協調動作を生成する運動計画モデルを提案した。この運動計画モデルでは、入力される言葉の記号列（音素列）に応じて、各音素の声道の局所的形態（例えば、「ば」の発声では口唇を閉鎖する動作）を発声運動タスクとして指定し、発声動作軌道のなめらかさ基準が最大となる最適な運動軌道が決定される。次に、このモデルをさらに発展させ、音声の音響的特徴を運動タスクとする統計的発声運動計画モデルの研究を進めた。その中で中心的な課題は、発声器官の位置、あるいは声道形状と音声の音響的特徴との間に存在する1対多の非決定性の問題を解消することであった。そのた

め、隠れマルコフモデル（HMM）によって発声動作の動的な振る舞いを表し、発声動作から音声が生産されるまでのプロセスを非線形な確率動的モデルとして定式化し、この確率的音声生成モデルを基に所望の音声スペクトルを与える発声動作の統計的最適推定値を決定する手法を確立した。これにより、これまで困難とされてきた子音を含む連続音声からその発声動作を決定する逆問題に対して大きな前進を果たすことができた。また、これらの音声生成過程の数理モデルを考案したことにより、音声生成に基づく音声情報処理の基盤技術が確立され、音声合成や音声認識への応用に向けた新たな展開を可能にした。

次に、発声動作を捉える視点をより発声系の実体に即したものとするため、発声生理系、力学系、音響系の3つの側面で発声系の実体モデルの構築、及び実体モデルに基づく発声運動計画モデルの構築に向けて研究を展開した。

発声系モデルの構築に向けての基礎データの収集を図るため、MRI観測と磁気センサー観測技術を開発した。MRI技術としては、新たに開発したMRI受信コイルによる発声系の複雑な筋配置を可視化する技術、MRI画像処理により発声器官の個々の筋の配置と筋長を非侵襲で測定する技術、同期撮像法による発声動作の可視化技術を開発し、また磁気センサー観測では、毎秒250コマの高時間分解能で発声動作を観測する技術を開発した。

シミュレーションモデルに関しては、柔らかい組織で形成される舌・唇の弾性体の機構に着目し、筋収縮によって運動を生成する発声力学系の生理モデルを構築した。このモデルでは、弾性体である舌や唇を多質点のバネ・マスモデルで表し、各ノードに筋肉モデルを配置し、筋の収縮に応じた弾性体の大変形を安定かつ比較的少ない計算時間で生成する方法を見出した。また、MRIデータを基に、舌、唇、及び顎の3次元構造を模擬した3次元モデルとして構築した。さらに、MRI断層画像から得られる3次元の声道形状から声道内の音響現象を再現する3次元声道音響モデルを構築し、これまでの1次元音響モデルでは捉えられなかった音声生成の音響現象を明らかにした。

一方、これらの計算機モデルをさらに発展させ、音声生成の物理音響的な現象を模擬する実体モデル（発話ロボット）の構築を進めた。発話ロボットの指針として、人と同じように肺から送り出される空気によって生じる声帯振動機構、空気流体によって生じる子音の音源生成機構、舌、唇など大きなかつ速い変形を伴う弾性体の制御機構を設定し、連続音声の発声を機械的に実現することを目標として開発を進めた。構築された発話ロボットは19自由度を有し、ピッチ及び有声・無声調整機能をもつ声帯、多様な舌や唇の形態を模擬する発声器官によって構成されている。全ての発声器官を模擬したトータルシステムの構築は初めての試みであり、また弾性体の機械制御機構に関する基盤技術の確立など、音声科学のみならずロボット工学における新たな方向性を示すことが出来た。

これらの発声系モデルと運動計画モデルを融合させ、話し手の声を真似て発声する聞き真似発声機構の構築を進めた。発声生理モデルでは、音声から発声動作を推定し、さらに運動

からモデル発声器官の筋収縮力を推定することにより、話し手の声を真似て発声するための発声器官の筋への運動指令を計画する機構を構築した。また、発話ロボットと運動計画モデルを融合することにより、話し手の声から話し手の発話動作を推定し、これを初期値として音響タスクを目標としたヤコビアン制御により発話ロボットの駆動パラメータの制御する手法を開発し、聞き真似発声機能を有する自律形発話ロボットを構築した。

#### (a) 運動計画グループ

感覚フィードバック修正を伴う発声力学摂動実験系を構築し、発声運動タスクの所在を明らかにするとともに、発声器官の運動レベルから音声の音響レベルに至る物理的なプロセスに関する脳内の内部モデルに基づいて発声運動計画が行われていることが示唆された。また、これらの実験的結果を踏まえ、内部モデルとして確率的な音声生成モデルを想定し、これを基に音声タスクから発声器官の動作生成、さらには筋収縮（運動指令）を生成する発声運動計画モデルを構築し、発声力学系に基づく聞き真似発声機構を実現した。

#### (b) 生理機構グループ

MRI 及び磁気センサシステムを用いた新たな発声機構の観測技術の開発するとともに、MRI を用いて発声時の舌筋の配置と長さ、舌の立体形状、喉頭の関節運動を観測し、母音発声時の舌の筋活動や喉頭の調整機構など発声メカニズムに関する新たな知見を得た。また、これら発声時の発声器官の3次元形態データ、筋の配置データは、発声生理モデル、声道音響モデル、発話ロボットを構築する上での基礎データとして活用された。

#### (c) モデリンググループ

人間の発声機構の実体を模擬する精密なモデルを構築することを目標として、発声生理モデル、声道音響モデル、及び発話ロボットの構築を行った。これらのモデルは、いずれのモデルも従来のモデルと比べてより人の発声系の実体を反映したモデルとなっており、音声科学、さらには人を模した音声合成の研究を進める上での重要な基盤技術を提供した。また、発話ロボットの構築に際しては、弾性体を用いて人工声帯や人工舌、唇を実現しており、大きな変形を伴う弾性体の機械制御という歩行ロボットなどの筋骨格系のロボットとは異なる新たなロボット工学の視点から研究を推進した。

### 3. 研究構想

#### 研究目標

本研究は、人間の発声力学系と発声運動制御系に着目して、音声生成過程の生理的、力学的、及び音響的な機構に関するモデルを解明・構築するとともに、これら発声系のモデルを基に発声運動計画機構に関する数理モデルを構築することにより脳における音声情報生成処理系を明らかにし、音声の生成メカニズムに基づく音声情報処理の基礎技術を確立することを目的とする。

#### 研究計画・進め方

- (1) 発声動作のタスクの階層構造に着目し、発声環境を外部から変化させる力学的摂動実験装置を構築するとともに、摂動実験を基に発声動作の運動タスクの所在を解明する。また、感覚フィードバックを抑制した状況下で、摂動に対する補償動作の適応化プロセスを調べることにより、発声運動計画において感覚情報果たす役割を明らかにする。これらの実験結果を発声運動計画モデルに反映させる。（運動計画グループ）
- (2) 運動より高い声道、あるいは音響レベルに発声運動タスクを設定し、運動タスクを達成する発声動作の運動軌道生成モデルを構築する。当初は、運動計画モデルを発声系の運動・音響モデルの上で動作させ、次に発声生理モデルの上で動作させる。これにより、音響タスクから筋への運動指令を特定する運動計画モデルを構築する。（運動計画グループ）
- (3) 言語情報以外のパラ言語情報が発声動作に及ぼす影響を、磁気観測システムを用いて計測した発声動作データの分析によって明らかし、その結果を基に多様な感性をもった音声を発声モデルによって実現する。（運動計画グループ）
- (4) MR I を用いて発声器官の筋配置及び筋長を測定する技術をMR I データの画像処理を中心に開発する。また、磁気センサによる3次元発声動作観測手法の基本原則、アルゴリズムを開発する。さらに、MR I 観測に基づき新たな発声生理系の機構を明らかにする。（生理機構グループ）
- (5) 人の発声系の実体を模擬する計算機モデルを、発声生理力学モデルと声道音響モデルについて構築する。発声生理力学モデルでは、特に舌や唇など大きな変形を伴う弾性体のモデル化に重点を置き、安定かつ現実的な計算量で個々の筋の収縮力から発声時の舌や唇の変形、及び運動を模擬するモデルの構築を図る。また、声道音響モデルでは、MR I 観測によって得られる声道の3次元形状を基に3次元声道音響モデルを構築し、これまでの1次元波動モデルとの違いを明らかにする。また、現実的な計算量でのシミュレーションを実現するため、有限要素法に替わる声道内3次元音響波動の計算法を開発する。（モデリンググループ）
- (6) シミュレーションでは再現し得ない発声時の流体音響現象を再現するため、発声系の機械モデル（発声ロボット）構築する。人間と同じように喉を震わせ口を動かして発声する発声ロ

ボットの構築を目指し、特に弾性体によって構成される声帯の自励振動機構や大変形を伴う舌、唇の機械的実現に研究の重点を置く。また、破裂音や摩擦音などの空気流体が引き起こす乱流音源を機械的に再現し、リアリティーのある音声の生成を目指す。さらに、運動計画モデルと融合することにより、聞き真似発声機能を有する自律形発話ロボットの実現を図る。  
(モデリンググループ)

## 新展開

発声力学系に関してはできるだけ実体に忠実なモデルを構築することを念頭に置き研究を進めてきた。一方、発声運動計画機構に関しては摂動実験を通して、脳内の発声運動計画機構をある程度推測することはできたが、モデル構築の際に想定した内部モデルの実態には未だ迫ることはできていない。研究の中で培ってきた摂動パラダイムと fMRI や Meeg などの脳観測を融合した実験を行うことにより、これまでに観測してきた摂動に対する補償動作の生じる仕組みや、感覚フィードバックに基づく補償動作の瞬時的な適応化の仕組みについて、より実体の解明につながることを期待できる。

また、これまでに構築した運動計画モデルをさらに発声機能の獲得モデルに発展させることが可能である、単音発声から連続発声への獲得のプロセス、さらには発声獲得の中での言語的な範疇化を視野に入れた研究の展開が期待できる。

## 4. 研究内容

### 4. 1 発声運動計画機構の解明（運動計画グループ）

#### (1) 実施の内容

発声環境を外部から変化させる摂動パラダイムを基に、発声動作の運動タスクの所在、発声器官の協調動作メカニズム、及び発声運動計画における感覚情報の機能を実験的に探索した。発声摂動実験は、発声中に下顎に力学的摂動を与える下顎摂動実験と口蓋の形態を瞬時に変化させる口蓋摂動実験について行った。

下顎摂動実験では、唇を使った発声時における唇・顎の協調動作メカニズムを明らかにすることを目的とした。ここでは、発声タスク中の顎運動を、外力によって阻害した時(摂動)、他の発声器官(唇)に起こる協調動作変化を観察し、そのメカニズムの考察を行った。

図 4-1-1 に本研究で新たに開発した顎摂動実験システム概要を示す。被験者の下顎は、被験者毎に作成する専用の顎固定器を用いて装置可動部に固定し、外力はその可動部を通してトルクモータを用いて与えた。このときモータ力の作用点を顎直下におき、摂動方向と顎運動方向を一致させた。これにより、過去研究と異なり顎を閉じる方向だけでなく開く方向にも摂動を加えることを可能とした(図 4-1-1 下)。また、モータと顎固定部の連結部をジンバル構造(図 14-1-1 下)にすることにより、摂動以外の被験者にかかる負荷力を軽減した。これらの要素技術により、装置装着時でも、子音を含めた発声動作がほぼ通常と同様に行うことができ、また任意のタイミングで顎摂動を与え、そのときの唇顎の運動、音声、筋活動を計測するシステムを構築した。

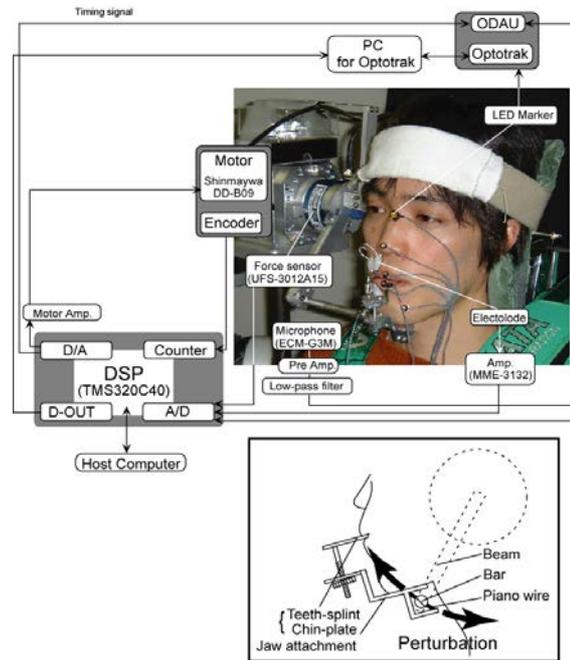


図4-1-1 下顎摂動実験システム概要

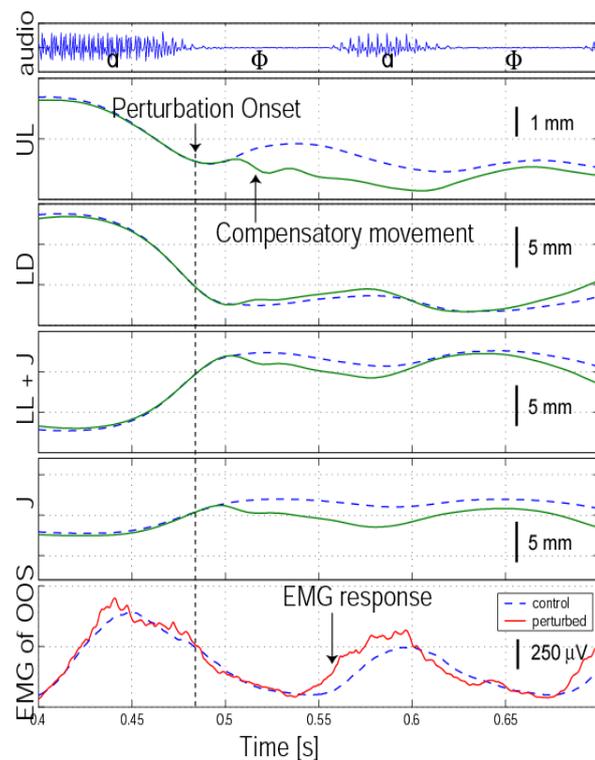


図4-1-2発声タスク/aΦaΦ/における音声、各発声器官[上唇(UL)，両唇間距離(LD)，下唇+顎(LL+J)，下顎(J)]，上唇筋活動の時間応答

図4-1-2に実験で得られた通常発声時の応答(青点線)と摂動時の応答(赤実線)を示す。このとき摂動力は、顎を開く方向にステップ状に加えた。唇音発声に向けた顎閉鎖運動を阻害すると(図2下から二番目), それに応じたすばやい補償動作が上唇に現れ(図4-1-2上から二番目), 結果として両唇間距離は一定に保たれ(図4-1-2上から三番目), 発声タスクが達成された。この補償動作は、約20 msで運動を開始しており、神経ループでは対応できない応答速度であった。上唇筋活動から反射的な応答(図4-1-2一番下)も確認したが、これも初期補償動作に比べ遅かった。これらは、初期補償動作が神経ループを用いた応答ではないことを示唆していた。この補償動作のもう一つの特徴として、母音発声タスクでは補償動作量が小さくなっており(図4-1-3), タスク依存性があった。さらに、顎を閉じる方向(いままでと反対の方向)に外力を加えた場合、上唇が上昇する補償動作が現れ、摂動方向に応じた特性も有していた。

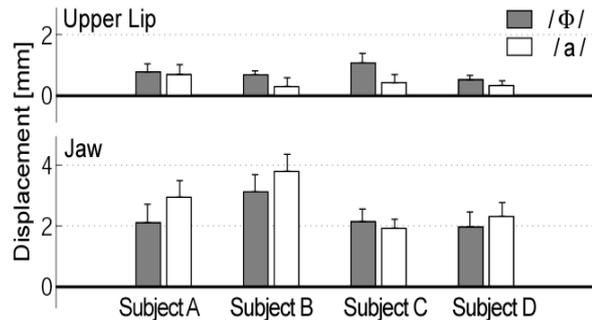


図4-1-3 唇音および後続母音発声時の摂動によって動かされた上唇・顎の変位量

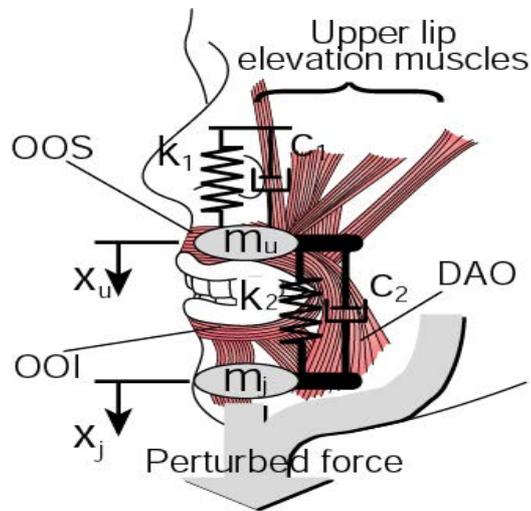


図4-1-4 上唇・顎モデル

この補償動作メカニズムを説明する仮説として、上唇と顎をつなぐ筋剛性調節に基づくメカニズムを提案した。これは、上唇・顎をつなぐ筋によって、下顎に働く外力が上唇に伝播され、補償的な運動変化が誘発されるというものである。このとき、唇音発声タスクでは両唇間の微妙なせばめが重要であることから、その達成、維持のため、上唇・顎間剛性は硬く調節され、母音発声タスクでは両唇間のせばめは特に重要でないことから剛性を柔らかく調節されるとし、これによって発声タスクに応じた応答の違いが誘発されたと考えた。また、補償動作方向は摂動方向に一致すると考えた。

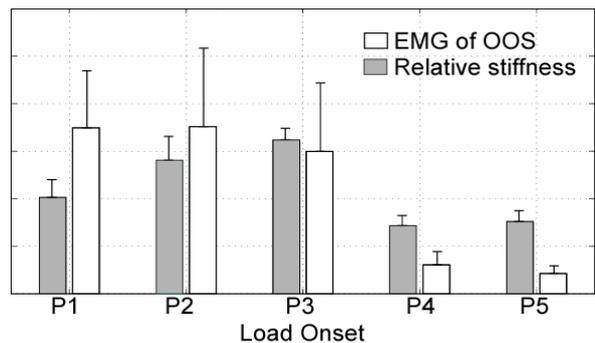


図4-1-5 推定した上唇・顎間剛性と上唇筋活動の時間変化

仮説検証のため、上唇・顎間の剛性推定を行った。まず、上唇・顎の筋結合の関係を機械要素(バネ・ダンパ)を用いてモデル化し(図4-1-4), その剛性力の釣り合い関係から上唇・顎間の剛性を

推定した。唇音発声から後続母音発声までの5時点(P1~P5)でそれぞれ剛性を推定したところ、唇音発声タスクでは硬く(図4-1-5 P2), 後続する母音発声タスクに向けて剛性が減少していた(図4-1-5 P4, P5)。そして、この剛性変化と上唇筋活動変化の間には高い相関関係があった(図4-1-5)。筋活動量は筋剛性を決めることから、筋活動量を発声タスク毎に調節して剛性を変化させていることを示唆する結果が得られた。反対方向摂動における応答に関しても同様の結果が得られた。

さらに、同モデルを用いたシミュレーションによって筋剛性による上唇補償動作の再現を行った。ここでは上唇・顎間剛性の時間変化を、別実験により同定された上唇の筋ダイナミクスを用いて上唇の筋活動データから推定した(図4-1-6)。結果として初期的な補償動作および、発声タスクに応じた補償動作の変化を再現することができた(図4-1-7)。以上の結果より、発声運動中において、発声器官をつなぐ筋の剛性が発声タスクに応じて調節され、その剛性力の大きさが補償動作において重要であることを示した。

一方、口蓋摂動実験では、発声時における触覚や聴覚などの感覚フィードバックのメカニズムを明らかにすることを目的とした。ここでは、発声中の感覚フィードバックを抑制し、口蓋(上顎)の形状を瞬時に変化させた時に生じる舌の補償動作を観察し、そのメカニズムの考察を行った。

図4-1-8に、本研究で新たに開発した口蓋摂動実験システムの概要を示す。アクリル素材のベースの上にゴム素材を貼り付けた人工口蓋を作成し、ベースとゴムの間にチューブを介して空圧をかけて風船上にゴムを膨らませることにより人工口蓋の形状を変化させた。(図4-1-9)

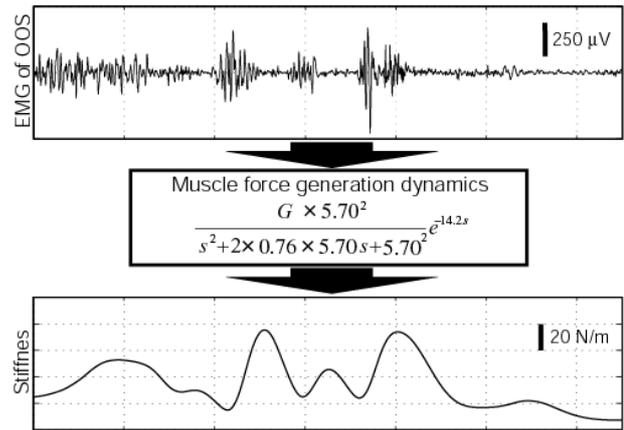


図4-1-6 筋ダイナミクスを用いた筋活動から剛性

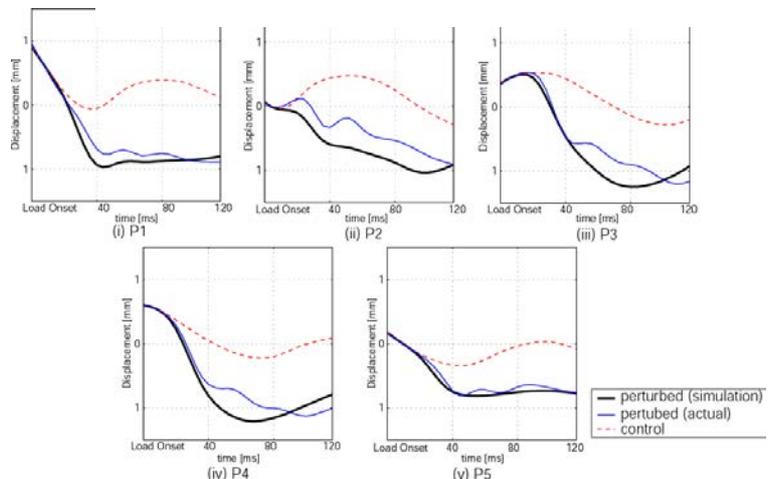


図4-1-7 唇音発声から後続母音までの異なる5時点(P1, P2, P3, P4, P5)における顎摂動による上唇応答シミュレーション



4-1-8 口蓋摂動実験システム概要

空圧制御はサーボ駆動のピストンシリンダを用いて制御し、被験者の直近に置かれた水圧・空圧変換ポンプを介して空圧を制御することで、発声速度と比較して十分に速い人工口蓋の形状変化を実現した。発声動作は、磁気センサーシステム（Electro-Magnetic Articulograph; EMA）を用いて計測した。EMA計測では、被験者の上下唇、下顎、及び舌上の4ヶ所に磁気センサを装着し、その位置を毎秒250回のレートで測定した。（図4-1-10） また、舌上に新たに作成した表面電極（直径3mm，厚さ1.5mm）を装着し、舌の筋電計測を行った。



図4-1-9 形状可変人工口蓋

図4-1-11に、「いや、あしゃしゃしゃ．．．しゃ」の発声における下顎(J)と舌(T1, T2, T3)発声動作と筋電位を、摂動がない場合とある場合で比較して示す。口蓋摂動は、EMAによって測定された下顎の位置と音声レベルをリアルタイムにモニタし、先頭の広母音「あ」の時点でランダムに与えた。これにより被験者は口蓋の変化をあらかじめ予測することはできず、「しゃ」の発声に向けて舌が口蓋と初めて接触した時点（図中の緑線）で始めて口蓋の形状変化に気づくことになる。口蓋摂動に対して舌が下方へシフトする補償動作は先頭音節「しゃ」の発声中に生じ、その後徐々に舌が後方にシフトする補償動作が観察される。下顎にはほとんど補償動作は認められなかった。また、舌が下降する補償動作に対応して舌の筋電位の上昇が認められ、この補償動作が運動指令を修正することにより生じる能動的な補償動作であることが示された。

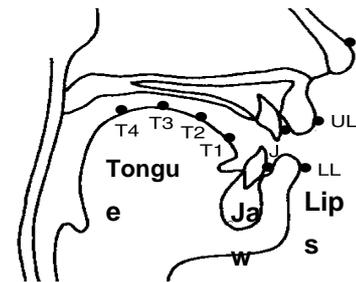


図4-1-10 磁気センサの配置

図4-1-11に、「いや、あしゃしゃしゃ．．．しゃ」の発声における下顎(J)と舌(T1, T2, T3)発声動作と筋電位を、摂動がない場合とある場合で比較して示す。口蓋摂動は、EMAによって測定された下顎の位置と音声レベルをリアルタイムにモニタし、先頭の広母音「あ」の時点でランダムに与えた。これにより被験者は口蓋の変化をあらかじめ予測することはできず、「しゃ」の発声に向けて舌が口蓋と初めて接触した時点（図中の緑線）で始めて口蓋の形状変化に気づくことになる。口蓋摂動に対して舌が下方へシフトする補償動作は先頭音節「しゃ」の発声中に生じ、その後徐々に舌が後方にシフトする補償動作が観察される。下顎にはほとんど補償動作は認められなかった。また、舌が下降する補償動作に対応して舌の筋電位の上昇が認められ、この補償動作が運動指令を修正することにより生じる能動的な補償動作であることが示された。

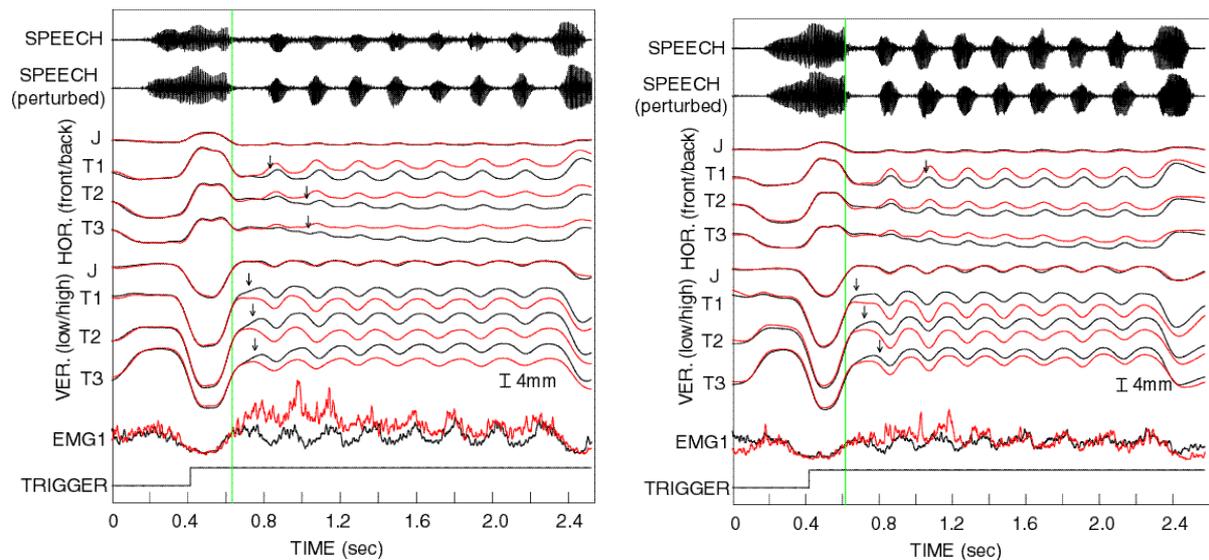


図4-1-11 口蓋摂動に対する補償動作と筋電位。黒線が摂動なし、赤線が摂動あり。触覚、聴覚フィードバックが正常の場合（左）と抑制した場合（右）

一方、舌と口蓋の触覚を表面麻酔により抑制し、かつ両耳に雑音を提示することにより発声音の聴覚フィードバックを抑制した場合、舌の補償動作は正常の感覚フィードバック時に比べて抑制され、また舌の筋電位にも顕著な違いは認められない。図4-1-12に、感覚フィードバックの抑制条件毎に、舌の補償動作に対する変位、時間遅れ、筋電レベルを比較して示す。これより、口蓋摂動を与えない通常の発声環境下では、触覚、聴覚のいずれの感覚フィードバックを抑制しても筋電レベルの違いは小さく（図4-1-12右）、また発声動作にもほとんど変化が生じず、正しい「しゃ」の発声が行われるのに対し、口蓋摂動により発声環境が変化した場合には、正しい発声のための補償動作を生じさせるために感覚フィードバックが必要であることが明らかになった。また、触覚と聴覚フィードバックでは補償動作が生じる時間遅れが異なり（図4-1-12中）、瞬時的に舌が下降する補償動作では、触覚フィードバックが優先的に寄与することが明らかになった。

これらの実験的結果から、発声の運動計画の仮説として、発声動作によって生じる触覚事象や音響的事象に関する内部モデルを脳内に持ち、内部モデルを基に感覚情報を達成するように発声動作を計画するメカニズムが示唆された。また、一旦内部モデルを獲得した環境下では感覚フィードバックはさほど寄与せず、ほとんど開ループ制御によって発声運動制御がなされているのに対し、摂動によって発声環境が変化した場合には、感覚フィードバックにより内部モデルの適応化がかなり短時間で達成されることが示唆された。

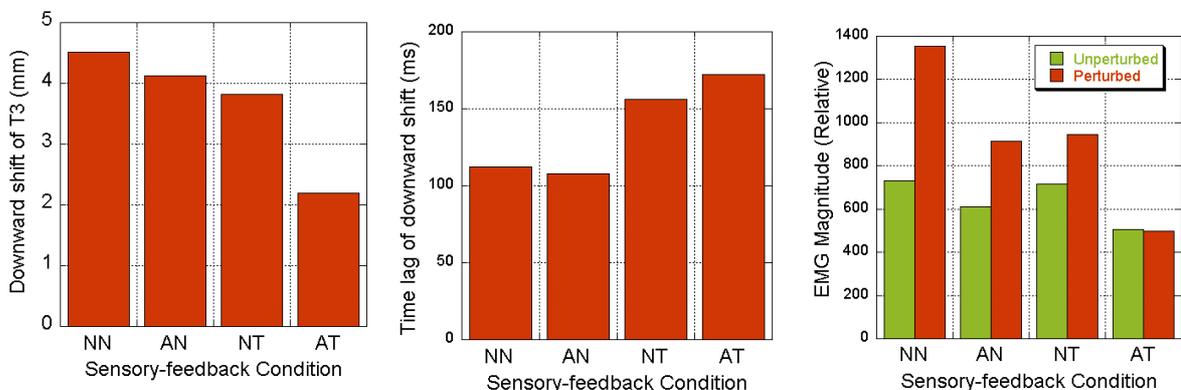


図4-1-12 感覚フィードバックが口蓋摂動の補償動作に及ぼす影響。

舌補償動作の変位（左）、補償動作の時間遅れ（中）、補償動作中の筋電レベル（右）

NN: 正常フィードバック AN: 聴覚フィードバック抑制 NT: 触覚フィードバック抑制

AT: 聴覚・触覚フィードバック抑制

## (2) 得られた研究成果の状況及び今後期待される効果

70, 80年代において、発声運動中に顎または下唇運動を阻害する実験が行われ、摂動による運動変化を補償する上唇補償動作が観測された。それらの補償動作に対応した筋活動応答から、神経ループを用いたフィードバックによるメカニズムが提案された。本研究で観測した補償動作は、神経ループによる応答では間に合わない早い応答であった。おそらく両者の補償動作はさらに別のメカニズムも含めて協働しており、階層的に発声運動を補償していると考えられる。発声器官の協調動作メカニズムは複雑であり、現在もなおその解明に向けて研究は続けられている。本研究では、補償動作メカニズムの一つについて仮説を与え、それを検証した。このような発話生成の制御メカニズムが明らかになることにより、発話学習や医療の分野において貢献すると考えている。人の運動において、個々の器官ごとに多くの研究がなされ、そのメカニズムは様々な仮説が提案されている。外界との相互作用や姿勢制御においては、四肢に関する研究から各器官の剛性調節の重要性が示されつつある。本研究では、発声時の唇・顎の相互作用において剛性調節が重要であることを示す結果が得られた。このことは、脳機能において、機械インピーダンス調節を運動制御方策の一つとして行っていることを示唆している。発声運動における脳機能において、脳部位の特定などさらなる研究を要するだろう。

一方、口蓋摂動のような発声系の形態を変化させる試みは、顎でバイトブロックを噛みながら発声する実験や様々な形の人工口蓋を装着して発声する実験など60年代より継続的に行われてきた。いずれの実験も静的に発声環境を変化させる摂動実験であったため、被験者が事前に発声環境の変化を知覚し、補償動作にかなり予測的な要素が含まれていた。また、顎摂動実験では、上記に述べたように補償動作のメカニズムとして神経ループ以外の剛性調節による受動的な要素を考慮する必要があるのに対し、形態摂動で生じる補償動作の多くは感覚フィードバックによるものと考えられる。その意味で、今回提案された口蓋摂動の実験パラダイムは、初めて動的な形態的摂動の補償動作に対する感覚フィードバックの役割りを明らかにした実験と考えている。観察された神経ループを介した補償動作がどのような脳内メカニズムで行われているのかを明らかにすることは、発声内部モデルの獲得のメカニズムを解明する上で有効な切り口になると考えられる。

## 4. 2 発声運動計画モデル (運動計画グループ)

### (1) 実施の内容

摂動パラダイムによる発声運動タスクに関する実験的結果を踏まえ、発声系の内部モデルに基づく発声運動計画モデルの検討を行った。

まず、下顎摂動実験結果を基に声道の局所的特徴を運動タスク (声道タスク) とする運動計画モデルを構築した。舌、唇、顎などの発声器官の協調動作によって達成される声道の局所的特徴 (タスク座標系) を発声動作空間の線形変換として表現し、タスク空間での音素内分散対発声動作空間での全分散の比が最小となるように線形変換を決定することによりタスク座標系を決定した。このように統計的に決定された運動タスクは、両唇と顎の協調動作によって達成される唇破裂音「ぱ」の口唇閉鎖や、舌体と舌尖と顎の協調動作によって達成される歯茎破裂音「た」の声道閉鎖など、声道の局所的特徴として明示的に表される運動タスクを包含した柔軟なタスク表現となっており、かつ運動タスクの重要度を分散比に基づいて決定できる特長を有している。次に、図4-2-1に示すように、指定された音素系列に応じて指定される声道タスクの時系列に対し、声道タスクを満たしかつ運動軌道の滑らかさ規範が最大となる発声動作を算出する発声運動軌道生成モデルを導出した。

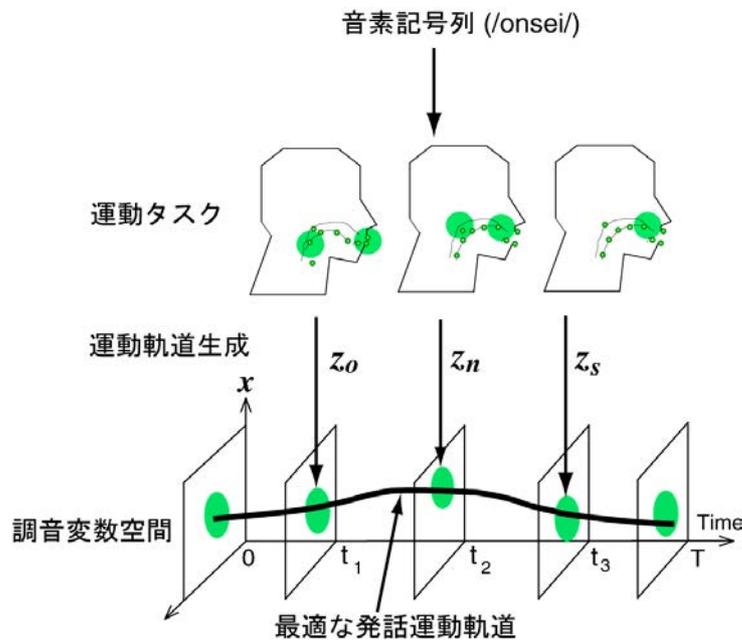


図4-2-1 声道タスクに基づく発声運動計画モデル

次に、感覚フィードバック抑制実験により示唆された知見を基に、上記の声道タスク運動計画モデルを発展させ、音声の音響的特徴（音声スペクトル）を運動タスク（音響タスク）とする発声運動計画モデルを構築した。このモデルは、図4-2-2に示すように、音素列に応じて音響タスク系列が生成され、逆モデルに基づいて音響タスクを達成するような発声動作の運動計画が行われる。また、このモデルでは自分の声や話し手の声を聴覚系で処理して音響タスクを形成し、それを発声タスクとして発声動作を行う聴き真似発声の機能を模倣することができる。

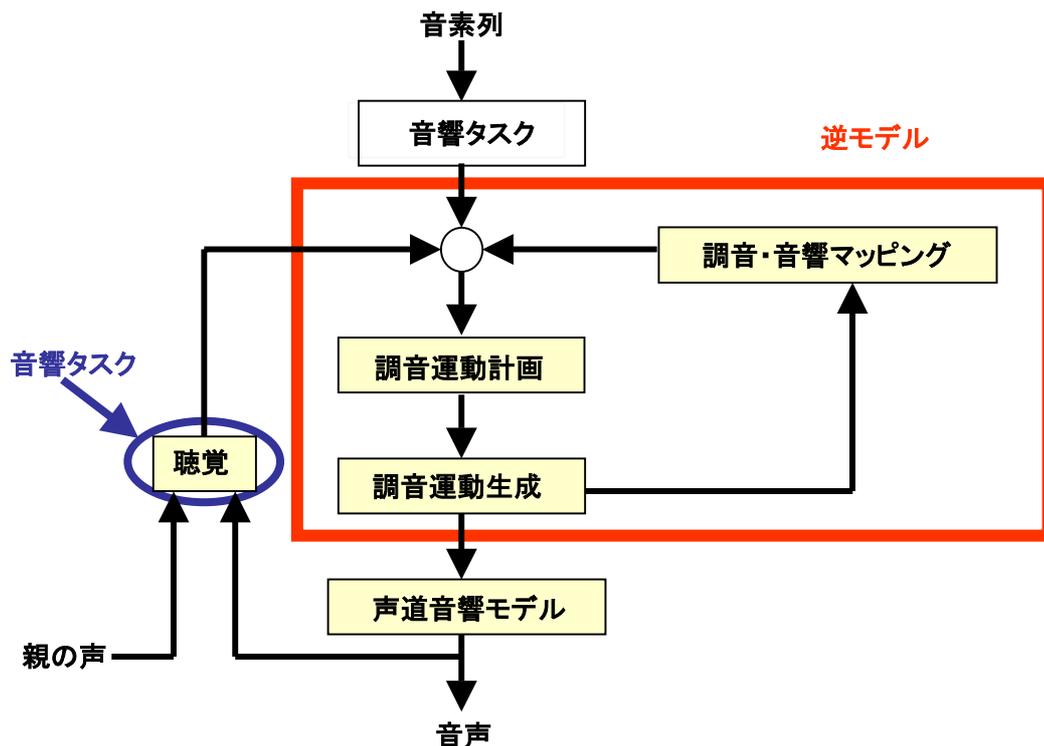


図4-2-2 音響タスクに基づく発声運動計画モデル

このような音響タスクに基づく発声運動計画モデルでは、発声器官の位置あるいは声道形状と音声の音響的特徴との間に存在する1対多の非決定性の問題を解消し、音響タスクから発声動作を決定する逆モデルを構築することが課題となる。

この課題を解決するため、図4-2-3に示すような統計的音声生成モデルとその逆モデルを構築した。このモデルは、発声動作の動的な振る舞いを表す隠れマルコフモデル（HMM）と発声動作と音声スペクトル（声道の音響的特徴）との非線形な関係を表す調音・音響マッピングによって構成される。HMMは、各音素毎の発声動作を複数の状態遷移によって表し、状態遷移に応じて発声動作を確率的に生成する。一方、調音・音響マッピングは、各状態毎に発声動作と音声スペクトルの関係を線形近似することにより発声動作空間から音声スペクトル空間全体への非線形な写像関係を区分線形近似する。また、観測される音声スペクトル

の分析誤差やモデルの近似誤差を考慮し、調音・音響マッピングにおいて発声動作から音声スペクトルを確率的に生成する．このように、発声動作から音声生成されるまでのプロセスを非線形な確率的な動的モデルとして定式化し、直接観測された発声動作データと同時観測された音声データを基にモデルのパラメータを最尤推定するアルゴリズムを見出した．

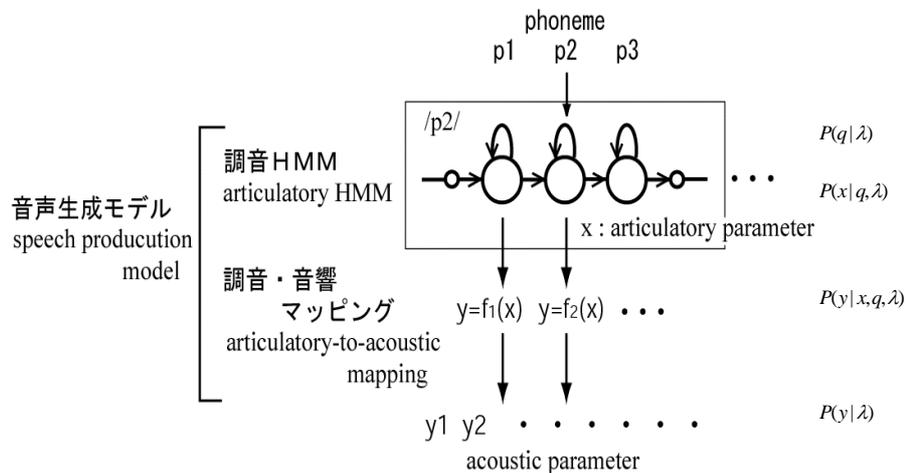


図4-2-3 統計的音声生成モデル

次に、この統計的音声生成モデルを基に所望の音声スペクトルを与える発声動作の統計的最適推定値を決定するアルゴリズムを見出し、図4-2-4に示すような、音響タスクから発声動作を決定する逆モデルを構築した．

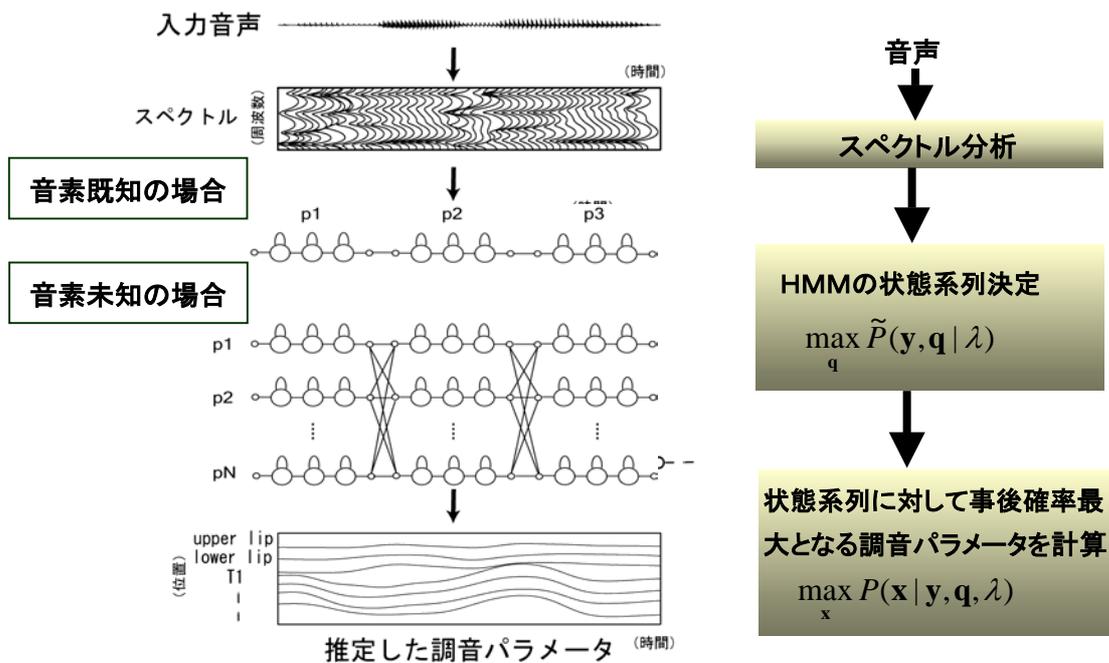


図4-2-4 音声生成逆モデルの構成

逆モデルでは、スペクトル分析によって音声から音声スペクトルを求め、音声スペクトルの尤度が最大となるHMMの状態系列を決定する。この際、発声内容の音素列があらかじめ既知の場合は、音素列に応じて状態系列が与えられ、状態遷移の時間的推移が決定される。また、音素列が未知の場合、すなわち話し手の声を真似て発声する聞き真似発声の場合は、可能な全ての状態系列の中から尤度が最大となる状態系列とその状態遷移が決定される。この場合、話し手の声から状態系列を決定することは、話し手の声から音声生成モデルに基づいた音声認識が行われていることを意味する。次に、決定された状態遷移と与えられた音声スペクトルに対して、事後確率が最大となる発声動作が決定される。

このような逆モデルを用いて音声から決定された発声動作と音声と同時に観測された発声動作の実測値との比較を図4-2-5に示す。

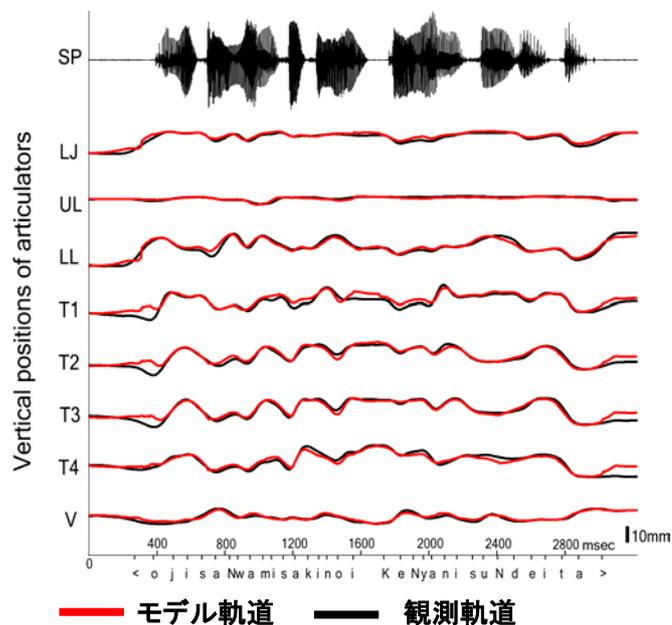


図4-2-5 逆モデルにより決定された発声動作

次に、発声動作を捉える視点をより発声系の実体に即したものとするため、生理的発声モデル及び発声系機械モデル（発声ロボット）に対する発声運動計画モデルの構築に向けて研究を展開した。

生理的発声モデルにおける運動計画では、上記の音響タスク運動計画モデルを基に音響タスクから発声動作を決定し、さらに発声動作から発声器官の筋収縮（運動指令）を決定すること、また筋の拮抗関係を明らかにすることが課題となる。

調音器官である舌は、四肢など剛体リンク系を動かすシステムと異なり、複数の筋を使ってその弾性構造の形状を制御している。そしてその形状変形により声道における共鳴や空気の流れが変化し複雑な音声パターンが生成される。このような複雑なシステムにも拘わらず、成人は他人が話している際の音響的特徴や唇や舌などの調音器官形状の限られた情報から、自分自身の調音器官を制御し同じような調音運動を行い発声することができる。

このような人間が行っている巧みな調音運動を舌ダイナミクスモデルで実現するためには、目的とする調音運動を生成するように、複雑に配置された筋群に対する運動指令を何らかの方法で決定する必要がある。そこで本研究では、図4-2-6に示すような模倣学習の枠組みを用いて、複雑なダイナミクスをもつ舌モデルに目標とする運動を実現させるための筋運動指令値を求める問題を検討した。

このスキームでは、フォワードモデルと内部モデルによる誤差変換メカニズムを用いて運動指令を繰り返し修正することにより、与えられた一部の目標点の運動を模倣するような運動指令を求めることを狙った。

本手法を用いて、指令が運動中に2回大きく変化する場合に得られる目標調音運動軌道を模倣する筋運動指令の推定を行ったところ、図

4-2-7に示すように平均位置誤差および平均運動指令誤差は繰り返し推定により減少した。繰り返し推定後には、図4-2-8に示すように、運動の途中3時点(0.3, 0.6, 0.9 s)で、19回繰り返し推定後の運動指令による舌の構え(白ワイヤーフレーム)は目標とする舌の構え(ソリッド)と非常に近いものが得られた。

図4-2-9に舌表面の11ノードの軌跡を示す。初期(0回目)状態で14ある全ての筋群への指令は0であるため舌はまったく動かない。繰り返し推定を重ねるに従い軌道が改善され、19回の推定繰り返しで比較的目標軌道に近い軌道が得られた。

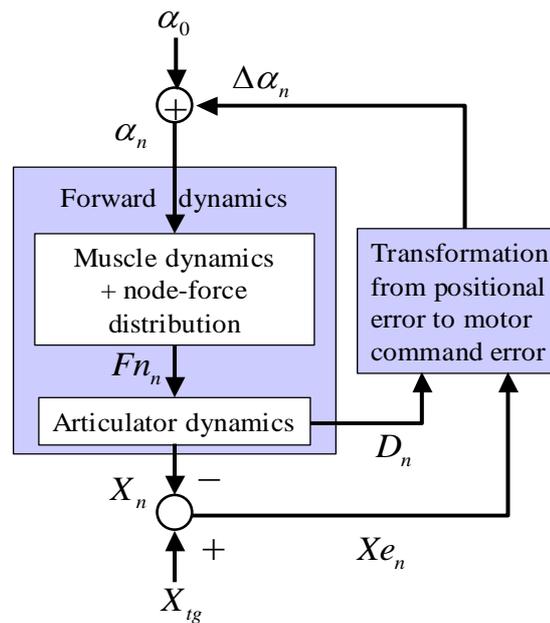


図4-2-6 目標調音運動を実現する運動指令推定スキーム

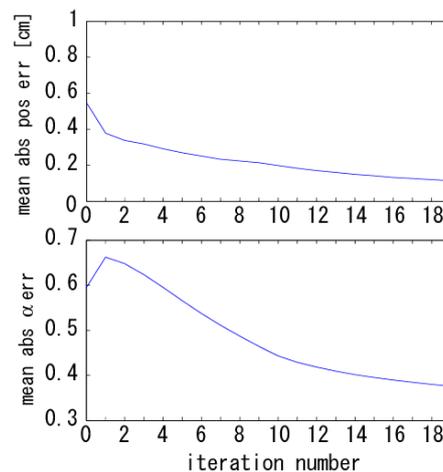


図4-2-7 繰り返し推定による平均位置誤差と平均運動指令誤差の減少

(0.3 s)

(0.6 s)

(0.9 s)

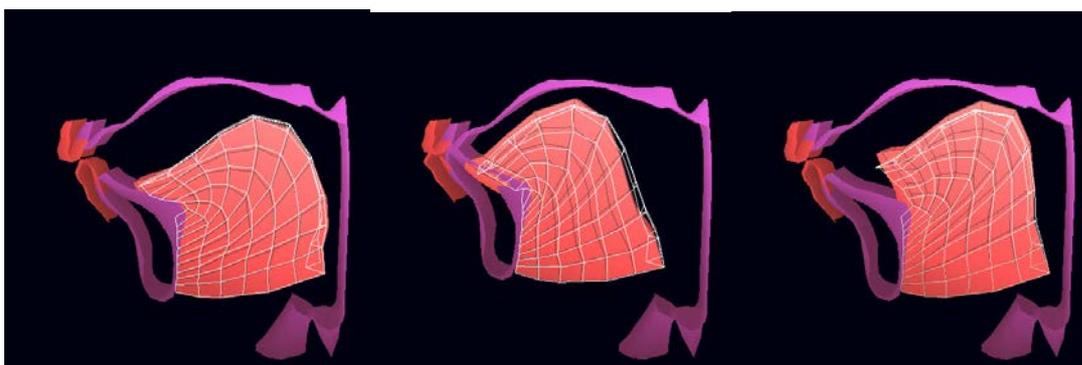


図4-2-8 推定後の運動指令を用いた連続運動における舌の構え. 繰り返し推定19回後の運動指令で実現された舌の構え (白ワイヤーフレーム) は目標とした舌の構え (ソリッド) に近い. (0.3, 0.6, 0.9 s)

このように、運動模倣スキームを使うことにより、複雑な弾性ダイナミクスをもつ調音器官であっても、その一部の運動目標を達成する運動を実現することに成功した。

次に、筋の拮抗関係のメカニズムを、舌の生理的モデルに基づいて検討した。音声生成過程では、一つの調音目標を達すためいくつかの調音筋（協調筋と拮抗筋）が同時活動することが可能である。特に拮抗筋の働きを明らかにするため、我々は舌の8つの筋グループを構築して協調筋と拮抗筋と振る舞いをシミュレーションした。その筋グループは一つの独立筋と一つの筋ペアからなる。その独立筋が一定の収縮力を維持しながら筋ペアの

収縮力を変化することによって、モデルを制御する。この場合、独立筋は主にモデルのグローバルな制御に働くが、筋のペアの働きは主にローカルの制御へ貢献する。二つのグループの振る舞いを例として図 4-2-10 に示す。図 4-2-10(a)では、独立筋は SG で筋ペアは GGp と SL からなっており、図 4-2-10(b)では、独立筋は GGm で筋ペア T-SL と SL からなっている。ペアとなっている筋は舌尖に対して協調筋となっているが、舌背に対して拮抗筋となっている。筋ペアの力を一定の比率で維持されるながら舌尖を一定の範囲に動かしても、舌背が不動にすることができる。この結果より、拮抗筋の働きは運動系の制動だけでなく、運動系の安定性の維持に重要な役割があることがわかる。つまり、運動系に対してある部分を操作し

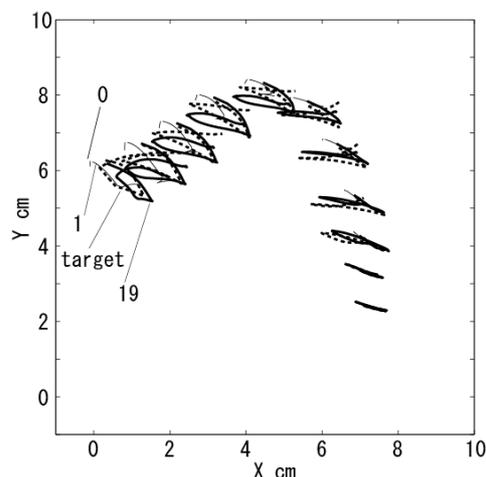


図4-2-9 舌モデルの表面ノードの動き (点線：目標運動，太線：繰り返し推定19回後の運動指令で得られた軌道，細線：0回，1回推定後の軌道)

ても他の部分に影響を与えないことが可能である。

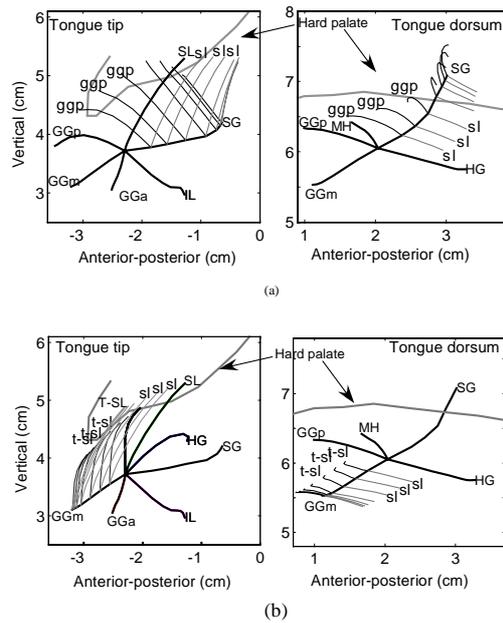


図4-2-10 拮抗筋の働きのシミュレーション

上記の拮抗筋のメカニズムを考慮して、複数目標点の同時制御の方法を開発した。図 4-2-11 には、独立筋 HG 及び筋ペア GG p と SL からなる筋グループによる例を示す。この例では、音声/sa/の/s/の舌尖と舌背の調音目標を設定するとした。/s/に対して舌尖が決定的な制御点なので、保証しなければならない。それに対して、舌背は非決定的な制御点である。図 4-2-11 からわかるように、HG はおもに舌背の目標を実現する筋となるが、舌尖目標を実現できる組み合わせは少なくとも  $ggp_1-sl_1$ 、 $ggp_2-sl_2$  と  $ggp_3-sl_3$  の 3つのグループがある。その 3つのどちらかを選択するかを舌背の目標の到達状況によって決定することとなる。これらのグループでは、HG の収縮レベルが異なってそれぞれの力は 0.0、0.1 と 0.2 ニュートンとなっており、予測された調音点は①、②と③になっている。計画している調音位置と比較すると③がもっとも適切であると思われる。従って、グループ 3 が選択された。

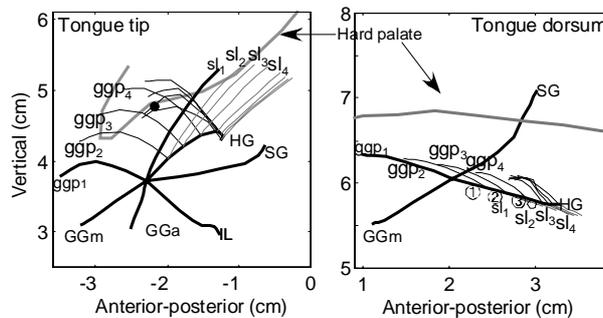


図4-2-11 拮抗筋の同時収縮を考慮した制御方法

与えた調音目標に対してこの制御方法は平衡点マップからすべて可能な候補パターンを探し出して、エネルギー最小原則に基づいて最適な収縮パターンを選択する。この制御方法では、複数目標の制御に関する一般的な原則としては、決定的な調音目標を確保した上、非決定的な目標を最適化することである。

一方、発声ロボットにおける運動計画では、発声者と異なる発声力学系をもつ発声ロボットに対して話し手の声を真似て発声させる自律的発話ロボットの構築を課題とした。発声ロボットにおける聞き真似発声動作計画モデルの構成を図4-2-12に示す。話し手の声からHMM音声生成逆モデルを用いて人の発声動作を推定し、人とロボットの発声系の形態の違いを正規化することにより人の発声動作をロボットの発声動作に変換する。次に、この発声動作を初期値として発声ロボットを駆動し、この時のロボットの音声と話し手の音声との誤差をホルマント周波数、ピッチ周波数及び有声・無声の特徴に関して比較する。それらの誤差を評価関数としてロボット制御変数をヤコビアン制御則に基づいて修正することにより、聞き真似発声を行った。

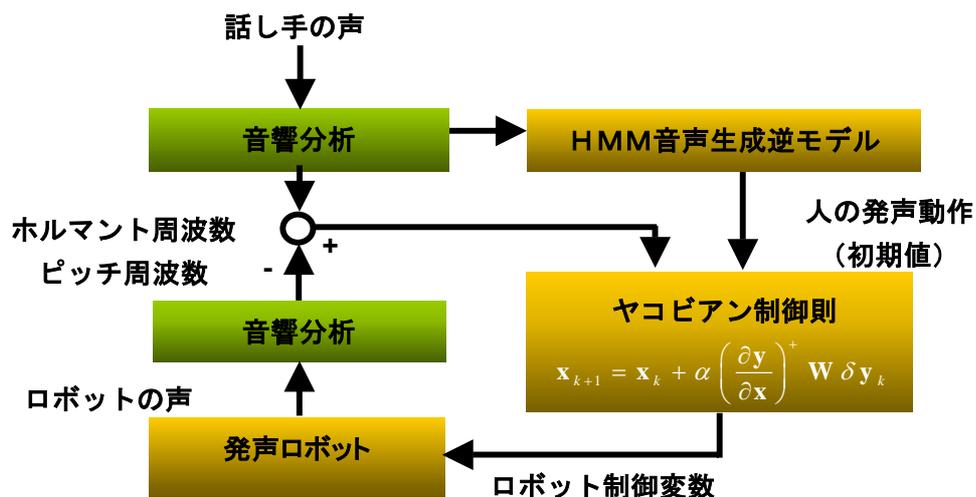


図4-2-12 発声ロボットにおける聞き真似発声運動計画

## (2) 得られた研究成果の状況及び今後期待される効果

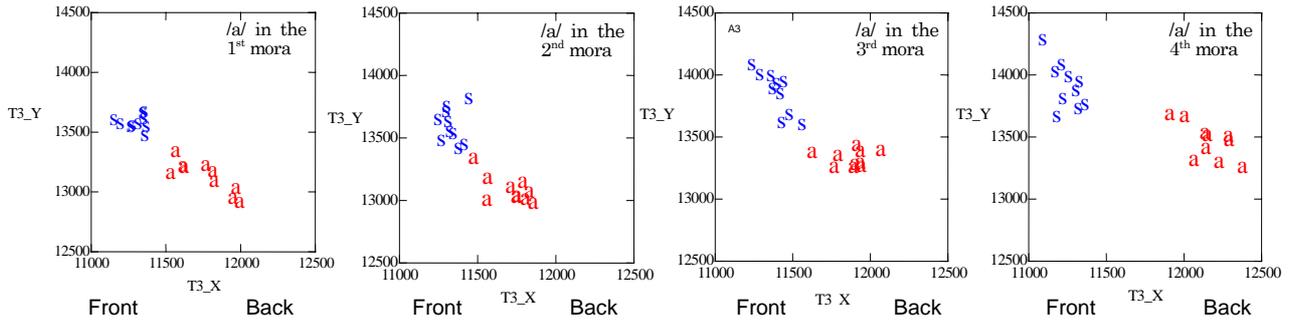
音響タスクに基づく発声運動計画モデルにおいて、音声生成の内部モデルを確率的な非線形ダイナミカルシステムとして定式化し、統計的推定に基づく逆モデルを構築した。発声動作の多様な動的振る舞いをHMMモデルにより表現することにより、音響タスクから発声動作を決定する逆モデルにおいて、発声動作の動的な制約を十分に生かすことが可能となり、これまで長年困難とされてきた子音を含む連続音声から発声動作を決定する逆問題に対して大きな前進を果たすことができた。また、音声生成過程の数理モデルとそのパラメータ分析手法を見出したことにより、音声生成に基づく音声情報処理の基盤技術が確立され、音声合成や音声認識への応用に向けた新たな展開を可能にした。この研究では、発声動作データと音声データを用いて音声生成モデルの学習を行ったが、人間の発声動作獲得のプロセスを模擬するには、発声力学系に固有な制約の基で聞いた音声のみからモデルを学習する機構が必要となる。そのためには、生理的発声力学モデルと一体となった音声生成モデルの学習機構を構築することが次の重要な課題となる。この課題が解決することができれば、人の発声獲得機能の解明に向けて構成的な研究を展開することが期待できるとともに、音声情報処理技術への展開が一層現実的なものとなる。また、今回の運動計画モデルでは、あらかじめ言語的（音素）情報が与えられたものとしてモデルの学習が行われたが、逆モデルにより決定される発声動作から自律的に言語単位の範疇化を行う機能を実現することにより、さらに人の音声言語獲得機能を模擬したモデルへと発展できる可能性がある。

次に、発声動作からさらに運動指令を特定する逆モデルを、生理的発声力学モデルに基づいて構築した。逆モデルにより与えられた発声動作を模擬できる筋収縮パターンを決定することはできたが、今後は決定された筋収縮パターンと筋電計測により得られる実測値との比較することによってその有効性を検証する必要がある。現状の逆モデルでは、筋の拮抗関係に起因する非決定性を解消する仕組みが考慮されておらず、今後筋エネルギー最小化のみならず発声動作にける筋の剛性の役割を考慮した仕組みを、モデルと筋電データとの比較検証の中で見出していく必要がある。

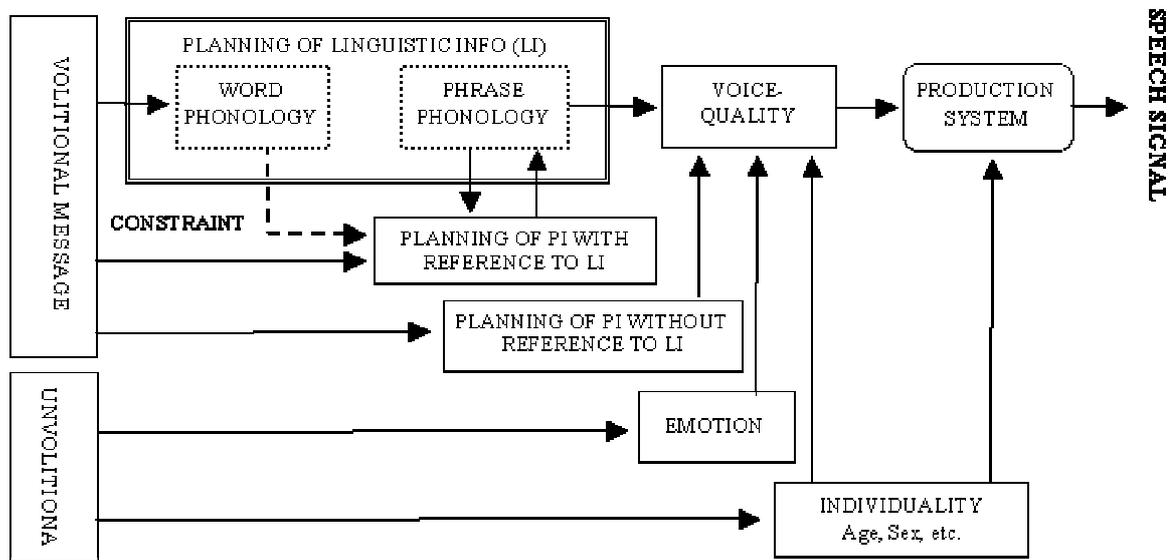
また、発声運動計画モデルと発声ロボットを融合することにより、聞き真似機能をもった自律形発声ロボットを構築することができた。今後は、聴覚センサとともに触覚センサを発声ロボットに搭載し、触覚を含む感覚情報から発声動作を学習する自律型発声ロボットの構築が課題となる。さらに、実体発声モデルの特長を生かし、物を食べながら話すといった様々の実環境下で正しい発声が行えるような発声運動制御モデルを構築することも興味ある課題である。

### 4. 3 パラ言語情報に基づく発声動作の生成（運動計画グループ）

パラ言語情報（「疑い」「感心」「落胆」など）を担った発話の特徴を音声信号および調音運動の両レベルにおいて解析し、パラ言語情報を担う音声特徴を抽出した。その結果、パラ言語情報の影響は、持続時間、基本周波数、振幅などのいわゆる韻律特徴にだけ認められるのではなく、母音や子音など、いわゆる分節特徴の調音にも及ぶことが発見された。下図では「笹田が」という発話に含まれる四つの母音「ア」の調音が、「S疑い」と「A感心」の発話では、前後方向に分離していることを示している。



これらの知見に基づいて、パラ言語情報が音声生成過程でどのように処理されるかについて、以下の概念モデルを構築した。



### (2) 得られた研究成果の状況及び今後期待される効果

上の概念モデルは、パラ言語情報の伝達に関わる音声特徴の計算過程において、句音韻論レベルの言語情報（イントネーションの要素としてのtone）が操作されること、また、語音韻論レベルの言語情報（例えば母音の弁別素性）が計算に対する制約として機能することを示している。今後、これらの要素を音声生成モデルに取り込むことによって、より自然な音声を合成することが可能になると期待される。

#### 4. 4 MRI 観測技術 (生理機構グループ)

##### (1) 実施の内容

発声動作の生理計測には主としてX線撮影、筋電計測、運動計測などが用いられてきた。最近では磁気共鳴画像法 (MRI) の進歩により、X線を用いることなく3次元画像の記録できるようになり、生理計測への応用が可能となった。本分担研究ではMRIを用いて発声時の舌筋の配置と長さ、舌の立体形状、喉頭の関節運動を観測した。また、発声動作を高時間分解能で高精度に計測する手法として、2次元及び3次元磁気センサシステムの構築を進めた。

##### <舌筋の長さと言の立体形状の計測>

舌は音声の性質を決定する重要な器官であり、筋肉のみで構成される特殊な運動でもある。母音の生成に大きく関わる筋肉は外舌筋とよばれる3種類の筋であり、それぞれの働きは解剖学的な配置と筋電信号から推測されてきた。本研究では、MRIを用いて母音発声時の各筋の配置と長さを実測することにより舌の立体変形をもたらす各筋の機能を解明した。

日本人成人男性4名により日本語5母音「イ、エ、ア、オ、ウ」の持続発声のMRIを記録した。各画像上で舌筋の輪郭をトレースし、正中矢状面に投影して筋長を計測した。図4-4-1に主要な外舌筋 (オトガイ舌筋GG、茎突舌筋SG、舌骨舌筋HG) の計測結果を示す。GGはすべての筋の中で筋長の変化が最も大きく母音の決定に大きく貢献する。SGの中ではSGpは筋長変化が小さくSGmで変化が大きい。HGについてはHGaの変化が大きくHGpでは変化の傾向に個人差が見られた。

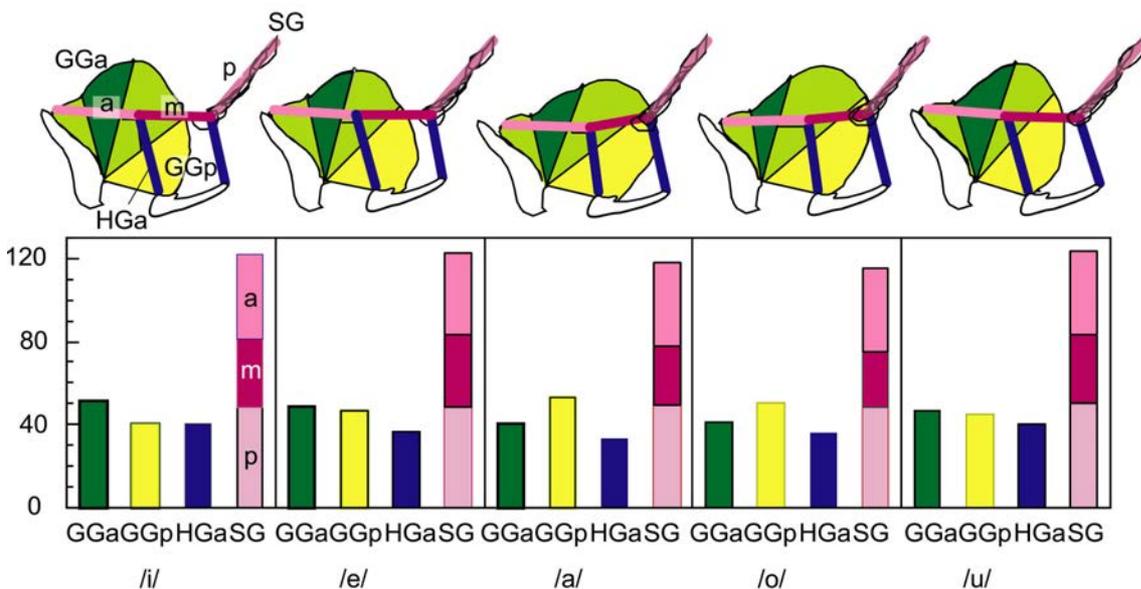


図4-4-1 日本語5母音における外舌筋の配置と筋長

前舌母音ではGGaとGGpがともに活動すること知られている。筋長計測の結果では母音イでGGpは短いGGaは長く、GGpの収縮効果によりGGaが引き伸ばされたと考えられる。後舌母音

ではSGとHGがともに活動するとされている。これらの筋長変化はGGに比べてともに少なく、舌を後上方に引き上げる筋はSGpではなく内部変形をもたらすSGmであると考えられた。

母音発声における舌筋の長さ変化と舌の立体形状との関係を求めるため、舌内の解剖学的指標を用いて内部変形を計測した。これには成人男性話者一名が5母音を持続発声した時の矢状面画像と冠状面画像を用いた。矢状面画像では舌内部を浅層、中間層、深層に分割して各層の面積を求めた。冠状面画像ではHGとGGに挟まれた舌動脈の屈曲点を利用した。

正中矢状面における舌内各層（表層、中間層、深層）の面積および冠状面における舌変形の計測結果を舌形状の立体構成例とともに図4-4-2に示す。舌全体の面積はアとオで大きく、イ、エ、ウで小さく、左右舌動脈間の距離はイ、エ、ウで広く、アとオで狭いことが認められた。すなわち、舌の変形は3次元的であり、後舌母音では舌が左右から狭まりながら後方に膨隆し、前舌母音では舌が左右に広がりながら前方に移動するメカニズムが明らかになった。

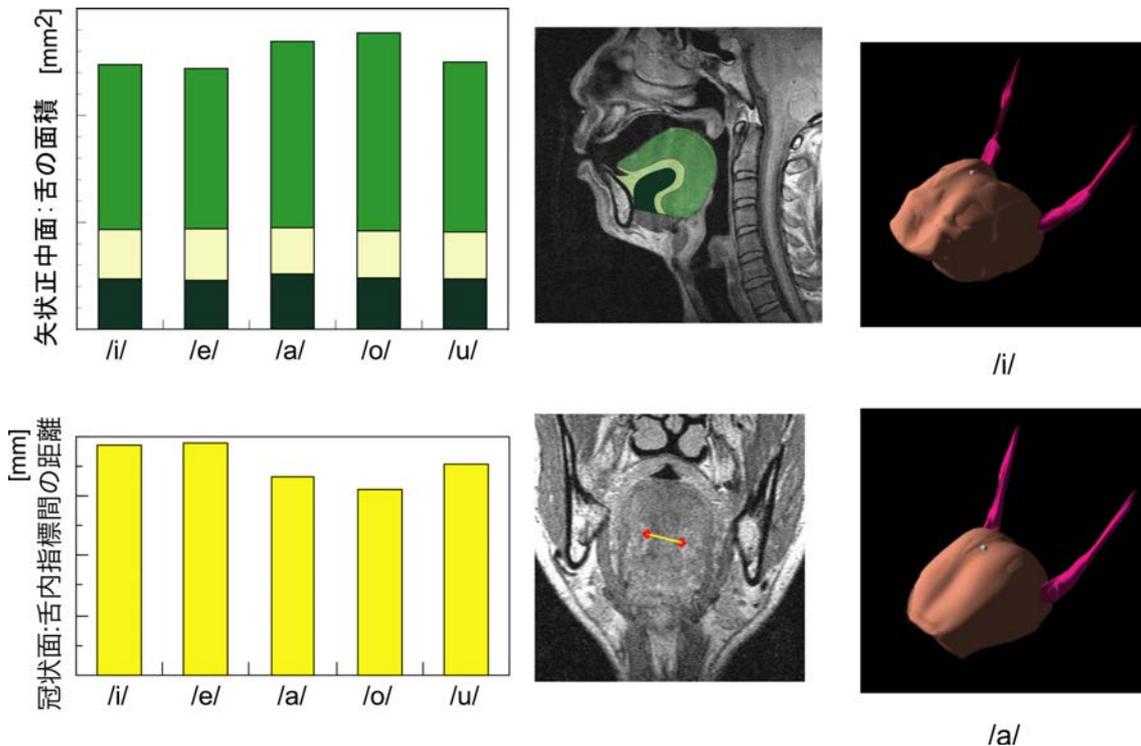


図4-4-2 5母音発声時の舌矢状面の面積（上）、左右方向の内部変形（下）、および舌表面形状の3次元表示（右）

以上より前舌母音と後舌母音を生成するメカニズムを以下のようにまとめることができる。  
 前舌母音の生成：前舌母音イ、エ、ウではGGpが短縮することにより舌組織を左右方向に押し出しながら舌を前方に移動させつつ舌面の上方への膨隆をつくる。イではGGaの収縮により舌の正中溝が形成され、声道前方の細い導管を維持する。ウではSGの舌内繊維と内舌筋の収縮により舌の左右を狭めて舌背を膨隆させる。

後舌母音の生成：後舌母音アとオではGGpの弛緩およびSGとHGの収縮により舌全体を後方に移動させ舌を前後に短縮させる。GGaの収縮により日本語母音特有の舌端の陥凹をつくる。アではGGmの収縮が加わり舌背を下降させる。オではGGaとSGの収縮により後上方への膨隆をつくる。

#### <喉頭軟骨の位置変化の記録>

喉頭は音源の生成する重要な器官であるが、サイズが小さいため十分な画像分解能が得られず、また呼吸運動による上下動が伴うため画像歪が生じやすいという問題があった。本研究では鮮明な喉頭画像を記録するために、小型アンテナを用いた高感度喉頭用コイルを試作し、呼吸運動による画像歪を防ぐための同期撮像法を開発した。この2つを組み合わせることで声の高さの変化における喉頭軟骨の位置変化を記録した。喉頭用コイルは小型円形表面コイルのアンテナを楕円形のアンテナに変更し、仰向位で自然に発声できるよう図4-4-3に示す形状とした。同期撮像法では図4-4-4に示す図のように、ヘッドホンからのガイドトーンに合わせて吸気と持続発声を同期させることによって発声時の状態のみを撮像することができる。

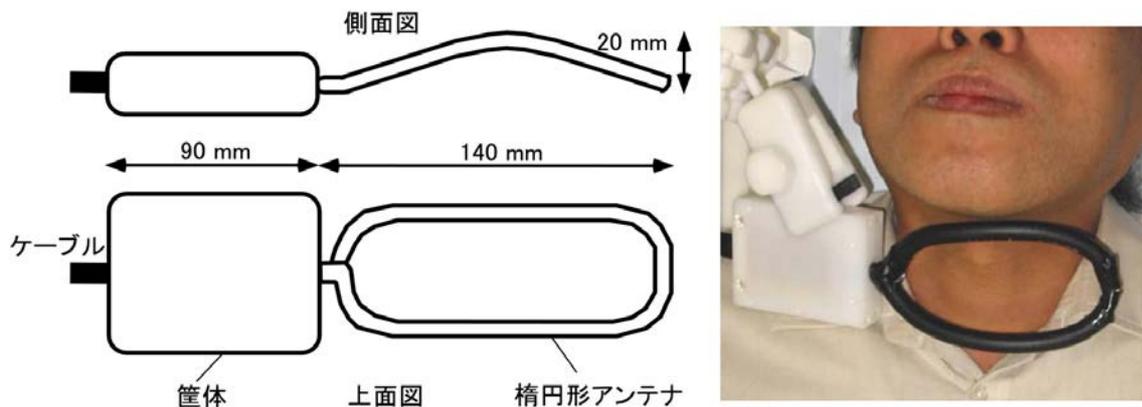


図4-4-3 喉頭撮像用MRIコイル（左）および使用例（右）

喉頭軟骨の位置変化の計測には、男性話者が基本周波数120Hzの「普通の発声(Low)」および180Hzの「高い声(High)」で母音イを発声したときの画像を用いた。LowとHighの画像について甲状軟骨と輪状軟骨をトレースし、図4-4-5(左)に示す立体図を作成した。これより、喉頭軟骨の上下運動および回転、滑走、声帯長の変化を計測した。図4-4-5(右)より、甲状軟骨はHighで回転することなく約4 mm上昇し、輪状軟骨はHighで頂部が後方に回転しその関節角の変化は約5度であった。また、甲状軟骨はHighで輪状軟骨に対し前進し滑走距離は約1.25 mmであった。以上の結果から、関節の滑走が起こらないとする従来の報告と異なり、輪状甲状関節の運動が回転と滑走からなることが明らかとなった。

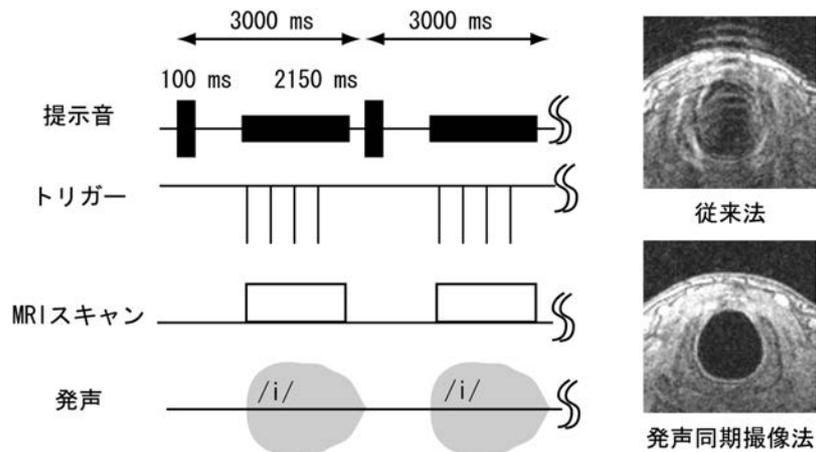


図4-4-4 発声同期撮像法による撮像法とサンプル画像

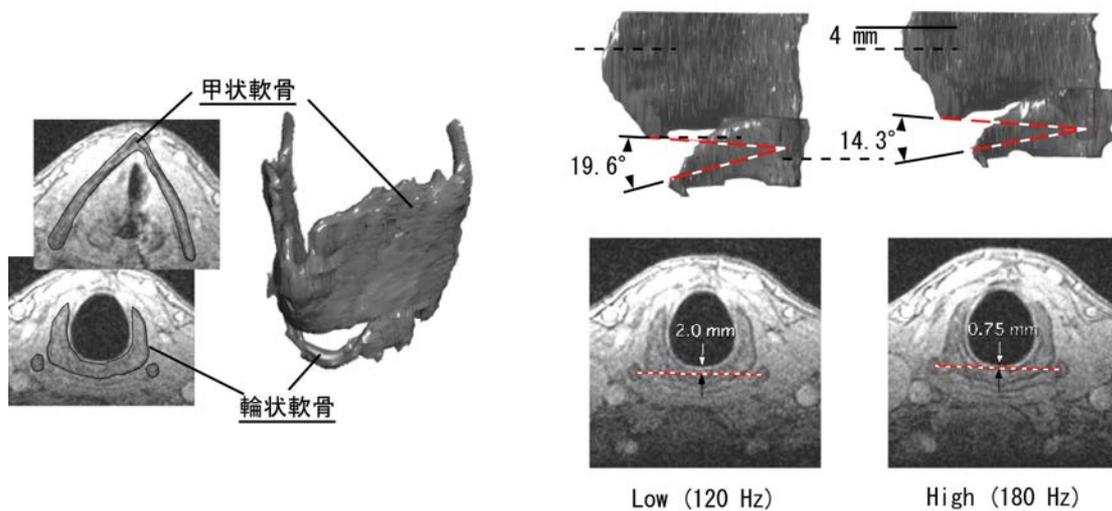


図4-4-5 喉頭軟骨の3次元再構成と輪状甲状関節の運動：回転（上）と滑走（下）

## (2) 得られた研究成果の状況及び今後期待される効果

MRIは比較的新しい方法であり、生体の断面を可視化できるため静止画像の記録法として役立つが、十分な分解能が得られないという問題があった。このプロジェクトでは、MRIの分解能を高めるため、撮像パラメータとコイルを改良することにより、発声器官の鮮明な画像を記録し、従来の問題点であった舌変形メカニズムと喉頭軟骨運動メカニズムを明らかにした。

研究専用のMRI装置を有する施設は世界的にも数少なく、発声機構に関するMRI研究も少ない。そのなかで、米国Maryland大学のTagging MRIによる舌変形機構の研究が数少ない例であり、声道形状の計測については、ベルギーBruxelles大学の実時間計測（低分解能）およびスウェーデン王立工科大学の声道壁モデルによる音声合成などのMRI研究が試みられている。しかし、本研究における高分解能MRIによる生理的メカニズムを対象とした研究はなく、世界をリードする研究として評価されている。

舌は心臓とともに筋のみからなる運動器官であるが、悪性腫瘍の発生を除けば疾患の発生率の少ない器官であるため、生理的メカニズムの研究が著しく遅れていた。舌の立体変形メカニズムの解明は、発話障害の評価と補助手段の研究に貢献するほか、筋のみからなる特殊な運動の発現機構の研究および柔らかいアクチュエータの開発に役立つと期待される。音声分野では、音声生成機構の研究、生理学的調音モデルによる音声合成、ロボットによる発声などにおいて重要な基礎資料を提供する。

喉頭用MRIコイルと同期撮像法の組合せは、鮮明な喉頭画像を記録するための画期的方法であり、計測が難しいとされてきた喉頭の研究手段として、基礎研究から医療応用にいたる広い範囲で応用が期待される。以下に通常の頸部用コイルと性能を比較する。

表4-4-1 喉頭用コイルと最適化撮像法によるMRIの高精度化

	従来の撮像法 (市販の頸部用コイル)	高分解能撮像法 (喉頭用コイル)
実用的解像度	0.5 x 0.5 mm	0.25 x 0.25 mm
相対S/N比	1	4
撮像最適部位	頸椎	喉頭・口唇

## 4. 5 磁気センサー観測技術（生理機構グループ）

### (1) 実施の内容

我々が「あ」や「い」など、さまざまな言語音を作り出すことができるのは、調音器官の運動によるものである。また、脳内で計画された運動指令が直接的に具体化されるのは、調音運動のレベルであると考えられる。したがって、発話時の調音運動の観測により、発話運動制御に関する豊富な情報を得ることが可能になる。とくに、本プロジェクトにおいては、口蓋形状が急に変化した時の調音器官の応答を調べたり、発話ロボットの口の動きを制御する上で、このような観測データがきわめて重要な役割を担っている。

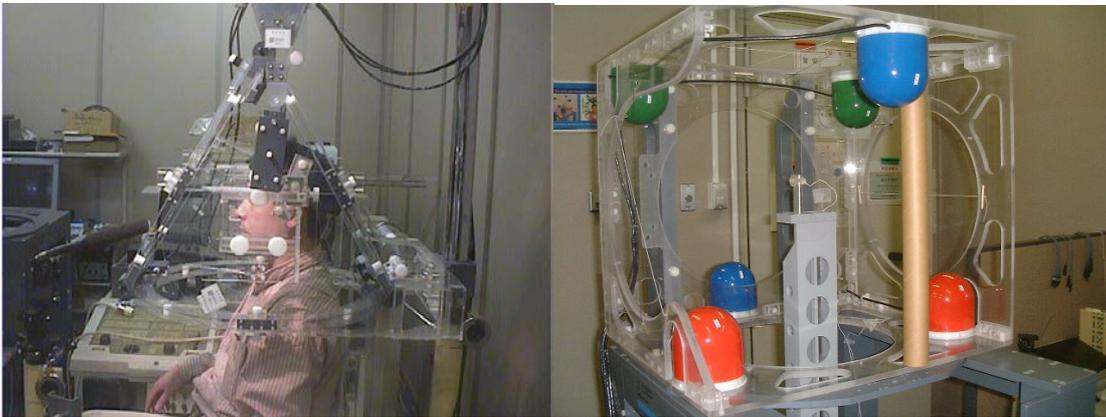


図4-5-1：2次元磁気センサシステム

図2：3次元磁気センサシステム

MR Iによって声道の断層像を観測する方法では、時間分解能などの点で、上記の目的に使用することができない。そこでここでは、複数のマーカー位置を磁氣的に計測する、磁気センサシステムを開発した（図4-5-1）。この2次元システムでは、頭部周辺に配置された3個の送信コイルにより、交流磁界が生成される。マーカーである小型受信コイルは、顎、上唇、下唇、軟口蓋に各1個、舌に4個装着され（合計8個）、磁界から誘導される信号の強度により、それらの位置を毎秒250サンプルの割合で測定することができる。また、このとき、マイクロホンや電気喉頭計などを使用することで、音声や声帯の振動パターンを同時に観測することが可能である。発話時の調音器官の運動範囲は、たかだか数cmの程度である。とくに、破裂音や摩擦音を発話する際の舌尖の微妙な動きを観測するには、高い空間分解能が必要とされる。磁気センサシステムの測定精度は、送信コイルの生成する磁界の空間パターンを、いかに精度よく校正できるかによって決まる。送信コイルは磁気双極子として働き、受信信号は送信・受信コイル間距離のほぼ3乗に反比例して減衰する。しかしながら、実際のシステムでは送信チャンネル間の干渉などがあり、場所に依存した局所的な歪

みが受信信号に生じるため、双極子のような物理モデルでは精度的に不十分となる。本システムでは、観測領域を格子状に区切った時の各格子点に受信コイルを配置し、測定した多数の受信信号をスプライン関数を用いて平滑化することによって、ノンパラメトリックに磁界を校正する方法を考案した。この結果、調音器官全体をカバーする14(cm)x14(cm)の観測領域に対して、平均で約0.2mmという非常に高い測定精度を得ることができた。

一方、2次元の磁気センサシステムでは、観測領域が被験者の正中面上に限られるという制約がある。また、発声中に受信コイルが傾いたり、横にずれたりした場合には、測定誤差が無視できなくなる。そこで、これらの問題点を解決するために、マーカーの3次元位置を測定するシステムの開発をおこなった(図2)。この3次元システムでは、マーカーの状態を表す3個の位置変数と2個の傾き変数の値を決めるため、6個の送信コイルが使用されている。また、個々の送信コイルの発生する3次元的な磁界パターンは、測定領域をカバーする磁界データをスプライン補間することで校正される。現在のところ、6(cm)x6(cm)の観測領域において、平均で0.3mm程度の位置測定精度が得られることがわかった。この精度は、校正用磁気データのサンプル数に依存するので、今後は、調音器官全体をカバーする観測領域に対して、十分な測定精度を得るための校正サンプル数を検討する必要がある。

## (2) 得られた研究成果の状況及び今後期待される効果

調音器官のような、外部からは不可視な運動をできるだけ精度よく観測するための技術として、磁気センサシステムの開発をおこない、スプライン関数による磁界校正法と3次元計測法とを新たに提案した。測定精度の点では、現状として、世界的にみても信頼性の高い観測システムを実現することができた。このシステムをもとに、発話運動制御に関する種々の研究課題へ実験データを提供することができ、プロジェクトの推進に貢献した。

磁気センサシステムは、音声生成、音声言語学、音声情報処理の領域における研究用ツールとして、世界的に広く利用されている。また、磁気センサシステムは、音声関連の研究領域だけでなく、モーションキャプチャリングやユーザーインターフェースへの応用も盛んである。したがって、今後は、ここで検討した磁界校正法や3次元計測法の研究成果をよりオープンなものとすることで、広く学術的、工学的な貢献に寄与するものと考えられる。

## 4. 6 発声生理モデル (モデリンググループ)

### (1) 実施の内容

舌、顎、唇などの複数の調音器官や顔の筋を巧みに操ることで発話運動を行っている。特に、舌と唇は、複数の筋を操りその柔軟体の三次元的な形状を細かく変化させて音響的特性を制御する。例えば舌先や口唇部の変形により声道管共鳴は大きく変化し、また摩擦子音発声には音源となることなどから微妙な調整が必要とされる。人間の音声生成メカニズムを究明するため、三次元MR画像と解剖学的データに基づいて三次元的な生理学的発話機構モデルを構築した。三次元の発話機構モデルの全体構成を図4-6-1に示す。モデルの外形は一人の日本人男性話者のMR画像から求められた舌、唇、下顎、舌骨、口唇、軟口蓋及び声道壁などの形状学的データに基づいて構築された。調音筋についてMR画像の分析と解剖学的な資料に基づいて舌のモデルには11個、舌骨・下顎システムには8個配置された。

モデルの構築に関しては、特に柔らかい組織で形成される舌・唇の弾性体の機構に着目し、筋収縮によって運動を生成する発声力学系の生理モデルを構築した。このモデルでは、弾性体である舌や唇を多質点のバネ・マスモデルで表し、各ノードに筋肉モデルを配置し、筋の収縮に応じた弾性体の大変形を安定かつ比較的少ない計算時間で生成する方法を見出した。

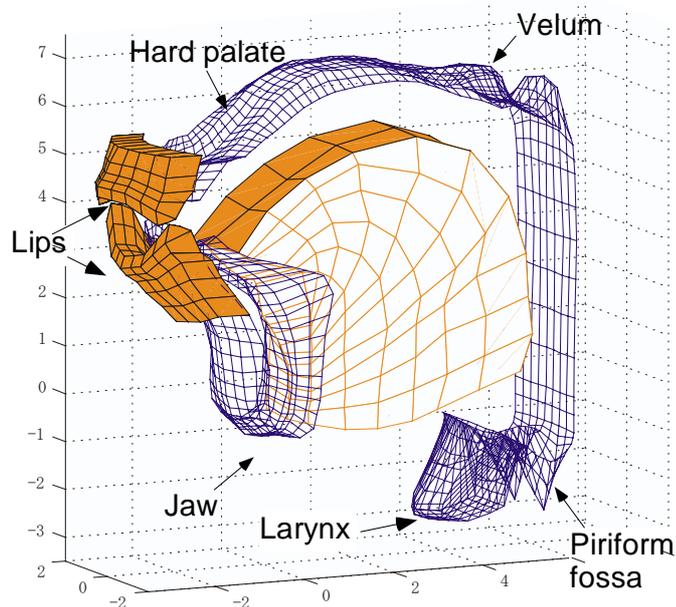


図4-6-1 生理学的発話機構モデルの外形

ここでは、唇と顎についてモデルの詳細を説明する。発話運動の詳細なメカニズムを探り、また従来重要性が指摘されている調音運動における発話器官の力学的拘束や協調関係を構成的に検討するため、筋活動によって変形運動が生成されるリアリティのある口唇力学モデルを構築した。モデルは、MRIデータから得た唇、上・下顎などの器官及び口周筋の構造データを用いて3次元的に柔軟に変形するバネマス系と実際の筋配置に従って筋力発生ダイナミクスを模擬する方式を用いた。

まず、構造データに関しては、新たに開発されたコイルによりMRI高分解能のイメージを取り、そのデータから口輪筋の微細な形状を取り出すことを可能とした(図4-6-2)。その口輪筋を含む口周辺部位の力学モデルを作成するために、左右に広がるに従い外皮に対して垂直な断面(図4-6-3)の画像データを作成し、其々の面で外皮から口腔内側面までを5層のノード点で表した(図4-6-2)。このような精度の高いMRI実測データを用いることにより、口唇外形状(図4-6-4)と口輪筋配置・形状(図4-6-5)に関して、過去に例のないリアルなモデルの記述が可能となった。

また、唇の変形に関与する頭蓋骨と唇周辺の柔軟組織をつないでいる9つの筋と5つの顎筋に関しても、MRIから画像処理により抽出した頭蓋骨形状と解剖学知見および実際のMRIデータを手がかりに図4-6-6, 4-6-7に示すように配置し、唇変形の詳細なメカニズムを調べることが可能なモデルに仕上げた。また、合計約千の変数によって記述されたこのモデルのダイナミクス方程式を差分法によって解くことにより、入力された筋活動パターンに応じて口唇周辺の運動を出力し、グラフィクスアニメーションによってその変形運動をビジュアライズするシステムを構築した。図4-6-8に口輪筋、口周筋、顎筋、舌などを統合した三次元モデルを示す。全ての構成要素が1名の被験者のMRIデータから得られているため、リアルな動きが可能である。

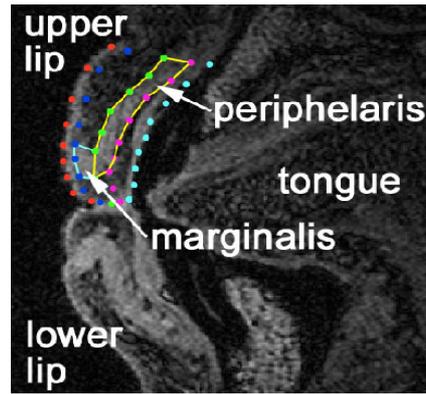


図4-6-2 傍矢状面における口唇周辺の高精度MR画像とモデルノード

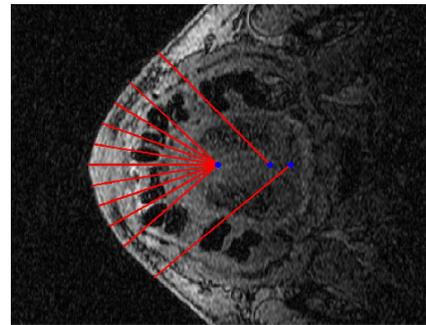


図4-6-3 モデルノードを抽出する切断面

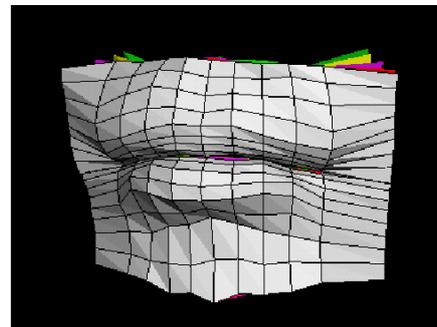


図4-6-4 口唇周辺部表皮面モデル

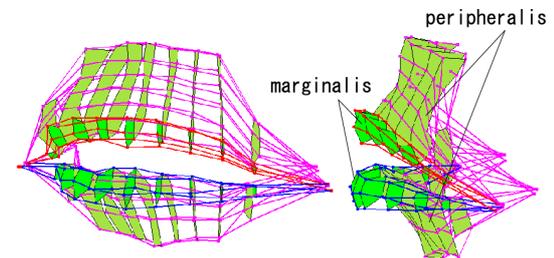


図4-6-5 口輪筋辺縁部と周辺部のモデル

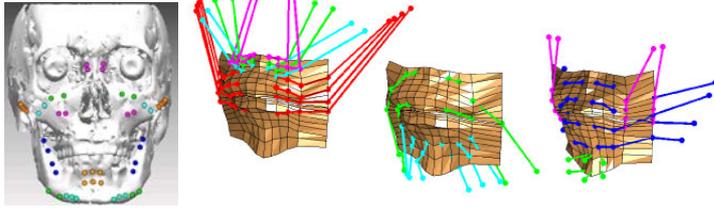


図4-6-6 口唇周辺筋のモデル化. 頭顎骨上の筋の起始と口唇周辺筋の口唇部への接続

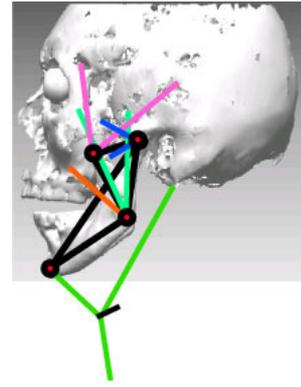


図4-6-7 顎筋のモデル

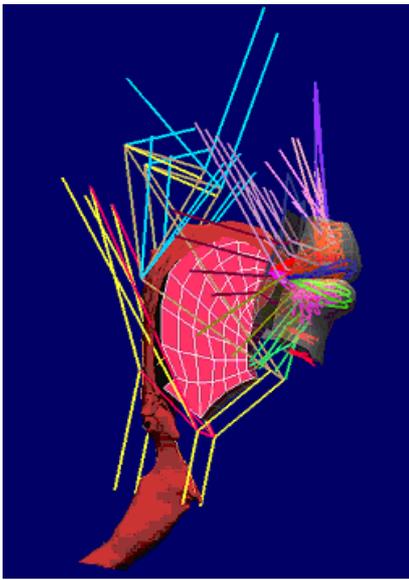


図4-6-8 口輪筋, 口唇周辺筋群, 顎筋群, 舌 (ピンク), 声道管 (赤) の統合モデル

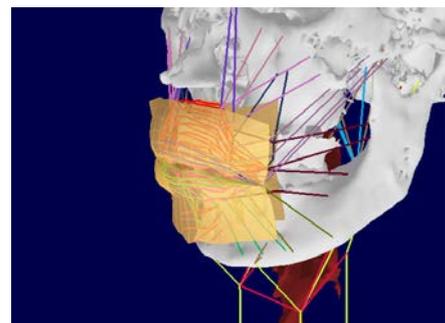
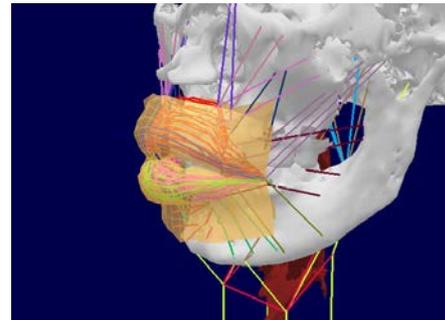
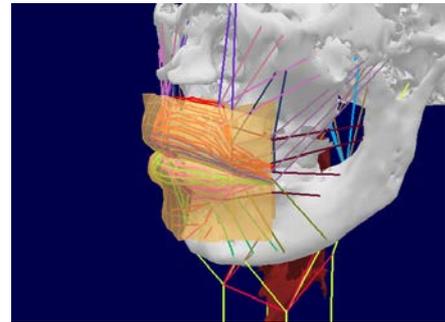


図4-6-9 筋活動による唇動作シミュレーション. 自然な構え(上). 突き出し(中) つぐんだ構え(下)

さて次に, 以上のモデルを用いて, 唇の突き出しや狭め, 丸めなどを実現する筋の制御メカニズムについて検討した. 従来は唇の突き出しを形成する筋制御の仕組みは推測されるに留まっていたが, 本モデルを用いて筋と弾性組織との三次元的な構造を作ることによって, 構成的に口唇部の動きを再現できるようになった. 口輪筋は, 辺縁部と周辺部に機能的に分かれているとする仮説に則り, 周辺部深層のみを活動させることにより図4-6-9中に示すような唇部の「突き出し」が現れ, また辺縁部を活動させることにより図4-6-9下に示すような「口をつぐむ」動作が現れることが初めて構成的に実証された. また唇の丸めを作る動作は, 辺縁部活動と口を開く動作だけでは形成できず, より複雑な筋の協調関係が必要であること

も明らかになった。さらに、片側頬骨筋の活動による「皮肉笑い」などの表情運動もこのモデルを使って簡単に生成することが可能となった。

## (2) 今後の残された課題

本研究で構築した生理的発声ダイナミクスモデルは、(1)舌、唇弾性部の運動制御における運動指令推定逆問題と制約条件の検討、(2)複数の筋活動による複雑な舌、唇弾性部の運動メカニズムの構成的解明、(3)発話運動を介在させた音声生成と知覚のインタラクションと発話運動学習メカニズムの検討、などにおいて広く用いる基盤システムであり、これを用いて、人の行う発話運動制御の仕組みをより深く理解し、優れたマンーマシン・インタフェースの基礎技術へと発展させたい。また、口唇部の運動影像是音声知覚や感情表現とも深くかかわっていることが知られており、運動生成の面から視覚情報と知覚との関係を解明する研究にも本モデルを応用していただけるものと考えている。

## 4. 7 声道音響モデル (モデリンググループ)

### (1) 実施内容

音声生成系の音響特性は声道の3次元形状に依存することを明らかにするため、声道の分布定数回路モデル(1次元モデル)と3次元形状モデル(多線条分布定数回路モデル、有限要素モデル)を用いて音響解析を行った。ATRのMRI計測装置を用いて実際の母音発音時の形状を抽出し、音響解析の形状モデルのデータとした。MRIデータから声道の形状パラメータを抽出するソフトウェアを開発した。1次元モデルでは、肺と声道との結合による影響を明らかにした。3次元モデルでは、4kHz以上の高域において、母音調音時の口腔断面の扁平度など形状パラメータが伝達関数にどのように影響するかを数値解析により調べた。さらに、有限要素法の高速演算法の開発、声道の形状パラメータが時間変化するに従って時変の声道伝達関数を求める方法を開発した。表1に示すように声道音響特性の解析では、設定する物理的仮定によって計算の複雑さや、有効周波数範囲が大きく異なってくる。3次元有限要素法は、最も詳細な解析手法と考えられるが、複雑な3次元声道形状に適合するメッシュを自動生成することが難しいため、大量の形状データを処理するには何等かの近似形状モデルを導入することが望まれる。本グループでは、このような形状近似に関する検討も実施した。有限要素法による音響解析にあたり、当初、4面体1次要素を使用したシミュレーションを行っていたが、6面体1次要素の方が解析精度が良いことから、これに対応した新たなソルバを開発してシミュレーションを行った。また、従来から利用されている1次元モデルをモード分解に基づく定式化により3次元音圧分布を等価的に表現できるように多線条回路モデルとして拡張し、高域周波数まで有効範囲を増加させながら高速な計算処理を実現するための新たな手法の開発も実施した。

表1 声道音響モデルの比較

	1次元モデル	3次元有限要素モデル	多線条分布定数回路モデル
計算量	小	大	中
形状表現能力	小	大	中
モデル作成	容易	労力集中	容易
周波数範囲	約4kHz	要素サイズに依存	モード数に依存
アーチファクト	小	可能性あり	可能性大

## (2) 得られた研究成果の状況及び今後期待される効果

MRIにより得られた3次元形状にできるだけ忠実にメッシュを作成したモデルを参照すべき基準モデルとし、これを変形した多くの形状モデルの音響特性について検討を行った。3次元有限要素モデルと声道内音圧分布の計算例を図1に示す。分岐が存在しない場合は、従来、伝達特性上の零点は発生しないと考えられていたが、3次元形状を考慮した計算では、母音によっては3kHz前後の周波数域において、分岐がない状態であっても零点が発生し得ること、4kHz以上の高域では多くの極、零点が発生することなどが示された。また、(c)のように声道断面を幾何学的に簡単な形状に置き換えた場合や咽頭と口腔の間の曲がりや省略した場合、梨状窩などの声道内分岐を省略した場合など、3次元形状の簡略化の影響について検討を行った。モデルの形状変形によっても伝達特性の低域はあまり影響を受けず、音韻性を決定する低域特性が断面形状に関する感度が極めて低いことが確認された一方、おおよそ4kHz以上の高域においては、断面形状への依存性が大きいことが示された。図2は、母音/a/から/i/に形状を変化させた場合の数値モデルによる計算結果である。高域では高次の伝搬モードが発生し、声道伝達関数に影響を与えることが明らかとなった。

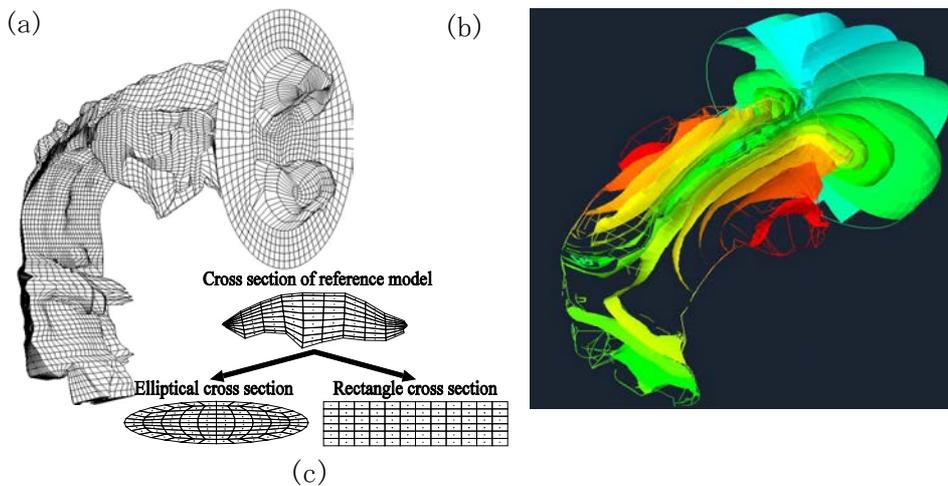


図1 3次元声道形状の有限要素法による解析例 (a) 有限要素メッシュ/a/ (b) 声道内部の音圧分布/a/(3654Hz) (c) 断面形状の幾何学的に簡単な形状への置換

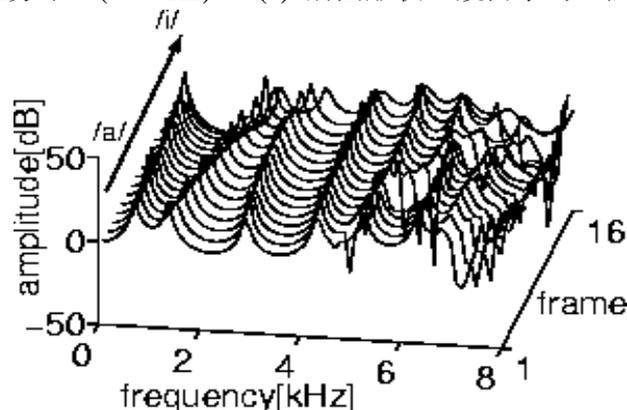


図4-7-2 声道伝達特性の時間変化

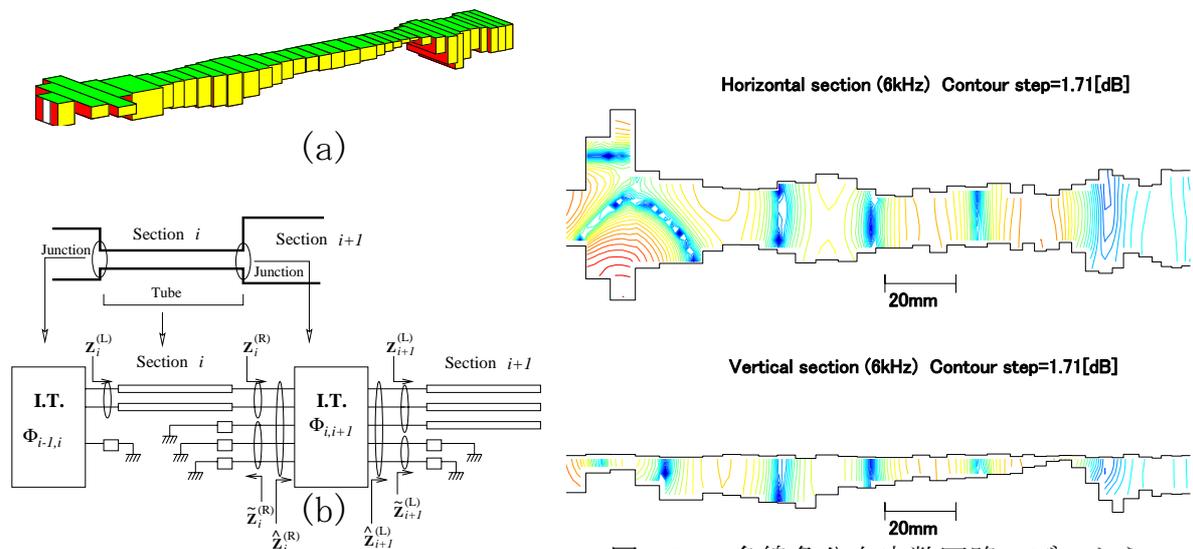


図4-7-3 (a) 矩形管の非対称接続による近似 (b) モード展開に基づく電氣的等価回路

図4-7-4 多線条分布定数回路モデルから求められた音圧分布例 (6kHz)

従来から利用されている1次元音響管モデルは分布定数回路理論とよく対応しており、高速な計算が可能であるが、適用範囲が限られているので高域の伝達特性を求めることができない。図4-7-3(a)のように3次元声道の各断面を矩形で近似し、これらが非対称に多段接続されたものとみなすと、管内の3次元音場を平面波と高次モードの重畳により表現することができる。通常、ダクト系の音響計算では伝搬しないモード（エバネッセントモード）は無視するが、声道モデルのように各区間長が短い場合は、隣接する管への影響があるため、エバネッセントモードを考慮する必要がある。図4-7-3(b)は、エバネッセントモードを含む多線条分布定数回路として表現した電氣的等価回路である。平面波と高次モードの自由空間への放射を含めて計算する方法を提案しており、これにより図4-7-4のように声道の横断面サイズの効果を含めて音場を表現することが可能となった。各管の断面積を保持したまま隣接する管との相対的な配置を変化させた場合には、高域の音響特性に大きく影響することが示されている。モード展開に基づく多線条分布定数回路モデルから得られた音響特徴は、有限要素法による様々なモデルを用いた解析結果と同様の傾向を示していることから、声道の3次元形状の小さな変形が音声生成系の高域の音響特性に特に大きく影響することが示されたと言える。

声道の3次元形状に起因する音響特徴は、音声の個人性の出現と密接に関連していると考えられることから、声道音響モデルの高度化は、話者依存性のある様々な音声処理に寄与できるものと考えている。声門や口腔内の狭めにおける高速空

気流と音波の相互結合をどのように扱うかという問題も残されており、今後、計算機シミュレーションのみではなく計測実験に基づく検討を進める必要があると思われる。

## 4-8 発話ロボットの構築（モデリンググループ）

### (1) 実施内容

本研究は、発声器官（肺，声帯）および調音器官（舌，唇，歯，鼻腔）を有し、人間の発声動作を模擬した発話ロボットを開発し、これを用いて人間と同様の発声を実現することにより、計算機シミュレーションのみでは解明困難な発声系のメカニズムをロボット工学的な視点から明らかにすることを目的としている。

上記の目的に従い、図4-8-1に示すように人間形発話ロボットWT-1（Waseda Talker-No.1）を開発し母音発声を実現した。また、WT-1R（Waseda Talker-No.1 Refined）を開発し、母音、さらに子音の一部であるさ行、は行、ま行、ぱ行、/waseda/の発声を実現した。そして、WT-2（Waseda Talker-No.2）・WT-3（Waseda Talker-No.3）を開発し、従来のロボットに比べ人間に近い明瞭性の高い母音および破裂子音、摩擦子音、鼻子音の生成を実現した。本報告では、WT-3の機構と音声生成について述べる。

#### (i) 発話ロボット WT-3 の機構

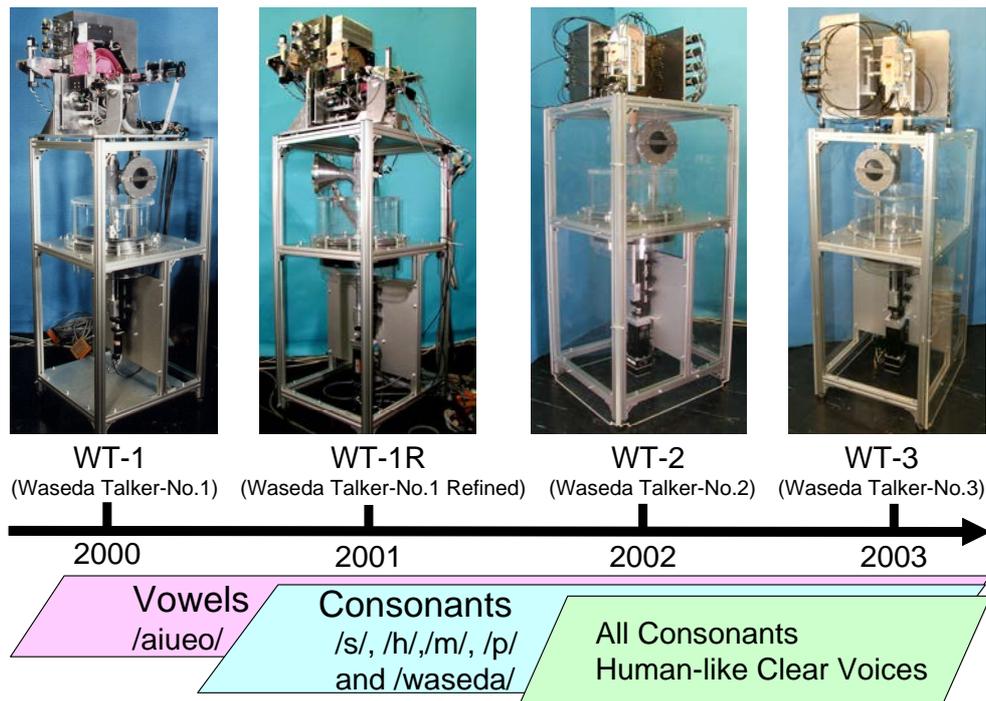


図4-8-1 Talking robot WT (Waseda Talker) Series

発話ロボットWT-3は、図4-8-2に示すように肺（1自由度）、声帯（3自由度）、調音器官である口唇（5自由度）、歯（1自由度）、舌（7自由度）、鼻腔、軟口蓋（1自由度）の全18自由度を有し、声帯から口唇までの声道長さは175[mm]であり成人男性と同程度の大きさを持つ。その概要は、肺から空気を送り人工声帯を振動させることで音を生成し、

舌などの調音器官によって調音され、口唇から音が発せられる。また、その発話器官は、動きを確保しつつ大規模に変形し、かつ空気・音の密閉性を確保しなければならず、そのため弾性体の超低硬度ゴム<sup>(4)</sup>で構成されている。下記に各器官の詳細について報告する。

肺は、図4-8-2に示すように人間の呼気・吸気系を模擬し、ベロフラムを用いた機構を採用している。そして、WT-3の声帯は、図4-8-3に示すように2枚の超低硬度ゴム<sup>(4)</sup>を張り合わせることでスリットを形成し、そこに肺からの呼気を通し振動させ音源を生成する。左右のゴムを独立した機構で均等に巻き取ることで、ピッチ変更を可能にした。安定した声帯振動を実現し、ピッチが100-260 [Hz]と広域になり、より抑揚のある発声を期待できるようになった。さらに人間の声帯と同様に、基本周波数を保ったまま有声無声音の切り替えを可能にした。

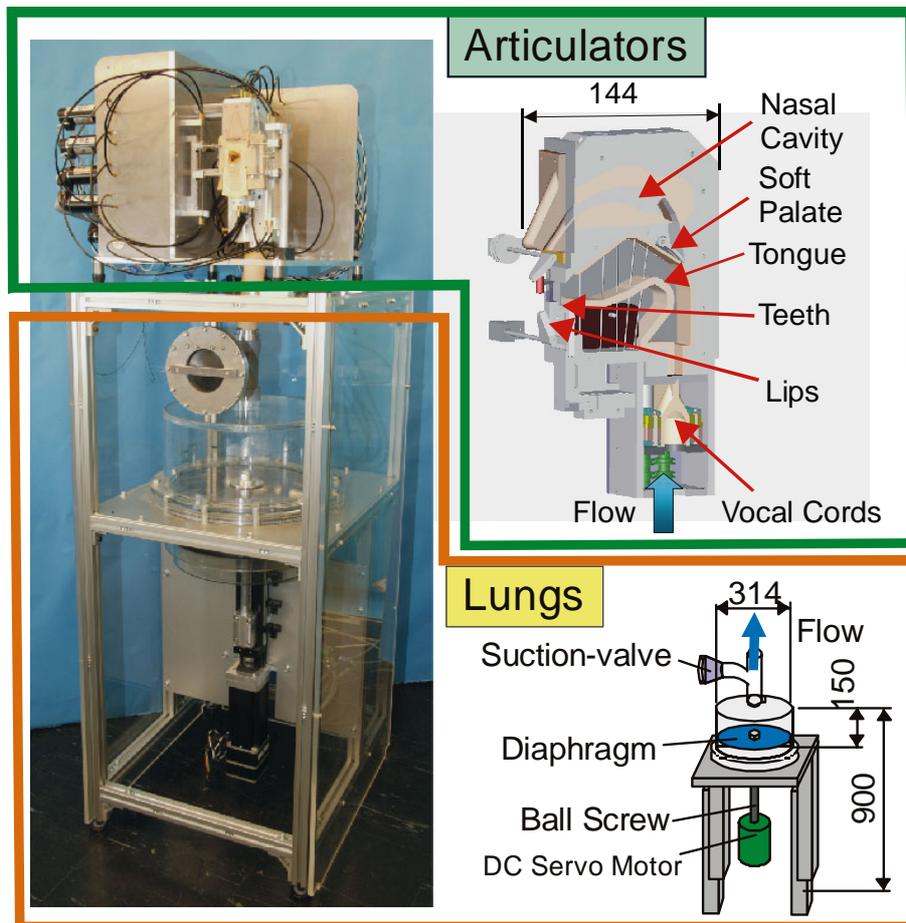
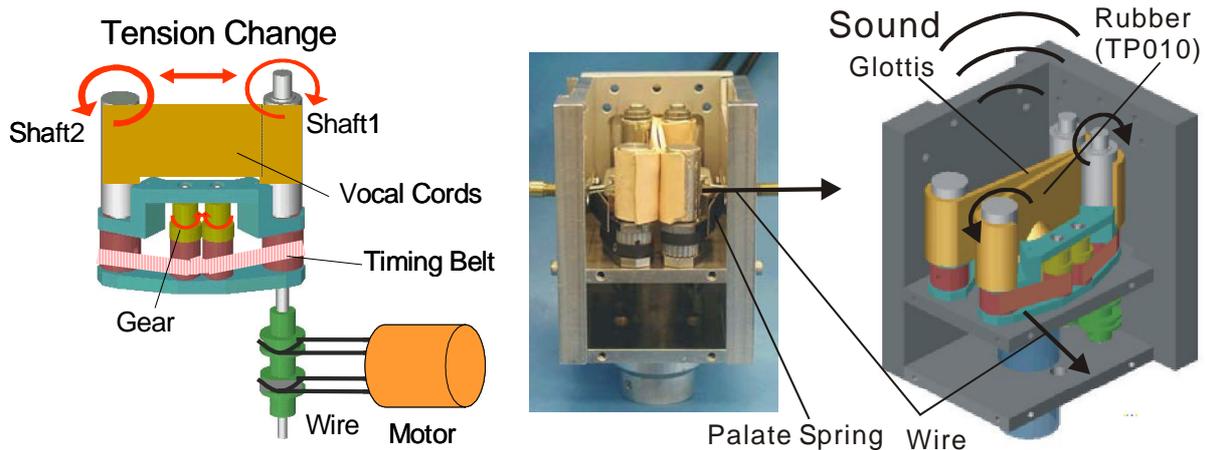


図4-8-2 Mechanical overview of talking robot WT-3



(a) Change of pitch

(b) Switch between voiced and voiceless sounds

図4-8-3 WT-3's vocal cord mechanism

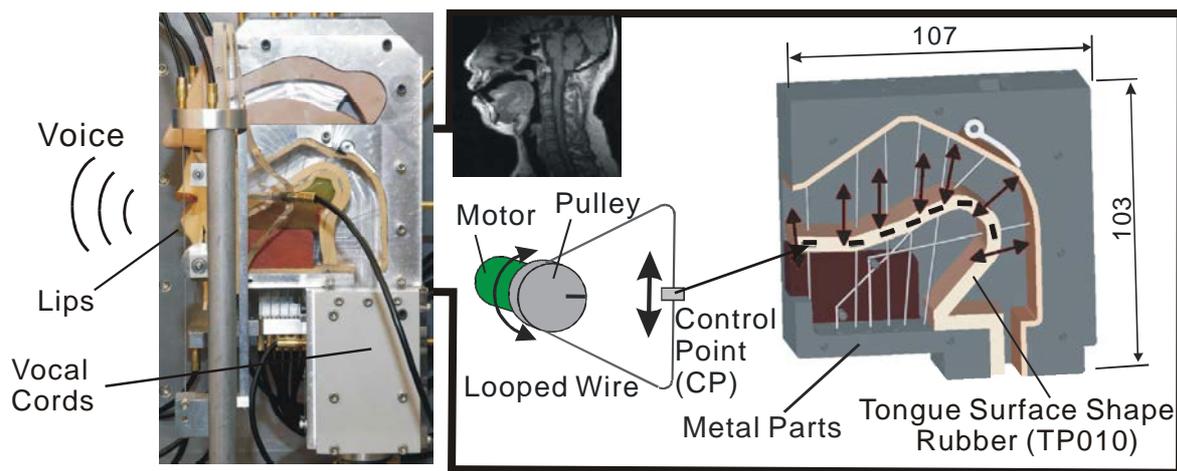
また、人間の音声は声帯で原音を生成し、声道形状を変更させることでその多様性を与えている。WT-3の舌機構は、図4-8-4に示すようにワイヤによる舌形状変更機構であり、舌は超低硬度ゴムで形成される。そのゴムと7個の金属部材を接着し、そこからループ状にしたワイヤを口蓋と下顎の間に通し駆動させることで舌の形状を変化させた。この機構は7点で舌形状を形成し、人間に近い多様な構えの舌形状が生成可能となった。

WT-3の口唇は、図4-8-5に示すように上下それぞれに開口と突き出しのためにワイヤ・プーリの2自由度機構と円唇母音形成のために口唇両端の口角を突出す1自由度機構を有し、計5自由度の口唇駆動機構を実現した。図7にWT-3の母音発声時の口唇形状を示す。歯は、上歯を口蓋に固定し、下歯を1自由度の直動機構により高速に開口可能である。鼻音発声に必要な鼻腔は、人間と同様一对の共鳴腔で構成しており、軟口蓋を開くことによって鼻音発声が可能である。

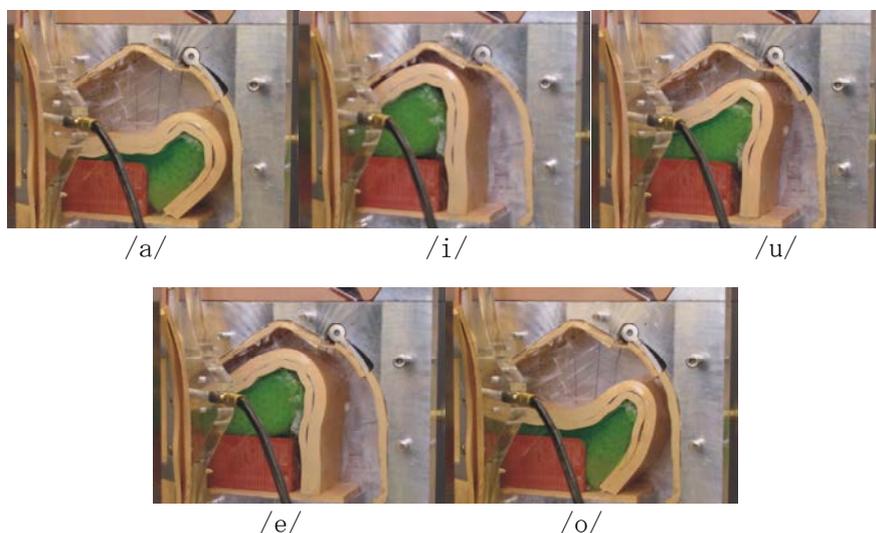
上記の器官を有するWT-3を用い、破裂子音、摩擦子音、鼻子音などの日本語の50音、そして濁音、半濁音の構音、さらに連続発声を実現し、従来のロボットに比べより人間に近い自然な発声を実現した。

#### (ii) 発声実験

WT-3を用いて母音発声実験を行い、その出力音声を観測した。図4-8-6に母音/a/のパワースペクトルおよび/aieuo/のスペクトログラムを示す。人間の母音の音響的特徴であり声道の共振周波数であるフォルマントは毛利を参考とし、スペクトログラムによるフォルマン



(a) Tongue mechanism using lopped wires

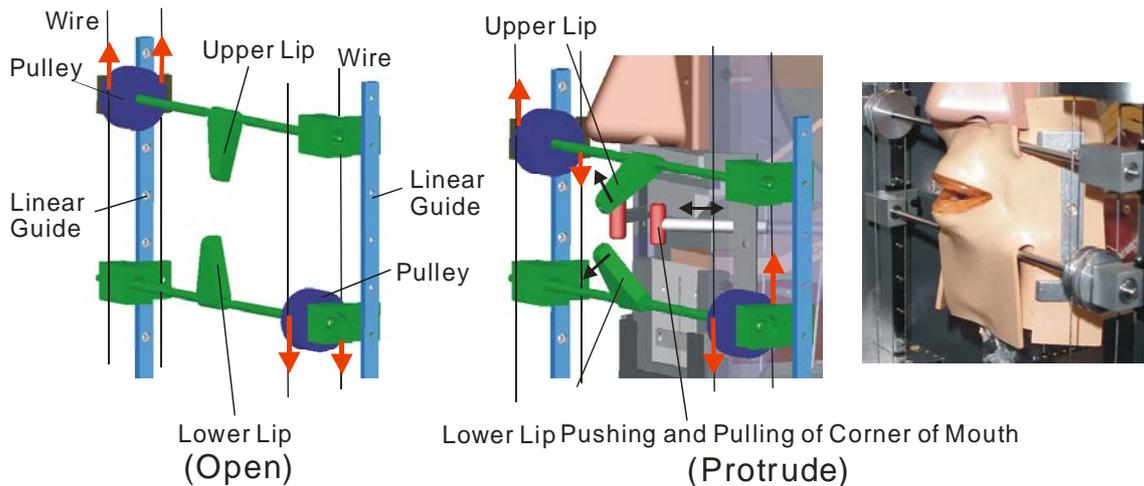


(b) Tongue shape when speaking Japanese vowels

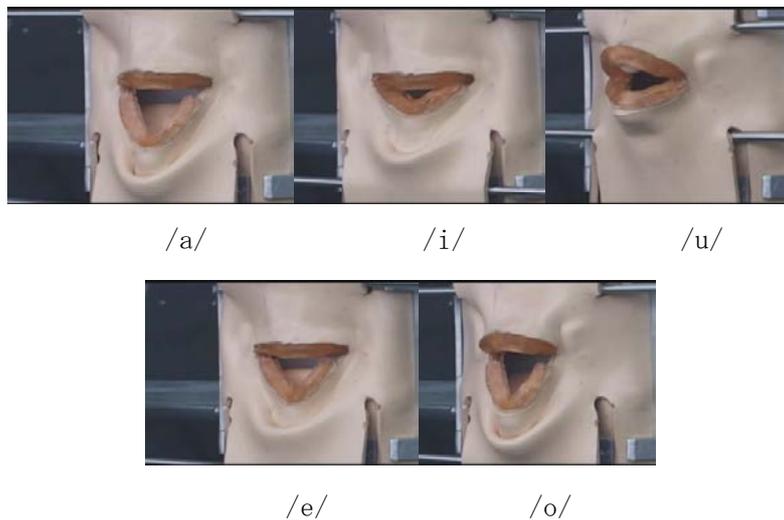
図4-8-4 WT-3's tongue mechanism

ト抽出は音声信号処理ソフトのPraatを用いた。図よりWT-3はより人間に近いフォルマントパターンを示しており、第2フォルマント (F2)に関して大きく変化していることが確認できる。舌形状、口唇形状が人間に近いものとなり、また音響特性を考慮し舌下部の空間を埋めるなどの改良により、F2の変化が明瞭となり、聴覚的にも従来のロボットに比べより聞き取りやすいものとなった。

また、子音発声の一例として摩擦音である/s/について図7に示す。人間の歯擦音の/s/は5 [kHz]と8 [kHz]にエネルギーのピークを持つと報告されており、図よりWT-3においてもその特徴を確認できた。他にも破裂子音 (/t/, /d/, /p/, /b/, /k/, /g/)、摩擦子音 (/j/, /z/, /h/, /Φ/, /Ç/)、鼻子音 (/m/, /n/)などの日本語のすべての50音、そして濁音、半濁音の子音発声を生成した。



(a) Lips mechanism that can control the opening area and protrude



(b) Lips shape when speaking Japanese vowels

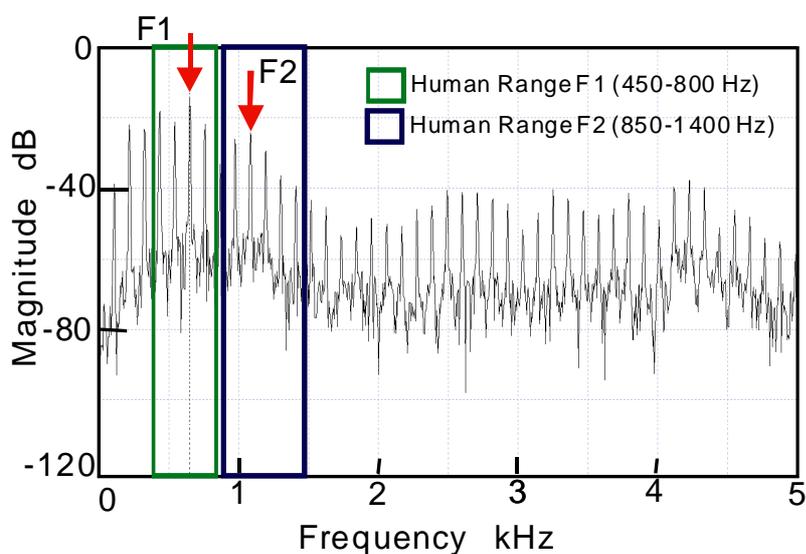
図4-8-5 WT-3's lips mechanism

## (2) 得られた研究成果の状況及び今後期待される効果

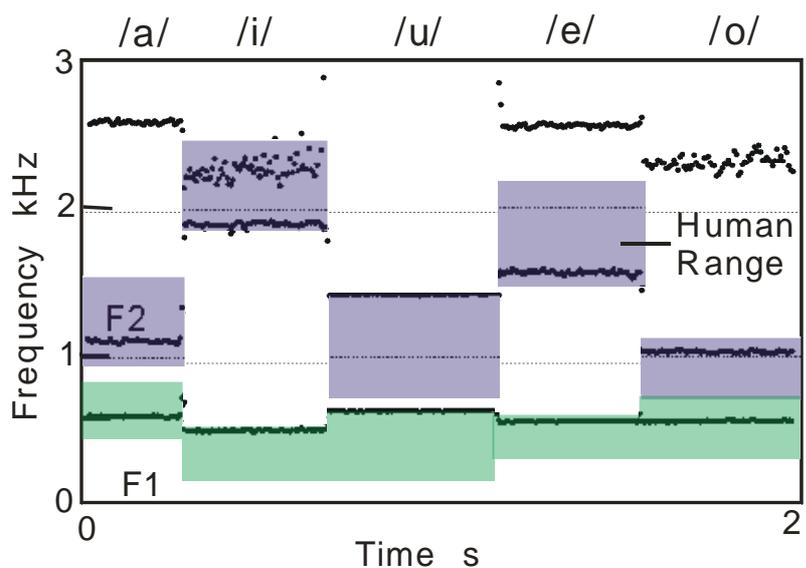
本研究において、人間と同様に発声・調音器官を有する発話ロボットを開発し、流体音響現象を伴う人間の発声運動を実機械モデルによってリアルタイムに再現可能となった。その波及効果として、これまでに提唱された発声運動に関する理論を実際に試す実験装置として利用することも可能であり、さらに将来、音声から口の動きを逆推定する技術が開発できれば、発声の訓練や外国語の発音習得の有効な手段を提案できるものと考えられる。また、現在の携帯電話のように人間の音声データを伝送するのではなく、それを生成するための人間の発声運動を伝送することで情報量を極めて圧縮した新たな情報伝達システム

への応用も考えられる。

このように人間形発話ロボットは、将来欠くべからず研究機材として大きく役立っていくことは疑いない。また医学分野においても、発声障害などの治療・研究にも利用可能であり、発声運動を模倣するシミュレータとして、大いに研究に利用されていくであろうと予想される。さらに、ロボット工学的に見ても、声帯や舌、唇など大変形を伴う弾性体を人と同じように高速かつ高精度で制御する発話ロボットを構築する意義は大きく、柔らかいロボットを実現するための基盤技術となる。



(a) Japanese vowel /a/



(b) Spectrogram of /aieuo/

図4-8-6 Formant pattern of WT-3

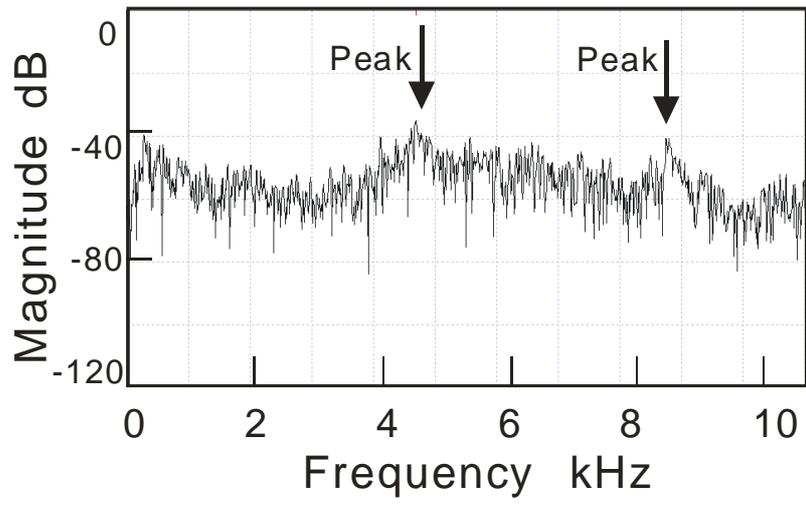


图4-8-7 Fricative /s/ of WT-3

## 4.9 生理的機構を模擬した舌ロボットの構築（モデリンググループ）

### (1) 実施の内容

舌の生理的構造を模擬した人工舌の作成を検討した。舌はそれぞれの舌筋に収縮力を加えることで、その一つ一つの長さを制御するのではなく、複雑に入り組んだ舌筋がそれぞれに影響を及ぼして、舌全体の形状を制御している。本研究に於いて作成する人工舌はその外形状のみでなく、内部舌筋の付き方も模擬する。このような人間の発声機構をバイオメティクスの考え方に従って人工的に再現した実態モデルを機械式音声合成装置（Mechanical Speech Synthesizer：MSS）と定義する。図4-9-1参照。

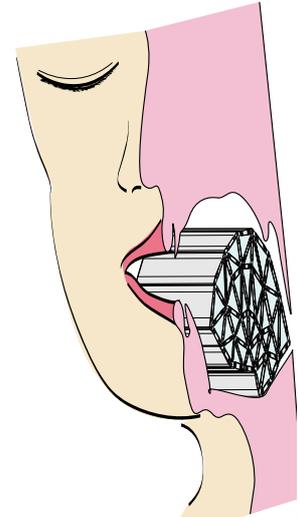


図4-9-1 機械式人工舌の概念

### (2) 得られた研究成果の状況及び今後期待される効果

図4-9-1のような概念図を元に、以下の仕様を満たす要素を試作した。図4-9-2上参照。

- 構成要素単位を三角柱とする。
- 三角要素の3辺は伸縮可能で任意の1辺をアクティブに駆動させることができる。
- 三角要素の面積が一定になるように内部に液体状の物質を充填する。

具体的には3辺に空気圧シリンダーを内蔵し、構成要素内には内部にスライム（ゲル物質）を封入したゴム袋を充填した。図2下参照。

本装置で、図4-9-3のように2辺をパッシブにしておいて（エアシリンダーへの空気の入出力を止める）他の1辺をアクティブに収縮させる実験を行った。その結果、面積変化率数パーセントの誤差で三角形が変形し所望の動作が確認された。

今後はこの要素を複数連結することによってより複雑な動作が可能な舌モデルを構築する。



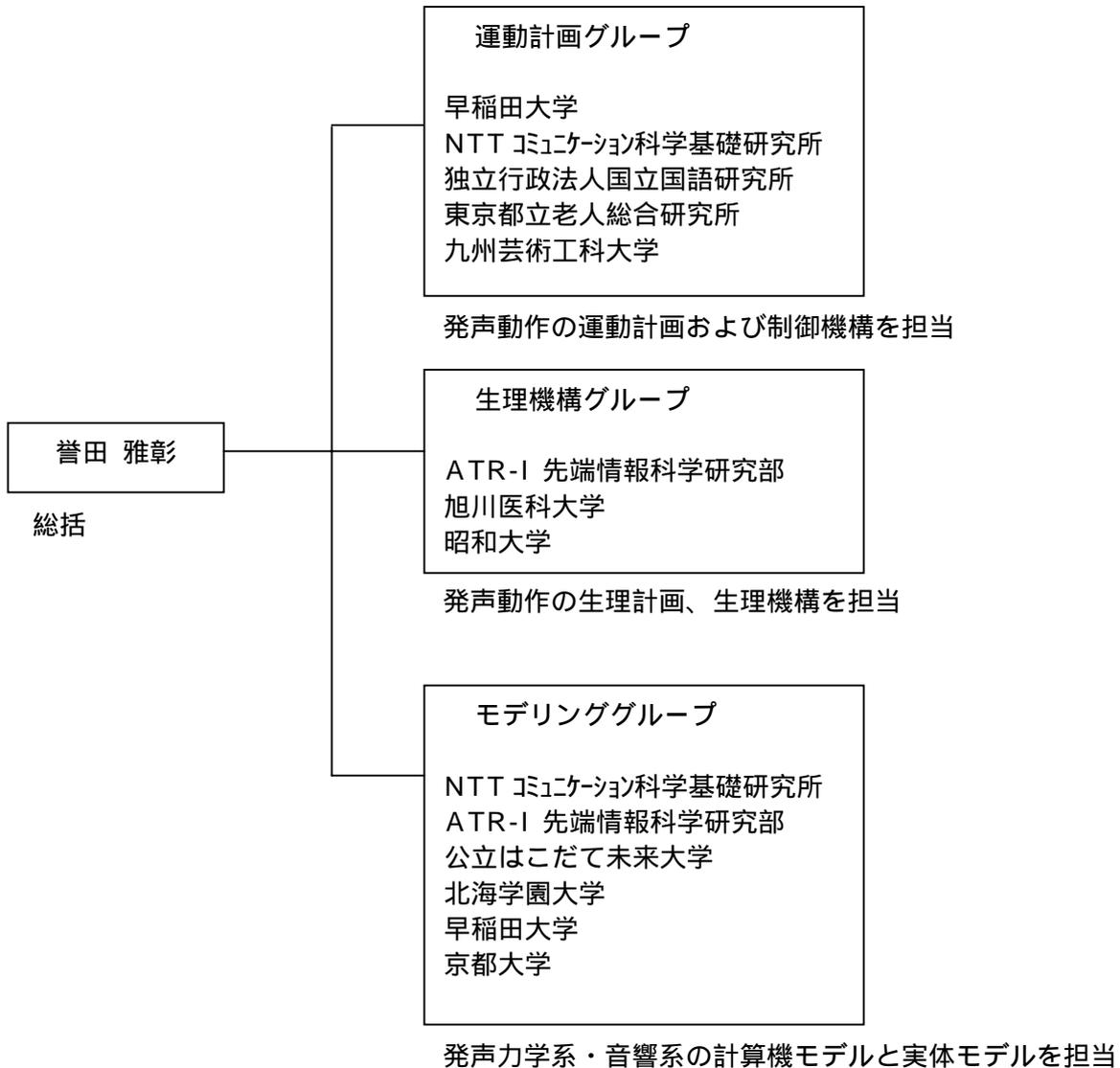
図4-9-2 構成要素



図4-9-3 動作

## 5. 研究実施体制

### (1) 体制



## (2)メンバー表

## 運動計画グループ (誉田雅彰)

氏名	所属	役職	研究項目	参加時期
誉田 雅彰	早大	教授	運動タスク、運動計画モデル	H10.10～
岡留 剛	NTT CS 研究所	主任研究員	運動計画モデル	H10.10～
鈴木 紳	NTT CS 研究所	主任研究員	運動計画モデル	H10.10～
藤野 昭典	NTT CS 研究所	社員	運動計画モデル	H13.03
廣谷 定男	NTT CS 研究所	社員	運動計画モデル	H11.05～
五味 裕章	NTT CS 研究所	主任研究員	運動タスク	H13.05～
伊藤 貴之	NTT CS 研究所	CREST 研究員	運動タスク	H10.10～
西條 直樹	NTT CS 研究所	員	運動タスク	H11.05～
阿部 敏彦	NTT CS 研究所	社員	運動タスク	H13.05～
野添 潤一	NTT CS 研究所	ポスドク	運動タスク	H14.02～
池田 真由美	NTT CS 研究所	学生(修士)		H15.09
川森 雅仁	NTT SI 研究所	研究補助員	パラ言語に基づく運動解析	H15.01～
前川 喜久雄	国語研	主任研究員	パラ言語に基づく運動解析	H10.12～
辰巳 格	老人研	領域長	運動と知覚の相互作用	H10.10～
伏見 貴夫	老人研	室長	運動と知覚の相互作用	H14.03
呉田 陽一	老人研	研究員	運動と知覚の相互作用	H10.10～
鎗木 時彦	九州芸工大	研究員	運動計画モデル、運動計測	H10.10～
若宮 幸平	九州芸工大	助教授	運動計画モデル、運動計測	H12.04～
澤田 雅司	NTT-AT	助手	運動計測	H12.04～
桐谷 滋	神戸海星女大	社員	声帯機構	H10.10～
新美 成二	国際医療福祉大	教授	生体計測	H14.02～
Emi Z. Murano	ATR-HIS	教授 研究員	生体計測	H14.08～ H15.03 H10.10～ H13.03 H12.04～ H14.03 H10.10～

## 生理機構グループ (本多清志)

氏名	所属	役職	研究項目	参加時期
----	----	----	------	------

本多 清志	ATR-I ISD	主幹研究員	運動・生理計測、生理モデル	H10.10 ~
E. Bateson	ATR-I ISD	主幹研究員	運動計測、生理モデル	H10.10 ~
正木 信夫	ATR-I ISD	主任研究員	運動計測、神経情報処理モデル	H14.03
高野 佐代子	ATR-I ISD	CREST 研究員	生体モデル	H10.10 ~
党 建武	北陸先端大	員	生理モデル	H12.04 ~
朴 雪梅	北陸先端大	助教授	生理モデル	H10.10 ~
坂本 尚志	旭川医大	学生(修士)	神経情報処理モデル	H14.06 ~
和久本 雅彦	昭和大学	教授	運動計測、生理モデル	H10.10 ~
		講師		H11.04 ~

モデリンググループ (高西敦夫)

氏名	所属	役職	研究項目	参加時期
誉田 雅彰	早大	教授	声帯振動機械モデル	H10.10 ~
五味 裕章	NTT CS 研究所	主任研究員	下顎機械モデル	H10.10 ~
持田 岳美	NTT CS 研究所	研究主任	声帯振動機械モデル	H10.10 ~
本多 清志	ATR-I ISD	主幹研究員	声帯振動機械モデル	H10.10 ~
三木 信弘	はこだて未来大	教授	流体音響モデル	H10.10 ~
吉川 英一	はこだて未来大	助手	流体音響モデル	H12.04 ~
S. El-Masri	はこだて未来大	CREST 研究員	流体音響モデル	H14.03
佐々木 幸司	はこだて未来大	員	流体音響モデル	H12.04 ~
元木 邦俊	北海学園大	学生	流体音響モデル	H13.01
松崎 博季	北海学園大	助教授	流体音響モデル	H13.08 ~
高西 淳夫	早大	助手	舌、唇機械モデル	H15.05
高信 英明	工学院大	教授	舌、唇機械モデル	H10.10 ~
西川 員史	早大	講師	舌、唇機械モデル	H10.10 ~
林 宏樹	早大	学生(博士)	舌、唇機械モデル	H10.10 ~
今井 彰浩	早大	学生(修士)	舌、唇機械モデル	H10.10 ~
小河原 隆行	早大	学生(修士)	舌、唇機械モデル	H12.04 ~
桑江 俊治	早大	学生(修士)	舌、唇機械モデル	H12.12 ~
棚橋 邦浩	早大	学生(修士)	舌、唇機械モデル	H13.03
池尾 俊輔	早大	学生(修士)	舌、唇機械モデル	H12.12 ~
藤田 愛	早大	学生(修士)	舌、唇機械モデル	H13.03
秋山 隆行	早大	学生(修士)	舌、唇機械モデル	H12.12 ~
福井 幸太郎	早大	学生(学部)	舌、唇機械モデル	H14.03
大須賀 公一	京大	学生(学部)	舌、唇機械モデル	H13.04 ~
板東 幹雄	京大	助教授	舌、唇機械モデル	H13.04 ~
澤田 謙次	大阪府立大	学生(修士)	舌、唇機械モデル	H15.03
		学生(博士)		H14.04 ~
				H14.04 ~
				H15.04 ~

				H15.04 ~ H10.10 ~ H15.01 ~ H11.04 ~ H12.08
--	--	--	--	--

## 6. 研究期間中の主な活動

### (1) ワークショップ・シンポジウム等

年月日	名称	場所	参加人数	概要
2000. 5. 1～ 4	CREST Workshop on Models of Speech Production	Kloster Seeon, Bavaria	130人	Speech Production Seminarとの共催でワークショップを開催し、チームの研究成果とともにCRESTプロジェクトを海外にアピールした。
2001. 3. 17	チームミーティング	「脳を創る」研究事務所	23人	チーム内各グループの進捗状況報告および研究討議
2001. 9. 23 ～24	CREST Workshop on Speech Motor Control and Modeling	ホテルルーシス札幌	46人	発話メカニズムの研究に関する国内外の主要な研究者が参加し、最新の研究成果について討論を行った。また、チームの研究成果をアピールするとともに以後の研究展開について有益な示唆を得た。
2002. 7. 24	チーム全体ミーティング	JAIST	25人	チーム内各グループの進捗状況報告および研究討議
2003. 8. 22 ～23	シンポジウム「MRI技術と音声研究」	ATR	36人	観測法の中で重要な役割を果たしたMRIとその音声研究への貢献をテーマとした、チームメンバー及び外部からの講演者を招いたシンポジウム

### (2) 招聘した研究者等

氏名（所属、役職）	招聘の目的	滞在先	滞在期間
藤村 靖 (オハイオ州立大学, 教授)	藤村教授が提案されているC&Dモデルについて把握するため(講演等)	NTT CS研	H11. 7. 12～ H11. 7. 16
Maureen Stone (University of Maryland, Professor)	H13. 9. 24-25に行われたCREST Workshopでの発表	Hotel Lusion Sapporo	H13. 9. 23～ H13. 9. 26

Pascal H.L. Perrier (Queen's University, Professor)	H13. 9. 24-25 に行われ たCREST Workshopでの 発表	Hotel Lusion Sapporo	H13. 9. 23～ H13. 9. 26
Rafael Laboissiere (Max-Planck Institute fur psychologische Forschung, Dr.)	H13. 9. 24-25 に行われ たCREST Workshopでの 発表	Hotel Lusion Sapporo	H13. 9. 23～ H13. 9. 26
Elliot Saltzman (Boston University, Associate Professor)	H13. 9. 24-25 に行われ たCREST Workshopでの 発表	Hotel Lusion Sapporo	H13. 9. 23～ H13. 9. 26
David J. Ostry (McGill University, Professor)	H13. 9. 24-25 に行われ たCREST Workshopでの 発表	Hotel Lusion Sapporo	H13. 9. 23～ H13. 9. 26
Joseph S. Perkell (Massachusetts Institute of Technology, Senior Research Scientist)	H13. 9. 24-25 に行われ たCREST Workshopでの 発表、 調音観測装置及び音声 生成に関する会議参加	Hotel Lusion Sapporo、 NTT CS研	H13. 9. 23～ H13. 9. 28
Philip Hoole (Institut fur Phonetik, Munich University)	H13. 9. 24-25 に行われ たCREST Workshopでの 発表、調音観測装置及 び音声生成に関する会 議参加	Hotel Lusion Sapporo、 NTT CS研	H13. 9. 23～ H13. 9. 27
藤村 靖 (オハイオ州立大学, 教授)	発声メカニズムに関す る議論及び講演のため	NTT CS研	H14. 7. 1～ H14. 7. 31
John F. Houde (University of California, Assistant Research Neuroscientist)	聴覚フィードバックに 関する講演及び議論	NTT CS研	H14. 9. 2～ H14. 9. 9

## 7. 主な研究成果

### (1) 論文発表 (国内15件、海外9件)

1. Hiroya, S., Honda, M. “Speaker adaptation method for acoustic-to-articulatory inversion using an HMM-based speech production model”, *IEICE Transactions on Information and Systems*, **E87-D, 5**, 2004.
2. Hiroya, S., Honda, M. “Estimation of articulatory movements from speech acoustics using an HMM-based speech production model”, *IEEE Trans. on Speech and Acoustic Processing*, **12, 2**, 2004.
3. 伊藤貴之、五味裕章、誉田雅彰 “Articulatory coordination by muscle-linkage during bilabial utterances”、日本音響学会誌、**24, 6**, pp.391-393, 2003.
4. 党建武、誉田雅彰、本多清志 “Investigation of coarticulation in continuous speech”、*Acoustical Science and Technology*, 2003 (in press).
5. 藤野昭典、鎗木時彦、誉田雅彰、村野恵美、新美成二 「無声子音における舌・唇と喉頭の調音運動の時間関係の分析」、日本音響学会誌、**59, 3**, pp.121-130, 2003.
6. 伊藤貴之、五味裕章、誉田雅彰 「発声運動に応じた筋ステイフネスによる上唇・顎の協調メカニズム」、電子情報通信学会論文誌、**86-DII**, pp.333-341, 2003.
7. Nishikawa, K., Imai, A., Ogawara, T., Takanobu, H., Mochida, T., Takanishi, A. “Development of a talking robot for vowels and consonant sounds”, *Acoustical Science and Technology*, **24, 1**, pp.32-34, 2003.
8. 西川員史、林宏樹、高信英明、持田岳美、誉田雅彰、高西淳夫 「人間形発話ロボットによる母音および子音発声の実現 - 第3報 より人間に近い発声を目指した新型発話ロボットの開発」、日本機械学会論文集、**C, 69, 683**, pp.139-144, 2003.
9. Sasaki, K., Miki, N., Miyanaga, Y. “Acoustic Analysis of Vocal Tract Using Auto-Mesh Generation of Finite Element Modeling”, 電子情報通信学会論文誌、**E86-A, 8**, pp.1964-1970, 2003.
10. Honda, M., Kaburagi, T., Fujino, A. “Compensatory responses of articulators to unexpected perturbation of the palate shape”, *Journal of Phonetics*, **30**, pp.281-302, 2002.
11. Gomi, T., Ito, T., Murano, E. Z., Honda, M. “Compensatory articulation during bilabial fricative production by regulating muscle stiffness”, *Journal of Phonetics*, **30**, pp.261-279, 2002.
12. 誉田雅彰 「発話機構の計算論的研究」、*Computer Today*、サイエンス社、2002
13. 鈴木紳、岡留剛、誉田雅彰 「音響調音コードブックを用いた音声からの調音運動の逆推定」、電子情報通信学会論文誌、**85-A**, pp.840-846, 2002.
14. 前川 喜久雄、北川 智利 「音声はパラ言語情報をいかに伝えるか」、認知科学、**9, 1**, pp.46-66, 2002.
15. Kaburagi, T., Honda, M. “Electromagnetic articulograph based on a nonparametric representation of the magnetic field”, *Journal of the Acoustical Society of America*, **111**, pp.1414-1421, 2002.
16. Dang, J., Honda, K. “Estimation of vocal tract shapes from speech sounds with a physiological articulatory model”, *Journal of Phonetics*, **30**, pp.511-532, 2002.
17. 西川員史、浅間弘一郎、林宏樹、高信英明、高西淳夫 「人間形発話ロボットによる母音発

- 声の実現」, 日本機械学会論文集、**C, 68, 667**, pp.900—905, 2002.
18. 西川員史、小河原隆行、今井彰浩、高信英明、持田岳美、高西淳夫 「人間形発話ロボットによる子音および連続発声の実現」, 日本機械学会論文集、**C, 68, 675**, pp.3361-3366, 2002.
  19. 佐々木幸司、三木信弘、松崎博季、宮永喜一 「3次元声道音響解析における有限要素法の計算の高速化」, 電子情報通信学会誌、**J85-A, 11** pp.1211-1218, 2002.
  20. Takano, S., Honda, K. “Analysis of tongue muscle geometry based on 3D MRI and its implications on tongue muscle functions in vowel production”, *Speech Motor Control, Colonial Williamsburg/VA.*, 2002.
  21. Kaburagi, T., Honda, M. “Dynamic articulatory model based on multidimensional invariant-feature task representation”, *Journal of the Acoustical Society of America*, **110**, pp.441-452, 2001.
  22. Okadome, T., Honda, M. “Generation of articulatory movements by using a kinematic triphone model”, *Journal of the Acoustical Society of America*, **110**, pp.453-463, 2001.
  23. 菅田雅彰 「科学技術振興事業団戦略的基礎研究推進事業(CREST) 発声力学に基づくタスクプランニング機構の構築」, 日本音響学会誌、2000.
  24. Callan, D., Callan, A., Honda, K. and Masaki, S. “Scalp recorded electrical brain activity underlying lexical processing”, *Technical Report of IEICE*, TL99-16, 25-32, 1999.

(2) 口頭発表

① 招待、口頭講演 (国内 91件、海外 85件)

岡留剛・鎚木時彦・誉田雅彰(NTT CS 研)、“ Relations between utterance speed and articulatory movements ”、Eurospeech'99: 6<sup>th</sup> European Conference on Speech Communication and Technology、Budapest, Hungary、1999.9.5

鎚木時彦・誉田雅彰・岡留剛(NTT CS 研)、“ A trajectory formation model of articulatory movements using a multidimensional phonemic task ”、Eurospeech'99: 6<sup>th</sup> European Conference on Speech Communication and Technology、Budapest, Hungary、1999.9.5

誉田雅彰・鎚木時彦・岡留剛(NTT CS 研)、“ Speech synthesis by mimicking articulatory movements ”、International Conference of IEEE SMC99、Tokyo、1999.10.13

岡留剛・鎚木時彦・誉田雅彰(NTT CS 研)、“ Articulatory movement formation by kinematic triphone model ”、International Conference of IEEE SMC99、Tokyo、1999.10.13

川森雅仁・岡留剛(NTT CS 研)、“ Semantic calculus of adjectives and its learning ”、International Conference on Cognitive Science、waseda University (Tokyo, Japan)、1999.7.27

澤田謙次(大阪府立大)・大須賀公一(京大)・荒木秀之(三菱電機)・小野敏郎(大阪府立大)、“ Estimation of three-dimensional shape of articulatory organs toward the realization of mechanical speech synthesizer ”、1999 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics、東京国際フォーラム(東京)、1999.10.13

澤田謙次(大阪府立大)・大須賀公一(京大)・荒木秀之(三菱電機)・小野敏郎(大阪府立大)、“ On soft machine Toward the realization of mechanical speech synthesizer ”、1999 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics、東京国際フォーラム(東京)、1999.10.13

鎚木時彦・誉田雅彰(NTT CS 研)、“ Dynamic articulatory model based on multidimensional invariant-feature task representation. ”、5<sup>th</sup> Seminar on Speech Production: Models and Data、Munich, Germany、2000.5.4

藤野昭典・鎚木時彦・誉田雅彰(NTT CS 研)・村野恵美・新見成二(東大)、“ Relative Timing between Articulatory and Glottal Motions in Voiceless Consonant Production. ”、5<sup>th</sup> Seminar on Speech Production: Models and Data、Munich, Germany、2000.5.1

五味裕章(NTT CS 研)・伊藤貴之(CREST)・誉田雅彰(NTT CS 研)、“ Task dependent jaw-lip coordination examined by jaw perturbation during bilabial-consonant utterances. ”、5<sup>th</sup> Seminar on Speech Production: Models and Data、Munich, Germany、2000.5.4

岡留剛・鈴木紳・誉田雅彰(NTT CS 研)、“ Recovery of articulatory movements from acoustics with phonemic information. ”、5<sup>th</sup> Seminar on Speech Production: Models and Data、Munich, Germany、2000.5.2

誉田雅彰・鎚木時彦(NTT CS 研)、“ Speech Compensation to Dynamical Structural Perturbation of the Palate Shape. ”、5<sup>th</sup> Seminar on Speech Production: Models and Data、Munich, Germany、2000.5.4

党建武・本多清志(ATR)、“ Estimation of vocal tract shape from speech sounds via a physiological articulatory model ”、5<sup>th</sup> Seminar on Speech Production: Models and Data、Munich, Germany、2000.5.2

松崎博季・元木邦俊(北海学園大)、“ FEM analysis of 3-D vocal tract model with asymmetrical shape. ”、5<sup>th</sup> Seminar on Speech Production: Models and Data、Munich, Germany、2000.5.4

元木邦俊(北海学園大)・Pierre BADIN・Xavier PELORSON(Institut de la Communication Parlee(France))・松崎博季(北海学園大)、“ A modal parametric method for computing acoustic characteristics of three-dimensional vocal tract models. ”、5<sup>th</sup> Seminar on Speech Production: Models and Data、Munich, Germany、2000.5.4

高西淳夫(早大)、“ Development of a talking Robot ”、5<sup>th</sup> Seminar on Speech Production: Models and Data、Munich, Germany、2000.5.1

Emi Zuiki Murano(東大)、“ Vocal Fold Vibration patterns in Spasmodic Dysphonia: Observation from a High-Speed digital Imaging System. ”、5<sup>th</sup> Seminar on Speech Production: Models and Data、Munich, Germany、2000.5.4

吉川英一・三木信弘(はこだて未来大)、“ A new model of lung and trachea for speech synthesizer of vocal-tract analog. ”、5<sup>th</sup> Seminar on Speech Production: Models and Data、Munich, Germany、2000.5.4

Samir El-Masri・三木信弘(はこだて未来大)、“ A new efficient FEM and Analysis of relation between impedance function and geometrical parameters of the vocal tract. ”、5<sup>th</sup> Seminar on Speech Production: Models and Data、Munich, Germany、2000.5.4

岡留剛・誉田雅彰(NTT CS 研)、“ Planning and forming articulatory movements from phoneme-specific representatives. ”、Acoustic Society of America、Atlanta、2000.6.2

誉田雅彰(NTT CS 研)・鐙木時彦(九州芸工大)・藤野昭典(NTT CS 研)、“ Compensatory articulatory behavior to immediate structural perturbation of oral cavity. ”、Acoustic Society of America、Atlanta、2000.6.2

伊藤貴之(CREST)・五味裕章・誉田雅彰(NTT CS 研)、“ Model of the mechanical linkage of the upper lip-jaw for the articulatory coordination. ”、6<sup>th</sup> International Conference on Spoken Language Processing、北京・中国、2000.10.16

誉田雅彰・藤野昭典(NTT CS 研)、“ Articulatory Compensation and Adaptation for Unexpected Palate Shape Perturbation. ”、6<sup>th</sup> International Conference on Spoken Language Processing、北京・中国、2000.10.17

党建武・本多清志(ATR)、“ Improvement of a physiological articulatory model for synthesis of vowel sequences. ”、6<sup>th</sup> International Conference on Spoken Language Processing、北京・中国、2000.10.17

松崎博季・元木邦俊(北海学園大)、“ FEM analysis on acoustic characteristics of vocal tracts shape with different geometrical approximation. ”、6<sup>th</sup> International Conference on Spoken Language Processing、北京・中国、2000.10.19

元木邦俊(北海学園大)・Xavier PELORSON・Pierre BADIN(Institut de la Communication Parlee(France))・松崎博季(北海学園大)、“ Computation of 3-D vocal tract acoustics based on mode-matching technique. ”、6<sup>th</sup> International Conference on Spoken Language Processing、北京・中国、2000.10.17

林宏樹・浅間弘一郎・西川員史・高信英明・高西淳夫(早大)、「人間形発話ロボットの開発 母音発声の実現」、第21回バイオメカニズム学会学術講演会、九州大学、2000.11.25

西川員史・浅間弘一郎・林宏樹・高信英明・高西淳夫(早大)、“ Development of a Talking

Robot.”、IEEE/RSJ IROS2000、香川大学、2000.11.3

西川 員史、高西 淳夫(早大) “ Mechanical Design of a Talking Robot for Natural Vowels and Consonant Sounds ”、2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation(ICRA2001)、Seoul/Korea、2001.5.24

西川 員史、今井 彰浩、小河原 隆之(早大) 高信 英明(工学院大) 持田 岳美(NTT CS 研) 高西 淳夫(早大) “ Speech Production of Natural Vowels and Consonant Sounds using a Mechanical Talking Robot ”、The First International Symposium on Measurement, Analysis and Modeling of Human Functions、北海道大学、2001.9.22

五味 裕章(NTT CS 研) 伊藤 貴之(CREST) 誉田 雅彰(NTT CS 研) “ Compensatory articulation driven by muscle-linkage and change in acoustic distortion caused by different jaw-perturbations ”、The First International Symposium on Measurement, Analysis and Modeling of Human Functions、北海道大学、2001.9.23

伊藤 貴之(CREST) 五味 裕章、誉田 雅彰(NTT CS 研) “ Dynamical simulation of the upper lip compensatory articulation using low filtered EMG signal ”、The international symposium on measurement, analysis and modeling of human functions、北海道大学、2001.9.23

Emi Zuiki Murano(東大) “ First motor control assessed by electrical stimulation lips ”、First International Symposium Human Functions、北海道大学、2001.9.23

誉田 雅彰、藤野 昭典(NTT CS 研) Emi Z. Murano(東大) “ Compensatory responses of articulators to unexpected palatal perturbation: Articulatory and EMG studies ”、CREST Workshop on Speech Motor Control and Modeling、札幌、2001.9.24

五味 裕章(NTT CS 研) 伊藤 貴之(CREST) 誉田 雅彰(NTT CS 研) “ - Control mechanisms of cooperative articulation – From the viewpoint of perturbation study ”、CREST Workshop on Speech Motor Control and Modeling、札幌、2001.9.24

Emi Zuiki Murano(東大) “ Perioral Reflex Modulation in Speech Motor Control ”、CREST Workshop on Speech Motor Control and Modeling、札幌、2001.9.24

持田 岳美、誉田 雅彰(NTT CS 研) “ An experimental study on acoustical measurement of vocal-tract area function ”、CREST Workshop on Speech Motor Control and Modeling、札幌、2001.9.25

Kiyoshi Honda、Hironori Takemoto、Yukiko Nota、Shinobu Masaki(ATR-I) Sayoko Takano(CREST) “ Physiological assessment of speech production activities by means of MRI ”、CREST Workshop on Speech Motor Control and Modeling、札幌、2001.9.25

党 建武(AIST/ATR-I) 本多 清志(ATR-I) “ Motor control for a physiological articulatory model involving muscle antagonism ”、CREST Workshop on Speech Motor Control and Modeling、札幌、2001.9.25

元木 邦俊、松崎 博季(北海学園大) “ Numerical Computation on Acoustic Characteristics of 3D vocal-tract models ”、CREST Workshop on Speech Motor Control and Modeling、札幌、2001.9.25

鎗木 時彦(九州芸工大) 誉田 雅彰(NTT CS 研) “ Electromagnetic articulograph system using the spline representation of the magnetic field ”、CREST Workshop on Speech Motor Control and Modeling、札幌、2001.9.25

党 建武(JAIST/ATR-I) 本多 清志(ATR-I) “ Inverseestimation from speech sound to

articulatory targets ”、5<sup>th</sup> National conference on modern phonetics、Beijing/China、2001.10.12

西川 員史、今井 彰浩、小河原 隆之(早大)、高信 英明(工学院大)、持田 岳美(NTT CS 研)、高西 淳夫(早大) “ Development of a Mechanical Talking Robot that produces Natural Vowels and Consonant Sounds ”、IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems(IROS2001)、ハワイ、2001.10.31

Emi Zuiki Murano (東大) “ Speech Functional Motor Mapping of the Perioral Region ”、Society for Neuroscience、San Diego、2001.11.12

伊藤 貴之( CREST )、五味 裕章、誉田 雅彰(NTT CS 研)、“ A dynamical simulation by using low pass filtered EMG for compensatory articulation ”、Society for Neuroscience、San Diego、2001.11.15

Jianwu DANG (JAIST/ATR-I)、Masato AKAGI (JAIST) “ Speech Processing based on human mechanism ”、The 6<sup>th</sup> Conference on Man-machine Speech Communication、Shenzhen/China、2001.11.20

藤野 昭典(NTT CS 研)、鍋木 時彦(九州芸工大)、誉田 雅彰(NTT CS 研)、Emi Z. Murano (東大)、新美 成二(国際医療福祉大) “ Relative timing of oral and laryngeal motions in voiceless consonant production: A comparison of single and geminate consonants in Japanese ”、142<sup>nd</sup> meeting of the acoustical society of America、Florida、2001.12.4

高野 佐代子( CREST )、本多 清志( ATR-I ) “ Analysis of tongue muscle geometry based on 3D MRI and its implications on tongue muscle functions in vowel production ”、Speech Motor Control、Colonial Williamsburg/VA.、2002.3.17

党 建武( JAIST/ATR-I )、本多 清志( ATR-I ) “ Motor control for a physiological articulatory model involving muscle antagonism ”、11<sup>th</sup> Biennial Conference on Motor Speech: Motor Speech Disorders & Speech Motor Control、Williamsburg/VA、2002.3.18

誉田 雅彰、藤野 昭典(NTT CS 研)、村野 恵美(東大、CREST) “ Effects of tactile and auditory feedback on compensatory articulatory response to an unexpected palatal perturbation、International Conference on Linguistics and Phonetics (LP2002)、明海大学(千葉) 2002.9.3

持田 岳美、誉田 雅彰(NTT CS 研)、林 宏樹、桑江 俊治、棚橋 邦浩、西川 員史、高西 淳夫(早大) “ Control system for talking robot to replicate articulatory movement of natural speech ”、7<sup>th</sup> International Conference on Spoken Language Processing、Denver (Colorado/USA) 2002.9.19

伊藤 貴之( CREST )、五味 裕章、誉田 雅彰(NTT CS 研) “ Modeling of muscle contraction dynamics of speech articulator ”、Society for Neuroscience、Orlando (Florida/USA) 2002.11.7

廣谷 定男、誉田 雅彰(NTT CS 研) “ Determination of articulatory movements from speech acoustics using an HMM-based speech production model ”、International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP2002)、Orlando (Florida/USA)、2002.5.13

廣谷 定男、誉田 雅彰(NTT CS 研) “ Acoustic-to-articulatory inverse mapping using an HMM-based speech production model ”、International Conference on Spoken Language Processing、Denver (Colorado/USA) 2002.9.16

西川 員史、今井 彰浩、小河原 隆之(早大)、高信 英明(工学院大)、持田 岳美(NTT CS

研) 高西 淳夫(早大) “Speech planning of an anthropomorphic talking robot for consonant sounds production”, 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2002), Washington D.C. (USA), 2002.5.13

西川 員史、今井 彰浩、小河原 隆行(早大) 高信 英明(工学院大) 持田 岳美(NTT CS 研) 高西 淳夫(早大) “Development of an anthropomorphic talking robot to mechanically produce human voices”, 14<sup>th</sup> CISM-IFTOMM Symposium on ROBOTICS (RoManSy2002), Udine (Italy), 2002.7.3

鎚木 時彦、若宮 幸平(九州芸工大) 誉田 雅彰(NTT CS 研) “Three-dimensional electromagnetic articulograph based on a nonparametric representation of the magnetic field”, 7<sup>th</sup> International Conference on Spoken Language Processing, Denver (Colorado/USA), 2002.9.20

党 建武(JAIST、ATR) 誉田 雅彰(NTT CS 研) 本多 清志(ATR) “Investigation of coarticulation based on electromagnetic articulographic data”, International Conference of Spoken Language Processing 2002, Denver (Colorado/USA), 2002.9.18

高野 佐代子(CREST、ATR) 本多 清志(ATR) Dang Jianwu(JAIST、ATR) “Geometrical analysis of the tongue muscles based on MRI and functional modeling of the tongue”, Acoustical Society of America, Cancun (Mexico), 2002.12.6

誉田 雅彰、藤野 昭典(NTT CS 研) 村野 恵美(東大、CREST) “Effects of tactile and auditory feedback on compensatory articulatory response to an unexpected palatal perturbation”, International Conference on Linguistics and Phonetics (LP2002)、明海大学(千葉) 2002.9.3

伊藤 貴之(CREST) 五味 裕章、誉田 雅彰(NTT CS 研) “Modeling of muscle contraction dynamics of speech articulator”, Society for Neuroscience, Orlando (Florida/USA), 2002.11.7

廣谷 定男、誉田 雅彰(NTT CS 研) “Determination of articulatory movements from speech acoustics using an HMM-based speech production model”, International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP2002), Orlando (Florida/USA), 2002.5.13

廣谷 定男、誉田 雅彰(NTT CS 研) “Acoustic-to-articulatory inverse mapping using an HMM-based speech production model”, International Conference on Spoken Language Processing, Denver (Colorado/USA), 2002.9.16

西川 員史、今井 彰浩、小河原 隆行(早大) 高信 英明(工学院大) 持田 岳美(NTT CS 研) 高西 淳夫(早大) “Speech planning of an anthropomorphic talking robot for consonant sounds production”, 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2002), Washington D.C. (USA), 2002.5.13

西川 員史、今井 彰浩、小河原 隆行(早大) 高信 英明(工学院大) 持田 岳美(NTT CS 研) 高西 淳夫(早大) “Development of an anthropomorphic talking robot to mechanically produce human voices”, 14<sup>th</sup> CISM-IFTOMM Symposium on ROBOTICS (RoManSy2002), Udine (Italy), 2002.7.3

鎚木 時彦、若宮 幸平(九州芸工大) 誉田 雅彰(NTT CS 研) “Three-dimensional electromagnetic articulograph based on a nonparametric representation of the magnetic field”, 7<sup>th</sup> International Conference on Spoken Language Processing, Denver (Colorado/USA), 2002.9.20

党 建武 (JAIST、ATR)、誉田 雅彰 (NTT CS 研)、本多 清志 (ATR) “ Investigation of coarticulation based on electromagnetic articulographic data ”、International Conference of Spoken Language Processing 2002、Denver (Colorado/USA)、2002.9.18

高野 佐代子 (CREST、ATR)、本多 清志 (ATR)、Dang Jianwu (JAIST、ATR) “ Geometrical analysis of the tongue muscles based on MRI and functional modeling of the tongue ”、Acoustical Society of America、Cancun ( Mexico )、2002.12.6

五味 裕章 (NTT CS 研)、“ Cooperative articulation by stiffness regulation ”、13<sup>th</sup> Neural Control of Movement Meeting、Santa Barbara(CA)、2003.4.25

Jianwu Dang (JAIST/ATR)、Konstantin Markov (ATR)、Yosuke Iizuka (JAIST)、Satoshi Nakamura (ATR)、“ Improvement of speech recognition method using speech production mechanism ”、International Congress of Phonetic Science 2003、Barcelona (Switzerland)、2003.8.4

党 建武 (JAIST/ATR)、本多 清志 (ATR)、“ Consideration of muscle co-contraction in a physiological articulatory model ”、EuroSpeech2003、Geneva (Switzerland)、2003.9.3

高野 佐代子 (CREST/ATR)、本多 清志、正木 信夫、島田 育廣、藤本 一郎 (ATR)、“ Translation and rotation of the cricothyroid joint revealed by phonation-synchronized high-resolution MRI ”、EuroSpeech2003、Geneva (Switzerland)、2003.9.3

鍋木 時彦、河合 孝時 (九州芸工大)、“ Analysis of voice source characteristics using a constrained polynomial model ”、EuroSpeech2003、Geneva (Switzerland)、2003.9.1

西川 員史 (早大)、高信 英明 (工学院大)、持田 岳美 (NTT CS 研)、誉田 雅彰 (早大)、高西 淳夫 (早大)、“ Speech production robot based on human articulators and vocal organs ”、The 11<sup>th</sup> International Conference on Advanced Robotics、Coimbra (Portugal)、2003.7.2

西川 員史、林 宏樹 (早大)、高信 英明 (工学院大)、持田 岳美 (NTT CS 研)、誉田 雅彰 (早大)、高西 淳夫 (早大)、“ Speech production Humanoid robot to reproduce human vocal movement ”、the 3<sup>rd</sup> IEEE International Conference on Humanoid Robots (Humanoids 2003)、Karlsruhe、Munich (Germany)、2003.10.2

西川 員史 (早大)、高信 英明 (工学院大)、持田 岳美 (NTT CS 研)、誉田 雅彰 (早大)、高西 淳夫 (早大)、“ Modeling and analysis of elastic tongue mechanism of talking robot for acoustic simulation ”、2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems、Las Vegas (USA)、2003.10.29

西川 員史 (早大)、高信 英明 (工学院大)、持田 岳美 (NTT CS 研)、誉田 雅彰 (早大)、高西 淳夫 (早大)、“ Development of a new human-like talking robot having advanced vocal tract mechanisms ”、2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems、Las Vegas (USA)、2003.10.29

誉田 雅彰 (早大)、村野 恵美 (ATR)、“ Effects of tactile and auditory feedback on compensatory articulatory response to an unexpected palatal perturbation ”、6<sup>th</sup> International Seminar on Speech Production、Manly (Australia)、2003.12.8

伊藤 貴之 (CREST)、村野 恵美 (ATR)、五味 裕章 (NTT CS 研)、誉田 雅彰 (早大)、“ Identification of articulator muscle dynamics producing quick speech movements ”、6<sup>th</sup> International Seminar on Speech Production、Manly (Australia)、2003.12.7

若宮 幸平、鍋木 時彦 (九州芸工大)、誉田 雅彰 (早大)、澤田 雅司 (NTT-AT)、“ An

investigation on the measurement accuracy of the three-dimensional electromagnetic articulography”、 6<sup>th</sup> International Seminar on Speech Production、 Manly(Australia)、 2003.12.7

Emi Zuiki Murano(ATR-HIS)、“Sensorimotor regulation in ongoing speech tasks”、 6<sup>th</sup> International Seminar on Speech Production、 Manly(Australia)、 2003.12.8

高野 佐代子(ATR)、“Observation of tongue-larynx interaction using improved MRI”、 6<sup>th</sup> International Seminar on Speech Production、 Manly(Australia)、 2003.12.9

五味 裕章(NTT CS 研)、野添 潤一(東工大)、党 建武(JAIST/ATR)、本多 清志(ATR)、“Physiologically based lip model for generating speech”、 6<sup>th</sup> International Seminar on Speech Production、 Manly(Australia)、 2003.12.10

党 建武(JAIST/ATR)、本多 清志(ATR)、“A control method considering the static and dynamic characteristics of the articulatory model”、 6<sup>th</sup> International Seminar on Speech Production、 Manly(Australia)、 2003.12.10

西川員史(早大)、高信 英明(工学院大)、持田 岳美(NTT CS 研)、高西 淳夫(早大)、“Speech production using a mechanical talking robot based on human speech organs”、 6<sup>th</sup> International Seminar on Speech Production、 Manly(Australia)、 2003.12.10

藤野昭典・鎚木時彦・菅田雅彰(NTT CS 研)・村野恵美・新美成二(東大)、「磁気センサシステムおよびフォトプロットグラフを用いた調音運動と声門の運動観測」、日本音響学会、明治大学(神奈川)、1999.3.10

藤野昭典・鎚木時彦・菅田雅彰(NTT CS 研)・村野恵美・新美成二(東大)、「無声子音生成における調音器官と声門の運動タイミングの分析」、日本音響学会音声研究会、ATR(京都)、1999.5.20

鎚木時彦・菅田雅彰・岡留剛(NTT CS 研)、「多次元不変特徴タスクを用いた調音運動の軌道生成」、日本音響学会音声研究会、ATR(京都)、1999.5.20

伊藤貴之(CREST)・五味裕章・菅田雅彰(NTT CS 研)、「唇音発声時の顎摂動に対する唇、顎の挙動変化」、電子情報通信学会MEとバイオサイバネティクス研究会、名古屋工業大学(愛知)、1999.12.11

伊藤貴之(CREST)・五味裕章・菅田雅彰(NTT CS 研)、「唇音発声時の顎摂動に関する上唇の補償動作」、日本音響学会2000年春季研究発表会、日本大学(千葉)、2000.3.17

藤野昭典・鎚木時彦・菅田雅彰(NTT CS 研)・村野恵美・新美成二(東大)、「無声子音の生成における声門運動の時間パタンの分析」、日本音響学会 2000 年春季研究発表会、日本大学(千葉)、2000.3.17

菅田雅彰・鎚木時彦・藤野昭典(NTT CS 研)、「口蓋形摂動に対する調音補償動作の分析」、日本音響学会 2000 年春季研究発表会、日本大学(千葉)、2000.3.17

前川喜久雄・籠宮隆之(国語研)・菅田雅彰・鎚木時彦・岡留剛(NTT CS 研)、「パラ言語情報の調音運動への影響 「疑い」と「感心」の比較」、日本音声学会 平成 11 年度全国大会、東北大学(宮城)、1999.9.26

前川喜久雄・籠宮隆之(国語研)・菅田雅彰・鎚木時彦・岡留剛(NTT CS 研)、「調音運動から見たパラ言語情報の生成」、日本音響学会 1999 年秋季研究発表会、島根大学(島根)、1999.10.1

辰巳格・佐久間尚子・伊集院睦雄・伏見貴夫(老人研)・田中正之(京大)、「音声呈示による日本語約 4 万語の心像性評価」、第 23 回日本失語症学会総会、宇都宮(栃木)、1999.11.4

本多清志・Callan,D.・Callan,A.・正木信夫(ATR)、“Neural activation patterns evoked by vowels

under preparing to speak and listening only conditions.”、日本音響学会 1999 年秋季研究発表会、島根大学(島根)、1999.9.29

本多清志・藤田覚・Mark Tiede・和久本雅彦・党建武(ATR)、「上下歯列間隙により生じる声道の分岐管 – Vocal tract side branches formed by the interdental space.」、日本音響学会 1999 年秋季研究発表会、島根大学(島根)、1999.9.30

松崎博季・元木邦俊(北海学園大)・榊原照善・三木信弘(北大)、「声道形状の近似法の違いが音響特性に与える影響について」、日本音響学会 2000 年春季研究発表会、日本大学(千葉)、2000.3.17

伊藤貴之(CREST)・五味裕章・菅田雅彰(NTT CS 研)、「筋インピーダンス変化を考慮した上唇・顎モデルによる補償動作の検証」、ニューロコンピューティング研究会、琉球大学・沖縄、2000.6.22

藤野昭典(NTT CS 研)・鍋木時彦(九州芸工大)・菅田雅彰(NTT CS 研)・村野恵美・新美成二(東大)、「促音が先行する無声子音の調音・声門運動のタイミング」、日本音響学会 2000 年秋季研究発表会、岩手県立大学・岩手、2000.9.20

高野佐代子(CREST)・本多清志(ATR)、「MR 画像に基づく母音発声時の筋長計測」、日本音響学会 2000 年秋季研究発表会、岩手県立大学・岩手、2000.9.20

高野佐代子(CREST)・本多清志(ATR)、「Muscle length measurement during vowel production based on Magnetic Resonance Images.」、音声研究会、九州芸工大・福岡、2000.2.23

党建武・Kaisheng YAO・本多清志(ATR)、「発話機構モデルによる逆推定法を用いた音韻の識別」、音響学会春季全国大会、筑波大・茨城、2001.3.14

党建武・西郷憲一・本多清志(ATR)、「発話機構モデルによる声道形状逆推定法を用いた音韻と発話様式の分析」、音声研究会、九州芸工大・福岡

松崎博季・本木邦俊(北海学園大)・三木信弘(はこだて未来大)、「3 次元声道形状の単純化に関する一考察」、日本音響学会 2000 年秋季研究発表会、岩手県立大学・岩手、2000.9.20

西川員史・浅間弘一郎・林宏樹・高信英明・高西淳夫(早大)、「人間形発話ロボットの開発 母音発声の実現」、第 18 回日本ロボット学会学術講演会、立命館大学、2000.9.14

鍋木時彦・市野裕香(九州芸工大)・菅田雅彰(NTT CS 研)、「磁界のスプライン表現に基づいた磁気センサシステムの検討」、音響学会春季全国大会、筑波大・茨城、2001.3.14

鍋木 時彦(九州芸工大)・菅田 雅彰(NTT CS 研)、「磁界のパラメトリック表現を用いた磁気センサシステムの検討」、日本音響学会音声研究会、ATR(京都)、2001.5.24

小河原 隆之、西川 員史、今井 彰浩(早大)、高信 英明(工学院大)、高西 淳夫(早大)、「人間形発話ロボットの開発による母音及び子音発声の実現」、日本 IFToMM 会議、工学院大学、2001.6.22

三木 信弘、吉川 英一(はこだて未来大)、「時変声道アナログ・モデルの瞬時スペクトルの評価法」、電子情報通信学会 回路とシステム研究会、北見工業大学、2001.6.28

三木 信弘(はこだて未来大)、「Lossy Transmission Line Model の応答に関する考察」、電子情報通信学会 回路とシステム研究会、北見工業大学、2001.6.28

元木 邦俊、松崎 博季(北海学園大)、「非対称な音響管モデルによる声道伝達特性の計算について」、日本音響学会秋季研究発表会、大分大学、2001.10.2

松崎 博季、元木 邦俊(北海学園大)、「有限要素法を用いた音響解析におけるソフトウェア利用の一例」、日本音響学会秋季研究発表会、大分大学、2001.10.2

鍋木 時彦(九州芸工大)・菅田 雅彰(NTT CS 研)、「磁気センサシステムの磁界表現における平滑化スプラインの利用」、日本音響学会秋季研究発表会、大分大学、2001.10.2

菅田 雅彰、五味 裕章 (NTT CS 研)、伊藤 貴之 (CREST)、藤野 昭典 (NTT CS 研)、「音声生成における発話強調動作機構」、日本音響学会秋季研究発表会、大分大学、2001.10.3

持田 岳美、菅田 雅彰 (NTT CS 研)、「損失声道モデルに基づく口唇インパルス応答からの声道断面積関数推定」、日本音響学会秋季研究発表会、大分大学、2001.10.3

藤野 昭典 (NTT CS 研)、鍋木 時彦 (九州芸工大)、菅田 雅彰 (NTT CS 研)、Emi Z. Murano (東大)、新美 成二 (国際医療福祉大)、「無声子音における調音・声門運動のタイミングの分析 - 促音の有無による比較 - 」、日本音響学会秋季研究発表会、大分大学、2001.10.3

党 建武 (JAIST) / ATR-I)、本多 清志 (ATR-I)、「筋の拮抗関係を考慮した生理学的調音モデルの制御」、日本音響学会秋季研究発表会、大分大学、2001.10.3

高西 淳夫 (早大)、「人間型ロボットと発声」、日本音響学会秋季研究発表会、大分大学、2001.10.3

松崎 博季、元木 邦俊 (北海学園大)、「有限要素法を用いた 3 次元声道形状のモデル化に関する一考察」、日本音響学会秋季研究発表会、大分大学、2001.10.4

正木 信夫、本多 清志 (ATR-I)、「MRI による 3 次元動画記録の発話運動観測への応用」、第 46 回日本音声言語医学会、東京、2001.11.8

小河原 隆之、西川 員史、今井 彰浩 (早大)、高信 英明 (工学院大)、持田 岳美 (NTT CS 研)、高西 淳夫 (早大)、「子音発声を目的とした人間形発話ロボットの開発」、第 126 回情報処理学会データベースシステム研究会/第 3 回日本感性工学会感性ロボティクス部会 合同研究発表会、慶応義塾大学、2002.1.21

菅田 雅彰、藤野 昭典 (NTT CS 研)、Emi Z. Murano (東大)、「Tactile and auditory feedback in speech motor control」、ARO Winter Meeting、2002.1.27

廣谷 定男、菅田 雅彰 (NTT CS 研)、「HMM に基づく音声からの調音運動の逆推定」、日本音響学会 2002 年春季研究発表会、神奈川大学、2002.3.20

伊藤 貴之 (CREST)、五味 裕章、菅田 雅彰 (NTT CS 研)、「唇音発声時の唇・顎の協調メカニズム - 顎開放・閉鎖方向への閉鎖応答に基づく考察」、日本音響学会 2002 年春季研究発表会、神奈川大学、2002.3.20

党 建武 (JAIST/ATR-I)、菅田 雅彰 (NTT CS 研)、「発話機構モデルによる逆推定法を用いた音韻の識別」、日本音響学会春季研究発表会、神奈川大学、2002.3.20

鍋木 時彦 (九州芸工大)、「磁界のスプライン表現に基づく 3 次元磁気センサシステム」、日本音響学会春季研究発表会、神奈川大学、2002.3.20

若宮 幸平、鍋木 時彦、澤田 弘太郎 (九州芸工大)、菅田 雅彰 (NTT CS 研)、「3 次元磁気センサシステムの位置推定精度の検討」、日本音響学会春季研究発表会、神奈川大学、2002.3.20

鍋木 時彦、若宮 幸平、澤田 弘太郎 (九州芸工大)、菅田 雅彰 (NTT CS 研)、「磁界のスプライン表現を用いた 3 次元磁気センサシステムの検討」、日本音響学会音声研究会、東京大学、2002.3.29

持田 岳美、菅田 雅彰 (NTT CS 研)、林 宏樹、桑江 俊治、棚橋 邦浩、西川 員史、高西 淳夫 (早大)、「調音観測軌道に基づいた発話ロボットの連続発声制御方式の検討」、日本音響学会秋季研究発表会、秋田大学 (秋田)、2002.9.27

藤野 昭典 (NTT CS 研)、鍋木 時彦 (九州芸工大)、菅田 雅彰 (NTT CS 研)、村野 恵美 (東大、CREST)、新美 成二 (国際医療福祉大)、日本音響学会 秋季研究発表会、秋田大学 (秋田)、2002.9.26

藤野 昭典、誉田 雅彰 (NTT CS 研)、村野 恵美 (東大、CREST)、「無声子音の発話運動における発声の強さの影響の分析」、日本音響学会 春季研究発表会、早稲田大学 (東京)、2003.3.19

藤野 昭典、誉田 雅彰 (NTT CS 研)、村野 恵美 (東大、CREST)、「無声子音発声時の舌・喉頭運動における発声の強さの影響」、電子情報通信学会 音声研究会、東京大学 (東京)、2003.3.28

伊藤 貴之 (CREST)、五味 裕章、誉田 雅彰 (NTT CS 研)、「調音器官における筋力発生ダイナミクスの同定」、第 17 回生体・生理工学シンポジウム、北海道大学 (北海道)、2002.9.11

廣谷 定男、誉田 雅彰 (NTT CS 研)、「統計的音声生成モデルに基づく調音運動の逆推定法」、電子情報通信学会 音声研究会、龍谷大学 (滋賀)、2003.1.31

廣谷 定男、誉田 雅彰 (NTT CS 研)、「調音運動の逆推定における話者適応化法」、日本音響学会 春季研究発表会、早稲田大学 (東京)、2003.3.19

桑江 俊治、西川 員史、林 宏樹、棚橋 邦浩 (早大)、高信 英明 (工学院大)、誉田 雅彰、持田 岳美 (NTT CS 研)、高西 淳夫 (早大)、「人間に近い発声を目的とした新型発話ロボットの開発」、日本ロボット学会創立 20 周年記念学術講演会、大阪大学 (大阪)、2002.10.14

棚橋 邦浩、西川 員史、林 宏樹、桑江 俊治 (早大)、高信 英明 (工学院大)、持田 岳美、誉田 雅彰 (NTT CS 研)、高西 淳夫 (早大)、「多様な舌形状変更機構を用いた新型発話ロボットの開発」、第 23 回バイオメカニズム学術講演会、岡山理科大学 (岡山)、2002.10.26

松崎 博季、元木 邦俊 (北海学園大)、三木 信弘 (はこだて未来大)、「有限要素法による時間領域における母音生成シミュレーション」、聴覚・音声研究会、石川ハイテク交流センター (石川)、2002.7.26

松崎 博季、元木 邦俊 (北海学園大)、三木 信弘 (はこだて未来大)、「時間領域の 3 次元有限要素法による母音生成シミュレーション」、日本音響学会 秋季研究発表会、秋田大学 (秋田)、2002.9.27

若宮 幸平、鍋木 時彦、澤田 弘太郎 (九州芸工大)、誉田 雅彰 (NTT CS 研)、澤田 雅司 (NTT-AT)、「3 次元磁気センサシステムにおける測定誤差要因に関する検討」、日本音響学会 音声研究会、九州芸術工科大学 (福岡)、2002.8.30

若宮 幸平、鍋木 時彦、澤田 弘太郎 (九州芸工大)、誉田 雅彰 (NTT CS 研)、澤田 雅司 (NTT-AT)、「3 次元磁気センサシステムの位置推定誤差要因」、日本音響学会 秋季研究発表会、秋田大学 (秋田)、2002.9.28

前川 喜久雄 (国語研)、「パラ言語情報研究の課題」、日本音響学会 秋季研究発表会、秋田大学 (秋田)、2002.9.26

佐々木 幸司 (北大)、三木 信弘 (はこだて未来大)、宮永 喜一 (北大)、「声道モデルのための有限要素モデリングの自動要素生成」、DSP シンポジウム、大沼プリンス (北海道)、2002.11.8

高野 佐代子 (CREST、ATR)、本多 清志 (ATR)、正木 信夫、島田 育廣、藤本 一郎 (ATR-BAIC)、「MRI コイルと外部トリガ同期撮像法による発声動作の高分解能撮像」、日本音響学会 春季研究発表会、早稲田大学 (東京)、2003.3.19

持田 岳美、誉田 雅彰 (NTT CS 研)、林 宏樹、桑江 俊治、棚橋 邦浩、西川 員史、高西 淳夫 (早大)、「調音観測軌道に基づいた発話ロボットの連続発声制御方式の検討」、日本音響学会 秋季研究発表会、秋田大学 (秋田)、2002.9.27

持田 岳美、誉田 雅彰 (NTT CS 研)、林 宏樹、桑江 俊治、棚橋 邦浩、西川 員史、藤野 昭典 (NTT CS 研)、鍋木 時彦 (九州芸工大)、誉田 雅彰 (NTT CS 研)、村野 恵美 (東

大、CREST)、新美 成二(国際医療福祉大)、日本音響学会 秋季研究発表会、秋田大学(秋田)、2002.9.26

藤野 昭典、誉田 雅彰(NTT CS 研)、村野 恵美(東大、CREST)、「無声子音の発話運動における発声の強さの影響の分析」、日本音響学会 春季研究発表会、早稲田大学(東京)、2003.3.19

藤野 昭典、誉田 雅彰(NTT CS 研)、村野 恵美(東大、CREST)、「無声子音発声時の舌・喉頭運動における発声の強さの影響」、電子情報通信学会 音声研究会、東京大学(東京)、2003.3.28

伊藤 貴之(CREST)、五味 裕章、誉田 雅彰(NTT CS 研)、「調音器官における筋力発生ダイナミクスの同定」、第17回生体・生理工学シンポジウム、北海道大学(北海道)、2002.9.11

廣谷 定男、誉田 雅彰(NTT CS 研)、「統計的音声生成モデルに基づく調音運動の逆推定法」、電子情報通信学会 音声研究会、龍谷大学(滋賀)、2003.1.31

廣谷 定男、誉田 雅彰(NTT CS 研)、「調音運動の逆推定における話者適応化法」、日本音響学会 春季研究発表会、早稲田大学(東京)、2003.3.19

桑江 俊治、西川 眞史、林 宏樹、棚橋 邦浩(早大)、高信 英明(工学院大)、誉田 雅彰、持田 岳美(NTT CS 研)、高西 淳夫(早大)、「人間に近い発声を目的とした新型発話ロボットの開発」、日本ロボット学会創立20周年記念学術講演会、大阪大学(大阪)、2002.10.14

棚橋 邦浩、西川 眞史、林 宏樹、桑江 俊治(早大)、高信 英明(工学院大)、持田 岳美、誉田 雅彰(NTT CS 研)、高西 淳夫(早大)、「多様な舌形状変更機構を用いた新型発話ロボットの開発」、第23回バイオメカニズム学術講演会、岡山理科大学(岡山)、2002.10.26

松崎 博季、元木 邦俊(北海学園大)、三木 信弘(はこだて未来大)、「有限要素法による時間領域における母音生成シミュレーション」、聴覚・音声研究会、石川ハイテク交流センター(石川)、2002.7.26

松崎 博季、元木 邦俊(北海学園大)、三木 信弘(はこだて未来大)、「時間領域の3次元有限要素法による母音生成シミュレーション」、日本音響学会 秋季研究発表会、秋田大学(秋田)、2002.9.27

若宮 幸平、鎗木 時彦、澤田 弘太郎(九州芸工大)、誉田 雅彰(NTT CS 研)、澤田 雅司(NTT-AT)、「3次元磁気センサシステムにおける測定誤差要因に関する検討」、日本音響学会 音声研究会、九州芸術工科大学(福岡)、2002.8.30

若宮 幸平、鎗木 時彦、澤田 弘太郎(九州芸工大)、誉田 雅彰(NTT CS 研)、澤田 雅司(NTT-AT)、「3次元磁気センサシステムの位置推定誤差要因」、日本音響学会 秋季研究発表会、秋田大学(秋田)、2002.9.28

前川 喜久雄(国語研)、「パラ言語情報研究の課題」、日本音響学会 秋季研究発表会、秋田大学(秋田)、2002.9.26

佐々木 幸司(北大)、三木 信弘(はこだて未来大)、宮永 喜一(北大)、「声道モデルのための有限要素モデリングの自動要素生成」、DSP シンポジウム、大沼プリンス(北海道)、2002.11.8

高野 佐代子(CREST、ATR)、本多 清志(ATR)、正木 信夫、島田 育廣、藤本 一郎(ATR-BAIC)、「MRI コイルと外部トリガ同期撮像法による発声動作の高分解能撮像」、日本音響学会 春季研究発表会、早稲田大学(東京)、2003.3.19

村野 恵美(東大/CREST)、「Sensorimotor control of the lip during speech movements: An electrophysiological study」、第3回 Team Voice Meeting、国際医療福祉大学・言語聴覚センター、2003.5.17

Jianwu Dang(JAIST/ATR)、Konstantin Markov(ATR)、Yosuke Iizuka(JAIST)、Satoshi Nakamura(ATR)、“Application of articulatory dynamics on speech recognition”、音声研究会、ATR(京都)、2003.6.26

佐々木 幸司(北大)、三木 信弘(はこだて未来大)、宮永 喜一(北大)、“Computation of time-varying spectra based on 3-D vocal tract shape using auto-mesh generation and FEM”、音声研究会、ATR(京都)、2003.6.27

野添 潤一(東工大)、党 建武(JAIST)、本多 清志(ATR)、五味 裕章(NTT CS 研)、「リアルな調音生成を目指した口唇ダイナミクスモデルの構築」、日本音響学会 2003 年秋季研究発表会、名古屋(愛知)、2003.9.17

池尾 俊輔、西川 員史、小河原 隆行、藤田 愛(早大)、高信 英明(工学院大)、持田 岳美(NTT CS 研)、誉田 雅彰、高西 淳夫(早大)、「人間に近い声帯・声道形状変更機構による新型発話ロボットの音声生成」、日本音響学会 2003 年秋季研究発表会、名古屋(愛知)、2003.9.17

鍋木 時彦、阿部 真也(九州芸工大)、「制約多項式モデルを用いた有声音源特性の分析 – 声門開閉時点の探索 – 」、日本音響学会 2003 年秋季研究発表会、名古屋(愛知)、2003.9.19

若宮 幸平、鍋木 時彦(九州芸工大)、誉田 雅彰(早大)、「3 次元磁気位置計測における解の収束性」、日本音響学会 2003 年秋季研究発表会、名古屋(愛知)、2003.9.19

西川 員史、小河原 隆行、池尾 俊輔、藤田 愛(早大)、高信 英明(工学院大)、持田 岳美(NTT CS 研)、誉田 雅彰、高西 淳夫(早大)、「発話ロボットの柔軟舌形状のモデル化および音響シミュレータの開発」、日本ロボット学会 第 21 回学術講演会、東京工業大学(東京)、2003.9.20

藤田 愛、小河原 隆行、池尾 俊輔、西川 員史(早大)、高信 英明(工学院大)、持田 岳美(NTT CS 研)、誉田 雅彰、高西 淳夫(早大)、「人間に近い声帯・声道形状変更機構を有する新型発話ロボットの開発」、日本ロボット学会 第 21 回学術講演会、東京工業大学(東京)、2003.9.20

鍋木 時彦、田辺 洋祐(九州芸工大)、「等角写像を用いた 2 次元声門流の解析」、電子情報通信学会音声研究会、浜松(静岡)、2003.9.30

若宮 幸平、辻 拓哉、金 智之、鍋木 時彦(九州芸工大)、「音素別ニューラルネットワークを用いた調音 – 音響マッピング」、電子情報通信学会音声研究会、浜松(静岡)、2003.9.30

伊藤 貴之(CREST)、五味 裕章(NTT CS 研)、誉田 雅彰(早大)、「聴音マスキングによる発話運動修正の変化 – Influence of auditory masking on articulatory motion adaptation.」、生体生理シンポジウム、新潟県健康づくり・スポーツ医科学センター(新潟)、2003.10.8

野添 潤一(東工大)、党 建武(JAIST)、本多 清志(ATR)、五味 裕章(NTT CS 研)、「3 次元 MRI に基づいた唇力学モデルの構築」、生体生理シンポジウム、新潟県健康づくり・スポーツ医科学センター(新潟)、2003.10.8

野添 潤一(東工大)、党 建武(JAIST)、本多 清志(ATR)、五味 裕章(NTT CS 研)、「口唇力学モデルによる調音運動の模擬」、第 4 回 SICE システムインテグレーション部門講演会、東海大代々木キャンパス(東京)、2003.12.19

西川 員史、小河原 隆行、池尾 俊輔、藤田 愛(早大)、高信 英明(工学院大)、持田 岳美(NTT CS 研)、誉田 雅彰、高西 淳夫(早大)、「人間の発話器官を模擬した発話ロボットによる音声生成」、第 4 回 SICE システムインテグレーション部門講演会、東海大代々木キャンパス(東京)、2003.12.19

②ポスター発表 (国内 件、海外 件)

### ③プレス発表

#### (3)特許出願（国内 8件、 海外0件）

##### ① 国内

11-347125、「顎摂動装置」、五味 裕章・伊藤 貴之、科学技術振興事業団・NTT、1999.12.7  
2000-99288、「機械的発声装置」、高西 淳夫・浅間 弘一郎・林 宏樹・高信 英明、科学技術振興事業団・早稲田大学、2000.3.31

2001-144528、「磁気式位置検出方法及びその装置」、鍋木 時彦、科学技術振興事業団、2001.5.15

2001-114480、「発声装置」、高西 淳夫・高信 英明・西川 員史・今井 彰浩・小河原 隆行、科学技術振興事業団・早稲田大学、2001.4.12

2002-66118、「発声装置」、高西 淳夫・高信 英明・西川 員史・林 宏樹・桑江 俊治・棚橋 邦浩、科学技術振興事業団、2002.3.11

2003-070253、「磁気共鳴画像化装置」、高野 佐代子・正木 信夫・島田 育廣・藤本 一郎、科学技術振興事業団・(株)国際電気通信基礎技術研究所、2003. 3. 25

2003-126705、「発声装置及びこれに用いられる声帯駆動機構、口唇駆動機構、舌駆動機構」、高西 淳夫・誉田 雅彰・高信 英明・西川 員史・小河原 隆行・池尾 俊輔・藤田 愛、科学技術振興事業団・早稲田大学、2003. 5. 1

2003-193186、「弾性体形状をモデル化する方法及びその装置、並びにそのモデル化する方法を用いた音響シミュレーション方法及びその装置」、高西 淳夫・誉田 雅彰・高信 英明・西川 員史・小河原 隆行・桑江 俊治、科学技術振興事業団・早稲田大学、2003.7.7

##### ② 海外

なし

#### (4)受賞等

##### ① 受賞

なし

##### ②新聞報道

2000年5月16日付け 日経産業新聞

－人工声帯ロボットに関する記事

2003年4月15日付け ふくおか市政だより 「ロボカップカウントダウン」

－発話ロボットの紹介

2003年10月10日付け 日経産業新聞

－発話ロボット及び本プロジェクトの紹介

2003年11月20日付け 日本工業新聞

－発話ロボットの紹介

③ その他

1999年 招待講演 「Speech Synthesis by Mimicking Articulatory Movemnets」 IEEE Int. conf. on SMC

2000年 New Technology Japan (JETRO発行)

－人工声帯ロボットに関する記事

2000年 招待講演 「音声生成における発話動作協調機構」

日本音響学会講演発表会

2003年5月2日19:30～20:43放送 NHK総合テレビ

「鉄腕アトムはつくれるか～すごいぞ！最先端ロボット大集合～」

－発話ロボットの紹介

2003年9月6日9:15～9:59放送 NHK教育テレビ

「声はどうやって出ているの？/南極④ドームふじ」

－発話ロボットの紹介

2003年11月発行 日経サイエンス －発話ロボットの紹介

(5) その他特記事項

なし

## 8. 結び

発声という人間に固有な運動を伴う情報生成機構を解明することは、研究対象として極めてチャレンジングな対象であるが、人間固有の機能であるが故に、その脳内処理メカニズムの多くは未だ解明されていない。このような研究対象に対して、発声力学系の本格的なモデルを構築すること、またそのモデルを基に発声運動計画のモデルを考え、構成的に脳の発声情報生成機構の解明に迫るねらいで研究を進めてきた。5年間の研究プロジェクトを通して、当初のねらいであった発声力学モデルのとタスクプランニングモデルの構築をほぼ達成することができたが、これによって発声の脳内メカニズムの解明がどの程度進展できたかは心もとない。メカニズム解明に向けた新たな実験系の構築、発話ロボットの構築、さらには観測実験に基づいた発声力学系のできるだけ詳細なモデルの構築など、いずれも労力と時間を費やす研究課題であったが、医学、機械、音響、情報、言語の分野の研究者が協力しあうことで達成できたものと考えている。観測技術の開発やモデル化の研究は一見地味な研究対象ではあるが、音声科学研究を発展させるには必須の研究ステップであり、今後の音声研究の中で重要な足跡を残せたものと自負している。また、新たな実験系を組むことで、新たな実験パラダイムが構築でき、その中で新たな知見や今後の発声脳機能の解明に向けての糸口が見出せたものと考えている。

チーム運営に関しては、当初は課題が多少発散気味であったが、後期は対象を絞り込むことで、精力が集中できたように思う。また、これまで競合関係にあった研究者同士が、プロジェクトを推進するなかで各自のアイデアを出すことで、今までにない発想が生まれることが多々あり、ある意味で音声科学に関するオールジャンの体制を組めた効果であったように思う。

問題点としては、企業研究者の宿命ではあるが、5年間の間に所属部署や所属機関が変わるチームメンバーが多く、研究を効率よく進める上で多少なりとも支障となった。

また、研究費に関しては、予想はしていた以上に物づくりの部分に多くの費用がかかり、また支出が年度計画からずれることが多々あった。CRESTプロジェクトの予算の支出項目が弾力的であることに救われた面が多々あった。

全体的に見れば、CRESTプロジェクトは、制度や予算運用面において日本の中でも最も恵まれた研究環境を提供する事業であり、このような事業に参加できたことを幸せに感じるとともに大変誇りに感じている。今後、CRESTプロジェクトで培われた研究成果、研究者同士の人脈を生かし、よりインパクトのある研究成果を生むように努力していきたい。

最後に、このような機会を与えて頂いた科学技術振興機構の方々、研究をサポートして頂いた領域「脳を創る」統括甘利俊一先生、ならびに事務所の方々に深く感謝の意を表したいと思います。



グループメンバーの集合写真