

日本音響学会 編

音響テクノロジーシリーズ **29**

音声器官のメカニズムと シミュレーション

— 生体計測とモデル化 —

博士（工学） 吉永 司 編著

博士（理学） 竹本 浩典 博士（情報科学） 北村 達也

博士（工学） 桂田 浩一 博士（工学） 徳田 功

共 著

コ ロ ナ 社

音響テクノロジーシリーズ編集委員会

編集委員長

千葉工業大学
博士（工学） 飯田 一博

編集委員

千葉工業大学
博士（工学） 大川 茂樹

NTT 株式会社
加古 達也

滋賀県立大学
博士（工学） 坂本 眞一

日本大学
博士（工学） 辻村 壮平

日本工業大学
博士（工学） 大田 健紘

甲南大学
博士（情報科学） 北村 達也

神戸大学
博士（工学） 佐藤 逸人

（五十音順）

（2025 年 9 月現在）

発刊にあたって

音響テクノロジーシリーズは1996年に発刊され、以来20年余りの期間に19巻が上梓された。このような長期にわたる刊行実績は、本シリーズが音響学の普及に一定の貢献をし、また読者から評価されてきたことを物語っているといえよう。

この度、第5期の編集委員会が立ち上がった。7名の委員とともに、読者に有益な書籍を刊行し続けていく所存である。ここで、本シリーズの特徴、果たすべき役割、そして将来像について改めて考えてみたい。

音響テクノロジーシリーズの特徴は、なんといってもテーマ設定が問題解決型であることであろう。東倉洋一初代編集委員長は本シリーズを「複数の分野に横断的に関わるメソッド的なシリーズ」と位置付けた。従来の書籍は学問分野や領域そのものをテーマとすることが多かったが、本シリーズでは問題を解決するために必要な知見が音響学の分野、領域をまたいで記述され、さらに多面的な考察が加えられている。これはほかの書籍とは一線を画するところであり、歴代の著者、編集委員長および編集委員の慧眼の賜物である。

本シリーズで取り上げられてきたテーマは時代の最先端技術が多いが、第4巻「音の評価のための心理学的測定法」のように汎用性の広い基盤技術に焦点を当てたものもある。本シリーズの役割を鑑みると、最先端技術の体系的な知見が得られるテーマとともに、音の研究や技術開発の基盤となる実験手法、測定手法、シミュレーション手法、評価手法などに関する実践的な技術が修得できるテーマも重要である。

加えて、古典的技術の伝承やアーカイブ化も本シリーズの役割の一つとなろう。例えば、アナログ信号を取り扱う技術は、技術者の高齢化により途絶の危

機にある。デジタル信号処理技術がいかに進んでも、ヒトが知覚したり発したりする音波はアナログ信号であり、アナログ技術なくして音響システムは成り立たない。原理はもちろんのこと、ノウハウも含めて、広い意味での技術を体系的にまとめて次代へ継承する必要があるだろう。

コンピュータやネットワークの急速な発展により、研究開発のスピードが上がり、最新技術情報のサーキュレーションも格段に速くなった。このような状況において、スピードに劣る書籍に求められる役割はなんだろうか。それは上質な体系化だと考える。論文などで発表された知見を時間と分野を超えて体系化し、問題解決に繋がる「メソッド」として読者に届けることが本シリーズの存在意義であるということを再認識して編集に取り組みたい。

最後に本シリーズの将来像について少し触れたい。そもそも目に見えない音について書籍で伝えることには多大な困難が伴う。歴代の著者と編集委員会の苦労は計り知れない。昨今、書籍の電子化についての話題は尽きないが、本文の電子化はさておき、サンプル音、説明用動画、プログラム、あるいはデータベースなどに書籍の購入者がネット経由でアクセスできるような仕組みがあれば、読者の理解は飛躍的に向上するのではないだろうか。今後、検討すべき課題の一つである。

本シリーズが、音響学を志す学生、音響の実務についている技術者、研究者、さらには音響の教育に携わっている教員など、関連の方々にとって有益なものとなれば幸いである。本シリーズの発刊にあたり、企画と執筆に多大なご努力をいただいた編集委員、著者の方々、ならびに出版に際して種々のご尽力をいただいたコロナ社の諸氏に厚く感謝する。

2018 年 1 月

音響テクノロジーシリーズ編集委員会

編集委員長 飯田 一博

ま え が き

音声の生成に関する研究は、記録に残る中では、1780 年ごろに von Kempelen が音声生成機械 (speaking machine) を発明したのが最も古い例であり、その後 19 世紀には Helmholtz による共鳴器を用いた母音の共鳴の説明が試みられるなど、非常に古くから多くの研究者によって行われてきた。また 20 世紀に入ってから、日本人研究者の活躍も広く知られている。千葉と梶山による 1942 年の著書 “The Vowel: Its Nature and Structure” は、後の G. Fant や K. N. Stevens らによる音響理論に大きな影響を与え、声帯 2 質点モデルを提案した石坂謙二や、声帯の詳細な観察を行った平野実らの論文は、現在でも多く引用されている。

これらの研究の共通点は、いずれも音声の物理的メカニズムに着目している点である。人が音声を発する際には、肺から気流が流れ、声帯を振動させたり、口で気流を乱れさせたりと、さまざまな物理的プロセスを経て音となり伝わっていく。またこのとき、声帯がどのように閉じるのか、舌がどのように変形するのかといった点も、生理学的だけでなく力学的に説明することができる。本書では、こうした問題を取り上げ、物理学の最も基本的なアプローチである「実験・観察」と、「理論 (シミュレーション) による説明」の二面から、調音 (唇・舌・喉などを動かして母音や子音といった具体的な音にすること) と声帯振動による発声について最新の研究手法を解説する。

現在、深層学習や AI と呼ばれる技術の発展により、音声生成や音声合成に多くの研究者や技術者の関心が寄せられている。大量の GPU と音声データセットをモデルに投入することで、人では聞き分けがつかないほど自然な音声生成できるようになってきた。しかし、モデルの内部はブラックボックスであり、人がどのように喉や口を調整して自然な音声を生成しているのかを調べるこ

はできない。一方、人の発声や調音の物理的メカニズムに基づいた知見は、器質的な発声・発話障害（器官の異常が原因で起こる声や話し方の障害）の治療には欠かせない。現に、発声障害やボイストレーニングの現場では、物理モデルによる説明が活用されている。このような背景から、本書で中心となるのは物理的な計算に基づいたモデルであり、深層学習技術および両者の融合については副次的に取り上げる。本書で紹介する研究の発展が、発音・発声を良くしたいと願う人々にさらに活かされることを望んでいる。

本書は、音響テクノロジーシリーズ 14『音声生成の計算モデルと可視化』（楠木時彦編著）と同じ分野を扱うが、2010年に発刊された前書から本書執筆までに15年が経過しており、計測装置や物理モデルは大きな発展を遂げている。

1章では、発音・発声の基礎となる音声器官の生理を解説し、2章と3章では調音運動の計測と声道のシミュレーションについて解説する。計測については、現在の研究でよく用いられている超音波画像計測とリアルタイムMRIに焦点を絞り、計測データの後処理まで丁寧に説明している。4章と5章では声帯振動による発声について、計測とシミュレーションをそれぞれ取り上げ、計測については人の声帯から類人猿の声帯、さらにシリコン樹脂によるモデルまで広く解説する。3章と5章のシミュレーションでは、最新のスーパーコンピュータを用いた解析や機械学習による研究など幅広く紹介する。

本書の執筆は、音声科学の各分野で第一線に立つ研究者の方々をお願いした。また、各章の執筆にあたり、多数の方々から貴重なご援助をいただいた。この場を借りて、著者一同、心より感謝申し上げる。本書が音声科学に興味を持つきっかけとなり、また音声科学の進展の一助となれば幸いである。

吉永 司	1章, 3.1節, 3.3～3.4節, 4.1～4.2節, 5章
竹本浩典	2.2節, 3.2節
北村達也	2.1節
桂田浩一	3.5節
徳田 功	4.3～4.4節

2026年7月

吉永 司

目 次

1. 音声器官の生理

1.1	スピーチチェーン	1
1.2	呼吸器の生理	3
1.2.1	呼吸のメカニズム	4
1.2.2	発話および歌声における肺気量	5
1.3	調音器官の生理	7
1.3.1	唇 と 顎	7
1.3.2	舌	8
1.3.3	軟口蓋と咽頭	12
1.3.4	喉頭蓋とその周辺器官	13
1.4	喉 頭 の 生 理	14
1.4.1	3 つ の 軟 骨	15
1.4.2	内 喉 頭 筋	16
1.4.3	外 喉 頭 筋	17
1.4.4	声 帯 の 物 性	18

2. 調音運動の計測

2.1	超音波画像法	20
2.1.1	超音波画像法の基礎	21
2.1.2	音声研究における超音波画像法	26
2.1.3	超音波画像法を用いた音声研究の例	28
2.1.4	超音波プローブの固定法	30

2.1.5	舌輪郭の抽出	34
2.2	rtMRI	36
2.2.1	rtMRI の概要	37
2.2.2	切歯補填	42
2.2.3	rtMRI 動画からの調音器官の輪郭抽出	45
2.2.4	抽出した輪郭の後処理	49
2.2.5	輪郭を用いた分析例	51

3. 声道のシミュレーション

3.1	舌の有限要素モデル	61
3.1.1	有限要素法	61
3.1.2	医用画像からの舌形状の抽出	68
3.1.3	筋線維の配向	72
3.1.4	解析により得られた知見	76
3.1.5	舌シミュレーションの応用	80
3.2	音響シミュレーション	82
3.2.1	支配方程式	83
3.2.2	境界条件	86
3.2.3	計算条件	90
3.2.4	計算手順	91
3.2.5	計算例	92
3.3	口腔模型による実験	95
3.3.1	母音の実験	96
3.3.2	子音の実験	101
3.4	流体力学シミュレーション	108
3.4.1	支配方程式	109
3.4.2	支配方程式の性質	113
3.4.3	乱流モデル	115
3.4.4	離散化	118
3.4.5	境界条件と計算格子	122
3.4.6	計算例	126

3.4.7 OpenFOAM での解析	130
3.5 物理情報を用いた機械学習による音の生成	132
3.5.1 調音運動からの音声合成で用いられる深層学習モデル	132
3.5.2 調音運動データからの音声合成	139

4. 喉頭・声帯の計測

4.1 in vivo での声帯の観察	149
4.1.1 喉頭内視鏡	150
4.1.2 EGG	155
4.1.3 その他の観察手法	157
4.2 in vivo での空気力学的測定	159
4.2.1 Rothenberg マスク	159
4.2.2 声門下圧の測定	161
4.2.3 発声機能検査	162
4.3 in vitro 摘出喉頭での測定	163
4.3.1 声帯振動の再現実験	163
4.3.2 摘出喉頭吹鳴実験	165
4.3.3 高速撮影	168
4.4 シリコーン声帯物理モデル	170
4.4.1 さまざまな声帯物理モデル	170
4.4.2 MRI 型モデルの作製法	171
4.4.3 MRI 型モデルの吹鳴実験	174

5. 声帯振動のシミュレーション

5.1 低次の質点モデル	180
5.1.1 質点モデルのバリエーション	180
5.1.2 喉頭筋のモデル化	189
5.2 有限要素モデル	194
5.2.1 形状と物性値	195

5.2.2	モード重畳法	200
5.2.3	モード解析による声帯振動解析	206
5.2.4	内喉頭筋の筋線維モデル	211
5.3	流体構造連成解析	215
5.3.1	モデルの種類	216
5.3.2	モデルの検証	225
5.3.3	流体構造連成解析の応用	228
5.4	機械学習モデル	230
5.4.1	質点モデルのパラメータ推定	231
5.4.2	喉頭筋活動度の推定	235
5.4.3	有限要素法と機械学習	236
5.4.4	PINN	242
引用・参考文献		245
索引		265



音声器官の生理

本書の初めに音声生成のメカニズムを考える上で重要となる生理機構について解説する。音声生成とは、コミュニケーションを行うために人の身体が物理的に音を発生させることであり、その過程では身体の各器官が協調して音の発生と調整を行う。発声には唇や舌、顎の運動、声帯の振動に加えて、それらの間に位置する軟口蓋や咽頭、喉頭蓋なども活動し、それにより音の変化を生み出している。さらに、音の発生に必要な空気の流れは、横隔膜の上下運動と肺の膨張・収縮によって生み出され、大きな声量や歌声をコントロールするときには重要な役割を果たす。2章以降では、これらの器官がどのように働いて音声生成をコントロールしているのかを計測・解析していくため、本章ではその基礎となる調音器官の解剖や生理学的メカニズムの基本事項について説明する。

1.1 スピーチチェーン

発音・発声に関わる音声器官を解説する前に、発音・発声メカニズムを考える上でも重要な概念であるスピーチチェーンについて簡単に解説する。スピーチチェーンとは、音声コミュニケーションにおけるプロセスを説明する基礎的なモデル^{1)†}である。音声コミュニケーションにおいて、図 1.1 のように5つの段階を考える。まず話者は脳の言語的な階層において、どのような言葉を選択し、何をいおうとするのかを考える。その後、生理学的な段階となり、脳の神経活動から司令を受けた音声器官（舌・唇・肺・声帯など）が活動し、何らかの

[†] 肩付数字は巻末の引用・参考文献番号を表す。

2 1. 音声器官の生理

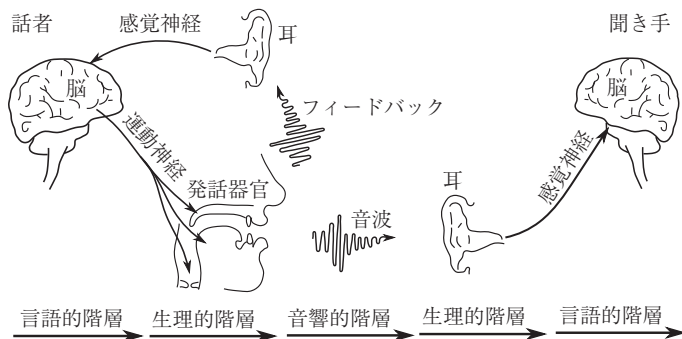


図 1.1 スピーチチェーン¹⁾

音を発する。そしてつぎの段階として、音が聞き手に向けて空中を放射状に伝搬する。聞き手の耳まで伝搬した音は、聞き手の生理学的な段階へ入り、内耳で音声信号を神経信号に変換する。そして、聞き手の脳において言語的な階層へと入り、何が発せられたのか、脳は言語知識、文脈、経験を活用し、発話者が伝えた情報を解釈する。この音が伝搬する段階は、聞き手へ伝搬するだけでなく、発話者へも伝搬し、それが発話者の耳の生理的な段階を経て脳へ伝わる。この一連の流れが連鎖することをスピーチチェーンと呼び、発声・発音を考える際には重要となる。

この鎖が見られる代表的な現象として、**ロンバード効果**²⁾ が挙げられる。ロンバード効果とは騒音環境下で発話者が自分の声量を大きくしたり、普段よりも高い声で発声したりするようになる効果である。つまり、静かな環境下では聞こえていた発話者の声が騒音下では聞こえにくくなるため、それを補正するように無意識的に発話の生理的条件を修正する。これは、スピーチチェーンの一部が乱されると、他の部分にも影響が及ぶ例である。

図 1.1 では耳を介した連鎖しか説明されていないが、そのほかに視覚や触覚によってこの鎖が乱され、発声・発音が変化することも知られている。例えば、**マガーク効果**と呼ばれる、特定の音節を発音する口の動きに、別の音声を重ねた映像を呈示した場合に、視覚情報・聴覚情報のどちらでもない第3の聞こえ方をする錯覚現象がある³⁾。「ガ」といっている映像に、「バ」という音声を組み

合わせて視聴すると、「ダ」と聞こえることが報告されている。そのほかに、触覚が音声知覚を変化させる例として、音の聞こえない空気の噴射を手や首に当て、それと同時に有声破裂音を含む「パ」という音節を聞くと無声破裂音「パ」に聞こえることが報告されている⁴⁾。

これらの結果は、人がコミュニケーションを行う際には、聴覚だけでなく、視覚や触覚情報からも多くの影響を受けていることを示しており、生理的なメカニズムを考える上では重要な事柄となる。ただし、脳での制御や、聴覚などの感覚フィードバックについて考えると問題が非常に複雑になるため、本書では音の生成の部分（生理的から音響的階層まで）に焦点を当てて解説していく。

1.2 呼吸器の生理

人が声を発しようとするとき、まず肺から空気を出すことから始める。一部の特殊な子音を除けば、肺からの気流がなければ音は発生しないので、呼吸をコントロールする器官が大事であることは直感的にわかる。しかし、それらの器官が音響的にどの程度の役割を担っているのかについては、いまだ不明な点が多い。

喉にある声帯が閉じていると、肺から気管を通して声帯の下面までの空気の圧力を上昇させる。この圧力は**声門下圧**と呼ばれ、発声において重要な指標となる。人が発声を行う際には、この声門下圧を上昇させ、ある閾値を超えると声帯は自然と振動を始める。このとき、肺からの気流に声帯の振動周波数に対応した変動が直接加えられるわけではなく、肺からのほぼ一定の気流により声帯が自励的に振動する。そのため、肺の周りの筋は主として声門下圧に影響を与えるだけであり、そのほかの要因には通常影響を及ぼさないと考えられる。声門下圧をコントロールすることで、発声のタイミング、声量、周波数などを変えることができる。一方で、ある一定の声門下圧においては、声帯の振動様式は喉頭の筋活動によってのみ決まる。まずはこの声門下圧をコントロールする肺のメカニズムを考える。

1.2.1 呼吸のメカニズム

肺はスポンジ状の構造を持っており、肺を身体から取り出すと、肺組織の弾性力により縮んでしまう。それに対し、人の身体の中では胸腔（肋骨や横隔膜に囲まれた空間）が負圧となることで、肺が外側に引っ張られ、形を保っている。つまり、肺はゴム風船のようになっており、風船の周りの空間を広げることで肺を膨らませ、空気を出す際には、肺の中に入っている空気の圧力と肺の弾性力によって受動的に空気を出すことができる。人が最大吸気を行うと、肺の中の圧力は約 2kPa まで上昇することが報告されている⁵⁾。

呼吸にはおもに 2 種類の**肋間筋**が働く（図 1.2 (a)）。肋骨の内側と外側にそれぞれ**内肋間筋**と**外肋間筋**が配置されており、外肋間筋が収縮すると、肋骨が持ち上がって胸郭（肋骨、胸骨、胸椎から構成される骨格）が前後左右に拡大し、これによって肺は伸ばされ息を吸い込むことができる。一方、内肋間筋は肋骨を引き下げて胸郭を狭め、能動的に空気を出す方向に力をかけることができる。肺活量を測るときなど、無理やり肺の空気を出そうとするときには、この筋が大きく働く。

また、肋間筋とは別に、**横隔膜**が胸腔と腹腔との境界にあり、この横隔膜が上下することで、肺を拡大させたり、縮小させたりすることができる（図 1.2

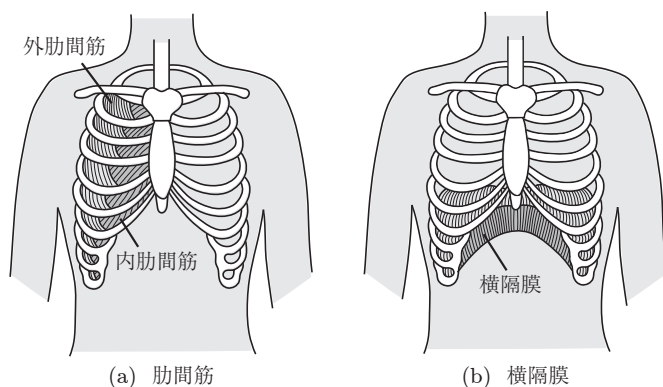


図 1.2 肋間筋と横隔膜

(b))。横隔膜は弛緩しているときドーム型の形状をしており、横隔膜の筋が収縮すると平らな形状となる。横隔膜が平らになると、そこに収まっていた内臓が押し出され、腹部が膨らむ。そのため、横隔膜をおもに用いる呼吸を腹式呼吸、肋間筋をおもに用いる呼吸を胸式呼吸と呼ぶこともある。また、この横隔膜が痙攣するとしゃっくりとなる。

以上の呼吸に関わる筋の役割から、一般的な人の自然な呼吸では、肺の周りの筋を収縮させることで肺を膨らませ、肺の弾性力によって肺を縮ませて息を吐き出すことがわかる。この関係から、肺の弾性力と胸郭を広げる弾性力が釣り合う状態の肺気量が求められる。この値を機能的残気量 (functional residual capacity; **FRC**) と呼ぶ。肺が FRC から外れて拡大または収縮すると、FRC に戻ろうとする受動的な力が働く。健常人の FRC は通常約 2.4 L (全肺気量の約 40 %) 程度といわれている⁶⁾。

1.2.2 発話および歌声における肺気量

ここでは、発声や歌声において、呼吸がどのように用いられているか、簡単に解説する。肺に入れられる吸気の量は最大値を持ち、人にもよるが成人男性の一般的な全肺気量は約 6 L、最大呼気の後には残気量が約 1.2 L あり、発声ではこの差の 4.8 L を使うことができる⁶⁾。一方、通常の呼吸では約 0.5 L が吸い込まれ、吐き出される。呼吸は 1 分間に約 20 回と考えると、1 回の呼吸で肺から出される空気の流量を計算すると約 0.3 L/s となる。このように、通常の呼吸では肺活量の約 10 % 程度しか活用していない。

発話においては、肺活量の約 50 % が活用されるといわれており、ある計測例では肺活量の 55 % から 10 % までの範囲が用いられている⁷⁾。FRC が 40 % だとすると、発話の最初は肺の受動的な呼気の力を活用しているものの、長く発話していると肺気量が FRC よりも低い値となり、おもに内肋間筋を活用して能動的に肺を萎ませていく。同じ実験において、通常の声量で朗読する被験者は、FRC より高い肺活量から発話を開始し、肺活量が FRC を下回ると呼吸する傾向が報告されており、朗読においては呼気の受動的な力をより利用する傾

索引

【あ】		オンセット圧	166	逆フィルタリング	160
アーチファクト	25	【か】		逆べき乗法	206
アトラス	70	開口筋	7	逆問題解析	78
【い】		外喉頭筋	17, 189	キャパシタンス	184
一方程式モデル	117	外舌筋	9, 61	吸収境界	83
遺伝的アルゴリズム	232	外側輪状披裂筋	17, 189	境界層方程式	185
入口境界	122, 224	外 転	15, 37, 107, 193	境界要素法	82
陰解法	121, 200	外部光電声門図	156	胸骨甲状筋	17, 194
インダクタンス	184	外肋間筋	4	胸骨舌骨筋	17, 194
咽 頭	12, 45, 76	下咽頭	13	強連成解析	216
【う】		下咽頭収縮筋	13	筋静水圧系	9
薄板スプライン関数	58	ガウシアンパルス	90	筋電図	78
渦の最小スケール	114	ガウスの発散定理	63	筋肉層	19, 171
歌 声	6, 96, 223	カオス	183	【く】	
埋め込み境界法	124, 217	拡散スペクトル画像	75	空間解像度	40, 80
運動学に基づくモデル	179, 238	拡散テンソル画像	74	空隙率	223
運動方程式	83, 182	顎舌骨筋	7, 47, 74	クラスタ分析	56
【お】		風上差分	119	克蘭ク・ニコルソン法	121
オイラー法	67, 120	加湿器	165	クーラン数	91, 120
横隔膜	4, 40	下縦舌筋	11, 74	【け】	
横舌筋	11, 74	仮声帯発声	178, 188	計算格子	124, 217
オトガイ棘	71	滑降シンプレックス法	232	茎状突起	11, 72
オトガイ舌筋	10, 71	活性化関数	140, 234	茎突舌筋	10, 71
オトガイ舌骨筋	8, 74	カバー層	19, 197	ゲート付き回帰ユニット	234
オーバーラップ	49	カルマンフィルタ	232	肩甲舌骨筋	17, 194
オフセット圧	166	【き】		【こ】	
オリフィス吐出係数	185	気柱共鳴周波数	96	口蓋咽頭筋	12
音響陰影	26	基底関数	62	口蓋垂	13
音響特徴量	139	気 嚢	169	口蓋垂筋	12
		機能的残気量	5	口蓋舌筋	10
		キモグラフ	153	口蓋帆挙筋	12
		逆フィルタ解析	235		

口蓋帆張筋 12
 硬口蓋 12, 47, 124
 格子ボルツマン法 112
 甲状軟骨 15, 27, 155, 212
 甲状披裂筋 16, 187
 硬性内視鏡 150
 構造格子 124, 218
 光電声門図 156
 喉頭蓋 13, 47, 73, 229
 口輪筋 7
 後輪状披裂筋 17, 189
 コーパス 132, 231
 固有値 201
 固有値解析 200
 固有モード 200
 コンプレッサ 105

【さ】

最長発声持続時間 162
 嗄 声 230
 サブクリティカル 166

【し】

時間積分 120, 200
 時間領域差分法 82
 識別器 137
 歯擦音 102
 実形状モデル 196
 質量マトリックス 63, 201
 弱連成解析 216
 周期境界 123
 主成分分析 52, 78, 155
 順動力学追跡シミュレーション 78
 上咽頭 13, 150
 上咽頭収縮筋 13
 上縦舌筋 11, 73
 衝突圧 235
 上 皮 18, 171
 自励振動を考慮したモデル 179

振動子 21

【す】

垂直舌筋 11, 74
 スイープ信号 98

数値流体力学 108
 スキーム 119
 ストロボスコープ 151
 スピーチチェイン 1
 スペクトログラム 135, 167, 209

【せ】

生成器 137
 声帯筋 16, 211
 声帯粘膜モデル 100
 声帯物理モデル 164
 声帯膜 169
 声道伝達関数 92
 声門下圧 3, 159, 182
 声門体積流モデル 179
 声門閉鎖時間率 154, 209
 舌 骨 10, 23, 71, 189
 舌骨甲状筋 17
 舌骨舌筋 10, 71, 73
 舌輪郭 34
 セミランドマーク 52
 線形ばね 182
 全結合層 140, 234

【そ】

層 流 114
 速度勾配テンソル 129

【た】

対称境界 123
 体積弾性率 64, 198
 体積変化率 64
 ダイナミック Smagorinsky モデル 116
 第 2 Piola-Kirchhoff 応力
 テンソル 64, 199
 タギング MRI 79
 畳み込み層 135

【ち】

チェストボイス 186
 中咽頭 13
 中咽頭収縮筋 13
 調音-音声変換システム 139
 超音波 21, 78

超音波画像法 20
 超音波トランスデューサ 21
 超弾性体 63, 198
 直接数値シミュレーション 115

【て】

ディープニューラルネット
 ワーク 230
 摘出喉頭 163, 190
 敵対的学習 137
 出口境界 122
 電気声門図 155
 電気抵抗 184

【と】

等間隔化 50
 トリガ信号 175

【な】

内喉頭筋 16, 189
 内舌筋 9, 73
 内 転 15, 163, 191
 内力ベクトル 63
 内肋間筋 4
 ナビエ・ストークス方程式 108, 221
 軟口蓋 12, 37

【に】

ニューマークの β 法 68
 ニューラルポコーダ 140

【ね】

熱線流速計 103
 粘性係数 65, 183
 粘膜固有層 18, 186
 粘膜層 10, 171, 191
 粘膜波動 152, 181

【は】

肺活量 4
 肺気量 5
 ハイスピードカメラ 106, 152, 188
 剥離位置 185

パーシャルボリューム効果 40
 発声閾値声門下圧 166
 発声時平均呼気流量率 162
 波動方程式 113
 パルスエコー法 21
 反射境界 86

【ひ】

非圧縮性流体 110, 221
 鼻咽腔 12
 光造形方式 97
 光マイクロホン 40
 非構造格子 124
 ヒステリシス 107, 166
 ひずみエネルギー密度関数 63, 198
 非線形ばね 182
 表面力ベクトル 63
 披裂間筋 17, 189
 披裂喉頭蓋ひだ 13, 229
 披裂軟骨 15, 165

【ふ】

ファイバスコープ 150
 ファルセット 186
 フォルマント 8, 76, 160
 部分積分 63
 フラッシュマウント 103
 プーリング層 136
 ブロードバンドノイズ 101
 プローブマイクロホン 94, 97

【へ】

閉口筋 8

ベイズ推定 79, 232
 壁面境界 123
 ペナルティ法 205
 ベルヌーイの定理 182
 ヘルムホルツ共鳴 96
 変形勾配テンソル 64

【ほ】

ポアソン比 63, 190
 ポアソン方程式 113
 ボディ-カバー理論 19, 186
 ボディ層 197
 ポリープ 152, 186
 ホワイトノイズ 98

【ま】

マガーク効果 2
 マスク関数 223
 マッハ数 109

【み】

右 Cauchy-Green ひずみ
 テンソル 64, 198

【む】

無反射境界 86, 218

【も】

モード重畳法 200
 モンテカルロシミュレーション 236

【や】

焼きなまし法 232
 ヤング率 63, 197

【ゆ】

有限差分法 67
 有限要素法 61, 195

【よ】

陽解法 120

【ら】

ラージエディシミュレーション 116
 ラプラス方程式 219
 ランドマーク 46, 81
 乱流 114, 221
 乱流モデル 116

【り】

離散化 65, 204
 梨状陥凹 14
 リード式人工喉頭 100
 リープフロッグ法 84
 粒子群最適化 232
 領域拡張法 69, 153
 輪状甲状筋 16, 189
 輪状軟骨 15, 212

【れ】

レイノルズ数 114, 230
 レベルセット法 70
 連続の式 83, 218

【ろ】

肋間筋 4
 ロンバード効果 2

【A】

ALE 130, 217
 ATR 音素バランス 503 文 52

【B】

BGK 方程式 112

bi-directional LSTM 135

【C】

Cauchy 応力テンソル 62
 Cauchy の第一運動法則 62
 CFD 108
 CFL 数 91

cine MRI 38
 CNN 135, 234
 convergent 形状 181
 CPP 154, 209
 CQ 155, 209
 CRNN 234

[D]		hyperarticulation	38	PINN	242
DICOM	24	H1-H2k	209	PML	83
DIVA モデル	80	[I]		PTP	166
divergent 形状	181	IBM	217, 219	[Q]	
Dlib	46	IPA	7	Q 値	129
DNN	230	[K]		[R]	
DNS	115	k - ε モデル	118	RANS	118
DSI	75	Khooimei	188	real-time MRI	38
DTI	74	[L]		RNN	133
dynamic MRI	38	Lanczos 法	206	Rothenberg マスク	159, 240
[E]		LES	116	rtMRI	38
EfficientNetV2-B2	145	Lighthill テンソル	110	[S]	
EGG	155	Lighthill のアナロジー	110	Sharp-interface 法	220
EMA	140	LSTM	133, 233	SINDy	236
EMA2S	141	[M]		Smagorinsky モデル	116
EMG	78	MFR	162	Snakes	69
ePGG	156	MOCHA-TIMIT データ		SoftPlus 関数	234
[F]		ベース	140	SOVT	229
failure mode	242	Mooney-Rivlin 体	64, 198	STL	92
fMRI	81	MPI	130	[U]	
fps	24, 80, 153	MPT	162	UKE	238
FRC	5	MRI 型モデル	171	USC-TIMIT	143
[G]		M5 モデル	171, 195	[V]	
GAN	137	[N]		Validation & Verification	225
GMM	132	Neo-Hookean 体	64	Volume Penalization 法	221
Green-Lagrange ひずみ		[O]		[Y]	
テンソル	64	OATSP 信号	94	Yee アルゴリズム	84
[H]		Ogden モデル	198	Yeoh 体	64
HARDI	75	OpenFOAM	130, 219	~~~~~	
HiFi-GAN	145	OQ	155, 226	2 質点モデル	100, 181
Hill モデル	65	[P]		3 音響管モデル	96
HMM	132	PGG	156		
Holzapfel-Gasser-Ogden					
モデル	198				

—— 編著者・著者略歴 ——

吉永 司（よしなが つかさ）

2013年 大阪大学基礎工学部システム科学科卒業
2015年 大阪大学大学院基礎工学研究科博士前期課程修了（機能創成専攻）
2018年 大阪大学大学院基礎工学研究科博士後期課程修了（機能創成専攻），博士（工学）
2018年 大阪大学特任助教
2019年 豊橋技術科学大学助教
2023年 大阪大学助教
現在に至る

竹本 浩典（たけもと ひろのり）

1993年 京都大学理学部卒業
1995年 京都大学大学院理学研究科修士課程修了（動物学専攻）
2000年 京都大学大学院理学研究科博士課程修了（生物科学専攻），博士（理学）
2000年 株式会社国際電気通信基礎技術研究所
2009年 独立行政法人情報通信研究機構
2016年 千葉工業大学教授
現在に至る

北村 達也（きたむら たつや）

1992年 山形大学工学部情報工学科卒業
1994年 北陸先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士前期課程修了（情報処理学専攻）
1997年 北陸先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士後期課程修了（情報処理学専攻），博士（情報科学）
1997年 静岡大学助手
2002年 株式会社国際電気通信基礎技術研究所
2007年 甲南大学助教授
2012年 甲南大学教授
現在に至る

桂田 浩一（かつらだ こういち）

1995年 大阪大学基礎工学部情報工学科卒業
1997年 大阪大学大学院基礎工学研究科博士前期課程修了（情報数理系専攻）
2000年 大阪大学大学院基礎工学研究科博士後期課程修了（情報数理系専攻），博士（工学）
2000年 豊橋技術科学大学助手
2007年 豊橋技術科学大学講師
2011年 豊橋技術科学大学准教授
2016年 東京理科大学准教授
2022年 東京理科大学教授
現在に至る

徳田 功（とくだ いさお）

1992年 筑波大学第一学群自然科学類物理学科卒業
1994年 筑波大学大学院理工学研究科修士課程修了（理工学専攻）
2000年 博士（工学）（筑波大学）
2003年 室蘭工業大学助教授
2005年 北陸先端科学技術大学院大学助教授
2011年 立命館大学准教授
2013年 立命館大学教授
現在に至る

音声器官のメカニズムとシミュレーション

— 生体計測とモデル化 —

Mechanisms and Simulation of Speech Organs:

Biomedical Measurements and Computational Modeling

© 一般社団法人 日本音響学会 2026

2026 年 9 月 18 日 初版第 1 刷発行

検印省略

編 者 一般社団法人 日本音響学会
発 行 者 株式会社 コロナ社
代 表 者 牛 来 真 也
印 刷 所 三 美 印 刷 株 式 有 限 公 司
製 本 所 牧 製 本 印 刷 株 式 有 限 公 司

112-0011 東京都文京区千石 4-46-10

発 行 所 株式会社 コロナ社
CORONA PUBLISHING CO., LTD.
Tokyo Japan

振替 00140-8-14844・電話(03)3941-3131(代)

ホームページ <https://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-01168-5 C3355 Printed in Japan

(新宅) G



本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられています。
購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は、いかなる場合も認めていません。
落丁・乱丁はお取替えいたします。