

■論文■

声道模型を用いた音響教育——音声生成のしくみ

荒井隆行

私たち人間は、日頃から様々な方法で意思を伝え合っている。音声言語はその一例であり、人が誰かと音声を使ったコミュニケーションを図ろうとするとき、そこには図1のような「ことばの鎖 (speech chain)」¹⁾ができる。まず、話し手が「相手に伝えたいメッセージ」を考えると、そのメッセージは脳内で「語の並び」として実現される(言語学的段階)。それに従い、脳から運動神経を介して「どの筋肉を使ってどのように運動器官を動かすか」という指令が送られ、実際に音声器官(音声発話に關係する器官)が動き、音が作られる(生理学的段階)。

発せられた音声は空气中を伝わり、相手や自分の耳に届く。池に小石を投げ入れると周囲に波紋が広がっていくが、それと同じように「話し手の声」(音響信号)が音の波、つまり「音波」として伝搬していく(音響学的段階)。

音響信号が聞き手や話し手の「耳」に届くと、聴き取りのプロセスが始まる。音の振動は聴覚器官に伝わり、まず鼓膜を振るわせる。そして順に、中耳にある耳小骨、さらに内耳の蝸牛へと伝わっていくのである。蝸牛はリンパ液で満たされており、リンパ液での振動は神経パルスに変換される(生理学的段階)。神経パルスは感覚神経を介して脳へと伝達され、最終的に脳内で情報が統合されると、再び話し手のメッセージが「語の並び」として復元される(言語学的段階)。この一連の「ことばの鎖」のどこかに障がいがあると、コミュニケーションに支障をきたすこととなり、

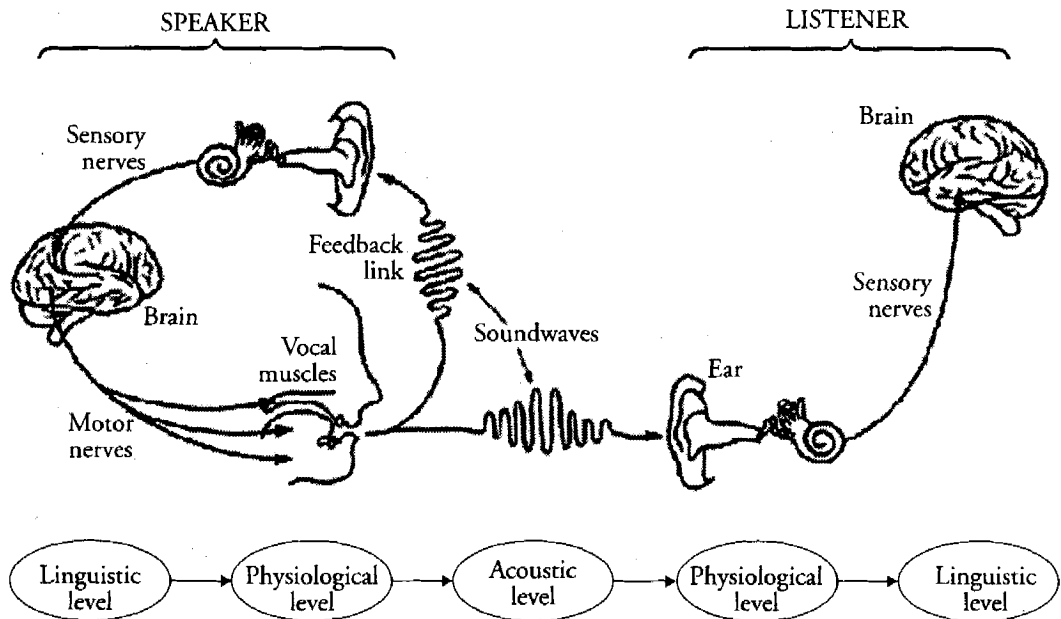


図1 ことばの鎖 (Denes and Pinson, *The Speech Chain*¹⁾ より)

聴覚障がいを含む「言語障がい」となり得るのである。

音声コミュニケーションに関する分野は、音声生成（音声がいかに生成されるか）と、音声知覚（音声がいかに知覚されるか）を中心にして、様々な学問分野と複雑に関係している。工学系では、機械に喋らせる「音声合成」、機械に音声を分からせる「自動音声認識」、携帯電話の通信への応用など音声をいかにデジタル情報としてコンパクトに表現するかを扱う「音声符号化」といった「音声工学」の分野がある。一方、言語学の分野には「音声学」と「音韻論」があり、両者が表裏一体をなしている。音声学には、音の作り方を扱う「調音音声学」、聞き手の聴覚でどう音声が受け取られるかを扱う「聴覚音声学」、そして音響的側面を扱う「音響音声学」がある。心理学では「認知心理学」や「心理音響学」などの分野で音声が扱われているし、医療の分野でも「音声学」は「言語障がい学」や「言語病理学」と密接に関わっており、言語聴覚士をはじめとする臨床の専門家が輩出されている。また日本では馴染みが薄いですが、海外では音声学・聴覚科学を専攻できる大学も多く、それ自体が一つの学科となっている。

一般に「音響学」というと「物理学」のイメージが強いが、

実際は学際的な学問である。私は上智大学大学院で音響学の授業を担当しているが、理工系の学生と文科系の学生との比率は実に二対一程度だ。文科系の学生は、ほとんどが言語聴覚研究コースの学生だが、それに加えて言語学専攻や心理学専攻の学生が受講している。数年前に言語聴覚士の国家資格の制度が確立されたが、言語聴覚士を志す者にとって音響学は必修となっている。

音楽大学でも音響学の履修は一般的なようで、音楽音響を中心に「音の生理学」など音声生成のしくみを学べる学校もある。一昨年私は、上智大学公開学習センターの出張講座の一環として、姉妹校であるエリザベト音楽大学で音声の音響学の話をする機会に恵まれた。音大での講演は初めてだったので多少の不安を抱きつつ臨んだが、皆さん興味深く話を聞いて下さった。

このように、音声コミュニケーションは様々な分野と複雑に関係しており、したがって「音声の音響学」を学ぶ側にもかなりの広がりがある。⁽²⁾ 学習者(関わる人)の裾野の広さを考えると、ただ単に教科書の上で学ぶだけでなく物理模型などを使い「誰が見ても分かるような形」で理論を体现することができれば、理解が容易になる。私はこれまでに、国内外の会議で声道模型や肺の模型を用いた実演を幾度も行ってきたが、研究者なら誰でも知っているような基本的な理論や現象であるにもかかわらず、デモをすると会場から歓声が上がリ、いずれも好評を博してきた。何も入門者に限らずとも可視化の付加価値は大きい。

言葉の獲得は人間にとって重要なことであるし、多かれ少なかれ、人は子供のときから「音」に対する興味を持っているのであるまいか。母音生成の基本となるメカニズムは比較的単純に示すことが可能であるから、身近に「音声に関する音響学」を学べる教材があっても不思議ではない。けれども、一部の博物館や教育機関を除けば、そのような教材に触れる機会はほとんどなく、それならば「自分で作ってしまおう」と思い立った。音声生成のしくみを直感的に理解できるように教材があれば、テーマが身近である分、子供から大人まで広く活用できる。そんなことから

私の「模型を使った音響教育の試み」が始まったのである。

本稿ではまず、音声生成、とくに母音を作り出すメカニズムについて概説し、それをいかに可視化・可聴化するかについて考察すると同時に、その一例として「音響教育教材としての声道模型⁽³⁾」⁽¹³⁾を紹介したい。最近ではコンピュータの発達により、コンピュータ・シミュレーションに基づく教育も盛んになってきている。そのような中、あえて物理模型を用いた「ハンズ・オン」の実験を通して、「より分かりやすく、より直感に訴える音響教育」を追及したい。

母音の基礎

千葉・梶山の母音論

近代の音声研究は、実は日本がリードしていた。それは、千葉・梶山によって一九四二年に出版された *The Vowel: Its Nature and Structure* ⁽¹⁴⁾ にある(図2)。この本の価値は、「母音」に関連する様々な領域が「科学」として一つにまとめられたところにあり、⁽¹⁵⁾「母音」を音声学という側面からだけでなく、その生成と知覚に関して生理学、物理学、心理学の各方面から論じている。さらに、戦時中という時代背景にもかかわらず英語で出版されており、そのことが功を奏して出版直後から世界中で広く読まれるようになったのである。

彼らの研究は、次のようにまとめられる。⁽¹⁵⁾⁽¹⁸⁾

- (一) 生理学的データを収集し、X線撮影装置など当時としては最先端の技術で三次元声道形状を計測した。
- (二) これらのデータから世界で初めて母音のスペクトルや共鳴周波数を計算した。
- (三) 電気回路理論を導入し、母音生成の音響理論を確立した。
- (四) 母音の音響的性質は声道形状によって決定されると結論づけた。

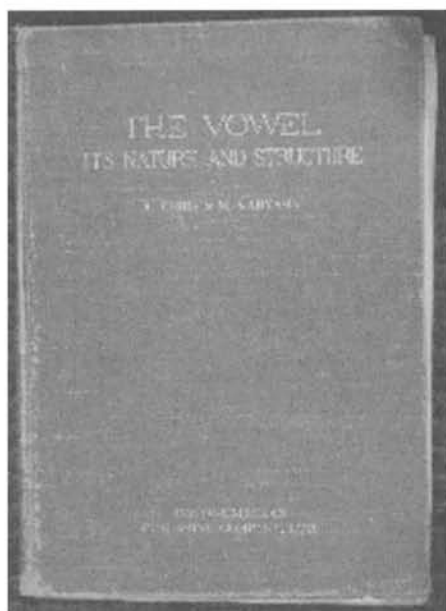


図2 マサチューセッツ工科大学のケネス・N・ステイブンス教授が所有する *The Vowel* (第1版)

数年前、日本音声学会⁽¹⁷⁾と日本音響学会⁽¹⁵⁾がそれぞれ、この名著の出版六十年を記念して特集号を企画している。原著に加えてこれらの特集号を読めば、彼らの業績の奥深さをより深く理解できるであろう。

この研究は、後にスウェーデン王立工科大学のグナー・ファント教授や米国マサチューセッツ工科大学のケネス・N・ステイブンス教授に受け継がれ、現代の音声科学の基礎が築かれることとなった。ちなみに、この著作の出版後、千葉勉先生は上智大学にて音声学研究室を開設しておられる。本学は国内有数の音声学研究室を持つ教育機関として、近代の音声研究をリードする一端を担ってきたとも言える。

母音生成に必要な「音源」と「声道フィルタ」

母音が生成される過程は、音響管としての「声道」と、その音響管に入力される「音源」によって大雑把にモデル化される。通常、喉頭に位置する左右一对のひだである声帯が振動することで音源となり、これは「声帯音源」と呼ばれる。また、声道は音源の音色を変えるフィルタの役割をすることから、とくに「声道フィルタ」とも呼ばれる。このように母音の生成を音源と声道フィルタに分けて考えることは、すでに千葉・梶山の *The Vowel*⁽¹⁴⁾ で述べられており、後にグナー・ファント⁽²²⁾ によって音源フィルタ理論として確立された。

まずは日本語五母音の声道断面図とその形状を大まかに示した模式図を見て欲しい(図3)。/i/と/e/の場合には

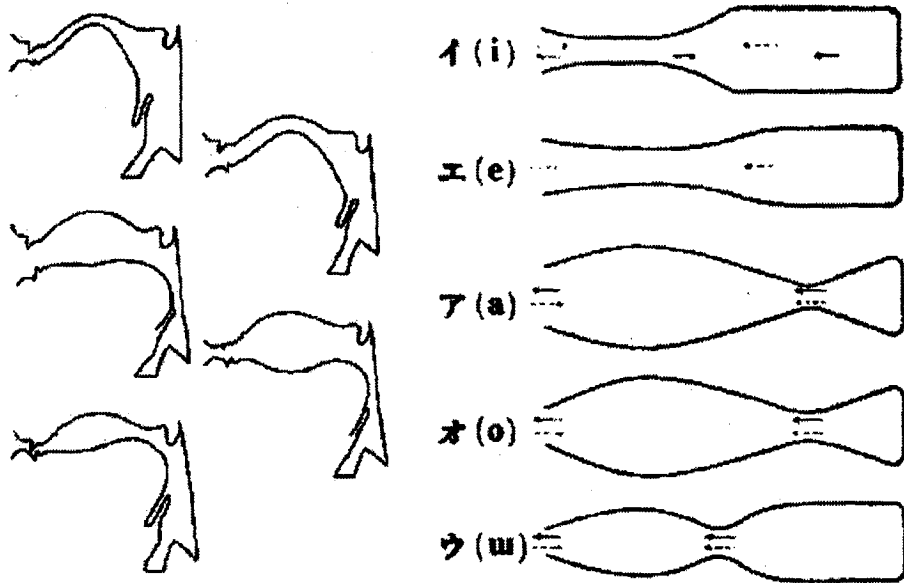


図3 母音の声道断面図とその形状に対する模式図（千葉・梶山 *The Vowel*¹³より、一部改変）

前腔（図の左側に相当する）に狭めが存在し、それに比べて後腔である咽頭腔（図の右側に相当する）が広くなっている。/i/では前腔に強い狭めが存在すると同時に後腔が広い。/e/は/i/に似ているが、前腔が/i/よりも広い。一方、/e/は後腔に狭めが存在すると同時に、口唇側の開口部が比較的開いている。/o/では/a/と同様、後腔に狭めが存在するが、口唇側の開口部は比較的細い。/u/は声道の中央付近に狭めがあると同時に、口唇側の開口部も細くなっている。このように、声道形状を変えることで異なる母音（/a/, /i/, /u/, /e/, /o/など）が生成される。

音源フィルタ理論によれば、声帯音源と声道は独立しているものとみなすことができる。声帯音源は母音の高さ（ピッチ）や声質などに主に関係し、声道は/a/や/i/など母音の質、すなわち韻質に主に関係している。つまり、例えば高いピッチや低いピッチの母音を作り出そうとした場合、声帯音源の振動数を変えることにより、母音の響き（韻質）を変えることなく様々な高さの母音を作り出すことができる。反対にピッチを変えずに母音の韻質だけを変えるには、声帯音源の振動数を一定にしなから、口を大きく開いたり（/a/）、舌と口蓋の間で狭めを口腔の前方に作ったり（/i/）などと、声道の形状を変えればよいのである。

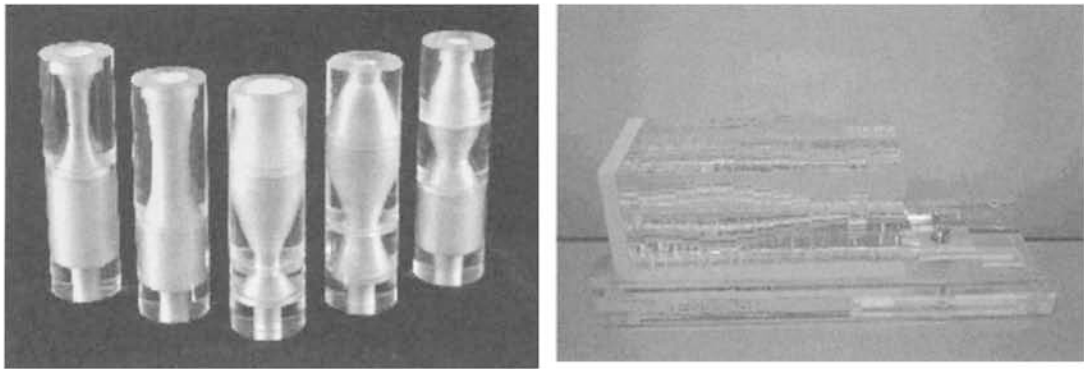


図4 Arai (2001)³⁾の声道模型(左が筒型、右がプレート型)

声道模型

千葉・梶山に基づく声道模型

千葉・梶山の *The Vowel*⁽¹⁴⁾ では、各母音に対して測定された「声道形状」が妥当であるかどうかを確認するため、粘土による声道模型が作られている。そして、その声道模型から出力された音声进行分析し、実測された母音と波形やスペクトルが一致することを確認している。戦争のため、残念ながら千葉・梶山のオリジナル模型は残っていないようであるが、われわれは二〇〇一年に彼らの測定結果に基づき、声道模型の復元を試みた。⁽³⁾ 図4の写真は、左が千葉・梶山⁽¹⁴⁾の復元模型である「筒型」(左から /i/, /e/, /a/, /o/, /u/)、右がわれわれ独自の「プレート型」の声道模型である。音源として電気式人工喉頭や笛式人工喉頭などを用いることによって、人間が発するような「母音」を手軽にデモンストレーションすることが可能である。「筒型」が注目されることが多いが、学習者が自分で並べ替えて様々な声道形状を作り出せる「プレート型」も、実際に音を聞きながら理論を体感できると好評である。

声道模型は、大学や大学院の音声学、音響学、音声言語医学などの分野において「音声」を解説する際の導入として最適である。とくに、声道の形状が母音の韻質に関係していることや、音源フィルタ理論などを分かりやすく説明できる。また音声分析ソフトを同時に併用することで、生成される母音进行分析してフォルマント周

波数（共鳴周波数）などを確認することも可能となるので、応用範囲も広い。視覚的な理解を助けることで、大学生に限らず、高校生、中学生、さらには小学生をも対象に、「音声はどのように作られるのか？」を直感的に説明できる教材となる（実際、本声道模型は子供向けの科学館やテレビの科学番組などでも使われており、最近では国立科学博物館における科学教室にて活躍した）。

音源について

声道模型を使って母音を生成するためには、何らかの音源を喉頭側に入力する必要がある。そのために、ここでは電気式人工喉頭（以下、電気喉頭）または笛式人工喉頭を用いた例をあげる。

人工喉頭（図5）は、喉頭癌などの疾患のため喉頭を摘出した患者さんが、失った声を取り戻すために開発された「代用音声のための補綴器具」である。電気喉頭自体はブザーのような音しか出すことができない。しかし、喉の側面に電気喉頭の振動板（右端の白い板状部分）をあてがいながら口や舌を動かして声道形状を変えると、ブザー音が音源となって声道が共鳴し、音声として聞こえる。笛式人工喉頭も電気喉頭と同じ目的で設計されたが、音の作られ方や使用方法が多少異なる。電気喉頭の場合、電気によって作られる機械的なピストン運動が振動板を「叩く」ことで音が作られているが、笛式の人工喉頭の場合、発話者の呼気がゴム膜を振動させて、それが音源となる。自分自身の呼気を使うという点でも、より自然な発話に近くなる。

頭部形状模型¹³

まっすぐな声道模型は、声道フィルタとして必要な形状を簡潔に示せるが、それがどのように頭部に配置されているか、イメージがつかみにくい。それを補うために、頭部形状模型を開発した。図6は、その頭部形状模型の $\frac{1}{2}$ と



図5 電気式人工喉頭（左）と笛式人工喉頭（右）

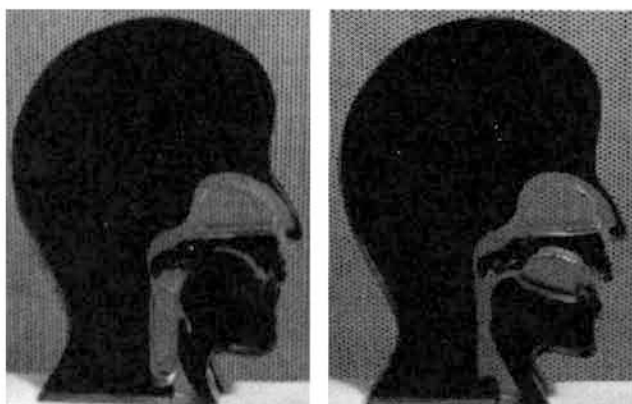


図6 頭部形状模型（左は /i/、右は /a/）

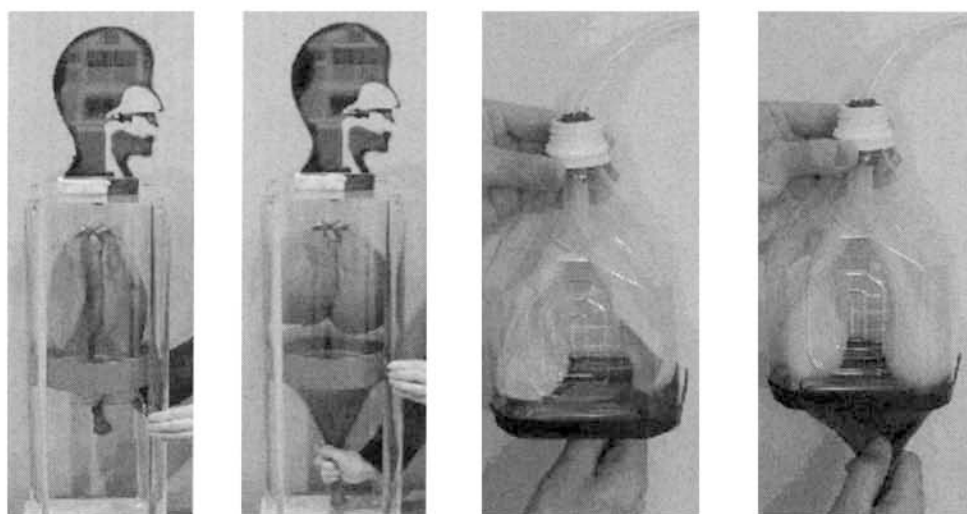


図7 肺の模型

／a/である。これらは横から見た写真であるが、母音／i/と／a/を発声している時の正中矢状断面（頭部を縦の中心線に沿って左右二つに割った時の断面）を表している。また、これらの模型はいずれも鼻腔を伴っており、鼻腔への入口を開閉できるように作られた可動式の軟口蓋を下げることで鼻咽腔結合が実現され、鼻音化された母音を生成することも可能となっている。

肺の模型⁽¹³⁾

模型と一緒に使う音源としては、先に記した電気式人工喉頭と笛式人工喉頭等がある。通常私たちが音声を発するときは、呼気で声帯を振るわせて音源としている。その「息を吸って吐く」という呼吸のメカニズムから発声を系統的に示すためには、次のような肺の模型を使うと効果的である。

図7の左二つが大きな肺の模型（上に乗っているのは、前で述べた頭部形状模型）、右二つが小さい肺の模型である。いずれも容器の下側にゴム膜が張られていて、それぞれ胸部（＝容器）と横隔膜（＝ゴム膜）を模擬している。容器中の二つの風船は肺を模擬しており、二又の管（＝気管と気管支）を介して容器外の笛式人工喉頭（＝声帯）へと接続されている。ゴム膜が下がると容器の中は陰圧となり、外から中の二つの風船に空気が吸い込まれて膨らむ（各模型右側）。ゴム膜が元に戻る際に二つの風船の中の空気は上部へ押し出され、この呼気により人工喉頭のゴム膜が振動して音源となる。さらにその先に声道模型を接続することで、音声を生成することが可能となる。

声道模型を使った教育

音声学の講義での応用

私たちはこれまで、千葉・梶山の『*The Vowel*』⁽¹⁴⁾に基づいて声道模型を復元し、それを教材として用いながら音響音声学の授業や発声のしくみを示すデモを行い、様々な場面で非常に大きな教育的効果を持つことを示してきた。例えば、上智大学大学院の「音声・音響・聴覚情報処理」の講義では、音声生成理論の基礎を学ぶ。以前は図を用いながら理論を解説し、学生の反応も「ふーん」という感じで終わっていたが、模型を用いるようになってからは反響が大きい。簡単に理論を解説してから実演するので、頭ではそうなることが分かっているはずなのだが、事象を目の当たりにすると「実感」として捉えられるようだ。それはコンピュータを使ったデモでは得られない感動を与えてくれる。話は声道形状まで発展していき「模型の反対側から音源を入力しても同じ音声が出力されるんですよね？」と質問が出た。すぐさま試して見せ、実際は音が変わることを確認する。どうしてなのか考えさせること数分、「反対から音源を入力すると相対的な狭めの位置が変わるため、当然出力される音も変わる」ということに学生自らが気付いた。自然と理解も深まるし、教える側も楽しいことは言うまでもない。

純粹に「単純な筒から人間が発するような母音が聞こえてくること」自体が驚きであるし、声道模型の種類（形状）が変わると「聞こえてくる母音」も変化する様子を問近に示されると、かなりインパクトが強いようだ。「声道の形状が母音の音質（韻質）に関係している」ということが、ストレートに理解できるようである。

言語聴覚士を志す学生を対象に、言語障がいに関わる「音響学」や「音声学」を教える際などにも、声道模型は大切に活用できる。例えば、口から鼻への気流の流れをコントロールする「鼻咽腔結合の度合い」と「実際に聞こえる

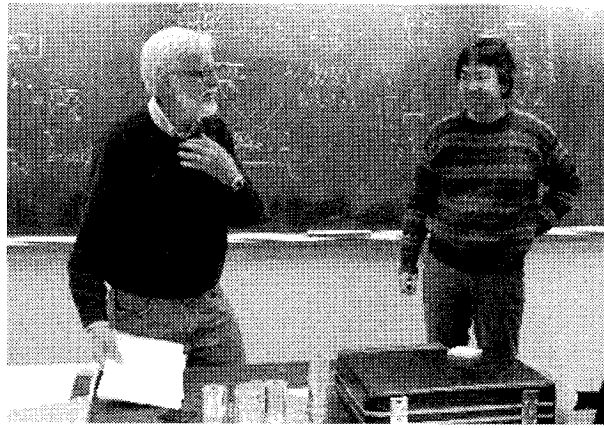


図8 マサチューセッツ工科大学のケネス・N・スティーブンス教授の授業にて

鼻音化の程度」の関係を、視覚的に確認することは難しい。発声中の鼻咽腔閉鎖機能を外から観測するのは困難だからである。その点、声道模型を用いれば、鼻咽腔結合の度合いを変えながら同時に音を確認することができるので、両者の関係を直感的に体得するには最適である。さらに、母音の*ɪ*ではわずかな鼻咽腔結合でも鼻音化が音として確認できるのに対し、母音の*æ*では多少の鼻咽腔結合でもあまり鼻音化しない。そのようなことまで、この声道模型で手軽に確認できるのである。

マサチューセッツ工科大学(MIT)

二〇〇三年から二〇〇四年にかけて、私はマサチューセッツ工科大学にて在外研究を行った。その間、何度かこの声道模型を用いた講義を行う機会に恵まれた。以前からお世話になっていているケネス・N・スティーブンス教授が、彼の講義の一部を私に下さったのである(図8)。授業では、模型の意義や原理、その活用方法に関して鋭い質問が飛び交い、白熱した議論から学生の関心の高さがうかがい知ることができた。後日スティーブンス教授からも「学生は興味深く母音の実体模型を観察し、そこから生成される様々な音に熱心に耳を傾けていた」と評価をいただき、私も手応えを新たに⁽²⁾した。

千葉・梶山の声道模型を復元した際、私は教授に声道模型教材一式を寄贈した。彼はその教育的価値に共感し、それ以来MITの授業でも活用して下さっているようである。かつてスティーブンス教授も、千葉・梶山の *The Vowel* (図2) を読んで音声科学を勉強したという。音声科学の分野では第一人者である教授が、MITの講義で模型を活

用して下さることに、コンピュータにはない「物理模型」の教育的価値と、六十年以上たっても色あせない千葉・梶山の偉業を感じるのには私だけではないだろう。



図9 「静岡科学館る・く・る」に展示されている Arai (2001) のモデル

静岡科学館る・く・る

このようにもっぱら講義中心に声道模型を活用してきたが、最近では高校生向けの体験授業などでも紹介するようになり、使うほどに「専門的に学ぶ方々だけでなくもっと幅広く活用できないものか」という思いが深まってきていた。そんなとき、二〇〇四年三月に開館した「静岡科学館る・く・る」から、Arai (2001)⁽⁸⁾の声道模型を展示したいという話をいただいた。科学館の愛称である「る・く・る」は、科学館のキーワード「みる、きく、さわる」の語尾をつなぎ合わせたものである。嬉しいことに、声道模型も子供たちに「見て、聞いて、触って」もらう機会を得たのだ。展示は「人間の発声メカニズム」を意識して、声道模型と笛式人工喉頭（音源）とふいごを組み合わせ、空気を送って母音を出す仕掛けとなった（図9）⁽¹¹⁾。

私は、わくわくしながら開館したばかりの科学館を訪れた。春休み中ということもあり、館内は子供たちであふれていたが、残念ながら声道模型の展示スペースは人影まばらであった。子供たちは適当に押ししてみるものの、思うように音が出ない。実は、笛式人工喉頭で音を出すには

ちよつとしたコツがある。ゴム膜は、空気圧が弱すぎると振動しないし、強すぎても振動が止まる。つまり、適切な圧力を加えないとうまく振動しないので、「音声」として生成されないのだ。そのため、子供たちは何だか分からないままに通り過ぎて行く（ちなみに、笛式人工喉頭のゴム膜を振動させるのに必要な圧力〔5~10 cm H₂O〕は、人間が音声を発する場合に声帯を振動させるための圧力とほぼ同じ値である）。

私は思わず近くの少年に声をかけ、実際にふいごに手をかけて「こんな風にゆっくり押ししてごらん」と見本を示してみた。すると「アー」。模型が喋った!? 少年は目を輝かせた。そばにいた父親も近寄ってきて「あれー、今、何て聞こえた？」などと会話をしながら、次々と音を出していく。音が人を呼ぶせいもあるのだろう、たちまちコーナーは子供たちでいっぱいになり、今度は私が驚く番であった。子供だけでなく、大人も夢中になっている様子が嬉しかった。親たちは「へえ、面白い」なんて小声でつぶやきながら、操作は我が子に譲り、先生役となって子供を誘導していた。

子供はすごいなあと思った。少しヒントを与えただけで根気強くトライするようになり、明らかに何かを感じてくれているようであった。幼児期、児童期は興味を持ったことをまねしたり、繰り返したりしながら様々なことを習得していく。適宜援助をしながら、あとは子供の自主性や好奇心を尊重しつつ工夫した使い方ができると良いと思った。まだ耳が敏感な時期なので模型の「音質」にこだわると同時に、きちんとした音声が出せるよう「正しい操作」のための確かなサポートも必要だと実感した。

スタッフの方のお話によると、筒型模型も人気だが、プレート型もパズル感覚で楽しんでいる様子とのこと。二〇〇六年にも再度訪問し、人工喉頭のゴムの劣化や模型の部品管理など、メンテナンスは声道模型の重要な課題であると実感したが、この模型が「子供の頃から科学に親しんでもらう」一助となれば、この上ない喜びである。理科離れが叫ばれている昨今、身近なところから科学の面白さや不思議を感じ、「どうして？」につなげていって欲しいと切

に願う。

発音訓練や発声練習における声道模型

声道模型の応用の別の例として、言語治療や言語学習における発音訓練、声楽の発声練習なども考えられる。いずれの場合も、理想的な声道の形状や舌の位置を実体模型で示し、さらにそこから理想的な音が出てくれば、直感的に理解しやすい。舌が自由に動き、連続的に音を変化させられるような模型ができれば、活用はぐっと広がると考える。

例えば、言語障がいを持つ患者さんに、構音器官の「わずかな位置の違い」が音としてどれほど大きく変わってくるかをリアルタイムに見てもらえる。音を聞きながら実物（模型の動き）と比べられるので、小さな子供の臨床の現場においてもとても魅力的な教材になる。聴覚障がいや視覚障がいのある患者さんも、見たり触ったりすることで、口腔内における舌の位置や声道形状を確認したりすることが可能となる。

また語学学習では、自分の言語に存在しない発音を習得するのが至難の業である。発音する際の舌の動きや唇の形をモデルとして模型で示せば、発音練習を手助けできる。われわれは母音のみならず、*ㄣ*や*ㄨ*など子音の声道模型も開発中であるが、英語の発音練習にも活用できるかもしれない。

その他、声楽の分野でも模型は有効な教材となる。例えば、声楽で重要なものの一つに呼吸があるが、「肺の模型」は呼吸（とくに腹式呼吸）の原理を教えるにはもってこいだ。先に述べたエリザベト音大での公開講座でも、学生から「歌を歌うとき、先生から『胸を広げて』『横隔膜を下げて』などと言われても漠然としていたが、模型を見てピンと来た」という声があった。また、声道模型も好評で「同じ音源なのに、口の形が違ふとこんなに音が変わってくることに今さらながら驚いた」など、客観的に見て気づくことも多かったとみえる。さらには、そのような「声」の複雑

さを再認識し、「楽器も、『ただ息を吹き込めばよい』というわけではない。『歌うように楽器を吹き』もつと音を磨いていきたい」というような感想までも見られ、模型の学習に留まらない「嬉しい相乗効果」もあつたようだ。

本稿では、様々な声道模型を用いて音響学や音声生成に関する音響教育について述べてきた。ここで示したように、発音を「可視化」・「可聴化」できる声道模型は、大学や大学院の音響学の授業をはじめ、音声学、音声・聴覚科学、言語障がい学・音声言語医学などの分野において、「音声に関する説明」の導入として活用することができる。筒型およびプレート型、頭部形状型などの「声道模型」と、人工喉頭や肺の模型を組み合わせることによって、「音声生成」の理論を系統的に、かつ、効果的に理解できる。学習者は、様々なデモンストレーションを通じて、実際には目にする事のない「声道の形状」を視覚的に捉えることができるし、さらに、実際に模型を手にとって実験したり、実測したりという過程の中で、文字通り、理論を「体得」できる。とくに、声道の形状が母音の韻質に関係していることや、音源フィルタ理論などを説明する際は、非常に有効である。

また音声分析ソフトを同時に併用することにより、生成される母音を分析し、そのフォルマント周波数（共鳴周波数）やスペクトログラム（声紋）などを確認することも可能である。ここでご紹介した応用例はほんの一例であるが、この声道模型が「空気の振動が音を作る」、「同じブザー音を使っても声道の形が変わると異なる母音を生み出す」などということを直感的に伝えることができるという点で、専門的分野に偏らず、まさに子供から大人まで広く楽しめる教材であると信じている。

最後に、興味のある方はぜひ以下のホームページもご参照いただきたい。模型の詳しい解説や活用例を、カラー写真・ビデオ映像を交えて紹介しており、実際に模型から出る「音」も聞くことができます。

http://www.splab.ee.sophia.ac.jp/Vocal_Tract_Model/

http://www.splab.net/Vocal_Tract_Model/

謝辞

声道模型を用いた音響教育教材の開発では多くの方々に助けていただいた。米国マサチューセッツ工科大学スピーチ・コミュニケーション・グループのメンバー、とくに Kenneth N. Stevens 先生、米国カリフォルニア大学バークリー校の John Ohala 先生、国立国語研究所の前川喜久雄先生、元筑波大学の板橋秀一先生、元東北大学の城戸健一先生、元東京藝術大学の中村俊一先生、東京工業大学の佐藤大和先生、NTT-ATの石井直樹氏、静岡科学館のメンバーの皆様、ノルウェー科学技術大学の Dawn Behne 先生、上智大学国際言語情報研究所・音声学研究室ならびに言語聴覚研究センター、理工学部電気・電子工学科荒井研究室のメンバーに感謝申し上げます。なお、本稿に関連するプロジェクトの一部は、科学研究費補助金(C, 17500603)、守谷育英会、サウンド技術振興財団の助成を受けて行った。

参考文献

- (1) P. B. Denes and E. N. Pinson, *The Speech Chain: The Physics and Biology of Spoken Language*, 2nd ed. (New York: W. H. Freeman, 1993).
- (2) T. Arai, "An effective method for education in acoustics and speech science: Integrating textbooks, computer simulation and physical models," *Proc. of the Forum Acusticum Sevilla*, 2002.
- (3) T. Arai, "The replication of Chiba and Kajiyama's mechanical models of the human vocal cavity," *Journal of the Phonetic Society of Japan*, Vol. 5, No. 2, pp. 31-38, 2001.
- (4) T. Arai, N. Usuki and Y. Murahara, "Prototype of a vocal-tract model for vowel production designed for education in speech science," *Proc. of the 7th European Conf. on Speech Communication and Technology*, Vol. 4, pp. 2791-2794, Aalborg, 2001.
- (5) T. Arai, E. Maeda, N. Saika and Y. Murahara, "Physical models of the human vocal tract as tools for education in acoustics," *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 112, No. 5, p. 2345, 2002.
- (6) 荒井隆行「『より直感に訴える音響教育』を音声学に取り入れるには」(『日本音響学会講演論文集』第二巻、二〇〇二年三月) 一一一九—一二二〇頁。

- (7) 荒井隆行・雑賀紀子・前田絵理・村原雄二「千葉・梶山による声道模型の復元とその教材としての応用」(『日本音声学会全国大会予稿集』二〇〇二年) 一三二―一三八頁。
- (8) T. Arai, "Physical and computer-based tools for teaching Phonetics," *Proc. of the International Congress of Phonetic Sciences*, Vol. 1, pp. 305-308, Barcelona, 2003.
- (9) 荒井隆行・前田絵理「音声学における声道模型を用いた音響教育」(『日本音響学会音響教育調査研究会資料』第EDU-二〇〇三卷八号、二〇〇三年) 一―五頁。
- (10) 荒井隆行・前田絵理・梅田規子「梅田・寺西による声道模型を用いた音響教育」(『日本音響学会講演論文集』第一卷、二〇〇三年九月) 三四―三二四頁。
- (11) T. Arai, "Education in Acoustics using physical models of the human vocal tract," *Proc. International Congress on Acoustics*, Vol. III, pp. 1969-1972, Kyoto, 2004.
- (12) 荒井隆行「肺の模型と声道形状を視覚的に捉えられる頭部模型を用いた音響教育教材」(『日本音響学会講演論文集』第一卷、二〇〇五年三月) 二七三―二七四頁。
- (13) T. Arai, "Lung model and head-shaped model with visible vocal tract as educational tools in acoustics," *Acoustical Science and Technology*, Vol. 27, No. 2, pp. 111-113, 2006.
- (14) T. Chiba and M. Kajiyama, *The Vowel: Its Nature and Structure* (Tokyo: Tokyo-Kaiseikan, 1942).
- (15) K. Maekawa, "From articulatory phonetics to the physics of speech: Contribution of Chiba and Kajiyama," *Acoustical Science and Technology*, Vol. 23, No. 4, pp. 185-188, 2002.
- (16) 粕谷英樹他「音声学における二〇世紀の成果と二一世紀に残された課題——音声分野」(『日本音響学会誌』第五十七卷一号、二〇〇一年) 一―一〇頁。
- (17) 前川喜久雄・本多清志「千葉・梶山の『母音論』について」(『音声研究』第五卷二号、二〇〇一年) 一五―二〇頁。
- (18) K. Honda, "Evolution of vowel production studies and observation techniques," *Acoustical Science and Technology*, Vol. 23, No. 4, pp. 189-194, 2002.
- (19) G. Fant, "T. Chiba and M. Kajiyama, pioneers in speech acoustics," *Journal of the Phonetic Society of Japan*, Vol. 5, No. 2, pp. 4-5, 2001.
- (20) K. N. Stevens, "The Chiba and Kajiyama book as a precursor to the acoustic theory of speech production," *Journal of the Phonetic Society of Japan*, Vol. 5, No. 2, pp. 6-7, 2001.
- (21) T. Arai, "History of Chiba and Kajiyama and their influence in modern speech science," *Proc. of From Sound to Sense: 50+ Years of Discoveries in Speech Communication*, pp. 115-120, Cambridge, MA, 2004.

- (22) G. Fant, *Acoustic Theory of Speech Production* (The Hague, Netherlands: Mouton, 1960).
- (23) K. N. Stevens, *Acoustic Phonetics* (Cambridge, MA: MIT Press, 1998).
- (24) 荒井隆行・菅原勉監訳『音声の音響分析』(海文堂、一九九六年)。
- (25) 荒井隆行・菅原勉監訳『音声・聴覚のための信号とシステム』(海文堂、一九九八年)。
- (26) 荒井隆行・菅原勉監訳『音入門——聴覚・音声科学のための音響学』(海文堂、二〇〇二年)。
- (27) 今富摂子・荒井隆行・菅原勉監訳『音声知覚の基礎』(海文堂、二〇〇三年)。

著者は理工学部電気・電子工学科教授(音声言語情報処理・音響音声学等)