

## 音の福祉工学 —先端技術が果たす役割—

伊福部達

北海道大学 電子科学研究所

**要旨** 失われたり衰えた感覚や手足の機能を工学技術で少しでも補助しようとする分野を「福祉工学」といい、筆者は25年にわたり音に関する福祉工学に携わってきた。その成果から、聴覚や発声機能を補助したり気配の謎解きなどの研究が生まれた。そして失われた感覚イメージに近いイメージをいかに作り出すかという研究は、実際にはないものをいかにあるかのように見せるかというバーチャル・リアリティの研究に必然的に結びついてきた。その先端技術がフィードバックして音の福祉工学に活かされるし、現場で使ってまだ不十分であれば再び基礎に戻るというループを描くことができる。このループを描いている内に概念形成とか感覚連合という未知の脳機能について少しずつ明らかにされる。本稿では、このように音の福祉工学と先端技術とがどのように関わり合っているかを述べる。

**キー・ワード:** 福祉工学、感覚代行、バーチャル・リアリティ、概念形成

## Sound-based assistive engineering - a role of high technology-

Tohru Ifukube

Research Institute for Electronic Science, Hokkaido University

**ABSTRACT** We have been carrying out the sensory substitute studies for about 25 years, and have designed several substitute devices which are in practical or will be put into use. Furthermore, we have obtained many findings regarding concept formation and sensory association in the human brain. We will refer to our research regarding the sensory substitutes and mention how it relates to high technology.

**Keywords:** Assistive engineering, Sensory substitutes, Virtual reality

### 1. 福祉工学における技術体系

失われたり衰えたりした感覚や手足の機能を工学技術で少しでも補助しようとする分野を「福祉工学」といい、筆者は25年間にわたりこの分野に携わってきた。本課題では、福祉工学の研究が必然的にバーチャルリアリティなどの先端技術に結びついたという経緯を筆者の研究歴に基づいて述べながら、先端技術が音の福祉工学に果たす役割について考察したい。

筆者が大学院生の時にはメディカルエレクトロニクス (ME) 部門の研究室で主に心臓の計測に関する研究をしていたが、教授から音楽好きの筆者に聴覚の研究をしたらどうかと奨められた。それでME的な聴覚の研究を目指し、聴覚に障害のある人たちに音声や音楽を感じさせようと試行錯誤の結果、福祉工学という分野を開拓してきた。福祉工学の方法論 (図 1) には、感覚・運動器系を生体工学的に解析する「基礎研究」と、それに基づいて失われた感覚や運動機能の「代行システ

ム（機器）」の開発がある。

そして失われた感覚イメージに近いイメージをいかに作り出すかという研究は、実際にはいものをいかにあるかのように見せるかというバーチャルリアリティの研究に必然的に結びついてくる。その研究成果がフィードバックして感覚障害者のための機器に利用できる。現場で使って、不完全なら再び基礎研究に戻るといようなループを描きながら研究を進めることができる。これが福祉工学における技術体系である。

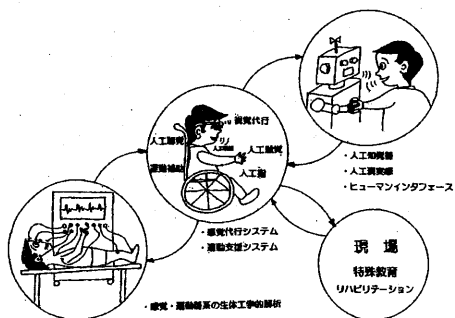


図1. 福祉工学の方法論

## 2. 色々な感覚代行システム

聴覚が失われた人にどのようにしてほかの感覚経路を介し、音声あるいは音楽を聞かせたら良いかというテーマが筆者の研究の始まりであった。その方法は3つ考えられる。一つは視覚障害の人が点字を読むように、音声を触覚で聴くような刺激に変換しそれを訓練によって言葉として理解するという方法。もう一つの方法は音声を画像や文字にして見せる方法。3つ目は、聴神経が残っている場合に、直接電気刺激を与えて音声情報を脳に送る方法である。いずれの方法も、最も重要なのは、いかにして聴覚的なイメージをほかの感覚神経経路を介して作り出すかということである。このような研究では感覚系や発声系に関する基礎研究が極めて重要な立場を占めており、「聴覚代行」「視覚代行」あるいは「発声代行」に関する装置の開発を進めてきた。

### 2.1 「指で聴く」装置の開発

感覚代行で最初に行ったのが触覚を使った聴覚

代行の研究である。約20年前に、内耳の機能を電子回路で置き換え、指先でわかるように変換した装置（触知ボコーダ）を開発した。図2に示したように、振動するピンが縦16列横3行で48本配列されていて、高い音が来れば上部が振動し、低い音が来れば下部が振動する。たとえば母音の「あ」の場合には真ん中あたりが強く振動し「い」の場合には両端に分かれる。母音の場合は振動する場所が異なり、子音の場合は振動の場所が動き、それを点字を読むように指先で感じとらせようという考え方である。実際に札幌聾学校と共同研究で一年間ほど音声認識訓練をしたことがあったが、そのときの経過はNHKで「指で聴いたあいうえお」というドキュメンタリー番組で採り上げられ、今では貴重な資料になっている。この装置は製品化されたが、当時約70万円と高額であったため結局普及するまでには至っていない。その後、触知ボコーダは改良され、「く」や「つ」などの短くてすぐ消えてしまう子音も指先で把握できるように工夫がなされた。詳細は省略するが、これには麻雀の盲牌が大きなヒントとなり、今の触知ボコーダはパターンが指先上を電光掲示板のように動くようになっている。現在、64チャンネルの触知ボコーダをタバコの箱くらいの大きさで、5~6万円の価格になるように、東京のベンチャー企業が製品化を目指して開発している。

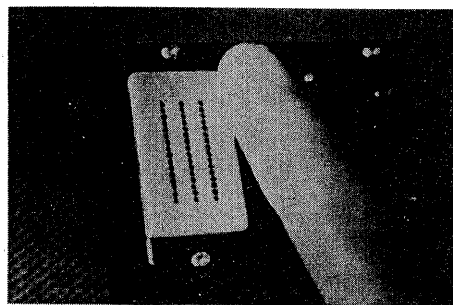


図2. 触知ボコーダの振動子アレイ (3×16)

### 2.2 言葉を文字にするタイプライタ

この装置を中途失聴になった人に適用したところ、実際に触っても「あ」と「い」の違いはわかるが、それは音声としては聞こえてこないことか

ら非常に失望したようである。彼らは文字という概念をすでに獲得しているので、実際の生活では筆談を使っている。特に高齢化してからの失聴では手話や読話を覚えるのは困難である。もし音声情報を文字に変換することができれば、言葉として読み取れるし聞き取れるはずである。そこで、筆者等は17年ほど前に基礎研究にもどり、触知ボコーダーの出力の時間スペクトルパターンを利用して、聴覚での情報処理機構を踏まえてコンピュータで音声を文字に置き換えるという研究に取り組んだ。ただし、「あかさたな・・・ん」と一音一音話した68個の単音節音声をかな文字に換える単純なものである。当時、世の中に出始めたマイクロコンピュータを使ってハードウェアで音声タイプライタを作り、さらにワープロとつないで漢字まで表現できるような装置として製品化することができた(図3)。96%くらいの正答率で0.2秒後に文字になるという性能であった。この装置はワープロの音声入力として非常に有望視され、当時150万円もしたこの装置をいろいろなメーカーが購入した。非常に高額であったために、中途失聴者のための装置としては普及しなかったが、最近、この装置がまた注目されてきている。現在、不特定話者、連続音声認識装置を利用して、バーチャルリアリティ(VR)で使われる透過型HMDを介して認識された音声を文字にして相手の口元あたりに現れる補助装置の開発を行っている。そのため、誤認識をされた文字を含む文章を中途失聴者がどこまで理解できるかを調べている。

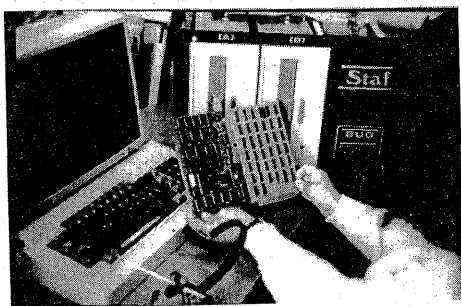


図3. 単音節音声タイプライタの外観

## 2.3 聴神経を電気刺激して音声を伝える

聴神経が残っている人に直接電気刺激を与える人工内耳は、聴覚経路のらせん器と呼ばれるセンサー部分(毛の生えた約3万個の細胞)に障害のある感音性難聴に有効である。聴神経が正常で聴覚中枢までつながっている場合、生きている神経に電気刺激を加えて情報を中枢に送ることができる可能性があることから、15年くらい前から人工内耳の基礎研究を重ねてきた。しかし、この研究は日本では人体実験を伴う危険な研究であると判断され医療分野ではまったく理解されなかった。そこで当時人工内耳の分野で非常に優れた研究を進めていたアメリカのスタンフォード大学に行き、筆者が作った人工内耳(図4)をボランティアの患者に埋め込んで、約一年間にわたり実験やテストをしてきた。

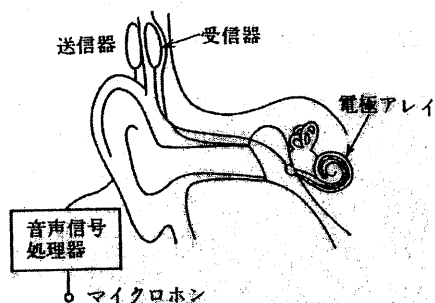


図4. 8チャンネル人工内耳の構成図

マイク目ホンで拾った音声を内耳で処理していると思われる信号に電子回路で置き換え、伝送装置を介して体内に埋め込んだ受信器で検波する。その信号を内耳に埋め込んだ8個の電極を通じて聴神経を刺激するという方式であった。どのように信号処理すれば言葉がわかるかを研究したのであるが、残念なことに患者の内観報告によると、自分が記憶している音と電気刺激されて聞こえてくる刺激とはほど遠いとのことであった。技術的な未熟さもあって、筆者は日本に帰国し新たな方法で人工内耳の研究を始めることになった。内耳を傷つけない簡単な方法を試行錯誤で探し出し新しい方式を提案したのであるが、実際に使った被験者の感想では、先ほどの患者の言っていたよ

うに、記憶している音声と刺激されて聞こえてくるものとはかなり違うらしく、なかなか実用として使われない状況にあった。そうこうしているうちに、メルボルン大学で研究・開発されコクレア社で製品化された人工内耳が全世界に普及し、現在では1万人以上の人たちに適用されている。

ところで、人工内耳の研究過程で耳鳴りが治るといふ人が多くいるということに気が付いた。耳鳴りは相手にはわからない、眠れない、言葉が聞き取りづらいなど非常に強いストレス状態を引き起こしており、決定的な治療法がないのが現状である。これまで延べで約千人の患者に内耳を電気刺激する検査をしたところ、およそ3分の1で耳鳴りが一過性ではあるが治ることがわかってきた。患者からは、耳鳴りが始まったら自分で治療できるような装置を開発してほしいという要望があって、埋め込み型の耳鳴り治療器を開発し(図5)、現在まで7名が耳に埋め込んでいる。



図5. 埋め込み式耳鳴り治療器の外観

## 2.4 ゆっくり聴く補聴器の開発

こういう研究をしていると難聴に接する機会が多く、そのなかでも老人性難聴者に良く出会う。個人差が非常に大きい、特徴を調べてみると、若い人の難聴とは根本的な違いがある。検査音の強さを変えていろいろな言葉を聞かせその正答率をみると、普通の耳では音を大きくしていくと100%わかるようになるが、老人性難聴の場合には途中で止まってしまう、一定以上は音を強くしても聞こえがよくなるらない、逆に音を強くしたためにかえって悪くなるという例が多い。それで現在の音圧を増幅するだけの補聴器は約半数の高齢

者の難聴には役に立たないことが分かっている。ところで難聴の人に話す時に、われわれは無意識のうちにゆっくり話している。老人性難聴は耳が単に悪くなっただけではなく、言葉を理解する速度が低下したと言われている。したがって、声の高さは変わらずにゆっくり聞こえる機能を補聴器に持たせれば良いのではないかと思い大手の電気メーカーの人と共同開発をしたことがある(図6)。ゆっくり聞こえる補聴器は、一方的に音が入ってくるラジオやテープ学習、あるいは電話の音声を書く時に役に立つことが実証されている。

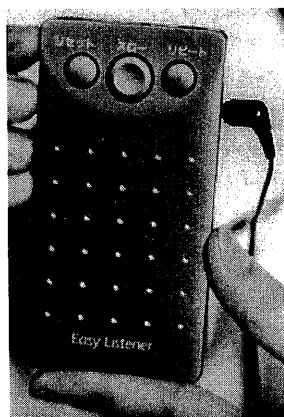


図6. 「ゆっくり」聴くデジタル補聴器の外観

## 2.5 九官鳥音声の研究から人工喉頭へ

聴覚や音声の研究を進めていると、いわゆるモノマネ鳥(九官鳥やインコ、オウムなど)が、人間の口の形と全然違うのになぜ非常にうまく話すことができるのかという疑問が湧いてくる。その疑問が解ければ、たとえば言葉を失った人たちのための人工発声器を開発することができるのではないかと考えた。ところで人間の声は、ヘリウム酸素混合空気中(空気中の窒素をヘリウムに置き換えたもの)でしゃべると、ドナルドダックのような声に変わる。窒素よりも軽いヘリウムによって口の中で起こる共鳴の周波数が高い方に移るために生じる現象である。もしこの空気で九官鳥の声が変われば、人間と同じ発声をしていると言えるだろうと実験をしたところ、九官鳥の声には

変化がなかった。信号解析と解剖の結果から、声帯に相当する鳴管というものが2つありそれを組み合わせて声を出していることがわかった。人間とはかなり違う発声方法なのであるが、発声している言葉のイントネーションをみると非常に似ている。そこからヒントを得て、今度は人工喉頭の開発をした。

たとえば喉頭がんなどで喉頭を取ってしまうと声の音源がなくなるので、食道発声という方法をとる。しかし、この方法は訓練が大変で、特に高齢化するほど難しくなるので、電気人工喉頭と呼ばれるものが使われる。喉の外から音を振動で入れ、口のかたちを変えると言葉になるという器具である。ところがそれはロボットがしゃべっているかのような非常にフラットな音しか出すことができないので患者は積極的に使っていないのが現状である。そこで、九官鳥と同じように抑揚をつける工夫をした。呼吸にはイントネーションに関係する情報があるのでそれを喉に開けた気管孔から取り出してイントネーションをつける装置の開発をし、この方法で話す音声極めて自然になることを実証した。昨年、札幌の企業で製品化し1000台を発売したところ瞬く間に650台が売れた(図7)。

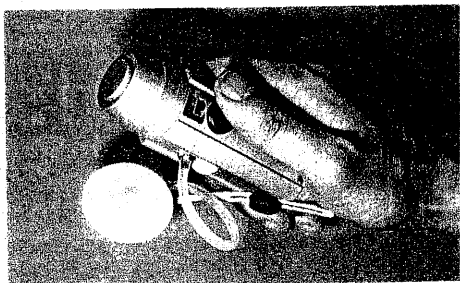


図7. イントネーション制御型人工喉頭の外観

## 2.6 コウモリの発声音から障害物探知器

九官鳥と並び称せられる超感覚を持った動物にコウモリがいる。多くのコウモリは超音波を放射し、跳ね返ってきた音から餌をつかまえたりあるいは障害物を見つけたりする能力を持っている。発する超音波の種類によってコウモリは2種類に

分かれる。1つは、ピーという一定の音を出してから少し下がるもので、もう一方は短時間で急激に周波数が下がる音を出すものである。このコウモリを調べていくことによって、視覚障害者が超音波の反射音で障害物を検出するような装置に応用できるのではないかと考えた。

最初に一定の音を出すコウモリの音を人間の耳に聞こえる音に直して、どの程度障害物が認知できるか実験し、音によって方向、距離、動きがある程度わかるという結果を得た。次に周波数が急激に下がるタイプのコウモリを調べ、超音波メガネを開発し(図8)、先ほどのコウモリとどちらが障害物の検出に有利かを比較してみた。ポールを徐々に近づけて、その存在を感知した位置をポールの太さと距離を変えて実験したところ、2ミリのポールの場合、一定の音を出した場合は64センチ、周波数が下がる場合は92センチで感知し、後者の方が障害物の検出に有利であることがわかった。



図8. 周波数下降型コウモリをモデルとした超音波メガネ

## 2.7 障害物知覚から「気配」の科学へ

このような研究の過程で障害物知覚という興味ある現象を経験した。それは「気配」にも関係することである。たとえば、視覚障害の人たちに体育館の中の壁に向かって歩かせると、まず約3メートルの地点で「何かがあるという感じがする」と言い、それから直前まで来ると「何かにぶつかりそうな感じがする」と言って立ち止まる(図9)。何回歩いても壁から40センチぐらいのところまでピタッと立ち止まることができる。彼らの内観報告は、何か皮膚で感じたような気がすると

か、風の流れ方が変わったような気がするということである。一般的にも「気配で感じる」ということがあるが、障害物知覚は一種の気配と呼ばれているものかも知れないと考え、気配を科学する研究に入った。いろいろ調べてみると、音が関係していることがはっきりしてきた。最初に3メートルぐらいのところに来ると、自分が出した足音が跳ね返ってくるときに、自分の足元から聞こえるように急に変わってくる。これを先行音効果というが、それが何かがあるという認識に結びつくようである。右耳と左耳の相関係数をみると壁の直前で値が急に小さくなることから、音像がいきなり全面に広がって感じられているようである。それが何かがあつたりそうになるという感覚と一致しているということがわかってきた。ところで、視覚障害の人は自分も静止して障害物も静止していてもその存在を感知できる。たとえば50cm<sup>2</sup>の障害物を置いて、その脇に座らせると、ほとんど完璧にその存在がわかる。これは、障害物の位置と周辺の騒音源の関係で、耳に入る音の音色が微妙に変わり、それが障害物の距離感と結びついていることがわかった。そこから、左右にスピーカーを置き音をコントロールすることによって仮想障害物を提示することができると考えた。

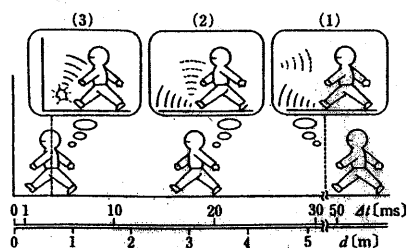


図9. 障害物知覚の2段階

## 2.8 バーチャルリアリティへの展開

これは言ってみれば究極のバーチャルリアリティということがいえる。

例えば、スピーカーをずらっと並べて、回転椅子で自分が回転すると例えば都会のなかのある環境のなかにいるような感覚を作ることできる(図10)。実は1983年に、聴覚だけではなく視

覚のバーチャルリアリティの研究が盛んになるであろうと思い、今のHMDと言われているものに相当する特許を出したことがある。ところがその当時は、だれからも興味を示してくれず、7年でその特許申請が切れてしまったことがある。独自にHMDを開発して研究を続けていたのが最近やっと認められ、バーチャルリアリティと福祉工学が一体となった一つの学問体系が考えられるようになってきた。2年程前に複合現実感(MR)プロジェクトが通産省のKTCとキヤノン(株)の出資により発足し、現実の情報に仮想の情報を重ねたり、はめ込んだりしてより臨場感のある情報を提供しようという研究がスターとした。北大の近くに研究所分室が作られ、我々は、MR刺激の人体へ及ぼす影響を調べ、MR技術を医療福祉へ応用する研究を進めている。最近では、手足に障害のある人たちを補助する研究も進んでおり、並行して手足が何かに触ったという感じや重たいという感じを仮想的に提示するバーチャルリアリティの研究を行っている。さらにバーチャルリアリティは高齢者や障害者が住みやすい住宅、都市づくりのシミュレーションの研究に発展しようとしている。

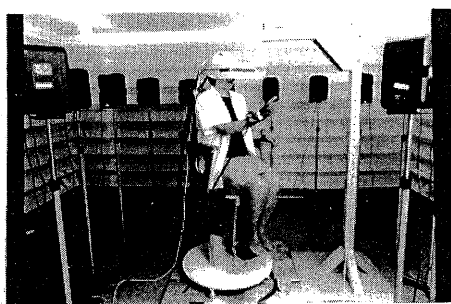


図10. バーチャルリアリティシステムの外観

25年にわたる研究を通じて、福祉工学の方法論は、最初に述べたように、まず基礎研究があり、特に障害者と健常者の特性の違いを調べる。次にそれに基づいて聴覚代行、視覚代行、あるいは発声機能を代行するような機器を開発する。それが自然とバーチャルリアリティなどの先端技術に発展し、人とロボットが会話をしたり握手をする

このような研究につながる。この技術に磨きがかかってくれば、それをフィードバックさせてよりよい聴覚代行、視覚代行、発声代行の研究に生かされる。また、現場で利用した機器が不完全であれば、もう一度基礎研究に戻る。このようなループを描きながら、先端技術が福祉工学に活かされ新しい学問の技術体系が築き上げられるのではないかと考えている。

### 3. おわりに

以上の技術体系は理想論であるが、実際にはこのような分野は社会的に認知されているとは決して言えない。福祉工学というと、どうしても車椅子などをイメージし、既成概念にしばられてしまう。従来、人間の機能回復は主として医学の分野で進展してきたもので、ここでの福祉工学は工学的なアプローチということができ、今後の発展の可能性は十分にある。ただし、問題なのは需要が少ないことである。視覚障害の人たちが30数万人、聴覚障害も同じくらいの数で、発声障害は2万人位である。もちろん、世界的規模でみると需要は決して小さくはないが、「福祉工学」という名前であるがゆえに需要が狭まっている面もある。福祉という狭い領域から発展したものを一般の人でも使えるようなものに広げていけば、需要も広がり技術ももっと磨かれると考えている。言い換えると、社会的ニーズは高いにもかかわらず、今まで特殊な狭い分野の問題と考えられていた「福祉（ハンディキャップ）」に関する科学技術を通常の「人間活動」のための科学技術につなげて、両者をさらに新しい研究分野へとパラダイム・シフトさせることができるであろう。

それと、もう一つ重要なことは、このように失われたり劣った感覚や発声あるいは脳機能を補助するという研究は、人間とは何かという根元的な学問と結びついてくることである。例えば、ある機能が失われると別の機能でそれを代替しようとする能力が自然と備わってくる。これは、5感とか脳の機能がある規則に従って変わっていくことを意味し、それらの機能を別の観点から探ること

とになろう。そして、このことは人間についての「思索」や「文化」をより豊かにする素材となり得ると考えている。このように音の福祉工学から派生するであろう技術や知見は決して予測できないような重要なものが包含されているような気がする。それにしても、わが国で音の福祉工学を本格的に目指している研究者はあまりにも少ない。筆者の研究経験に照らしても、このようなフロンティア科学技術の構築とそこにチャレンジする研究者により手厚く研究資源が機動的に移動してくるような研究開発システムの改革を望みたい。そして、本稿を一読してこの分野を開拓していこうとする研究者が一人でも増えることを切に願う。

#### 【参考文献】

- 1) 伊福部達:「音の福祉工学」コロナ社(1997)
- 2) 伊福部達:バーチャル・リアリティが切り拓く新技術体系、研究技術計画、12巻1号、PP26-31 (1997)