平成29年度研究助成 【サウンド技術振興部門】より

聴覚フィードバックにおける骨導音知覚の役割とその応用

北陸先端科学技術大学院大学情報科学研究科
教授　鵜木　祐史

1．聴覚フィードバック

聴覚フィードバックは、音声生成におけるフィードバック情報の一つであり、私たちは自らの音を聴きながら、音声生成に係わる器官を制御して正しく発話している。例えば、音声生成と知覚のループ（言葉の鎖）において、雑音など外乱が混入したとしても、難なく発話することができるのはこの聴覚フィードバックを利用しているからである（ロンバード効果と呼ばれる）。

聴覚フィードバックの研究は多岐に渡る。代表的なものとして、遅延聴覚フィードバック（DAF）が知られている。DAFでは、自らが発声した音声を付与させ、それを聴きながら発声するときに音声発話にどのような影響がでるかが調査されてきた。その結果、200ms程度の遅延を付与させた場合に、吃音のようになったり、間延びした発声になったりと音声発話が困難になることがわかった。これは、発声したい音声の音響特徴と、実際に聞こえてくる音声の音響特徴が時間的にずれることによって脳がそれを補正して発話させようとした結果生じたものであると考えられる。

2．音声の知覚経路

空気を振動して伝搬される音（気導音）は、図１（下）のように、外耳道を経由して鼓膜を

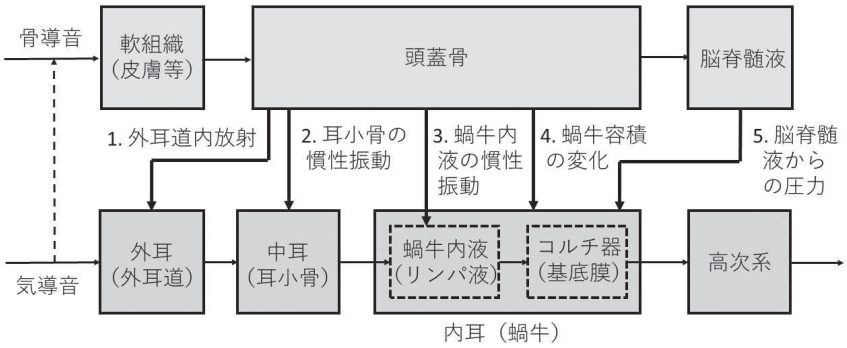

図１　気導音と骨導音の知覚に係わる聴覚経路の概要

振動させ、中耳の耳小骨を介して蝸牛に到達する。蝸牛では、その振動が蝸牛液内を伝搬した後、コルチ器にある基底膜に進行波と呼ばれる変位運動を生じさせ、その上にある受容細胞を興奮させる。その興奮は、聴神経を経由して高次系（脳）へと伝えられ、音として知覚される。一方、図１（上）のように、音が頭蓋骨の振動を経て知覚される場合、その音は骨導音と呼ばれる。骨導音は、話者の声（気導音）が音声器官から頭蓋骨に直接振動して伝搬することも可能であるし、骨導振動子を利用して呈示することも可能である。

骨導音の知覚には、いくつかの経路があることが知られている[1)]。一つは骨伝導により外耳道そのものが振動されることによって生じる振動音（外耳道放射）を知覚するものであり、もう一つは耳小骨連鎖から慣性振動として生じる振動音を知覚するものである。その他として、蝸牛そのものが振動することによって生じる音の知覚（蝸牛内液での慣性振動や蝸牛容積の変化によるもの）や脳脊髄液からの圧力によって生じる音の知覚もあると考えられている。

３．遅延聴覚フィードバックにおける骨導音知覚

私たちの音声知覚経路には、気導音の知覚経路の他に骨導音の知覚経路もある。この点を鑑みると、気導音の聴覚フィードバックを厳密に検討するためには、何らかの方法で骨導音知覚の経路を遮断しなければならない。従来研究では、ピンク雑音の呈示により骨導音をマスクすることでこの知覚を無視してきたが、その効果について精査されていないため、骨導音の知覚経路を完全に無視できるか不明である。

一方、ロンバード効果では骨導音知覚が重要になる可能性が示唆されており、聴覚フィードバックでも重要な要因であると考えられている。そのため、聴覚フィードバックのメカニズムを解明するためには、気導音知覚だけでなく骨導音知覚にも主眼を置いた検討を行う必要がある。本研究の主な狙いは、自らの骨導音知覚が聴覚フィードバックでは重要な要因であるという仮説を立て、骨導音知覚が聴覚フィードバックにどのような影響を与えるのか調査することである。本稿では、その最初の取り組みとして、DAFにおける骨導音知覚について検討する。

４．遅延聴覚フィードバック実験

正常聴力を有する日本人成人男性話者３名に対してDAFの実験を行った[2)]。図２に示すような処理概要にて、気導音・骨導音を処理して話者にフィードバックした。実験は防音室内で行われた。話者の音声はマイクロホン（Sennheiser MHK 416 P48）からA/Dコンバータ（Roland QUAD-CAPTURE）を経由して、

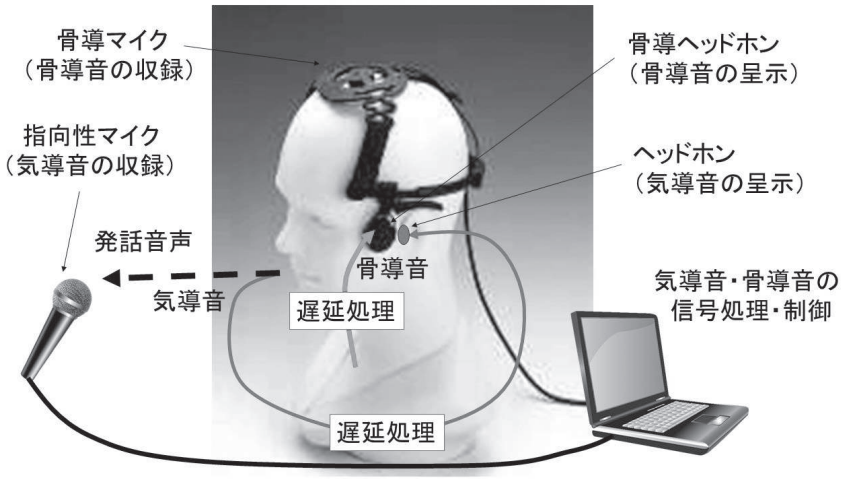

図２　発話音声（気導音／骨導音）の聴覚フィードバックの概要

PC（LG Sharkoon with OS Ubuntu Studio 14.04 Linux）により収録された。サンプリング周波数は44.1kHz、量子化ビット数は16bitsとした。PC内で実験条件に応じて音声信号を遅延させ、オーディオインタフェースを経由してアンプ（audio-technica AT-HA5000）で増幅させた後、ヘッドホン（Sennheiser HD280）または骨導トランスデューサ（TEAC HP-F200）によって話者に呈示された。実験条件によって信号と同時にピンク雑音が付加された。ヘッドホンからの出力は音圧レベル80dBになるように調整された。実験機構全体で13.2msの潜時があることが確認されたため、音声への遅延操作にはこの潜時も考慮して調整された。

話者には、遅延なし（潜時13.2ms）と５つの遅延時間（50、100、150、200、400ms）の条件で一つの音声刺激（４モーラ単語＋助詞＋４モーラ単語、例えば、ホドホドのシャブシャブ）を連続で30回発話させた。これを１セットとして、４つの音声刺激について各条件をランダムにしたうえで４セット行った。フィードバックは、気導音と骨導音の２種類として、ピンク雑音の呈示も気導音と骨導音の２種類とした。骨導音でのDAFならびにピンク雑音の呈示のときのみ耳栓をさせて、気導音のフィードバックをシャットアウトした。

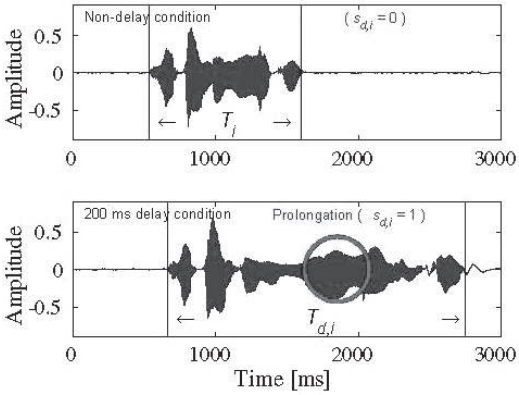

図３　無遅延時の発話音声（上）と遅延聴覚フィードバック（200ms遅延）における発話音声（下）

図３に発話音声刺激の一例を示す。DAFの影響により発話音声が長くなっていることがわかる。実験では、無遅延時とDAFのときの音声刺激に関して発話長の比（図３上の刺激長に対する図３下の刺激長の比）の平均ならびに非流暢箇所の数（吃音の観測数）を測定した。代

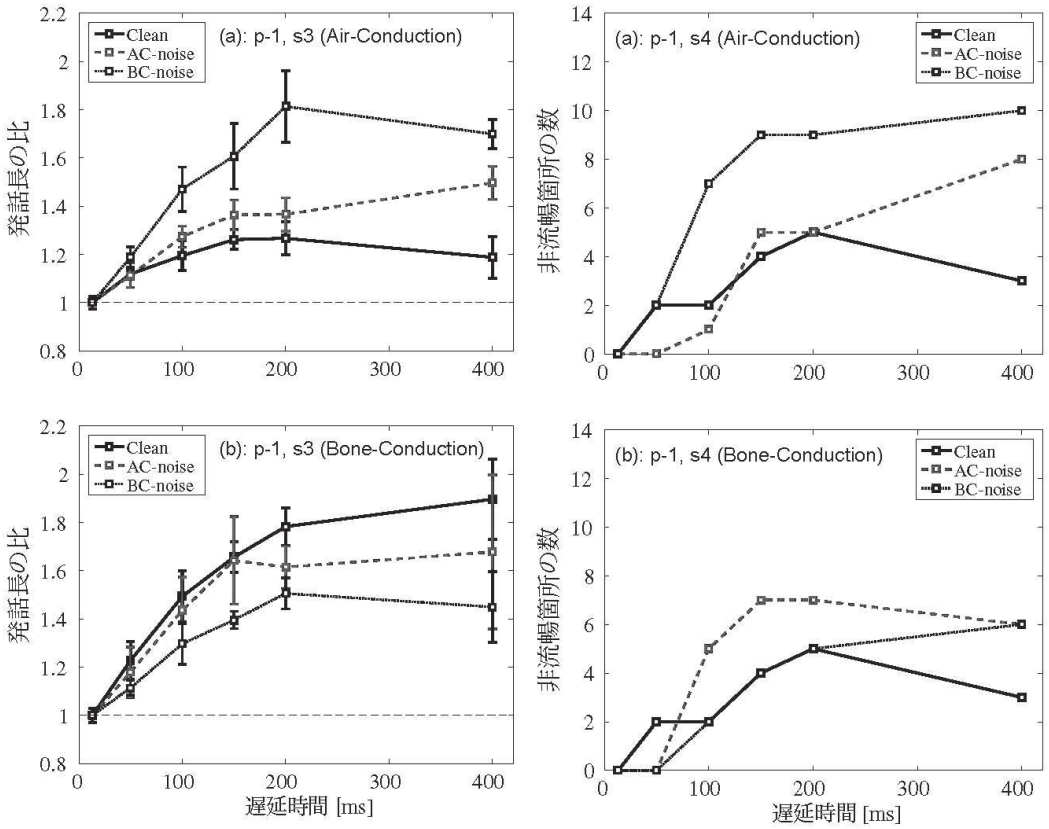

図４　遅延聴覚フィードバックにおける発話長の比（左）と非流暢箇所の数（右）．図の上段は気導音によるフィードバックを下段は骨導音によるフィードバックの結果.

表例として、ある話者の実験結果を図４に示す。

実験結果から次のことがわかった。

- 気導音ならびに骨導音のDAFによる音声発話への影響がみられた。特に遅延が150～200ms付近でその影響が最大であった。
- 骨導音によるピンク雑音の呈示による効果から、気導音のDAFによる音声発話への影響が大きくなった。しかし、骨導音のDAFによる音声発話への影響は大きくなかった。

他２名の話者においても気導音おならびに骨導音のDAFによる音声発話への影響はみられたが個人差があることがわかった。

５．まとめと今後の展望

DAFにおける骨導音知覚に関して、気導音／骨導音呈示による発話音声のフィードバックならびにピンク雑音によるマスキングの効果を検討した。その結果、話者自身の骨導音知覚から、DAFによる音声発話への影響が大きいものであることがわかった。その影響の度合いは、話者による個人差があるため、話者数を増やした実験を行うなど、継続した検討が必要である。しかしながら、本検討では気導音知覚と骨導音知覚を完全に分離して議論できたわけではない。例えば、耳栓の利用により気導音知覚を遮

断することはできたが、ピンク雑音の気導音／骨導音呈示によるマスキングの結果からわかるように骨導音知覚を完全に遮断できたわけではない。また、骨導音呈示によるDAFでは、骨導音が外耳道放射による気導音として知覚されることで生じたDAFの結果であるのかもしれない。さらには、骨導音呈示で利用した骨導トランスデューサの特性を補正していないため、純粋な骨導音の音響特徴に関するDAFを検討できたとまでは断言できない。これらに関しては、気導音知覚における音響的特徴の検討[3)]や骨導音呈示方法の検討[3)]など注意深く検討を深め、DAFの実験方法を洗練化することで一つずつ解決していく予定である。

謝辞

本研究に対して研究助成を賜りましたサウンド技術振興財団に心より感謝申し上げます。

参考文献

1）Stenfelt, S.“Acoustic and physiologic aspects of bone conduction hearing,”Adv Otorhinolaryngol., vol. 71, no. 10－21, Mar. 2011.

2）鳥谷輝樹，鵜木祐史，“気導・骨導の遅延聴覚フィードバックにおける呈示方法の検討,”日本音響学会2017年度春季研究発表会講演論文，3-Q-46, pp.1529－1532, March 2017.

3）鳥谷輝樹，鵜木祐史，“話者が知覚する骨導音声の音響的特徴の検討,”日本音響学会2017年度秋季研究発表会講演論文，3-P-10, pp. 345－348, Sept. 2017.