

平成26年度厚生労働科学研究費補助金
障害者対策総合研究開発事業事業（感覚器障害分野）
分担研究報告書

中高度難聴者への超磁歪素子を用いた埋め込み型骨導人工中耳の開発

研究分担者 小池 卓二（電気通信大学大学院情報理工学研究科 教授）

研究要旨

本研究では、既存の骨導補聴器よりも侵襲や埋め込み後の感染症へのリスクが小さく患者の負担が少ない、側頭部皮膚下完全埋め込みタイプの補聴器を開発してきた。本補聴器の振動子部分には超磁歪素子を用いているが、これまでの計測により、低音域における出力が不十分である可能性があることが分かってきた。そこで低音域の出力向上を目指し、振幅変調（AM）波と磁界共鳴方式を組み合わせた新伝送方式を用いることで、送受信コイルの伝送効率の改善に取り組んだ。その結果、新方式は従来方式に比べ伝送効率が45 dB程度向上し、本補聴器の課題である低音域の出力不足を改善できる可能性が示された。

A．研究目的

外界の音は、鼓膜、耳小骨、蝸牛へと伝達され、蝸牛内のリンパ液を振動させる。リンパ液の振動により、蝸牛内の感覚細胞が刺激され、機械振動が電気信号に変換される。この電気信号が神経を介して脳へ伝えられることで音を認識する。この経路に何らかの障害が生じると難聴となる。難聴となった場合、聴力改善の手段として補聴器の利用が挙げられる。外耳道にイヤホン挿入し、気導刺激によって補聴する気導補聴器は、外耳道内における音の反射やハウリングなどの影響により、高音域までひずみの少ない正確な音圧増幅特性の実現が困難である。骨導補聴器は、外耳や鼓膜を介さない聴覚経路である骨導を用いた補聴器であり、気導補聴器に比べ、音圧、音質ともに優れ補聴性能が良いことから注目されている。しかし、デバイス設置のための侵襲により患者の負担が大きい。

そこで本研究では、上記の問題点を克服する側頭骨の皮膚下に埋め込む骨導補聴器を提案する。これまで試作した補聴器では、高周波数域では高い出力が得られているが、低周波数域では相対的に出力が低く、十分な補聴が行えない可能性があることが分かってきた。これは、本補聴器はコイルの相互誘導を用いることで経皮的に音情報を体内の振動子に送るが、低周波において伝送効率が悪いためであると考えられる。そこで本報告では、送受信コイルの伝送効率を

改善することによって、低音域の出力不足を向上させることを目的とした。

B．補聴器と信号伝送方法

B - 1．補聴器概要

本補聴器は、マイク、サウンドプロセッサ、送信コイルからなる信号送信器（体外ユニット）と、受信コイル、骨加振器（体内ユニット）で構成されている。本補聴器の構成を Fig. 1 に示す。体外ユニットと体内ユニットは、コイルの相互誘導により経皮的に信号伝送を行う。また、体外ユニットを頭部に保持するために、送信コイル・受信コイルそれぞれの中心に円柱形のネオジウム磁石を設置している。小型振動子部分には、超磁歪素子（Giant Magnetostrictive Material, GMM）を用いている。GMMとは、外部磁界に応じて寸法を変化させる性質を持ち、圧電材料に比べ、変形率、応答速度ともに優れた素子である。GMMにコイルを巻き、そのコイルに音に応じた電流を流

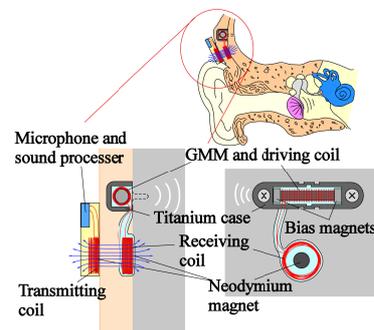


Fig. 1 Implantable hearing aid

すことで、音に合わせて変形させることができる。GMM は、磁界 - 変形特性が非線形であるため、バイアス磁界を与え比較的線形な領域を利用する。GMM には、駆動コイルとして銅線を直接巻き、受信コイルと駆動コイルは直列に接続されている。本補聴器はこの GMM を用いた小型振動子を側頭骨の皮膚下に完全に埋め込む事で骨導補聴を行う。本補聴器は、体外ユニットと体内ユニットを分離することで、体内ユニットの完全埋め込みと小型化を実現している。よって、既存の骨導補聴器よりも侵襲や埋め込み後の感染症へのリスクが小さく、患者の負担が軽減されるという利点がある。

B - 2 . AM と共振回路を組み合わせた新伝送方式

相互誘導により受信コイルに発生する誘導起電力は式 (1) で表せる。

$$V = -M \frac{dI}{dt} \quad (1)$$

M は相互インダクタンスであり、コイル形状やコイル間距離などによって決定される値である。つまり形状や距離が一定である場合、受信コイルに発生する電圧は送信コイルに流れる電流の時間変化に依存する。本補聴器の送信コイルには、ヒトの可聴域である比較的低い周波数の信号波を直接入力し相互誘導させていた。そのため、受信コイルに発生する電圧が低く、伝送効率が悪かった。

伝送効率を上げるには相互誘導に高周波を用いる必要がある。そこで本補聴器には、高周波である搬送波の振幅を信号波の形に変調させる、振幅変調 (Amplitude Modulation, AM) の利用を検討する。使用する搬送波の周波数は、非接触給電の規格の 1 つである Q_i を参考に、110 ~ 205 kHz の範囲内に収める。さらに伝送効率を上昇させる手段として、コイルとコンデンサによる共振回路を利用する方法を提案する。両素子を直列に繋げ、回路の共振周波数に相当する信号を入力することで、インダクタンスとキャパシタンスが打ち消し合う。これにより、回路内のインピーダンスは抵抗成分のみとなり、高伝送効率で電力を送信することが可能であると考えられる。

しかし、AM を用いて信号伝送する場合、

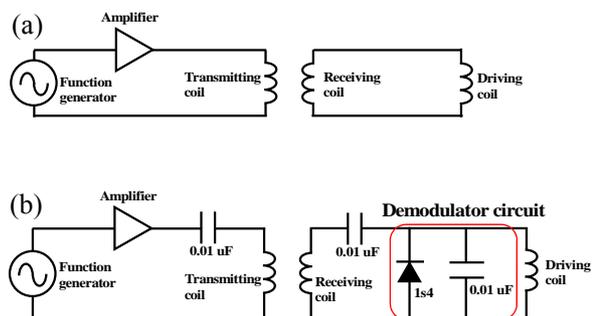


Fig. 2 Circuits of external and internal units
(a) Conventional circuit (circuit A)
(b) Circuit using magnetic resonance (circuit B)

Table 1 Details of coils

	Transmitting coil Receiving coil	Driving coil
Lead diameter (mm)	0.2	0.2
Coil turns (turns)	40	130
Inner diameter (mm)	25	2
Length (mm)	2	10
Resistance (Ω)	2.0	0.9

そのままでは音として知覚することができないため、復調回路に通す必要がある。この復調回路の追加により、駆動コイルを流れる電流が低下してしまう可能性がある。そこで、信号波を直接入力した従来の伝送方法と、AM 波と共振・復調回路を用いた新伝送方法の伝送効率を計測し、どの程度の改善が見込めるか比較した。

C . 研究方法

C - 1 . 従来方式と新方式の比較

実験の回路図を Fig. 2 に、送受信コイル及び駆動コイルの詳細を Table 1 に示す。回路 A は信号波を直接送信コイルに流す、従来の伝送方式を用いた際の回路図である。受信コイルに発生した電圧により、駆動コイルに直接電流が流れる。回路 B は送受信側にコンデンサを繋ぎ、共振回路とした新伝送方式を用いた際の回路図である。受信コイルに発生した電流を並列型復調回路 (図中赤線で囲んだ部分)に通すことで、駆動コイルに復調された信号波が流れる。

経皮伝送を模擬するため、送受信コイルの間に厚さ 5 mm の塩化ビニル板を挟んだ。ファンクションジェネレータ (SG-4115, IWATSU)、アンプ (HSA4011, NF) を用い、送信側回路に正弦波を入力した。送信側回路に入力した電圧、電流は電圧プローブ

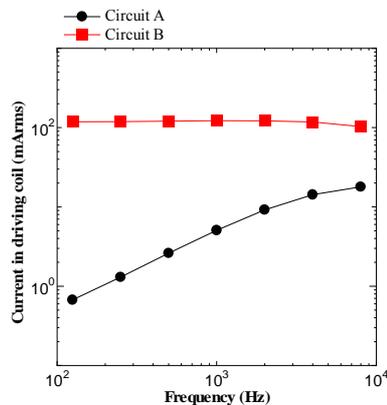


Fig. 4 Current in driving coil

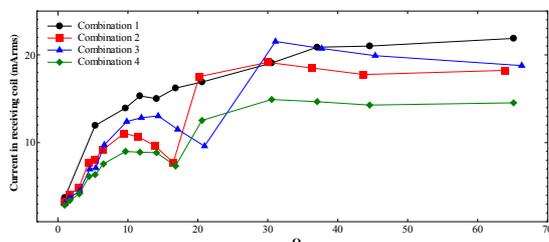


Fig. 5 Relationship between transmitting and receiving coil

た,受信側に流れた電流を縦軸に示す. コイルの巻き数が同じ場合 (Combination 1), Q 値の上昇に従って受信側に流れる電流が上昇した. しかし, コイルの巻き数が異なる場合 (Combination 2~4), $Q = 15 \sim 20$ でノッチが見られた.

受信側の電流を多くするには送信コイルの巻き数を多く, 受信コイルの巻き数を少なく設定する必要があるが, 電流が逆に落ちてしまうコイル・コンデンサの組み合わせが存在する. Q 値は 30 以上で電流が横ばいとなった. Q 値は高すぎると信号波を伝送できなくなる可能性があることを考慮すると, 本補聴器の受信側回路の Q 値は 25 ~ 35 となるよう設定すれば, 可聴域までカバーでき, かつ高い出力が得られると考えられる.

E. 結論

皮下埋め込み型骨導補聴器の実用化に向けて, 本補聴器の問題点であった低周波数域の出力不足への対策を, 伝送効率の改善という点から行った. AM と共振回路を組み合わせた新しい伝送方式によって, 伝送

効率が改善されるか計測を行った. その結果, 以下の知見が得られた.

- AM と共振回路を用いた新しい信号伝送方式により, 電流伝送効率を最大で約 45 dB 向上できる.
- 可聴域までカバーでき, かつ十分な出力を得るために, 体内ユニットの Q 値は 25 ~ 35 が最適である.

F. 研究発表

1. 学会発表

林直輝, 田中絵里, 橋本卓弥, 神崎晶, 羽藤直人, 小池卓二: 埋め込み型骨導補聴器用振動子の振動特性改善, 日本機械学会 2014 年度年次大会 (2014.9.7-10)

田中絵里, 林直輝, 神崎晶, 羽藤直人, 橋本卓弥, 小池卓二: 骨導補聴器用トランスデューサーにより発生する振動の三次元計測, 日本機械学会 第 25 回バイオフィロントイア講演会 (2014.10.3-4)

田中絵里, 林直輝, 金子渥, 神崎晶, 羽藤直人, 橋本卓弥, 小池卓二: 埋め込み型骨導補聴器の信号伝送効率の改善, 日本機械学会 第 27 回バイオエンジニアリング講演会 (2015.1.9-10)