

学位論文題名

人工内耳における伝達情報量の増加を

目的とした刺激方式に関する研究

学位論文内容の要旨

近年、電子工学など技術の進歩により生活や仕事をする上で著しい利便が得られてきている。しかし、その便利さの多くは心身ともに健常な人達を対象として追求されてきた。電子工学などの先端技術を生体機能の損なわれた人達に活かすという発想は古くからあったが、それが具体化され始めたのは比較的最近である。ところで、現在、重度の感音性難聴者の残存神経に対して電気刺激を行うことにより、失われた聴覚機能を再現しようとする人工内耳という装置が実用化されている。しかし、現在の人工内耳は決して完成されたものではなく、従来の研究から幾つかの問題点が指摘されている。この問題点とは、第1点として、電極アレイが挿入される蝸牛内が導伝性を有するリンパ液で満たされているため、同時に2つ以上の電極で電流を流そうとすると蝸牛内ではチャンネル間にインターラクションが生じることである。また蝸牛外においては蝸牛自身の螺旋構造のために非常に複雑な電流パターンが作られ、多くの刺激チャンネルを用いても蝸牛内の電流の広がりのためにあまり多くの情報を送ることはできない。第2点として、3万本ある聴神経に対して、電極の数は多くても22個であり、そこでも伝達情報量に限界が生じていることである。そのため、現在の人工内耳で失聴以前の音声を再現するのは困難であり、聞き取り能力を向上させる上で脳の可塑性に頼っているのが現状である。実際には、そのような脳の可塑性の力を借りず、失われた機能を失われる以前の機能にできるだけ近づける努力をしなければならない。

本研究では、人工内耳とくにマルチチャンネル人工内耳の伝達情報量の増加を目的とした刺激方式を提案している。提案方式の妥当性を数値解析により調べ、ヒトから摘出した蝸牛に電極を挿入して実験を行い本方式の有用性を示すとともに、モルモットの蝸牛神経への電気刺激に対する応答、及び聴神経モデルを用いた数値解析から本方式の有用性の裏付けを行った。以下に、本論文の構成に従って本研究で得られた成果について述べる。本論文は全6章で構成されている。

第1章では、本研究の背景として聴覚代行の社会的必要性を述べ、本研究の目的を示した。

第2章では、現在までの人工内耳研究について概説し、その問題点を指摘している。また、蝸牛内での電流の広がりを抑えるための、他の研究者による諸方式について述べ、本研究の位置づけを明確にしている。

第3章では始めに、我々が提案した3電極型刺激方式の理論的動作について述べている。我々の提案した3電極型刺激方式では、複数個ある電極の内、任意の3電極を選び刺激電流を制御するという方法を採用している。具体的には、中央の電極を通して刺激電流を引き

込み、両側の電極で、中央の電極から与えた電流値に一致する電流を放出している。本方式は、聴神経線維から一定の距離だけ離れた位置に置かれる電極アレイ中の任意の3電極から刺激を行うことで、聴神経線維上の限られた領域に、電極アレイ径方向電流密度（電界強度）の負の最大値をもたせることができるようになる。また、両側の電極に供給する電流の割合を動的に変化させて、電極アレイ径方向電流密度（電界強度）の分布パターンすなわち刺激部位を移動させることにより、見かけ上無数の仮想電極があるようにした。これら機能が実際にヒト蝸牛内で成立し得るか否かを確認するために、ヒトの摘出蝸牛内で調べ、従来の方式とも比較した。

その結果、3電極型刺激方式では、他の方式よりも分布を先鋭化することを明らかにした。また、3電極型刺激方式では、神経線維に対し、刺激として有効である電極アレイ径方向電界強度の負の最大値を持つ蝸牛内位置を移動し得るということを明らかにした。ただし、負の最大値となる位置を最大限移動させようとするとき、径方向双極型と刺激方法が同じになるために、3電極型は他の方式よりも神経興奮の広がりを抑え得るという利点が無くなるという問題点を指摘した。しかし、電極の存在しない部位に神経興奮を移動させ得るということは、電極数が限られている人工内耳では極めて有用であり、この機能によって中枢へ送ることができる情報量の増加に貢献することが想像される。

第4章では、前章で明らかにした事実に基づき、さらに神経レベルでの3電極型刺激方式の動作を確認するために、モルモットを用いた動物実験と聴神経モデルを利用した数値解析から、以下に示す結果を導いた。

まず、従来の方式である単極型、双極型および3電極型刺激方式の神経レベルでの比較を数値解析によって比較した。その結果、3電極型刺激方式で両側の電極に通電する電流をバランスさせた場合が、他の方式よりも、神経興奮の広がりを抑えるということを明らかにした。また、3電極型刺激方式では、負の径方向電界強度（電流密度）によって生じる輸送膜電位が最も高くなる部位の両側に、正の径方向電界強度（電流密度）によって脱分極する部位 side lobe が存在することを示した。本方式で、刺激部位を最大限移動させようとする場合、実質的に双極型に近づく。その際、side lobe の影響が最も高くなる。この side lobe から、神経発火が生じない範囲が3電極型刺激方式が有効に働く範囲となることを示した。

また、モルモットを用いた動物実験で、3電極型刺激方式によって誘発させられる複合活動電位を聴神経束から導出し、聴神経線維モデルを利用した数値解析から算出した“閾値を超えるモデル聴神経線維の総数”と比較した。その結果、3電極型刺激方式が形成する電極アレイ径方向電流密度（電界強度）分布から見いだした“幅”と名付けたパラメータが、複合活動電位の大きさを決定する主要因であると推察できた。この“幅”を一定に保つようにして、刺激部位の移動を行うことで、刺激される範囲を一定に保ちながら、刺激位置を移動させ得ることを示唆した。これは、電極アレイ上に固定されている限られた数の電極を用いて、蝸牛内にアレイ状に配置されている聴神経の任意の位置を、興奮させることができるということを表している。

第5章では、第4章で行った動物実験および数値解析の検証および妥当性について述べている。より実際の聴神経に近いモデルを用い、数値解析を行い、動物実験から得た結果との比較を再度行った。また、動物実験時に聴神経線維-電極アレイ間の距離がずれていた場合についても論じた。その結果、数値解析と動物実験で多少の差異はあるものの、その傾向は変わらないということが分かった。加えて、配置した聴神経線維モデルの密度についても論じた。その結果、数値解析で設定した聴神経線維モデルの密度が妥当な値であることを示した。

第6章では、本研究の成果を統括し、また将来の展望について触れた。

今後は、本方式を組み込んだスピーチ・プロセッサを用いて、その機能をマルチチャンネル人工内耳を装着している被験者で確認する必要があるだろう。しかし、本研究の結果から、人工内耳における伝達情報量の更なる増加が期待でき、より高い周波数弁別能または高い聞き取り能力を得ることが予想される。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 伊 福 部 達
副 査 教 授 河 原 剛 一
副 査 教 授 下 澤 楯 夫
副 査 教 授 山 本 克 之

学 位 論 文 題 名

人工内耳における伝達情報量の増加を 目的とした刺激方式に関する研究

近年、重度の感音性難聴者の残存神経に対して電気刺激を行うことにより、失われた聴覚機能を再現しようとする人工内耳が実用化されている。しかし、現在の人工内耳は決して完成されたものではなく、従来の研究から幾つかの問題点が指摘されている。第1の問題点は、電極アレイが挿入される蝸牛内が導伝性を有するリンパ液で満たされているため、多くの刺激チャンネルを用いても蝸牛内の電流の広がりのために送り得る情報量が少ないことである。第2点として、3万本ある聴神経に対して、電極の数は多くても22個であり、そこでも伝達情報量に限界が生じていることである。

本研究では、マルチチャンネル人工内耳の伝達情報量の増加を目的とした刺激方式を提案している。提案方式の妥当性を実験と数値解析の両面から調べ、その有用性の裏付けを行っている。主な結果は以下に要約される。

第1章では、本研究の背景として聴覚代行の社会的必要性を述べ、本研究の目的を示している。第2章では、現在までの人工内耳研究について概説し、その問題点を指摘している。また、蝸牛内での電流の広がりを抑えるための、他の研究者による諸方式について述べ、本研究の位置づけを明確にしている。

第3章では始めに、著者が提案した3電極型刺激方式の理論的動作について述べている。著者の提案した3電極型刺激方式では、複数個ある電極の内、任意の3電極を選び刺激電流を制御している。具体的には、中央の電極を通して刺激電流を引き込み、両側の電極で、中央の電極から与えた電流値に一致する電流を放出する方法を提案している。本方式では、聴神経線維上の限られた領域に、電極アレイ径方向電流密度の負の最大値をもたせることができるようになっている。また、両側の電極に供給する電流の割合を動的に変化させて、電極アレイ径方向電流密度の分布パターンすなわち刺激部位を移動させることにより、見かけ上無数の仮想電極があるようにしている。これらの機能が実際にヒト蝸牛内で成立し得るか否かを確認するために、ヒトの摘出蝸牛内で調べ、従来の方式と比較している。その結果、本方式では、他の方式よりも分布を先鋭化で

きることを明らかにしている。また、3電極型刺激方式では、神経線維に対し、刺激として有効である電極アレイ径方向電界強度の負の最大値を持つ蝸牛内位置を移動し得るということを明らかにしている。このように、電極の存在しない部位に神経興奮を移動させ得るということは、電極数が限られている人工内耳では極めて有用であり、この機能によって中枢へ送ることができる情報量の増加に貢献することを推察している。

第4章では、前章で得られた事実に基づき、さらに神経レベルでの3電極型刺激方式の動作を確認するために、モルモットを用いた動物実験と聴神経モデルを利用した数値解析から、以下に示す結果を導いている。

まず、従来の方式である単極型、双極型および3電極型刺激方式の神経レベルでの比較を数値解析によって比較している。その結果、3電極型刺激方式で両側の電極に通電する電流をバランスさせた場合が、他の方式よりも、神経興奮の広がりを抑えるということを明らかにしている。

また、モルモットを用いた動物実験で、3電極型刺激方式によって誘発させられる複合活動電位を聴神経束から導出し、聴神経線維モデルを利用した数値解析から算出した“閾値を超えるモデル聴神経線維の総数”と比較している。その結果、3電極型刺激方式が形成する電極アレイ径方向電流密度分布から見いだした“幅”と名付けたパラメータが、複合活動電位の大きさを決定する主要因であると推察している。この“幅”を一定に保つようにして、刺激部位の移動を行うことで、刺激される範囲を一定に保ちながら、刺激位置を移動させ得ることを示唆している。これは、電極アレイ上に固定されている限られた数の電極を用いて、蝸牛内にアレイ状に配置されている聴神経の任意の位置を、興奮させることができるということを表している。

第5章では、第4章で行った動物実験および数値解析の検証および妥当性について述べている。その結果、数値解析と動物実験で多少の差異はあるものの、その傾向は変わらないということを明らかにしている。加えて、配置した聴神経線維モデルの密度についても論じている。その結果、数値解析で設定した聴神経線維モデルの密度が妥当な値であることを示している。

第6章では、本研究の成果を統括し、また将来の展望について触れている。

本研究の結果から、人工内耳における伝達情報量の更なる増加が期待でき、より高い周波数弁別能または高い聞き取り能力を得ることが予想される。

以上のように、本研究では、難聴者のためのマルチチャンネル人工内耳の伝達情報量の増加を目的とした刺激方式を提案し、その有効性を示したことから生体工学に貢献するところが大きい。

よって、著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。