

学 位 論 文 題 名

人工内耳の設計に関する生体工学的研究

学位論文内容の要旨

わが国における聴覚障害者の数は1987年2月の厚生省の統計では約35万4千人（18歳以上）、全世界では8000万人に達しているといわれている。聴覚は人間の持つ五感の中でも視覚と共に周囲の状況を把握するために重要な感覚であり、全方位の情報を察知できるという面で大きな役割を果たしている。聴力が著しく低下すると警報音など注意を促す環境音を知覚できなくなるため、生命に危険が及ぶこともある。もう一つの問題は、相手の話の内容を正確に把握できなくなるため、日常生活でのコミュニケーションに支障をきたすようになることである。

生まれつき、あるいは幼児から重度の難聴になると聴覚言語機能の発達が妨げられるため、それらを通して得られる言語力や思考力に遅滞が生じ健全な社会生活を営むのに支障をきたすようになる。そのため、聴力が著しく低下した場合、できるだけ早い時期に何らかの方法によって、音に関する情報とりわけ音声情報を脳に送ることが不可欠になってくる。

人工内耳は、これら聴覚障害者のうちでも内耳だけに障害を持つ患者の残存する末梢聴神経を直接電気刺激して、音に関する情報を伝達させようとする試みである。これまでに種々の方式の人工内耳が開発されてきているが、それらの多くは内耳の中に刺激電極を挿入するという方式をとっているため残存する内耳の機能を損なうという欠点があり、言語概念の獲得時期である幼児や小児に適用できないという問題点があった。

本論文では、幼児や小児にも適用でき、内耳への侵襲をできるだけ少なくすることを念頭においた人工内耳の設計方法について述べたものである。具体的には、シングルチャンネル蝸牛外刺激型人工内耳システムを提案し、新しい刺激電極、体内への信号伝送、音声信号処理方式を試作し、その評価を行っている。このような研究を通じて、逆に、ヒトの聴覚神経における情報処理の仕組みが解明されていくことが期待されるし、得られた知見は現在の難題である音声自動認識の研究に活かされると考える。これが人工内耳研究の生体工学的な側面である。

第1章は序論として、各種の聴覚補助方式について述べるとともに人工内耳の位置づけを行い、残存する聴神経を有する感音性難聴者の補綴装置として人工内耳がどこ

まで有用であるかを考察した。そして、新しい人工内耳システムを設計するにあたって、どのような神経刺激電極、体内信号伝送方式および音声信号処理方式を構築しなければならないかを明確にした。

第2章では、まず内耳の生理学的な知見を概説し、蝸牛の機能を代行するためには聴神経をどのように電気刺激すれば良いかを考察した。次に、従来の人工内耳の方式に触れ、それらの長所や問題点を明らかにした。さらに、従来の人工内耳装着者の電気刺激に対する知覚特性について述べ、信号処理を開発する上で検討しなければならない問題点を考察し、本論文で展開している人工内耳の有用性を述べた。

第3章では人工内耳のための神経刺激用電極の開発とその評価を行った。ここでは非侵襲である蝸牛外電気刺激法の重要性について述べ、蝸牛の鼓室階に通じる正円窓膜という薄い膜に電極を接触させる方法を採用し、膜に傷をつけないように高含水ゴムと呼ばれる生体適合性が高く柔らかい高分子材料で電極を被覆することを提案した。そして、高含水ゴムで被覆した刺激電極が人工内耳の電極としてどこまで有用であるかを評価した。

電極にパルス電流を流しそのとき発生する電圧波形から等価回路を求めて評価した結果、高含水ゴムで被覆した方が抵抗分が大きい、分極が電流量にあまり依存しなくなることが分かった。一年にわたって生体へ埋め込んだときでも高含水ゴムの電気的特性はほとんど変化しないことを確認した。また、モルモットの蝸牛の正円窓膜に刺激電流を与え聴神経より誘発される複合電位を記録した結果、被覆電極を用いても内耳に電極を挿入した場合と同様の特性が得られることを確認した。

第4章では人工内耳のための体内への信号伝送方式を開発し、その電気的特性を調べると共にモルモットによる動物実験から本方式の有効性を評価した。本方式は、一次コイルをイヤーマールド内に設置し、チップコイルなどからなる受信部を外耳道内壁に埋め込むという形式をとっている。この場合に問題となる伝送効率の安定性、コイル間の位置ずれの影響などについて調べた。受信部をシリコンでコーティングし生理食塩水中に半年間つけた状態でその伝送効率を調べた結果、その特性はほとんど変化しなかったことから、体内に埋め込んでも電氣的に長時間安定であることが推察された。さらに、モルモットの蝸牛をこの伝送方式を介して刺激し、聴神経束からの複合電位を求めた結果から、従来の刺激装置と同様に聴神経を十分に発火させ得ることを確認した。

第5章では蝸牛の電気刺激によって生じる感覚特性について述べた。音刺激に対して聴覚は優れた時間分解能を持つが、このことが聴神経の直接電気刺激でも得られるのかどうかを調べた。実験ではモルモットの蝸牛に相続く2個の電気パルスで刺激を行い聴神経の複合電位を求めた。その結果、刺激間の時間差が $500\mu\text{sec}$ になるまで2個の刺激に対応して聴神経が応答することを見だし、聴神経の時間分解が十分高いことを確認した。

次に、19名の難聴者に急性検査として岬角からの聴神経電気刺激を行い、そのとき

に生じる感覚特性と時系列電気刺激に対する応答を調べた。その結果、刺激で生じる感覚に関しては個人差が極めて大きく、患者が知覚した電気刺激は、音としてばかりでなく振動感覚等としても知覚されることが分かった。しかし、相続く2個のパルスからなる時系列刺激を与えて、2個の刺激間の時間差がどの程度増えると感覚に違いが生じるかを調べた結果、わずか100~200 μ sec増えると違いがでてくるところを見いだした。このことから、音声の時系列信号に変換することにより電気刺激でもある程度音声の識別ができることが示唆された。

第6章では、前章の結果を踏まえて音声を時系列刺激に変換する新しい符号化方式を提案し、この信号処理を実現するために必要なソフトウェアとハードウェアについて述べた。ここではピッチと第2ホルマントを抽出し、ピッチに同期するパルスの直後にもう一つのパルスを挿入して、その2つのパルス間の時間差が第2ホルマント周波数の逆数になるように変換する符号化方式を考案した。これに必要な信号処理をDSPを用いて実現した結果、この符号化に必要な処理時間は約20msecであることが分かった。なお、この符号化方式で合成した5母音がどの程度識別できるかをテストした結果、訓練無しでも約60パーセントの識別率が得られることを確認している。本方式は手術の簡便さに加えホルマント等の音声情報も伝達できるため、特に幼児や小児へ適用するのに適しているといえる。

第7章は結論として本研究で得られた主な結論を要約している。

学位論文審査の要旨

主 査	教 授	栃 内 香 次
副 査	教 授	小 川 吉 彦
副 査	教 授	山 本 克 之
副 査	教 授	伊 福 部 達
副 査	講 師	松 島 純 一 (医学研究科)

学 位 論 文 題 名

人工内耳の設計に関する生体工学的研究

本論文は、言語概念の獲得時期である幼児や小児にも適用でき、内耳への侵襲をできるだけ少なくすることを目的とした人工内耳の設計方法について述べたもので、シングルチャンネル蝸牛外刺激型人工内耳システムを提案し、新しい刺激電極、体内への信号伝送、音声信号処理方式を試作し、その評価を行っている。

第1章は序論であり、人工内耳の位置づけを行い、残存する聴神経を有する感音性難聴者の補綴装置として人工内耳がどこまで有用であるかを考察している。そして、新しい人工内耳システムを設計するにあたって、どのような神経刺激電極、体内信号伝送方式および音声信号処理方式を構築しなければならないかを明確にしている。

第2章では、まず内耳の生理学的な知見を概説し、蝸牛の機能を代行するためには聴神経をどのように電気刺激すれば良いかを考察している。次に、従来の人工内耳の方式に触れ、それらの長所や問題点を明らかにしている。さらに、従来の人工内耳装着者の電気刺激に対する知覚特性について述べ、信号処理を開発する上で検討しなければならない問題点を考察している。

第3章は人工内耳のための神経刺激用電極の開発とその評価を行っている。初めに非侵襲である蝸牛外電気刺激法の重要性について述べ、正円窓膜に傷をつけないように高含水ゴムと呼ばれる生体適合性が高く柔軟な高分子材料で被覆した電極を膜に接触させる方法を提案している。まず電極にパルス電流を流し発生する電圧波形から等価回路を求めて、高含水ゴムで被覆した方が抵抗分が大きい、分極が電流量にあまり依存しなくなることを明らかにし、一年にわたって電極を生体へ埋め込み高含水ゴ

ムの電気的特性はほとんど変化しないことを確認している。次に、モルモットの蝸牛の正円窓膜に刺激電流を与え聴神経より誘発される複合電位を記録した結果、被覆電極を用いても内耳に電極を挿入した場合と同様の特性が得られることを示している。以上からこの刺激電極の人工内耳用電極としての有用性を確認している。

第4章では人工内耳のための体内への信号伝送方式を開発し、その電気的特性を調べると共にモルモットによる動物実験からその有効性を評価している。本方式では、一次コイルをイヤーマールド内に設置し、チップコイルなどからなる受信部を外耳道内壁に埋め込む。この場合に問題となる伝送効率の安定性、コイル間の位置ずれの影響などについて調べ、体内に埋め込んでも電氣的に長時間安定であることを示している。さらに、モルモットの蝸牛をこの伝送方式を介して刺激し、聴神経束の反応から、従来の刺激装置と同様に聴神経を十分に発火させ得ることを明らかにしている。

第5章では蝸牛の電気刺激によって生じる感覚特性について述べている。まずモルモットの蝸牛に電気刺激を行い聴神経の時間分解が十分高いことを確認した。次に、19名の難聴者に急性検査として岬角より聴神経電気刺激を行い、そのときに生じる感覚特性と時系列電気刺激に対する応答を調べた。その結果、刺激で生じる感覚に関しては個人差が極めて大きく、電気刺激は音としてばかりでなく振動感覚等としても知覚されることを明らかにしている。さらに、相続く2個のパルスからなる時系列刺激を与えて、2個の刺激間の時間差がどの程度増えると感覚に違いが生じるかを調べた結果、わずか100~200 μ sec増えると違いがでてくるとを見いだした。このことから、音声を時系列信号に変換することにより電気刺激でもある程度音声の識別ができることを示唆している。

第6章では、前章の結果を踏まえて音声を時系列刺激に変換する新しい符号化方式を提案し、この信号処理を実現するために必要なソフトウェアとハードウェアについて述べている。まずピッチと第2ホルマントを抽出し、ピッチに同期するパルスの直後にもう一つのパルスを挿入して、その2つのパルス間の時間差が第2ホルマント周波数の逆数になるように変換する符号化方式を考案し、これに必要な信号処理をDSPを用いて実現した結果、この符号化に必要な処理時間は約20msecであることを示している。また、この符号化方式で合成した5母音の程度識別テストを行い、訓練無しでも約60パーセントの識別率が得られることを確認している。

第7章は結論で、本研究で得られた主な成果を要約している。

以上のように、本論文は新しい発想に基づく人工内耳を開発し、重度聴覚障害者支援システムとしての有効性を確認するとともに、ヒトの聴覚神経における情報処理特性の一端を明らかにしたもので、医用電子工学ならびに音声情報処理工学の進歩に寄与するところが大きい。

よって、著者は博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。