

学 位 論 文 題 名

「ディジタル補聴器のための
聴覚非線形特性に関する研究」

学位論文内容の要旨

老人性難聴を始め内耳や中枢に障害をもつ感音性難聴者の多くは、健聴者とは異なる聴覚特性の歪みがある。そのため、従来の単純に音圧を増強するだけの補聴器では、十分な聞き取りの改善が望めない。我が国の難聴者の数は現在、高年難聴者だけでも324万人いると推定されており、このうち補聴器を装用しているものが約74%いるが、現在の補聴器に満足していない者は52%を越えている。難聴者の数は社会の高齢化にともない急増することは必至であり、その増加とともに真に役に立つ補聴器への期待と要求は極めて大きい。

最近、健聴者とは異なる難聴者の聴覚特性を補うように、ディジタル処理による音声の加工を行うディジタル補聴器の設計開発が盛んになってきている。しかし、その多くは周波数分解能や時間分解能を補うものであり、聴覚の非線形特性の劣化を補償する研究は見あたらない。本研究の目的は、聴覚における音声知覚特性を聴覚非線形性の観点から調べ、少しでも聞こえが良くなるようなディジタル補聴器を提案し評価するところにある。このような補聴器の設計開発では、健聴者と難聴者の聴覚特性を調べ、比較解析する基礎研究が最も重要になる。

聴覚の非線形のうち、結合音については比較的よく研究されている。結合音とは複数の周波数からなる音を聴取したときに知覚する音である。例えば f_1 [Hz], f_2 [Hz] ($f_1 < f_2$)で構成される複合音を聴取すると $f_2 - f_1$ [Hz]や $2 \times f_1 - f_2$ [Hz]の周波数で結合音が生じることが分かっている。

ところで音声は複数の周波数成分を持ち、その調波構造やホルマント構造から類推すると聴覚の非線形性により結合音が生成される可能性が高い。また、音声は時間的に定常なものでなく、音圧や周波数が絶えず変化するものであり、ヒトはその変化を手がかりにして音声の認識をしていると言っても過言ではない。結合音は時間的に周波数変化しない定常複合音については研究されている。しかし、周波数変化する複合音（FM複合音）については研究がされておらず、音声などのように複数の周波数成分が時間的に変化する場合にどのような音として知覚されるのかは不明な点が多い。

本研究は、上述の点を踏まえた上で、難聴者の聴覚非線形性の働きを補うディジタル補聴器の設計開発を最終目的とし、従来研究されていなかったFM複合音における結合音知覚特性を調べ、難聴者の特性と比較した。研究に際しては主としてマスキング実験という心理物理的手法を用いて結合音の知覚特性を推察した。得られた知見をもとにディジタル補聴器により音声の加工を行い、難聴者における音声の聞こえが改善することを確認した。

本論文の要約を以下に示す。

第1章では、本研究の背景、特に、高齢化社会に向かうことで難聴者が増えることと、本研究の社会的意義について触れた。また、本研究の目的であるディジタル補聴器の設計に、聴覚特性を定量的に把握することが最も重要である旨を強調した。

第2章では、難聴の種類と従来の難聴の補助方式について述べた。特に本章では、本研究の基礎となる聴覚機構とその非線形性について従来の知見を概観し、難聴の補助方式の一つであるデジタル補聴器の現状について述べた。

第3章では、本研究の主たる実験手法であるマスキングについて、その測定方法、現在までに分かっている諸現象について述べ、本研究で対象とする聴覚の非線形性である結合音について従来の知見を概観した。また、さらに聴覚の非線形性を調べるための一つの手段である耳音響放射についても概説した。

第4章では、継続時間長5 msのFM複合音を刺激にした場合の耳音響放射現象を測定し、耳音響放射音を周波数分析した結果、FM複合音聴取時にも結合音が現れることを明らかにした。

第5章では、心理物理的手法であるマスキング実験手法を用い、健聴者についてFM複合音を聴取したときの結合音知覚特性を調べた。まず、倍音構造をもつFM複合音、および持たないFM複合音をマスクする音（マスキング音）に用いたマスキング実験をおこなった。その結果、結合音の一つである差音の周波数のところでマスキング量が増加することから、差音一定のFM複合音を聴取した時も差音を知覚することが推察された。

また、FM複合音の周波数変化速度を変化させた実験から、周波数変化速度が速くなるほど、差音結合音のマスキング量は増加し続けることがわかった。増加が見られる最大の変化速度は音声におけるホルマント遷移速度の上限程度であることから、音声における周波数変化速度であれば十分結合音が増強され得ることを示唆した。

さらに、プローブ音の呈示位置を変えた実験から、マスキング音の周波数が変化するところでマスキング量は大きくなり周波数変化の中央部で最も大きくなること、マスキング量の増加が両側周波数に比べて結合音周波数のところでより大きくなることが分かった。このことから、周波数変化部で結合音が増強される可能性を示し、その生理機序について考察した。

なお、両耳分離マスキング実験から、いずれのマスキング音でもマスキングは現れず、FM複合音における結合音の生成も末梢の機構が関与していると推察した。

第6章では、内耳性難聴者20名を対象とし、健聴者と同様のマスキングによる検査を行った結果を述べている。難聴者の多くで定常複合音およびFM複合音ともに差音結合音の生成が認められず、結合音の生成がある場合でもFM複合音による結合音の増強現象はあまり見られなかった。このことから、健聴者と内耳性難聴者とはFM複合音による結合音の知覚特性に大きな差があることが分かった。

第7章では、少し視点を変えて、音声によるマスキング実験のおこない、複数のホルマントによる結合音の生成する周波数領域でマスキング量が上昇することを見いだしている。また、難聴者において、複数のホルマントで生じると予想される結合音を増強した母音の識別検査を行ったところ、6名中2名で母音明瞭度の改善が、また、1名で低下するという結果が得られた。

第8章では、以上の結果を踏まえて、難聴者による加工音声による明瞭度検査を実施した結果を述べている。音声の差音増強に関係するピッチ周波数変化速度を大きくした加工音声を高年齢の感音性難聴者に聴取させた結果から、音声の識別能が向上することが分かった。また、FM複合音に類似するホルマント遷移部を残すような時間伸張処理を施した音声を聴取させた場合でも、音声の識別能が向上することが分かった。以上から、聴覚非線形特性を考慮した処理によるデジタル補聴器の有用性を確認した。

第9章では、本研究の結論であり、得られた知見と将来の課題および展望を述べた。とくに聴覚非線形性を考慮したデジタル補聴器は内耳障害ばかりでなくより高次の中樞機能の劣化をも補償していることを述べ、将来のデジタル補聴器の研究方法について展望した。

学位論文審査の要旨

主査	教授	伊福部	達
副査	教授	下澤	楯夫
副査	教授	新保	勝
副査	教授	伊達	惇

学位論文題名

「デジタル補聴器のための 聴覚非線形特性に関する研究」

内耳や聴覚神経系に障害をもつ難聴者の多くは、従来の単純に音圧を増強するだけの補聴器では十分な聞き取りの改善が望めない。我が国の難聴者の数は、社会の高齢化にともない急増することは必至であり、真に役に立つ補聴器への期待と要求は極めて大きい。

本研究の目的は、聴覚特性のなかで聴覚非線形性を健聴者と難聴者において調べ、聴覚非線形性の違いを補償するデジタル信号処理機能を持った補聴器を提案し評価することである。

聴覚非線形性によって生じる現象のひとつに「結合音」がある。結合音とは複数の周波数からなる音すなわち複合音を聴取したときに知覚される音である。音声は一種の複合音であり、しかも調波構造やホルマント構造を持っていることから結合音が明瞭に知覚される可能性が高い。

一方、音声は時間的に定常なものでなく、音圧や周波数が絶えず変化するものであることから、複合音が周波数変化するFM複合音でどのような結合音が知覚されているかを調べることはデジタル補聴器を設計する上で極めて重要な課題となる。

本研究では、FM複合音を聴取したときの結合音知覚特性を、心理物理的手法のひとつであるマスキング実験に基づいて調べ、健聴者と難聴者で比較した。さらに、実験結果を踏まえて音声の加工を行い、難聴者における音声の聞き取りがどのように改善されるかを調べている。

本論文の要約を以下に示す。

第1章では、デジタル補聴器の設計に、聴覚特性の把握が必要であることを述べている。

第2章では、本研究の背景、特に、本研究の社会的意義について触れている。また、難聴の分類と聴力検査法について述べている。

第3章では、従来の難聴の補助方式と新たに検討されている補助方式、とくにデジタル補聴器の現状について述べている。

第4章では、本研究の主たる実験手法であるマスキング効果について、その測定方法と現在までに分かっている諸現象について述べている。また、本研究で対象とする結合音について従来の知見を概観している。

第5章では、マスキング実験手法を用いて、健聴者がFM複合音を聴取したときの結合音知覚特性を心理物理的に調べている。まず、倍音構造をもつFM複合音および持たないFM複合音をマスクする音すなわちマスキング音に用い、一方、マスキング音の周波数変化部にマスクされる短音すなわちプローブ音を重畳した。その結果、複合音の差音の周波数領域でプローブ音が大きくマスクされマスキング量が増加した。このことから、FM複合音聴取時にも差音結合音が知覚されることを推察している。

次に、異なる周波数変化速度のFM複合音をマスキング音に用いた結果、周波数変化速度が速いほど、差音結合音のマスキング量が増加することを明らかにした。そして、最大の増加が見られる変化速度は音声におけるホルマント遷移速度の上限程度であったことから、音声にみられる周波数変化速度であれば十分、差音結合音が増強され得ることを推察している。

また、プローブ音の呈示時刻を変えた実験から、複合音の周波数が変化するところでマスキング量は大きくなり周波数変化の中央部で最も大きくなること、マスキング量の増加が両側周波数に比べて結合音周波数のところでより大きくなることを明らかにしている。

さらに、左耳にマスカーを右耳にプローブ音を聴取させた実験から、差音結合音周波数でマスキング量の上昇は現れなかった。このことからFM複合音による結合音は聴覚系の末梢が関与していると推察している。

第6章では、内耳性難聴者20名22耳を対象に、健聴者と同様のマスキング検査を行っている。その結果、15耳で定常複合音およびFM複合音ともに差音結合音の知覚が認められなかった。また、差音結合音の知覚がある場合でも複合音の周波数変化部における結合音の増強現象はあまり見られなかった。このことから難聴者においては健聴者と異なる聴覚非線形性を有していることを明らかにした。

第7章では、少し視点を変えて、音声をマスカーに用いて高次ホルマントにより低域に結合音が生じられるのかを調べている。その結果、ホルマント周波数から計算される結合音周波数領域でマスキング量が上昇した。そこで、難聴者を対象に、ホルマント周波数から計算される結合音を増強する処理を行った加工母音の識別検査を行ったところ、6名中2名で母音明瞭度の改善が見られた。個人差はあるものの、結合音の増強が聞き取り改善に結びつく難聴者がいることを明らかにしている。

第8章では、5章、6章の結果を元に、差音結合音も関与する音声ピッチに着目し、内耳性難聴者のピッチ周波数変化の識別能力を調べた結果、6章における予想通りピッチ周波数変化の識別能力が劣化することを確認した。そこで、ピッチ周波数変化速度を大きくする処理を行うデジタル補聴器を提案し、実際に処理をソフト的に行った加工母音を内耳性難聴者に聴取させた結果、母音識別率が7耳中全耳で改善されたことを報告している。

第9章では、本研究の結論と、将来の課題および展望を述べている。

以上のように著者は、聴覚非線形性について心理物理学的な立場からその詳細を明らかにし、聴覚の非線形性を考慮したデジタル補聴器の設計に有用な知見を得たことから、生体工学とくに福祉工学の進歩に寄与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。