

氏名（本籍）	<small>むらかみ やすき</small> 村上 泰樹（山口県）
学位の種類	博士（情報科学）
学位記番号	甲第117号
学位授与年月日	平成27年9月25日
学位授与の要件	広島市立大学大学院学則第36条第2項及び広島市立大学学位規程第3条第2項の規定による
学位論文題目	Theory of nonlinearities in cochlear mechanics 計算モデルに基づく蝸牛非線形現象の解明
論文審査委員	主査 教授 石光俊介 副査 教授 小林康秀 副査 教授 岩城敏 副査 学外審査委員 赤木正人

論文内容の要旨

音響システムでは周波数分析は中核となる技術となる。我々の聴覚も音響システムとみなすことが出来る。本論文では、我々の聴覚ではどのような聴覚の戦略で周波数分析が行われているのか明らかにすることを目標とする。

音を聴くことを我々は普段意識することなく行っているが、そのシステムは複雑な構成をしている。システムを研究する際には、研究手法はボトムアップアプローチとトップダウンアプローチに二つに大別され、この2つのアプローチは相補的な関係にある。聴覚を研究する際にはボトムアップアプローチでは生理学的に聴覚システムをサブシステムへと分解してサブシステム間の作用と機能について検討することで、聴覚システム全体の機能について検討する。一方で、トップダウンアプローチでは心理学的あるいは脳科学的に聴覚システムの入出力関係に着目する。

まず、ボトムアップアプローチとして聴覚のどこに周波数分析機能を実現する器官が存在するのかが問題となる。それについては、聴覚の周波数分析機能は聴覚末梢系にある蝸牛の機械的な応答に由来していることが明らかとなっている。蝸牛は中に液体が満たされた管状の構造をしている。音波が蝸牛へ入力されると管の中を音波が伝播し、蝸牛内の基底膜が音波の周波数に依存して共振を起こす。そのため、音波は基底膜の共振パターンに応じて周波数ごとに分解される。そして、基底膜上には機械的な振動を神経情報へと変換する感覚細胞が存在するため、基底膜の振動は神経情報へと変換される。しかし、蝸牛内部の基底膜の共振は非線形である。そのため、重ね合わせの原理を適用することができないため、任意の自然音を単純な要素に分解して、その出力を重ね合わせることで所望の出力を得ることが出来ない。しかし、現在、蝸牛の応答は空間的に限られた範囲でしか計測することが出来ない。そのために任意の自然音に対する蝸牛の応答パターンは分からない。

次に、トップダウンアプローチに音響心理実験を用いた手法がある。この手法では、音

響刺激と心理的感覚の対応関係を測定する。そして、音響心理実験を通じて、聴覚の周波数分析機能については、帯域通過フィルタ群であることが明らかとなった。そして、個々の帯域通過フィルタの形状を測定するためには、我々の聴覚は非線形であるので、例えば自然音に対する帯域通過フィルタの形状を計測するためには刺激として自然音を用いなければならない。しかし、自然音を用いて帯域通過フィルタの形状を推定することは出来ず、ある特定の周波数パターンをもつ人工的な音響刺激を用いなければ、帯域通過フィルタの形状を推定することにならない。そのため、推定された帯域通過フィルタが聴覚の周波数分解能を再現しているのかどうかは分からない。

ボトムアップアプローチとトップダウンアプローチは実験的手法である。それらが困難な場合、モデルを用いた手法が有効となる。まず、ボトムアップ的な知見すなわち生理学的知見から蝸牛のモデルは伝送線路モデルとして提案されている。このモデルでは、液体が満ちた管を音波が伝わることで内部にある基底膜が振動する様子を力学的に記述している。このモデルでは基底膜上にある外有毛細胞と呼ばれる感覚細胞が基底膜の振動に反応して、細胞が機械的な運動を起こし、基底膜へ力を与える。この一連のフィードバック系の影響で生理学的実験から得られている基底膜の鋭い共振特性と非線形な特性を示す。一方、トップダウン的な知見すなわち心理学的な知見から聴覚の周波数分解能力は帯域通過フィルタ群としてモデル化されている。それぞれの帯域通過フィルタの形状は入力レベル依存性を示し、入力信号はべき乗則に従い圧縮される。この処理はフィードフォワード系として表現される。ここで、ボトムアップアプローチから導出された伝送線路モデルでは外有毛細胞を含むフィードバック系が生理学的実験から得られている周波数分解能力を説明しようとしているのに対して、トップダウンアプローチではフィードフォワード系が心理学的実験から得られている周波数分解能力を説明しようとしている。

本論文では、これまで述べた生理学的実験と心理学的実験の両方で明らかとなっている聴覚の周波数分解能力に関する知見の不一致に着目し、計算モデルを用いて蝸牛で起こる非線形現象のメカニズムを明らかにすることを目的とする。代表的な蝸牛の非線形現象として圧縮特性と二音抑圧、結合が挙げられるため、この3つの非線形現象の解明を行った。そして、次の4つの計算モデルを提案した。外有毛細胞モデルを含んだ伝送線路モデルと生理学的実験から得られている外有毛細胞の飽和特性に着目した飽和型フィードフォワードモデルと蝸牛の情報処理過程を模擬した飽和型フィードバックモデル、心理学的実験から得られている圧縮特性を模擬したべき乗則モデルである。

まず、聴覚の入出力特性は中程度の入力レベルで入出力特性の傾きが圧縮的になり、低いあるいは高い入力レベルで線形な特性になる。提案した4つのモデルの入出力特性を求めた結果、伝送線路モデルは生理実験と同様な入出力特性が得られた。飽和型フィードフォワードモデルは低い入力レベルでは線形な特性を示したが中程度以上の入力レベルでは完全飽和を示した。飽和型フィードバックモデルは生理実験と同様な入出力特性を得ることが出来た。べき乗則モデルはパラメータの値に依存して入出力特性の傾きが変化するため、適切なパラメータの値を設定することで中程度の入力レベルで得られる圧縮的な特性が得られた。

次に、二音抑圧は二つの純音を入力した際に一方の応答が他方の存在によって減少する

現象である。この二音抑圧を説明するために差分ベクトル法と呼ばれる蝸牛の応答の表現法を提案した。差分ベクトルを求めた結果、提案モデルは共に大きなレベルの純音が小さなレベルの純音を抑圧することを示した。生理学的知見から得られている伝送線路モデルから得られた差分ベクトル群のパターンと最も近いパターンは飽和型フィードバックモデルであった。

結合音は二つの純音を入力した際に、与えていない周波数の応答が観測される現象である。結合音の振幅は2つの入力のレベルに依存した特有のパターンを出力する。このパターンは、(1) 2つの入力レベルが近いとき結合音の振幅は極大となり、(2) 2つの入力レベルが離れると結合音の振幅は小さくなる傾向を示す。シミュレーションを通じて、手印モデルもこのパターンを再現した。生理学的知見から得られている伝送線路モデルから得られた差分ベクトル群のパターンと最も近いパターンは飽和型フィードバックモデルと適切なパラメータの値を設定したべき乗則モデルであった。

以上の結果より、(1) 外有毛細胞の入出力特性を模擬した飽和型フィードフォワードモデルより、外有毛細胞の入出力特性を含む蝸牛の情報処理過程に着目した飽和型フィードフォワードモデルが蝸牛の非線形現象を説明に適していること、(2) べき乗則モデルは中程度の入力レベルであれば、蝸牛の非線形現象を説明可能であることが明らかとなった。

先に述べた通り、生理学的知見では外有毛細胞の飽和特性が蝸牛の非線形情報処理に大きな影響を与えていると議論がなされている。本論文ではさらに踏み込んで外有毛細胞の飽和特性を含んだ蝸牛の全体的な情報処理過程を表現する飽和フィードバックが重要な役割を果たすことを提案する。また、心理学的実験から聴覚の周波数分析にべき乗則モデルが重要であるという点に対し、飽和型フィードバックモデルとべき乗則モデルが同様な応答特性が得られることは、我々の聴覚系は周波数分析を飽和フィードバックに基づいて行っていることが示唆される。

我々は聴く音の素性や周辺環境を特別に意識することはない。そのため、我々の聴覚は音の素性や周辺環境の学習を必要としないシステムであるといえる。現在、音響システムに用いられる周波数分析技術は音の素性や周辺環境の学習を必要とする技術である。そのため、分析する音の素性や周辺環境が不明な場合、分析に必要なパラメータの値を設定するために多くの困難をともなう。そのため、聴覚のもつ頑健な周波数分析システムを規範とする周波数分析技術が実現されることが期待されている。本論文では、周波数分析の非線形性に着目をした。システムの複雑さから、その非線形性もまた複雑な情報処理過程を通じて得られていると考えられることが多い。しかし、本論文の結果はその逆であり非常に簡素な情報処理過程が非線形性を生み出すことを示した。このことは聴覚を規範とした周波数分析システムもまた簡素な情報処理システムとして構築できることを示唆する。

論文審査の結果の要旨

論文において提案された非線形モデルは蝸牛の非線形現象をよく表現しており、聴覚末

梢系の研究や聴覚機能の診断などの多くの応用分野に貢献できるものと考えられる。手法の斬新さとその応用の有用性から優れた論文と判断できる。以上により博士論文としては十分な内容であると判断された。本論文の主な成果はAcoustical Science and Technology, ICIC Express Lettersの2件の論文および著書「Concepts and Challenges in the biophysics of Hearing」に発表した他、査読付き国際会議7件などにも公表済みである。以上により審査委員会は論文審査を合格とした。また、論文発表後の質疑応答および審査委員会による基礎知識に関する試問を行った結果、各質問に対して申請者からの確かつ明快な回答がなされた。また、英語で記述した論文を公表するとともに、国際会議においても多くの発表実績もあり、高い水準の外国語能力を有していると判断できる。以上、論文発表および試問の結果を総合判断し、申請者は博士（情報科学）の学位を取得するに値する十分な専門知識と資格を有していると認め、審査委員会は試験・試問の結果を合格と判断した。