

本論文で報告されている本條氏の研究は、非線形物理学の観点から下方倍音知覚の機構が説明できることを示す研究で、当該研究分野に重要な貢献をなす研究成果である。

本論文は6章からなり、第1章では下方倍音知覚を中心とした音高知覚研究の歴史の総説、第2章では後の章の議論で必要となる聴覚系の生理学の基礎知識と用語を整理した解説、第3章では先行する数理モデル研究の検討、第4章では新しい数理モデルの提案を導く考察、第5章では本論文の中核となる新しい数理モデルの提案と解析、第6章では前章の成果を類似する問題群の中の別の問題に適用した応用例、第7章では物理学の視点からの聴覚研究の他分野への波及効果に関する著者の見解が示されている。

人間の聴覚は、正弦波のように単一の周波数成分からなる純音に対しては正しく音高を知覚するが、基本周波数は定まってはいるが複数の周波数成分からなる複合音を聴いたとき、音波中には実際には含まれない、基本周波数の $1/2$, $1/3$, $1/4$ など整数分の一の周波数の音、すなわち下方倍音が知覚される。

聴覚心理学の分野において下方倍音に関する様々な実験がなされ、純音のみを聴かせる場合、複合音を聴かせる場合、雑音のある環境下で聴かせる場合、など異なる条件下で、下方倍音を感知せずに正しい音程が感知される「分析モード」と下方倍音が感知される「合成モード」が存在することが明らかにされている。また、有理数比でない周波数比を持つ二つの音からなる複合音を聞かせる実験で、要素となっている二つの音の周波数を同量増減させたときに、感知される下方倍音の周波数の増減に対して法則性「ピッチシフト」が存在することが知られている。

Cartwright らは物理学の観点から、ピッチシフトが力学的共鳴で説明できることを指摘した。聴覚系を非線形自励振動子と考え、二つの入力音と聴覚系自体の固有周波数が3周波数共鳴を起こすとするとピッチシフトが説明できる。しかし、Cartwright らの研究では、共鳴条件すなわち周波数比が有理数比になるという条件のみに着目し、共鳴現象の動力学に踏み込んだ議論をするには至っていなかった。

本條氏は、共鳴現象と、その一般化である周波数ロッキングの動力学に着目し、聴覚系の応答を模倣する非線形振動子の具体的なモデルを提案した。最初に、下方倍音が感知される合成モードにおいて聴覚系の振舞を模倣するモデルについて考察し、パワースペクトルに多数の高調波を持つ非線形振動子である必要性を指摘した。すなわち、外力に対して、振動子自体の固有自励振動の高調波で周波数ロッキングし、外力の周波数の整数分の一の周波数で振動する状態が下方倍音の感知に対応する。具体的に、Van der Pol 方程式に従う非線形振動子で奇数次の下方倍音に対応する周波

数ロッキングが見られることを数値実験により示した。そして、Van der Pol 方程式に修正を加えることで奇数次だけでなく偶数次の下方倍音にも対応する周波数ロッキングを起こすモデルを考案した。更に、神経細胞の力学モデルとして知られる FitzHugh-Nagumo モデルが、上述の修正された Van der Pol 方程式と数理的に同等の性質を持ち、下方倍音知覚のモデルとして適することを示した。

本條氏は更に、下方倍音を感知する合成モードと感知しない分析モードの二つの状態を表現できるモデルを提案した。この点が本條氏の研究の最も重要な寄与である。FitzHugh-Nagumo モデルの非線形性の強さを表す定数を変数とみなす拡張を行い、これによりパラメータ選択によって高調波での周波数ロッキングを起こしたり消失させたりできることを示した。すなわち、この拡張された FitzHugh-Nagumo モデルでは、パラメータ値によって下方倍音知覚の合成モードと分析モードの切り替えができる。パラメータ空間のどの領域が合成／分析モードの境界であるかを数値実験によって解析し、追加した変数の振舞により高調波での周波数ロッキングが消失する動力学について考察した。外力の入力により、振動変数の振動が励起されると、振動の非線形性が低減される効果が十分働くような設定で、高調波での周波数ロッキングが消失するという機構が明らかにされた。

上述の拡張された FitzHugh-Nagumo モデルは聴覚神経系の応答を表現するモデルであるが、聴覚系の有毛細胞の自励振動についても、同様に高調波の周波数ロッキングの有無の切り替え機能を持つ非線形振動子モデルが構築可能であることを示した。

本條氏の研究は、聴覚の物理学という分野で、次のような点で重要な寄与をしたと考えられる。聴覚の研究に物理学が重要な視点を提供し得ることは Cartwright らの周波数共鳴の研究により示されていたが、彼らの研究は共鳴現象の物理に踏み込んでいなかった。本條氏は具体的な非線形振動子のモデルを構築することで、下方倍音知覚のより多くの実験事実が、非線形振動系の振舞と極めて良い平行性を持ち、非線形力学の概念で説明できることを示した。特に、下方倍音知覚の合成モードと分析モードの切り替えを表現する動力学モデルを考案したことは非常に独創的な研究成果である。また、そのモデルが神経細胞のよく知られたモデルの拡張によって得られていることから、本條氏の研究は、実際の細胞内の物理的非線形現象にもとづいて聴覚のメカニズムを解明する研究の戸口を開くことに貢献していると云える。

したがって、本審査委員会は博士（学術）の学位を授与するにふさわしいものと認定する