

位相振動子モデルを用いたオルガンパイプの周波数 引き込み現象に関する研究

岡田, 昌大

<https://hdl.handle.net/2324/2236238>

出版情報 : Kyushu University, 2018, 博士 (芸術工学), 課程博士
バージョン :
権利関係 :

氏 名 : 岡田 昌大

論 文 名 : 位相振動子モデルを用いたオルガンパイプの周波数引き込み現象に関する研究

区 分 : 甲

論 文 内 容 の 要 旨

パイプオルガンはその起源を紀元前2世紀までさかのぼることができ、長い歴史の中で洗練されてきた楽器である。一人オーケストラとも呼ばれるこの楽器は、非常に多くのパイプ（オルガンパイプ）から構成され、その数は大きなものだと1万を超える。そして、演奏される際にはその中の複数のパイプが同時に鳴り、倍音を重ね合うことで様々な音色を生み出す。オルガンパイプの大多数は、フルーパイプと呼ばれるエアリードを音源とするものである。その音は流体现象と音響現象が相互に絡み合って発生するため、詳細な発音メカニズムは未だわかっていない。

オルガンパイプは非常に複雑な発音機構を有するが、その力学的詳細に立ち入らず、マクロな視点で見たとき、オルガンパイプは直流である空気流を交流である音に変換する自励振動系としてとらえることができる。理論上、自励振動系は周波数引き込み現象を示すことが知られているが、現実のオルガンパイプもこの現象を示すことが発見されている。この事実は、流体现象と関係する複雑な音現象を自励振動系とみなせる可能性を示唆している。

一方、位相振動子モデルは、自励振動系を説明する代表的な数理モデル（微分方程式）であり、特に周波数引き込み現象を説明することに長けたものである。位相振動子モデルの利点には、自励振動系がどのような微分方程式で記述されようとも必ず同じ形に変形（変数変換）できるという点がある。つまり、位相振動子モデルは、「対象とする自励振動系がどのような周波数引き込み現象を示すのか」に焦点を当てた際の解析の基本形と言えるモデルである。この基本形としての性質を利用すれば、詳細なメカニズムが不明であるオルガンパイプにもアプローチできる可能性がある。

詳細なメカニズムが不明かつ位相振動子モデルが有効である例として、生物の概日リズムが挙げられる。概日リズムにおいては、外界からの周期的な光刺激（太陽光）が生物リズムの周期を引き込む。この現象を解析するために、位相振動子モデルを用いて、実際の生物から位相感受関数を測定することが試みられている。位相感受関数とは、「外界から受ける刺激に対してどの程度周波数引き込み現象を生じやすいか」を表すものである。実際の生物から位相感受関数を測定することによって、その生物が持つ概日リズムを特徴付けることが可能となる。

以上を踏まえ、本研究では、詳細な機構が不明であるオルガンパイプに対して位相振動子モデルの適用を試みた。具体的には、生物学への応用例と同じように、位相感受関数の測定（逆推定）を行った。そして、位相振動子モデルが音響学においてどの程度有効であるかを議論した。

まず、位相感受関数の測定に先立って、現実のオルガンパイプが位相振動子モデルに従うかを検証した（第2章）。そのために、自励発振するオルガンパイプに外から正弦波や複合音を与える実験を行った。その結果、外力の周波数成分がパイプ音の周波数成分に近接する際に、周波数引き込み現象が起ることを確認した。これは、位相振動子モデルの理論から予測された結果そのものであったため、オルガンパイプが位相振動子モデルに従うことを示せたと言える。

次の第3章では、第2章で得られた正弦波外力による周波数引き込み現象の観測結果から、位相感受関数を構築した。また、パイプ音の倍音周波数と引き込みの生じやすさとの関係から、推定された位相感受関数にはパイプ上部の共鳴管の特性が反映されていることを考察した。

本研究は、実物のオルガンパイプを用いた測定であるがゆえ、真の位相感受関数（正解値）はわからない。そこで続く第4章では、外力としてパルスやホワイトノイズを採用し、位相感受関数の再測定を行った。結果として、第3章で考察したパイプの共鳴特性がパルスを用いた計測結果にも現れていたことを確認できた。しかし、測定結果そのものは精度の高いものではなく、位相感受関数の正確な値や関数の形などは得ることができなかった。なお、ノイズを外力として用いた場合には、パイプを十分に加振できないという理由から適切に計測ができなかった。

最後に、第5章において、位相感受関数が得られた場合の応用例として、2本のオルガンパイプ対の組み合わせ評価に関する理論的枠組みを導入した。位相振動子モデルの理論を整理することで、パイプ間の相互作用の強さに非対称性がある際に、同じ音高のパイプ対よりも、1オクターブの関係にあるパイプ対の方が調律は行いやすいということを示すことができた。加えて、位相感受関数が不明である状況を想定し、パイプ音の波形情報のみを用いた組み合わせ最適化も行ったが、この場合も、同じ音高のパイプ対が最も周波数引き込み現象を引き起こしやすく、調律は行いにくいことがわかった。以上の結果は、実際の調律時におけるパイプ対の組み合わせとも矛盾がないものであった。

以上より、位相振動子モデルは、音現象に対してもその説明力は高いことがわかった。しかしながら、「パルスやノイズを使って簡単に位相感受関数を推定する」といったような工学的な応用を考えると、現段階では課題が残ることもわかった。