



Title	工学的手法による肺呼吸システムの解明
Author(s)	和田, 成生
Citation	大阪大学, 1991, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.11501/3054377
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

氏名・(本籍)	和 田 成 生
学位の種類	工 学 博 士
学位記番号	第 9762 号
学位授与の日付	平成 3 年 3 月 26 日
学位授与の要件	基礎工学研究科 物理系専攻 学位規則第 5 条第 1 項該当
学位論文題目	工学的手法による肺呼吸システムの解明
論文審査委員	(主査) 教授 小坂田宏造 (副査) 教授 福岡 秀和 教授 角谷 典彦 教授 吉川 孝雄

論文内容の要旨

生体現象の力学的構造を工学的に理解し、医療分野を支援することを目的とするバイオメカニクスの立場から、生命維持に最も重要な機能の一つである肺呼吸システムの解明を試みた。伝統的な分析的手法のみでは解明していくことが困難な肺呼吸の複雑システムに対して、限られた実験的情報を有効に利用し、推論機能を働かせて帰納的に対象を明らかにしていくシミュレーションによるアプローチを展開した。

まず、肺呼吸システムを流れ、変形、輸送、拡散などの力学問題として孤立化し、それぞれの現象を直接的に数理モデルで表現する肺呼吸モデルを構築した。生体内での特性が明らかにされていない肺胞表面張力に関しては、肺呼吸のシミュレーションによる総合的立場から帰納的にそれを評価することを目的として、生体外での測定結果に仮説を加えた表面張力モデルを提案した。これらの分布定数形で表された肺呼吸モデルの離散化解法として、随伴変分原理に基づく有限要素法について説明した。

つぎに、構築した数理モデルに基づくシミュレーションをいくつかの問題に適用し、それを通じて肺呼吸システムの解明を試みた。

まず、肺呼吸システムを構成する個々の力学因子を統合し、モデルに含まれるパラメタを設定して系の応答を調べる順問題的アプローチを示した。これまでに報告されている正常肺を表す物性値を用いた通常呼吸のシミュレーションからは、実測される外的な呼吸諸量に近い値が得られ、システムの力学的構造を考慮して、内面的な個々の要因から構成された肺呼吸モデルの妥当性の一端が示された。また、実際には測定が困難な内面的な呼吸状態が、シミュレーションを通じて表されることを示すとともに、各要因の特性を表すパラメタを操作することにより、それが肺呼吸システム全体の特性に与える影響を

評価した。

つぎに、家兎の摘出肺の圧力-体積関係とその肺組織片の弾性特性とを測定し、それらの実験結果とシミュレーションから、肺呼吸モデルに含まれる未知要因に対するパラメタを同定する逆問題的アプローチを示した。個体別に同定されたパラメタを用いたシミュレーションは、個々の試料（個体）の全体的な力学特性を良く表しており、個体差の問題を含めて、肺胞表面張力のように肺内では直接的に測定することが困難な要因の特性が推定され、系全体の動力学特性が肺呼吸モデルに基づくシミュレーションにより明らかにされていくことを示した。

肺呼吸に対するバイオメカニクス的考察を実際の臨床分野に応用していく一つの試みとして、人工呼吸時の換気条件の設定問題について検討した。人工呼吸を想定したシミュレーションを通じて、正常に換気を維持するために必要な換気条件を求ることにより、低い圧力で好適に換気が実現される換気条件について検討した。さらに、肺に関する力学現象を対象としてきた肺呼吸モデルに、体循環におけるガス貯蔵を考慮したモデルを連成させた、より包括的な呼吸現象を表すモデル化とそれに基づくシミュレーションについても検討した。

以上、構築した肺呼吸モデルに基づくシミュレーションを通じて、直接的な測定が困難な肺内での現象や個体差の問題を含めて、非線形の力学現象が多数連成する肺呼吸の複雑システムの力学特性を明らかにするとともに、個々の要因の相互作用のもとで発揮される肺呼吸機能を内面的な物理量を介して評価していくうえで、数理モデルに基づくシミュレーションによるアプローチが有効であることを示した。

論文審査の結果の要旨

肺呼吸システムは多数の力学現象が連成した複雑システムであり、従来の研究では単一の現象あるいは一部の連成現象のみに対象が限られていたが、本論文では、肺呼吸システム全体としての機能、特性の理解を目的とし、気道系内の気体の流れを中心とする動力学問題、ガス輸送と換気を中心とする換気問題、肺および体循環に関する血液循環問題等を総合的に取り扱っている。具体的には、個々の力学要因を支配する力学モデルを構成し、それを肺呼吸システムの形態的、力学的階層構造にしたがって組み上げ、全体的な数理モデルを提案している。肺胞に作用する表面張力は肺サーファクタントのはたらきにより特徴的なふるまいを示すが、この問題について体外実験との比較などから独創的な増分形表現方法を提案、検討している。

以上のモデル構築の研究に続いて、提案した数理モデルによるシミュレーションに基づき、実際の肺呼吸システムの特性について検討している。まず、正常肺の通常呼吸のシミュレーションにより提案したモデルの検証を行うとともに、個々の力学特性値が呼吸機能に及ぼす影響について、病的な肺の場合も含めて定量的に検討を加えている。これにより、直接観察のできないシステムの内面的な要因の特性を推察することを可能にした。次に、家兎の摘出肺を用いた外面上に観察可能な特性実験および体外状態での力学要因の特性実験の結果を、数理モデルに基づくシミュレーションと組合せ、個々の試料すな

わち個体別のモデルパラメータの同定を試みている。また、人工呼吸における好適換気条件について検討を行い、医療の現場で経験的に摸索されていた問題への力学理論の面からの支援の可能性を示している。

以上のように、本論文は肺呼吸システムを構成する個々の力学要因についての分析的研究を基礎に、それらが階層的に連成する肺呼吸システムとしての特性理解を目指し、力学理論に基づく数理モデルとシミュレーションによる視点を提案し、その展開の端緒を開いたものである。これは生体力学の分野にモデル駆動形の新たな工学的接近法をもたらしたもので、その学問的貢献は大きく、工学博士の学位論文として価値あるものと認める。