

—人工呼吸制御への非線形制御理論の応用を通して—

○ 若松秀俊 (東京医科歯科大学 医用器材研究所)

1. はじめに

生体における諸現象は、その時点での状態と、それ以後の操作の如何によっては、全く異なる挙動を呈するような「非線形現象」であることが少なくない。しかも、それらは複数の現象が相互に関連し、影響し合って顕われる場合が普通である。それゆえに、システムの関連を明らかにしながら、総合的に把握しない限り、条件が変化する全体の中の一つの現象の挙動としての動的特性の理解が極めて困難である。以下では、システムの思考により、生体に関する現象を数学モデルとして記述し、システムダイナミクスの予測とそれへの介入を行い、生体のもつシステムの意味や構造の理解を試みる。具体的には、人工呼吸制御を扱い、これを通して、健康管理における制御理論の必要性和有効性について述べる。

2. 生体現象のシステム論的扱い

病学的検査データの処理と解釈、診断、および医療における総合判定、医療機器の使用、投薬のような臨床上の処置などの患者に対する「操作」や健康管理のための諸活動は制御対象を生体とする広い意味でのシステム制御と考えられる。例えば、医療上の制御は専門家の深い洞察力〔システム同定〕によって、頭の中に描かれた臨床上の現象に関する患者〔制御対象〕の全体像〔システムモデル〕の違いと現時点における生理状態(病態)〔状態変数の初期値〕の違いに応じて、これから辿るであろう異なった生理状態の軌跡〔システムの動特性〕を予測しながら、すなわち、治療効果などを予想しながら、行われるのが普通である。ところで、この場合に、生体の非線形特性のために、治療開始時の状態〔初期状態〕によっては、将来どの方向に病状が進行、あるいは回復するのか〔非線形写像の初期値依存性による状態変数のとり得る軌道の違い〕が個々の患者によって異なる〔非線形系の構造が同一でもそれを特徴づけるパラメータが異なる〕し、またそれを操作する方法〔制御法則〕によっても変ってくる。したがって、一般に、こうした状態の軌跡を描くような生体の生理学的現象のダイナミクスの適切な変更を行うことは、専門家以外の者にとっては、極めて困難である。しかるに、健康管理のように、専門家の手を経ないで、どんなひとにでも行い得ることを目的とする場合には、その法則を見いだし、客観的操作方法を確立することが必要である。ところで、近年理論的に大きな進歩をみた、生物の適応能力をシステム制御にとりいれた適応制御理論では、システムの特性が変化しても制御系全体の特性を与えられた規範モデルの特性に適応的に合わせる方法を明らかにしている。したがって、健康で望ましい状態を、追及すべき規範モデルの特性と考えるならば、生体特有の個体による、また老化など経時変化によるパラメータの違いに起因する健康状態の劣化についても、自動的に制御系を修正設計しながら、対応できることになり、この理論が健康維持のためになすべきことの裏付けを側面から与え得るものと思われる。

3. システム制御工学の応用による生体機能の制御の試み
適応制御の考え方にたつて、目的に応じた生体サブシステムの制御が原理的に可能であることを、人工呼吸制御による血中炭酸ガス濃度の制御を例にとりて説明し、これが自らの健康状態を管理する考え方に連なることを示す。ところで、生体サブシステムをまとめた機能として扱う場合には、①一般に、それが非線形系であり、これを記述する適当な数学モデルがないこと、②生体の状態を乱さないで、制御に必要な情報を計測する技術が不完全なこと、③どのような制御方式が生体に適しているのか生体側から明確な制御要請条件が与えられないことが挙げられる。そのために、個々の機器の制御、機能代行における制御工学の応用を除けば、医学においては、システムの概念とその手法が適用された例は少ないようである。

<呼吸器系のモデル化>これまでに行われてきた人工呼吸制御の大部分は、呼吸器系(生体サブシステム)の線形近似モデルを基にした制御方式によるものであり、適切な非線形モデルが使われていない。ここでは、呼吸器系を表わす非線形数学モデルとして、線形系を含む広範囲な非線形系の入出力関係を一般的に表現できるボルテラ級数を用いることにする。この際、我々の認識には、おのずと限界があり、制御対象について得られる知識が完全なものではなく、部分的なものであるとする。

<制御の方法>部分的な知識を基にして表現した呼吸器系に関して、内部状態に立ち入らずに、入出力情報だけを用いて、パラメータ変化に対して、適応的に対応できる人工呼吸制御系を設計する。それによって、代謝量の変動があっても、医学的要請条件に従って、肺胞炭酸ガス濃度が目標値に追従できるような制御が可能になる。

<健康問題への概念の適用>制御対象の不完全な知識のみを基にした適応的な非線形制御系の設計方法は、明確な記述が困難で、経時変化する健康に関する諸現象を制御量とするとき、規範モデルを与えた望まし状態に追従させるような操作を行うことを可能にする。すなわち、健康状態の制御にその概念が基本的に適用できる。

4. おわりに

本研究では、肺胞炭酸ガス濃度の制御を例にとり、健康を自己管理すること、すなわち個別的な生体の機能制御が生体の適応能力に立脚した制御方法によって、原理的に可能であることを述べた。この考え方は、生体現象のように非線形現象であって、しかもその特性を特徴づけるパラメータの個体差や経時変化のために、正確な挙動を把握することが困難である場合のシステム制御に適しており、こうした現象の集合ともいべき健康という状態の維持を図るために必要とされる操作が如何にあるべきかを示唆してくれるものと思われる。

文献

1) Wakamatsu et al.: Proc. IFAC 9th World Congr., 3045/3050 (1984).