

## 論文の要旨

題目 A Study on Automatic Control Methods in the Operation of the  
Cardiopulmonary Bypass System  
(人工心肺システム操作における自動制御法に関する研究)

氏名 高橋 秀暢

Cardiopulmonary bypass (CPB) 装置とは、心臓手術を行う際に人工的に心臓機能と肺機能を代行する装置である。John H. Gibbon, Jr.により最初に CPB 装置が開発され、その後、ほとんど完全なシステムとして今も CPB 装置は臨床で使われている。また、システムに付属するデバイスは安全を配慮するために改良が繰り返されている。

CPB 操作の中でも血液流量制御は、脱血と送血回路の一部を圧迫するオクルーダを開閉することにより血液回路を流れる血流量を制御するだけでなく、リザーバに流出入する血液量を調整してリザーバレベルを一定に保つ必要がある。なぜなら、リザーバレベルは患者の心臓や肺の血液量に相当するため、不適切なリザーバレベル操作は意図しない患者の血圧変動を招いてしまう。さらには空気塞栓につながる危険性もあり、血圧変動とともに患者に重篤な障害をもたらす可能性がある。このように血液流量制御の操作は灌流医に大きな精神的負担がかかる。なぜならば、灌流医は流量を変更または調整するために脱血側オクルーダ、送血側オクルーダ、遠心ポンプという3つの機器を繊細に操作し、目標の血液流量に調整しながら同時にリザーバレベルを一定に保持する必要があるからである。

そこで、これまでに血液流量制御操作を自動化するための多くの研究が行われてきた。しかし、どの従来法にもリザーバレベルを制御する機能は実装されておらず、リザーバレベルを一定に保つことはできなかった。したがって、臨床で経験するベントや後負荷の変化に対して脆弱で、これらの外乱によってリザーバレベルが大きく変動してしまうという問題があった。

そこで本研究では、手動操作された脱血流量に基づいて送血流量を自動制御する2自由度モデルマッチング制御系と、同時にリザーバレベルを一定に保持可能な新たなフィードバック制御系を提案する。以下に本論文の概要を示す。

第1章では、本研究の背景と目的について述べた後、従来研究と本研究の位置付けを明確にする。

第2章では、人工心肺装置の自動制御を実現するため、灌流を調整するオクルーダ操作に伴う圧流量特性の定常非線形モデルを新たに考案した。ニュートン流体であるグリセリン溶液と非ニュートン流体である赤血球混濁溶液を用いて、各3段階の粘度レベル

のサンプルを準備し、オクルーダ開度によって調整される圧流量特性を実験的に解析しモデル化するとともに、流体の可視化を行った、実験結果より、提案モデルは静脈および動脈ライン側の灌流実験データによく適合した（静脈ライン側  $R^2 = 0.996$ 、動脈ライン側  $R^2 = 0.985$ 、いずれも  $p < 0.01$ ）。さらに、Leave-one-out 交差検証と Bland-Altman 分析により、提案モデルは最小限の比例誤差とバイアス誤差で正確に流量を予測できることが確認された。

第3章では、心肺バイパス中の動脈ライン側血流量に対する自動制御系を新たに提案した。このシステムでは、手動で調整された脱血側血液流量を目標値として、送血側血液流量を自動制御可能である。動脈ライン側血流量の自動制御システムは第2章で得られた定常非線形モデルからフィードフォワード制御系を設計し、フィードバック制御系を組み合わせた2つの制御系で構成される。シミュレーションでは、フィードフォワード制御とフィードバック制御を併用した制御系と、フィードバック制御系のみでの制御結果を比較し、提案法の有効性を検証した。その結果、提案する制御系は、定常非線形モデルのパラメータ誤差に対して安定して血液流量制御できることが明らかになった。次に、この制御系を CPB システムに実装し、手動調整の脱血側血液流量に基づいた送血側血液流量の自動制御実験を行った。実験の結果、送血側血液流量は、手動操作の脱血側血液流量によく追従することを確認した。

第4章では、リザーバレベルと血液流量を同時に制御可能な自動制御システムを提案する。血液流量制御系はフィードフォワード制御とフィードバック制御を用いた2自由度モデルマッチング制御手法に基づいて設計し、リザーバレベル制御器は I-PD フィードバック制御に基づいて設計した。心肺バイパス開始と離脱を模擬した実験を行った結果、動脈血流量は手動調整した静脈血液流量に 7.57%以下の誤差で追従し、リザーバレベルは 4.89%以下の誤差で一定に維持されることが確認された。次に、術野からのベント／吸引と患者の後負荷変動による外乱を模擬した実験を行った結果、提案法の制御精度は後負荷の変動にほとんど影響されないこと、ベント／吸引による外乱は血液流量の制御精度をやや悪化させる（3.26%以下の誤差）がリザーバレベルの誤差は 2.22%以下に維持できることが明らかになった。

第5章では、総括および今後の研究への発展を述べる。