

## 審査の結果の要旨

氏名 張 浩

本論文は、「Development of computational method for investigation of cerebral hyperperfusion syndrome initiation using patient-specific 1D-0D simulation (過灌流症候群の検討のための 1D-0D シミュレーション手法の開発)」と題して、7章から構成されている。

動脈硬化による狭窄症部位に対する外科治療法としては、近年、内膜剥離術とステント留置術が広く行われている。しかし、外科治療にはリスクを伴う。例えば、頸部内頸動脈へのステント留置術では、脳へと繋がる内頸動脈の流量が急激に増え、脳内に流量が流れ過ぎてしまう「過灌流」が知られている。過灌流の発症率は低いものの、ひとたび発症すると重篤な脳内出血を引き起こす可能性があり、心臓発作を除く術後死亡の 50%を占める重篤な合併症である。現状では、術前に過灌流の予測はできないため、早期に診断し、血压管理など迅速な治療を行っている。

仮に術前の状態から術後の脳内の血管の流量を予測できれば、過灌流およびそれに伴う脳内出血の発症を予測でき、適切な手術方法の提案が可能となる。本論文では、患者個々の術前・術後経過の予測の発展に寄与することを目的として、全身 83 本の主要な動脈に対しては 1 次元モデル、残りの毛細血管、静脈、心臓に対しては 0 次元モデルで構築し、生理学的現象を再現できる 1D-0D シミュレーション手法を開発している。医用画像のデータを適用する際に必要となるモデルのパラメータについて、生理学的知見に基づいた算出方法を検討している。特に、脳内末梢抵抗を推測するために、SPECT データの活用を提案し、議論している。医療画像データの不確かさが 1D-0D シミュレーションに対する影響を定性的、定量的に調べたうえで、さらに多段階 CAS 手術の患者に応用し、過灌流の研究および予測に応用する可能性を示している。

第 1 章の序論では研究の動機、背景および目的を述べている。ここでは、本研究で対象とする循環器系疾患（過灌流症候群）の特徴と発症メカニズムを述べるとともに、血行力学的要因について解説している。数値シミュレーションを用いて血行力学の観点から過灌流症候群の解明および予測を目指した研究活

動について述べている。これらを踏まえ、従来研究における課題を明らかにし、本研究の意義、目的について述べている。

第2章では、本研究で対象とする全身循環器、特に脳循環の生体特有の特徴を示している。血液の物質特性と血管壁の変形特性を説明したうえで、全身循環に伝播する脈波の特徴を述べている。

第3章では、本研究における1D-0D解析で用いた数値解析アルゴリズムについて述べている。ここでは支配方程式の離散化及び離散化された方程式の解法を説明する。さらに、1Dモデルと0Dモデルのカップリングについて述べている。

第4章では、1D-0D解析を用いて、患者に応用する手法を述べている。本研究で使われている医療画像データの概要を説明したうえで、これらのデータを用いて、血管形状の構築と末梢抵抗の推測手法を述べている。脳循環の末梢抵抗を推測するために、SPECTデータの使い方について述べている。さらに、血管形状モデルによって、シミュレーション結果に対する影響を述べている。

第5章では、患者の術前後の末梢抵抗および血圧が変わらないと仮定し、手術直後の流量を予測手法について述べている。医療画像データの不確かさの分析およびこれら不確かさが予測シミュレーションの結果に対する影響を述べている。

第6章では、実際の症例に本研究で提案した予測手法を応用し、多段階ステント留置術が患者さん術後の脳流量の増加を緩和することを再現できている。さらに、予測した流量の増やし方と、SPECTの計測値との比較を行っている。

第7章は結論であり、本研究における様々な医療画像データを取り入れた1D-0D血流解析手法の開発、さらに患者さん術後の予測手法の開発、及び医療画像データの不確かさの分析によって得られた知見をまとめ、今後の展開および課題について述べている。

以上に述べたように、本論文では、過灌流症候群の検討のため、1D-0D解析手法を開発した。さらに、医療画像データの不確かさが予測シミュレーションの結果に対する影響を分析した。実際の多段階ステント留置術の症例における解析に適用した結果、本研究で提案した予測シミュレーションの有用性と可能性が示された。これらから、臨床医療への応用に向け、過灌流症候群の発症要因の解明および発症の予測を行うことが期待できる。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。