



|                     |                                                                                                                           |
|---------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Title               | 多目的最適化による動脈分岐形状に関する流体力学的適応要因に関する研究 [論文内容及び審査の要旨]                                                                          |
| Author(s)           | 姫野, 雅子                                                                                                                    |
| Degree Grantor      | 北海道大学                                                                                                                     |
| Degree Name         | 博士(工学)                                                                                                                    |
| Dissertation Number | 甲第12900号                                                                                                                  |
| Issue Date          | 2017-09-25                                                                                                                |
| Doc URL             | <a href="https://hdl.handle.net/2115/67511">https://hdl.handle.net/2115/67511</a>                                         |
| Rights(URL)         | <a href="https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.1/jp/">https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.1/jp/</a> |
| Type                | doctoral thesis                                                                                                           |
| File Information    | Masako_Himeno_abstract.pdf, 論文内容の要旨                                                                                       |



## 学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称 博士（工学） 氏名 姫野 雅子

### 学 位 論 文 題 名

多目的最適化による動脈分岐形状に關与する流体力学的適応要因に関する研究  
(Study on adapting factors of artery bifurcation shapes to blood flow using multi-objective optimization)

生体はさまざまな環境の変化に応答して、自らを変化させている。近年、生体適応の研究で、最適化手法を用いたシミュレーション実験がなされるようになり、力学的刺激に対しての骨のリモデリングや血管壁のコラーゲンの配向についての研究例がある。動脈も血流の影響を受け、随時リモデリングを行っていることが生物実験より確かめられてきた。それは、血管の血流と直接接する面にある内皮細胞は、血流に沿って生じる表面せん断応力 (Wall Shear Stress: WSS) を感知するしくみを持っており、血流量が増えて WSS が高くなると血管径を広げ、逆に流量が減少して WSS が下がると径を狭めるというものである。このような生物実験は動脈の直線部位を対象としている。一方、分岐近傍の血流の様子は直線部位とは大きく異なる。同一円周上でも WSS は異なっていたり、WSS が位置的に大きく異なっていたり時間的変動が大きい場所がでたりする。このような部位での調節の仕組みは、直線部位での実験から得られた知見からは簡単に推測することができない。そのため、多種多様な要因が候補として挙げられているが、どの要因がどの程度關与しているのかは分かっていない。

そこで、「血管の分岐近傍の形状は、何かしらの流体力学的要因に適応した結果である」と仮定して、多くの形状が持つ共通の要因を抽出することで、血流への適応のかかわりが大きい要因を見つける方法を提案する。具体的には、以下のとおりである。まず、血管の形状が最適化されている要因を複数仮定し、要因とその組み合わせを検討する。そして、実際の形状を元に、要因（要因の組み合わせ）ごとに、それを満足する最適な分岐近傍の形状を計算で求める。得られた最適形状と実形状を比較し、実形状と最適形状の差異の度合いから、要因への適応度を推定する。これを複数の実形状例で試し、より血流への適応度が高い要因を探すというものである。本研究では、この手法を用いて、適応度の高い要因を見いだせるかどうかを調べた。

今回対象とした血管の分岐は、分岐近傍の形状が持つ共通の要因に普遍性があるかどうかを見るため、組織的にも形状の特徴も異なる頸動脈分岐と腹部大動脈分岐とした。両方とも形状に個人差が大きい部位であるので、頸動脈分岐では 7 実例、腹部大動脈分岐では 5 実例の、それぞれ典型的な形状を選択した。比較する要因として取り上げたのは 5 種類である。血流に関わる要因として、高 WSS、低 WSS、WSS の位置的偏差である WSS gradient (WSSG)、WSS の時間的変動を示した WSS temporary gradient (WSSTG) の 4 種類と、生体内の組織は必要以上には大きくならないという観点から、血管内腔面積は最小という要因である。これらの要因を 2 つずつ組み合わせ、トレードオフが認められた 6 ケースについてシミュレーションを行った。

シミュレーションは 2 段階で行った。「径のみ」を最適化の変数と取り上げた場合と「径と中心線の形状」の両方の場合を取り上げた場合である。最適解と実形状との違いは、目的要因の評価値によるグラフ上のユークリッド距離で定義する方法を用いた。今回は、トレードオフの關係がある複数の

要因を取り上げたため、得られる最適形状はそれぞれの要因の重みが異なる複数の解集合（パレートフロント）となる。パレートフロントと実形状の位置的距離を客観的な指標とした。

まず、径のみを最適化変数として設定した場合では、両分岐部の 12 実例全てで、「最大時間平均 WSS は最小となっている」と「内腔面積は最小になっている」という要因の組み合わせにおいて、実形状が最適形状の一つであることが分かった。この組み合わせが最適形状集団と実形状の違いが最も小さく、今回設定した他の 5 つの組み合わせより大きな差が認められた。

次に、径と中心線の形状の両方を変数として設定し、上記の 2 要因が中心線の形状調節に関わっているかどうかを調べた。その結果、腹部大動脈分岐の 2 実例以外の 10 実例では、実形状と最適形状集団との違いは、径のみの場合と同等であり、実形状は最適形状の一つと認められた。動脈の長さ、加齢や高血圧などの要因で伸長するといわれており、流体力学的要因よりも他の要因の影響をより強く受けていると考えられる。そこで、「血管は実形状と同じ長さであった場合」という条件を加えて実験を試みたところ、当てはまらなかった 2 実例でも実形状は最適形状の一つであることが確かめられた。このことから、血管の径と中心線の形状は、なんらかの要因で伸長していく血管に対して、「時間平均 WSS が最小」と「内腔面積が最小」となるよう調整されていると推測できた。

以上より、提案手法は、血管形状が持つ共通の要因の抽出方法として有効であることが確かめられ、血流への適応度が高い要因を示唆することができた。ここでは、5 種類の要因を取り上げたが、他の流体力学的要因のみでなく、力学的要因や生理学的要因を取り上げて調べることも可能と考えられる。このような解析から得られた知見は、血管のバイパス手術などに応用できると考えられる。また、動脈瘤や狭窄などの異常な形状発症のメカニズムを理解するうえで大きな助けとなるであろう。