

2. 数値流体力学 (CFD) 解析の活用

笹森 大輔 札幌白石記念病院放射線部

脳動脈瘤の発生・増大・破裂の機序はなお不明な点が多く、数値流体力学 (computational fluid dynamics : CFD) による血行力学的要素の解析が数多く報告されている^{1)~3)}。

八木ら⁴⁾は、2000年以降を患者個々の医用画像から血管形状を構築し、CFDによる計算科学により血流を可視化できる時代と位置づけている。CTの歴史を振り返ると、1986年にヘリカルCT (ヘリカルスキャン) が開発され、1998年には4列MDCTが登場。2000年以降も多列化が進み、高速に高精細な画像の取得が可能となった。CTの長足の進歩は、患者個々の高精細な血管形状の画像構築に寄与し、臨床レベルでCFD解析による血流の可視化を可能とした。

現在のところ、脳動脈瘤に対するCFD解析に用いる医用画像の満たすべき条件を示した報告は数少ない。本稿では、デジタルファントムを用いて脳動脈瘤に対するCFD解析における形態学的因子に関する基礎的検討から、医用画像の満たすべき条件について解説する。

未破裂動脈瘤の治療

『脳卒中治療ガイドライン2015』⁵⁾において未破裂動脈瘤の治療に対するrecommendationが示されている。これは“International Study of Unruptured Intracranial Aneurysms (ISUIA)”や“Unruptured Cerebral Aneurysm Study in Japan (UCAS Japan)”などをエビデンスとするもので、脳動脈瘤の形態や部位に応じて生涯の破裂率を予測し、手術合併症率を上回る場合、治療を検討することが推奨されるというものである。患者個々の血流をCFD解析で可視化できる現在、プラスアルファの破裂予測が期待される。

脳動脈瘤の増大・破裂とCFD解析

Tardyら⁶⁾は脳動脈瘤の増大・破裂には血行力学的因子が関与すると報告している。近年、医用画像を利用したCFD解析で血行力学的負荷を定量的に評価した報告が散見され、CFD解析パラメータの一つである壁面剪断応力 (wall shear stress : WSS) が脳動脈瘤の増大や破裂に強く関係しているという観点では共通している。しかし、どのように関与しているかについては、解析結果が一定していない。この原因の一つとして、CFD解析の条件設定が適切でない可能性が考えられる。安定したCFD解析のための医用画像の標準化が望まれる。

WSS

CFD解析において、「流れによる摩擦力」すなわち「血流が血管内皮細胞をこする力」をWSSと定義している⁷⁾。Malekら⁸⁾は、血管内皮細胞の機能を正常に保つには適切なWSS (1.5Pa以上) が必要で、低すぎるWSS (0.4Pa以下) により動脈硬化・アポトーシスなどが引き起こされ、強すぎるWSSにより血管拡張・蛇行・動脈瘤発生などが引き起こされると報告している。また、Kamiyaら⁹⁾は、血管は血管壁に作用するWSSが一定になるように内皮依存性に径を変化させていると報告している。このように、血管がその形態を変化させながら適切なWSSを保とうとすることは、一致した見解が得られている。

医用画像における形態学的因子がWSSに与える影響

われわれは、医用画像の形態学的因子がWSSに与える影響についてデジタルファントムを用いて解析を行った。デジタルファントムの作成には、Autodesk社の“123D Design”を使用した。形態学的因子として、助走距離 (以下、entrance length)、血管直径 (以下、vessel diameter)、流入角度 (以下、flow angle)、動脈瘤サイズ (以下、aneurysm size)、ネック径 (以下、neck diameter) を変化させたデジタルファントムを作成し、stereo lithography (以下、STL) ファイルに変換した。