

IV 異分野とのクロストーク

1. 流体力学とMRIの統一的理解 に向けて —— CFDとMRIをつなぐ数理

大谷 智仁 大阪大学大学院基礎工学研究科機能創成専攻生体工学領域

流体力学は、水や空気など、さまざまな「流体」の流れを、物理・工学的観点から紐解くための学術基盤の一つである。この「流体」の定義は非常に幅広く、例に挙げた身近な水のような、直感的に想像する気体や液体だけでなく、原子・分子の流れや銀河の星々の運動に至るまで、流動する物質・物体のすべてを「流体」とし、流体力学の対象に含みうる。この観点で、血液やリンパ液、脳脊髄液のような生体内の液体の流れ、組織中の間質液の流れ、呼吸器系でのガス交換や気流制御による発声など、生物の体は多種多様な「流体」の流れと、流れに直結する物理に満ちている。

近年のコンピュータ性能の向上に伴い、流れの数値計算技術 (computational fluid dynamics: CFD) が普及したことで、流体力学と聞くと、まずCFDを連想する方も多岐にわたる。CFDでは、対象とする流れの流速や、流体により輸送される熱、物質の濃度など、流れだけでなく、流れに派生するさまざまな物理の時系列情報を評価できる。大規模な実験系が必要な流れ計測の代替や、技術的に計測が困難な流れの解析手段として、今日では、CFDは工学の不可欠なツールとなった。生物・医学の諸問題に対するCFDの適用も広く模索され、大血管系を対象とした血流CFDの方法論はかなり成熟し¹⁾、特に本邦では、医学系の研究者を中心にその社会実装が推進されている^{2), 3)}。

ただし、大血管系に関して言えば、MRIによる流体計測の方法論 (位相コントラストMRI、または4D flow MRI) は以

前から確立されており、被験者個々に血液の流速分布の時系列データを取得できる。流体計測の手法として、四次元の流れ分布を半自動的に計測可能な類似技術はほぼなく、計測 (MRI) と計算 (CFD) が同じレベルで両立するこの状況は、流体力学の分野全体の中でも珍しいように思われる。ほかにも、拡散強調MRIが出力する見かけの拡散係数 (apparent diffusion coefficient: ADC) は、血流の灌流、組織構造に邪魔された間質液の流れや分子拡散など、複数の流れの情報を持ち、これも一つの流れ計測である。しかし、このADCを流体力学の文脈で記述することは容易でなく、流れに対する解析手段として、MRIによる実測が流体力学の理論・計算に先行する側面も強い。

筆者は機械科学 (mechanical science: 力学に対する科学) を専門とする工学系の研究者であり、生体内の流れ (血液・脳脊髄液の流れ) のCFDに携わる中で、MRIによる生体内の流れの計測データに触れる機会を得たことで、上記のMRIの技術的な特異性に気がつくに至った。最近になって、MRIに関する複数のエキスパートの先生方に協力をいただきながら、MRIの物理的な原理に基づき、流体力学とMRIを接続する理論構築や、数値計算手法の開発を手掛け始めたところである。

本稿では、主に血流を対象とする流体力学の基本的な考え方を紹介した上で、CFDとMRI、それぞれの特徴と違いを整理し、最後に、どのように組み合わせているか、CFDとMRIの統一のための展望に触れる。業務で日々MRIに携わる専門家

から見て、不自然・不正確な記述も多々あると思われるが、「非専門家が見たMRI」として、目線の違いを楽しんでいただければ幸いである。

流体力学の概要

流体力学の基本的な原理は、高校の物理で学ぶ力学と本質的には同じである。例えば、バネで接続された質点の運動は、運動方程式 (質量×加速度=外力) により記述され、質量とバネの特性が決まれば、質点の移動量や速度は一意に求まる。同様に、流体の運動も、運動方程式および流体の物性 (密度や粘性) が定まれば、その運動を記述できる。血流に限らず、CFDの説明では、ナビエ・ストークス (Navier-Stokes) 方程式という深淵な名前の方程式が現れる。この式は、質点の運動方程式を流体に拡張し、流体の物性に由来する諸々の仮定を追加したもので、成り立ち自体は単純である。血流の分野でよく見かける典型的なナビエ・ストークス方程式の形は、以下のように表される。この式では、流体の質量保存則 (非圧縮性: 流体の体積が変化しない性質) をあらかじめ仮定している。

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \mathbf{x}} \right) = - \frac{\partial p}{\partial \mathbf{x}} + \mu \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial \mathbf{x}^2} \cdots (1)$$

ここで $\mathbf{u}$ は流体の流速ベクトル、 p は圧力、 ρ および μ は流体の密度および粘性係数を表す。左辺について、第2項に目をつぶってもらえれば、密度と流速の