

2. 心血管領域におけるMRIの新技術と臨床応用

2) キーワードで読み解く 心大血管の4D Flow MRI

関根 鉄朗 日本医科大学付属病院放射線科

近年、心血管領域における4D Flow MRIを用いた流体解析が注目を浴びている¹⁾。4D Flow MRI自体は2000年代前半から研究報告がなされ、おおよそのシーケンスは2010年頃に完成し、近年、撮像に関するconsensus statementsも発表された²⁾。いまだ研究用途の色合いが強い撮像法ではあるが、心大血管の流体解析において、新規のimaging biomarkerを提供できると期待されている。本稿では、項目を絞って、①撮像の高速化、②速度分解能の向上、③流体力学的解析手法の発展、④乱流運動エネルギー(turbulent kinetic energy: TKE) 定量の4つのキーワードを中心に概説する。

撮像の高速化

4D Flow MRIにおいては、三次元空間の撮像範囲×4つのセットの画像〔強度画像と3つの位相(=速度画像)〕×時間軸情報(1心拍を15~25程度に分割)するため、一般的な3D撮像のMRIと比較して、5~100倍程度の情報量になる。そのため、当初の心大血管4D Flow MRIは30分を超える撮像時間となっており、撮像のハードルが高かった。これを解決するため、撮像の高速化の試みが盛んに行われ、現在でも継続中である。この際の高速化の方向性としては、空間方向の高速化(parallel imaging, compressed sensing)、時間軸方向の高速化(view sharing, 時間軸方向のk-space segmentの加算)、空間-時間軸方向の高速化(k-t SENSE, k-t GRAPPA, kat-arcなど)の3種類がある。本稿執筆時点で、メーカーが商用でサポートしている高速撮像法としては、parallel imaging(全メーカー)、compressed sensing(フィリップス社)、k-t系の高速撮像法(GE社、フィリップス社)である。この結果、全メーカーにて、臨床的に許容できる範囲での心血管4D Flow MRI撮像が可能となってきた(大血管であれば10分程度)。k-t系の高速撮像法では、時間軸方向のblurringやaveragingが働いてしまうことが問題視されており、筆者らは、k-t PCA法(k-t空間でのundersamplingと主成分

分析を組み合わせた高速撮像法)を用いている³⁾。この結果、後述のmulti VENC撮像であっても胸部領域で10分弱程度の撮像を可能としている(図1)。

速度分解能の向上

4D Flow MRIにおいては、「速度分解能(velocity noise ratio: VNR)」が非常に肝要である。以下、この概念について概説する。4D Flow MRIでは、スピンの位相差から速度情報を算定する。このため、スピン位相差に対応する速度定量値、すなわち、撮像断面における計測可能な最高速度を決定する必要がある。この際の最高速度は、VENC(velocity encoding)と称される。VNRは、 $VNR = (\pi/\sqrt{2})(v/VENC)SNR$ の関係にあり、すなわち速度分解能とVENCは逆相関する。言い換えると、high VENCを設定するとslow flowの描出が不良となり、slow VENCを設定するとslow flowの描出は向上するが、high VENCにおいて速度情報の折り返りが生じる。これを解決するには、2つの方向性がある。1つは、一度の折り返りを許容し、後処理にて、それを補正する手法である。ピクセルごとの時間軸方向のvelocity curveをトレースしながら、semi-automaticないしマニュアルでunwrappingを行う。もう1つはdual VENC撮像である⁴⁾。これは、high VENCを折り返りのないリファレンスの速度情報として取得し、slow VENC情