

11. 4D flow MRIの最新動向

寺田 理希 磐田市立総合病院放射線診断技術科

4D flow MRIはMR撮像法の一つで、血流ダイナミクス（血液の流れの特性）を評価できる。3D cine PC法で得られる3方向の位相画像とMR angiography (MRA) 画像を使用し、血管内の種々多様な血管内流体解析を可能にする。近年では、4D flow MRIは一般的MRI用語となりつつあり、診断や血管性病変発生の推定、予防、予後推定や治療方針の決定のパラメータとして用いるために、多くの施設で行われてきている。今回は、4D flow MRIを理解していただくため、技術的背景から臨床的有用性について紹介する。

4D flow MRIの特徴

4D flow MRIは、三次元画像に流体の三次元速度ベクトルを心時相で時相分割した血流情報を合わせて血流解析を行う検査法の総称である。この手法で必要な画像は、血管外観を構築できるMRA画像と血流情報を持つ位相画像である。MRA画像は、phase contrast (PC) MRA画像、time of flight (TOF) 法、arterial spin labeling (ASL) 法などを使用した非造影MRA画像や造影MRA画像を使用することが一般的である。心臓など心拍の動きに合わせたMRA画像が必要な場合には、コヒーレント型gradient echo (GRE) シーケンスによるcine MRA画像を使用する。位相画像では、2D cine PC MRIを使用する方法が古くから用いられており、流速を測定することが可能であった^{1)~9)}。この方法では、流体が層流であるという

前提で流速を測定しており、非層流成分を計測対象とすることができないため、使用制限がある。また、多断面での撮像による撮像時間の延長や、空間分解能が低いこと、SNRが低いことなど多くの問題があり、4D flow MRIとしての臨床使用は難しいのが現状であった。効率的に多断面で3方向の位相画像を得ることのできる三次元収集型のcine PC法 (3D cine PC MRI)^{10)~16)}を使用した4D flow MRIでは、関心領域内の流速ベクトルが全体的に測定可能であり、速度ベクトル由来のさまざまな指標〔血管壁や内皮に対する力学的影響に関する付随情報（壁剪断応力：WSS、振動剪断インデックス：OSIなど）^{10)~11)}、流れの定量化（断面の最大流速や平均流速、流量）、流れを線状に可視化 (STL)、エネルギー損失^{17)~19)}、turbulent kinetic energy (TKE)^{20), 21)}、流線情報など〕を得ることが可能で、血流に基づくさまざまな解析が可能となる。

4D flow MRIによる新しい画像情報は革新的評価であり、全身の血流に基づく疾患の評価、治療、効果判定に役立つと思われる。

4D flow MRIの基本的撮像原理

PC法の特徴は、GRE法を使用して対になった傾斜磁場 (bipolar gradient) を使用することである。bipolar gradientにより、静止部では位相シフトが0になるのに対して、印加方向の血流部では

位相シフト (位相のズレ) を生じさせる。bipolar gradient位相シフト量は、bipolar gradientの強度 (velocity encoding : VENC) や血流速に依存して変化する。この位相差を信号として、遅い血流から速い血流まで目的血管の流速に合わせた最適なVENCの設定により、高いSNRを得ることができる。

4D flow MRIでは、このPC法を心電図と同期することにより、心周期に応じた位相画像の描出が可能で、流速や流れの方向の評価ができる。

三次元収集法では短いTRとTEを使用し、スライスと位相方向にエンコーディングを行いながら、x, y, z軸の3方向にbipolar gradientによる速度エンコードを行い、空間三次元に時間軸を含めた四次元データを効率良く収集し、心周期ごとの実データである位相画像と強度画像の四次元血流情報を同時に得ることができる^{10), 14)~16)}。

4D flow MRIの精度について

4D flow MRIでは、精度管理が重要となる。精度検証項目としては、速度プロファイルの正確性、空間分解能とSNRの速度計測精度に及ぼす影響、空間分解能が速度プロファイルの血管形状や壁剪断応力の精度に及ぼす影響、速度ノイズの影響、臨床における精度検証などが考えられる。

速度プロファイルは、3軸に均一なVENCが付加されなければ正確に得るこ