

File No. 65

鳥取大学医学部附属病院
奥田恭平

はじめに

4D Flow MRIはphase-contrast (PC) 法により得られたデータを元に、血液の流れを可視化し、定量評価も可能な技術である。しかし、まだ研究活用が中心で、臨床的な意義づけが確立されているとは言い難い。4D Flow MRIの撮像や解析に取り組んでいける施設も限られ、解析ソフトウェアに関する情報を得る機会も少ない。

当院では放射線科を中心に4D Flow MRIへの関心があり、iTFlow2を導入し様々な領域での撮像に取り組んでいる。iTFlow2は、PC MRIデータを入力することで流体を可視化でき、様々な血流パラメータを得ることのできる4D Flow MRI解析ソフトウェアである。導入している施設数は55施設程度（2024年3月現在）であり、使用経験の報告もまだ多くはないと思われる。本稿では、iTFlow2による血流解析と当院での活用例を紹介する。

iTFlow2による血流解析

1. 入力データとマスク処理

4D Flow MRIの元データとなるPC画像は、双極性傾斜磁場を印加することで生じる位相差から速度情報を得る撮像技術である。心電図または脈波同期により、心周期に応じた流体の変化を捉えることができる。X、Y、Zの3軸それぞれのPCデータを収集することで、流れの方向や速度変化の情報を3次元的に把握す

iTFlow2を用いた 血行動体の可視化と 定量解析

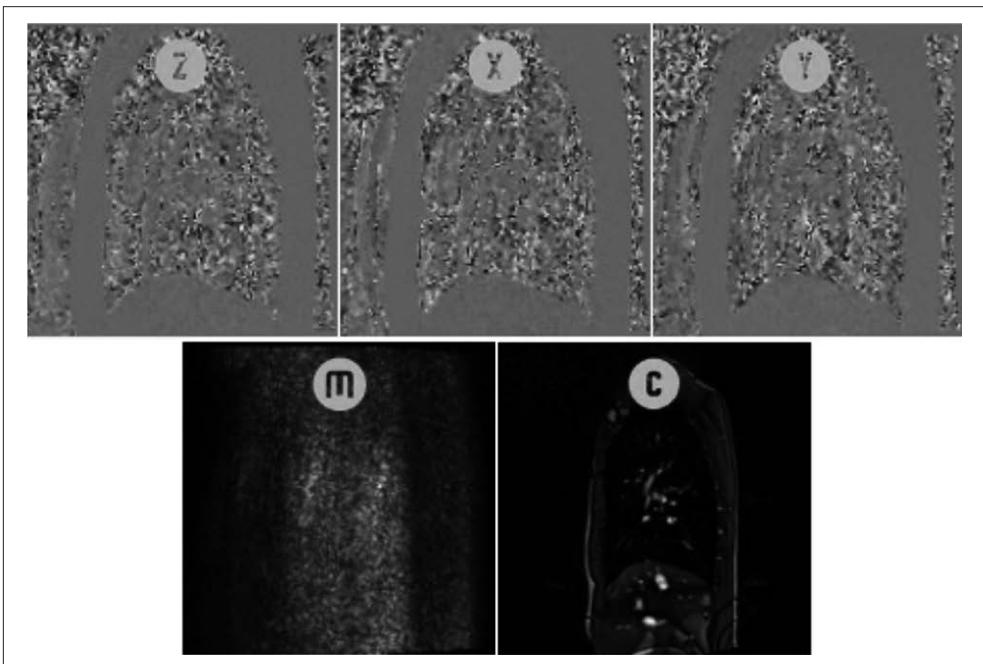


図1 iTFlow2への入力データ
X、Y、Zの3軸のphase-contrastデータとMagnitude画像及びCINE画像を入力する。

ることが可能となる。

iTFlow2への入力データは、3軸 (X, Y, Z) のPC画像と形態画像 (Magnitude image) である（図1）。解析は比較的シンプルで、形態画像に対しトリミングや閾値設定によるMask処理を行うことで、Mask内の血流パラメータを可視化することができる（図2）。形態画像にはMR Angiography (MRA) のような目的血管と軟部組織とのコントラストが明瞭なデータが適しており、不要な領域は2Dもしくは3D画像上でcuttingすることで血管のみが抽出される。さらに、CINE MRI画像も形態画像として入力することが可能であり、心拍動による心臓の形態的な変化も追従してMaskされ、より正確な血流パラメータを得ることができる。

2. 血流パラメータとその他の機能

血流パラメータは2D及び3Dでの観察が可能で、血流ベクトルや流線表示 (Streamline)、血管内の仮想的な粒子の動きを追跡したPathlinesによって、血管内の流体の動きを視覚的に把握できる（図3）。さらに、血管断面を指定することで血流量の定量評価も可能である。その他、血流の乱れや渦流を表す指標として、Uniformity IndexやHelicity (螺旋流)、Vorticity (渦度) の可視化や定量化も可能である。

流体の可視化だけでなく、力学的な負荷を表すパラメータも算出可能である。血流が血管壁を擦る力を表す壁面剪断応力 (Wall Shear Stress : WSS) やそのストレス方向の変動を表す Oscillatory Shear Index (OSI) は、解離のリスクや動脈瘤の評価などに活用されている¹⁾。また血液の運動効率を表す指標であるエネルギー損失 (Energy Loss) は、心負荷を示す指標として報告されている²⁾。

iTFlow2には、データ解析をサポートする様々な機能も搭載さ

れている。その一例として、速度の折り返し補正があげられる。PC法では、速度に対して位相シフトを割り当てること (velocity encode : venc) で流速が定量される。そのため、実際の血流速度がvencより大きい場合、速度の折り返し (velocity aliasing) が生じ正確な血流評価が困難となる。撮像の際に症例や目的血管に応じて適切なvenc値を設定することがPC法のポイントではあるが、局所的に流速が変化している場合などaliasingが生じてしまうケースもある。この速度の折り返しに対し、iTFlow2では補

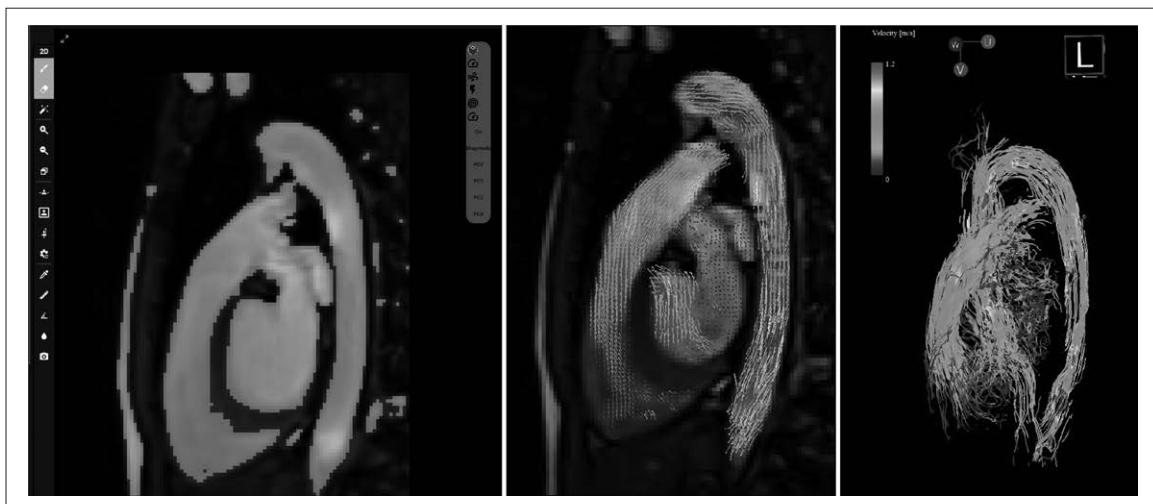


図2 iTFlow2による血流の可視化

⇒卷頭カラー参照

- a Mask領域
- b 2D CINE画像上の血流ベクトル表示
- c Streamlineの3D表示
- Maskされた領域の血流パラメータが可視化されている。

a | b | c

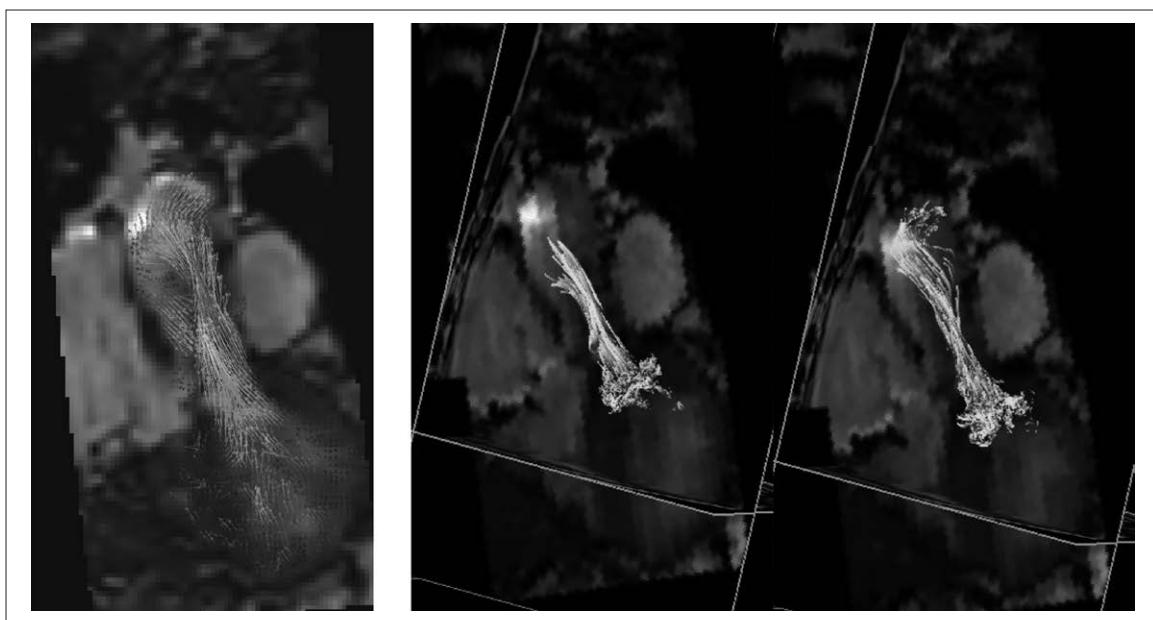


図3 大動脈弁閉鎖不全症評価目的での4D Flow MRI

⇒卷頭カラー参照

- a 血流ベクトル表示
- b Pathlines表示
- 左室から大動脈へ向けた順行性の血流が観察され、逆行性の血流は明らかではない。上行大動脈における渦流も観察される。

a | b

正が可能 (vencと実際の速度が著しく異なる場合を除く) であり、解析を手助けする機能であるといえる。

当院での活用例

当院ではこれまでに頭部血管、心臓・大動脈、門脈血流、下肢血管での4D Flow MRIの撮像を経験している。撮像・解析を含めた技術的な課題や、臨床的意義を検証している段階であるが、iTFlow2を用いた4D Flow解析により非侵襲的に臨床的な情報が付加されている。

大動脈弁閉鎖不全症の重症度評価のために4D Flow MRIを施行した症例では、明らかな大動脈弁逆流がないことが可視化されている(図3)。また、乱流による不規則な血液の流れも視覚的に把握することができる。従来、先天性心疾患における短絡血流や弁狭窄・閉鎖不全における血流量の評価には、2D PC法が用いられてきた。そのため、撮影時に設定した断面のみの解析・評価となり、後処理で任意の部位や断面を計測し直すことはできなかった。一方、4D Flow MRIでは3次元データを取得しているため、iTFlow2によるデータ解析の際に、任意の断面の血流量を計測可能であることもメリットの1つである。

門脈血流の評価目的で4D Flow MRIを施行した症例では、治療効果の評価に役立っている。肝硬変による門脈圧亢進症に対し4D Flow MRIを施行した症例では、門脈圧の亢進による遠肝性の血流が可視化されている(図4)。この症例は、部分的脾動脈塞栓術 (Partial Splenic Embolization : PSE) が施行され、治療後の4D Flow MRIでは求肝性の血流へと変化したことが観察された。脾静脈での血流を計測すると、求肝性血流へと改善していることが定量的に評価された。同様に、胃食道静脈瘤に対しバルーン閉塞下逆行性経静脈的塞栓術 (Balloon-occluded Retrograde Transvenous Obliteration : B-RTO) 施行例でも、治療後に求肝性の門脈血流への改善が観察されており、治療効果を視覚的・定量的に捉えることができている。

その他の活用法として、他のシーケンスと組み合わせて血流情報を可視化させることも可能である。2D表示の背景画像にはMagnitude画像やCINE画像だけでなく、任意の画像を入力することもできる。例えば、総腸骨動脈狭窄に対し4D Flow MRIを施行した症例では、Bone Imaging上にStreamline表示することで石灰化部位での血流の様子が可視化されている(図5)。この2D表示の背景画像にはPC画像(元データ)を選択することもできるため、アーチファクトやデータの妥当性の確認にも役立っている。

当院では、iTFlow2が直接PACSと接続されていないため、同じ

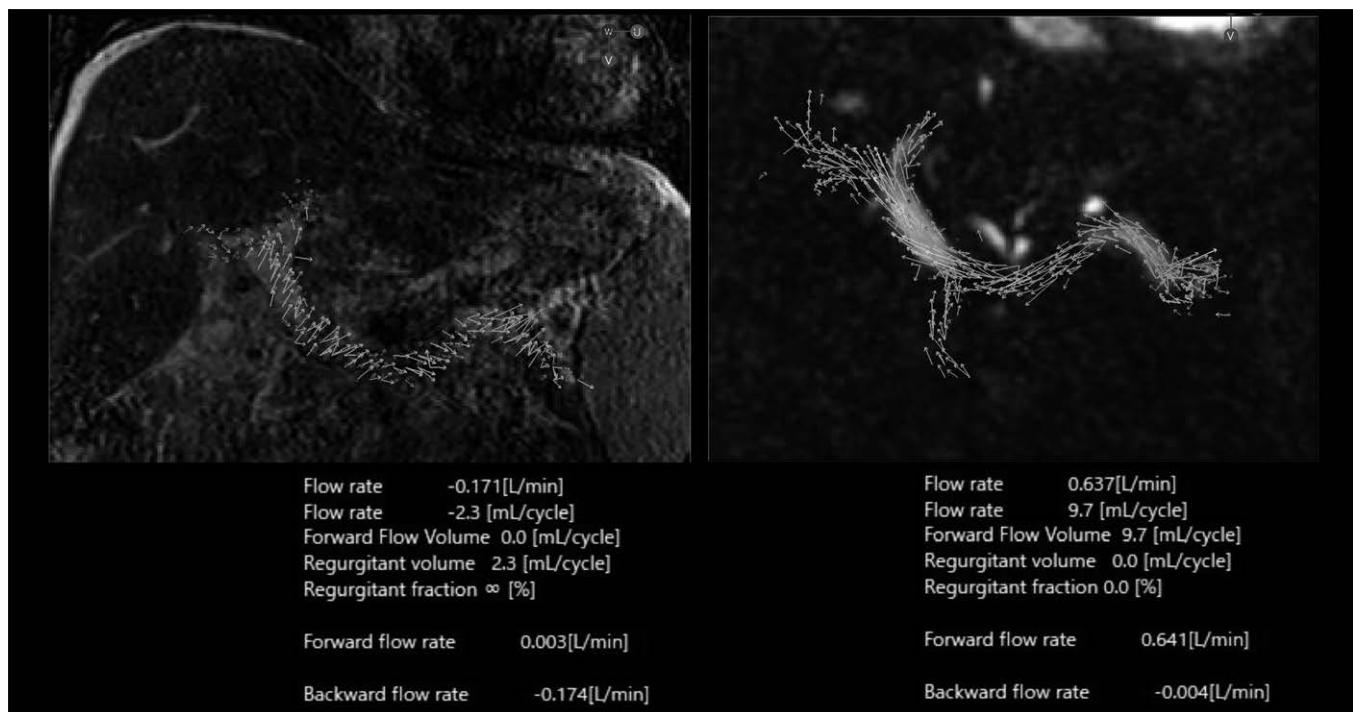


図4 門脈圧亢進症の治療前後における門脈血流の変化

a 治療前

b 部分的脾動脈塞栓術による治療後

治療前の遠肝性血流が、治療後に求肝性の血流へ変化していることが視覚的に把握することができる。

求肝性血流を正として脾静脈で血流計測をすると、治療後の門脈血流の変化が定量的に評価できる。

→巻頭カラー参照

a | b

PCにインストールされているZIOSTATIONを介して画像データの通信を行っている。そこで、ZIOSTATIONの機能も4D Flow解析に活用している。例えば、Mask処理による血管抽出の機能は、ZIOSTATIONのような汎用ワークステーションの方が充実しており、iTFlow2での血管分離に苦慮する場合は、ZIOSTATIONでMask処理したデータを4D Flowの形態画像として活用している。

さいごに

今回iTFlow2による4D Flow解析と当院での使用例を紹介した。血流動体を直感的に把握でき、種々の定量指標が算出可能

なアプリケーションとして臨床医の関心も高い。算出可能な指標や新たな機能も次々とアップデートされており、引き続き当院でも活用していきたい。

<文献>

- 1) Numata S et al: Blood flow analysis of the aortic arch using computational fluid dynamics. European Journal of Cardio-Thoracic Surgery 2016, 49(6): 1578-1585
- 2) Stugaard M et al: Energy loss in the left ventricle obtained by vector flow mapping as a new quantitative measure of severity of aortic regurgitation: a combined experimental and clinical study. European Heart Journal Cardiovascular Imaging 2015, 16(7): 723-30

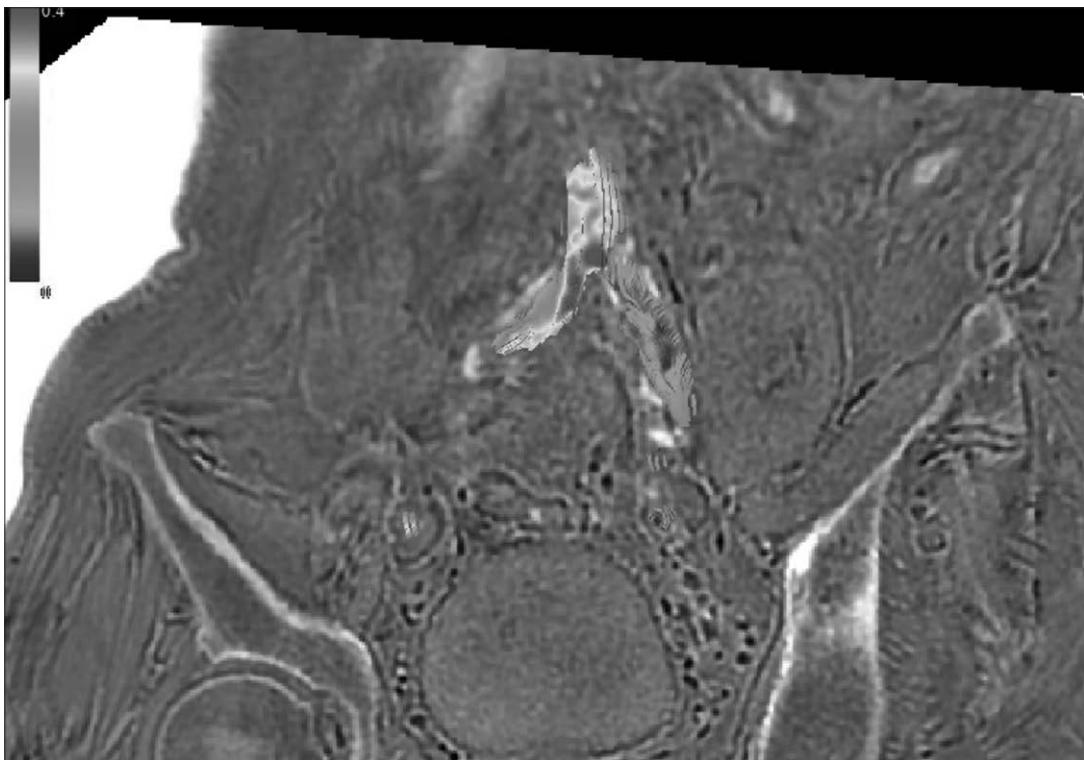


図5 Bone ImagingとStreamlineのFusion画像

総腸骨動脈分岐部の石灰化による狭窄部位での血流低下が可視化されている。

▶巻頭カラー参照