

Editorial Comment

4D flow MRI による Fontan 循環の血流解析と臨床への応用

前田 潤

慶應義塾大学医学部小児科

Blood Flow Imaging Using 4D Flow MRI and Clinical Application in Fontan Circulation

Jun Maeda

Department of Pediatrics, Keio University School of Medicine, Tokyo, Japan

心臓 MRI (magnetic resonance imaging) は心臓の形態を表示するほか、位相コントラスト (phase contrast: PC) 法を用いて、血流量を計測することが可能である。従来 PC 法は 2 次元断面で行われてきたが、近年、3 次元方向での計測を多断面で行い、解析ソフトウェアを用いて積算することで、4 次元表示、すなわち 3 次元構造の経時的観察が可能となった。この four-dimensional (4D) flow MRI により、検査後に任意の断面を設定して、乱流、渦流やそれらが心腔や血管壁に及ぼす血流の影響を可視化し、血流量や流速を定量することが可能となった。4D flow MRI は、弁逆流や狭窄、大動脈疾患の他、先天性心疾患においても心内短絡や体肺側副血管、Fontan 型術後症例の血流解析に用いられている^{1,2)}。

Fontan 手術適応症例に対しては、コンピュータを用いた流体シミュレーションや、プレッシャーワイヤーを用いた血管内の圧、速度の実測値を基に血流のエネルギー損失 (flow energy loss: FEL) を算出し、FEL の少ない上大静脈と心外導管の肺動脈への吻合位置のデザインや導管のサイズの選択、横隔神経麻痺の及ぼす影響の評価が行われている^{3,4)}。近年、4D flow MRI においても解析技術の進歩により、FEL や、壁すり応力 (wall shear stress: WSS) などの流体力学的な指標も測定できるようになり、Fallot 四徴症や Fontan 循環を対象とした血流解析の報告が散見される⁵⁻⁷⁾。心臓 MRI を用いて、複雑な先天性心疾患の血行動態を非侵襲的に、より詳細に評価することが可能になりつつある。

藤田らの論文は、Fontan 術後遠隔期に発症した蛋白漏出性胃腸症 (PLE) に対して、4D flow MRI による FEL や WSS に基づいて治療方針を決定したという貴重な報告である⁸⁾。報告症例では、造影 CT および下大静脈造影により、心外導管に石灰化を伴う明らかな狭窄が認められており、PLE の治療として、導管交換により Fontan 循環の適正化を図るという選択肢が考えられる。一方、狭窄部位前後の圧較差が 0 mmHg であったこと、また PLE 発症時の心臓カテーテル検査では狭窄が認められなかったことから、手術による導管交換は PLE に対して効果的でない可能性もありうる。さらに低圧の静脈系における圧較差の評価は困難な場合があり、Fontan 循環において圧較差を認めない導管狭窄がまれではないことも過去に報告されている⁹⁾。藤田らは、4D flow MRI の解析により、造影 CT 上 50% 以上に及ぶ導管狭窄であっても、Fontan 回路内の血流は保たれ FEL が低値であることを示し、導管交換よりも、内科的治療により心室拡張末期圧を低下させる方が PLE の改善につながるという結論に至った。一方、狭窄部周囲における WSS 上昇が認められ、今後内膜増生による導管狭窄の進行が懸念された。また、単心室では、痕跡的心室の収縮同期不全により主心室の効率的な収縮が阻害され、心拍出量が低下し、ひいては PLE を惹起することも考えられる。しかし 4D flow MRI による心室間血流の解析では、心室内乱流形成はなく、FEL も低値であり、痕跡的心室の同期不全が PLE を招来する可能性は低いことが示唆された。

doi: 10.9794/jspccs.34.205

注記：本稿は、次の論文の Editorial Comment である。

藤田周平, ほか：4D flow MRI を用いた血行動態評価が有用であった TCPC 術後導管屈曲, 蛋白漏出性胃腸症の 1 例. 日小児循環器会誌 2018; 34: 197–204

藤田らの論文で述べられているように FEL を Fontan 循環評価の指標として用いるためには、およその基準値の設定が必要となる。藤田らは Fontan 回路や心室内の FEL (各々 0.33 mW, 0.54 mW) を、心臓カテーテル検査時の圧容積ループから得られた心室仕事量 (663.9 mW) と比較して、十分低いと判断している。一方、Honda らのプレッシャーワイヤーを用いたデータ解析では、心外導管を用いた Fontan 回路における FEL は、明らかな血行動態異常のない症例で 5.26~10.67 mW と報告されており⁴⁾、測定法による差を認める。4D flow MRI では、低い空間分解能や、検出速度、シグナルノイズ比などのパラメーター設定により、計測値が影響を受けている可能性が考えられ¹⁰⁾、今後同一症例における FEL, WSS の経時的変化と臨床経過との比較、複数症例での比較による検証が必要であろう。

FEL は乱流により生じる心負荷を、WSS は血管内膜の変性を反映し、現状よりもむしろ将来の心機能低下、血管内膜増生を予測する指標とされている¹⁰⁾。これらは圧や容量負荷に対して心血管機能が代償されている時期から異常値を示し、症状が出現する前や現行の治療ガイドラインで提唱されている時期より前に、治療介入を考慮する指標となるかもしれない¹¹⁾。筆者の施設においても、Fallot 四徴症などの右心系疾患の心内修復術後、肺動脈弁閉鎖不全に対して、右室拡大が明らかであるが無症状であったため、肺動脈弁置換術を行うタイミングに悩み、弁置換後も右室拡大が改善せず、右心不全、不整脈が残存した症例を複数経験している。今後 4D flow MRI による血流解析が普及し、EFL や WSS などの流体力学的指標と予後に関する知見をさらに集積することによって、より適切な手術時期が明らかになり、ひいては先天性心疾患の予後が改善されることを期待したい。

引用文献

- 1) Dyverfeldt P, Bissell M, Barker AJ, et al: 4D flow cardiovascular magnetic resonance consensus statement. *J Cardiovasc Magn Reson* 2015; **17**: 72
- 2) Vasanawala SS, Hanneman K, Alley MT, et al: Congenital heart disease assessment with 4D flow MRI. *J Magn Reson Imaging* 2015; **42**: 870-886
- 3) 板谷慶一, 宮地 鑑, 小原邦義, ほか: Fontan 循環の流体シミュレーション—現状と展望—. *日小児循環器会誌* 2010; **26**: 39-48
- 4) Honda T, Itatani K, Takanashi M, et al: Quantitative evaluation of hemodynamics in the Fontan circulation: A cross-sectional study measuring energy loss in vivo. *Pediatr Cardiol* 2014; **35**: 361-367
- 5) Haggerty CM, Restrepo M, Tang E, et al: Fontan hemodynamics from 100 patient-specific cardiac magnetic resonance studies: A computational fluid dynamics analysis. *J Thorac Cardiovasc Surg* 2014; **148**: 1481-1489
- 6) Hirtler D, Garcia J, Barker AJ, et al: Assessment of intracardiac flow and vorticity in the right heart of patients after repair of tetralogy of Fallot by flow-sensitive 4D MRI. *Eur Radiol* 2016; **26**: 3598-3607
- 7) Sjöberg P, Heiberg E, Wingren P, et al: Decreased diastolic ventricular kinetic energy in young patients with Fontan circulation demonstrated by four-dimensional cardiac magnetic resonance imaging. *Pediatr Cardiol* 2017; **38**: 669-680
- 8) 藤田周平, 山岸正明, 宮崎隆子, ほか: 4D flow MRI を用いた血行動態評価が有用であった TCPC 術後導管屈曲, 蛋白漏出性胃腸症の 1 例. *日小児循環器会誌* 2018; **34**: 197-204
- 9) van Brakel TJ, Schoof PH, de Roo F, et al: High incidence of Dacron conduit stenosis for extracardiac Fontan procedure. *J Thorac Cardiovasc Surg* 2014; **147**: 1568-1572
- 10) Itatani K, Miyazaki S, Furusawa T, et al: New imaging tools in cardiovascular medicine: Computational fluid dynamics and 4D flow MRI. *Gen Thorac Cardiovasc Surg* 2017; **65**: 611-621
- 11) Itatani K: When the blood flow becomes bright. *Eur Heart J* 2014; **35**: 747-752