

# 血流可視化技術が切り開く循環器画像診断の新たな領域： 心臓超音波VFM (Vector Flow Mapping)の現状と展望

The novel Insights into Cardiovascular Imaging Techniques with the Flow Visualization Method:  
The present conditions and the prospects of the Echocardiography Flow Visualization Method named VFM (Vector Flow Mapping)

板谷 慶一 <sup>1)2)</sup>	Keiichi Itatani	宮崎 翔平 <sup>1)</sup>	Shouhei Miyazaki	小山 紗千 <sup>2)</sup>	Sachi Koyama
中島 光貴 <sup>2)</sup>	Kouki Nakashima	宝来 哲也 <sup>2)</sup>	Tetsuya Horai	岡 徳彦 <sup>2)</sup>	Norihiko Oka
北村 律 <sup>2)</sup>	Tadashi Kitamura	本田 崇 <sup>3)</sup>	Takashi Honda	鍋田 健 <sup>4)</sup>	Takeshi Nabeta
佐藤 孝典 <sup>4)</sup>	Takanori Sato	石井 正浩 <sup>3)</sup>	Masahiro Ishii	阿古 潤哉 <sup>4)</sup>	Junya Ako
宮地 鑑 <sup>1)2)</sup>	Kagami Miyaji				

<sup>1)</sup>北里大学医学部 血流解析学講座

<sup>2)</sup>北里大学医学部 心臓血管外科

<sup>3)</sup>北里大学医学部 小児科

<sup>4)</sup>北里大学医学部 循環器内科

循環器画像診断技術は近年のコンピュータ技術の進歩とともに飛躍的に進展し、診断の質に変革をもたらしつつある。例えば従来、医療画像といえばシャーカステンにレントゲン写真を貼ったり、白黒静止画像が印刷されたレポート用紙を読んだりしていたが、近年ではカラー動画がふんだんに用いられ、心筋壁運動や血流動態など動きを伴う複雑な機能診断をより明快に提示するものに変貌を遂げつつある。

一方で血液循環のポンプとしての心臓は非常に合理的な血流を発生していると古来より信じられており、近年でも心臓の形態や機能と血流には強い関連があると考えられている。昨今の画像診断の技術的進歩に伴い、心臓超音波や放射線画像を用いて血流を可視化する技術が開発され、詳細な血流が提示されるようになり、循環器診療に新たな視点をもたらすものとして期待されている。

本稿ではわれわれの研究室で開発された心臓超音波を用いた血流可視化技術であるVFM (Vector Flow Mapping: 日立アロカメディカル)が臨床的にどのように役立っているのかを紹介する。さらにはVFMが心臓MRI (Magnetic Resonance Imaging) やCT (Computed Tomography) などほかの循環器画像診断を基にした可視化法との比較の中でどのような関連があり、今後どのような未来が期待されるのかを研究室の最新の知見とともに紹介する。

Recent cardiovascular imaging techniques have been developing with the recent progress in computer technology. For example, traditional medical imaging reminiscent a monochrome roentgen photograph on a Schaukasten or a report paper with white-and-black pictures, but recent technologies with abundant color videos present clearer information in cardiac muscle motion or hemodynamics.

On the other hand, from an ancient time, a heart has been believed to perform efficient ejection for the maintenance of the systemic circulation, and even in these days, blood flow is believed to be closely linked to the morphology and function of the cardiac chamber. Recent imaging technique developed novel flow visualization method based on the echocardiography and radiographic images, which enabled detail evaluation of hemodynamics and is expected to provide novel insights into daily clinical practice in cardiovascular system.

In this paper, we'd like to introduce a novel echocardiography flow visualization method named VFM (Vector Flow Mapping) and its clinical applications. Moreover, we'd like to discuss its relationship with other recent flow visualization modalities also developed in our laboratory and to introduce recent insights of flow visualization studies.

**Key Words:** Vector Flow Mapping, Echocardiography, Flow Visualization Method

## 1. 超音波血流可視化法とVFM(Vector Flow Mapping)の原理

超音波VFMは計測断面内での流量保存を仮定し、カラードプラ法と心筋壁を追跡する手法であるspeckle tracking法を重ね合わせたものを基に心臓血管内の血流をベクトルで表示している<sup>1)~3)</sup>。具体的には図1に示すようにカラードプラはプローベから検出されるビーム方向の血流速度分布を示すのに対して、speckle trackingは心筋壁運動を追跡し、壁近傍での血流速度情報を有するため、壁近傍から微小空間内で流量が保存されるようにビーム直交方向の血流速度を算出する方法である。この方法はBモードカラードプラ動画のみから成立するため、非侵襲かつ簡便で、理論的にも明解な手法として注目を集めた<sup>3)</sup>。カラードプラを基に連続の式を積分し、その境界条件としてspeckle trackingより得られる壁運動速度を用いるというこの方法のコンセプトは初めGarciaらにより報告され<sup>4)</sup>、VFMでは壁近傍での血流速度をより正確に算出し、血行力学的な指標をより安定に算出できるように改変している<sup>2)</sup>。

超音波による血流可視化法は技術的にはコントラスト剤を注入してparticleを追跡する方法に基づくEcho PIVに始まり<sup>5)</sup>、大概らによって開発されたEchodynamography<sup>6)</sup>や、近年ではさらに渦流のみを特異的に可視化するVortography<sup>7)</sup>などが存在するが、Echo PIVはその後の実験結果との検証により60cm/sを超える血流速度場を正確には計測できないという問題点が浮き彫りになり<sup>8)</sup>、また、Echodynamographyはその原理として渦流と基本流を分割するという手法、ならびに壁運動速度を加味していないという点で理論的基盤が弱い弱だとされる。現在のところEchoPIV、Phase Contrast法(PC-MRI)と並びVFMは代表的な生体内血流可視化計測方法の一つとされている<sup>9)10)</sup>。

## 2. VFMで分かることとその臨床応用

従来カラードプラはプローベから出るビーム方向に血流速度の計測が束縛されていたが、VFMでは自由な方向で血流速度が求められる。例えば図2は比較的頻度の高い先天性心疾患の一つである房室中隔欠損症の患者で房室弁に逆流が発生した症例でのVFMの解析結果であるが、同一断面での自由な方向での血流計測が可能であるため、心尖部四腔断面像において仮想的なラインをVFM解析結果上に引くことによって2次元の流量ではあるが、収縮期の房室弁逆流と拡張期の心室内流入量を、また、同一断面内で心室中隔欠損項を通過する流量が収縮期に左室から右室へ、拡張期には右室から左室に流入している様子が見取れる。

VFMのような血流可視化技術を用い、循環器疾患においてどのように血流を解釈するかということが現在議論される。すなわち「ベクトルで可視化された血流の画像をどのように読影するか」という問題である<sup>3)</sup>。そのために得られたベクトルから血行力学的な指標を算出することが期待される。例えば壁ずり応力(Wall Shear Stress : WSS)は血流が心血管内膜をこする力であり、動脈硬化病変の進展<sup>11)</sup>やプラークの破たん<sup>12)</sup>にかかわるとされ、また血流エネルギー損失は血管吻合部<sup>9)</sup>や心臓弁<sup>10)</sup>などでの非効率な血流がもたらすエネルギー効率の良し悪しを数値として表現する手法であり、心負荷をもたらす物理量として考えられている。われわれは、本来全圧に基づくとされる血流のエネルギー損失が血管内での拍動流れに関しては粘性散逸に基づく損失と等価であることを証明し<sup>15)16)</sup>、VFMでも実測できるようにシステムを構築した<sup>1)~3)15)16)</sup>。図3には各種の血流の指標が表現されている。

このような血流の可視化と指標の算出によって、健常人における心内血流がもたらす循環生理学上の新たな知見が得られることが期待される。図4には健常人左心室内の特徴的な

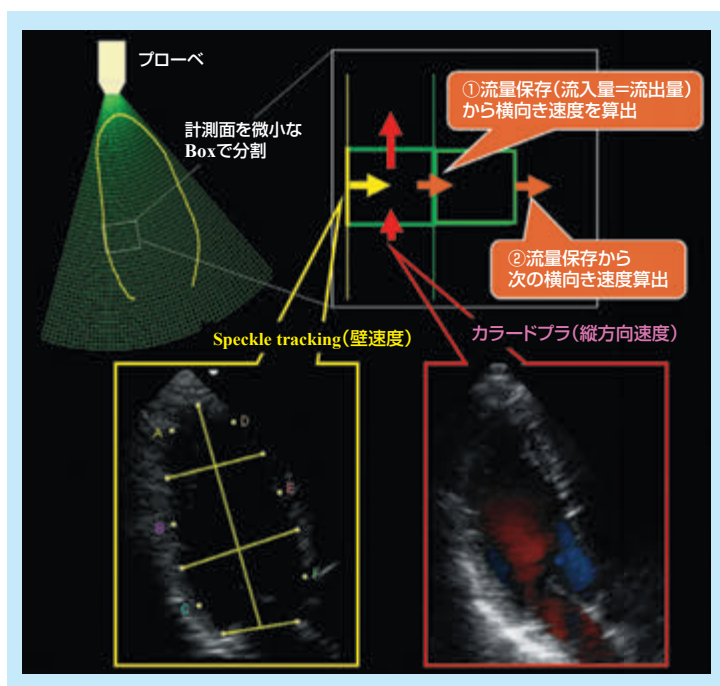


図1：VFMの原理(参考文献3より引用)

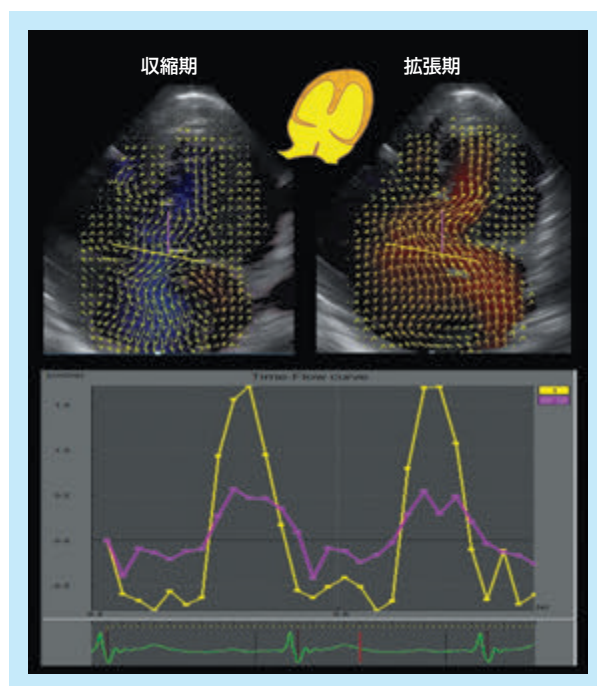


図2：心尖部四腔断面でみた房室中隔欠損症、房室弁逆流の血流

時相における血流をそれぞれベクトル+WSS、流線+渦度、エネルギー損失+WSSといったように重ね合わせて検証した結果を示す。等容収縮期には左室内には心基部に大きな渦流を発生し、この渦流はスムーズな駆出血流を助ける。この時、渦内部のエネルギー損失は小さく、あたかも効率よく駆出できるよう準備をしているかのようにも見える。収縮中期には心室全体からまっすぐ大動脈側へ向かう血流を認め、一部流出路中隔でWSSが高くなる部位が存在する。拡張流入期には僧帽弁前尖の周りに右巻きの、後尖の周りに左巻きの渦流が存在し、この内部ではやや大きなエネルギーを損失するが、拡張中期から後期にかけて前尖の渦は少し心尖部側に移動し、エネルギー損失は低下する。このプロセスは楕円形の左室内で渦エネルギーがあたかもうまく伝搬しているかのようにも見える。今後健常例の多くの解析結果を基に、このような血流パターンがどの程度普遍性を持つものであるのか、成長や加齢とともにどのように変化していくものなのか、エネルギー損失や渦度、WSSの正常値はどの程度であるのかといったことを解明していく必要がある。

また、心疾患で血流を可視化し解析を行うことで病態生理学的にも新たな視野がもたらされる。たとえばエネルギー損失は左室心尖部長軸断面で計測したカラードプラ画像を

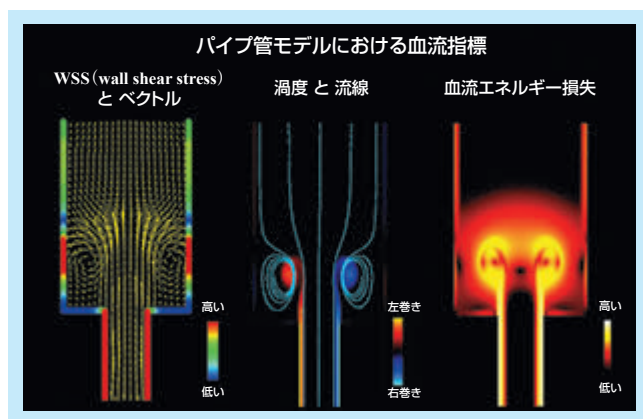


図3：パイプモデルにおける各種血流指標

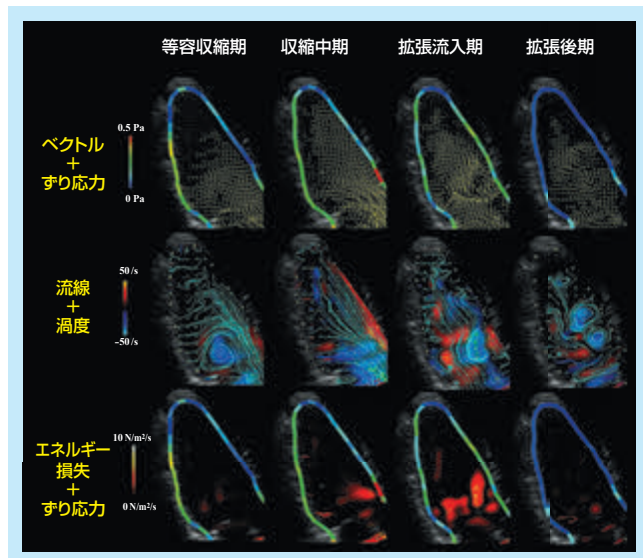


図4：健常人左室内での血流と循環指標

VFMで解析すると大動脈弁閉鎖不全症例では逆流の程度が大きくなるにつれて心室内エネルギー損失は大きくなり、高い輝度を持つようになる。特に逆流ジェットの周囲のほかに、ジェットが心尖部に衝突し旋回流となって乱流を発生する部位に強いエネルギー損失を発生することが分かる(図5)。従来、大動脈弁閉鎖不全症の手術適応は左室駆出率が高度に低下するかあるいは左室径が拡大しているかでなければ自覚症状の有無がほとんどの適応基準であり<sup>17)</sup>、客観性に乏しくまた高度な心機能不全が起こった後での対処で果たして適切なのかという疑問があった。その意味では心機能が保持されているうちに定量化した心負荷が計測できるエネルギー損失は非常に有用な指標となりうる。血流のエネルギー損失は弁狭窄などの後負荷(圧負荷)が上昇する疾患で高くなるのがこれまでの研究結果から得られたが<sup>13)14)18)19)</sup>、これらの結果は前負荷(容量負荷)が上昇する疾患でもエネルギー損失が増加していることを意味する結果である。また、これらの血流のエネルギー損失は心内で発生する病的な血流に伴うものであるが、その一方でこれら損失も含めエネルギーを産生しているのは心臓の拍動運動であり、エネルギー損失が心負荷になりうるのではないかと考えられる。従来画像診断に基づく心機能評価は心臓の動きや内腔容積など、現状の機能が悪化しているかどうかを評価するものであったのに対して、血流エネルギー損失はまだ心機能が保持されている状態下でどの程度心負荷がかかっているかを示す指標であり、心疾患に対する治療介入の適切なタイミングを明快にする可能性を有する指標である。

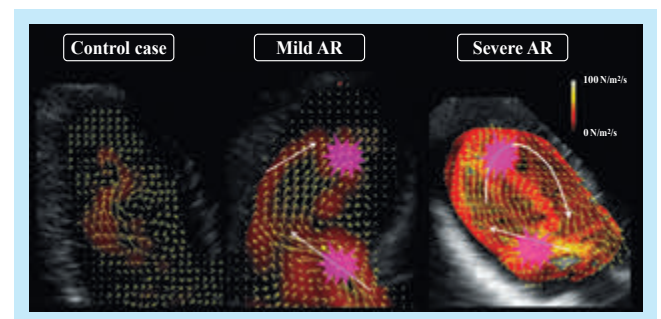


図5：大動脈弁閉鎖不全の程度と拡張期左室内エネルギー損失

### 3. その他血流可視化モダリティとVFM

上記のようにVFMは心臓血管疾患において病態の視覚的・定量的な評価を行う上で非常に有用な手法であるが、その一方でたとえば二次元流れの仮定に基づいていることやframe rateが十分ではないこと、カラードプラのノイズが大きく平均化を行わなければならないこと、Nyquist limitを超えるAliasingの補正が難しいことなど超音波計測上の特性にかかわるさまざまなlimitationが存在する。超音波以外での血流の可視化は生体内計測としては心臓MRIに基づくPhase Contrast法(PC-MRI)が有用であるとされ<sup>9)10)20)21)</sup>、特にMRIは三次元的な計測が可能であることから血管内の渦流などの臨床的な評価が行われている<sup>22)23)</sup>。しかしながら

MRIでは心臓血管内外のコントラストが十分明瞭ではないこと、空間分解能が十分ではないために壁近傍での血流評価は困難であり、たとえばWSSなどの指標の算出は容易ではないことが予測される<sup>21)</sup>。また時間分解能も十分高くはなく、これらの分解能を保とうと考えると撮影時間が長くなり、検査可能な症例が限定されるといった臨床上的問題点も存在する。また近年では直接的な計測ではないが、造影CTによる患者固有の血管形状を基に流量や血圧などを仮定してコンピュータに流体計算をさせるCFD(Computational Fluid Dynamics)などといった手法も存在し、さまざまな臨床応用が期待されている<sup>24)~26)</sup>。この方法は際限なく時間空間分解能を上げることが可能であるが、一方で可視化血流の基となるものが計算解であるために圧力や流量などの計算の仮定や計算のアルゴリズムそのものに結果が非常に大きな影響を受けることが難点であり、十分なvalidationのもとに進めなければならない<sup>26)27)</sup>。

われわれの研究施設ではこのような近年着目されている先端技術を駆使し、さまざまな臨床例で複数のモダリティで評価を行うことによっておのおのの可視化技術そのものの特性をより深く知ることが可能になるのみならず、各臨床例のより詳細な情報を得ることが可能になる。例えば図6は同一症例ではないがどちらも拡張型心筋症における拡張期左心室内の血流を拡張流入期と拡張後期とでVFMとMRIの結果を比較・評価したものであるが、心室内の大きな渦流がどちらの計測結果でも表現されていることが分かる。拡張型心筋症では左心室内に比較的大きな渦流が発生することがCFD結果などからも知られるが<sup>28)</sup>、左室の辺縁までにわたる大きな渦流を発生することは計測系によらない普遍的な特徴であることが分かる。また、図7は小児先天性心疾患での同一症例でのVFMとCFDとの血流の計測結果の比較であるが、単心室症例、大動脈弁下狭窄に対して主肺動脈と大動脈を吻合するDKS(Damus Kaye Stansel)吻合を行った後での大動脈血流であるが、収縮期に大動脈弁通過血流、肺動脈弁通過血流が合流し、また拡張期に主肺動脈側から大動脈弁側への逆行性血流が存在していることが見て取れる。そして、図8は成人健常例での大動脈内血流に対してCFDとMRIとで比較を行っ

たものである<sup>27)</sup>。遠位大動脈弓での流れの剥離、下行大動脈での収縮期での血流速度分布は極めて似ているが、これはCFDにおける計算仮定がそれほど間違っていなかったことを意味するに過ぎない。一方で、時間空間分解能がCFDより少ないMRIなど計測系に対して、指標を算出する上でどの程度分解能が影響するかを考える際、今度はCFDを理論値としてvalidationするというアプローチもありうると考えられる。

このように血流の可視化は技術革新を進めながら、その一方で循環器疾患の病態生理学の解明と治療指針に新たな展望をもたらす学際的な研究領域であると言える。

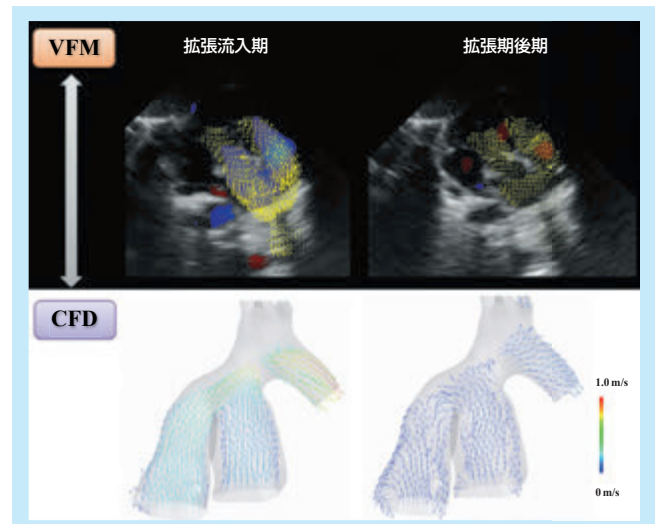


図7：VFMとCFDとの比較：小児先天性心疾患手術後(DKS手術後)大動脈内血流

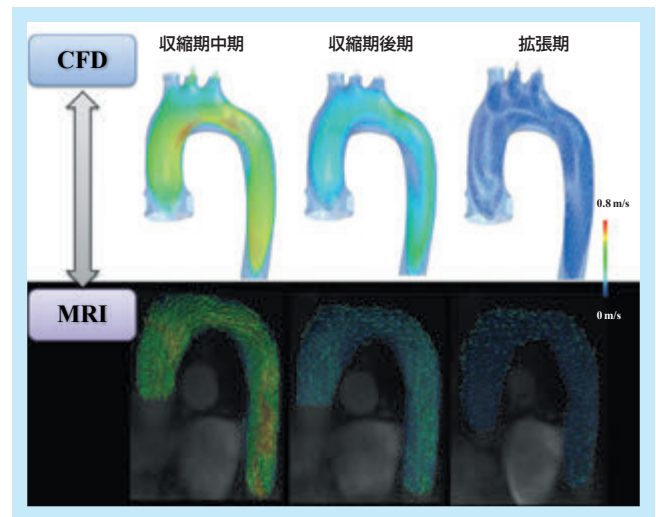


図8：CFDとMRIとの比較：健常人大動脈内血流

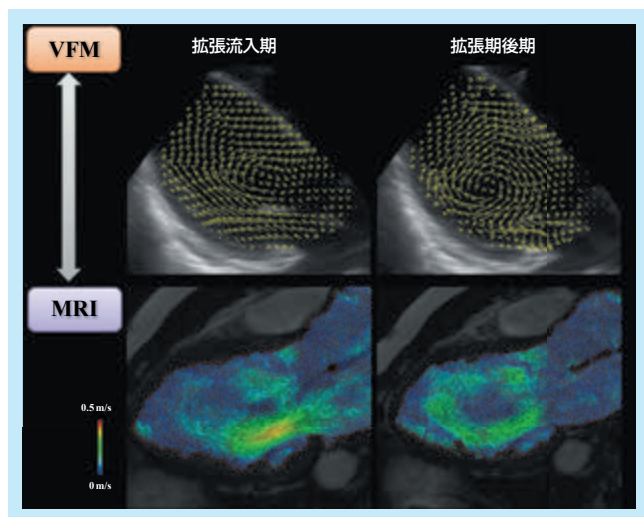


図6：VFMとMRIとの比較：拡張型心筋症における心内血流

## 参考文献

- 1) 板谷慶一, ほか: VFMの原理と臨床応用—超音波による血流可視化技術が循環器診療にもたらす新たな視点. Innervation, 26: 5-7, 2011.
- 2) Itatani K, et al.: Intraventricular flow velocity vector visualization based on the continuity equation and

- measurements of vorticity and wall shear stress. *Jpn J Appl Phys*, 52 : 07HF16, 2013.
- 3) 板谷慶一, ほか : シリーズ血流を診る・2 超音波VFM<sup>®</sup> (vector flow mapping). *検査と技術*, 41 : 1126-32, 2013.
  - 4) Garcia D, et al. : Two-dimensional intraventricular flow mapping by digital processing conventional color-Doppler echocardiography images. *IEEE Trans Med Imaging*, 29 : 1701-13, 2013.
  - 5) Kim HB, et al. : Echo PIV for flow field measurements in vivo. *Biomed Sci Instrum*, 40 : 357-63, 2004.
  - 6) Ohtsuki S, et al. : The flow velocity distribution from the Doppler information on a plane in three-dimensional flow. *J Visualization*, 9 : 69-82, 2006.
  - 7) Mehregan F, et al. : Doppler vortography: A color Doppler approach to quantification of intraventricular blood flow vortices. *Ultrasound Med Biol*, 40 : 210-221, 2014.
  - 8) Kheradvar A, et al. : Echocardiographic particle image velocimetry: a novel technique for quantification of left ventricular blood vorticity pattern *J Am Soc Echocardiogr*, 23 : 86-94, 2010.
  - 9) Sengupta PP, et al. : Emerging trends in CV flow visualization. *JACC Cardiovasc Imaging*, 5 : 305-316, 2012.
  - 10) Rodriguez Muñoz D, et al. : Intracardiac flow visualization: current status and future directions. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*, 14 : 1029-1038, 2013.
  - 11) Markl M, et al. : Co-registration of the distribution of wall shear stress and 140 complex plaques of the aorta. *Magn Reson Imaging*, 31 : 1156-62, 2013.
  - 12) Fukumoto Y, et al. : Localized elevation of shear stress is related to coronary plaque rupture: a 3-dimensional intravascular ultrasound study with in-vivo color mapping of shear stress distribution. *J Am Coll Cardiol*, 51 : 645-50, 2008.
  - 13) Itatani K, et al. : Influence of surgical arch reconstruction methods on single ventricle workload in the Norwood procedure. *J Thorac Cardiovasc Surg*, 144 : 404-14, 2012.
  - 14) Garcia D, et al. : Assessment of aortic valve stenosis severity: A new index based on the energy loss concept. *Circulation*, 101 : 765-71, 2000.
  - 15) Itatani K, Ono M. Blood flow visualizing diagnostic device. Patent WO 2013077013 A1
  - 16) Itatani K, Fluid dynamical considerations on the single ventricular physiology: Energetic optimization of the Fontan and Norwood procedure. 2011. PhD Thesis, the University of Tokyo, Tokyo, Japan.
  - 17) ACC/AHA 2006 Guidelines for the management of patients with valvular heart disease: 3.2.3 Chronic aortic regurgitation. Pp. e111-121.
  - 18) Bahlmann E, et al. : Prognostic value of energy loss index in asymptomatic aortic stenosis. *Circulation*, 127 : 1149-1156, 2013.
  - 19) Honda T, et al. : Quantitative Evaluation of Hemodynamics in the Fontan circulation: A cross-sectional study measuring energy loss in vivo. *Pediatr Cardiol*. 2013 Sep 4. [Epub ahead of print]
  - 20) Kim WY, et al. : Left ventricular blood flow patterns in normal subjects: a quantitative analysis by three-dimensional magnetic resonance velocity mapping. *J Am Coll Cardiol*, 26 : 224-238, 1995.
  - 21) 宮崎翔平, ほか : シリーズ血流を診る・3 MRI血流解析法の基本. *検査と技術*, 41 : 1218-23, 2013.
  - 22) Kvitting JP, et al. : Flow patterns in the aortic root and the aorta studied with time-resolved, 3-dimensional, phase-contrast magnetic resonance imaging: implications for aortic valve-sparing surgery. *J Thorac Cardiovasc Surg*, 127 : 1602-1607, 2004.
  - 23) Markl M, et al. : Time-resolved three-dimensional magnetic resonance velocity mapping of aortic flow in healthy volunteers and patients after valve-sparing aortic root replacement. *J Thorac Cardiovasc Surg*, 130 : 456-63, 2005.
  - 24) Qian Y, et al. : Computational hemodynamic analysis in congenital heart disease: simulation of the Norwood procedure. *Ann Biomed Eng*, 38 : 2302-13, 2010.
  - 25) Bluestein D, et al. : Intraluminal thrombus and risk of rupture in patient specific abdominal aortic aneurysm - FSI modelling. *Comput Methods Biomech Biomed Engin*, 12 : 73-81, 2009.
  - 26) 宮崎翔平, ほか : シリーズ血流を診る・5 コンピューターシミュレーション. *検査と技術* in-press.
  - 27) 宮崎翔平, ほか : 先天性大動脈疾患の血流シミュレーションにおける境界条件と乱流モデルの検討 日本流体力学会数値流体シンポジウム.
  - 28) Mangual JO, et al. : Comparative numerical study on left ventricular fluid dynamics after dilated cardiomyopathy. *J Biomech*, 46 : 1611-1617, 2013. radial scanning with parallel imaging of the head. *Journal of Medical Society of Toho University*, 60(4) : 198-203, 2013.