

超音波診断装置 LISENDO 880LE の Vector Flow Mapping 機能による 血管の Wall Shear Stress 測定

Vascular Wall Shear Stress Measurement Using Vector Flow Mapping Feature of Ultrasound System LISENDO 880LE

西山知秀 Tomohide Nishiyama / 荒井 修 Osamu Arai

石黒 俊 Suguru Ishiguro / 齋藤梨奈 Rina Saito

関 佳徳 Yoshinori Seki / 岡田 孝 Takashi Okada

株式会社 日立製作所 ヘルスケアビジネスユニット

ABSTRACT

Wall Shear Stress (WSS) は血流が血管壁をこする力で、血管の内皮細胞の健康状態に影響を与えることが知られており、WSSを簡便に評価する手法が期待されている。

本稿では、日立の超音波診断装置の血流解析アプリケーションVector Flow Mapping (VFM) による、新たなWSS測定手法を提案する。VFMでは、流体力学の質量保存則を用いて、血流速度のベクトルマップを算出し、これを流体解析してWSSを計算する。

頸動脈ファントムを用いた in vitro 実験により提案手法の妥当性を検証し、

臨床評価により、VFMを用いたWSSの評価がプラークの破綻リスクの指標となる可能性が示唆された。

今後の展望として、初期の動脈硬化の評価や、適切なWSSに管理することで動脈硬化の予防に寄与できる可能性などが考えられる。

Wall Shear Stress (WSS) is the tangential drag force for vessel wall produced by blood flow. It is known the conditions of endothelial cells is affected by WSS, so the method evaluating WSS conveniently is expected.

In this report, we propose the new measurement method of WSS using Vector Flow Mapping (VFM), blood flow analysis application of Hitachi's ultrasound system. In VFM, the vector map of blood velocity is calculated based on law of conservation of mass in fluid dynamics, and WSS is calculated by fluid analysis of this map. We verified the validity of proposed method by in vitro experiment using carotid artery phantom. By clinical evaluation, it was suggested that there was a possibility WSS evaluation using VFM was the indicator of plaque rupture risk.

In future prospect, there is also expectation that WSS evaluation using VFM contributes to evaluate the first stage of arteriosclerosis and prevent arteriosclerosis by managing WSS adequately.

Key Word: Vector Flow Mapping(VFM), Wall Shear Stress , Color Doppler, Arteriosclerosis, Carotid Artery

はじめに

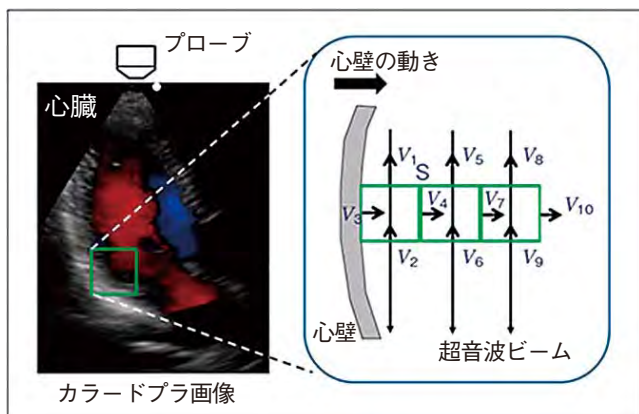
社会全体の高齢化が進み、循環器疾患への関心が高まる中、超音波診断装置には今まで以上に効率的かつ正確な診断情報の提供が求められている。日立の超音波診断装置LISENDO^{※1} 880LEが提供する「血流を描き出す」アプリケーションは、全身の血管に対する形態・動態・機能をより詳細に把握可能にしている。その中でも、超音波で血流動態を正確に把握するための独自アプリケーションVector Flow Mapping (VFM) は、従来のドプラ測定では超音波送受信方向の速度しか測れなかった血流測定を、2次元血流ベクトル分布として測定できるようにしたものである¹⁾。

本稿では、VFMによって得られた血流情報から血管壁に作用するせん断応力 (Wall Shear Stress : WSS) を推定する技術²⁾を紹介する。WSSは、血流が血管壁をこする力であり、血管の内皮細胞の健康状態に影響を与える³⁾。WSSが低いと、動脈硬化が進行することが知られる一方、WSSが高いこともまたプラーク内出血と関連することが知られ、リスクとなるとされる。WSSを評価することにより、動脈硬化から脳卒中発症のリスク評価まで幅広く評価できる可能性や、適切なWSSに管理することで動脈硬化の予防に寄与できる可能性があり、WSSを簡便に評価する手法が期待されている。

Vector Flow Mapping (VFM) for Vascular

日立は2013年に、心臓の血流速度ベクトルを表示する技術としてVFMを製品化した。VFMでは、従来のカラードプラで検出できなかった、ビームに直交する速度成分の推定が可能となる。これによって、血流方向にとらわれず、局所血流を速度ベクトルとして表示できる。さらに、速度ベクトルを流体力学的に解析することで、心腔内の相対的圧較差 (Relative Pressure)、血流のエネルギー損失量 (Energy Loss)、渦度 (Vorticity)、壁に対するせん断応力 (WSS) などの指標が

図1 質量保存則 (連続の方程式) に基づく直交方向速度成分の算出



1. カラードプラより流入速度 V_2 、流出速度 V_1 が分かる。
2. スペックルトラッキングより壁面の速度 V_3 が計算できる。
3. 質量保存則により流出速度 V_4 が計算できる。
$$V_4 = (V_2 + V_3) - V_1$$
4. 次のビームは、壁面の速度の代わりに V_4 を用いることで順次計算できる。

得られるため、心臓の血行動態の新たな評価方法として期待されている⁴⁾。

今回われわれは、動脈硬化の早期発見をモチベーションとして、頸動脈の血流動態を把握するためのアプリケーション「VFM Vascular」を製品開発した。最初のステップとして、前述した指標のうち最も動脈硬化と関係が深いWSSを簡便に測定できる超音波診断装置を開発目標に設定した。血管向けに、超音波プローブは高周波リニア型のL441と組み合わせて動作するようにした。また、血管向けのベクトル計算方法を考案し、新たな撮像シーケンスを開発した。

VFM Vascularの原理

VFMでは、流体力学の質量保存則 (連続の方程式) を用いて、血流速度のベクトルマップを求める (図1)。質量保存則によれば、ある関心領域に流入する血流量と流出する血流量が等しい。関心領域における血流量を超音波ビーム方向とそれに直交する方向に分けて考えると、ビーム方向成分はカラードプラで測定できる。ビーム直交成分は、超音波ビームに直交する演算経路上で逐次的に連続の方程式を解くことで求められる。最終的には、ビーム方向成分と直交成分を合成して得られる流量ベクトルを関心領域の断面積で除算することで、速度ベクトルを求めることができる。

連続の方程式を解くには境界条件が必要になる。境界条件は、心臓のVFMにおいては、超音波画像に描出された心筋をスペックルトラッキングして求めた心壁の動きを用いている⁵⁾。しかし、頸動脈のVFMにおいては、対象が円筒形状であるため、心臓の場合と同様に血管壁を境界条件としただけでは、境界条件を持たない演算経路ができてしまい、方程式を解けない。そこでわれわれは、追加の境界条件を得るために補助的に二方向ドプラ法を用い、Main ビーム (通常のカラードプラ用の超音波ビーム) とそれに角度をつけた3本のCross ビームを含む新たな撮像シーケンスを開発した (図2)。このシーケンスでの撮像によって、Cross ビームがMain ビームと交差する点の血流速度ベクトルが求められる。

図2 VFM Vascularの撮像シーケンス

二方向ドプラ法により、Main ビームとCross ビームの交点における血流速度ベクトルを測定する。

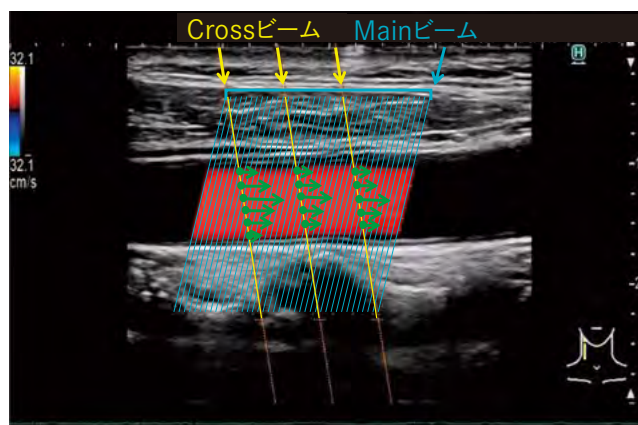
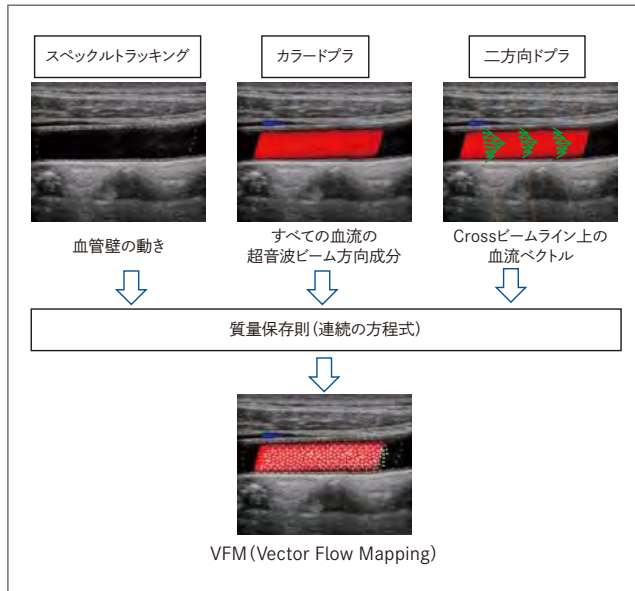


図3 VFM Vascularにおけるベクトル演算



つまり、VFM Vascularでは、スペクトルトラッキングで求めた血管壁の動きと、二方向ドプラ法で求めた3本のCrossビームライン上の血流を境界条件として、連続の方程式を解いて血流速度のベクトルマップを算出する(図3)。なお、二方向ドプラ法単独でもCrossビームの密度を上げて血流速度ベクトルを求めることは可能だが、それと比較して本手法は、通常のカラードプラ用のシーケンスにCrossビームを3本追加しただけで済むためフレームレートを保ったまま撮像でき、連続の方程式を用いて流速伝播を考慮に入れた演算をしているため広い視野で血流速度ベクトルを求められる、などのメリットがあると考えられる。

Wall Shear Stress (WSS) の計算

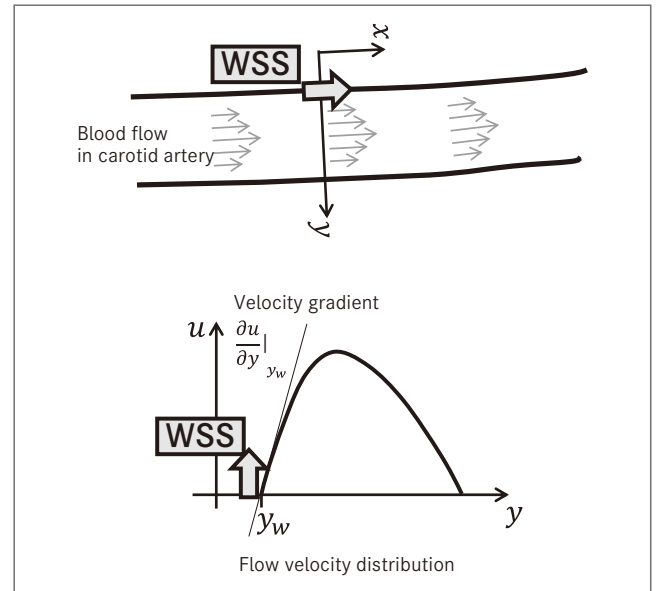
VFM Vascularで得た血流速度ベクトルを流体力学解析することで血管壁のWSSが計算できる。WSSの定義式を式(1)に示す。WSSは、図4に示すような壁近傍における壁面速度勾配と血液の粘度 μ の積で得られる。

$$\text{式(1)} \quad WSS = \mu \left. \frac{\partial u}{\partial y} \right|_{y_w}$$

ただし、 y_w は壁面のy座標を表す。血液の粘度を定数として扱うものとする、WSSは血流速度ベクトル分布から壁面速度勾配を求めることで推定できる。しかし、超音波による血流計測は、壁近傍の精度低下、計測値のばらつき、壁面位置の不確定性などの誤差要因を含む。WSS計測の実用化における課題は、これらの誤差要因に対しロバスト性を有する計測法の確立である。そこで、WSS計測で重要となる壁近傍の血流を平行流モデルで置き換え、実測値からモデルの係数を決定することによりWSSを推定する²⁾。

図5に、頸動脈における収縮期のWSSの表示例を示す。WSSの値が大きい箇所を赤色系で、小さい箇所を青色系で表示しており、血流が血管壁をこする力の分布を把握可能で

図4 Wall Shear Stress



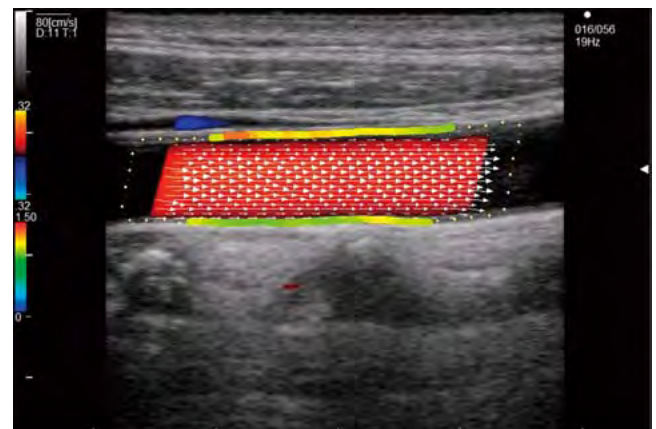
ある。また、動画として数心拍分のベクトルおよびWSSの解析ができるので、収縮期と拡張期の間で変化する様子を把握可能である。さらに、WSSの値を外部ファイルに出力することもできるので、WSSの定量的な把握も可能である。

血流ベクトル分布を得るには、従来、MRIや血管造影を用いて取得した血管形状に基づいて三次元流体解析を行う方法が使われていたが、これらの方法と比べて、超音波診断装置のVFM技術を用いれば簡便に高精度なWSSを推定できる。

妥当性の確認

WSSが1.5Pa以上で血管壁に適度な刺激を与える血流動態は動脈硬化を防ぐ効果があるとされ、反対にWSSが0.4Paを下回る血流では動脈硬化が進行するとの報告がある⁶⁾。動脈硬化診断の実現には、複雑形状の血管で局所的な低WSS領域を発見することが要求され、高リスク群の偽陰性判定率を5%に抑えるには、計測誤差を35%以内とすることが求められる⁷⁾。

図5 VFM：頸動脈におけるWall Shear Stressの表示例



WSSの計測性能は、ヒト3D-CADデータから作成した頸動脈ファントムを用いたin vitro実験により評価した(図6)。その際、Particle Image Velocimetry (PIV) で計測した速度分布から算出されるWSSを真値とした(図7)。超音波撮像とレーザー光学系の2系統で計測するため、ファントムは透過性軟質ウレタン製とし、散乱体を混ぜたポリエチレングリコールを1Hzの拍動流で流した。真値との比較の結果、提案手法は平均誤差3%、標準偏差27%であり目標値を達成した(図8)。

図6 ヒト頸動脈模擬ファントム



図7 Particle Image Velocimetry (PIV) による流体計測

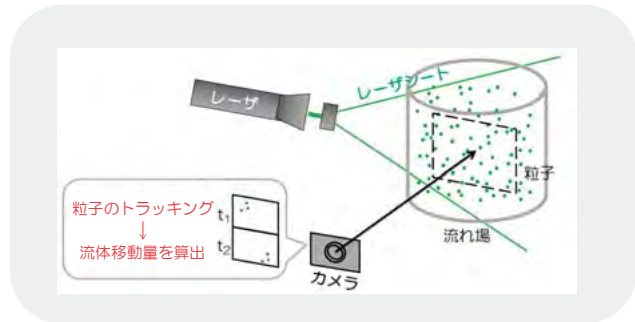


図8 WSS測定値の相関：PIVとVFMの比較

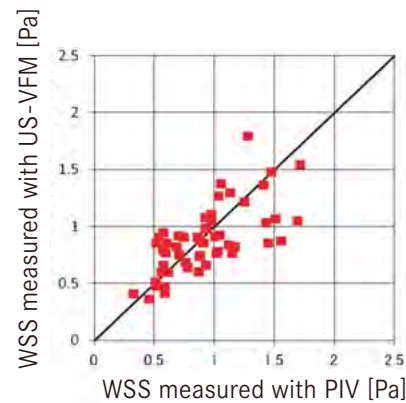
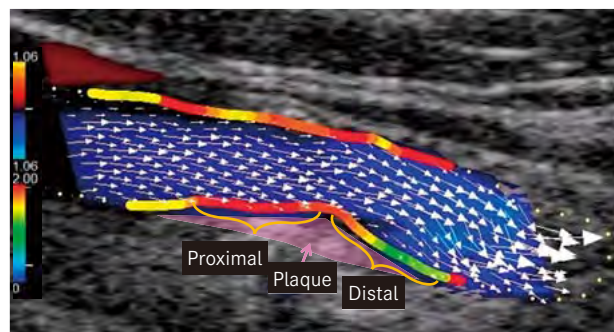


図9 臨床応用例：頸動脈狭窄症

画像提供：国立循環器病研究センター 脳卒中集中治療科医長 山上宏先生



臨床画像例

図9に、頸動脈狭窄症におけるWSSの画像を示す。拍動流に伴う血流渦およびWSSの変化をカラー表示で可視化することができ、プラークの部位ごとのWSSの定量評価も可能で、WSS値はプラーク近位部で遠位部に比して有意に高かった。これにより頸動脈プラーク表面におけるWSS値を定量的に評価可能であり、VFMを用いたWSSの評価がプラークの破綻リスクの指標となる可能性がある⁸⁾。

今後の展望として、初期の動脈硬化評価などができる可能性や、適切なWSSに管理することで動脈硬化の予防に寄与できる可能性などが考えられる。

おわりに

本稿では、日立の超音波診断装置LISENDO 880LEのアプリケーションVFM Vascularによる頸動脈のWSS測定手法の開発について、原理、開発内容、そして妥当性検証結果を紹介した。WSS測定の実現により、動脈硬化が進行するリスクやプラーク破綻のリスクが高い血管を早期に発見できる可能性が考えられ、本アプリケーションは将来的に脳梗塞や心筋梗塞の予防に役立つと期待している。今後、医師と協力して臨床データを積み重ねて、臨床価値を実証していきたい。

謝辞

本技術の開発にあたり、基礎技術検討を進めていただいた株式会社日立製作所 研究開発グループ 研究員の田中智彦氏、浅見玲衣氏、清水一力氏に深く感謝申し上げます。

販売名：超音波診断装置 ALOKA^{*2} LISENDO 880
医療機器認証番号：228ABBZX00092000
ALOKA LISENDO 880はLISENDO 880LEと呼称します。
製品の改良により予告なく記載されている仕様が変更になることがあります。

※1 LISENDO、※2 ALOKAは株式会社日立製作所の登録商標です。

参考文献

- 1) 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(7):07HF16, 2013.
- 2) Shimizu M, et al. : Wall shear stress measurement method based on parallel flow model near vascular wall in echography. Jpn J Appl Phys, 56(7S1):07JF08, 2017.
- 3) 谷下一夫：動脈硬化に関するマイクロナノバイオメカニクス。脈管学, 46(6):735-41, 2006.
- 4) 上嶋徳久: Vector Flow Mapping. 超音波検査技術, 39(3):266-9, 2014.

- 5) Kusunose K, et al. : Echocardiographic image tracker with a speckle adaptive noise reduction filter for the automatic measurement of the left atrial volume curve. Eur Heart J Cardiovasc Imaging, 15(5):509-14, 2014.
- 6) Malek AM, et al. : Hemodynamic Shear Stress and Its Role in Atherosclerosis. JAMA, 282(21):2035-42, 1999.
- 7) 清水一力, ほか：血管壁近傍の平行流モデルに基づく Wall Shear Stress 分布の超音波計測. 超音波医学, 44(Suppl):444, 2017
- 8) 阿部宗一郎, ほか：Vector Flow Mappingを用いた頸動脈プラークにおける wall shear stress 評価の試み. 超音波医学, 45(Suppl):641, 2018.