2B26

光電脈波計測と超音波計測融合シミュレーションによる血圧と血流の同時計測システムの開発（開発システムによる Wave Intensity の評価）

Development of Simultaneous Analysis System for Blood Pressure and Flow Using Photoplethysmography and Ultrasonic-Measurement-Integrated Simulation (Evaluation of Wave Intensity Using Developed System)

非 〇曾根 周作（東北大院） 正 早瀬 敏幸（東北大流体研）
正 船本 健一（東北大流体研） 正 白井 敦（東北大流体研）

Shusaku SONE, Graduate School of Biomedical Engineering, Tohoku University 6-6-4 Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai
Toshiyuki HAYASE, Institute of Fluid Science, Tohoku University
Kenichi FUNAMOTO, Institute of Fluid Science, Tohoku University
Atsushi SHIRAI, Institute of Fluid Science, Tohoku University

Key words : Simultaneous Analysis System for Blood Pressure and Flow, Photoplethysmography, Ultrasonic-Measurement-Integrated Simulation, Electrocardiogram, Carotid artery, Wave Intensity

1. 緒言

我が国の死因の約 25%は循環器系疾患が占める。循環器系疾患の発症・進展は血行力学と関連があるがわかっていない点も多い。循環器系疾患の機序の解明のためには血圧と血流を同時に計測する必要があると考えられ、それらを非侵襲、簡便に計測できる新しいシステムが望まれる。著者らは血管内の血流やせん断応力等の血行力学の情報を再現する超音波計測融合シミュレーション（以下、UMI シミュレーション）を提案してきた⁽¹⁾。さらに、今まで困難であった連続血圧測定に対して、頸動脈部位における血管直径変化と動脈内圧との間の相似関係⁽²⁾を利用することで、光電脈波センサから得られるデータから血圧の正確な再現を試みた⁽³⁾。そして頸動脈内の血圧と血流を対象として、光電脈波と UMI シミュレーションによる血圧と血流の同時解析システムを開発し、本システムにより頸動脈内の血流を解析、再現し、Wave Intensity(WI)を求めた⁽⁴⁾。また光電脈波によって得られる血圧波形と UMI シミュレーションによって計算される血流波形の時相を一致させるために心電信号を超音波診断装置と脈波計測装置に同時に送信するシステムを構築するとともに、血流速度の変化を正確に取得できるようにサンプリングレートを改善した⁽⁵⁾。

本報告では改良システムに対して光電脈波の時間応答性と線形性の評価を行うとともに、実際に頸動脈部位において測定を行って WI を求めた。

2. 方法

解析対象は、23 歳男性ボランティアの総頸動脈内の血圧と血流とする。以下の測定は東北大学流体科学研究所倫理委員会の承認の下で行った。測定システムを図 1 に示す。時相を同期させるための心電信号は光電脈波回路と超音波診断装置に同時に送られる。UMI シミュレーションを用いて上流端断面平均流速および血流場を、光電脈波データを用いて血圧波形を得るために、超音波リニアプローブによって取得した 7 心拍分のカラードプラ画像を血流場の解析に、また同時刻での 7 心拍分の光電脈波データを圧力の解析に用いる。血圧波形の取得方法について述べる。Beer-Lambert 法則により血管内の容積の変化は、光の検出強度としてフォトランジスタを用いて脈波波形として電圧値で得られる。このデータに血圧計であらかじめ得られた収縮期血圧(118mmHg)および

Fig.1 Modified simultaneous analysis system for blood pressure and flow velocity

拡張期血圧値(75mmHg)で軟正し、血圧変動波形を得る。次に血流波形は UMI シミュレーションの結果として得られる。基礎方程式は、非定常非圧縮性ナビエ・ストークス方程式および圧力方程式であり、超音波計測および数値シミュレーションにより得られるドプラ速度を比較し、その誤差に比例した、仮想的な体積力を基礎方程式に加える⁽¹⁾。Wave Intensity(WI)は、循環系の任意の一点での血圧を P 、血流速度を U とすると、次式で定義される。

$$WI = \left(\frac{dP}{dt} \right) \left(\frac{dU}{dt} \right) \quad (1)$$

WI は動脈内のある点で、前進波が優勢か、後退波が優勢かを簡単に判定できる指標であり、血管内の波動伝播現象の解明に利用し始められているが、圧力と流速のわずかな時相の不一致が WI の結果に大きく影響を与えるため、時相を正確にあわせることは非常に重要である。

3. 結果と考察

図 2 に心電図および頸動脈部位の脈波の計測波形を、図 3 に超音波計測でのカラードプラ画像を示す。両図の四角枠に示すように手を上げることで心電波形上に特徴をもった信号を印加し、その信号を時間の基準として超音波計測と光電脈波計測の時相を合わせた。心電および光電脈波のサンプリングレートは 200Hz、超音波計測のサンプリングレートは 34.39Hz である。また、データ遅延の問題を検証するために、光電脈波回路に方形波信号を入力し、その立下りから入力に対する出力応答を検討したところ、2.2 μ s の遅れであった。また検出する光強度と出力電圧との関係は線形であること

Fig.2 ECG (raw), ECG (noise removed) and pulse wave in a carotid artery

を確認した。

図 4 に血流動態の UMI シミュレーション結果を示す。通常のシミュレーションに比べ UMI シミュレーションの結果は複雑な流れ場を再現できている⁽⁴⁾。

図 5 に心電、血圧、血流速、血圧と血流速の微分、および WI の時間変化を示す。ゲインの違いが平均流速 U 及びその微分に明瞭に現れることが分かる。また前報⁽⁴⁾に比べ流速の変化が高サンプリングレートで取得できるようになり、WI も拡張期領域の小さな変化を取得できるようになった。頸動脈部位における特徴的な WI 波形⁽²⁾を有していることから時相の不一致の問題も小さいと考えられるが、時相の ms オーダーの違いが WI の結果に大きく影響を与えるため、超音波計測の時間遅れの評価が今後必要である。

4. 結言

血圧と血流の同時計測システムにおいて、光電脈波によって得られる血圧波形と UMI シミュレーションによって計算される血流波形の時相を高精度にあわせるために心電信号を超音波診断装置と脈波計測装置に同時に送信する機能を付加し、また血流速度の変化を正確に取得できるようにサンプリングレートの改善を行った改良システムに対して、光電脈波の時間応答性と線形性の評価を行うとともに、実際に頸動脈部位において測定を行って WI を求めた。

Fig.5 ECG, pressure, velocity, their derivatives and WI.

Fig.3 Color Doppler image and ECG(raw) in a carotid artery

Fig.4 Blood flow at systolic phases by ordinary simulation (top) and UMI simulation (bottom)

参考文献

- (1) Funamoto K, et al., Measurement- Integrated Simulation of Real Blood Flow in the Aorta,” Ann. Biomed. Eng., Vol. 33, pp. 415-428, 2005.
- (2) Sugawara M, et al., “Relationship between the Pressure and Diameter of the Carotid Artery in Humans,” Heart Vessels, Vol. 15, pp. 49-51, 2000.
- (3) 曾根ら, 他 2 名, 超音波 M モードイメージングと光電容積脈波センシングによる脈波同定の比較, 日本超音波医学会 第 86 回学術集会プログラム・講演抄録集, Vol. 40, (2013), 429.
- (4) Sone S, et al., Simultaneous Analysis System for Blood Pressure and Flow Using Photoplethysmography and Ultrasonic-Measurement-Integrated Simulation. *Proceeding of 35th IEEE EMBS Annual Conference*. Osaka, Japan, 1827-30, 2013.
- (5) Sone S, et al., Improvement of Simultaneous Analysis System for Blood Pressure and Flow Velocity Using Photoplethysmography and Ultrasonic-Measurement-Integrated Simulation. *Proceeding of 7th East Asian Consortium on Biomedical Engineering Student Workshop*. Taipei, Taiwan, 2013.