

修士学位論文要約 (平成24年3月)

脈波伝播特性の高時間分解能超音波計測に関する研究

本江 和恵

指導教員：金井 浩 研究指導教員：長谷川英之

Study on Ultrasonic Measurement of Pulse Wave Propagation at High Temporal Resolution

Kazue HONGO

Supervisor: Hiroshi KANAI, Research Advisor: Hideyuki HASEGAWA

The pulse wave velocity (PWV) is the propagation velocity of the pressure wave along the artery due to the heartbeat. The PWV gets faster with the progress of arteriosclerosis and, thus, is used as a diagnostic index of arteriosclerosis. In this study, the minute vibration velocities of the human carotid arterial wall were measured on the 72 points along the longitudinal direction at intervals of 0.2 mm and the propagation delays among the velocity waveforms were estimated using their phases. It is very difficult to estimate small time delays from the phases of velocities measured at only two points along the artery because small errors in the phases of the vibrations lead to a significant pulse wave velocity estimation error. Each velocity waveform is composed of a forward component and a component reflected by the distal position of the artery. To calculate the phase of each frequency component, the frequency analysis was applied to the minute vibration velocities. There were components showing the phase delay corresponding to the propagation from proximal to distal (forward wave) and that from distal to proximal (reflected wave). The PWV for each component was estimated by applying the least-square method to the phases measured at all points along the arterial wall. To improve the time resolution in analysis of the pulse wave, high frequency components in the velocity waveforms were amplified using the acceleration waveforms, which were obtained by differentiating the velocity waveforms. Using the acceleration waveforms, the PWVs in the frequency range from 17 Hz to 66 Hz were stably estimated to be 5.7 – 7.9 m/s, which were in good agreement with those reported in literature.

1. はじめに

近年、食生活の欧米化や高齢化の進展により動脈硬化症患者が増加している。動脈硬化症とは、動脈壁が肥厚し弾性を失い硬化するもので心筋梗塞や脳梗塞等の重篤な疾患につながる。

脈波伝播速度(PWV)は心臓からの血液の駆出に伴い血管を伝播する脈波の速度のことで、動脈硬化が進展するほど速くなることから診断の指標として用いられている。本研究では、ヒト頸動脈壁上局所多数点で微小振動速度波形を計測して周波数解析を行い、各点で計測した速度波形の位相を用いて脈波の伝播遅延時間を推定する。

脈波が心臓から末梢へ伝播する際に反射が生じるため、微小振動速度波形も進行波と反射波から構成されている。微小振動速度波形を数十ms程度の時間窓を用いて周波数解析し、各周波数成分の位相を1心周期内の各時刻で算出することで、中枢側より末梢側で位相が遅れている成分(進行波)と末梢側より中枢側の位相が遅れている成分(反射波)を判別する。全ての計測点で得られた速度波形の位相情報に最小二乗法を適用することで進行波・反射波

それぞれの脈波伝播速度を推定する。

2. 原理

本報告では、図1で示すようにヒト頸動脈壁に位相差トラッキング法¹⁾を適用し0.2mm間隔72点で微小振動速度波形を計測した。位相差トラッキング法は、超音波プローブから送信された超音波パルスが拍動により微小振動している動脈壁で反射され再び超音波プローブに戻るまでの伝播時間による受信超音波信号の位相遅れの変化からプローブと血管壁の間の距離変化を決定するもので、微小振動速度を高精度に計測することが可能である。

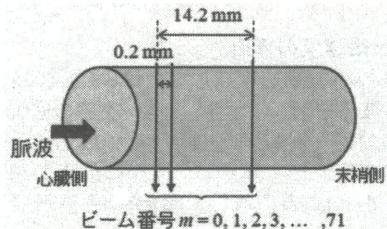


図1 動脈壁微小振動速度の計測方法

ビーム形成方法には広い送信ビーム内に複数の受信ビームを形成する Parallel Beam Forming²⁾ を用いており、送信回数を減少させることで 3472 Hz の高フレームレートを実現している。

72 点分の動脈壁微小振動速度を離散フーリエ変換することで位相を算出し、その位相分布より進行波、反射波を判別する。また各成分について脈波伝播速度を算出する。

3. 動脈壁微小振動速度波形の解析結果

局所 72 点で計測した微小振動速度波形をハンギング窓を掛けて離散フーリエ変換し、計測位置・時刻ごとに各周波数成分 $f = 10 \sim 80$ Hz の位相を推定して速度波形を構成する進行波、反射波成分を判別した。図 2 にハンギング窓の窓幅を $w = 0.1$ s とし $f = 30$ Hz に着目した場合の駆出期のピーク部の位相分布を示す。

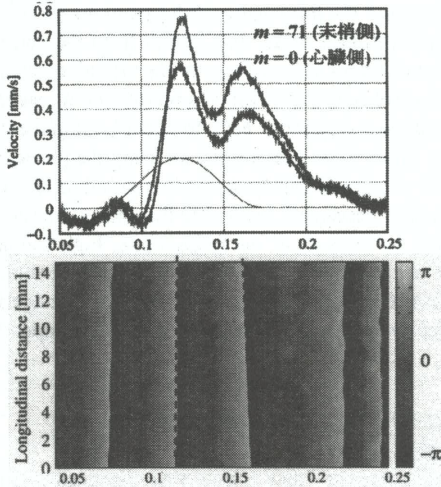


図 2 計測位置・時刻ごとの位相分布 ($f = 30$ Hz)。

$t = 0.12$ s 付近のピークでは計測位置が下流になるに従い位相が遅れるので進行波成分、 $t = 0.16$ s 付近のピークでは計測位置が下流になるに従い位相が進むので反射波成分であることが分かる。各周波数において同様の傾向が見られた。着目する周波数が高くなるほど位相のばらつきが大きくなる傾向が見られた。

4. 脈波伝播速度の算出

動脈壁微小振動速度波形を微分した血管径方向の加速度波形を図 3 に示す。ハンギング窓の窓幅を加速度波形のピーク幅と同程度の $t = 0.06$ s とし、速度波形、加速度波形で算出した位相に最小二乗法を適用して得られた近似直線の傾きから脈波伝播速度を算出した。

速度波形のピーク部 $t = 0.123$ s と加速度波形のピーク部 $t = 0.112$ s において $f = 17, 33, 50, 66$ Hz に着

目して算出した脈波伝播速度を図 4 に示す。両波形のピーク部で算出した脈波伝播速度を比較すると、加速度波形のピークから算出した脈波伝播速度の方が速度波形のピークから算出した脈波伝播速度よりも周波数によるばらつきが少なく、より文献値³⁾に近い値が得られた。加速度波形は速度波形の微分であり高周波が増幅されて波形が鋭くなることで各成分が分離しやすくなり信頼性の高い脈波伝播速度が算出できると考えられる。

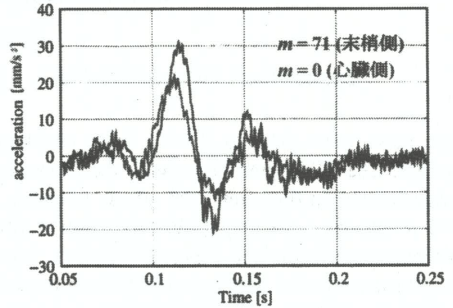


図 3 ビーム番号 0, 71 の径方向加速度波形。

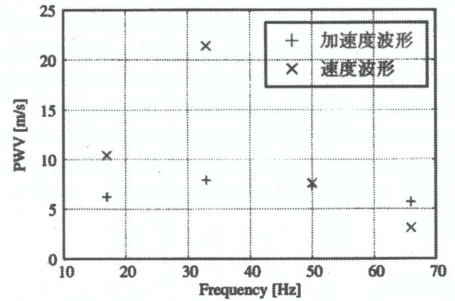


図 4 各波形から算出した脈波伝播速度。

5. まとめ

ヒト頸動脈壁上の局所多数点で計測した動脈壁微小振動速度とそれを微分した径方向加速度波形を離散フーリエ変換し、計測位置・時刻ごとの位相の分布より波形を構成する進行波、反射波成分を判別した。また、各波形のピーク時刻における計測位置に対する位相分布の近似直線より脈波伝播速度を算出し、高周波成分が強調された加速度波形を用いることにより 15 mm 程度の局所において文献値と同様の脈波速度を安定に計測することができた。

文献

- 1) H. Kanai, M. Sato, Y. Koiwa, and N. Chubachi, IEEE Trans. UFFC, 43 (1996) 791.
- 2) H. Hasegawa and H. Kanai, IEEE Trans. UFFC, 55 (2008) 2626.
- 3) 非侵襲的動脈硬化診断研究会: 動脈硬化の診断のガイドライン, 共立出版, 東京 (1999) 72.