

氏名（本籍地）	そね しゅうさく 曾根 周作
学位の種類	博士（医工学）
学位記番号	医工博 第 35 号
学位授与年月日	平成27年 3月25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科、専攻	東北大学大学院医工学研究科（博士課程）医工学専攻
学位論文題目	光電脈波計測と超音波計測融合血流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の開発
論文審査委員	（主査）東北大学教授 早瀬 敏幸 東北大学教授 西條 芳文 東北大学教授 石川 拓司 東北大学准教授 太田 信

論文内容の要旨

第1章 序論

我が国の死因の30%は循環器系疾患が占める。動脈硬化症はこれら疾患の主因であるため、生活習慣の是正や動脈硬化症の早期診断は大変重要である。動脈硬化は血行力学と密接な関係があるが、動脈内の血流の実体は心臓の拍動によって生じる波動であり、心臓からの進行波や末梢部位での反射により生じる後退波により、血管内皮細胞に作用する圧力とせん断応力の時間変化の位相は異なる。すなわち、進行波では圧力の微分 dP/dt と壁せん断応力の微分 $d\tau/dt$ は同符号であり、後退波では異符号となる。これらの位相の異なる圧力とせん断応力の時間変化が内皮細胞に与える影響は未知である。これまで血管壁に作用する圧力とせん断応力の位相を考慮して血圧場と血流場を同時に解析した研究はほとんど行われていない。循環器系疾患の機序の解明や高度診断法の開発には、血圧場と血流場の位相の変化まで考慮した同時解析が重要であると考えられる。

本論文は、動脈硬化の初生および進展と血行力学の関係を、血管内を伝搬する進行波と後退波に対応する位相を有する血圧場と血流場が血管内皮細胞に与える影響の面から解析可能な、光電容積脈波センサと2次元超音波計測融合シミュレーションを用いた血圧と血流の同時解析システムを開発するために行った一連の研究を取り纏めたものである。

第2章 2次元超音波計測融合血流解析システムの開発

血圧と血流の同時解析システム開発の基礎となる2次元超音波計測融合(2D-UMI)血流解析システムを開発することを目的とし、研究を行った。2D-UMI血流解析システムでは、超音波計測データと血流場の数値シミュレーションから血管内の2次元血流場を再現する。超音波計測データから血管形状を自動抽出した後、計算格子を生成し、計算領域内のドプラ速度データから上流端流速を推定しながら、2D-UMIシミュレーションを実行し、得られた解析結果をPC上に可視化するシステムを構築した。健常、動脈硬化、狭窄を含む5例の頸動脈の超音波カラードプラ計測の臨床データを用いた解析結果の可視化を行って、本システムの有効性を明らかにした。種々の上流境界速度分布条件を用

いた場合の、本解析と通常の数値シミュレーションとの非定常流動場の解析結果の比較を行った結果、通常のシミュレーションでは正確な速度分布を与えることで解析精度は改善されるが、2D-UMI シミュレーションでは上流端速度分布の影響はほとんどなく、さらに超音波計測による上流端速度分布を与えた通常のシミュレーションに比べて大幅に誤差が小さいことが明らかとなった。また、上流端流速推定を行なうことが正確な流れ場の再現に重要であることが示唆された。

第3章 光電容積脈波計測と超音波計測融合血流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

光電容積脈波センサと 2D-UMI シミュレーションによる血圧と血流の同時解析が可能なシステムを構築し(図 1)、頸動脈における解析を行って Wave Intensity(WI)により特定された進行波と後退波に対応する時相における血流場の特徴を明らかにすることを目的として研究を行なった。Water hammer 理論の結果との比較により、本システムは誤差 10 ms 以内の精度で血圧と血流の同時解析が可能であることが示された。本システムによりヒト左総頸動脈の血圧と血流の同時解析を行なって、WI により特定された進行波と後退波に対応する 2 次元非定常流動場の特徴を調べた結果から、2D-UMI シミュレーションと通常のシミュレーションで従来可能性が指摘されていた逆流に伴うストップ流れが再現された。平均 Wall shear stress(WSS)の収縮期ピークにおいて、2D-UMI シミュレーションの平均 WSS の値は通常のシミュレーションによる値よりも大きくなり、また 2D-UMI シミュレーションによるピーク時の位相は通常のシミュレーションより遅れた結果となった。WI の結果から、通常のシミュレーションでは、進行波優勢のとき WSS が最大となるが、2D-UMI シミュレーションでは後退波優勢のとき WSS が最大となっており、その時の両者の流れ場の状態は異なっていた(図 2)。これらの結果から、両シミュレーションの結果は、頸動脈内の波動伝播が血管内皮細胞に与える影響の評価に関して異なる結果を与える可能性があることが示唆された。

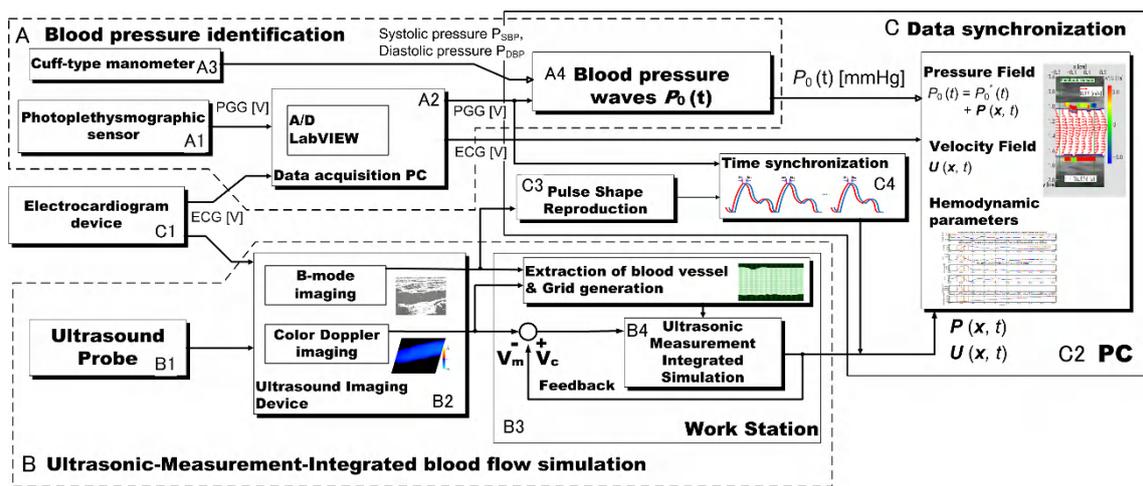


図 1 開発した光電容積脈波計測と 2 次元超音波計測融合(2D-UMI)シミュレーションによる血圧と血流の同時解析システム

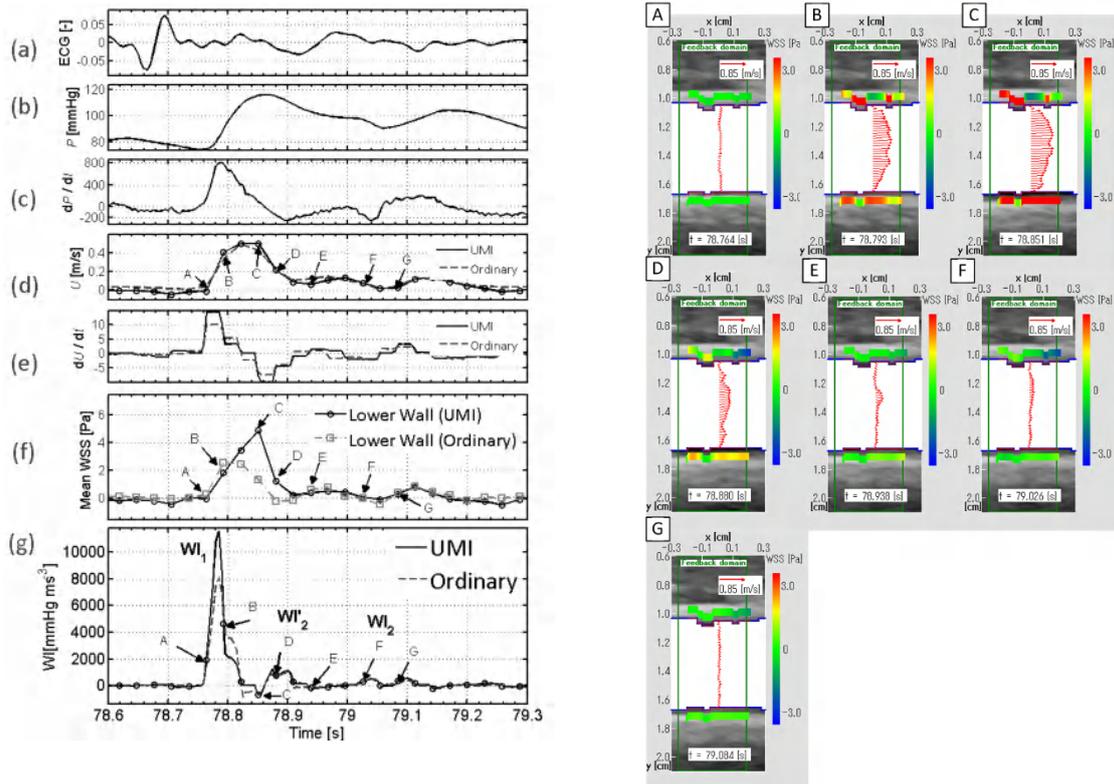


図 2 左: (a)心電図, (b)圧力, (c)圧力の微分, (d)上流端流速, (e)上流端流速の微分, (f)空間平均 WSS, (g) WI の時間波形 右: 左の A-G に対応する 2D-UMI シミュレーションによる流れ場

第 4 章 超音波計測融合血流シミュレーションによる血圧と血流の簡易同時解析システム

光電容積脈波センサの代わりに超音波 B モード画像を用いて、血圧波形を再現する、超音波診断装置と 2D-UMI シミュレーションによる簡易な血圧と血流の同時解析システムの開発を目的として研究を行なった。血圧波形は、3 章で血圧測定と超音波計測の時刻の同期処理で用いた、B モード画像に対して平均血管径の時間変化から血圧波形を求める方法を用い、血流速度場は、3 章と同様に超音波カラードプラデータを用いて 2D-UMI シミュレーションより求める簡易システムを構築した。簡易システムの画像脈波は、超音波計測の時間および空間分解能が低い問題があるが、簡易システムとオリジナルシステムによる脈波と WI の解析結果から、脈波と WI の振幅値には若干差はあるものの、傾向として両者は類似していることが分かった。得られた結果から、WI により特定された進行波と後退波に対応する 2 次元非定常流動場の解析で、画像脈波を用いた簡易システムは有効であることが示された。

第 5 章 結論

本論文で得られた研究成果を以下に示す。第 2 章では、血圧と血流の同時解析システム開発の基礎となる 2 次元超音波計測融合(2D-UMI)血流解析システムを開発した。第 3 章では、光電容積脈波センサと 2D-UMI シミュレーションによる血圧と血流の同時解析が可能なシステムを構築し、頸動脈における解析を行って Wave Intensity(WI)により特定された進行波と後退波に対応する時相における血流場の特徴を明らかにした。第 4 章では、光電容積脈波センサの代わりに超音波 B モード画像を用いて、血圧波形を再現する、超音波診断装置と 2D-UMI シミュレーションによる簡易な血圧と血流の

同時解析システムを開発した。

本論文において、動脈硬化の初生および進展と血行力学の関係を、血管内を伝搬する進行波と後退波に対応する位相を有する血圧場と血流場が血管内皮細胞に与える影響の面から解析可能な血圧と血流の同時解析システムが開発され、その有効性が示された。

論文審査結果の要旨

動脈硬化の初生および進展を、血管内を伝搬する進行波と後退波に対応する位相を有する血圧場と血流場が血管内皮細胞に与える影響の面から研究することを可能にするため、血管内の血圧と血流を同時に解析できるシステムを開発することが必要である。本論文は、これらの研究成果をまとめたものであり、全編5章からなる。

第1章は序論であり、本研究の背景、目的及び構成を述べている。

第2章は、2次元超音波計測融合(2D-UMI)血流解析システムの開発を行っている。超音波計測データから血管形状を自動抽出した後、計算格子を生成し、上流端流速を推定しながら、2D-UMIシミュレーションを実行し、得られた解析結果をPC上に可視化するシステムを構築するとともに、頸動脈の超音波カラードプラ計測の臨床データを用いた解析結果の可視化を行って、本システムの有効性を明らかにしている。これらは、血圧と血流の同時解析システム実現のための基礎となる重要な成果である。

第3章では、光電容積脈波センサと2D-UMIシミュレーションによる血圧と血流の同時解析が可能なシステムを構築し、頸動脈における解析を行ってWave Intensity(WI)により特定された進行波と後退波に対応する時相における血流場の特徴を明らかにしている。Water hammer理論の結果との比較により、本システムは誤差10ms以内の精度で血圧と血流の同時解析が可能であることを示すとともに、本システムによりヒト総頸動脈の血圧と血流の同時解析を行なって、非定常血流場の特徴を明らかにしている。これらは、頸動脈内の波動伝播が血管内皮細胞に与える影響の研究に繋がる重要な成果である。

第4章では、超音波診断装置と2D-UMIシミュレーションによる簡易な血圧と血流の同時解析システムを開発するとともに、その有効性を実験的に検証している。ヒト頸動脈の検証実験により、簡易システムとオリジナルシステムによる脈波とWIは類似していることを明らかにしている。これらは、簡易システムの有効性を示しており、実用上有益な結果である。

第5章は結論である。

以上要するに本論文は、光電容積脈波センサと2次元超音波計測融合シミュレーションを用いた血圧と血流の同時解析システムを開発し、その有効性を実験的に検証したものであり、医工学及び機械工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(医工学)の学位論文として合格と認める。