

学 位 論 文 題 名

流れに直交する単一超音波ビームを用いた
相関血流計に関する基礎的研究

学位論文内容の要旨

本論文は、従来の超音波ドプラ法では計測不可能な、超音波ビームに直交する流れの流速計測に関する手法を提案し、理論解析、計算機シミュレーション、及び実験により本手法の基本的特性を明らかにした研究成果をまとめたものである。

今日、超音波診断法は、超音波断層像という形態情報のみならず、血流速という機能情報をも無侵襲的かつ実時間で取得できることから、臨床に広く普及している。血流速の計測には一般に超音波ドプラ法が用いられており、この手法を応用したカラードプラ（実時間2次元血流イメージング装置）は心腔内の血流や各臓器への血流を実時間で2次元画像表示できることから、心循環系の臨床計測には不可欠の装置となっている。

しかし、ドプラ法で計測できる流速は原理的に超音波ビーム方向成分のみであることや、計測対象が比較的大血管の血流に限られること、ビーム入射の至適範囲に解剖学的な制限があること等から、近年は、これらドプラ法の限界を打破し、新しい方向への展開を図るべく、2次元血流速度ベクトルの推定や、Time Domain Correlation Technique(TDCT)といった新しい血流計測法の開発、エコーエンハンスメント法の利用、組織血流計測など、幅広い試みがなされてきている。

このような背景のもと、本研究は、“流れに直交する単一超音波ビームを用いた相関血流計測法”という新しい血流計測法を提案する。本相関法が実現されれば、ビームに直交する血流情報というこれまでに無い診断情報を臨床の場に提供でき、従来のビーム方向の血流情報との併用で、3次元的な血行動態の把握に大きく役立つものと考えられる。また、ビーム入射至適範囲の拡大や、流速ベクトル計測の可能性など、超音波計測分野の次なる展開への足掛かりを与えるものと期待される。

そこで、本論文では、上述の相関法の測定原理や測定精度、誤差軽減効果などの基本性能について、理論、計算機シミュレーション、及び実験により詳細な解析を行うとともに、本相関法の応用として血管内血流計測システムの試作、流速ベクトル計測法の開発を試みた上で、他計測法との比較から本相関法の位置づけを行っている。

本論文は全9章より構成されており、その主な成果は次のように要約される。

第1章の序論では、本研究の目的とその背景について述べている。

第2章では、本相関法の測定原理について理論解析を行い、散乱体の移動量と相関係数の関係式を導出している。解析結果の妥当性を確認するため、シミュレーション及び実験を行い、相関係数が散乱粒子の移動距離の増加に伴い単調に減少すること、減少率は超音波振動子の長さにも依存して、サンプリング位置やサンプリング長、さらには出射超音波パルスの中心周波数、パルス長、波長、散乱体密度に依存しないことを明らかにしている。また、相関係数の減少は、超音波ビーム内の散乱体の入れ替わりよりも、むしろ各点散乱体までの距離の変化によるエコー信号の位相変化に起因することを推察している。以上のように、本章では本研究を進めるに当たって必要な基本式を解析的に導出し、その妥

当性を確認している。

第3章では、本相関法の測定パラメータ（加算回数 N 、サンプリング長 l_s 、パルス長 l_p ）の最適値を決定するために、これらパラメータと時間・空間分解能、及び流速測定精度の関係を記述する理論式を導出している。流速測定精度が $\sqrt{l_p/(l_s \cdot N)}$ に比例することを明らかにし、その妥当性をシミュレーション及び実際の流れを用いた実験で確認している。これにより、測定パラメータを決定する際の直接的かつ有用な指針を得ている。

第4章では、本相関法の誤差要因である雑音の影響について解析するとともに、その軽減法を考案している。まず、雑音をクラッタとランダム雑音の2種に分け、それぞれが混入した場合の流速測定誤差を理論的に求めている。次に、実際の生体計測を想定し、クラッタ及びランダム雑音混入時の測定誤差軽減法を考案している。クラッタに対しては雑音波形推定法、ランダム雑音に対しては S/N 推定法を用いて雑音の影響を軽減している。これら誤差軽減法については、シミュレーション及び実際の流れを用いた実験を行い、その有効性を検証している。

第5章では、超音波ビーム入射角の誤差により生じる流速測定誤差（ビーム角依存誤差）について理論解析を行い、実用上の大きな障害となるビーム角依存誤差を軽減する手法を考案している。本手法は、相関係数に代わり相関関数の最大値を用いる手法であり、理論解析により、ビーム角誤差が $20 \sim 30^\circ$ であっても流速測定誤差を $\pm 10\%$ 以下に抑制できることなどを推察している。シミュレーション及び実験を行い、以上の解析結果の妥当性、及びビーム角依存誤差軽減法の有用性を確認している。これにより、実際の生体計測において問題となるビーム角設定誤差の影響を著しく軽減できるとしている。

第6章では、本相関法の一応用例として血管内血流計測システムを試作し、定常流や拍動流の流速分布、及び流量を実際に計測可能であることを確認している。さらに、近年新しい診断法として注目されている血管内超音波イメージング法へ本相関法を適用することにより、血管断層像などの形態情報のみならず、血管弾性率や血流量等、より多くの生体情報を同時に取得できる多機能型超音波プローブが実現可能であることを展望している。

第7章では、本相関法をさらに発展させ、単一ビームによる流速ベクトル計測法を提案している。本ベクトル計測法は、一定時間間隔を隔てて得られた2つのRFエコー信号の相関関数のピーク位置からドプラ偏移、すなわち流速の超音波ビーム方向成分を検出するとともに、そのピーク値から本相関法によってビーム直交方向成分を検出するものである。これら測定原理について理論解析を行い、さらに移動散乱体を用いた実験、及び実際の流れを用いた実験を行って、単一ビームで流速ベクトルを計測可能であることを確認している。両実験とも、流速ベクトルと超音波ビームとが成す角の平均測定誤差は $1 \sim 3^\circ$ 程度であり、流速ベクトルを高精度に計測できる可能性が示されている。また、単一ビームによる本流速ベクトル計測法の長所として、複数ビームを用いる従来法のように観測点が限られる等の制約がなく、かつプローブの形状を小型化できるなどの点を考察している。さらに、本流速ベクトル計測法の適用により、従来の2次元流速ベクトル分布計測に代わり、3次元流速ベクトル分布の計測も可能となることを示唆している。

第8章では、超音波を用いた従来の主な流速計測法と本相関法とを比較検討し、本相関法の位置づけを試みている。まず、主な従来法として、ドプラ法、TDCT、スペckル法、Transverse Doppler法を挙げ、それらの測定原理を簡単に説明している。次に、本相関法との原理的な比較検討を行い、一見全く異なって見えるそれら計測法が、実際には互いに深い関連性を有することを述べている。特に、本相関法、スペckル法、そしてTransverse Doppler法は、いずれも超音波ビーム方向成分を利用して流速を計測しており、原理的には同一の現象を異なった処理法で観測していること、また、Transverse Doppler法は超音波ドプラ法を、本相関法はTDCTをそれぞれより一般化した手法（流速ベクトルが計測可）であり、Transverse Doppler法と本相関法はフーリエ変換を介して対称な関係にあることを明らかにしている。

第9章は結論であり、本研究で得られた成果をまとめている。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 山 本 克 之

副 査 教 授 勇 田 敏 夫

副 査 教 授 栗 城 眞 也

副 査 教 授 朝 倉 利 光

学 位 論 文 題 名

流れに直交する単一超音波ビームを用いた

相関血流計に関する基礎的研究

今日、超音波診断法は、断層像という形態情報のみならず、血流速という機能情報をも無侵襲的に取得できることから、臨床に広く普及している。血流速の計測には一般に超音波ドプラ法が用いられており、この手法を応用したカラードプラ装置のように、心腔内等の血流を実時間で2次元画像表示でき、心循環系の臨床計測に不可欠な装置も出現している。しかし、ドプラ法で計測できる流速は原理的に超音波ビーム方向成分のみであることや、計測対象が大血管の血流に限られること等から、近年は、これらドプラ法の限界を打破し、新しい方向への展開を図るべく、さまざまな試みがなされてきている。

このような背景のもと、本研究は、”流れに直交する単一超音波ビームを用いた相関血流計測法”という新しい血流計測法を提案している。本相関法が実現されれば、ビームに直交する血流情報というこれまでに無い診断情報を取得でき、従来のビーム方向血流情報との併用で、3次元的な血行動態の把握等に大きく役立つものと期待される。

本論文では、上述の相関法の測定原理や測定精度、誤差軽減効果などの基本特性について、理論、計算機シミュレーション、及び実験により詳細な解析を行うとともに、本相関法の応用として血管内血流計測システムの試作、流速ベクトル計測法の開発を試みている。その主な成果は次のように要約される。

第1章の序論では、本研究の目的とその背景について述べている。

第2章では、本相関法の測定原理について理論解析を行い、散乱体移動量と相関係数の関係式を導出している。解析結果の妥当性を確認するため、シミュレーション及び実験を行い、相関係数が散乱粒子の移動に伴い単調に減少すること、減少率は超音波振動子の長さにも依存し、エコー信号のサンプリング位置やサンプリング長、超音波周波数、パルス長、散乱体密度など、他の主要なパラメータには依存しないことを明らかにしている。

第3章では、本相関法の測定パラメータ（加算回数、サンプリング長、パルス長）の最適値を決定するために、これらパラメータと時間・空間分解能、及び流速測定精度の関係を記述する明解な理論式を導出している。また、その妥当性をシミュレーション及び実際の流れを用いた実験で確認している。

第4章と第5章では、本相関法の誤差要因である雑音と超音波ビーム入射角の影響について理論解析を行うとともに、それらの誤差軽減法を考案している。さらに、シミュレーション及び実際の流れを用いた実験を行い、それらの有効性を検証している。雑音に関し

ては、クラッタとランダム雑音の2種に分け、それぞれが混入した場合の流速測定誤差、及び誤差軽減効果を検討している。超音波ビーム入射角に関しては、ビーム角設定誤差が $20\sim 30^\circ$ であっても、流速測定誤差は10%以下と、実用精度を確保できることを明らかにしている。

第6章では、本相関法の一応用例として血管内血流計測システムを試作し、定常流や拍動流の流速分布、及び流量を実際に計測して、前章までの手法の妥当性、有効性を実用システムで検証している。

第7章では、本相関法をさらに発展させ、単一ビームによる流速ベクトル計測法を提案している。本ベクトル計測法は、一定時間間隔を隔てて得られた2つのRFエコー信号の相関関数のピーク位置からドブラ偏移、すなわち流速の超音波ビーム方向成分を検出するとともに、そのピーク値から本相関法によってビーム直交方向成分を検出するものである。理論解析、及び実験を行い、単一ビームにより流速ベクトルを計測可能であること、さらに流速ベクトルの向きは、誤差 3° 以内と高精度に求め得ることを示している。

第8章では、従来の主な超音波流速計測法と本相関法とを比較検討し、本相関法の位置づけを試みている。各手法の原理的共通点と相違点に言及し、Transverse Doppler法と本相関法はフーリエ変換を介して対称な関係にあること等、各手法の対応関係を明らかにしている。

第9章は結論であり、本研究で得られた成果をまとめている。

これを要するに、著者は、流れに直交する単一超音波ビームを用いた相関血流計測法を考案し、その基本的特性を理論的、実験的に明らかにするとともに、医用超音波計測への新たな応用を見いだしており、生体計測工学の進歩に寄与するところ大なるものがある。

よって、著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。