

氏名	Liu 劉	Fan 凡
授与学位	工学博士	
学位授与年月日	昭和 63 年 3 月 25 日	
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 1 項	
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 精密工学専攻	
学位論文題目	管内変動流量のモデルベースト計測に関する研究	
指導教官	東北大学教授 箱守京次郎	
論文審査委員	東北大学教授 箱守京次郎	東北大学教授 永井 伸樹
	東北大学教授 大宮司久明	東北大学教授 猪岡 光
	東北大学助教授 内山 勝	

論文内容要旨

第 1 章 序 論

管路内の非定常層流の瞬時流量の計測については、近年、管路断面の一部（代表点・代表領域）の流速情報を流速計により抽出し、流体管路の動的モデルに基づきカルマンフィルタを構成し、それにより流速の全プロフィルの推定を行うことにより、正確な瞬時流量を求めるというモデルベースト動的流量計測手法が提案されている。

本研究は、このようなモデルベーストの管内変動流量を計測する手法を、より一般的な場合、より広範囲な場合の管内流量計測に拡張することを目的としている。

管内流れの適当な動的モデル（集中定数系モデルを含む）を求めるのは、モデルベースト流量計測手法の鍵である。その適切なモデルさえ得られれば、1) 任意断面形状管路内、2) 管路内の任意場所で、たとえば入口にごく近いところ、いわゆる助走区間内の流れの計測にも適用可能である。本研究では、これを念頭におき、本研究の指針とする。

そのために、まず任意断面形状の十分長い管内流れを対象にして、有限要素法による管路モデル生成の可能性を確認し、それを用いた流体管路動的モデルの一般的な導出手法を確立する。つぎに、助走区間内の流れを支配する非線形ナビエ・ストークス方程式を、流れの動的挙動が高精度に表現できるように線形化近似する方法を提案する。さらに、この線形化された方程式より、管内任意場所における非定常流の流速プロフィルの推定アルゴリズムを導出する。最後に、この推定アルゴリ

ズムを実験システム上あるいは数値シミュレータ上でインプリメントすることにより、その有効性を確認する。

第2章 有限要素法を用いた任意断面形状流体管路動的モデルの導出手法

本章では、モデルベースト流量計測のための、任意断面形状管内流れの動的モデルを、有限要素法を用いて導出する一般的な手法を提案した。そして、導出されたモデルの動的精度が十分高いことを、助走区間外における非定常層流を対象にし、円管および矩形管を例とする数値計算により、周波数領域で検証した。さらに、有限要素モデルの動的精度について、管路モデルの解析解が求められない場合に、その固有値分布を調べることによる判定指針を提案した。本手法により導かれる流体管路モデルおよびその導出手法はつぎのような特徴を持っている。1) 管路断面形状に依らない汎用性、2) 線形状態方程式の形で簡単に表現でき、モデルベースト手法に対する適用性、3) 比較的低次元で高精度で実現でき、計算時間が大幅に短縮できる実用性などである。

第3章 任意軸対称断面形状管内管軸上任意位置における流速プロファイル推定アルゴリズム

本章では、管内非定常層流を支配するナビエ・ストークス方程式中の非線形対流項の近似を、管軸に対して対称性をもつ任意断面形状の直管路内非定常層流を対象にし、流れの全領域の境界条件を満足するように線形化する一般的な手法を提案した。

この手法により線形化された方程式には、管軸方向の座標と時間のみの未知変数が含まれている。そのために、この線形方程式には、前章で確立した有限要素動的モデルの導出手法を適用し、それを管断面上で有限要素離散化した。すると、未知パラメータを含む集中定数流体管路線形モデルが得られた。

この線形モデルより流速プロファイルを求めるために、その未知変数を求める必要がある。本研究では、それと未知入力を状態変数に拡張し流速プロファイルと併せて同時に推定する方法にした。そのために、未知変数と未知入力が状態変数に拡張された非線形状態方程式を導出し、それに拡張カルマンフィルタ理論を適用し、管内流速プロファイルの非線形推定アルゴリズムを導出した。

また、具体例として、代表的な円管および矩形管を取り上げ、それらの管軸に沿う任意場所における流速プロファイルを推定するアルゴリズムを与えた。さらに、管内流れの動的モデルの可観測性の必要条件を数値計算により確かめた。

本章の核心であるその非線形対流項の近似は、従来の近似方法より、1) 管軸上の境界条件を満足し、激しい振動流の挙動が高精度に表現可能である、2) 圧力勾配を入力とするため、動的流量を求める本研究の目的に適合する、3) 広範囲への応用が可能であるなどの特徴を持っている。

第4章 観測モデル

本章では、流体管路観測モデルについて検討し、以下の研究で用いる一点の流速値を測定する流速計を観測機器とする場合に、流速情報を抽出する観測過程の数学モデル化を行った。また、変動

流速のセンサとしてよく使われる熱線流速計を観測機器とした場合について、そのセンサの長さが管半径と比べて小さい場合、測定流速は、センサの中心点上の流速にほぼ等しいこと、すなわち熱線流速計による観測は点観測と見なせることを理論計算と実験検証により示した。

第5章 管内変動流の発生と流速プロファイルの測定実験システム

本章では、第3章で導出した助走区間を含む管内流れの流速プロファイルの推定アルゴリズムの有効性と適用範囲を検証するために、実験システムを構成した。この実験システムにより、管路内に変動流を発生でき、またビーム走査レーザ流速計を用いることにより、管断面内の一直線上の流速プロファイルあるいは代表点の流速値も測定できる。さらに、反転流のプロファイルも測定できるように、その流速計測システムにレーザ光線の周波数シフターを加えることにより、改良充実させた。本実験システムの特徴は、管内流れを高精度に制御でき、かつ流量信号発生側の境界条件をはっきりさせることと、任意値を持つ変動流量の瞬間値と非定常流速プロファイルの瞬時波形を直接測定可能なことである。

第6章 管内変動流速プロファイル数値シミュレータ

第3章で導出した推定アルゴリズムの精度を検証するために、本章では、さらに管内変動流速プロファイルの数値解を有限差分法を用いて求めた。この数値シミュレータは、ナビエ・ストークス方程式から直接導かれて、管内変動流の平均流速さえ与えられれば、管内全領域における流速プロファイルの変動が求められるものである。本研究では、それを数値シミュレータと呼ぶ。

この数値シミュレータの妥当性を確かめる際、助走区間外では、解析解とを比較し、助走区間内では、解析解がないため、構成した変動流の発生と流速プロファイルの計測実験システムを用いた検証実験を行った。これにより、第3章での推定アルゴリズムの精度と適用範囲を、外乱の影響がないなどの意味で、高精度な検証を実現できる。

また、本数値シミュレータの特徴は、境界条件が明確、計算が簡潔、解が高精度などである。したがって、流速検出型動的流量計の精度検証に対して、本数値シミュレータは実験システムの副基準として便利に利用できる。

なお、本章では、円管および矩形管の数値シミュレータを導出したが、その導出手法は、任意断面形状管路内流れの流速プロファイルの数値シミュレータの導出に対しても適用できる。

第7章 管内変動流速プロファイルの推定実験

本研究で提案した任意軸対称管内管軸上任意位置における流速プロファイルを推定した流量を計測する手法の有効性、実用性、汎用性は、円管および矩形管を例として、推定アルゴリズムを流速プロファイルの数値シミュレータ上、または実験システム上へインプリメントし、推定結果とそれぞれの検証システムにより求めた流速プロファイルとを比較することにより確認された。さらに、管内逆流つまり管入口から出て行く流れを伴うような場合に、管入口近傍での流速プロファイルの推定計測に対する有効性も実証した。

本章の結果により，本研究で提案した変動流量を計測する手法の基礎である，ナビエ・ストークス方程式の対流項を管内流れの境界条件を満足するように線形化近似することにより導かれた流体管路動的モデルは，円管内流ればかりではなく，矩形管内流れ，さらにより一般的な軸対称性を持つ断面形状管内流れに対しても，十分妥当であることがわかった。本手法により，管内流れが大幅な変化をする場合に，流速プロファイルが高精度に推定でき，管内変動流量の計測上かなり有用である。

第 8 章 結 論

本章は本論文の結論であり，以下のように要約される。

(1) 任意断面形状をもつ十分長い流体層流管路に対して，高精度，低次元，汎用性をもつ動的モデルの有限要素法を用いた導出手法を提案した。この手法により，モデルベース手法を用いた任意断面形状をもつ管内変動流量の計測が可能となった。

(2) 管内任意場所における層流を支配する非線形ナビエ・ストークス方程式を適切に線形化することにより，管路モデルを導出し，流速プロファイルの推定アルゴリズムを提案した。これにより，管内流れの状態に依存しない変動流量の計測が可能となった。

審査結果の要旨

管内変動流の瞬時流量の計測は、重要な基本技術であるが、広帯域・高精度化を実現するためには解決すべき困難な問題が残されていた。その解決の鍵は、管路断面の流速プロファイルを正確に把握することであり、管路断面内代表点における流速値を観測し、予め計算機上に構成してある管路動的モデルと照合しつつ流速プロファイルを推定し、流量を計算するモデルベース計測が有力な一解決法である。本論文は、同手法の適用範囲の大幅な拡張を試み実用性を高めた研究の成果をまとめたもので、全編8章よりなる。

第1章は序論である。第2章では、流体管路の高精度動的モデルの作成について論じ、モデルの満足すべき諸条件を明らかにした上で、有限要素法を用いた一般的な線形有限次元状態変数モデルの導出法を提案し、モデルの動的精度を明らかにしている。これらは、有用な成果である。

第3章では、任意軸対称断面形状をもつ管路内非線形層流に対する動的モデルと流速プロファイルの推定アルゴリズムの構成法を提案している。すなわち、ナビエ・ストークス方程式の非線形対流項を流れの全領域の境界条件を満足するように線形化し、第2章の手法により未知変数を含む有限次元管路モデルに変換する。さらに未知変数を律する確率過程を仮定し、拡張カルマンフィルタ理論を適用して流速プロファイルを定める拡張状態変数を推定する。同システムの可観測性についても併せて考察している。本章での線形化手法は注目すべき重要な提案として評価される。

第4章では観測モデルについて補足的に論じている。第5章および第6章では、第3章の提案手法を実証するために開発した、変動流発生装置とビーム走査レーザ流速計を用いた実験システムおよび有限差分法による数値シミュレータについて述べている。

第7章では、以上の提案と準備のもとに助走区間内外にわたる円管および矩形管路内非定常層流の流量計測を種々の条件下で行い、本論文の手法が極めて有効であり高精度計測が可能であることを実証している。

第8章は結論である。

以上要するに本論文は、管内変動層流のモデルベース計測に関して実用性の高い汎用的なモデル構成ならびに推定手法を提案し多くの有用な知見を与えたもので、計測制御工学の進展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。