



圧力波および脈動流の減衰に関する研究

佐藤, 寿恭

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2007-03-25

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲4027

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1004027>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



【 3 7 4 】

氏 名・（本 籍） 佐藤 寿恭 （ 兵庫県 ）

博士の専攻分野の名称 博士（工学）

学 位 記 番 号 博い第465号

学位授与の 要 件 学位規則第5条第1項該当

学位授与の 日 付 平成19年3月25日

【 学位論文題目 】

圧力波および脈動流の減衰に関する研究

審 査 委 員

主 査	教 授	神吉	博
	教 授	薦原	道久
	教 授	森本	政之
	助教授	安達	和彦

本研究は設計開発・解析の効率化を図るべく、円管路を伝播する脈動に関する新しい解法を提案する事である。管路や狭路を伝播する圧力波や脈動流の特性の把握は、様々な産業機械において設計およびトラブル対策上の重要な要素となっている。産業用ガスタービンの燃焼振動対策を始め、産業プラントではダクト系の騒音問題、配管系のウォーターハンマ現象などでは、圧力波の振幅、減衰、伝達関数の解析が重要な要素である。マイクロポンプシステムの様な装置や航空機の油圧制御システムでは、特に壁面粘性が強く働き易くそれらの予測が重要である。本研究では工学的用途を十分に考慮した上で、代数式による解法の提案を試みた。またそれらの実用段階での利便性を考え、その解法は可能な限り単純化を試みた。

近年のコンピュータや数値解析技術の進歩は、流体の保存式をより厳密に数値解法で解く事を実現している。従来は膨大な計算コストを要した流体解析コードによる音響解析も、精度向上とコスト圧縮を重ねている。また保存式を直接的に解ける利点があり、設計開発や現象解析の最終段階では、物理実験にならぶ極めて強力な解析ツールである。一方で配管系全体を解くような大規模解析の他、機器の形状や脈動の条件などが未知な場合、すなわち初期設計の段階では、解析解や近似式、実験式などがより強力な設計ツールとなる。大規模解析には伝達マトリックス法が広く用いられ、その伝達関数は解析式や実験式などを用いる事が多い。また近年の自動制御の分野では高速化や高精度化を背景に、制御系に物理モデル（解析解や近似式、実験式など）を積極的に導入する試みが見られる。また産業界では開発競争の激化を背景に、トラブル対策や設計開発のコスト低減、期間短縮が求められており、設計ツールとしての重要性が見直されている。

円管路を伝播する疎密波は微視的には脈動流を伴う現象である。本研究で扱う疎密波は oscillating flow と pulsating flow に大別されるが、その区別は定常流成分の有無である。産業機械における脈動設計の対象は、厳密には pulsating flow が大半であるが、従来は oscillating flow の解析が流用されるのが一般である。ダイレクトシミュレーションを適正に使用すれば解析可能と推測されるが、計算に時間を要しケーススタディーに不向きな為、一般の産業機械の初期設計では使用しづらい。本研究は、産業機械の設計・開発期間短縮、設計コスト低減、トラブル対策の効率化を目的に、より効率的な管路内脈動に関する解析手法を提案するものである。

第 2 章では、静止場中の管路軸方向に軸対称な線形波動を仮定して、流体の保存式（運動方程式、連続の式）に基づく解法提案と定式化に成功している。圧力波の伝播は微視的には流体運動を伴うが、狭管路の場合、圧力波の減衰は流体運動に伴う壁面粘性（せん断粘性）の効果が支配的であると考えられる。一方、管路径が大きいと壁面粘性の効果が弱まり、圧縮粘性の効果が無視出来なくなる。疎密波の減衰に壁面粘性が支配的要因である狭管路を対象に、圧力は管路断面で一樣、疎密波は一次元的に伝播すると仮定して、圧力損失は壁面粘性に起因し流速は二次元で考慮するとして、静止場中の疎密波の解析解を導出

した。本章では、静止場（定常流を無視）を前提に、摂動圧力、摂動流速（面平均流速、流速分布）、位相速度、距離減衰係数を与える新たな解法提案と、公式の導出に成功している。公式を設計実務に使用する場合、その記述式は単純な方がより望ましい。先に得た解析解は、数学的に厳密ではあるが多価関数を含むものであった。ところが、実際に計算機（エンジニアリング言語）で計算する時には、一般に多価関数の主値だけが選択され計算される。そこで解析解に計算機同様の条件を導入し、主値だけが選択されるとして解の単純化に成功した。結果、解析解はその精度を損なう事無く、実務に十分有用なレベルまで単純化されたと考えている。

第 3 章では、第 2 章で示した円管路中の疎密波に関する解法とその公式の妥当性を、過去に発表された実験結果や従来解法との比較評価をもって行った。なおその概要は次の通りである。3.2 節では、Brown らの実験結果を用いて位相速度と距離減衰係数との比較を、3.3 節では D'Souza と Oldenburger の解法との比較を、3.4 節では Muto, Nakane ら計測結果との比較を通して、夫々、妥当性が確認した。中でも本論文で提案する公式による解法が、既に設計・解析の現場で実績のある D'Souza と Oldenburger の解法との等価性を示せた事は興味深い所である。これにより従来は 2 断面間の応答解析に、圧力と流速の両方の入力情報が必要であった所が、一方だけの入力情報で圧力、流速の双方の解析が可能となった。一般に産業機械のフィールド試験では、変動する圧力と流速の両方を管路の 1 断面内で計測することは、極めて困難であり、提案する解法と公式は従来手法のこの問題点を解決するものである。

第 4 章では、研究結果を定常流場に拡張し、pulsating flow の流速分布に関する他研究者の計測結果と解析結果を比較し、妥当性評価を試みた。その結果、各断面における流速分布は、定常流を無視して得た静止場中の粒子速度分布と、定常流の流速分布の重畳で、実務上は支障ない近似が可能な事を確認した。半径方向の流速分布に限って pulsating flow を解析するならば、その周期振動成分に oscillating flow の結果を代用しても、実用上、問題ないと考えられる。ただし、以上の方法では、位相速度 a_n 、距離減衰係数 β_n における定常流 u_0 の影響は考慮されていない。よって、pulsating flow の x 方向（伝播方向）の挙動解析に、前述の解法をそのまま適用する事は出来ない。仮に適用するとしても、 $u_0 \rightarrow 0$ と見做せる事が前提条件となってしまう、本質的に pulsating flow を扱う事は出来ない。そこで本論文では、研究の纏めとして定常流を考慮した位相速度と距離減衰係数の解析を試みる事とした。

第 5 章では、第 2 章で静止場を伝播する疎密波に適用した解法を、定常流場に拡張して、定常流を考慮した疎密波の位相速度と距離減衰係数の解析を試みた。ここでは流体の保存式に定常流の項を入れた解法提案を行っている。すなわち、流体の保存式から移流項（対流項）を省略せず、摂動流速、位相速度と距離減衰係数の解析を行った訳である。その結果、静止場の解析と同様に、位相速度と距離減衰係数を決定する連立特性方程式を得るに至った。この連立特性方程式は、定常流に 0（零）を代入すれば、第 2 章で解いた oscillating flow の連立特性方程式に帰着する。pulsating flow に関する場合、oscillating flow の様な解析

(氏名：佐藤寿恭

NO. 3)

解は得ていないが、数値計算を導入し連立方程式を解き位相速度と距離減衰係数の計算に成功している。本研究では更に、得られた数値解に対して実用的な近似式を与えている。近似式は *oscillating flow* の解析解をマッハ数で補正した代数式である。マッハ数 0.6 までは数値計算解と良く一致する事を確認しており、一般に線形波動の範囲をマッハ数 0.3 程度以下であるから、十分な範囲で数値計算解の値を返している。これにより、定常流場 (*pulsating flow*) の場合も、近似式であるものの位相速度と距離減衰係数を代数式での記述に成功した。なお、振動圧力と拱動流速 (面平均流速、流速分布) の式は、連立特性方程式の導出過程で、位相速度と距離減衰係数を含んだ形で導出されるので、以上で定常流場 (*pulsating flow*) の脈動の記述式が完備されるに至った。

定常流を考慮した連立特性方程式、および近似式の妥当性を直接評価する実験結果が無い為、その精度を保証するには至らない。しかし、従来手法や実験結果との比較で十分に妥当性が確認されている静止場中の解法と公式に同じ解法に基いており、予測の域を出ぬものの妥当性は高いと考えている。

以上の通り本研究では、円管路を伝播する圧力波および脈動に関する解法の提案と、代数式による定式化を行った。本論文が提案する解法、および公式が、従来手法に対して改善を実現した点を以下の通りである。

- (a) 圧縮性条件の下、流体の波動性を記述する。
- (b) 直接的に圧力と流速の扱いを可能とする。
- (c) 距離減衰係数と位相速度を導入し、脈動の履歴計算を不要とする。
- (d) 入力信号として圧力と流速の一方から、両者の解析を可能とする。
- (e) 可能な限り代数式で解を与える。
- (f) 移流項を考慮した圧力波および *pulsating flow* の解法を提案する。
- (g) 移流項を考慮した圧力波および *pulsating flow* の定式化を行う。

氏名	佐藤 寿恭		
論文 題目	圧力波および脈動流の減衰に関する研究		
審査 委員	区 分	職 名	氏 名
	主 査	收 授	神吉 博
	副 査	教 授	薦原 道久
	副 査	教 授	森田 政之
	副 査	助教授	安達 和彦
	副 査		
要 旨			
本研究の目的は、産業機械の設計開発・解析の効率化を図るべく、円管路を伝播する脈動に関する新しい解法を提案する事である。管路や水路を伝播する圧力波や脈動流の特性の把握は、様々な産業機械において設計およびトラブル対策上の重要な要素となっている。産業用ガスタービンの燃焼振動対策を始め、産業プラントではダクト系の騒音問題、配管系のウォーターハンマ現象などでは、圧力波の振幅、減衰、伝達関数の解析が重要な要素である。マイクロポンプシステムの様な装置や航空機の油圧制御システムでは、特に壁面粘性が強く扱い易くそれらの予測が重要である。本研究では工学的用途を十分に考慮した上で、脈動問題の代数式による解法の提案を試みた。またそれらの実用段階での利便性を考え、その解法は可能な限り簡単化を試みている。 本研究で扱う円管路を伝播する疎密波は微視的には脈動流を伴う現象である。本研究で扱う疎密波は <i>Oscillating flow</i> と <i>Pulsating flow</i> に大別されるが、その区別は定常流成分の有無である。産業機械における脈動設計の対象は、厳密には <i>Pulsating flow</i> が大半であるが、従来は <i>Oscillating flow</i> の解析が流用されるのが一般である。ダイレクトシミュレーションを適正に使用すれば解析可能と推測されるが、計算に時間を要しケーススタディーに不向きな為、一般の産業機械の初期設計では使用しづらい。一方で配管系全体を解くような大規模解析の他、機器の形状や脈動の条件などが未知な場合、すなわち初期設計の段階では、解析解や近似式、実験式などがより強力な設計ツールとなる。また近年の自動制御の分野では高速化や高精度化を背景に、制御系に物理モデル (解析解や近似式、実験式など) を積極的に導入する試みが見られる。また産業界では開発競争の激化を背景に、トラブル対策や設計開発のコスト低減、期間短縮が求められており、設計ツールとしての重要性が見直されている。以上の様な背景に基づき、本論文は産業機械の設計・開発期間短縮、設計コスト低減、トラブル対策の効率化を目的に、より効率的な管路内脈動に関する解析手法を提案している。 本研究では疎密波伝播に伴う脈動流を、定常流成分の有無から <i>Oscillating flow</i> と <i>Pulsating flow</i> に大別して扱っている。<i>Oscillating flow</i> に関する研究は、古くは 19 世紀から多くの研究者によって定式化や解析方法の提案がなされてきたが、現在でも多くの研究者が取り組む問題である。一方、<i>Pulsating flow</i> では本来は定常流を考慮する必要があるが、非圧縮の解析が実験結果が大半であり、定常流と波動性を考慮した解法は、管路内脈動に関する限り見当たらない。 本研究では、従来手法の調査を通して設計ツールとして改善が望まれる項目の抽出を行い、それらを解決している。以下にその要点を列挙する。 (a) 圧縮性条件の下、疎密波の波動性を記述する。 (b) 直接的に圧力と流速の扱いを可能とする。 (c) 距離減衰係数と位相速度を導入し、脈動の履歴計算を不要とする。 (d) 入力信号として圧力と流速の一方から、両者の解析を可能とする。 (e) 可能な限り代数式で解を与える。 (f) 移流項を考慮した圧力波および <i>Pulsating flow</i> の解法を提案する。 (g) 移流項を考慮した圧力波および <i>Pulsating flow</i> の定式化を行う。			

659

氏名	佐藤 寿恭
第2章では、静止場中の線形波動を仮定して流体の保存式（運動方程式、連続の式）に基づく解法提案と定式化に成功している。圧力波の伝播は微視的には流体運動を伴うが、狭管路の場合、疎密波の減衰は流体運動に伴う壁面粘性（せん断粘性）の効果が支配的である。本研究ではこのような狭管路を対象に、圧力は管路断面で一様、疎密波は一次元的に伝播すると仮定して、圧力、平均流速、流速分布の解析解を導出した。本章では更に得られた解析解の単純化を行っている。すなわち計算式は設計実用を使用する場合、その記述式は単純な方がより望ましい。先に得た解析解は、数学的に厳密ではあるが多価関数を含むものであった。ところが、実際に計算機（エンジニアリング言語）で計算する時には、一般に多価関数の主値だけが選択され計算される。そこで解析解に計算機同様の条件を導入し、主値だけが選択されるとして解の単純化に成功した。結果、解析解はその精度を損なう事無く、実務に十分有用なレベルまで単純化している。 第3章では、第2章で示した円管路中の疎密波に関する解法とその公式の妥当性を、過去に発表された実験結果や従来解法との比較評価をもって行った。その概要は次の通りである。3.2節では、Brownらの実験結果を用いて位相速度と距離減衰係数との比較を、3.3節ではD'SouzaとOldenburgerの解法との比較を、3.4節ではMuto, Nakaneら計測結果との比較を通して、夫々、妥当性を確認した。中でも本論文で提案する公式による解法が、既に設計・解析の現場で実績のあるD'SouzaとOldenburgerの解法との等価性を示せた事は意味深い。これにより従来は2断面間の応答解析に、圧力と流速の両方の入力情報が必要であった所が、一方だけの入力情報で圧力、流速の双方の解析が可能となった。一般に産業機械のフィールド試験では、変動する圧力と流速の両方を管路の1断面内で計測することは、極めて困難であり、提案する解法と公式は従来手法のこの問題点を解決するものである。 第4章では、研究結果を定常流場に拡張し、Pulsating flowの流速分布に関する他研究者の計測結果と解析結果を比較し、妥当性評価を試みた。その結果、各断面における流速分布は、定常流を無視して得た静止場中の粒子速度分布と、定常流の流速分布の重畳で、実務上は支障ない近似が可能な事を確認した。半径方向の流速分布に限ってPulsating flowを解析するならば、その周期振動成分にOscillating flowの結果を代用しても、実用上、問題ないと考えられる。ただしこの方法では位相速度a_n、距離減衰係数β_nにおける定常流u_0の影響は考慮されていない。この問題点は第5章の研究で解決している。 第5章では、静止場を伝播する疎密波に適用した解法を拡張して、流体の保存式に定常流の項を入れて疎密波の位相速度と距離減衰係数の解析をしている。すなわち、流体の保存式から移流項（対流項）を省略せず、振動流速、位相速度と距離減衰係数の解析を行った訳である。その結果、静止場の解析と同様に、位相速度と距離減衰係数を決定する連立特性方程式を得ている。Pulsating flowに関する場合、Oscillating flowの様な解析解は得ていないが、数値計算を導入し連立方程式を解き位相速度と距離減衰係数の計算に成功している。 第5章では更に、得られた連立特性方程式の数値解に対して実用的な近似式を与えている。近似式はマッハ数0.6まで数値計算解と良く一致する事を確認しており、一般に線形波動の範囲はマッハ数0.3程度以下であるから、十分な範囲で数値計算解の値を表わしている。これにより、定常流場（Pulsating flow）の場合も、近似式であるものの位相速度と距離減衰係数を代数式の計算式を提案している。なお、振動圧力と振動流速（面平均流速、流速分布）も代数式で導出されており、以上で定常流場（Pulsating flow）の脈動の記述式が完備されるに至った。近似式ではあるが代数式で計算できる事は、設計初期などに行う概略計算のケーススタディーにおいて、その効率化に強く寄与するものであり、工学的観点でみればその有用性は高いと判断される。 本研究は、産業機械の設計開発・解析の効率化を図るべく、円管路を伝播する脈動に関する新しい解法を、Oscillating flowとPulsating flowの両方で提案している。それら解法は、工学的用途を十分に考慮した上で、代数式による解法の提案を試みられており、設計ツールとして設計・開発期間短縮、設計コスト低減、トラブル対策の効率化に寄与し、またこの種の広い分野にも適用できると判断される。本論文はこれらの価値ある知見の集積であると認める。よって学位申請者佐藤寿恭は博士（工学）の学位を得る資格があると認める。	