

氏 名	阿 部 晃 久
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	平成3年3月28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) 機械工学第二専攻
学 位 論 文 題 目	開放端から放出される衝撃波の回折とその背後の 流れに関する研究
指 導 教 官	東北大学教授 高山 和喜
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 高山 和喜      東北大学教授 大宮司久明 東北大学教授 嶋 章      東北大学教授 神山 新一

## 論 文 内 容 要 旨

### 第1章 緒 論

衝撃波の回折現象は、古くから多くの研究者により実験的、理論的に研究されてきた。しかしながら、その多くが比較的単純な二次元流れ場での衝撃波回折現象を扱ったもので、角から発生する膨張波が、垂直衝撃波波面におよぼす複雑な干渉や影響などによる衝撃波面の形状変化について、まだ議論の余地が残されている。角を過ぎる衝撃波やその背後の流れ場の構造は、出口の形状（回折角度）および入射衝撃波マッハ数の違いによって、透過衝撃波背後に現れる二次衝撃波や渦近傍に発生する衝撃波および壁面上を伝播するマッハステムなどの形状や強さなどが異なる。しかしながら、これらの流れについては未だ十分な解明はなく、流れ場の詳細な観察が必要である。さらに、円形あるいは長方形断面管などから放出される衝撃波については、軸対称三次元流れ場での可視化計測が著しく困難で、流れ場の構造が明らかにされたとは言い難い。

近年、数値流体力学の分野は、電子計算機の高速度化と記憶容量の増大により、様々な数値計算法が開発され著しい発展が見られる。現在、数値流体力学は、実験と共にますます重要となっている。最近では、三次元現象の解明に用いられ、逆に、計測の困難さからそれを実証する実験面での立ち遅れが目立ち、三次元現象の新たな計測技術の開発は、現在最も重要な研究課題となった。

角を過ぎる衝撃波の回折・減衰やその背後の流れ場での現象の解明は、ターボ機械および自動車エンジン内流れや排気系などでの振動・騒音、さらに最近、航空宇宙工学の分野で開発されているスクラムジェットエンジンなどにみられるステップ流れやノイズ流れ、燃料噴射出口からの流れで

の衝撃波の挙動と干渉ならびに衝撃波制御など工学的応用問題に密接に関係する。

以上のことから本研究は、開放端から放出される衝撃波の挙動およびその背後の流れ場について、二次元、軸対称、三次元流れ場での衝撃波管実験ならびにこれらに対応する数値計算を行い、衝撃波の回折・減衰、衝撃波面形状の変化過程および衝撃波背後の流れ場等について定量的に議論する。

## 第2章 数値計算法

開放端から放出される衝撃波現象の数値計算のために、現在、衝撃波を伴う高速流れ場の計算に最も有効な二次精度風上型 TVD 差分法を用いて、Euler 方程式を解き、二次元、軸対称流れ場の計算および三次元流れ場への拡張を行った。

本研究で扱う流れ場では、衝撃波マッハ数が大きくなると二次衝撃波、渦中心ならびにせん断層周辺で、角から発生する強い膨張波の影響により、圧力の値に数値的な振動が発生することがわかった。このことから、マッハ数10の強い衝撃波を例として、それに対する数値的な振動の防止策について検討し、開放端から衝撃波が放出された直後の出口角の取扱いならびに、せん断層および渦中心を標的として、常に安定的に得られる密度によって重みを作用させた数値粘性の導入および流束制限関数の選択などについて検討した。その結果、これまでの計算結果に比較して、解像度を損なわず、解の数値的振動を減少させることができた。

## 第3章 実験方法および可視化計測法

圧力型衝撃波管を用いて二重露光ホログラフィ干渉計法による可視化実験（二次元、軸対称および三次元現象）を行った。また、軸対称現象に対して、干渉計写真の縞分布から、縞次数と対称軸からの縞の位置を計測することにより、定量的に現象内部の流れ場の密度分布を求める方法を確立した。この方法は、円形断面の衝撃波管開放端から大気中に放出され、回折・伝播する衝撃波および水中球状衝撃波と気泡の干渉現象などの軸対称流れ場を例に、衝撃波背後の密度分布および圧力分布を求め、数値計算結果との比較などから、それらの計測精度等について検討した。その結果、軸対称現象に対する二重露光ホログラフィ干渉計法を用いた密度分布の定量的計測法の有効性を示した。また、さらに複雑な三次元現象に対して本計測薄膜を応用可能性について検討するために、拡散光による三次元二重露光ホログラフィ干渉計法を用いて正方形断面管から放出する衝撃波現象の可視化を行った。その結果、従来よりも解像度や明るさの面で優れた結果を得ることができた。さらに、光学系の工夫とフィルムの設置位置および方法などを検討すれば、複雑な三次元現象の定量的測定も可能であることを示した。

## 第4章 開放端から放出される二次元および軸対称流れ

二次元および軸対称流れ場に衝撃波が放出されたときの衝撃波面の回折およびその背後の流れ場について、衝撃波管による可視化実験を行い、またその結果を数値計算結果と比較して衝撃波の挙動とその流れ場の構造を詳細に観察した。また、近年工業や医療への応用に注目されている SR (Synchrotron Radiation) 光源専用機から X 線を取り出す際に、高エネルギー集中でブリリウム薄膜窓が破

損し真空中に発生・伝播する衝撃波によって高真空状態の装置内部が汚染されるのを防ぐために、衝撃波を減衰、遅延させる方法へ応用を試み、この衝撃波伝播を単純な衝撃波管問題に置き換えて、衝撃波の有効な減衰法について数値解析を試みた。

以上の結果、スリットから放出される衝撃波の挙動およびその背後の流れの構造について二重露光ホログラフィ干渉計法による可視化実験と数値計算結果から初期衝撃波マッハ数の違いによる流れ場の構造の変化を明らかにした。また、初期衝撃波マッハ数が同じ時、出口回折角の違いによる流れ場の変化は渦中心の移動軌跡に顕著に現れることがわかった。これは、渦中心と壁面との位置関係による速度方向の偏向が原因であることがわかった。

軸対称現象については、円形断面管から放出される衝撃波現象を二重露光ホログラフィ干渉計法により可視化し、縞分布の処理および数値計算結果から強い非定常流れ場の構造を明確にした。特に、数値計算では、管出口角から発生する斜め衝撃波と二次衝撃波とがつくる衝撃波三重点からのびるすべり線をとらえることができた。また、二次元と軸対称流れ場での現象の違いは、出口角から発生する膨張波の流れ場に対する影響の違いにより、先頭衝撃波の減衰ならびに二次衝撃波から先頭衝撃波までの間の流れの圧力分布などに明確に現れることを明らかにした。

衝撃波の減衰法についての一応用例として、斜め縮小流路を衝撃波が過ぎる際の流れ場の様子を数値計算により明らかにした。その結果、斜め流路から放出される衝撃波は、出口角からの非対称な膨張波の影響により衝撃波面での圧力分布が非対称となり、流路出口からの流れの方向は下流方向からずれて斜め流路方向となることが明らかとなった。また、縮小流路の形状を変化させることで出口からの流出方向をずらすことにより、衝撃波の減衰を促進し流量を減少させる可能性を得た。

## 第5章 開放端から放出される衝撃波面形状の変化

これまで一般的に、開放端から放出される衝撃波面の形状変化過程は、平面から球形へ滑らかに漸近していくと考えられ、十分な検討がなされていなかった。本研究では、可視化実験および数値計算から得られた衝撃波面の中心軸上の形状変化に注目し、これまで行われていなかった衝撃波面形状の曲率分布計測により、衝撃波面形状の詳細な定量的測定を行った。その結果、開放端から放出される衝撃波面形状の変化過程は滑らかではなく、衝撃波が平面から球形へ変化する過程で、ある瞬間、特異的に凸型形状となる新たな事実を得た。これは、軸対称現象の場合に顕著となり、管出口から発生する強い膨張波の先頭衝撃面に対する三次元的な影響によるものであることを明らかにした。さらに、中心軸付近での衝撃波面形状を測定し、曲率分布を求めた結果、管出口からの先頭衝撃波伝播距離に対する曲率変化は、定性的には衝撃波マッハ数に関係ないが、定量的にはマッハ数の増加にともなって曲率の最大値も増加することを明らかにした。

## 第6章 正方形および長方形断面の開放端から放出される衝撃波

工学的応用で重要となる三次元性の強い流れ場の現象解明を目指し、正方形および長方形断面の衝撃波管開放端から放出される衝撃波背後の流れについて、数値計算および可視化実験を行い、三次元流れ場の構造を明らかにした。

縦横比1の正方形断面の衝撃波管から放出される衝撃波背後の流れを二重露光ホログラフィ干渉計法で二方向から撮影を行い、得られた干渉計写真より管出口から発生する渦輪構造が歪むことを確認した。また、三次元に拡張した二次精度風上型 TVD 差分法を用いてオイラー方程式を解き、縦横比1の場合について、計算結果と可視化実験から得られた縞分布を比較し、定性的に良好な一致を得た。このことから、数値計算により正方形断面管から放出される衝撃波背後の流れ場の構造ならびに渦輪の歪みの原因について検討した結果、管出口から発生する膨張波の三次元的影響により流れ場が歪められることがわかった。

さらに非対称性が強くなる場合として、縦横比2の長方形断面の衝撃波管から放出される衝撃波背後の流れについて数値計算を行い、管出口からの流れ場に見られる渦輪や二次衝撃波ならびに斜め衝撃波等の三次元的な構造を示した。その結果、流れ構造の特徴は基本的に正方形断面管から得られた結果と一致するものの、時間の経過と共に正方形断面管の場合と比較して流れの非対称性がより強く現れることを明らかにした。

## 第7章 結 論

上述の各項目の要点を纏めて結論とした。

## 審 査 結 果 の 要 旨

衝撃波の回折現象は、高速流体力学の基礎的研究課題として古くから研究されてきた。最近の数値計算法の発展および実験技術の進歩により、これまで十分に議論されていなかった様々の衝撃波回折現象が新たに明らかになりつつある。2次元、軸対称ならびに3次元流れ場での開放端から放出される衝撃波の挙動とその背後の流れの解明は、高速空気力学および工学的に重要な研究課題である。

本研究は、衝撃波管とホログラフィ干渉計法による定量的可視化実験と TVD 差分法による数値解析を行い、開放端から放出される衝撃波およびその背後の渦輪の挙動について理論的・実験的研究を行ったもので、全編7章よりなる。

第1章は緒論である。

第2章では、数値計算について、2次元 TVD 差分法を3次元非船形システムへ拡張し、強い衝撃波に対するスキームの安定化の一手法を提案した。これは有効な知見ある。

第3章では、本研究に用いた衝撃波管および可視化計測法を示し、軸対称流れの干渉計写真に現れる縞分布から密度分布を求める新しい画像処理法を提示している。その一例として、円形断面の開放端から放出される衝撃波とその背後の流れ場の密度分布を求め、数値計算結果との対比を行い、両者は定量的に良く一致した。以上、軸対称現象の干渉写真から定量的なデータを導く本方法は、工学的に非常に有用であり、評価に値する。

第4章では、前章の方法を駆使して、開放端から放出される2次元および軸対称流れ場での衝撃波の回折現象を論じている。数値計算結果と実験結果との比較検討により、開放端近傍での衝撃波の回折、膨張波の伝播、渦の生成等の非線形な流れの構造を解明し、有効な知見を得た。

第5章では、開放端から放出される衝撃波面形状が特異的な変化を経て、平面形状から球形に移行する過程を数値計算と実験とにより明らかにした。これは新しい知見である。

第6章は、正方形・長方形断面から放出される衝撃波の挙動について、実験と数値計算の結果を比較検討している。軸対称の場合と異なる渦輪構造の存在とその挙動を定量的に明らかにし、また、3次元ホログラフィ干渉計法による可視化観測を行った。これは重要な知見である。

第7章は結論である。

以上要するに本論文は、開放端から放出される衝撃波の回折とその背後の流れについて衝撃波管による定量的可視化実験を行い、その結果と数値計算結果を対比し、衝撃波の挙動およびその背後流れ・渦輪構造・膨張波の伝播等を定量的に明らかにした。これらは、流体工学ならびに衝撃波工学の発展に寄与するところ少なくない。

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。