

氏 名	伊 藤 勝 宏
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) 機械工学第二専攻
学 位 論 文 題 目	遷音速流れに関する研究
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 神山 新一

## 論 文 内 容 要 旨

### 第 1 章 緒 論

遷音速流れが高速空気力学の重要な研究課題となって久しく、定常な遷音速流れの研究は目覚ましい発展を遂げている。一方、非定常遷音速流れの研究は、現象の複雑さ、実験研究の難しさのため未だ十分な解明が行われたとは言い難い。過去に衝撃波管を非定常遷音速風洞として利用した研究は少なくないが、その大半は定性的な議論に留まっている。また、数値シミュレーション法の進歩により衝撃波の遷移現象なども精度良く模擬できるようになったが、実験と定量的な比較を行うにはさらなる改良を要する。

本論文では、まず衝撃波管内流れの計測にパルスレーザを光源とするホログラフィ干渉計を用いることによって、衝撃波管が非定常遷音速風洞として十分利用可能なことを実証した。また、衝撃波現象の解明に適した数値シミュレーション法を開発し、その結果を実験と比較し、衝撃波干渉に伴う種々の物体まわりの遷音速流れ現象と物体の空力特性変動を明らかにした。

第 1 章は緒論である。第 2 章では、衝撃波管内の粘性流れの数値解法を開発し、各種衝撃波管問題について基礎的検証を行った。第 3 章では、衝撃波管内流れの計測に適したホログラフィ干渉計について述べている。この計測技術の適用により、物体まわりの圧力分布計測が可能になったこと、また衝撃波管側壁の境界層が実験精度に及ぼす影響を吟味した。第 4 章では、円柱および円柱まわりの非定常遷音速流れについて可視化実験と数値シミュレーションを行い、衝撃波の遷移現象、

衝撃波と境界層の干渉に伴う非定常はく離現象，空力特性変動などを明らかにした。第5章では，角柱まわりの非定常遷音速流れについて可視化実験と数値シミュレーションを行い，前縁角から放出されるはく離せん断層，伴流における渦と衝撃波の干渉などを明らかにした。第6章では，テストモデルとして翼形を用い，風洞壁干渉効果などを明らかにし，衝撃波管が遷音速風洞として利用可能なことを実証した。第7章は結論である。

## 第2章 衝撃波管内流れの数値シミュレーション法

衝撃波管内流れの計測法の進歩により，時間的変動の著しい衝撃波と境界層の干渉およびはく離などを詳細に観測することが可能となりつつあり，それを高精度で再現する数値解法の開発は重要である。最近では，Harten, Yeeによって開発された2次精度TVD差分法が衝撃波管内流れの数値シミュレーションによく用いられる。この方法の基本的な考え方は，双曲型方程式に対する差分解が弱解に収束するための十分条件（TVD条件）を満たすように適当な制限関数を導入して流束を制限することである。そのため数値的不安定性を取り除くための人工粘性項の調節が不要となり，不連続面が鮮明に捉えられる。本研究では，2次精度TVD差分法をNavier-Stokes方程式に適用して衝撃波管内の粘性流れの解析に最適な数値解法を開発し，各種衝撃波管問題を解き，特にMirelsによる衝撃波背後の境界層厚さとの比較等，後の章で述べる研究に必要な諸事項の基礎的検証を行った。

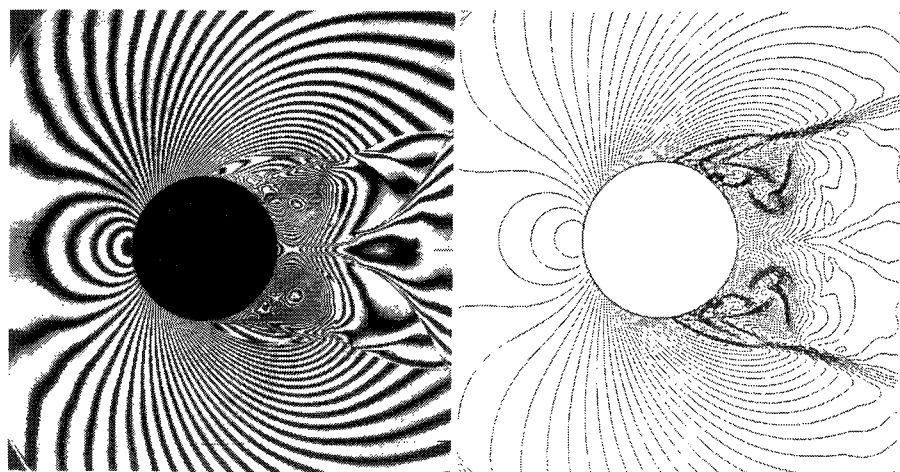
## 第3章 実験方法および可視化計測法

衝撃波管内流れのような短時間現象の定量的計測は，従来至難とされてきた。一般にはシャドウグラフ法，シュリーレン法，マッハツェンダー干渉計法などの光学計測法が用いられるが，シャドウグラフ法やシュリーレン法では高い精度の計測は望めず，マッハツェンダー干渉計法では光学系の組合せに一般性を欠き，衝撃波管実験には向かない。本研究では，ルビーレーザを光源とするホログラフィ干渉計を衝撃波管実験に適するよう開発設計し，流れ場の定量的計測を可能にした。また，後の章で取り扱う現象に現れる衝撃波管側壁の境界層が実験精度に及ぼす影響を検討した。

## 第4章 円柱およびだ円柱まわりの非定常遷音速流れ

円柱およびだ円柱に衝撃波が衝突した後に発生する非定常遷音速流れについて前章で述べた可視化法および数値シミュレーション法を用い，衝撃波の反射・回折，衝撃波と境界層の干渉，非定常な境界層のはく離現象等を解明し，物体の空力特性変動を詳細に明らかにした。

第1図は衝撃波が円柱を通過し境界層のはく離が十分進行した時の流れの様子を示す干渉縮写真と数値シミュレーションから得た等密度線図である。入射衝撃波のマッハ数は1.7，入射衝撃波背後の一樣流マッハ数は0.77，レイノルズ数は $2.5 \times 10^5$ ，衝撃波衝突後の経過時間は $150 \mu\text{sec}$ である。この種の非定常流れにおける境界層のはく離は，後部よどみ点で衝撃波三重点からのマッハシステムが反射して上流へ伝播し，これが物体表面に沿って成長する境界層と干渉することにより誘起されることがわかる。さらにこの過程に衝撃波三重点から生じる滑り線の巻上がり現象が関与するため，



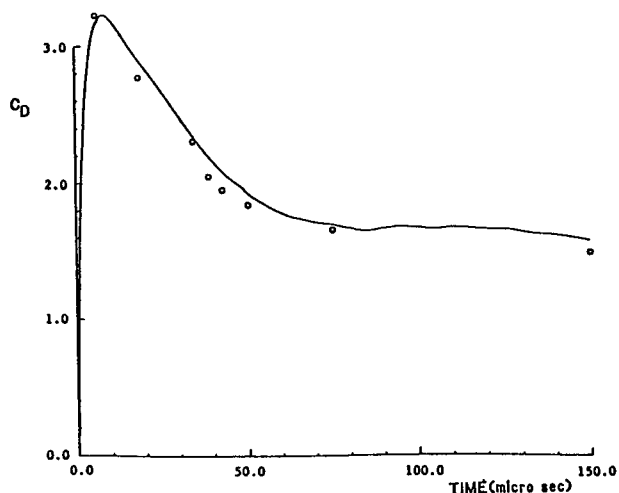
干渉縞写真

数値シミュレーション

第1図 円柱まわりの非定常遷音速流れ

流れは一層複雑になっていることがわかる。境界層との干渉の結果衝撃波は分岐し、干渉域前方には斜め衝撃波、後方には垂直衝撃波が形成され、三重衝撃波構造が現れる。斜め衝撃波と円柱の接点のはく離点となり、はく離せん断層が放出される。はく離せん断層の一端には大きな自由渦が形成され、後方垂直衝撃波と干渉する。円柱面とせん断層の間の逆流域には、複数の小さなはく離泡と衝撃波が発生し、それに伴ってはく離せん断層が波打ち、はく離せん断層に沿って主流中に膨張波と衝撃波が交互に生じる。本可視化実験結果はこのような複雑な流れの微細構造を良く明らかにし、また本数値シミュレーションは実験と良く一致する結果を与えた。またここでは、だ円率  $1/2$ 、 $3/4$  のだ円柱についても可視化実験と数値シミュレーションを行い、だ円形状の変化に伴う流れの変化、特に非定常はく離現象の相違点を詳細に明らかにした。

第2図は、干渉縞を計測して圧力分布を求め、円柱まわりの抗力係数の時間変化を算出し、数値シミュレーションと比較した結果を示す。衝撃波が円柱に衝突後、抗力は急激に増大し、衝撃波が正常反射からマッハ反射へ遷移する時に最大となる。その後抗力は減少し、はく離が発生する時には最大値の  $1/2$  程度まで減少する。新たな複数のはく離泡と衝撃波の発生に伴わずかな変動を残しつつ定常値へ漸近する。他のだ円柱の場合も抗力の時間変



第2図 円柱まわりの抗力係数の時間変化

化はこれと類似の傾向を示す。また、だ円柱まわりの揚力係数の時間変化も求め、衝撃波の反射・回折や非定常はく離現象との関係を明らかにした。

## 第5章 角柱まわりの非定常遷音速流れ

角柱に衝撃波が衝突する時に前縁角で発生するはく離は、非定常はく離現象のもう一つの興味ある問題である。また、伴流における渦と衝撃波の干渉が引き起こす空力特性変動の解明は高速空気力学の重要な課題の一つである。ここでは、角柱まわりの非定常遷音速流れについて可視化実験と数値シミュレーションを行い、衝撃波の伝播に伴い前縁角から放出されるはく離せん断層と逆流域内に生じる複数のはく離渦の構造および相互干渉の様相を明らかにした。また、前縁角および後縁角における衝撃波の反射・回折と空力特性変動の関係を明らかにした。さらに、後縁角から放出されるはく離せん断層および渦と反射衝撃波の干渉、その結果生じる複数のじょう乱とはく離渦の構造、それが空力特性変動に及ぼす影響等を明らかにした。

## 第6章 翼形まわりの非定常遷音速流れ

衝撃波管内に翼形を置いて衝撃波管を遷音速風洞として利用する試みは広く行われてきた。しかし、定量的計測の難しさのため翼面衝撃波や反射衝撃波と境界層の干渉、風洞壁干渉効果、空力特性変動等に関して不明な点が多い。ここでは、翼形に衝撃波が衝突してから翼面衝撃波が形成されるまでの翼形まわりの流れ場を定量的に計測し、数値シミュレーションの結果と比較し、衝撃波管が遷音速風洞として利用可能なことを実証した。また、翼面衝撃波および上下壁で反射した衝撃波と境界層の干渉、それが空力特性変動に及ぼす影響を明らかにした。さらに、上下壁で反射した衝撃波が翼面に達した時から現れる風洞壁干渉効果について定量的議論を行い、それによって翼面衝撃波が後退し揚力が増大する傾向を示すことを明らかにした。

## 第7章 結 論

非定常遷音速流れは、現象の複雑さ、実験研究の難しさのためか未だ十分な解明が行われたとは言えない。本論文では、実験的には衝撃波管内流れの計測にホログラフィ干渉計を導入して、定量的密度分布計測から物体まわりの圧力分布を定量的に決定する手法を提唱し、理論的には2次精度TVD差分法をNavier-Stokes方程式に適用して衝撃波管内の粘性流れの数値解法を開発し、実験結果および数値解析結果との対比から、衝撃波管内の非定常遷音速流れ現象を詳細に解明した。その結果、衝撃波管が非定常遷音速風洞として十分利用可能なことを実証し、衝撃波干渉に伴う種々の物体まわりの流れと空力特性変動との関係を明らかにした。

本研究に対して、御指導を賜りました指導教官東北大学高速力学研究所高山和喜教授に衷心より感謝の意を表します。

## 審査結果の要旨

遷音速流れが高速空気力学の重要な研究課題となって久しい。定常遷音速流れの研究は目覚ましい発展をとげているが、衝撃波の複雑な干渉を含む非定常遷音速流れの研究は、現象の複雑さのためか、未だ十分な解明が行われているとは言い難い。

本論文は、衝撃波管内の遷音速流れを数値解析的に、かつ実験的に究明しようとするもので全編7章からなる。

第1章は緒論である。

第2章は衝撃波管内遷音速流れの数値シミュレーション法を提案している。すなわち、一般曲線座標系における二次精度TVD差分法をナビエ・ストークス方程式に適用した。これは衝撃波管内遷音速流れの研究に高解像度の新しい数値解析手段を加えるものである。

第3章は、衝撃波管内遷音速流れの実験方法と可視化計測について述べている。衝撃波管実験では作動時間が短く、定量的な計測は至難とされた。これを克服するためにルビーレーザーを光源とするホログラフィ干渉計法を衝撃波管実験に適用し、さらに実験結果に現れる側壁境界層の影響を明らかにするなど、この種の研究に重要な知見を加えている。

第4章は、円柱及び楕円柱まわりの遷音速流れの研究である。これら物体まわりの衝撃波と境界層との干渉、及び非定常はく離現象を理論的ならびに実験的に考察し、これら物体の非定常空力特性を明らかにしている。これは重要な知見と言える。

第5章は角柱まわりの非定常遷音速流れに関する研究である。衝撃波管内に置いた角柱まわりの流れ、特に前縁の角を過ぎる非定常はく離流れを数値解析的かつ実験的に明らかにしている。

第6章は、NACA 0012翼形まわりの非定常遷音速流れに関する研究である。衝撃波管内に置いた翼形の非定常空力特性を光学可視化法により定量的に計測し、その結果を数値解析の結果と比較して良い一致を得ている。これは衝撃波管が一種の遷音速風洞として十分活用できることを明らかにしたもので、注目すべき成果である。

第7章は結論である。

以上要するに本論文は、衝撃波管内に置いた各種形状の物体まわりの遷音速流れについて、二次精度差分法による数値解析を行い詳細な定量的光学可視化実験結果と対比し、その非定常特性を明らかにすると共に、遷音速流れの数値解析及び実験研究の今後の発展方向を示唆したもので、高速空気力学の進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。