

称号及び氏名 博士（工学） 坂上 昇史

学位授与の日付 平成 22 年 12 月 20 日

論文名 「超音速境界層の乱流遷移に関する研究」

論文審査委員 主査 新井 隆景

副査 辻川 吉春

副査 大久保博志

副査 千葉 正克

副査 浅井 雅人

論文要旨

本論文は、航空宇宙流体力学分野の重要な未解決課題である**超音速境界層の乱流遷移**に関する著者の一連の研究をまとめたものである。

超音速境界層が層流の状態から乱流に遷移すると壁面摩擦や熱伝達特性が劇的に変化する。それゆえ、超音速・極超音速機の開発では、乱流遷移位置や遷移に伴う抗力・熱伝達の変化量を把握するために膨大な風洞実験が必要になる。しかし、その結果は多くの場合飛行試験とは一致しない。これは複雑多岐にわたる遷移現象の理解が十分でなく、風洞実験と飛行試験の条件を合わせることが難しいためである。亜音速境界層遷移の研究によると、外乱が弱い場合の遷移は線形不安定の臨界レイノルズ数以上の領域で固有攪乱（TS 波）の線形増幅から始まる。TS 波の振幅が主流速度の 0.3~1% に達すると 2 次不安定による斜行波が成長して高剪断層が形成される。さらに高周波 2 次不安定によりヘアピン渦が形成されて壁近傍に縦渦やストリークが生成・発達し、局所的な壁乱流状態（乱流斑点）が生まれる。外乱が強い場合は、TS 波の線形増幅過程を経ずに直接縦渦やストリークが生成され、それらが発達・崩壊する不安定性の連鎖により亜臨界レイノルズ数領域でも乱流遷移する。横流れが生じる流れ場では、横流れ速度分布の変曲点に起因する横流れ不安定により縦渦列とそれに伴うストリーク構造が生まれる。つまり、乱流に至る経路は複数あり、外乱とその強さ、流れの不安定性などに応じて異なる遷移が生じるのである。遷移予測や遷移の抑制・促進制御には、それぞれの遷移を惹起する固有の攪乱とその挙動を支配する不安定性（**攪乱の増幅機構**）と音波や機械的振動などの外乱からこの固有の攪乱が生まれる過程（**攪**

乱の受容過程)に関する知識が不可欠である。

超音速境界層の乱流遷移もマッハ数 4 以下では亜音速境界層と類似の現象であると考えられ、数値計算で遷移を調べる研究が行われている。例えば、低マッハ数域で支配的な主流に対して斜めに伝播する固有攪乱(斜行波対)の振幅が主流速度の 0.1% 程度に達すると縦渦の生成に始まる乱流遷移の軌道に乗ることが予想されている。強いランダム攪乱を与えた場合には、乱流境界層中と類似の渦構造の発生が示唆されている。しかし、これら数値計算に対応する実験結果が存在せず、研究は前に進んでいない。これは風洞実験における超音速層流境界層の厚さが 0.5mm 程度と薄く、その薄い層内の高速流動現象を把握することが困難なためである。極微のプローブを慎重な配慮のもとで挿入しても、それによる攪乱が遷移を支配する可能性がある。遷移の進行を把握するための壁面剪断応力の計測においても同じ問題が生じる。また、熱線流速計などの点計測で遷移を支配する攪乱の構造を捉えることは、現象が周期的でもない限り不可能である。つまり、遷移過程を実験的に把握するためには、遷移を支配する攪乱(渦構造)を可視化するとともに流速や壁面摩擦応力を非接触で計測可能な**定量化可視化法**が必須であるといえる。超音速流の可視化にはシュリーレン法が有効であり、定性的な流れの可視化情報だけでなく遷移に伴う定量データを同時に得ることが原理的に可能である。しかし、その校正法は確立されておらず、また、層流境界層の厚さが薄いため、これまで遷移の研究に用いられていなかった。

このような背景のもと、本論文は、超音速境界層における「**攪乱の受容過程**」とその挙動を支配する「**流れの不安定性(攪乱の増幅機構)**」を理論と実験の両面から解明することを目指し、超音速境界層の安定性解析法、数値計算法、さらに、遷移を引き起こす攪乱の同定と遷移を特徴づける速度分布や局所壁面摩擦などの定量データ取得に必須の「**定量化可視化法**」を確立して行った超音速境界層遷移に関する著者の一連の研究をまとめたものであり、7章からなる。

第1章では、超音速境界層の乱流遷移に関する研究の現状と問題点を述べ、本研究の背景と目的を明確にしている。

第2章では、まず、本研究に必須の微小振幅攪乱の構造と増幅・減衰特性を調べる線形安定性解析コードおよび圧縮性 Navier-Stokes 方程式を直接的に解く数値計算コードを作成し、主流マッハ数 2.2 の超音速平板境界層における固有攪乱の挙動を調べ、計算コードの精度を確認した。次に、圧縮・膨張斜面を過ぎる超音速境界層における固有攪乱の挙動を粘性・非粘性攪乱に対する局所平行流近似の線形安定性解析の結果と比較して、攪乱の挙動が境界層分布の一般化変曲点に由来する変曲点不安定に支配されることを確認した。また、この変曲点不安定の寄与が平均流分布の一般化変曲点における密度と速度勾配の積によって評価できることを明らかにした。

第3章では、作成した計算コードを用いて超音速境界層における微小振幅攪乱の受容過程を調べている。壁面を強制振動させて振動 Stokes 層を導入した場合、励起される固有攪乱の振幅は、亜音速流の場合と同様、振動 Stokes 層に含まれる固有攪乱の波数成分に比例するが、導入したエネルギーが音波攪乱として主流中に放射されるため亜音速流の 1/4 程度になることを示した。超音速流中を伝播する音波(振動マッハ波)が境界層平板前縁に入射する場合は、境界層の発達に伴う準定常的な変動が前縁近傍に形成され、下流で受容される固有攪乱の振幅が、従来検討されてきた主流中の変動振幅ではなく、この準定常変動の振幅に比例することを明らかにした。

第4章では、遷移を惹起する攪乱の可視化とともに遷移を特徴づける定量データを取得するた

めの定量化シュリーレン法を新たに開発した。まず、密度勾配による光束の屈折角計測の精度と再現性を確認する校正法として、平行光束を一定角度だけ一様に屈折させるウェッジ状光学ガラス（ウェッジプリズム）を用いる方法を提案し、その有効性を確認した。次に、2次元後向きステップ角部から生じる膨張波を計測し、屈折角と密度勾配の関係を校正するときの問題点を明らかにした。さらに、主流マッハ数 1.86 の乱流境界層を計測し、平均速度分布、摩擦速度、壁面摩擦応力などの定量データが高精度かつ断面一括で得られることを示し、本開発手法が超音速境界層遷移の計測に極めて有効であることを確認した。

第5章では、定量化シュリーレン法およびピトー管、熱線流速計を用いて、矩形断面を有する測定部マッハ数 2 の超音速風洞ノズル壁境界層の乱流遷移を調べている。まず、遷移の進行を特徴づける平均速度分布や壁面摩擦応力を内層の対数分布と外層の後流分布を結合した複合分布を用いて推定する方法を開発し、その有効性を確認した。次に、定量化シュリーレン法による密度勾配計測により、遷移が始まると壁近傍の平均密度勾配が特徴的に増すことを明らかにした。また、定量化シュリーレン法による結果と複数のスパン方向断面でのピトー管計測より、遷移が風洞側壁近傍から始まり攪乱の横方向汚染によって広がることを確認した。遷移を惹起する渦度攪乱として、数値計算でその存在が示唆されている流れ方向に傾いた渦構造の発生をシュリーレン法による可視化で捉えた。また、その高さや間隔が境界層厚さのスケールを有し、その存在確率分布が乱流に近づくにつれて境界層外層の平均密度勾配分布と相似になることを示した。さらに、熱線計測により、層流状態でも境界層厚さの中央付近で変動実効値が主流値の 8% に達し、遷移の進行とともに壁近傍の実効値が増すことを捉えた。本研究で調べた乱流遷移は、その初期段階の変動場が境界層厚さ程度の直径を有する縦渦とそれが作る低速ストリークに支配され、ストリーク不安定により壁乱流構造としての渦の生成が始まると激しい運動量交換によって平均速度分布が一気に乱流分布に近づくことを明らかにした。

第6章では、超音速ノズル内流れの数値計算を行い、実験で観察された攪乱の増幅機構や流れの不安定性について調べている。まず、一様な超音速流れを得るため超音速ノズル内に生じた圧力勾配によりノズル壁の曲率中心方向に向かう2次流れが風洞側壁境界層内に生じ、この2次流れによって矩形断面の風洞角部に縦渦群が形成されることを示した。また、その発生位置や空間スケールが実験で観察した結果と一致し、遷移の攪乱源となることを明らかにした。次に、2次流れによる横流れ速度分布の変曲点に起因する横流れ不安定により、縦渦列とそれに伴うストリーク構造が生まれ、このストリークの不安定性によって壁乱流特有の攪乱が成長して乱流に遷移する一連の攪乱増幅過程をシュリーレン法による可視化で捉えた。また、壁近傍のストリーク構造の特徴から判断して、亜音速境界層の遷移過程で現れるものと類似の乱流斑点が超音速境界層においても発生することを初めて明らかにした。さらに、横流れ不安定によるストリーク構造の崩壊や乱流斑点の発達から、乱流遷移する位置が非圧縮流の場合の横流れレイノルズ数に基づく遷移レイノルズ数に対応することを確認し、横流れ不安定による乱流遷移の下限レイノルズ数を明らかにした。

第7章では、本研究で得られた主要な成果を総括している。

審査結果の要旨

超音速境界層が層流の状態から乱流に遷移すると壁面摩擦や熱伝達特性が劇的に変化する。それゆえ、超音速・極超音速機の開発では、乱流遷移位置や遷移に伴う抗力・熱伝達の変化量を把握するために膨大な風洞実験が必要になるが、その結果は多くの場合、飛行試験とは一致しない。これは複雑多岐にわたる層流から乱流への遷移現象の理解が十分でなく、風洞実験と飛行試験の条件を合わせる事が難しいことによる。このような背景のもと、本論文は、超音速境界層における「攪乱の受容過程」(固有の攪乱が生まれる過程)とその挙動を支配する「流れの不安定性(攪乱の増幅機構)」を数値解析、実験の両面から明らかにしたものである。得られた成果は以下の通りである。

- (1) マッハ数 2.2 の流れでは、攪乱の挙動が境界層分布の一般化変曲点に由来する変曲点不安定に支配され、このような流れ場では超音速境界層の乱流遷移は亜音速の境界層遷移と本質的に同一である。
- (2) 超音速流中を伝播する音波(振動マッハ波)が、遷移を引き起こす固有攪乱の形成に重要な役割を果たしている。
- (3) 遷移を引き起こす攪乱の可視化とともに遷移を特徴づける定量データを取得するための定量化シュリーレン法を新たに開発し、本手法が超音速境界層遷移の計測に極めて有効であることを示した。
- (4) 矩形断面を有する測定部マッハ数 2 の超音速風洞ノズル壁境界層の乱流遷移は、その初期段階の変動場が境界層厚さ程度の直径を有する縦渦とそれが作る低速ストリークに支配され、ストリーク不安定により壁乱流構造としての渦の生成が始まると激しい運動量交換によって平均速度分布が一気に乱流分布に近づく。
- (5) 超音速ノズルに発達する境界層では、乱流遷移する位置は横流れレイノルズ数に基づく遷移レイノルズ数で表現できることを示し、横流れ不安定による乱流遷移の下限レイノルズ数を同定した。

本研究は、これまで未解明であった超音速境界層の乱流遷移現象を、数値的、実験的に研究し、特に遷移を引き起こす固有攪乱の受容過程と増幅過程を詳細に明らかにしたもので、乱流遷移の研究に多大の寄与と今後の研究の方向性を示すものであり、航空宇宙工学や乱流力学の発展に貢献すること大である。また、申請者が自立して研究活動を行うのに必要な能力と学識を有することを証したものである。

本委員会は、本論文の審査ならびに学力確認試験の結果から、博士(工学)の学位を授与することを適当と認める。