

## 論文の内容の要旨

論文題目 An experimental investigation of the attachment line boundary layer transition on swept cylinders in hypervelocity flow

(高温極超音速気流中における斜め円柱付着線境界層の遷移に関する実験的研究)

氏名 藤井啓介

極超音速境界層の乱流遷移現象への高エンタルピー実在気体効果について調べる目的で、カリフォルニア工科大学GALCIT (Graduate Aeronautical Laboratories) のT5 hypervelocity shock tunnelにおいて、空気、窒素および二酸化炭素を試験気体とした一連の実験を実施した。同設備を用いた半頂角 $5^\circ$ の鋭い先端を持った円錐上に発達する境界層の遷移に関する過去の実験によれば、二酸化炭素を試験気体とした場合に、高エンタルピー効果によって乱流遷移が著しく遅れることが示されていた。今回の一連の実験は、境界層の代表温度や境界層端Mach数といった境界層の状態量が大きく異なるときに、この高エンタルピー効果がどのように現れるかについて実験的に調べることを目的としている。更には上記円錐実験で見られた高エンタルピー効果に関して、境界層の線形不安定性により最も強く増幅される擾乱の周波数と、気体分子の振動や解離反応における緩和時間により定まる特性周波数との関係がどのように境界層遷移に影響を与えているかを調べることを具体的な目標とした。また、それが上記の円錐実験と比べて大きく異なるための条件について考察し、本研究では、これら二つの特性周波数の比を広い範囲で変化させることができるように後退角 $45\text{ deg}$ と $60\text{ deg}$ の斜め円柱付着線における境界層を対象と定めた。本実験において遷移Reynolds数は、付着線における加熱率を計測し完全気体理論値と比較することで決定した。それらを総エンタルピーに対して整理したところ、高い後退角( $\Lambda=60\text{ deg}$ )のケースにおいては、二酸化炭素を試験気体としたときには円錐実験における結果と同様に、高エンタルピー効果は遷移をきわめて強く遅らせることが明らかとなった。ただし、窒素、空気を試験気体とした場合では大きな効果は観測されなかった。また後退角の小さいケース( $\Lambda=45\text{ deg}$ )に関しては遷移Reynolds数への総エンタルピー効果は高後退角( $\Lambda=60$

deg)のケースと比べ、小さくなることが明らかとなった。

以上の実験結果を用いて、本実験条件において遷移へつながる線形不安定性が2nd modeであると仮定して、もっとも強く増幅されると予想される周波数における音響減衰率を境界層の参照エンタルピー条件において算出した。その結果、大きな後退角の実験ケース ( $\Lambda=60$  deg)については音響減衰率の総エンタルピーに対する変化は、観測された遷移Reynolds数の総エンタルピー依存性にきわめて類似した特長を有することが示された。このことは、二酸化炭素分子の振動エネルギー緩和が主要な要因となって、本研究の二酸化炭素の実験で得られたような遷移Reynolds数を大きく増加させるという高エンタルピー効果が現れたという可能性を示唆している。次に、完全気体非粘性線形安定解析を実施し、最大増幅率ならびに上記のように算出された緩和による音響減衰率との比較を行った。その結果、二酸化炭素の実験条件では、それらはほぼ同オーダーの大きさで相互に効果を打ち消しあう状況であるのに対し、窒素および空気の実験条件では二つの特性周波数が離れすぎているため2nd mode周波数における音響減衰率はきわめて小さいことが示された。これらの結果は、大きな後退角のケースの実験結果を支持している。

次に、境界層端Mach数への依存性あるいは境界層端Mach数が異なる場合における総エンタルピー依存性について調べるために、過去に実施された半頂角 $5^\circ$ 円錐の実験結果を、運動量厚を基準とした遷移Reynolds数として再整理し、本実験結果との比較をおこなった。その結果、境界層端Mach数の減少に伴い、遷移Reynolds数への総エンタルピー効果はその重要性を単調に失う傾向が明らかにされた。境界層端Mach数の減少に伴い音響擾乱の特徴を持つ2nd mode不安定性がその重要性を失うためにこの現象がおきるという可能性が考えられた。

以上、本研究において明らかにされたことをまとめると以下のとおりである：

境界層端Mach数の増加とともに高エンタルピー効果によって境界層遷移Reynolds数は増大する。この現象は高いMach数域における緩和現象による音響減衰によって定性的によく説明される。