

## 空間発展 DNS による M=3 超音速境界層の遷移機構の研究

前川 博, 渡辺大輔 (広大院) 尾崎 幸玄 (広大)

## Study of transition mechanism in a supersonic boundary layer at M=3 using spatial DNS

H. Maekawa, D. Watanabe &amp; K. Ozaki

Dept. of Mech. System Eng., Hiroshima University

## ABSTRACT

Spatial direct numerical simulations are used to study the formation and development of three-dimensional structures in a supersonic flat plate boundary layer, where the freestream Mach number is 3 and the Reynolds number at the inlet based on the displacement thickness 1000. Random disturbances are superimposed on the laminar profile at the inlet plane of the boundary layer computational box. Hairpin vortices are generated in an intermittent manner on a low speed streak downstream after the low/high speed streaks formation. The numerical turbulent velocity fluctuations are in good agreement with the experimental data of the supersonic turbulent boundary layer for M=2.9.

Key Words: Supersonic boundary layer, Bypass-transition, Spatial DNS, Aeroacoustics

## 1. はじめに

圧縮性境界層の遷移予測は次世代輸送機的设计にとってキーテクノロジーの一つと考えられてきた。線形理論で予測される初期条件から発達する遷移機構と線形領域をバイパスするいわゆるバイパス遷移現象があることがこれまで知られているが、その遷移機構の詳細な内容は直接シミュレーション (DNS) を使って解明されることが期待されている。超音速流れでは低速流れのような可視化結果は少なく遷移機構の全体像について示唆を与えるデータは多くないが、亜音速流れの遷移機構とは類似性があるものと考えられている。一方、DNS による研究は時間発展問題としてこれまで研究が進められてきたが、通常的时间発展 DNS では境界層の非平行性の影響が理解されにくい欠点があり<sup>1)</sup>、空間発展 DNS はその欠点をカバーしより実験に近い流れ場を作ることができると遷移機構の解明が進むことが期待されている<sup>2)</sup>。

本研究は、高解像空間差分<sup>3)</sup>による空間発展 DNS を使って、線形過程バイパス領域から乱流遷移状態までの圧縮性境界層における遷移機構の詳細を明らかにするものである。本報告では、超音速境界層 (主流マッハ数 3) で等温壁である

## 2. 計算手法

流入境界層の層流速度分布は境界層方程式を解き与えた。また、温度分布はプラントル数  $Pr=1$  として Crocco-Busemann の関係式を用いた。マッハ数  $M_\infty=u$

$/c_\infty$  として、 $c_\infty$  は主流音速である。また、本研究では壁面温度  $T_w=1$  の等温壁を仮定した。一方、DNS において支配方程式は圧縮性ナビエ・ストークス方程式であり、空間の離散化には移流項に 5 次精度風上バイアスコンパクトスキーム<sup>4)</sup>および粘性項に 6 次精度中心コンパクトスキーム<sup>5)</sup>を用いた。流出境界には特性波解析に基づく NSCBC (Navier-Stokes Characteristic Boundary Condition)<sup>6)</sup>を適用した。時間進行は 4 次精度 Runge-Kutta 法により行った。また、計算領域は流入口 ( $x=0$ ) における排除厚さ  $\delta$  に対し、 $0 < x < 500\delta$ ,  $0 < y < 30\delta$ ,  $0 < z < 33\delta$  とした。格子数は  $N_x \times N_y \times N_z = 301 \times 101 \times 96$  であり、主流および主流垂直方向に格子伸長を行っている。

## 3. 計算結果および考察

層流状態にランダム攪乱 (速度変動最大値 5%) を導入すると、渦度変動が同時に作り出され、ストリークが現れることがわかる。ただし、入り口層流のレイノルズ数が低く粘性の影響が大きいので攪乱振幅が大きいと考えるべきであり、超音速境界層においては壁面近くで粘性項の影響が大きく、より高いレイノルズ数流れにおいては小さな振幅をもつ攪乱で遷移が開始すると考えられる。粘性項の影響が大きいことは、主流マッハ数が小さい場合 (例えば  $M_\infty=1.2$  程度) でより小さな攪乱から遷移することよりわかる。速度変動  $u'$  を使って可視化すると図 1 のように見える。そして速度変動  $u'$  のフーリエ変換を行うと、低速・高速ストリークに対応する速度変

動の大きい位置が(y-z)平面内で見出すことができる(図2参照). 図2では $l_r$ は壁摩擦長さを示す. 上流ではストリークの位置や間隔は,  $y=1.0$ の排除厚さ程度, 間隔は $z=120$ 程度と, これまで低速流れのバイパス遷移で観察されたスパン方向間隔( $z=110$ )と比べわずかに広いことがわかる. これは速度分布が壁面付近で若干異なることに由来すると考えられる. 一方, 第二不変量 $Q$ を使った渦構造を同時に可視化すると, 明らかに低速ストリークの近くに主流から鉛直およびスパン方向に少し傾いた渦構造が比較的交互に向きが変化した渦形態がみられる. ストリーク・縦渦構造は, 非圧縮性壁面せん断流で観察されたものと酷似している. その下流ではヘアピン渦のように頭部が明確になる渦構造が間欠的に現れる. このとき, ストリーク間隔はいったん広くなり, その後壁面極近くまでストリークが形成され始める. そして, 乱流境界層が発達し始めると, 間隔が小さなストリークとストリークの分嶺によって形成されたと思われるより大きな間隔のストリークが壁面近傍に発達することがわかる. その上にはもっと大きなスケールの変動が現れる. ストリーク出現頻度最大値の位置( $y=0.44$ )から10倍程度上方の境界層内では大きな(ストリーク間隔のおおよそ2.5倍)構造が出現する. 一方, 図3,4に示すように, 下流の乱流境界層においては,  $u$ 変動が他の $v, w$ 成分より際立って大きい超音速境界層の特徴が現れている. 速度変動は $M=2.9$ の実験結果とよく一致している. 遷移領域では,  $u, w$ 変動とも境界層上方で極大値をもつ.

$M=3.0, Re_\delta=1000, u'=-0.1$

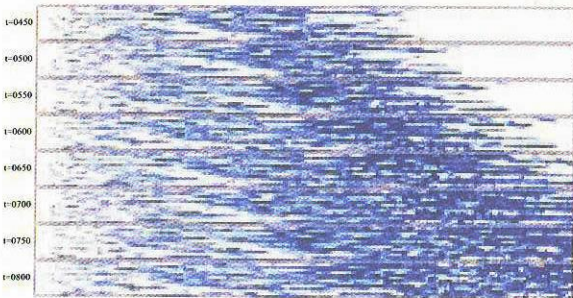


図1 低速ストリーク発達の様子(流れは左から右)

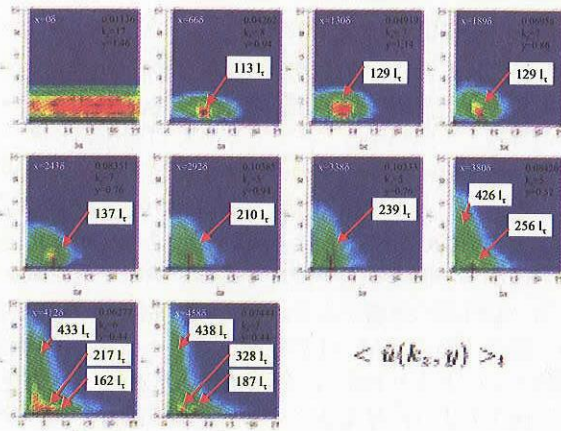


図2  $u$ 速度変動のフーリエ変換 $\langle \hat{u}(k_z, y) \rangle$

#### 4. まとめ

空間発展DNSを実行し以下の事を確認した.

(1) 大きな攪乱によって縦渦構造とともに低速・高速ストリーク構造が明確に現れる. ストリークがある程度発達すると, 低速ストリークの上方に縦渦がスパン方向にやや傾いて存在する. さらに下流では, 低速ストリークが分嶺する状態があらわれ, その位置に複雑化した渦構造が発達してスポット乱流が形成される. 亜音速のバイパス遷移と機構は類似している.

(2) 下流で発達しはじめた乱流境界層の速度変動分布は,  $M=2.9$ 乱流境界層の高レイノルズ数結果と良い一致を示し,  $u$ 変動が大きくなる特徴を示した. ただし,  $w$ 速度変動の壁面付近の大きさは実験結果より大きな値を示した. 詳細はもっと多くの実験結果を調べる必要がある.

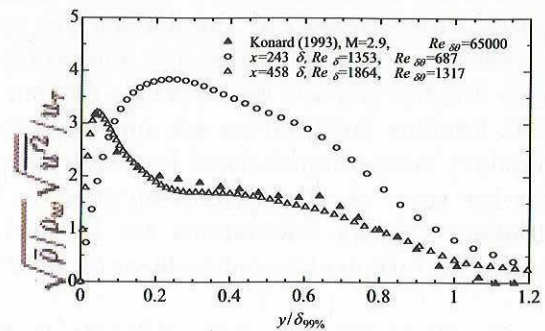


図3 遷移領域( $\circ: x=243\delta: Re_\delta=687$ )と下流( $\Delta: x=458\delta: Re_\delta=1317$ )乱流境界層における速度変動 $\sqrt{\bar{\rho}/\rho_w} \sqrt{u_i^2}/u_\tau$ および $M=2.9$ の実験結果( $Re_\delta=65000$ ).

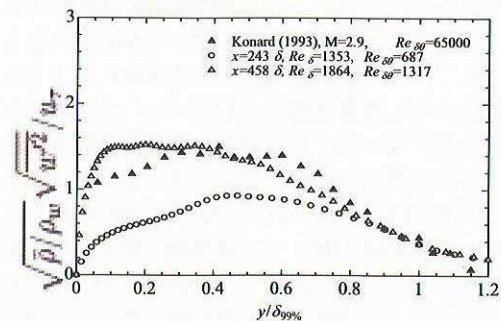


図4 超音速境界層における $w$ 速度変動( $\Delta: x=458\delta: Re_\delta=1317$ )と $M=2.9$ の実験結果.

#### 参考文献

- 1) Adams N. A., Kleiser L., J. Fluid mech. 317, (1996).
- 2) Guo Y., Kleiser L. and Adams N. A., AIAA J. 34, (1996).
- 3) Deng, X., Maekawa, H. and Shen, C., AIAA Paper 96-1972, (1996).
- 4) Lele, S. K., J. Comput. Phys. 103, (1992).
- 5) Poinot, T. J. and Lele, S. K., J. Comput. Phys. 101, (1992).
- 6) Konrad, W., Ph.D. Thesis, Princeton University, Princeton, NJ. (1993).