

## No.21

## 縮流胴壁に沿う境界層の振舞

高木正平、西沢啓、徳川直子(航技研)、側垣正、今井喬弘(青山学院大)

## On boundary-layer transition along wind-tunnel contraction wall

S. Takagi\*, A. Nishizawa\*, N. Tokugawa\*, T. Sobagaki\*\* and T. Imai\*\*

\*National Aerospace Laboratory, \*\*Aoyama Gakuin University

## ABSTRACT

Re-transition mechanism of a laminarized boundary layer on the convex wall of a wind-tunnel contraction was experimentally investigated. Experiments were conducted under the condition that a turbulent boundary layer was formed in the concave region and then it was laminarized due to the strong acceleration on the convex wall following the concave region. The onset of the re-transition locates upstream of the outlet region where the adverse pressure gradient exists. Detailed measurements using a hot-wire sensor show a definite evidence that prior to appearance of the turbulent spots in the re-transition process the laminar velocity profile has an inflection point. The turbulence intensity of about 3% in this unstable boundary layer seems to trigger the rapid re-transition even under the favorable pressure gradient.

**Key Words:** Boundary-Layer Transition, Laminarization, Contraction Nozzle, Pressure Gradient

## 1. はじめに

低騒音の超音速風洞を実現する手段の一つとして、縮流胴壁面に発達した乱流境界層をラバール管の手前で吸い取る方法が確立されている<sup>1)</sup>。しかし、風洞の構造としては複雑にならざるを得ないから、もし縮流胴境界層を層流に保つことができればそれにこしたことはない。著者らは縮流胴に沿う境界層が遷移する機構を航技研較正用低乱風洞(CWT)を用いて調べており、これまでに凹面部でゲルトラ渦が発生する<sup>2)</sup>ことや、凸面部で再層流化した境界層が乱流斑点の発生によって出口近傍で再遷移する<sup>3)</sup>ことなどを示してきた。本研究では再遷移の機構に注目する。

## 2. 実験装置・実験方法

実験にはCWTの縮流胴(図1)を用いた。座標系は流れ方向をX、スパン方向をY、鉛直方向をZとし、座標原点は縮流胴入り口壁面のセンターライン上とした。変曲点は縮流胴入り口から40%Lに位置する。測定部の主流流速は $U_{\infty}=40\text{m/s}$ とした。レイノルズ数は $R_x=U_{\infty}L/\nu=4.5\times 10^6$ であり、この時縮流胴の出口近傍において再遷移が生じる。

計測にはIプローブと熱線流速計を用いた。また、ホットフィルムシート(Tao of systems SF9501)を壁に貼り付けて間欠率を測定した。

## 3. 結果と考察

図2に天井壁における静圧係数 $C_p$ の分布と、ポテンシャル理論<sup>4)</sup>から得た壁面及び縮流胴中心軸に沿う $C_p$ 分布を示す。計測結果と計算結果は、出口近傍領域を除いて非常によく一致している。一般に、有限長さの縮流曲線が直線部と連結する場

合、縮流胴の入口と出口近傍で壁面に沿って逆圧力勾配が生じることは避けられないものであるが、本風洞においても計測、計算の両結果から出口付近で明らかに逆圧力勾配領域が見られる。

図3にホットフィルムで計測した間欠率 $\gamma$ の分布を示す。凸面部に至ってからしばらくは $\gamma\approx 0$ の層流状態が維持されているように見えるが、その後 $\gamma$ は徐々に増加していく。再遷移の開始位置を $\gamma\approx 0.005$ の位置と定義すれば、このレイノルズ数における再遷移位置は $X/L=0.63$ である。これは出口近傍の逆圧力勾配領域の開始点( $X/L\approx 0.85$ )よりもかなり上流であるから、再遷移の原因は逆圧力勾配ではないことがわかる。

図4に縮流胴中心線上で計測した平均速度及び乱れ強度の鉛直方向分布を示す。 $X/L=0.35$ から0.68にかけて境界層内の乱れのピーク値は減少していく。このことは確かに加速による再層流化が生じていることを表している。しかし、間欠率の分布は $X/L=0.35$ および0.44において $\gamma\approx 0$ であるから、壁面だけに注目すれば既に層流化が完了したように見えるのに対し、これらの位置における境界層内の乱れの大きさは決して小さくないことが分かる。さらに特筆すべき点は、 $X/L=0.35$ から0.68にかけて境界層の速度分布に変曲点が現れていることである。一般的にこのような速度分布は攪乱に対してより不安定であり、かつ、再層流化は完遂せずに3%程度の乱れが残留する。したがって、加速流といえども再遷移直前の境界層は極めて遷移しやすい状態にあるものと推測される。既報<sup>3)</sup>に示したように、再遷移は乱流斑点の自然発生によって開始するが、強い外乱が存在する場合にはT-S不安定を経ずに乱流斑点が発生することが最

近の研究<sup>5)</sup>で明らかになっている。本実験の場合も、再遷移直前における攪乱の発達が、初期攪乱の振幅が大きい場合の遷移機構として最近注目されている Transient growth<sup>5)</sup>によるものなのか興味深い。また、変曲点型の速度分布がどれほど再遷移に寄与しているのか、なぜこのような速度分布形状になるのか、等が今後の課題である。

4. まとめ

縮流胴内の境界層が出口近傍で再遷移する機構を調べ、出口の逆圧力勾配はその主要因でないことを示した。再層流化の過程で加速流中にも関わらず変曲点を持つ速度分布が形成され、さらにその中で残留乱れをトリガとして乱流斑点が発生するようである。

参考文献

1) I.E.Beckwith, F.-J.Chen & M.R.Malik: AIAA pap. 88-0143(1988)  
 2) S.Takagi, A.Nishizawa & N.Tokugawa: 3<sup>rd</sup> International Symposium on THMT (2000) pp. 275-282.

3) A.Nishizawa, S.Takagi, N.Tokugawa & T.Sobagaki: AIAA pap. 2001-0278 (2001).  
 4) 小林 陵二: 東北大学 速研報告, Vol. 46 (1981) pp. 17-37.  
 5) M.Matsubara & P.H.Alfredsson: J. Fluid Mech., Vol.430 (2001) pp. 149-168.

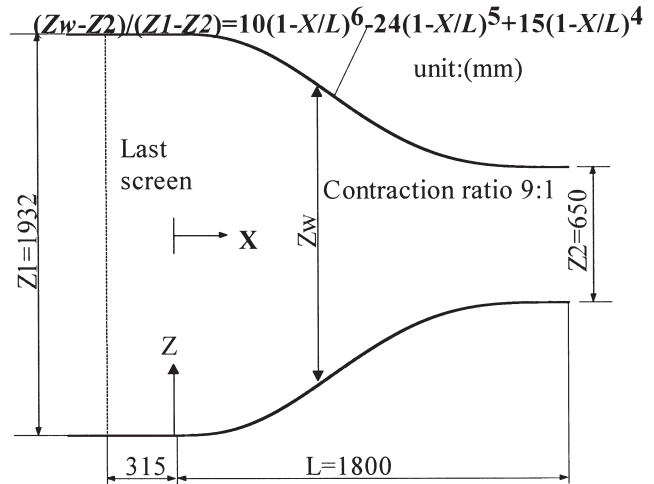


Fig. 1 Contraction nozzle.

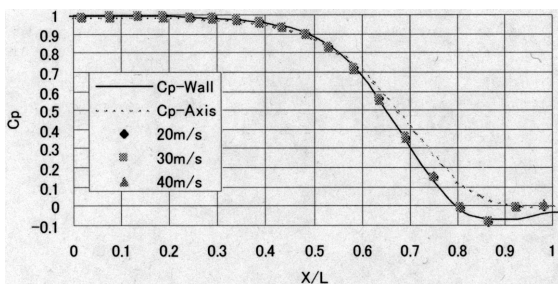


Fig.2 Cp distribution along the wall surface at Y=0. Symbols are the experimental results. Solid and broken lines are the results by a potential theory<sup>4)</sup>.

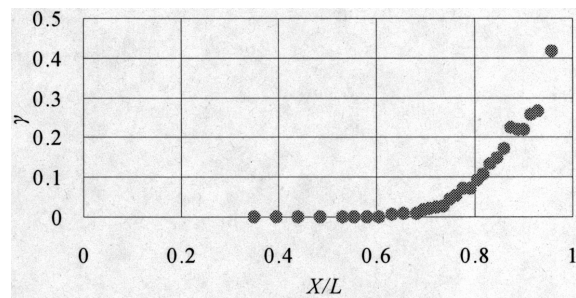


Fig.3 Intermittency distribution along the wall surface at Y=0.

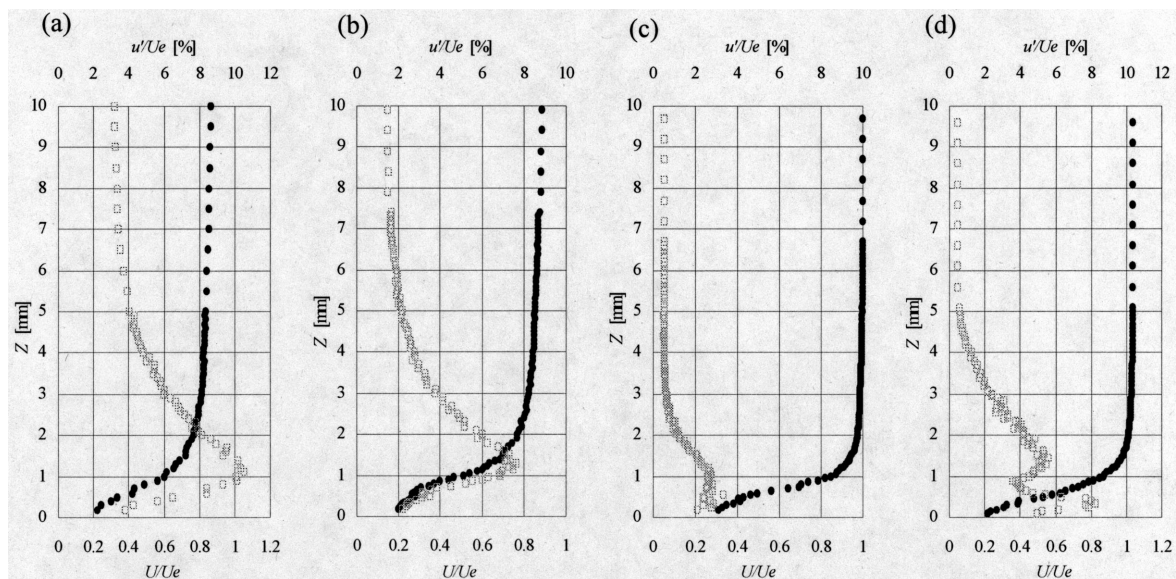


Fig.4 Streamwise variation of the velocity and fluctuating velocity profiles at Y=0. Solid and open symbols indicate the mean velocity,  $U/U_e$ , and fluctuating velocity,  $u'/U_e$ , respectively.  $X/L$ = (a): 0.35, (b): 0.44, (c): 0.68, (d): 0.85.