

20

# 後退翼に沿う三次元境界層遷移について

高木正平\* ウィリアム・サリック\*\*

## Experiments on Swept-Wing Boundary-Layer Transition

by

Shohei TAKAGI  
*National Aerospace Laboratory*  
 W.S. SARIC  
*Arizona State University*

### ABSTRACT

The three-dimensional boundary-layer experiments were conducted on a 45° swept wing in the ASU Unsteady Wind Tunnel. Crossflow-dominated transition was produced on a very smooth surface with contoured end liners to simulate infinite swept-wing flow. The model surface was carefully polished and buffed up to  $\pm 3 \mu\text{m}$  to minimize roughness effects on transition. Fixed-wavelength vortices, traveling wave and inflectional breakdown were subsequently observed prior to turbulent state as before, but the transition location moved further 10% – 20% downstream of the chordlength. In order to control traveling wave and inflectional breakdown, two kinds of acoustic sounds, which tune up the traveling wave and breakdown, respectively, were introduced visualizing the surface flow via two- or three-dimensional roughness elements. No acoustic effect was observed in visualization.

**Keywords:** three-dimensional boundary-layer transition, inflectional instability, traveling wave

### 1. はじめに

後退翼面上に発達する三次元層流境界層は二次元のそれに比べるとかなり低いレイノルズ数で遷移が生ずる。周知のように、これは翼前縁方向の横流れ不安定に起因している。しかしこの横流れ不安定によっていかなる不安定機構が形成され、どのような過程を経て乱流に遷移するかについては、まだ十分に理解されているとは言い難い。例えば、実験では流れを可視化するとほぼ主流方向に軸を持つ定的な縦渦列が境界層内に観察<sup>1~3)</sup>され、下流で時間依存型の変動（一次不安定波<sup>4)</sup>

が現われる。理論ではこの一次不安定波の方が縦渦の成長率より大きいと予測しているが<sup>5,6)</sup>、一次不安定波が縦渦より先に観測された実験報告は今のところない。このことについて一般には模型（特にその前縁部で）の粗さが強く影響しているためと解釈されている。ただ実験で観察される縦渦の間隔、縦渦の主流に対する傾斜角あるいは不安定波の周波数等は理論とかなり良く一致している点<sup>6)</sup>は注目に値する。伊藤と門田<sup>7)</sup>は後退二次元橢円翼上に発達する境界層の安定性について後退角のない場合の臨界遷移レイノルズ数と比較した。それによると後退角のない場合には、境界層の遷移はT-S型の不安定で開始するが<sup>7,8)</sup>、翼が後退角を持つと翼の前縁は横流れ不安定に支配さ

\* 航空宇宙技術研究所

\*\* アリゾナ州立大学

れ、臨界レイノルズ数は急激に減少する。しかしその後縁側は後退角のない場合のようにT-S型の不安定波が増幅される。さらに理論では横流れ不安定によって成長する不安定波の周波数はT-S型の変動に比べると一桁以上も小さいと予想しているが、それでも縦渦（周波数0）の発生を旨く説明出来ない。一方文献6)の模型前縁近傍の  $dC_p/dx$  は常に負で、この領域ではT-S型の不安定に対しで安定<sup>9)</sup>である。これは文献7)と対立しているが、文献7)を支持する実験結果もまだない。回転体の境界層では回転面に固定された縦渦が観察されているものの、一次不安定波が報告されていない。

以上述べて来たように、力学的には同じ方程式に支配されている筈の後退翼、後退円柱、回転円盤及び回転球等の上に発達する三次元境界層でも、理論的にも実験的にも統一的な説明が今のところできていない。三次元境界層の流れ場は複雑で実験的に計測しにくい量も多く、そのためにも今後理論と実験との綿密な連係作業は不可欠である。遷移の後期では一次不安定波より一桁以上も高い二次不安定波が発生するが、これは縦渦によって巻き上げられた遅い流体から形成される変曲点型の不安定から生ずるもの<sup>10)</sup>であり、上記何れの境界層でも観察されている<sup>4,10~12)</sup>。以上のことを鑑みアリゾナ州立大学で次のような実験を試みた。

## 2. 実験の主眼点

- 2.1 文献6)で用いた模型の粗さを従来の1/10まで小さく（公称±3μm）した場合の、遷移レイノルズ数の変化
- 2.2 縦渦と速度分布との対応
- 2.3 また縦渦と一次不安定波との関係
- 2.4 前縁近傍に貼付した厚さ9μm、直径4mmあるいは幅4mm、長さ200mm及び $X/c=0.2$ に貼付した厚さ25μm、幅4mmの粗さの効果
- 2.5 一次不安定波の伝播方向
- 2.6 2.4の粗さがある場合とない場合について一次、二次不安定波に同調する音波の効果について調べた。なお項目2.1を除いて全ての実験は翼弦長cと主流流速に基づく

レイノルズ数 $R_c$ を $2.6 \times 10^6$ に保った。

## 3. 実験結果

2.1ではナフタリン法で流れを可視化し、遷移点を乱流ウェッジの発生点とした。この方法は熱線と熱膜風速計による結果とも良く一致し<sup>6)</sup>、遷移点の検出法として確立された方法とみてよさそうである。それによると遷移レイノルズ数は $R_c$ に依存するが、滑らかな面では10~20%増大した。また縦渦の発生位置は空間的に固定され、再現性は極めて良好であった。表面から0.5mmより外層では速度の遅い領域と昇華の早い領域は対応し、速度の遅い領域の間隔は可視化写真から求めた縦渦の間隔と良く一致した（項目2.2）。従来と同様に縦渦は一次不安定波より先に発生した（項目2.3）。2.4に関し粗さ9μmに基づくレイノルズ数は約14で、二次元境界層では全く遷移に影響のない粗さでも三次元境界層では遷移レイノルズ数を約10%減少させた。項目2.5では2本の熱線を用いた。1本は $X/c=0.4$ の表面から0.5mmの位置に固定し、もう1本はトラバース装置で表面から約1mmの位置を保ちながら、時空間相関を求めた。搅乱は前縁にほぼ平行に伝播すると予測する理論結果<sup>13)</sup>を裏付ける結果は得られなかった。一次、二次不安定波に同調する音波の効果（項目2.6）を調べるために流れを可視化し、ナフタリンの痕跡を注意深く観察した。その結果、音波の有無に拘らず、縦渦の発生位置、間隔及び遷移点の移動は観察されなかった。

## 引用文献

- 1) Anscombe, A. & Illingworth, L. N. : ARC R & M 2968 (1952).
- 2) Gray, W. E. : R. A. E. TM Aero-255 (1952).
- 3) Gregory, N., Stuart, J. T. & Walker, W. S. : Phil. Trans. A248, 155 (1955).
- 4) Poll, D. I. A. : J. Fluid Mech., 150 (1985), pp.329-356.
- 5) Malik, M. R. & Poll, D. I. A. : AIAA Paper-84-1672 (1984).

- 6) Dagenhart, J. R., Saric, W. S., Mousseux, M. C. & Stack, J. P. : AIAA Paper-89-1892 (1989).
- 7) 伊藤・門田：第22回乱流シンポジウム講演論文集 (1990), pp.169-173.
- 8) Schlichting, H. : Chapter X in Boundary Layer Theory, Sixth Edition (1968).
- 9) Saric, W. S. : Private communication March (1991).
- 10) Kohama, Y. : Acta Mech. 66 (1987), pp.21-38.
- 11) Kohama, Y., Saric, W. S. & Hoos, J. A. : Proc. of the Royal Aeron. Soc. Conference on : Boundary-Layer Transition and Control April 8-12 (1991).
- 12) 高木正平：第22回乱流シンポジウム講演論文集 (1990), pp.174-178.
- 13) Dagenhart, J. R. : NASA TP1902 (1981).

