

横流れ不安定場の解明、予測、そして制御

小濱泰昭、江上泰広、河上充佳、春田善之、島垣 満（東北大流体研）

Transition Mechanism, Prediction, and Control of Crossflow Field

Y. P. Kohama, Y. Egami, M. Kawakami, Y. Haruta, and M. Shimagaki

Institute of Fluid Science, Tohoku University

ABSTRACT

Through systematic investigation concerning the crossflow dominant boundary layer transition, we have clarified the complicated transition mechanism experimentally. Namely, transition starts with stationary streamwise vortex (crossflow vortex) generation. We call this as "Primary Instability". Then, Primary instability induces three unsteady instabilities, F_1 , F_1' (relatively low frequency), F_2 (relatively high frequency). F_1 travels to crossflow direction, F_2 travels to streamwise direction, and F_1' travels to the opposite direction with F_1 . It seems to be that F_2 enhances the transition into full turbulent. Taking into consideration of such flow mechanism, we have developed prediction method introducing C_1 , C_2 which is valid in general three-dimensional boundary layer transition. Knowing the threshold value for critical condition either by experimentally, or numerically, we can predict transition onset simply calculating potential flow information. We have also developed unique and practical selective suction method to delay the transition with less suction power. We could succeed to delay the transition with one third of the power of uniform suction.

Key Words: Transition, Drag reduction, Prediction, Boundary layer, Flow control,

1. 緒言

航空機の巡航性能は基本的には揚抗比で決まる。従って抵抗を如何に低減できるかが技術課題になる。その抵抗の中身のうち、より抵抗を低減できる可能性が残されているのが、亜音速機の場合摩擦抵抗と誘導抵抗である。二次元境界層の層流制御に関連した研究は主翼の摩擦抵抗を低減することを目的として戦中から戦後にかけて盛んに行われてきている。その後航空機の高速化に伴い、衝撃波による造波抵抗低減が重要になり、後退翼を採用することになるが、後退角は表面境界層を三次元化して横流れ不安定を誘発、摩擦抵抗を増大させてしまう。オーダーとして当然造波抵抗が大きいため後退角は持たせざるを得ないが、如何にして横流れ不安定性により促進される乱流遷移を遅らせるか、が重要な技術課題になっている。これに関連した研究は、これまでの研究は三次元境界層の乱流遷移のメカニズム解明が主流であり、幾つかの乱流遷移シナリオが明らかになりつつある⁽¹⁾。

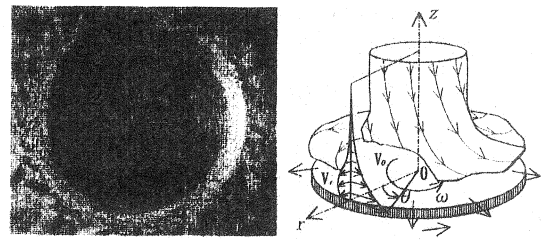
我々も三次元境界層に関して主として実験的な

立場から長年その解明の研究を行ってきた。その結果、一次不安定性として定常な縦渦が発生、その縦渦の成長が非定常の低周波不安定性を誘発、さらに高周波不安定性（高周波二次不安定性）を誘発、乱流遷移へと早期に移行⁽²⁾することを解明している。このような遷移プロセスは回転体、傾斜体、湾曲体一般に共通している。現在のところこれ以外の乱流遷移シナリオ⁽³⁾も見受けられるが、我々の乱流遷移メカニズムを前提として予測並びに制御を検討してみるのもそろそろ良いのではないかと、との判断で現在研究を進めている。制御に関しては、従来の一様吸い込みがあるが、その制御のために必要となるパワーが抵抗低減によるメリットを相殺してしまい、実用性が必ずしもあるとは認識されていない。Saric らは、発生が予想される横流れ渦のピッチより僅かに狭い間隔で微小粗さを翼の前縁付近に設置、それにより乱流遷移を遅らせる、という実験も提唱している。このような制御が実用上も可能であれば実に有効は制御法であり、評価できる。

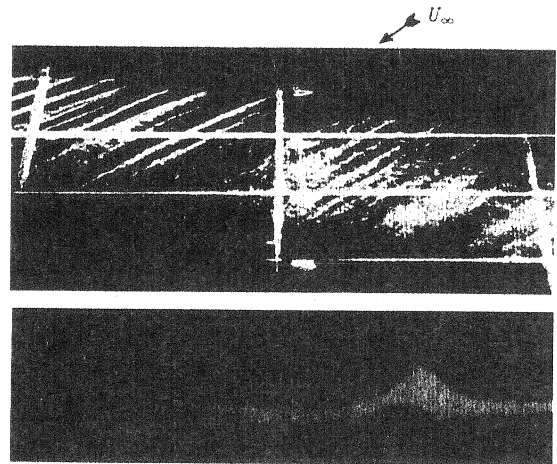
以下に我々の制御研究の途中経過を示す。

2. 乱流遷移メカニズム

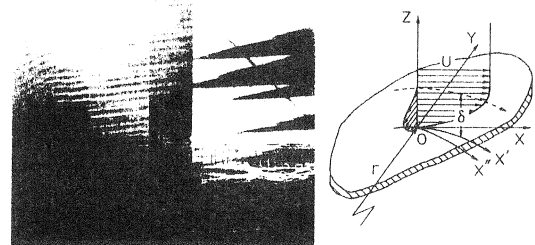
横流れ不安定は後退翼境界層に生じるが、実験室レベルでは回転円盤を使用して研究されることが多い。定性的には類似の流場を提供する。さらに実験の容易さを考慮して造られたモデルに後退平板+圧力印加物体がある。そして実機の主翼のモデルを用いたより実用的な測定も可能である。ここではこれらのモデル全てを使用、それぞれの特徴を生かした形で実験を行い、横流れ不安定性が卓越する乱流遷移メカニズムを正確に明らかにすることを試みている。図1に回転する円盤、後退平板、後退翼それぞれの境界層の可視化写真と速度場を示す。また図(b)には後退平板境界層の内部断面構造を煙により可視化した画像も示している。これらの実験情報から得られた流の構造と安定計算より得られた流線、そして発生する非定常不安定性 f_1, f'_1, f_2 の関係を図2に示している。図中破線は横流れ速度の方向が逆転する位置を示しており、Sはサドルポイントを示す。この図から、Sにおいて速度の速い上からの流と速度の遅い下からの流が衝突して速度分布に変曲点を作り、その複雑な三次元流により主流方向には f_2 を、横流れ方向には f_1 を、そして f_1 と180度伝播方向と伝播高さが異なる f'_1 を作ることが分かる。そのきっかけをつくっているのが壁面に生じる剥離泡であり、あたかも固体の突起の役割をしている。この突起状の剥離泡が境界層底部の図では左から右へと動く遅い流れを上を押し上げ、変局点タイプの三次元速度分布を作る原因になっている。従ってこの剥離泡を含む遅い流を選択的に吸い込む(除去する)ことが可能であれば乱流遷移を遅らせることが出来ることになる。



(a) 回転円盤境界層



(b) 後退平板境界層



(c) 後退翼境界層

図1. 横流れ不安定性の発生する流場

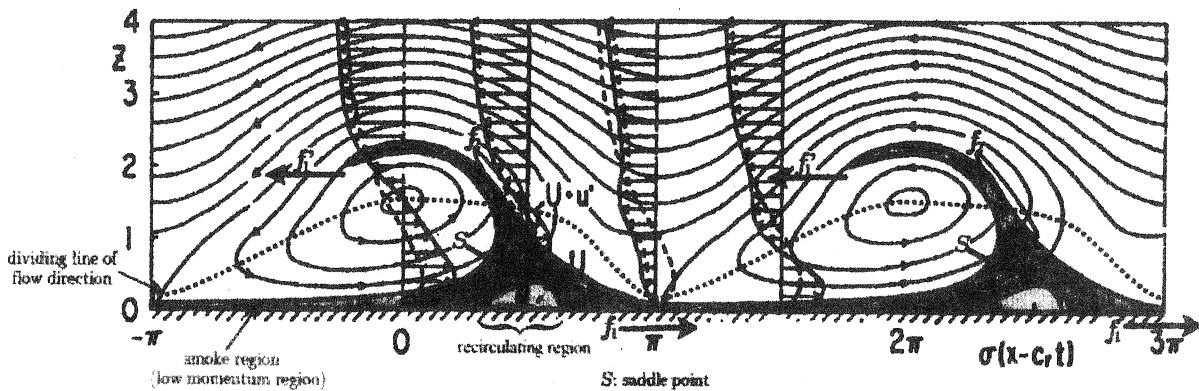


図2. 定在型横流れ渦と非定常不安定性 f_1, f'_1, f_2 の関係

3. 乱流遷移の予測

三次元境界層に発生する不安定性の一つとして横流れ不安定性が存在するが、三次元境界層全体を見渡す事でより一般的な乱流遷移のメカニズムが見えてくる。三次元境界層とは要するに①回転体表面、②湾曲体表面、③傾斜体表面に発生する境界層であり、何れも遠心力やコリオリ力などの外力が強く作用する場合であることがわかる。図3に一般的な三次元境界層の場を示すが、流線が湾曲する結果遠心力が外力として凸の曲率外側に作用する。そしてこの外力は壁に並行な部分と壁に垂直な部分とに分力できる。流体力学的な安定性の立場からこれらを考慮すると、壁に垂直な成分は所謂ゲルトラ不安定性に対応し、水平な

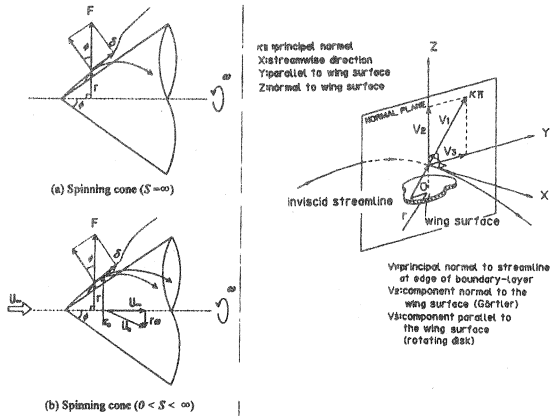


図. 3 一般的三次元境界層の局所流場

成分は横流れ不安定性に対応する。詳しい説明は避けるが、遠心力の壁に水平に作用する成分も結局は壁に垂直に作用する成分と同じ不安定な状況を境界層内部と外部との間に生じさせる事が分かっている。従って、ゲルトラ数と同じ考え⁽⁴⁾で新たにパラメータとして二つを定義すると以下になる⁽⁵⁾。

$$C_1 = \frac{U_c \theta}{v} \sqrt{\frac{\theta \sin \varphi}{r_{e1}}}$$

(横流れ不安定性を評価するパラメータ)

$$C_2 = \frac{U_c \theta}{v} \sqrt{\frac{\theta \cos \varphi}{r_{e2}}}$$

(ゲルトラ不安定性を評価するパラメータ)

これらのパラメータは主流の情報のみ(非粘性計算、境界層内部の情報不要)で求める事ができる。求めた値を例えば実験で得られている閾値と比較、不安定点を決定すること(遷移の予測)が可能となる。何れか一つのパラメータが閾値を超えれば不安定になる、と考える事ができる。図4にこのようにして求められたパラメータの値とNファクターを計算により求めて示す。

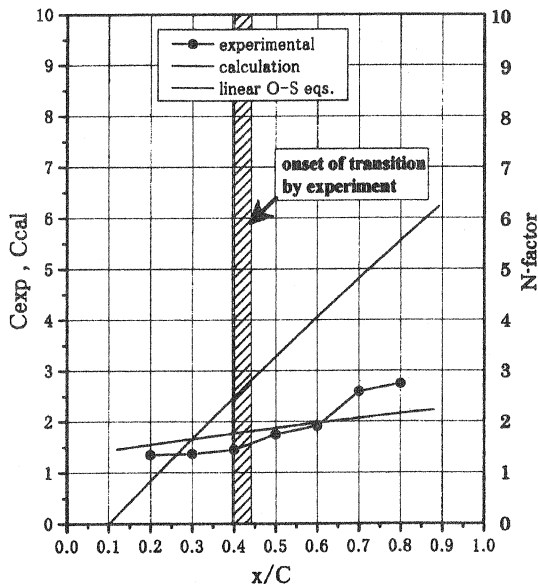


図. 4 予測パラメータ C_1, C_2

4. 乱流遷移の制御

これまでの実験から、発生する横流れ渦は発生場所に極めて安定して留まることが判明している。発生後、数ミリの高さの構造が有っても場所を変えることが無い。このことから、渦の位置を考慮した選択吸い込みの可能性が出てくる。即ち可視化、ないし他の方法により発生渦の場所を特

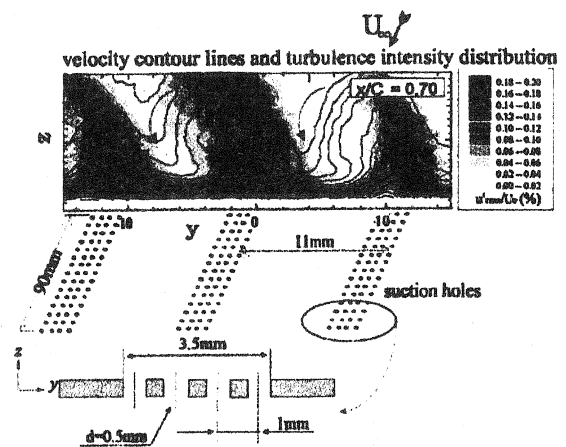


図. 5 縦渦と吸い込みデバイスとの関係

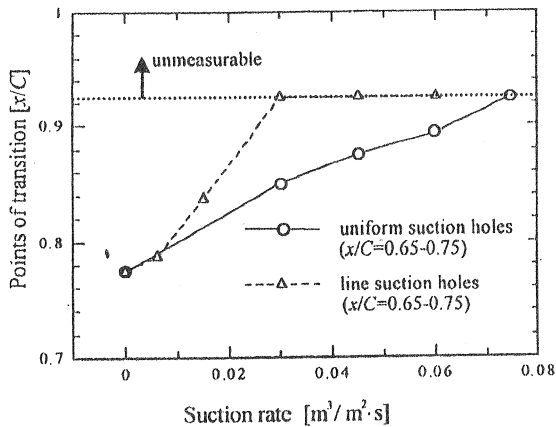


図6. 吸い込み量と遷移の遅れの関係

定、その渦の下に存在する剥離泡の位置に吸い込み位置を設置することも可能となる。そのような発想のもとに造った選択吸い込み装置が図5に示されている。一箇所に0.5mm径4列の吸い込み孔列があり、剥離泡付近の遅い流れを選択的に効率よく吸い込むことを目的としている。剥離泡を吸い込むことが出来れば、図2で左から右へと流れる境界層底部の流は上向きに湧き上がることは無く、従って三次元の変局点速度分布を形成しにくい状況ができる。その結果として乱流遷移を遅らせることが出来ると期待できる。このようにして吸い込んだ結果が図6に示されている。横軸は吸い込み量、縦軸は流方向の距離であり、プロットされた実線が一樣吸い込みの結果、破線が選択吸い込みの結果である。この図から、吸い込み量が一樣吸い込みのおよそ3分の1でおなじ効果が得られることが分かる。つまり一樣吸い込みに比べ、選択吸い込みでは少ない制御エネルギーで同じ効果を得ることが可能となることが判明した。

5. 結言

横流れ不安定場の乱流遷移メカニズムを解明、一般的な三次元境界層の乱流遷移メカニズムへと考察を拡張し、三次元境界層一般の遷移パラメータを導き出した。そしてその流場の性質を利用した選択吸い込み方法を考案、実験的にその効果を調べ、3分の1の制御エネルギーで制御できることを示した。今後はより精度の高い予測に必要となる閾値を求めると共に、制御法が実用上有効であることを示す目的から、実際に後退翼モデルを使用し、その風洞実験から本コンセプトが抵抗低減に有効であることを実証したい。

参考文献

- (1) Kohama, Y., Egami, Y.: AIAA 99-0921.
- (2) Kohama, Y. P., Alfredsson, P. H., Egami, Y., Kawakami, M.,: Laminar-Turbulent transition, H. F. Fasel, W. S. Saric Eds., (1999), 205-210.
- (3) Lingwood, R. J.: J. F. M. 314(1996), 373-405.
- (4) Goertler, H.: NACA TM-1375(1954).
- (5) Kohama, Y., Davis, S.: FED-114(1991), 109-114.