

No.16 水素気泡法による平板境界層の自然遷移の観察

松原 雅春（信州大学），稲澤 歩（東北大流体研），
Fredrik Lundell (KTH)，小濱 泰昭（東北大流体研）

Investigation of natural transition in a flat plate boundary layer using hydrogen bubble method

by

Masaharu Matsubara¹, Ayumu Inasawa², Fredrik Lundell³ and Yasuaki Kohama²
Shinshu University¹, Tohoku University², Royal Institute of Technology³

ABSTRACT

Investigation of natural transition in a flat plate boundary layer subjected to free stream turbulence has been done using the PIV technique for hydrogen bubbles. The disturbances of the free stream turbulence generate streamwise elongated regions of low streamwise velocity, so called streaky structures, in the boundary layer and this structures develop downstream and breakdown to turbulence with spanwise waviness motions. This study is focused on the investigation of the lift-up mechanism that explains in the non-modal theory that the wall-normal velocity disturbance in a shear flow induces the large streamwise velocity disturbance. A new method that includes image processing and algorism to detect three-dimensional positions of bubbles from the stereo images has been developed to obtain instantaneous time-spanwise distributions of the streamwise velocity and the wall-normal velocity. This information makes the streaky structure visible in the velocity fields and reveals the lift-up mechanism in the natural transition process.

Key words: boundary layer, natural transition, free stream turbulence, transient growth, stereo PIV

1 はじめに

主流乱れが数%程度の場合の境界層遷移は、従来考えられていた Tollmien-Schlichting 波（T-S 波）から始まる遷移過程と異なり、スパン方向に境界層厚さ程度で流れ方向に極めて長いスケールを持つ低速領域、いわゆるストリーク構造から遷移が始まるのが流れの可視化や熱線風速計による実験¹⁾により明らかになっている。このストリーク構造は下流でスパン方向に振動を始め、その直後乱流に崩壊し、そこから乱流斑点が発生する。

一方、従来の線形理論とは異なり、流れ方向に対する解の相似性を仮定しない場合、線形攪乱方程式の解として、T-S 波とは全く別の性質や構造をもつ攪乱がより速く成長することが理論的に示されている^{2) 3)}。この理論は攪乱の成長

が粘性を考慮した場合に急速ではあるが一時的なため Transient growth 理論と呼ばれたり、解が複数のモードを含むため Non-modal 理論と呼ばれている。この理論から予測されている攪乱の構造やエネルギーが流れ方向に比例して増加するなどの性質は、自然遷移に現れるストリーク構造とよく一致している。

さらに Non-modal 理論によると、境界層内に取り込まれた攪乱の垂直成分が境界層の平均速度勾配とともに、流れ方向の速度変化を誘起するリフトアップ機構の存在が予測されている。しかしこのとき境界層内に取り込まれた初期攪乱の壁垂直方向成分は結果として起こる流れ方向攪乱に比べエネルギーで数百分の一程度なので、この垂直方向成分を X 型熱線等で測定するのは非常に困難である。

そこで本研究では水素気泡法による流れの可視化によりリフトアップ機構を直接的に観察する。さらにステレオ可視化画像を PIV 的手法で処理し、流れ方向流速 u と壁垂直方向流速 v を求めてリフトアップ機構を明らかにする。

2 実験装置

本実験で用いた回流式可視化水槽を図 1 に示す。絞り比 4:1 を持つノズル下流には断面 $500\text{ mm} \times 500\text{ mm}$ 長さ 3 m の測定部を有し、流れの可視化用のため測定部壁は 3 面ともガラス製である。

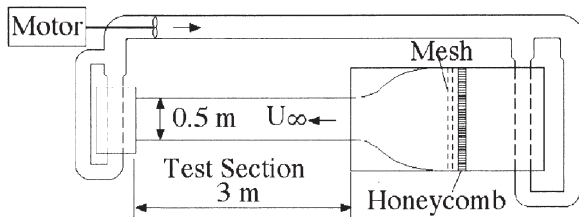


図 1 回流式可視化水槽

この測定部に長さ 95 mm 、厚さ 10 mm のくさび形状前縁を持つ長さ 2095 mm のアクリル製試験平板を測定部底面から 10 cm の高さに設置した。測定部周辺をカメラの配置とともに図 2 に示す。座標系は平板の前縁を原点とし、流れ方向 x 、平板と垂直な方向 y 、スパン方向 z とする。平板前縁よりも 0.5 m 上流に、直径 5 mm のアルミニウム円管を組合せた乱流格子を設置した。格子間隔は 40 mm である。

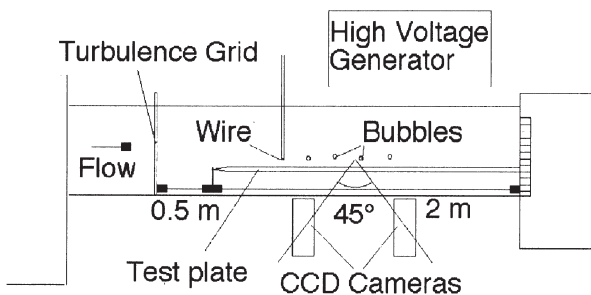


図 2 測定部

流れの可視化には水素気泡を用いた。電極は直径 $50\text{ }\mu\text{ m}$ の金メッキタングステン線で、これに 400 V の電圧を加え水素気泡を線状に発生させた。この気泡を測定部底壁下方に設置した光軸が観察域で交差する 2 台のプロGRESSブス

キャンカメラで撮影した。これら 2 台のカメラと水素気泡の発生を 6 Hz で同期させ、画像を 2 枚のキャプチャーボードによりコンピュータに取り込んだ。

主流の流速 U_∞ と乱れ強さ Tu は $x=0, y=100\text{ mm}$ において LDV により測定した。観察条件は主流流速 $U_\infty=0.098\text{ m/s}$ で主流乱れ強さ $Tu=3.3\%$ である。測定位置 $x=0.9\text{ m}$ におけるレイノルズ数は $Re_x=66000$ である。タングステン線の高さは $y/\delta^*=1.8$ (δ^* はブラジウス解に基づく排除厚さ) で、理論で予想された最大攪乱振幅の位置とほぼ一致する。

3 画像処理及び測定結果

カメラからコンピュータに取り込まれたオリジナル画像を図 3 に示す。流れは左から右で画面の範囲は流れ方向に約 100 mm 、スパン方向に約 80 mm である。これらの気泡線はタイムラインを表わしている。速度の遅い領域が画面の真ん中付近に左右に広がって現われており、ストリーク構造が存在していることがわかる。このストリークの幅は境界層厚さ程度で、目視による観察ではこの構造が数秒間にわたって観察されることから、ストリーク構造がスパン方向に比べ流れ方向に大きく伸びた構造を持つことがわかる。

これらの画像を処理し速度場を求めようとすると、画像のゆがみが問題となる。これはカメラの視線が対象平面と垂直でないため、画面右側と左側の長さスケールが異なってしまう。そのためこの図の気泡線の位置の違いから直接奥行き方向の位置を求めることができないので、試験壁平行平面に投影した画像を座標変換により計算した。両者の投影面を正確に一致させるため、格子模様を印刷した基準対象紙を試験面に直接置き、その画像を取り込んでオリジナル画像の座標と投影面の座標の関係を求めた。

座標変換後の画像から気泡線の位置を数値化するため、以下の手順で画像処理を行った。まず気泡がない場合の画面を数十枚取り込み、その平均をオリジナル画像から差し引くことで試験壁に付着して動かない気泡や装置壁などの映

り込みを取り除いた（図4(a)）．これらの画像を一旦、気泡のある領域が1，無い領域が0になるように二値化した．気泡線と画像ノイズを区別するため、二値化した画像において近傍の画素とアンド処理を行い、1の値がある方向に連続している領域を調べ、さらにこの領域を1とした画像とオリジナル画像をアンド処理した（図4(b)）．この画像を、気泡線が薄い所が途切れることを避けるため、二次元FFTを用いてローパスフィルターをかけた（図4(c)）．さらにその結果を二値化し線状領域の中心位置を求め、この位置を気泡線の位置として定量化した．求めた位置を再び画像に描いた結果が図4(d)である．

二つのカメラ画像から得た気泡線位置の違いから奥行き方向を求め、さらに気泡発生用のタンゲステン線の位置と発生時間間隔から、流れ方向と壁垂直方向の流速を求めた．その結果を図5に示す．流れ方向速度分布図5(a)より、時間方向に長くのびた低速領域いわゆるストリーク構造が見られる．特に、強いストリーク構造が $z=20\text{ mm}$, $t=10\text{ s}$ において見られ、その場所の

壁垂直方向流速は正の値を持つことが図5(b)からわかる．これは、流れ方向の速度変動が壁垂直方向の速度変動を誘起するいわゆるリフトアップ機構によるためと考えられる．

4 まとめ

水素気泡法による流れの可視化により、自然遷移過程に現われるストリーク構造の存在が明らかになった．さらにステレオPIV的手法を用いた結果、境界層内に取り込まれた攪乱の壁垂直速度成分によりストリーク構造が形成されることが確かめられ、Non-modal理論において予測されたリフトアップ機構が実証された．

参考文献

- 1) Matsubara, M. & Alfredsson, P. H. : *J. Fluid Mech.* (To be published.)
- 2) Hennigson, D. S. : *Advances in turbulence V* (editor Benzi R., 1995) Kluwer, 190-204.
- 3) Luchini, P. : *J. Fluid Mech.* 404(2000), 289-309.

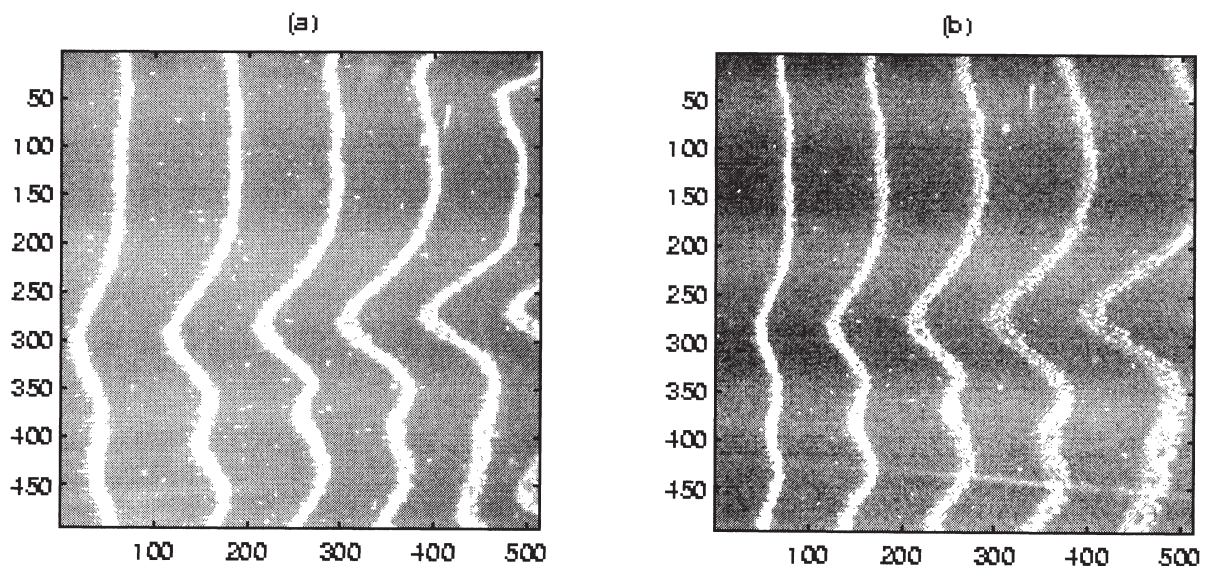


図3 オリジナル画像 (a)上流側カメラ (b)下流側カメラ

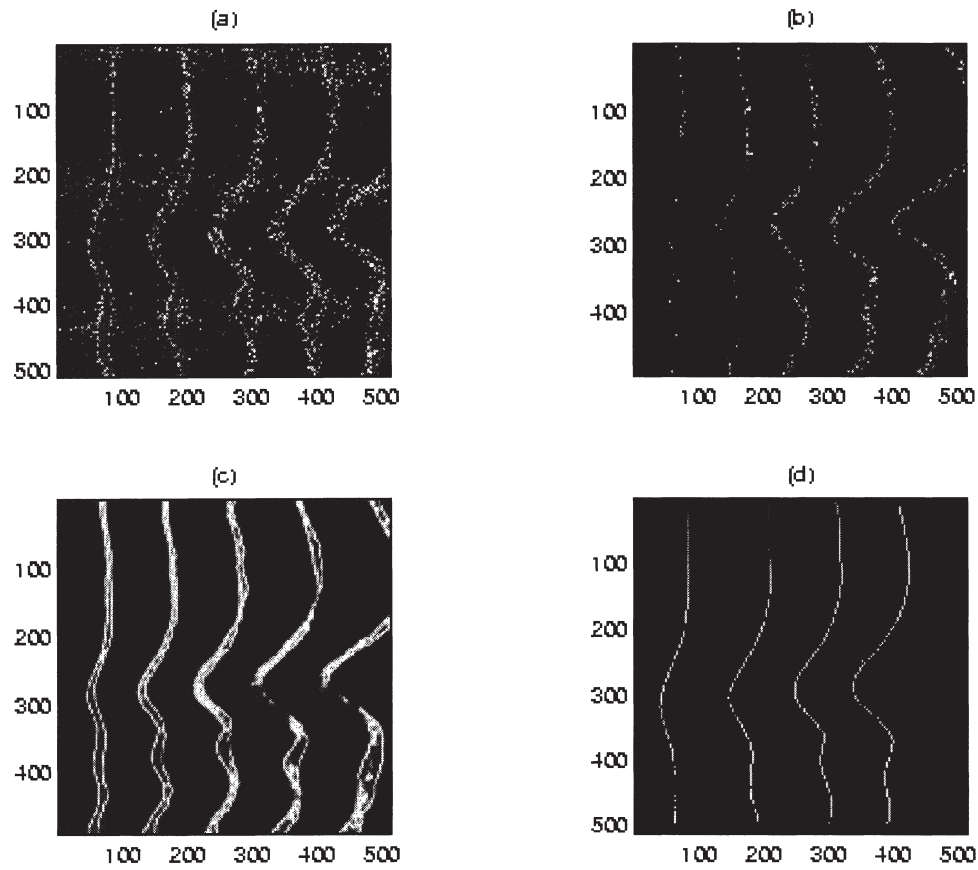


図4 画像処理 (a)平均減法後 (b)ラインフィルタ (c)FFT フィルタ (d)定量値

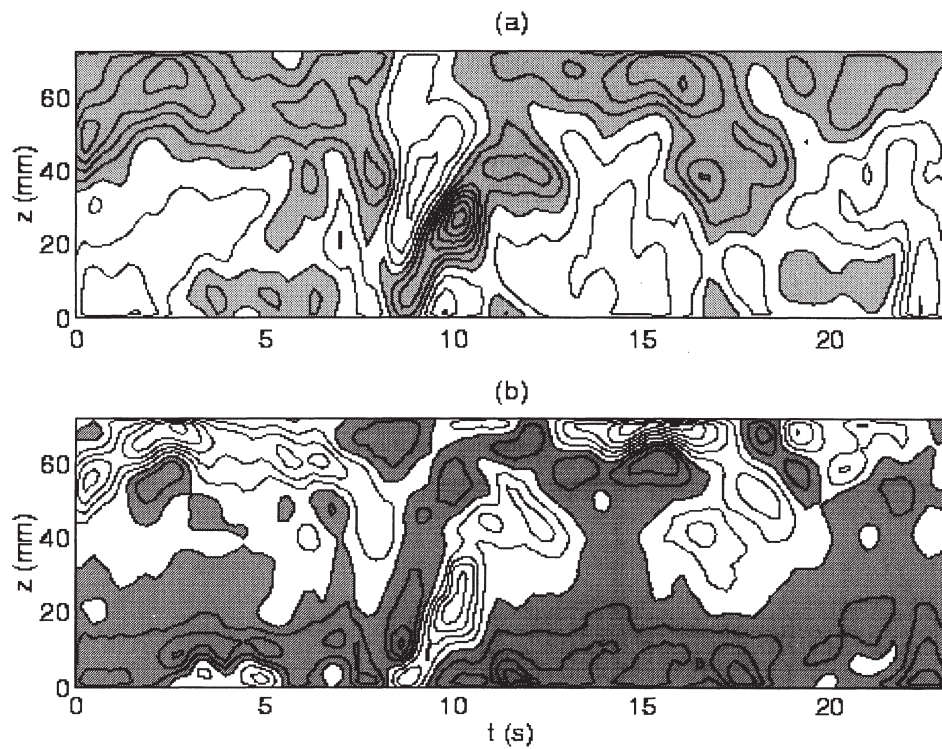


図5 流速分布 灰色部分は負値で等値線は 5mm/s 間隔
(a)流れ方向流速 u (b)壁垂直方向流速 v