

境界層遷移のきっかけとなる渦構造

Vortical Structure which Triggers Boundary Layer Transition

- 福西 祐, 東北大工, 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-0, E-mail : fushi@fluid.mech.tohoku.ac.jp
- 佐藤友裕, 東北大院, 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01, E-mail : tomohiro.sato.r1@dc.tohoku.ac.jp
- 吉川 穰, 宮城県産技センター, 仙台市泉区明通 2-2, E-mail : yoshikawa-jo490@pref.miyagi.lg.jp
- 廣田真人, 東北大工, 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01, E-mail : masato.hirota.r7@dc.tohoku.ac.jp
- 伊澤精一郎, 東北大工, 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01, E-mail : izawa@fluid.mech.tohoku.ac.jp
- Yu Fukunishi, Tohoku Univ., 6-6-01 Aramaki-Aoba, Aoba-ku, Sendai
- Tomohiro Sato, Tohoku Univ., 6-6-01 Aramaki-Aoba, Aoba-ku, Sendai
- Joe Yoshikawa, Industrial Tech. Inst. Miyagi Pref. Govern., 2-2 Akedori, Izumi-ku, Sendai
- Masato Hirota, Tohoku Univ., 6-6-01 Aramaki-Aoba, Aoba-ku, Sendai
- Seiichiro Izawa, Tohoku Univ., 6-6-01 Aramaki-Aoba, Aoba-ku, Sendai

Numerical study is performed to find a key structure that can trigger the boundary layer transition. Two types of simply shaped vortex tubes, namely crank-type vortex tube with its middle section aligned in the wall-normal direction or a Z-shaped vortex tube, are introduced into a Blasius boundary layer as a trigger for the transition. In the case of the crank-type vortex tube, the horizontal parts quickly disappear while the middle section is stretched in the streamwise direction by the velocity gradient of the background boundary layer. However, it eventually decays and the boundary layer stays in the laminar state. However, for the Z-shaped vortex tube case, small new vortices are generated one after another around the original vortex creating a complicated flow structure which eventually leads to turbulence. The mechanism which the first one of the new vortices is generated is presented.

1. はじめに

境界層の乱流遷移に関する研究の歴史は古く、これまでに様々な知見が蓄積されてきた。しかし、遷移境界層中でいかにして乱流が誕生するのか、その初生に関わるメカニズムについては、未だ明確な理解が得られているとは言い難い^{(1),(2),(3)}。そこで本研究では、なるべく単純な渦構造を層流境界層中に意図的に加え、その変化を追うことで流れ場が複雑化する様相を詳細に観察した。これらのアプローチを通して、乱流の初生に求められる渦構造の形状や幾何学的配置を探り、乱流の初生に関わるメカニズムを考える手がかりを得ることを試みた。

2. 計算方法

支配方程式は、一様流速 U と流入境界における境界層の排除厚さ δ_0^* によって無次元化された 3 次元 Navier-Stokes 方程式と連続の式であり、これらを差分法により解いた。その際、微細な変動を捉えるため、未知数である速度と圧力を層流境界層を形成する平均分とそれからの差異である変動分に分離し、変動分についてのみ解くこととした。計算領域は $400 \times 30 \times 40$ の直方体領域であり、計算格子には壁面近傍を密にした不等間隔格子を用いた。格子点数は $2001 \times 101 \times 201$ である。座標系の原点は流入境界の壁面中央にあり、 x, y, z 軸をそれぞれ、流れ方向、壁面垂直方向、スパン方向にとった。また、 U と δ_0^* により定義されるレイノルズ数は 530 とした。境界条件としては、壁面では滑りなし条件を、流入境界においてはブラジウス速度分布を、またスパン方向には速度および圧力に鏡面境界条件を与え、速度・圧力に関してその他の境界では微分量なしのノイマン条件を与えている。なお、圧力の計算領域内平均値は 0 としている。

3. 結果および考察

計算初期において $x = 140$ の位置にクランク状あるいは Z 型の渦を導入し、それぞれの場合のその後の流れ場の変化を観察した。図 1 にそれぞれの渦の初期状態の形状を示す。両者とも渦軸は $y-z$ 面内にあり、クランク状渦の中央部分は壁面に垂直に置かれているのに対して、Z

型の渦の場合には中央部分がスパン方向に傾斜している。上下にある壁面に平行な部分は境界層の循環とは逆方向に回転しており、渦の形態を短時間に失うことを期待している。その結果、中央部分だけが残ることになる。

図 2 (a) にクランク状渦のケースを示す。速度勾配の第 2 不変量 $Q = 0.01$ の等値面を描画しており、渦構造が可視化されている。予想通りにスパン方向に伸びた部分はすぐに消え、中央部分が渦構造として残った。中央部分は境界層の持つ速度勾配により x 方向に傾斜しつつ引伸しを受けるが、やがて弱くなり、直接乱流を発生させることなく消え去った。

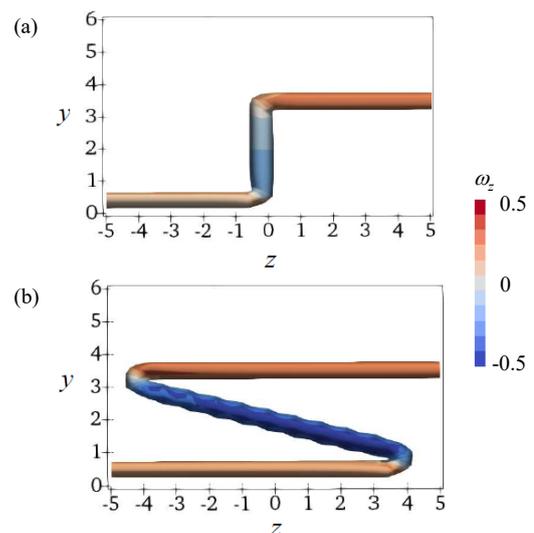


Fig. 1: Configuration of (a) crank-shaped vortex and (b) S-shaped vortex.

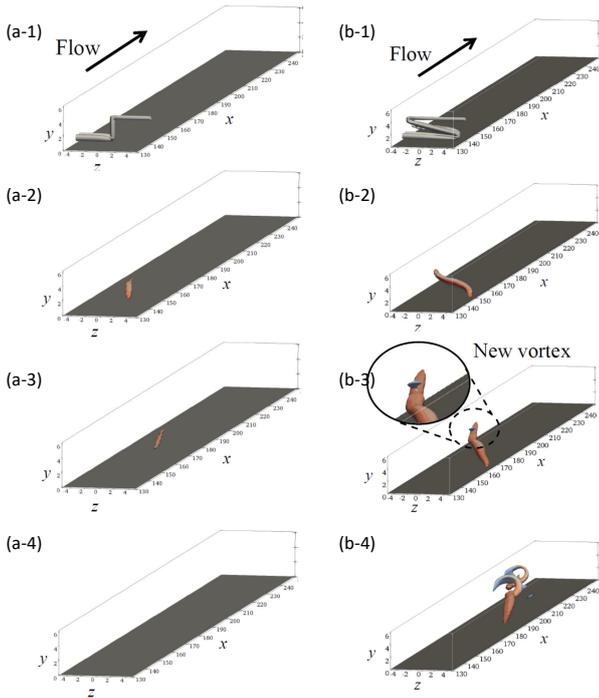


Fig. 2: Growth of (a) crank-shaped vortex and (b) S-shaped vortex at $t = (1) 0, (2) 25, (3) 75$ and $(4) 125$.

図 2 (b) は Z 型の渦の場合である。この場合もスパン方向に伸びた部分はすぐに消えるが、残った中央部分の渦構造が生き残った。そして $t = 75$ において導入した渦のすぐ上に小さな渦片が現れ、その後次々に新たに小さな渦が生まれ、流れ場の複雑化が進展して乱流に遷移した。 $t = 75$ において小さな渦片が現れた付近の拡大図を見ると、この小さな渦片の回転方向は導入した Z 型渦と逆向きであり、その位置は Z 型渦の中央部分が局所的な引伸しを受けて回転角速度が大きくなっている位置の近傍であった。そして、渦片逆向きに回転する成分は、導入した Z 型渦と境界層の平均速度勾配を形成する渦度成分とが干渉することにより作り出されていることがわかった。

4. まとめ

層流境界層中にクランク状あるいは Z 型の渦を導入したところ、クランク状の渦はただ消えるのみであったが、Z 型の渦の場合にはまず逆向きに回転する小さな渦片をその近傍に生み出し、ついで次々と新しい渦が生成されて乱流に至る現象が観察された。最初に生まれる小さな渦片は、導入した渦の一部分が引伸しを受けて強くなり、境界層の平均速度勾配を形成する渦度成分と干渉することにより作られることがわかった。

参考文献

- (1) Singer, B. A. and Joslin, R. D., “Metamorphosis of a hairpin vortex into a young turbulent spot”, *Phys. Fluids* 6 (11), 3724 (1994).
- (2) Yoshikawa, J., Nishio, Y., Izawa, S. and Fukunishi, Y., “Key vortical structure causing laminar-turbulent transition in a boundary layer disturbed by a short-duration jet”, *Phys. Rev. Fluids*, 3 (1), 013904 (2018).
- (3) Yoshikawa, J., Nishio, Y., Izawa, S. and Fukunishi, Y., “Key structure in laminar-turbulent transition of boundary layer with streaky structures”, *Theor. Appl. Mech. Letters*, 9, pp. 32-35 (2019).