

バックステップ流中の渦構造

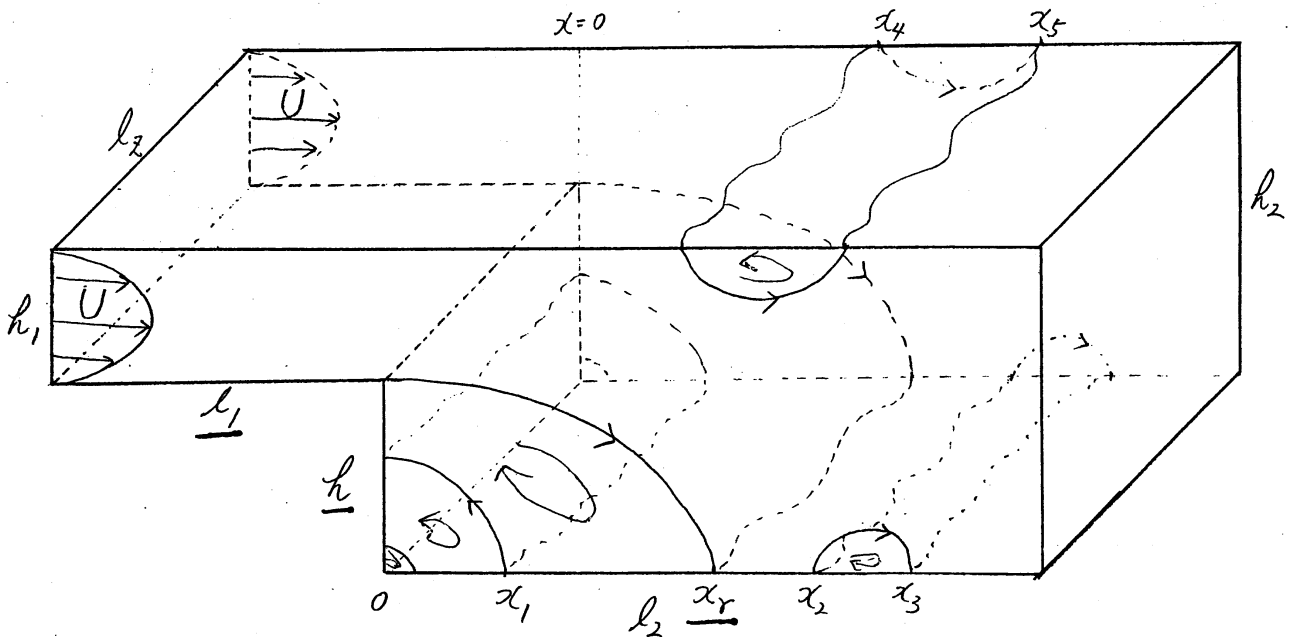
京大院大・理研・物理 高岡正憲 (Masanori Takaoka)

1 はじめに

本講演は、この短期共同研究会の参加者に、今後の研究について議論して頂くことを目的に、一つの話題として提供されたもので、これまでのバックステップに関する研究をサーベイしたものです。

まず、流れ場の全体像と表記（概略）を下図に示します。

U	maximum velocity of inflow	St_x	$= fx/U$ Strouhal number
E	$= h_2/h_1$ expansion ratio	Re	$= Uh/\nu$ Reynolds number



2 二次元流

2.1 定常

- x_r の E 依存性

- $E < 2$ では, x_r は h に比例する.
- $E > 2$ では, upper recirculation ができ, x_r は減少する.

(Ref. Barton ('94))

- x_r の Re 依存性

- (E が小さいほど) x_r は Re のほぼ線形に増加する.
- x_r は $Re \sim 400$ まで増加し, その後減少する.
- $Re > 300$ で upper recirculation ができる.
- $Re > 750$ で second lower recirculation できる.

(Ref. Armaly *et al.* ('83), Thangam & Knoght ('90))

- x_r の平均流入速度依存性

- 流量が同じなら

(Ref. Kaiktsis *et al.* ('91))

- x_r の助走区間長さ依存性

- Re が大きくなると, x_r の差は小さくなる.

(Ref. Kaiktsis *et al.* ('91))

2.2 非定常

- $Re = 600$ は定常流となるか?

- スキームの精度の不足により, 本来定常となるパラメータでも, 非定常となってしまう.

(Ref. Kaiktsis *et al.* ('91), Gresho *et al.* ('93), Osssmald *et al.* ('83), Kim & Moin ('85), 木山 *et al.* ('97), Sethien & Ghonem ('88))

- Re 依存性 : 定常から非定常へ
 - $Re < 400$ で定常で, $x_r \propto Re^{0.75}$ となる.
 - $Re \sim 500$ で, 不安定化し振動運動する.
 - $Re \sim 600$ で, second bifurcation をしている.

(Ref. Kaiktsis *et al.* ('91), Le & Moin ('94))

- 特定の振動数の摂動... T-S 波
 - 下流で T-S 波が見られる.

(Ref. Kaiktsis *et al.* ('91), Asai *et al.* ('96))

3 三次元流

3.1 定常

⇒ 二次元定常

3.2 非定常

- 流れ場の Re 依存性 : 定常 \rightarrow ($Re = 900$) \rightarrow 非定常 \rightarrow ($Re = 5000$) \rightarrow 乱流
 - $Re = 300 \sim 5000$ で, upper recirculation ができる.
 - 流れはステップの後ろでスパン方向に三次元化し, 下流で二次元性を回復する.
 - $Re = 900 \sim 1800$ で, second lower recirculation ができて, x_r は小さくなる.

(Ref. Armaly *et al.* ('83), Denham & Patrick ('74), Kaiktsis *et al.* ('91))

- x_r の Re 依存性

(Ref. Armaly *et al.* ('83), Denham & Patrick ('74), Brederode & Bradshaw ('72), Moss *et al.* ('79), Durst & Tropea ('81), Karniadakis *et al.* ('89), Osswald *et al.* ('83), Patera ('84), Kim & Moin ('85), Sethian & Ghoniem ('88), Ku *et al.* ('89), Armaly *et al.* ('83), Durst & Tropea ('81), Sinha *et al.* ('81))

- x_r の E 依存性

(Ref. Brederode & Bradshaw ('72), Moss *et al.* ('79), Kuehn ('80), Durst & Tropea ('81), Ötügen ('91) Ra & Chang ('90))

- 三次元性：スパン方向の構造

– 二つの separation zone の間で，三次元化が起こる。

(Ref. Armaly *et al.* ('83), Kaikisis *et al.* ('91), Jovic & Driver ('94), 木山ら ('97), Hasan ('92), Bradshaw & Wong ('72))

- バックステップの後流と universal log-law

– ステップの下流 $x \sim 20h$ では，universal log-law より小さく，回復にはもっと長い距離が必要。

(Ref. Le *et al.* ('97), Nagano *et al.* ('91), Driver ('91), (Bradshaw & Wang ('72), Kim *et al.* ('78), Westphal *et al.* ('84), Adams *et al.* ('84))

- recirculation 中に大きな負の skin friction

– $|C_f|$ は Re が増加すると減少する。 $|C_{f,U_N}| = 4.5Re_N^{-0.92}$ 。

(Ref. Le *et al.* ('97), Eaton & Johnston ('80), Westphal *et al.* ('84), Adams & Johnston ('85), Driver & Seegmiller ('85))

- 乱流の生成と turbulent kinetic energy budget

– 上流 ($x = -2h$) では，zero-pressure gradient turbulent boundary layer と同じ。

- recirculation region では, plane mixing layer に似ている.
- 下流 ($x = 7h$) では, production や velocity-pressure gradient は wall region で大きな値をとる.

(Ref. Le *et al.* ('97), Net *et al.* ('93), Chandrsuda & Bradshaw ('81))

流れ場 (x_r) の時間振動... T-S 波, shear layer mode, step mode

(Ref. Hasan ('92), Bradshaw & Wong ('72), Le *et al.* ('97), Jovic & Driver ('94), Eaton & Johnston ('80), Neto *et al.* ('93), Friedrich & Arnal ('90), Driver *et al.* ('83, '87), Le & Moin ('94))

- 特定の振動数の摂動... T-S 波

- f_1 や f_2 に近い振動数の摂動を加えると, x_r は小さくなる.

(Ref. Kaikisis *et al.* ('91), Hasan ('92))

- スパン方向の境界条件

- 周期境界条件を固体壁の境界条件に変えると, x_r は減少する.

(Ref. Kaikisis *et al.* ('91))

4 モデル, クロージャー

- 現象論的モデル

- Helmholtz-Kirchhoff flow の考えを用いたモデル
- Prandtl-Batchelor model, Childress model
- O'Malley *et al.* model, composite model

(Ref. O'Malley *et al.* ('91), Childress ('66), Riley ('88), Sadovskii ('71), Moore *et al.* ('88))

- K - ϵ , RNG, SGS-model, Reynolds stress, ...

(Ref. Neto *et al.* ('93), Zhou *et al.* ('94)), Rubinstein & Barton ('90), Speziale ('87), Yoshizawa ('84))

5 最後に

これまでのバックステップに関する研究をサーベイしてきましたが、調べながら思ったことは、多くの研究がなされてきたがまだまだやることがあり、(計算機の能力の進歩も含め)それが出来る段階になってきた、ということです。そのいくつかを以下に挙げて終わることにします。

- 流入と流出の境界条件をより適当なものとして、定常解の Re 依存性 (recirculation の生成, bifurcation) を調べる。
- 実験との比較や実験では難しい極端な状況を、3次元の直接数値シミュレーションする。
- O'Malley *et al.* model に Moore *et al.* の解を導入することによる改良。