

jh150032-NA20

渦の動力学に基づく乱流生成とその維持機構の理解

伊澤 精一郎（東北大学大学院工学研究科）

概要 乱流がいかんして始まりどのように維持されるのか、その動力学について、(1) 乱流の初生に関わる現象、(2) 3次元境界層の不安定化機構、(3) 乱流渦運動とエネルギー伝達機構の3つの観点から明らかにする。本研究では(2)のテーマについて取り組み、回転円板全体を対象としたシミュレーションを実施して従来の線形安定性解析との比較を行った。その結果、絶対不安定性が発現するとされる臨界レイノルズ数の値 507 が正しくないことを示唆する結果が得られた。

1. 共同研究に関する情報

(1) 共同研究を実施した拠点名

東北大学サイバーサイエンスセンター

(2) 共同研究分野

- 超大規模数値計算系応用分野
- 超大規模データ処理系応用分野
- 超大容量ネットワーク技術分野
- 超大規模情報システム関連研究分野

(3) 参加研究者の役割分担

伊澤 精一郎：取りまとめ
滝沢 寛之：高速化支援
福西 祐：乱流
小林 広明：高速化支援
江川 隆輔：高速化支援
小松 一彦：高速化支援
西尾 悠：乱流遷移
吉川 穰：乱流初生現象
Waleed Abdel Kareem：乱流

2. 研究の目的と意義

我々の身の回りの流れのほとんどは乱流である。複雑で不規則な乱流は、激しい変動をもたらす強い混合作用を有するため工学的にも大いに利用されており、冷却や内燃機関における燃焼効率の向上などの直接的な寄与ばかりでなく、自動車の排気ガスや工場の煤煙といった汚染物質の大気拡散を促進する間接的な側面も持ち合わせている。そ

の一方で、管内流や流体中を物体が移動する場合には摩擦抵抗の大幅な増大をもたらす。例えば、旅客機の空力抵抗の約半分は摩擦抵抗が占めている。したがって、摩擦抵抗を減らして大幅な燃費の改善を図るためには、旅客機の後退翼面上に発達する3次元境界層の遷移過程を把握する必要がある。その物理を知らなければ空力性能に優れた翼型を設計することは難しい。また、管内を流れる乱流を抑制して圧力損失を回復させようとするのであれば、アクチュエータを駆動させるなどして乱流のエネルギー伝達機構に働きかけ、乱流の生成維持システムを破壊する必要がある。現在乱流制御を目的とした様々な手法が提案されているが、吹き降ろしのある個所では壁面から噴流を噴射し、逆に吹き上げがある個所では吸い込みをかけるといった対処療法的な方策が多いのが現状である。このことは、遷移過程を含む乱流についての知識が未だ十分ではないことを示唆している。

境界層の乱流への遷移は、一様流中に含まれる速度変動や音波などの外乱が境界層に取り込まれ、下流で成長することによって引き起こされる。

1969年にMorkovinがこの問題を”receptivity (受容性)”の問題として取り上げて以来、境界層遷移に関する理論的実験的な研究が様々に行われ、多くの知見が蓄積されてきた。一方、乱流研究の歴史はさらに古く、これまでも Prandtl の「混合距離理論」、Taylor の「一様等方性乱流の統計理論」、Kolmogorov の「局所等方性の理論」など次々に様々なアイデアが提出され、現在の乱流研究の

礎となっている。これらの研究により乱流の統計的な側面，すなわち平均像は明らかとなってきたが，時々刻々と変化する乱流がいかにしてその性質を獲得し（乱流の初生），またどのような機構で維持されているのか（乱流の動力学）については不明な点が多い。本研究課題を通じてこれらの点が明らかとなれば，乱流の性質をうまく利用した新たな乱流制御の指針が得られるものと期待される。

3. 当拠点公募型共同研究として実施した意義

実施拠点のサイバーサイエンスセンターは同じキャンパス内にあり，センターに所属する共同研究者と情報交換を密に行うことができ，適宜適切なサポートを受けることができた。

4. 前年度までに得られた研究成果の概要

新規課題のため該当しない。

5. 今年度の研究成果の詳細

本年度は，概要で述べた 3 つの研究課題のうち，2 番目の「3 次元境界層の不安定化機構の解明」について，パソコンレベルでは不可能であった回転円板全体を計算対象としたシミュレーションを実施した。以下にその詳細を述べる。

一定の角速度で回転する円板表面に形成される境界層は，流れの方向と最大圧力勾配の方向が異なるため 3 次元化し，航空機の後退翼と本質的に同じ遷移過程をたどる。その速度分布は Navier-Stokes 方程式の厳密解であり相似解となることから，3 次元境界層の代表例として研究が行われてきた。図 1 は，一定の角速度 Ω で回転する円板上の速度分布の様子を示している。半径方向と周方向の速度成分は，局所外部流速 $r\Omega$ を用いて

$$U_r(z) = \frac{u_r}{r\Omega}$$

$$U_\theta(z) = \frac{u_\theta}{r\Omega}$$

と無次元化でき，自己相似な速度分布となる。ま

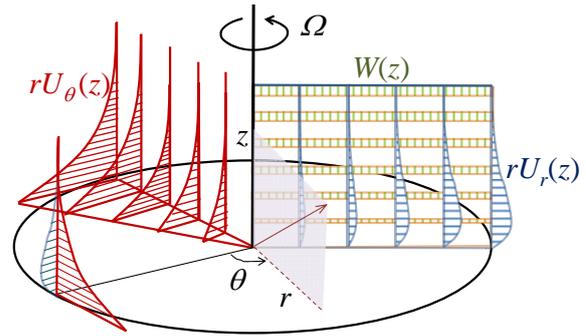


図 1 回転円板上の速度分布

た，回転円板流れにおける層流境界層厚さは，

$$\delta = \sqrt{\frac{\nu}{\Omega}}$$

で与えられるので，円板表面からの無次元高さは

$$Z = z \sqrt{\frac{\Omega}{\nu}} = \frac{z}{\delta}$$

となる。これに対して，壁面垂直方向の速度成分と圧力は，

$$W(z) = \frac{w}{\sqrt{\nu\Omega}}$$

$$P(z) = \frac{p}{\rho\nu\Omega}$$

と，一定の値をとる。ここで ρ は流体の密度， ν は動粘性係数である。このとき，流れ場のレイノルズ数は，

$$Re = r \sqrt{\frac{\Omega}{\nu}} = \frac{r}{\delta}$$

で定義され，回転円板中心からの無次元距離に一致する。

これまでこのような回転円板上に形成される流れ場を対象として，様々な実験や理論解析が行われ，3 次元境界層の安定性について調べられてきた。流れ場の可視化や熱線流速計による計測結果から遷移領域では周方向に並んだ定在的な縦渦が現れることが知られており（図 2），これらの縦渦はレイノルズ数が 300 付近から移流不安定によって成長し，507 を超えると絶対不安定が発現する

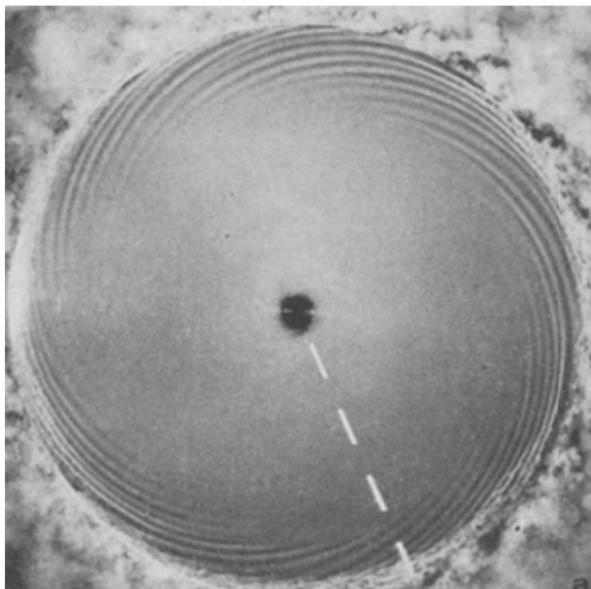


図 2 四塩化チタンによる流れの可視化
(Y. Kohama, Acta Mechanica 50, 1984)

ことなどが報告されている。

移流不安定と絶対不安定の判断は、外部から局所的に加えられたパルス状攪乱の群速度の値にもとづいている。後者の絶対不安定は群速度の零点に関して発生するが、回転円板流れにおいて絶対不安定が存在するかどうかは研究者によって意見が分かれている。Itoh (2001) は、複素特性曲線法を用いて特異点となる群速度の零点近傍における波束攪乱の振る舞いを詳細に調べ、Lingwood (1995, 1997) が提示した絶対不安定の可能性を否定する結果を得ている。

実験では、移流不安定と絶対不安定を切り分けて議論することは極めて難しい。これは、円板表面のわずかな粗さや流入する流れに含まれる攪乱が、境界層内の速度変動の成長に大きな影響を与えてしまうためである。このため、これらの不安定性が境界層の乱流遷移に果たす役割についてはよくわかっていない。本研究で回転円板流れを採り上げた理由もここにある。

そこで本研究では、この点について明らかにするため、回転円板全体流れを対象として 3 次元数値シミュレーションを実施した。従来のパソコンレベルの計算では、GPGPU を用いて演算速度の高速化を図ることはできても、メモリーの制約から

計算領域を周方向に周期境界条件を課した扇状に限定せざるを得なかった。そのため、他の研究で報告されている流れ場に現れる特徴的な螺旋状の縦渦列の本数を考慮して、計算領域の大きさを設定していたのが現状である。今回新たに SX-ACE を利用した円板全体を対象とする計算では、まず Lingwood が線形安定性解析により予測した絶対不安定性が発現する臨界レイノルズ数 507 が正しいかどうかについて検証した。計算では、臨界レイノルズ数に達する半径位置よりも内側の低いレイノルズ数領域で境界層中に短時間局所的な攪乱を与え、その様子を観察した。具体的な計算方法は以下の通りである。

計算は差分法で行い、圧力場と速度場のカップリングには MAC 法を用いた。空間微分項の離散化には式 3 次精度上流差分(Kawamura- Kuwahara スキーム) を、その他の項には 4 次精度中心差分を用いた。時間進行には、2 次精度 Crank-Nicolson 法を用いた。なお、本計算では、微小な変動の成長を精度よく捉えるため、基本流（回転円板流れの層流理論解）からの差分だけを解くこととした。計算領域としてレイノルズ数が 420 から 630 までの領域を確保し、流入及び流出境界に緩衝領域を設けることで、境界条件の影響をできるだけ低減するように配慮した。したがって、本計算の有効計算領域は、レイノルズ数が 441 から 570 までの範囲となる。上流の流入部緩衝領域では、入り口での速度変動成分がゼロとなるように速度変動を滑らかに減衰させ、下流の流出部緩衝領域でも滑らかに減衰させ流出させた。回転円板の回転数は 1200rpm である。外部攪乱は、絶対不安定性が発現するとされる臨界レイノルズ数 507 よりも上流の 470 の位置から点源攪乱を模して与えることとし、その位置の周方向速度の 10% の強さをもった速度変動を、壁面垂直方向に 0.002 回転分だけランダムに与える方法で導入した。理論解析によれば、絶対不安定性に起因する不安定波動の周方向波数は 68 である。そこで、得られた計算結果については、計算領域を全周の 1/68 に限定し、周方向に周期境界条件を課した場合と比較した。後者の

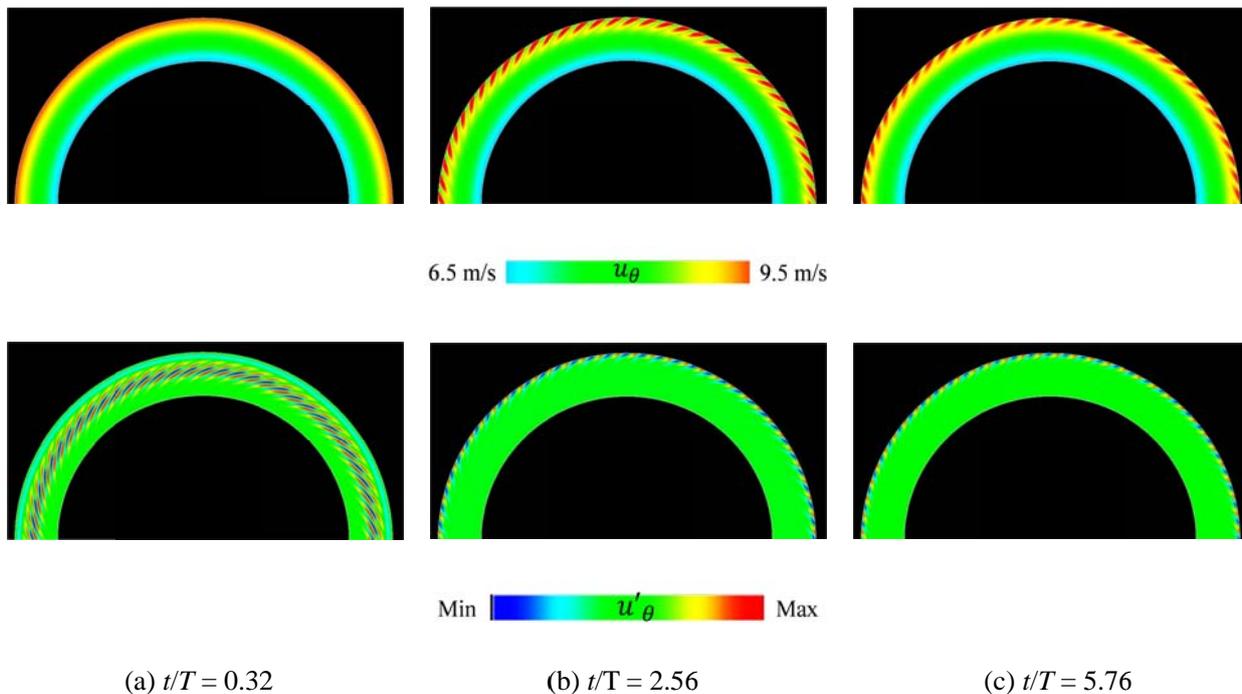


図 3 周方向速度とその変動成分の流動パターン (GPGPU, $Z = 1.0$)

結果については、NVIDIA 社の GTX-TITAN グラフィックカードを 5 枚使用して計算したものである。計算格子点数は、半径方向、周方向、壁面垂直方向に、それぞれ

GPGPU: $139 \times 119 \times 193$

SX-ACE: $139 \times 6143 \times 193$

点である。

図 3, 4 に、 $Z = 1.0$ の高さにおける周方向速度とその変動成分の様子を示す。ここで T は回転周期であり、図の描画領域は緩衝領域を除いた領域である。図 3 の計算領域を周方向に限定した $1/68$ の計算では、その方向に周期境界条件を課していることから、レイノルズ数が等しい周方向 68 か所で同時に攪乱が導入されることになる。このため、レイノルズ数 470 の位置から局所的に短時間導入された攪乱は、互いに干渉しあい、半径方向に流下しながら螺旋状の規則的な速度変動パターンを形成している。これに対して、円板全体を計算領域とした場合、円板上の 1 か所から導入された攪乱は局所的な波束攪乱を形成し、波束攪乱が作る縞状パターン、すなわち縦渦構造は周方向に広がりながら流下する。しかしその範囲は局所的で、

円板が 10 回転以上回っても図 3 のように周方向につながったパターンは見られなかった。

回転円板流れにおいて絶対不安定が発現するのであれば、上流から流下してきた攪乱は、臨界レイノルズ数とされる 507 の位置に達すると、群速度が零の状態でも時間的に増幅するはずである。しかし、周方向速度の変動成分の最大値の時間変化について調べたところ、どちらのケースにおいても、攪乱を導入してから円板が 1 回転まわるまでは急速に増加するものの、その後は一転して減少に転じることがわかった。このことは、Itoh の解析結果を裏付けるものであり Lingwood の説が正しくないことを示唆しているが、その検証には半径方向にさらに広い領域を確保した計算が必要である。現在の計算領域の大きさは、半径方向に $Re \in [420, 630]$ まで確保しているが、上述したように境界条件の影響をできる限り低減させるため、両端には緩衝領域を設けており、実際の領域は $Re \in [441, 570]$ に過ぎない。乱流遷移が起こるのはさらに下流であり、演算時間との兼ね合いもあるが、少なくともレイノルズ数 Re が 700 程度までは計算しておくことが望ましい。これは今後の課題であ

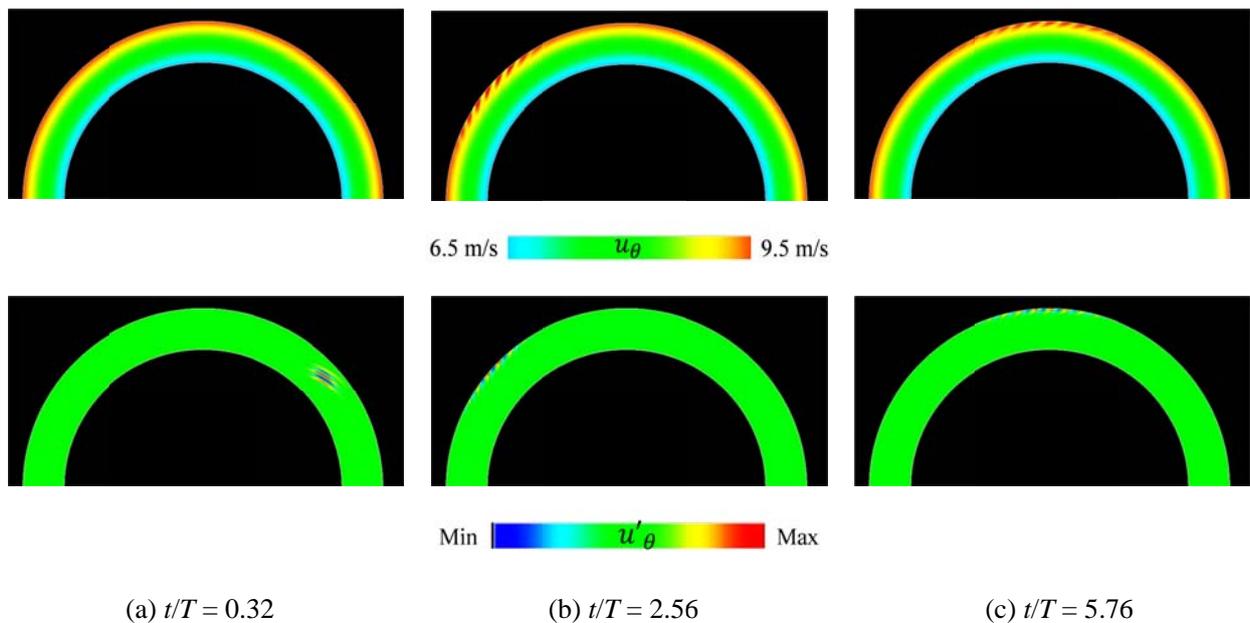


図 4 周方向速度とその変動成分の流動パターン (SX-ACE, $Z = 1.0$)

り，回転円板の安定性と乱流遷移の関係については，更なる検討が必要である。

(4) 国内会議発表
なし

6. 今年度の進捗状況と今後の展望

回転円板の計算に予想以上のコストがかかり，予定していた他の 2 つの研究課題を実施することはできなかった。予算執行の見積もりが甘かった点については，率直に反省したい。本研究課題の継続課題として応募した平成 28 年度の JHPCN 研究課題は不採択であったので，JHPCN の枠組みでの将来計画はない。その代わりに，平成 28 年度は，東北大学サイバーサイエンスセンターとの共同研究が承認されたため，こちらの枠組みで研究を継続する予定である。

(5) その他（特許，プレス発表，著書等）
なし

7. 研究成果リスト

(1) 学術論文

なし

(2) 国際会議プロシーディングス

なし

(3) 国際会議発表

なし