

jh200009-NAH

回転円板上に形成される 3 次元境界層の特徴的な縦渦が乱流遷移に及ぼす影響

李 根燮 (岐阜大学), 滝沢 寛之 (東北大学), 江川 隆輔 (東北大学)

概要

回転円板上に形成される 3 次元境界層の特徴的な縦渦が乱流遷移に及ぼす影響について調べた。半径方向に制約がない全周計算においても、上流からの外乱の導入を止めても全体不安定性によって縦渦が成長し維持されることを確認した。外乱を導入してから 4 回転まで計算した結果、78 本の縦渦が主に成長し、周波数解析をした結果、78 付近の端数が強く成長していることを確認した。理論解析では端数 68 が主に成長する結果であったため、全体不安定性の研究は端数 68 を中心として行われてきた。しかし、今回の結果は全体不安定性において理論解析で用いられる平行流近似は適切ではないことを示した。また、非線形効果による 2 次不安定性によって、縦渦の成長限度が決められその限度を超えると乱流遷移すると知られているが、本研究から 2 次不安定性を調べるための基礎データが得られた。

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

(2) 共同研究分野
超大規模数値計算系応用分野

(3) 参加研究者の役割分担

李 根燮

計算コード作成および計算実行、計算結果の考察

滝沢 寛之

計算コードの高速化支援

江川 隆輔

計算コードの高速化支援

く 2 つに分類される。層流の場合は流れが層状になり規則正しく運動し、乱流の場合は流れが不規則に乱れながら運動する状態を意味する。不規則な状態の乱流は流れへ強い変動を与えることで大きな拡散や混合作用を

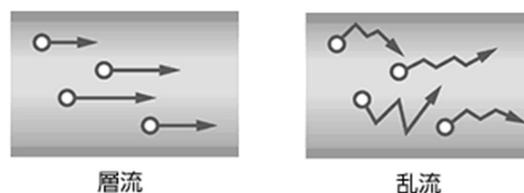


図 1 管内流れでの層流と乱流の違い。流体は左から右に流れている。ある点における流体の時間的変化を表している。

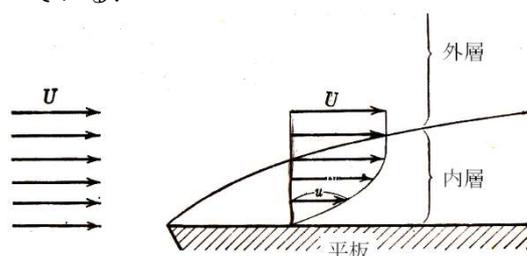


図 2 流れの簡略化。流体が一定な速度で左から右へ流れているとき、平板上の流速の変化を示している。

2. 研究の目的と意義

流れが「層流」から「乱流」へ変化する要因を明らかにすることはできるだろうか？
図 1 に示しているように流れの状態は大き

有し、内燃機関における燃焼効率や熱交換機の冷却効率を向上させ、工場からの煤煙や交通手段の排気ガスなどの汚染物質を素早く拡散させるなどの長所がある反面、摩擦抵抗を大きくさせるという短所も存在する。例えば大型の旅客機になると、全抵抗のうち半分程が摩擦抵抗に占有されてしまう。摩擦抵抗を軽減させ燃費の改善を図るためには、流れの層流領域を長く維持させ乱流領域を減らす必要があり、流れが乱れる理由を理解しなければ流れを制御することは難しい。

流れが層流から乱流へ変化する要因を調べるために数多くの研究が行われてきている。図2のように流れを簡略化しその要因について調べた。

一定速度 U で流体が流れている中、物体周りの流れは粘性効果によって流速が落ちる反面、物体から離れると流速 U を保ったまま流れる。物体の影響が及んでいない領域が外層、流速が減少された領域が内層であり、この内層のことを境界層と呼ぶ。この境界層の中では流れが層流から乱流へ変化する。1969年に Morkovin が「受容性」(Morkovin, Viscous Drag Reduction, 1969)を問題として取り上げた以来、理論的、実験的、数値的な研究が行われ、平板においての流れが層流から乱流へ変化する要因についてほぼ明らかになっている。図3は流れが層流から乱流へ変化する過程を示す。外乱が含まれない理想的な流れであれば、層流から乱流へ「遷移」することはできず、層流の状態をいつまでも保つ。現実での流れの中には必ず外乱が含まれている。外乱は音のような振動が流れに含まれることや物体表面の粗さが原因で発生する。この外乱は最初層流領域に入り流れ、層流から乱流への変化が起き始める領域である遷移領域に到達する。遷移領域で外乱が大きく成長し不規則的になることで流れを乱流に変化させる。外乱が境界層の中で受容され乱流を起こしているといえる。外乱が受

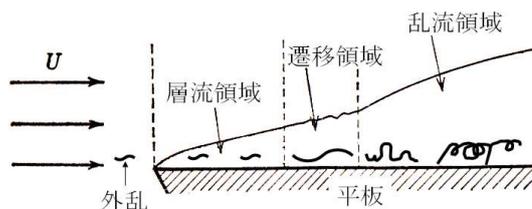


図3 平板上の流れが層流から乱流へ変化する過程。波形の線は外乱を意味する。この外乱の時間変化を示している。

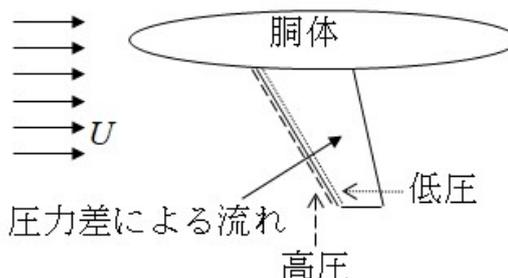


図4 後退翼での流れ。航空機は左に動いている。

容される理由についても数々の研究が行われ、流体の粘性効果や外乱が流れる現象そのものが原因であることが明らかになっている。しかし、我々の身の回りの流れはより複雑であり、必ずしも図3のような流れだけではない。図4は航空機が飛んでいるとき後退翼での流れを示す。流れが後退翼の前縁にぶつかることで高圧になり、翼面上は低圧になる。主流方向と翼面上の圧力勾配の方向が異なり、圧力勾配により主流方向と異なる向きに流れが生じる。この場合、境界層が3次元に変化することから「3次元境界層」と呼ぶ。平板上のような境界層は「2次元境界層」である。この3次元境界層でも流れが遷移する要因について研究されてきているが、2次元境界層より複雑なため不明な点が多く残っている。本研究課題よりその要因が明らかとなれば、その知見をうまく利用した新たな流れの制御の方針が得られることが期待される。

3. 当拠点公募型研究として実施した意義

本研究を当拠点公募型研究として実施した結果、以下の成果が得られた。

スーパーコンピューターでなければ計算が不可能であった結果が得られた。全体不安定性において回転円板上の流れの研究は今まで計算コストの問題上、計算領域や解析できる端数を制限することで進められてきた。実験結果とも大きく異なる結果であったため、実際の現象とどれほど乖離が生じるかが理解できなかった。本研究から制約がない条件での結果を得られたため、実際の現象と今までの結果の間の差が明確になり、より正しい方向に研究を進めることができた。

4. 前年度までに得られた研究成果の概要

該当なし

5. 今年度の研究成果の詳細

計算機利用上の工夫した点を以下に示す。

計算コードを高速化するために、既存の計算コードにベクトル演算ができるように修正した。また、MPI を用いた並列を行うためにコードを修正した。計算領域を分割する方向を決める必要があったため、最も効率が高かった周方向を分割し、分割面のデータのやり取りが必要な領域と分割された計算領域の計算を同時に計算し、計算効率を向上させた。そして、スーパーコンピューターで計算を行うとき、32, 64, 128 のノード数を試し、より効率よく計算できる 64 のノード数で計算を行った。

研究成果を以下に示す。

図 5 は周方向速度のカラーマップを時間系列で示す。回転数 0.05 では外乱を導入し止めた後であるため、不完全な縦渦を形成している。回転数 1 では縦渦が繋がれ成長していき、回転数 4 では縦渦が流れ去らず、円板

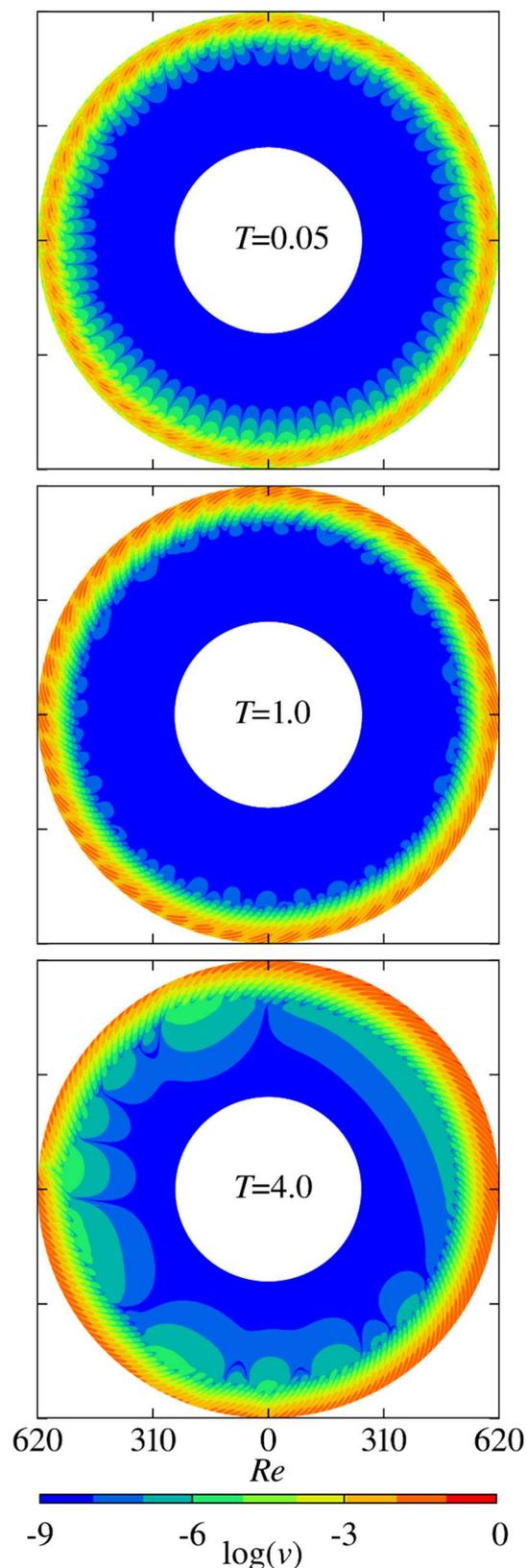


図 5 $z=1.17$ での周方向速度のカラーマップ。 T は回転数を示す。 Re はレイノルズ数を示し、本計算では半径方向の長さと同じ。

外側に維持されている。このことは全体不安

定性によって縦渦が維持されていることを意味する。また、ある位置では縦渦が弱くなっていることがわかるが、これは全体不安定性によって成長できる波数が同時に成長しているからであると考えられる。

図 6 は半径方向における周方向速度の RMS 値の変化を示す。一般的な流れ場において、乱れた流れは下流に流れながら成長する。図 6 の結果からもそのような傾向がみられるが、 $Re=520$ から RMS 値の成長に変化が見られ、より高い成長率を示す。しかし、 $Re=620$ に近づくと RMS 値の成長が抑えられることが分かる。一般的な流れだと、上流で示されている RMS 値の成長率で下流まで続くのであるが、 $Re=520$ から RMS 値の急激な成長は全体不安定性によるものであり、 $Re=620$ 付近で全体不安定性が発現していることを示す。これは本計算の場合、非線形ナビエストークス方程式を計算しているため、全体不安定性によって成長できる限界が存在しているからである。 $Re=620$ 付近で乱れた流れが維持されているため、上流も乱れている状況になっている。

図 7 は波数解析した結果を示す。 $T=4.0$ 回転数において、波数 78 が主に発達していることが分かる。先行研究の理論解析では波数 68 が主に成長するという結果が示され、本研究の結果と異なる結果になった。理由としては理論解析で使われている平行流近似が実際の流れと乖離しているからと考えられる。また、波数 78 付近の波数も大きく成長していることから、全体不安定性によって 78 以外の波数も同時に成長していると考えられる。

図 8 は周波数解析結果を示す。結果から各波数成分に分離した後に解析を行った。波数は主に発達した 78 付近の波数成分の周波数解析結果を示す。波数とそのピーク周波数が一致すると、その波数成分は円板と同じ速度で回転していることを意味する。全体不安定性によって成長した各波数成分は自分の波数よりピーク周波数が低いため、円板より遅く回転している

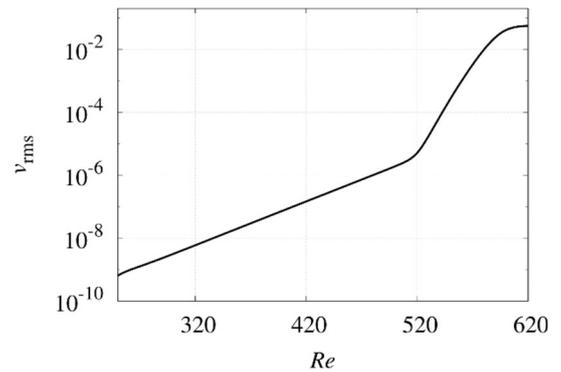


図 6 $z=1.17$ での周方向速度の RMS 値の半径方向における変化を示す。

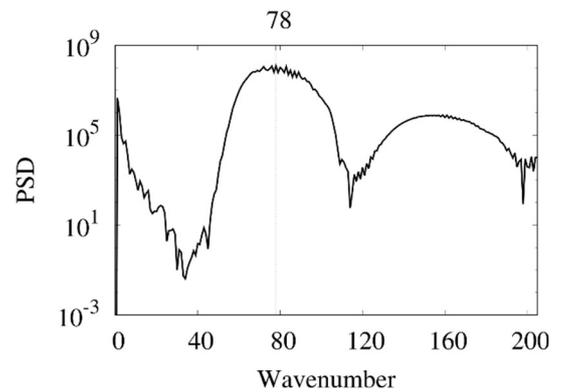


図 7 $T=4.0$, $z=1.17$, $Re=600$ での波数解析結果を示す。PDS は Power spectral Density を示す。

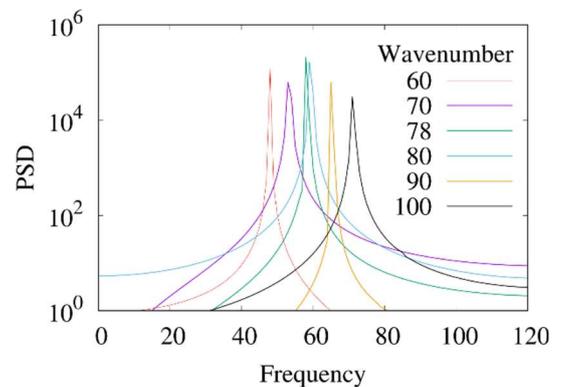


図 8 $T=3.0-4.0$, $z=1.17$, $Re=620$ での周波数解析結果を示す。

ことを示す。また、波数が小さいほどピーク周波数が低いことが分かる。このデータは今後全体不安定性を調べるときに重要な基礎データであり、数々の不安定性の中でも全体不安定性によって成長していることを示す証拠となる。

6. 今年度の進捗状況と今後の展望

今年度の計画は全体不安定性を目標とした全周計算であり、計算結果において他の研究結果と妥当性が取れて、新しい結果も得られたため、10点満点中8点になると考えられる。現在、本研究の成果をまとめた論文が査読中である。計算領域を乱流領域まで含めて乱流の計算が出来たら10点満点だと思うが、この計算に関しては、次の機会に実行したいと思う。

今後は今回の結果を用いて、全体不安定性における不明な点を明らかにしていきたいと思っている。そのために、研究室レベルで行える、周方向の計算領域に制限を設けた計算を行い、本研究の結果と合わせて考察する予定である。

7. 研究業績一覧（発表予定も含む。投稿中・投稿予定は含まない）

(1) 学術論文（査読あり）

該当なし

(2) 国際会議プロシーディングス（査読あり）

該当なし

(3) 国際会議発表（査読なし）

該当なし

(4) 国内会議発表（査読なし）

該当なし

(5) 公開したライブラリなど

該当なし

(6) その他（特許、プレスリリース、著書等）

該当なし