

令和 3 年 6 月 22 日現在

機関番号：32629

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2020

課題番号：19K14892

研究課題名（和文）後退翼の前縁境界層における乱れの受容メカニズムの解明

研究課題名（英文）Study on physical mechanism of Leading edge receptivity of swept wing

研究代表者

西尾 悠 (Nishio, Yu)

成蹊大学・理工学部・助教

研究者番号：70712743

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000 円

研究成果の概要（和文）：主流乱れとして渦度変動を平板前縁近傍にのみ導入し、実験では得ることが難しい前縁部に形成される境界層内の速度場や渦度場の解析や流れ場の観察を行った。さらに、主流乱れを構成する渦の運動と流れ場の関係を考察することによって、局所的な外乱を導入した場合の平板前縁受容性の物理的メカニズムの解明を試みた。結果として、境界層中にストリーク構造が形成される理由は、縦渦対が平板前縁先端部で選択的に増幅されたためであり、その増幅メカニズムは前縁の場所ごとに異なることが明らかとなった。また、前縁淀み点ではなく、それよりもやや下流に乱れの受容に特に大きな影響を与える箇所があることが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

前縁受容性は盛んに研究が行われているが、主な乱れの受容点である境界層が成長し始める物体前縁部における乱れの生成機構については、境界層が薄く計測が困難なこともあり未解明な点が多い。本研究ではこの問題に対して、直接数値計算を用いることで前縁付近の流れ場を再現し、渦度の変形や移流に着目し物理メカニズムの解明に取り組んだものである。得られた研究結果は、輸送機器の摩擦抵抗の増大を招く境界層遷移を遅らせる遷移制御の一助となる知見である。この遷移制御が可能となれば、流体機器、特に大型の輸送機器の輸送効率向上につながり、現在人類が抱える環境問題の解決にも貢献し得る。

研究成果の概要（英文）：This study attempted to numerically investigate the physical mechanism of the leading edge receptivity to a vortical disturbance introduced into only a vicinity of the leading edge, focusing on the deformation of the vorticity pattern in the penetration process of the disturbance into the leading edge boundary layer. As a result, it was found that the streaky structure in the boundary layer is formed because the longitudinal vortex pairs are selectively amplified at the leading edge. A numerical experiment employing a partially slip condition at the leading edge wall suggests that the highly receptive point exists slightly downstream from the stagnation point of the leading edge, whereas the stagnation point has less effect on the leading edge receptivity.

研究分野：流体力学

キーワード：受容性 境界層

1. 研究開始当初の背景

航空機の抵抗は摩擦抵抗が 50%以上を占めており、この摩擦抵抗を低減することが航空機の輸送効率向上へとつながる。流れにさらされた物体周りにはこの境界層が発達するが、一般的にその状態は上流では層流状態であり、下流に進むにつれて乱流状態へと移り変わる。そして、この状態の移り変わりを境界層遷移と呼ぶ。乱流状態の摩擦抵抗は層流状態の摩擦抵抗に比べ約 10 倍に跳ね上がるため、航空機の輸送効率から考えると乱流状態は害以外の何物でもない。境界層遷移は乱れの受容と呼ばれる主流に内包される速度変動や音響的な乱れが境界層内に取り込まれることから始まる。この乱れの受容は遷移を引き起こす境界層内の乱れの初期振幅を決定する重要な要素である。そして主流乱れに対する境界層の安定性を理解してなければ、境界層の乱流遷移位置の予測および制御は不可能である。一方で初期攪乱の大きさと遷移位置との関係は単純であり、境界層内に受容される初期攪乱が大きければ遷移位置は上流へ移動する。つまり、この受容される乱れを制御できれば遷移位置が制御可能となる。よって本研究では境界層の受容性に着目した。この受容性はその重要性から盛んに研究が行われているが、主な乱れの受容点である境界層が成長し始める物体前縁部における乱れの生成機構については、境界層が薄く計測が困難なこともあり未解明な点が多い。

2. 研究の目的

本申請課題では主流乱れが取り込まれるメカニズムを前縁部の境界層内の渦構造と主流中の乱れの構造とを関係づけながら明らかにすることを目的とした。3 次元数値計算によって、前縁近傍にのみ局所的な外乱を導入した際の平板前縁受容性について詳細に調べることである。主流乱れとして一様等方な渦度変動を平板前縁近傍にのみ導入し、実験では得ることが難しい前縁部に形成される境界層内の速度場や渦度場の解析や流れ場の観察を行った。さらに、主流乱れを構成する渦の運動と流れ場の関係を考察することによって、局所的な外乱を導入した場合の平板前縁受容性の物理的メカニズムの解明を試みた。

3. 研究の方法

主流に含まれる局所的な速度変動に対する境界層の応答について数値シミュレーションおよび風洞実験により調べた。また、風洞実験を行うために局所的に攪乱を導入する装置を改良するための理論モデルの構築を試みた。

3.1. 局所的に攪乱を導入した場合の前縁受容性

前縁近傍にのみ局所的な外乱を導入した際の平板前縁受容性について 3 次元数値シミュレーションを用いて調べた。一様等方な乱流を渦度攪乱として平板前縁近傍にのみ導入し、前縁部境界層内の速度場や渦度場の変化を解析する事で、局所的な外乱に対する平板前縁受容性の物理的なメカニズムの解明を試みた。平板上流の一様流中に、約 2.5% の乱れ強さで平板厚さと同程度の領域に一様等方的な渦度攪乱を局所的に導入した。導入された乱れは、流下するにつれてその乱れ強さが減少する減衰攪乱である。

3.2. 受容性における前縁壁面の役割

渦度攪乱に対する楕円形の平板前縁部における受容性について 2 次元数値シミュレーションを用いて調べた。特に、受容過程において渦度変動が境界層内に取り込まれる 2 つのルート、すなわち一様流中に導入した渦度攪乱が境界層内に直接入り込むルートと、壁面においてすべりなし条件を満たすために渦度が壁面から供給されるルートに着目し、これら 2 つのルートを分離して個別に解析することで、受容性の理解を深めることを試みた。

3.3. 局所的に攪乱を導入する装置の改良

本研究では風洞実験において乱れを局所的に導入するために翼の後端からジェットを噴射する装置を用いている。この装置は翼とその内部に設けられた管路およびそれに接続された翼後端のスリットから構成される。スリットから出る噴流の流量を均一化するために開口スリット部を有する管内の流れについて一次的な理論モデルを構築した。そして、その理論予測をもとに流出速度の不均一性の原因について明らかにするとともに、流出速度を均一化する手法を開発した。そのために本研究では管側面から流体が流出する管路流れの保存法則を連立させた理論モデルを構築した。そして、理論モデルによる結果の妥当性について検証するため、実験および数値流体解析も行った。

4. 研究成果

4.1. 局所的に攪乱を導入した場合の前縁受容性

境界層周辺の流れ場を調査したところ、平板境界層外の $h=5.0$ 以上の一様流中を流下する乱れはそのまま単調に減少するが、境界層内では $h=2.5\sim 3.5$ 付近にピークが見られ、3%

程度の乱れ強さを保つことがわかった。得られる分布は典型的な T-S 波型の速度変動分布とは異なり、シングルピークの変動分布である。高い主流乱れにさらされた境界層内の速度変動はこのようなシングルピークの変動分布が観察されることが多くの研究者によって報告されているが、本結果から平板厚さ程度の局所乱れに対しても同様の変動が支配的になることがわかった。このとき、境界層内の $h=2.5$ において、スパン方向中心の $z=0$ 付近に $x=2$ 近辺から下流に伸びた高速領域が、またその両側には低速領域が見られ、定在的なストリーク構造が形成されていることが分かった。さらに境界層内における速度変動のピーク値の流れ方向分布は $x=4$ まで増幅し、その後減衰、さらに前縁と平板のつなぎ目である $x=12$ 以降で再度増幅した。このことは T-S 波が形成されずにストリーク構造が直接発達するような強い外部攪乱に対しても、つなぎ目が強い受容点であることを示唆している。

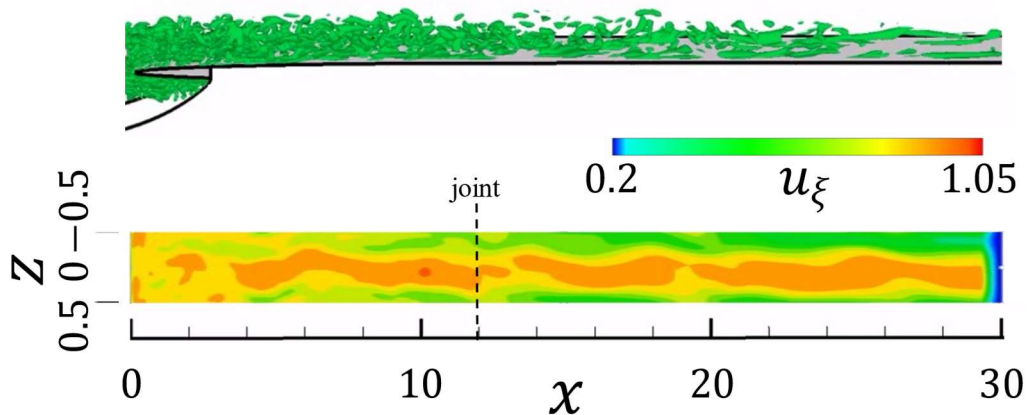


図 1. 受容後に形成されるストリーク構造の一例

一般にストリーク構造の形成には、流れ方向に軸を持った縦渦の存在が関係することが知られている。そこで、ストリーク形成のきっかけとなる定在的な縦渦構造に着目し、 $y-z$ 断面における渦度の縦渦成分である ω_x の変化について調べた。その結果、瞬間的にはランダムに分布しているように見えた渦度 ω_x は、時間平均的には正や負の渦度が局在しており、導入した渦度攪乱はわずかな非一様性を有することが示された。また、境界層外縁部には平均像としては縦渦対が存在することが認められ、前縁部先端の加速領域で流れ方向に選択的に伸張されて強められる事が分かった。このとき伸長する縦渦対により、壁面方向への吹きおろしや吹き上げ速度が誘起されるため、その結果としてストリーク構造が形成されたものと考えられる (図 2(a))。次に境界層外縁部に存在する縦渦対が前縁先端で強められた要因を流体要素の変形に着目して調べた。その結果、前縁部よどみ点付近では、縦渦対は平板前縁先端部の加速流によるストレッチングの作用を受けて強められること(図 2(b)：赤色

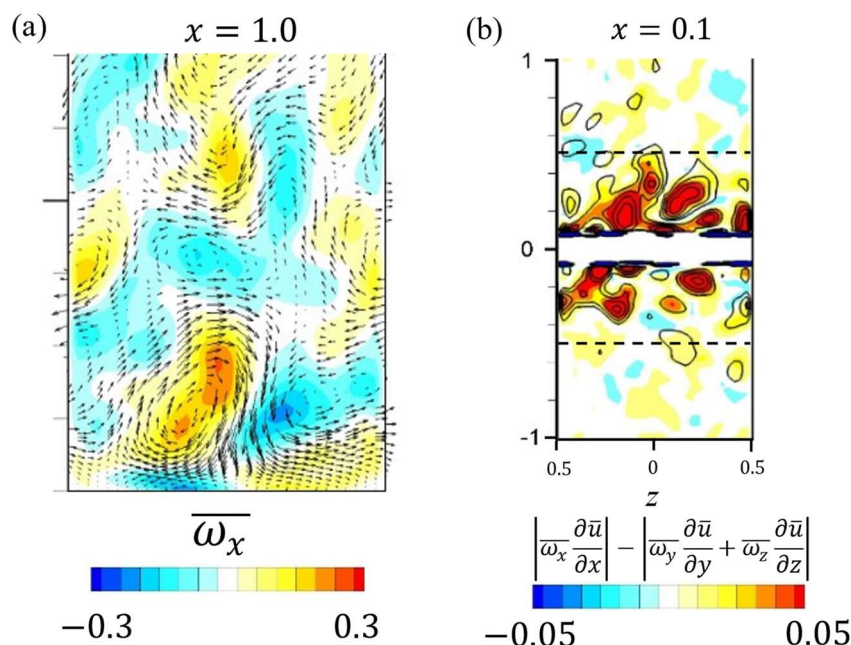


図 2 前縁付近の渦度および渦度変形成分の可視化の一例

の箇所がこの項が高い位置), またティルディング項による渦度生成に関しては, $\omega_y \partial u / \partial y$ が支配的であることが分かった。さらに, ストリーク構造を生成する渦について時間をさかのぼって追跡したところ, 主流の壁垂直方向の渦度成分が主たるものであることも明らかとなった。

最後に, ストリーク構造自身が前縁近傍に誘起する速度変動によって ω_x 成分が増幅されるフィードバックループの影響について検討した。そこで比較のため, ストリーク構造を下流で強制的に散逸させた計算を実施した。その結果と元の操作していない計算結果とを比較すると, 下流にストリーク構造がなくても縦渦対の存在に変化がないことがわかった。そのためストリーク構造によるフィードバック機構の影響はないことが示された。

以上の結果から, 境界層中にストリーク構造が形成された理由は, 一様流中の乱れの非一様性に起因して生成された, ある時間平均としてのみ存在する縦渦対が平板前縁先端部で選択的に増幅されたためであることが明らかとなった。

4.2. 受容性における前縁壁面の役割

通常の壁面すべりなし条件の下で解析対象となる流れ場の特徴を調べた。その結果, 渦度変動の壁面垂直方向分布は壁面付近及び境界層中腹にピークをもつ分布となり, 2つのピーク位置における渦度変動は逆符号となっていた。また, 境界層中腹のピークの値およびピークの壁面からの距離は流下と共に変化した。次に, 一様流中から直接境界層内に入り込む渦度の影響を調べた。ここでは壁面をすべり条件とし, 壁面からの渦度供給のルートをつなぐことで一様流中からの渦度供給ルートのみを分離して扱い, 通常のすべりなし条件による計算と比較した。その結果, 一様流からの渦度供給ルートが境界層内に生む渦度変動は, 通常のすべりなし条件の結果と比較して, 壁面近傍において小さく, 渦度変動の壁面垂直方向分布には境界層中腹にピークが生じ, 流下に伴うピーク値やピーク高さの変化する様子は通常のすべりなし条件における境界層中腹のピークの挙動とほぼ等しくなることが明らかとなった。両者の差異は, 特に前縁部において大きいことが明らかとなった。

壁面を部分的にすべり条件とすることで渦度供給源となる壁面の位置を限定し, 壁面のどの位置からの渦度供給が受容性に影響を与えるかを調べ, 以下の結果を得た。よどみ点付近の壁面からの渦度供給が受容性に与える影響は小さく, 一方で前縁部において壁面から供給される渦度変動は, 下流において壁面付近の渦度変動を打ち消すように作用することがわかった。つなぎ目はかなり強い受容点となる前縁部壁面から供給される渦度とつなぎ目から供給される渦度は, 下流において互いに打ち消し合う様子が確認された。

さらに, 壁面から供給される渦度そのものの挙動を調べるため, 通常のすべりなし条件において得られる壁面の渦度変動を壁面の境界条件として付与し, 一様流中に渦度攪乱を導入させず, 渦度変動の流下に伴う挙動を解析した。その結果壁面から供給される渦度変動はつなぎ目の付近を境にその波長が短くなり, 平板部には T-S 波に相当する波長の渦度変動が

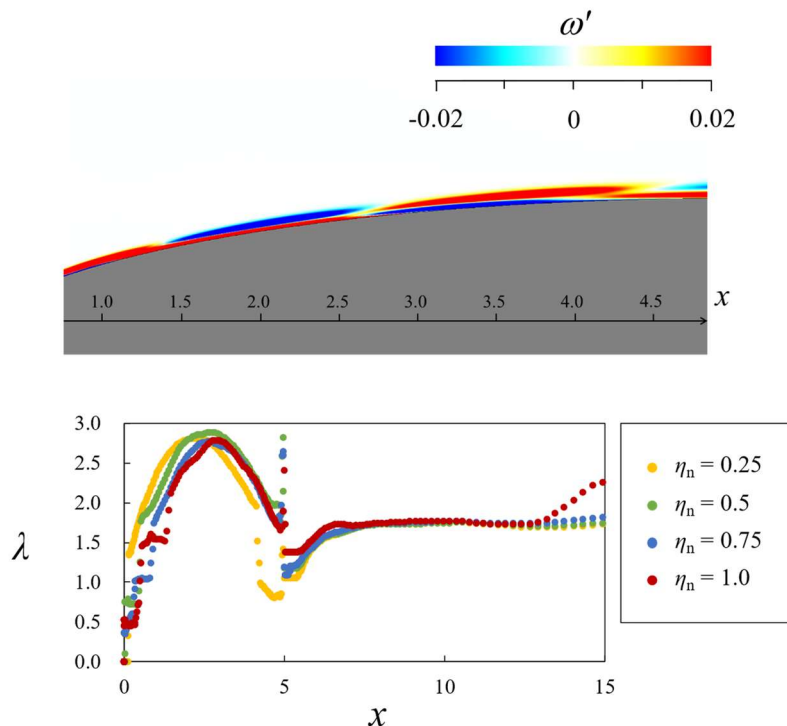


図3 壁面付近の渦度分布 (上図) とその波長 (下図)

生じることが明らかとなった。さらに壁面から供給される渦度変動は流下に伴ってさらに壁面と干渉することで波長が変化し、壁面から離れる際には波長は短くなることが認められた。

また、渦度パターンの相互作用について議論するため、渦度輸送方程式の粘性拡散項に着目した。その結果、粘性拡散項の値の壁面垂直方向分布は、渦度変動分布の勾配が大きい壁面近傍と境界層中腹にピークを持ち、平板部では壁面からの渦度供給と一様流から入り込む渦度攪乱それぞれの分布の重ね合わせが成立するが、前縁部やつなぎ目の位置では重ね合わせが成立しないことが明らかとなった。

以上の結果から、前縁部およびつなぎ目における渦度供給や渦度パターンの相互作用は受容性に特に大きな影響を与えることが明らかとなった。そして、その現象は極めて非線形性が強いことが示唆された。

4.3. 局所的に攪乱を導入する装置の改良

理論モデルにより得られたスリットを有する管路内の圧力分布を同じ条件で行った実験および数値流体解析と比較したところ定量的にも一致し、理論モデルによる結果が妥当であることが示された。また、レイノルズ数や管のアスペクト比を変えてパラメータスタディを行った。全長が短い管では末端にかけて圧力が単調に上昇し、それに伴って噴出流速も増加した。一方、管長を長くすると、上流では圧力がゆるやかに低下し、管中程からは上昇に転じた。流量を変化させた場合、無次元化した圧力や管内流速がほとんど変化しないことから、レイノルズ数依存性が小さいことも確認できた。

次に、構築した理論モデルを用いた流出速度の均一化に取り組んだ。流出速度を管長手方向で均一であるとし、これを満たすような流出孔の損失係数の分布を理論モデルにより逆算した。その結果、圧力が高くなる管の末端側で値が大きくなる圧力損失係数の分布が得られ、その分布を基に改めて流出速度を計算したところ、均一な流出速度の分布が得られた。これにより、基本的な流れ場でありながら原因が明確でなかった流出速度の不均一性が理論的に明らかになり、それを解消する手法も確立された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Seiichiro Izawa, Hiroko Isawa, Yu Nishio, Yu Fukunishi	4. 巻 13
2. 論文標題 Receptivity to Freestream Periodic Vorticity Disturbance on a Flat Plate with an Elliptic Leading Edge	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Applied Fluid Mechanics	6. 最初と最後の頁 1-11
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.47176/jafm.13.06.31359	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 NISHIO Yu, KOMORI Kohei, IZAWA Seiichiro, FUKUNISHI Yu	4. 巻 16
2. 論文標題 Flow measurement around the edges and curved outer surface of a rotating disk	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Science and Technology	6. 最初と最後の頁 1-11
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/jfst.2021jfst0003	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 YANAGISAWA Yukizumi, NISHIO Yu, IZAWA Seiichiro, FUKUNISHI Yu	4. 巻 15
2. 論文標題 Experimental study on artificial environment to promote onset of turbulence	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Science and Technology	6. 最初と最後の頁 1-16
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/jfst.2020jfst0017	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Kota Tomiuka, Seiichiro Izawa, Yu Nishio, Yu Fukunishi	4. 巻 15
2. 論文標題 Bypass transition in a boundary layer subject to sheet-type freestream disturbance	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Science and Technology	6. 最初と最後の頁 1-12
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/jfst.2020jfst0001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Masato Hirota, Yu Nishio, Seiichiro Izawa, Yu Fukunishi	4. 巻 52
2. 論文標題 Hierarchical vortical structures extracted from turbulent fields	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Fluid Dynamics Research	6. 最初と最後の頁 1-20
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1873-7005/ab53b1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yuki Toda , Masataka Morimatsu , Yu Nishio , Takano Ogawa	4. 巻 3A
2. 論文標題 Theoretical Model of a Flow in a Tube with a Slit	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the ASME-JSME-KSME 2019 8th Joint Fluids Engineering Conference	6. 最初と最後の頁 1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1115/AJKFluids2019-5257	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

[学会発表] 計2件(うち招待講演 0件/うち国際学会 1件)

1. 発表者名 西尾 悠, 戸田 悠樹, 小川 隆申
2. 発表標題 側面にスリットが設けられた円管内流れにおける噴出流量分布の均一化
3. 学会等名 日本機械学会2020年度 年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yu Nishio, Kohei Komori, Seiichiro Izawa, Yu Fukunishi
2. 発表標題 Experimental Study on Flow around Edges and Curved Surface of a Rotating Disk
3. 学会等名 Sixteenth International Conference on Flow Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------