

令和3年9月14日

報道機関 各位

東北大学流体科学研究所

**世界初！旅客機主翼の流れの遷移メカニズムを解明  
後退翼の層流化により空気抵抗の大幅減へ前進**

**【発表のポイント】**

- ・大型旅客機などの後退翼<sup>1</sup>の前縁部の遷移<sup>2</sup>のもとになる波の発生を、スーパーコンピュータにより、世界で初めて可視化観察することに成功した。
- ・発生した波は、本研究での短時間のエネルギー増幅についての理論計算結果と一致した。これにより、半世紀にわたり未解明であった後退翼前縁部での遷移メカニズムが解明された。
- ・本研究結果により、流れの遷移のしやすさの簡便な予測法の精度が著しく向上すると期待され、将来的に低計算コストでの航空機開発を一層加速すると考えられる。

**【概要】**

航空機の大幅な低抵抗化を実現する方法の一つは、機体の形状の工夫や流体制御デバイスによる層流化<sup>3</sup>です。主翼の50%で層流状態を維持できれば、航空機的全抵抗の10%を削減できると考えられます。昨今の設計・製造技術の発達により実現可能性が高まり、世界各国で研究開発にしのぎを削っています。

東北大学流体科学研究所の焼野藍子助教と大林茂教授は、これまで未解明であった大型旅客機の特に主翼前縁で発生する層流から乱流への遷移メカニズムを、世界で初めて、スーパーコンピュータとエネルギー過渡増幅に着目した理論解析により、解明することに成功しました。本研究で構築した解析技術は、低計算コストな技術開発を可能にし、航空機開発において世界に一步先んじる重要な成果とも言えます。

本研究成果は、米国現地時間2021年9月4日付で、本研究分野で最も権威ある学術専門誌の一つである「Physics of Fluids」に受理されました。

## 【詳細な説明】

### <背景>

遷音速から超音速域で飛行する航空機の主翼は衝撃波による抵抗を抑えるため後退角を有しています。しかしそのような後退翼まわりでは、流れは三次元化し複雑な遷移過程を経て乱流化しやすく、それにより摩擦抵抗が増加することが課題です。これまで二次元翼まわりで、形状の工夫により層流状態を維持し低抵抗化を実現した自然層流翼は戦前より実用化されていますが、後退翼まわりでは未だされていません。主翼の 50%を層流状態で維持できれば、航空機全抵抗のおよそ 10%を低減できると考えられ、次世代超音速輸送機において「層流化」は必須の技術の一つです。設計・製造技術の発達により実用化への見通しがたってきたことから、現在世界各国で開発にしのぎを削っています。例えば、エアバス社による BLADE プロジェクトでは 2017 年に飛行試験が開始されています。日本でも、JAXA の小型超音速機プロジェクトで開発された自然層流翼を搭載した機体は、2005 年に飛行実証しています。

層流化のためには、まず層流から乱流への遷移メカニズムの解明がなされなければなりません。後退翼のやや後流域の三次元化した境界層中では、横流れ不安定による定在波が発生し、流体の安定性理論による解析結果と一致することが広く知られています。一方、後退翼の前縁付近での流れは、前述の後流域での遷移過程に影響が大きいと考えられ、これまで半世紀以上にわたり主に実験と理論計算により解析が試みられてきましたが、未解明な点が多く残されていました。例えば、漸近解を仮定する従来の安定性理論に基づき、遷移のもとになる波の存在が確認されたが、風洞試験で観察される波の波長とは一致していませんでした。さらに、欧米での飛行試験の結果からは、大型の航空機では、胴体で生じる境界層の乱れが主翼前縁部に侵入し、風洞実験では捉えることが難しい遷移過程が引き起こされる可能性を指摘されていました。しかし、それを証明することは困難でした。

### <本研究で達成した内容>

東北大学流体科学研究所の焼野藍子助教と大林茂教授は、スーパーコンピュータを用いた超並列計算(1 ケースあたり最大 3000 並列×約 200 時間)を用い、人工的に遷移を促進する擾乱の与え方を工夫することで、航空機の主翼前縁部で遷移のもとになる二つの波の発生と成長過程の詳細を捉えることに、世界で初めて成功しました(図 1)。これにより、従来、風洞実験でも確認されていた定在波だけでなく、後退方向に移流する進行波についても、その発生の詳細を観察することが可能になりました。

本研究ではさらに、流れの安定性理論との比較を行いました。安定性解析に従来のように漸近解を仮定せず、非直交モードの重ね合わせによる有限時間でのエネルギー増幅に焦点を当て、各ターゲット時間に対するエネルギー過渡増幅を算出しました。その結果、本数値計算で観察される波の波長は、短い時間で不安定化する非直交モードの最適成長波長と一致することを世界で初めて突き止めました(図 2)。それにより、後退翼前縁部の遷移のもとになる波の発生は、従来の漸近的不安定性ではなく、

短い時間のエネルギー過渡増幅に支配される可能性が高いことを示しました。本研究で有効性が確かめられた理論により、流れの遷移のしやすさの簡便な予測法の精度が著しく向上するため、将来的にはスーパーコンピュータにたよらない低計算コストな技術開発が可能になると考えられます。本研究で構築した解析技術は、航空機開発において世界に一步先んじるために重要な成果とも言えます。

#### 【謝辞】

本研究は東北大学流体科学研究所スーパーコンピューティングシステム、未来流体情報創造センター次世代融合システム(AFI-NITY)によりなされました。また、この成果は国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託業務(No. JPNP20010)の結果得られたものです。さらに、本研究の成果の一部は、日本学術振興会(JSPS)の科研費(No. 19K14880)の助成を受けました。

#### 【論文情報】

タイトル Propagation of stationary and traveling waves in a leading-edge boundary layer of a swept wing  
著者 Aiko Yakeno, Shigeru Obayashi  
掲載誌 Physics of Fluids, Volume 33, Issue 9, 2021  
DOI 10.1063/5.0063936  
URL <https://doi.org/10.1063/5.0063936>  
2021年9月24日に公開予定です

#### 【用語の説明】

##### 1. 後退翼

遷音速から超音速域で飛行する航空機の主翼が、衝撃波による造波抵抗を減らすため付け根から翼端に向かって後退しているもの。飛行マッハ数が0.75以上の航空機で採用され、マッハ数が増すにつれて必要な後退角が増加する。

##### 2. 遷移

流れに乱れのない層流から乱流へ状態が変化することを遷移という。遷移のしやすさは、理論的には微小擾乱の線形増幅率により判定される。本研究で有効性が確認された新しい理論(エネルギー過渡増幅, Energy transient growth)を、大域的安定性解析(Global stability analysis)に組み込むことで、遷移のしやすさを簡便に予測することができるようになる。このような遷移の予測法は、翼形状の最適設計や、翼面に設置する制御デバイスを開発する際に有用である。

##### 3. 層流化

一般に層流化は、翼の形の工夫や流れの制御により、遷移の開始地点を後流へ遅らせる

ことにより達成される。次世代超音速輸送機で採用が必須と考えられる低抵抗化技術の一つ。後退翼まわりでは流れは三次元化し複雑で、乱流に遷移しやすく、層流化は困難である。大型機では胴体で生じる境界層の乱れが主翼前縁部に侵入し、層流化をさらに難しいものとする。本研究をきっかけに、世界で初めて前縁部付近の流れの詳細を捉えることが可能になり、さらに遷移の発生メカニズムが解明されたので、層流化技術において世界に先駆ける重要な成果を得られたと考えられる。

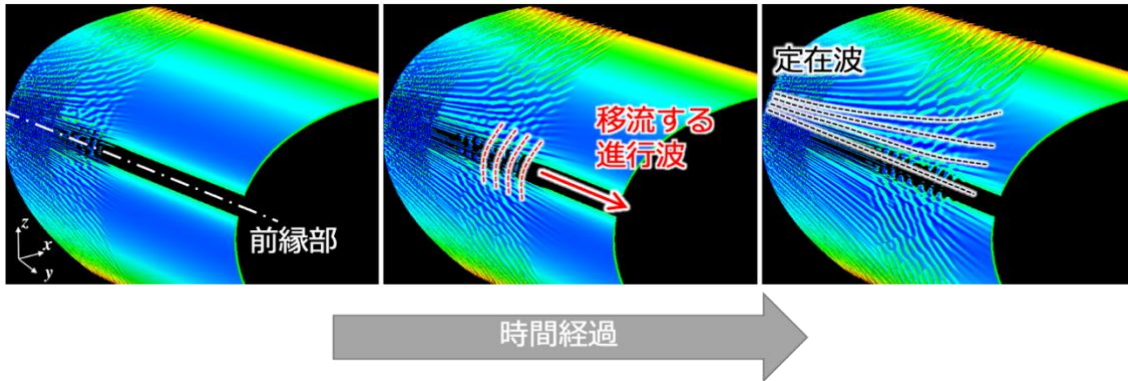


図1 後退翼前縁部周辺の流れ場の可視化の様子、遷移のもとになる波が縞模様で表れている（等値面は変形速度テンソルの第二不変量、スパン方向速度で色付けしてある）

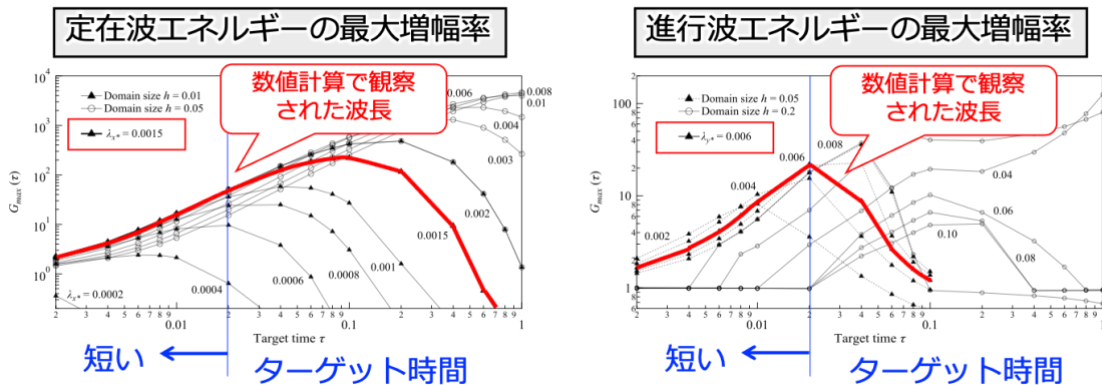


図2 定在波と進行波のターゲット時間に対するエネルギー過渡増幅の最大増幅率（数値計算で観察された波の波長は、短いターゲット時間で最大のエネルギー過渡増幅する波長と一致した）

**【問い合わせ先】**

東北大学流体科学研究所  
 航空宇宙流体工学研究分野  
 担当 助教 焼野 藍子  
 電話 022-217-5218  
 E-mail aiko.yakeno.b4@tohoku.ac.jp