

2026 年 10 月 22 日

報道機関 各位

国立大学法人東北大学

乱流はどこから始まるのか —壁ぎわに現れる未知の微細な流れ構造を発見—

【発表のポイント】

- 層流から乱流へ切り替わる直前の流れを直接数値計算^(注1)で調べ、壁ぎわに微細なコヒーレント構造^(注2)が現れることを明らかにしました。
- 同じレイノルズ数における遷移過程^(注3)でこれまで報告された構造よりも微細で、スパン方向の速度変動が約45度に傾く特徴があります。
- 壁ぎわの流れの変動を数値的に抑えると、下流で乱流渦の発達が弱まることを確認しました。乱流への遷移の仕組みを理解し、将来の流れ制御につながる可能性があります。

【概要】

航空機や自動車の表面を流れる空気は、上流では整然とした「層流」ですが、ある地点から「乱流」へと切り替わります。この切り替わりを遷移と呼び、乱流になると摩擦抵抗が増えるため、遷移を遅らせることは省エネルギー技術の重要な課題です。しかし、遷移直前の壁ぎわで生じる微細な流れの構造については、十分に解明されていませんでした。

東北大学流体科学研究所の焼野藍子准教授は、高解像度の直接数値計算により、壁から境界層厚さの14.3%以内というごく近い領域に、微細なコヒーレント構造が現れることを示しました。その波長は境界層厚さの0.35~0.55倍で、同じレイノルズ数における遷移過程で従来報告された構造よりも小さく、スパン方向の速度変動が約45度に傾く特徴があります。また、線形安定性解析から、古典的なトルミン・シュリヒティング波^(注4)の不安定性では説明できないことも示しました。

本成果は、遷移の初期段階を理解する手がかりとなり、壁ぎわを狙った流れ制御の設計指針につながる可能性があります。一方、構造の生成機構や遷移への寄与は未解明であり、今後も検証を進めます。

本研究成果は、2026 年 10 月 16 日に流体力学分野の国際学術誌 European Journal of Mechanics - B/Fluids に掲載されました。

【詳細な説明】

研究の背景

1950 年以降の実験研究により、乱れた流れのなかにも秩序だった流れ構造が潜んでいることが示されました。その後、計算機の発達により直接数値計算が可能になり、遷移過程に現れるさまざまな構造が明らかになってきました。代表的なものに、層流中で成長する二次元的なトルミン・シュリヒティング波、流れ方向に細長く伸びるストリーク、局所的な乱流の塊であるパフやスラグ、斜めに並ぶ乱流バンドなどがあります。いずれも、境界層厚さと同程度か、それを大きく上回るスケールをもつ構造です。

こうした構造の理解は、流れ制御の出発点でもあります。実用化が進んでいる代表例がリブレット（サメ肌加工）です。ルフトハンザ・テクニクはボーイング 747-400 の胴体下面約 500 平方メートルにリブレットフィルムを施工し、最大 0.8% の燃料削減を報告しています。また、日本航空、宇宙航空研究開発機構（JAXA）、オーウェル、ニコンによる共同の取り組みでは、2025 年 1 月にボーイング 787-9 の胴体にリブレット塗装が施され、実運航での試験が行われています。ただし、リブレットは、すでに乱流になった領域の摩擦を下げる技術であり、流れの向きに沿って溝を刻む必要があります。

一方、遷移そのものを遅らせて抵抗の小さい層流を長く保つというアプローチもあります。研究グループは、微小な凹凸を面全体に不規則に分布させた表面（DMR : Distributed Micro-Roughness）が遷移での乱流成長を遅らせ、摩擦抵抗を低減しうることを直接数値計算で示し、さらに 2026 年には、同研究所の 1 メートル磁力支持天秤装置（1m MSBS）を用いた風洞試験で、層流翼形状を基にした軸対称流線型模型において、最大 43.6% の全抵抗低減を実証しました。

しかし、遷移が始まる直前の壁のごく近くで何が起きているのかは、十分に調べられていませんでした。特に、境界層厚さよりはるかに小さいスケールの運動は、計算格子の解像度や可視化のしきい値の制約から見落とされやすいという課題がありました。

今回の取り組み

焼野准教授は、平板上の境界層を対象に、三次元圧縮性ナビエ・ストークス方程式の直接数値計算を行いました。入口境界層厚さに基づくレイノルズ数は 2,857、マッハ数は 0.1、0.2、0.3 の 3 条件です。空間微分には 6 次精度コンパクト差分スキームを用い、解像度の異なる 2 種類の計算格子で同じ条件の計算を行いました。また、風洞実験における壁面粗さや格子乱流に相当する擾乱として、上流域にランダムな体積力を与えました。

その結果、遷移が始まる直前の壁のごく近くに、表 1 に示す特徴をもつ秩序だった流れ構造が繰り返し現れることがわかりました。

二点空間相関^(注 5)を調べると、約 45 度に傾いた X 字型のパターンが統計的にも確認されました。壁のごく近くでは、負の圧力変動と負の流れ方向速度変動が局所的に重なります。また、流れ方向にこの低圧域を通り抜けるにつれて、壁垂直方向の速度が下向きから上向きへと反転します。渦による汲み上げに似た、圧力と速度の結合を示しています。

この構造のスケールと向きは、格子の解像度やマッハ数を変えても、また、上流の擾乱を壁面近傍に与えた場合と境界層外の周囲流れに与えた場合でも変わりませんでした。さらに、擾乱を与えない層流計算における数値的な雑音のレベルは、この構造の振幅の 1 万分の 1 以下でした。これらの結果は、この構造が数値計算に由来する見かけのものではなく、物理的な応答であることを支持しています。

壁の近くに現れる秩序だった構造はこれまでに多く報告されており、今回の構造も、見た目だけでは既知のものと混同される可能性があります。そこで、本研究では、代表的な既知構造との違いを表 2 にまとめ、明示しています。

特に、十分発達した乱流境界層では、本研究とよく似た 45 度の X 字型相関パターンが報告されています。しかし、両者の主な違いは形ではなく、スケールと流れの状態にあります。既往の研究で報告された構造は、境界層厚さと同程度の波長をもつ乱流中の構造であるのに対し、今回の構造はその 1~2 桁小さい波長をもち、まだ層流に近い遷移前の境界層に現れます。

なお、今回の構造の波長を壁単位^(注 6)に換算すると約 56~89 となり、乱流境界層で古くから知られるストリーク間隔(約 100)と同じオーダーになります。ただし、今回の構造は層流に近い境界層に現れ、摩擦速度が乱流時よりはるかに小さいため、壁単位での単純な比較には注意が必要です。本研究の重要な点は、境界層厚さで規格化したスケールで比較すると、既知のいずれの遷移構造とも合致しない、という点にあります。また、今回の構造は流れの中に現れる現象であり、リブレットや DMR のような表面形状そのものではありません。これらの表面技術と直接対応づけられる段階には至っていません。

さらに、壁面近傍(境界層厚さの 11.4%以内)の変動を数値的なフィルタで抑制すると、下流に発達する乱流渦の活動が境界層全体にわたって弱まることわかりました。この結果は、遷移過程が壁のごく近くの薄い層の変動に敏感であることを示しています。

構造の起源については、非モーダル過渡成長^(注 7)の解析を行い、短い時間スケールで最も成長しやすいモードの波長(流れ方向 0.571、スパン方向 0.457)

が直接数値計算の観測値とおおむね一致することを示しました。ただし、成長率は 1.6 倍程度と控えめであり、線形理論だけでは十分に説明できません。生成機構の特定は今後の課題として残っています。

今後の展開

最大の課題は、この構造がどのように生まれ、維持されるのかを特定することです。本研究では、上流からの擾乱を与え続けないと構造が減衰することも確認しており、現時点では自律的に成長する不安定性ではなく、外部擾乱に対する境界層の応答（受容性）として理解されます。実際の飛行や走行においては、大気乱れや表面粗さによる擾乱は常に存在するため、この条件はむしろ現実の流れに近いものと考えています。

検証の面では、独立した計算コードによる再現や、実験による確認が望まれます。ただし、構造が最も強く現れる境界層厚さの数パーセントという壁面近傍で、主流速度の 0.05% 程度の変動を捉えることは、現在の計測技術では容易ではありません。計測手法の検討も含めて取り組んでいきます。

制御への応用は、現時点では可能性の段階です。仮に、壁から境界層厚さの 1 割程度までの層の変動が遷移の進行に寄与しているのであれば、その層を狙った表面処理は、少ない介入で大きな効果を得るための設計指針になりえます。

一方、本成果は DMR による抵抗低減の機構を説明するものではありません。直接数値計算で最も遷移遅延効果が高かった突起の設置間隔は境界層厚さと同程度であり、今回の構造の波長の 2~3 倍にあたります。実験で効果を示した DMR コーティングの間隔は、さらに小さいものでした。したがって、突起間隔と構造の波長が単純に共鳴しているという説明は成り立ちません。両者に関係があるのかどうかは未解決の問いであり、DMR の形状と分布を系統的に変えた直接数値計算によって調べていく予定です。

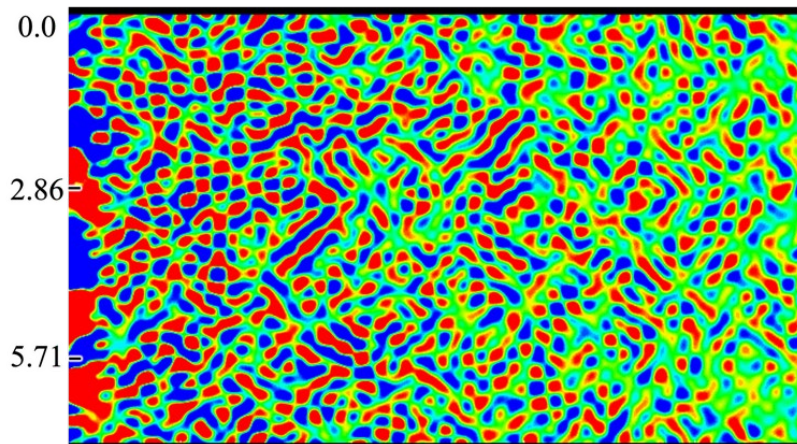


図 1. 遷移が始まる直前の壁面近傍に現れた、約 45 度に傾いた周期的な流れ構造。波長は境界層厚さの 0.35~0.55 倍である。

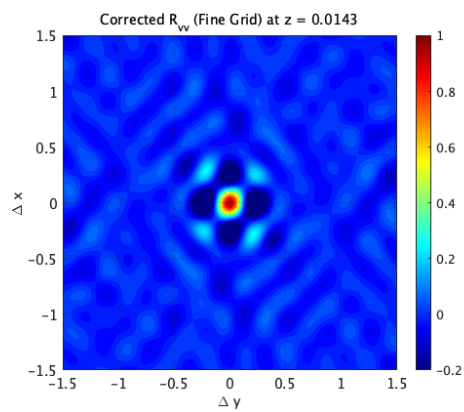


図 2. 二点空間相関に現れた 45 度に傾いた X 字型のパターン。構造の向きが統計的に確認される。

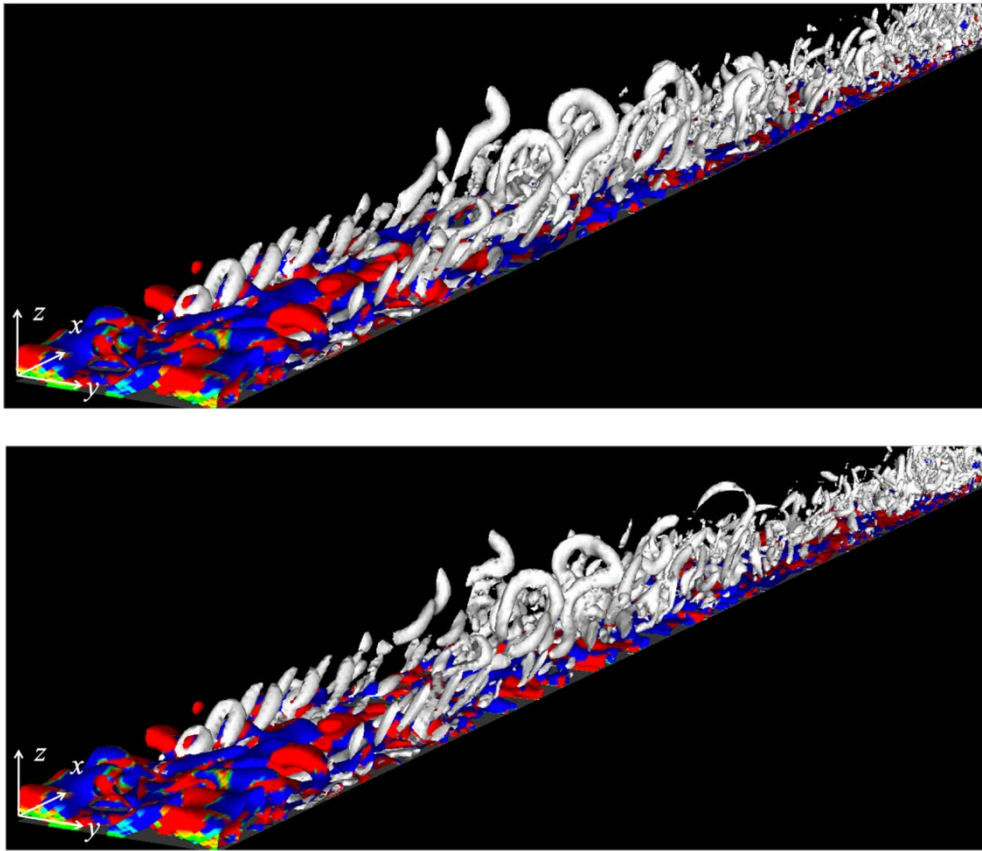


図 3. 壁面近傍の変動を数値フィルタで抑制した場合（上）としない場合（下）の、渦構造の比較。壁面近傍（境界層厚さの 11.4%以内）の変動を数値フィルタで抑制すると、下流の乱流渦の発達が弱まる。

項目	本研究で得られた値	比較
流れ方向・スパン方向の波長	境界層厚さの 0.35～0.55 倍	TS 波の中立波長は約 55.7 倍 (100～160 倍の隔たり)
壁からの広がり	境界層厚さの 14.3% 以内で明瞭に確認できる (最も強いのは 1.43% の高さ、弱いピークは境界層端まで残る)	既知の遷移構造はいずれも境界層厚さ全体に広がる
向き	スパン方向速度変動が約 45 度	乱流バンドは約 25 度
振幅	スパン方向速度変動で主流速度の約 0.05%	平均速度に対して十分小さく、逆流は生じない
壁単位換算の波長	約 56～89	乱流境界層のストリーク間隔は約 100

表 1. 本研究で捉えた近壁コヒーレント構造の特徴。長さは特記したものを除き、いずれも入口境界層厚さで規格化した値である。

既知の構造	代表的な波長（境界層厚さ比）	今回の構造との違い
TS 波	約 55.7	二次元的でスパン方向に一様。構造は三次元的で波長が 100～160 分の 1
ストリーク	スパン方向が約 8.2、流れ方向は 10 以上	流れ方向に細長い。今回の構造は縦横の波長がほぼ等しい
斜め波	10～100 のオーダー	TS 波どうしの非線形相互作用で生じる。スケールが桁違いに大きい
パフ・スラグ、乱流バンド	100 以上	すでに乱流化した領域の大規模な間欠パターン
乱流境界層の 45 度 X 字パターン	約 1 (境界層厚さと同程度)	相関の形はよく似るが、十分発達した乱流中の現象で、波長が 1～2 桁大きい
バックフロー（逆流事象）	壁単位で 20 程度	粘性底層に限られたまれな偶発事象。今回の構造は空間的に周期的で、逆流は生じない

表 2. 既知の近壁構造との比較。波長は特記したものを除き、入口境界層厚さで規格化した値である。

【謝辞】

数値シミュレーションは、東北大学流体科学研究所 未来流体情報イノベーション研究センターのスーパーコンピュータシステムを用いて行いました。本研究は、日本学術振興会（JSPS）科学研究費助成事業（課題番号：JP19K14880、JP23K26030）、科学技術振興機構（JST）創発的研究支援事業（課題番号：JPMJFR222R）、および科学技術振興機構（JST）戦略的創造研究推進事業 CREST「予測・制御のための数理科学的基盤の創出」研究領域における研究課題「決定論的支配方程式による非線形・散逸・偶然性の動力学」（課題番号：JPMJCR24Q6、研究代表者：焼野藍子准教授）の支援を受けて実施されました。

【用語説明】

- 注1. 直接数値計算（DNS：Direct Numerical Simulation）：流れの支配方程式であるナビエ・ストークス方程式を、乱流モデルを使わずに直接解く数値計算手法である。最小の渦までを格子で解像する必要があり計算コストは大きい、モデルに由来する誤差が入らない。本研究では6次精度コンパクト差分スキームを用い、解像度の異なる2種類の格子で同一の結果が得られることを確認している。
- 注2. コヒーレント構造：一見無秩序に見える流れのなかに現れる、空間的・時間的に相関をもった秩序だった運動である。渦や波のようなまとまりとして繰り返し現れ、流れの遷移や乱流の維持を支配する。単一のスナップショットだけでは偶然の模様と区別できないため、相関統計による確認が必要となる。
- 注3. 遷移：整然と層状に流れる「層流」から、乱れを伴う「乱流」へと切り替わる過程である。乱流になると壁面摩擦は著しく増大するため、遷移を遅らせて層流を保つことが摩擦抵抗低減の重要な手段となる。
- 注4. トルミン・シュリヒティング波（TS波）：層流境界層のなかで自発的に成長する、流れ方向に伝わる二次元的な波である。古典的な線形安定性理論（オア・ゾンマーフェルト方程式）で記述され、遷移の代表的な経路をなす。本研究のレイノルズ数ではTS波の中立波長は境界層厚さの約55.7倍であり、今回の構造とは波長が100～160倍隔たっている。
- 注5. 二点空間相関：流れのなかの2つの地点の変動がどれだけ連動しているかを、距離の関数として表した統計量である。これを平面上に描くことで、構造の向きと大きさを客観的に取り出せる。本研究では、ある瞬間の流れ場について、広い領域の格子点にわたって空間平均を取っている。
- 注6. 壁単位：壁面摩擦に基づく長さの尺度で、乱流の近壁構造を比較する際に用いられる。乱流境界層のストリーク間隔が約100、リブレットの溝幅が約15～20といった値が知られている。ただし層流に近い境界層では壁面摩擦が小さく、壁単位の意味も異なるため、乱流の値との単純な比較には注意が要る。
- 注7. 非モーダル過渡成長：長期的には減衰する擾乱であっても、一定の時間内にはエネルギーが大きく増幅するという現象である。支配方程式の非正規性に由来し、安定性理論では不安定にならない条件でも遷移が起きる理由を説明する。本研究では、短い時間スケールの最適モードが今回の構造と近い波長をもつことを示したが、成長率は1.6倍程度であり、これだけで構造の形成を説明できるわけではない。

【論文情報】

タイトル : New coherent flow structure near a wall in the transitional boundary layer

著者 : Aiko Yakeno*

*責任著者 : 東北大学流体科学研究所 准教授 焼野 藍子

掲載誌 : European Journal of Mechanics - B/Fluids

DOI : 10.1016/j.euromechflu.2026.204656

URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0997754626002037>

【問い合わせ先】

(研究に関すること)

東北大学流体科学研究所

准教授 焼野 藍子

TEL: 022-217-5267

Email: aiko.yakeno@tohoku.ac.jp

(報道に関すること)

東北大学流体科学研究所

国際研究戦略室 広報担当

TEL: 022-217-5873

Email: ifs-koho@grp.tohoku.ac.jp