

# 飛行機翼面上の境界層で起きる 流れの不安定性

東京理科大学 創域理工学部 機械航空宇宙工学科 教授 つかはら たかひろ 塚原 隆裕

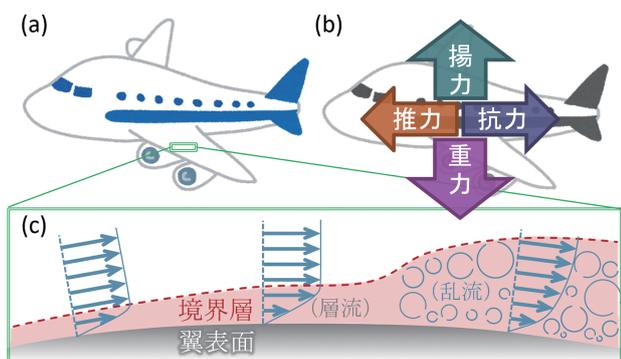
宇宙航空研究開発機構 航空技術部門 主任研究開発員 いしだ たかひろ 石田 貴大

宇宙航空研究開発機構 航空技術部門 主幹研究開発員 / とくがわ なおこ 徳川 直子  
東京理科大学大学院 創域理工学研究科 機械航空宇宙工学専攻 客員教授

新年早々、航空技術ニュースが飛び込んできました。日本航空（JAL）が宇宙航空研究開発機構（JAXA）等と共同して「サメ肌」機体を国際線に世界初導入したのです<sup>1)</sup>。これは流体力学、特に「乱流」に関わる技術であり、次世代航空機開発には乱流を如何に予測・制御するかが肝心なのです。とは言え、飛行機で遭遇する揺れ「乱気流」のことではなく、機体表面に生じるミクロな気流の乱れのことです。これが燃費改善の鍵なのです。本稿では、乱流の起源となる「流れの不安定性」について解説し、飛行機（後退翼）特有の乱流遷移と研究課題について紹介します。

## 1. 飛行機の抗力と気流

飛行機を飛ばしている力は何でしょうか？ 人の努力と技術力、も正解ですが... ここで、航空機は多種多様なので、海外旅行で使うジェット機【図1(a)】を想定しましょう。ならば、ジェットエンジンが飛行機を飛ばしていると思われるかもしれませんが、正しい理解は次の通りです。一定速度で水平飛行をしているとき、飛行機には4つの力が作用しており【図1(b)】、重力と（翼の）揚力がつり合い、水平方向には抗力と（エンジンの）推力がつり合った状態にあります。よって、空中に飛行機を浮かせているものは揚力です。揚力は、飛行速度が大きいほど強くなります



【図1】飛行機にかかる力と翼表面の境界層

ので、重力に打ち勝つほどの速度を維持すれば飛行を続けられます。エンジンは、進行方向のブレーキ（=抗力）に打ち勝つための推力を生んでおり、ロケットのように打ち上げるためのものではありません。飛行機の離陸加速中は別として、上空の巡航時に抗力さえ無ければエンジン推力を切って燃料を節約しても良いのですが、そうは問屋が卸しません。抗力をゼロにすることは原理的に不可能です。どこまで減らせるかが勝負所です。

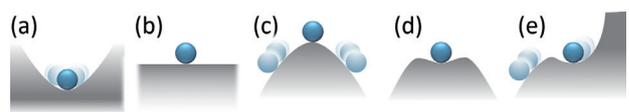
抗力（空気抵抗）にも様々な要因があります。主に①形状抗力、②誘導抗力、③干渉抗力、④造波抗力、⑤摩擦抗力、から成ります。飛行機は胴体も含めて流線形ですので、①は既に限界近くまで小さい状況です。また、翼端のウイングレットが、②の主要因である翼端渦を遠ざけて、抗力低減をもたらしています。さて、問題は残りの3つです。③は、胴体—翼、主翼—尾翼などの各部の気流が干渉して生じる付加的な抗力で、機体設計思想に関わる問題です。④は、空気中の衝撃波が要因であり、飛行機速度が音速以下でも翼表面で衝撃波は局所的に発生し得ますので、この対策には翼形状の工夫が必要です。⑤は、胴体や翼の全表面で、たとえ表面が滑らかでも空気の粘性により必ず発生し、形状最適化が成されてきた現代飛行機における抗力の主要因です。空気の粘性は、機体表面上に境界層と呼ばれる数mm～数十cm厚の薄い層を作り、境界層外の気流よりも遅い流れ（地上観測者側から見れば、飛行機表面に張り付いたように進行方向に空気が持っていられる流れ）が生じます【図1(c)】。この気流減速分だけ、機体には摩擦抗力が作用しているのです。さらに、境界層内が乱れた状態（乱流）になると、機体表面近傍に細かな渦が生まれて、境界層の厚さはより大きくなり摩擦抗力は桁違いに大きくなります。本稿冒頭に触れた「サメ肌」<sup>1)</sup>は、この微細な乱流渦を機体表面から（サメ肌のような微細な凹凸リブレットで）遠ざけ、乱流摩擦を低減しています。たとえ1%の低減率でも、

その燃費改善・CO<sub>2</sub> 排出削減・経済効果は膨大なものになります。ならば、境界層の乱流そのものを起こさせたくない、と考えるのが自然の流れ——しかし、自然界の流れは時に不安定であり、原理的に乱流化は避けられません。そこを理解いただくため、次節で、流れの安定と不安定について説明します。

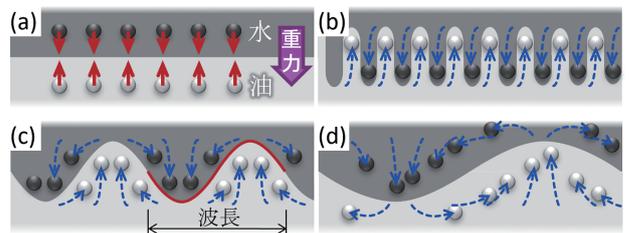
## 2. 流れの安定と不安定

日頃，“安定”な生活を送りたいものですが、安定／不安定とは何でしょうか。力学の観点で表す「安定」は【図2】で説明されます。今の状態（図中の青球）に僅かな変化（図中水平方向のズレ）を与えても、ある状態（元の位置）に自発的に戻る系が安定です。転んでも起き上がるダルマのような系です。ズレがそのままの「中立」も定義されますが【図2(b)】、ズレが増加する系を「不安定」と言います【図2(c)】。尖った方を下にして鉛筆を立たせるような系です。鉛筆が立つことも理論上あり得ますが、肉眼で検出出来ない微小なズレが必ず増幅して倒れます。奇跡的に立ち続けたとしても、それは鉛筆の先が厳密に尖っていないからです。先端が平らであれば少しのズレに対して安定で、強いズレ（外乱）に対しては不安定で、【図2(d)】のイメージになります。【図2(e)】のように、とある方向のズレ（特定の外乱）にだけ不安定な場合もあり、そのような例は自然界にも流体流れにも多く存在しています。注意されたいのは、流体流れの乱流状態を「不安定」とか、乱れの無い流れ（層流状態）を「安定」という認識ではなく、乱れ（ズレ）が増幅するか否かが「不安定か安定か」の判断になります。不安定性により乱れが増幅した結果として、乱流に至るのです。

安定／不安定はどのように決まるのか。流体も質量ですから、質量の動きを支配するのは力と力の「せめぎ合い」です。力にも種類（有限）があり、自然界の流れは無数の力がせめぎあって複雑かつ多様ですので、シンプルな系で考えてみましょう。まず、重力と粘性のせめぎ合いです。静置したサラダドレッシングを観察すると、油分と水分が分離した二層状態になって、上層に油分が溜まります。油は、水よりも軽い（密度が小さい）ためです。瞬間的にドレッシング容器を上下反転させると混ざり始めます——身近な所で誰も不安定性を活用しているのです。ここで、【図3(a)】の理想状態から考えてみます。上側に密度の重い水が、下側に軽い油があります。それぞれに重力と浮力（浮



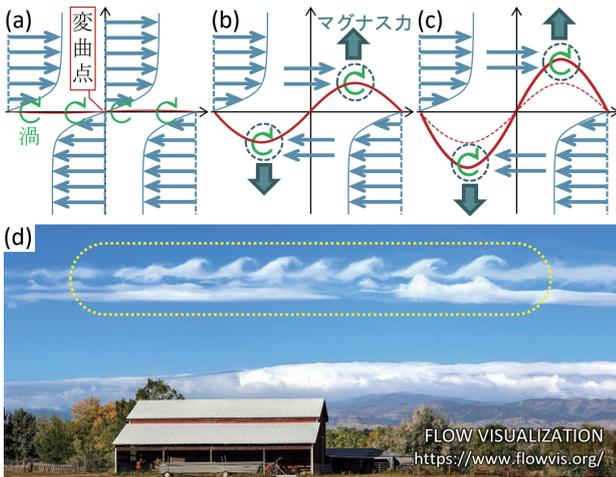
【図2】 安定／不安定の概念図



【図3】 密度差に起因するレイリー・テイラー不安定性

力は重力由来）が作用します。その差分を赤矢印で、各流体の一部（流体塊）を球で図示しています。水の流体塊は下に、油の流体塊は上に行きたがり（レイリー・テイラー不安定性）。まさに、尖った鉛筆を立たせたような不安定状態です。そして、【図3(b)】の青点線で示すように各流体塊が移動して流れを作れば、効率良く上下が入れ替わりそうです。このときの流体塊の気持ち(?)は、人混みの交差点を渡るときに似ています。自分の正面から流れてくる人混みに逆らって進まねばなりません。正面からの圧力も感じますが、すれ違う人と肩が当たりそうで抵抗を感じます。少し楽をしようと、同方向に歩く人の隣や後ろに回り込みたくありませんか？ 流体塊も同じです（感情は持ちませんが、力は感じます）。すれ違う人との「肩のぶつかり／擦れ」が、流体の粘性力のイメージです。よって、粘性力が弱まる【図3(c, d)】の方が気持ち良い(?)流れ方になります。しかし、【図3(d)】のように流体塊の横移動や周り込みばかりなもの効率は悪そうです。よって、最も丁度良い流れ方・間隔が顕在化し、それを【図3(c)】の場合だとすれば、図中赤線の波長が「最不安定波長」になります——前述の「特定の外乱」の一例です。この対流を引き起こす密度差や最不安定波長は、【図2(d, e)】の窪みの深さや形状に相当するもので、重力と粘性力の比率で決まります（現実には、界面張力による安定化への寄与も重要です）。

もう1つ、不安定性の例を紹介します。【図4】は対向する平行な流れに注目したものです。前述の交差点で対向者とすれ違う状況に似ています。対向する2つの流れの速度差により、その境界面はシート状に無数の渦（図中の緑）が連なったものと見なします【図4(a)】——理解し難いかもしれませんが流体力学では一般的な取扱い。さて、【図4(b)】のように渦に微小なズレが起きると、より速い流れが渦に正対して、ズレが大きくなる方向にマグナス力が発生します。マ



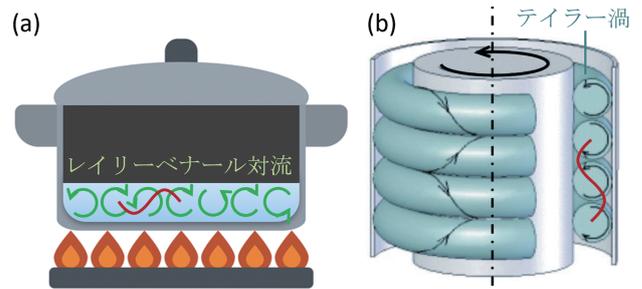
【図4】変曲点由来のケルビン・ヘルムホルツ不安定性

マグナス力とは、投げられた回転ボールの軌道が曲がることと同じ原理で、翼の揚力発生原理にも関係しています。マグナス力の向きは渦回転と外部流の向きに応じて変化し、【図4(c)】のように境界面(赤線)は上下方向に振動するようになります。これをケルビン・ヘルムホルツ不安定性と呼び、空の雲を見ていると時折、その痕跡を見つけることができます【図4(d)】。この不安定性は変曲点不安定性の一種であり、速度分布の変曲点を起点にズレが増幅して不安定化します。不安定化は、流れ自体が速いから起きるのではなく、速度の空間分布に変化(変曲点)があると不安定になるわけではありません。ここでもまた粘性力がズレに対するブレーキにもなり、慣性力(慣性力は速度差由来)と粘性力のせめぎ合いになります。乱流にまで至るかは、慣性力と粘性力の比率で決まるため、レイノルズ数(=慣性力/粘性力)などの無次元数でよく整理されます。

### 3. 様々な不安定化と発生条件

飛行機の話から逸れますが、本節では様々な流れの不安定性を例にして発生条件を紹介します。前節で述べたように、流体の運動は力の絶対値ではなく、力と力の相対的バランスによって決まり、不安定性の発生条件についても同様です。力の代わりに運動量流束や、伝熱が絡めば熱流束を考えて、各流束(流速ではなく)の比である無次元数を用いて発生条件を整理します。そうすることで、特定の材質や時空間スケールによらず、普遍的な発生条件を定義することができます。

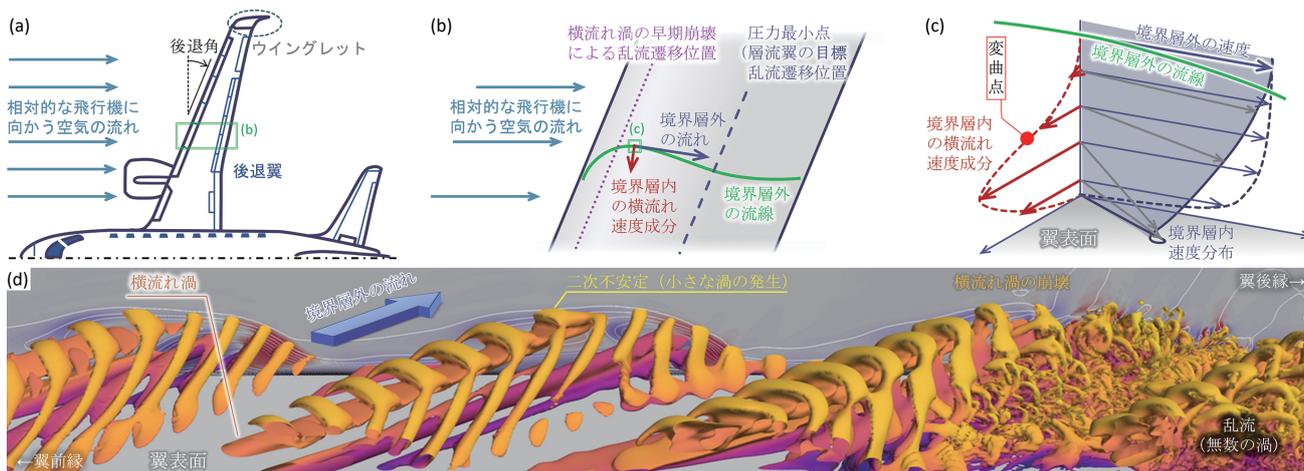
例えば、【図5(a)】のように鍋の水面と加熱底面の温度差が大きいと自然対流を生じますが、その発生は



【図5】レイリー・ベナール対流とテイラー渦

無次元数の1つレイリー数(=浮力対流熱流束/熱伝導流束)が臨界値1708を越えたときです。最不安定波長(または臨界波長)は水膜厚さの2.016倍<sup>2)</sup>、自然発生した流れをレイリー・ベナール対流と呼びます。別の例で、【図5(b)】のように同心二重円筒間に水を充填して内円筒を回転させると、遠心力によって内側の速い流体塊が外側に移動したがる不安定な系になります。二円筒の間隙の狭い特定な場合に、無次元数のテイラー数(=コリオリ力/粘性力)が臨界値1708を越えたとき、最不安定波長が間隙幅の2.016倍<sup>2)</sup>で、テイラー渦が発生します。一見異なる2例で、無次元数の物理的意味も異なるレイリー数とテイラー数が、臨界値1708で見事に一致します。特定の条件下では数学的に同一問題に落ち着くため不思議ではないのですが、物理現象の普遍的な一面が垣間見える面白さがあります。流体は水に限るわけではなく、油や空気でも、同じ臨界値と臨界波数で各不安定性が発生します。ただし、臨界値と臨界波数は流れの系に依存しますので、定性的に異なる系の臨界条件は一つ一つ調べる必要がありますが、【図5】のような一次不安定(乱流までは即座に至らない最初の不安定性)については、長年の理論的研究(線形安定性解析等)で理解が進んできました。しかし、一次不安定を経ないバイパス遷移や、二次不安定については未解明な問題が多々あります。

乱流に成るか否かを予測するのに、発見者の名を冠したレイノルズ数が一般的に用いられますが、流体力学の入門的な教科書では閾値としてレイノルズ数2000~2300をよく見かけます。これは、直円管内流れにのみ適用されるもので、これを下回ると外乱は必ず減衰する「乱流遷移の下限値」と解釈されます。イメージとしては、【図2(d, e)】の窪みが平坦になるレイノルズ数に相当します。1883年のレイノルズの実験から約130年後、より精緻な臨界値 $2040 \pm 10$ が求められました<sup>3)</sup>。これは地道な実験の賜物で、(外乱を想定した)乱流遷移の下限値を見出すには大規模な実験や高精度な数値シミュレーションが不可欠な



【図6】後退翼境界層の横流れ不安定と二次不安定，および3次元数値流体シミュレーションの可視化結果。

のです。飛行機表面の乱流遷移も例外ではありません。

#### 4. 後退翼面の乱流遷移条件と課題

本稿の主題である，飛行機の後退翼表面における乱流遷移について解説します。塚原研究室で取り組んでいる問題にも触れます。

翼面の乱流遷移を遅らせるため，特別な装置無しに，翼断面形状を工夫することで層流状態を保たせる自然層流翼があります。Honda Jetに適用されましたが，その発明は古く<sup>4)</sup>，戦前に世界最速を目標として開発された速度記録機（通称研三）にも採用されました。しかし，現代/次世代の飛行機は飛行速度がより速く（遷音速），層流状態の維持が各段に難しくなります。さらに1節で紹介した翼面上衝撃波も問題で，これによる造波抗力を低減するため，【図6(a)】のように後退翼を用いるのが常識です。すると，後退角がついたことで，翼を過ぎる流れが翼前縁近くで曲がるのです。【図6(b)】の緑で示す流線のように境界層外の流れは曲がりますが，境界層内は曲率中心に向かう速度成分（横流れ）が生じます。境界層内の3次元的速度分布を描いたのが【図6(c)】です。翼表面からの高さに応じて，流れの向きが複雑に変化します。ここで重要なポイントが，赤線で示す横流れ速度分布に存在する変曲点です。2節で述べたように，変曲点は不安定化の起点であり，実際に「横流れ不安定性」として後退翼表面における乱流遷移の主要因になります。横流れ不安定性により，最初に横流れ渦が発生・成長し，やがて下流で横流れ渦自体が不安定になり崩壊，そして乱流に至ります。（横流れ渦のイメージは，【図4(c)】のケルビン・ヘルムホルツ不安定の波に似ています。）幸い横流れ渦自体は摩擦に殆ど寄与しませんが，乱流

遷移点から下流の摩擦が増大します。要は，横流れ渦の発生は不可避でも，崩壊を遅らせて乱流遷移点を目標位置（【図6(b)】の圧力最小点）まで後退させれば，大きい摩擦抗力低減を実現できるのです。

横流れ渦自体の不安定は「二次不安定」と呼ばれ，その発生条件は横流れ渦を伴う流れ場（【図6(c)】の基本流から更に複雑化したもの）に依存します。3節で紹介した2次元系よりも，3次元的で複雑な系であることが想像できます。よって，理論的に二次不安定の発生条件は特定できず，やはり実験とシミュレーションで見出す必要があります。実用を考えれば，外乱の無い理想的な場合ではなく，主流（境界層外）乱れや翼表面の微細粗面の影響も加味しなければなりません。そこで，JAXAと共同して塚原研究室では，直接数値シミュレーション（乱流モデル不使用の三次元高解像度計算）により，主流乱れや粗面の影響下にある横流れ渦・二次不安定・乱流遷移過程の解明に取り組んでいます【図6(d)】。スパコンでも数週間を要する大規模計算ですが，普段見えない空気の流れを可視化して，優雅で神秘的な流体・渦・乱流現象に出会えたときは興奮します。これだから，研究はやめられません。

#### 【参考文献】

- 1) JAXA, “大面積リブレット形状塗膜を施した機材を世界で初めて国際線に導入”, 2025年1月10日.  
www.jaxa.jp/press/2025/01/20250110-1\_j.html
- 2) 日本流体力学会編, 流体力学ハンドブック第2版, 丸善出版(1998): 第7章.
- 3) K. Avila et al., “The onset of turbulence in pipe flow,” *Science* 333.6039 (2011): 192–196.
- 4) 橋本毅彦, “飛行機の誕生と空気力学の形成”, 東京大学出版会(2012): 第6章.