

# 論文の内容の要旨

論文題目 非定常流れの時間空間における特徴抽出法と

低レイノルズ数流中の翼型への適用に関する数値的研究

氏名 濱崎 勝俊

流体现象の状態遷移を理解し予測することは、工学的に重要な研究課題の一つである。例えば航空分野において最も重要な課題の一つである飛行体の抵抗低減のために、層流制御や乱流制御の研究が行われているが、これらを効果的に運用するためには、流れ遷移の時期や位置を把握する必要がある。実在流れは、物体形状や流れの不均一性といった多くの要因が絡み合って形成されるので、遷移や不安定化は、解析的に得られるようにある条件下で突然空間的分布をもって生じるのではなく、まず局所的な流れの特異性が引き金となると考えられる。その特異性として、本研究では時間遅れに着目している。多くの先行研究において、物体の挙動に周囲の流れの挙動が追従しないことによって、流れの遷移が誘起される可能性が示唆されている。例えば、再突入カプセルの大気圏飛行時や旅客機の離着陸時は飛行体に特に安定飛行が要求される重要なフェーズであるが、このような状況においては、飛行体周りの気流の局所的な時間遅れの存在によって、飛行不安定が生じると考えられている。また亜音速領域と超音速領域が混在する遷音速内部流れにおいては、翼の振動と翼周りに生じる衝撃波の挙動の時間遅れが、翼の非定常空力特性に大きな影響を与える可能性が示されている。

また近年の計測技術や機器の発達によって詳細な流れ計測が可能となってきた。実験的研究においては、非接触で定量的非定常計測が可能な手法の例として、粒子画像流速測定法(PIV)、感圧塗料(PSP)あるいは感温塗料(TSP)による面計測技術が挙げられる。一方で数値的研究においても、近年の数値流体力学(CFD)と計算機の発達により、時間的にも空間的にも高分解能な流れ場のデータを取得することが可能となっている。大規模渦解析(LES)はその代表例である。いずれの手法においても大容量のデータが取得されるため、流れ場について論じるためのデータ処理法および可視化手法の確立が求められる。

以上を踏まえて、本論文では、物体表面圧力分布の時系列データにおける局所時間遅れを取得し、その空間構造を可視化する新しい手法を提案した。局所時間遅れを取得するために相関解析を採用した。相関解析は、二つの時系列データ間の相関が時間の関数として取得され、相関が最大となる時刻から元の時系列データ間の時間遅れを推定可能なためである。可視化結果を相関マップと呼称し、流れ場の詳細な時間空間構造と相関マップ上の描像との関連について考察した。これらを元に、時系列データの時間方向の挙動に対する条件、物体形状に対する条件、時系列データの時間空間解像度に対する条件を明確にして、提案手法を確立することを本研究の目的としている。

まず元となる時系列データの作成方法を述べる。流れ場の詳細な時間空間構造と、相関マップの描像との比較検討が容易であるという利点に着目し、本研究ではCFDによってデータ取得を行った。流れ場は二次元とし、流線型物体の代表としてNACA0012翼型を、複雑形状(一般形状)物体の代表としてコルゲート翼型を採用している。レイノルズ数は10000で一定として迎角をパラメータにとり、これらの翼型周りの非定常非圧縮流れを、MAC法をベースとした自作ソルバーによって解析した。このようなパラメトリック解析によって、単一周期変動流れ、多重周期変動流れ、非周期的変動流れとそれぞれに対応する圧力分布の時間変動データを取得した。相関解析による時間遅れ検出はあらゆる種類の時系列データに対して適用可能であるが、カオスの

挙動を示すような流れを扱う場合は、その強い非定常性を定量化することに特化した別の手法の導入が望ましいと考えられる。そのため提案手法の適用範囲を単周期変動流れとして流れ解析結果を分類し、提案手法の適用範囲内：NACA0012 翼型の迎角 0~5 度およびコルゲート翼型の迎角 0 度、要検討状況：NACA0012 翼型の迎角 6 度、適用範囲外：コルゲート翼型の迎角 10 度と定義した。

次に提案手法について述べる。翼型表面上の任意の二点の時系列データに対して相関解析を行い、得られる相関関数が最初に最大値をとる時刻を、元のデータ間の時間遅れとして定義した。相関関数が最大値をとる時刻は元データ間の時間遅れとして考えることができるが、単一周期で変動する時系列データ間の相関関数は同じ周期をもつ周期関数となるため、最大値をとる時刻が複数存在して時間遅れを一意に決定できない。そのため相関関数が最初に最大値をとる時刻を採用しているのである。また迎角変化にともない流れ場や表面分布の振動周期が変化することが確認されたため、時間遅れを振動周期で規格化することも提案した。翼型表面に沿った空間一次元座標（s 座標）を定義した上で、翼型表面上の全点に対してこのような処理を行うと、時間遅れは縦軸横軸ともに s 座標をとる空間二次元の時間遅れ分布図が得られる。本論文ではこの時間遅れ分布図を相関マップと呼称している。

翼型表面の摩擦分布、圧力分布、圧力勾配分布、圧力の二階微分の分布を用いた相関マップと翼型周り流れ場の挙動を比較検討した結果、圧力勾配分布が流れの特徴をよく捉えることが確認された。この結果は、境界層理論において表面摩擦と圧力勾配に相関があり、また圧力勾配が流れを駆動し摩擦が生じるというメカニズムから妥当であると考えられる。この結果を受け、本論文では圧力勾配分布の相関マップについて述べる。相関マップに現れる描像は、模様你不連続をもたらす線、それに囲まれた泡状模様、縞状模様、それ以外の模様の四つに分類できることが明らかとなった。それぞれのパターンが見られる位置から、不連続に囲まれた泡状模様は速度変動が小さい定常的流れ領域、縞状模様は剥離泡からの放出渦の移流などによって速度変動が大きい流れ領域の特徴を捉えていることが確認された。また縞状模様の間隔と振動周期によって、近傍流れにおける移流速度を推定できることが示された。次にこれらを用いた具体的な結果の考察を述べる。単周期振動する NACA0012 翼型の迎角 0~5 度の範囲では、相関マップの描像変化は迎角変化にともなう非定常流れの発達をよく捉えていることが確認された。同じく単周期振動するコルゲート翼型の迎角 0 度との比較で、翼型形状によらず提案手法を適用できることも確認された。また多重周期振動を示す NACA0012 翼型の迎角 6 度の相関マップに対する考察から、単一振動成分が卓越して単周期振動として扱えるような流れに対しては適用できる可能性が示唆された。一方で非周期的振動をみせるコルゲート翼型の迎角 10 度の相関マップに対する考察からは、上記の特徴的なパターンが見られなかった。そのため提案手法の適用範囲として、物体形状には依存せず、流れおよび表面圧力勾配が単一周期で変動する場合に限ることが示された。また元データの時間空間方向のデータ密度の変化に対する相関マップの描像変化を確認した。その結果、振動周期を 10 点以上で表現する時間分解能、剥離流れの影響が卓越する翼面をおよそ 80 点以上で表現する空間分解能が要求されることを示した。

表面圧力分布は数値解析のみならず実験においても容易に取得することが可能であり、また元データに要求される時間空間分解能は、近年盛んに用いられている非定常 PSP 計測で容易に達成できると考えられる。従って、例えば実際の飛行中においては、流れ制御装置を効果的に作動させるための一つの手段として導入できると考えられる。なお実際の物体表面データは空間二次元であるため、提案手法の導入にあたっては、多次元データを可視化する表現手法の検討が求められる。また相関マップを作成するための空間軸は流れの移流方向に一致させることで、移流速度の推定が可能となる。従って移流方向が不明である場合には妥当な相関マップが得られないと予想される。現実の物体表面データに対する提案手法の適用にあたっては、これらの課題の解決が不可欠である。