

審査の結果の要旨

氏名 李東輝

修士(工学) 李東輝の論文は「A Study on Formation Mechanisms of Surface Pressure Distribution around a Laminar Separation Bubble (層流剥離泡付近の表面圧力分布形成メカニズムに関する研究)」と題し、7章から構成されている。

近年注目されている小型無人飛行機は翼弦長を基準としたレイノルズ数で 1,000 から 100,000 の低レイノルズ数領域で飛行する。この領域での翼型空力性能に大きな影響を及ぼす特徴的な因子の1つとして、層流剥離泡(Laminar Separation Bubble, LSB)の形成が挙げられる。LSB 付近における表面圧力分布の一般的な特徴として、一定圧力分布になる領域、その後流には圧力が急に回復する領域があることが知られている。しかしながら、近年、LSB が形成されても上記のような典型的な特徴が現れない場合があることが報告されており、このような現象まで包括的に説明できる圧力分布形成の物理的メカニズムの理解が不十分であった。

また、LSB が形成されることにより、低レイノルズ数領域での翼型空力特性は高レイノルズ数領域での翼型空力特性とは大きく異なるため、低レイノルズ数領域で性能が高い翼型の開発が必要とされている。ラージエディシミュレーション(Large Eddy Simulation, LES)を用いることでこのレイノルズ数領域での翼型特性の精度よい予測が可能であることが知られているが、低レイノルズ数領域で性能が高い翼型を効率的に開発するためには計算コストの低い2次元計算を用いることが望ましい。先行研究により2次元非定常層流計算は LSB 付近の流れ場に対して定性的に良い予測性を有することが示されているが、その詳しいメカニズムに関する議論は不十分であった。

そこで本論文は LSB 付近の表面圧力形成に関わる物理メカニズムを解明すること、および、低レイノルズ数領域における2次元非定常層流計算の信頼性を検証することを目的としている。

第1章の序論では、本論文の背景と先行研究、目的について述べている。

第2章では、本論文で用いる数値計算手法について説明している。

第3章では、平板長基準 5%厚みの平板に対して LES を行い、LSB 特性を「定常層流剥離泡(LSB_S)」と「定常変動層流剥離泡(LSB_SF)」に分類している。また、i) LSB が形成されても典型的な圧力分布が現れない場合があること、ii) 定常領域において LSB 内部が定常状態であっても一定の圧力分布が現れない場合があること、iii) 変動領域において遷移を伴わなくても急な圧力回復現象が起こりえること、を示している。

第4章では、圧力勾配方程式を導き、新しい視点から圧力分布形成メカニズムを議論している。はじめに、レイノルズ数に応じて剥離せん断層の発達具合が異なることにより表面付近で異なる粘性応力分布になることが LSB_S と LSB_SF の定常領域において異なる圧力分布特性を持つ理由であることを明らかにしている。また、変動領域における急な圧力回復はレイノルズ応力の勾配輸送による壁面付近での強い粘性応力に起因すること、急な圧力回復にはレイノルズせん断応力の勾配輸送による壁面垂直方向の運動量交換が重要であることを示している。さらに、レイノルズせん断応力の勾配輸送は2次元成分が支配的な場合と3次元成分が支配的な場合があり、どちらが支配的であるかということよりも、その強さが重要であることを明らかにしている。

第5章では、4章までに示した知見を活かし、数値計算の工学的応用に焦点を当て LSB をもつ流れ場に対する2次元非定常層流計算(以下、2次元計算)の信頼性と有用性を議論している。LES と2次元計算の比較により、2次元計算の瞬間流れ場では3次元渦構造や乱流付着境界層などの特徴は捉えられないものの、表面圧力分布や表面摩擦係数分布、再付着状態などの時間平均特性に対する定性的な予測が可能であることを示している。3次元流れ場構造が現れる変動領域において、2次元計算でも急な圧力回復が現れる理由は、実現象における3次元変動成分は現れないが、その分が2次元変動成分になり、その結果として全体変動成分が3次元計算と同様な分布になるためであることを明らかにしている。これは前章で議論した圧力分布形成メカニズムで示されたように、変動成分を生み出す流れの構造よりも形成される変動成分の大きさ自体が重要であることを示している。

第6章では、翼型周りに対して LES および2次元計算を行い、実用流れ場に対して前章で得られた知見の有効性を議論している。本論文で明らかにした表面圧力分布形成メカニズムが翼型周りの LSB を伴う流れ場にも適用できることを示し、2次元計算は大規模剥離を伴う高迎角を除けば翼型形状によらず定性的な空力特性と LSB 形成が予測可能であることを示している。

第7章は結論であり、本論文で得られた知見をまとめている。

以上要するに、本論文は LSB を伴う流れ場の表面圧力分布形成に関わる物理メカニズムの解明を目的として、学術的観点から LSB の特性を理解し表面圧力分布の形成メカニズムを明らかにしていること、また工学的観点から LSB を伴う流れ場に対する2次元非定常層流計算の有用性を示しているものであり、航空宇宙工学上貢献するところが大きい。

よって本論文は博士(工学)の学位請求論文として合格と認められる。