

## 論文の内容の要旨

論文題目     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)

氏 名     李 東輝

本論文では層流剥離泡付近の表面圧力分布に関わる物理メカニズムの解明を目的とし、層流剥離泡の特性理解および圧力分布形成メカニズムを解明した。更にその知見を活かして層流剥離泡が形成される流れ場に対する2次元非定常層流計算の工学的有効性を検証した。

まず解析対象を平板長基準の5%の厚みの直角前縁を有する平板と設定し、平板長基準レイノルズ数( $Re_c$ )が $Re_c=5.0\times 10^3$ ,  $6.1\times 10^3$ ,  $8.0\times 10^3$ ,  $1.1\times 10^4$ ,  $2.0\times 10^4$ の条件でLarge eddy simulation (LES)を行った。その結果、全てのレイノルズ数で層流剥離泡が観察されたが、レイノルズ数に応じて異なる特性が得られた。まず瞬間流れ場により、 $Re_c=5.0\times 10^3$ ,  $6.1\times 10^3$ ,  $8.0\times 10^3$ では流れ場全体が2次元構造であることに対し、 $Re_c=1.1\times 10^4$ ,  $2.0\times 10^4$ では遷移を伴う3次元乱流構造が形成されることが確認できた。更に、剥離内部の乱流運動エネルギー分布を調べることで、外見上では同じ層流剥離泡のように見えても、層流剥離泡の特性を次のような2種類に分類できることわかった。まず $Re_c=5.0\times 10^3$ ,  $6.1\times 10^3$ の比較的低いレイノルズ数では剥離領域全体が定常状態の「定常層流剥離泡(LSB\_S)」が、 $Re_c=8.0\times 10^3$ ,  $1.1\times 10^4$ ,  $2.0\times 10^4$ の比較的高いレイノルズ数では剥離領域内部で定常と変動領域が共存する「定常変動層流剥離泡(LSB\_SF)」が現れることを示した。各層流剥離泡の特性に応じ、LSB\_Sでは剥離領域全体の定常領域において滑らかな圧力回復が観察された。その一方、LSB\_SFではまず定常領域において一定の圧力分布が、その後の変動領域において急な圧力回復が起こるような、いわゆる層流剥離泡付近でよく見られる典型的な圧力分布形状が得られた。

以上により、i) 層流剥離泡の形成時には一定の圧力分布後に急な圧力回復が起こるような圧力分布が一般的であると考えられたが、LSB\_Sの結果から層流剥離泡が形成されても上記のような典型的な圧力分布形状が現れない場合があること、ii) 今までは剥離せん断層内部の定常的な流れが一定の圧力分布を誘発すると考えられたが、LSB\_SとLSB\_SFの定常領域の比較から層流剥離泡内部が定常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) 今までは急な圧力回復を引き起こすものは3次元乱流構造の形成によるものであると考えられたが、 $Re_c=8.0 \times 10^3$ の結果において流れ場が2次元構造であっても急な圧力回復が見られたことから、遷移を伴わなくても急な圧力回復が起こり得ることを示した。これらの観察結果は今まで説明されてきた層流剥離泡付近の表面圧力分布形成メカニズムでは説明しきれない現象であり、これらも包括的に説明できる物理メカニズムの理解がまだ不十分であることを示唆している。

そこで本論文では主流方向運動量方程式から平均圧力勾配方程式を導き、方程式を構成している対流、第1粘性拡散、第2粘性拡散、レイノルズ応力の勾配輸送項の収支を調べることで圧力勾配の形成に関与する物理メカニズムを新しい視点から解明した。まず定常領域において、LSB\_SとLSB\_SFの間で異なる圧力分布が現れる理由は表面付近において第1粘性拡散分布の相違に起因することがわかった。更に第1粘性拡散を構成する粘性応力と速度分布を調べることで、レイノルズ数により異なる速度の最小値の壁面からの位置が壁面付近の粘性応力や圧力勾配の相違に影響することを明らかにした。また変動領域においては、レイノルズ応力の勾配輸送による壁面付近の強い粘性応力の発生が急な圧力回復を引き起こすこと、レイノルズせん断応力による壁面垂直方向の運動量交換が急な圧力回復現象に重要であることを示した。更に、レイノルズせん断応力を2次元変動と3次元変動成分に分解することでレイノルズせん断応力の勾配輸送を誘起する渦構造の2次元性/3次元性よりは、形成される大きさ自体が急な圧力回復に重要であることを明らかにした。

以上のメカニズムにより、層流剥離泡内部の定常領域では流れが基本的に2次元構造で剥離せん断層の挙動を正しく予測すること、また変動領域では形成される変動成分の大きさが重要であることがわかった。この結果は3次元乱流構造が形成される変動領域においても、変動成分すなわちレイノルズせん断応力の勾配輸送を正しく予測できれば2次元計算でも表面圧力分布の予測が可能であることを示唆している。これを検証するため、5%厚みの平板に対して2次元非定常層流計算を行った。その結果、まず2次元非定常層流計算を用いても平均剥離泡長さ、再付着点の変化傾向、層流/乱流再付着や表面圧力分布数のような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た。一方、瞬間場における3次元乱流構造や平均速度プロファイル、定量的な表面摩擦抵抗の予測は難しいことがわかった。特に表面圧力分布の予測性について、流れが2次元構造である層流再付着のレイノルズ数では2次元と3次元計算の間で良好な一致が確認された。その一方、流れが3次元構造になる乱流再付着のレイノルズ数ではまず一定の圧力分布区間では遷移近傍における圧力分布のオーバーシュート現象を除けば良好な一致を示した。更に急な圧力回復が見られる変動領域においては、実現象では3次元成分として現れるべき変動成分が2次元計算では2次元変動成分に押し込まれるが、レイノルズせん断応力の勾配輸送が正となる定性的な傾向は捉えることができるため2次元計算でも3次元計算と同様な圧力分布が得られることを示した。

最後に、本論文で議論した層流剥離泡付近の表面圧力分布形成メカニズムに加え、2次元非定常層流計算の工学的有効性を示すため、翼型周りの実用流れ場に対して同様な解析を行った。まずNACA0012翼型を用いてLESを行い、翼型周りで形成される層流剥離泡に対しても本論文で提案したメカニズムが適用できることを示した。更に本論文で述べた表面圧力分布形成メカニズムは層流剥離泡が形成される流れ場ならレイノルズ数に関係なく適用可能であると考えられる。また2次元非定常層流計算の工学的有用性、特に空力特性予測性に対する翼型形状依存性を検証するため、NACA0012(対称の厚翼)、NACA0006(対称の薄翼)、Ishii(キャンバー付き薄翼)の3つの翼型に対して2次元非定常層流計算を行った。その結果、大規模剥離を伴う高迎角を除けば翼型形状によらずに定性的な空力特性や層流剥離泡の形成が予測可能であることがわかった。この結果は過去の知見と照らし合わせると2次元非定常層流計算が適用可能な範囲は少なくとも $Re_c=5.0 \times 10^4$ 以下の範囲であることを示唆している。更に一般的に想定される巡航迎角が大規模剥離を伴わない比較的低い迎角であることを考慮すると、多くの計算ケースを必要とする新しい翼型設計の初期段階もしくは未知の翼型の空力特性把握に対して2次元非定常層流計算は非常に有効な手法であると考えられる。