

論文の内容の要旨

論文題目：風力タービン用翼型に発生するはく離泡及び翼性能の数値解析

氏名：木枝 香織

「涙の粒のようなその形状は、普遍的な美をも兼ね備えているもの」と表現される翼型とは、揚力を得るものの真髄であり、流体機械設計の中心を占めるものである。理想的な翼型形状はその大きさと流速に依存するもので、この依存性はスケール効果と呼ばれる。スケール効果はコードレイノルズ数 $Re (u_{\infty} \cdot c / \nu ; u_{\infty}$:主流速度, c :翼弦長, ν :動粘性係数)により特徴付けられる。風力タービンブレードの Re は $10^5 \sim 10^6$ のオーダーであり、この領域ではより低い Re に比べ翼性能が飛躍的に向上する一方、大規模な層流はく離による性能低下や層流はく離後の乱流遷移、流れの再付着、はく離泡形成など複雑な現象が起こる領域であり、多くは低 Re 領域と呼ばれる。従って、風力タービン用翼型設計においては、翼型のこれら低 Re 領域におけるはく離特性予測や現象解明が重大な関心事であり、性能評価の重要課題である。

また、風力タービンブレードは変動自然風況下で作動し、ピッチ制御動作やロータのフェザーリング状態、緊急停止動作を含めると、迎え角変動は ± 180 度の範囲となる。風速や回転数変化による Re 変動も発生する上、風力タービンは本来的に設計点で運転されるわけではなく、設計点からずれた状態での翼性能の評価も重要である。さらに、このような現象には 3 次元的な渦の形成が流れに深く影響を及ぼし、現象解明や性能解析を複雑にしていると思われる。従って、風力タービン用ブレードまわりの流れ場に関わるキーワードとして、流れの非定常性と 3 次元性があげられる。

本研究の目的は、風力タービン用翼型まわりの流れ場の 3 次元流れ構造やはく離現象、特にはく離泡形成の現象解明である。はく離泡が形成されることにより、大規模な層流は

く離が抑えられ翼性能は高く維持されるため、その物理的理解は重要である。

低 Re 領域の翼型に形成されるはく離泡のシミュレーションには、その流れ場の性質から、3次元非定常な数値解析が必要であり、ナビエ・ストークス方程式を直接解く方法：数値流体力学（Computational Fluid Dynamics：CFD）を解析手法に採用した。現状では、 Re が 10^5 以上の計算に直接計算の解像度を要求することは困難であることから、対流項に風上スキームを採用する計算安定化手法や、Large Eddy Simulation (LES)による乱流計算が有効な手段であり、精度良いシミュレーションに成功すれば、風洞実験からは得がたい流れ情報が補われることが期待される。

まず、はく離現象を伴う 3次元渦構造を解明する出発点として、実験データが豊富で、数値解も得られており、はく離・再付着現象が起こる円柱まわり流れを取り上げた。対流項差分スキームには、3次精度風上差分スキーム（K-Kスキーム）を採用し、流れの3次元性が顕著に表れる $Re=10^3$ の3次元流れ計算を実施した。図1は、得られた流れ場の圧力等値面($P=-1.6$)の瞬時値とパーティクルシミュレーションである。圧力等値面は円柱背後のカルマン渦の位置を示し、パーティクルシミュレーションは、はく離点近傍に配置されたパーティクルが与えられた速度場で移動する様子を示している。はく離点近傍にパーティクルの軌跡間隔の広がり部が存在し、その下流でカルマン渦が3次元的に曲がっていることが確かめられた。

揚力係数 (C_l) や抗力係数 (C_d) などの時間変動にはうなり現象が生じ、それらのパワースペクトルにはカルマン周波数のメインのモードに隣接した複数のピークが存在した。さらに、メインのモードと、隣接したピークのモードとの差のモードが確認され、差のモードはうなり現象に対応していることが明らかとなった。また、はく離点近傍の流れ場には、カルマン周波数の $1/2$ 程度のモードが確認されたが、スパン方向の流れの構造は主にこのモードによって形成され、図1に示したパーティクルの軌跡の広がり部（3次元的な渦対）の出現に対応していることが判明した。さらに、はく離点における流れの3次元性の影響で、カルマン渦が曲がり、その曲がりに誘起されたと考えられる2次渦の発生（スパン方向の不安定性の流れ方向への伝搬）が認められた。

以上の結果より、これらの Re 領域の流れ場の3次元性は本質的なものであり、現象解明には3次元計算が必要であることが確認された。

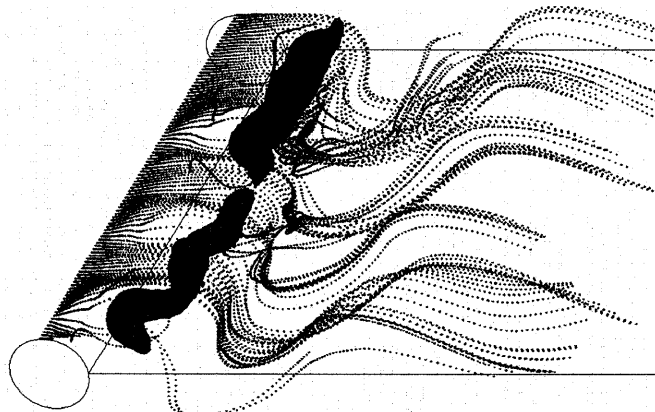


Figure 1 $Re=10^3$; Surface plots of pressure($P=-1.6$) and particle simulation at $T=42.1$

次に風力タービン用に設計された 2 種類の翼型 MEL012 と M-F071 を取り上げ、それらの流れ場に形成されるはく離泡のシミュレーションを実施した。翼型 MEL012 は $Re=2 \times 10^5$ 、迎え角 4 度、翼型 M-F071 は $Re=2 \times 10^5$ 、迎え角 10 度の計算を実施したが、これらの条件では、風洞実験結果よりはく離泡形成が確認されている。

翼型 MEL012 の計算で得られた翼まわりの圧力係数分布 (C_p) を図 2 に示す。(a)では、グローバルな流れ場を捉えるために対流項に風上差分スキーム (QUICK スキーム) を適用し、解の格子依存性を調べた。粗い格子 GRID1 では、 C_p 分布に実験結果のような不連続部が現れないが、流れ方向に細く分割した格子 GRID2 と GRID3 では、実験結果と同様な不連続部が現れ、はく離泡の形成が捉えられることがわかった。GRID3 のスパン方向分割数は GRID2 の倍であるが、 C_p 不連続部がより明確に捉えられ、スパン方向の格子分割数も重要であることが判明した。(b)は GRID3 を使い、LES の Dynamic model を適用した計算結果であり、実験結果との一致が良好である。LES 計算結果は、 C_p 、 C_l 、 C_d すべて実験値とより良く一致し、精度が良いことが判明した。

はく離点近傍の速度ベクトルと圧力コンター図の一連の時間変化から、はく離泡の流れのメカニズムを調べた。その結果、はく離泡とは、層流はく離後のはく離境界層内で発達してきた渦が、境界層外側から流れを巻き込みながら成長し強くなり、その後弱くなっていく過程と理解された。QUICK スキームと LES による計算結果とを比較したが、この比較的大きな流れ構造には顕著な相違はみられなかった。

翼型 M-F071 の計算で得られた翼まわりの C_p 分布を図 3 に示す。ここでは QUICK スキームを適用し、はく離泡のシミュレーションに再現性があることを確認した。

翼型 M-F071 については、風洞実験で得られた圧力の時間変動とそのパワースペクトルを、計算結果と比較した。実験結果、計算結果ともに $x/c=0.325$ 付近で変動が始まり、パワースペクトルには小さなピークが現れる。下流に向い変動の振幅は大きくなり、 $x/c=0.4$ 付近で最大となる。このときパワースペクトルには 2 つのピークが観察された。その後、徐々に振幅を弱めつつ、細かい変動となっていく。この下流方向への圧力変動の変化から理解されるはく離泡の流れ構造は、シミュレーションで得られたはく離泡の流れ構造を裏付ける

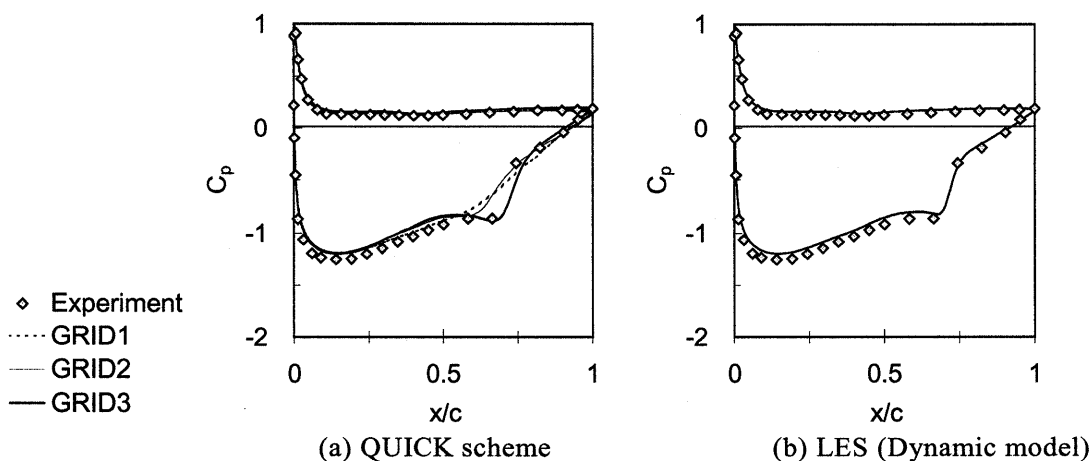
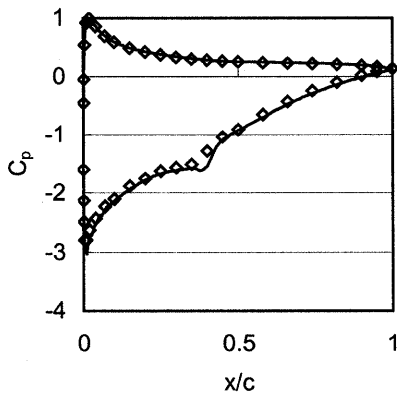
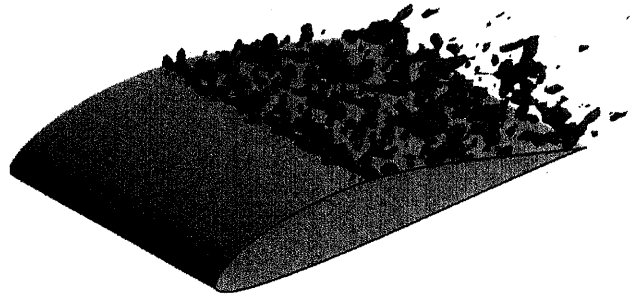


Figure 2 MEL012, $Re=2 \times 10^5$, $\alpha=4$ deg.; Pressure coefficients around the airfoil



◇ Experiment
 Figure 3 M-F071, $Re=2 \times 10^5$, $\alpha=10 \text{deg.}$;
 Pressure coefficient around the airfoil



■ -0.025
 Figure 4 M-F071, $Re=2 \times 10^5$, $\alpha=10 \text{deg.}$;
 Surface plots of $dp = p - \bar{p}$, \bar{p} : spanwise mean

ものであると考えられる。

また、パワースペクトルに 2 つのピークが現れる領域の計算結果には、はく離泡内の強くなった渦と壁面との干渉による 2 次渦の形成が観察された。壁面せん断流れの安定論に関するレビューから、境界層の乱流遷移のプロセスをまとめると以下の 3 ステージに分類される。

- Receptivity (受容性) 外乱が粘性型の不安定波である Tollmien-Schlichting 波 (T-S 波) を誘起する過程
- Instability (不安定性) 不安定性の線形増幅過程と、振幅が増幅されるにつれて現れる 3 次元性や、非線形干渉 (Secondary instability) の過程
- Breakdown 擾乱の著しい成長と、ブレークダウンして乱流に至る過程。
ある振幅に達した不安定波と境界層の非線形干渉が観察される。

ここに、2 次渦の形成は、breakdown し乱流に至る過程に重要な役割を担っていることが想像される。

図 4 に、流れの様子を瞬時の圧力場からスパン方向に平均した圧力を引いた値の等値面で示す。はく離点近傍にはライン状の分布が観察されるが、これはスパン方向に平均した渦中心位置と、実際の 3 次元的な渦中心の分布とのずれにより生じ、この領域での渦の曲がりを示している。これより下流側は、より細かい流れの 3 次元構造が存在し、乱流へ遷移していると考えられる。

今回の解析で、はく離泡形成が 3 次元 CFD 計算でシミュレートされ、 C_p 分布は実験値と良く一致し、そのメカニズムは一定程度明らかとなった。かかる解析結果からはく離泡形成のメカニズムにおいて非定常性および 3 次元性が本質的であることが判明した。今後は、今回の解析手法を風力タービン用翼型でしばしば発生する低迎角、低 Re での性能低下や、高迎角における前縁失速、高迎角で発生するヒステリシスなどの解析に適用し、翼まわりの流れの解明や予測に貢献することが期待される。将来的には、CFD による高性能翼型設計ツールに発展させたい。