

ブレードへの着氷および製作誤差の影響

IMPACT OF ICING AND MANUFACTURE ERROR TO BLADE

藤原 惇嗣* 岩井 憲一* 小川 路加* 細見 雅生*
 Atsushi Fujiwara Kenichi Iwai Ruka Ogawa Masao Hosomi

風力発電機ブレードの翼断面形状は、非常に繊細に作られており、傷や汚れなどでも翼断面性能へ影響を与える。そのため風車の運転を開始した後も、定期的な点検や補修が必要となる。本稿では、風車ブレードへの着氷による翼断面形状の変化と風車ブレード製作誤差による翼断面形状の変化に伴う、二次元翼断面性能への影響について述べる。

キーワード：風力発電ブレード，着氷ブレード，ブレード製作，製造管理

1. はじめに

ブレードとは、流れの中に置かれた物体に作用する力の内、抗力に比べて揚力が大きくなるように作られたものをいい、その断面形状のことを翼型（翼断面）という。

翼型の形状は、レイノルズ数や迎角などの周囲状況や使用目的により最適なものが異なり、その二次元翼性能も異なる。本稿では、着氷や製作誤差による翼型の変化に伴う影響について述べる。

2. 二次元翼性能

翼の各部の名称を図-1に示す。

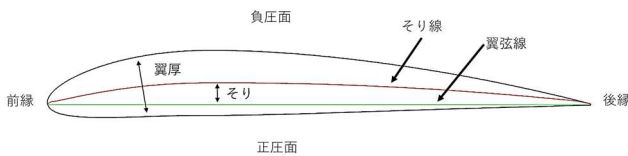


図-1 ブレードの各部名称

ブレードの風を切る側（前側）を前縁、風が抜ける側（後側）を後縁といい、前縁と後縁を結ぶ線を翼弦、その長さを翼弦長という。また、負圧面側の翼表面と正圧面側の翼表面の中心点を結んだ線をそり線、翼弦とそり線の距離をそりといい、そり線に垂直な厚さを翼厚という。

翼型の例として図-2に NACA0025 と NACA0035、NACA4312 を示す。これらの翼型は通称 NACA 翼と呼ばれ、NASA の前身の機関である NACA が開発し、公開している翼型である。また、図-3、図-4 に二次元翼性能の迎角—揚力係数 ($\alpha-C_l$) と迎角—抗力係数 ($\alpha-C_d$) を、図-5 に迎角—揚抗比 ($\alpha-C_l/C_d$) を示す。

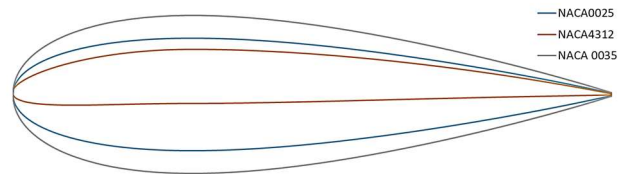


図-2 翼断面比較

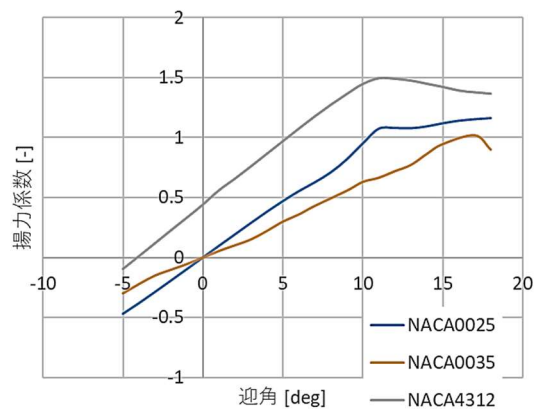


図-3 迎角—揚力係数 ($\alpha-C_l$)

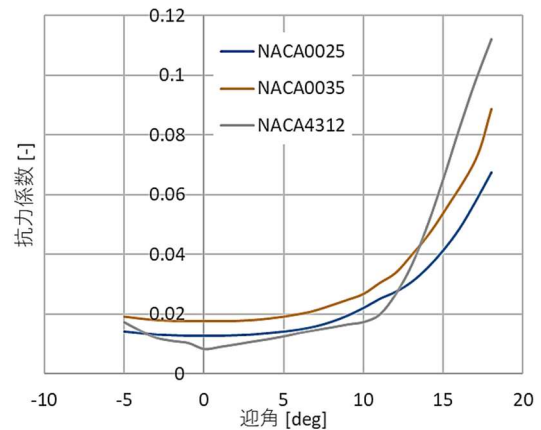


図-4 迎角—抗力係数 ($\alpha-C_d$)

* 環境インフラ本部 再生可能エネルギー部

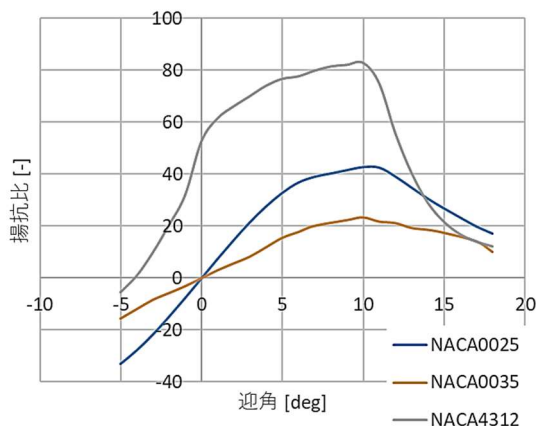


図-5 迎角—揚抗比 ($\alpha - C_l/C_d$)

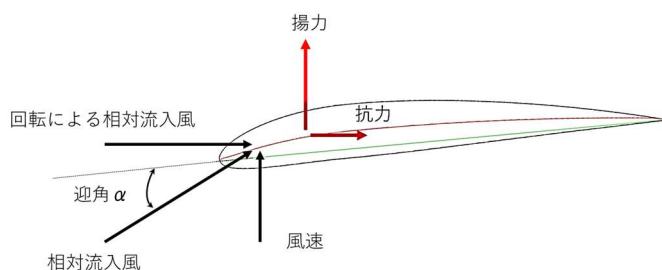


図-6 迎角と揚力・抗力

図-6 にブレードに作用する風と発生作用力を示す。翼弦線と相対流入風のなす角度を迎角といい、ブレードを負圧面側へ押し上げる力を揚力、ブレードを後縁側へ押す力を抗力という。

図-3～図-5 より、NACA4312 と NACA0025 を比較した際、迎角が 10°以下で NACA4312 の方が揚力係数・揚抗比ともに高く、抗力係数が小さいことから性能が高いといえる。しかし、揚抗比の傾斜をみると、迎角が変化した際の変動は NACA0025 の方が緩やかであるため、安定した翼だといえる。また NACA0025 と NACA0035 を比較すると、同じ対象翼で翼厚が異なるだけだが、図-3～5 よりわかるように性能に大きな違いがみられる。このように、ブレードは、形状の違いにより大きく性能の差が表れることがわかる。

3. 着氷による影響

本章では、風車ブレードへの着氷により、翼断面形状が変化することによる翼性能への影響について述べる。

3.1 着氷メカニズム

(1) 着氷の発生環境¹⁾

着氷の発生は周囲環境による主な現象として、以下 3 が挙げられる。

Rime ice

0℃～-20℃で発生し、過冷却水滴が構造物にぶつかることにより着氷する。構造物に衝突するとすぐさま凍結するため、構造物の風上側のみに着氷する。

Glaze ice

0℃～-6℃で発生し、雲や霧の水滴が構造物に付着することにより着氷する。Rime ice と異なり、構造物に衝突した際には水滴状態であり、その水滴が外気温により冷やされることにより氷となる。そのため、水滴状態で構造物表面を流れるため、構造物の風下側にも着氷する。

Wet snow

0℃～+3℃で発生し、粘性の高い湿った雪が構造物へ付着し、凍結することで着氷する。

(2) 着氷の状態変化¹⁾²⁾

着氷の状態は下記の 4 つの過程に分類される。状態変化の模式図を図-7 に示す。

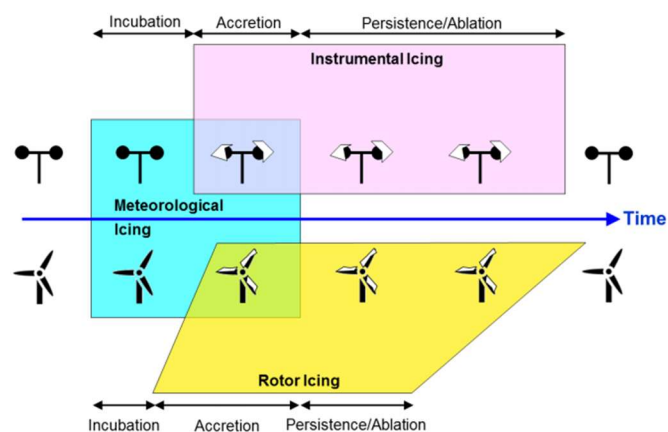


図-7 着氷の状態変化¹⁾

Incubation

3.1-(1) 項で示した気象条件の開始から構造物やブレードへ着氷するまでの時間。温度や構造物の表面に依存して変化する。

Accretion

構造物やブレードへ付着した氷が成長する期間。

Persistence

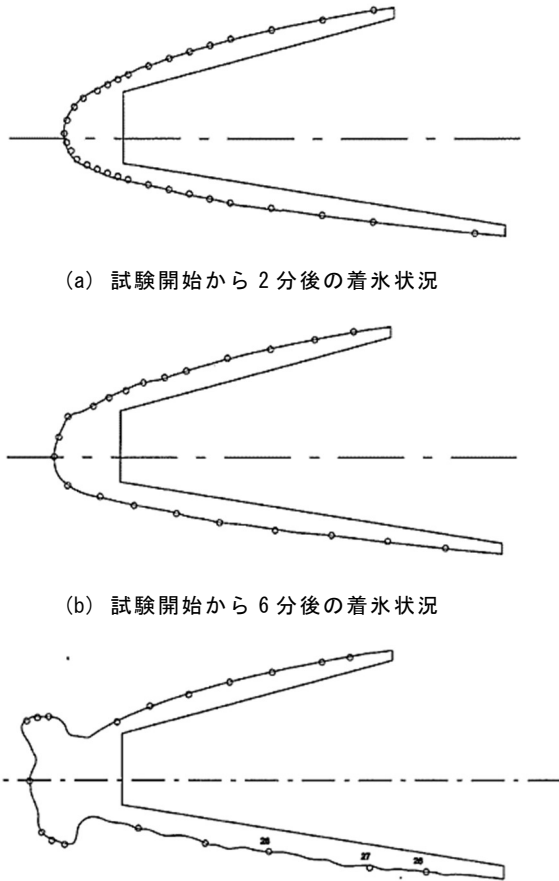
構造物やブレードに付いた氷が、付着し続ける期間。この期間では、氷は成長や減少はしない。

Ablation

構造物やブレードに付着した氷が、融解・昇華・脱落・浸食により取り除かれていく期間。

3.2 ブレードへの着氷

ブレードへの着氷状況について図-8 および図-9 のように風洞実験⁴⁾や現地調査⁵⁾によって調査されており、ブレードの前縁部に着氷することがわかっている。



(a) 試験開始から 2 分後の着氷状況
(b) 試験開始から 6 分後の着氷状況
(c) 試験開始から 22.5 分後の着氷状況
図-8 風洞実験によるブレードへの着氷と成長状況⁴⁾



図-9 ブレード/メットマストへの着氷/着雪状況とブレードより脱落した氷⁵⁾

構造物やブレードへの時間あたりの着氷量は、式(1)で示される³⁾。

$$\frac{dM}{dt} = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 wUA \quad (1)$$

ここで、

M : 着氷の質量

w : 気流中の単位体積あたりの水滴質量

U : 気流速度 (相対流入風速)

A : 気流に正対する投影面積

α_1 : 水滴の全衝突率

α_2 : 衝突した水滴が物体表面に残存する割合

α_3 : 残存した水滴が氷化する割合

上式より、着氷量は水滴が構造物やブレードに衝突することにより発生し、その頻度が多いほど、早くかつ大きく成長する。

3.3 着氷によるブレード性能への影響

(1) ブレード性能への影響量の規格による定義

3.2 節に示したように、ブレードに着氷した場合、その着氷分で見かけ上のブレードの断面形状が変化する。これによるブレード性能への影響について IEC (International Electrotechnical Commission)では、迎角が $-2^\circ \sim 14^\circ$ の範囲で、式(2)および(3)により算出される Penalty factor を揚力係数・抗力係数へ乗ずることで評価するよう記載されている²⁾。

$$C_{L-pen} = -0.0014 \cdot AoA^2 - 0.0017 \cdot AoA + 0.9509 \quad (2)$$

$$C_{D-pen} = 0.00191 \cdot AoA + 3.1151 \quad (3)$$

上式より、揚力係数の Penalty factor は、迎角が増えるにつれて二次関数的に増加し、抗力係数の Penalty factor は、迎角が増えるにつれて、一次関数的に減少する。

こちらで与えられる Penalty factor を NACA0025 の翼性能に適用した揚力係数および抗力係数を図-10、図-11 にそれぞれ示す。青線で元の二次元翼性能を、橙線で Penalty factor を適用した二次元翼性能を示す。

図-10 より、着氷時の揚力係数は非着氷時に比べて低くなり、迎角 8° 付近では約 15% 低下する。また、図-11 よりわかるように、着氷時の抗力係数は、非着氷時に比べて高くなり、迎角 8° 付近では約 3 倍になる。

(2) 解析によるブレードへの着氷影響評価⁶⁾

ブレードへの着氷による影響について、DTU (Technical University of Denmark) など、解析によっても評価されている。図-12、図-13 に解析時に使用された着氷翼型モデルを示す。黒線で翼表面を、赤線で着氷表面を示す。

図-12 は、Rime ice の状態で着氷した場合を想定して作成されたモデル (Case A) で、過冷却水滴が衝突し、即座に凍結するため、翼の前縁から伸びるように着氷が成

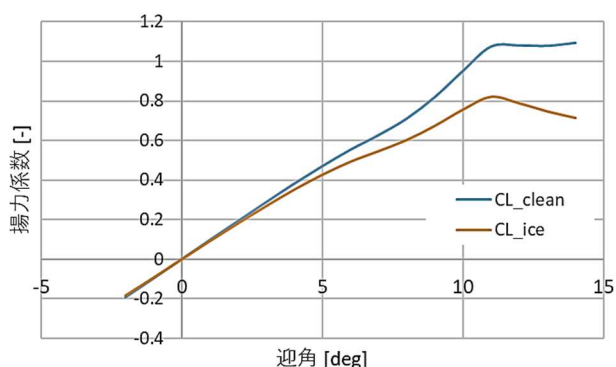


図-10 揚力係数

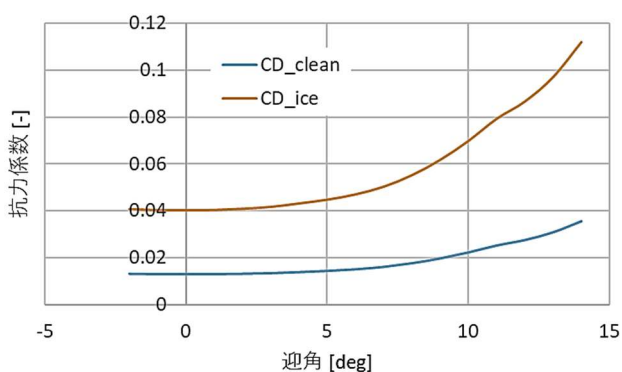
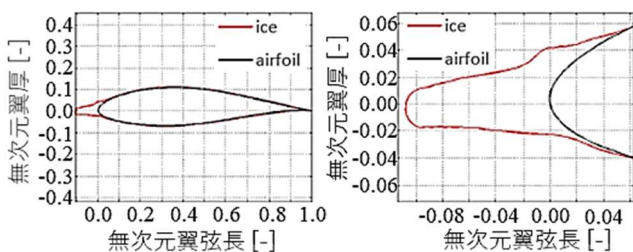
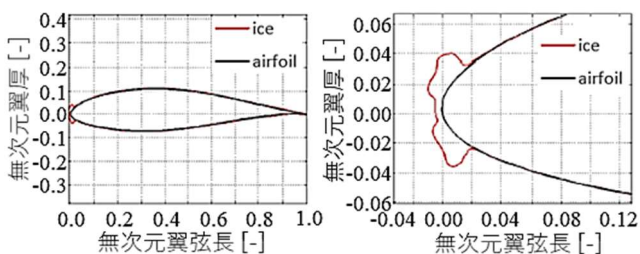


図-11 抗力係数



(a) 全体図 (b) 前縁部拡大図

図-12 着氷翼型モデル Case A



(a) 全体図 (b) 前縁部拡大図

図-13 着氷翼型モデル Case B

長している。図-13はGlaze iceの状態を着氷した場合を想定し作成されたモデル(Case B)で、衝突した際は水滴であり、表面を少し流れてから凍結する。そのため、中

心付近はあまり着氷が成長せず、上下に伸びるように着氷が成長している。

図-14, 図-15に非着氷時と着氷時の二次元翼断面性能比較を示す。ここで赤丸は、非着氷時、赤三角でCase Aの着氷時、赤四角でCase Bの着氷時の二次元翼断面性能を示す。

図-14より、着氷時の揚力係数は、非着氷時に比べ減少する。また、Rime iceを想定したCase AよりGlaze iceを想定したCase Bの方がより揚力係数が減少することがわかる。Case Aについて、低迎角では差が小さい。これは図-12よりわかるように着氷が前方に伸びているため、ある程度着氷面から翼表面へスムーズに気流が流れるためであると考えられる。また、高迎角で差が大きいことについて、高迎角時は気流が斜め方向よりブレードへ流入することから、着氷前面部で気流が剥離することから、非着氷時のものよりも剥離点が前縁部側へ移動するためであると考えられる。また、迎角16°付近で急激に揚力係数が減少するが、これは、前述の通り剥離点が前

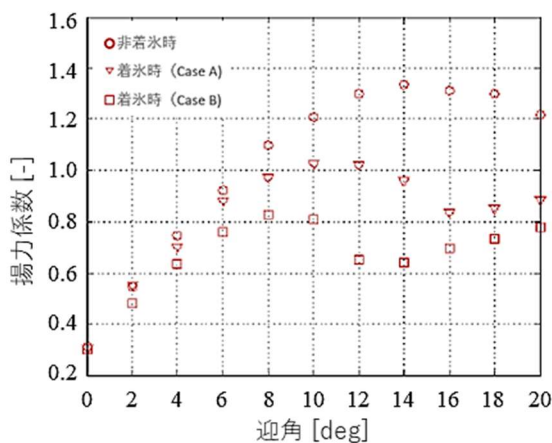


図-14 着氷時と非着氷時の揚力係数比較

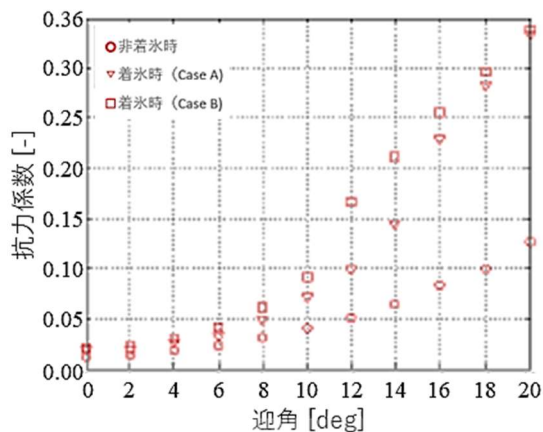


図-15 着氷時と非着氷時の抗力係数比較

縁側へ移動したことにより、完全剥離点が非着氷時よりも低迎角側へ移動し、このあたりで気流が剥離したためと考えられる。Case Bでは、Case Aより揚力係数の減少が顕著であるが、これは、図-13よりわかるように、着氷形状が上下方向にのびることにより、低迎角でも着氷端部で剥離した気流が途中で再付着するためと考えられる。また高迎角ではそれがさらに顕著となるため、Case Aよりも揚力係数が減少したと考えられる。

図-15より、着氷時の抗力係数は、非着氷時に比べ増加する。また、Case AよりCase Bの方がより抗力係数が増加することがわかる。Case Aにおいて低迎角範囲の抗力係数が増える原因として、着氷面がなだらかではないことから、細かい剥離が生じそれにより抗力係数が増加していると考えられる。迎角16°において、急激に抗力係数が増加しているが、この範囲は剥離に伴い、よどみ点が大きくなったためであると考えられる。Case Bでは、Case Aよりも抗力係数が大きくなっているが、これは、着氷が上下方向に伸びることにより、正面の投影面積が大きくなったことと、気流の突入角が大きくなったためと考えられる。

4. 製作誤差による影響

本章では風車ブレード製作時に生じる誤差が二次元翼断面性能へ与える影響について述べる。

4.1 ブレード製作について

風車ブレードの製作手順は、“型へのガラス繊維の積層”、“樹脂の注入・硬化”、“カップリング”、“ルート部機械加工”、“塗装”の手順が一般的である。この手順のうちカップリングの状況を図-16に示す。



図-16 カップリング状況

カップリングとは正圧面と負圧面をそれぞれの型で作成し、図-16のように型ごと反転し、それを接着する工程のことである。しかし、正圧面と負圧面を別々に製作して接着するため、その接着面で製作誤差が生じることがある。この製作誤差が二次元翼断面性能へ与える影響を調べるため、二次元翼断面解析ソフト xflr5⁷⁾を用いて対象となる翼断面の揚力係数および抗力係数を算出し、比較を行った。

4.2 解析対象翼断面

今回、ブレードの翼端部および翼中央部の2つの翼断面を解析対象とし次の(1)項～(3)項に示すように翼断面形状を変化させて比較を行った。いずれの条件においても、形状変化によって生じた段差は滑らかにすり合わせ、また、翼弦長が増減する場合には、形状を変化させずに拡大・縮小し、元と同じ翼弦長となるように調整した。本稿では翼端部にて解析を行った結果のみを示す。

(1) 前縁部の開きによる翼断面形状の変化

カップリング時には、前縁部および後縁部が接着面となるが、接着時に接着剤の量や気温等の気象環境により、前縁部と後縁部の厚み方向への誤差が生じる。この現象を再現するため、後縁部の接着面を中心とし、正圧側の翼表面を回転させ、厚みを増減させたモデルと、正圧側・負圧側の両方の翼表面を同量回転させ、厚みを変化させたモデルを作成し、解析を行った。増減量を定量化するため、解析断面の翼弦線長さの1/4分前縁より後縁側へ翼弦線上に移動した位置の厚さを基準とし、割合で増減させた。作成した解析モデルの模式図を図-17、図-18に示す。橙線で元の翼断面形状を、青線で変化後の翼断面形状を示す。

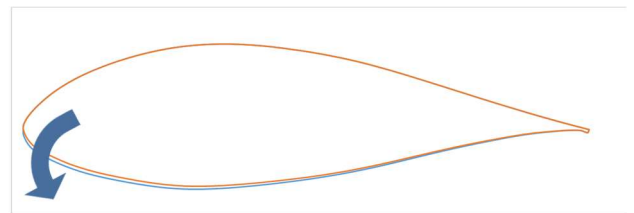


図-17 正圧側のみ回転による厚み変化モデル

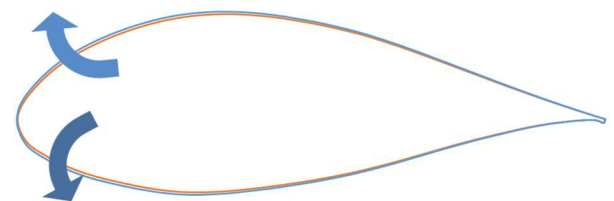


図-18 両側回転による厚み変化モデル

(2) 後縁側の開きによる断面変化

前項にて定義したものと逆に、後縁側の厚みの変化による断面変化について再現するため、前縁部の接着面を中心に、正圧側の翼表面を回転させ、厚みを増減させた。増減量については、後縁部の厚みを基準とし、割合で増減させた。作成した解析モデルの模式図を図-19に示す。

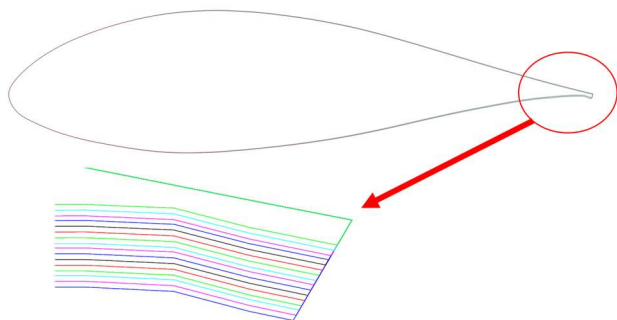


図-19 正圧側のみ回転による厚み変化モデル

(3) 正圧側・負圧側翼表面の前後方向へのずれによる断面変化

接着する際、正圧側・負圧側の翼表面が、規定の位置からずれた場合を想定し、正圧側の翼表面を基準に負圧側の翼表面前後にずらした場合と、負圧側の翼表面を基準に正圧側の翼表面を前後にずらした場合でモデルを作成し、比較を行った。作成した解析モデルの模式図を図-20に示す。青線で元の翼断面形状を、橙線で変化後の翼断面形状を示す。

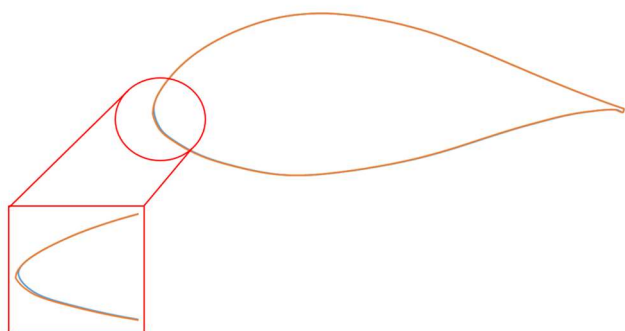


図-20 正圧側の前後方向のずれによる変化モデル

4.3 解析結果

(1) 前縁部の開きによる二次元翼断面性能への影響

4.2-(1)項で作成したモデルの解析結果を図-21～図-24に示す。青の実線で元の二次元翼断面性能を、他色の実線で前縁部が開く方向（プラス方向）に翼断面が変化した際の二次元翼断面性能を、破線で前縁部が閉じる方向（マイナス方向）に翼断面が変化した際の二次元翼

断面性能を示す。また変化量は、凡例に記載の割合分変化させた。

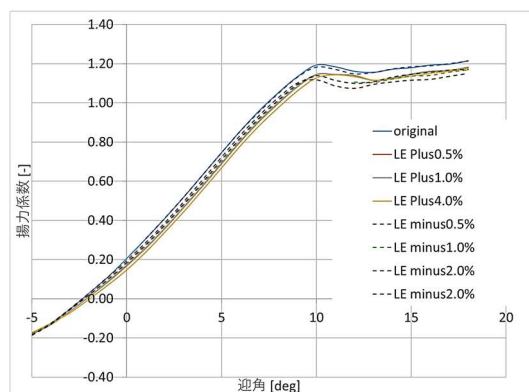


図-21 揚力係数比較（正圧側のみ回転）

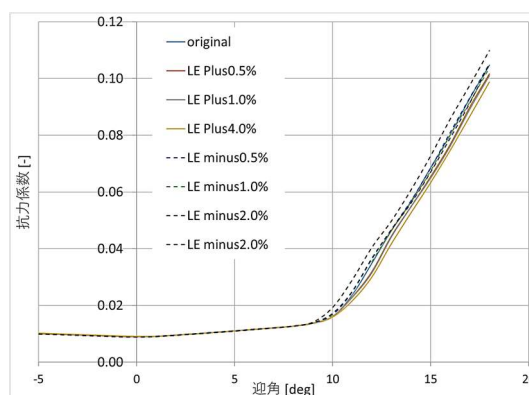


図-22 抗力係数比較（正圧側のみ回転）

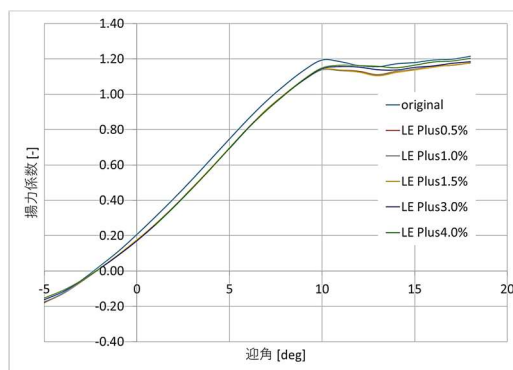


図-23 揚力係数比較（両側回転）

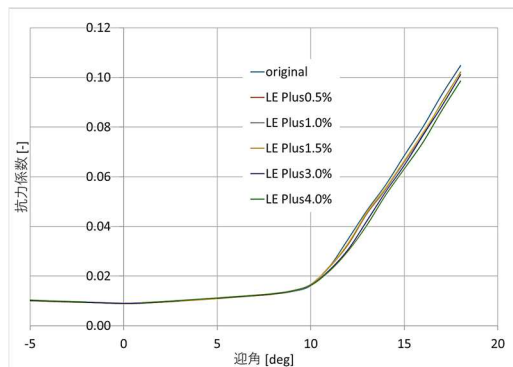


図-24 抗力係数比較（両側回転）

図-21, 図-22 より, 正圧側のみずれた場合, 揚力係数・抗力係数ともに, 翼厚が薄くなる方向の方が厚くなる方向に比べて影響が小さくなる。

図-23, 図-24 より, 両側へずれた場合, 揚力係数が低下するが, 厚さの違いによる差は小さい。抗力係数については, 1%程度の誤差では抗力係数が低下するが, 3%以上で抗力係数が増加する。

(2) 後縁部の開きによる二次元翼断面性能への影響

解析結果を, 図-25, 図-26 にそれぞれ示す。図-25 より揚力係数は, 迎角付近では後縁部の厚みが厚くなるほど揚力係数は大きくなり, 最適迎角付近から高迎角側では厚みが厚いほど揚力係数が小さくなる傾向が見られた。図-26 より抗力係数は, 最適迎角付近で, 厚みが厚くなるほど抗力係数が大きくなる傾向がみられた。

青の破線で元の二次元翼断面性能を, 他色の破線で後縁部が閉じる方向 (マイナス方向) に翼断面が変化した際の翼断面性能を, 実線で後縁部が開く方向 (プラス方向) に翼断面が変化した際の二次元翼断面性能を示す。また, 変化量は凡例に記載の割合分変化させた。

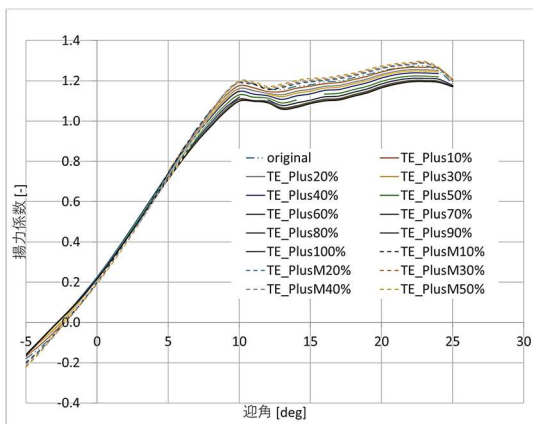


図-25 揚力係数比較

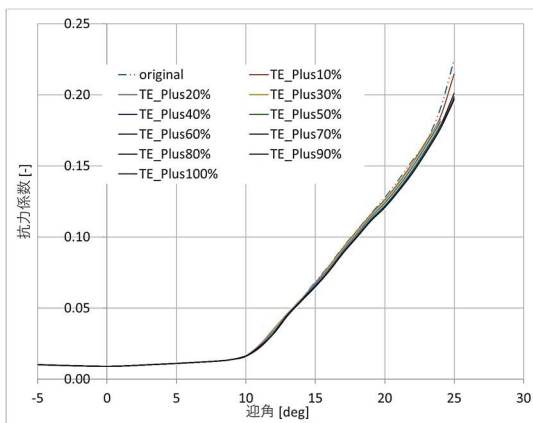


図-26 抗力係数比較

(3) 正圧側・負圧側翼表面の前後方向へのずれによる断面変化

正圧側翼表面基準で負圧側翼表面をずらした解析結果を図-27, 図-28 に, 負圧側翼表面を基準に正圧側翼表面をずらした解析結果を図-29, 図-30 にそれぞれ示す。青の破線で元の二次元翼断面性能を, 他色の破線で後縁方向 (マイナス方向) に翼断面が変化した際の二次元翼断面性能を, 実線で前縁方向 (プラス方向) へ翼断面が変化した際の二次元翼断面性能を示す。また, 変化量は凡例に記載の割合分変化させた。

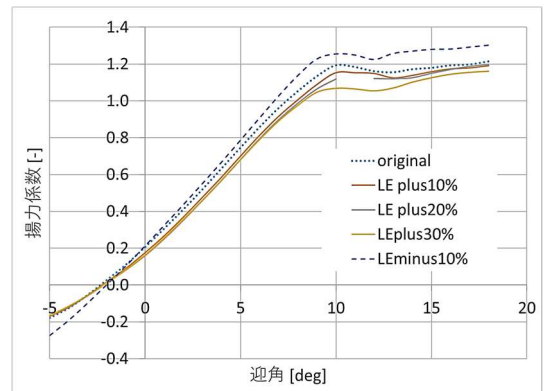


図-27 揚力係数比較 (正圧側翼表面基準)

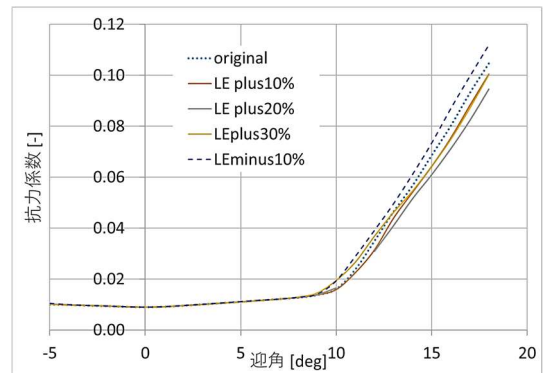


図-28 抗力係数比較 (正圧側翼表面基準)

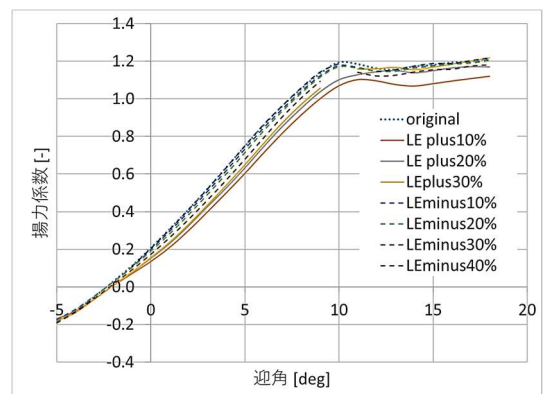


図-29 揚力係数比較 (負圧側翼表面基準)

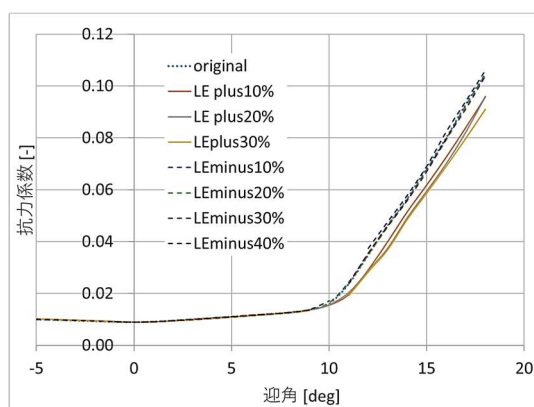


図-30 抗力係数比較（負圧側翼表面基準）

図-27, 図-28 により, 揚力係数は, 負圧側翼表面が後縁側はずれた場合に低下し, 前縁側へずれた場合には増加する. 抗力係数は, 負圧側翼表面が後縁側へずれた場合に低下し, 前縁側へずれた場合には増加する. 図-29, 図-30 より, 揚力係数は正圧側翼表面が前縁側・後縁側どちらにずれた場合でも, 元の翼型よりも低下する. また, 後縁側へずれた方が前縁側へずれた場合より揚力係数の低下量は大きくなる.

5. おわりに

本稿では風車ブレードへの着氷と風車ブレード製作誤差により翼断面形状が変化した場合の二次元翼断面性能への影響について示した.

風車ブレード着氷に伴う変化は, 着氷形状により傾向は異なるものの, 揚力係数・抗力係数ともに影響を与える. この状態で運転される風車は, 通常運転で想定されている状態とは異なる荷重状態で運転されることになるため, 耐用年数の低下等の問題が生じると考えられ, 今後対策を検討していく必要がある.

製作誤差に伴う, 二次元翼断面性能への影響を製作公差以上にずれているモデルも含めて調査した. 通常, 製造検査を通ったブレードでここまで影響のするものは考えられない. しかしながら, 数ミリ程度の誤差でも十分に二次元翼断面性能へ影響を与えるため, 製作時の誤差については十分に留意が必要である.

参考文献

- 1) IEA Wind Task 19 Available Technologies of Wind Energy in Cold Climates, July 2016.
- 2) IEC 61400-1 Ed.4 (2017)
- 3) 木村茂雄 (神奈川工科大学): 風力発電における着氷の影響と対策: 日本ガスタービン学会誌 Vol.40 No.2 2012.3

- 4) Harold E. Addy, Jr. (NASA): Ice Accretions and Icing Effects for Modern Airfoils, NASA TP -2000-210031, April 2000.
- 5) Wadham-Gagnon, M: Ice profile Classification Based on ISO12494. TechnoCentre éolien (Wind Energy Techno Centre). Winter wind 2013.
- 6) Jens Nørkær Sørensen (DTU): Kenneth Thomsen (Siemens Wind Power): CFD Simulations of an Airfoil With Leading Edge Ice Accretion, Kasper Mortensen S021998: August 2008
- 7) xflr5: <http://www.xflr5.tech/xflr5.htm>