

風車の翼型と最近のブレード技術

前田 太佳夫 (三重大学), 木村 學 (ジー エイチ クラフト)

1. はじめに

風車ブレードは、発電量を大きくするための空力性能と、設計寿命を全うできるような構造強度のバランスのもとに設計される。

ブレードの空力性能を決める翼型は、揚力、抗力、モーメント係数などの特性に加えて、ブレードの製造誤差や運転中に付着する汚れなどの影響も考慮して開発される。繊維強化樹脂複合材で製作される風車ブレードは、樹脂硬化時の変形に起因する製造誤差がある程度は容認しなくてはならない。また、屋外で運転される風車ブレードは、空力性能に大きな影響を及ぼす前縁部において汚れの付着は避けられない。そのため、ブレードの形状に誤差が生じたり、前縁に汚れが付着しても、ブレードの性能が変化しにくい翼型の開発が行われている。

一方、長大化する風車ブレードは、構造・製造・輸送についても課題があり、ブレードの設計・製造においては、風車性能に対するコストの比を低減させるような技術が必要となる。

本稿では、はじめに風車の翼型設計について概説し、次に風車ブレードの最近の技術について紹介する。

2. 風車の翼型

風車ブレードの空力設計は、半径方向の各断面における流入風速と周速度による速度三角形をもとに誘導速度を考慮して最適迎角を求め、スパン方向へのねじりやテーパを決める。各断面における流体力をブレード全体に加算すればブレード全体に作用する流体力が計算でき、これにブレード先端や根元における損失補正を加えて最終的なブレードの性能を決定する。そのため、各断面における翼型の特性がブレードの性能を決める際に重要となる。

一般に空力の視点からは、風車の翼型として次の条件を満たすことが望ましい。

- (1) 揚力係数が大きい
 - (2) 抗力係数が小さい
 - (3) 揚抗比が大きい
- (3)の条件をよりよく達成するためには、零揚力角と最小抗力角との差が小さい、という条件も加えられる。

2.1 NREL 翼型

米国・再生可能エネルギー研究所 (National

Renewable Energy Laboratory) によって開発された翼型である¹⁾。NREL の前身の太陽エネルギー研究所 (Solar Energy Research Institute) の頃に多くの翼型が開発されたため、従来はSERI 翼型と呼ばれた。

NREL 翼型は Eppler 翼解析コードによって開発されている。欧州製風車は大形化の一途をたどってきたが、米国では小形風車の導入も活発であるため、NREL 翼型の設計指針は、様々な長さの翼に対応できるような翼型系列を構築することである。NREL 翼型は前縁の粗さに対して最大揚力係数の挙動が鈍感であるように設計されている。また、NREL 翼型系列内の翼型の組合せにより、失速制御、ピッチ制御、可変速制御の風車に対応できるようになっている。

失速制御風車に対しては、失速点近傍のピーク出力を抑えるために、ブレード先端付近に用いる翼型としては最大揚力係数を抑えた翼型となっている。最大揚力係数が抑えられることにより、与えられた発電機容量に対して、より掃過面積の大きなブレードを用いることができる。つまり起動特性が良くなる。また、失速制御風車と可変速制御風車に対しては、高い揚力係数の翼型をブレード先端付近に用いることにより、ブレード全体としてのソリディティを低く抑えることができる。つまりコストを低く抑えることができる。

また、厚い翼型はブレードの剛性を高くし、タワーとブレードとの離隔を保つことができるのでアップウィンド風車に適しており、一方、薄い翼型は抗力を低減し、ダウンウィンド風車に適している。

NREL 翼型系列を用いると年間発電量が、失速制御風車では23~35%、ピッチ制御風車では8~20%、可変速風車では8~10%の向上が試算されている。

2.2 Risø 翼型

デンマーク・リソ国立研究所 (現在はデンマーク工科大学に吸収) によって開発された翼型である²⁾。翼型の設計には、二次元翼形設計・解析ツールXFoil, Epplerコードおよびリソ国立研究所が開発したEllipsys-2Dコードが使われている。この系列に属する様々な翼厚比の翼型は、厚さが異なる翼型をブレードのスパン方向に配列しても1本のブレードとして翼表面が滑らかにつながるように設計されている。また、前縁における汚れに対する鈍感さ、設計点を外れた運転における揚力係数、失速後の最大揚力係数、空力騒音なども配

慮されている。

Riso-A1 翼型系列は、翼厚比 15%~30%程度の翼型で構成されている。この翼型系列は、定格出力 600kW 以上の風車のために開発され、定速運転される失速制御風車またはピッチ制御風車を対象としている。

Riso-P 翼型系列は、翼厚比 15, 18, 21, 24%の 4 種類で構成される。この翼型系列は、定格出力 1MW 以上の風車のために開発され、定速運転または可変速運転されるピッチ制御風車を対象としている。

Riso-B1 翼型系列は、翼厚比 15~36%の翼型で構成されている。この翼型系列は、定格出力 1MW 以上でソリディティの小さいフレキシブルブレードのために開発され、可変速ピッチ制御風車を対象としている。これは大形化する洋上風車向けに開発された翼型であり、ソリディティが小さいと翼弦長が小さくなるためにブレードの重量は軽減されてコストを低減できる。一方で、剛性が小さくなるためブレードのたわみが課題となり、材料や構造も同時に解決する必要がある。

2.3 DU 翼型

オランダ・デルフト工科大学によって開発された翼型である³⁾。デルフト工科大学ではXFOILの計算スキームを用いつつ、風車の回転が翼型性能に及ぼす影響として、失速領域での三次元効果を計算機能に追加したRFOILというコードを用いている。

風車の翼型を設計する際には、矛盾する様々な要求の間でトレードオフがあるが、高い揚抗比などは一般に望まれる傾向にある。そのため、DU 翼は、高い揚抗比を保ちながら、翼前縁部の汚れや製造誤差などが翼型特性の敏感さに及ぼす影響を可能な限り低減するように開発されている。これを実現するため、迎角が高くなり失速が近づきつつあるときに翼前縁付近で流れが乱流遷移するように設計されている。

3. 最近のブレード技術

ブレードの課題は、何よりも年間総発電量 (AEP: Annual Energy Production) を大きくするか、である。ここ数年の風車ブレード専門会議 (Wind Turbine Blade Manufacture International Conference) と複合材シンポジウムなどでの発表をもとにその一端を紹介する。

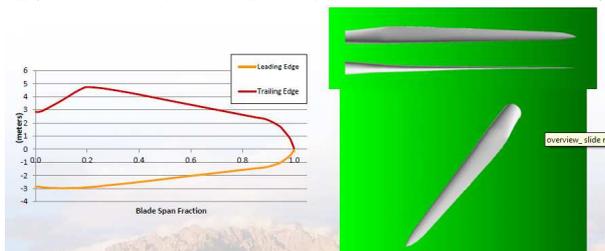


図1 SNL100 ブレードモデルの形状⁴⁾

紹介する。

3.1 洋上用大形 100m ブレード開発: 米国・サンディア国立研究所⁴⁾

6~7 MW 級風車ブレードのフィールドでのテストが行われているが、風車先進諸国の各研究所は認証取得可能な長さ 100 m 超えブレードの開発を進めている。技術要求は、コスト/性能である。空力と構造の戦い、長大化に伴う出力/重量の 2 乗 3 乗則との戦いである。「軽く、細く、長く」をどのように構造・材料・プロセスで実現するか、緻細にして革新的な挑戦を各社が競っている。具体的にはブレードの最大翼弦長を短くし、翼根元径を大きくする。ちなみにサンディア国立研究所の長さ 100 m の SNL100 ブレードモデル (13.2 MW 風車用) は翼根元径 6 m、最大翼弦長 8 m である。大形航空機主翼・胴体に炭素繊維主体の複合材料を用いることが今日一般化しているが、風車においてはコストが問題で、10 年以上先でも採用できない状態と考えられている。現実的に調達可能なグラスファイバー (GF) とエポキシ樹脂を用い、カーボンファイバー (CF) を用いないで成立するよう緻細な構造設計と VaRTM (真空樹脂含浸製造法) 成形可能なプロセスと既存設備で工夫する道を選択している。

カーボン設計研究 (Carbon Design Studies)

イニシャルケーススタディで全 GFRP ブレードに対して、スパーキャップを全 CFRP 一方向材 (UD)、さらに後縁を CFRP 一方向材 (UD) で翼端たわみを同等の条件で比較検討を行い、その結果、最大たわみモード疲労寿命で GFRP モデルが 100 年に対して、CFRP スパーのモデルは 28 年と想像より短い。また質量は GFRP モデルが 118 トンに対し、CFRP モデルは 20~25 トン低減する。CFRP が占める重量は 8.6 トンで、この費用が大きい。この SNL100 ブレードモデルの現時点での結論では、近未来におけるコストと性能のトレードオフで革新的低コスト CF の供給が実現するまでは全 GF を選択すると述べている。

3.2 複合材の材料 (強化繊維, マトリックス樹脂, コア材など)

航空機の複合材は擬似等方性繊維配交を基本としており、その理由は機体形状と荷重伝達などが複雑であ

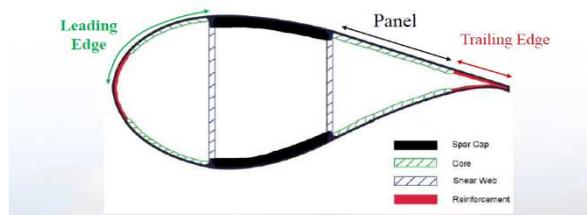


図2 SNL100 ブレードモデルの断面構成⁴⁾

ること、部分・要素ごとに積層構成を変更すると開発初期に行う認証材料試験が膨大になることなどがあり、スパー・シアウェブ・フレーム・ストリンガーなど同一の材料積層構成を用いている。風車ブレードではスパーキャップは100%一方向材(UD)、シアウェブは±45度材(面内せん断方向)100%、前縁・後縁の補強などもUD、翼のシェルは±45度材でねじり方向対応など、最も効果的な繊維配交設計を徹底することを行い、最軽量化を図っている。

LM社によると、6MW級ブレードで1トン質量低減した時の効果はAEPで10%増加すると言う。ちなみに同社は、10%のローターサイズ革新は+12%AEP、翼端速度と騒音革新で+20%AEPなど、とのことである。

強化繊維：CF/GF

航空機においてCF材の適用が進んでいるが、風車ブレードにおいてCFの適用には各社ともどちらかと言えば否定的である。理由の最大はコストである。また仮にコストが下がってもCF特有のリスクが多々ある。

小形航空機ではGF/CFRPで十分成立し、すでに永い実績がある。大形航空機では2乗3乗則により、弾性率・強度・密度などからCFRPの特性を最大限生かすことが効果的と考えられ採用が進んだが、その弾性率の高さがより精密な繊維配交と工作の再現性を要求し、高い信頼性を実現するために高精度な自動装置化が必須となっている。CFはその弾性率の高さゆえにわずかな繊維配交の不均一やヨレやリンクル(しわ)から応力集中が発生し破壊基点となり疲労寿命の予測が困難となる。そのため不安定な労働集約作業から脱却する自動装置化を先進各国は約20年前から膨大な研究開発投資を行い、今日に至っている。

一方、風車ブレードは、コストとの戦いがありグローバルな低コスト労働者に依存する道を選び自動装置化はほんの一部限定的に行われたに過ぎない。その理由は複合材成形現場が舟艇などの延長線上にある歴史的

な背景もあるが、形状と荷重伝達が航空機に比較してシンプルであり、GFの適度な弾性変形が応力を各繊維に分散し、応力集中を回避することでロバスト性を確保できている、なども大きな要素である。実際GFUD材のスパーキャップをCFUD材に置き換えただけでは設計強度を発現しない。その理由はCF繊維が少しでも不均一な積層だと圧縮荷重負荷時に部分的に応力集中部が破壊伝播してしまう。その対策・プロセス・装置化が必要になる。

多くの実績があるGF繊維配交設計で今日の大形ブレードが成立している。洋上風車用長大ブレードは高効率を求めるほど構造的にハイリスクを負うのが現状である。

3.3 ブレード分割・締結例：ガメサ社：“Innoblade”⁵⁾ (2012年 Innovation Award 受賞)⁵⁾

5MW級64mブレードを中央で2分割し、なおかつ質量40%の低減を達成した。この革新ブレードは、低騒音翼型、分割部ボルト締結構造、引き抜き材/プリプレグ材プロセス(Pultrusion & Prepreg Process)、自動積層装置採用などで達成している。そのPultrusion材はスパーキャップに用いられている。その理由はファイバーに張力を負荷した状態でダイス内にて加熱硬化させることで圧縮強度が一般的VaRTM一方向材の1.8倍となる効果を用いている。繊維強化樹脂複合材は引張時繊維が支えることで強い。圧縮は母材となるマトリックス樹脂が多くを負担するため引張強度の60~70%程度が実力値であるが、Pultrusion材を併用成形することで大幅な質量低減を達成している。また巧みな鋼材を用いたジョイント部を設け、現場でボルト締結できる構造で40%質量の低減は秀逸である。このメーカーはファイバーと樹脂を原料により近い形で自動積層する装置化が世界で最も進んでいる。

3.4 Advanced Manufacturing Initiative (AMI) Blade of Wind Turbine：TPI社(米国エネルギー省・初期風力発電プログラムの紹介)⁶⁾

目的：労働生産性35%向上、生産サイクル時間35%縮

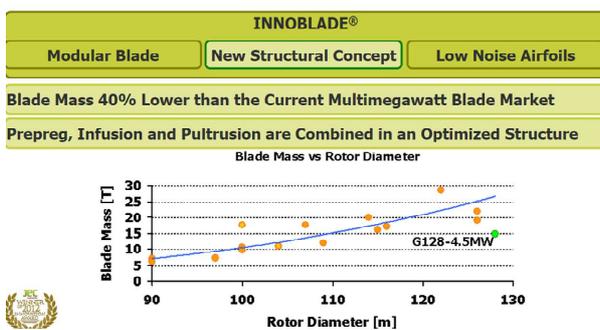


図3 INNobladeの構造コンセプト⁵⁾

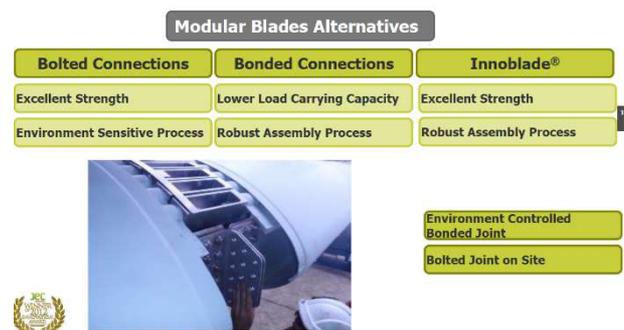


図4 INNobladeのブレード分割・締結技術⁵⁾

小、品質を向上させメンテナンス費大幅削減。
 手段：生産工場モデルの最適化、最新非破壊検査システム導入、先進的自動生産システム（装置化の推進、複合材成形から仕上げプロセス最適化）。
 期間：3年間、米国エネルギー省／アイオワ州政府／TPI社、各1／3負担プロジェクト。

発表時点の第一段階で労働生産性 36.8%達成の見込みを確認している。TPI社は労働集約型生産で大きな実績を持っているが、ブレードの大形化はコストと共に大幅な品質・信頼性が最も重要であることから現在調達可能な技術・装置を工夫している。航空機が採用した自動装置システム化は大きな設備投資を要するが、新たに専用装置を開発するか、熟考を要している。

大形航空機業界は大規模なガントリー型ロボットを採用してきたが、近年EUではアーム型多関節ロボットを複数組み合わせることで複雑な運動・機能を実現する手法を進めており、米国も最近この方向にシフトしている。これら多関節汎用ロボットシステムはEUのKUKA社がリードしている。その制御の3次元空間認識手法が日本のロボットと異なり複雑な複合材積層と工作のプログラムに特徴があるとされている。日本は世界で最も工業用ロボットでリードしているが、この分野では残念ながらかなり遅れている。

3.5 その他のブレード技術

風車ブレードは複合材技術で成立する今日唯一の大形部材であるが、材料が成形工程で完成することから一般工業材料と異なり難しい。性能品質が素材より成形プロセスに依存する割合が最も大きいことがその理由である。前述のように航空機先進各国・各社はそのため膨大な自動装置化の導入を行った。さらに大きな投資が品質確認の非破壊検査自動装置である。ハードは比較的簡単だが、得られた膨大なデータをどのように処理し、判断し、管理するか？これが生産作業と並ぶほどの工数を要しているのが現状である。風車ブレード生産において非破壊検査の課題は製品のサイズもあるが、航空機のCFRPより、風車のGFRPの

超音波探傷は難しい。GFはCFに比べて弾性率が低く減衰するので、これまで厚肉材や接着構造部の断面観察が困難であったが、機器メーカーとユーザー技術者の協力で実用できるところまで来たようである。

着氷や前縁のレインエロージョン表面処理、落雷対策なども含めてまたの機会の報告とする。

4. まとめ

日本風力エネルギー学会から「風力エネルギーハンドブック」を出版するにあたり、本稿ではハンドブックで触れていない翼型設計コンセプトの詳細や、具体的な最近のブレード技術について紹介した。風車ブレードの設計は、年間発電量を大きくするための空力性能と、これとトレードオフにある構造強度を両立することが要求される。また、材料や設計・製造プロセスの改革も進められているが未だ開発途中の課題が多い。ブレードの高性能化や信頼性向上についてはますます研究開発が必要と言える。

参考文献

- 1) 例えば, Tangler, J.L., Somers, D. M., NREL Airfoil Families for HAWTs, Report of National Renewable Energy Laboratory, NREL TP-442-7109 (1995), 1.
- 2) 例えば, Fuglsang, P., Bak, C., Development of the Risø Wind Turbine Airfoils, Wind Energy, Vol.7 (2004), 145.
- 3) 例えば, Timmer, W.A., van Rooij, R.P.J.O.M., Summary of the Delft University Wind Turbine Dedicated Airfoils, Journal of Solar Energy Engineering Trans. ASME, Vol. 125 (2003), 488.
- 4) Griffith, D.T., Large rotor development: 100-meter blade research, Proc. Wind Turbine Blade Manufacture 2012 (2012).
- 5) Sanz, J., Advanced joint system for modular blades, Proc. Wind Turbine Blade Manufacture 2013 (2013).
- 6) Wells, D., Integrating Ultrasonic Cutting with High-Accuracy Robotic Automatic Fiber Placement for Production Flexibility, Proc. Society for the Advancement of Material and Process Engineering (SAMPE) Annual Conference and Exhibition 2014 (2014).



図5 スパーキャップの自動生産システム⁶⁾



図6 多関節ロボットによる複合材積層⁶⁾