

令和元年度
卒業研究論文

中型商用風車の空力弾性
シミュレーションモデルの開発

1610950027 松本 秀一

近畿大学工学部機械工学科
流体エネルギー研究室

本研究で用いる記号

λ	:周速比[-]
C_P	:パワー係数[-]
C_T	:推力係数[-]
C_L	:揚力係数[-]
C_D	:抗力係数[-]
Re	:レイノルズ数[-]
AoA	:迎角[°]
a	:誘導係数[-]
a'	:角誘導係数[-]
ρ	:空気密度[kg/m ³]
r	:任意の位置でのブレード半径[m]
b	:微小翼型幅[m]
dT	:微小推力[N]
dQ	:微小トルク[N*m]
U_{rel}	:相対風速[m/s]
c	:コード長[m]
dF_L	:微小揚力[N]
dF_D	:微小抗力[N]
φ	:ねじれ角[°]
dF_N	:微小推力[N]
dF_T	:微小のブレード回転方向に働く力[N]
B	:ブレードの枚数

目次

第1章 緒言

1.1 風力発電のシミュレーションの現状	1
1.2 風車の空力弾性シミュレーション	2
1.3 研究の目的	4

第2章 解析手法

2.1 解析ツール	5
2.1.1 QBlade	5
2.1.2 BEM Turbine	6
2.2 解析モデル	7
2.3 解析方法	7
2.3.1 翼型の性能解析	7
2.3.2 ブレードの基本設計	7

第3章 結果及び考察

3.1 翼型データの抽出と解析	10
3.2 翼素運動量理論の概要	15
3.3 ブレードパラメータの算出	18
3.4 ロータの性能評価	21
3.5 OpenFAST モデルの作成	23

第4章 結言

25

参考文献

27

第1章 緒言

風力は昔から人力、動物の力、水力、と並んで動力源として利用されてきた。現在では、自然エネルギーから人々の活動に必要な電気エネルギーに変換する発電方法の一つとして利用されている。世界的な傾向として、再生可能エネルギーの発電割合の拡大及び再生可能エネルギーの電力価格の低下を目的に、イギリス、ドイツ、アメリカ、中国など各国政府が風力発電の建設に投資を行い、急激に建造が進んでいる¹⁾。とりわけ洋上風車の建造数は、2020年から一気に増加すると思われる。洋上では陸上と比較し、風車の設置場所の範囲を広く確保でき、風を乱す障害物も存在しないため、比較的一定の風速が得られる。また、大型風車の建造がしやすく風車の大型化により発電量を増すという観点から、洋上風車の建設メリットは大きい。図 1.1 に現在、世界で一番大きい洋上風力発電所である Walney Extension の写真を示す。この風力発電所はイギリスの洋上にあり、定格出力 8 MW の 87 基の風車がある。Walney Extension は最大で 659 MW の発電を行う。これは 600,000 世帯分の電力である。ヨーロッパではこのサイズの洋上風力発電所は他の場所でも建設中である。



図 1.1 イギリスの Walney Extension 洋上風力発電所²⁾

1.1 風力発電のシミュレーションの現状

どの分野においてもコンピュータを使用した数値解析は、なくてはならない重要なツールである。流体力学の分野では、数値流体力学(CFD: Computational Fluid Dynamics)が非常に多くの場面で活躍している。風車(Wind Turbine)における CFD を活用した研究を例あげる。1つ目は、“南大隅 WF 風車ナセルカバー飛散・損傷事故の再発防止に向けた強度対策検討³⁾”

である。2016年9月19日～20日に鹿児島県大隅半島を直撃した台風により、大隅WFナセルカバーが飛散、損傷事故を起こした。この再発防止の検討を行う際に、CFDを用いている。事故当時の風速からナセルにかかる風圧荷重をCFDで解析し、算出を行っていた。これによりナセルの強化対策がなされた³⁾。2つ目は、“風力発電所における交流干渉と発電量損失に関する数値的検討⁴⁾”である。上示のように近年、陸上での大型風車の設置場所の限界もあり、設置場所も広く得られる海洋で、複数の超MW級の浮遊式風車による大規模風力発電所が建造されている。その際問題になるのが、互いに生み出す後流干渉によるエネルギー損失である。複数の風車同士による流れの干渉をCFDにより再現し、電力損失がどのくらいかシミュレーションを行っていた⁴⁾。3つ目は、“マルチロータ風力発電システムの空力弾性解析ツールの開発⁵⁾”である。複数のマルチロータを組み合わせる発電システムの軽量化及びコストダウンを目指し、ロータを支える支持構造に着目し解析を行っていた。そのために運動量理論とモーダル法を組み合わせ、この発電システム専用のシミュレーションツールを開発し、算出を行っていた⁵⁾。

以上は数多くある研究論文の中から一部を抜粋したものであるが、CFDは様々な使い方をされているのが分かる。本研究では、こうしたCFDではなく、初期の運動量理論をベースにした空力弾性シミュレーションで解析を行い、得られたデータをCFD等でシミュレーションを行う際に、反映させてゆく方法で研究を進めてゆく。

1.2 風車の空力弾性シミュレーション

風車は火力発電や原子力発電に比べて、発電量や装置の破損等を設置環境に大きく左右されやすく、発電量も不安であるというデメリットが存在する。また、発電量を増加させるために大型化が進んでいる。図1.2にHaliade-X 12MW wind turbine⁶⁾を示す。ゼネラル・エレクトリック(GE: General Electric Company)が建造している最大の大型風車である。最大発電量12MW、ロータ直径220m、タワー高さ260mと非常に大きな構造物である。運転を行っていく中で、支柱、シャフト、ブレード、発電機等の各パーツに負荷される疲労荷重とそうした負荷に対する耐久性能、それらを加味した上でいかに発電効率を落とさないようにするなど様々な制約の中、設計を行うは非常に大変である。

このような制約の中、様々な環境下に曝された状態でも発電効率の向上、疲労荷重の低下を目指すべく、渦発生器、プラズマアクチュエータ等をロータに組み込み、その効果を検証する研究がなされている。しかしながら、これら実験装置の原理を解析するソフト、解析用の中型商業用風車モデル、そして、これらを統合的に解析し検証を行うソフトは今現在存在していない。このようなソフトを作るため、空力弾性シミュレーションツールであるOpenFAST⁷⁾をベースに開発してゆこうと考えている。OpenFASTはアメリカの国立再生可能エネルギー研究所(NREL)が開発したツールで風力の研究機関、大学や風力発電関連の企業では幅広く利用されている。OpneFASTの概要を図1.3に示す。手始めに実際の中型商用風車と特性が類似したシミュレーションモデルを構築し、OpenFASTで使用できるように必要がある。なお、この風車ではプラズマアクチュエータによる剝離制御の研究が行われている。

12 MW capacity

220-meter rotor

107-meter long blades

260 meters high

67 GWh gross AEP

63% capacity factor

38,000 m² swept area

Wind Class IEC: IB

Generates **double the energy as previous GE Haliade model**

Generates almost **45% more energy** than most powerful wind turbine available on the market today

Will generate enough clean power for up to **16,000** European households per turbine, and up to **1 million** European households in a 750 MW configuration windfarm

HALIADÉ-X 12 MW

GE Renewable Energy is developing **Haliade-X 12 MW**, the biggest offshore wind turbine in the world, with **220-meter rotor**, **107-meter blade**, leading capacity factor (**63%**), and **digital capabilities**, that will help our customers find success in an increasingly competitive environment.

1063 ft 324 m

855 ft 260 m

1046 ft 319 m

Eiffel Tower Haliade-X 12 MW Chrysler Building

図 1.2 Haliade-X 12MW wind turbine⁶⁾

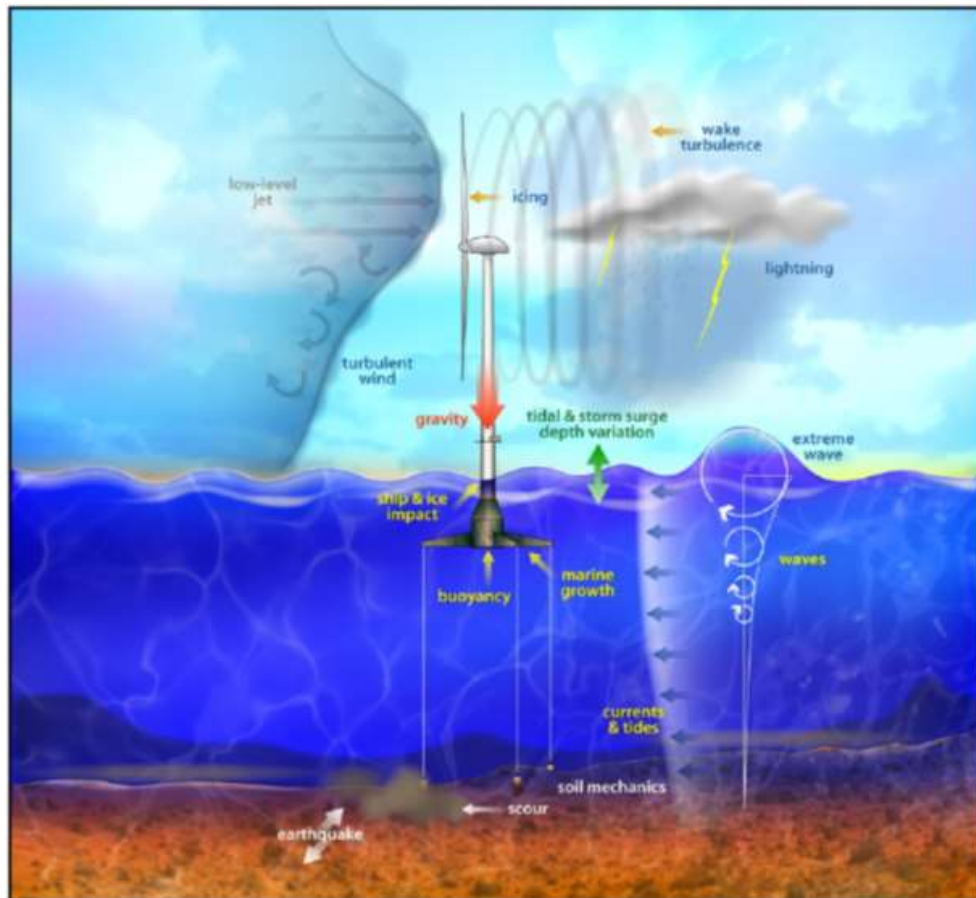


図 1.3 OpenFAST の概要⁷⁾

1.3 研究の目的

空力弾性シミュレーションモデル OpenFAST で研究用の中型商用風車に搭載されているプラズマアクチュエータが稼働している際に, 空力的観点からどのような現象が発生しているのか, また, 装置が風車に及ぼす効果を検証する. 検証するために必要な中型商用風車と性能特性が類似した解析用モデルを構築することが本研究の目的である.

- 1) 翼型データからの数値抽出と解析による性能比較
- 2) ブレードの基本的なパラメータの算出
- 3) ロータの性能特性の評価
- 4) OpenFAST で使用する中型商用風車の解析用モデルの構築

第 2 章 解析手法

本章では研究で用いる解析ツール及び解析手法について説明する. 最初に解析ソフトの機能や使用目的を説明する. その後後対象となるモデルについて述べ, 解析手順を示す.

2.1 解析ツール

2.1.1 QBlade

風車に使用する翼型の解析から揚力及び抗力を算出するために QBlade⁸⁾ というソフトを使用する. 図 2.1 に QBlade のシステム構成を示す. また, 図 2.2 に QBlade の解析環境を示す. QBlade は, 翼型の形状設計, 性能解析を行うモジュール, 全方位角に対する翼型性能解析を行うモジュール, 空力及び構造力学を反映しブレード設計を行うモジュール, 風況環境, 構造にかかる負荷及び変位, 翼素運動量理論(BEM)の解析を行う各モジュールで構成されており, これらが同じ開発環境下で行うことができる. 渦運動について考えられた循環 Γ をベースに構築された渦理論に基づき, コード化された解析ソフトである. 渦格子法, パネル法, 揚力線理論を用いて, 翼型やブレードの性能特性, 後流の時間変化に伴う推移を統合的に解析するソフトである. なお, 解析で扱われる流体は, 非粘性, 非圧縮, 渦流れなしと仮定されている. また, 渦要素は直線, 曲線の環状区分として構成されている. このソフトで解析するにあたり, 低いレイノルズ数(Re)での解析精度はあまり高くないのを考慮する必要がある. また, 翼素運動量理論(BEM: Blade Element Momentum)を利用したロータ設計を行うモジュールが実装されていないため, 後で説明する BEM Turbine というインハウスのコードを使用する.

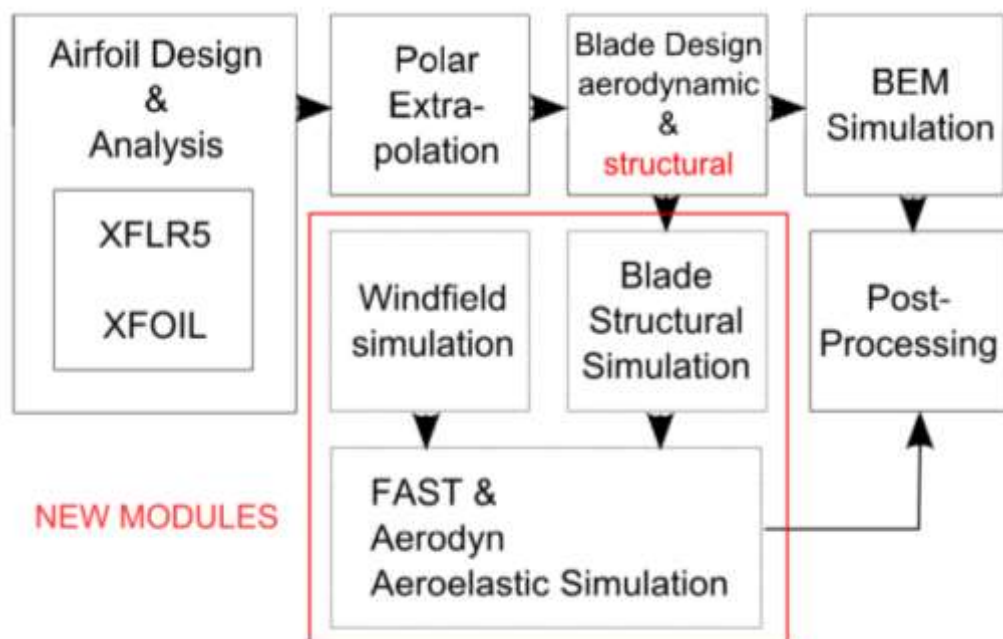


図 2.1 QBlade のシステム構成⁸⁾



Click on the Airfoil Design Module in the Toolbar to Start



図 2.2 QBlade の解析環境⁸⁾

2.1.2 BEMTurbine

BEMTurbine⁹⁾は、研究室で開発したインハウスの風車設計及びその性能評価を行うツールである。オープン化されたツールは図 2.3 に示すように github からダウンロードし誰でも使用できるようになっている。翼素運動量理論(BEM: Blade element momentum theory)¹⁰⁾に基づきブレード設計で不可欠な任意の位置での翼弦長(Chord Length), ねじれ角(Twist Angle)を解析から求められる。また, 周速比 λ (Tip Speed Ratio)に対するパワー係数 C_p (Power Coefficient), 推力係数 C_T (Thrust Coefficient)を解析し風車の性能を評価するモジュールも実装されている。

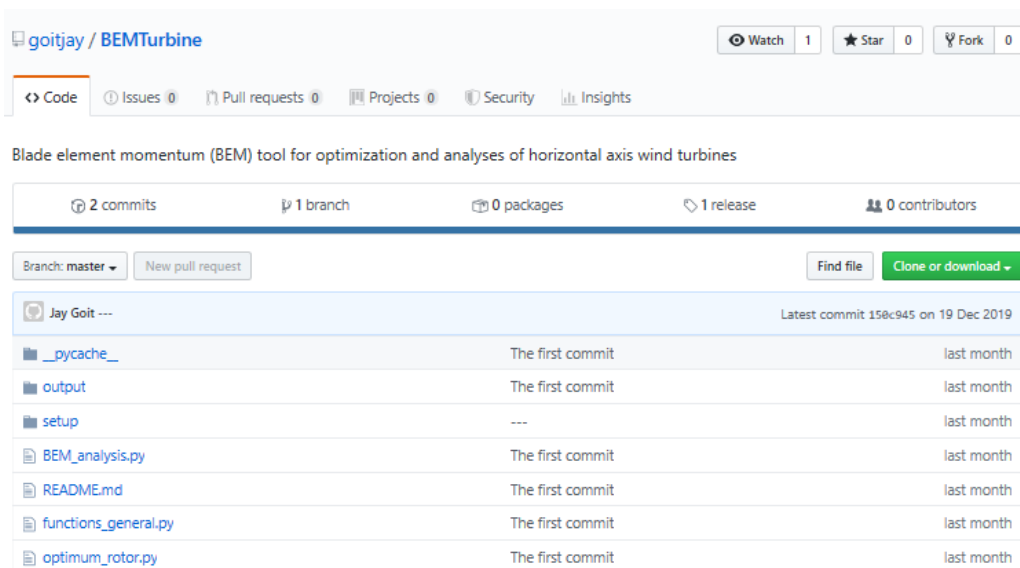


図 2.3 BEM Turbine⁹⁾

2.2 解析モデル

中型商用風車に使用されているブレードの翼型で、公開されているものが2つある。ブレードの根元から7.0mの位置で使用されている翼型1, 12.5mの位置で使用されている翼型2である¹¹⁾。これら翼型の迎角(AoA)–15°~30°の揚力係数(C_L), 抗力係数(C_D)の実験データが公開されている。これら翼型の形状, 揚力係数(C_L), 抗力係数(C_D)データを xy 座標データとして抽出し, 解析対象モデル及び解析値と比較するグラフとして使用する。なお, このデータは, レイノルズ数(Re)を300,000と設定し計測されたデータである。

2.3 解析方法

2.3.1 翼型の性能解析

- 1) QBlade を用いて, KDFoil-1, KDFoil-2 の揚力係数(C_L), 抗力係数(C_D)の解析を行う。抽出を行い得た翼型の形状データを, QBlade 内にある Airfoil Design モジュールにインポートする。
- 2) 翼型の厚さ, プロットデータの数や形状に歪な点はないかを確認する。
- 3) XFOIL Direct Analysis モジュールで, 解析対象の翼型の選択, レイノルズ数(Re), 迎角(AoA)の範囲などの初期設定を決定し, 問題なければ実行を行う。ここでは, 翼型の C_L, C_D グラフデータとの比較を行うために, 始めは Re=300,000, 迎角(AoA)–15.0° ~ 30.0°に設定し, 実行を行う。これらから得られたデータは, 計測値と解析値を比較するために使用する。
- 4) 実際は翼型をレイノルズ数(Re) = 1,500,000 下で稼働させるため, レイノルズ数(Re)の設定を変更し, KDFoil-1, KDFoil-2 の解析を再度行う。また, ブレードのピッチ制御の解析を行う際にあらゆる迎角(AoA)に対する C_L, C_D データが必要になってくる。よって, 迎角(AoA) – 180.0° ~ 180.0°での C_L, C_D データを算出する。この解析を行うのは, Polar Extrapolation to 360 モジュールである。この解析は, Re = 1,500,000 のデータのみ行う。

2.3.2 ブレードの基本設計

- 1) BEM Turbine を用いて, ブレードの任意位置にある翼型のコード長(Chord), ねじれ角(Twist Angle)の解析を行う。BEM Turbine/setup にある inp ファイル内の算定数値, ロータ, 翼型, ブレードのプロパティ設定を行う。また, 同じフォルダー内に KDFoil-1, KDFoil-2 の迎角(AoA)に対する C_L, C_D ファイルを入れておく。
- 2) Anaconda/Spyder を起動し, BEM Turbine/optimum_rotor.py モジュールをインポートし, 解析を実行する。これにより, 理論上最適なブレードのコード長とねじれ角が出力される。
- 3) 周速比(λ)に対するパワー係数(C_p)の解析を行う。Anaconda/Spyder に BEM Turbine/BEM_analysis.py モジュールをインポートし, 解析を実行する。これにより, λ に対する C_p, C_T が出力される。BEM Turbine のコードは, 結言の後に記載されている。

第3章 結果及び考察

本章では, 空力弾性シミュレーションに重要な空力パラメータの解析に関する結果を示す. 具体的には, 風車ブレード用の翼型を抽出し, 風車を運転する際のレイノルズ数で翼型の揚力と抗力を解析する. その後翼型の揚力係数と抗力係数を元にブレードのパラメータの解析を行う. そして, 得られたロータのパワー係数及び推力係数を求め, 性能評価を行う. 最後に本研究で求めた空力パラメータを OpenFAST に導入する.

図 3.1 にはこの研究でモデルを作成中型商用風車の概略を示す. この風車のロータ直径は 33 m, ハブ高さは 41.5 m である. また, 表 1 にその他の中型商用風車の諸元を示す.

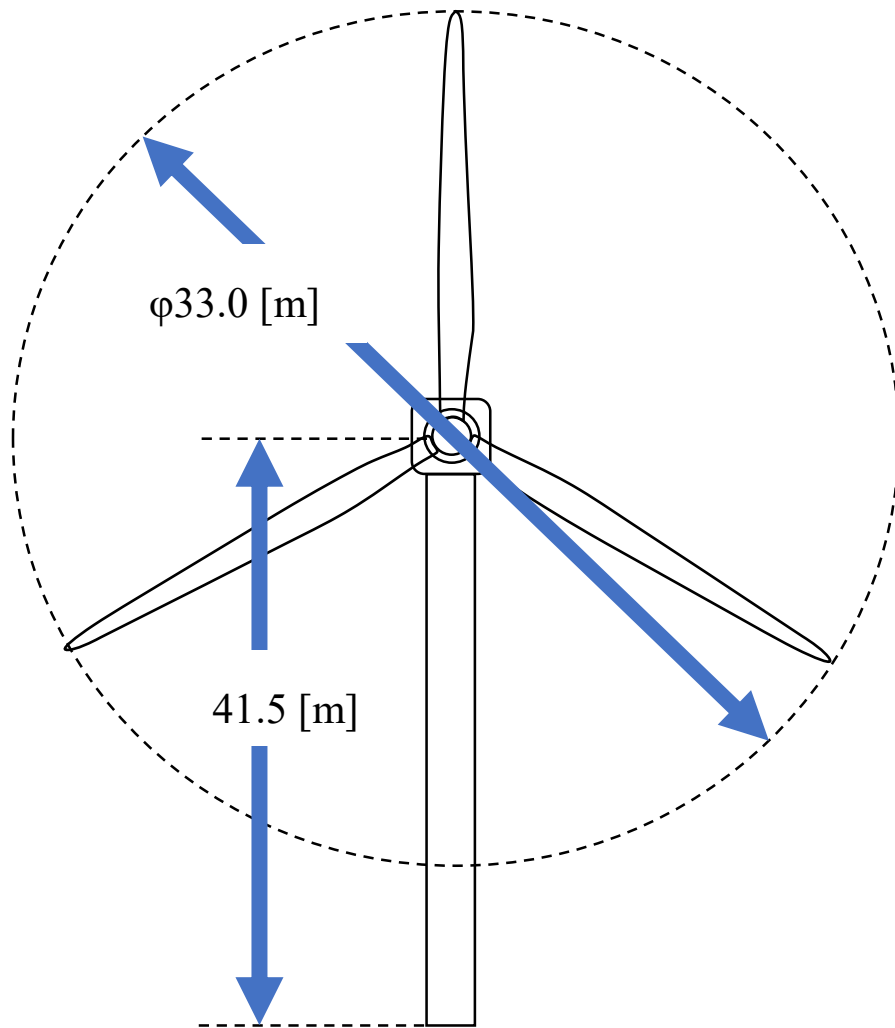


図 3.1 中型商用風車

表 1 中型商用風車の諸元	
ロータ直径	33m
ハブ高さ	41.5m
定格出力	300kW
定格風速	11.5m/s
定格回転数	40.5rpm
カットイン風速	3.0m/s
カットアウト風速	25m/s
最適周速比	7.5
チルト角	5°
ブレード長さ	15.940 m

3.1 翼型データの抽出と解析

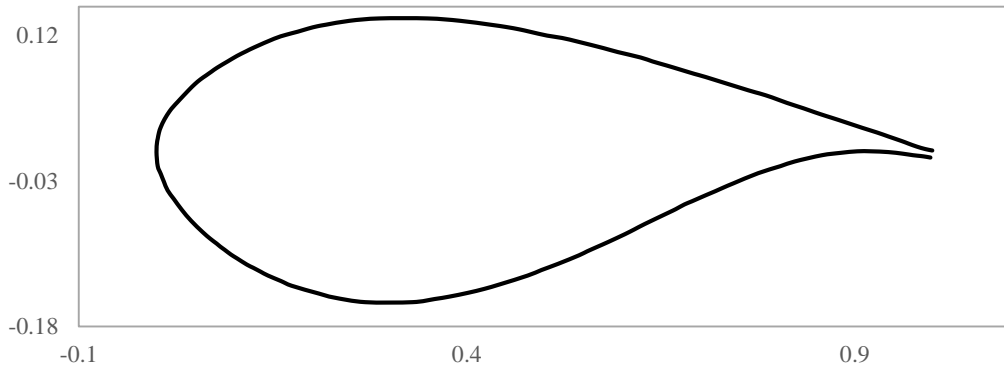
図 3.2 に抽出した翼型を示す。これらは、解析を行う対象の中型商用風車に使用されている翼型を抽出し、KDFoil-1, KDFoil-2 と呼称した。KDFoil-1 はブレード根本から 12 m の位置まで使用する, 12m から先端まで KDFoil-2 を使用する。QBladeにより解析を行った結果と計測値のデータを比較した。

図 3.3 に迎角(AoA)に対する揚力係数(C_L)曲線($Re = 300,000$)を示す。揚力係数(C_L)を見ると, KDFoil-1 は迎角(AoA)が $-5.5^\circ \sim 7.5^\circ$, KDFoil-2 は迎角(AoA)が $-12.0^\circ \sim 6.5^\circ$ との間で, 計測値と解析値はわずかに差異があるが, 傾向はほぼ一致した。つまり, 直線領域において傾向は一致する。また, KDFoil-1 では, 迎角(AoA)が $7.5^\circ \sim 18.5^\circ$ の時に, 差異が最大で 1.1 ほどあったものの傾向が類似していた。KDFoil-2 では, 迎角(AoA) $11.0^\circ \sim 30.0^\circ$ で解析値が測定値に対して, 少し遅れて追隨していると思われる。しかし, 差異が迎角(AoA)によって異なり, 傾向は近いが数値が大きく異なっている。最大値, 最小値に関しては KDFoil-2 の最小値が, 迎角(AoA)と揚力係数(C_L)が計測値では $-12.0^\circ, -0.80$ に対し, 解析値では $-11.5^\circ, -0.84$ となり, 差異は 0.04 であった。傾向一致の見られた迎角(AoA)の範囲内に存在しており, 差異はあるがほぼ一致していると思われる。これ以外の KDFoil-1 の最大値と最小値, KDFoil-2 の最大値は, 迎角(AoA)が大きく異なっており, 傾向の一致した迎角(AoA)の範囲外であった。

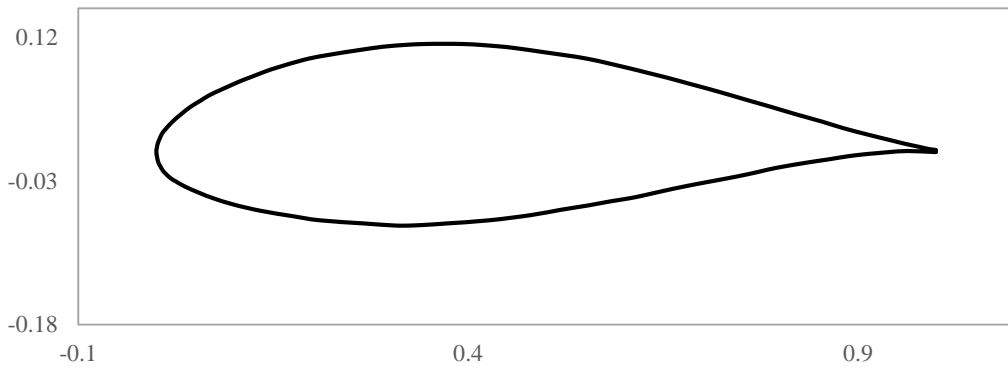
次に図 3.4 に迎角(AoA)に対する抗力係数(C_D)曲線($Re = 300,000$)を示す。抗力係数(C_D)を見ると, KDFoil-1 は迎角(AoA)が $-5.0^\circ \sim 8.0^\circ$, KDFoil-2 は迎角(AoA)が $-12.2^\circ \sim 11.5^\circ$ の間で, 計測値と解析値とで僅かに差異があるものの傾向がほぼ一致した。KDFoil-1 では, 迎角(AoA)が $8.0^\circ \sim 16.5^\circ$ で最大差異が 0.012 ほどあるが, 傾向はほぼ一致している。KDFoil-2 では, 迎角(AoA)が 11.5° から, 傾向は類似しているが解析値と計測値との差異が, 迎角(AoA) $11.5^\circ \sim 21^\circ$ の間で徐々に広がり, 迎角(AoA) 30.0° まで遅れて値が追隨している。つまり, 傾向は類似しているが差異が徐々に大きくなっている。最大値と最小値に関して, 最小値の場合, KDFoil-1 の迎角(AoA), 抗力係数(C_D)が, 計測値で $-1^\circ, 0.008$ に対し, 解析値で $2^\circ, 0.016$ となり差異は, 0.008 となった。迎角(AoA)は異なり, 抗力係数(C_D)も 2 倍ほど異なる。KDFoil-2 の計測値が $-2^\circ, 0.004$ に対し, 解析値が $2.5^\circ, 0.011$ となり差異は, 0.007 であった。迎角(AoA)

は異なり, 抗力係数(C_D)も約 3 倍異なる. 最小値は, 傾向が一致している迎角(AoA)の範囲内であり, 差異も大きくないが, 抗力係数(C_D)の数値を考慮した場合, 大きな違いであると思われる.

これらを統合的に推察すると, 揚力係数(C_L), 抗力係数(C_D)ともに, 迎角(AoA) 0° から前後する迎角(AoA) $-6.0^\circ \sim 12.0^\circ$ の範囲では傾向はほぼ一致しており, データが使用できると思われる. その他の迎角(AoA)での傾向は, 類似してはいるが差異が大きい, 又は, 全く異なっていると思われる.



(a) KDFoil-1



(b) KDFoil-2

図 3.2 抽出した翼型

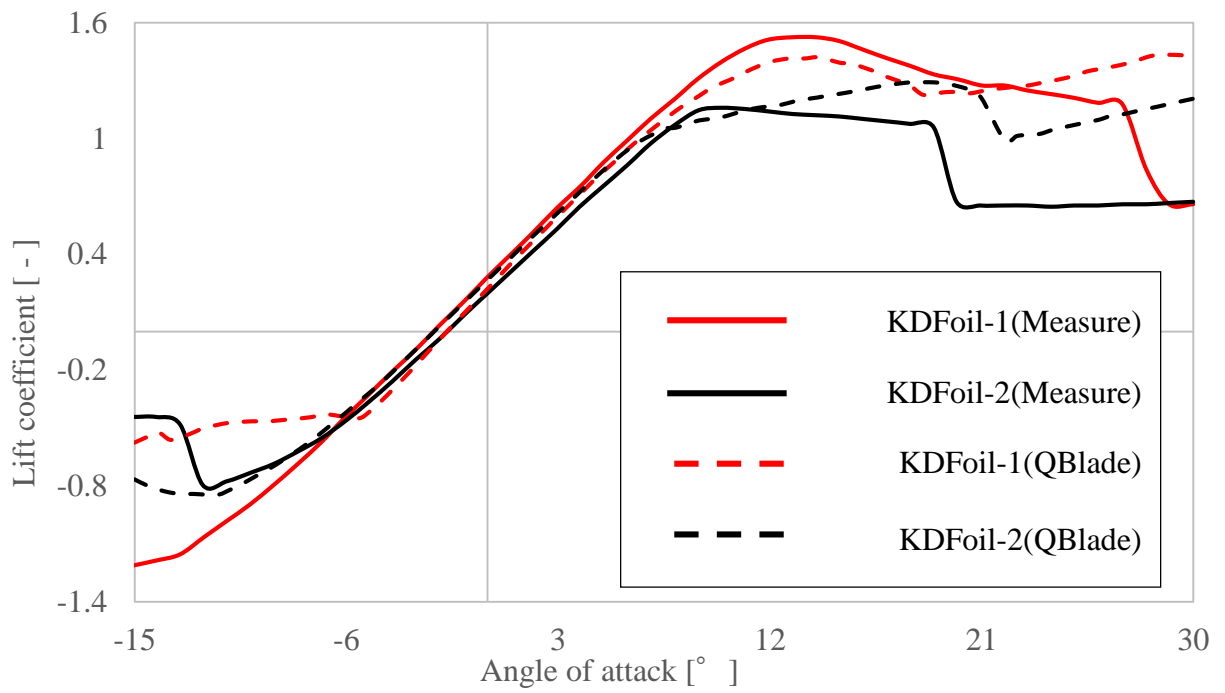


図 3.3 揚力係数(C_L) . レイノルズ数, $Re=300,000$.

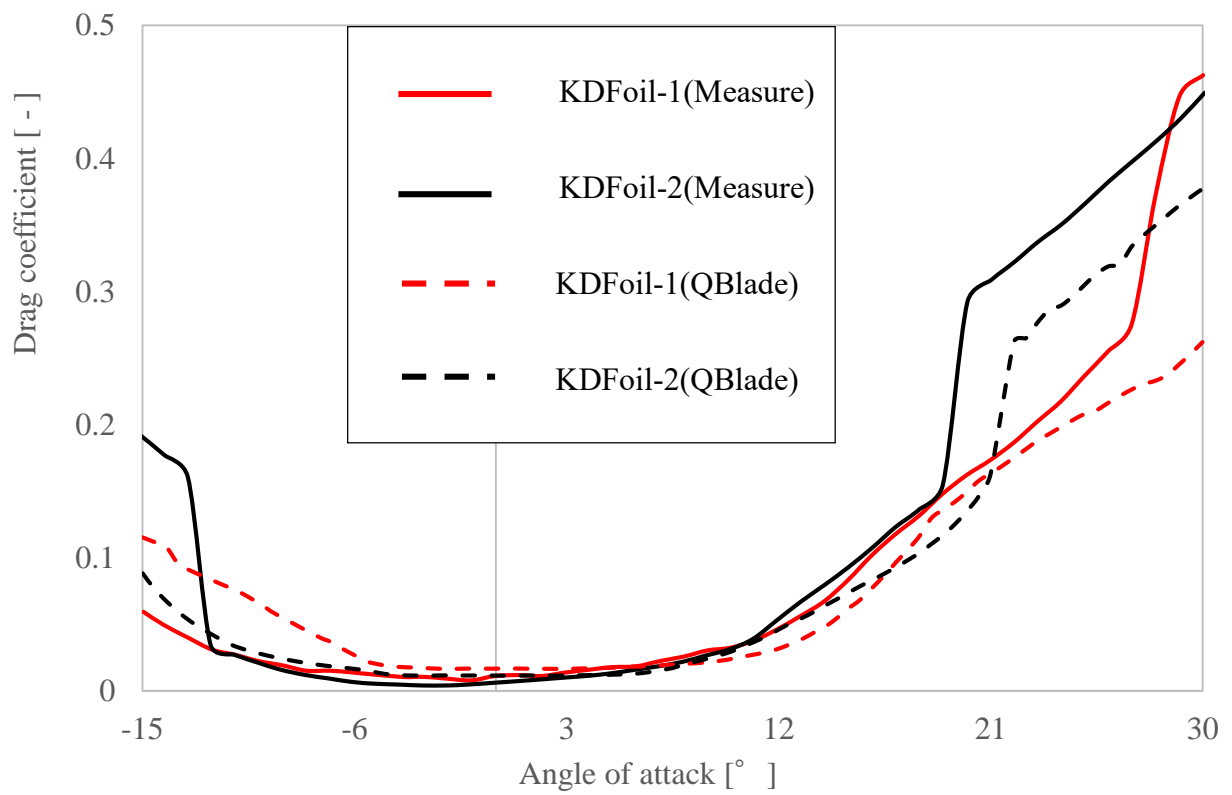


図 3.4 抗力係数(C_D) . レイノルズ数, $Re=300,000$.

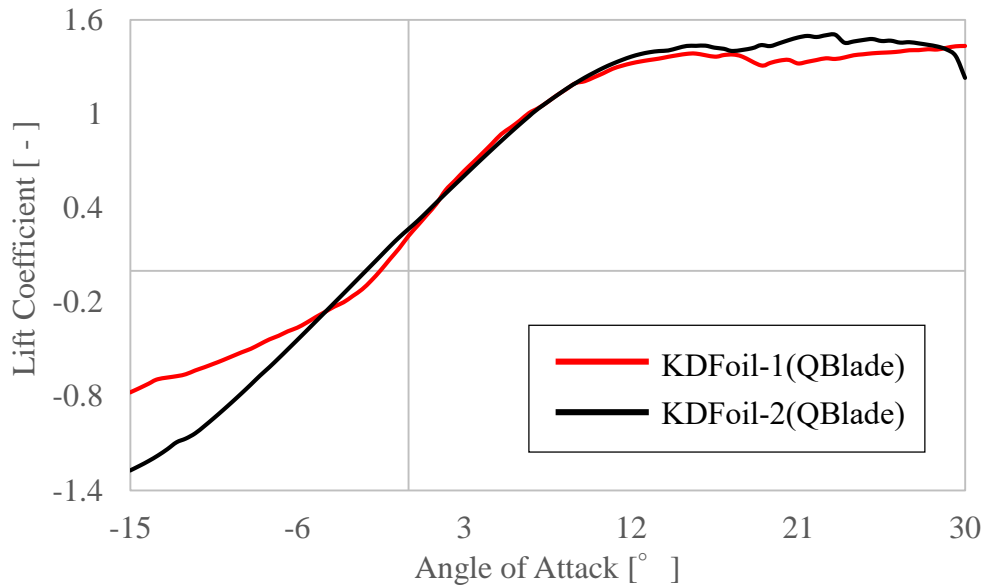


図 3.5 揚力係数(C_L)曲線 . レイノルズ数, $Re=1500,000$.

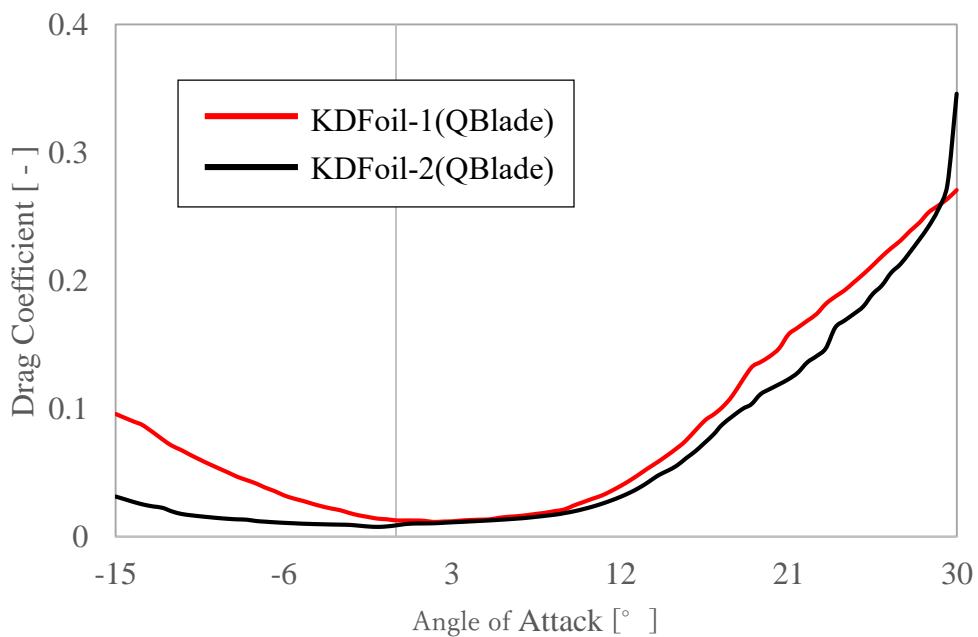


図 3.6 抗力係数(C_D)曲線 . レイノルズ数, $Re=1500,000$.

次に, 図 3.5 に揚力係数(C_L)曲線(レイノルズ数, $Re=1500,000$)を示す. また, 図 3.6 に抗力係数(C_D)曲線(レイノルズ数, $Re=1500,000$)を示す. 揚力係数(C_L)から見ると, KDFoil-1, KDFoil-2 は異なる翼型ではあるが, 迎角(AoA)が $-6.0^\circ \sim 8.0^\circ$ となる時, ほぼ傾向が一致している. また, 数値の上昇の傾向が直線のようにになっている迎角(AoA)15.0°前後で, 僅かに数値が低下する傾向である. 迎角(AoA)が 18.0°あたりになると類似していた傾向が乖離し始めている. その後は, KDFoil-1 の場合, 不安定に低下し迎角(AoA)が 19.0°になったあたりから, 緩やかに上昇している. KDFoil-2 の場合, 不安定に迎角(AoA)が 23.0°でピークを迎え, 迎角(AoA)29°まで穏

やかに低下した後、急激に値が低下している。迎角(AoA) -6.0° から下は、KDFoil-1 の場合、迎角(AoA) -15.0° の時、揚力係数(C_L)が -0.7 に達するまで、迎角(AoA) $10^\circ \sim -6.0^\circ$ の間での減少傾向に比べ、穏やかに数値が減少している。KDFoil-2 の場合、迎角(AoA) -15.0° までほぼ直線状に低下している。そのまま迎角(AoA) -15.0° で、揚力係数(C_L)が -1.3 に達している。これらの傾向から、特定の迎角(AoA)範囲では、KDFoil-1、KDFoil-2 共に一致もしくは類似している傾向にある。しかしながら、最大揚力係数($C_{L,max}$)及び最小揚力係数($C_{L,min}$)は、その特定値になる時の迎角(AoA)も揚力係数(C_L)も異なっている。

次に、抗力係数(C_D)を見ると、迎角(AoA) $0^\circ \sim 8.0^\circ$ の間で、傾向が一致している。KDFoil-1 の場合、迎角(AoA) $8.0^\circ \sim 14.0^\circ$ に達するまで、KDFoil-1 と類似した曲線状の変移になっており、その後は、少し不安定であるものの、ほぼ直線上に数値が上昇している。迎角(AoA) 0° 以下も同じく、ほぼ直線上に上昇している。KDFoil-2 の場合、迎角(AoA) 0° 以下では、直線上に上昇しているが、KDFoil-1 に比べ緩やかに大きくなる傾向である。迎角(AoA) 12.0° 以上から、直線上に大きくなっているが、迎角(AoA) 29.0° あたりから、一気に数値が上昇している。これらの傾向から特定の迎角(AoA)範囲では、KDFoil-1、KDFoil-2 共に一致もしくは類似している傾向が強く、また、類似している迎角(AoA)範囲が揚力係数(C_L)より広いと思われる。また、直線的に数値が変移している範囲も広い。

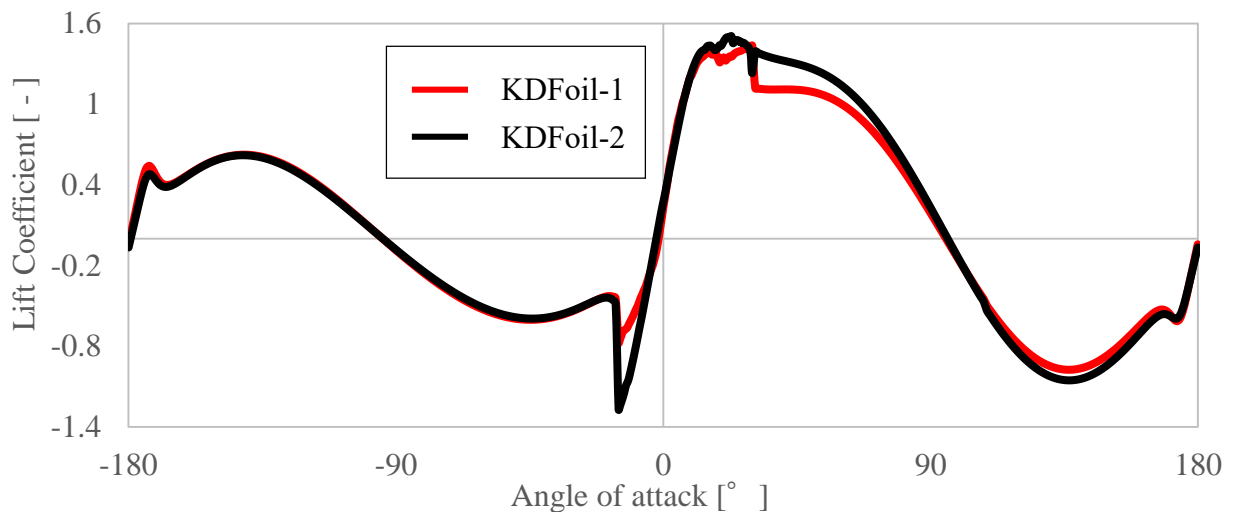


図 3.7 迎角 360°の揚力係数(C_L)

解析を行う実際の風車は、レイノルズ数(Re) $=1,500,000$ 下で稼働している。解析の結果を図 3.7 に $Re=1,500,000$ での迎角(AoA)周囲 360°に対する揚力係数(C_L)を示す。また、図 3.8 に $Re=1,500,000$ での迎角(AoA)周囲 360°に対する抗力係数(C_D)を示す。迎角(AoA) $-180^\circ \sim 180^\circ$ のデータを解析したのは、ブレード制御を入れて解析を行う際にあらゆる迎角(AoA)に対する揚力係数(C_L)、抗力係数(C_D)の値が必要になってくるためである。

揚力係数(C_L)では、迎角(AoA) $-20.0^\circ \sim -5.0^\circ$, $10.0^\circ \sim 80.0^\circ$, $110.0^\circ \sim 175.0^\circ$, 抗力係数(C_D)は、迎角(AoA) $-120.0^\circ \sim -60.0^\circ$, $-15.0^\circ \sim 0^\circ$, $60.0^\circ \sim 120.0^\circ$ の範囲でKDFoil-1 と KDFoil-2 の性能特性が異なっている。しかし、その他の範囲では大きな差異はなく、傾向もほぼ類似し

ている. とりわけ抗力係数(C_D)は, 非常に類似している. よって, KDFoil-1, KDFoil-2 の性能は迎角(AoA)により微妙に異なるが, 傾向はほぼ類似している. このデータを用いて, 最適なブレードの基本設計を行う.

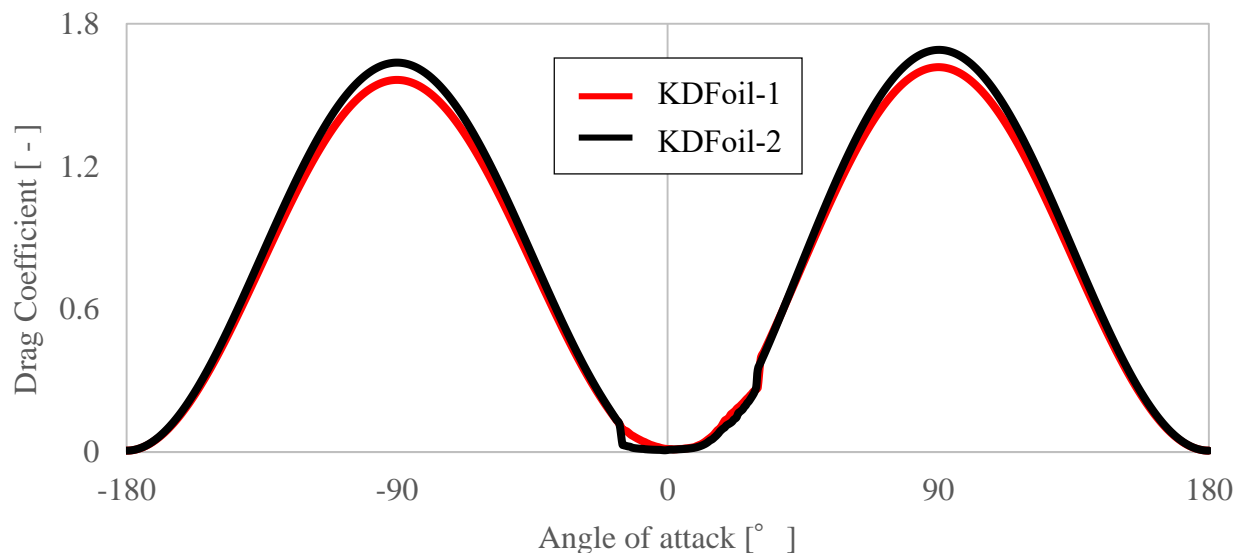


図 3.8 迎角 360°の抗力係数(C_D)曲線

3.2 翼素運動量理論の概要

次の 3.3 節のブレードパラメータの算出に翼素運動量理論 BEM を使用する. そこで, 運動量理論の概要をここで説明する. この説明は参考文献 10 に基づいている. 翼素運動量理論 BEM は, 運動量理論と翼素理論を組み合わせた非常にシンプルな理論式である. 図 3.9 に理論的なロータの概要を示す. また, 図 3.10 に翼素の空力学の概要を示す.

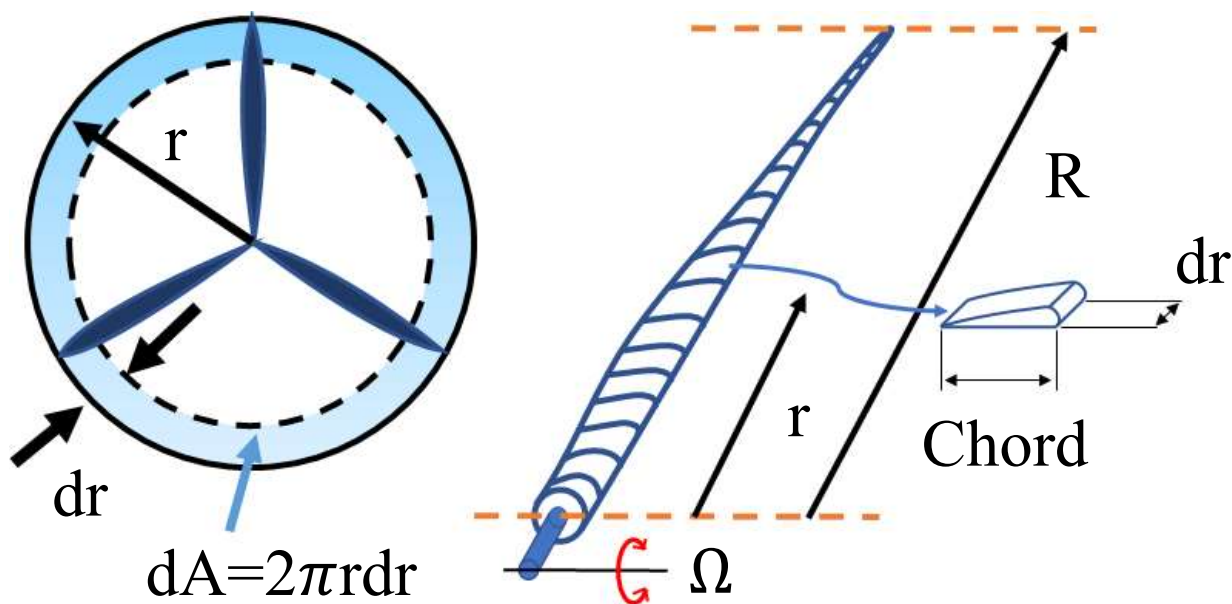


図 3.9 理論的なロータ

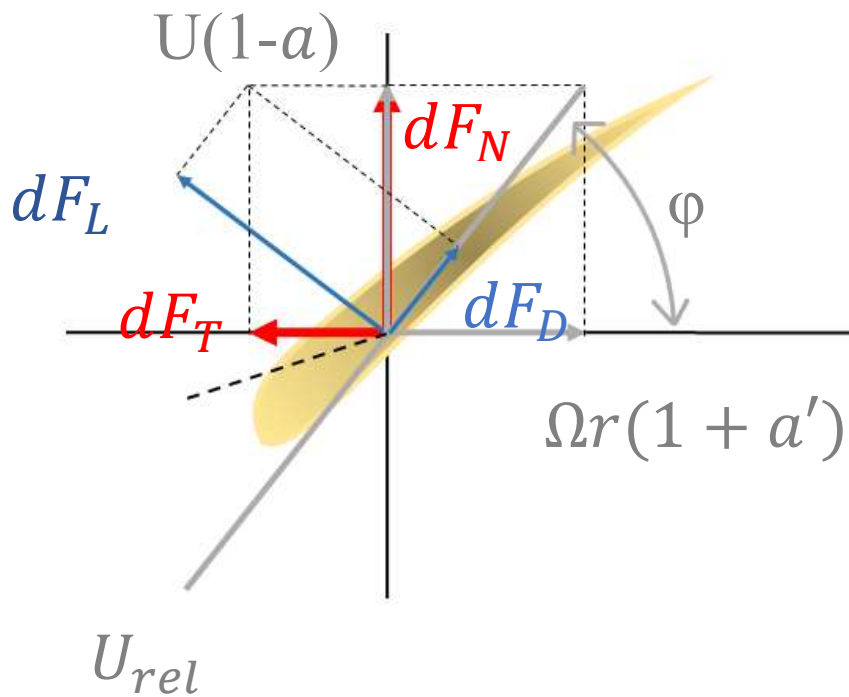


図 3.10 翼素の空力学

理論式を構築してゆく上で、以下の仮定を前提としている。

1. どの場所でも定常流れである
2. 非圧縮流体である
3. 流体と構造物同士の摩擦抵抗は 0 である

以上を前提に理論式を導いてゆく。

$$dT = 4a(1 - a)\rho U^2 \pi r dr \quad (3.1)$$

$$dQ = 4a'(1 - a)\rho U \Omega \pi r^3 dr \quad (3.2)$$

ここで、 a は誘導係数、 a' は角誘導係数、 ρ は空気密度、 r はロータ中心から任意の翼素までの距離、 dr は微小翼幅である。この式(3.1)、(3.2)は、運動量の保存則から導かれた式である。 dT は、任意の位置 r での微小環状面積で受ける微小推力である。また、 dQ は、微小環状面積で発生する微小トルクである。次に、翼素理論を説明する。

$$dF_L = C_L \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 c dr \quad (3.3)$$

$$dF_D = C_D \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 c dr \quad (3.4)$$

ここで、 U_{rel} は翼型に当たる相対風速、 c はコード長である。この式(3.3), (3.4)は、微小翼型面積に発生する力を2分力したものである。 dF_L は、相対風速ベクトル U_{rel} 又は、翼型のコード長面に対して、垂直方向に働く力である。ロータ回転軸に対し垂直方向に働く力で、ロータを回転させる力である。 dF_D は、相対風速ベクトル U_{rel} 又は、翼型のコード長面に対して、平行方向に働く力である。ロータ軸に対して平行方向に働く力で、発電には貢献せずブレードを風下方向に押し曲げる力である。

$$dF_N = dF_L \cos \varphi + dF_D \sin \varphi \quad (3.5)$$

$$dF_T = dF_L \sin \varphi - dF_D \cos \varphi \quad (3.6)$$

ここで、 φ は翼型のねじれ角である。この式(3.5), (3.6)は、式(3.3), (3.4)をロータ軸に対して垂直、水平に2分力したものである。 dF_N は、ロータ回転軸に対し垂直方向に働く力で、ロータを回転させる微小な力である。ロータ軸に対して平行方向に働く力で、発電には貢献せずブレードにスラスト荷重をかける微小な力である。式(3.5), (3.6)に式(3.3), (3.4)を代入しブレードの枚数を加味させると、

$$dF_T = B \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 (C_L \sin \varphi - C_D \cos \varphi) c dr \quad (3.7)$$

$$dF_N = B \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 (C_L \cos \varphi + C_D \sin \varphi) c dr \quad (3.8)$$

ここで、 B はブレード枚数である。式(3.7), (3.8)のようになる。また、ロータに発生する微小トルクを式にすると、

$$dQ = B \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 (C_l \sin \varphi - C_d \cos \varphi) c r dr \quad (3.9)$$

式(3.9)になる。これらの式から、抗力の増加がトルク dQ を減少させ、微小スラスト荷重 dF_N を増加させることが読み取れる。

これら運動量理論、翼素理論の理論式をまとめて翼素運動量理論(BEM)と呼ぶ。これらの式をベースに、Optimum Rotorの式は、よりシンプルに計算を行うため以下の仮定を前提に式改変してゆく。以下にまとめると、

1. 後流は発生しないものとし、角誘導係数 a' を0とする。
2. 翼型に発生する抗力もないものとし、抗力係数(C_d)を0とする。しかし、 $C_d = 0$ の翼型が存

- 在しないため, 実際の解析時に揚力と抗力の比 C_l/C_d が最大となる値を選ぶ.
3. 無数のブレードがついているとし, 先端損失はないとする. そして,
 4. 誘導係数 a は, ロータの全てで最大パワー係数 C_p を発揮するとし, $a = 1/3$ とする.
- 以上の仮定を盛り込み, 翼素運動量理論(BEM)の式(3.1),(3.2)を式変形すると,

$$dT = \rho U^2 \left(\frac{8}{9}\right) \pi r dr \quad (3.10)$$

$$dF_N = B \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 (C_l \cos \varphi) c dr \quad (3.11)$$

となる. ここで回転方向に働く力 dT とブレードにスラスト荷重をかける力 dF_N が等しいと仮定すると,

$$c = \frac{8\pi r \sin \varphi}{3BC_l \lambda_r} \quad \left(\lambda_r = \lambda \frac{r}{R}\right) \quad (3.12)$$

となる. この式は, ロータ半径 r に位置する翼型のコード長である. また, $\tan \varphi = \frac{2}{3\lambda_r}$ より,

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{2}{3\lambda_r} \right) \quad (3.13)$$

となる. この式は, ロータ半径 r に位置する翼型のねじれ角を表す. ここで使われる周速比 λ は, 設計するロータに最適な数値を入れる. 以下は, 周速比の式である.

$$\lambda = \frac{\Omega R}{U} \quad (3.14)$$

以上の理論式をベースに, 3.3 節のブレードパラメータの算出に使用する.

3.3 ブレードパラメータの算出

3.2 節の BEM 理論に基づいた BEMTurbine を用いてブレードのパラメータを算出した. BEMTurbine の optimum_rotor という関数を用いてコード長とねじれ角の解析を行った. 図3.11にブレード翼素位置に対するコード長, 図 3.12 にブレード翼素位置に対するねじれ角を示す. ブレード 1m の位置でのコード長が5.7m, ねじれ角が49.1°となっており, そこからブレードの末端までコード長, ねじれ角ともに急激に値が低下し, ブレード16mの位置でのコード長が 0.54m, ねじれ角が-1.77°となった. シミュレーションソフトのプログラミングミスによる数値の逸脱は見られなかった. しかし, 実際のブレードは重量, 強度, 費用対効果

上の問題から、根本付近では翼型は使用されず、円形になっている。また、ブレード 2m 前後付近で、最大コード長は 1.635m という仕様になっている。よって、図 3.12 のコード長は、ブレード根本付近、及びブレード 2.5m の位置で、コード長が 3.6m というのは非常に大きいと思われる。そこで、実際の風車に使用されるブレードのコード長、ねじれ角の設計に近づけるべく、ブレード根元から、2.56m までのコード長、ねじれ角を変更した。ブレード 1m の位置で、コード長 1m、ブレード 2.56m の位置で、最大コード長 1.635m と仮定し、BEM の Optimum Rotor の式(3.12)を使用した。(3.12)を変換し、式(3.15)のようにした。

$$\varphi = \sin^{-1} \left(\frac{3BC_L c}{8\pi R} \right) \quad (3.15)$$

この式(3.15)¹⁰⁾をベースに簡易的なコードを BEM Turbine に追加し、解析を行った。図 3.13 に修正したコード長、図 3.14 に修正をしたねじれ角を示す。ブレード 1m でコード長が 1m、ねじれ角が 3.6°となり、ブレード長さ 1.635m に達するまでコード長、ねじれ角の値が大きくなっている。最大コード長が 1.635m の時、ねじれ角が 8.42°となる。そこから徐々に減少し、ブレード長さ 16m で、コード長が 0.54m、ねじれ角が-1.77°となる。ブレード根元からブレードの 15%の位置までの数値が変わっただけだが、実際の風車に使用されているブレードの基本的な形状に近いデータになったと思われる。つまり、モデル設計上の大きな数値逸脱もなく、ブレードの基本設計データとして使用できるとと思われる。

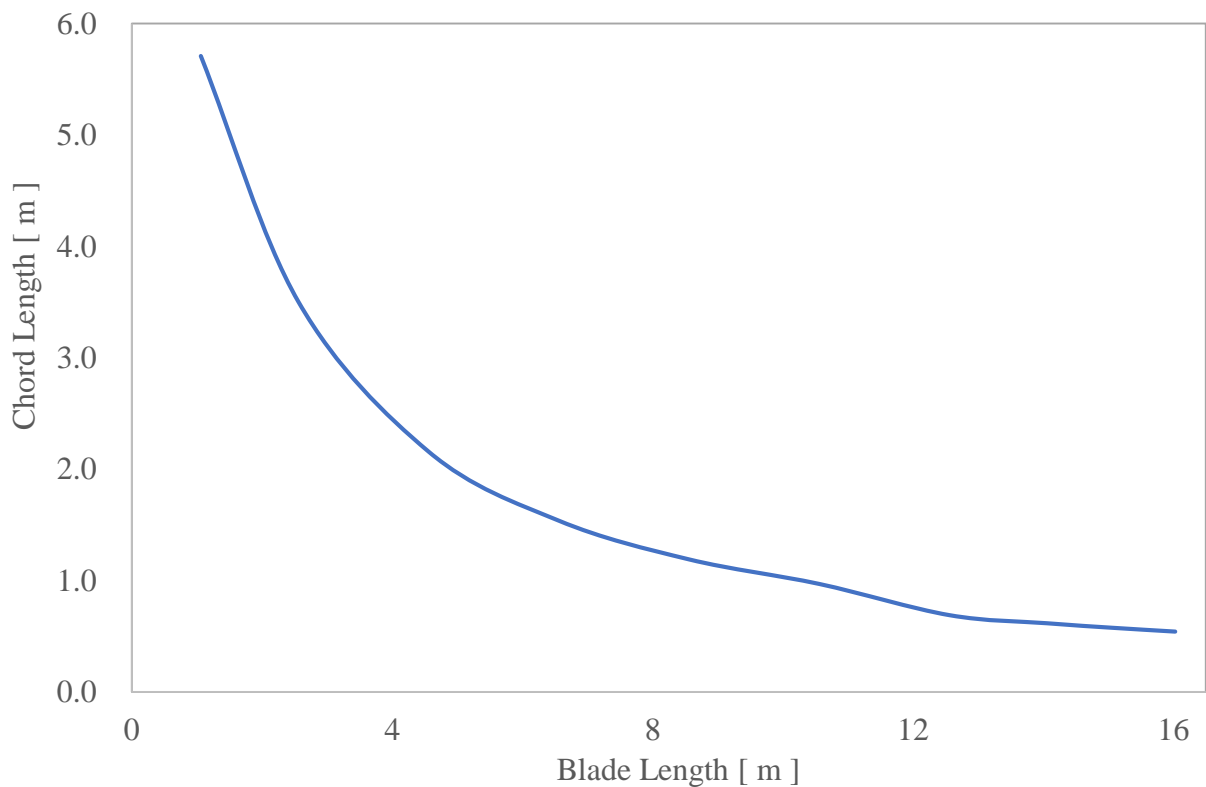


図 3.11 ブレード翼素位置に対するコード長 (修正前)

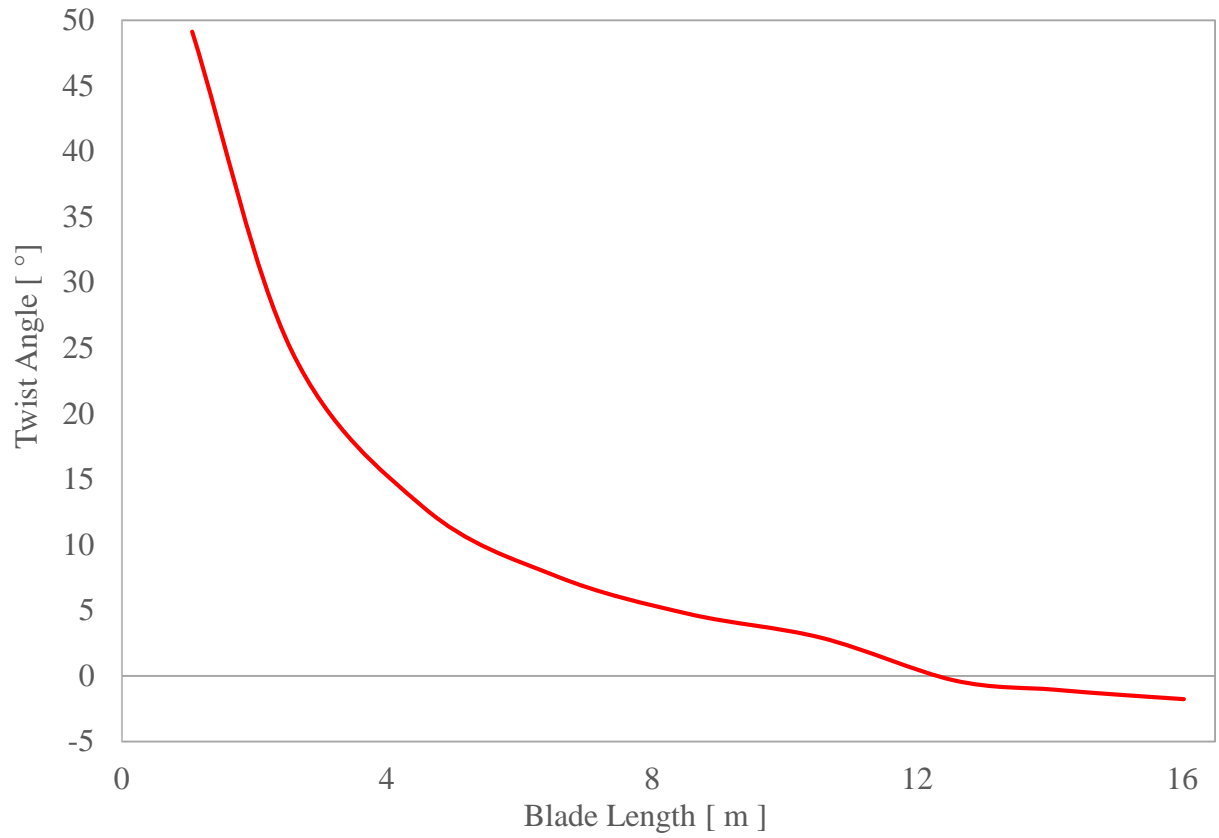


図 3.12 ブレード翼素位置に対するねじれ角 (修正前)

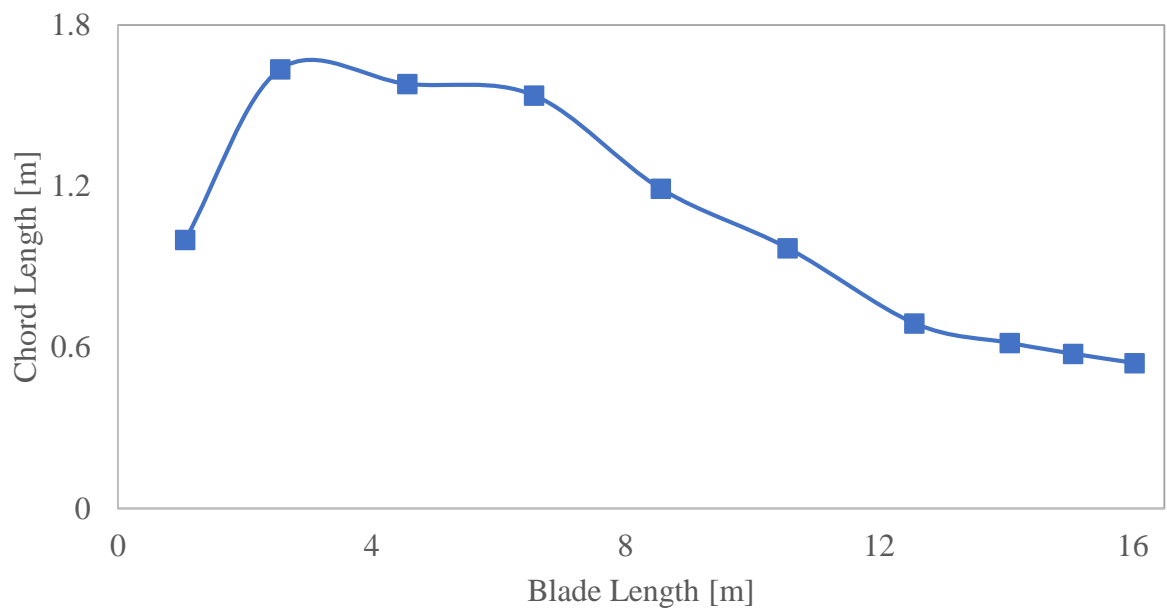


図 3.13 ブレード翼素位置に対するコード長 (修正後)

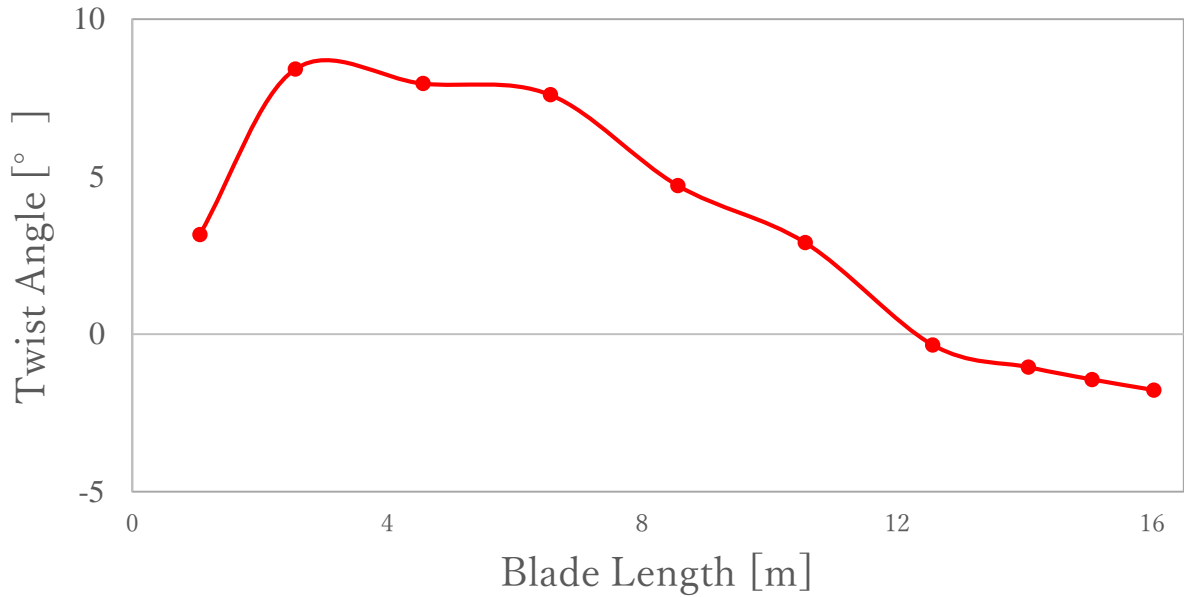


図 3.14 ブレード翼素位置に対するねじれ角 (修正後)

3.4 ロータの性能評価

ロータの性能評価では BEM Turbine の BEM_analysis という関数を使用した。複数の周速比で解析を行い風車のパワー係数と推力係数を求めた。パワー係数(C_p)とは、流体のエネルギーに対し、ロータが出力するエネルギーの度合いを示すものである。対して、推力係数(C_T)とは、流体の押す力に対するロータのスラスト方向に負荷される力の度合いを示すものである。誘導係数(a)と角誘導係数(a')を使用すると、パワー係数と推力係数は次式のように定義できる¹⁰⁾。

$$C_p = 4a(1 - a)^2 \quad (3.16)$$

$$C_T = 4a(1 - a) \quad (3.17)$$

パワー係数(C_p)の最大値とその時の推力係数(C_T)の値は、理論式から誘導係数(a)が1/3の時であると導き出されている。最大パワー係数(C_{Pmax})は、59.26%である。この時の推力係数(C_T)は、8/9となる。

図 3.15 に周速比(λ :Speed Tip Rate)とパワー係数(C_p :Power Coefficient)を示す。周速比(λ)が 1.5 から始まり、4.5 までパワー係数(C_p)が急速に大きくなっている。そこから周速比(λ)が 7.5 になるまで、徐々にパワー係数(C_p)の上昇が落ち着き、周速比(λ)が 7.5 で最大パワー係数(C_p)0.51 となる。その後は、周速比(λ)に対してパワー係数(C_p)が減少してゆく。周速比(λ)8.5 以降のデータがないのは、パワー係数(C_p)の数値が発散しデータを算出できなかったためである。実際の風車が最大パワー係数(C_{Pmax})を維持できる周速比(λ)は、7.5 である。また、ロータの理論的な最大パワー係数(C_{Pmax})は、0.5926 と知られている。シミュレーションで出力されたデータは、最大パワー係数(C_{Pmax})が理論値より 0.0826 ほど低い、それでも解析からは高性能の風車が設計できたと言える。最大パワー係数(C_{Pmax})が理論値より低い、

理論上では抗力がない翼型を仮定している. しかし, 実際にそのような翼型は存在しない. また, 理論式から導かれたコード長を, 実際のブレードの構造を考慮し, ブレード根元から 2.56m の位置まで大幅に修正したことも最大パワー係数(C_{Pmax})の低下に繋がったと思われる. BEM Turbine は, ブレード先端から発生する渦抵抗, 渦損失, 摩擦損失, 駆動部品による伝達効率などを考慮せず解析されているため, 空力弾性シミュレーション OpenFAST では, これらを考慮し解析してゆく必要がある. よって, 実際の効率はこれ以上に低下すると思われる. しかし, 最大パワー係数(C_{Pmax})が大きく低下せず 0.5 以上あったので, ロータのモデルとして十分に使用できると思われる.

次に, 推力係数(C_T :Thrust Coefficient)について考察を行う. 図 3.16 に周速比(λ)と推力係数(C_T)を示す. 全体的には周速比(λ)に対して放物線上に推力係数(C_T)が増加している. 周速比(λ)が 2.5~4.5 のあたりで増加が顕著になり, 6.5 あたりから増加傾向が落ち着いている. 最大パワー係数(C_{Pmax})が得られた周速比 7.5 では, 推力係数 C_T の値が 0.89 である. 周速比(λ)とは, 風速に対するロータ先端部の角速度の度合いであり, 無次元数である. つまり, 回転数が大きくなるほど, 今回作成しているロータが稼働する周速比(λ)の範囲内では, 推力係数(C_T)は大きくなり, ブレードにかかる負荷は大きくなる傾向になると思われる.

以上の周速比(λ)に対するパワー係数(C_P), 推力係数(C_T)の考察を統合的にまとめると, ロータの性能にかかわるパワー係数(C_P)は, 特定値で理論値に近い数値を出しているが, 推力係数(C_T)は数値が周速比(λ)に比例している. また, パワー係数(C_P)が最大値に達していた時, 推力係数(C_T)は, 誘導係数(a) 1/3の時になる値 0.89 となっており, 解析値と理論値がほぼ一致していると思われる.

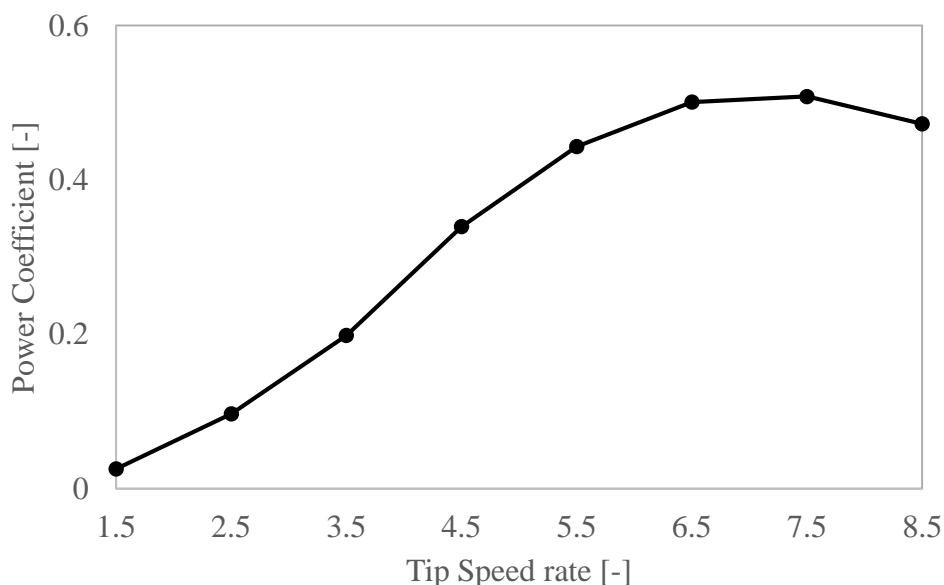


図 3.15 周速比(λ)とパワー係数(C_P)

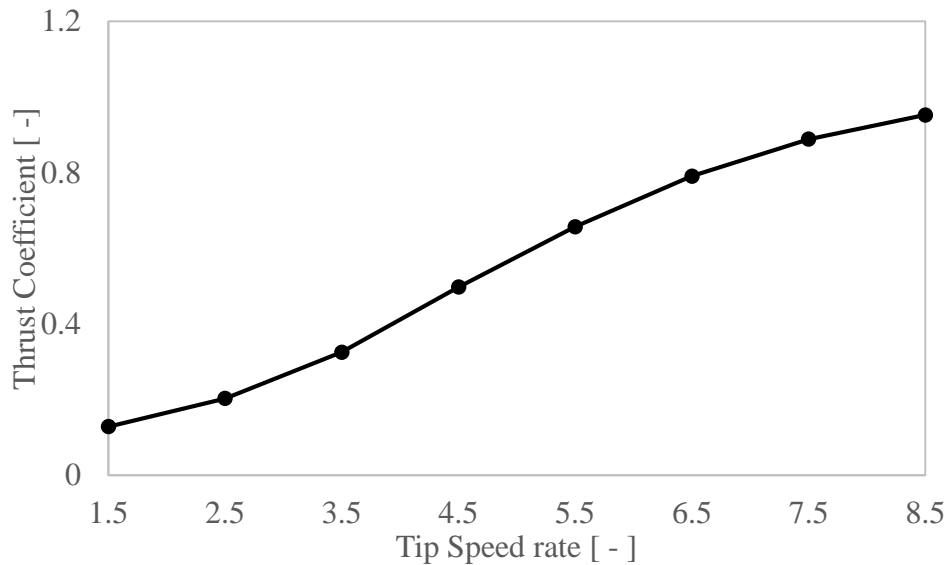


図 3.16 周速比(λ)と推力係数(C_T)

3.5 OpenFAST モデルの作成

3.3 節で得ることができたブレードのコード長, ねじれ角を空力弾性シミュレーション OpenFAST のセットアップ用のファイルに入力し, ロータに関する流体力学のプロパティを完成させた. 図 3.17 に AeroDyn_blade ファイルのプロパティを示す. また, 図 3.18 に流体力学に関するファイルである Onshore_AeroDyn ファイルのプロパティを示す. 空力弾性シミュレーション OpenFAST は, 主に 5 つのプロパティファイルと, これらをシミュレートするのに必要なアプリケーションで構成されている. 主要なファイルは, 流体力学に関する情報を記述する Onshore_AeroDyn ファイル, 全体的な構造力学, 材料力学に関する情報を記述する Onshore_ElastoDyn ファイル, Wind Turbinen に必要なタワーに関する詳細な構造力学の情報を記述する Onshore_ElastoDyn_Tower ファイル, ナセルのヨー軸制御, ブレードのピッチ制御, ロータ回転数の制御, 発電した電力の送電制御などの電気電子及び制御に関する情報を記述する Onshore_ServoDyn がある. 更にこれらのファイルに情報を提供するファイルに情報を含め 10 前後のファイルがあり, それらに記述してゆく必要がある. システム構造上シンプルであるが, ファイル内のプロパティ変更は, 少し手間がかかる. 解析ソフトの開発を進行してゆく過程で, 視覚的に理解のしやすいアプリケーションに改良されると, 研究の進捗に貢献できるのではないかと思われる.

第4章 結言

ロータに渦発生器, プラズマアクチュエータを組み込み, 発電効率及び疲労荷重の低減を目指している研究に必要な専用解析ソフトを作成するために, 空力弾性シミュレーションモデル OpenFAST をベースに作成を行う. そのために OpenFAST で使用できる中型商用風車のシミュレーションモデルの構築を研究目的とした. シミュレーションモデルを構築するために, QBlade 及び BEM Turbine などのシミュレーションソフトを用いて, ブレード及びロータの基本的な設計を行った.

QBlade で解析を行った翼型 KDFoil-1, KDFoil-2 の揚力係数(C_L), 抗力係数(C_D)データは, 抽出した揚力係数(C_L), 抗力係数(C_D)データと比較し, 性能特性が特定の迎角(AoA)の範囲内でほぼ一致していた. この範囲以外では, 同じ迎角(AoA)に対する揚力, 抗力係数の数値が一致していなかったものの, 変移の傾向は類似している点もあった. しかし, これらの翼型は使用上問題ない. なおこの比較において, レイノルズ数(Re)は 300,000 で行った. 実際に使用するレイノルズ数(Re)1,500,000 で翼型の解析を行った. KDFoil-1, KDFoil-2 の揚力係数(C_L), 抗力係数(C_D)データは, 僅かに異なっている点もあったが, 性能特性の傾向はかなり類似していた. また, 解析モデルに使用する翼型データとして, 使用可能であった.

次に, ブレードに必要なコード長, ねじれ角を BEM Turbine により解析した. ブレードのコード長, ねじれ角は, 理論式上問題ないものの, 実際のブレード設計と異なるので, コードを改良することで, 解析用モデルとして使用できるブレードモデルの基本設計が完了した. 同時に BEM Turbine により解析された周速比(λ)に対するパワー係数(C_p)は, 周速比(λ)7.5 で, 最大パワー係数(C_{pmax})が 0.51 となった. 対象としている中型商用風車が最大パワー係数(C_{pmax})に達する時, 周速比(λ)は 7.5 と解析結果と一致した.

これら研究結果より, 空力弾性シミュレーション OpenFAST で使用できる中型商用風車のシミュレーションソフト用のモデルの構築用の空力パラメータの設定が完了した.

参考文献

1. Kunihiko TAKAHASHI, Kie UEDA, “海外 トピックス・メルマガニュース No.6”, 日本風力エネルギー学会誌, Vol.43, Issue 3, pp.461-471, 2019.11
2. Walney Extension: <https://www.bbc.com/news/uk-england-cumbria-45424559>
3. Naoto WATANABE, Satoshi NAKASHIMA, Nobutoshi NISHINO, Kazuyuki OTOMO, Kazuhiro NAGADOU, Nobuyuki HONJO, “Study on Measures for the Prevention of Recurrence of the Scattering and Damage Accident of Wind Turbine Nacelle Covers in Minami Osumi WF”, 風力エネルギー学会 論文集, Vol.43, Issue 2, pp.21-28, 2019.2
4. Keita KIMURA, Yasutada TANABE, Makoto IIDA, “A numerical study of the wake interference and loss of energy for WPP”, 風力エネルギー学会 論文集, Vol.43, Issue 3, pp.29-36, 2019.11
5. Amr ISMAIEL, Yuqing HE, Shigeo YOSHIDA, “Development of an Aeroelastic Analysis Tool for Multi-Rotor Wind Turbine System”, 第 41 回風力エネルギー利用シンポジウム, pp.130-133
6. GE Maximum Wind Turbine:
<https://www.ge.com/renewableenergy/wind-energy/offshore-wind/haliade-x-offshore-turbine>
7. OpenFAST NREL: <https://nwtc.nrel.gov/FAST>
8. David Marten, “QBlade v0.95 Guidelines for Lifting Line Free Vortex Wake Simulations”, 2016
QBlade: <https://sourceforge.net/projects/qblade/>
9. BEM Turbine: <https://github.com/goitjay/BEMTurbine>
10. J,F,Manwell, J,G,McCowan, A,L,Rogers, “WIND ENERGY EXPLAINED Theory, Design and Application SeconEdition”, 2009
11. 直木裕也, 前田太佳夫, 鎌田泰成, 多田哲史, 花村真紘, 岩井憲一, 藤原惇嗣, 細身雅生, “寒冷地風車のブレード着氷が風車荷重に及ぼす影響に関する研究”, 日本風力エネルギー学会, 第 41 回風力エネルギー利用シンポジウム, pp.122-125, 2019 年 12 月.

令和元年度

卒業研究論文

中型商用風車の空力弾性シミュレーションモデルの開発

松本

秀一