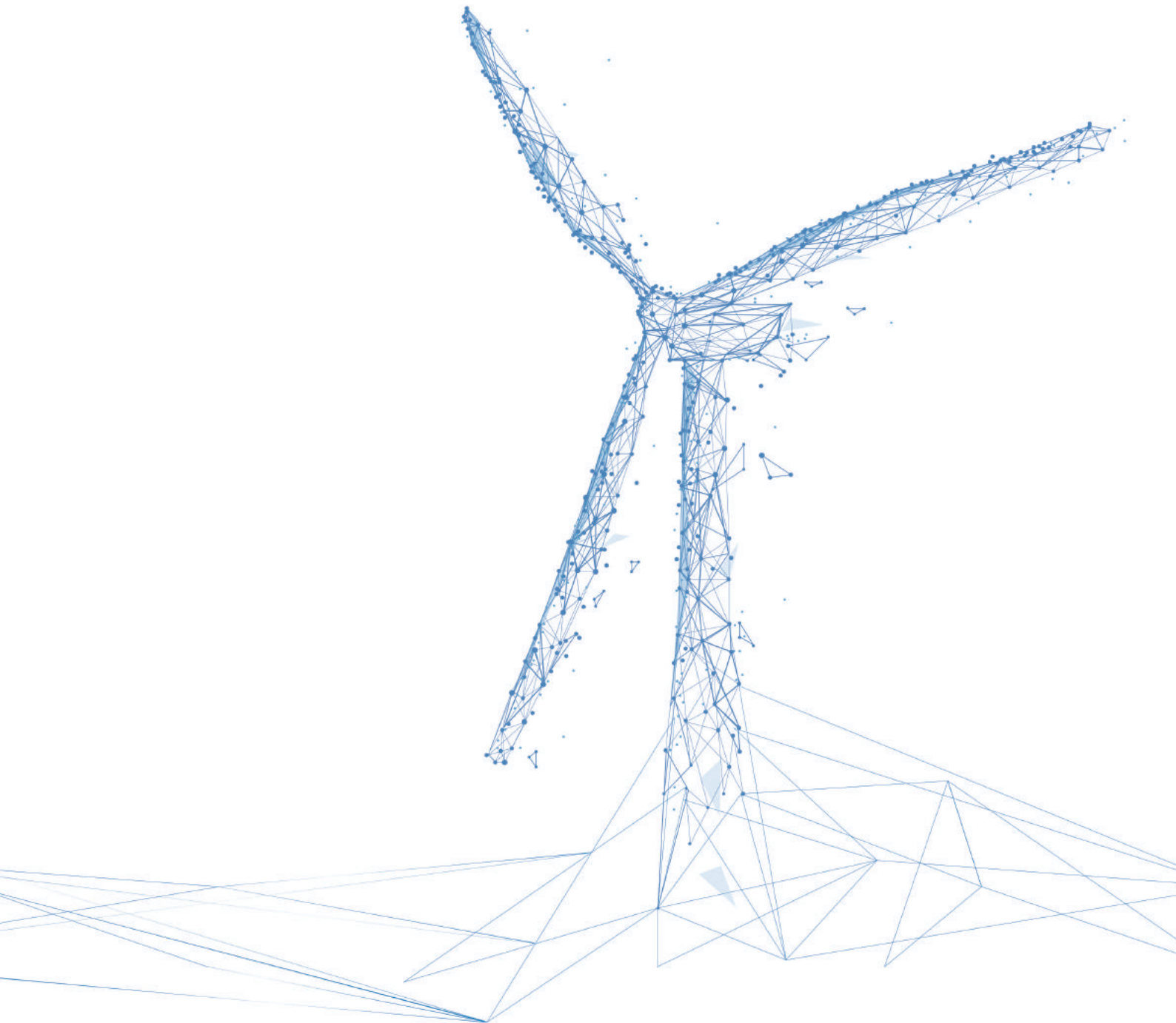


2019



海と風と、人の未来をめざして





本会では、2010年から風力発電設備に係る認証に取り組み、当初は、風車型式認証、浮体式風力発電設備の船級登録検査を中心に行っていましたが、その後、認証の対象をウインドファーム、海洋エネルギー発電設備、洋上での輸送・据付工事、風力発電設備の定期的な保守点検等と順次拡大し、現在では認証のメニューも多岐にわたっております。

これらの多くの業務は、日本ではこれまであまり馴染みのなかった業務であり、風力関係の皆様方におかれましても、認証の位置づけや活用方策、審査手続き等わかりにくいもあろうかと存じます。

このため、本会では、この度、再生可能エネルギー部情報誌を発行し、本会が展開する認証業務に関連する情報を幅広く提供していくことといたしました。

本情報誌が皆様の認証に対するご理解とご活用の一助となれば幸いです。

現在、日本では再生可能エネルギーの主力電源化に向けて、産官学による様々な取り組みが進められております。

本会としても、再生可能エネルギー利用の安全と安定操業確保の観点から、その利用普及に微力ながら貢献してまいりたいと考えておりますので、引き続き、ご指導・ご鞭撻のほど宜しくお願い申し上げます。

日本海事協会 事業開発本部 再生可能エネルギー部 部長

赤星 貞夫

Contents

- ・ 01. 型式認証の概要 P.03
- ・ 02. 風力発電所の工事計画審査への対応
—「ウインドファーム認証」と「風車支持構造物製造評価」— P.09
- ・ 03. Marine Warranty Survey
— 海洋再生可能エネルギー発電プロジェクトの発展のために — P.16
- ・ 04. 定期安全管理審査制度への取り組み P.21
- ・ 05. 海洋再生可能エネルギー発電システム認証の動向 P.23
- ・ 06. 洋上風力のための空力-水力-制御-弾性連成
解析プログラムNK-UTWind P.28
- ・ 07. 風車ナセルに作用する変動空気力特性 P.40

型式認証の概要

剣持 良章

1. はじめに

風車(風力発電設備)に対する型式認証の目的は、その型式の風車が設計条件、適用される基準、その他の技術的要求事項に従って設計、文書化、製造されていることを証明することであり、設計文書に従って風車を設置、運転及び保守できることが実証されることも要求される。

風車の型式認証は国内の法制度上で活用されており、小形風車の場合には、2012年7月1日より施工された「電気事業者による再生可能エネルギー電気の調達に関する特別措置法」(以降FIT法とする)による固定価格買取制度の対象となる際に、「日本工業規格JIS C 1400-2に適合するものであること、又はこれと同等の性能及び品質を有するものであることが確認できるものであること」という条件が設けられ、同条件の確認の根拠として型式認証が活用されてきた。また、大型風車の場合には、電気事業法により風力発電設備であって出力500kWを超える場合に適用される「工事計画届出義務」に関する審査の中で、設置される風力発電設備が型式認証を有することが要求されている。

本稿では、風車(風力発電設備)に関する型式認証についてまとめる。

2. 風車(風力発電設備)の定義

2.1 IEC/JIS規格における風車とは

風車に関する国際基準としては、IEC(International Electrotechnical Commission:国際電気標準会議)においてIEC61400規格シリーズが整備されている。日本国内では、IEC61400シリーズの一部規格に対応するものとして、産業標準化法(※2019年7月1日より、旧来の「工業標準化法」から法律名が改められた。)の下で、JIS(Japanese Industrial Standards:日本産業規格)が整

備されており、JIS C 1400規格シリーズが風車に対応する規格群となっている。

上記の国際・国内規格において、風車の定義としてすべての風車は「風車」であるが、ロータの受風面積が 200m^2 以下であり、かつ、発電電力の電圧が $1,000\text{V}_{\text{ac}}$ または $1,500\text{V}_{\text{dc}}$ の風車を特に「小形風車」と定義している。受風面積とは、風を受けるロータ(翼)の回転面の面積であり、一般的な風車で例を図1に示す。

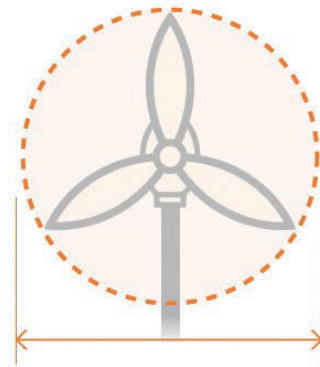


図1 風車の受風面積(点線で囲まれた円内の面積)

2.2 法制度において型式認証が要求される風力発電設備の定義

日本の法制度における風力発電設備の定義は前2.1項の定義とは明確に異なる。規格上の風車とは1基の風車を単位としているが、法制度上の風力発電設備とは発電設備を単位としており、風車の基数には拠らない点に留意されたい。

電気事業法において、発電設備は総じて「電気工作物」と定義され、事業用電気工作物と一般用電気工作物に大別される。風力発電設備の場合に、一般用電気工作物とは小出力発電設備であり、出力20kW未満のものと定義される。逆に、出力20kW以上のも風力発電設備は、基本的に事業用電気工作物と定義される。FIT法においても、この電気事業法の定義がそのまま

採用されている。

電気事業法では、風力発電設備に対して、同法の省令が定める「発電用風力設備に関する技術基準」を満足することを義務として要求する他、出力500kWを超える場合には工事計画届出義務があり、発電設備の設置等工事について事前に申請し、認可を受けなければならない。この認可において、設置される風車は、型式認証を有しているか、設置後一定期間内に型式認証を取得することが要求されている。

一方、FIT法では、出力20kW未満の風力発電設備の場合、2018年3月31日までのFIT法の条文において、「日本工業規格JIS C 1400-2に適合するものであること、又はこれと同等の性能及び品質を有するものであることが確認できるものであること」という要求事項が課せられており、これを確認する根拠として、実質的に型式認証を有することが要求されていた。ただし、2018年4月1日に改正され、出力20kW未満の風力発電設備に対する特別な買取価格が撤廃され、風車は「陸上風車」と「洋上風車」の区分しかなかったため、上述の要求事項についても条文からは撤廃されている。

ここで、出力20kW以上で500kW未満の風力発電設備については、法制度において型式認証が要求されると解釈できるかは定かではない。従来設置されてきた500kW未満の風力発電設備が寿命を迎えて再設置などの工事を検討した場合や、出力20kW未満の風力発電設備を検討していた事業者が20kWを超えた場合には、個別案件として法制度の適用による要求事項を確認する必要があると考える。

2.3 小形風車と大型風車

本会の型式認証は、基本的には国際・国内規格で定義される認証制度に準じて運用している。ただし、前2.1及び2.2項の関係から、これまで「小形風車型式認証」としては、受風面積が200m²以下で出力が20kW未満の風車を対象としてきており、「大型風車型式認証」では、出力が500kWを超える風車を対象としてサービスを提供してきた。

今後は案件によって、受風面積が200m²以下で出力が20kW以上の小形風車や、出力が500kWを未満の大型風車に対して型式認証サービスを提供するケースも

想定されている。

以上の関係を図2に簡単に示す。

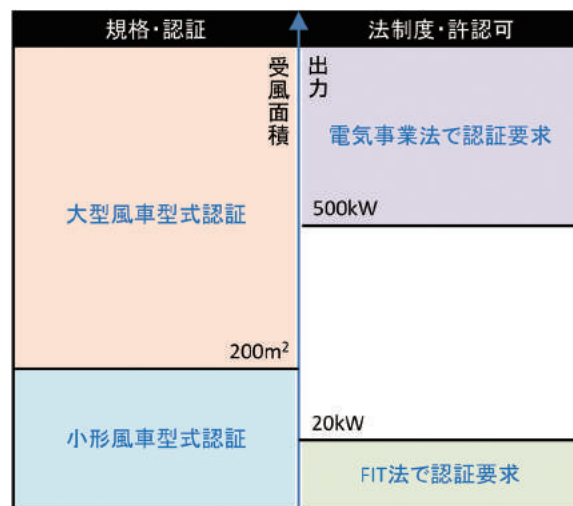


図2 認証の区分と法制度

3. 型式認証

3.1 一般

本会は風車(製品)に対して基準に適合しているかどうかを評価して、型式認証を提供する製品認証機関として活動しているが、製品認証機関たるものに要求される基準として、JIS Q 17065(適合性評価—製品、プロセス及びサービスの認証を行う機関に対する要求事項)がある。このJIS Q 17065には認証活動の基盤としてすべきことが定義されるとともに、認証機関として要求される力量などが規定されている。

認証活動の公平性や透明性を確保するために、第三者評価(認証、試験、校正)機関を評価する認定機関が存在しており、本会は公益財団法人日本適合性認定協会により、JIS Q 17065を満足して活動する製品認証機関として評価され、2013年5月9日に認定を取得している。

3.2 認証スキーム

3.2.1 小形風車

本会が小形風車に対して提供する型式認証では、基本的に次の二つの基準を適用している。

(1) JSWTA0001小形風車の性能及び安全性に関する

規格(社団法人日本小形風力発電協会規格)

(2) JIS C 1400-22: 風車の適合性試験及び認証

認証範囲は、「風車本体、制御装置、ケーブル類及び断路器、設置及び運転マニュアル」であり、タワー及び基礎、並びに、系統連系保護機能は認証範囲から除外されている。適用範囲から除外された理由は、風車を設置するサイトの環境条件や電氣的条件などから個別に設計される必要が強いために型式認証としては取り扱いが難しいためである。また、タワー及び基礎は建築基準法が、系統連系保護機能については系統連系規定が基準として適用され、それぞれに審査機関が存在する。ただし、2014年4月1日以降、風力発電設備のタワー及び基礎に関する法規は電気事業法に一元化されているが、引き続き型式認証の適用範囲からは除外している。

JSWTA0001は、日本小形風力発電協会のウェブページ上で公開されており、無償で入手可能である。

3.2.2 大型風車

本会が大型風車に対して提供する型式認証では、基本的に次のいずれかの基準を適用している。Germanischer Lloydとは認証機関名であるが、同ガイドラインは世界で広く活用されているため、同ガイドラインが定める認証スキームを本会でも採用しているケースがある。認証範囲には特に除外はなく、案件毎に依頼者の希望に応じて対応している。

(1) JIS C 1400-22: 風車の適合性試験及び認証

(2) Germanischer Lloyd Guideline for the Certification of Wind Turbines 2010(※以降GLガイドライン2010とする)

3.3 認証モジュール

3.3.1 小形風車

小形風車に対する型式認証のモジュールは、次の(1)から(4)に示すモジュール全てで構成される。本来は設計基準評価のモジュールがあるが、認証の申請を受理する際に申し込みの内容確認及び提出図書の簡易レビューを実施することで設計基準評価を代替しているため、評価モジュールとしては省略している。(1)から(3)の評価は同時並行で進み、これらの評価が完了した後、認証の決定に進むための最終的

な推薦を得るため、本会が外部の専門家や有識者を招いて構成する風車認証委員会を開催して(4)の評価を行う。

(1) 設計評価

(2) 型式試験評価

(3) 製造評価

(4) 最終評価

3.3.2 大型風車

大型風車に対する型式認証のモジュールは、次の(1)から(5)に示すモジュール全てで構成される。JIS C 1400-22を採用する場合と、GLガイドライン2010を採用する場合でモジュール名が異なるが、根本的な内容としては大きく異なることはない。(1)の評価についてまず評価を実施した後、(1)から(4)の評価は同時並行で進み、これらの評価が完了した後、認証の決定に進むため(5)の評価を行う。

(1) 設計基準評価(GLガイドライン2010を採用した場合は省略)

(2) 設計評価

(3) 型式試験評価(GLガイドライン2010を採用した場合は、「プロトタイプ試験」となる)

(4) 製造評価(GLガイドライン2010を採用した場合は、「設計に関連した製造及び据付における要求事項の履行の評価」及び「品質マネジメントシステム評価」となる)

(5) 最終評価

3.4 認証の維持

型式認証では、製品の基準への適合性を評価して認証を発行したら終わりという訳ではなく、認証した製品の設計や製造が無断で変更されていないか、変更される場合にはどのような影響が生じるか、製品として実現されて野外に設置された風車に事故が起きていないかなど、認証した製品について継続的に評価を行うことが規格で要求されている。

3.4.1 型式認証書の有効期間

型式認証書の有効期間は、いずれの認証スキームにおいても5年間と定められている。この5年の期日を超えると、認証書の効力は失効する。このため、認

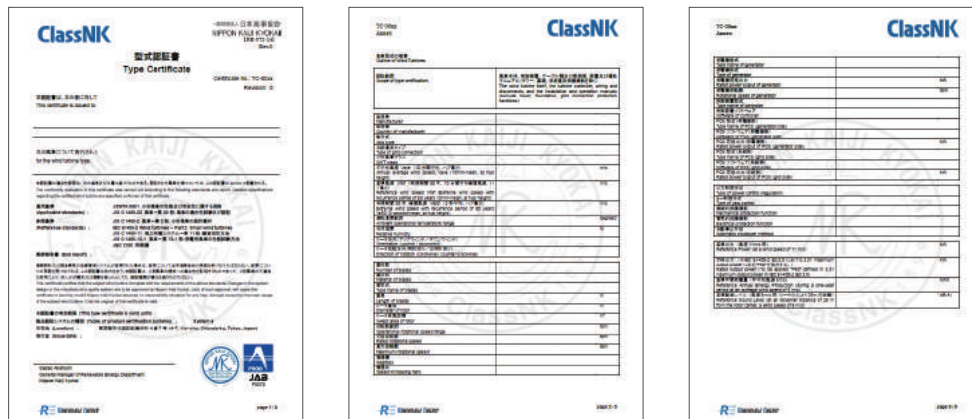


図3 型式認証書の書式(小形風車向け)

証を維持するためには、認証の更新を行う必要がある。小形風車向けの証書の書式を図3に示す。

3.4.2 年次報告とサーベイランス

自社の風車に対して型式認証を取得した製造者は、登録者として本会の認証登録簿に登録される。登録者は、認証された風車に関して、どの程度設置されているかを同定するための風車情報(シリアル番号、製造年月、設置場所、運転状況など)などを含む年次報告書を、認証日を基準として毎年、本会に提出する義務がある。

また、登録者(製造者)は、5年間の認証有効期間に

おいて、特に製造品質管理が維持または向上し、適切に風車を製造していることを確認されることを主たる目的としたサーベイランスと呼ぶ定期的な監査を受検する必要がある。このため、登録者は、適切な時期が来れば、本会にサーベイランス受検のための申請をしなければならない。

このサーベイランス実施の時期は、登録者が製造品質管理に関して、認定認証機関よりISO 9001(JIS Q 9001)の審査を受け、認証を取得しているか否かで異なる。この実施時期について、ISO 9001認証を取得している場合を図4に、ISO 9001認証を取得していない場合を図5にそれぞれ示す。

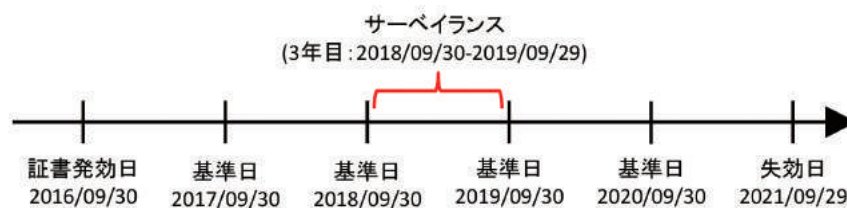


図4 ISO9001認証を取得している場合のサーベイランス実施時期



図5 ISO9001認証を取得していない場合のサーベイランス実施時期

また、定期的ではないサーベイランスとして、臨時サーベイランスを設けている。この臨時サーベイランスは、風車の事故が生じた場合、風車が基準に適合していない可能性を示す何らかの情報が提示された場合、製品に何らかの瑕疵がある場合が、登録者、利害関係者、第三者から本会に報告された場合に実施する。特に事故の場合は、登録者は事故が発生（又は、発生を認識）してから1週間以内に本会へ報告しなければならない。報告された内容によって、本会は認証の一時停止など必要な処置を行う。

3.4.3 認証の変更

認証された風車の設計及び又は製造を変更する場合、本会の承認を得て変更しなければ、変更された風車に対して、型式認証書の効力は失われる。このため、認証の審査における製造評価時（又はサーベイランス時）に、風車の設計及び又は製造に係る変更管理の社内規定に、何らかの変更を製品に反映する前に、その内容を本会に報告し、承認を得た後とする内容を記載しなければ認証を発行しないこととしている。

認証の変更を申請された場合には、変更内容の影響度に応じて本会が必要な評価内容を定める。多くの場合は、風車実機での基準に従った試験計測が要求されることとなる。

3.4.4 認証の一時停止

3.4.2項に記載した臨時サーベイランスの結果を受けて認証を一時停止する処置を行なう場合がある。認証一時停止となった場合、その原因となった事由の解決することが必要であり、解決までの期日を6か月としているが、本会が適当と認める場合には延長することがある。

認証一時停止となると、型式認証書の効力が一時的に失効することとなり、この付帯条件として、登録者に対して新規の風車製品の出荷（工場からの出荷、国内在庫の出荷、新規の建設を含む）を禁じることとなる。これは、認証書の効力を失効させなければいけない状況が生じている風車が、その状況の中でリスクを抱えたまま新たに出荷されることを防ぐ意味合いがある。

3.4.5 認証の失効（終了と取消）

3.4.4の認証一時停止が期日までに解決できない場合、最終的には本会が型式認証を失効させる場合があり、これを認証の取消と呼ぶ。

一方、登録者（製造者）の事情によって型式認証を失効させることを終了と呼ぶ。製造者が型式認証を取得した風車の製造を取りやめた場合、事業を撤退した場合、会社が倒産する場合などが想定される。

認証が失効する場合には、型式認証書本紙の返却や、小形風車の場合には本会が管理のために発行する認証シールの消除（廃棄）、関連する広報媒体等の消除（廃棄）を要求する。

3.4.6 認証の更新

3.4.1項で記述したように、型式認証書の有効期間は5年間であり、以降も型式認証の維持を希望する場合には、認証の更新を行う必要がある。認証の更新については、期日の半年前から申請を受け付けており、適切に申請して必要な文書を本会へ提出し、評価を受けることが必要となる。

一旦認証された風車ではあるが、5年間での認証上の要求事項の変化や、風車の変更などを踏まえ、基本的には3.3節で記載した全ての認証モジュールの評価を改めて実施している。

4. まとめ

風車の型式認証については、一度認証書が発行されればそれで終わりということではなく、それを適切に維持していくという製造者としての責任が果たされて初めて有効なものとなり得ると考えている。特に小形風車の場合は、国内に設置した風車で発生する事故の根本原因はほぼ次の3点に集約されており、多くの事故が発生している。

- (1) 本会の承認を取らずに無断で設計変更を行っている
- (2) 製造時に本会が承認した製造プロセスに従っていない
- (3) 建設時に本会が承認した施工プロセスに従っていない

認証の維持に関する製造者の意識をいかに向上さ

ることができるかという観点での制度の検討が必要な局面となっており、型式認証について適切な維持管理がなされない場合には、より厳しい取り扱いを適用し、例えば型式認証を取消とする条件を新たに設けることも検討している。

前述のとおり、型式認証については、様々な課題を抱えている状況ではあるが、本会としてはこれらの課題を解決していくために、独立した第三者の立場でその役割を果たし、業界の皆様のお役に立てるよう努めて参りたい。

参考文献

- 1) 経済産業省、発電用風力設備に関する技術基準を定める省令(平成九年通商産業省令第五十三号)
- 2) 経済産業省、陸上に設置される発電用風力設備に係る工事計画審査について(平成31年4月4日)
https://www.meti.go.jp/policy/safety_security/industrial_safety/oshirase/2019/4/310404-1.html
- 3) 経済産業省、電気事業者による再生可能エネルギー電気の調達に関する特別措置法施行規則(平成二十四年六月十八日経済産業省令第四十六号)
- 4) 経済産業省 日本産業標準調査会、産業標準化とJIS
<https://www.jisc.go.jp/jis-act/>

風力発電所の工事計画審査への対応

—「ウィンドファーム認証」と「風車支持構造物製造評価」—

岩下 智也

1. はじめに

電気事業法による規制を受ける風力発電所の工事計画審査への対応として、本会ではウィンドファーム認証と風車支持構造物製造評価というサービスを提供している。

ウィンドファーム認証は、日本国内において電気事業法の適用を受ける風力発電所を対象とした認証であり、その対象範囲は、風車及び支持構造物(タワー、基礎もしくは係留設備を含む浮体構造物基礎)としており、2016年に開始して以降、現在まで様々な風力発電所に対して認証を発行している。

また、風車支持構造物製造評価は、平成31年4月から適用されている工事計画届出の技術基準審査フローで要求されることになった風車タワーの製造評価に対応するための新たなサービスである。

本稿ではこれらのサービスについて、その背景も含めてまとめる。

2. 風力発電所の工事計画審査

2.1 電気事業法による規制

風力発電所については電気事業法による規制の対象となっており、発電用風力設備は事業用電気工作物として工事計画届出の義務が課せられている。具体的には、同法第48条により事業用電気工作物の設置又は変更の工事のうち、公共の安全の確保上特に重要なものとして認可を要する原子力発電所等の工事以外の工事であって、なお重要なものを事業用電気工作物設置者が行おうとする場合には、事前に経済産業大臣に当該工事の計画を届け出ることの義務を課しており、当該工事計画の変更についても同様に事前届出の義務を課している。また、電気事業法施行規則 別表第二により、風力発電所の工事に

ついては、出力500kW以上の場合に事前届出が必要とされている。

2.2 技術基準への適合性

前2.1項に示す電気事業法による規制では、事業用電気工作物設置者に対して、第39条によりその事業用電気工作物を経済産業省令で定める一定の技術基準に適合するように義務を課している。この事業用電気工作物が風力設備の場合、発電用風力設備に関する技術基準を定める省令¹⁾が前述の経済産業省令に該当し、これがいわゆる「風技」と呼ばれるものである。この風技については、いわゆる性能要求となっていることから、解釈と逐条解説²⁾の形で詳細な要求事項が公開されている。

2.3 工事計画届出における技術基準審査

前2.1項に示す工事計画の事前届出として、事業用電気工作物設置者は工事計画届を管轄の産業保安監督部に提出しなければならない。その工事計画届には、前2.3項に示す風技の要求事項へ適合していることを示す資料を添付することが求められており、その適合性に係る審査が行なわれる。その審査フローは図1に示す形となっており、「標準設備」もしくは「特殊設備」のいずれかに判定されるかによって、その流れが大きく変わることになる。「標準設備」として判定された場合は、産業保安監督部における審査のみとなるが、「特殊設備」として判定された場合、産業保安監督部から本省での専門家会議での審査に移行することになる。

なお、「標準設備」もしくは「特殊設備」の判定については、経済産業省が公表している発電用風力設備の設置又は変更の工事計画に関する審査実施要領³⁾もしくは工事計画審査フローチャート⁴⁾においてその詳細が規定されている。

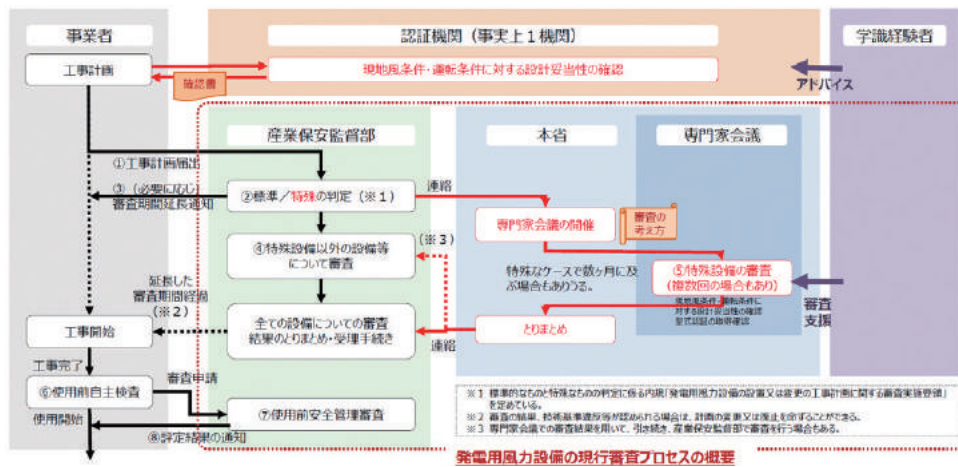


図1 電気事業法に基づく工事計画届出における技術基準審査の流れ⁵⁾

2.4 工事計画届出における技術基準審査における第三者認証の活用

前2.3項に示した工事計画審査フローチャート⁴⁾において、工事計画届出における技術基準審査において第三者認証を活用する形での審査方法が示されている。

陸上風力発電所の場合は、RNA (Rotor Nacelle Assembly) 及びタワーについて型式認証を取得していることが前提条件となっている。さらに、発電所の建設予定サイトの外部環境条件が型式認証を取得する際に設定した設計条件を逸脱する場合、もしくは型式認証を取得した設計から何らかの変更を行なう場合には、特殊設備として判定される。この場合、設計条件の逸脱もしくは設計変更について、第三者認証機関によりサイト条件・運転条件に対して設計評価を行いその結果が妥当であることが示された結果を提出すれば、専門家会議においてその結果が活用され審査がスムーズに進む形となる。また、タワーについては、型式認証を取得した設計からの逸脱がある場合は、第三者認証機関による設計評価に加えて製造評価も併せて行い、製造評価の結果を使用前安全管理審査までに報告することが求められている。

本会のウィンドファーム認証はこの第三者認証を活用した審査方法に完全に対応するものであり、陸上風力発電所については、これまでに60件以上の認証実績があり、工事計画届出における技術基準審査の迅速化に寄与している。また、特にタワーについては、型式認証を取得した設計から変更する場合には、

ウィンドファーム認証における設計評価に加えて、製造評価の実施も要求されていることから、それに対応するサービスとして風車支持構造物製造評価を提供している。

3. ウィンドファーム認証

3.1 認証の対象及びその目的

ウィンドファーム認証とは、支持構造物を含む1基又は複数の特定の風車が特定のサイトに関する要求事項に適合していることを本会が書面を発行して証明する手続きのことで、本会が発行しているガイドライン⁶⁾で規定されるプロジェクト認証のうち設計評価に係る要求事項のみを対象としている。原則として日本国内において電気事業法の適用を受け1基又は複数の風車を設置する出力が500キロワット以上の風力発電所を対象とし、認証の対象範囲は風車及びその支持構造物(タワー、基礎もしくは係留設備を含む浮体構造物)としている。

ウィンドファーム認証の目的は、型式認証された風車(この場合はタワーも含む)及び支持構造物の設計が、外部条件及び電気事業法に基づく要求事項に適合しているかどうかを評価することであり、型式認証を取得していない風車を採用する風力発電所に対してウィンドファーム認証を発行することは原則として認められない。

なお、本会は公益財団法人日本適合性認定協会から風力発電システムを認証するJIS Q 17065:2012

(ISO/IEC 17065IDT)による製品認証機関として認定を受けており、その認定範囲として小形風車／大型風車の型式認証に加えてウィンドファーム認証も含まれている。認定書等については公益財団法人日本適合性認定協会のホームページ⁷⁾で公開されている。

3.2 認証モジュール

3.2.1 全般

ウィンドファーム認証のモジュールは、型式認証された風車に対し、原則として次の(1)から(5)に示すモジュール全てで構成される。それぞれのモジュールの関係を図2に示す。

- (1) サイト条件評価
- (2) 設計基準評価
- (3) 全体荷重解析
- (4) 風車(RNA)設計評価
- (5) 支持構造物設計評価

3.2.2 陸上風力発電所の場合

対象とする風力発電所が陸上に位置する場合は、前3.2.1項によらず次の(1)から(3)のモジュールとすることができる。この場合のモジュールの関係を図3に示す。また、特殊設備に該当する項目及び申請者の希望に応じて全てのモジュールを実施するか、一部のモジュールのみを実施するかを指定することができる。

- (1) サイト風条件評価
- (2) 風車(RNA)設計評価(設計基準評価及び全体風荷重解析を含む)

(3) 支持構造物設計評価(サイト条件評価、設計基準評価及び全体荷重解析を含む)

3.2.1項に示す認証モジュールがウィンドファーム認証の基本体系であり、これは陸上・洋上を問わず適用することができる。ただし、洋上風力発電所の場合は全てが特殊設備に該当することになるのに対し、陸上風力発電所の場合は風車のみ、もしくは支持構造物のみが特殊設備に該当するケースが存在する。このような状況を踏まえ、工事計画審査への柔軟な対応という観点から申請者の利便性を考慮して、本3.2.2項に示す陸上風力発電所向けの体系を用意している。これまでの実績等から、3.2.1項に示す体系が洋上風力発電所向け、3.2.2項に示す体系が陸上風力発電所向けという形で定着していることから、以降の内容は実態に即して便宜的に前述のと通りの定義に従うこととする。

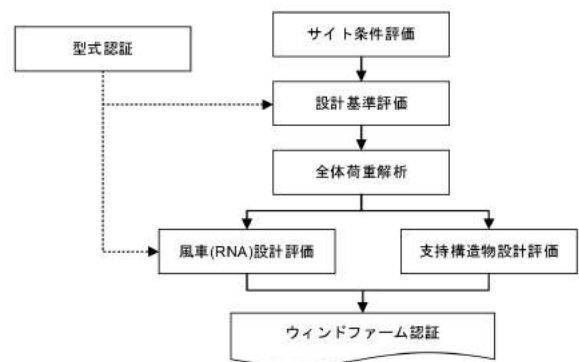


図2 ウィンドファーム認証の評価モジュール

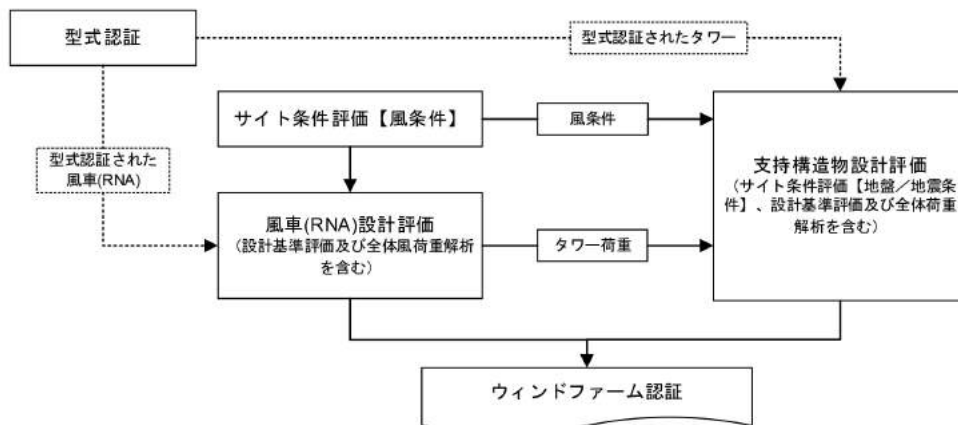


図3 ウィンドファーム認証の評価モジュール【陸上風力発電所の場合】

3.3 審査の概要

3.3.1 適用基準

ウィンドファーム認証の適用基準は、3.1項に示した公益財団法人日本適合性認定協会が定める認定の基準についての分野別指針^{*7}において定められる以下に示す(1)から(8)の基準:規格等としている。ただし、本会が適当と認める場合には、これら以外の国際規格、国家規格、認証機関の規則などについても認証基準として適用することができることとしている。

- (1) JIS C 1400-1: 風車—第1部:設計要件
- (2) JIS C 1400-3: 風車—第3部:洋上風車の設計要件
- (3) 平成9年3月27日通商産業令第53号「発電用風力発電設備に関する技術基準を定める省令」
- (4) 20140328 商局第1号「発電用風力設備の技術基準の解釈について」
- (5) 土木学会「風力発電設備支持物構造設計指針・同解説(2010年版)」
- (6) Germanischer Lloyd (GL) Guideline for the Certification of Wind Turbines 2010
- (7) Germanischer Lloyd (GL) Guideline for the Certification of Offshore Wind Turbines 2012
- (8) JIS C 1400-22: 風車—第22部:風車の適合性試験及び認証(以下、JIS C 1400-22)

3.3.2 審査の流れ

ウィンドファーム認証に係る審査は、「事務局による審査」と「分科会を開催しての専門家による審査」に大別される。風車に係る審査の流れについては図4に示す通りであり、事業者又は風車メーカーより提出された審査資料をまずは本会職員で構成される事務局(以下、事務局)にて審査を行なう。その内容が整った段階で大型風車認証分科会において各分野の専門家より構成される委員に対し事務局が説明する形で審査を行ない、技術基準等への適格が確認されるまで同様の審査を繰り返すことになる。(図4の破線の矢印は必要に応じて大型風車認証分科会を繰り返すことを意味する。)

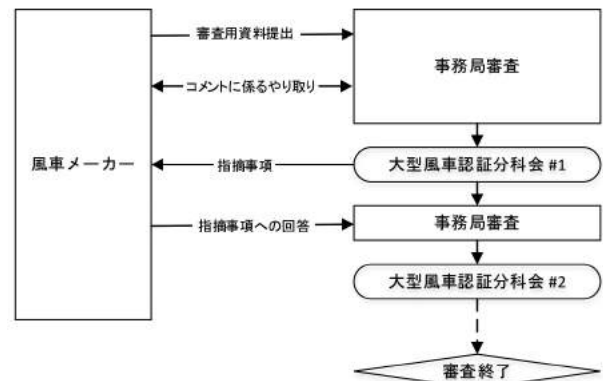


図4 風車に係る審査の流れ

支持構造物に係る審査の流れについては図5に示す通りであり、事業者・支持構造物設計会社・風車メーカーより提出された審査資料に基づいて、まずは特殊設備に該当する項目を中心に支持構造物認証分科会にて審査を行なう。当該分科会では、各分野の専門家で構成される委員に対して、事業者・支持構造物設計会社・風車メーカーが設計に係る説明を直接行う形としており、そこで出された指摘事項に対して次回分科会で回答するということを繰り返すことになる。(図5の破線の矢印は必要に応じて支持構造物認証分科会を繰り返すことを意味する。)分科会での特殊設備に係る審査終了後、事務局において支持構造物の設計計算書全般の審査を行ない、その終了を以って審査完了となる。

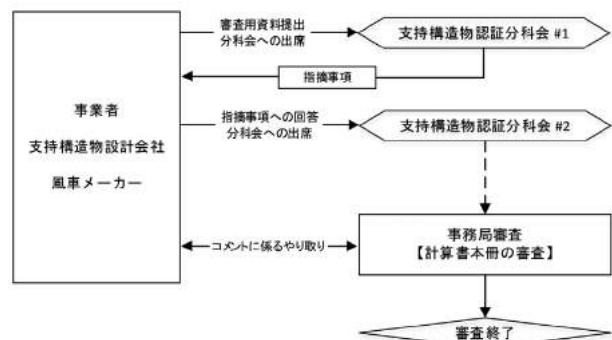


図5 支持構造物に係る審査の流れ

3.3.3 洋上風力発電所の場合

洋上風力発電所の場合、前述のとおり工事計画審査において全てが特殊設備に該当することから、風車及び支持構造物の審査を分割して申請することは認められない。また、特に支持構造物に対しては陸上風力発電所における土木学会指針⁹⁾に相当する詳細な国内基準が整備されていないことから、プロジェクトごとに適用基準をそれぞれ定める形での審査を実施している。このような状況を踏まえて、後戻りを極力減らすという観点から申請者の希望に応じて、事前審査という形でプロジェクトの初期設計の結果を審査するという対応をしている。この事前審査については、3.2.1項に示すモジュールのうち(1)、(2)、(3)及び(5)について、図5に示す支持構造物認証分科会を繰り返す形で専門家による審査を行なう。なお、全ての設計が完了した後に行う本審査については、風車については図4に示す流れに従い、支持構造物については図5に示す流れに従い、それぞれに対応するモジュールに係る審査を行なう。

3.3.4 陸上風力発電所の場合

風車については、3.2.2項に示すモジュールのうち、(1)及び(2)について図4に示す流れに従い審査を行なう。また、支持構造物については、3.2.2項に示すモジュールの(3)について図5に示す流れに従って審査を行なう。

最近の傾向としては、風車メーカー側で実施する空力弾性解析によるタワー荷重をタワー設計に適用する必要があるため、当該解析の入力条件となるサイト風条件の審査を前倒しで行ない、サイト風条件とタワー荷重を確定させた後にタワー及び基礎の詳細設計を行うという流れができつつある。

3.4 認証文書

3.4.1 洋上風力発電所の場合

3.2.1項に示す評価モジュールに従い、3.3項に示した審査を行った結果、風車及び支持構造物の設計が認証基準に適合していることが確認された場合、審査実施項目に応じて、次の(1)から(5)に示す認証文書を発行する。

(1) ウィンドファーム認証書

- (2) サイト条件評価適合証明書及び認証評価報告書(サイト条件評価)
- (3) 設計基準評価適合証明書及び認証評価報告書(設計基準評価)
- (4) 全体荷重解析適合証明書及び認証評価報告書(全体荷重解析)
- (5) 風車設計評価適合証明書及び認証評価報告書(風車設計評価)
- (6) 支持構造物設計評価適合証明書及び認証評価報告書(支持構造物設計評価)

3.4.2 陸上風力発電所の場合

対象とする風力発電所が陸上に位置する場合、3.2.2項に示す評価モジュールに従い、3.3項に示した本会での審査を行った結果、風車及び/又は支持構造物の設計が認証基準に適合していることが確認された場合次の(1)から(4)の全てか、(2)から(3)の組み合わせのいずれかによる認証文書を発行する。適合証明書及び認証評価報告書のサンプルを図6に示す。

- (1) ウィンドファーム認証書
- (2) サイト条件評価適合証明書及び認証評価報告書(サイト風条件評価)
- (3) 風車設計評価適合証明書及び認証評価報告書(風車設計評価)
- (4) 支持構造物設計評価適合証明書及び認証評価報告書(支持構造物設計評価)



図6 認証文書のサンプル
(左:適合証明書、右:認証評価報告書)

3.4.3 認証文書の有効期限

3.4.1項及び3.4.2項に示す認証文書については、原則として有効期限を定めない。ただし、本会が特に認める場合に限っては、未解決事項を付してその対応期限を設けることで認証文書を発行する場合があります。その場合、認証文書の効力は当該期限までとなり、期限までに必要な対応がなされない場合は認証を取消すことになる。

4. 風車支持構造物製造評価の概要

4.1 評価の対象及びその目的

風車支持構造物製造評価とは、電気事業法の適用を受け1基又は複数の風車を設置する、出力が500キロワット以上の風力発電所を対象とし、その工事計画届の受理にあたり要求される風車支持構造物の製造評価を対象としている。評価対象とする風車支持構造物については、建設予定地の現地サイト条件に基づく設計が適切に行われており、その内容について本会によるウィンドファーム認証を取得しているか、もしくは第三者機関による設計評価が完了していることが前提となる。なお、ここでいう風車支持構造物とはタワーのみに限定しておらず基礎もその対象としている。

4.2 製造評価の実施内容

4.2.1 実施項目

風車支持構造物に対する製造評価の実施項目として次の(1)から(6)に示す項目を実施する。それ

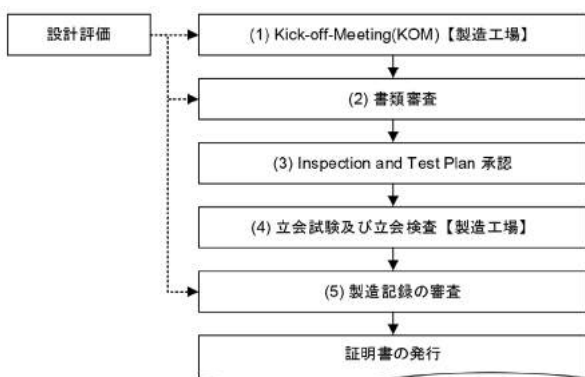


図7 製造評価の実施項目及びそのフロー

ぞれの項目の関係を図7に示す。なお、評価対象によっては項目が追加される場合もあることに留意が必要である。

- (1) Kick-off-Meeting(KOM)
- (2) 書類審査
- (3) Inspection and test plan(ITP)の承認
- (4) 立会試験及び立会検査
- (5) 製造記録の審査

4.2.2 証明書の発行

4.2.1項に示す実施項目に対する審査・評価結果に問題がないことが確認された場合、本会は評価対象物に対してそれぞれ証明書を発行する。発行する証明書のサンプル(評価対象物:タワー)を図8に示す。

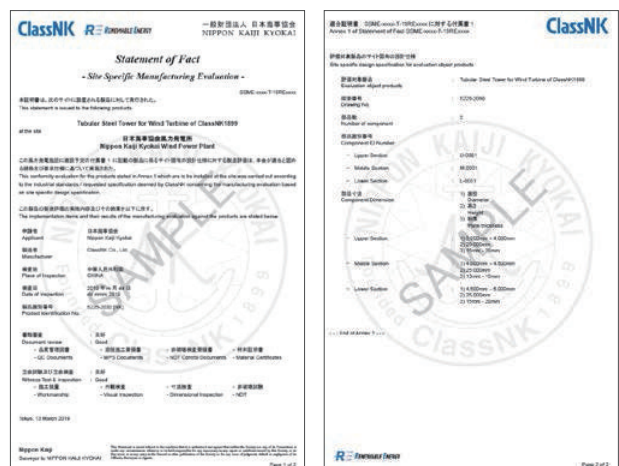


図8 証明書のサンプル

5. まとめ

電気事業法による規制を受ける風力発電所の工事計画審査への対応として、本会が提供するサービスのうち、ウィンドファーム認証と風車支持構造物製造評価についてその背景も含めてまとめた。なお、これらのサービスに係る最新情報は本会ホームページにて随時公開しているため、そちらも併せて参照いただきたい。

また、陸上風力発電所に対する工事計画審査について、第三者認証機関による認証の結果を活用することを法的に位置づける形とするための検討が経済産業省で行われている。それを円滑に実施していく

ためには、風技に基づく要求事項の明確化や新規に要求事項を定める場合の透明性の確保など様々な課題があるが、本会としてはこれらを解決していくために、独立した第三者の立場でその役割を果たすことで、業界の皆様のお役に立てるよう努めてまいりたい。

最後に、国が定めるエネルギー基本計画において「主力電源」とすることが明確に示されている再生可能エネルギーのうち、その主役となるべき風力発電が安全かつ効率的に導入されるよう、業界の皆さまと共に様々な課題の解決に取り組んでいく所存である。

参考文献

- 1) 経済産業省、発電用風力設備に関する技術基準を定める省令(平成九年通商産業省令第五十三号)
- 2) 経済産業省商務流通グループ電力安全課、発電用風力設備に関する技術基準を定める省令及びその解釈に関する逐条解説(平成29年3月31日改正)
https://www.meti.go.jp/policy/safety_security/industrial_safety/law/files/fuugikaishakukaisetsu.pdf
- 3) 経済産業省、第15回新エネルギー発電設備事故対応・構造強度WG 資料2-1
https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/hoan_shohi/denryoku_anzen/newenergy_hatsuden_wg/pdf/015_02_01.pdf
- 4) 経済産業省、発電用風力設備の設置又は変更の工事計画に関する審査実施要領(20140328商局第2号、平成26年4月1日)
https://www.meti.go.jp/policy/safety_security/industrial_safety/law/files/160829-1.pdf
- 5) 経済産業省、陸上に設置される発電用風力設備に係る工事計画審査について(平成31年4月4日)
https://www.meti.go.jp/policy/safety_security/industrial_safety/oshirase/2019/4/310404-1.html
- 6) 風車及びウィンドファームの認証に関するガイドライン(日本海事協会、2014年5月)
- 7) 公益財団法人日本適合性認定協会ホームページ
<https://www.jab.or.jp/system/service/product/accreditation/detail/453/>
- 8) 「認定の基準」についての分野別指針
ー風力発電システム:ウィンドファーム、プロジェクター JAB PD366:2017
第2版(公益財団法人日本適合性認定協会、2017年9月27日)
<https://www.jab.or.jp/news/2017/092701.html>
- 9) 風力発電設備支持物構造設計指針・同解説[2010年版](土木学会)

Marine Warranty Survey

— 海洋再生可能エネルギー発電プロジェクトの発展のために —

河口 創生

1. はじめに

本会では第三者機関として、風力発電機や風力発電所に対する認証業務に加え、洋上風力発電プロジェクトにおける洋上施工中の事故リスクを低減しプロジェクトの安全性・信頼性の向上に資するMarine Warranty Surveyのサービスを提供している。

本稿では、Marine Warranty Surveyについてその概要を説明するとともに、本会の取組みを紹介する。

2. Marine Warranty Surveyとは

2.1 Marine Warranty Surveyの役割

Marine Warranty Survey(以下、MWS)とは、事業規模の大きい洋上の石油・ガス生産設備の開発プロジェクト等で一般的に適用されている保険サーベイであり、再保険会社の認定を受けた第三者機関が洋上施工を審査し評価する業務のことをいう。第三者機関が技術的な観点から適切に審査を行い、洋上施工に係わる事故リスクを許容できる水準まで低減することで事業の確実な実施に貢献する役割を持つ。

洋上風力発電所の開発プロジェクトにおいても、洋上での作業になることから事故の発生リスクは決して小さいとは言えず、事故が発生した場合の保険支払い金額も少なくないため、MWSの実施は保険引受の条件として設定されることになる。また、直接の条件とはなっていないが、保険引受がなされることがファイナンス組成の条件となっていることから、MWSの実施は結果的にファイナンス組成の条件にもなるとも言える。

2.2 MWSの概要

MWSでは、洋上施工に関する規格への適合性を確認するという観点での審査・検査を実施する。その一般

的な実施内容は表1に示す通りで、施工設計、解析、計算、作業手順書、マニュアルといった技術文書の確認を行う「書類審査」と、工事に使用する船舶・機器などの事前確認検査や工事中に立会検査を行う「現場立会検査」に分類される。

洋上施工に関する規格としては、Noble Denton社が発行していた規格がデファクトスタンダードとなっていたが、Noble Denton社は2009年にGermanischer Lloyd(GL)に買収され、さらにそのGLが2013年にDet Norske Veritas(DNV)と合併し、DNVGLとなったことから、現在ではDNVGLが発行する洋上施工に関するガイドラインであるDNVGL-ST-N001/N002がMWSにおける適用規格として広く使われている。

また、MWSの対象となる項目については、それぞれのプロジェクトにおいて、発電事業者、施工会社、保険会社及びMWSサーベヤーで合意のもと決定されることになる。一例として、モノパイル基礎の着床式洋上ウィンドファームを想定したMWS対象作業および対象項目は表2に示す。これらの項目のうち、ナセルやブレードなどの風車の構成部品や下部工・基礎などについて、それぞれの製作工場から、プロジェクトの工事用に設定される基地港への輸送については貨物保険にてカバーされることも多いため、MWSの対象項目として含むか否かについては、それぞれのプロジェクトの状況に応じて個別に判断されることになる。

3. ClassNKのMWSの取組み

3.1 ClassNKのMWSへの取組み

本会は数年前より国内の損害保険会社や海外の再保険会社との協議を重ね、Marine Warranty Surveyを実施することができる機関としての認定を目指して体制作りを進めてきた。2016年に初めて浮体式洋

表1 MWSの一般的な実施内容

審査対象	書面審査	現場検査
すべての施工における気象・海象の作業限界を示す図書	○	
気象・海象予報の取得手順	○	
重量物リスト、重量配置図	○	
使用機器、使用船舶、使用手順を示す図書	○	
曳航ルート、曳航計画、燃料補給計画、退避計画を示す図書	○	
積込み計算書、積込み手順書(バラストプラン、岸壁強度、船体強度、復原性計算書(Intact & Damage stability)を含む)	○	
輸送計算書、輸送手順書(ボラードプル試験結果、船体強度、復原性計算書(Intact & Damage stability)を含む)	○	
設置計算書、設置手順書(設置船スラスト能力、船体強度、復原性計算書(Intact & Damage stability)を含む)	○	
設置サイトにおける海底地盤のボーリング等の基礎設置に必要な資料	○	
積出、曳航、設置作業における荷重に対する構造強度の確認	○	
海底ケーブル図面及び敷設関連図(エクスポートケーブル、インターアレイケーブル含む)	○	
海底ケーブル積出及び固縛手順書(エクスポートケーブル、インターアレイケーブル含む)	○	
海底ケーブル敷設及び陸揚手順書(エクスポートケーブル、インターアレイケーブル含む)	○	
海底ケーブル埋設手順書(エクスポートケーブル、インターアレイケーブル含む)	○	
試運転方案、プロジェクト引渡し手順書	○	
適用規則及び推奨規則等	○	
プロジェクトの品質保証・品質管理体制	○	
各種変更時の管理方法を示す文書	○	
プロジェクトのインターフェースや実施体制	○	
使用船舶及び機器の評価	○	
緊急時対応手順書	○	
キックオフミーティングへの参加		○
リスク評価会議への参加		○
作業事前打ち合わせへの参加		○
使用船舶及び機器の状態確認検査		○
基礎、タワー、風車、ケーブルの積出、固縛の確認検査		○
基礎、タワー、風車の輸送の確認検査		○
基礎、タワー、風車の設置の確認検査		○
ケーブルの敷設、埋設、陸揚げの確認検査		○

表2 MWS対象作業および対象項目(例)

対象作業	対象項目
構成部品の製造工場から 基地港への輸送	モノパイル(MP)、トランジッションピース(TP)の積出し+固縛、輸送、陸揚げ タワー、ナセル、ブレードの積出し+固縛、輸送、陸揚げ
陸上での組立作業	タワーの組立(ボルト接続作業含む)
積出し	MP、TP、グラウト材の積込み+固縛
	タワー、ナセル、ブレードの積込み+固縛
	海底ケーブル積込み+固縛
洋上輸送及び洋上設置	MP、TP、グラウト材の輸送及び設置
	タワー、ナセル、ブレードの輸送及び設置
	海底ケーブルの輸送
洗掘防止工	洗掘防止材の積込み+固縛、輸送、設置
海底ケーブル敷設	海底ケーブル敷設、基礎内引留め、海底ケーブルの陸揚げ、ケーブル防護(埋設)

上風力発電設備の建設工事に対してMWSを実施し、それを当初の予定通り完了することができたことから、同年に再保険会社であるCodan社及びSwiss Re社から主に東アジア地区におけるMarine Warranty Surveyの実施機関として認定された。その後、同じく再保険会社であるGCube社、Canopius社からも同様の認定を受けている。

本稿執筆時点において、合計2件のプロジェクトに対するMWSを実施した実績があるが、その際には適用する規格としては、Noble Denton規格を採用してきた。しかし、前述のとおりNoble Denton規格がDNVGLガイドラインに変わってしまったこと、またそのDNVGLガイドラインは欧州の状況に基づいて作成されたものであり、日本国内の状況と照らし合わせると必ずしも合理的とは言えない要求事項となる場合があることなどから、日本国内の状況に則したガイドラインを策定して欲しいとの関係者の皆さまからのご要望が多数寄せられた。このような状況を踏まえて、本会独自のガイドラインの策定に向けて目下その作業中である。この本会独自のガイドラインについては後述する。

3.2 ClassNKのMWSの実施実績

本会が実施したMWSのうち、浮体式洋上風力発電の実証事業の建設工事において実施したMWSの内容について簡単に紹介する。

3.2.1 福島浮体式洋上ウィンドファーム実証研究事業

福島浮体式洋上ウィンドファーム実証研究事業における「ふくしま浜風」の建設工事において本会として初めてとなるMWSを実施した。

本プロジェクトのMWS対象工事は、①浮体のみの曳航、②風車搭載後の浮体の曳航、③係留工事であった。①の浮体のみの曳航は、浮体を起重機船で吊りながら曳航する特殊な吊り曳航となったが、曳航中の浮体は非常に安定しており、かつ天候にも恵まれたことから問題なく完了した。②風車搭載後の浮体の曳航は、図1に示すように前方には主曳航船1隻と補助曳航船2隻、後方には補助曳航船1隻と合計4隻による大船団で約10日間の曳航となったが、終始天候に恵まれ特に問題なく現地サイトへ予定通り到着した。③係留工事については、約10日間の作業中に悪天候のため作業船が港へ退避しなければならない状況が発生するなど、予定通りとはならない場面もあったが、安全に十分配慮しながら、かつ工事スケジュールの遅延を少しでも削減することの両立の図りながら、係留工事に対するMWSを実施した。全体を通じては、総じて天候に恵まれたこともあり、事前に承認した作業手順から逸脱してしまうようなリスクの高い状況は発生せず、安全かつ確実な工事が実施された。



図1 現地サイトへの曳航の様子(筆者撮影)

3.2.2 次世代浮体式洋上風力発電システム実証研究 (バージ型)

NEDOによる次世代浮体式洋上風力発電システム実証研究(バージ型)で建設された「ひびき」においてMWSを実施した。MWSの対象工事は、①係留設備の把駐力試験、②海中電柱建設工事、③浮体の洋上輸送、④浮体への風車搭載工事、⑤風車を搭載した浮体の曳航、⑥浮体への係留接続、⑦海底ケーブルの敷設船への積み込み・輸送・敷設・引込みであり、浮体式洋上風力発電設備に対するMWSとしては、全ての項目を網羅する形となった。

係留設備の把駐力試験においては、使用するアンカーを変更するといった当初の計画からの変更や、浮体への風車搭載工事の予定時期に台風の襲来を受



図2 風車搭載の様子(筆者撮影)

けるといったこと、洋上でのケーブル敷設中に警報が発令されるレベルの大雨に見舞われるなど、思わぬ状況に遭遇することもあったが、その都度、工事に係る現場責任者と建設的な協議を重ねてリスクを低減させることを一義的な目的としてMWSを実施した。

3.3 ClassNKが実施するMWS

MWSを適切に実施し、工事のリスクを想定範囲内に収めるためには、現場における関係者間の綿密なコミュニケーションが最も重要である。当然のことながら、事前に承認した作業手順通りに現場作業を行うことができれば、事故が発生する可能性は著しく低くなる。しかしながら、現場での工事には前述のような計画変更や、天候による影響を受けて工事の手順を変更せざるを得ないなどの状況は必ず発生する。その場合には、工事に係る現場責任者とMWSを実施するサーベヤーとの間での意思疎通と、認識の共有が不可欠であり、それらが適切に確保されてはじめてMWSの役割のひとつである第三者としての冷静な目で現場に立会い、リスク許容範囲を超えることのない作業となるようなチェックを実施することができる。

本会は、国内に根ざしたMWS実施機関として、現場での工事関係者との間での日本語による意思疎通と、認識の共有ができるという点を大切にしていきたいと考えている。

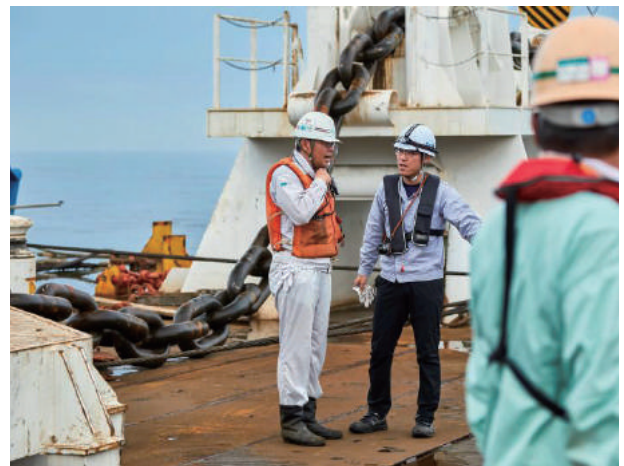


図3 現場責任者(左)とMWSサーベヤー(右、筆者)の協議の様子

3.4 ClassNK-MWSガイドライン策定

3.4.1 ガイドライン策定の方針

本会が独自に策定するMWSガイドラインは、欧州で広く適用されているDNVGLガイドラインを否定するものではなく、それを参考にしつつ、日本の法規、文化、慣習に則した内容とすることを目指している。初版では、日本の海域に設置されるモノパイル基礎の着床式洋上風力発電所の建設工事を対象とするが、着床式のジャケット基礎や浮体式に対応する内容を順次加えていく予定である。

MWSガイドライン策定は以下の方針にならって開発を進めている。

- ・ DNVGLガイドライン“DNVGL-ST-N001及びDNVGL-ST-N002”のうち、日本の海域に設置されるウィンドファームに適用できる要件を原則として踏襲することとする。(石油・ガス開発向けの要求事項や欧州特有の要件は削除する。)
- ・ 前項において踏襲することにした要件であっても、リスクコントロールのレベルは維持しつつ、日本の状況に即した形に編集する。
- ・ 必要に応じて、国内法規(クレーン則、船舶のクレーン関連規則等)を取り込む。また、DNVGLガイドラインで明確になっていない部分についても、日本の状況(台風、地震等)を考慮した要件を盛り込む。

3.4.2 欧州と日本の主な相違点

ガイドラインの策定においては、欧州と日本との違いを理解することが重要であり、その相違点の主

なポイントは以下のとおりであると考えている。

- ・ 作業中止基準に係る考え方
- ・ 吊り作業におけるスリングやシャックルの安全係数の考え方
- ・ タグボートのボラードプルの考え方
- ・ バージ(非自航の起重機船などのクレーン船も含む)の船舶としての取扱い
- ・ 復原性要件の取扱い
- ・ DP(Dynamic Positioning)についての取扱い

これらの相違点を踏まえた上で、いかに安全を担保しつつ日本の状況に則したものとできるかが課題であり、この課題を解決すべく、国内の関係者と協議を重ねながら策定作業を進めている。また、本会は船舶の検査を実施する船級協会でもあり、船舶関連の検査については熟知している。その知見と経験を活かして、工事に使用する機材や船舶などの事前の状態確認検査については、独自の検査要件を定めることとしている。

3.5 さいごに

今後日本国内で多数計画されている洋上風力発電プロジェクトにおいて、本会が策定する日本国内の状況に適したガイドラインに基づくMWSを実施することで、合理的な要求事項による適切なリスクコントロールを行い、安全かつ確実な洋上施工の実現を目指している。本会のこれらの取組みが洋上風力発電の普及に少しでも寄与することになれば幸いである。

定期安全管理審査制度への取り組み

中村 誠

1. はじめに

現在、国内には1基当たりの発電出力が500kWを超えるいわゆる大型風車が2,200基以上設置されており、設備容量は350万KWに達している。^(※1)

そのような中、2013年3月12日に京都府の太鼓山風力発電所で発電機を搭載したナセル部分とブレードが落下する事故が発生した。破損状況から、事故原因として風車を支えるタワーの鋼板溶接部の製造不良による疲労破断が疑われたが、事故調査委員会及び東京大学の詳細調査・研究により、真の原因はナセル部分とタワーとを接続するボルトの整備不良であることが判明した。^{(※2)、(※3)}

2013年には、他にもナセルやブレードを含むロータ部分落下する事故が相次いだため、これらの事故を重く見た経済産業省が風車発電設備に発生したトラブルを調査分析した結果、多くの場合、運転中の保守点検の不備にその原因があることがわかった。

諸外国と比較して複雑な地形が風に影響し、また、毎年台風等が襲来するという厳しい自然環境条件があるため、日本固有の条件に見合った設計、メンテナンスが重要となる。そのため、国は電気事業法を一部改正し、火力や水力発電設備の発電事業者に課している定期点検が正しく実施されていることを国が審査

する「定期安全管理審査制度」を風力発電設備にも義務付けることになり、2017年度4月から施行された。

日本海事協会は、経済産業大臣から定期安全審査機関としての登録を受け、2018年2月から活動を開始した。本稿では、当部が実施する風力発電設備の定期安全管理審査制度について簡単に紹介する。

2. 定期安全管理審査制度

定期安全管理審査とは、電気事業法第55条に従って、発電事業者が所有する発電設備に対して定期的実施している自主検査(定期事業者検査)の実施体制について、国が行う基準適合性確認審査のことを言い、経済産業大臣の承認を受け登録された審査機関が国に代わって実施するものである。

風力発電設備に対しては、単機出力500kW以上の発電設備の、特にブレード(翼)、ロータ、ナセル、タワー(塔体)、基礎部、非常用電源装置等について、電気事業法及び保安規程の定めにした点検整備が行われていることを確認する。

審査項目は合計42(細項目で約90)あり、自主検査記録の確認と目視による現地確認を行う。他に可能ならば確認すべき9つの推奨確認項目が設けられている。また、自主検査が確実に実施するに必要な組織

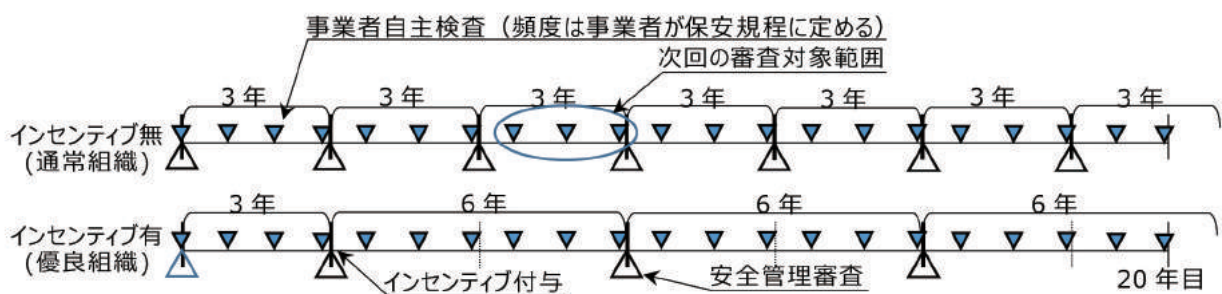


図-1 安全管理審査の周期

のマネジメント能力の確認も併せてなされる。

定期安全管理審査の頻度は3年ごととなっており、前回実施した安全管理審査日以降に実施された事業者検査全てが審査対象となる。風力発電設備を廃止しない限り、継続的に受審することが必要である。従って、ごく少数の発電設備を運用している小規模な発電事業者や短期間で担当者が代わるような公共事業体にとっては負担の大きい制度となるが、タービンブレードが外部に露出しており、風の流れに応じてタービンの回転数が変動しようとする等、他の発電設備には見られない特徴を多く有しており、安全に対する維持管理についてはこれまでの発電設備の経験だけではカバーしきれない特段の配慮が必要である。

一方、事業者が自ら行う検査の実施体制が十分に維持されており、かつ、継続的に適切な検査が実施されていると評定された場合、それが維持されることを前提にインセンティブが与えられ、次回から審査

の周期を6年に延ばすことが可能になっている。これにより、通常、風車の設計上の供用期間は20年であるから、インセンティブを受けている組織は、少なくとも20年の間に4回の定期安全管理審査を受審することになる。(図—1)

3. おわりに

本会は登録審査機関として2018年2月から活動を開始した。これにより、立地計画から保守点検に到るまでの全てのプロセスに対して審査を実施する体制を整えたといえる。風力発電設備に関する各種認証審査の実績により、風力発電設備及び立地に対する審査能力や具体的な情報を有していることから、ほかのどの審査機関よりも発電事業者にとって有益な安全管理審査を実施できる組織であることを強調して発電事業者に向けPRしているところである。

参考文献

- (*1) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構データベース
「日本における風力発電設備・導入実績」(<https://www.nedo.go.jp/library/fuuryoku/index.html>)
- (*2) 石原 孟 他、太鼓山風力発電所の風車タワー疲労破断の原因解明について
(第36回風力エネルギー利用シンポジウム、2014)
- (*3) 京都府、京都府太鼓風力発電所3号機ナセル落下事故報告書、2013
(http://www.meti.go.jp/committee/sankoushin/hoan/denryoku_anzen/newenergy_hatsuden_wg/pdf/001_03_02.pdf)

海洋再生可能エネルギー発電システム 認証の動向*

佐々木 千一

1. はじめに

日本海事協会(通称“ClassNK”)は、1899年創立の船級協会(船舶の認証機関)である。船舶以外の認証としては、2011年より(洋上を含む)風力発電システムの認証サービスを開始し、2016年より風力以外の海洋再生可能エネルギー発電システムの認証サービスを開始した。海洋再生可能エネルギー発電システムの認証は、国際標準または国内標準に基づく任意の認証である。ただし、洋上浮体式風力発電システムの場合は、日本では船舶安全法が適用となるので、認証においては国内法規を考慮している。

本稿では、海洋再生可能エネルギー発電の現在の開発状況、関連する標準及び認証の動向について紹介する。

2. 海洋再生可能エネルギーとは

2.1 海洋再生可能エネルギー

海洋再生可能エネルギーとは、再生可能エネルギーのうち海洋がもつエネルギー資源であり、一般に洋上風力、波力、潮汐力・潮流、海流、海洋温度差、塩分濃度差によるエネルギーを指す。ただし、狭義に解釈し、洋上風力を除いて海洋再生可能エネルギーという場合もある。

再生可能エネルギーというと、一般には太陽光、風力、地熱等が知られているが、これらは陸上で活用できるエネルギーであり、実際には未だに十分活用できていない再生可能エネルギーが海洋に潜んでいる。日本の国土は狭いというのが一般的な認識であるが、排他的経済水域(EEZ、図1参照)で見れば、日本は世界第6位の広さを有する。

エネルギー問題に直面しているなか、日本にとってはこの豊富な海洋資源エネルギーの有効活用が急



出典:海上保安庁海洋情報部Web site
>海の情報>日本の領海等概念図

図1 日本の排他的経済水域

表1 日本の海洋再生可能エネルギー貯存量

波力	潮流、海流	海洋温度差	洋上風力
195GW	22GW(潮流) 205GW(海流)	904GW	1,570GW

出典:NEDO平成22年度「海洋エネルギー・ポテンシャル把握のための業務」報告書

参考)日本の全電力発電容量:約200GW

務となっている。

日本の海洋再生可能エネルギー賦存量(エネルギーポテンシャル)を表1に示す。この表によれば、洋上風力エネルギーの賦存量が多いことが顕著であるが、日本の全電力発電容量が約200GWであることを考えれば、他の海洋エネルギーであっても有効活用できればある程度の電力需要を賄える可能性があることがわかる。

陸上及び海洋の再生可能エネルギーを導入する上

*本稿は、著者が技術雑誌「スマートグリッド」2017年10月号に掲載した原稿を修正し、最新情報を加えたものである。

では、スマートグリッドの構築が重要である。太陽光や風力では、その発電量が気候や天候に左右される。海洋再生可能エネルギーの発電量も一般に海象条件に左右されるが、太陽光や風力とは不安定となる時期や時間帯が異なるため、これらと組み合わせることにより、より安定した電力供給が期待できる。

海洋再生可能エネルギーの利用形態としては、ほとんどが発電であり、海洋再生可能エネルギー発電は一般に次のように分類される。

- ・洋上風力発電
- ・波力発電
- ・潮汐力・潮流発電
- ・海流発電
- ・海洋温度差発電
- ・塩分濃度差発電

なお、潮流発電は、1日に通常2回起こる潮の満ち引きによる海水の流れを利用した発電であり、一方、海流発電は、親潮や黒潮等の海水の定常的な流れを利用した発電である。

2.2 海洋再生可能エネルギー発電の現状

海洋再生可能エネルギーのうち、洋上風力については2011年度から国の実証プロジェクトが開始された。現在はほとんどのプロジェクトが完了しており、特に洋上着床式の風力発電は、2019年以降 大規模なウィンドファーム(実機)が建設される予定となっている。

一方、波力や潮流・海流等の海洋エネルギーは、国の実証プロジェクトにより実現性を検証している段階である。日本では経済産業省、NEDO(新エネルギー・産業技術総合開発機構)、環境省、文部科学省などのプロジェクトにおいて、海洋エネルギー関連事業が積極的に進められるようになった。

洋上風力を除き、現状における主要な海洋再生可能エネルギー発電システムの開発状況を以下に示す。

- (1) 波力発電: ブイ型(浮体式)、防波堤設置型など種々の形態の発電システムが開発されている。
- (2) 潮流・海流発電: 橋脚設置型、海底設置型(着床式)、浮体式、水中浮遊式など種々の形態の発電システムが開発されている。

- (3) 海洋温度差発電: 日本の設置海域は温度差が大きい沖縄に限定される。インドネシア等への輸出に向けて大型の発電プラントが開発されている。

日本では、波力、潮流、海流及び海洋温度差を利用した発電システムが主流となっている。波力や潮流の発電システムは、防波堤や橋脚のような港湾施設に設置される場合があるが、これは設置コスト及びメンテナンス費用の低減化を図ることができるためと考えられる。波力及び潮流・海流発電ではユニット単体の発電量はそれほど大きなものではなく、複数台(アレイ)の合計でMWクラスの出力とすることが多い。これとは反対に、海洋温度差発電においてはユニット1基の大型化を図り、高出力とするのが一般的である。

3. 海洋再生可能エネルギーに関する標準類と動向

3.1 国際標準の動向

海洋再生可能エネルギー発電に関する国際標準は、国際電気標準会議(International Electrotechnical Commission: IEC)で開発されている。IECの体制を図2に示す。IECでは、標準管理評議会(Standards Management Board: SMB)及び適合性評価評議会(Conformity Assessment Board: CAB)の2つの評議会においてそれぞれ技術基準及び認証基準の開発・整備を行っている。前者は技術委員会(Technical Committee: TC)を設置し、国際標準(International standard: IS)及び技術仕様書(Technical specification: TS)等を開発しており、後者は型式認証、プロジェクト認証等の認証システムを開発している。

2007年、IECは国際海洋エネルギー変換器標準化委員会(IEC/TC114)をSMBの下に組織し、これ以降 海洋エネルギー関連の技術基準は当該委員会で開発が行われてきた。IEC/TC114の活動に対し、日本国内では一般社団法人電気学会が国内審議団体となって対応している。電気学会の下に電源開発株式会社が事務局となってIEC/TC114国内委員会を組織し、国際標準案の審議等を行っている。

一方、認証システムは、既存のIECEE(電気部品)、

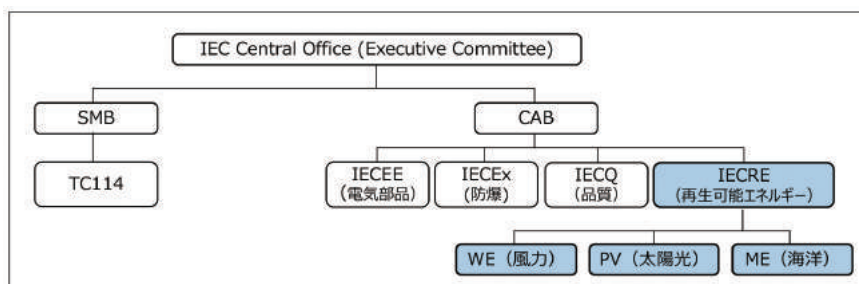


図2 IECの体制

IECEx(防爆)及びIECQ(品質)と横並びでCABの下にIECRE(再生可能エネルギー)を設置し、さらにIECREの下にWE(風力)、PV(太陽光)及びME(海洋エネルギー)というセクターを設置して開発することとなった。日本国内では、IECの活動(再生可能エネルギー: IECRE)に対して日本工業標準調査会(JISC)が国内審議団体となって対応している。JISCの下に一般社団法人日本電機工業会(JEMA)を事務局として2014年からIECRE国内審議委員会を組織し、当該委員会の中でME(海洋エネルギー)への対応を行っている。

標準の開発状況等について以下に示す。TC114では、海洋エネルギーとして波力、潮流、河川流及び海洋温度差のエネルギーを取り上げている。日本の黒潮やメキシコ湾流のような海流は、潮流と類似する部分もあるが、今のところスコープ外となっている。現在策定中の規格及び既に発行済の規格を図3に示す。

図3の規格のうち、発行済の規格のタイトルを表2に示す。波力発電や潮流発電の性能に関しては、それぞれIEC/TC 62600 100シリーズ及び200シリーズで発電性能評価と資源量評価に関する技術仕様書が発行済みである。

発電システムの設計については、IEC/TS 62600-2が既に発行済みである。また、海洋温度差発電の設計については、IEC/TS 62600-20 “General guidance for design and analysis of an Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC) plant”が2019年に発行の予定となっている。

一方、海洋エネルギー発電システムの認証については、図2のMEの下で次の内容を規定した運用規則(Rules of Procedure)を策定している。

- ・ 認証機関及び試験機関の定義、資格等
- ・ 認証機関及び試験機関の相互査察 (Peer assessment)

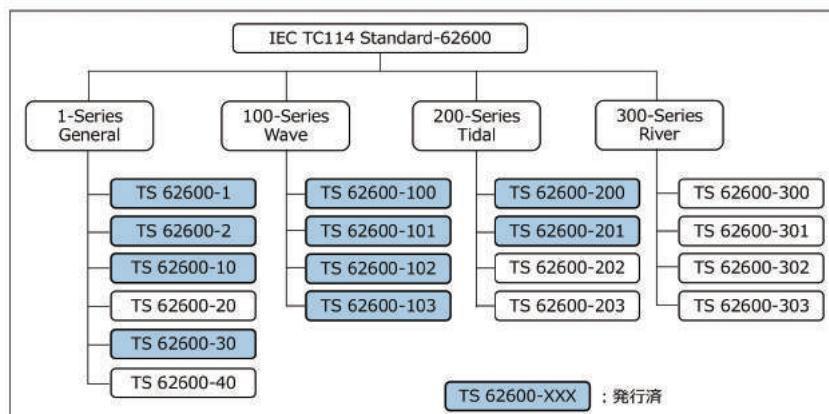


図3 海洋エネルギー発電に関する国際標準

表2 発行済の国際標準

規格番号	タイトル
IEC/TS 62600-1	Terminology 用語集
IEC/TS 62600-2	Design requirements for marine energy systems 海洋エネルギーシステムの設計要件
IEC/TS 62600-10	Assessment of mooring system for marine energy converters (MECs) 海洋エネルギー変換器の係留設備評価
IEC/TS 62600-30	Electrical power quality requirements 電力品質要件
IEC/TS 62600-100	Power performance assessment of wave energy converters 波力エネルギー変換器の発電性能評価
IEC/TS 62600-101	Wave energy resource assessment and characterization 波力エネルギー資源量評価
IEC/TS 62600-102	Wave energy converter power performance assessment at a second location using measured assessment data 波力エネルギー変換器の他地点での性能評価
IEC/TS 62600-103	Guidelines for the early stage development of wave energy converters - Best practices and recommended procedures for the testing of pre-prototype devices 波力エネルギー変換器の初期開発ガイドライン-試作機の試験のための最良慣行及び推奨手順
IEC/TS 62600-200	Power performance assessment of tidal energy converters 潮流エネルギー変換器の発電性能評価
IEC/TS 62600-201	Tidal energy resource assessment and characterization 潮流エネルギー資源量評価

- ・部品認証、型式認証、プロトタイプ認証及びプロジェクト認証等の定義

試験機関と認証機関の位置づけについては、認定された試験機関は海洋エネルギー発電システムの発電性能等の試験を行い、試験報告書を作成する。また、認定された認証機関は、設計評価に加え、試験機関が作成した試験報告書のレビュー等を行い、型式認証書等の証明書を発行することになる。認証の対象は、現時点では、波力、潮流及び河川流の発電システムについて規定することとしており、海流発電や海洋温度差発電は含まれていない。これらに関する認証基準の策定は将来的な課題となっている。

3.2 国内標準の動向

技術基準に関する管轄官庁の動向としては、国土交通省海事局からの委託により、一般財団法人日本船舶技術研究協会が主催する委員会(2014年度から3年計画)の下で次の安全ガイドラインが策定された。

- ・浮体式波力発電施設安全ガイドライン
- ・浮体式潮流・海流発電施設安全ガイドライン
- ・浮体式海洋温度差発電施設安全ガイドライン

本会においても、上記と同様の技術基準に関するガイドラインを策定中である。上記のガイドラインとの違いは、本会のガイドラインでは浮体式に限定せず、(海底)着床式や港湾施設に設置される発電システムに関する技術基準を含む点にある。

一方、認証機関が発電システムの型式認証やプロジェクト認証を行う上では、認証に関するガイドラインも必要となる。本会は次に示す認証に関するガイドラインを策定しており、一部のガイドラインは既に発行している。

- ・波力発電システムの認証に関するガイドライン(2015年12月発行)
- ・潮流・海流発電システムの認証に関するガイドライン(2015年12月発行)
- ・海洋温度差発電システムの認証に関するガイドライン(策定中)

4. 認証の動向

海洋再生可能エネルギー発電システムの一般的な製品開発プロセスを図4に示す。発電システムは、一般にプロトタイプ開発、水槽試験、実証試験（縮小スケール及び/または1/1スケール）というプロセスを経て実機（商用機）を建設することになる。国のプロジェクトにおける実海域試験は、この実証試験に対応する。

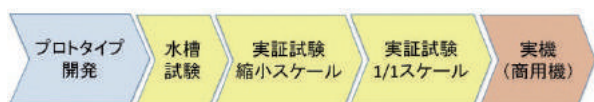


図4 製品開発プロセス

発電システムの認証は、一般に実海域試験及び実機建設のときに必要となり、実海域試験のときにはプロトタイプ認証または型式認証が、実機建設のときにはプロジェクト認証が要求される。このうち、現在日本で実施されている認証のほとんどはプロトタイプ認証である。プロトタイプ認証は次の要素で構成され、実海域試験が行われる前に認証書が発行される。

- ① サイト条件評価
- ② 設計標準評価及び設計評価
- ③ 製造評価
- ④ 実証試験計画書の評価

また、認証申請者から要望があった場合、本会は前述の項目③及び④を除き（すなわち、設計に関する項目のみで）、設計評価適合証明書を発行する場合もある。これは国の許認可に関係しており、経済産業省の許認可の際に活用される。

本会は、既に海洋再生可能エネルギー発電システムに対するプロトタイプ認証書発行業務を開始しているが、このような状況は海外の認証機関においても同様である。発電システムの本格的な認証は型式認証（またはプロジェクト認証）であるが、型式認証を取得した発電システムは少ないのが実情である。今後は、プロトタイプ認証取得後、設置サイトでの実証試験で実測データを蓄積し、必要に応じて設計変更を行った上で、型式認証を取得するようになるものと予想される。

5. おわりに

海洋再生可能エネルギー発電設備のうち、洋上着床式風力発電設備については今後大規模なウィンドファームが建設される予定である。一方、風力以外の海洋再生可能エネルギーは、国の実証プロジェクトで実現性を検証している段階である。本会は、実機建設のみならず、実証機の建設においても認証を通じて第三者機関としての役割を果たしていきたい。

洋上風力のための空力-水力-制御- 弾性連成解析プログラム NK-UTWind

福王 翔

1. はじめに

風力発電は他の再生可能エネルギーと比べてライフサイクルコストが低く、また近年FIT(固定価格買取制度)による買取価格が設定されたことにも後押しされて日本国内で商用プロジェクトが次々と始動する等、大きな注目を集めている。風力発電設備はその設置場所によって大きく陸上風車と洋上風車に分けられ、洋上風車は陸上風車と比べて設置可能な場所のポテンシャルが高いこと、洋上の方がより乱れの少ない安定した風を得やすいこと、また騒音の影響が陸上と比べて小さいこと等の利点があり、今後更なる開発プロジェクトが予定されている。洋上風車はその支持構造の形式によってさらに着床式と浮体式に大きく分けられる。図1に現在提案または設置されている洋上風車の支持形式の一覧を示す。水深の浅い水域ではモノパイル形式、少し水深が深くなるとジャケット形式が経済的な面から最適であるとされており、欧州においてもこれらの支持形式によるウィンドファームが数多く建設されている。一方、さらに水深が深い海域では着床式の支持形式では座屈強度を確保するために部材寸法を上げる必要がありコストが高くなるため、セミサブ型やスパー型等の浮体を係留で固定する、浮体式の方が経済的であると試算されている[1]。

これらの洋上風力発電設備は、図2に示すように様々な外力が働く環境に設置され、その中で作用する風荷重、波荷重、係留力、地震荷重等様々な外力に対して最低20年の供用期間に耐えることが求められる。設計に際してはこれらの全ての外力およびこれらが連成して作用することによる影響を適切に評価し安全性を担保することが本会ガイドラインをはじめ、様々な設計基準等で求められている。各外力条件

に対する風力発電設備の応答を評価するためには風車-支持構造の連成解析が行われることが多く、設計において重要な位置を占めている。図3に洋上風車の一般的な連成解析の内容を示す。風車ローターおよび風車タワーに作用する変動空気力、浮体部に作用する流体力が基本的な外力であるが、これらが作用する風車内のダイナミクスは風車の制御、ドライブトレイン構造、タワー構造、浮体構造、係留形式等が連成し合ったものであり、これらのダイナミクスが作用外力とも連成をしているものである。

洋上風車を対象とした連成解析コードのうち代表的なものとして、アメリカ国立再生エネルギー研究所(NREL)の開発したFAST[5]、DNV GLのBladed[6]、デンマーク工科大学の開発したHAWC2[7]等が挙げられるが、その他にも各メーカー、研究機関、大学等が独自に連成解析コードの開発を行っており、各ダイナミクスのモデル化の手法や外力評価の手法でそれぞれ独自のモデルやアルゴリズムが選択され実装されている。しかし、こうした多くの解析コードが存在する一方で、特に浮体式風車に関しては観測例、計測例が少ないこと等から計算精度の検証が種々の環境条件に対して十分に行われているとは言えず、いずれの計算コードにおいても今後の更なる検証とそれに基づいたモデルの更新が必要な状況となっている。

「NK-UTWind」は洋上風車に対する認証業務およびメーカーにおける設計作業で使用することを目標に開発された連成解析ツールである。三井造船株式会社、国立大学法人東京大学、独立行政法人海上技術安全研究所、株式会社アイ・エイチ・アイ マリンユナイテッド(研究実施当時)、三菱重工業株式会社、株式会社風力エネルギー研究所、一般財団法人日本海事協会との共同研究体制により、日本海事協会の「業界要望による共同研究」のスキームによる研究支援を受

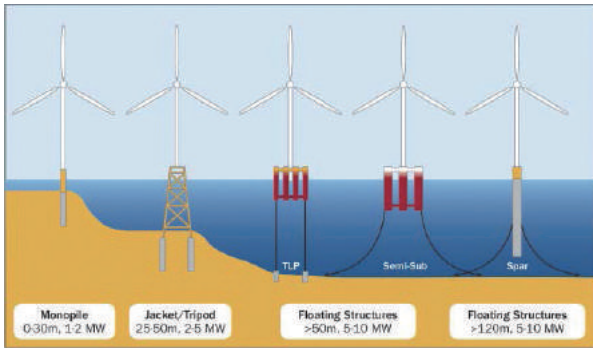


図1 洋上風力発電設備の各種支持形式[2]

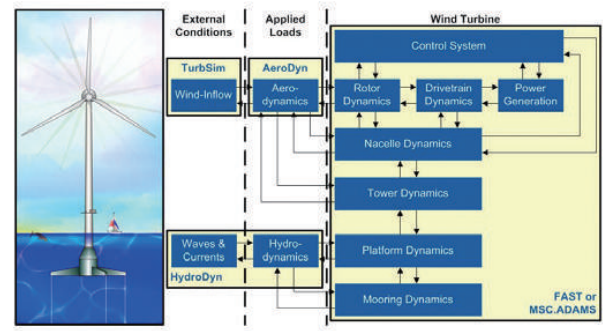


図3 洋上風力設備を対象とした一般的な連成解析の内容の概要[4]

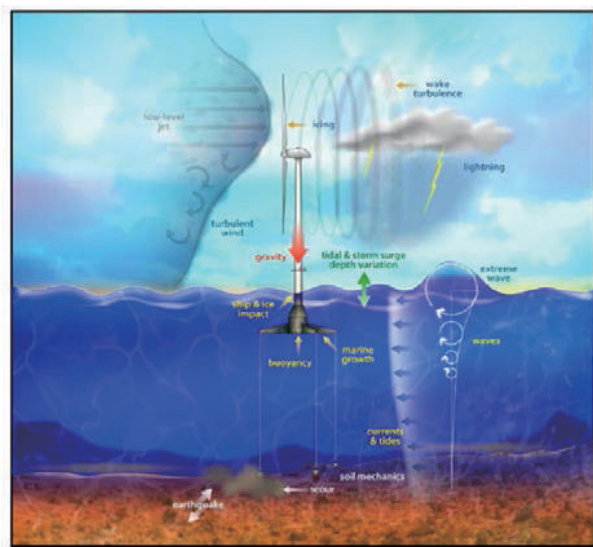


図2 洋上風力発電設備に作用する外力環境[3]

けて2011年から開発を開始し、2013年にこの共同研究が終了⁹した後は東京大学と本会が引き続き開発を継続している。本解析コードは支持構造物の任意断面における断面力の照査を可能とすることを基本のコンセプトとしており、浮体を剛体扱いとして動揺応答の評価に重きを置くFAST等の他コードと差別化を図っている。当初は浮体式を対象として開発が始まったが、現在は地盤モデルが導入され、着床式、浮体式の両方の支持形式に対応できるようになった。コード自体の開発と同時に、独自に水槽試験を実施し比較検証を行うと同時に、連成解析コード比較検証のための国際プロジェクトに参加する等の活動を行っており、より多くの浮体モデルや環境条件における解析精度の検証に努めてきた。また同時に、本計算コードの実際の使用の際の簡便性を高めるため、連成解析コードに付随するプリ処理・ポスト処理ツールの開発も進めてきた。

本報告では、著者が開発に携わってきた連成解析コードNK-UTWindの概要およびその精度検証に関する活動の結果について紹介を行う。また同時に開発を行ってきたNK-UTWindに付随するプリ・ポスト処理ツールについても紹介する。

2. 「NK-UTWind」の計算概要

NK-UTWindはタワーを含めた支持構造物を立体骨組モデルによってモデル化し、式(1)の運動方程式をニューマークβ法によって解くものである。

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx + F^{hydro} + F^{lines} + F^{buoyancy} + F^{aero} \quad (1)$$

M : 質量行列

K : 剛性行列

C : レイリー減衰行列

F^{hydro} : 流体力

F^{lines} : 係留力

$F^{buoyancy}$: 浮力

F^{aero} : 風車からの荷重

レイリー減衰行列は主に数値計算を安定させるために導入されているものであるが、これを使用して線形減衰を表すことも想定されている。 F^{hydro} で表される流体力については、モリソン式を使用する方法とポテンシャル理論を使用する方法が考えられるが、現時点では浮体の部材断面に働く断面力を評価できる利点を考慮し、式(2)で表されるモリソン式が採用されている。

$$f_w = \rho \frac{\pi D^2}{4} \dot{u} + C_m \rho \frac{\pi D^2}{4} (\dot{u} - \ddot{x}) + C_D \frac{1}{2} \rho D (\dot{u} - \ddot{x}) |\dot{u} - \ddot{x}| \quad (2)$$

ρ : 水密度

\dot{u} : 水粒子の速度

D : 部材半径

C_M : 付加質量係数

C_D : 抗力係数

F^{lines} で表される係留力については、カテナリー解による準静的解析とランプドマス法による動的解析、およびTLP係留等のモデルに使用できるバネ要素による解析の3種類を導入している。準静的モデルは係留ラインが準静的な釣合状態にあると仮定してライン形状と張力を解析解より求めるものであり、計算コストが低い等の利点から広く用いられているが、係留ラインに働く流体力や慣性力は考慮していない。一方動的モデルは係留索を複数の要素に分割しその運動方程式を解くことで応答を得るものであり、係留索に作用する外力や係留索自体のダイナミクスを考慮できることから、一般的に準静的モデルと比べてより精度の高い結果が得られる。NKUTWindに実装したランプドマスモデルの概要について説明する。基本的な理論の詳細は参考文献[14]を参照されたい。まず係留索を $N-1$ 個の質点からなる系でモデル化する。質点間は質量の無視できる線形ばねで結合されているとする。静的な状態では、質点 j に働く力は重量 δ_j と上側への張力 T_j と下側への張力 T_{j-1} の3つであり、力の釣り合いは鉛直方向・水平方向について以下ようになる。ただし、 $\delta_1=T_1 \cdot \sin \gamma_1$ とする。

$$T_j \cdot \sin \gamma_j = \sum_{k=1}^j \delta_k \quad (3)$$

$$T_j \cdot \cos \gamma_j = T_1 \cdot \cos \gamma_1 \quad (4)$$

両式から質点間の張力が求められる。係留索が緩く張られていて、例えば質点 m までの部分が海底に付いている場合は、質点1から質点 m までの水中重量を打ち消す反力である垂直抗力 $NormalF_j$ を与え、それ以外の点の垂直抗力はゼロにする。

$$T_j = \sqrt{T_1^2 - \delta_1^2 + \left(\sum_{k=1}^j (\delta_k - NormalF_k) \right)^2} \quad (5)$$

いま、係留索上端(点P)の位置(x_p, y_p, z_p)が与えられたとき、以下の条件式が求められる。ただし、係留索の断面積 a 、ヤング率 E 、張力を与えないときの長さ l とする。

$$\sum_{j=1}^N l_j \sin \gamma_j = z_p \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^N l_j \cos \gamma_j = \sqrt{x_p^2 + y_p^2} \quad (7)$$

未知数 T_1 と δ_1 を反復計算によって求めることで、係留索の初期形状が得られる。

水中を運動する係留索には、張力と水中での重力に加えて、流体から受ける付加慣性力と摩擦抗力が働く。索をモデル化したときの質点 j に関する三次元運動方程式は以下の式で与えられる。

$$\begin{bmatrix} I_{1j} & I_{2j} & I_{3j} \\ J_{1j} & J_{2j} & J_{3j} \\ K_{1j} & K_{2j} & K_{3j} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{X}_j \\ \ddot{Y}_j \\ \ddot{Z}_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{xj} \\ F_{yj} \\ F_{zj} \end{bmatrix} \quad (8)$$

I, J, K は運動方程式のうち加速度に依存する項の係数、つまり一般化された質量を示す。これは集中質量と流体から受ける付加質量からなる。 F_j は運動方程式のうち残りの項である力を示す。これは張力と流体から受ける摩擦抗力と水中での重力からなる。なお、タッチダウン点付近の地盤反力はバネによって表すとし、デフォルト値ではばね定数は 5000N/m^2 としている。

式(8)の運動方程式を解く際にはHoubolt法により時間ステップ $n+1$ における加速度を式(9)のように変位の関数として近似する。

$$\ddot{s}_j^{n+1} = \frac{1}{\Delta t^2} (2s_j^{n+1} - 5s_j^n + 4s_j^{n-1} - s_j^{n-2}) \quad (9)$$

式(8)と式(9)を使用して $n+1$ での加速度 \ddot{x}_{n+1} を求める再には時間ステップ $n+1$ での張力 T_j^{n+1} が必要となり、これは反復計算によって求める必要がある。反復計算に際して、以下の関数 Ψ_j を考える。

$$\Psi_j = (x_j - x_{j-1})^2 + (y_j - y_{j-1})^2 + (z_j - z_{j-1})^2 - \tilde{l}^2 (1 + T_j / Ea)^2 \quad (10)$$

時間ステップ $n+1$ における張力 T_j^{n+1} が、式(9)のように張力の暫定値 \tilde{T}_j^{n+1} と補正量 ΔT_j^{n+1} の和で表されるとすると、関数 Ψ_j は張力の関数なので、テーラー展開により式(12)のように書ける。

$$T_j^{n+1} = \tilde{T}_j^{n+1} + \Delta T_j^{n+1} \quad (11)$$

$$\Psi_j^{n+1} = \tilde{\Psi}_j^{n+1} + \frac{\partial \tilde{\Psi}_j^{n+1}}{\partial \tilde{T}_{j-2}^n} \Delta T_{j-2}^n + \frac{\partial \tilde{\Psi}_j^{n+1}}{\partial \tilde{T}_{j-1}^n} \Delta T_{j-1}^n + \frac{\partial \tilde{\Psi}_j^{n+1}}{\partial \tilde{T}_j^n} \Delta T_j^n + (\text{高次項}) \quad (12)$$

式(12)の高次項を無視すると、張力の修正量 ΔT_j^{n+1} は式(13)の連立方程式を解くことによって求められる。この張力の修正値 ΔT^{n+1} が収束するまで反復計算を行う。ここで、 G は、式(8)の運動方程式の係数から計算される係数行列である。詳細な式とその導出は文献[3]を参照されたい。

$$[G][\Delta T^{n+1}] = -[\tilde{\Psi}^{n+1}] \quad (13)$$

ランプドマスモデルの反復計算のフローを図2に

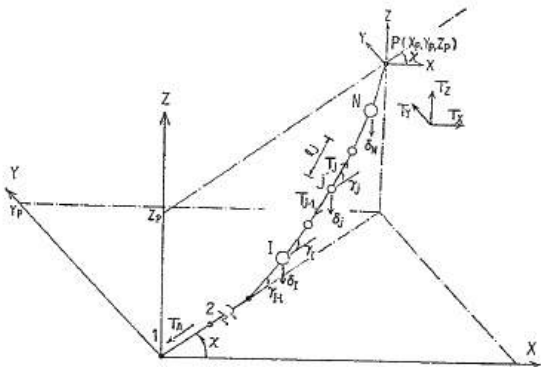


図4 ランプドマス法による係留索のモデル化

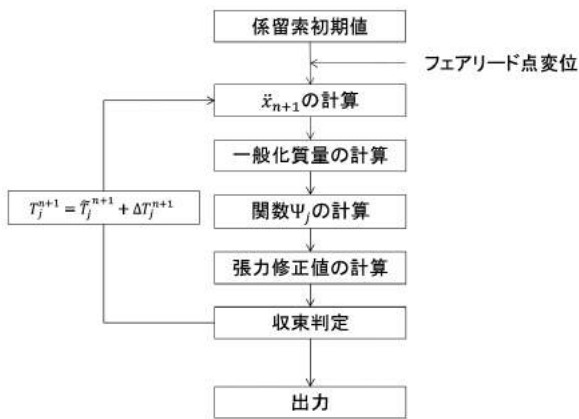


図5 ランプドマス法の計算フローチャート

示す。収束判定の閾値はユーザーが定義できるが、デフォルトでは $\Delta T^{n+1}=0.001$ が採用されている。

F^{aero} で表される風車からの荷重は、NRELが開発したオープンソースのコードであるFASTを使用して評価を行う。FASTにおいて風車ローターに作用する空気力は翼素境界理論 (Blade Element Momentum Method) によって評価されている。翼素境界理論はブレード方向に風の流れはないと仮定し、1本のブレードをいくつかの要素に分割して各要素の揚力、抗力を求める翼素理論と、アクチュエーターディスク理論から求められる運動量理論の二つの組み合わせによってローターに作用する空気力を求めるものである。翼素理論と運動量理論より、ブレードのある要素にはたらくスラスト T とトルク Q は、式(14)、(15)のように求められるため、これを利用して未知数である誘導係数 a 、 a' をイタレーションによって求める。

$$\begin{aligned} \delta T &= \frac{1}{2} \rho W^2 B c (C_l(\alpha) \cos \phi + C_d(\alpha) \sin \phi) \delta r \\ &= 2 \pi r \delta r \rho U_{\infty} (1-a) 2 a U_{\infty} \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \delta Q &= \frac{1}{2} \rho W^2 B c r (C_l(\alpha) \sin \phi - C_d(\alpha) \cos \phi) \delta r \\ &= 2 \pi r \rho U_{\infty} (1-a) 2 a' r \Omega \end{aligned} \quad (15)$$

- ρ : 空気密度
- W : 相対風速
- B : ブレード枚数
- c : コード長
- $C_l(\alpha)$: 入射角 α に対する揚力係数
- $C_d(\alpha)$: 入射角 α に対する抗力係数
- ϕ : 相対風速とローター面の成す角度
- r : 要素長さ
- a : 軸方向の誘導係数
- a' : 接線方向の誘導係数
- U_{∞} : ローターの影響をうけない入射風速
- Ω : ローター回転速度

風車は風況に適した最適な発電を行うことや安全性を確保することを目的に制御を行っている。例えば近年の最も一般的な可変速ピッチ制御型風車では、比較的風速が低い領域では発電量が最大になるように風速に応じて回転数を変化させており、「定格風速」と呼ばれるある一定の風速を超えると発電機の回転数が一定となるようにブレードのピッチ角を制御する。回転数やピッチ角をどの程度変化させるかの指示値は、平均風速と風速の変動量(厳密にはローターに作用する空力トルクと空力トルクの変動量)に基づいた制御アルゴリズムによって決定されており、風車ローターに作用する空気力の評価にはこの制御アルゴリズムの考慮が不可欠である。NKUTWindではこの制御アルゴリズムについてもFASTの機能を使用する。

NK-UTWindでは、制御による風車ローターの空力特性の影響と風車ローターに作用する空気力に加えて、シャフトやギアの摩擦力までをFASTでモデル化

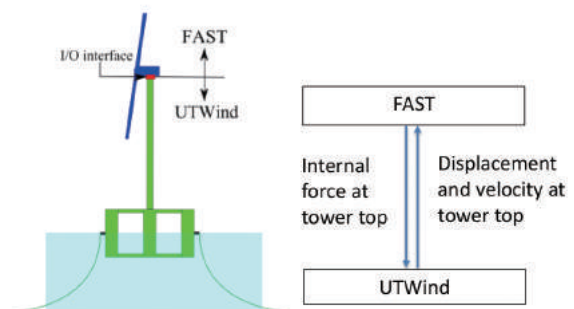


図6 NK-UTWindとFASTの受け渡しの概要図

し、風車ナセル、タワー、および浮体をNK-UTWind本体でモデル化を行う。この二つの計算を連結するために、NK-UTWind側ではタワー頂部の荷重を「風車からの荷重」として毎時間刻みでFASTから受け取っており、一方FAST側で必要となる毎時間刻みの接続点における変位・速度をNK-UTWindから渡している。FASTとNK-UTWindの受け渡しの概要を図6に示す。

3. 「NK-UTWind」の精度検証

3.1 浮体式風車モデルの概要

洋上風車用の連成解析プログラムはその計算精度については未だに検討の余地があり、世界各国の研究機関がこの問題に取り組んでいる。そのひとつとしてIEA Wind Task30がある。IEA WindはIEA(国際エネルギー機関)のもとで風力発電に関する研究開発の国際協力活動を行うプログラムであり、風力に関する重要な研究開発テーマごとにTaskと呼ばれる研究グループを設置している。そのうちのひとつであるTask30は“Computer Codes and Models for Offshore Wind Energy”を課題として設置されており、このTask 30内のプロジェクトとして2014年よりOC5(Offshore Code Comparison, Collaboration, Continued, with Correlation)プロジェクトが3段階に分けられ実施された。2014年からスタートしたPhase Iではモノパイル基礎(着床式)、2015年からスタートしたPhase IIでは1/50スケールのセミサブ浮体(浮体式)、2017年からスタートしたPhase IIIでは実海域におけるジャケット基礎(着床式)を対象とし、本プロジェクトに参画している各機関のそれぞれの連成解析コードによる解析結果の比較検証および精度検証を行った。2016年12月末に終了したPhase II¹⁰では、1/50スケールのセミサブ浮体を使用して水槽実験を実施し、この結果をベースとして各参加機関の解析結果の比較検証を行った。NK-UTWindはPhaseIIよりプロジェクトに参加し、セミサブ浮体の水槽試験の結果を使用して精度検証を行った。本節ではその結果について紹介する。セミサブ浮体の水槽試験の様子と使用された1/50スケールモデルの概要を図7に示す。水槽試験は2013年にオランダの研究機関MARIN(Maritime Research Institute Netherlands)の水槽で行われた。搭載風車はNRELが公開している5MW風車の参照モデルを元にして作成

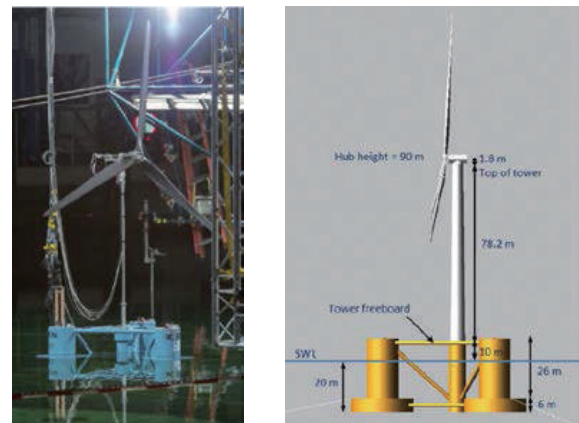


図7 (a)セミサブ浮体の水槽試験の様子と
(b)使用モデルの幾何学形状[10]

されたものであり、回転数等の制御が可能である。計測は風車周りの回転数等のパラメータ、浮体の6自由度の動揺、タワー頂部荷重、タワー基部荷重および係留張力等について行われた。詳細な諸元は参考文献[10]を参照されたい。水槽試験の結果は参考文献[16]のURLに公開されている。

3.2 「NK-UTWind」によるモデル化の概要

OC5 Phase IIで実施された水槽試験模型について、数値モデルを構築した。水槽試験と使用された1/50スケールモデルの概要を図1に示す。浮体、タワーおよびナセルについて梁要素でモデル化を行い、風車ローターはFASTの仕様に従ってモデル化を行った。OC5 PhaseIIの水槽試験では浮体は剛体として想定されているため、浮体モデルの質量情報は重心と慣性モーメントのみが与えられているが、NK-UTWindは梁モデルを採用しているため質量分布を与える必要がある。質量分布のモデル化に際してはまずYaw方向の慣性モーメント I_{zz} から中央カラムとサイドカラムの質量比を求め、さらに重心位置 CM 、Roll方向の慣性モーメント I_{xx} 、Pitch方向の慣性モーメント I_{yy} が合うように各カラムでの質量の鉛直分布を最適化した。最終的な浮体モデルの諸元を表1に示す。

次に、浮体に作用する流体力の評価の際に式(3)中の付加質量係数 C_M および抗力係数 C_D について浮体形状等を考慮して決定する必要がある。これらの値については水槽試験の自由振動試験の結果を使用して、固有周期、式(16)で表されるLinear damping係数 p およびQuadratic damping係数 q が実験値と合うように各係数の同定を行った。

表1 浮体部の主な諸元の目標値とモデル値

	総質量(kg)	CM(m)	Ixx(kgm ²)	Iyy(kgm ²)	Izz(kgm ²)
目標	1.29E+7	14.09	7.55E+9	8.22E+9	1.36E+10
Model	1.29E+7	14.02	7.16E+9	7.16E+9	1.03E+10

$$y=qx+p, \quad x=\frac{1}{2}(\Phi_n+\Phi_{n+1}),$$

$$y=\Phi_n-\Phi_{n+1}/\frac{1}{2}(\Phi_n+\Phi_{n+1}) \quad (16)$$

ここで、 Φ_n は自由振動のn番目のピークの値である。調整した各係数の最終値を表2、係数調整後の固有振動数および減衰係数の結果を図8に示す。表2中の「カラムC」はセミサブ浮体の中央カラム、「カラムS」は3つのサイドカラムを表す。また図8中のラベル1~6はそれぞれSurge, Sway, Heave, Roll, Pitch, Yawを表している。本浮体の部材は全て円柱で構成されており、調整した各パラメータ値は概ね理論値の範囲内に収まっているが、ブレス部材の付加質量係数と各カラムの鉛直方向の抗力係数は理論値から外れた結果となった。理論値が単一の円柱に対するものであるのに対してブレス部は部材が集中していること、Heave方向のプレートは大きな粘性が働くこと等がそれぞれ原因であると考えられる。Linear Dampingについては、モリソン式をベースとするNK-UTWindでは抗力係数のみを使用して全自由度を同時にチューニングすることが難しいため、目標値と差がある結果となった。Linear Dampingを含めて目標

値に合わせる場合にはレイリー減衰項に加えて追加の減衰項を加えることで目標値が達成されることが考えられる。

ランプドマスモデルでは係留索に作用する流体力を計算するため、流体力係数を決定する必要がある。Wendtら(2016)¹⁵は同セミサブ浮体の水槽試験結果を使用してチューニングにより各係数を推定している。本計算でもこの結果を採用し、軸直交方向の付加質量係数は1.445、抗力係数は1.813とした。係留索の分割数を10から200まで変化させた数ケースで計算を行ったところ、概ね30より大きい分割数で結果が収束した。本報告では分割数200の結果を掲載する。全体座標の定義と係留の配置を図9に、係留の主な諸元を表3に、また式(3)~(8)を使用して計算した係留索の初期形状を図10に示す。

Phase IIでは様々な条件の計25個の荷重ケースについて比較が行われたが、本報告では紙面の都合上、表4に示す網羅的な2ケースのみ結果を示す。解析時間は水槽実験と同様10800秒、時間刻みは0.01秒とした。

表2 OC5 PhaseII セミサブ浮体の係数一覧

	カラムC水平	カラムS水平	ブレス水平	カラムC 鉛直	カラムS 鉛直
C_M	1.0	1.1	3.0	2.0	0.5
C_D	2.0	1.6	1.1	6.0	4.3

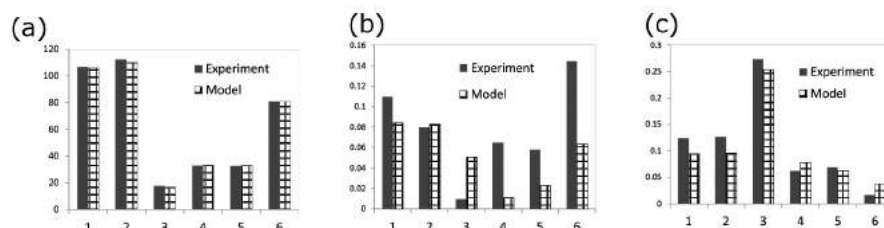


図8 係数調整後の(a)浮体の固有周期、(b)Linear damping、(c)Quadratic dampingの解析値と目標値の比較

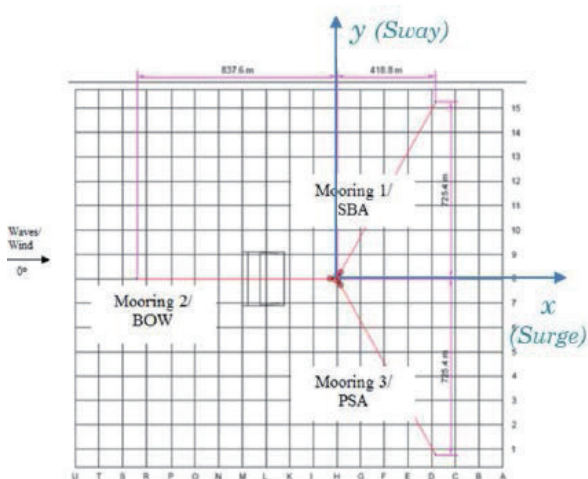


図9 全体座標と係留配置の概要[1]

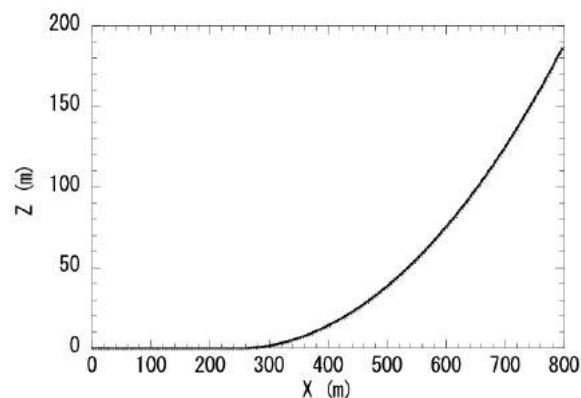


図10 係留索の初期形状

表3 カテナリー係留の主な諸元

係留長さ	835.5 m
係留索直径	0.139 m
空中質量	125.5 kg/m
ヤング率	8.25E+10 Pa
初期張力	1.12E+6 N

表4 各荷重ケースの条件

ケース名	回転数	Wave	Wind
LC3.5	0 rpm	White noise Hs=10.5 m, T=6-26 s	None
LC4.1	12.1 rpm	Irregular, JONSWAP H=7.1 m, T=12.1 s	12.91 m/s

4. 計算結果

4.1 セミサブ型浮体式風車の動的応答

準静的カテナリーモデルを使用した場合のセミサブ型浮体式風車の動的応答を見る。まず風車静止時の波のみに対する荷重ケースの代表例としてホワイトノイズ波に対するLC3.5について、NKUTWindによる解析結果と実験結果のパワースペクトル密度の比較を図11に示す。図11(a)、(b)より、Surge、Heaveについては解析値と実験値でよく一致していることがわかる。一方で図11(c)からわかるようにPitch方向の変位については解析値の方が過小評価となっているが、このPitch方向変位の変動が過小評価される現象はFASTやBladedを始め、他の多くの解析ツールで共通して見られた。図11(d)に示すNo2係留の張力の結果を見ると、Surgeの変動成分に対応する0.01Hz前後の成分は実験値とよく一致しているが、それ以上の高周波成分について解析値は実験値を再現できて

いないことがわかる。今回の解析においてNK-UTWindと同様にカテナリー解による準静的解析を使用した他コードでも同様の傾向があることから、カテナリー解による準静的解析の特徴であると推測される。図11(e)、(f)より、タワー荷重についてはPitch変位成分に対応する0.03Hz程度の周波数成分が解析値で過小評価となっており、Pitch変位の過小評価が原因と考えられる。一方で、0.32Hz周辺のタワー固有振動に対応する周波数成分は解析値の方が実験値を少し上回った。

次に風車が回転しているケースであるLC4.1について、NKUTWindによる解析結果と実験結果のパワースペクトル密度の比較を図12に示す。図12(a)、(b)よりSurgeおよびHeave方向の変位の変動成分について解析値と実験値でよく一致していることがわかる。一方、図12(c)より、Pitch方向の変動成分についてはLC3.5と同様、解析値は実験値を過小評価している。また図12(d)より、係留張力についても低周波成分は

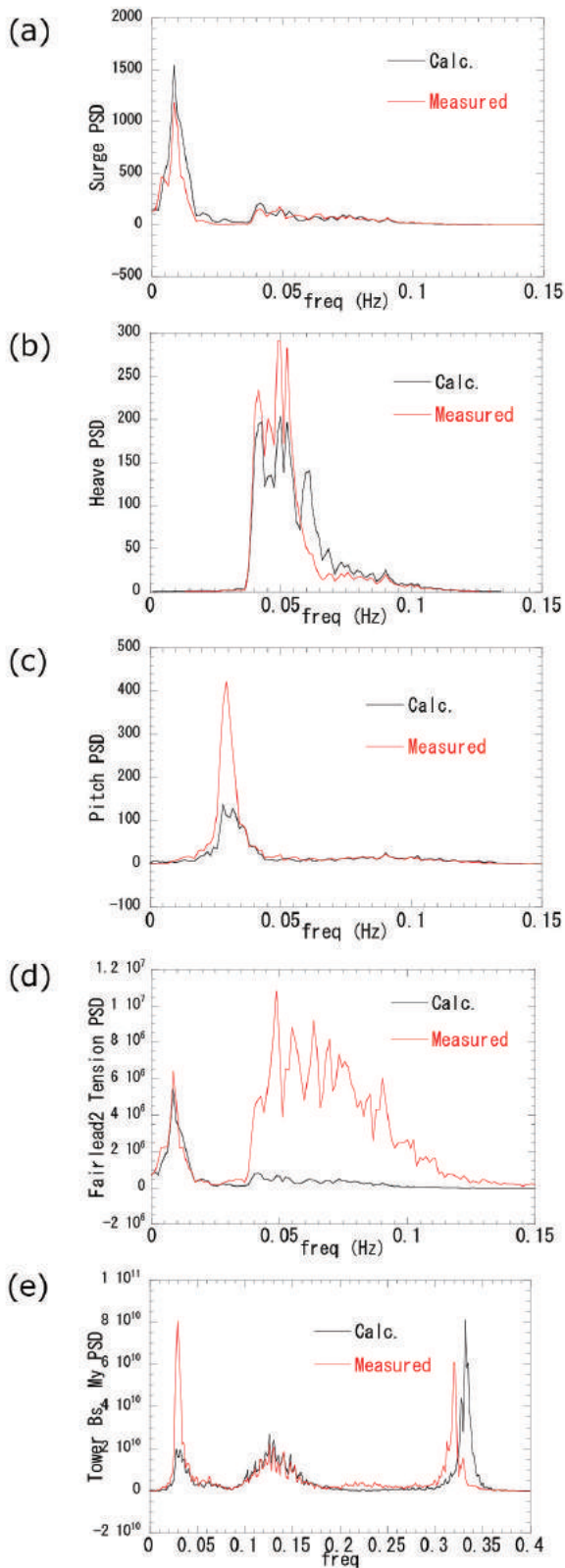


図11 LC3.5の (a) Surge変位、(b) Heave変位、(c) Pitch変位、(d) 係留張力、(e) タワー基部曲げモーメントの解析値と実験値のパワースペクトル密度の比較

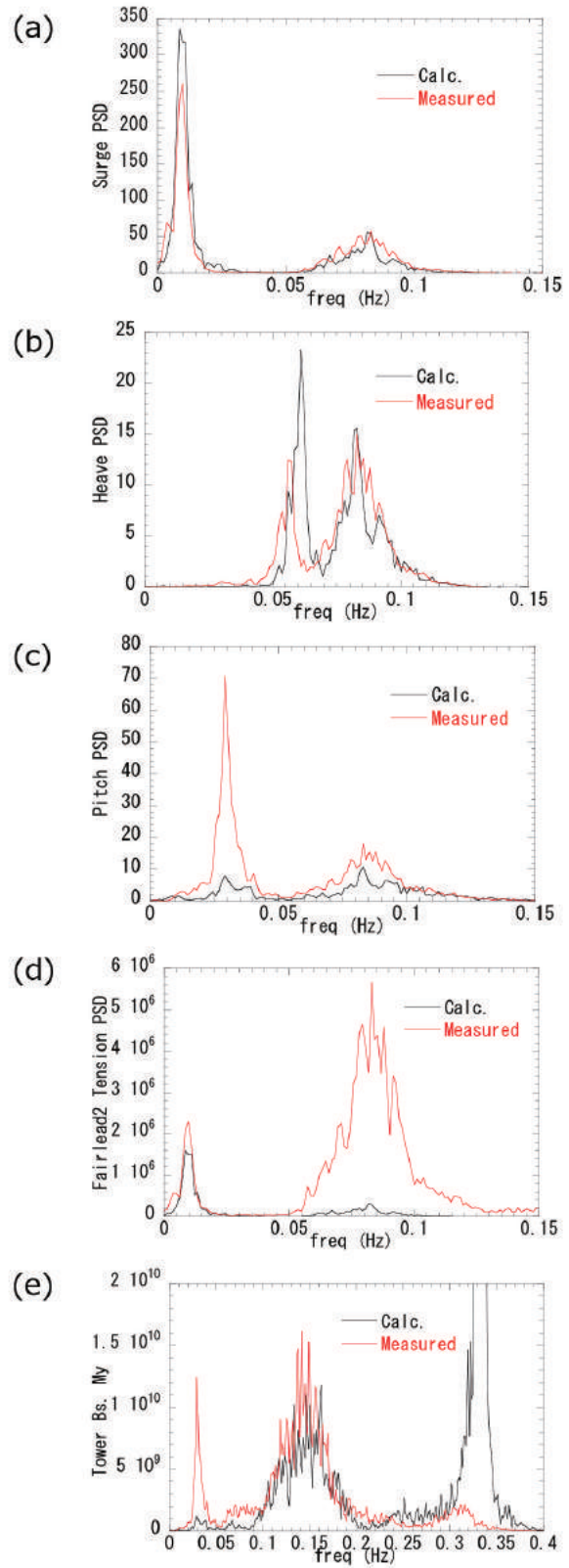


図12 LC4.1の (a) Surge変位、(b) Heave変位、(c) Pitch変位、(d) 係留張力、(e) タワー基部曲げモーメントの解析値と実験値のパワースペクトル密度の比較

実験値とよく一致しているが高周波成分について解析値は大幅な過小評価となっている。図12(e)、(f)より、タワー荷重の変動成分については0.02Hz付近のPitch変位に対応するピークと0.32Hz付近のタワー固有周期に対応するピークで解析値が実験値を大幅に過小評価していることがわかる。タワー固有周期に対応するピークの解析値が実験値より大幅に大きくなる現象は、デンマーク工科大学のHAWC2、IFEの3DFloat等のコードでも同様の現象が見られ、これらのコードは全て流体力の評価にモリソン式を使用していることから、モリソン式特有の現象であると推測される。具体的には、例えば付加質量成分についてポテンシャル論をベースとしたものでは周波数依存性が考慮されるがモリソン式では一定値を使用しているため、タワー固有振動数に対応する周波数成分に着目するとモリソン式では過大評価になるのではないかと推測される。一方0.02Hz付近のPitch変位に対応するピークについては全ての計算コードで大幅な過小評価となっており、この原因究明が今後の課題となっている。

4.2 係留モデルによる影響

次に、係留モデルにランプドマスモデルを使用した場合の結果について検討する。はじめに、規則波を作用させた時のランプドマスモデル、準静的カテナリーモデルと実験値の応答の比較を図13及び図14に示す。図13より、準静的モデルと比べてランプドマスモデルの方が、係留張力の振幅および位相をよく表

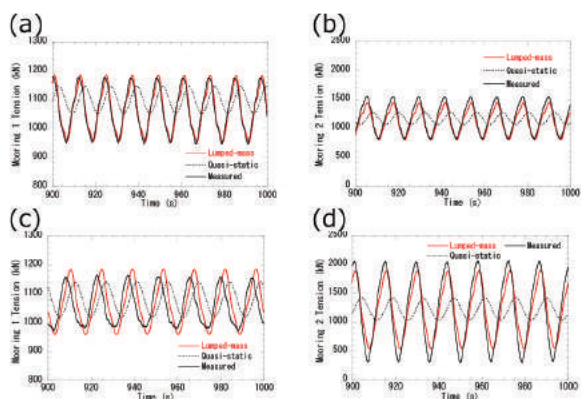


図13 LC3. 1の(a)1番係留の張力および(b)2番係留の張力、LC3. 2の(c)1番係留の張力および(d)2番係留の張力の解析値と実験値の比較

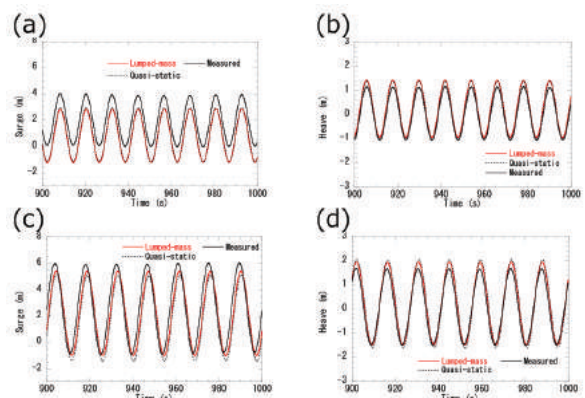


図14 LC3. 1の(a)Surgeおよび(b)Heave、LC3. 2の(c)Surgeおよび(d)Heaveの解析値と実験値の比較

していることが分かる。LC3. 1と比べて入力波の振幅が大きいLC3. 2で解析解と計測値に差がみられるが、浮体応答の非線形性等の影響が原因のひとつとなっている可能性が考えられる。図14より、LC3. 2では準静的モデルとランプドマスモデルで浮体のSurge、Heave変位の平均値および振幅に差が生じているが、この影響はLC3. 1では非常に小さいことがわかる。

不規則波を作用させた時のランプドマスモデル、準静的カテナリーモデルと実験値の応答のパワースペクトル密度の比較を図15に示す。図15(a)より、1番係留の張力について準静的モデルで過小評価になっていた波強制力の周波数成分が、ランプドマスモデルによってよく再現できていることがわかる。図15(b)より、2番係留でも1番係留と同様の傾向が見られるが、ランプドマスモデルを使用しても実験値を過小評価していることがわかる。この原因の究明は今後の課題である。図15(c)より係留モデルは浮体のSurgeにも影響を与えており、準静的モデルで少し課題評価されていたSurge応答がランプドマスモデルにより改善されていることがわかる。また図15(d)より、Heaveに関しても0.06Hz付近の応答でランプドマスモデルの方が実験値に近い値が得られている。一方、浮体のPitch応答が解析で過小評価される問題が文献[1]でも指摘されており、これに関しては図15(e)のように、ランプドマスモデルによる改善は見られなかった。

5. NK-UTWind用プリ・ポスト処理ツール「NK Visual FOWT」

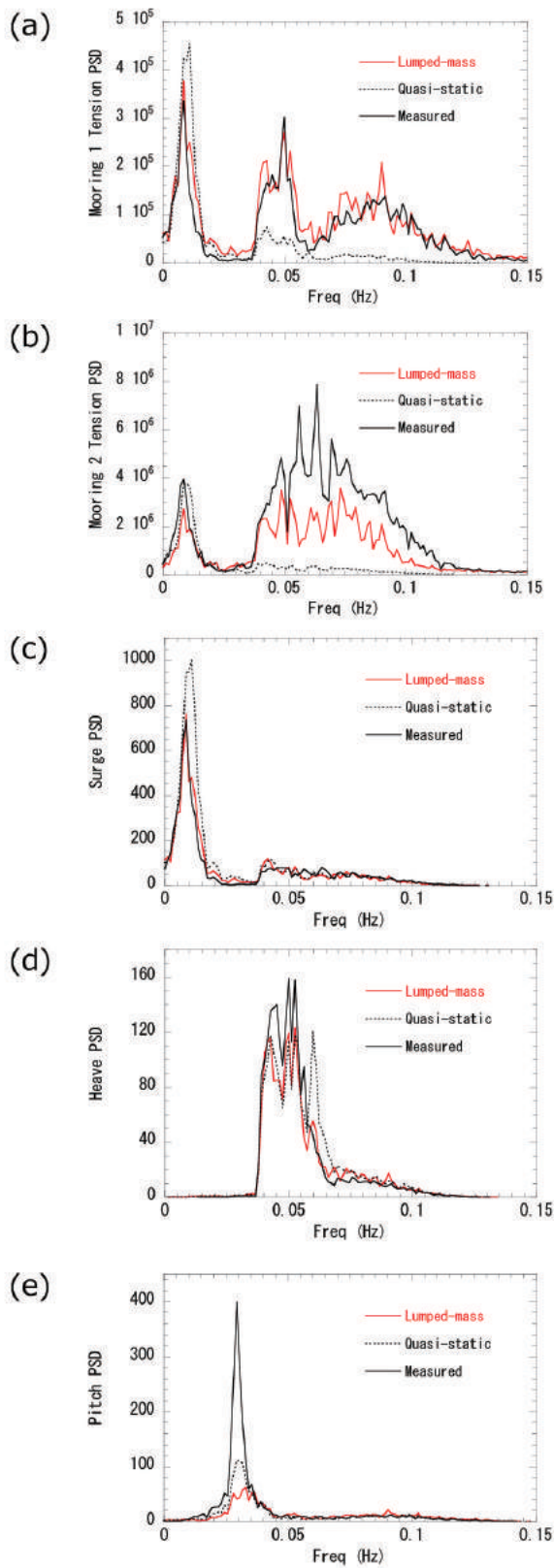


図15 LC3.5の(a)1番係留の張力、(b)2番係留の張力、(c)Surge、(d)Heaveおよび(e)Pitchの解析値と実験値のスペクトルの比較

NK-UTWindによる解析は、プリ処理、ポスト処理の各段階に際し、補助ツールを導入することによって作業を簡便化、円滑化にすることができる。このためのツールとして、Windows上で動作するアプリケーション「NK Visual FOWT」の開発を行った。まずプリ処理のモデル構築の段階においては、構築した梁モデルが意図したとおりに設定できているかどうか、各節点、要素を可視化することにより確認できる。図16には、浮体式風車に対する例と着床式風車に対する例を示す。またプリ処理段階においては風車ローター、風車タワー、浮体等のパーツごとに指定された重心や慣性モーメント、全体システムに対して指定された重心や固有値等を満たすようにモデル化を行う必要があり、アプリではこれを補助する機能が備えられている。また立体骨組モデルによってモデル化を行うため、各要素の方向を指定するために直交するベクトルを定義する必要がありこの直交性の確認も行うようになっている。

次にポスト処理段階においては、解析結果が設計者同士の情報共有や対外的な説明等に使用されることが想定され、これを円滑に行うために浮体動揺のアニメーションの生成、また指定したパラメータに関する時刻歴解析結果の表示が行える機能を追加した。これによって、例えば最大荷重が発生する時刻の前後の動揺が視覚的に確認でき、現象の把握や解析結果の妥当性の確認に役立てることができる。なお、本ツールは2017年11月現在でNK-UTWindの他にもDNV GLの連成解析コードBladed v4.6による解析結果も読み込むことが可能となっている。

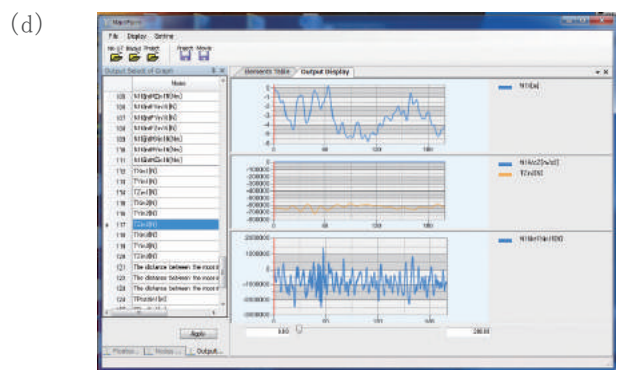
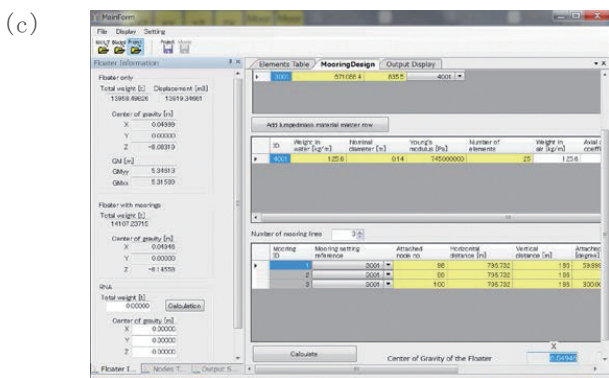
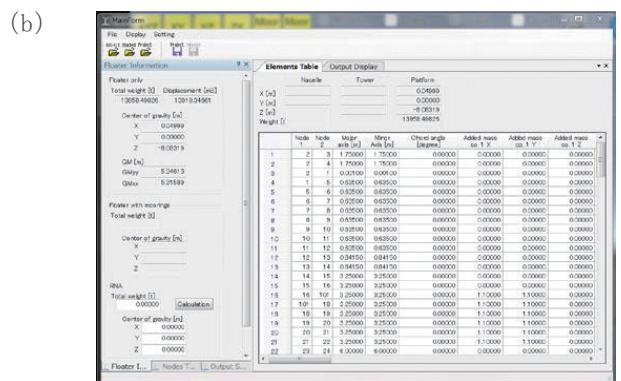
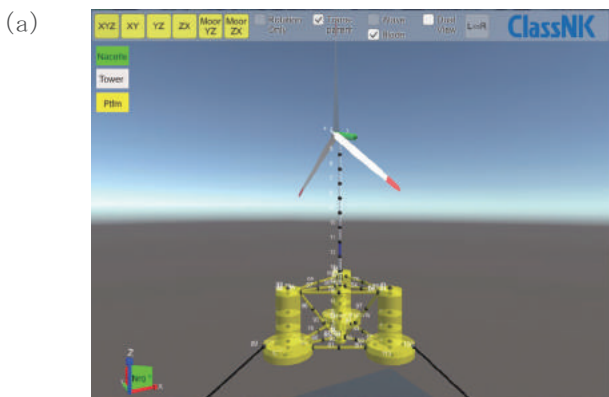


図16 NK Visual FOWTの結果表示画面とアニメーション表示画面。(a)浮体式セミサブ浮体モデルの例、(b)構造モデルの重量分布・釣り合い計算の例、(c)ランブドマス係留の初期形状計算の例、(d)解析結果時系列の表示例

6. まとめ

本報告では洋上風車用連成解析プログラム「NK-UTWind」の概要とその精度検証結果、およびプリ・ポスト処理ツール「NK-Visual FOWT」について紹介を行った。NK-UTWindは構造モデルをFEMでモデル化し流体力をモリソン式で評価するツールであり、FASTと組み合わせることで洋上風車に作用する各外力およびそれらの連成による影響を評価するものであ

る。コード検証のために国際プロジェクトIEA Wind Task30に参画し、セミサブ浮体に対する検証を行ったところ、概ねよく一致する結果が得られたが、ポテンシャル理論との違いやピッチ動揺の再現性において課題が確認できた。モデル可視化、重量計算、固有値計算、アニメーション作成等の機能を持つプリ・ポスト処理ツールを開発しており、NKUTWindと共に業界における利用を期待したい。

参考文献

- 1) Bailey. H., Brookes .K.L., Thompson.P.M., Assessing Environmental Impacts of Offshore Wind Farms: Lessons Learned and Recommendations for the Future, Aquatic Biosystems vol.10 (1): 8, 2014
- 2) European Wind Energy Association, Deep Water: the Next Step for Offshore Wind Energy. Brussels, Belgium, A Report by the European Wind Energy Association, 2013
- 3) Musial.W., Ram.B., Large-Scale Offshore Wind Power in the United States: Assessment of opportunities and Barriers, 2010
- 4) Jonkman. J., A Quantitative Comparison of Three Floating Wind Turbines, Proceeding of AWEA Offshore Wind Project Workshop, 2009
- 5) Jonkman. J.M., Buhl Jr.M.L., FAST User's Guide, Technical Report NREL/EL-500-38230, 2005
- 6) Garrad Hassan & Partners Ltd., Bladed Theory Manual version 4.4, 2013
- 7) Larsen.T.J., Hansen.A.M., How 2 HAWC2, the user's manual, Risoe National Laboratory Risoe-R; No.1597(ver3-1), 2007
- 8) 日本海事協会、浮体式洋上風力発電設備に関するガイドライン、2012
- 9) 日本海事協会、洋上風力発電用風車/浮体連成解析プログラムの開発 成果報告書、2013
- 10) Robertson.A.H., Wendt.F., Fonkman.J.M., Popko.W., Dagher.H., Gueydon.S., Qvist.J., Vittori.F., Uzunoglu.E., Harries.R., Yde.A., Galinos.C., Hermans.K., Bernardus de Vaal.J., Bozonnet.P., Bouy.L., Bayati.I., Bergua.R., Galvan.J.,F, Alonso.I.M., Sanchez.C.B., Shin.H., Oh.S., Molins.C., Debruyne.Y., OC5 Project Phase II: Validation of global loads of the DeepCwind floating semisubmersible wind turbine, Energy Procedia、2017
- 11) Goupee.A., Fowler.M., Kimball.R., Helder.J., Ridder.E., Additional Wind/Wave Basin Testing of the DeepCwind Semi-submersible with a Performance-Matched wind Turbine, Proceedings of the Ocean, Offshore and Arctic Engineering Conference, 2014
- 12) Roberston.A. et al., Uncertainty Analysis of OC5-DeepCwind Floating Semisubmersible Offshore Wind Test Campaign, Proceedings of the International Society of Offshore and Polar Engineers Conference, 2017
- 13) 福王翔、石井希実子、鈴木英之、連成解析コードNK-UTWindによるIEA Wind Task30 OC5 PhaseII セミサブ浮体の動的応答解析、第39回風力エネルギー利用シンポジウム、2017
- 14) 福王翔、NK-UTWindによるセミサブ型浮体式洋上風車の係留力評価におけるランプドマスモデルの検証、第40回風力エネルギー利用シンポジウム、2018
- 15) 中嶋俊夫、元良誠三、藤野正隆、質点系モデルによる係留ラインの3次元動的解析法、日本造船学会論文集、第154号、pp192-202、1983
- 16) Wendt.F.F., Andersen.M.T., Robertson.A.N., Jonkman.J.M., Verification and validation of the new dynamic mooring modules available in FAST v8, Proceedings of the 26th International Ocean and Polar Engineering Conference, 2016
- 17) https://drive.google.com/drive/folders/0BzK194XRMkp_TUF6R1A5NjdBaFU (2018年10月30日にアクセス)

風車ナセルに作用する 変動空気力特性

井上 浩男、岩下 智也

1. はじめに

風車ナセルについて、土木学会指針(2010)¹⁾では、代表的な矩形型と球形型に対して平均風力係数が示されている。また、GL2010²⁾においても矩形ナセルを対象として各面での平均風力係数が示されており、類似した形状のナセルでは平均的な作用空気力(抗力および揚力)を算定することが可能である。

本会では、様々な形状の風車ナセルに作用する風力特性を把握することを目的に各種検討を行っているが、本稿では角部にアールの付いたナセルの風洞試験を実施した結果をまとめる。

2. 風洞試験実施の背景

近年、国内においては強風時にナセルのケーシング等に被害が発生していることもあり、その強度評価を適切に実施することは風力発電施設の公衆安全の確保の観点からも重要である。ナセルの局所的な外装材の耐力評価には各部に作用する変動空気力特性の把握が必要であり、土木学会指針(2010)¹⁾では矩形ナセルに対するピーク外圧係数が示されているものの、あくまでも参考資料としての提示に留まっている。

Noda & Ishihara³⁾(以下、文献3))は矩形ナセルについて風洞試験を行い、局所的な変動空気力特性を求めナセルの外装材の評価に用いることを提唱している。この手法に基づいて算定された等価最大/最小平均風力係数は日本国内の状況に即した安全側の評価となることから、本会のウィンドファーム認証における審査では、文献3)で提唱されている結果をナセル外装材の安全性確認に用いる変動空気力特性として適用することを推奨⁴⁾している。

なお、角部にアールの付いたナセルも多くみられ

るが、前述の文献3)の風洞試験で用いた矩形ナセルにはアールは設けられておらず、そのまま適用すると厳密には正しくないという状況が発生している。これに対し、風車メーカーが独自に風洞試験或いは精緻なCFDなどを実施することにより、ナセルに作用する変動空気力特性を求めている事例は殆ど見られない。また、GL2010²⁾でも平均空気力係数については、代表長の10%のアール付きの形状に対して20%低減することを認めているが、変動空気力特性については明示されていない。よってこれらの当該規定をそのまま準用することが妥当であるかを確認する必要があった。

これらの状況を踏まえて、本会では一般的なアール付き矩形ナセルに対して風洞試験を実施して変動空気力特性を把握し、ナセル外装材の安全性確認のための本会の推奨値として明示することとした。

3. 風洞試験

3.1 試験条件等

風洞試験は、図1に示す株式会社風工学研究所の回流式境界層風洞にて、表1に示す試験条件の下で行った。写真1に試験時の模型設置状況を、写真2に風路内の乱流境界層生成装置の設置状況を示す。

3.2 データ処理手法

試験実施に当たっては、矩形ナセルとの特性比較が容易になるように、使用風洞は異なるが試験条件、試験手法及びデータ処理手法は文献3)の条件に極力合わせるようにして、試験を実施した。

実機のハブ(ナセル)高さの設計風速を50m/sとし、必要な相似則を適用した。ここで、変動風圧測定は局部風圧力の評価を目的としており、代表長としてはナセルのハッチ相当の1mを用い、TVL法を適用するこ

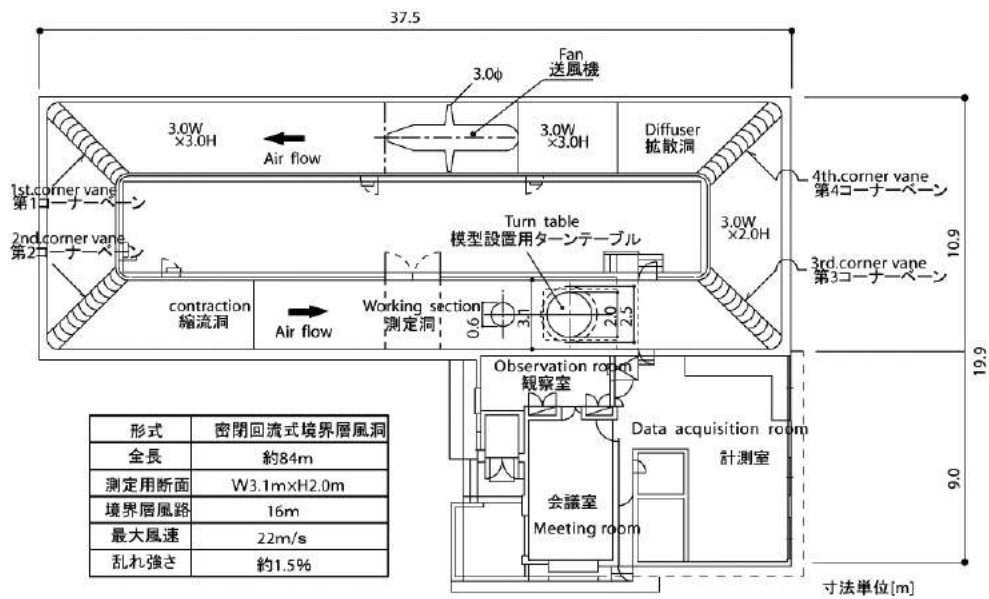


図1 風洞試験装置

表1 主な試験条件

風洞測定部	3.1m ^W ×2.0m ^H ×16.0m ^L
模型位置	測定洞上流端より14.75m
平均風速	10.0m/s(ハブ高さ)
乱れ強さ	12.7%(ハブ高さ)
風速の鉛直プロファイル	0.2(ハブ高さ中心)
試験風向	ナセルに正対する方向を0°とし、時計回りを正として、0~355°の間を5°ピッチで72風向を設定
模型(縮尺1/50)	・ナセル:250×80×80、・タワー:60φ(mm)
ハブ高さ	風洞床上高さ400mm
圧力測定孔	200点(対称性に配慮)
サンプリング	800Hz、6個で移動平均処理
データ長	60秒(実時間600秒相当)
データ数	1サンプル(60秒)で5サンプル



写真1 風洞試験模型



写真2 乱流境界層生成装置設置状況

とにより800Hzのサンプリングに対し6個の移動平均処理を行った上で、データをまとめることとした。

なお、計測データは実時間で10分間相当で評価することが望ましいが、乱流境界層中での風洞試験における計測データの安定化を図る目的で、文献3)と同様に10分間相当の1データに対し5データのアンサンブル平均を求め、特性を評価することとした。

4. 風洞試験結果

4.1 最大・最小ピーク風圧係数

試験で測定された変動風圧は、3.2の処理を行った上で、測点毎・風向毎に、以下に示す式により最大ピーク風圧係数 Cp_{max} および最小ピーク風圧係数 Cp_{min} を算定した。

$$Cp_{max} = (p_e - p_s)_{max} / q_H \quad (1)$$

$$Cp_{min} = (p_e - p_s)_{min} / q_H \quad (2)$$

ここで、

p_e : 模型壁面に作用する変動風圧 (N/m^2)

$(p_e - p_s)_{max}$: 最大ピーク風圧 (N/m^2)

$(p_e - p_s)_{min}$: 最小ピーク風圧 (N/m^2)

p_s : 風洞内 (reference point) の静圧 (N/m^2)

q_H : ハブ高さの平均速度圧 (N/m^2)

算定した風圧係数の整理にあたっては、文献3)の手法を踏襲し、ナセルカバーの設計に用いることを考慮してJIS C 1400-1で規定される極値風速に対応した設計荷重ケースであるDLC6.1及びDLC6.2に対応する形とすることとした。従って、測点毎・風向毎の Cp_{max} および Cp_{min} に対し、DLC6.1に対応するケースと

して各測点毎に風向角が -15° から $+15^\circ$ (ナセル正面を 0° と定義)となる場合での最大・最小ピーク風圧係数を、またDLC6.2に対応するケースとして各測点毎に全風向角中での最大・最小ピーク風圧係数を求めた。結果の一例(DLC6.1対応の最小ピーク風圧係数)を図2に示す。

4.2 等価最大・最小平均風圧係数

風車は設置場所により風速だけでなく乱れ強さも異なることから、4.1で求めたピーク風圧係数に汎用性を持たせるため、以下に示す式により乱れ強さの影響を排除して一般化した等価最大平均風圧係数 Cpe_{max} と等価最小平均風圧係数 Cpe_{min} を求めた。なお、結果は4.1と同様に、DLC6.1対応用とDLC6.2対応用に分けて整理した。

$$Cpe_{max} = Cp_{max} / (1 + 7 \times I_{UH}) \quad (3)$$

$$Cpe_{min} = Cp_{min} / (1 + 7 \times I_{UH}) \quad (4)$$

ここで、

I_{UH} : ハブ高さ H における乱れ強さ (表1より、0.127)

結果の一例(DLC6.2に対応する等価最小平均風圧係数)を図3に示す。

4.3 角部アール付き矩形ナセルの変動圧力係数の提言

実際の設計に用いるには圧力分布は図3のような複雑なコンタ図ではなく、ある程度平滑化したブロック割された図であることが望ましい。文献3)においても矩形ナセルのブロック割図が提案されているのでアール付きナセルの効果比較が容易になるよう、そのブロック割を参考にしながらブロック割図

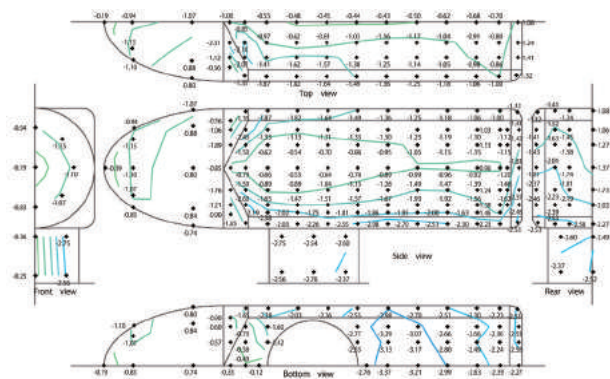


図2 風向角 -15° から $+15^\circ$ となる場合の最小ピーク風圧係数(DLC6.1に対応するケース)

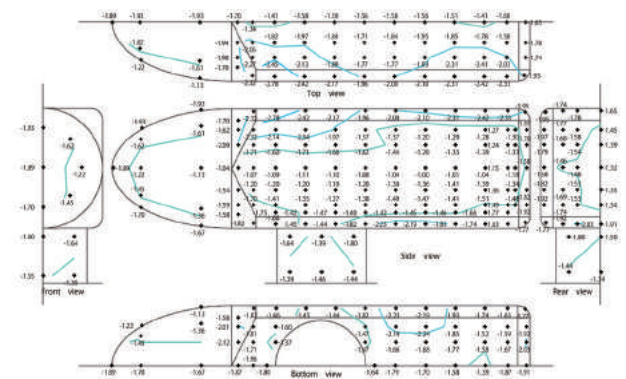


図3 全風向中の等価最小平均風圧係数(DLC6.2に対応するケース)

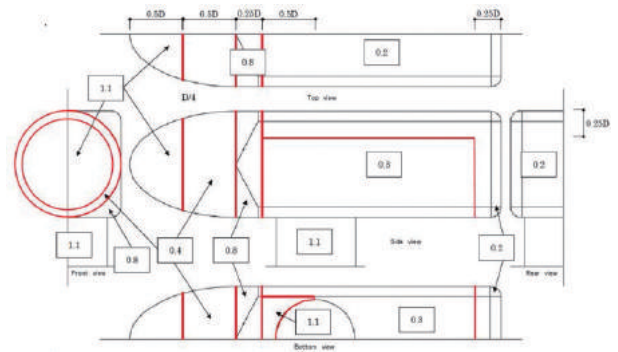
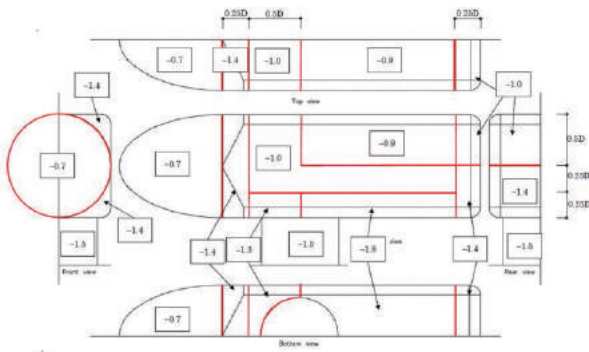


図4 DLC6. 1に対応する等価最大／最小平均風圧係数(左:最小、右:最大)

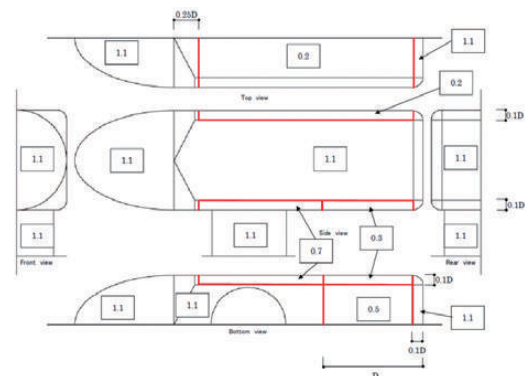
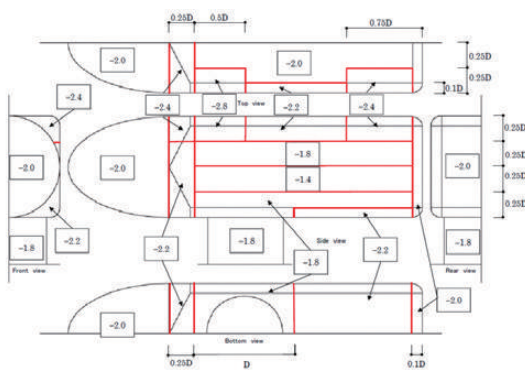


図5 DLC6. 2に対応する等価最大／最小平均風圧係数(左:最小、右:最大)

にまとめた。その結果について、DLC6. 1に対応する等価最大／最小平均風圧係数を図4に、DLC6. 2に対応する等価最大／最小平均風圧係数を図5に示す。

4.4 角部アールの有無による変動空気力への影響

角部にアールを設けたことによる効果を確認するため、図6に示す特定の測点に対してピーク風圧係数の風向毎の変化特性をまとめ比較した。特性変化の比較を容易にするため、測点番号・位置は文献³⁾のFig. 7の測点番号・位置に合わせ、アール付きナセルの測点番号には新たに(r)を付けることとした。但し、アール上に設けた測点(ダッシュ付き)は、その位置が文献³⁾の測点位置とは微妙にずれることになるので注意されたい。

図7は上面での比較を行ったものであるが、アールから離れた中央部(rt2とt2)では風向に対する変化特性は、アール有無での差はほとんど見られない。一方、rt4'とt4の比較では210°付近の後方からの風の際に、t4では角部での流れの剥離による圧力の急激な低下がみられるのに対し、アール付きのrt4'では

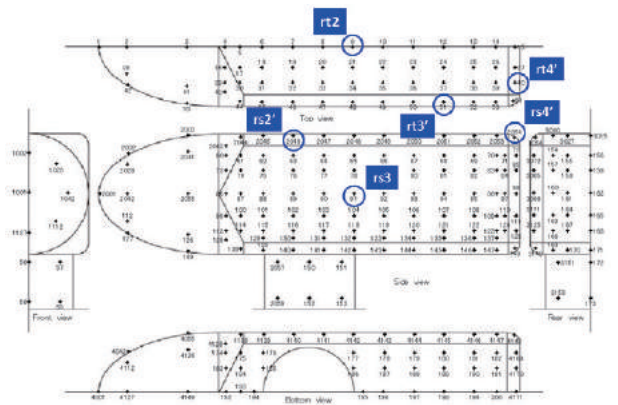


図6 アール付きナセル測点番号

それほど急激な低下はなく、アールの効果が確認できる。

図8は側面での比較を行ったものであるが、上面同様、中央部(rs3とs3)では風向に対する変化特性にはほとんど差がみられない。一方、rs2'とs2を比較すると、測点が上流側になる180~360°の間で、アール付きのrs2'では負圧が、アールがないs2では正圧が、それぞれ大きくなる特性となっていることが分かる。

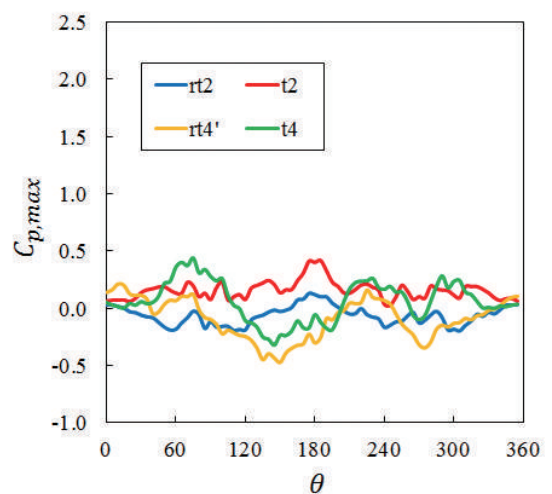
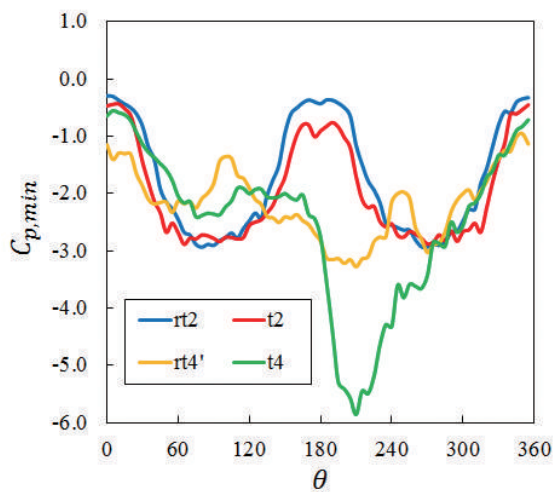


図7 上面におけるピーク風圧係数の風向別特性比較(左:最小、右:最大)

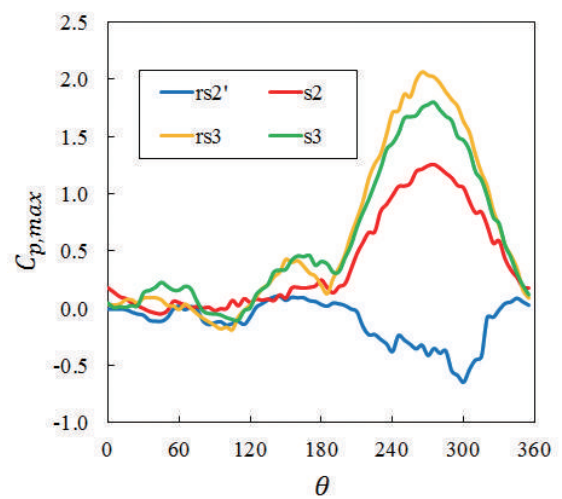
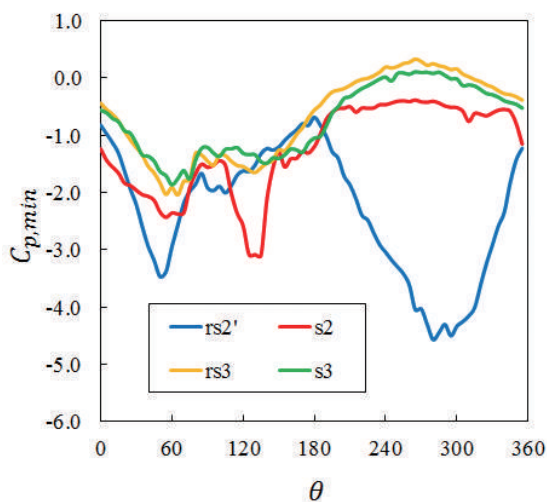


図8 側面におけるピーク風圧係数の風向別特性比較(左:最小、右:最大)

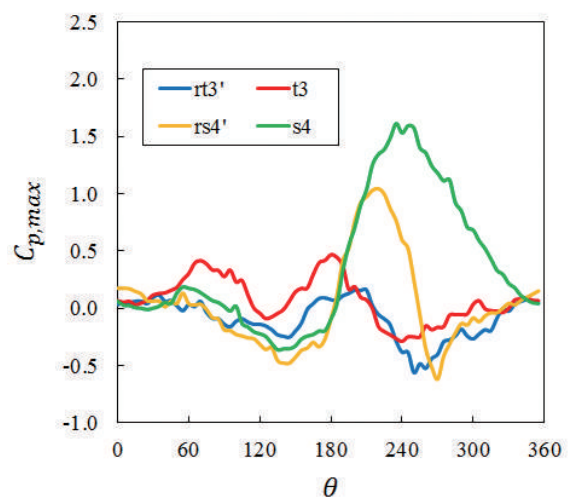
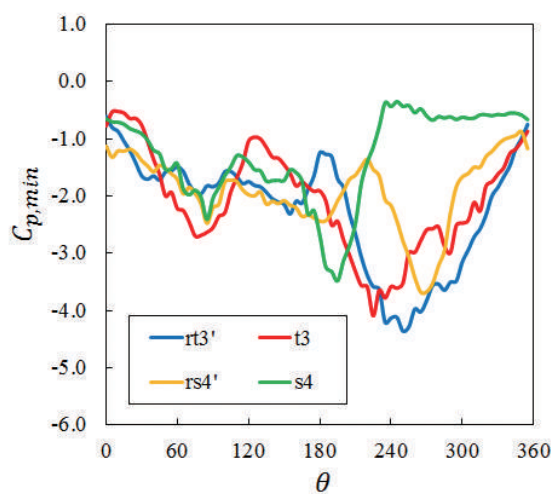


図9 ナセル後部の上面&側面におけるピーク風圧係数の風向別特性比較(左:最小、右:最大)

また、rs2'では60°付近に、s2では120°付近に負圧のもう一つのピークが確認される。アールの有無でハブ、ナセル&タワーでの流れの相互干渉が変化することもあり、負圧のピークが生じる風向が変化したものと考えられる。

図9は後部に近い上面(rt3'とt3)及び側面(rs4'とs4)での特性を比較したものであるが、図7,8同様に風向に対して複雑な変化がみられる中で、アール付きによる正圧の軽減が確認できるものの、負圧については上流側となる風向では軽減の効果がほとんど見られない測点があることも確認できる。

5. まとめ

アール付き矩形ナセルの代表的な形状に対して、風洞試験を行い変動空気力係数求め、その結果を反映した変動圧力特性をブロック割図にまとめ、本会からの推奨値⁵⁾として提示した。

本来は風車メーカーにて風洞試験或いは相応に精緻なCFDを実施し、個々の設計に反映されるべきものではあるが、海外でのナセルカバーの事故例が少ないこともあり、ここまでの検討を行ってないのが現

状のようである。

文献3)においてもGL2010²⁾では危険側になるとの警告が発せられており、風車メーカーとして独自の検討がなされない場合は、本会からの推奨値^{4),5)}等を反映した設計が行なわれることを期待したい。

なお、アール付きの効果については、角部の剥離が抑えられることにより、局所的に絶対値が極端に大きくなっていった負圧の発生は抑制される傾向にあり、アール付きには一定の効果があることが確認された。一方、部位によっては、タワーなどの干渉もあり、逆に正負の圧力の絶対値の上昇がみられる部位もあることも確認された。本会で検討を行った別のナセル形状においても、特定の風向で干渉によると思われる急激な圧力増減が生じる事例が確認されており、ナセルの設計には細心の注意が必要である。

近年、風車の大型化が進み、これまででない規模で特異な形状のナセルも出始めている中で、風洞試験或いは相応に精緻なCFDによる事前検討は必須であるが、それぞれの検討に限界もあることから、実機による観測等を並行して実施することにより、推定精度の向上が図られることが望まれる。

謝辞

記事作成にあたり、東京大学大学院 工学系研究科 社会基盤学専攻 教授石原孟先生には比較対象とする風洞試験結果をご提供頂いた。ここに感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 風力発電設備支持物構造設計指針・同解説[2010年版]、土木学会、平成23年1月
- 2) Rules and Guidelines IV Industrial Services, 1 Guideline for the Certification of Wind Turbines, Edition 2010, GL
- 3) H.Noda and T.Ishihara:Wind tunnel test on mean wind forces and peak pressures acting on wind turbine nacelles, Wind Energy 2014; 17:1-17
- 4) Nacelle Covers Peak Wind Pressure Calculation Method Rev.1, March, 2019, ClassNK
- 5) Equivalent mean pressure coefficients for rectangle nacelle with rounded corners, March, 2019, ClassNK



RENEWABLE ENERGY 2019 (2019年10月発行)

編集人 : 赤星 貞夫

発行者 : 一般財団法人 日本海事協会 事業開発本部 再生可能エネルギー部
〒102-8567 東京都千代田区紀尾井町4番7号
☎ 東京(03)5226-2032

本誌に掲載された全ての記事内容は、一般財団法人 日本海事協会の許可なく転載・複写することはできません。

記事の転載をご希望の方は、下記までご連絡ください。

E-mail : re@classnk.or.jp(再生可能エネルギー部)

一般財団法人 日本海事協会
事業開発本部
再生可能エネルギー部

〒102-8567 東京都千代田区紀尾井町4番7号

電話番号：03-5226-2032

E-mail：re@classnk.or.jp

www.classnk.or.jp