

洋上風車

Offshore Wind Turbines

吉田茂雄*

1. 概要

以下の1)～4)に示すように、洋上風力発電はあらゆる面で社会的価値の高い技術である¹⁾。本稿では、そのうち、風車に関する動向と展望について解説する。

1) 発電コストが低い

条件のいいプロジェクトの均等化発電コスト (Levelized Cost of Energy; LCOE) は、先進諸国の火力発電と同レベル以下になっている²⁾。

2) CO₂ 排出量が低い

火力発電は無論、他の再生可能エネルギーや原子力発電と比較して、単位発電電力量あたりのCO₂排出量が最も低い³⁾。

3) エネルギーセキュリティに対する効果

世界の風力エネルギーのポテンシャルは25～75TWと推定されており、世界の電力需要が16TWに対して、十分大きいエネルギーポテンシャルがある⁴⁾。特に、四方を海に囲まれる我が国の風力エネルギーポテンシャルは、陸上で118GWであるのに対して、洋上ではその5倍以上の552GWとの報告もある⁵⁾。

4) 産業に対する効果が大きい

風力発電は、産業の裾野が広い技術であり、世界全体の雇用創出効果は、約2百万人弱⁶⁾と報告されている。日本では、2040年までに洋上風力の国産化率60%を目標としており、これが実現されれば、2040年時点の洋上風力の直接効果だけで3万人以上の雇用、1兆円以上の経済波及効果が推定されている⁷⁾。

2. 動向

2.1 導入状況

風力発電は、直近の5年間に世界全体で毎年50～95GWが新規導入され、累積の設備容量は2021年末で837GWに達している。従来、風力発電は、陸上を中心に設置が進められてきたが、過去10年間は洋上風力の伸びが顕著になってきており、2021年までの累積で7%を洋上風力が占めるようになっている⁸⁾。

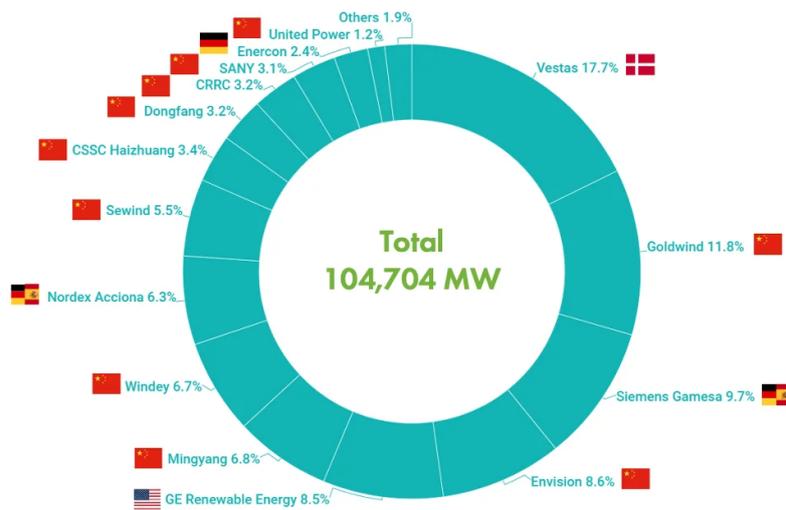
我が国の風力発電は、現在、全電力供給の1%を占めるに過ぎない。しかし、周囲を海に囲まれた、山の多い狭い国土に1億人以上が住む我が国においては、洋上風力の実用化に対する期待が極めて大きい。そのような背景の中、2050年カーボンニュートラル宣言(菅元首相、2020)以降、より明確なビジョンが示され、将来の大規模導入・主力電源化に向けた、さまざまな施策が取られており、今後も1GW/年のペースで導入が進んでゆくことが予想される。

2.2 風車メーカーの動向

世界の新規導入における風車メーカーのシェアをFig 1(a)に示す。今日の世界の新規導入量の約1/2を中国が占めるが、世界全体の新規導入量の約50%を中国メーカーが占めている。特に、洋上風力においては、中国メーカーの存在感は際立っており、中国の上位3社(Seewind, Mingyang, Goldwind)が、世界の洋上風力全体の50%を超えるまでになっている。

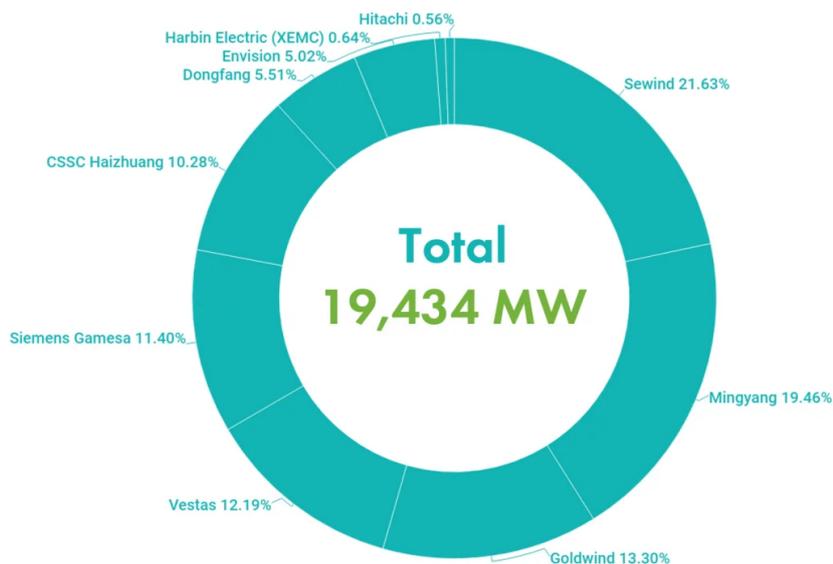
中国市場に設置される風車のほとんどは中国製風車であり、欧米製の風車はほとんど導入されていない。国内市場拡大と産業の足並みが揃わないと、

*佐賀大学 海洋エネルギー研究所 教授
九州大学 応用力学研究所 教授



Source: GWEC Market Intelligence, May 2022

(a) 陸上風力



Source: GWEC Market Intelligence, May 2022

(b) 洋上風力

Fig 1 新規導入に対するシェア (2021年)⁹⁾

国内での導入の停滞や輸入機による国内市場の席巻などに陥るが、中国は導入拡大と産業化を両立させた好例と言える。

また、中国製の風車は欧米製と比較して安価であり、また、サプライチェーンの多くが中国にあるため、今後の世界市場における中国メーカーの動向が注目される。

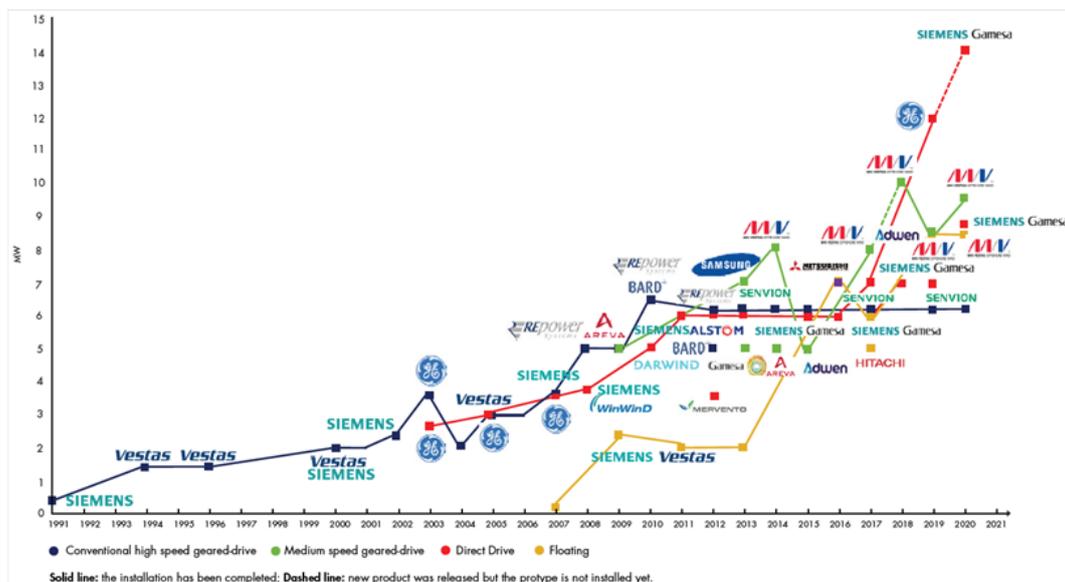
2.3 風車サイズの動向

近年の代表的な洋上風車と主要各国に新規導入された風車のサイズの履歴を Fig 2 に示す。洋上風力が本格化した 2010 年代以降、急速に大型化が進ん

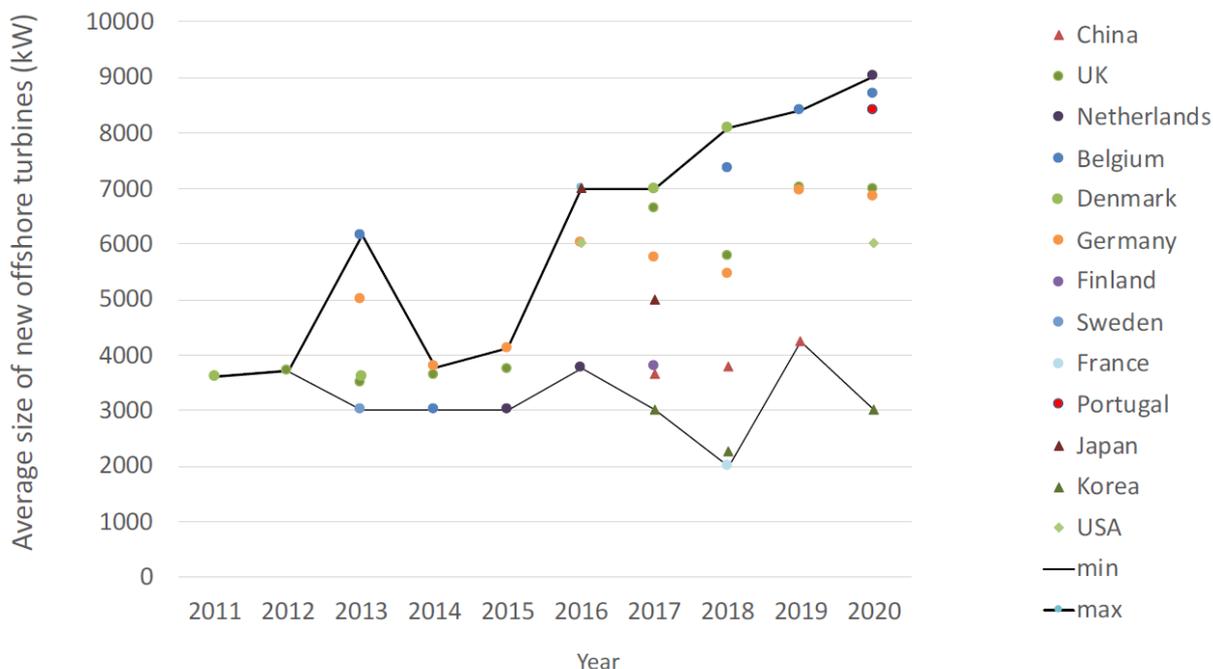
でいることが分かる。また、最大サイズから、平均サイズには 5 年程度の遅れがある。

3. 風車要素の動向と展望

洋上風力の社会的価値は冒頭に述べた通りであるが、開発の方向性としても、大型化、低コスト化が中心で、環境や電力系統への適合性の重要性も大きくなる。特に、陸上の風車では、重量や大きさにより、輸送性・建設性で制約を受けるが、洋上においてはそれらの制約が相対的に小さい。一方、陸上と比較して、洋上ではアクセス性が著しく悪く、一旦、



(a) 代表的な機体サイズ¹⁰⁾



(b) 新規導入機平均¹¹⁾

Fig 2 洋上風車サイズ

故障や修理に必要になると大きな経済的な損失を被るため、信頼性や整備性に対する要求は非常に高い。

また、洋上風車は、陸上のように居住地近くに設置されることはないため、騒音や景観に対する要求は相対的に低い。

以上のような状況において、ロータとドライブトレイン・発電システムについて、動向・展望と課題を述べる。

3.1 ロータ

(1) ブレード枚数

今日の風車のロータは、ほぼ100%が3枚翼ロータである。これは、1980年代の3枚翼アップウィンドロータ、かご誘導発電機、ストール制御を特徴とするデンマーク型風車からの歴史的な発展によるものが多い。この形式は、信頼性の高い構造で、長い間、市場の主流を占めてきた。その後、風車のサイズが1MWを超えると、定速・ストール制御は、

より変動荷重と低風速域の騒音が低く、電力系統への影響も小さい可変速・ピッチ制御に取って変わられたが、ロータ形式は、依然、3枚翼・アップウィンドロータが圧倒的な主流のままである。

3枚翼ロータは2枚翼ロータと比べて、回転速度が低いため、比較的騒音が低く、また、視覚的にもバランスがいい。また、ロータの質量・慣性バランスがいいため、回転や変形による振動が発生しにくい。一方、2枚翼ロータはほとんど普及しておらず、今日の商業機としては、2-B Energyの6MW機が最大である。しかし、洋上風車としては、騒音の問題は比較的小さく、輸送・建設、ならびに、運転・保守に対する要求が高いため、地上にロータ・ナセルを組み立てられ、ナセルのヘリコプタでのアクセスが容易な2枚翼風車は将来の洋上風車の技術として注目されている。

2枚翼ロータは、回転速度を高くすることが多いので、空気中の粒子や水滴による前縁エロージョンや、共振や自励振動が発生しやすく、技術的な難易度は、3枚翼ロータよりも圧倒的に高い。

(2) ロータ位置

同様に、ロータ位置についても、デンマーク型風車の流れからアップウィンドロータがほとんどを占め、ダウンウィンドロータの大型商業機は、日立製作所2.1MW、5.2MW機の後、2-B Energyの6MW機のみである。ダウンウィンド風車は、タワーの風下側をブレードが通過する際の、低周波音や変動荷重のため、敬遠されてきた。しかし、12) 13)などのモデルが開発されるとともに、大型化により、ブレードの剛性が相対的に低下するため、変動荷重に対する影響が低下している。また、低周波音については、実際の運用において、適切な設計により問題ないレベルに低減することができる。特に、居住地に対して十分な離隔が確保できる洋上風車において、大きな問題になることはない。

一方、ダウンウィンドロータは以下の2つの観点から、将来の超大型風車の技術として有望である。

1) 超大型化への適性

大型風車では、発電時にブレードが風下側に大きく撓む。アップウィンド風車では、ブレードとタワーのクリアランスを確保するため、ブレードのプリコーン、プリベントの適用もしくは、ブレードの剛性を高くする必要がある。プリコーンではロータ面積が小さくなり、プリベントでは製造・輸送が不利で、ブレード構造向上ではブレード自体の質量とコストが大きくなる。それに対して、ダウンウィンド

風車では、ブレード剛性に対する要求が小さいため、ブレード自体、さらには、ナセルとタワーが軽量化し、LCOEを低減する。特に、超大型風車や、極値風速が高い場合に、この傾向が顕著となる¹⁴⁾。

2) 浮体式洋上風車としての適性

水平軸風車は、ブレードとタワーのクリアランスを設けるために、アップウィンドロータには正の、ダウンウィンドロータには負のティルト角を設ける。ほとんどの浮体式洋上風車は、発電時のロータスラストの影響で、浮体が風下側に傾斜するが、その場合、ミスアラインメントは、アップウィンドロータでは増加し、ダウンウィンドロータでは小さくなる。

実機の例から、各々のティルト角が+6degと-3degで、浮体が3deg傾斜した場合、ダウンウィンドロータではミスアラインメントがほぼ0degになるのに対して、アップウィンドロータでは、平均9degとなり、通常の風車の設計で想定する平均ヨーミスアラインメントを超過する。流入パワーも36%低下し、ミスアラインメントが大きい条件で運転することは、疲労荷重の観点からも望ましくない¹⁵⁾。

(3) ブレード形状

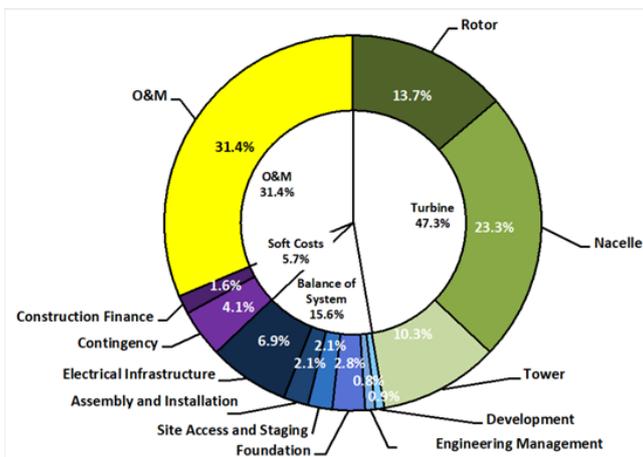
洋上風力では、風の乱れが小さいため、比較的安定した条件での発電が可能である。そのため、荷重低減の観点から、設計揚力係数を陸上よりも高めに設定して、翼弦長を短く（ソリディティを小さく）するのが一般的である。これにより、大変形、重力の影響、高次モードの影響、捩じれの影響などがより顕著になる。これらは、小型の風車では問題にならなかったものが多かったが、大型の風車ブレードではより詳細なモデルが必要になってきている。特に、フラップ方向に大きな曲げ変形が発生しやすいため、ブレードとタワーのクリアランスとの確保、ならびに、変形時の出力の維持・増加のために、テラリングやプリベントなどは、大型風車としては一般的な技術になっている。

これ以外に、構造上有利な厚翼翼型、揚力係数を確保するためのボルテックスジェネレータや、空力騒音低減のためののこぎり状のブレード後縁セレーションなども適用されている。

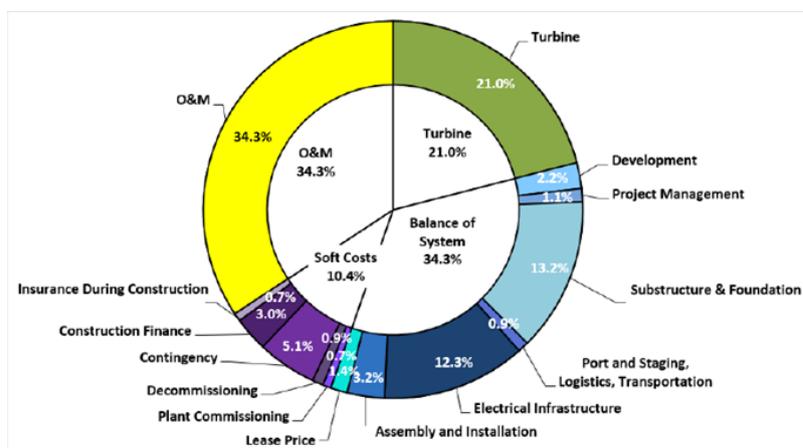
(4) ブレード材料・構造

ブレードの軽量化においては、荷重低減のほか、材料と製造法を考慮した強度の向上と、強度のばらつきでの低減が重要である。

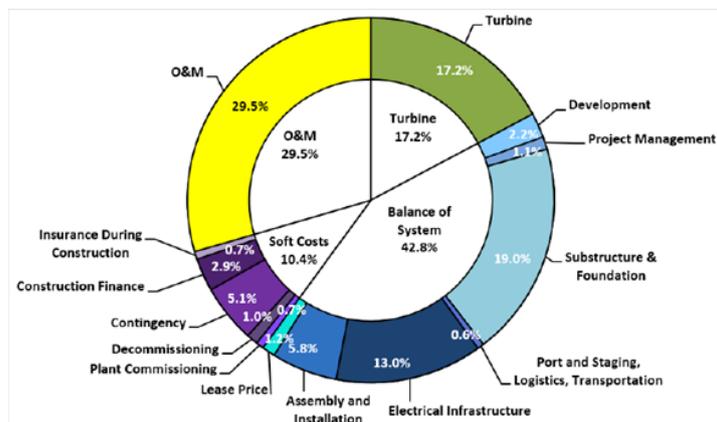
ブレードの材料は、依然、エポキシ系の樹脂とガラス繊維によるGFRPが主流であるが、必要に応



(a) 陸上ウィンドファーム



(b) 着床式洋上ウィンドファーム



(c) 浮体式洋上ウィンドファーム

Fig 3 LCOE 内訳の例¹⁶⁾

じて、高価ではあるが、比強度・比剛性に優れた炭素繊維による CFRP が選択される。

また、製造方法は、初期のハンドレイアップから、真空ハギング、インフュージョン、あるいは、プリプレグと進歩し、ブレードの軽量が進められてきたが、近年では、さらにプルトルージョンによる成型も実用化している。

(5) ブレードの廃棄・リサイクル

風車の設計寿命は 20 ～ 25 年が一般的で、運用期間を終えた風車は廃棄される。日本でも初期の風車は廃棄され始めているが、早くから膨大な数の風車が設置されてきた欧米では、既に、年間百万トン以上のブレードが廃棄されており、風車の多くの部品はスチール製であるが、ブレードは、GFRP や

CFRPの複合材で、レジンに有害な化学物質を含むなど、廃棄・リサイクルに課題が多い。今後から開発する風車のブレードは、従来以上に、廃棄・リサイクルに配慮されたものになる。

3.2 ドライブトレイン・発電システム

ドライブトレイン・発電システムも風車の経済性や機能を大きく左右する要素である。特に洋上風車では、本体コストの低減はもとより、計量化、故障率低減・稼働率向上が重要な要素になる。

上述の通り、数百kW程度サイズの風車では、固定ピッチ角のストール制御と合わせた、増速機とか誘導発電機の組み合わせが主流であった。その後、1MW前後からは、変動荷重の低減と低風速域の騒音の低減、ならび、電力システムに対する影響の観点から、可変速・ピッチ制御が主流になってきたが、ここでは、高速の増速機とパーシャルコンバータと組み合わせた二重給電誘導発電機(Doubly Fed Induction Generator; DFIG)が好まれた。また、その間、巻線または永久磁石による同機発電機によるダイレクトドライブ(ギアレス)のシステムも一定のシェアを持っていた。その後の、数MW以上の本格的な洋上風車においては、中速の増速機付のハイブリッドドライブ、または、ダイレクトドライブの永久磁石同機発電機とフルコンバータを組み合わせた発電システムに収斂している。ダイレクトドライブは、故障リスクの高い増速を持たない点で有利ではあるが、膨大な量の永久磁石を使用するため、今後、更なる大型においては、軽量で永久磁石の使用量を大幅に削減できるハイブリッドドライブが優勢になる可能性がある。

4. まとめ

典型的なウィンドファームのLCOEの内訳をFig 3に示す。(a)は陸上、(b)は着床式洋上、(c)は浮体式洋上のウィンドファームの試算例である。この例で、風車の比率は、陸上では47%と、LCOEの約1/2を占めるが、洋上では、着床式が21%、浮体式が17%と大きくない。しかし、BOS(Balance of System)やO&Mのコストはサイズよりも基数に依存する部分が大きいため、より大型の洋上風車の研究開発が進められている。あらゆる要素のイノベーションにおいて、上記の比率以上に風車が重要な役割を担う。また、上述の中国の例で、政策と産業界の成功例を紹介したが、風車なしの取り組みでは、産業や技術に対する効果は限定的になる反面、情報、ノウハウ、ならびに、かなりの資金の海外流

出が予想される。より有機的で、輸出にも供し得る要素やサービスの獲得の観点から、国内の風車メーカーが待望される。

風力発電の全体的な動向については1)で紹介したので割愛した。また、上記で挙げた課題のほかにも、主要な機械要素のほか、O&Mの向上に向けた、故障予防/予知、デジタルツイン、スマートロータ、ライダー支援制御などによる制御技術の向上、輸送・施工性の向上など、本稿で触れなかった数多くの課題がある。

参考文献

- 1) 吉田茂雄, 洋上風力発電の動向・展望(海洋再生可能エネルギーの動向・展望), 太陽エネルギー, 49, 4, 2023.
- 2) IRENA, Renewable Power Generation Costs in 2017, 2018.
- 3) GWEC, Global Wind Report, 2022.
- 4) Seive R., Entering the Solar Era, The Next 50 Years of Energy Generation, 2020.
- 5) JWPA, 2021.
- 6) REN21, Global Status Report, 2022.
- 7) 自然エネルギー財団, 日本における洋上風力発電導入の社会経済分析, 2022.
- 8) Global Wind Energy Council, Global Wind Report, 2022.
- 9) Global Wind Energy Council, Market Intelligence, 2022.
- 10) Global Wind Energy Council, Global Offshore Wind Report 2020, 2020.
- 11) IEA Wind, Annual Report, 2020, 2021.
- 12) Yoshida S., Kiyoki S., Load Equivalent Tower Shadow Modeling for Downwind Turbines, JSME Journal, B, 2007.
- 13) Yoshida S., Dynamic Stall Model for Tower Shadow Effects on Downwind Turbines and Its Scale Effects, Energies, 13 (19), 2020.
- 14) Namura, N., Shinozaki, Y., Design Optimization of 10MW Downwind Turbines with Flexible Blades and Comparison with Upwind Turbines, J.Phys.: Conf. Ser. 1618 042021, 2020.
- 15) 吉田茂雄, 次世代浮体式洋上風車の実証事業, 足利大学・風力エネルギー利用総合セミナー, 2023.
- 16) Stehly, T., et al., 2019 Cost of Wind Energy

Review, NREL/TP-5000-78471, 2020.

洋エネルギー研究所洋上風力エネルギーシステム分野教授。日本風力エネルギー学会フェロー，理事，風力・水力部会長。博士（工学）。

著者略歴



吉田 茂雄（よしだ しげお）

1990年京都大学・工学部・航空工学科卒業。1990~2013年富士重工業株式会社。2013年~現在九州大学・応用力学研究所・教授。2021年佐賀大学海