

## 2.1.5 風力発電

### (1) 研究開発領域の定義

風力発電に関する科学、技術、研究開発を記述する。風力発電は、風の運動エネルギーを風車（風力タービン）により回転力に変換し、発電機により電力へ変換する発電方式である。設置する場所で陸上風力、洋上風力（浮体式、着床式）に分かれる。ここでは、風力発電に係る各要素技術、周辺技術、さらにシステム全体を最適化する基盤技術などを対象とする。

### (2) キーワード

風力発電、洋上風力発電、浮体式、着床式、運転保守、系統連系

### (3) 研究開発領域の概要

#### [本領域の意義]

現代の大型風車は風の運動エネルギーの約50%を電力に変換できる。経済的に大量導入可能なので、再生可能エネルギーの中では水力発電の次に大規模に利用されている。現代の大型発電用風車は、主に揚力型、水平軸、Upwind（ロータをタワーの風上に配置）、プロペラ式3枚翼、鋼製モノポールタワー、の特徴をもつ。風向に追従して首を振るヨー制御、強風時に翼のひねり角度を変えて風を受け流すピッチ制御、風速に合わせてロータの回転数を増減する可変速運転、の3種類の制御を標準装備している。この基本構成は、2000年代に広範に普及したピッチ制御と可変速運転を除くと、1980年代のオイルショック後に確立した。既に30年以上の信頼性と経済性の競争で淘汰された結果であり、今後も大きくは変わらないであろう。現時点での現実性のある代替技術は、Downwind（+受動ヨー制御）、2枚翼、コンクリート製（もしくは鋼製とのハイブリッド）タワー、の3技術くらいである。

風力発電の世界の累積導入量は2019年末で6億5千万kW（651 GW）・約40万基である。これは日本国内の発電設備の総合計約300 GWの2倍を越える。世界の年間電力需要の7%（EUでは15%、日本は0.7%）を風力発電が供給している。2019年の新規導入量は60.4 GW（約2万台）で年成長率は9%、年間投資額は数十兆円に上る。洋上風力発電の世界累計は2019年末で29.1 GW、新規導入量は6.1 GWで、年間投資額は約3.3兆円（299億ドル）に上る。風力発電全体に対して、累計で5%、新規で10%を占める（図表2.1.5-1）<sup>1)</sup>。

図表 2.1.5-1 風力発電の市場規模

2019年末 時点	風力発電（全体）		洋上風力発電	
	世界	日本	世界	日本
累計	651 GW（約40万台）	3,923 MW（2,414台） 世界の0.6%、21位	29.1 GW 全体の5%	65.6 MW（29台） 全体の1.6%
新規	60.4 GW（約2万台）/年	270 MW（104台）/年 世界の0.4%、24位以下	6.1 GW/年 全体の10%	1 MW/年 全体の0.4%
投資額	数十兆円/年		約3.3兆円/年	

注：1 GW=千MW=百万kW

**[研究開発の動向]**

現代風車は、オイルショック（1973年と1978年）の石油代替電源ニーズの下で、無人運転を可能にする電子制御技術と、軽量高強度のガラス繊維強化プラスチック複合材料（Glass Fiber Reinforced Plastic : GFRP）の発達の恩恵を受け、実用化された。1980年代にはデンマークを中心に、水平軸プロペラ式3枚翼鋼製モノポールタワー、ストール制御（高風速時に翼形状の空気特性により失速現象が発生して定格出力以上の発電を防ぐ設計、翼はハブに固定）、軸系は増速機と籠型誘導発電機、プロペラの回転数は一定（固定速）という安価に大量生産可能な設計（デンマークモデル）が確立して普及した。

風車は経済性の追求から1990年代後半に急速に大型化して、2000年頃にはロータ径50 m、定格出力1 MW を越えた。立地も、平均風速の高い好風況の地域（Class I）から、より風速の低い地域（Class II・III）に移行し、より大きなロータ直径が求められるようになった。こうした風車の大型化に伴い、出力制御と強風時停止を確実にを行うために、翼根部に旋回輪軸受を設置して翼のねじり角度で出力を制御するピッチ制御がストール制御に取って代わった。さらに電力変換装置（インバータ/コンバータ）を介して連系することで、風速の強弱に合わせて回転数も増減する可変速運転（瞬間的な風速変化による出力変動を平準化できる）も普及した。こうした1980年代から現在までの大型風車の仕様の変遷を図表2.1.5-2に示す。

2.1 俯瞰区分と研究開発領域  
エネルギー区分

**図表 2.1.5-2 大型風車の技術仕様の進歩<sup>2)</sup>**

	1980年代	2000年代	2020年
立地	陸上	主に陸上、一部が洋上	洋上比率が10%を越える
風況	強風地域（Class I : 平均風速10 m/s）	低風速化（Class II : 平均風速8.5 m/s）	陸上 Class III（7.5 m/s） 洋上 Class S（10 m/s 超）
定格出力	20 kW ~ 1 MW	1 MW ~ 3 MW 徐々に大型化	陸上向け平均は2.7 MW 洋上向け平均は7.8 MW
ロータ直径	25 m ~ 50 m	50 m ~ 100 m	陸用120 m 以上、洋上160 m 以上
翼材料	木製合板またはGFRP	GFRP	長大翼はCFを部分採用
翼の防雷	無し	レセプターが標準装備へ	
タワー	鋼製モノポールタワー	一部の高高度タワーはコンクリート製へ	
風向風速計	カップ式	徐々にドップラー式へ	ドップラー式
軸系構成	増速機付（3段式）	主流は増速機付、 約10%（独 Enercon）のみが ギアレス式を採用	まだ増速機付が主流だが ギアレス式も30%以上へ
発電機	籠型誘導発電機 （4, 6極）	主流は巻線型誘導発電機、 約10%（独 Enercon）のみが 多極同期発電機を採用	2/3が巻線型誘導発電機、 1/3が永久磁石式多極同期発電機 （PMSG、中速機も含む）
電力変換器	無し	主に部分負荷容量	1/3が部分、2/3が定格容量
回転数	固定速運転	可変速運転が標準装備へ	
出力制御	ストール制御が主流	ピッチ制御が標準装備へ	
ブレーキ	主に主軸ブレーキ	空力ブレーキ（翼のフェザリング）	

風車の大型化と低風況向けのロータ直径拡大に伴い、最近のブレード長は陸用で50 m以上、洋上用は82～108 mまで進展している。ブレード材料には、軽くて強いガラス繊維強化プラスチック（GFRP）が主に利用されているが、洋上風車のブレードでは、強度を高めるために部分的（Spar Cap部）に高価だが剛性と比強度の高い炭素繊維（Carbon Fiber）の利用も広がっている。また、性能向上や騒音抑制のために、ブレードへの各種のエアロパーツを添付する工夫も普及している。

より速い上空の風を求めて、世界的にタワーの高高度化（ハブ高増大）が進んでいる。欧州（ドイツ）の新規設置風車の平均ハブ高は2014年時点で116 mまで伸びている<sup>3)</sup>。日本も2021年12月にはハブ高116.5 mの風車が青森で運開する予定である<sup>4)</sup>。高高度タワーでは、しばしば基部の直径が4 mを越えるため、トンネルや歩道橋の下を通れないなどの輸送制限が課題になる。このため、ドイツを中心に、鋼製モノポールの代わりにコンクリート製タワー（現地打ちと工場生産の2手法あり）、もしくは大直径の下半のみコンクリート製にしたハイブリッドタワーの普及が進んでいる。

主軸系の構成は、発電機を小型化するために、ロータ（プロペラ）と発電機の間には歯車式の増速機構（増速機）を挟む方式が、2019年時点では主流（約73%）である<sup>5)</sup>。ロータに大直径の多極同期発電機を直結するギアレス方式もレアメタル（永久磁石式同期発電機の製造に大量に必要）の調達容易な中国の風車メーカーを中心に徐々にシェアを増やしている。

パワエレ面では、送電システムからの多様な要請に対応できるように、定格容量の電力変換装置（Full Converter）を持つ風車が2019年時点で57%まで増えている<sup>5)</sup>。さらに2010年頃から瞬間的に系統電圧が低下しても風車の運転を継続する機能も標準装備されている。

立地拡大では、陸用では年平均風速7.5 m/sの低風況地域（Class III）向けが増えてきている。また、-20℃以下の寒冷地、2000 m超の高標高、熱帯性低気圧（台風）の襲来地域にも風力発電が普及している。台風に対しては、大型風車の国際標準IEC61400-1への日本委員会からの提案が採用され、基準風速57 m/sのClass T（Tropical Cyclone Class）を新設した改訂4版（4th edition）が正式発行された<sup>6)</sup>。洋上風力発電では、風車の大型化（2019年新規の平均サイズは7.8 MW<sup>7)</sup>）と水深増大（2019年運開サイトの平均深度は33 m<sup>7)</sup>）に伴い、モノパイル基礎の直径が従来の8 mから12 mへ拡大している。これにより7～10 MW級風車が水深約50 mまでモノパイルで設置可能になり、より高価なトリポッド式・トリパイル式の基礎は淘汰された。さらに浮体式洋上風力発電の実証研究も各国で進められている（（5）科学技術的課題を参照）。

#### （4）注目動向

##### 【新展開・技術トピックス】

ここでは、原則として既に数十台以上の大型風車で実績があり、商用事業への普及が始まっている新技術を紹介する。MW級以上の大型風車では実証されていない新技術は「（5）科学技術的課題」に示す。

##### ■陸上風力発電

経済性向上と立地拡大のために、大型化（欧州では定格出力4～5 MW、ロータ直径120～150 m）と低風速域（平均風速7.5 m/s）対応が進んでいる。具体的には主に、ブレード長を延伸し、ハブ高を増大（100 mを越える高高度タワー化）した風車が開発され、普及した。

##### 1) 分割翼

50 mを越えるブレードは、交差点や山岳部の曲道を通できないこの輸送制約から、ブレードを途中で分割して輸送して、現地で接合する分割翼が商用化しつつある<sup>8)</sup>。

## 2) ブレードのエアロパーツ

ブレードの空力性能を向上させるために、翼表面への突起 (Vortex generator) や板 (Air spoiler) の設置が普及した。翼の風切音抑制のために、翼後縁に鋸歯 (三角形) 状の小片 (Serration) を添付する設計も普及しつつある。

## 3) 高高度タワー

ハブ高100mを越えると、タワー基部の直径が4mを越えるため、従来の鋼製モノポールタワーでは輸送制限を受ける。この対策として、現地で施工できるコンクリート製で大直径化する方法が広く普及した。また、鋼製タワーでは、最下段を円周方向に120°で3分割することで輸送制約を回避して、4mを越える大直径を達成する手法も商用化している<sup>9)</sup>。

### ■洋上風力発電 (風車本体)

#### 1) 風車の超大型化

定格出力を増大して必要台数を減らして、建設工数 (建設費用) を削減する工夫が進んでいる。2019年の欧州の新設洋上風車の平均定格出力は7.8 MW (7800 kW) まで大型化している<sup>7)</sup>。最近の風車メーカー各社の最新鋭機の一覧を図表2.1.5-3に示す。2020年8月時点で運転中の世界最大の風車はGEのHaliade Xで定格出力は12 MW (1万2千kW)、ロータ直径は220 mである。最近は検証・量産費用を含む新型風車の開発費が高騰 (MW級で約500億円) しており、大市場を押さえた大企業へのメーカー集約・寡占化が顕在化している。

#### 2) 雨滴エロージョン対策 (LEAPWind<sup>10)</sup>)

洋上風車は、陸上より騒音 (ブレードの風切音) の制約が弱いため、翼性能向上のために陸上風車 (約80 m/s) を越える翼先端速で風車を運転する仕様になっている。このため雨滴によるブレードのエロージョン浸食の被害が顕著になった。洋上でのブレード交換には傭船料の高いジャッキアップ船 (約1千万円/日) が必要であり、莫大な修理費用を要した。そこで複数の企業グループによる耐エロージョン素材の研究開発と実証試験が欧州委員会の補助を得て行われている。

### ■洋上風力発電 (基礎と建設工事)

欧州の洋上風車の基礎は、自動溶接で量産可能な monopile 基礎が80~90%を占める<sup>7)</sup>。他は、大水深 (約50 m) ではジャケット基礎 (溶接工数多く重量も大きい)、浅水深 (20 m未満) では重力式基礎も利用される。モノパイル (MP) とタワーの接合部にはトランジションピース (TP) という太めの鋼製円筒が用

図表 2.1.5-3 プロトタイプが試運転中の各社の洋上風車

風車機種名	定格出力	ロータ直径	メーカー名	初号機運開 / 商用化
V164 10.0	10 MW	164 m	MVOW (三菱 Vestas)	2018年 / 2021年
V174 9.5	9.5 MW	174 m	MVOW (三菱 Vestas)	2020年 / 2022年
SG11.0-193 DD	11 MW	193 m	SGRE (SiemensGamesa)	2020年 / 2022年
SG11.0-200 DD	11 MW	200 m	SGRE (SiemensGamesa)	2020年 / 2022年
Haliade X	12 MW	220 m	GE Renewables	2019年 / 2021年
D10000-185	10 MW	185 m	Dongfang (DEC: 東方電気)	2020年 / -

意され、隙間にセメント（グラウト）を詰めて打設時の傾きを補正できるようになっている。

### 1) モノパイル基礎の最適化（PISA project<sup>11)</sup>）

直径、厚さ、深さ等を変えた数十本のパイルを打設して、海底地質に応じた最適設計を把握する共同研究が実施され、モノパイル基礎のコストが約30%低減された。

### 2) グラウトの脱落防止

MPとTPの間の下端のシール不良でグラウトが脱落して風車が正常に固定できなくなるトラブル（2009年、英国Robin Rigg洋上風力発電所）の反省から、最近のモノパイル基礎（MPとTP）は単純円筒ではなく、円筒（直径大）・コーン・円筒（直径小）を繋げた形状になっており、コーン部で確実に風車を支持できるように改良された。

### 3) パイル打設の垂直精度の向上

ハンマーによるパイル打設時に、パイルを両側から治具で支えて打つ工法が普及し、垂直精度が向上した。

### 4) モノパイル基礎のトランジションピースレス（TP less）工法（Skybox<sup>12)</sup>）

浅水深ではグラウトによる角度補正が不要になり、巨大なTPの代わりに簡素なコンクリート製架台を用いる工法も登場した。オランダのWestermeer洋上風力発電所（3 MW×48台、合計144 MW）他で適用されている。

### 5) モノパイル基礎のスリップジョイント工法（Slip Joint Connection<sup>13)</sup>）

MP上部と風車下部を相補的なコーン状にすることで、グラウトやボルトを使用せずに摩擦だけで風車を基礎上に据付ける新工法が、2018年にオランダのPrincess Amalia洋上風力発電所で実証試験された。洋上風車設置のクレーン作業が1回分少なくて済むため、材料・機器・人員の節約と設置時間の短縮の両方でコストを削減できる。

### 6) サクシオンバケット基礎

砂質の海底地盤には、パイル下部をバケツ状に拡げて、その内部で砂を攪拌してポンプで吸い上げることでパイルを沈み込ませるサクシオンバケット工法（施工に重機が不要）が2018年の英国European Offshore Wind Deployment Centreの8.4 MW×11基で実証された<sup>14)</sup>。モノパイル基礎・ジャケット基礎の双方に適用できる。日本でも2018年からNEDOによる技術開発が行われ、2020年にはNEDO助成を受けてメーカーによる実証試験<sup>15)</sup>が開始されている。また中国でも適用が行われつつある。

### 7) 自己沈降式重力式基礎

中空のコンクリート製の重力式基礎自体を浮かべて現地まで輸送して、注水沈下させて基礎を敷設する工法が、EOWECの8.4 MW×2基<sup>14)</sup>と、2019年のスペイン領カナリア諸島のPLOCAN研究所のElisa Project（5 MW×1基）<sup>16)</sup>で試行された。大重量の重力式基礎の輸送費を低減できる。

## ■運転保守（O&M）

### 1) 隔監視

主要機器に各種センサーを設置して、故障の予知・検知・寿命診断の遠隔監視が標準装備になっている。

### 2) ビッグデータ解析

大手風車メーカーは、納入した数万台の風車の数十年分の運転データと遠隔監視データをサーバに蓄積し、人工知能（AI）でビッグデータ解析することによる故障診断・寿命延長・計画保守・性能向上を行っている。

### 3) ドローン活用

落雷等によるブレード損傷の検出や、寒冷地での着雪・着氷の除去へのドローン活用が普及している。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

1) 洋上風車関連

EUでは、Offshore Wind Acceleratorという統合的な洋上風車の技術開発プログラムが運用されている<sup>17)</sup>。特に技術成熟度が高く、実用化に近い開発は、英国研究組織Carbon Trustを中心に実証試験が行われている<sup>18)</sup>。

日本では風力発電の技術開発は、NEDOを中心に行われている<sup>19)</sup>。

2) 浮体式洋上風車発電プロジェクト

世界各国で、浮体式洋上風力発電の商用化に向けて実証研究が行われている。主な浮体式洋上風車プロジェクトの実績と計画 (2025年運開予定まで) を図表2.1.5-4に示す。

図表2.1.5-4 各国の浮体式洋上風力発電プロジェクト  
(2020年8月時点、日本風力発電協会調べ)<sup>7), 20), 21)</sup>

運開	設置海域	プロジェクト名	浮体形式	搭載風車
2009	ノルウェー	Hywind Norway	スパー型	2.3 MW × 1基
2011	ポルトガル	WindFloat <sup>注1)</sup>	セミサブ式	2 MW × 1基
2013	日本	GTOFOWT <sup>注2)</sup>	スパー型	2 MW × 1基
	日本	FukushimaFORWARD <sup>注3)</sup>	セミサブ型	2 MW × 1基
2016	(同上)	(同上)	セミサブ型	7 MW × 1基
2017	(同上)	(同上)	改良スパー型	5 MW × 1基
	フランス	FloatGen	バージ型	2 MW × 1基
	英国	Hywind Scotland	スパー型	6 MW × 5基
2018	英国	Kincardine-1	セミサブ型	2 MW × 1基
2019	日本	NEDO次世代洋上	バージ型	3 MW × 1基
2020	ポルトガル	WindFloat Atlantic <sup>注1)</sup>	セミサブ型	8.4 MW × 3基
	ドイツ	Nezy2	セミサブ式	1.5 MW × 1基
	ノルウェー	TetraSpar Demo	セミサブ式	3.6 MW × 1基
2021	英国	Kincardine-2	セミサブ型	9.5 MW × 5基
	フランス	Provence Grand Large	TLP型 <sup>注4)</sup>	9.5 MW × 3基
	スペイン	DemoSATH	セミサブ型	2 MW × 1基
2022	フランス	EolMed	バージ型	6.2 MW × 4基
	ノルウェー	Hywind Tampen	スパー型	8 MW × 11基
	米国	Atlantic Maine	セミサブ型	合計30 MW
	フランス	Les Eoliennes Flottantes de Groix	TLP型 <sup>注4)</sup>	9.5 MW × 3基
	中国	CTG First Floating	-	合計10 MW

2023	フランス	GroixBelle Ile (EFGL)	セミサブ型	10 MW×3基
	米国	Aqua Ventus	セミサブ型	合計 12 MW
	日本	長崎県五島沖	-	合計 21 MW以下
2024	英国	Celtic Sea Floating	-	合計 32 MW
	韓国	Donghae 1	-	合計 200 MW
2025	スペイン	Equinor floating Canary Island	-	合計 200 MW
	米国	Redwood Coast	-	合計 150 MW
	イタリア	Sicilian Channel TetraSpar	セミサブ式	合計 250 MW

注1：ポルトガルのWindFloat 2 MWは2016年に撤去された。

注2：GOTOFOWTは2016年に長崎県五島市に払い下げられ、梶島から福江島に移設。

注3：FukushimaFORWARDの7 MW風車は2020年に撤去された。

注4：TLPはセミサブ型浮体をテンションリグ式で係留する。

## (5) 科学技術的課題

ここでは、まだ実証中で、商用化の確立には至っていない研究開発を紹介する。

### ■要素技術

#### 1) ダウンウィンド風車

ロータ（プロペラ）をタワーの風下側で回すダウンウィンド風車は、無動力で受動風向に追従し（風見鶏効果。台風襲来時の系統停電時の信頼性で有利）、斜面の吹上風に正対して有効受風面積が大きい、風スラストによるブレードのタワー接触が生じない（軽く華奢で安価なブレード）などの利点がある。一方で、ブレードがタワーの陰に入った時の騒音と疲労荷重の課題があり、採用は広がっていない。2019年1月に日本の日立製作所が風車製造から撤退したため<sup>22)</sup>、ダウンウィンドの大型風車の量産メーカーは、一部の中国メーカーを除いて無くなった。

#### 2) 2枚翼

風車（特に浮体式洋上風力発電用）の重量を軽減するために、ブレード枚数を2枚に減らした設計も試行されている。NEDOの次世代浮体式洋上風力発電実証の国家プロジェクトで、福岡県北九州市の響灘沖に2枚翼風車が設置されている。2019年5月に運開したもので、設計はドイツのAerodyn社である<sup>19)</sup>。

#### 3) 超電導発電機（EcoSwing project）

風車の信頼性向上手法の一つに、ロータと発電機を直結させる簡潔な設計（ダイレクトドライブ/ギアレス化）で部品点数を大幅に削減する方法がある。部品点数は、増速機付が約2万点に対し、ギアレスでは数千点まで削減できる。直結式では発電機の回転数が十数rpmに低下するため、大出力を得るには発電機半径を大きくする必要があり、重量増加とそれに伴うコスト増が課題になっている。発電機の大型化を抑制するには、磁力の強化が有効であり、ネオジム系の永久磁石が多用されている。しかし、洋上風車向けに10 MW以上の大出力を得るにはネオジム系永久磁石でも足りないため、より強い磁力を求めて超電導磁石の適用が試行されている。2017年に中国の風車メーカーEnvision（遠景能源）がデンマークに3.6 MWの2枚翼の超電導発電機風車を建設し、1年以上の実証運転を行った<sup>23)</sup>。セラミック系のガドリニウム-バリウム-銅酸化物（GdBaCuO）の複合テープで製作された発電機は、直径4 mと従来設計より1.5 mも小さい。但し、冷却用補器も含む信頼性と経済性の検証は、まだ途上である。

### ■浮体式洋上風力発電

50 m を越える大水深で発電できればポテンシャルは無限にある。スパー型、セミサブ型、バージ型の3タイプは既に複数基で実績があり、技術的には確立しているが、2020年時点ではコストが着床式の2倍（百万円/kW）以上と極めて高い。商用化は欧州では2025年頃、日本では2030年頃と見られている。2020年8月時点で世界運転中の浮体式洋上風力発電は5ヶ国の8プロジェクトで合計15基、75.5 MWある。既存の75.5 MWに加えて、2022年までに10プロジェクト・264.4 MW、2025年までには更に8プロジェクト・885 MWの実証計画がある（表2.1.5-4）<sup>20)</sup>。

将来的には、風荷重による傾斜に強いロータを風下に置くダウンウィンド方式、傾斜への耐力を上げた浮体式専用設計の風車、などの工夫により、浮体を小型化できれば、経済性を向上できる可能性がある。より野心的な方法もいくつか考案されている。1点係留にして浮体全体で風向追従させ、ヨ一駆動機器を省いて風車を軽量化する方式をNEDOが研究中である。他には、単一の浮体に複数の風車を設置する方式があるが、風向変化時に風上側の風車の後流渦（Wake）が風下側の風車に干渉する懸念があり、実機レベルで採用に至った例はない。浮体内でバラスト水を移動させて、能動的に揺れを抑制する構想もあるが、故障時の安全懸念から実装例はまだ無い。発電機を海面近くに設置可能となる垂直軸風車を採用して低重心化する構想（例：三井海洋開発が試行した500 kW Skwidシステム）も根強く存在するが、大型化の壁を越えられた実績はまだない。以上のように、浮体式洋上風力発電では各国がブレークスルーを目指して競争を続けており、近い将来の商用化が大きく期待されている<sup>24)</sup>。

### ■空中風力発電

気球式（Altaeros、ソフトバンクが出資）、グライダー式（Makani Power）、凧式（KiteGen）等、様々なタイプが各国で研究開発されている。Makani PowerはGoogle/Alphabetの支援を受けて、2017年に600 kWまで大型化、2019年にはノルウェーで洋上プラットフォームからの飛行試験に成功したが、Google/Alphabetは「商業化には予想よりも時間が掛かる」として、2020年2月に支援を打ち切っている<sup>25)</sup>。

## (6) その他の課題

世界的な風力市場の成熟に伴う変化が、風力発電の研究開発にも大きな影響を与えた。風力発電の研究開発を主導してきた欧州風車メーカーの数が減り、層が薄くなってきている。

市場は世界全体では成長しているが、風車の大型化のペースの方が速いため、新設風車の台数は減少している。また地理的には欧州からアメリカ大陸とアジア、特に中国に中心が移行した。大きな母国市場を揺り籠に中国風車メーカーが成長して、輸出を始めた。欧州風車メーカーは陸用風車では激しい価格競争に晒され、徐々に経営難に陥り、吸収合併されて数が減り（Siemens社とGamesa社が合併、Nordex社とAcciona社が合併、GE社がAlstom社を吸収、Senvion社が倒産）、欧州で風車工場の閉鎖が相次ぐ状況になった。米国ではトランプ政権が誕生して以降、風力発電関連の技術開発は低調である。

洋上風力発電では、欧州を中心に活発な技術開発が続いているが、その中心となる超大型風車は、開発・検証費用がMW級で500億円以上にまで高騰して、世界的な大企業以外は負担ができなくなった。開発費の回収には、3～5年以内に千台・10 GW以上の販売が必要になり、投資回収できるだけの市場規模の確保が技術開発の前提条件になった。

日本でも、温暖化対策で火力発電から再生可能エネルギーへの転換が始まり、本格的な風力発電（陸上・洋上共）の導入拡大期を迎えた。2020年4月の電力改革で発電と送電が分社化され、広域連系運用が拡大

すれば、風力発電の出力変動を吸収し易くなると期待される。洋上風力発電に関しては、2019年4月に再エネ海域利用法が施行され、国が基本方針を定め、年度ごとに、促進区域の指定を行った上で、公募による事業者の選定を行うこととなった。更にその導入促進と競争力強化・コスト低減を同時に実現していくために、「洋上風力の競争力強化に向けた官民協議会」が設置され、2020年7月17日に第1回協議会が開催された。このような支援策に加え、研究開発と関連産業育成を継続的に進めるには、野心的な将来の導入目標を公的に明示して、民間投資を確実に呼び込むことが求められる。2020年10月の「2050年カーボンニュートラル」宣言に伴い2020年12月に策定されたグリーン成長戦略では、国の洋上風車発電の導入目標として、2030年10 GW、2040年30～45 GWが掲げられ、国内市場の創出、サプライチェーンの構築に加え、次世代技術として浮体式の開発を行うことが明記された。このことは、風車産業、研究開発にとっての強い追い風になると期待される。

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	△	↘	<ul style="list-style-type: none"> <li>●海底地質や航路情報も含む洋上風況マップNeoWindsが開発され、2017年3月から供用され、その後も改訂された。</li> <li>●2019年1月に日立製作所が風車製造から撤退して、風車本体の研究開発の担い手となる大型風車メーカーが国内に不在となった<sup>22)</sup>。</li> <li>●日本が提案・主導した台風対策 (ClassTの追設) を反映した大型風車の安全要件の国際標準 IEC61400-1 4<sup>th</sup> Edition が2019年2月に発行された<sup>6)</sup>。</li> </ul>
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>●初期の洋上風力発電実証の国家プロジェクト (NEDO着床式、環境省と経産省の浮体式) は研究期間を終え、民間への払下げや撤去が行なわれつつある。</li> <li>●NEDOがサクシオンバケット式基礎の要素研究を実施<sup>15)</sup>、その後NEDO助成を受けて民間で実証試験を開始。</li> <li>●北九州市でフランスのIDEOL社とドイツのAerodyn社の技術を導入してNEDOが次世代浮体式洋上風力発電 (2枚翼3 MW風車) の実証を実施<sup>20)</sup>。</li> </ul>
米国	基礎研究	×	↘	<ul style="list-style-type: none"> <li>●トランプ政権は再生可能エネルギーに無関心のため、研究開発は低調であったが、バイデン政権での動向が注目される。</li> </ul>
	応用研究・開発	×	↘	
欧州	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>●大学・公立研究所の連携が進んでいる。公的研究プログラムも多い。</li> <li>●エロージョン対策の複数企業による共同研究が続いている<sup>10)</sup>。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>●10 MW級大型洋上風車開発のSenvion社主導の研究開発は同社の経営破綻により頓挫した。</li> <li>●着床式洋上風力発電の低コスト化に向けた基礎や建設方法の研究開発が複数種類進められている<sup>11)-14), 16)</sup>。</li> <li>●浮体式洋上風力発電の商用化に向けた実証計画が、フランス、英国、ポルトガル、ノルウェー、ドイツ、スペイン、イタリアで2025年までに十数件、約百万kW規模で進行中である。</li> </ul>
中国	基礎研究	×	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>●中国風車メーカーの大半は、欧米系の風車メーカー・設計コンサル会社からの技術供与を受けて風車製造に参入。自主開発は稀で知財権も軽視。</li> </ul>
	応用研究・開発	×	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>●中国風車メーカーの一部 (Goldwind、Envision、Mingyang) が約百万kW/年の規模で中央アジアや中南米への海外輸出を始めている。</li> <li>●洋上風力発電も沿岸部の潮間帯を中心に大規模に開発中だが、ほぼ外資を排除して独自に開発している。</li> </ul>

韓国	基礎研究	×	↘	●不況で風力発電へのモチベーションが低下。撤退した企業が多い。
	応用研究・開発	×	↘	●韓国政府は洋上風力開発の国産化を掲げ続けて、多数の造船・重工業会社に風車製造への参入を促したが、欧米中国との競争に敗れてことごとく撤退。唯一、斗山重工業 (Doosan Heavy Industries & Construction) だけが踏みとどまっている。 ●欧米企業と共同で浮体式洋上風力開発の検討も進められている。

(註1) フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

(註2) 現状 ※日本の現状を基準にした評価ではなく、CRDS の調査・見解による評価

◎：特に顕著な活動・成果が見えている

○：顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド ※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

### 関連する他の研究開発領域

- ・ 太陽光発電（環境・エネ分野 2.1.4）
- ・ その他の再生可能エネルギー発電（水力、海洋、地熱、太陽熱）（環境・エネ分野 2.1.7）
- ・ 破壊力学（環境・エネ分野 2.1.17）

### 参考・引用文献

- 1) Global Wind Energy Council (GWEC), "Global Wind Report 2019," (2020), <https://gwec.net/global-wind-report-2019/> (2021年2月12日アクセス)
- 2) 上田悦紀, 「風力発電システム、NEF新エネルギー人材育成研修会(風力発電)」(2020), <https://www.nef.or.jp/topics/2020/20201214.html> (2021年2月12日アクセス)
- 3) IEA Wind Task 26, "WP2, The Past and Future Cost of Wind Energy", (2017), <https://community.ieawind.org/task26/viewdocument/the-past-and-future-cost-of-wind-en> (2021年2月12日アクセス)
- 4) ヴィーナ・エナジー, 「国内最高層クラスとなる風力タービンを有する「中里風力発電所」起工式を青森県で開催」(2020), <https://prtimes.jp/main/html/rd/p/000000003.000052790.html> (2021年2月12日アクセス)
- 5) WoodMackenzie, "Global wind turbine supply chain trends 2020", <https://www.woodmac.com/reports/power-markets-global-wind-turbine-supply-chain-trends-2020-399666> (2021年2月12日アクセス)
- 6) IEC, *IEC 61400-1* (2019), <https://webstore.iec.ch/publication/26423> (2021年2月12日アクセス)
- 7) WindEurope, "Offshore Wind Statistics 2019", (2020), <https://windeurope.org/wp-content/uploads/files/about-wind/statistics/WindEurope-Annual-Offshore-Statistics-2019.pdf> (2021年2月12日アクセス)

- 8) LM Windpower, “Revolutionary two-piece blade design launched, for GE Renewable Energy’s Cypress onshore turbine platform”, (2018) ,  
<https://www.lmwindpower.com/en/stories-and-press/stories/news-from-lm-places/revolutionary-two-piece-blade-design-launched> (2021年2月12日アクセス)
- 9) Vestas, “New tower enables increased power production at low wind sites”, (2014) ,  
[https://www.vestas.com/en/media/~media/92670482644d4e5bb751ff6bd6f66a43.ashx#:~:text=The%20Large%20Diameter%20Steel%20Tower%20\(LDST\)%20%2D%20an%20innovative%20solution,and%20therefore%20revenue%20for%20customers](https://www.vestas.com/en/media/~media/92670482644d4e5bb751ff6bd6f66a43.ashx#:~:text=The%20Large%20Diameter%20Steel%20Tower%20(LDST)%20%2D%20an%20innovative%20solution,and%20therefore%20revenue%20for%20customers) (2021年2月12日アクセス)
- 10) European Commission, “LEAPWind : Leading Edge Advanced Protection using novel thermoplastic materials and processes for offshore Wind turbine blades”, (2019) , <https://ec.europa.eu/easme/en/leapwind-leading-edge-advanced-protection-using-novel-thermoplastic-materials-and-processes-offshore> (2021年2月12日アクセス)
- 11) Oxford, “Pile Soil Analysis Project”, <http://www2.eng.ox.ac.uk/geotech/research/PISA> (2021年2月12日アクセス)
- 12) Sif Group, “Skybox : slip joint connection for secondary steel” (2020) , <https://sif-group.com/en/news/project-updates/736-skybox-slip-joint-connection-for-secondary-steel> (2021年2月12日アクセス)
- 13) GROW, “The Slip Joint Offshore Research project (SJOR) ”, (2018) , <https://grow-offshorewind.nl/project/sjor> (2021年2月12日アクセス)
- 14) World Wind Technology, “Firmer foundations with gravity and suction bucket”, (2018) ,  
<http://www.windpower-international.com/features/featurefirmer-foundations-with-gravity-and-suction-bucket-6125426/> (2021年2月12日アクセス)
- 15) NEDO, 「風力発電等技術研究開発 (洋上風力発電等技術研究開発) [洋上風力発電低コスト施工技術開発 (施工技術実証)]」, [https://www.nedo.go.jp/koubo/FF3\\_100274.html](https://www.nedo.go.jp/koubo/FF3_100274.html) (2021年2月12日アクセス)
- 16) Esteyco, ELISA – ELICAN PROJECT, “World’s first craneless bottom-fixed offshore turbine 5MW “ELISA” prototype”, (2018) , <https://www.esteyco.com/en/proyectos/elisa-elican-project/> (2021年2月12日アクセス)
- 17) Carbon Trust, “The Offshore Wind Accelerator”,  
<https://www.carbontrust.com/our-projects/offshore-wind-accelerator-owa> (2021年2月12日アクセス)
- 18) Carbon Trust, “Offshore wind majors signal continued commitment to R&D as next stage of the Offshore Wind Accelerator gets the green light”, (2020) ,  
<https://www.carbontrust.com/news-and-events/news/offshore-wind-majors-signal-continued-commitment-to-rd-as-next-stage-of-the> (2021年2月12日アクセス)
- 19) NEDO, 「北九州市沖で浮体式洋上風力発電システムの実証運転を開始」, (2019) , [https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5\\_101117.html](https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101117.html) (2021年2月12日アクセス)
- 20) GWEC (Global Wind Energy Council) , “Global Offshore Wind Report 2020”, <https://>

gwec.net/global-offshore-wind-report-2020/ (2021年2月12日アクセス)

- 21) 経済調査会, 「洋上風力発電の最新動向、経済調査レビュー」27号 (2020)
- 22) 日立製作所, 「ニュースリリース」2019年1月25日, <http://www.hitachi.co.jp/New/cnews/month/2019/01/0125.html> (2021年2月12日アクセス)
- 23) Chemistry World, “World first as wind turbine upgraded with high temperature superconductor”, (2018) ,<https://www.chemistryworld.com/news/world-first-as-wind-turbine-upgraded-with-high-temperature-superconductor/3009780.article#/> (2021年2月12日アクセス)
- 24) Makani Power, “A long and windy road”, (2020) , <https://medium.com/makani-blog/a-long-and-windy-road-3d83b9b78328> (2021年2月12日アクセス)
- 25) TechCrunch, “Alphabet takes the wind out of its Makani energy kites”, (2020) , <https://techcrunch.com/2020/02/18/alphabet-takes-the-wind-out-of-its-makani-energy-kites/> (2021年2月12日アクセス)

## 2.1