

## 2.1.4 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、研究開発を含む領域である。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、出力平準化等の周辺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、スパー型、セミサブ型、バージ型、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。現代の発電用大形風車は、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、オイルショック後の1990年代に確立され（いわゆる「デンマークモデル」）、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。

風力発電の世界の累積導入量は2021年末で8億4千万 kW（837 GW）・約34万基である。これは日本国内の発電設備の総合計約300 GWの2.8倍に相当する。世界の年間電力需要の9%（EUでは15%、日本は1%）を風車が供給している。新規導入量は93.6 GW（約2万台）/年で年成長率は12%、年間投資額は数十兆円/年以上に上る。洋上風力発電の世界累計は2021年末で57.2GW・約1万基、新規は21.1GW/年であり、風力発電全体に対して累計で7%、新規で29%を占める（図表2.1.4-1）<sup>1), 2)</sup>。また、風力発電は天候により出力が増減する変動電源なので、導入拡大に伴って出力変動を吸収する技術（ancillary service）も活用されている。

図表 2.1.4-1 風力発電の市場規模

2021 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	837 GW（約34万台）	4,581 MW（2571台） 世界の0.5%、20位以下	57.2 GW 全体の7%	51.6 MW（26台） 全体の1%
新規	75.1 GW（約2万台）/年	143 MW（23台）/年 世界の0.2%、20位以下	21.1 GW/年 全体の29%	-7 MW（-2台）/年 <sup>*1</sup>
投資額	数十兆円/年		5兆円/年以上	

※1：日本の洋上風力新規が -（負）なのは福島浮体式風車2台の撤去による。

注：1 GW=千MW=百万kW

**[研究開発の動向]**

「デンマークモデル」 確立後の技術的な進歩は以下の通り。

2000年代

- ・ 出力制御が固定式のストール制御から能動的に翼を捻るピッチ制御へ
- ・ プロペラの回転が一定速度から風力に応じた可変速運転へ（発電した電気の周波数はパワーエレクトロニクス（電力変換装置）で系統周波数に合致させる）

2010年代

- ・ 発電周波数変換用の電力変換装置が、部分容量から定格容量（full converter）へ
- ・ これに合わせて、発電機も二次巻線型誘導発電機から永久磁石式多極同期発電機（PMSG）へ
- ・ ハブ高が100 mを越えるハイタワーが増え、タワー基部径を大型化し易いコンクリート製タワーやハイブリッド（上部が鋼製で下部がコンクリート）タワーの普及（主に欧州）

2020年代

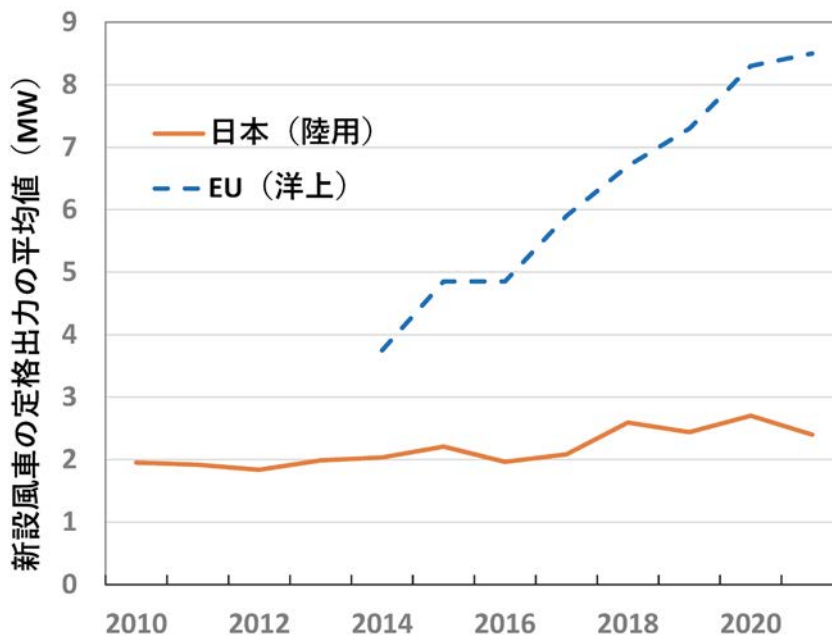
- ・ 世界的に洋上風力発電（水深50m以浅で海底まで基礎のある着床式）の普及が進み、経済性向上（必要基数減による建設費低減）のために洋上風車の大型化が急速に進む（2022年時点で商用機は定格出力1万2千kW・ロータ直径220m）
- ・ 浮体式洋上風力開発が実証段階から准商用段階（pre-commercial stage）へ

以上の他で現実性のある代替技術には、Downwind（+受動ヨー制御）、2枚翼、分割翼（山岳部の輸送制約回避が目的）、が挙げられるが、2022年時点では普及は限定的である。また、浮体式洋上風力に続く夢の技術として期待された「空中風車」は、まだ経済性の壁を越えられておらず、大口投資家のGoogle LLC（Alphabet Inc.）も撤退している。

風力発電の技術開発の中心は風車の大型化である。建設費低減（工事台数削減）による経済性向上を求めて、定格出力・ロータ直径・ハブ高（タワー高）の増大が続いている。2021年末時点で新規設置風車の平均サイズは、陸上用で約3,000 kW、洋上用は欧州で約8,200 kW（中国で約5,600 kW）に大型化している（図表2.1.4-2）<sup>3), 4)</sup>。風車大型化の波は日本にも押し寄せており、2021年12月には青森県のJRE八幡岳牧場風力発電所でロータ径117 mの4,200 kW風車8基、2022年末には秋田港と能代港の周辺海域でロータ径117 mの4,200 kW洋上風車33基が運転を開始する。大型化の傾向は建設費の高い洋上風力発電で特に顕著であり、定格出力1万kW・ロータ直径220 mを越える超大型風車が開発され、商用投入されている（図表2.1.4-3）<sup>1), 2)</sup>。

**図表 2.1.4-2 洋上風車の開発状況（2022年12月時点）**

風車メーカー	機種名	定格出力	ロータ径	状況
GE (米国)	Haliade X	12~14 MW	220 m	商用運転中
SiemensGamesa (スペイン)	SG11.0-200 DD	11 MW	200 m	商用運転中
	SG14.0-236 DD	14 MW	236 m	建設中
Vestas (デンマーク)	V164 10.0	10 MW	164 m	商用運転中
	V236 15.0	15 MW	236 m	建設中
Mingyang (中国)	MySE16.0-242	16 MW	242 m	建設中
Goldwind (中国)	GWH252-16.0	16 MW	252 m	建設中
CSSC (中国)	CSSC 18.0-256	18 MW	260 m	開発中



図表 2.1.4-3 新規設置風車の平均サイズの推移<sup>3), 4)</sup>

(参考資料よりCRDSにて作成)

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

■浮体式洋上風力発電

2020年から2023年にかけて複数の浮体式洋上風力発電所が運転開始・建設されている（図表2.1.4-4）。スパー型、セミサブ型、バージ型の3タイプは既に実証段階を終えて、准商用（pre-commercial）段階に進んでいる。スパー型（釣りの浮きの形の縦長円柱浮体）は喫水が100 m以上あり、浮体への風車艀装を不安定な海上で実施せざるをえない課題がある。セミサブ浮体は造船所のドックで建造されているが、本格量産時に長期間ドックを占有するのは困難なため、ドック外の埠頭ヤードで建造できる方式（TetraSpar<sup>5)</sup>、DemoSATH、IDEOLバージ型）も試行されている。本格的な海中工事が必要なTLP型（Tension Leg: 海底の重しにケーブルを緊張繫留して浮体を小形化する）はまだ実用風車では検証されていない。

先行グループは、大形化・廉価素材採用（浮体のコンクリート化、係留索の樹脂化）・量産・標準化による建造費低減と、好風況海域での設備利用率向上（50%以上の設備利用率で経済性向上）を追求、数百MW規模の准商用開発を目指している。後発グループは、大胆な新方式（例：1点係留、2枚翼風車、1浮体2風車、浮体ごとの風向追従等）に挑戦するが、リスクは高く、成否はまだ不明である。特にNessy2は、ドイツのAerodyn社創案の1浮体にダウンウィンド式風車を2基搭載して浮体全体で風向追従する先鋭的な設計で、バルト海での1年間のモデル試験の後<sup>6)</sup>、中国のMingyang社が8.3 MW風車2基を載せて、初号機運開に向けて準備に入っている。

欧米では多数の数百MW～GW級の入札が始まっているが、最終投資決定（FID）は2023～25年頃のものも多く、まだ本当に商用化を成功できるかは未知数である。最近では中国も浮体式洋上風力開発に参戦を始めている。

図表 2.1.4-4 世界の浮体式洋上風力発電の開発状況 (2020～2023年)

運開	設置海域	プロジェクト名	浮体形式	搭載風車
2020	ポルトガル	WindFloat Atlantic	セミサブ型	8.4 MW × 3基
2021	ノルウェー	TetraSpar	セミサブ式	3.6 MW × 1基
	英国	Kincardine-2 <sup>7)</sup>	セミサブ型	9.5 MW × 5基
	中国		セミサブ型	5.5 MW × 1基
2022	スペイン	DemoSATH	セミサブ型	2 MW × 1基
	中国		セミサブ型	6.2 MW × 1基
2023	日本	長崎県五島沖 <sup>8)</sup>	スパー型	2.1 MW × 8基
	ノルウェー	HywindTampen	スパー型	8.6 MW × 11基
	中国	Nessy2	セミサブ型	16.6 MW × 1基

■硬質海底地盤への大口径モノパイル基礎の適用

着床式洋上風力発電の基礎は、モノパイル基礎（鋼管状で自動溶接で量産可能）が80～90%を占める<sup>4)</sup>。しかし、海底が岩質で大口径鋼管を打設できない場合は、小口径杭で済むジャケット基礎（溶接工数が多く重量も大きい）が採用されてきた。

ベルギーの大手建設会社DEME社とドイツのトンネル掘削会社Herrenknecht社が、トンネルマシンを縦に駆動して海底を掘削することで、岩質海底に対してモノパイル基礎を施工する技術を確認し、2022年にフランス初の商用洋上風力発電所Saint Nazaire（6 MW × 80基）に適用して成功させた<sup>9), 10)</sup>。ただし、日本に適用するには掘削時の廃水処理に課題が残る。

■運転保守（O&M）

日常の風車の遠隔運転監視（CMS: Condition Monitoring System）に対し、5G通信技術の採用が進んでいる。また、風車（特にブレード）の点検へのドローンの活用が広範に普及した。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

■浮体式洋上風力開発

浮体式洋上風力開発でTetraSparやNessy2などの新方式の試行が始まっており、成否が注目されている。

■北海・バルト海のエネルギー島整備計画（Energy Island Plan）<sup>11)</sup>

EUは2021年末時点で変動電源（太陽光+風力。天候次第で発電量が変化する電源）からの電力供給が年間電力需要の20%を超える状況になっている（日本はまだ5%程度）。このため晴天で強風の際は風力発電の発電量が需要を上回り、余剰電力が生じるようになってきている。一方、ゼロカーボン達成するには、更に再生可能エネルギー（特に洋上風力発電）の導入を拡大する必要がある。このため、北海とバルト海に送变电の拠点となる人工島を造り、四方に直流高圧送電線（HVDC）網を蜘蛛の巣のように走らせて、1億kW規模の洋上風力発電を連系する計画が進められている。連系先にスカンジナビア半島（山岳氷河があり水力発電が豊富）を含むので、英国・ドイツ側は蓄電池が無くても、風力+水力で常に安定した再生可能電力を享受できる利点がある。洋上風力発電の導入量が増えて余剰電力が増えた際には、人工島に水電解設備を併設して水素を製造して、既存の海底ガスパイプライン網を活用して陸まで運び、製鉄・化学工業の脱炭素化

に利用する構想になっている。2017年の構想発表から既に5年が経過し、デンマーク、オランダ、ベルギー等では、送変電基地の建設や、水素関連のインフラ整備が始まっている。

### (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。

#### ■空中風力発電 (Airborne wind turbine)

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 LLC (Alphabet Inc.) 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 LLC (Alphabet Inc.) 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。

### (6) その他の課題

2022年2月のウクライナ危機の勃発は、安価なロシア産天然ガスに大きく依存していた欧州諸国を震撼させ、地域内エネルギー源の洋上風力開発をより一層強化しようとしている。

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は数が減って寡占化している。一方で中国風車メーカーの存在感が高まっている。世界市場は成長を続けているが、風車の大型化のペースが速いため、台数では新設風車は減少している。地理的には欧州からアジア (特に中国) に明確に中心が移行した。

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10 MW級の開発で500億円以上にまで高騰して、世界的な大企業以外では負担できなくなった。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を進めるための前提条件となっている。2021年時点でこれを満たす市場規模を持つのは、欧州・米国・中国の洋上風力市場だけである。

こうした背景から、欧米と中国で洋上風車産業の競争が始まっている。従来の欧州市場は欧米企業 (風車メーカーではSiemensGamesa、Vestas、GEの3社) の独占状態だったが、2022年にイタリアのTaranto港洋上風力 (3MW × 10基) と日本の富山県の入善洋上風力 (3MW × 3基) が中国Mingyang社製風車を採用して洋上風力分野でも中国メーカーとの競争が始まっている。

### (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>●2019年1月に日立製作所が撤退して、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。</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。</li> </ul>
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>●国家プロジェクトによる浮体式洋上風力発電の技術実証試験は、環境省分は長崎県五島市に払下げ、経産省の福島プロジェクトは2021年に撤去された。NEDOの北九州沖3 MWは継続中。</li> <li>●戸田建設が長崎県五島沖で2.1 MW風車 × 8基のスパイ型浮体式洋上風力発電所の建造を開始、2023年に運開の予定。</li> </ul>
米国	基礎研究	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>●民主党のバイデン大統領下で温暖化対策が強化された。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>●特に洋上風力発電の商用化に向けた準備が進められている。</li> </ul>

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。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <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、既に入札が開始されている。</li> </ul>
中国	基礎研究	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>●複数の中国風車メーカーが欧州に拠点を構え、技術の吸収に務めている。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>●旺盛な国内需要を背景に、今では世界の風車（陸用・洋上共に）の約半数は中国風車メーカーが生産している。</li> <li>●陸用だけでなく、洋上風力分野でも海外輸出を開始している。</li> <li>●複数メーカー（Mingyang、Goldwind、CSSC、Dongfang、Sewind他）が15MW級洋上風車の開発を行っている。</li> <li>●超電導発電機搭載風車や浮体式洋上風力発電のような先端分野にも、欧州と協力しながら活発に研究開発を行っている。</li> </ul>
韓国	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>●不況で風力発電へのモチベーションが低下。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>●昨今の温暖化対策とウクライナ危機後の化石燃料費用高騰を受けて、国産資源の洋上風力発電の拡大に舵を切っている。</li> <li>●韓国政府は大型の洋上風力開発（浮体式も含む）を計画し、強力な国産化政策を掲げている。斗山重工業（Doosan Heavy）は8MW風車を開発。Unisonも洋上風車を生産している。現代電気（Hyundai Electric）がGEと提携して韓国内に風車工場建設を表明。CS Wind社もデンマークVestas社と協力して機器製造を始めている。</li> </ul>

(註1)「フェーズ」

「基礎研究」：大学・国研などでの基礎研究レベル。

「応用研究・開発」：技術開発（プロトタイプの開発含む）・量産技術のレベル。

(註2)「現状」 ※我が国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。

◎：他国に比べて特に顕著な活動・成果が見えている      ○：ある程度の顕著な活動・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」

↗：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 2.1.3）
- ・水力発電・海洋発電（環境・エネ分野 2.1.6）
- ・蓄エネルギー技術（環境・エネ分野 2.2.1）
- ・水素・アンモニア（環境・エネ分野 2.2.2）
- ・破壊力学（環境・エネ分野 2.6.3）

参考・引用文献

- 1) Global Wind Energy Council (GWEC), “Global Wind Report 2022,” <https://gwec.net/global-wind-report-2022/>, (2023年1月29日アクセス) .
- 2) Global Wind Energy Council (GWEC), “Global Offshore Wind Report 2022,” <https://gwec.net/gwecs-global-offshore-wind-report/>, (2023年1月29日アクセス) .
- 3) 一般社団法人日本風力発電協会「2021年末日本の風力発電の累積導入量：458.1万kW、2,574基」<https://jwpa.jp/information/6225/>, (2023年1月29日アクセス) .
- 4) GWEC, “GLOBAL OFFSHORE WIND REPORT 2022”, <https://gwec.net/wp-content/>

- uploads/2022/06/GWEC-Global-offshore-Wind-Report-2022.pdf, (2023年3月6日アクセス) .
- 5) Sarah Knauber 「TetraSpar (テトラ・スパー型) 浮体式洋上風力発電実証プロジェクト: ノルウェー沖で実証運転を開始」 RWE Renewables GmbH, <https://jp.rwe.com/press/2021-12-01-floating-offshore-wind-demo-project-successfully-commissioned-off-the-norwegian-coast>, (2023年1月29日アクセス) .
  - 6) Energie Baden-Württemberg AG (EnBW), “Floating wind turbine: Nezy2,” <https://www.enbw.com/renewable-energy/wind-energy/our-offshore-wind-farms/nezy2-floating-wind-turbine/>, (2023年1月29日アクセス) .
  - 7) Principle Power Inc., “Kincardin Offshore Wind Farm,” <https://www.principlepower.com/projects/kincardin-offshore-wind-farm>, (2023年1月29日アクセス) .
  - 8) 戸田建設株式会社 「浮体式洋上風力発電事業: Vol.2 国内初! 浮体式洋上風力発電設備を実用化」 [https://www.toda.co.jp/business/ecology/special/windmill\\_02.html](https://www.toda.co.jp/business/ecology/special/windmill_02.html), (2023年1月29日アクセス) .
  - 9) Herrenknecht AG, “Offshore Foundation Drilling,” <https://www.herrenknecht.com/de/produkte/productdetail/ofd/>, (2023年1月29日アクセス) .
  - 10) Herrenknecht AG, “SAINT-NAZAIRE OFFSHORE WIND FARM,” <https://www.herrenknecht.com/en/references/referencesdetail/saint-nazaire-offshore-wind-farm/>, (2023年1月29日アクセス) .
  - 11) WindEurope asbl/vzw, “Energy islands coming to Europe’s seas,” <https://windeurope.org/newsroom/news/energy-islands-coming-to-europes-seas/>, (2023年1月29日アクセス) .

## 2.1

### 電力のゼロエミ 安定化