

第3回

サンシャイン計画における風力発電開発の歴史と将来展望

HISTORY AND FUTURE PROSPECTS OF WIND POWER DEVELOPMENT IN THE SUNSHINE PROJECT

牛山 泉*

1. はじめに

風力利用について、欧州諸国のように歴史的土壌のない日本において、大規模風力発電の開発は、1973年の第一次石油危機の翌年に始まった政府（通商産業省工業技術院、現経済産業省）の「新エネルギー技術開発計画（通称サンシャイン計画）」が契機となっている。また、小規模ながらも1978年から2年間にわたって実施された科学技術庁（現文部科学省）の「風トピア計画」も忘れることはできない。サンシャイン計画以前の日本の風力発電装置は、手作りに近い小規模な出力10kW以下の離島や遠隔地の山小屋などの独立電源としての蓄電池充電用の装置がほとんどであった¹⁾。技術開発について政府が主導して推進するという方式は、わが国の産業政策の伝統的な方法のひとつであったが、太陽光発電や風力発電など新エネルギーの開発についても、新エネルギー総合開発機構（NEDO：New Energy Development Organization）が積極的なかかわりを持ち、産業界や学会への委託研究や補助金の交付により開発を推進してきた。

本稿では、最初に「風トピア計画」について紹介し、続いてサンシャイン計画における初期の風力エネルギー開発の概要と、その実施機関であるNEDOの取り組みを中心に、わが国の大規模風力発電の導入に向けた政府主導の計画を振り返る。これにより風力発電開発導入の草創期の歴史的な経緯が明らかになる。さらに、1990年代中期以降10年間にわたって実施され、わが国の大規模風力発電の導入普及に大きな役割を果たした、NEDOの風力発電フィールドテスト事業について述べる。この間に導入された風車はデンマークやドイツ等の欧州製が多く事故が頻発したことから、海外で先行する風

力発電をわが国特有の環境に適した技術として発展・定着させるために、NEDOにおいて日本特有の強風・乱流・雷を考慮した日本型風車設計ガイドラインを作成した。これにより日本の陸上風車の事故は大きく減少し、洋上風車に進出する準備も整った経緯を述べる。

そして最後に、2008年以降に始まった、わが国の海域に適合する洋上風力発電の取り組みについて明らかにし、今後わが国の主力電源として風力導入の中心的役割を果たす洋上風力発電技術の導入と拡大に対する展望を得ることとする。

本稿の特徴として、筆者はサンシャイン計画の風力プロジェクトの発足当初から現在に至るまで多くのプロジェクトに関わってきたことから、それぞれのプロジェクトにおいて特筆すべきエピソードなども数多く経験してきた。したがって、それらについての生き証人としての務めも果たしたいと考えている。

本論に入る前に、筆者と風力発電のかかわりについて述べておきたい。筆者は上智大学大学院理工学研究科の1期生として、恩師の理工学部長であった田中敬吉教授（元東京帝大航空研究所原動機部長、元千葉工業大学初代学長）のもとで、当時日本ガスタービン学会の会長も務めておられた慶應義塾大学工学部の佐藤豪先生の指導もいただき、ガスタービンの研究で学位を得たが、1973年の石油危機を契機に、大量に石油を使うガスタービンの研究を続けることに疑問を抱くようになった。

1976年春にアメリカ機械学会のガスタービン会議の後、MITガスタービン研究所に短期滞在した折に、デイビッド・ウィルソン所長に「私は大量の

* 学校法人 足利大学 顧問、名誉教授、工学博士

石油を使うガスタービンより自然の風からエネルギーを生み出す風力タービンに関心があるのですが」と話したところ、ウィルソン先生も「私も風力タービンの指導も少ししているが、ここの所長だから、君はその風力分野の研究で頑張りなさい」と言われたのである。

なお、このガスタービン研究所には、その時も三菱重工業から岡沢健氏が在籍され、その後には現在JWPA 日本風力発電協会国際部長の上田悦紀氏が三菱重工時代に在籍されていたと聞き驚いた。

筆者はウィルソン所長の励ましもあって、日本では当時、誰も風力の研究をしていなかったが、風力エネルギーの研究をスタートさせ、翌1977年には足利工業大学（現足利大学）で、JWEA 日本風力エネルギー協会（現学会）を設立した。

2. 日本における風力発電開発導入の歴史

2.1 風トピア計画

1977年7月、科学技術庁資源調査所は「風エネルギー研究会」（佐貫亦男会長）を発足させ、一般家庭や農林水産部門の小規模事業用に風力エネルギーを利用する場合に問題となる安全性や経済性について実証研究を行うという目的で、風力利用に関する種々の分野の研究を開始した。この研究の一環として、1978年から2年間にわたる「風トピア計画」²⁾という小型風車の実証プログラムが実施された。大規模な風力発電利用経験のない日本において、風力発電の実用化に向けた実証に基づく事業性評価が行われた初めての事業である。

実証試験では日本海側の金沢市少年自然の家および町営牧場に3基（水平軸2基、垂直軸1基）、内陸部の群馬県安中市ローズベイ・カントリークラブに2基（いずれも水平軸）、そして太平洋側では愛知県武豊町の農林水産省野菜試験場に3基（水平軸2基、垂直軸1基）の風力発電機が設置された。これらの風車は現地への設置に先立って、科学技術庁航空宇宙研究所において風洞実験を行っている。この実証試験を通して、風況の異なる日本海側、内陸部、太平洋側の3か所のサイトにおいて、風速と風車出力のデータが得られた。

実証試験が行われた武豊町の平均風速3m/s程度の低風速地域を想定した場合、発電単価は当時の技術では蓄電池なしで193円/kWh、蓄電池ありでは531円/kWhと非常に高コストな電源であることが明らかになった。いくつかの実証試験機ではブレードの飛散やブレーキ不良が発生し、安全性について

も十分な検討が必要であること、そしてエネルギー変換効率の向上が課題であることが明らかになった。

また、注目されるのは戦後の北海道を中心とする開拓地に農林省や北海道庁などの支援を得て定格出力200Wの小型風力発電機を2000台以上供給してきた山田風車である。同社は1960年代に役目を終えて休眠状態にあったが、風トピア計画においてはこれまでの低風速域向けの風車設計の経験を活かし、より出力の大きい1kW風車を開発して参画し、いずれのサイトにおいても好成績を収めている。この成果を高く評価した科学技術庁では、山田風車の山田基弘氏を黄綬褒章に推薦し、筆者は推薦文を書かせていただいたが、見事受賞に輝き関係者一同で祝賀会をさせていただいた。

風トピア計画は小型風車を対象とした小規模な実証事業であるものの、適切な風況予測や風力発電機の効率と信頼性の向上等、今後の風力発電開発における重点課題を明らかにすることができたといえる。

このプロジェクトにおいては、東京大学工学部航空学科の佐貫亦男先生が委員長、後に「鳥人間コンテスト」の審査員長を長く務められた東大航空の東昭先生、三菱電機の技師長（その後金沢工大教授）



図1 山田風車の1kW機（500Wのツイン）

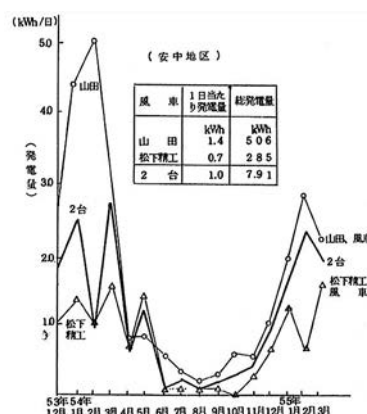


図2 群馬県安中地区における各種風車の成績

の高月一先生、東海大学の関和市先生などが委員となり、高月先生と筆者は、データ収集と分析を担当した³⁾。筆者はこれをまとめて1981年のブライトンでのBWEA 英国風力協会の年次大会で発表した。この年はダイアナ妃のご成婚で英国中が沸き立っていたことを思い出す。

なお、筆者が日本風力エネルギー協会を設立した時には、佐貫先生に会長を引き受けていただき、東先生、高月先生、関先生などが理事を引き受けてくださり、山田さんには顧問に就任頂いた。

2.2 日本における大規模風力発電導入の草創期

日本における新エネルギーの活用に関する研究は、1973年の石油危機を契機に、翌年1974年に始まった国家プロジェクトである「新エネルギー技術開発計画（通称サンシャイン計画）」によりスタートした⁴⁾。このサンシャイン計画には、1974年～1992年までの間に4,400億円が投入されている。第2次石油危機の起きた1978年にサンシャイン計画の実施機関として「新エネルギー総合開発機構（NEDO）」が設置された。当初計画は太陽エネルギー、地熱エネルギー、合成天然ガス、水素エネルギーの4項目に力点が置かれており、風力は、その他のエネルギーという扱いで「将来、新エネルギー源として供給に加わり得る可能性も大きい」と述べられているにすぎなかった。

サンシャイン計画の中で、本格的に風力エネルギーの研究が始まったのは1978年からであり、その前年に「風力エネルギー変換システムに関する研究委員会」（本間琢也会長）が活動を開始していた。筆者も最年少委員としてこの委員会に参画し、その成果は出版物として刊行された⁵⁾。

本間先生には、その後も学会や委員会でご指導いただき、大変お世話になった。あるとき京都大学時代の同期生という朝日新聞科学部の飯沼記者と一緒に食事をしたときに「牛山さん、今我々は本間先生と気楽に話しているけど、世が世ならとても近くに寄ることのできない人なんだよ」と言われたのである。本間先生は姫路城の城主の末裔とのことで驚いたが、その後も変わらず筆者のような下賤の身にも目をかけていただき、アメリカの学会に本間先生ご夫妻と御一緒させていただいたことも懐かしい思い出である。

本間先生は、当時工業技術院電子技術総合研究所に在籍で、その後筑波大学の教授になられた。この「サンシャイン物語」担当の産総研主任研究員の加藤和彦氏は、この企画を通して本間先生の教え子で

あることを知ったのである。

1980年までの当初の3年間は、風車ブレード、風車の運動制御、動力伝達系および振動・強度のような要素技術に関する「風力変換システムに関する研究」、さらには立地、環境、経済性、風況などの「風力変換システムに関する調査研究」、「風力変換システムに関する調査研究（気象調査）」、という3つの課題について調査研究が行われた⁶⁾。そして1981年には「100kW級パイロットプラントの開発」として、わが国初の大規模風車である図1に示す100kW実証機の開発・試験が、東京電力と石川島播磨重工業に委託して行われた。このプロジェクトの目的は高効率、低コストの風力変換システムを開発し、メガワットクラスの大規模風車の実現を目指し、既存電力システムとの連系試験により実用化に向けての課題を抽出することにあった。この風車の仕様は、風車直径29.4m、2枚ブレードのダウンウィンド形式で、タワー高さ28mであった。このパイロットプラントは1982年に伊豆七島の三宅島に設置され、1983年の単独試験の後、1984年から系統連系試験が行われ、1987年に解体撤去されるまで2,127時間運転され、22,8094 kWhの発電実績を残している⁶⁾。

この100kW実証機の運転試験は、わが国において、大規模風力発電が技術的には実用化可能であることを示した。一方で導入拡大を図るためには、システム構成要素の簡素化や軽量化によるコストダウンと稼働率の向上が必要であることも明らかになり、メガワット級風車の開発における課題を明らかにしたといえる。

1990年度からは「大型風力発電システム開発」として「風力エネルギー評価のための風況調査(1990～1993年度)」「集合型風力発電システムの制御技



図3 100kW 実証機、三宅島（撮影：牛山泉）

術の開発（1990～1997年度）」「大型風力発電システムの開発（1991～1998年度）」の3事業を実施している⁷⁾。

風況調査では「日本は欧州と比べて平均風速が低く、また複雑な地形に起因して乱れの強い風が多いため、風力発電には適さない」とする当時の風潮に対し、初めて全国規模の風力資源の定量的な評価が行われた。気象庁のAMeDAS（Automated Meteorological Data Acquisition System）観測所の風速データ⁸⁾やNEDO観測データなど964地点のデータなどを基に、全国の風況マップが作成され、有望地点の抽出、風力発電可能量、風力エネルギー賦存量を推定し、日本にも十分な風力発電の導入適地があることを明らかにした。また、大型風力発電システム開発では、500kW規模の信頼性の高い風力発電システムの開発が三菱重工業に委託された。三菱重工業はこの事業に先立ち既に中型風力発電機MWT-250を実用化、量産化し、1987年から1991年にかけて米国に800台近く納入している。

筆者は1982年のロサンゼルスでのIECEC学会の折に、東海大の関和市先生、日大の三野正洋先生、長井浩先生と、ロスから車で1時間くらいのテハ

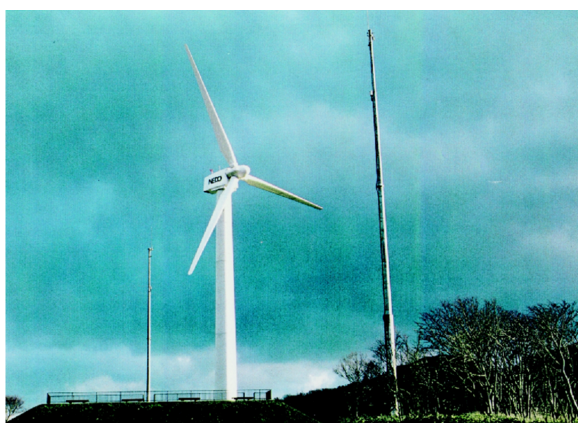


図4 500kW 試験機、(提供：三菱重工業)



図5 青森県竜飛岬のウィンドファーム

チャピのウィンドファームを見学したが、ナセルに三菱の赤い菱マークを見た時には思わず感動が込み上げたことを思い出す。なお、この風車群は設計寿命20年をはるかに超える30年以上も運転されたことでも知られている。開発された500kW大型風力発電機はこのMWT-250の基本設計を活用した信頼性の高い大型風力発電機を目指して、最適化・軽量化したFRP翼に加え、ナセル内機器の大型化に伴いナセル構造としてFRPカバーを採用することによる軽量化とメンテナンス性の向上を実現している⁹⁾。実証機は東北電力管内の青森県竜飛岬に設置され、コスト低減、運転特性についての研究を実施し、時間稼働率90%以上の信頼性があり、売電に資する十分経済的な発電コストであることや、騒音、システムの安全性にも問題がないことなどが確認され、大型風力発電実用化の見通しを得ている¹⁰⁾。

この500kW機は日本において実用可能な風力発電機として一旦は完成形を示したものの、当時は国内市場における展望が開けなかったことから、その後の普及にはつながらなかった。

なお、同時期に竜飛岬で「集合型風力発電システムの制御技術の開発」として300kW風車10基による我が国初のウィンドファームの実証試験も実施されていたが、筆者は来日されたEWEC欧州風力エネルギー学会のヤン・ドラハト教授（オランダ・デルフト工科大学）を、竜飛岬に案内したときの「どうしてこんな場所に風車を建てるんだ、ヨーロッパ人には考えられない」という教授の言葉が忘れられない。

オランダやデンマークのように平坦な地形のサイトに風車を立てる人々からは竜飛のように風は強くても極めて複雑な地形を見て、風の乱れが大きくなることを心配されたのである。

ドラハト先生の指摘の通り、ここに設置した風車

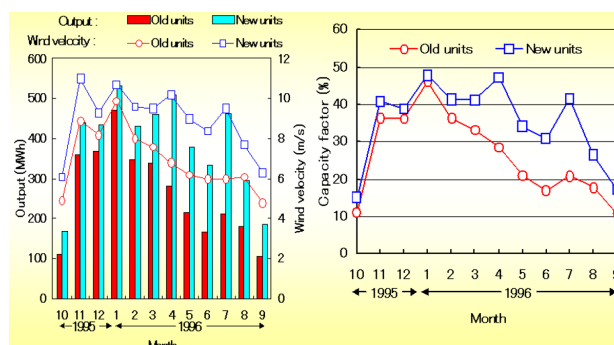


図6 新旧風車群の性能比較

のブレードは乱流の影響が大きく、14年くらいで小さな亀裂が発生し始めたのである。

2.3 離島用風力発電システムと局所的風況予測モデル

わが国は離島が多く、特に九州電力管内や沖縄電力管内には離島が多く、ディーゼル発電を行っている島が多いことから、燃料輸送も含めて電力料金が高く、かねてより発電用燃料削減のための風力発電や太陽光発電など再生可能エネルギーの導入が望まれていた。一方でサンシャイン計画において開発された大型風力発電機は大規模発電所用として適正な発電コストを実現したものの、離島用としては輸送、建設の困難さや、ディーゼル発電の弱小電力網との連系など課題があった。これに対し1999年4月から2003年3月まで、NEDOでは、中・小型風力発電機の開発を含む「離島用風力発電システム等技術開発」として4年間のプロジェクトが実施された¹¹⁾。

「離島における風力発電システムの開発」では、沖縄県伊是名島に、図7に示す100kW級の中型風力発電機2基を設置し、島内の電力系統に接続して、ディーゼル発電とのハイブリッド制御運転などの実証試験を行い、良い成果を得ている。委託先は富士重工業（現スバル）と沖縄電力であった。

この風車の開発を担当された富士重工業（現スバル）航空開発部長の永尾徹氏には、私が2014年の理事長就任を機に大学院の「風力エネルギー特論」を担当いただくことになった。また、この風車開発の経験と知見をベースに、デザイン的な観点から2024年に足利大学大学院で学位を取得され、この年が日本風力エネルギー学会JWEAの会長就任と重なったことは慶賀すべきことであった。さらに、その前の2007年には風車開発時の課長であった吉



図7 富士重工業 100kW 風力発電機
(撮影・提供：足利大学 永尾 徹)

田茂雄氏が足利大学大学院で、筆者が主査を務め学位を取得され、その後九州大学、佐賀大学の教授とになって活躍されている。

もう一つのテーマである「局所的風況予測モデルの開発」では、前節に述べた全国風況マップの改訂が行われた。この時期、欧州では数値解析モデルを活用した風況予測が一般的になり、線形解析に基づく各国の風況マップ（Wind Atlas）も作成され、風況調査に広く使われるようになっていた。

当時、世界的に普及していたデンマーク Risoe 研究所の開発した風況解析ソフト WAsP があり、欧州を中心とする地形が平坦なサイトには適合するものの、日本のように国土の7割が山岳丘陵地という複雑地形の場合には地形因子が大きく影響して適合しないサイトが多かったことから、当時、八戸工大の松阪知行先生や日本大学の長井浩先生が WAsP の日本への適用に苦勞されておられたことを思い出す。

このようにわが国のように起伏が激しく複雑な地形のサイトに線形解析を適用した場合には大きな誤差が生じる可能性があり、欧州の風力先進国並みの精度と解像度の高い風況マップを作成するには独自の風況予測モデルが必要となっていた。以上の情勢から、この改定では複雑地形に適用可能な非線形解析による局所的風況予測モデル（LAWEPS：Local Area Wind Energy Prediction System）の開発が行われ、これにより誤差±10%以内での風況予測が可能となった。この改訂版はNEDOホームページにて公開されている¹²⁾。

3. 風力発電フィールドテスト事業

1981年に石川県松任町にデンマーク・ミーコン社の100kW風車が設置され、筆者はこの時駐日デンマーク大使ご夫妻に現地まで同道させていただき、運転開始セレモニーに出席した。当時は、わず



図8 全国風サミット発祥の地、山形県立川町

か 100kW 風車発電所の開所式に大使が出席されるという時代だったのである。その後 1980 年代には、各地の自治体や企業がシンボリックに風車を建てる動きが出てきた。

その典型例は、1988 年～89 年の竹下登内閣の「ふるさと創生 1 億円」を基に、山形県立川町（現庄内町）に、1992 年に設置された米国 USW 社の 3 基の 100kW 風力発電機であった。発電した電力は温室の加温に使い、余剰電力は電力会社の電力系統に連系し売電するという前例のない方式であった。

この取り組みは、当時の NHK の人気番組「プロジェクト X」にも取り上げられ「突風平野風車を闘え！」というタイトルで 2002 年 2 月 19 日に放映された。日本の三大悪風の一つ「清川だし」に取り組み、農作物に被害を及ぼしてきた禍の風を恵の風に変えた、自治体初の風力発電所であった。

筆者はこのプロジェクトに参画していたことから、全国各地の風の強い自治体に呼び掛けて、立川町による風による町おこしの紹介を兼ねた「全国風サミット」を提案し、1994 年 8 月には日本風力エネルギー協会と共催で 12 市町村が集まった。

この時には筆者の知人で、世界的な「風の芸術家」新宮晋氏の欧州から米国各地を回った作品群「風のサーカス」10 点のうち 9 点が、この庄内町で本邦初公開され 1 か月以上にわたる野外展示の会期中に 1 万 5 千人もの見学者があり大評判となった。その後、風サミットに参加する自治体も増え、毎年持ち回りで開催されるようになった。

1996 年には、立川町が中心となって「風力発電推進市町村全国協議会」も設立され、10 年後の 2005 年には加盟市町村も 71 に達している。

2015 年には、18 回目の「風サミット」が、立川

町が余目と合併した庄内町で再度行われ、地球温暖化防止の高まりもあり、自治体や民間の風車が大きく展開されることになったのである。

このような背景もあり 1995 年から 2005 年にかけて実施された風力発電フィールドテスト事業¹³⁾は、「風力発電の一般普及への素地を形成するため、風況等の自然条件や社会条件を異にする国内各地に、その地域的特性に応じた具体的な風車発電機を試験的に導入し、運転データ等の評価・解析を行い、本格的普及に資する」ことを目的に 11 年間に渡って実施され、わが国の風力発電導入にきわめて大きな推進力を与えた。欧州の風力利用先進国とは風況も地形も気象条件も異なることから、多くの課題があったものの、わが国に適した日本型風力発電の開発が政府主導で NEDO を中心に行われ、図 9 に示すように、わが国の風力発電導入に大きな役割を果たしている。このフィールドテスト事業は「風況精査」、「システム設計」、「風車建設」および「運転研究」という共同研究メニューで構成されている。1995 年から 2005 年度までの第一フェーズでは、風況精査の観測高も 20m で風車設置規模も 100kW 以上としていたが、2000～2005 年度までの第二フェーズでは、観測高を 30m、風車規模を 500kW 以上としている。この第一フェーズと第二フェーズを合わせて、439 地点の風況観測、90 地点のシステム設計を行い、31 地点、合計 15,660kW の風車設置および運転、研究を実施した。さらに、2006 年度からは「風力発電フィールドテスト事業（高所風況精査）」として、風車規模の大型化に対応して、高所（観測高 50m、40m）での観測を実施している¹⁴⁾。これらのフィールドテスト事業により国内のさまざまな地域において、国内外の風車メーカーの風力発電機による運転データ、事故・故障データなど、有用なデータを収集・分析するとともに、風況評価手法を確立することができた。

ユーラスエナジー、日本風力開発、コスモエコパワーといった 2020 年代における、わが国の代表的な風力発電事業者が大規模ウィンドファーム開発を開始したのもこの事業と同時期の 2000 年前後である。このことから、フィールドテスト事業は大規模風力導入に向けて、時宜にかなったプロジェクトであったことがわかる。

3.1 風力発電電力系統安定化等技術開発

大規模なウィンドファームの開発が進み、電力系統への影響が懸念される中で、2003 年から 2007 年まで、風力発電の出力変動対策として蓄電技術の応



図 9 電源開発 苫前風力発電所
(提供：電源開発 三保谷 明)

用を実証するため、「風力発電電力系統安定化等技術開発」として技術開発がなされた¹⁵⁾。このプロジェクトは「蓄電システムによる出力変動抑制」の実証実験と、「気象予測に基づく風力発電予測システムの開発」からなる。前者は北海道苫前町にある電源開発の大規模風力発電施設（30.6MW）に出力範囲±6,000kWのレドックスフロー蓄電池を設置して充放電試験を実施した。後者は、風力発電の出力変動を事前に予測することにより、電力系統側の調整力を計画的に運用できることを期待して、風力発電システムの発電量を予測するシステム開発を行うものであった。

3.2 日本型風力発電ガイドライン策定事業

1990年代半ばから2000年代前半にかけて実施された、風力発電フィールドテスト事業の結果、民間事業者による多数のウィンドファーム建設をはじめ多くの風力発電機がわが国に設置された。この時期に導入された風力発電機は多くがデンマークやドイツ等の欧州製であり、欧州において多数の導入実績を持つ機種がそのまま国内に導入されたものである。その結果、国内各地域において、国内外の風力発電機による運転データが収集されるとともに、相当数の事故・故障データが収集された。2000年代前半は欧州で認証機関DNVや国際電気標準会議（IEC：International Electrotechnical Commission）等により風力発電機の設計基準が策定され始めた時期であり、デンマークを中心とする欧州の環境に適した風力発電機の設計方法は概ね確立されつつある時期であった。従ってこの時期に相次いだ事故・故障は、欧州で実績のある風力発電機も、わが国の厳しい自然環境には不適合であったということを示していた。このような状況下で、わが国特有の環境として、「複雑地形に起因する乱流」と「台風」という二つの厳しい風条件、そして冬季の日本海側に代表される極めて強い「雷害」を対象として、2005年から2年間にわたって「日本型風力発電ガイドラ

イン策定事業」¹⁶⁾が実施された。筆者はこの委員長を務め、三菱重工業の経験も反映させ、台風・乱流編¹⁷⁾と落雷対策編¹⁸⁾がまとまった。さらに2008年から2012年には、次のプロジェクトとしてこれをさらに発展させ「次世代風力発電技術開発事業」として、複雑な風の予測シミュレーション、落雷対策技術の開発などについて研究がなされた¹⁹⁾。

以上に述べた通り、風力利用の歴史の浅いわが国において、サンシャイン計画を契機にスタートした風力発電の研究開発は、わが国特有の地理的条件、気象条件の理解、それらに適合した風力発電システムの開発と導入の歴史である。これらを経て、わが国の陸上風力発電は実用可能なまでに成熟し、2010年代末に至って多くの陸上ウィンドファームが建設されている。2021年策定の長期エネルギー需給見通しにおいても、洋上風力発電と併せて主力電源の一つとして期待されている。

本年2024年は、国際的にはIEC国際エネルギー機関設立50周年、国内ではサンシャイン計画50周年の記念すべき年であるが、図11はサンシャイン計画40周年の記念式典の折のもので、経済企画庁長官としてサンシャイン計画を立案され、1970年の大阪万博を成功させ、作家としても著名な堺屋太一さんが前列中央に写っている。

ここで日本太陽エネルギー学会とサンシャイン計画の関連についても記しておきたい。筆者は谷下市松初代会長（慶應義塾大／幾徳工科大学長、1975—1978）を始め、何人もの会長にお世話になった。木村建一先生（早稲田大、1984—1985）、濱川圭弘先生（大阪大基礎工学、1988—1989）、藤井石根先生（明治大、1996-1997）などであり、さらに学会を通じて多くの先生方や会員の方々と親しくさせていただき感謝している。

特に、濱川先生は多結晶太陽電池の発明で世界的に著名な方で、文化功労賞も受賞されておられるが、WREC世界再生可能エネルギー学会を英国レディング大学のAli Sayigh教授とともに立ち上げ、ご自分の研究を発表されるばかりでなく、多くの日本の再生可能エネルギーの研究者を世界の舞台に引き出してくださった功労者であった。

また、濱川夫人はピアニストであったことから、いくつかのWRECの開会式が、そのピアノ演奏で始まり会議に花を添えてくださったことを記憶されておられる方も多いのではないだろうか。筆者自身も濱川先生の推薦もあり、1998年のWRECフィレンツェ大会において、日本の風力関係で初のバイオ



図10 日本特有の環境条件



図 11 サンシャイン計画 40 周年記念式典にて

ニア賞を受賞させていただいた。さらに WREC の 20 周年記念大会は、初めて産油国アラブ首長国連邦のドバイで行われた。濱川先生は、その 2 年前に逝去されておられたが、筆者はここで功労賞をいただき NHK の国際ニュースでも取り上げられ、現地の日本大使館にも招待いただいた。濱川先生の御恩にささやかながら報いることができたのではないかと考えている。

木村先生には学会やイベントのあるたびに声をかけていただき、いつもスケッチブックを持参される先生は、各地の景観や建物を描いておられたが、それをまとめた本をいただいたことや、アメリカ留学中にソーラーハウスに出会い、日本初のソーラーハウスを造られたことなども伺った。

藤井先生は東工大時代の恩師である一色尚次先生の御家族と筆者が親しくさせていただいていたこともあり、種々の面でお世話になった。八ヶ岳の麓で別荘用の厚い断熱壁のスウェーデンハウスを造られ太陽熱の化学蓄熱を利用された省エネハウスを見せていただき、日本機械学会の学生会員と一緒に取材させていただいたこともあった。

また、JSES の高尾矩行事務局長が退任されたときには、高尾氏は馬がお好きとのことで、ニュージーランドで「ホームステイ」ならぬ、牧場に滞在する「ファームステイ」を体験したいとのことで、藤井先生から筆者にも声がかかった。国際運転免許を取っておくようにとの依頼で、国際免許を取って

オークランドに着いたところ、レンタカー屋で車を運転するのは私だけということが判明し、滞在中は私が運転手を務めさせていただいた。

高尾さんを牧場に送り届け、藤井先生と南島を下ったのであるが、クライストチャーチでは筆者の教え子の佐藤君宅を訪問し、翌日は二人で娘さんの小学校で出前授業をし、さらに最南端の美しいクイーンズタウンでは、藤井先生は市街の散策、私は車で少し戻ってワナカ飛行場に行き、第 2 次大戦時代の戦闘機などの実機飛行する様子を見学し、格納庫兼工房で修復中であった、中島飛行機（現スバル）製の隼戦闘機を見せていただいた。

さらに、初代会長の谷下先生のご子息谷下一夫先生とは、私が慶應義塾大学の佐藤豪先生の研究室のゼミで一緒だった縁があり、谷下一夫先生はアメリカのブラウン大学で医用工学を修め帰国された。東京女子医大から慶應義塾の理工学部に移られ、システムデザイン工学科の科長を務めておられたときに再会した。2 年生のデザインリテラシーという科目の一環で風力エネルギー特別講義を依頼されたのが縁で、その後も現在に至るまで、27 年間も毎年、その講義を続けているのも奇跡に近い不思議な縁である。

4. 日本における洋上風力発電の取組み

わが国の人口は世界全体の 1.7%、国土面積は世界の総陸地面積の 0.25% (37.8 万 km²) であり、在

来型電源に対して面積当たりの発電出力が小さな陸上風力発電のポテンシャルは限られている。

一方で四方を囲む海は447万km²、世界第8位の領海、排他的経済水域をわが国にもたらしめている。従って、日本にとって、洋上風力発電の開発導入は主力電源化に向けて必要不可欠な政策であり、技術である。

4.1 欧州で先行する洋上風力発電

世界の風力発電の累積導入量は2022年末に906GWに達しているが、特に欧州においては風況の良いサイトが次第に乏しくなり、景観問題や騒音問題も少ないことから洋上への進出が検討されていた。電力事業の一環として本格的に洋上風力発電が始まったのは2000年代に入ってからで、英国を中心に拡大し、2019年末までには29GWに到達した。2019年に新規建設された洋上ウィンドファームの設備容量は614.5万kW、その発電所単体での最大設備容量は121.8万kWで大型火力発電所と同一規模である。同発電所の風車の定格出力は7.0MW、直径154mであり、大規模化が進んでいることがわかる²⁰⁾。そして設備利用率は低いサイトで29%から高いサイトでは48%にも達している。2019年に建設された洋上ウィンドファームの平均水深は33m、平均離岸距離は59kmであった²¹⁾。

欧州の既設洋上ウィンドファームは北海に設置されているものが7割以上を占めるが、北海は遠浅で水深が深くないことから着底式の設置に有利であり、欧州諸国は以前、北海の海底油田の工事をしてきたことから海洋構造物の設置経験があり、そのためのSEP船など専用特殊船舶も多く保有するため洋上風力発電には有利であった。

導入量の多い国は、中国、米国、ドイツ、スペイン、インドと続き、日本は5GWと低迷している。既設洋上風車のメーカーは、Siemens Gamesaが最大、次いでMHI Vestas、GEの3社で90%以上を占めている。風車を洋上に設置する基礎の形態としては、筒状のパイプ基礎を海底に打ち込むモノパイル形式が80%を占めており、ヤグラを組む形式のジャケット式、次いで、コンクリート基礎を海底に置く重力式、3本脚のトリポッド式などが続く²⁰⁾。DOEアメリカエネルギー省によれば世界の洋上風力発電の導入量は2021年に57.2GWから2027年には178GWと、6年間で3倍に増大すると予測されている。

さらに、2022年2月に勃発したロシアのウクライナ侵攻は欧州のみならず世界のエネルギー事情に

きわめて大きな衝撃を与え、ロシアからの天然ガスや石油に大きく依存していたドイツを筆頭に多くの国が、エネルギーの安全保障の立場から洋上風力発電の拡大と加速化に踏み切っている。

4.2 国内の洋上風力発電

国内における洋上風力発電についても、わが国の気象・海象条件や水深・海底地形などが欧州と異なることから、欧州での事例をそのまま適用する事は、前述の陸上風力発電と同様にリスクが大きい。また、北海での海上油田の開発実績に基づく海洋開発のための専用船や技術を応用できる欧州と異なり、わが国は外洋での風車設置とメンテナンスの経験が無く、洋上風力発電設備の安全性・信頼性・経済性に



図12 福島沖浮体式洋上風力発電実証研究

表1 NEDO 上風力発電研究開発プロジェクトのテーマ²²⁾

2	洋上風力発電実証研究 F/S 評価
2009	洋上風況観測システム実証研究
2010	洋上風力発電システム実証研究
2011	超大型風力発電システム技術研究開発
2011	洋上ウィンドファーム・フィージビリティスタディー
2011	浮体式洋上風力発電 FS 調査
2013	地域共存型洋上ウィンドファーム基礎調査
2013	着床式洋上ウィンドファーム開発支援事業
2013	洋上風況観測技術研究開発
2014	次世代浮体式洋上風力発電システムの実証
2015	洋上風況マップ
2016	日本型洋上風車の台湾における実証前調査事業
2017	低コスト施工技術調査研究

関する課題がある。そこで、表1に示すように、2008年度からNEDOにより、洋上風力発電実証研究のF/S評価^{23) 24) 25)}がなされ、2009年度には洋上風況観測システムの実証研究、2010年度には洋上風力発電システムの実証研究が始まった²²⁾。これらの成果から、わが国の排他的経済水域内において、浅海域においては1000万kW、深海域においては4800万kWもの洋上風力の賦存量があることが明らかになった²⁵⁾。NEDOの着床式洋上風力発電システムの実証研究は、いずれも2MW級風車を用いて、太平洋側では、千葉県銚子沖（離岸距離1.4km、水深11m）において重力式基礎により、日本海側では福岡県北九州沖（離岸距離3.1km、水深14m）においてジャケット・重力ハイブリッド式基礎により実施された²⁶⁾。これらの実証試験の成果から、着床式洋上風力発電導入ガイドブック²⁷⁾が策定され、日本独自の台風、地震荷重、波浪など環境条件の評価手法や支持構造物の計算手法などをIECへ提案を行っている。

さらに2011年から、図12に示すような、福島復興・浮体式洋上風力発電実証研究²⁸⁾が始まり、コンパクト・セミサブ浮体式の2MW機、V字型セミサブ浮体式の7MW、さらにアドバンスドスパー浮体式の5MWに加えて、世界初の浮体式サブステーション（変電所）も設置され、実証運転が行われた。

実証試験の成果として、2MW機は設備利用率も30%を超えており実用可能と判断されたが、実際には出力規模が小さいことから2MW機による浮体式風力発電の実用は難しいと思われる。また、5MW機と7MW機は、試作段階の風力発電機を設置したため初期故障が多く、実証試験としては不成功に終わっている。しかし、原因が明らかになったことから、これを今後の洋上風力発電開発に生かすことになる²⁹⁾。このプロジェクトは2017年で終了予定であったが、さらに2年間の継続が決まり、最終的には7MWシステムの撤去まで行なっている。これらの成果を踏まえ、2018年度には洋上風力発電の導入促進のための海域利用のルール化³⁰⁾が決定し、本格的な洋上風力発電導入の条件が整った。図13に示すように、東北、北海道の日本海側を中心に、全国各地で建設準備のための環境アセスメントが進められ、これに加えて一般海域が漁業との協調を配慮しつつ地方自治体との連携で選定されつつある。³¹⁾

以上、陸上風力と同様に洋上風力においても先行する欧州の事例を参考に、わが国特有の海洋環境に適した風力発電技術の研究開発が行われ、そして海洋利用についてもわが国の事情を適切に反映したルールが策定された。これらのプロジェクトにおいても、筆者は東京大学石原孟教授とともに委員長を

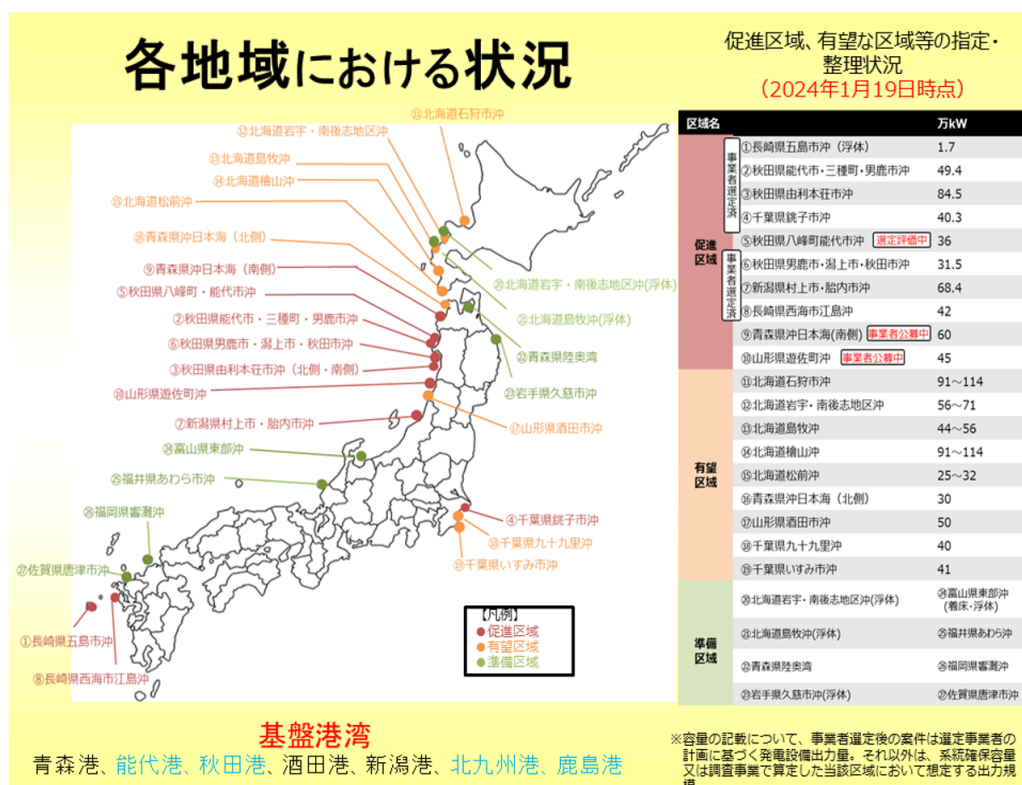


図13 計画中の洋上風力発電プロジェクト（出典：資源エネルギー庁（2024年1月現在）³¹⁾）

務め、洋上風力においても陸上と同様に賦存量調査や風況マップの整備が行われ、台風災害等の特有の厳しい気象条件に対して的確に技術開発が行われている。このように実用化に向けて着実に技術開発と制度設計が進んでいるのは、陸上風力で培われたノウハウが適切に継承されている証左である。

IEA 国際エネルギー機関によれば我が国における洋上風力発電の技術的賦存量は図 14 に示すように、国内電力需要の 9 倍もあることが報告されている。

2019 年には洋上風力発電の導入促進のための海域利用の各種法規が施行され、2020 年 10 月の菅元総理大臣の所信表明において「わが国は 2050 年にカーボンニュートラルを目指す」ことを宣言し、2021 年 10 月に策定された第 6 次エネルギー基本計画においては、エネルギー分野を中心とした 2050 年カーボンニュートラルに向けた道筋と取り組むべき政策が明示された。

さらに洋上風力発電については、図 15 に示すような、排他的経済水域 EEZ への拡大のための制度的措置を検討し、浮体式洋上風力の導入目標を掲げられているが、その実現に向けて技術開発・大規模実証を実施し、風車や関連部品、浮体基礎など洋上風力関連産業における強靱なサプライチェーン形成が必要となる。

これについては、日本の航空機産業の衰退と同じ道をたどってはならない。わが国は 1945 年の敗戦と同時に GHQ により航空機産業の開発と研究の停止を求められ、それが 7 年間続いたことから、エンジンはピストンエンジンからジェットエンジンに代わり、航空関連の技術者も不在となったため、70 年後に至っても国産中距離旅客機が型式認証も取得できず開発中止になっている。

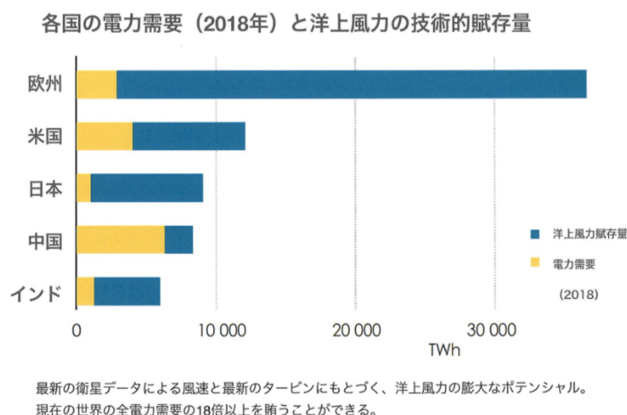


図 14 各国の電力需要と洋上風力の技術的賦存量

2010 年代後半まで、日本には風車メーカーが 4 社も存在し、その裾野には図 16 に示すような強力な関連部品のサプライチェーンがあったのであるから、時宜を逸することなくサプライチェーンの構築、できれば風車メーカーの再興を図るべきである。日本を支えてきた 550 万人の方々からなる自動車産業も EV 化の流れの中で産業構造の変化の影響を受けつつあり、洋上風力発電産業は、その受け皿ともなりうるのである。

5. おわりに

1970 年代の石油危機を契機にスタートしたサンシャイン計画の一環として、風力エネルギー利用の歴史的土壌のなかった日本において、大規模風力発電の開発導入が始まった。欧州の風力利用先進国とは風況も地形も気象条件も異なることから、多くの課題があったものの、わが国に蓄積された技術力により、政府主導でこれらの課題を解決し、日本型風力発電システムの開発がなされた。これが今日の風

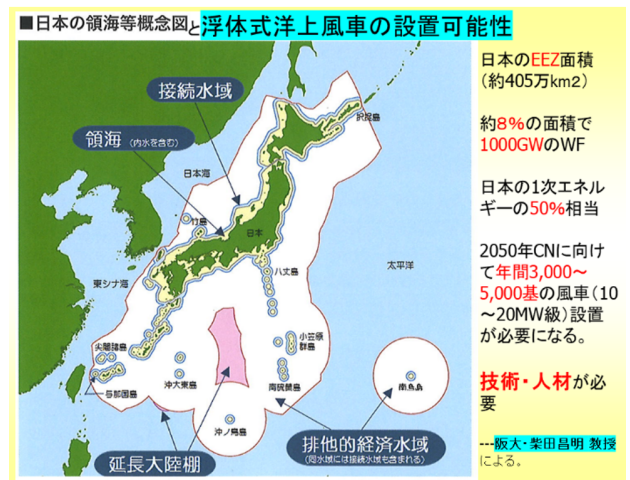


図 15 日本の排他的経済水域における浮体式洋上風力の設置可能性



図 16 風車関連産業のサプライチェーン

力発電実用化に繋がったといえる。特に、1990年代中期から11年間にわたって実施された風力発電実証フィールドテスト事業は、わが国の風力発電導入の大きな推進力となると共に、陸上風力発電の設置、運用技術を実用化、大規模導入に十分なレベルまで押し上げ、洋上風力に進出する準備も整ったといえる。

さらに、2008年以降、洋上風力発電の実証研究が始まり、陸上風力と同様に洋上風況マップが整備され、台風や雷等のわが国に適応しうる洋上風力発電システムの研究開発が行われ、その技術は短期間で加速度的に進化した。2019年には洋上風力発電の導入促進のための海域利用の各種法規が施行され、本格的な洋上風力発電導入の法的整備もなされた。

これらの洋上風力発電の本格的導入が始まると陸上風力発電において乱流や雷対策技術を確立したように、わが国独自の海洋環境に合わせた洋上風力の設置・運用方法を、先行する欧州と異なる条件に合わせた独自の技術として確立できると考えられる。陸上風力においては環境アセスメント等の制度上の問題により技術の確立とウィンドファームの拡大に時間差が生じたこともあるが、洋上風力発電においてはスムーズな導入ができるルール化がなされている。

以上の状況を踏まえれば、陸上、洋上を合わせた官民協議会の2030年の風力発電導入目標10GWは2020年代後半には達成が見込まれ、2040年の30～45GWという目標の実現可能性も明確になる。

さらに一般社団法人JWPA日本風力発電協会は2023年に「ウィンド・ビジョン2023」を掲げたが、これは2050年に電力需要の1/3を供給するため140GW（陸上40GW、洋上着床式40GW、洋上浮体式60GW）を導入し、国産グリーン水素の供給拡大にも貢献しうるというもので、2050年時点で年間6兆円、35.5万人の雇用創出、年間2.5兆円の化石燃料削減効果があるとしている。³²⁾ こうして日本の風力発電産業の持続可能な発展が実現することになる。

最後に、述べておきたいのは、日本では平成から令和にかけての30年を「失われた30年」と言うが、これは表面的な経済面で二流国になってしまったことではなく、この間、企業における品質検査の虚偽報告や各種データの改ざんなど、企業の道義心が失われてしまったこと、これを黙認してきた技術者の倫理観欠如の方がより深刻なのである。日本はかつ

ての武士道精神に基づく道義心や倫理観、一言でいえば「恥を知る」精神を失っては日本の存在意義はないのである。^{33) 34)}

さらに巨大化する洋上風力発電の開発や導入においては、専門家、国民、政治家の間での公平性、透明性のある情報公開が不可欠である。良心をラテン語で「コンスキエンティア」というが、共に知するという意味であり、人間同士の情報共有は当然のこと、最終的には絶対者と自分との間も問われるのである。³⁵⁾

参考文献

- 1) 牛山泉：風力発電の歴史，オーム社，2013，pp.129-144
- 2) 科学技術庁計画局：風エネルギーの有効利用技術に関する調査報告－「風トピア計画」調査報告－，1980
- 3) 科学技術庁計画局資源課：「風トピア計画」調査結果の概要，風力エネルギー，4巻2号，pp.51-58，日本風力エネルギー協会
- 4) 江崎弘造：新エネルギーその1. サンシャイン計画の概要，電気学会雑誌，94巻10号，pp.872-879，1974，電気学会
- 5) 本間琢也（編）：風力エネルギー読本，オーム社，1980
- 6) 蔵並真一：サンシャイン計画における利用技術の開発—100kW風力発電の運転結果を中心に—，風力エネルギー利用シンポジウム，8巻，pp.23-38，1986，日本風力エネルギー協会
- 7) 新井和昭：NEDO技術開発機構における風力発電の研究開発事業，風力エネルギー利用シンポジウム，25巻，pp.50-54，2003，日本風力エネルギー協会
- 8) 気象庁：地域気象観測システム（アメダス），<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/amedas/kaisetsu.html>（最終閲覧日：2020年3月31日）
- 9) 窪谷達雄：三菱量産型風車の適用例とNEDO殿500kW風車の開発，風力エネルギー利用シンポジウム，17巻，pp.95-104，1995，日本風力エネルギー協会
- 10) NEDO新エネルギー産業技術総合開発機構編：風力発電導入ガイドブック，2000，NEDO新エネルギー産業技術総合開発機構
- 11) 加藤和彦：NEDOにおける風力発電技術の開

- 発現状況と課題, 風力エネルギー利用シンポジウム, 24 巻, pp.10-14, 2002, 日本風力エネルギー協会
- 12) 新エネルギー産業技術総合開発機構: 局所風況マップ, <http://app8.infoc.nedo.go.jp/nedo/top.html> (最終閲覧日: 2019 年 10 月 24 日)
- 13) 松崎肇: NEDO 技術開発機構における風力発電フィールドテスト事業の実施状況, 風力エネルギー, 30 巻 1 号, pp. 48-53, 2006, 日本風力エネルギー協会
- 14) 薄井徹: NEDO の風力発電フィールドテスト事業における風況精査の実施状況, 風力エネルギー, 25 巻 4 号, pp.59-62, 日本風力エネルギー協会
- 15) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 風力発電技術委員会, 「風力発電電力系統安定化等技術開発」事業評価 (事後評価) 報告書, 2010
- 16) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 エネルギー対策推進部: 「日本型風力発電ガイドライン策定事業」基本計画, 2005
- 17) 新エネルギー・産業技術総合開発機構: 日本型風力発電ガイドライン 台風・乱流対策編, 2008
- 18) 新エネルギー・産業技術総合開発機構: 日本型風力発電ガイドライン 落雷対策編, 2008
- 19) 新エネルギー・産業技術総合開発機構: NEDO_次世代風力発電技術研究開発, https://www.nedo.go.jp/activities/FF_00223.html (最終閲覧日: 2020 年 3 月 31 日)
- 20) Global Wind Energy Council: Global Wind Report 2019, 2019
- 21) Wind Europe: Offshore Wind in Europe Key trends and statistics 2019, <https://windeurope.org/data-and-analysis/product/?id=61> (最終閲覧: 2020 年 3 月 31 日)
- 22) 石原孟: 洋上風力発電実用化に向けたこれまでの取り組み, 一般財団法人沿岸技術研究センター機関誌, 48 巻, pp. 10-13, 2017, 一般財団法人沿岸技術研究センター
- 23) 新エネルギー・産業技術総合開発機構: 平成 20 年度洋上風力発電実証研究 F/S 調査 (銚子), 2008
- 24) 新エネルギー・産業技術総合開発機構: 平成 20 年度洋上風力発電実証研究 F/S 調査 (北九州), 2008
- 25) 新エネルギー・産業技術総合開発機構: 平成 20 年度洋上風力発電実証研究 F/S 評価, 2008.
- 26) 牛山泉: 日本を救う風力発電と海洋エネルギーの技術開発の将来展望, NEDO TSC Foresight セミナー, 2018, NEDO 新エネルギー・産業技術総合開発機構
- 27) 新エネルギー・産業技術総合開発機構: 着床式洋上風力発電導入ガイドブック (第一版), 2015
- 28) 福島洋上風力コンソーシアム: プロジェクト概要 福島浮体式洋上ウィンドファーム実証研究事業について, <http://www.fukushima-forward.jp/gaiyou/index.html> (最終閲覧日: 2020 年 3 月 31 日)
- 29) 福島沖での浮体式洋上風力発電システム実証研究事業 総括委員会: 平成 30 年度 福島沖での浮体式洋上風力発電システム実証研究事業総括委員会 報告書, 2018
- 30) 経済産業省資源エネルギー庁: 洋上風力発電関連制度 | なっとく! 再生可能エネルギー, https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saiene/yojo_furyoku/index.html (最終閲覧日: 2020 年 3 月 31 日)
- 31) 経済産業省資源エネルギー庁, 国土交通省港湾局: 12 月 25 日総合資源エネルギー調査会省エネルギー・新エネルギー分科会再生可能エネルギー 大量導入・次世代電力ネットワーク小委員会洋上風力促進ワーキンググループ 交通政策審議会 港湾分科会環境部会洋上風力促進小委員会 合同会議 (第 1 回) 資料 3 再エネ海域利用法の運用開始に向けた論点整理—促進区域指定と事業者選定について—, https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/saisei_kano/yojo_furyoku/pdf/001_03_00.pdf (最終閲覧日: 2020 年 3 月 31 日)
- 32) 一般社団法人日本風力発電協会: JWPA ビジョンとミッション, <http://jwpa.jp/jwpa/vision.html>
- 33) 内村鑑三, 代表的日本人 (岩波文庫) 1995
- 34) 藤原正彦, 藤原正彦の代表的日本人 (文春新書) 2024
- 35) 同志社大学両神学研究センター, 「良心から科学を考える」 (岩波書店) 2021

著者略歴



牛山 泉（ウシヤマ イズミ）

1966 年 上智大学理工学部機械工学科卒業

1971 年 上智大学大学院理工学研究科機械工学専攻博士課程単位取得後退学

足利工業大学機械工学科専任講師（1973 年工学博士の学位取得）

1974 年 足利工業大学機械工学科助教授を経て 1985 年教授に

1976 年 MIT マサチューセッツ工科大学ガスタービン研究所短期滞在

1989 年 放送大学客員教授（環境とエネルギー工学担当）

1998 年 足利工業大学総合研究センター・センター長 中国・浙江工業大学客員教授

2002 年 日本風力エネルギー学会会長

2003 年 足利工業大学大学院教授

2006 年 足利工業大学副学長，日本太陽エネルギー学会会長

2008 年 足利工業大学学長，名誉教授

2014 年 学校法人足利工業大学理事長

2019 年 学校法人足利大学（校名変更）理事長

2022 年 学校法人足利大学理事

2024 年 学校法人足利大学顧問

公職等

主な審議会委員：経済産業省 洋上風力発電施設検討委員会 委員長，国土交通省 港湾における洋上風力発電施設検討委員会 委員長，新エネルギー財団 新エネルギー産業会議委員長，新エネルギー産業技

術総合開発機構，GI 基金審査員長，WWEC 世界風力エネルギー会議副会長，JICA 国際協力機構専門委員，日本風力エネルギー学会会長，日本太陽エネルギー学会会長，日本技術史教育学会会長 等を歴任

研究分野

総合工学，機械工学，環境学，エネルギー変換工学，技術史

著書・論文

・「環境とエネルギー工学」（日本放送出版協会，1996）・「風車工学入門」（森北出版，2004）・「風力エネルギーの基礎」（オーム社，2005）・「風力エネルギー読本」（オーム社，2006）・「エネルギー工学」（オーム社，2010）・「風力発電が日本を救う」（日本経済新聞社，2012）
・「風力発電の歴史」（オーム社，2013）など単著 12 冊（このうち 5 冊が中国・韓国・台湾で翻訳出版），共著は 25 冊，学術論文はガスタービン・再生可能エネルギー・風力発電関連中心に 160 編

主な受賞

日本機械学会畠山賞（1966），国際協力推進機構学術奨励賞（1973），WREC 世界風力エネルギー会議パイオニア賞（1995）及び功労賞（2010），ASME アメリカ機械学会先進エネルギー部門功労賞（1999），文部科学大臣賞（2005），日本風工学会出版賞（2008），日本太陽エネルギー学会功労賞（2011），日本技術史教育学会功績賞（2013），WWEC 世界風力会議功労賞（2016），日本風力エネルギー学会特別功労賞（2017），日本港湾協会港湾特別功労賞（2020）