総 説

風力発電の開発状況

(キーワード 風力発電, 風力エネルギー, サンシャイン計画)

— 1990.11.14 受理 —

機械技術研究所 松 宮 輝

1. はじめに

欧米での大規模なウインドファームの建設の進行に伴い、クリーンで再生可能な自然エネルギーとしての風力エネルギーの利用技術は年々進歩してきたが、今日の「地球環境時代」を迎え、風力エネルギーへの期待が急速に高まっている。

本稿は、内外の開発状況と、通産省工業技術院「サンシャイン計画」における風力発電技術の研究開発を概括する。

2. 風力利用の現状

わが国では、欧米のように本格的な商業利用の段階に至っていない。表1、図1に、近年のわが国の主な風力発電設備を示す。大半は試験研究用である。寿都町の5台の小型機は中学校の冬季暖房用という実用に供されているわが国初のミニ・ウインドファームである。

一方海外では、はるかに大規模の風力利用が進行している。世界の風力発電量の81%を占める米国では、80年代前半の州と連邦政府による開発促

表1 日本の主な風力発電設備

設置時期	設置場所	設置主体	出力・風車の直径 (製造メーカー)	用途
57年	沖永良部島	九州電力(株)	300kW, 33m (三菱重工業(株))	試験研究用
58年	三宅島	NEDO	100kW, 29m (石川島播磨重工業(株))	試験研究用
60年	三宅島	東京電力(株)	80 (150) kW, 21.8m (ベルギー, HMZ 社)	試験研究用
60年	長崎市	三菱重工業(株)	250kW, 25m (三菱重工業(株))	研究開発用
62年	つくば市	機械技術研究所	16.5kW, 15m (ヤマハ発動機(株))	試験研究用
63年	青森県 尻屋崎	東北電力(株)	16.5kW, 15m (ヤマハ発動機(株))	試験研究用
元年	北海道 寿都町	寿都町	16.5kW×5台, 15m (ヤマハ発動機(株))	中学校への 電力供給用
2年	鹿児島県 甑島	九州電力(株)	250kW, 28m (三菱重工業(株))	試験研究用
2年	沖縄県 伊是名島	沖縄電力(株)	100kW, 30m (ヤマハ発動機(株))	試験研究用
2年	神戸六甲 アイランド	関西電力(株)	16.5kW×2台, 15m (ヤマハ発動機(株))	試験研究用

図1 日本の風力地図

進政策に誘導された結果、カリフォルニアを中心に16,000台の風力タービンが設置され、その容量は1,600MWに達している(1990年4月現在)¹⁾。1989年の年間発電量は約22億kWhであり、これは、年間350万bblの石油節約を意味する²⁾。また、風力発電が全消費電力に占める割合は、カリフォルニアの電力会社PG & E社においては1.2%、またSC E社では1.5%となっている²⁾。

ウィンドファーム建設は、商業的実験であると同時に、技術的実験でもあった。多数の風車を設置、運転するなかで、風車技術そのものが鍛えられたのである。図2に、風車の単位出力当りの発電量の年次変化を示す¹⁾。これは、風力発電機の稼働率、信頼性、性能等の順調な向上を意味し、1989年の1983年に対する比は7.5倍にもなる。この米国の風力開発は、“通常のビジネス”として推移しても、2000年には11,000MWの発電規模となると予測されている。

図2 米国ウィンドファームにおける風車生産性の向上

一方、ヨーロッパ風力エネルギー協会は、2000年までにヨーロッパ全体で4,000MWの風力発電設備が導入されると予測している。内訳は、イギリス、デンマーク、オランダで各1,000MW、イタリアで300~600MW、西ドイツで100MWである³⁾。最近では、スペインが1995年までに80MW規模を建設するという計画もあり⁴⁾、この予測を上回る可能性も生じている。

米国に次いで風車の実用化が進み、世界の風力発電量の17%を占めるデンマークは²⁾、2,400台、254MWの容量を持つ(1990年1月)。1989年の発電量は460GWhで、これはデンマークの電力供給量の1.5%を占める。

他のEC諸国では、オランダの現有45MW(1990年7月)、1991年計画では128MW、イギリスの2000年1,000MW計画、スペインの現有7MW、計画中の35MW、ドイツの現有20MW、100MWの建設計画、イタリアの5~10MWの計画という状況であり、地球温暖化問題がクローズアップされ、風力開発は加速傾向にある。

3. 地球環境問題への寄与

温室効果の約5割がCO₂に起因し、CO₂の約8割が化石エネルギーから発生するといわれる今日、純粋にクリーンで非枯渇性の再生可能エネルギーである風力エネルギーへの期待は世界的に高揚している。

ウィンドファームによる風力発電の商業化が進んでいる米国のエネルギー省は、風力発電の地球温暖化問題への寄与の試算を行った⁵⁾。特別の法的処置を取らない場合でも、風力エネルギーは

図3 風力エネルギーによるCO₂発生防止量推計(米国)

1990年には70万tのCO₂の発生を、1995年には720万tを、2000年には2,400万tを防止すると推定している（図3）。

既存のウィンドファームによる風力発電量は、現状では全発電量の高々1.5%程度である。このようなレベルに抑えられている大きな理由は、出力変動の激しい風力発電は不安定な電力供給をもたらすことである。しかし、現状の技術でも、風力発電の投入割合の上限は10%程度とする認識が世界的に強い。他の発電設備とのハイブリッド・システムや、安価なエネルギー貯蔵システムを開発すれば、風力発電設備の容量比はいくらでも増やすことが可能になる。

この利用上の理由以外にも、風力発電システムの技術上の原因がある。風車は、ロータの回転面積と風速の3乗とに比例した出力を生むので、特定の地で風力をより多く利用するためには、多数の風車（ウィンドファーム）を建てるか、大型機を建てるかである。現状では、MW級の大型機はまだ技術的に未完成であり、商業利用としては前者が選択されている。しかし、大型機の技術が確立すれば、大型機のウィンドファームの建設が指向されることは間違いない。なぜなら、中・小形機のウィンドファームが平面的空間利用であるのに対し、大型機のウィンドファームは風速の強い上空層も含む立体的空間利用となるからである。

4. 世界の大型風車開発状況

ティータードハブやソフト設計等の新技術の開発が必要とされる大型機の開発は、リスクが大きいため、欧米各国は政府主導のもとにこれらの試験研究が行われている。

米国はコスト面でも実用化を目指す第三世代の風車MOD-5B（ロータ直径99m、ハブ高さ60m、定格出力3.2MW）を1987年にハワイのオアフ島に建設した。現在は、ハワイ電力が商業運転を行っている。

イギリスは、LS-1機（ロータ直径60m、出力3MW）を、1987年オークニー島に建設し、試験を行っている。この他にも、Howden 1MW機（ロータ直径55m、1990年2月設置）やVAWTG（可変形状垂直軸機、25m径）などを開発している。

スウェーデンは、Nasudden機（ロータ直径75m、出力2MW、1982年に建設）とMaglarp機（ロータ直径78m、出力2MW、1981年に建設）の2台の大型機を開発し、試験してきた。現在運転中のものは、Maglarp機で、18,190時間稼働し、24.4GWhを発電している（1990年）。Nasudden II機は、第2世代のMW機（3MW、80m径、78mハブ高さ）として、ドイツとの共同開発下にある。また、3MW規模の洋上発電計画を持つ。

デンマークは、NIBE-A/B機（630kW）を1979/80年に開発し、1988年に電力に移管した。いずれも3枚羽根のアップウインド形風車であるが、前者は失速制御、後者はフルスパンピッチ制御である。B機は22,713時間稼働し、6,259MWhを発電している。この他、2MWのプロトタイプ機（直径61m、ピッチ制御、カンチレバー式3枚ブレード）が開発されている。

オランダは、1986年1MWのNEWECs-45（ロータ直径45m）を建設した。これは、第1号試験機HAT-25（ロータ直径25m、出力300kW、1980年建設）とその3台の商業化機NEWECs-25を大型化したものである。

西ドイツは、GROWIAN機（ロータ直径100m、出力3MW、1982年建設）の失敗後、この経験を生かしたWKA-60機（ロータ直径60m、出力1.2MW）がヘルゴランド島に建設されている。1枚ブレードのMonopteros-50機（ロータ直径51m、出力550～1,000kW、1982年建設）、等も開発されている。

カナダでは世界最大のダリウス風車EOLE機（ロータ直径64m、ロータ高さ96m、出力4MW、

1986年建設)を試験運転している。1988年3月以来、8,928時間稼働し、5,780MWhを発電した(1990年9月)。

イタリア、スペインもそれぞれ、ガンマ60機(ロータ直径60m、出力1.5MW)、AWEC-60(ロータ直径60m、出力1.2MW)を試験運転中である。

IEA(国際エネルギー機関)は風力発電システムに関する国際共同研究を推進しており、わが国も1978年に参画した。風車性能評価試験法、騒音測定法、後流の影響の研究、などの共同研究を進めるとともに、各国の大型機開発の運転経験や事故の情報を交換している。

5. サンシャイン計画

わが国の風力研究は、通産省の「サンシャイン計画」等、国による大型機の開発、実証試験および基礎研究と、民間における中・小形機の開発および大学における基礎研究によって担われている。

通産省がサンシャイン計画のなかで、風力の研究開発をスタートさせたのは1978年である。当時は、科学技術庁がフートピア計画(小型風車の運転試験)を、また農林水産省がグリーンエネルギー計画(風車利用技術の研究)を進めていたが、今では終了している。

5.1 風況観測

わが国にどれだけの風力発電量が期待できるかを把握することは、開発者の大きな関心事である。サンシャイン計画下で、地上100mにも及ぶ独自の風況観測結果と、気象庁のAMeDASデータとから、風車設置可能台数を試算した。ロータ直径50mの大型風車であれば、全国に約5,500～17,000台(平均風速6m/s以上の地点)の設置が可能であり、その発電規模は約3,200MW～11,000MWである(表2)。これは、風力発電が全発電設備容量の約2.2%～7.3%を担うことを意味する。有望地点は全国に分布しているが、とりわけ北海道が有力である。この推計においては、既存データの精度に粗さがあり、沿岸線から5km以内の土地だけを対象としたり、山岳部および洋上は除外するなどの制約が設けてあり、上の数値は下限値の目安程度のものである。さらに、洋上発電等の新たな可能性を加えると、推定値ははるかに大きくなるものと考えられる。現在は、より正確な風況マップを作成しつつある。

5.2 大型風力発電システムの開発

最初の試験研究機 NEDO-100kW機である(図4)。昭和57年度に三宅島に設置され、単独運転およびディーゼル発電設備との連携運転(系統投入)が行われた(委託先:東京電力/石川島

表2 日本における大形風車設置可能台数の見積

建設高度 (塔高)	ロータ直径 (m)	風速分類	想定出力 (kW)	建設可能台数						
				北海道	東北	関東・東海	四国・近畿	九州	離島	全国
40m	50	6.0m/s以上	500～600	4919 (8530)	143 (159)	89 (100)	20 (53)	298 (317)	14 (14)	5483 (9173)
		8.0m/s以上	900～1000	348 (929)	143 (35)	0 (0)	0 (0)	19 (12)	0 (0)	510 (985)
	80	6.0m/s以上	1000～1400	1627 (2765)	46 (51)	37 (45)	12 (30)	81 (94)	7 (7)	1810 (2992)
		8.0m/s以上	2100～2600	113 (294)	46 (15)	0 (0)	0 (0)	7 (5)	0 (0)	166 (314)
100m	50	6.0m/s以上	500～600	15706 (34174)	546 (1106)	103 (372)	44 (495)	298 (357)	24 (24)	16721 (36528)
		8.0m/s以上	900～1000	3192 (5070)	143 (79)	0 (0)	18 (78)	298 (126)	7 (7)	3658 (5360)
	80	6.0m/s以上	1000～1400	4872 (10706)	194 (298)	44 (166)	25 (272)	81 (108)	12 (12)	5228 (11562)
		8.0m/s以上	2100～2600	1014 (1637)	46 (23)	0 (0)	10 (43)	81 (37)	3 (3)	1154 (1743)

上 段: 海岸から5km以内の範囲

() 内: 等風速線内全域

図4 NEDO-100kW機

播磨重工)。合計2127時間の運転で122804kWhの発電実績と基礎的な試験データを残し、昭和62年度に撤去された。

次いで、昭和60年度にMW級大型風力発電システムの開発が開始された。当時は、MW級の大型システムの開発に向けて、コスト低減に必要な新しい技術概念が世界各国で提唱された。疲労荷重の低減を図るティータード・ロータ、タワーのコスト低減を目的としたソフト設計技術、あるいは変動風に対して機械構造面と制御面で柔軟に対応する可変速運転システムなどである。昭和60年度から63年度にかけて、ロータ直径50m、出力1MWの大型風力発電システムの試設計を行った（図5）。特にティータードハブや大型ブレードの解析・試作・動作試験・強度試験等が実施された（委託先：東北電力、等）。経済性評価の結果、kWhあたり約11円という発電単価が試算された。

しかしながら、風車の最適寸法として、商業機では当面は200～300kWクラス、近い将来は500kW程度であろうという世界的な認識や、海外のMW級大型機の試験研究に少なからずのトラブルが発生していること、さらにわが国のこれまでの運転経験を勘案すると100kWから1MWへの飛躍は大きすぎる、などの判断から、サンシャイン計画の次の開発ターゲットは500kW級の風車が妥当であろうという結論となっている。現在は、大型機導入に向けての基礎調査、環境影響評価のための自然・生物系への影響調査や風車ブ

図5 1MW機の概念図

レードへの落雷実験などが行われている。

5.3 エネトピア・沖縄計画

沖縄県宮古島地域に複数台の中形機（275kW機と100kW機）、複数台の小型機（16.5kW機）を設置し、ウィンドファームをつくる計画が1990年にスタートした（委託先：沖縄電力）。現在は、サイト選定のため、風況観測が集中的に行われている。この計画では、運転・制御技術、耐久性、安全性、信頼性の確保等の研究を行い、本格的なウィンドファームの利用・運転技術の確立をめざしている。

5.4 基礎研究・評価研究

工業技術院機械技術研究所は、昭和53年以来、風車工学の基礎的研究、小型の実機の運転試験研究、大型風力の要素技術研究および評価研究を行っている。基礎的研究の分野では、変動風況下でのロータ特性、空力荷重の評価、新技術概念および新素材の研究、大気乱流の解析・予測など、風車の安全性・信頼性を向上させる課題は山積している。デンマークのRISO国立研究所をはじめ、米国DOE、英国DOE、スウェーデン、オランダなども類似の研究を行っている。

水平軸および垂直軸風車の空力解析と風洞実験、可視化実験、レーザドップラー流速計による精密測定（図6）を通じて空気力学理論およびロータ設計技術の確立を図ってきた。また、低レイノル

図6 新翼型の風洞試験

図7 機械技術研究所のWINDMEL機

ズ数領域でも高い性能を示す風車用新翼型“MEL”シリーズの開発やCFD(計算流体力学)支援による流れ場解析も行われている。

昭和56年度に、プロペラ形フィールド試験機(ロータ直径6m, 発電出力1.5kW)を設計・製作し、自然風況下における実機の運転・試験を開始した。昭和61年度には、新技術概念を導入した水平軸型風力発電システム, WINDMEL機(ロータ直径15m, 発電出力15kW)を設計・製作し、現在もフィールド試験を継続している(図7)。このシステムは、ティータードハブ機構、可変速運転システムおよびメカニカルガバナナなど大型機の開発に要求されている革新技术概念の試験・研究を行うものである⁶⁾。

また、大型機もしくはウィンドファームの導入による本格的な風力の開発に際して必ず必要となる、騒音等の環境問題、立地の最適化など、数々の試験・解析研究も行っている。

6. 民間における開発動向

紙面の関係上、民間における際だった動向について概観する。これらの中には、通産省の補助金制度によるジョイントプロジェクトも含まれる。

6.1 三菱重工, MWT-250機

三菱重工は過去10年、中規模の3枚ブレード水平軸型風力発電システムの開発に努力を傾注し、その結果、昭和62年にMWT-250機(ロータ直径25m, 定格出力250kW)をハワイ島のカマオアウィンドファームに37台とカリフォルニア・テハチャビのウィンドファームに20台を、続いてテハチャビのウィンドファームに340台を輸出するなど、世界有数の風車メーカーとなっている(図7)。

6.2 九州電力, 甕島風力発電所

離島部が多く、風力発電への期待が大きい九州電力は知名風力発電所の試験運転後、1990年からは年間平均風速が6.8m/sもある甕島にMWT-250機を設置し、現在実証運転を行っている。

6.3 東北電力

青森の岬部に年間平均風速10m/s前後の有望な地点(竜飛, 尻屋など)を持つ東北電力は、大型風力の開発に積極的であり、サンシャイン計画に参画するとともに、独自にも風況を観測し、ヤマハ16.5kW機の試験運転を行ってきた。来年から、MWクラスのウィンドファーム(5台の275kW三菱機)を竜飛岬に建設する構想を発表し、風力利用開発の大きな前進が期待される。

6.4 ヤマハ発動機

機械技術研究所のWINDMEL機の製造経験を踏まえ、姉妹機ヤマハ16.5kW機(ロータ直径15m, 出力16.5kW)を開発している。現在、北海道の寿都の5台、関西電力の六甲アイランドの2台、など国内に10台近く運転されている。ヤマハ100kW機(ロータ直径30m, 出力100kW)は、ヤマハ15機をスケールアップしたもので、沖縄電力が来年の運開を目指して建設中である。

7. むすび

わが国の一次エネルギーの対外依存度は81.0%,

石油の輸入依存度は99.6% (いずれも1987年) と、そのエネルギー供給構造は極めて脆弱である。一方、総合エネルギー調査会の長期需給見通しは、石油換算で1988年、4.82億kl (実績)、2000年、5.97億kl、2010年、6.66億kl と、今後とも増加する。日本は、一次エネルギーの消費が世界第4位 (シェア、5.0%)、石油では世界第3位 (シェア、7.3%、1987年) というエネルギー消費大国であり、国産エネルギーの確保とともに、地球環境問題への真剣な対応は国際的責務といえる。

今日の風力発電技術は、中・小形機では稼働率、耐久性、信頼性のさらなる向上が課題であり、そのためには材料の疲労問題の解決と、法制度等の環境も含めた運転・利用システムの改善が必要である。他方、大形機では、海外の研究例を引くまでもなくまだ多くの試験研究を要する。結論的に

述べれば、地道な努力と技術経験の積み重ねのみが風力発電技術を完成に導き、風力の真価を発揮させる時代をむかえるものと信ずる。

文 献

- 1) 米国DOE資料 (1990年4月)
- 2) AWEA資料 (1990年3月30日)
- 3) WIND ENERGY WEEKLY, 8, (344), 3 (1989)
- 4) WINDPOWER MONTHLY, 6, (10), 12 (1990)
- 5) WIND ENERGY WEEKLY, 8, (358), 2 (1989)
- 6) 松宮, 他, 可変速風力発電システム, 電気学会新・省エネルギー研究会資料ESC-88-6 (1988)

Research and Development of Wind Turbine Generator Systems

Hikaru MATSUMIYA

(Mechanical Engineering Laboratory, MITI)

SYNOPSIS : — This paper summarizes current progress on wind turbine generator systems (WTGS) R&D in Japan, especially those of the SUNSHINE project conducted by MITI. Recently, as the global environmental problem has arisen all over the world, the benefits of wind energy, as a clean, renewable energy resource, are more widely understood than before and not only the government but also utilities have started to accelerate R&D of WTGSs or windfarms.

Key Words

Wind turbine generator system (WTGS), Wind energy, Sunshine project