

# 風力発電の現状と将来

## The Present Status and Prospect of Wind Energy Conversion Systems

三 浦 登 志 男\*

Toshio Miura

### 1. はじめに

風力発電に関する開発は、将来のエネルギーの多様化およびクリーンエネルギーの活用という観点から1973年のオイルショック以来、米国はじめ西ドイツ、スウェーデン、オランダ、デンマークなどのヨーロッパ諸国において、国家プロジェクトとして推進されて来た。現在欧米諸国では100kw級実験機での基礎試験をほぼ完了し、Mw級風力発電機による実証試験段階にある。1990年～2000年には実用段階になるものと予想されている。

一方わが国の風力発電の開発は、欧米諸国にくらべて遅れているが、ここ3～4年前から風力エネルギー利用に対する関心が高まって来ている。小型風車の利用については、昭和53年、54年の2年間にわたる小型風車の実証試験が科学技術庁の風トピア計画として実施され、また電々公社、地方自治体、大学などの研究機関、民間企業でも発電はじめ温水、暖房用としての利用などの開発が進められている。そして昭和56年、サンシャインプロジェクトとして将来の大型風力発電の開発を目標とした100kw級風力発電開発プロジェクトが発足し、日本としてはじめて大型風力発電開発の第一歩をふみ出した。

ここでは、米国はじめヨーロッパならびに我が国の開発状況を紹介します、あわせて実用化への問題および将来の動向について展望してみたい。

### 2. 諸外国の開発状況

#### 2.1 米 国

米国でも、過去において揚水、かんがい用として多翼式風車が利用され、大型のものとしては1941年バークレーに1,250kwの風力発電が建設され短期間であ

ったが給電したという実績がある。しかし米国における本格的風力発電の研究開発は、1973年米国エネルギー省 (Dept of Energy: DOE) および航空宇宙局 (NASA) を中心として始まったと云えるだろう。

研究内容としては、

- 1) プロペラ式大型風力発電システムの研究
- 2) ダリウス型風力発電システムの研究
- 3) 農業への適用研究
- 4) 小型風車の研究

など多岐にわたっているが、将来のエネルギー源として最も注目されるのは大型風力発電システムの研究である。DOEでは風力発電の技術的問題の解決と同時に経済性の追求を目的としており、現在まで100kwから2,500kwまで合計9基のテスト機を建設している。一方このようなDOEプロジェクトとは別に米国内務省 (Dep't of Interior DOI) の委託をうけて、ハミルトンスタンダードが4Mw、ボーイング社がMOD-2と同タイプの2.5Mwをワイオミング州に建設している。また民間の電力会社でもSCE社 (Southern California Edison Co.) がBendix社製の3Mwを、PG&E社 (Pacific Gas & Electric Co.) がボーイング社の2.5Mwを導入し各々独自の実証試験を実施している。

表1は米国の大型風力発電プロジェクトの開発状況を示したものであるが、現段階では、WTS-4の4Mwまでの建設を完了し試験中である。DOEではMOD-5の開発をもって国家プロジェクトを終了し、その後は民間企業に移管したいとの意向をもっている。1975年に建設された100kw機は現在もオハイオ州サンダスキーでNASAによって種々の改良がくわえられ、Mw級の設計資料を得るための基礎試験が行なわれている。MOD-Oが風力発電の技術的問題点解明のためのテスト機とすれば、MOD-OAは100kw級規模の実用テスト機であり、MOD-1は大型化にともなう技術的資

\* 石川島播磨重工業(株)技術本部製品開発センター 副部長  
〒135 東京都江東区豊洲3-1-15

表1 米国の大型風力発電プロジェクト

委託元	機種名	規模	基数	建設場所・時間
DOE	MOD-O	100 <sup>kw</sup>	1	サンダスキー(1975)
	MOD-OA	200	4	クレイトン(1978) プエルトリコ(1978) ブロックアイランド(1979) ハワイ(1980)
	MOD-1	2,000	1	ブーン(1979)
	MOD-2	2,500	5	ゴールデンデール(1980) 3基 カルフォルニア(1982) ワイオミング(1982)
	MOD-6	6,000 7,200	1 1	計画中
DOI	WTS-3	3,000	1	スエーデン(1982)
	WTS-4	4,000	1	ワイオミング(1982)

料を得るためのテスト機といえるであろう。これに対してMOD-2は経済的な見地から構造的にも改良を加えたいわば実用化を旨としたテスト機である。一方ハミルトンスタンダードの3Mw, 4Mw機は、現在世界でも最新・最大規模のものであり構造的にも経済的な面からもユニークな試みが採用されており、今後の風力発電の商用化、経済性を見通す上でその成果が期待される。

## 2.2 英国

英国では、1948年から1960年にかけて、風力発電の開発が組織的に行われ、オークニー島、アルジェリア、マン島に100kw級の風力発電機が設置されたが、いずれも機械的トラブルで運転が中止された。しかし1977年に至りエネルギー省は風力エネルギーに対しても新エネルギーの一環として無視出来ないとの見解を明らかにし、風力発電の技術開発に約1億4,000万円の補助金を出している。現在英国の大型風力発電の開発は、国家プロジェクトではなく、大学や民間研究機関主導型で進められている。とくに、英国電力研究協会(ERA: Electrical Research Association)では3・7Mwの風力発電装置の設計を完了し、その建設場所を検討中である。

## 2.3 西ドイツ

1974年風力発電システムに関する国家プロジェクトが発足し、つぎの3つの計画がドイツ航空宇宙研究所(DFLR)を中心に推進されている。

### (1) グロビアン計画

3Mwの風力発電所をハンブルグ近郊に建設して既設電力網に接続し、商用電力として使用する計画で将来は原子力と風力の複合システムとすると云われている。グロビアン計画はI, IIがあり、Iは3Mw, IIは

5Mwの規模であるが、3Mw規模の風力発電機は1982年に建設が終り、IIはブレードが一枚というユニークなものであるが、すでに基礎試験として370kwのものが建設され今後の動向が注目される。

### (2) ボイト計画

260kw規模の中型風力発電機; 1981建設完

### (3) ダルニア計画

ブレード直径5mのドリウス型風力発電の研究  
西ドイツでは、1950年後半から1960年代にかけてヒュッター教授による100kw風力発電機の実績を有しており、これが現在の風力発電開発の技術的バックボーンになったと云えよう。西ドイツでは今後の見通しとして、風力発電は将来の主要発電方式になるとは云えないが全電力消費量の15%位を占めるのではないかとの見方がとられている。

## 2.4 オランダ

オランダのシンボルマークにさえなっている4枚羽根のオランダ風車は、19世紀中頃に約9,000台が稼動し、製油・製紙及びかんがい用などの動力として使用されていた。しかしオランダ風車も20世紀の近代化の波におされ、現在では風車博物館に保存されているにすぎない。しかし石油危機を契機として始まった新エネルギー開発への意欲はオランダでも非常に強く、とくに自然エネルギーの中で最も風力エネルギーに期待をかけている。オランダエネルギー省での本格的風力発電の開発は1976年に始まる。オランダ政府は2000年までに風力発電によって国の電力消費量の15~20%をまかなうとの目標のもとに1976年から1981年までの五カ年計画を立て、この中で300kw風力発電テスト機による基礎技術の確立、風力発電建設地の選定等の研究を実施した。1981年この五カ年計画の成果をふまえ、さらに9カ年計画を立て現在この計画を推進中である。この9カ年計画では次のような目標を立て国家プロジェクトとして推進して行く予定である。

(1) 2000年までに1~2Mw/1基を集め2,000Mwの風力発電所と300kw/1基をベースとして450Mwの風力発電所を建設する。

(2) 上記計画実現の第1段階としてMw級風力発電の設計および電力貯蔵方式の研究

## 2.5 デンマーク

デンマークもオランダとならんで風力エネルギー利用が盛んであるが、なんといってもデンマークでの風力発電機の実績は1956年にフォルスター島に建設されたゲッスル風車であろう。このゲッスル風車は約10年

間にわたって商用電源として使用され、いわば過去において成功した唯一の風力発電機といっても過言ではない。現在の大型風力発電プロジェクトは4カ年計画で1977年に発足し、商務省および電力消費組合が中心となって推進されて来た。このプロジェクトの成果として1979年に北海沿岸に近いニーベに630kwの風力発電機が2基相ついで建設され現在もテスト中である。この2台はNIBEMOD-AおよびMODBと名づけられ、いずれも3枚ブレードであるが一方は全体のブレードが可変ピッチ方式であるに対し他方はブレードの先端のみ可変ピッチのいわゆる部分可変ピッチ方式でこの比較テストを実施しているのが特徴的である。デンマークではこの他100kw以下の小型風力発電プロジェクトも進められている。

以上のような国家プロジェクトとは別に民間ベースでの風力発電機の開発も盛んでデンマークの北海沿岸の農家では22kw~45kwの風力発電機が既設電力網に接続して実用されており、またデンマークの北東にあるウルフボルグに1978年初頭1,700kwの風力発電がボランティアを中心に建設されたことも特記すべき事項である。

## 2.6 スエーデン

スエーデンも風力発電開発に意欲的な国の一つである。風力発電開発プロジェクトは1973年国家プロジェクトとして発足しエネルギー源開発庁を中心に進められている。

研究内容としては、

- (1) 風況調査および建設場所の風の流れの研究
- (2) 大型風力発電システムの研究
- (3) テスト用60kw風力発電機の試作試験
- (4) 経済性の研究

がある。60kwの基礎研究のためのテスト機は1977年に建設されすでにそのテストを完了しており、これをもとに、1982年には2Mwおよび3Mwが建設されいよいよ大型風力発電の実証試験の第一歩をふみ出した。とくに3Mw風力発電機は、その基本設計とブレードの製作をスエーデン政府よりアメリカのハミルトンスタンダードに委託したもので、前述のアメリカのワイオミング洲に建設された4Mwと全く同型である。このほかスエーデンでは風力発電の建設場所として洋上発電を計画しており、今後の動向が注目される。

## 2.7 カナダ

カナダの風力発電に関する研究は、1960年に始まるが、本格的な研究は1975年以降である。カナダで特長

的なのは、他の諸外国では水平軸型プロペラ式が主力であるに対し、いわゆるグリウス型と呼ばれる垂直軸型の開発が中心であるということである。1977年にカナダ東部のマグダレン島に出力200kwのグリウス型が建設されテストされたが現在の所長期的計画は明確でなく、国として200kw以上の開発は考えていない模様である。

## 2.8 その他の諸外国

ソ連では1976年に風力発電の5カ年計画を発表し1Mw~5Mwの風力発電とディーゼル発電を組み合わせるシステム等が計画されているとのことであるが詳しいことはわかっていない。また最近ではスペインも100kw風力発電を開発するなどのニュースもあり、また中国もアメリカの風力発電の技術援助の下に開発を推進しようとの計画をもっているようで、諸外国ともかなり風力発電に対して前向きの姿勢が感じられる。

## 3. 日本の開発状況

日本における風力発電の研究は、小規模な風車を除いては欧米諸国より遅れているが、ここ4~5年前から風力エネルギー利用に対する関心が高まって来ている。数kw以下の小規模風車は、日本でも民間ベースで実用化されており、昭和30年代には北海道の開拓農家を対象として発電用風車が数千台設置された例がある。また最近では昭和52年秋電々社が試験用として大島に出力2kwの風力発電機を設置したのをはじめその後地方自治体、大学、民間企業でテスト用あるいはデモンストレーション用として現在まで約十数台の小型風車が建設されている。このような状況を背景として昭和52年11月民間を対象とし「日本風力エネルギー協会」が発足した。これは大学、産業界、アマチュア同好の士を中心とした協会で、風力エネルギー利用技術の振興と普及を目的としたものでその会員数も700名以上と云われている。

一方国を中心とした風力エネルギーの利用開発も近年活発化して来ている。まず昭和52年7月科学技術庁を中心として「風エネルギー研究会」が発足し、この中で諸外国の歴史と現状、我国の現状と技術的・経済的諸問題が調査検討され、昭和53年3月その結果が「風エネルギーの利用に関する調査」としてまとめられた。

ついで昭和53年6月科学技術庁で風力エネルギー利用の技術的・経済的可能性を実証し小型風車の利用促進を目的としたいわゆる風トピア計画が53年・54年の2年計画が発足した。一方大型風力発電に対する調査・

要素研究も昭和53年頃から国の研究機関が中心となって実施されて来た。そして昭和56年に至りサンシャインプロジェクトとして将来の大型風力発電の開発を目標とした100kw級風力発電機を昭和57年度に三宅島に建設することとなり、日本としてはじめて大型風力発電開発の第一歩をふみ出したと云えよう。サンシャインプロジェクトは、昭和56年度から59年度の4カ年計画で58・59年度は三宅島での現地テストが予定されており、この開発は新エネルギー総合開発機構からの委託研究として東京電力が中心となり石川島播磨重工業等が参加し進められている。

現在国の風力エネルギー利用技術の研究は通産省の他、科学技術庁、農林水産省でも進められており、風力発電の研究のみならず風力の熱変換利用システムあるいは水素貯蔵方式による複合システム等多岐にわたり、その研究も大別して6プロジェクトがある。

また風力発電については前出の東京電力の他、関西電力・九州電力、北海道電力などの電力会社も強い関心を寄せており、九州電力でも離島用として300kw風力発電機の研究が進められている。

4. 風力発電実用化の問題点

将来のエネルギー源を目標として1973年から始まった大型風力発電の開発も、いまやMw級風力発電システムの実証試験段階に達したと云えるだろう。表2は、諸外国の開発状況を示したものであるが、今のまま開発が進めば1990年代には風力発電も実用化段階に入るだろうといわれている。しかしながら電気エネルギーとして実用化されるためには、安全性、経済性、環境問題など解決すべき問題も多い。

4.1 技術的問題

1982年米国機械学会主催で開催された第1回風力エ

表2 欧米諸国の開発状況

開発段階	100kw級による基礎試験				Mw級による実証試験				備考
	kw								
風力発電規模	4,000							○	日本● 米国○ 西独⊗ (X) スエーデン⊖ デンマーク⊕ オランダ⊙ カナダ⊙
	3,000					○	⊗	⊗	
	2,000				○			⊖	
	1,000			⊕					
	600				⊕	⊕			
	200	○	○	○	⊗	⊗	⊗	●	
建設年度	1975	'76	'77	'78	'79	'80	'81	'82	

ネルギーシンポジウムにおいて、今後実用化にあたり解明すべき問題として、構成機器の耐久性・信頼性・環境問題としての騒音、およびプロペラ式におけるアップウインド型とダウンウインド型の比較など経済的構造の追求などが上げられている。現に米国のMOD1およびMOD2でも制御システムの故障からブレードを破損したなどのニュースもあり、今後ともテストによる問題の解決と実績の積み上げが必要であろう。厳しい自然環境の中に建設される風力発電所はまさに自然とのたたかいであり台風に対する安全性、落雷、地震、着氷の対策も、経済的設計と如何にバランスをとって行くか、今後の課題である。この点からも米国の4Mw、西ドイツおよびスエーデンの3Mwなど大型風力発電システムのテスト結果が注目される所である。

4.2 環境へのインパクト

風力エネルギーは、化石燃料にくらべてクリーンなエネルギーであり、いわゆる大気汚染や環境破壊という問題はない。しかし風力発電所の立地条件面からいくつかの自然環境への影響が考えられる。

(1) 設置場所

建設適地としては、風況条件が最も基本的条件となる。経済的な面から年間平均風速が5m/s以上の場所が望ましいとされている。この点から山岳地域・海岸地域や離島が候補地となるが自然の美観を損わないように、風力発電システムの配置・色彩などにも十分配慮することが必要である。

(2) 騒音

騒音は、ブレードの回転によって生ずる騒音と空気の振動・脈動による20Hz以下の低周波騒音がある。まだ騒音について十分なデータは発表されていないのだがMOD-1の2Mwで65ホン程度と云われている。低周波騒音はMw以下ではあまり問題になっていないが、MOD-1の2Mwでは低周波騒音により約半マイル先の民家の窓が破損したなどの事故が発生した。この原因については、米国のNASAを中心に調査中とのことであるが、ブレード先端速度が早いこともその一因と云われている。風力発電機を多数一カ所に配置した場合の周囲に与える騒音の影響なども今後解明すべき課題であろう。

(3) 電波障害

大型風力発電機では、塔の高さが数十mから100mに及ぶ。このため設置場所によっては周囲の民家のテレビやその他の電波施設に影響を与えることになる。基本的には、風力発電所が周囲に電波障害を与えない

ような設置場所の選定あるいはテレビアンテナへの考慮などが必要であるが、風力発電機自身も電波障害のすくないFRPブレードを使用するなどの配慮が必要であろう。

### 4.3 経済性

風力発電の将来性を考えるにあたって、経済性は重要な要素である。欧米諸国でも如何にして経済的構造あるいはシステムを開発するかが大型風力発電システム研究の重要課題となっている。現に米国においては、

- (1) ピンヒンジ型ブレードによるブレードの軽量化
- (2) ソフトデザインによる塔の軽量化
- (3) ブレード先端の部分可変ピッチ方式
- (4) ダウンウインド型におけるフリーヨー方式

などコストダウンを目標とする構造の改良、テストが行われている。西ドイツにおいても一枚ブレードというユニークな試みがなされている。

米国のエネルギー省(DOE)では将来の見通しとしてMw級の風力発電機を100基製作した時の発電コストが3\$/kwh~5\$/kwhとの目標を立てている。

経済性に影響を与える要素として、設置場所の風況条件、風力発電の規模、需要と生産体制などが上げられる。風力エネルギーは、風速の3乗に比例するから設置場所の平均風速が大ききほど発電コストが安くなる。たとえば年間平均風速6m/secと9m/secでは発電コストが約半分になると推定されている。また大型になればなるほど設置場所までの運搬費および建設費も経済性評価の重要な要因となる。また風力発電規模について米国ではブレード直径が75m~125m程度が発電コストミニマムになるとの見方もあるが、傾向としてはMw級の方が小規模なものより経済的であると云われている。

## 5. 将来の動向

1973年に始まった欧米諸国の開発も、1982年に至り米国、西ドイツ、スウェーデンで3~4Mwの大型機がつぎつぎと建設され、いま実証試験を目的とした大型機もほぼ出揃った感がある。これら一連の試験機は、風力発電実用化の足がかりとなると同時にこれらのテスト結果は、電力エネルギー源としての風力発電の位置づけをある程度明確にしてくれるものと期待してよいだろう。

米国においては、現在SCE社(南カルフォルニアエジソン社)、PG&E社(パシフィックガス&エレクトリック社)などの電力会社を中心としていわゆる風

力農場「WIND-FARM」計画が積極的に推進されている。この「WIND-FARM」計画は一カ所に多数の風力発電機を設置し、大規模な風力発電所を建設しようという計画である。

SCE社では、今後10年間で電力需要の30%を風力発電でまかなうとの長期計画のもとに1990年頃に360Mwの風力発電所建設が予定されている。

またPG&E社でも将来計画として350Mwの規模の発電所をカルフォルニア州に建設する計画がある。このようなWIND-FARM計画の第一段階としてUSウインドパワー社は1982年に50kwを100基カルフォルニア州に建設し、フェイエット・マニファクチャリング社は、同じくカルフォルニア州に50kw級50基を建設し、現在いずれも稼働中である。

現在米国における風力発電開発の環境は、1982年度に政府予算が大巾に縮小されるなどきわめて厳しいが、それにもかかわらず米国エネルギー省の関係者や電力会社では、一連の実用化研究を通して電力事業における風力発電の位置づけを確認しようとする積極的姿勢がうかがえる。一方欧州においては、前述の如く北海沿岸をとりまく西ドイツ、スウェーデン、オランダ、デンマークが開発に積極的である。オランダが2000年までに2,000Mw以上の風力発電所を建設しようとの遠大な計画をもっている他、西ドイツでも将来風力発電で全電力消費量の15%程度を占めるとの見方がされており、風力発電に寄せる期待はかなり大きい。

このような外国に比べて日本は小型の風車に関してはかなり研究されているが、大型風力発電の開発は、昭和56年に発足したサンシャインプロジェクトによりようやく第一歩をふみ出したと云えるだろう。日本の風力エネルギー利用の環境は、風速条件から見るとある地点では恵まれている所もあるが台風が多いこと、地理的条件から見て平坦な広い土地がすくないこと、既設の電力網が非常に発達していることなどが、欧米にくらべて風力エネルギー利用促進のマイナス要因となっている。しかしながら前出の風力発電のサンシャインプロジェクトをはじめ熱変換利用システム、風力エネルギー賦存量、風力エネルギーの気象学的調査などが官、地方自治体或いは民間企業ベースで着々と推進されている。

厳しい自然を対象とする風力エネルギー利用は、建設場所の自然環境、風況特性を把握することが出発点となる。わが国の風力エネルギー利用開発にあたっては、外国等である程度確立された技術でも日本の風況

特性に合致しているか否かを実証し、テストを積上げて一つ一つの問題を解決して行く態度が必要であろう。

風力エネルギー利用の実用化において装置の安全性、信頼性、環境への適応性、経済性など今後解明すべき問題も多いが、現在わが国のサンシャインプロジェクトで建設されている100kw風力発電が2~3年後にはその解答を出してくれるだろう。今後のエネルギー多様化時代に対処し、風力エネルギーがすこしでも将来のエネルギー源として役立つことを期待したい。

#### 参 考 文 献

- 1) 本間琢也；風力エネルギー読本（昭和54年），オーム社
- 2) 牛山 泉，三野正洋；小型風車ハンドブック（昭和55年），パワー社

- 3) 三浦登志男；米国における風力発電の現状と展望（昭和56年10月号）電機 19-26
- 4) H. J. M. Beurskens and G. G. Piepers；The Dutch wind Energy Programme, (1982), 4th International Symposium 93~112
- 5) P. Nielsen；The Wind Power Programme of the Ministry of Energy and the Electric Utilities in Denmark (1982), 4th International Symposium 35-46
- 6) E. Hau, MAN Neue Technologie and R. Windheim；The wind power programme in Germany—Present status (1982), 4th International Symposium on Wind Energy Systems, 131-140
- 7) Arthur, D. Little Inc.；Large Wind Turbine Generator Performance Assessment (1981) EPRI, Ap-1959

### 話 の 泉

#### 長期エネ需給を見直し

#### エネ庁

通産省・資源エネルギー庁は総合エネルギー調査会の基本問題懇談会に総合エネルギー政策とその指針となる長期エネルギー需給見通しの総点検を要請した。原油価格の低下、世界景気の長期低迷などから国際石油情勢を初めエネルギーを取り巻く環境が大きく変化していることに対応、昨年4月に策定した長期エネルギー需給見直しを見直す一方、これを踏まえて現在推進中の総合エネルギー政策を中長期の視点で個別にチェックしようというもの。懇談会は月1回程度のペースで検討を進め、8月末には中間報告をまとめるが、エネルギー情勢の変化で総合エネルギー政策推進上、経済性とエネルギーの安全確保をどうバランスさせていくかが最大の焦点となる。

現行の長期エネルギー需給見直しは57年4月に策定したものの、骨子は年平均実質成長率5%程度を前提に、65年度におけるエネルギー需給について①総需要は原油換算で5億9,000万kl ②うち石油は2億9,000kl（依存率49.1%）とする③56年度の石油依存率64.2%を50%以下に引き上げる上で原子力、LNG、石炭液化を中心とする新エネルギーなど、石油代替エネルギー開発を強力に推進するというもの。

ところが最近エネルギー環境が大きく変化。長期にわたる世界同時不況、省エネルギーの定着、産業構造の変化などにより、エネルギー需要その

ものが予測を大幅に下回っているうえ、世界的な石油需要の低迷から原油価格が引き下げられ、しかも当面弱含みで推移する見通しとなっている。また政府は年内にも現在の新経済社会7カ年計画を改定するが、現行計画が示す年平均成長率5%が1%下方修正されただけでも65年度におけるエネルギー需要は5億9,000万klを1億kl下回る見通しとなっている。

通産省は需給見通しが現実にそぐわなくなったため新しい情勢を踏まえて新目標年次設定を含めて需給見直しを改定することにした。同時に新見通しを基本方針として現在進めている総合エネルギー政策も個々に点検、必要に応じて軌道修正する方針だが、この場合エネルギー供給の安全確保と経済性（供給コスト低減）のバランスをどうとるのが最大の課題となる。つまり、石油備蓄の水準、原子力、石炭、LNGの供給コストと供給構造のあり方、新エネルギー開発のあり方などを調整する。とくに今回はエネルギー政策を従来以上に経済的側面から点検するのが狙いで、石炭の液化、ガス化、太陽光・熱発電、オイルシェール、タールサンドといった新エネルギー開発のあり方が技術開発体制をも含め幅広く議論されることになっている。

（日刊工業新聞社 兼子次生）