

風 力

Wind Energy

牛 山 泉*

Izumi Ushiyama

風車は人類の使用してきた自然エネルギー利用の動力装置の中でもっとも古いものの一つである。蒸気機関や内燃機関の登場により動力装置としての主役の座からは降りているが、風力利用は近年の石油危機、地球環境問題との関連から再評価されつつある。

1. 風車の起源と伝播

1.1 風車の起源

エジプトのアレキサンドリアには3000年前の石造りの風車塔に6枚または8枚羽根の風車があったことが知られている。ギリシャにも古い風車があり、約2000年の歴史を経て、今日でもそのいくつかを見ることができる。

しかし、風車がどこで最初に使用されたかは明確になっていない。一般に風車は主回転軸が地面に垂直な垂直軸風車と地面に水平な水平軸風車の二つに大別されるが、風車の起源に関係すると思われるような事実が東洋とヨーロッパとにある。前者は垂直軸型、後者は水平軸型である。

チベットでは、風力計のような構造で垂直軸を中心に回転する風力駆動の祈祷用の経文円筒が非常に古くから用いられており、これが風車を示唆するものではないかという。また、12世紀には中国の一部の仏教寺院では聖典を本箱に入れて機械的に回転させて読むための車輪の響きが聞こえたという。これらは垂直軸風車の発生と関わりがありそうであるが、中国では13世紀以前には風車利用の歴史がないことを考慮すると、これらの事実と垂直軸風車とが結び付くか否か疑わしい。ただし、アフガニスタンでは既に7世紀には、垂直軸風車があったことは確実で、このあたりが風車の起源を推定する鍵ともいえる¹⁾。

一方、1～2世紀のアレキサンドリアの技師ヘロン

の「気体装置」の中の「風が吹けば笛が鳴るオルガン」の説明に、風車の羽根を意味するアムネリオンのことを記載していることは注目に値する。しかしヘロン自身がこの書物の中の装置をいずれもおもちゃまたは娯楽用として紹介したり考案しており、生産用の動力機関としての風車ではなかったようである¹⁾。以上のように、東洋とヨーロッパの風車の起源に関する事実は、一つは宗教的儀式のため、もう一つはおもちゃまたは娯楽用として考案されたわけで、そこには風車の芽生えらしきものは認められても、それをすぐさま中近東地域や中世ヨーロッパで普及した風車と関連づけようとするのは、その間に歴史的な断絶もあり、やや強引過ぎるようである。

中近東に最初の風車が現れたのは中世の初期である。7世紀の歴史家アル・タバリは著作の中で風で回転する製粉機のことを報告している。また、10世紀前半に集大成された「千一夜物語」のなかにも「魔神が翼で風車のような響きをたてながら……」と、述べられており、風車が既に当時の人々に知られていたことがわかる。

さらに、915年から934年にかけて大調査旅行を企てたアラビア人の地理学者アル・マスウディがペルシャのセイスタン州の風車について次のように述べている。「セイスタンは風と砂の土地である。この地方の特色は風が風車を回し、その風車が井戸から水を汲み上げて庭園を灌漑している点である。これ以上に風を利用している人々はこの世にない」。

それから3世紀後のアル・カズウィニ(1203～1283)はセイスタンについて、「風は止むことがない。それを考えた人々は風車場を建てた。かれらは穀物を挽くのに、これらの風車場だけを使った」と報告している。これらの報告や記事から、セイスタン州では常に強風が吹き、その住民は風力を揚水と製粉に利用していたことがわかる。その風車は上下二層の建物からなっており、下層にはとり入れた風で回転する垂直軸風車を

* 足利工業大学機械工学科教授
〒326 足利市大前町268-1

納め、上層には製粉のための石臼や穀粒を送り込む漏斗などがある。この地域では風向がほぼ一定であるため、下層の取り入れ口は主風向の東側に対して開いている¹⁾。

こうして中近東地域では、その後も垂直軸風車が広く使われた。

1.2 風車の伝播

ヨーロッパの風車は12世紀頃から現れているが、直接の系譜について、一部では、風車はベルシャからロシアとスカンジナビアを通じる交易路をへて西北ヨーロッパに入ったといわれてきた。また、ヨーロッパでの風車の伝播の順序を考えて、モロッコやスペインのイスラム圏から伝わったという説、さらには、ヨーロッパの風車は十字軍に従軍した者などが東方から帰還して伝えたという説もある。

これに対し、ヨーロッパの学者の間では、風車の東方起源説を承認することに難色を示すものが多かったようである。その主な理由は、中近東地域では現在余り風車が用いられていないことや、東方の風車が垂直軸形式の簡単なものであるのに対し、ヨーロッパの風車は水平軸の複雑な機構を有するものであるという理由からである²⁾。

いずれにせよ、中近東地域の風車はヨーロッパより早く10世紀には相当数使われており、また、12世紀末から13世紀初頭にかけて、イングランドや北部フランスに相当広く普及していたという明白な事実がある。

2. ヨーロッパの風車とその特徴

ヨーロッパの最初の風車として確かなものは、イギリスのヨークシャーに1185年に建てられたもので、この風車の使用料は1年につき8シリングであった。そして、風車の社会的な役割が定着したのは12世紀末の教皇ケレスティヌス3世の時代で、風車に十分の一税が課されたという記録が残っている。

その後、14世紀初頭から、風車はヨーロッパの平原では不可欠の原動機となり、風物の一つともなった。このことは14世紀初めのダンテの「神曲」、16世紀中期のラブレアの「パンタグリユエル物語」、さらには16世紀末のセルバンテスの「ドン・キホーテ」などの文学作品に、風車が現われていることからわかる。

ヨーロッパで使われた水平軸の風車は、その回転面を常に風の吹く方向に向けてやる必要があるが、これについては二つの方法が用いられた。初期のものや小型のものは、地面に据え付けた太い中心支軸の回りを

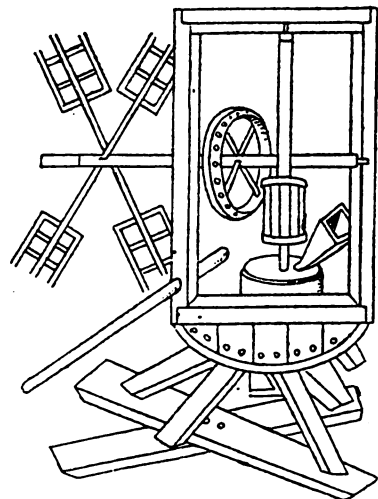
風車小屋と風車ロータが一緒に回転するポストミル（箱型風車）と称するもの、もう一つは比較的大型の風車で、固定した塔の頂部に旋回可能な部分がついており、ここで風車ロータと主回転軸を風向にむけて旋回させるタワーミル（塔型風車）と称するものである。

ポストミルの内部構造を描いた現存する最古のものの一つとして、図-1に示す15世紀のフス戦争の頃の一技師の手写本の中の絵がある。主軸は地面と平行に取り付けられ、それについている歯車と、臼石を貫く中心棒にある歯車とが噛み合っており、臼石が水平に回転するようになっている。臼の上には穀粒を送り込む漏斗がついている。また、風車を風の向きに回すための尾部柱が左斜め下についている。ただし、この絵は遠近法など画法が不正確で機材の配置も正確に描かれていないことに注意する必要がある²⁾。

一方、タワーミルは14世紀の初め頃から現れ、胴体の大部分を占める機械類の入っている部分がレンガあるいは石造りの塔の中に入っていて、風車ロータのついている頂部だけが風の向きに回る仕組みであった。ポストミルに比べて頑丈で、機構を大きくすることも可能であった。

風車の主回転軸は、最初は地面に対して水平であったが、16世紀初めイタリアの数学者G. カルダノの研究によって、風車の効率を高めるために主回転軸を水平面に対して5～10度上方に傾斜させる改良がなされている²⁾。

風車ロータの羽根枚数は圧倒的に4枚が多い。羽根枚数は風車の回転速度に関係し、羽根枚数の少ないも



(出典、アッシャー、機械発明史、1943)

図-1 ポストミルの構造

のほど回転速度が大きく、羽根枚数の多いものは起動はよいが回転は上がらない。少数ながら2枚羽根や5枚羽根、さらには6枚のものや12枚のものなどもあった。しかし、製粉や揚水には4枚羽根の回転速度が適当であり、工作もしやすく、またバランスも取りやすかったためと考えられる。さらには、ヨーロッパ人の潜在意識にあるキリスト教の十字架も4枚羽根を選択させる要因となったと思われる。

また、風車ロータには元来は布の帆が張られていたが、暴風雨が突発した時などは非常に扱いにくいので、より頑丈で調整しやすい木製の開閉式ロータも使われるようになった。1556年のアグリコラのデ・レ・メタリカの挿絵などからもいくつかの工夫の跡を見てとれる³⁾。

3. 風車王国オランダ

3.1 排水用風車（ヴィブモーレン）

中世には北西ヨーロッパでも、水車が利用しにくい低地において風車がたくさん利用された。北海沿岸地域はそのもっとも典型的な地域で偏西風も強く、フランス北岸からベルギー、オランダ、ドイツ、デンマークから北欧諸国にまで達する範囲である。特にオランダでは風車が発達し普及した。

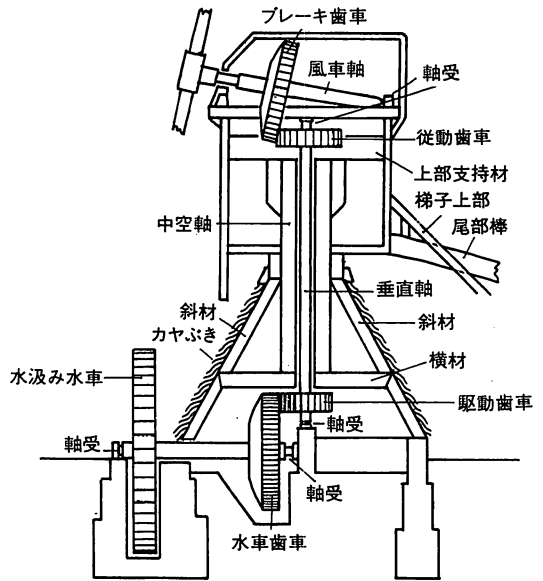
一般にオランダ風車といえば排水用の風車が頭に浮かぶが、この国でも最初は風車を製粉用にしか使用しなかったが、1430年に低地で排水に用いた排水用風車（ヴィブモーレン）が現れてから風力排水が盛んになりはじめた。それは、当時オランダでは人力や畜力よりも大きな力で排水しなければならなかったからである。この排水用風車の構造を図-2に示す⁴⁾。低地地方に侵入した海水を排除するには、一定の区画に堤防を築いてから排水作業をしたのである。

オランダの排水風車は17世紀にはザーン地域だけで700台あり、蒸気動力の出現する直前には900台も使われていた。絶頂期にはオランダ北部7州で合計約8000台を数えている⁵⁾。

3.2 風車とオランダ産業

アムステルダムの北方約10キロにザーンダムがある。ここはアムステルダムに近く、古くから風車による工業地域として、オランダの発展に主役を果たしてきたところである。

1850年頃、オランダ全国で約9000台の風車が使用されていたが、そのうちザーンダムには約1000台の風車があった。ところが、その30年後には約30パーセント



(出典、牛山泉、古典風車のメカニズム、1993)

図-2 排水用風車の構造

に減少し、さらに、19世紀末には19パーセントほどになってしまった。この急激な減少は、いうまでもなく工業の動力源として蒸気力が使用され始めたからである。風力利用の工場数が蒸気力利用の工場数に追い越されたのは19世紀の後半であり、20世紀に入ると、工業の動力源としての風車は、ほとんど意味がなくなってしまったといえる。

表1は19世紀中頃から19世紀末にかけての風車の用途別の数である⁵⁾。この狭い地域に全部で990台もの風車が使われていたことは驚くべきことである。そのうち1/3は木工風車、すなわち製材用風車（パルトロック・モーレン）である。木材はドイツやスカンジナビアなどの国から船で運搬してきた。その当時のオランダは世界最大の造船国であったが、その中心がザーンダムであった。因みに、1860年に勝海舟が船長となり、遣米使節の護衛艦としてサンフランシスコ・江戸間を往復した木造軍艦「咸臨丸」は、江戸幕府がオランダから買い入れたものである。

製材用風車は小型のものは風力により円形鋸を回転させたが、大型のものは図-3に示すように、クランク機構を用いてクラウン・ホイールから取り出した回転を往復運動に変換し、コネクティング・ロッドを通じて重い鋸枠を動かすようになっている。鋸の刃（ブレード）の間隔は板の厚さに応じて適当に設定でき、同時に数枚の板を製板できるようになっている⁴⁾。

表1 ザーンダム地域における風車の用途別数の変化

	1850年ごろ	1880年	1898年
穀物風車	23	9	8
パルトロック型木工風車	237	53	21
上部装置型木工風車	109	35	18
ウィップ型木工風車	15	7	7
型不明	6	0	0
米	121	44	31
油	204	92	54
紙	60	9	5
染色材	50	14	10
石けん	4	0	0
ペースト	7	1	1
ガラス	2	0	0
嗅たばこ	83	3	0
木綿	24	0	0
カカオ	8	0	0
カカオ種(家畜用)	33	0	0
皮なめし	3	0	0
火薬	6	0	0
香料	3	1	0
石灰	10	0	0
こしょう	17	2	2
麻	24	3	1
果実	24	3	6
飼料	8	1	0
セメント	3	0	0
グラインダー	4	0	0
石切り	1	0	0
石みぎ	1	0	0
その他	1	0	0
不明	34	0	0
揚水風車	40	13	10
計	1,165	290	174
二重申告	175	2	0
補正した合計	990	288	174

(出典, 吉野正敏, 風の世界 1989)

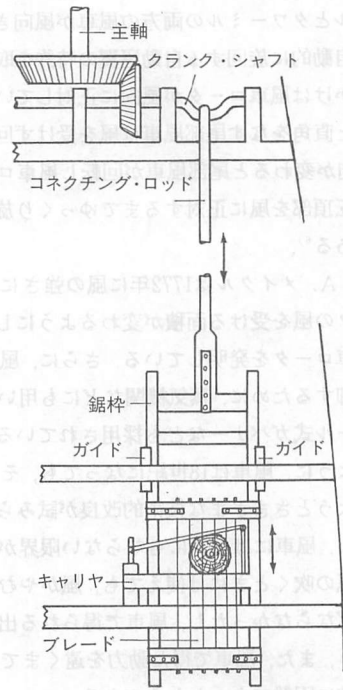
また表1よりわかるように、当時の風車はありとあらゆる用途に使用されているが、中にはどの過程で風車を使用しているのかわからないものさもある。

現在もオランダには写真1に示すような各種用途の古典風車が900台ほど残っており、そのうち約300台は動態保存され運転することができる。

4. 風車の改良

蒸気機関が発明された18世紀になっても風車の改良は行われ、専門化も行われた。

風車ロータを風の吹く方向に向けるための転回作業は、風下側に取り付けた尾部棒(テールポール)を人力で動かす原始的なものから、操作輪(キャプスタン)や巻上げ機(ウィンドラス)を利用して動かす方法に



(出典, 牛山泉, 古典風車のメカニズム, 1993)

図-3 製材用風車のメカニズム



写真1 典型的なオランダ風車

変ってきたが、1745年にイングランドのE. リーがポストミルとタワーミルの両方の風車が風向きに正対するよう自動的に旋回する自動尾翼の特許を取っている。このしかけは風車ロータが風向に正対している時には、ロータと直角をなす尾部風車は風を受けず回転しないが、風向が変わると尾部風車が回転し風車ロータと風車の回転頂部を風に正対するまでゆっくり旋回させるものである⁶⁾。

また、A. メイクルは1772年に風の強さによって風車ロータの風を受ける面積が変わるようにしたバネ入りの風車ロータを発明している。さらに、風車の回転数を制御するために、蒸気機関などにも用いられたフライボール式ガバナなども採用されている。

このように、風車は18世紀になっても、その性能を向上しようとさまざまな技術的改良が試みられた。

しかし、風車にはどうにもならない限界があった。それは風の吹くときには使えても、風がやむと休業しなければならなかったし、風車で得られる出力には限界があり、また、風車で得た動力を遠くまで伝えることは非常に困難であったからである。

生産形態が工場制手工業から工場制機械工業へと発展することにより産業革命が開始されることになるが、生産量の増大に伴って動力需要も増加し、大出力の原動機が要求されるようになった。一般に産業革命における主要な動力源は蒸気動力であると考えられているが、実際には水車と風車が中心的役割を果たしている。しかし、産業革命以降の、工業の大規模化における要求には風車や水車は応えられなかったのである。

蒸気機関が有効な原動機としての役割を發揮し始めたのは19世紀になってからであり、その頃ヨーロッパの風車は沈む夕陽のように最後の光を輝かしていた。この19世紀の末の、風車から蒸気機関への移り変わりの時期の様子は、ドーデーのよく知られている「風車小屋だより」に述べられている。

5. 風力発電王国デンマーク

1831年にファラデーにより電磁誘導現象が発見され、1832年にピキシの発電機、1870年には実用機としてグラムの発電機が出現している。

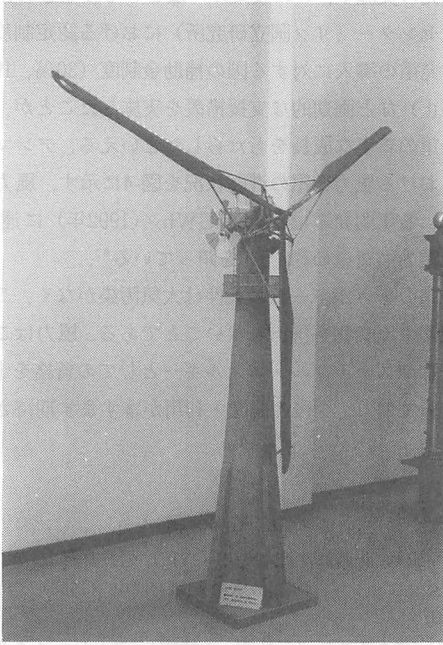
したがって、風車でこの発電機を駆動すれば、地理的に限定されるという風車や水車の欠点が解消されることになる。しかしながら、古典風車の王国オランダでは風車による発電には否定的であった。風車効率の悪さと、エネルギーの貯蔵に問題があったからである。

デンマークは1860年代のプロシャ戦争に敗れ、荒廃した国土を復興するために農業立国を目指していたが、その農村電化の動力源として目をつけたのが、豊富な風による風力発電であった。

1891年にユトランド半島のアスコウのホイスコーレ(国民高等学校)に「国立風力研究所」が併設され、所長のP. ラ・クールはオランダ形風車のロータを高速用に改良すると共に、風力の変動があっても出力に変動のない調速機能をそなえた風力発電装置を発明した。世界で最初の風力発電の成功であり、風力発電王国デンマークの誕生でもあった。また、電力の貯蔵には水の電気分解により水素と酸素を発生させ、水素を用いるというアイデアもきわめてユニークで、その後アスコウ・ホイスコーレでは、1895年から1902年まで水素ガスにより照明が行われ、変動のある風力発電によっていたにもかかわらず、一日もエネルギーが不足することはなかったという。さらに、1902年からはバッテリーによる蓄電になり、学校だけでなくアスコウの町全体に電力の供給を開始し、これは1958年まで続いた。

デンマークに風力発電が根付いて大きく成長した根底には、それなりの理由がある。技術は人間が開発し、使用するものであるから、それぞれの国民性に基づく技術風土が存在するのである。この場合にはデンマーク復興の父と呼ばれるニコライ・グルントヴィのフォルケ・ホイスコーレによる農民に対する啓蒙と教育があったことを見逃すことはできない⁷⁾。

ラ・クールによりデンマーク風力発電協会が設立され、1908年までに10~20kW級の風力発電機が72台建設された。1918年には第1次世界大戦の影響もあり120台に増加したが、大戦後は減少している。そして、第2次世界大戦が勃発するとナチス・ドイツの侵略により石油や石炭の供給が制限されたためエネルギー源が欠乏し、再び風力発電が始まった。写真2は第2次大戦中に多数建設されたF. L. シュミット社の60kW級風力発電機の等身大模型である。その数は1940年の16台から、1944年には88台と大きく増加しているが、燃料事情の好転した戦後の1947年には57台に減少し、1950年代末には200kWの大型風車1台のみとなった。また、両大戦の間には無電源地帯の農家向けに、0.5~1kWの小型風力発電機が1000~3000台製造され、1944年には1454戸が小型風車を利用していた。これらも大戦後には急速に減少し、その後、1970年代の石油危機までは風力発電はまったく用いられなくなった。



写2 F.L.シュミット社の風力発電装置の等身大模型（デンマーク技術博物館）

デンマークの風力発電は第2次世界大戦の終了まで直流発電方式を採用していたのであるが、終戦直後の1947年、電力会社SEASの技師J. ユールは交流の風力発電により既設の電力網に接続する方式を提案し、2基の実験用風力発電装置により実証試験を行っている。これが今日の大規模風力発電の基礎となっている。そして、この成果を踏まえて電力会社、風車メーカー、政府機関などからなる「デンマーク風力委員会」により1957年に建設されたのが有名な200kWのゲスル風車である。

この風車は1967年まで10年間、地元の電力網に接続して実用運転され、年間平均35万kW時の電力を発生した。さらに、石油危機後の1977年には、この風車を高く評価するNASA（アメリカ航空宇宙局）とDEFU（デンマーク電力事業研究所）により、10年間放置されていたこの風車の調査が行われ、依然として可動状態にあることが確認された。したがって、ゲスル風車は、長期間実用運転された唯一の大型風力発電装置として記憶されるべきものであり、また、大型発電用風車の寿命を推定する上で貴重なデータを残している⁸⁾。

6. 失敗の歴史：大規模風力発電

風のエネルギー密度は水の約1/800であり、まとまった出力を得るためには風車の規模を大型化する必要がある。今世紀初頭に中小規模の風力発電により、その有用性が実証されると、風車を大型化する動きが各国で具体化していった。大型風車の第1号は、1931年に黒海沿岸のパクラワに建設されたソ連の100kW機である。年間発生電力は28万kWhで、35km離れたセバストポルの2万kWの火力発電所に接続していた。しかし、増速に木製歯車を用いるなど効率は低いものであった。

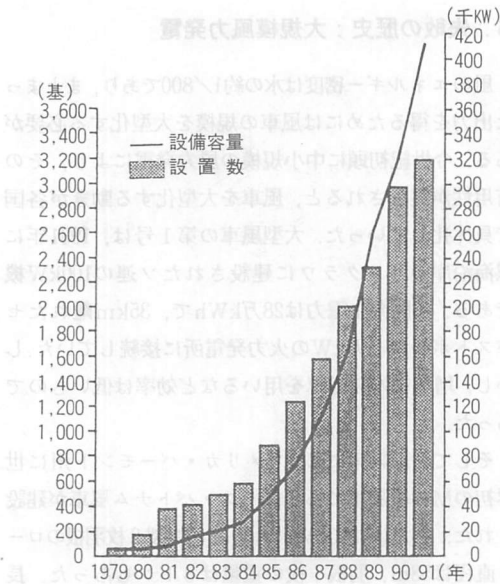
そして、1941年には、アメリカ・バーモント州に世界初のMW級風車であるスミス・パトナム風車が建設された。出力は1250kW、ステンレス製2枚羽根のロータ直径は53m、羽根1枚の重量は8トンもあった。長期に亘る試験運転の後、1945年に営業運転を開始したが、運開後1か月で羽根の取付け部が折損し、戦時下の材料難もあって開発中止となった。

この他にも、1930年代初めから60年代中期にかけて、商用電力網と連系する出力100kW以上の大型風力発電システムの開発が10件行われている。これらのうち、前述のスミス・パトナム風車を始めとして羽根の付け根で折損した例が多い。

また、技術的には成功したデンマークのゲスル風車やドイツのシュテッテン風車も1960年代の石油価格低落のため、コスト面で火力発電と競合できず運転を中止している。こうして、第1世代の大型風車は失敗に終わり、1960年代半ばにいったん終焉を迎えたのである。その後の空白期をはさみ、1973年の石油危機後に再び風力開発が開始され、第1世代のものよりさらに大型化した風車の開発も各国で活発に行われている⁸⁾。

7. 現代の風車

1973年の石油危機を契機に世界的に風力利用の再開が始まり、1980年代に入ると風力発電の商業化が行われるようになった。風力発電の特に盛んなのはアメリカ・カリフォルニア州とデンマークである。カリフォルニア州においては100kW級風車による集中立地方式のウィンドファームが建設され合計17000台もの風力発電機が設置されている。1991年の総設備容量は170万kW、発電電力量は30億kWh/年に達している。同州では風力発電が全電力設備容量の3%、電力量で2%を占めている。



(出典、デンマーク風車製造業協会、1992)

図-4 デンマークにおける風力発電の進展状況

一方、ヨーロッパにおける風力発電の総発電容量は1992年時点で約90万kWに達している。そのうち、デンマーク(51%)、ドイツ(17%)、オランダ(12%)の3か国で80%を占める。特にデンマークにおいては、風力発電の歴史が長く実績があること、過去20年にわたる国(エネルギー省)および電力会社の積極的な研

究開発の実施や、この成果の一環として設立されたテストセンター(リソ国立研究所)における認定制度、風力発電の導入に対する国の補助金制度(30%、1989年廃止)など画期的な支援措置を実施したことが、風力発電の着実な成長をもたらしたといえる。デンマークにおける風力発電の進展状況を図-4に示す。風力発電による年間発電量は約900GWh/(1992年)に達し、国内電力消費量の約3.5%を賅っている⁸⁾。

将来のエネルギー源の条件は大気汚染がなく、二酸化炭素や廃棄物を排出しないことである。風力はこのようなサステナブル・エネルギーとしての資格を十分に持っており、今後の開発・利用がますます期待される。

参考文献

- 1) 平田寛, 失われた動力文化, (1976), 岩波書店
- 2) A.P.アッシャー, (富成訳), 機械発明史, (1943), 岩波書店
- 3) G. アグリコラ, (三枝訳, 山崎編), デ・レ・メトリカ, (1968), 岩崎学術出版社
- 4) Beedell S.; Windmills, (1975), David & Charles.
- 5) 吉野正敏, 風の世界, (1989), 東京大学出版会
- 6) 牛山泉, 古典風車のメカニズム, 日本工業大学工業技術博物館ニュース, No. 11, 1993-3,
- 7) O. コースゴール, フォルケホイスコールの世界 (1993), 新評論
- 8) 牛山泉, さわかやエネルギー風車入門, (1990), 三省堂

協賛行事ごあんない 資源・素材'94 (大阪)

平成6年度資源・素材関係学協会合同秋季大会

- <会 期> 平成6年10月25日(火)~27日(休)
- <会 場> 関西大学100周年記念会館 他
(吹田市山手町3-3-35)
- <主 催> 資源・素材学会
- <日 程> 25日(火)分科研究会
26日(水)大会式・記念講演, 分科研究会, 懇親会
27日(木)分科研究会
28日(金)見学会

- <問合せ先> (株)資源・素材学会
秋季大会実行委員長 西村 山治
〒107 東京都港区赤坂9-6-41
TEL 03-3402-0541