

現代の風力発電技術の「経済性」について

1980年代におけるデンマークの風力発電機をめぐって

山口 歩*

風力発電は、発電コストにおいても石炭火力発電と拮抗するレベルに達し、CO₂の放出等環境負荷を削減する手段としてのみならず、経済的にも競争力のある手段として認められるようになった。しかし、この「経済性」の概念をいかに定義するかについては問題が残されている。国のエネルギー政策の枠組みにそって展開される各種の助成は、事業者の収益を大きく左右するし、系統連系費等関連する費用をトータルコストに含ませるかどうかも確定的とはいえない。本稿は、現在生産、配備の両面において世界の先端にあるデンマークの風力発電技術を対象として、その発電コストの実相、推移等を分析した。その中で特に論者は、「経済性」の向上に対する各種の助成の寄与を明確化し、加えてそうした助成を除いた技術独自のコストを確定した。デンマークにおける風力発電技術のコストは主に1980年代前半に大きく低減した。そして、コスト低減が一定程度成し遂げられた1987年段階の技術(200kw)クラスにおいて、すでに助成ぬきでも「経済的」であったことを確認した。またデンマークにおいて、系統連系費はトータルコストの10%分程度の低い値であったが、その条件下においても風力発電機オーナーの負担軽減のため、電力(配電)会社によって一部コストが負担されていたのであった。以上の事項の確認をもとに日本の課題についても触れた。日本における風力発電のコスト高は、主に土木建設費、系統連系費の高さに規定されたものだと言われている。論者は、上記の建設に関わるコストは、長期的視野の中で希釈されること、系統連系線等は将来の社会的、福利的インフラとして機能することを強調し、両項目への国の経済的支援が妥当であること、必要であることを示した。

キーワード：風力発電技術、経済性、デンマーク、政府補助、系統連系

問題設定

(1) 現代の風力発電技術の特性と「経済性」

「地球環境問題」、とりわけ温暖化ガスの削減が焦眉の課題となっている現在、電力生産体系における火力発電技術をすみやかに再生可能電力生産技術に代替していくことが求められている。そして、再生可能電力生産技術の中でも、風力発電技術は、環境負荷特性¹⁾のみならず

コスト面においても優れており、すでに一部の国や地域においては、火力発電技術などに対する競争力を持つにいたっている。

表1に示されるように、近年先進各国は風力発電の設備容量を急速に伸ばしている。そして、歴史的にも、そうした活況状況を支えてきたのがデンマークであった。デンマークは、発電容量総数こそ第4位にあるが、そもそも発電容量は国の電力消費量との関数であるので公平な比較とならない。そこで表2のような国民一人あ

* 立命館大学産業社会学部助教授

表1．1999年度2000年度の発電容量（MW）各国比較²⁾

	ドイツ	アメリカ	スペイン	デンマーク	インド	オランダ	イギリス	イタリア	中国	スウェーデン	ギリシャ	日本	フランス
1999年	4445	2492	1530	1742	1095	410	356	211	182	220	87	68	23
2000年	6113	2555	2402	2297	1220	448	409	389	340	231	189	150	79

表2．国民一人あたりの発電容量の各国比較³⁾

	デンマーク	ドイツ	スペイン	オランダ	アメリカ	日本
2000年	361	61	52	28	10	0.6

(単位 w/人)

たりの発電容量が意味を持つわけだが、その値は桁外れに高い数値となっている。

また設置面だけでなく生産面においても、現在にいたる約20年間の風力発電機の大半がデンマーク製であったということに、かの国の主導的位置が典型的に示されている。1999年度における風力発電主要メーカー10社の中にデンマーク企業が4社はいており、そのシェアは53%にも及ぶ⁴⁾。さらに風車のブレードメーカーとしてデンマークにはLM Glasfiber社があるが、同社は2000年度において、出力にして4495 MW相当、シェアにして45%のブレードをアセンブリ・メーカーにむけて生産・販売しているのである⁵⁾。

本稿では、こうした生産、設置両面において世界の先端に位置するデンマークの風力発電技術の「経済性」の実態を明確にすることを目的とする。それは、コスト低減の推移や対応する技術内容を明示していくことで、冒頭で示した「発電コストの面で競争力をもつ」という漠とした認識を具体的に示すということである。分析視座に関わって言うと、この問題については、その時期やレベルについての事実検証と、コスト低減に関わった諸要因の分析が別個に定立しうるが、本稿では、まず前者の解明を中心的な課題とする。この問いは、「いかなる意味で経済的か」という「経済性」概念の定義にも関わ

る問題である。

実際、「経済性」とは何を指すものなのか、問題は単純ではない。一般的に電力生産技術の「経済性」はkwhあたりのコスト（発電コスト）で比較される。しかしそのkwhあたりのコストにしても、関連する送電線の建設コストを含めるのかどうか、あるいはそうした送電線やインフラ全般の建設に関わる各種の資本助成をどのように考慮するのかなど、問題を残している。そしてまた、事業者にとってみれば、結果としての実質的な出費が問題となるわけで、外部からの資金助成や税制面での優遇制度などをもってすれば、純粋な発電コストが相対的に高い中でも低出費になりえる。全般に技術はテイクオフ期（技術普及に向けてのスタートライン）においてそうした資金助成を受ける傾向がある。

こうした問題を考慮し、本稿は単純にkwhあたりのコスト総額の問題だけでなく、そのコスト構成に着目し、それと各種助成制度との関係を可能な限り示して、「経済性」の問題を分析していく。特に、国の資金助成を要しない技術発展段階（時期とその内容）を確定することが重要であると考え。技術の「経済性」は各国の社会制度のあり方に大きく規定されている。ここで、論者は社会制度を、電力生産者への各種助成のあり方や量、電力売電価格、関連電力生産技術体系（発電技術から送電網）のありかた、電力需要の質や量などを含めたものと想定している。ともすると社会制度としては、税制や補助政策に限定して語られがちだが、社

会の技術体系（システム）の相互の連関性を丁寧に追うことが重要である。

また、デンマークにおいては、電力産業ではなく個人や協同組合の出資、所有を基軸として、またそうした市民投資家に対するさまざまな資金助成の枠組みが存在する中で、風力発電技術が普及してきた⁶⁾。こうした所有形態のもとでは、単純に発電コストの高低だけではなく、各種の制度的枠組みが普及において重要な役割を果たすということの後段で示していく。本稿では、風力発電の経済性の問題を扱うに際して、基本となる発電コストの値を指標とするだけでなく、市民投資家にとっての利得がいかにかに生まれるかという意味でも（括弧つきで）「経済性」「経済的」という言葉を使うこととする。

発電コストは、該当技術がおかれる国によって状況が大きく異なっている。例えば日本において、青森県竜飛や沖縄県宮古島の風力発電機の発電原価として25～39円/kwhの値が示されている⁷⁾。デンマークにおける風力発電のコスト構成の実相や、助成との関係を明確にすることは、今後の日本の課題、例えばコスト低減にむけての必要事項を抽出する上で基礎的な視点を与えるものと考えられる。

「経済性」は製造側の生産性及び製品の性能（アウトプット）に相関する問題であり、すなわち技術との関係が大変強い。本稿ではまず、「経済性」と風力発電機自体の性能との関係を確認し、製造技術の発展段階を含めた全体的な技術分析は今後の課題とする。分析手順としても、社会制度的な側面の寄与を明確にできれば、技術の寄与もクリアにすることができるものと考えている。

2 デンマークにおける現代風力発電の内容

（1）デンマークにおける技術の発展過程

「経済性」、発電コストの値は、時代によって変化する。それは技術発展段階に規定されたことでもあり、またその時代の社会制度に規定されたことでもある。そこで本節は、次のように分析対象となる技術と時代を限定する。

時代：1980年代から1990年代前半の期間

技術：RISØが認可する設計を備えたもの

出力：～600kw ぐらいの設備容量のもの

時代については、最も新しいもの（時期）が対象から外れていること、技術においても最新鋭の技術が外れていることになる。「RISØが認可する基本設計」という点はもう少し、説明が必要かと思う。デンマークの風力発電機メーカーは民間企業として技術開発に取り組んでいるが、各社の設計の基本構造には共通性がある。その内容を統括し、また各種助成との関係から各社の技術内容を審査しているのがRISØ（国立の研究機関）である。基本設計の具体的内容は、以下の文脈の中で示すこととする。

デンマークは風力発電技術の開発・運営についておよそ100年の歴史を持つが、商業的な意味で系統連系され運転され始めるのは70年代後半である⁸⁾。現代の主要メーカーがこの市場に参入するのが80年代前後であり⁹⁾、大体その時期をデンマーク風力発電技術の現代史のスタート地点と特定できる。本稿が取り扱う時代対象のスタートラインをそこに限定するのも、こうした発展過程と関係した問題である。

デンマークにおいて、現代的意味での風力発電技術がスタートする70年代後半の社会的背景は次のように整理される。

まず第一に、70年代の「オイルショック＝

資源エネルギー問題」と70年代から現在にいたる「公害・地球環境問題」の課題の高まりにより、それまでの化石燃料を基盤とする電力生産体系の再考が余儀なくされた。そしてその再考の渦中において、「原子力発電を持たない」ことが85年に明確に政策化され、それが爾後のエネルギー政策の前提枠組みとなった¹⁰⁾。前者は、70年代以降における先進諸国の共通フレームであったが、後者はデンマークの特異な要件であり、風力発電技術をその社会に定着させる決定的な要因となったと論者は考える。この点についての詳しい説明は以下の章において展開する。

第二に需要側面としては、80年代前半期、カリフォルニアの風力ラッシュという広大な外需が突発的に出現し、また各種補助政策に支えられて内需が持続的に拡大した。両者とも出立期における風力発電機メーカーを育成していく上で大きく作用した¹¹⁾。ここで、内需といっても、電力産業ではなく個人や協同組合が出資して運営するという形態が、歴史的にも現代においても大きな比重を占めているのがデンマークの大きな特徴である。

こうした時代背景の中で、現代の主要メーカーが80年代前後に風力発電市場に進出した。それぞれ、Vestas (79年)、Bonus (79年)、Nordtank (79年)、Micon (83年)、Nordex (85年)である。それと前後し、FRP技術を持つLM Glasfiber社も1978年に風車のブレード生産に参入した。

上記のメーカー以外にも各国の多数のメーカーがカリフォルニア市場の活況の中で存在していたが、86年にそのブームがストップすると、多くのメーカーが倒産し、また風力発電の世界から撤退した。そうしたカリフォルニアのいわ

ば「実践的な実験場」において、デンマーク製の風力発電機は健全性（故障、壊れることが少ない機種）の高い技術として頭角をあらわし、評価されるようになる¹²⁾。実際Nordtank社は一時倒産し、また後に合併されることになるが、他の4社は、先に紹介したとおり、2000年においてシェア53%を占める企業として存続しているわけである。

技術内容としては、1957年に試験的に建造されたJ. JullのGedser風車(200kw)の設計理念をベースとして、ハブに固定された三枚翼ブレード、スタール・コントロール、堅牢な増速ギア、誘導発電機という現代の基本的な技術要素が80年前後に確立した。こうした技術内容が、本稿の取り扱う期間において、デンマークの各メーカーが共通に備える設計内容となった¹³⁾。そしてこの基本設計構造をもとに、各メーカーは大体55kw内外の小出力機から600kwの中出力機までを、90年代後半まで順次開発・販売していった。具体的技術の細部に関わって言えば、ブレードの形状、材質および重量にしても、増速ギアのエネルギー損失の問題にしても適宜改良が加えられたわけで、上記の「共通の基本設計」というくりはあくまで蓋然的な枠組みに過ぎない。そうした具体的技術と「経済性」の相関については今後の検討課題としたい。

(2) 80年から90年代後半におけるデンマークの風力発電機の性能

対象機種の特定

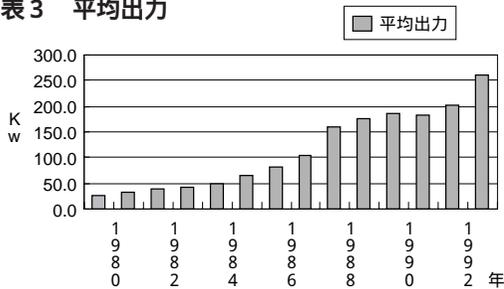
デンマークにおいてMWクラスの風力発電機の生産が比重を高めるのは1990年代末のことである。また同時に、ピッチコントロール・ブレードや多極発電機（増速機なし）他を備えた

新鋭発電機も建造されるようになってきた。しかし、ほぼ1990年代の後半までは、原則的に全ての風力発電機とも上記の～の技術要素を備えたもので、出力規模も大体上限600kw程度に限定される。また、本稿がそのレベルの技術を対象とするのも、「経済性」の確立が問題となるのが、その時代のその技術においてだからである。

80年～90年代前半における風力発電機のパフォーマンス

当該時代における風力発電機自体のパフォーマンスの変化を、平均出力について確認しておく。

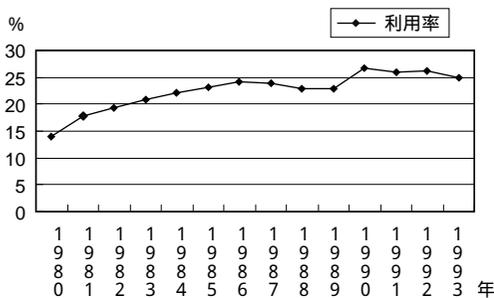
表3 平均出力



上表は、デンマークにおける風力発電機の平均の出力 = 設備容量 (kw) の推移のグラフである¹⁴⁾。出力は順調に増大しているが、93年時点でもなお平均にして250kw内外であったことがわかる。

また、同時期の利用率の変化を確認しておくと同表のようになる¹⁵⁾。

表4 利用率



こうした値の意味については、出力（設備容量）以上に利用率が重要であることをまず指摘しておく。風力発電は変則的な風をエネルギー源とする関係から、常時定格出力を保つことは現実的に不可能な技術である。「経済性」は当然のことながら実際の発電出力 = kwhに規定される。設備容量の相対的に高い発電機が、それ以下の設備容量の発電機より低い発電量を示すこともまれでない。社会に置かれた実際の技術が、どのような状態にあるか、特に利用率がいくらであるかを確認していくことが重要なのである。

当該時代やそれ以前においても、単に設備容量の大きい風力発電機、MWクラスの風力発電機は、既にアメリカ他で開発されていた。しかし、その多くが実験機の位置づけで、商業的成功はおろか、安定稼動にもいたらなかった¹⁶⁾。これに関して松宮は、83年から89年にかけてカリフォルニアの風力発電機の生産性が、大方7.5倍に改善され1500の値となったと記している¹⁷⁾。風力発電機の実産性の値は利用率に定数（一年間の時間数）をかけた値で、その値の推移は利用率のそれと等しくなる。松宮が示した改善結果としての1989年の（1500）の値は利用率でいうと約17%に相当し、グラフからわかるとおり、デンマーク国内においては82年段階に乗り越えられている値でもある。すなわち、カリフォルニアにおける生産性の改善比率の大きさは、改善結果の優秀性を意味するのではなく、改善前の惨憺たる状況を意味するものである。

繰り返しになるが、以上を総括してまとめると、本稿が検討を進める対象区分のデンマークの風力発電機は、比較的小型 中型（55kw ~ 600kw）の機種が基本であった。しかし、その

出力機においても高い利用率を実現することでコスト低減を図ってきたのである。

3 デンマークにおける風力発電機の「経済性」

1) 「経済性」の実相

耐用年数を大幅にしたまわる投資回収

本節では、80年代後半に建造された風力発電機の生産コストあるいは「経済性」について具体的に示し、またそれを支えた制度的要件を確定していく。

前章で述べたとおり、デンマークでは風力発電施設を個人で所有、あるいは協同組合形式で所有している事例が非常に多い。そして歴史的にも、そうした個人、協同組合がリードする形で、国内の風力発電システムが拡充されていった。発電事業者が風力発電技術を所有するようになるのは、そうした個人、協同組合所有の発電機の技術的安定性や発電実績を確認してからのことである。個人や協同組合が所有する生産手段であった関係上、80年代の風力発電機の

例1 Hornstrup Mark 風力協同組合¹⁸⁾

設備 200kw 1基 3380V線 で連携

設備コスト	計	140万 DKK
内訳	タービン価格	96万 DKK
	5年保険	3.7万 DKK
	建設費	6万 DKK
	送電線接続	22.5万 DKK
	その他	12.8万 DKK
政府補助		20万 DKK
必用投資額		120万 DKK

年間発電量	48万 kwh
年生産額	28.8万 DKK

「経済性」問題は、電力業界におけるコスト問題というより、民間投資者の利得あるいは資金回収問題という形で表わされた。以下、同時期に協同組合形式で運用された二つの風力発電の事例を紹介し、コストと資金回収期間にみる風力発電の「経済性」を実見してみる。

例1に示したHornstrup Mark風力協同組合（住民50世帯）所有の風力発電システムは、1987年に設置された。設備容量は200kw 1基（ローター直径25m）で、平均風速6 m/sの中で、年間の発電量はおよそ48万kwhを示した。定格出力200kwをベースに算出すると利用率は約27%になる。

設備コスト140万DKKから政府補助の20万DKKを引いた120万DKKが住民の投資額となるが、売電価格0.6DKKにおいて年間28万8千DKK程の収入が見込めるので、単純計算で4年強の期間で投資総額は回収されたことになる。

例2はLemの地域住民500世帯で所有されたウィンドファームで、35基の75kw風力発電機が1985年から86年にかけて設置された。設備容量計は2625kwになるが、年間の発電量はおよそ600万kwh（初年度550万kwh）で、定格出力の合計をベースに算出すると利用率は26%になる。

例2 Velling Mast 場所 Lem¹⁹⁾

設備 75kw:5基(1985), 30基(86) 計2625kw

資金	設備コスト(計)	2400万 DKK
	政府補助	330万 DKK
	必用投資額	2070万 DKK

年発電量	600万 kwh (1988 ~)
年生産額	360万 DKK

設備コスト2400万DKKから政府補助の330万DKKを引いた2070万DKKが住民の投資額となるが、年間の発電量を2年目以降の600万kwhをベースに算出すると年間28万8千DKK程の収入が見込めるので、これも単純計算で6年弱の期間で投資総額は回収されることになる。

両事例とも、イニシャルコストの回収（償却）期間は極めて短いということが確認できる。例2のウィンドファームの事例は論者が現地で見学したものだが、15年ほど経過した風車はいずれも健全に稼動しており、したがって現在も出資した住民の収入源（一世帯あたり出資80万円ほどで、6～7年の投資回収後は年間14万円ぐらいの収入となる）として機能していることになる。

ランニングコスト一般

コストにはイニシャルコストのほかランニングコストが加わるが、いうまでもなく風力発電は燃料費ゼロ、運転に関わる人件費ゼロ（ネットワーク管理は除く）のシステムなので、加算される額はわずかである。参考のためRISØのレポートの値を紹介すると、150kwクラスのタービンにおいて、およそ0.07（DKK / kwh）、200～250kwクラスで0.08（DKK / kwh）であり^{20）}、いずれにしても、これを加味して（売電価格0.6DKKから引いて）計算しても、資本回収期間が短いことはかわらない。

系統連系費の問題一般

系統連系費については、その費用分担のありかたが歴史的に推移したのでその点を整理しておく^{21）}。既に示した通り、デンマークにおいて系統連系がはじまるのは1970年代の後半であ

るが、その時点から1980年代前半までは、発電機自体が低出力であったため低電圧線に接続されていた。その後、風力発電機の出力の増大に関わって、10kV線へ接続することが義務付けられた。必ずしも風力発電機の近隣にあるとはいえない10kV線接続の費用分担については、1984年に風力発電機オーナーと配電会社との合意（agreement）が形成され、接続線の建設と系統の強化に関わる費用の内、オーナー負担分が65%、配電会社負担分が35%とされた。また、1991年に、接続費用を全額オーナー負担、系統の強化費を全額配電会社負担という形に84年の合意内容は改変された。

またその具体的負担額については、当該時期におけるグリッド接続費用のトータルコスト内の比重は、概ね10%内外で推移していたことが知られている。

90kw	150kw	300kw	450kw
約6%	約11%	約11%	約11%

各種の助成との関係

例1についてそのコスト構成、内訳が記されているので、その中の助成に関する項目をピックアップし、「経済性」についての助成の寄与分を確認したい。なお、例1の表に直接的に示されているのは、資本助成だけであるが、デンマークにおける風力発電への補助政策は、その資本助成に加え、売電価格の上乗せ、系統連系費についての電力会社の一部負担という項目があり、それが投資回収の年限を左右する項目となるので、その点も考慮する。さらには、風力発電へ投資したことに基づく節税や、風力発電による収入についての免税、なども投資のインセンティブを高める効果をもったことが知られているが、この分析では除外して扱う。

資本助成

両機とも80年代に設置されたものなので設置にかかわり、例1においては20万DKK(総コストの15%)、例2においては330万DKK(総コストの15%)が資本助成された。上記の資金回収の期間についての計算はこうした助成を差し引いて計算したものだが、こうした助成を除外した値を以下で与える。

電力の売電価格の上乗せ

例1、例2において、売電価格は0.6DKK/kwhとして算出されている。この値は電力会社の買取価格ではない。0.6DKKの構成は、配電会社の売電価格の85%分として設定された約0.3DKK分(=配電会社の買取価格)と、電気税と二酸化炭素税の還元金として払われる0.27DKK分(国の負担)に分けられる。この内後者の0.27DKK分を国からの補助と見積もり、それを差し引いた値を以下で与える。

系統連系に関わる電力(配電会社)の負担

風力発電機が設置された1985~87年は、系統連系費の負担についての「84年合意」が生きていた時期で、系統連系費用と系統の強化費全額の35%が配電会社によって負担された。これは、国の補助政策とは異なるものだが、参考のためその点も補正した値を以下で与える。

補正計算と各項目の寄与率

ここで、各助成項目が存在しなかったと仮定した場合の資金回収の年限を算出し、各項目の寄与率を評価すると共に、上記の補助を全て除いた値を算出する。

a) 資本助成を除外した値:

例1 4.16 4.86 例2 5.75 6.66

b) 売電価格の上乗せを除外した値

例1 4.16 7.58 例2 5.75 10.45

c) 系統連系の配電会社負担を除外した値

例1 4.16 4.59 例2 不明

d) 全ての助成項目を除外した値計算

(例1のみ)

例1 4.16 9.60

e) d) にランニングコストを考慮した計算

0.08DKK/kwhを適用

例1 4.16 12.67

以上の値から次のようなことが指摘できる。

まず第一に、a) b) c) の値の変化の幅からみて、補助項目として最も大きな意味を持ったのが、売電価格の上乗せ分としてのb)ということになる。他のa)、c)が回収年を1年程度変更するにすぎないのに対し、b)については、数式上の乗数に関わるため、回収年は(この場合)ほぼ倍加されることになる。なお、配電会社の買取価格が約0.3DKKとして固定的に維持されるということも重要なことで、国の助成とあわせ、その両者が保証する「売電価格」の値こそ、風力発電機の運営者の「経済性」を支える上で最も重要な数値なのである。また、国の助成が約半分加算されていることでわかるとおり、こうした売電価格の高さは、電力原価をいたずらに圧迫したもとはいえない。

第二に、e)の結果より、こうした助成がなかったとしても、上記の風力発電機については、回収年<耐久年を実現するという意味における「経済性」が確立されていたことがわかる。逆に言えば、デンマークでは経済的にペイするかどうかのラインを大きく超え出て、助成がなされていたことを意味する。

(2) 80年代の建造コストの推移について

次に前節の事例の「経済性」が当該対象期間の中でどの位置につくものなのかを、建造コス

トの変遷傾向の中で確認しておく。

P. メゴールは、「1980年における生産コストは、kwhあたり14USセントであった。以後十年間のうちにその価格は3分の1となり、国際市場で購入（した）石炭を使用した、現在の火力発電と比肩できるようになっている」と述べている²²⁾。それは一部の先進事例の値ではなく、平均的なコストを指している。なおコスト低落は、80年代の前半に顕著であって、爾後90年値（を若干下回る値）あたりを漸近線ラインとして収束する傾向にあり、90年ぐらからは際立った変化がみられない。

同様に、ロスキレの研究グループは、1982年と1989年における風力発電機の投資額（1000kwhあたりのシェアとして）を比較し、それぞれ4949と3410という値を示している²³⁾。ただし1982年の風力発電機は、投資額30%分の2121の資本助成を受けており、資本助成を受けることがなくなった1989年の風力発電機と比較する上では、それを差し引いた（上乘せした）7070の値をとるほうが妥当である。1982年と1989年における風力発電機のコストの間にはほぼ2対1関係が成立することになる。抽出サンプルは粗いが、この値も、上記の1980年代前半のコスト低落傾向と一致する内容である。

こうしたコスト低落傾向の中に前節の事例を当てはめてみる。まず、1980年代後半、特に1987年における風力発電機のコストは、全体的にコストの低落傾向が鈍化してきた時期のそれであるということが出来る。換言すれば、その事例はすでに大幅にコスト削減を実現した結果の値ということである。前節の事例の「経済性」（＝資金回収年問題）は、各種助成を抜きに考えても成立していることが確認されたが、

それは1987年設置の風力発電機としての値なのである。

このことは2章で示された、生産性、利用率の変化についても関係付けられる。すなわち、1980年代のコスト低落傾向は、生産性、利用率の上昇時期にあたる。80年前半に成しとげられた生産性の向上をもって、風力発電機のコストは安価となり、競争力を持つにいたるのである。

また1980年代後半以降のコスト低落傾向の鈍化は、生産性、利用率の安定状況に相当する。メゴールは「この先10年の同様のコスト低落は期待できない」と主張するが、それは、こうした生産性の傾向一般と関係づいた主張でもある。

なお、1990年代後半から、出力規模においてMWクラスのものデンマークでも建造され始め、それにともないピッチコントロールや多極発電機などの技術要素が採用されてきている。こうした諸技術、さらにはオフショアの風力発電機の経済性などは、今後の検討課題となる。

4. まとめ

1) 80年代後半の事例が示す意味

デンマークでは、個人、共同組合が出資し所有する形で、風力発電が主に運用されてきた。その中で、「経済性」は投資の回収が何年でなされるかという形で表現されていた。この意味でのクリティカルポイントは、投資回収年数が耐久年数以下となることである。本稿で示した事例は、80年代後半のものながら、非常に早い4年～6年という回収年の数値を示していた。そして、資本回収完了後のアウトプットは

収入となっていたのであった。

しかし、こうした回収年度の早さはさまざまな形の補助制度に支えられていたことも示された。デンマークでは、風力発電に対して、大別して次の5つの補助政策が取られていた。項目を列挙すると、直接資本投資補助、売電価格の上乗せ、系統連系費関連の一部電力会社負担、投資の節税効果、収入の免税となる。

経済的に の節税効果は額面として大変大きいものであったが、投資回収の年数に関わるものは ~ であり、そのなかでも特に重要（効果が高かった）なものが の売電価格への上乗せであることが示された。より丁寧に言えば、電力会社へ一定額の買取義務を負わせながら、なお上乗せがあったことの意義ということになる。

しかしまた、こうした補助制度（上記 ~ 項目）がなかったものとして修正しても、投資回収年は耐久年数より小さいことも示された。これらは、1980年代後半段階の風力発電機（200kw）で成しとげられた実績なのである。

以上のことは二つの面で示唆的である。まず第1に、補助制度と切り離して、技術的な問題として見ても、1980年代後半段階の200kw機クラスのものですでに「経済性」が実現していたという点である。第2に、 ~ の補助なしでも、耐久年より早い段階で投資回収が可能でありながら、その「経済性」を大幅に拡大する形での補助制度が、デンマークでは展開されたということである。十分というより十二分の補助があてがわれたのである。これは、風力発電という新規技術、80年代にあっては半ば開発途上にあっただけの技術が社会の一角に急速に定着していくという上では、ぎりぎり「経

済的」なだけでは事足りなかった、ということを示唆するものでもある。

こうした補助は、おもに国庫から捻出されたものだが、要するに「環境意識」に裏打ちされた、国民と国家の社会的費用負担の上に風力発電技術の定着過程は加速されたといえる。

（2）「経済性」の考え方と今後の課題

経済性は次の計算式における出費：収入比較の中で示される。

出費：「建設コスト（系統連系費等を含む）」

+ 「年平均ランニングコスト」×年

収入：「平均発電出力（kwh / 年）」×年×

「売電価格（DKK / kwh）」

個人や協同組合が出資したものの「経済性」については上記の通りである。発電事業所においては、上記の式の年数を耐久年数としたとき、出費と収入がイコールになるための「売電価格」の値が大体「発電コスト」相当分となる。その値が、他の技術のそれと比較してどうかという問題が技術の競争力とされている。こうした観点においても、デンマークにおいては80年末に石炭火力と拮抗したということが示されていた。その事実は、風力発電技術の一般的な「経済性」の指標として参考になるので改めて確認しておく。

ただし、「発電コスト（価格 / kwh）」をもって比較することにはいろいろ問題があることに注意が必要である。

まず第一に、kwhあたりの値である以上、利用率依存性があることになる。例えば日本では、原子力がおもにベースを担い、火力、貯水池式水力がミドル、ピークを担う関係上、原子力の利用率は必然的に高くなり、逆に火力水力は低くなる。そうすると原子力が発電コスト的に有

利に評価されるものである。最近の「ベストミックス」議論も火力の（kwhあたり）コスト削減課題の中であらわれてきたものである。仮に原子力がなく火力水力がベース付近まで負担する（利用率が高まる）とそれらの発電コストも下がることになり、比較の対象としての値の意味があいまいになる。

そもそも、発電コストは各技術で当然差異があるもので、最安値のものに特化すればよいのではない。ベース分担か、ピーク分担かは、技術特性（出力制御の可能性および安全性）から決まることで、そうした配置の中で、総コストが電気料金の元となる値として社会的に適正であるのかどうか問題なのである。現在の太陽光のように非常に高いものを除いては、コストが若干高いからといって、それを導入しないという理由とならない。

また第二に、発電コストに何が含まれるかという問題となる。その問題を「系統連系費用」についてみる。

技術にはすべて寿命があり、一定のライフサイクルで再生産されるものである。そしてその寿命は技術の種によって異なる。仮に火力で15年、風力で20年と考えるとき、60年のレンジのなかで火力は4回、風力は3回再建造が行われることになる。しかし、系統への接続線は残るので（当然そこにもメンテナンス、リペアが必要だが）、最初の設置において必要であった系統連系費は2世代目からは大きく削減されることになる。すなわち最初に建設された系統連系線が社会的インフラとして機能するのである。同じ論理で、建造に関わる土地造成、道の造成費なども2世代目から緩和される。

冒頭で示した通り、現在の日本における風力発電機の電力コストはまだ高い。そのコスト高

を招く大半は、建造土木費、系統連系に関わるものと聞く²⁴。しかし、現在出発期にあるためのこのコストは将来的には大半緩和されるということを認識すべきである。デンマークにおける、それらの費用は非常に安いことが示された。しかし、そうした問題については、日本も将来的にはそれに近づいていくことが可能と推察する。

こうした観点に立つとき、現在出立期にある風力発電技術についての多額の系統連系費用は、一定、電力産業が負担するか、国が補助してしかるべきものとする。デンマークでも電力産業の一定の負担が存在していたが、それはデンマークのありかたであり、むしろ条件の悪い日本は、国のより以上の大幅な補助があってしかるべきではないかと考える。環境課題は別に持続的発展課題とも言われている。その議論の全体的な当否はおくとしても、50年、100年先のあり方を検討射程においたという点を評価したい。そうした観点に立つとき、現在の風力発電の系統連系負担は、その後の未来社会の福利として機能するものへの出費として、国民の理解を獲得すべきだし、それができるものとする。

風力発電は風が吹く時しか発電しない関係上、電力系統と接続して、電気の過不足分を融通することが求められる²⁵。そして、系統に接続すると、該当エリアの中における他の電力生産技術のあり方が問題となる。すなわち出力が安定しない風力発電機の出力の補完となるためには、補完電力手段は出力制御が容易にできなくてはならないことになる。火力にしても、貯水池式水力にしても、出力制御の技術は現在大変高いレベルにあり、技術的にはクリアすることが可能である。また幸いなことに、風力発電

機が広範な地域に定着した中で、出力変動は平滑化される傾向にあることが確かめられ、制御の技術的困難性は緩和されていると聞く。ただし、原子力はそうした補完技術としては不適であり、限定ネットワーク内での原子力発電の比重が重いと、風力発電機の定着を阻むものとなる。デンマークにおける、「原子力を持たない」という枠組みが重要であった所以の一つはここにある。

負荷変動は、どの国でもおおむね昼ピークの「富士山型」曲線を描く。その中で風力発電は、とりわけ一定以上の比率になったら、ベース負荷を担う必要がでてくる。それは、ピーク負荷の昼間には、一定時間分しか電力需要がないので、その範囲外（すなわち深夜）に電力生産する風力発電機にそぐわないからである。しかし、日本においては、既にベース負荷の大半を原子力が占めており、そこに新規電力を導入する余裕が殆どない。需給バランスについては、負荷が最も低下する深夜時間帯において、その社会的な電力需要の上端を越えて電力が生産されている状況にあり、その過剰分がいわゆる揚水発電として蓄電されているのである。

風力発電技術の「経済性」収益性の高さを見込んで、日本の中では相対的に風況の良好な北海道において、発電施設の設置申請が殺到するという事態が昨年に生じたが、その節北海道電力は、その風力発電技術の発電比重をまず当面は3%に限定するという措置をとった。安全性も加味して、「まず」3%で始めるというありかたは一面納得のいく措置ともいえるが、背景にこうした原子力ベース占有問題があることも無関係とは思われない。もし北電が今後さらに風力発電を伸ばしていくとすれば、早晚東北電力をはじめ本州の電力会社との電力融通が求め

られていくものと思われる。そうすればまた、本州と北海道の電力をつなぐ「北本幹線」の強化増設ということも射程にあがってくることになる。すなわち、それに関わる社会的費用がまた別個に必要なわけである。

日本の中に風力発電を大きく普及させるためには、その「経済性」の向上は確かに重要な項目である。しかし、当該の風力発電機が、社会の各種発電技術との関係の中でしか機能しない以上、単に発電機単体の発電コストの値だけに注目していれば良いわけではない。ベース分担の原子力を一定削減するなど、相互的な発電システムの設計に関わる考察をあわせて、総合的な「経済性」を評価していくことが大事なのである。

注

- 1) 太陽光発電技術は、現在のところコストの面で問題があることが知られているが、さらに半導体生産過程やその廃棄過程における環境負荷が大きいことが指摘されている。吉田文和『IT汚染』岩波新書（2001）
- 2) Windpower Monthly News Magazine—Windicator
www.wpm.co.nzにおいて最新の各国設置容量が掲載されている。
- 3) 研修センター『風の学校』資料より
- 4) 松岡憲司「デンマーク風力発電機産業の技術形成」
『風力エネルギー』日本風力エネルギー協会（2001）vol. 25 No.1
BTM Consultant International Wind Energy Development 2000 p.15
をもとに示された値である。
- 5) www.lm.dk/engelsk/profil
LM Glasfiber社の提供パンフレット参照
- 6) 和田は、こうした市民所有の形態が、経済競争力の低い時期において風力技術の普及を促してきたことを強調している。和田武「生産手段

- の所有によるグリーン電力の普及」
『太陽エネルギー』日本エネルギー学会
(2000) vol. 26 No.3
- 7) 資源エネルギー庁編『新エネルギー便覧』(財)通商産業調査会出版部(1999) P.65
- 8) P. Maegaard 他著 “Vedvarende energii Danmark” OVEs (2000)
“Som Vinden Blaeser” Elmuseet ed. (1993)
- 9) B. Sorensen et al. “Windpower in Denmark” Roskilde Univ. (1996)
- 10) デンマークにおける原子力問題とエネルギー政策, 環境運動団体との関係については, 『北欧のエネルギーデモクラシー』(飯田哲也 新評論(2000))に簡潔にまとめられている。
- 11) デンマーク製風力発電機の輸出のシェア, 国内シェアの変遷についてはWind Power Note No.24 (2000) K. Soren ed. に詳しく報じられている。
- 12) R.W. Righter “Wind Energy in America—A History” Oklahoma Univ. (1996)
- 13) 他にメカニカルブレーキを備えることも重要な要件であった。
こうした技術要件の重要性については前掲8の両書を参照した。
- 14) 前掲9 p.97 の表より作成
- 15) 同上
- 16) 前掲12 大規模出力機の失敗例が多く紹介されている。
- 17) 松宮輝 『ここまでできた風力発電』工業調査会(1994) p.100
- 18) ブレーベン メゴード(ママ)
「デンマークの風力発電」
『風力エネルギー』日本風力エネルギー協会第21巻No.4(1997) p.40
- 19) 2000年度において論者が実際に見学し, その内容を聞きとったもの。
- 20) 前掲9 p.85
- 21) 前掲9 p.55, p.83
- 22) 前掲18 p.40
- 23) 前掲9 p.77
- 24) 清水幸丸 『風力発電技術 [改訂版]』パワー社(1999) p.68
- 25) もう一つは蓄電技術をもって, 過不足を補うということも当然考えられる。これについては, 送電線がとどいていない過疎地や, ネットワークが発達してなかった時代においてその有効性が認められていた。また最近では燃料電池など, 新しい蓄電技術の発展が期待されている。和田武「中国・内蒙古自治区における小型風力発電と太陽光発電の導入による牧民家庭の電化」『立命館大学産業社会論集』第37巻第4号(2002)参照

A Study on the Economy of Modern Wind Turbines

YAMAGUCHI Ayumu *

Abstract: Wind-turbines are believed to save the environment from emissions of CO₂ and to compete with other coal-fired power plants. Nowadays wind turbines are economical power plants. But it is difficult to define the term 'Economy' of wind turbines. Because of the many kinds of subsidies, it is hard to estimate the gross cost of turbines. In addition it is not clear whether the cost of grid-connection and reinforcement should be included in the total cost. In this paper, the author clarifies the meaning of 'economy' of wind turbines in Denmark during the period of 1980-1995. Denmark is recognized as the leading country in this field. And the economic performance of wind turbines improved drastically during the period of 1980~1985. By calculating the components of turbine costs, the effect of subsidies on wind turbines is ascertained. But without subsidies, 'economy' of wind turbine was realized in 1987. The cost of grid-connection and reinforcement was relatively low in Denmark, but electrical power companies was obliged to pay the costs in part. In Japan, on the contrary, the cost of grid-connection and reinforcement was relatively high. So subsidies for that item from the government must be paid to the owners of turbines.

Keywords: Wind Turbine, economy, Denmark, subsidy, grid-connection

* Associate Professor of the Faculty of the Social Sciences, Ritsumeikan University