

ヤマハ風力発電装置の開発



事業開発本部航空機器部風力開発課 青木繁光

1. はじめに

風力は、太古から人類が利用して来た古典的なエネルギーで、技術的なテーマとしては非常に古いものだと思います。しかしながら、現在、さまざまの理由で世界的にこのテーマの見直しが行われており、徐々に再利用の芽が現われつつあります。私達は、当初セールボートや発動発電機等の既存技術の延長線上で技術開発のスタートを切った訳ですが、実用化開発の局面を迎える、このシステム特有のいくつかの問題に直面することとなりました。

2. 開発の経緯

昭和48年の第一次オイルショックによって、世界的に中東への石油依存体質の改善をはかるための政治的、技術的活動への取組みがはじまり、我が国でも、その中の一環として新エネルギーの利用促進をはかるためのP/Jが提起され、昭和49年にサンシャイン計画としてスタートしました。

この内、風力発電装置は昭和56年度から研究開発が始まりましたが、それに先立つメガワット級大型風力発電システムの解析研究（調査研究）の中で、ローターブレードの主要材料として、複合材料を用いることが議論され、大型舟艇でのF.R.P技術に実績のある当社に、研究参画への打診があ

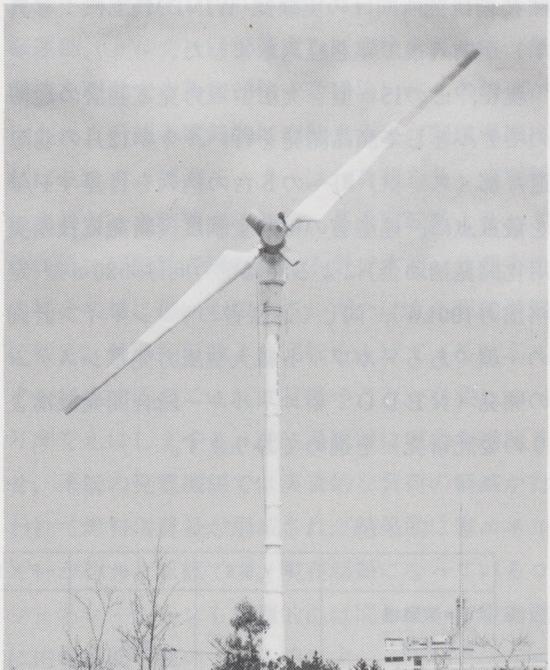


写真1 WINDMEL

った訳です。

この様に、研究開発の当初から価格競争力のあるブレード・メーカーとして当社の舟艇部門が位置付けられていた訳で、現在でもブレードのみを製造して欲しいという引合いがありますし、海外でも特に北欧のボートメーカーが風力用ブレードの主力メーカーとなっているのも同様の背景があるものと思われます。

その後、筑波にあります通産省の工業技術院機械技術研究所より、直径6mの小型実験機ですが

トータルシステムとしての開発・製造を行って欲しいとの打診があり、昭和56年9月の受注によって正式なプロジェクトとしてスタートしました。

昭和57年には、静岡県から浜岡町のローカル・エネルギー館の展示用風力発電装置を受注し、更にこの頃より、自主開発商品としての6m型の開発を始めています。

この様な経緯を図1に示します。

6m型は国内のモニュメント（展示用）市場を中心に計15台が納入され、15m型は工業技術院機械技術研究所向けの実験機(WINDMEL機：写真1)が納入後1年を経過しました。

現在、この15m型を実用型風力発電装置の最初のモデルとして商品開発を行い、今年12月の北海道寿都（スツツ）町への5台の納入を目指すP/Jを最重点に、通産省の補助金制度（新発電技術実用化開発補助金）による沖縄電力向けの30m型（定格出力100kW）、同じく通産省のサンシャイン計画の一環であるメガワット級大型風力発電システムの開発（NEDO：新エネルギー総合開発機構よりの委託研究）を進めております。

3. 風力発電装置の開発

風力発電装置がエネルギー源として実用に供されるためには、他のシステムと同等もしくはそれ以下のエネルギーコストであることが重要です。

エネルギーコストを支配するのは、発生電力量に対する設置コスト、耐久性（耐用年数）、および運転とメンテナンスのためのコストですが、風力エネルギーをはじめとする自然エネルギーの場合には、もう一つの条件が加わります。

それは、取得エネルギーが変動するということで、実用的に用いる場合には、他のエネルギー源（貯蔵システムも含めて）とのハイブリッドによって補完することが必要であり、風力部分としてハイブリッドのための設備も含めて上記コストを算出したものが、ハイブリッドの相手方のエネルギーシステムの、運用コスト（主に燃料コスト）レベルになることが条件となります。

風力利用は、この様な条件を満たすための技術開発という事になります。

3-1 開発のねらい

上記の条件をふまえて、開発の際のポイントを

	FY56	FY57	FY58	FY59	FY60	FY61	FY62
6m実験機	納入						
6m浜岡		納入					
20m揚水		ブレード		タワー	設置		
6m実証試験機		6mの自主開発 8m			新潟大等		
6mモニュメント			昭苑	山形県庁等			
解析研究							
光・風・ハイブリッド							
概念設計							
15m型							
30m型							
50m型							

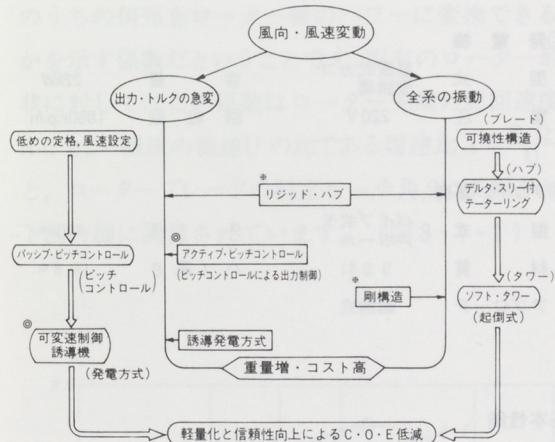
図1 風力発電装置開発の経緯

以下の様に考えています。

- a) 変換効率（風エネルギーから電気エネルギーに変換する効率）を高め、年間発電量を稼ぐこと。
- b) 設置コストを低減し、耐久性を確保するためには、軽量化とソフト化を推進すること。
- c) 運転コストやメンテナンスコストを低減するために、簡素な構造でパッシブなコントロールが出来るシステムを目指すこと。
- d) 又、パブリックアクセシビリティの問題もあるため、騒音レベルを下げ、全体の美観を整えることも重要です。

3-2 ヤマハ風力発電装置のコンセプト

図2に従来のシステムと比較し、当社のシステムの特徴を示します。



中央部は、U.Sのウインドファームを中心に、現在多く用いられているシステムの方式で、誘導発電機を電力系統に電気的に連結する方式です。

外側は当社が提案し、15m型および30m型で開発を進めている方式です。

風力発電装置の作動原理を示す模式図（図3）の中で、この両者の比較を具体的に示します。

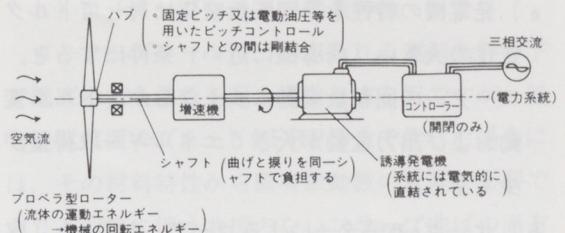


図3-1 従来の方式

図に示すように、風力発電装置の作動原理は極めて簡単なものです。空気流の運動エネルギーはプロペラを裏返しにした様なローターによって回転運動（トルク×回転速度）に変換されます。発電機を駆動する為に20倍～数10倍レベルの增速が行われ、系統と電気的に直結するカゴ型誘導機に結ばれます。誘導モーターは、負荷を負って電気エネルギーを消費する時は、基準回転数よりわずかに低い回転数で運転される訳ですが、負荷をこの場合の様に他からのエネルギーによる駆動装置に代え、基準回転数より回転を上げて（反抗トルクが発生するのでこれに打勝つことが必要）スペリ率を正にしますと、逆に系統側に電力を逆流させ、系統の発電機側では実質的な負荷の軽減が行われて燃料消費量が削減され、結果的に省エネルギーが行われる訳です。現在話題になっているコジェネレーションも原理的には同じことで駆動源に内燃機関を用いている訳です。

さて、エネルギー源となる空気流が、風洞の中の流れの様に変動の少いものであれば、この様な従来の方式で何ら問題はないのですが、実際に風力発電装置を運転する自然風の中では、風速や風向に相当に大きな変動があり、変換効率やシステムの耐久性、電力の質といった基本的な商品性に多大の影響を及ぼすことになります。

当社の最初のモデルである6m型実験機は従来の方式に近いものでしたので、（発電システムが系統連けいタイプでなく独立電源型となっている）運転中に以下の様な問題に直面しました。

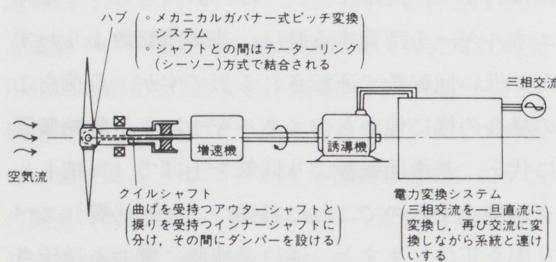
a) 発電機の特性を、回転数変化に対してトルク変化の大きい（誘導機に近い）条件にすると、ローターの回転数変動は少くなるが、トルク変動および出力変動が大きくエネルギー取得量が少くなる。

b) サーボ・モーターによるローターのピッチ（取付角）変換によって定回転を保つのに、発電量の数%から10数%に相当するパワーを消費する。

c) トルク・センサーによる計測で、伝達系に大きな振り振動のあることがうかがわれる。

d) 風向変動によって方位変化（ヨー運動：横方向への首振り）があると、ジャイロモーメントによってピッチング（縦方向の首振り）が起る。

この様な経緯を経て、現在15m型で達成されたシステムは以下の様になっています。



3-3 基本仕様

次に、デザイン要素を含めた特長を理解していくために、外観図および基本仕様を示します。

外観図および基本仕様

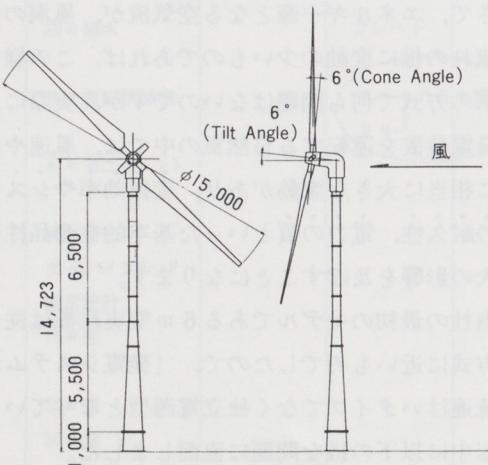


図3-3 15m型の外観図

15mシステムの基本仕様

①ローター部

型式	水平軸型	ローター配置	ダウンウインド
直 径	15m	翼 数	2
コーニング 角	6°	チルト角	6°
材 質	FRP	ブレード翼型	FX-Wシリーズ
ソリディティ イー	3.2%	翼根巾	0.89m
翼端巾	0.22m	捩り角	32°
ハブ形式	データーハブ	デルタスリ 一角	30°
データーリ ング角	±6°		

②制御部

速度制御	ピッチ変換	方位制御	フリーヨー手動ブレーキ
発電機制御	スベリ率調整	制動機	

③ギアーボックス、タワー・ヘッド

増速ギア	平行1段十ベルギア	増速比	22.1:1
潤滑方式	オイルバス	ブレーキ	ディスクブレーキ
カップリング	フレキシブルカップリング		

④発電機

型式	豎置式カゴ型誘導	容 量	22kW
電圧	220V	回転数	1800r.p.m

⑤タワー、基礎

型式	パイプ式モノポール	外 径	400mm
材質	SS41	ハブ高さ	14.8m
アプローチ	起倒式		

基本性能

①風速条件

起 動	3.0m/s	定 格	8.0m/s
カットアウト	25m/s	耐 風 速	60m/s

②性 能

定格出力	16.5kW	ローター回転数	81.5r.p.m
------	--------	---------	-----------

3-4 特性

このようなコンセプトと、それに基づく仕様によってもたらされた結果を、計算値と実測データを用いながら紹介します。

a) ローターの空力特性

ローターの空力特性は C_p (出力係数)カーブによって表わされます。 C_p の定義は

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho U^3 A}$$

ここで P : ローター出力 W

ρ : 空気密度 1.225 kg/m^3

U : 一様流の速度 m/sec

A : ローターディスク面積 m^2

ですが、意味するところは回転するローターのディスクを通過する空気流の持つ運動エネルギーのうちの何%をローター軸のパワーに変換できるかを示す係数だということです。固有のローター形状に対してはこの係数はローター先端の周回速度 $R\Omega$ と、一様流の流速 U の比である周速比 $\lambda = \frac{R\Omega}{U}$ と、ローター刃の設定ピッチ角 β に支配され、下図の様に計算されています。(図 3-4-1)

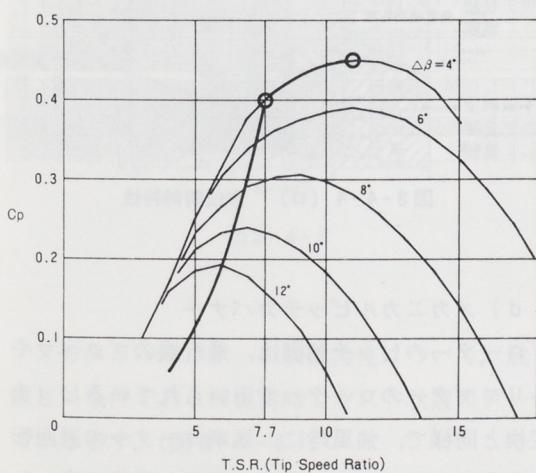


図 3-4-1 出力係数 λ

b) ローター刃の構造特性

ローター刃は、想定される運転条件の下で適度の安全係数を保つ構造とする訳ですが、風力発電装置の刃をFRP構造で作った場合には、その材料特性から固有振動数の管理が必要であり、回転に伴う共振のないフラップ曲げの固有振動数を持つことが条件となります。この関係をキャンベル線図として示します。(図 3-4-2)

製作された刃の振動特性は、研究部に依頼し、以下の様な結果となりました。(モーダル解析)。(図 3-4-3)

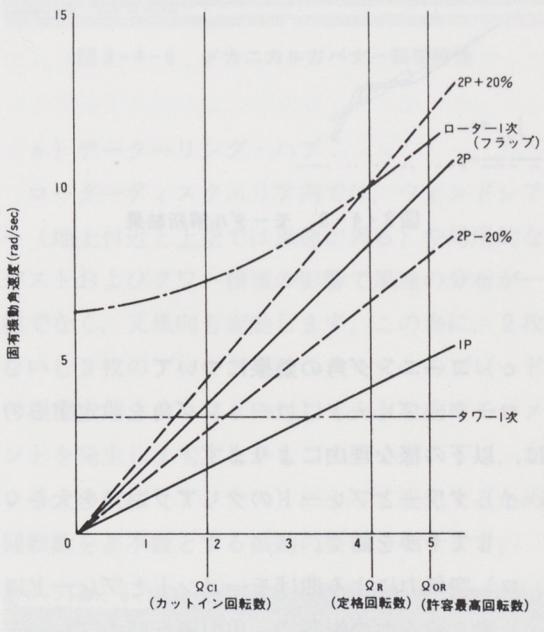


図 3-4-2 キャンベル線図

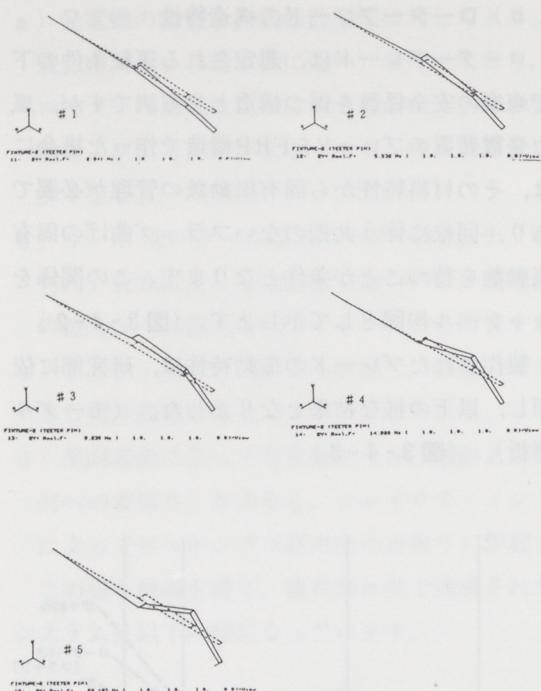


図 3-4-3 モーダル解析結果

c) コーニング角の効果について

ローター ブレードにコーニング角を設定するのには、以下の様な理由によります。

- イ) タワーとブレードのクリアランスを大きくして干渉を防ぐ。
- ロ) 空気力による曲げモーメントとブレードに働く遠心力の影響で、出力運転時のブレード荷重をピュア・テンション状態に近づけ、ブレードの荷重条件を楽にする。
- ハ) 上記の副次的效果として、ピッチベアリングの抵抗が軽減され、メカニカルガバナーの制御性が改善される。
- ニ) ローター自身が正の方位安定性を持つことになり、フリーヨーによる方位制御が可能となる。

このうち、ブレード・ルートの曲げモーメントおよび方位制御特性のデータを図 3-4-4 に示します。

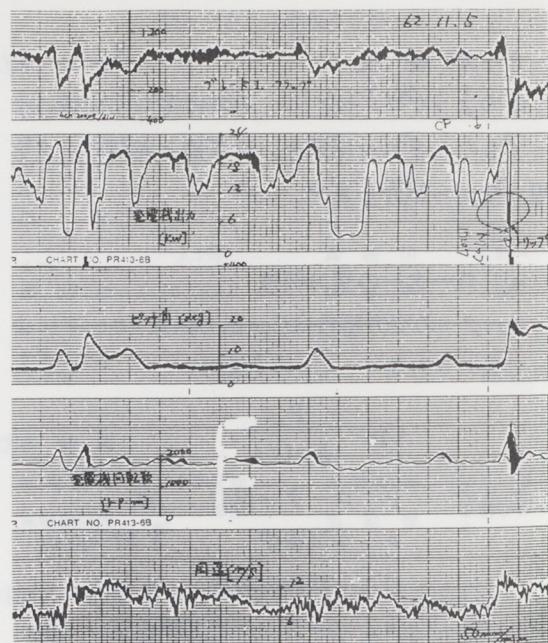


図 3-4-4 (イ) ブレードの曲げモーメント

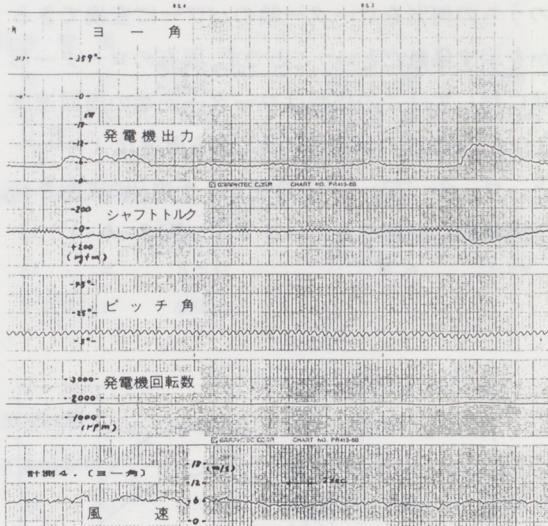


図 3-4-4 (ロ) 方位制御特性

d) メカニカルピッチガバナー

ローターのピッチ制御は、飛行機のプロペラやヘリコプターのローターで用いられているピッチ変換と同様で、強風時に、風車ローターの過回転や過荷重を防ぐための非常に重要な機能です。しかしながら、風力発電装置では、主として経済性

の観点から（装置が複雑化して設置コストが高くなり、しかも制御パワーを消費し、メンテナンスも煩雑である）一部の大型機や実験機を除いて、採用されることが少なかった訳です。

先に述べました直結型の誘導発電方式では、ピッチ角を固定して、誘導機の持つ反応トルク特性を利用して、強風時でも無理やり回転数の上昇を抑え込むという考え方を取っています。

しかし、この考え方では発生頻度の少い強風時への対応のために、ブレード、伝達系、発電機といった主要コンポーネントを過剰定格にしなければならず、最適設計から外れたものとなっています。

メカニカルガバナーによるピッチ変換システムは、この様な実情に即して開発されたもので図3-4-5に示すように定格風速の設定を、年間平均風速の2倍以下に抑えることが可能となり、システムの大巾な軽量化を可能にしました。

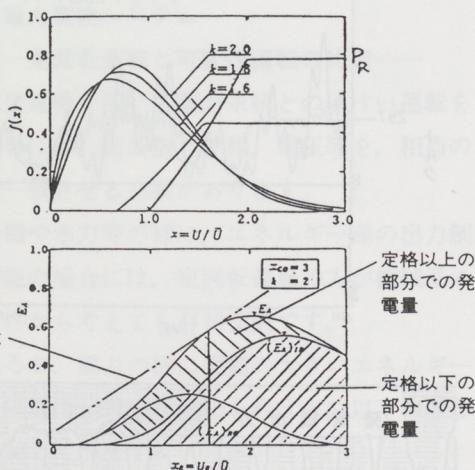


図 3-4-5

メカニカルガバナーの制御特性について、最も厳しい条件である無負荷時でガスト状態のデータで示します。（図3-4-6）

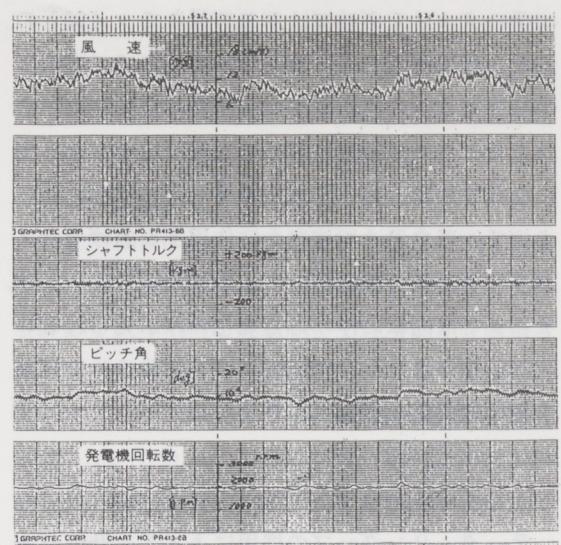


図 3-4-6 メカニカルガバナー制御特性

e) テーターリング・ハブ

ローターディスクエリア内では、ウインドシェー（地上付近と上空では風速が異なる）や局所的なガストおよびタワー後流の影響で風速の分布が一様でなく、又風向も変動します。この為に、2枚ないし3枚のブレードを持つローターのブレード付根部では、シャフトに対して大きな曲げモーメントを発生します。しかもこのモーメントは、ブレードの位相（アジマス）によって変化するため、回転数を基本数とする振動の要因となります。

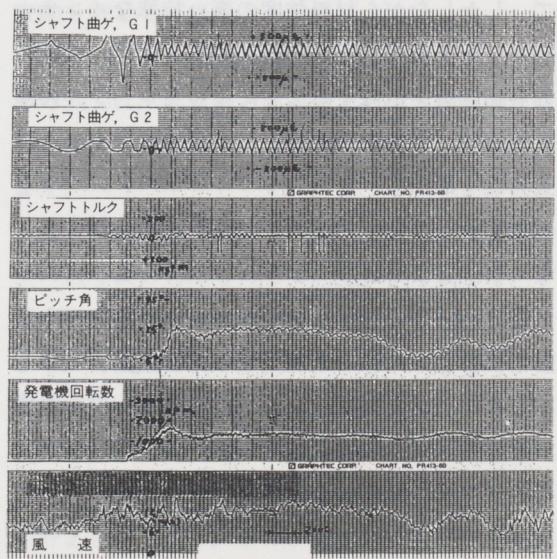


図 3-4-7 シャフト曲げ応力

テーターリングハブは、この様なモーメントの影響を軽減するために考案されたもので、本来はヘリコプターの技術ですが、同様に長大なローターを有する風力発電装置でも次第に用いられる様になりました。テーターリング構造とすることによって、アウターシャフトに作用する曲げモーメントはローターの自重による回転曲げのみとなり、データでは回転に伴う応力変化のみが見られるレベルとなりました。(図3-4-7)勿論これに起因する振動現象は皆無となりました。

f) クイルシャフト

テーターリングハブの採用によって、低速シャフトはかなり細身のものとなりましたが、それでもローター部分を片持ちで支えるという条件から伝達トルクによる捩りについては剛性過剰であり、その結果捩りの固有振動数が過大になってしまいます。

6m型のシリーズでは、開発当初、ハブや途中の結合部のキー、スプライン等伝達系に、計算に乗らない過剰のトルクが作用していることによる不具合が続発し、計測の結果これは全運転領域に見られる非常に大きなトルク変動であることが判明しました。(図3-4-8)

15m型ではこの問題に対する対策として、細身で、しかしながら材料強度の高い特殊なインナーシャフトを用いて全系の捩れ剛性を下げ、捩りの固有振動数を低減することによってローターの空力特性や、電力変換部のトルク特性に含まれる減衰特性を活かし、更にニトリルゴムのダンパーを追加することで、ステップ状の外乱にも対応できるレベルとなりました。

図3-4-9にシミュレーションによるトルク変動の推算と、同様の条件下における実測データを示します。シミュレーションには、ローターの空力特性や、電力変換システムのトルク特性も入っていますが、結果は非常に良い一致を見せてています。

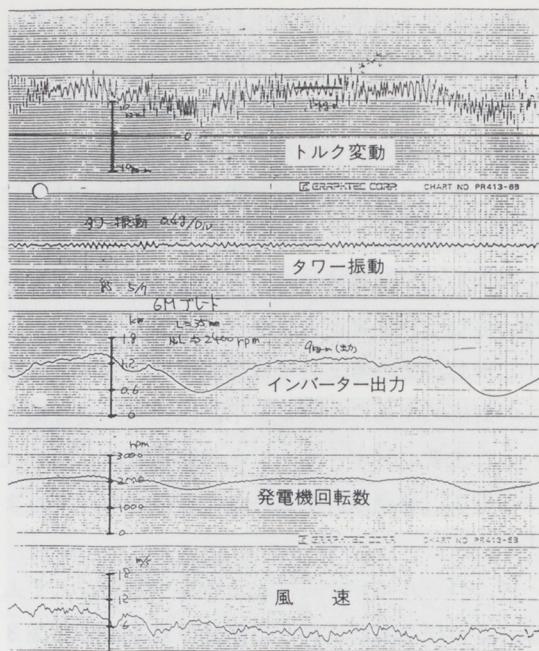


図3-4-8 6m型のトルク特性

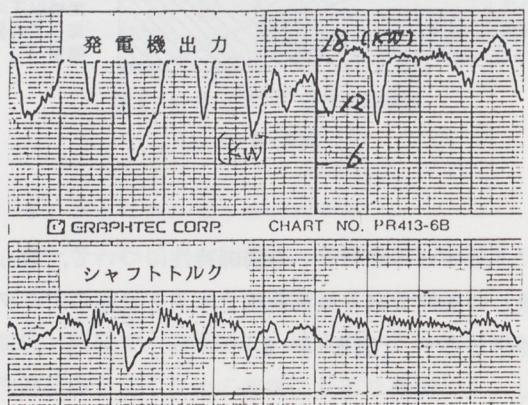
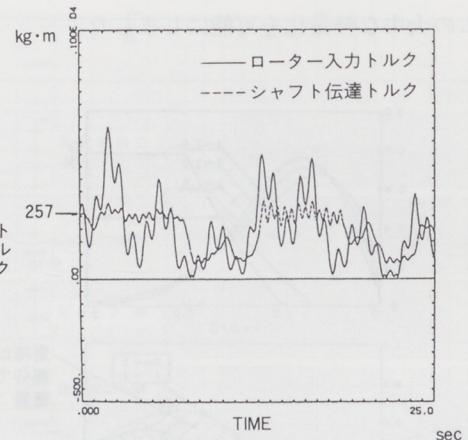


図3-4-9 伝達系トルク特性

g) フリーヨーとソフト・ソフトタワーおよび起倒装置

ローターのコーニング角によって、方位安定性が保たれ、ヨー制御（方位制御）は旋回ペアリングでタワー上部とナセル部を結合するだけの所謂フリーヨーシステムとなっています。タワーシャドウの影響等でローター系に発生するヨー系振動は、上記方式によってタワー系の振り振動特性との連成が絶ち切られ、タワー系の荷重条件が軽減されます。この様な特性を生かして、タワーは曲げの固有振動数が定格回転数の1Pより低いソフト・ソフトタワーとなっています。

これによってタワー系についても一層の軽量化がはかられ、電動ウィンチを用いた起倒が可能となりました。

実験時、この起倒方式によって、アクセシビリティーが大巾に改善され、作業効率を向上させることができました。

h) 電力変換システム

— 定回転運転と可変速運転の比較 —

交流発電機を用いて電力系統との連けい運転を行う場合には、周波数、位相、電圧等を、相当の精度で一致させる必要があります。

内燃機や水力等の様に、エネルギー源の出力制御が可能の場合には、定回転運転の方が機械系の設計条件から考えても有利な訳です。

ところが、風力の様に変動の大きいエネルギー源で、無理やり定回転運転を行うと、以下の様な問題点がでてきます。

イ) 図3-4-1に見られる様に、出力係数は周速比入で支配されます。風速の変動にもかかわらず定回転を保つことは、この入が常に変化することであり、最適設計点を外れた運転が続くという事です。

ロ) 定回転を保つために、ピッチ制御を行う必要がありますが、回転変動および出力変動の巾を狭める程ピッチ変換速度が大となり、制

御システムの容量増と制御パワーロスの増加をいたします。

ハ) 風速上昇時には、折角のパワーをピッチ変換によって逃がしてしまう訳です。エネルギー取得量をみすみす減ずる訳で勿体ない。

開発の当初には、可変速運転を行うのに必要な特殊な電力変換装置、即ち発電機の回転速度変動を許しながら系統との連けいを行う部分の設備コストが大きい為に、上記のディメリットが過少評価されていた訳ですが、その後の運転実績と研究によって、これによるエネルギー取得量の減少は、20~30%程にも及んで来ることが明らかとなつてきました。

加えて、可変速運転では、パワーレベルの変化を或る程度回転数変動で吸収しようとする考え方の為、伝達系のトルク変動が少く、ブレード、シャフト、增速ギア、カップリング等のコンポーネントの耐久性向上に繋がることも明らかとなつてきました。

風況モデルの下でのシミュレーションによる比較を30m型について行ったもので、このような特性の違いを見ることができます。

図3-4-9に設定した模擬風況を示します。

図3-4-9、10に回転数変動を示します。可変速運転方式では、この図の様に±20%前後の速度変動を許しています。

図3-4-11はピッチ角を表わしています。定回転方式では、回転数と出力の急減な変動を抑えこむために、急激なピッチ変換を繰返すことになります。

図3-4-12はローターの発生する空気力をトルクの形で表わしたもので、定回転方式では、ピッチの逃げのために取得パワーが抑えられていますが、可変速方式では、ガスト時のエネルギーを取込んでいます。

図3-4-13は伝達系のトルクです。可変速方式では、ローター系の回転数上昇の形でエネルギーが貯えられており、トルクレベルは定回転方式と

同じレベルに保たれています。

図3-4-14は発電機の出力です。可変速方式と定回転方式のエネルギー取得量には数10%の差異が見られます。

この様に、定回転方式と可変速方式の差が顕著に表われるのは、全系の慣性量と変動周期がマッチした時で、自然風が常にこの条件下にある訳では無いのですが、それにしても年間を通して、20~30%程の差異が出てくる事が容易にうかがえます。

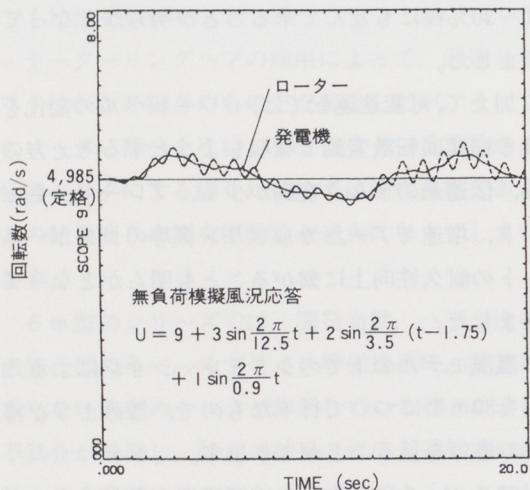


図3-4-9 回転数（可変速運転）

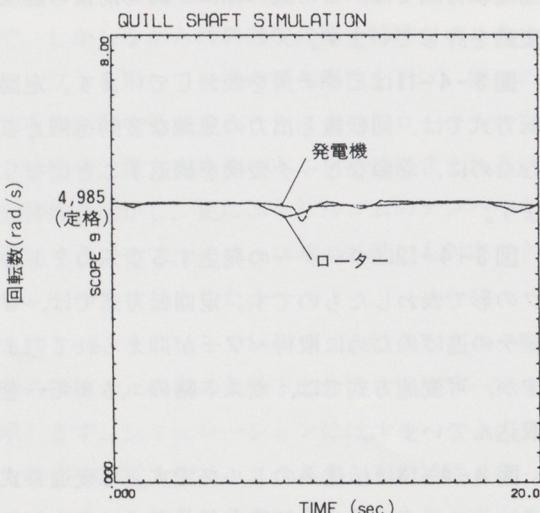


図3-4-10 回転数（定回転運転）

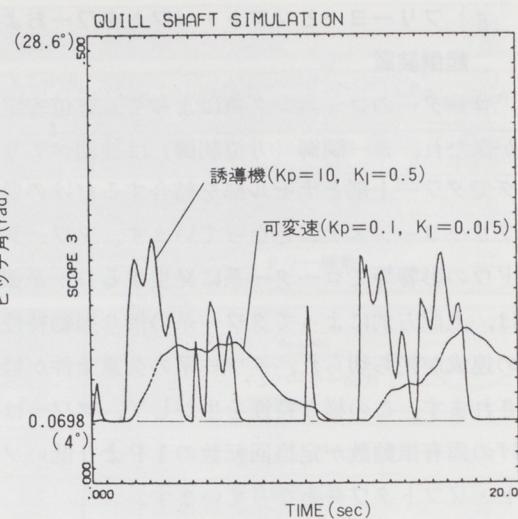


図3-4-11 ローターピッチ角

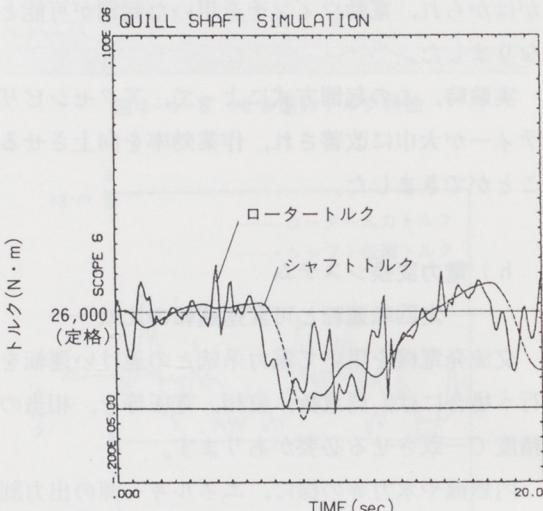


図3-4-12, 13 ロータートルク, シャフトトルク

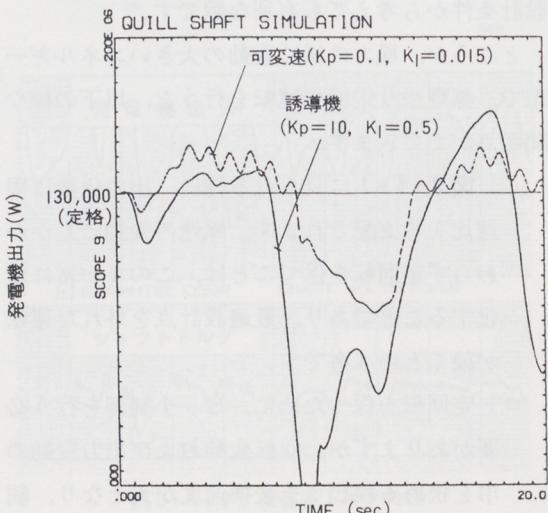


図3-4-14 発電機出力

可変速運転を可能にするためには、発電機と系統の間に、発電機を励磁し、かつ発生電力を風のエネルギーに合せながら制御するコンバーターと、このコンバーター部分で直流に変換された電力を、再び交流に変換しながら系統と同期して送り出すことのできるインバーターで構成される電力変換装置が必要になります。

当システムでは、スイッチング素子にトランジスタを用いたAC-DC-ACリンク方式による可変速発電系統同期電力変換器として開発しました。

この電力変換器は、ローターの回転数を情報として風況に合った出力制御を行ない、ピッチ変換システムと協調しながら、変動する風況の中で運転状態を制御し、最適状態に保つことができる能力を持っています。又、異常時のシステムの保護や系統の保護もする、システムの中枢に当る部分です。図3-4-15にこの部分のブロック図を示します。

電力変換部の主な構成要素は

- ①カゴ型誘導機（市販の電動機を改造して使用）
- ②上記の発電機を励磁し、出力状態を制御するトランジスター型コンバータ
- ③直流部分
- ④直流部分のパワーを交流に変換し、系統と連けいするためのトランジスター型インバータ。
- ⑤ ②および④を総合的に制御する主コントローラー。

②および④の電力変換部では、PWM方式による交流波形制御が行なわれています。

②の部分では更に、誘導機の発電制御を風況に合せて行なうため、低い回転数から高い回転数(22.5~112.5Hz)まで、誘導機のスペリートルク特性を利用しつつ、又、発電機自体の磁気飽和が起らない様に、電圧と周波数の関係を制御しています。

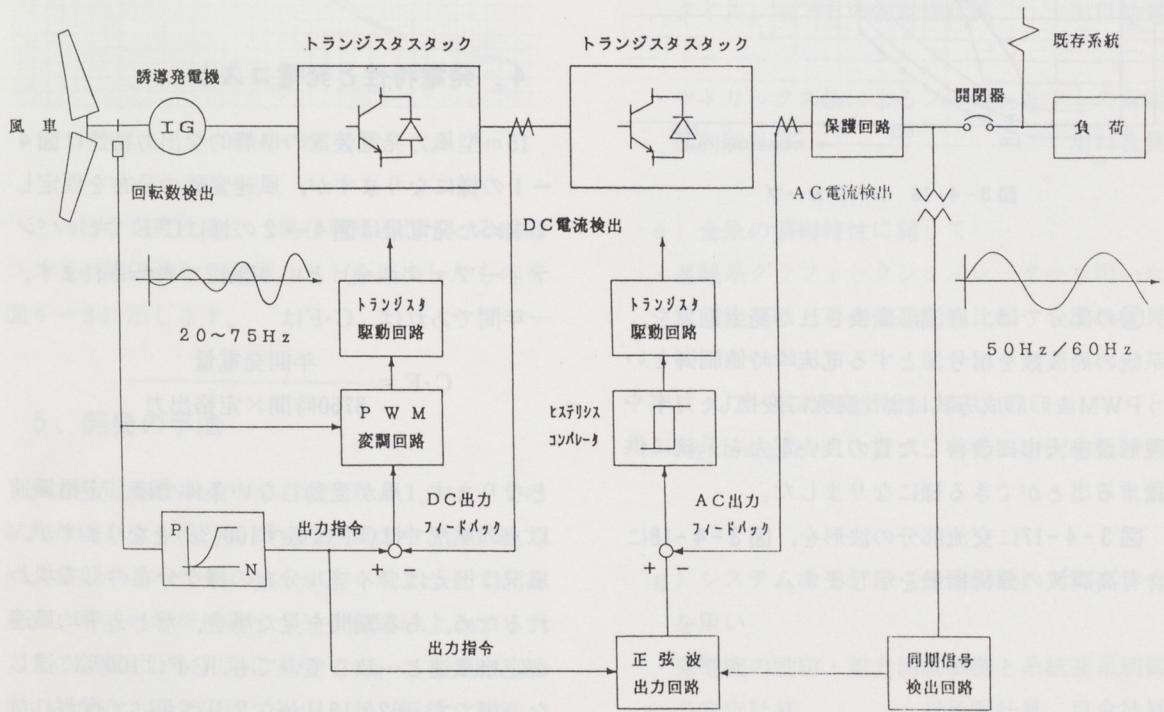


図3-4-15

トータルシステムとして、回転数と出力の関係を定められたマップの上にのせることを目指しており、図3-4-16に、結果として得られたベンチ試験による実測データを示します。

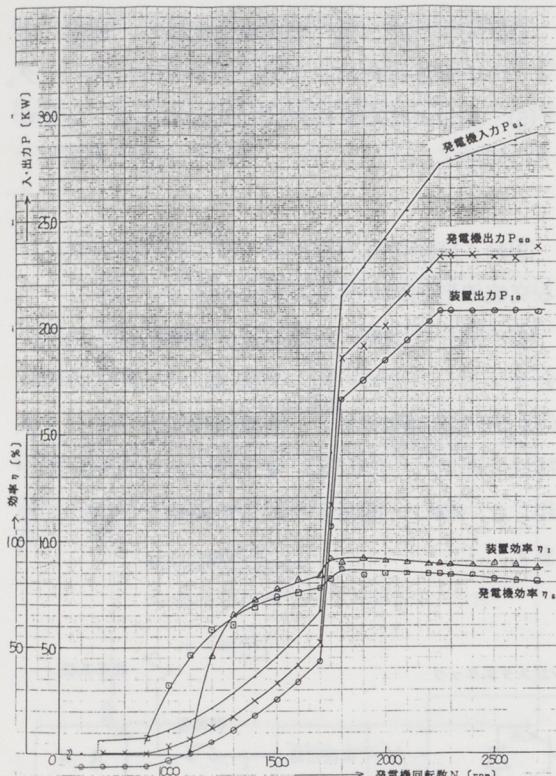


図3-4-16 N-Pカーブ

④の部分では、直流に変換された発生電力を、系統の周波数を信号源とする電流瞬時値制御というPWM波形形成方式により交流に変換し、力率や波形歪を大巾に改善した質の良い電力を系統に供給することができる様になりました。

図3-4-17に交流部分の波形を、図3-4-18に含有高調波の分析結果を示します。

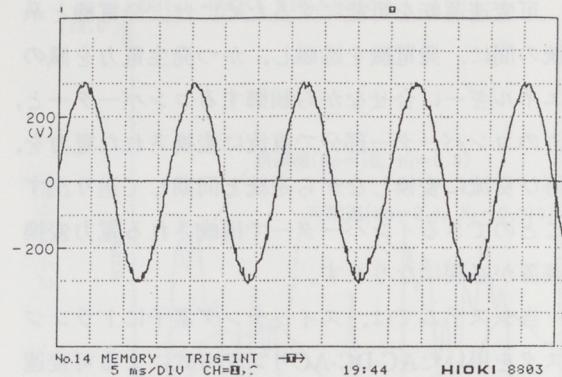


図3-4-17 インバータ端の出力波形

調波次数	レベル	基本波との差	比率	目標性能	評価
1	57.5 (dB)				*
7	19.5	38 (dB)	1.2 (%)	1 (%)	可
総合			1.2	2	良

図3-4-18 含有高調波分析結果

この他、系統との保護協調をはかる部分についても、度重なるベンチ試験およびフィールド試験で、実用化の段階に近いレベルを達成しています。

4. 発電特性と発電コスト

15m型風力発電装置の準静的な出力特性は図4-1の様になりますが、風速変動の分布を仮定して求めた発電量は図4-2の様にC-F（キャパシティーファクター）という指標で表わされます。一年間であれば C-Fは

$$C-F = \frac{\text{年間発電量}}{8760\text{時間} \times \text{定格出力}}$$

となります。風が変動しない条件では、定格風速以上の風況ではC-Fは必ず100(%)となります。風況は例えばワイブル分布の様な分布の形で現われるため、ある期間を見た場合、たとえ平均風速が定格風速と一致していても、C-Fは100%に達しない訳です。62年12月から2月にかけて行われた耐久試験では発電時間約1100時間に対し、約5500 kWhの発電量があった訳ですが、1時間単位に

まとめた平均風速とC-Fの関係は図に※印で示されたレベルとなります。

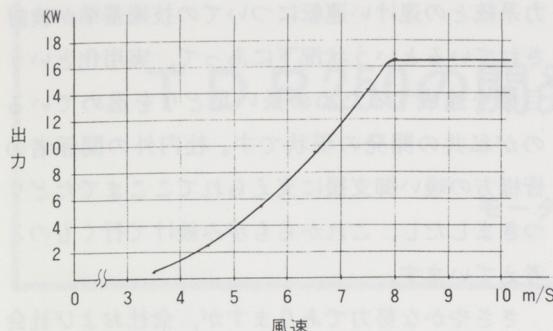


図 4-1 静特性

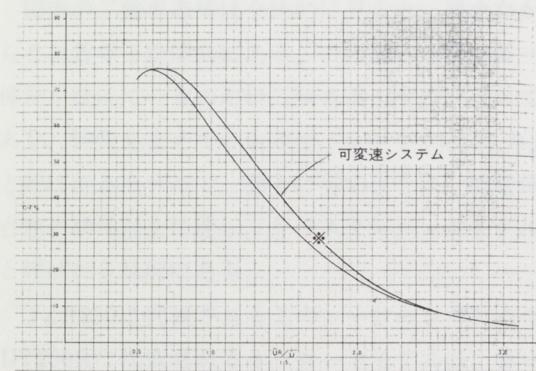


図 4-2

この様な発電性能と、現在目標としている設置コストの関係から、発電コストを算出したものを図 4-3 に示します。

5. 開発の手法

風力発電装置は、サイズが大きく 1 ユニットの試作単価も大きく、しかも自然風の中での試験では、発生するパワーレベルが全く風まかせであるため、事前の解析検討やベンチ試験によるプリテストの位置付けが非常に重要です。ここでは、紙面の関係から開発段階で用いられた解析、計算、実験の手法を担当者と共に紹介するに止めます。

将来このような場で詳細の発表が行われること

を期待します。

a) ローターの空力設計に関して

- ・環状運動量理論による空力特性計算とこれを用いた最適形状設計 田中主任

- ・微少攪乱理論によるローターの方位安定性計算 佐藤(彰)社員

b) ローターの構造設計に関して

- ・Myklestad 法によるローターブレードの振動特性計算 田中主任

c) ローターの制御特性に関して

- ・連続系グラフィックシミュレーターを用いたメカニカルガバナーの制御特性計算 田中主任

d) 伝達系の安定性計算に関して

- ・連続系グラフィックシミュレーターを用いたクイルシャフトの安定性計算 出口社員

- ・マトリックス法によるクイルシャフトの安定性判別計算 出口社員

e) 全系の制御特性に関して

- ・連続系グラフィックシミュレーターを用いた定回転運転と可変速運転の比較 出口社員

f) タワー系の振動特性に関して

- ・Myklestad 法によるタワーの固有振動数計算 出口社員

- g) システムのモデル（伝達関数）プログラムを用い

- ・発電機の励磁・電力回制制御と系統連系制御の安定計算 日比野社員、戸倉社員

- h) 誘導機の等価プログラムを用い

・誘導機の等価回路評価とスペリートルク特性
計算 戸倉社員

i) 電力変換器出力電圧、電流歪評価プログラム
による電力品質検討 日比野社員

j) 風力発電システムの等価ベンチによる動特
性評価 日比野社員、戸倉社員

6. おわりに

現在、我国に於ては風力発電装置本体および電力系統との連けい運転についての技術基準が検討されているという状況下にあって、実用化という目標を達成するための長い足どりを進めているのが私共の開発の現状です。社内外の関係者の皆様方の暖い御支援に支えられてここまでたどりつきましたし、これからも歩み続けて行くものと考えています。

ささやかな努力であります、会社および社会の今後の発展に少しでも資するところがあれば幸いと考えます。

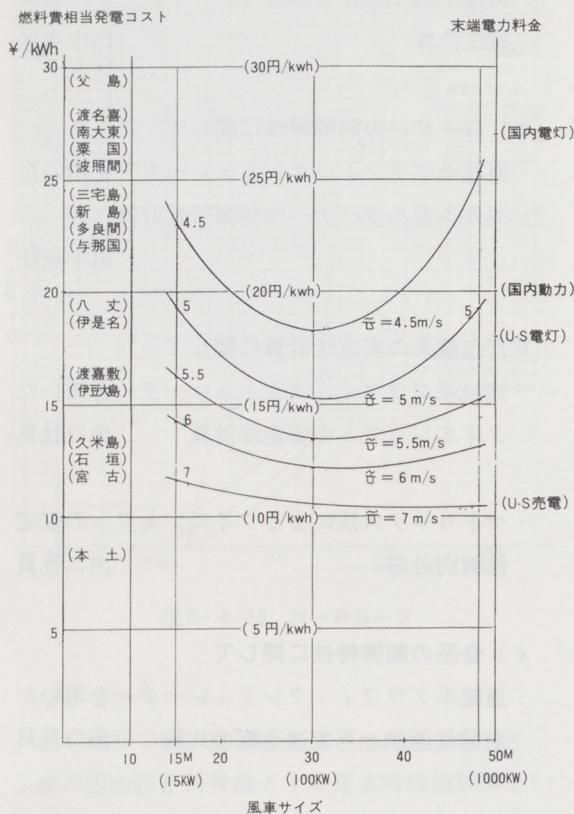


図 4-3 発電コスト