

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE
OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No. 1180 JUNE 2008

沿岸域中規模風車の開発とその沿岸域への適用について

永井 紀彦
鈴木 高二朗
牛山 泉
西沢 良史
細身 雅生
小川 路加
野口 仁志

独立行政法人 港湾空港技術研究所

Independent Administrative Institution,
Port and Airport Research Institute, Japan

目 次

要 旨	3
1. はじめに	4
2. 沿岸域中規模風車の開発	4
2.1 開発コンセプト	4
2.2 基本的な仕様と設計条件	5
2.3 施工性の向上に向けて	6
2.4 安全・制御システムの開発・改良	7
3. 現地実証試験	10
3.1 概 要	10
3.2 観測結果	11
4. 実証試験結果の考察	11
4.1 パワーカーブ	11
4.2 風速階級別の発電量の評価	11
4.3 風車による背後風速の減衰	16
4.4 騒音評価	19
4.5 塩害対策	19
4.6 安全・制御システムの検証	19
5. 課題と将来展望	20
5.1 サンドバイパスへの応用	20
5.2 大型風車設置困難立地への活用	23
6. おわりに	29
謝辞	30
参考文献	30

Development of Medium Size Wind Power System and its Application to Coastal Areas

Toshihiko NAGAI*
Kojiro SUZUKI**
Izumi USHIYAMA***
Yoshifumi NISHIZAWA****
Masao HOSOMI*****
Ruka OGAWA*****
Hitoshi NOGUCHI*****

Synopsis

In general, wind energy in coastal area is larger than in inland area. Demand of electric power is also large in coastal area. Even if the wind mill height is restricted by the airport regulation, medium size wind power system is likely to be used as the electric power of port and airport. In order to satisfy these electric demands, we developed the medium size wind power system. We also investigated its application of this medium size wind power system to the coastal area.

Wind energy distribution in Japan is clarified by Nagai (2002), finding that the wind energy in Tokyo bay is large enough to be applied to proto-type power generation system. However, observed wind data in Tokyo bay is not sufficient to design real field wind power system. From these points of view, we conducted following investigations.

- 1) Development of medium size wind power system applicable to coastal area.
- 2) Field test in Tokyo bay.
- 3) Application of the wind power system to sand bypass.
- 4) Application to the area in which the large size wind mill is difficult to construct.

Following results were obtained from this study.

- 1) Field experiment of the medium size wind power system was conducted at the eastern side of Tokyo bay and relations of the wind speeds at the front and back of the wind power wings were investigated with the generated electric power.
- 2) Possibility of the on-site wind-power energy application to a sand-by-pass system was investigated.
- 3) Field installation possibility of the developed medium size wind power system was studied using the GIS map information.

Key Words: Wind Power, Coastal Area, Wind Energy Application, Medium Size Generator,
Tokyo Bay

* Director, Marine Environment and Engineering Department
** Senior Research Engineer, Marine Environment and Engineering Department
*** Professor, Ashikaga Institute of Technology
**** Ashikaga Institute of Technology
***** Komai Tekko Inc.
***** Komai Tekko Inc.
***** Deputy Director, Construction and Control Systems Department

沿岸域中規模風車の開発とその沿岸域への適用について

永井 紀彦*
鈴木高二郎**
牛山 泉***
西沢 良史****
細身 雅生*****
小川 路加*****
野口 仁志*****

要 旨

沿岸域は、一般的に風速が大きく、かつ沿岸域諸施設のエネルギー自己需要も大きい。空港近傍などの高度制限がある沿岸空間であっても、港湾管理などの自己エネルギー消費にあわせた規模の中小型風力発電装置の潜在的な可能性は高いと考えられている。そこで本研究では、中規模の風車を開発するとともに、その沿岸域への適用について検討することとした。一方、我が国沿岸の風力分布については、これまでも永井(2002)によって明らかにされてきている。このうち、東京湾も比較的風力発電に適していることが分かっているが、これまでのところ十分な調査が実施されていなかった。そこで、本研究では以下の項目について検討し、とりまとめを行った。

- ① 可搬性などが優れた沿岸域に設置する中規模風車の開発を行い、その制御システム等を取りまとめた。
- ② 東京湾沿岸における現地実証試験を実施しその結果を取りまとめ、風車前後の風速と発電量との関係を整理・考察した。
- ③ 中規模風車によって得られる電力の現地活用としてのサンドバイパスへの応用の可能性を検討した。
- ④ 離島や山間部などの屈曲した搬送設置経路に対する、GISを用いた風車設置の可否判断システムを開発した。

キーワード：風力発電，沿岸域，風力エネルギー利用，中規模風車，東京湾

* 海洋・水工部長
** 海洋・水工部主任研究官
*** 足利工業大学教授
**** 足利工業大学総合研究センター
***** 駒井鉄工株式会社
***** 駒井鉄工株式会社
***** 施工・制御技術部新技術研究官
〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 独立行政法人湾技空港術研究所
電話：046-844-5036 Fax：046-844-1274 e-mail: nagai@pari.go.jp

1. はじめに

沿岸域は内陸部に比較すると一般的に風速もしくは風力エネルギーが大きく、風力発電設備を設置するのに適しているため(永井, 2002), これまでも多くの風力発電設備が設置されてきており, 今後も増加していくものと考えられる。

我が国の沿岸についてみると, 地形や利用形態は様々であり, それぞれの地域に対して風力発電の設備内容を吟味した上で, 導入する必要がある。たとえば, 内湾に面した比較的平坦な地域であれば, 港湾や空港があり, 市街地も迫っている場合が多く, 風力エネルギーに対する需要が大きい。港湾管理などの自己エネルギー消費にあわせた規模の中小型風力発電装置の潜在的な可能性は高いと考えられている。風力発電設備としては, スケールメリットを最大限に活かせる高さ100m以上のメガワット大型風車が期待されるものの, 空港近傍などでは高度制限があるほか, 市街地に近い場合には景観等の問題も配慮する必要があるため, 場合によっては中規模風車が適している場合もある。

急峻な山間部に迫った海岸や, 離島が多くあることも我が国沿岸の特徴である。このような場所では, 風車の部品の搬送が困難で, 大型の風車を設置しにくい場合も多い。また, 大規模な市街地から離れていることから, 周辺の地域の電力需要にあわせた中小型風力発電の導入が適している場合もある。

以上の背景をふまえ, 当所は平成17~19年度の3か年にわたって足利工業大学および駒井鉄工株式会社との3者共同研究を実施し, 沿岸域への適用を視野に入れた中規模風力発電システムの開発と, これによって生産された電力エネルギーの現地活用に関する検討を行った。本稿はこの3社共同研究の成果をとりまとめたものである。

すなわち, 本稿では, 沿岸域に適した中規模風車の開発と活用を目指して, 以下の項目について検討した。

1) 300kW中規模風車のコンセプトと設計仕様

我が国特有の問題である地震, 落雷, 風の乱流対策等について検討する。特にここでは, 今後設置が見込まれる離島や市街地から離れた岬などへの展開を考慮し, 風車の現地における容易な施工法についても検討した。

(第2章: 細見・小川が分担)

2) 東京湾に面した海岸における現地実証試験

風力発電システムを実際に設置して, 実際にその性能を確かめることとした。

(第3章: 細見・小川が試験実施を分担)

永井・鈴木が結果の整理とりまとめを分担)

3) 限られた空間を有効に利用するためにより経済的な風車間隔を決定するための基礎理論の構築

通常, 風車はブレード回転直径の10倍の距離を離して設置される。しかし, 風向きによっては10倍未満で済む可能性がある。ここでは, 第3章の実証試験結果に基づき, 既往研究成果を含めて, 解析を実施した。

(第4章の1-3節: 永井・鈴木が分担)

4) 300kW中規模風車の性能評価

第3章の実証試験結果に基づき, 騒音・塩害耐久性・安全制御などの基本的なシステムの性能について, 検討し評価した。

(第4章の4-6節: 細見・小川が分担)

5) 沿岸域の風力エネルギー現地活用事例の検討

サンドバイパスの電力としての風力エネルギーの活用を検討した。

(第5章第1節: 野口が分担)

6) 離島などへの中型風車の可搬性

大型風車の設置が困難な理由として, 大型ブレードを設置地域まで搬送できないという問題がある。ここでは, 離島地域などへの中型風車の可搬性に関して検討した。

(第5章第2節: 牛山・西沢が分担)

2. 沿岸域中規模風車の開発

2.1 開発コンセプト

風力発電では, 風のエネルギーを安全にかつ効率よく引き出すために, 発電機の性能を制約条件として作用する風に応じた荷重条件を設定している。従来のヨーロッパからの輸入風車は, ヨーロッパの風の特性に合わせて比較的乱れの少ない風を対象として開発されている。日本におけるこれまでの風力発電の設置場所は, 風の乱れが小さく, 年間を通じて安定した風が作用する海岸部や高原地が選定されてきた。しかし, わが国は国土のほとんどが山間部であり, 今後の風力発電は離島や山間部での開発が増えると予測される。一方, 近年のわが国の風力発電がおかれている現状として, 上述の海外機種に占める割合が多いこと, 国土の地形条件による風の乱れの発生・輸送や建設に制約があること, 台風や落雷という自然環境の制約があることが風力発電導入促進の障壁となっている((独)新エネルギー・産業技術総合開発機構, 2007)。また, 近年は建設コスト削減等経済性のスケールメリットを理由に MW 級の大型風車建設が進んでいるが, 輸送や建設条件がさらに厳しくなることや, 大型化ゆえに景観や騒音が問題になることも多い。

以上のような日本における風車建設状況を鑑み, 今後

の風力発電事業を活発にするためには、離島および山間部において風力発電の導入を促進することのできる、厳しい気象条件および輸送・建設の条件に適合した中規模風車が必要と考えられる。また、このような仕様の風車は、輸送条件や気象条件の厳しい離島においても適していると考えられる。ここでは、上記コンセプトにより開発した中規模風車の概要を説明する。

2.2 基本的な仕様と設計条件

(1) 開発風車の仕様

開発した風車の基本仕様と特徴を表-2.1、図-2.1に示す。写真-2.1は、実証試験の全景である。定格出力300kWの水平軸プロペラ型風力発電設備である。ローターはアップウィンド型3枚翼の可変ピッチ制御システムを採用した。カットイン風速は3.0m/s、定格風速は11.5m/sおよびカットアウト風速は25.0m/sである。本機のパワーカーブを図-2.2に示す。

本風車は、離島や山間部の建設を想定して、大型トレーラーを使用せずに、4m幅の道路でも通行可能な通常の10tトラックあるいは低床15tトラックを使用して輸送できるように部材の長さや重量を設定した。

(2) 設計条件

a) 風車クラス

設計条件として、世界的な設計基準であるIEC（国際電気標準会議）の条件を満足すると共に、日本特有の風の特徴も考慮して、風車クラスの条件を設定して設計した。風の条件を決めるパラメータは、国内の起伏が多いという地理的条件、台風に対する被害が多いという気象的条件を考慮して、年平均風速をクラスIIとして基準風速と乱れ特性を大きく設定して「IIA⁺」とした（表-2.2参照）。

b) 耐震設計

国内の建築基準（建築物の構造関係技術基準解説書編集委員会、2007）と土木の基準（(社)日本道路協会、2002）

表-2.1 開発した風車の基本仕様

定格出力	300 kW
ローター直径	33.0 m
定格風速	11.5 m/s
定格回転数	40.5 rpm
回転数範囲	(可変速) 12.0~47.6 rpm
カットイン風速	3.0 m/s
カットアウト風速	25.0 m/s
耐風速	70.0 m/s

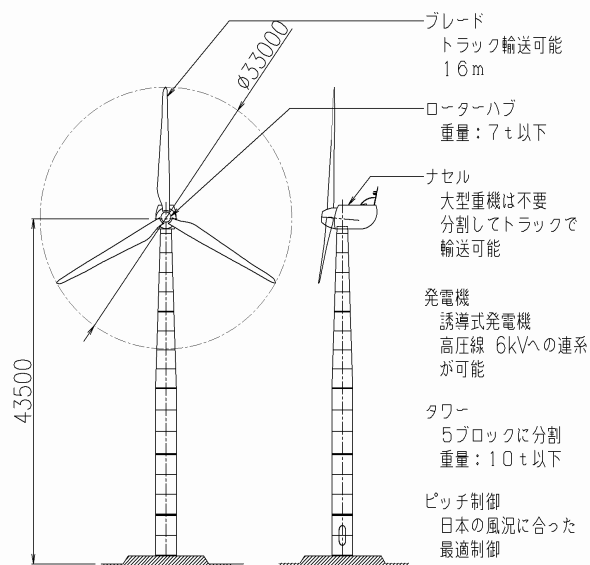


図-2.1 開発した風車の特徴

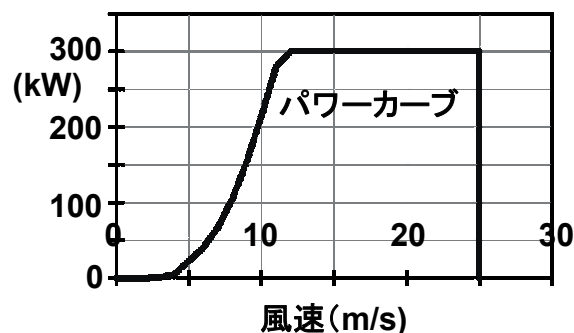


図-2.2 KWT300のパワーカーブ



写真-2.1 実証試験の全景（駒井富津工場）

表-2.2 IEC 風車クラスと開発風車の位置付け

風車クラス		I	II	III	IV	開発風車	
基準風速 $V_{ref}(m/s)$		50	42.5	37.5	30	50	
年平均風速 $V_{ave}(m/s)$		10	8.5	7.5	6	8.5	
乱れ特性	A	I_{15}	0.18	0.18	0.18	0.18	0.20
		a	2	2	2	2	1.5
	B	I_{15}	0.16	0.16	0.16	0.16	
		a	3	3	3	3	

ここに、A : 高い乱れ特性のカテゴリー
 B : 低い乱れ特性のカテゴリー
 I_{15} : 風速 15m/s 時の乱れ強度の特性値

に準拠して、地震に対しても安全な設計を行った。地震動としては、比較的発生確率が高いレベル 1 地震動 (200~400gal 程度) とさらに大きな強度のレベル 2 地震動 (700~1000gal 程度) の 2 段階のレベルを考慮した。

c) 落雷対策

風車への落雷を完全に防ぐためには、風車周囲にブレードより高い避雷設備を複数個設ける必要があるが、この対策は過大な費用負担が生じるため現実的ではない。したがって、落雷防止ではなく、落雷が生じても安全に風車を運転できるような対策を行っている。

国内では、JIS 規格による建築物に対する雷保護を中心に規定されているが、風力発電設備を対象とした雷対策については、具体的な基準が設けられていない。そこで、風力発電設備における雷対策は、一般的な規定の JIS A4201 と、国際的風力発電設備の規定である IEC 規格 (IEC, 2002) に従って設計を行った。雷対策の設計レベルとしては、IEC の保護レベル I を設定し、落雷に対しても十分に安全な設計を行った (表-2.3)。

表-2.3 IEC 保護レベルと雷パラメータ

保護レベル	ピーク電流 (kA)	比エネルギー (kJ/Ω)	平均電流上昇率 (kA/μs)	全電荷 (C)	回転球体法 (m)
I	200	10,000	200	300	20
II	150	5,600	150	225	30
III	100	2,500	100	150	45
60					

d) 輸送条件

離島や山間部への風車建設においては、輸送条件が重要な制約条件となる。特に、MW 級の大型風車の場合、ブレード長は約 30m~40m 程度にもなるため、ポルトトレーラーでの輸送が困難になることが多い。したがって、ブレードを輸送するために、特殊な起立装置付きの重機 (写真-2.2) を使って輸送したり、場合によっては道路改良が必要になる。これらの条件が、建設コストを圧迫

することになる。ここで開発した風車は、離島や山間部の建設を想定して、大型トレーラーを使用せずに、林道程度の 4m 幅道路でも通行可能な、通常の 10t トラックあるいは低床 15t トラックを使用して輸送できるように部材の長さや重量を設定した。輸送条件を表-2.4 に、ブレード輸送図を図-2.2 に示す。

2.3 施工性の向上に向けて

(1) 陸上部での施工性向上

風車を陸上部に建設する場合、最も重量が重いナセルをタワー先端に設置する必要がある。一般的には大型クレーンを使用しているが、建設位置までクレーンを移動させるため、道路条件によっては搬入路の整備が必要となり、風車建設費を増大させる要因の一つとなっている。



写真-2.2 ブレード起立装置 (日本通運株式会社ホームページ)

表-2.4 開発した風車の輸送条件

	員数	重量	長さ
ブレード	3	1 t	16 m
タワー	5	11 t 未満	11 m 以下
ナセル	1	15 t 未満	7.5m 未満

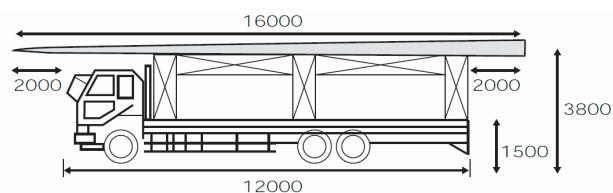


図-2.2 ブレードの輸送

また、条件が悪い場合は大型クレーンを現地へ搬入できない場合がある。上記のような建設時の制約を少なくすることが重要と考え、大型クレーンを使用しないナセルの建設工法を開発し実証試験機の架設を行った。この工法は、離島や山間部の風車導入を可能とすることを目的として開発したものである。図-2.3 にナセル架設のステップ図を示す。また、写真-2.3～2.12 は実証試験における架設状況である。

[工法の概要]

実証試験で検討した工法のステップを以下に示す。

- ・ 風車タワー頂部に回転式架設装置を、中型クレーン（60t クラス）を使用して設置。
- ・ この装置は鋼製フレームで構成され、中心の回転軸をタワーに接続した架台上に固定する。
- ・ 装置の姿勢制御は、装置の四方に滑車を介して接続した制御ワイヤを、地上のウィンチの操作で行う。
- ・ ナセルの吊上げは、装置の中心部を通る吊上げワイヤを使用して地上のウィンチの操作で行う。
- ・ ナセル吊上げ後、ナセルのタワー上への横移動は制御ワイヤによる装置の回転で行い、タワー上の所定の位置にナセルを据え付ける。

この架設工法は、重量のあるウィンチを地上に設置することで、タワー上に設置する装置を単純な構造で軽量とすることができ、タワー上での組立が中型のクレーンで可能となっている。

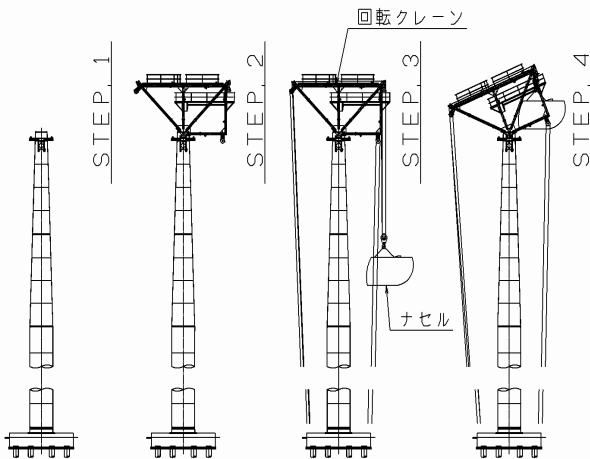


図-2.3 ナセル架設ステップ図

(2) 洋上部での施工性向上

一般に、風力発電は沿岸部や内陸部の風況の良い場所から設置が始まったが、近年は景観や騒音などの環境上

の問題に加え、風車自体の輸送条件の制約などから、海上輸送を利用して輸送上の制約を少なくできる洋上部での建設が期待される。

洋上部に風車を建設する場合、大別すると①自己昇降式（SEP）台船を使う場合と、②起重機船（FC）を使う場合が考えられ、国内外において施工実績のある工法である（港湾・沿岸域における風力発電推進研究会, 2005）。

FCを使う場合、国内の現有船舶機械による建設が可能であるが、波浪の影響を受けやすく、波浪による施工稼働率が明確になっていない。SEP 台船を使う場合は、施工時に波浪の影響が少なく施工性はよい。MW 級の大型風車を建設する場合は、一般に、使用する重機も大型となるため、現有する国内の SEP 台船での施工は困難である。一方、ここで検討している中規模風車の場合は、使用する重機が 120t～160t クラスのクローラークレーンであるため、国内の SEP 台船に搭載することが可能である（図-2.4）。

2.4 安全・制御システムの開発・改良

(1) 安全・制御システム

風車の安全性を確保するためには、どのように風車を運転・停止させるかが重要である。また、風車設計において特筆すべきは、風車の安全・制御に対するコンセプトがその風車設計に直接関係することである。開発風車では風車の運転時の安全を確保するため、以下に示す方針により安全・制御システムの構築を試行した。

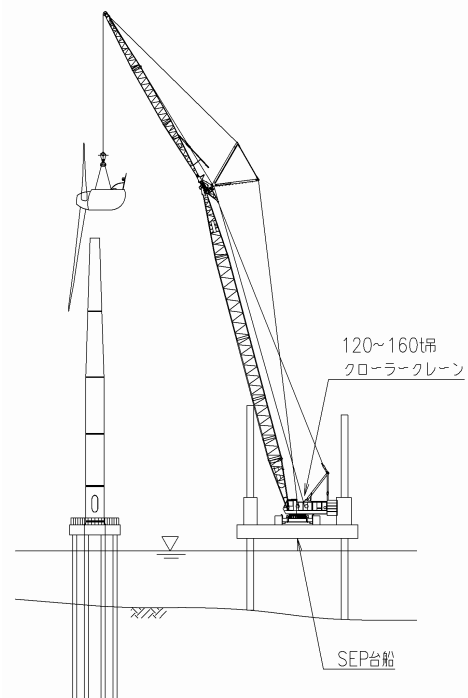


図-2.4 SEP 台船による洋上風車建設

a) 故障により風車が危険にさらされる状態

風車に故障が生じ、その故障により直接的に風車が危険にさらされる（設計上の限界状態にいたる）状態としては、①ピッチ制御の故障、②停電、③ローターの過回転の3種類を想定しており、風車がこれらの状態になると風車を停止させるようにシステムを構築した。

b) 設計上考慮する荷重ケース

安全・制御システムを踏まえて、設計上考慮する荷重ケースとして以下を検討した。

- ・耐風速時に風車が故障するケース
- ・任意の風車の状態と発生荷重状態の組み合わせ
- ・原因の異なる2つ以上の独立した風車の故障は、同時に発生しないものとする。

c) フェールセーフ設計

一般の機械や装置同様に、風車では制御システムの故障および使用者の誤操作を前提に設計することは重要である。ここでは、故障および誤操作による障害が発生した場合に、常に安全側に制御するフェールセーフ設計を行い、不適切なシステムの機能や、回路の機能不全、操作ミスによる破壊につながる機能低下を防ぐため、下記の制御機能を持たせた。

①主要パラメータをシステム（ソフト）とハードの両面で制御するリタナダントコントロール

- ・風車制御システムでは、ローターと発電機の回転数、ピッチ角、風速・風向、温度、油圧、振動、電圧、電流、周波数、主ケーブルのねじれなどのパラメータをチェックする。
- ・ローターと発電機の回転数、過大な振動、電圧、電流、周波数、風車制御装置の故障、非常停止ボタンについては、リレーを使用して風車を停止させるハードワイヤによる安全回路を設置した。

②システムの独立したブレーキシステムを導入して、万一の事態でも風車停止を可能とした。

③電気システムの安全に対しては以下を配慮した。

- ・ローターブレーキやヨーブレーキは、停電時に風車安全状態に移行する。
- ・全てのリレーは、停電時に安全回路を遮断させることで安全側に移行する。

④油圧システムの安全に対しては、停電時に風車安全状態へ移行するように、ブレードはフェザー状態に移動させ、メカニカルブレーキの作動およびヨーブレーキはフルブレーキ状態とした。

(2) ブレーキシステムの概要

風力発電のブレーキシステムとして、ローターの回転を抑制するブレーキと、ナセルを固定するヨーブレーキ

を設置した。安全を考慮して、停止時にはメカニカルブレーキを使い、ヨー回転時には油圧を半開放にして回転させるよう配慮した。

ローターのブレーキでは、ディスクブレーキによる高速ブレーキと、ブレードの受風角の制御により停止を行う。特に、高速ブレーキは、通常運転時以外の、商用電源の停止や制御装置の故障等の事故時において、制御システムでエラーを検知し、機構的にブレーキを動作させる仕様としている。

ヨーブレーキは、油圧を用いたブレーキと、ヨーモーターによるディスクブレーキにより、ナセルの回転軸を固定している。ローターブレーキ同様、事故時等においてブレーキを作動させる仕様としている。

(3) 制御装置

各種センサー、最適制御値の計算、風車制御、モニター出力などを総合的に関連させたシステムを構築した。常時発電状態を監視すると共に、各種センサー情報をリングバッファを用いて収集し、その情報をもとに最適な制御値を計算し、運転制御を行うこととした。

(4) 遠隔監視システム

風力発電の運転状態の監視や運転操作を、事務所などの遠隔地で実施するためのシステムを構築した。遠隔監視システムは、インターネット回線を利用して行うので、専用機器を必要とせず、汎用PCが使用できる。



写真-2.3 杭施工



写真-2.4 基礎コンクリート施工



写真-2.5 タワー架設



写真-2.9 ナセル上架



写真-2.6 タワー最終ブロック架設



写真-2.10 ナセル架設完了



写真-2.7 回転装置地組み



写真-2.11 ブレード架設



写真-2.8 回転装置の架設



写真-2.12 架設完了

3. 現地実証試験

3.1 概要

(1) 試験サイト

風車建設に先立つ事前風況観測を、東京湾沿岸の富津市に位置する風車設置サイトで、2002年11月から2003年10月までの1年間にわたって実施した。観測結果は、東京湾口に位置する常設洋上風観測点であるアシカ島観測塔における同時期の観測結果と比較検討した。

図-3.1に、富津およびアシカ島の両観測点位置を示す。アシカ島観測塔は、岩礁上に建設された施設であり、平

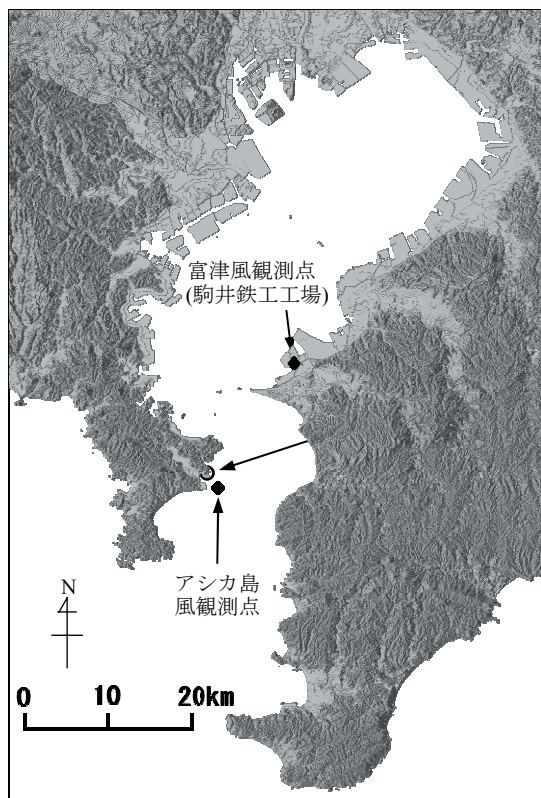


図-3.1 風況観測点位置図



写真-3.1 上から見た風車と風観測ポールの位置関係

均海面上13.5mの高さに超音波式風向風速計が設置されている。富津サイトでは、地上高20mおよび30mの2観測点で、三杯型風速計と矢羽根型風向計によって事前風況観測を行った。

その後、写真-3.1～写真-3.4、および図-2.1に示すように、実証試験としての風車と風況観測ポールを設置し、2007年より風況および発電量を観測している。



写真-3.2 風車と風観測ポールの位置関係

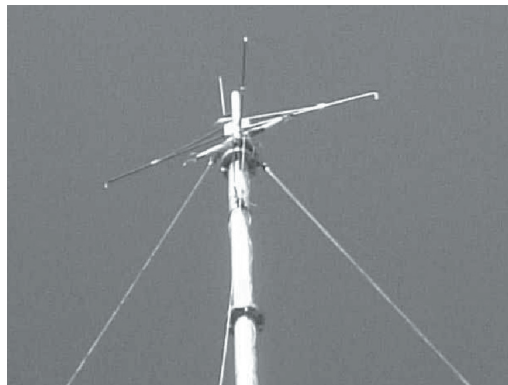


写真-3.3 風観測ポールの風速計と風向計の設置状況



写真-3.4 風車の外観

(2) 試験サイトにおける風況

図-3.2は、2002年11月～2003年10月までの月平均風速を示したものである。各観測点の月平均風速は、いずれの季節においても、アシカ島・富津30m・富津20mの順の大きさであった。アシカ島は富津よりも観測標高が低いにもかかわらず、強い風を観測しているのは、富津における風は陸上の地形や建物の影響を受けているためであると考えられる。

図-3.3に、各観測点の風配図を示す。富津の風向は、20m高度と30m高度でほぼ一致しているが、アシカ島とは若干異なり、アシカ島ではよく見られるNおよびSからの風が見られない。南北方向に強い遮蔽を受けていることがよくわかる。

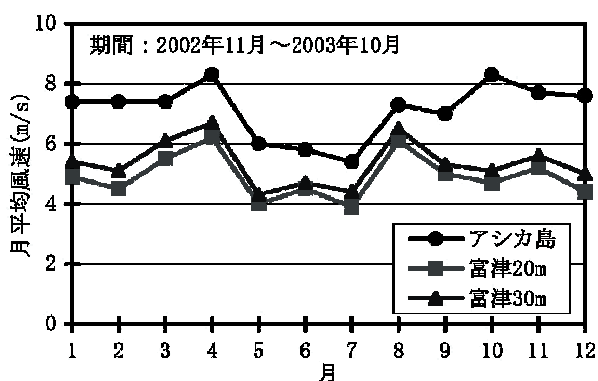


図-3.2 月平均風速 (2002年11月～2003年10月)

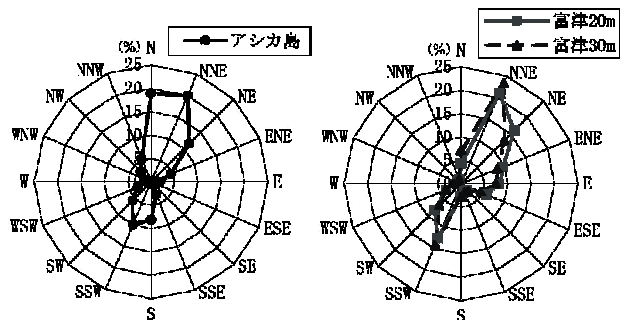


図-3.3 各観測点の風配図 (2002年11月～2003年10月)

3.2 観測結果

(1) 観測された風向・風速・発電量

図-3.4～3.7に2007年3月から10月にかけての実証試験結果を示す。ここでは、3月1日から10月31日までの連続観測情報を、10分間毎の統計量として整理を行い、観測ポール上で測定された10分間平均風向風速(風速A)、風車背後の風向風速計で測定された10分間平均風向風速(風速B)、および10分間の平均発電量を、それぞれ経時変化図としてとりまとめている。

図-2.2の風車のパワーカーブに示されるように、カット

イン風速は3m/s、カットアウト風速は25m/sであり、風速が11.7m/sから25m/sの際に、定格の発電出力が得られるようになっている。図-3.4～3.7はパワーカーブとよく対応しており、風速3m/s以下では発電量は概ねゼロとなっており、風速が12m/sを超えると発電量は300kW弱程度の一定値となっている。ただし、安全制御が過敏に機能しすぎた結果、定格出力が期待される風速12m/s以上の強風時において、しばしば風車の運転が停止したことには注意が必要である。強風時における制御システムの改良は、今後の課題として残された。

4. 実証試験結果の考察

4.1 パワーカーブ

図-4.1は、毎時の風速観測データと図-3.4～3.7に示す実証試験の結果から得られたパワーカーブであり、永井ら(2005a)にならった発電効率Aのパラメータをあわせて示している。風速3m/sから12m/sの領域では、発電量は風速の3乗に概ね比例するため、わずかな風速の相違が、きわめて顕著な予測発電量の差として現れていることが、図からよく理解できる。本風車の発電効率Aは、定格前の風速11m/s以下の範囲では0.3程度の値を示し、沿岸風力照明システム用の小型風車における実証試験結果(永井ら, 2005)とほぼ近い効率であった。また、図-4.1は、図-2.2のパワーカーブと極めて近い形状を示している。すなわち、本実証試験で用いられた風車は、想定する風車のパワーカーブ通りの発電をしていることが実証された。なお、図-4.1の定格発電量は300kWを若干下まわっている。これは発電機回転数とピッチ角の安定化のための制御システムによるものであるが、現在調整中である。

4.2 風速階級別の発電量の評価

表-4.1に、図-4.1に示されるパワーカーブを考慮した、図-3.5～3.8の再整理結果を示す。10分間平均観測値が34,937観測数ある中で、観測ポール上のA地点風速がカットイン風速である3m/s以下となり、発電量がゼロであった観測数は、7,239であった。すなわち、試験期間中の21%は、風が弱いため発電システムが休止していたことになる。この階級の総発電量が完全にゼロにならず210kWhという値になっているのは、10分間平均風速として整理したためであると思われる。すなわち、平均風速では3m/s以下であっても、10分間中に3m/s以上の風が数分程度継続すれば、風車は発電を行うと想定される。

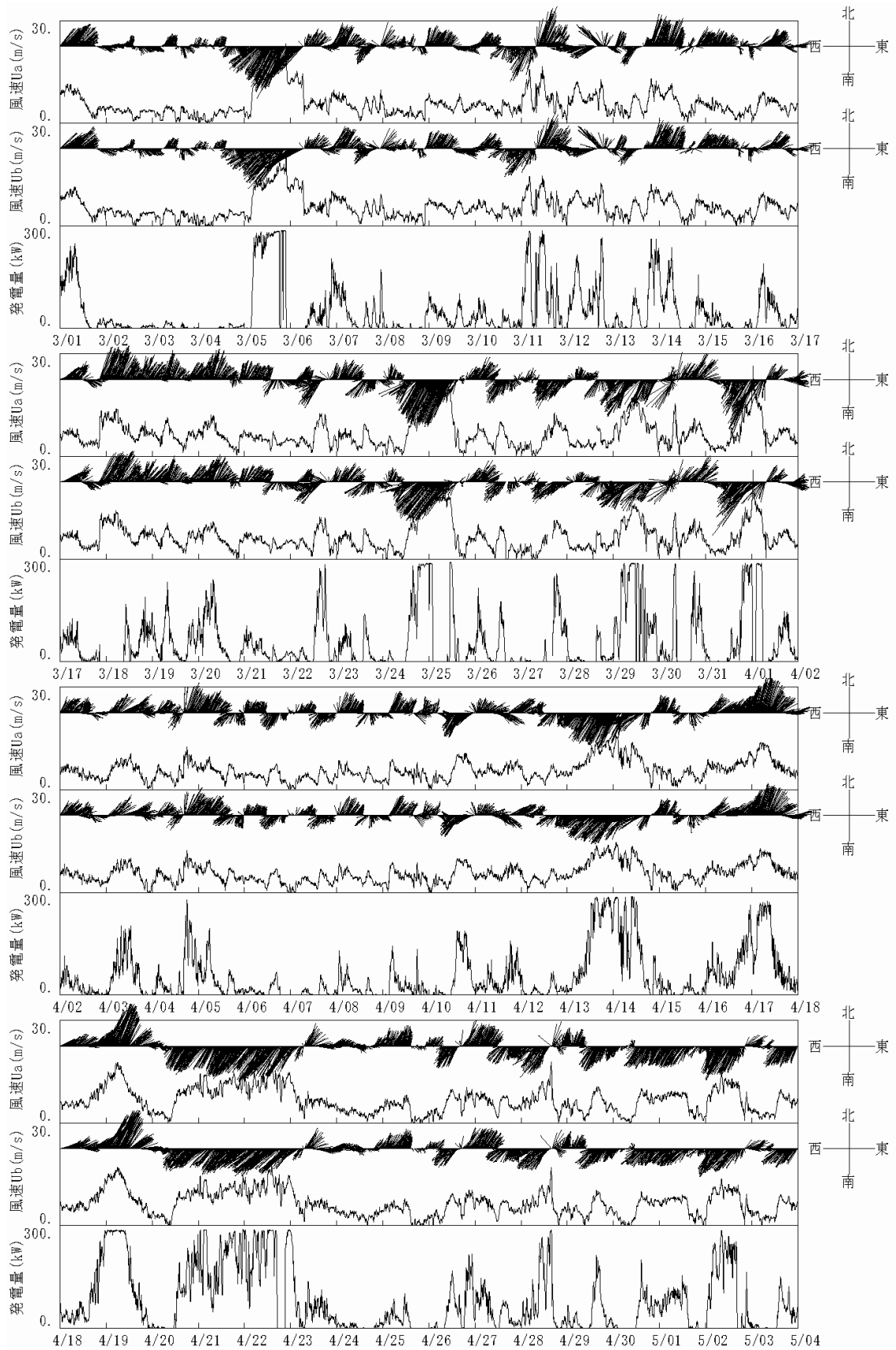


図-3.4 観測された風向風速，発電量 2007年3月1日～5月3日
 (風速 U_a は観測ポール，風速 U_b は風車背後ナセル上の風速)

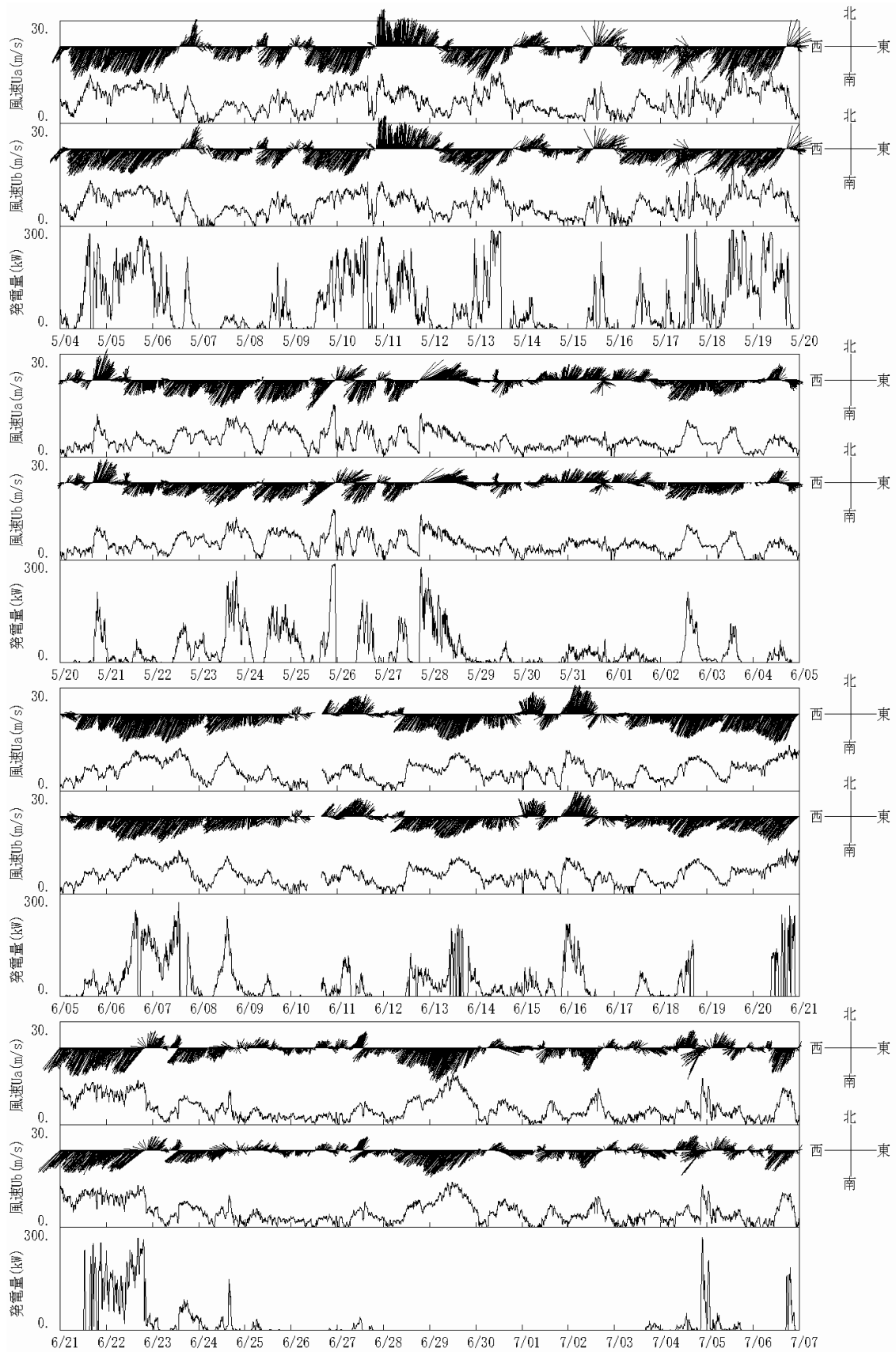


図-3.5 観測された風向風速, 発電量 2007年5月4日~7月6日
 (風速 U_a は観測ポール, 風速 U_b は風車背後ナセル上の風速)

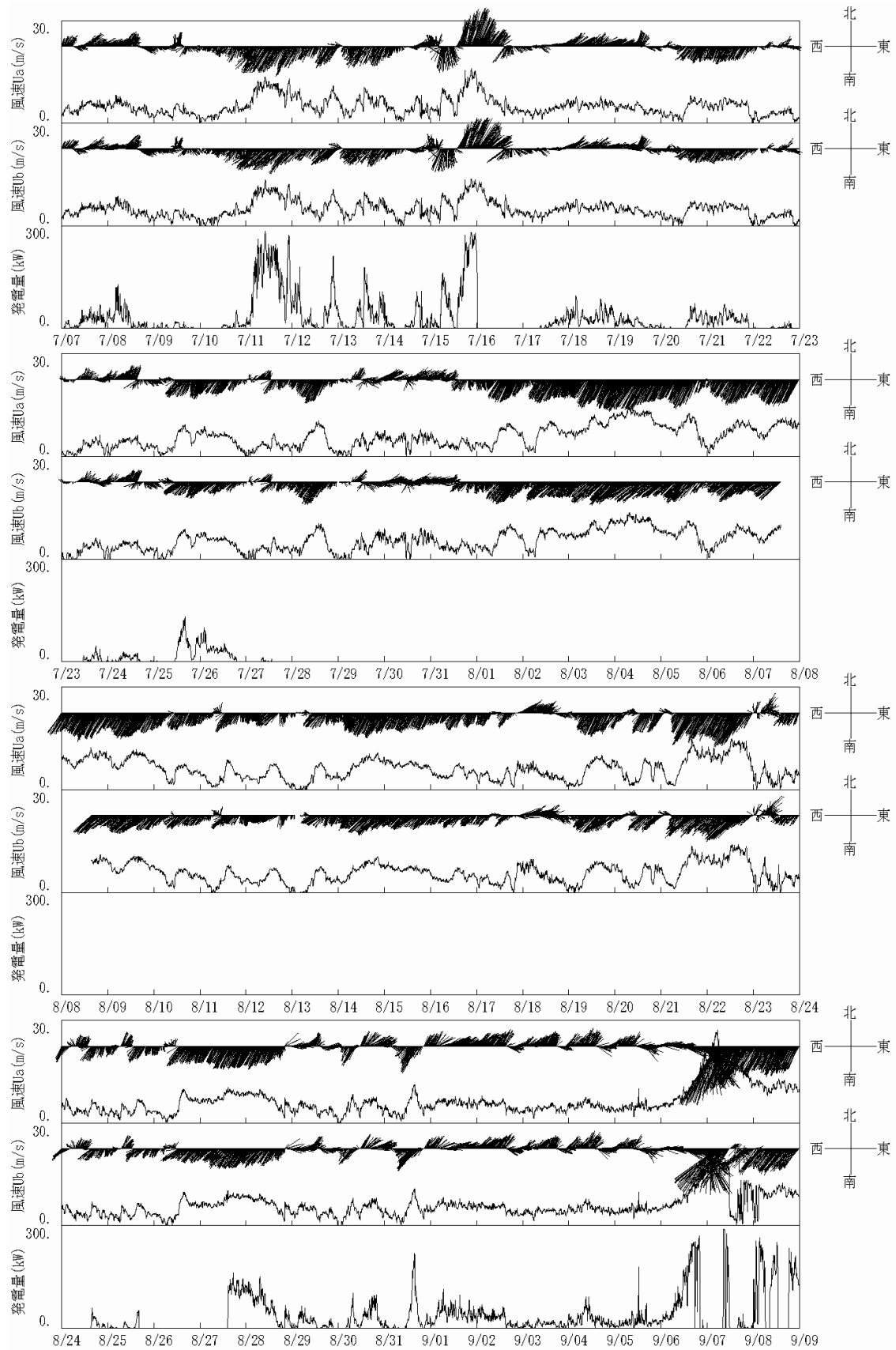


図-3.6 観測された風向風速, 発電量 2007年7月7日~9月8日
 (風速 U_a は観測ポール, 風速 U_b は風車背後ナセル上の風速 2007年7月~8月)

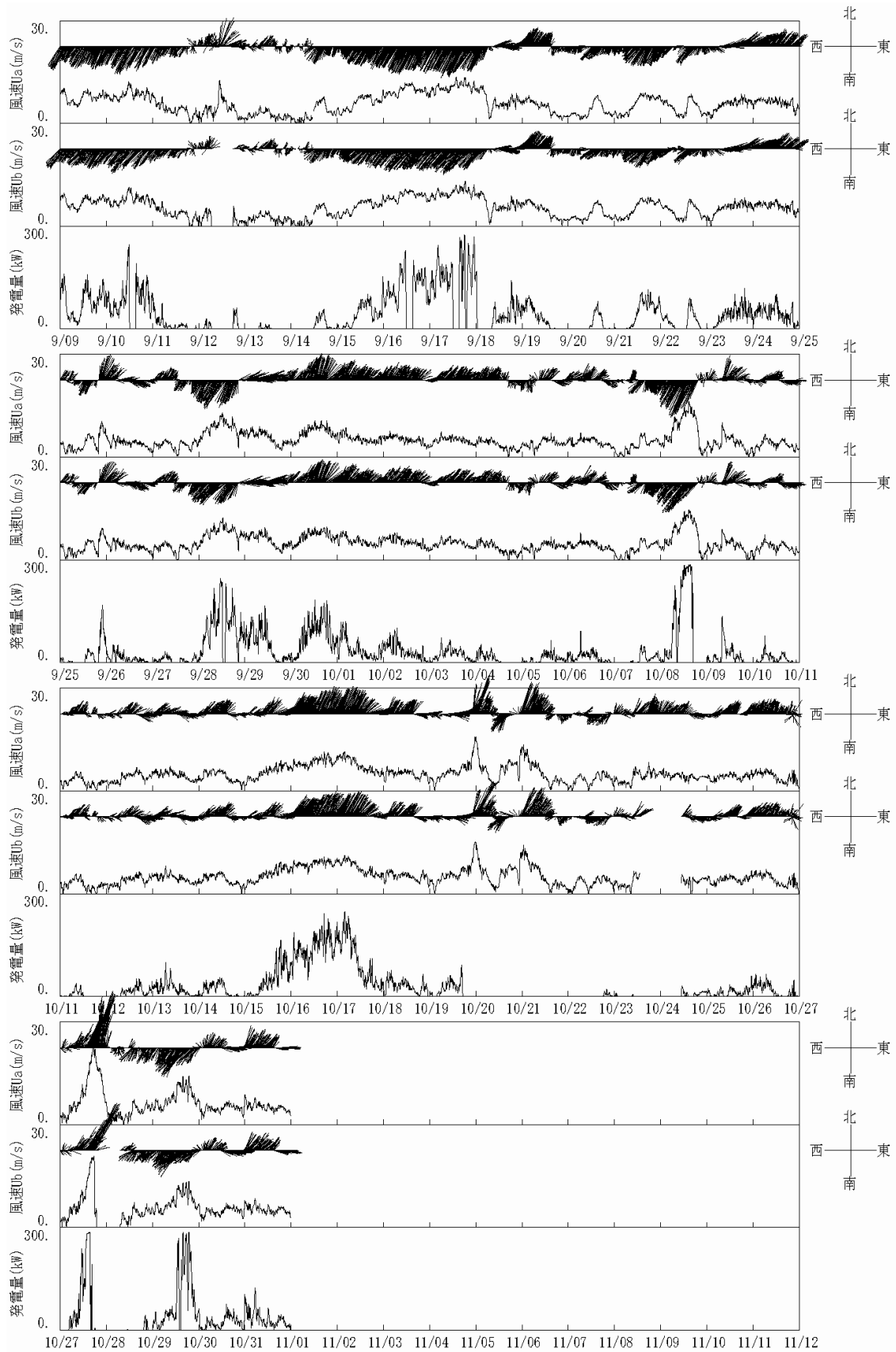


図-3.7 観測された風向風速，発電量 2007年9月9日～10月31日
 (風速 U_a は観測ポール，風速 U_b は風車背後ナセル上の風速)

他方、本発電システムが定格出力することが期待される風速 12m/s を超える観測数は 1456 であり、試験期間中の 4%の期間にすぎなかったが、この短い延べ 243 時間の期間中に、229,353kWh の全期間を通じた総発電量の 17% にあたる発電量が得られており、風況によって変動する風力発電量の時間的な偏在性が、改めて確認された。風速 12m/s 以上の強風状態において、平均発電量が定格値の 300kW よりもかなり低い 159kW となったのは、3. で述べたように、安全制御が過敏に機能しすぎた結果、定格出力が期待される風速 12m/s 以上の強風時において、しばしば風車の運転が停止したためであり、強風時における制御システムの改良は、今後の課題として残された。

風速 3m/s から 6m/s の間の、比較的弱い風況となった観測数は、13,846 観測であり、延べ 2308 時間（試験期間中の 40%）と多かったものの、この風速階級における総発電量 31,687kWh は、全期間を通じた総発電量の 14% にすぎず、カットイン風速の設定が風速 3m/s であっても 6m/s であっても、システムの総発電量には、大きな差を与えないことも明らかにされた。ただし、わずかながらであっても発電を継続するシステム稼働率といった観点からは、カットイン風速の設定が風速 3m/s である場合と 6m/s である場合とでは、40%の相違があることには注意を要するので、システムの目的に合わせた適切なカットイン風速の設定が、望ましいものと思慮される。

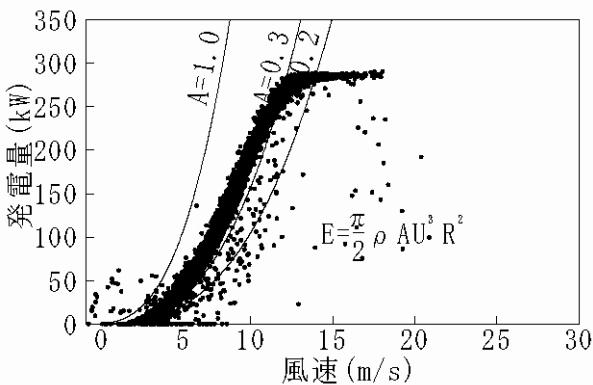


図-4.1 パワーカーブの実証結果

表-4.1 風速階級別出現度数と発電量

A地点風速 (m/s)	出現回数	平均発電量 (kW)	総発電量 (kWh)
0-3	7,239	0	210
3-6	13,846	14	31,687
6-9	8,603	57	81,020
9-12	3,793	123	77,918
12-	1,456	159	38,518
合計	34,937	-	229,353

4.3 風車による背後風速の減衰

(1) 観測ポールと風車背後の風速の関係

効率的な発電を行うために、風車は常に風の来襲方向を向くように方位制御されているため、風車背後の風速は風車によって風力エネルギーの一部が消費されて風速が小さくなっているものと考えられる。風車前面と風車背後の風速の関係を調べるため、ここでは図-4.2のように領域を区分して風車前面と風車背後の風速を比較した。

すなわち、風況観測ポールで観測される風速（風速 U_a ）と風車背後のナセル上で観測される風速（風速 U_b ）との関係を整理する際、観測ポールが風車の風上に位置する“領域 a”，海側から風が来襲する“領域 b”（海風）、観測ポールが風下側に位置する“領域 c”，陸側から風が来襲する“領域 d”（陸風）に分けた。

“領域 a”の場合には、さらに、範囲を狭めて、範囲が 45度の“領域 e”と 20度の“領域 f”についても検討した。この場合、観測ポールを通った風が風車を直接通過するため、風車前面と風車背後の風速を直接比較することができるものと考えられる。逆に、“領域 c”の観測ポールが風下側に位置する場合は、観測ポールでの風速 U_a 、風車背後のナセル上の風速 U_b のいずれもが、風車を通過した風を計測しているものと考えられる。

図-4.3 にそれぞれの領域での、観測ポール（風速 U_a ）と風車背後の風速（風速 U_b ）との相関を示した。図中には、10 分間平均風速の観測数 N 、風速 U_a と風速 U_b の平均的な比を意味する回帰直線の傾き S を表示している。

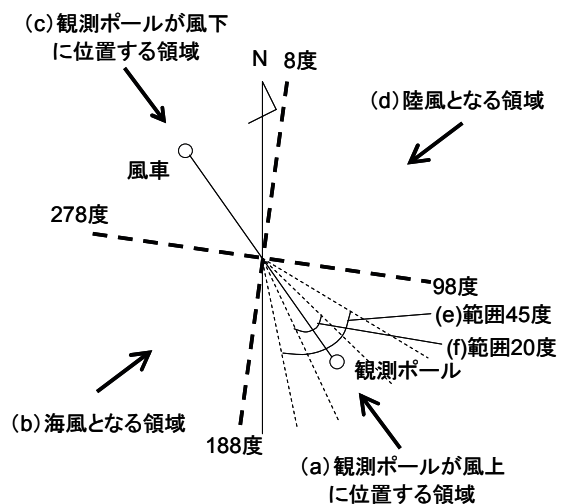


図-4.2 観測ポールと風車の位置関係 領域区分

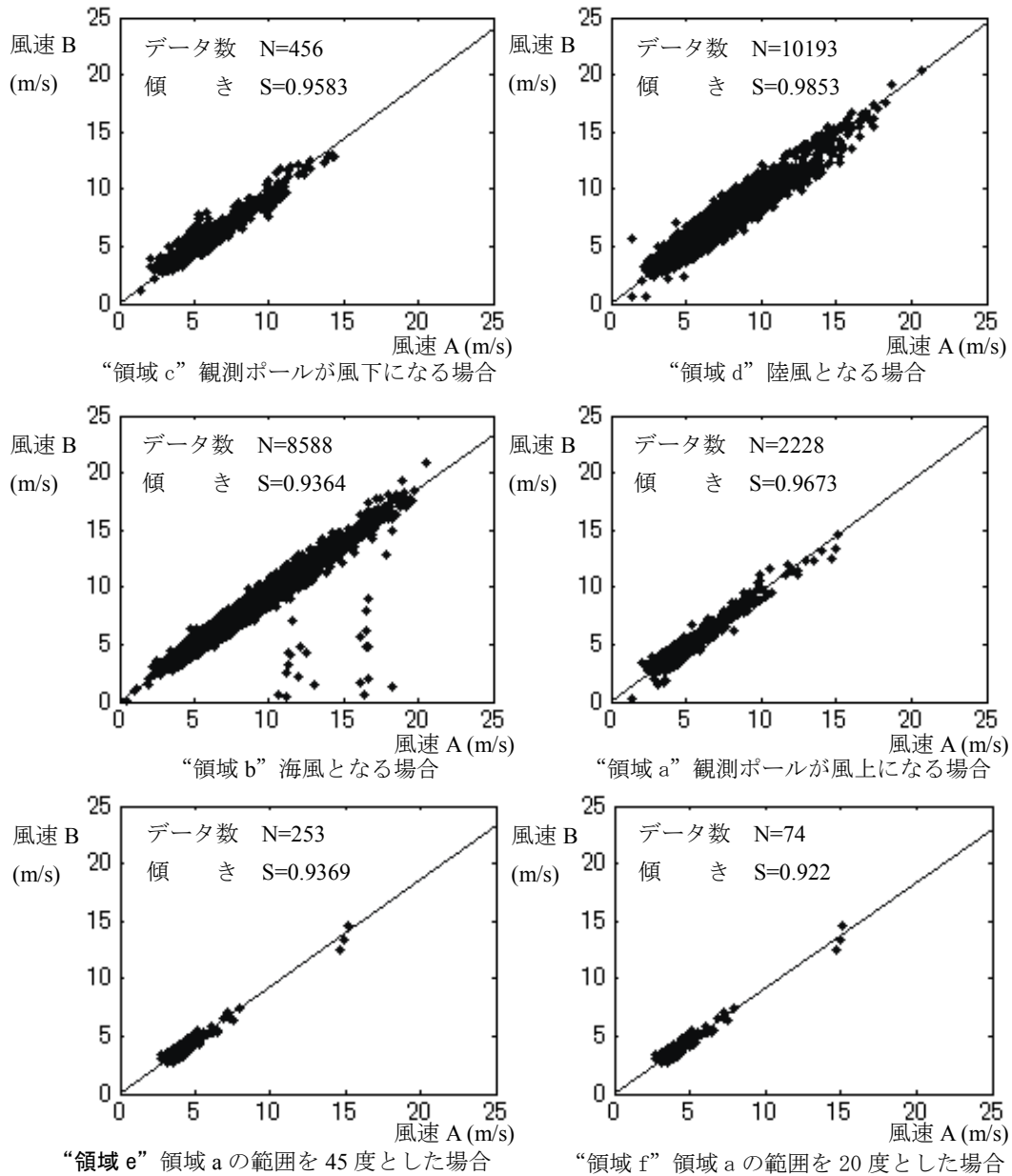


図-4.3 方位別の風速 A (観測ポール) と風速 B (風車背後のナセル上) の比較

次に、それぞれの領域の回帰直線の傾き S に注目してみる。観測ポールが風上にある“領域 a”では傾き S が 0.9673、風下にある“領域 c”では 0.9583、“領域 b”の海風の場合は 0.9364、“領域 d”の陸風の場合は 0.9853 となっており、いずれの場合も風車背後の風速 B の方が、風車を通過していない風速 A よりも小さくなっている。

さらに、“領域 a”の幅を 45 度狭めた“領域 e”と 20 度狭めた“領域 f”の図を見てみると、風速 B はさらに小さく、それぞれ 0.9369 と 0.922 となっている。この場合、観測ポールを通った風が風車を直接通過しているものと考えられ、風車による風エネルギーの低減効果を直接示しているものと考えられる。

(2) 風車による背後風速減衰に関する考察

永井ら (2006b) は、白石ら (2005) による瀬棚港沖合洋上風車に関する実測データをもとに、風車の裏側で測定した風速について、風車によるエネルギーロス を考慮して風車前面に襲来する風速を想定している。すなわち、風車前面の風エネルギーを E_f 、発電量を E_j 、風車背後の風エネルギーを E_b とするとき、エネルギー保存式である式 (1) を仮定する。

$$E_f = E_b + E_j \quad (1)$$

一般に、風エネルギー E は、式 (2) に示すように風速

U の3乗に比例する。

$$E = (\pi/2) \rho U^3 R^2 \quad (2)$$

ここに、 ρ は空気密度 (1.226kg/m³)、 R は風車ロータの半径 (23.5m) であり、 πR^2 は風車前後を空気が通過する断面積を意味している。式(1)は、発電されずに熱や騒音として消費されるエネルギーを無視するとともに、風車のロータ回転円よりも外側における風速の変化を考慮しておらず、空気の質量保存も満足しない、近似的かつ大胆な仮定の上に提案された式である。しかしながら、一般に風力発電システムを計画・設計する上で、単独の風車建設にとどまる本実証試験のような事例はむしろ稀であり、一般的には風車群による発電が行われることになる。この際、風車群中の合理的な風車配置計画を算定するためのめやすの必要性から、式(1)は提案されたものである。ここでは、この関係式をもとに、本実証試験結果の評価を試みた。

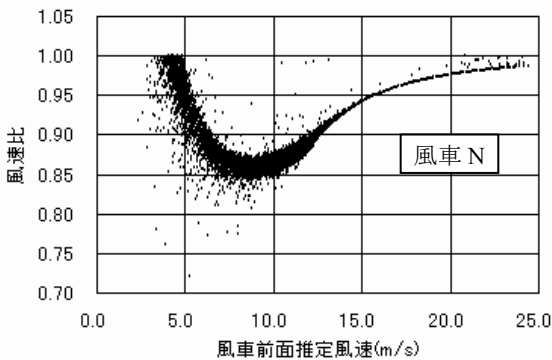


図-4.4 風車背後の推定風速比 (瀬棚港)

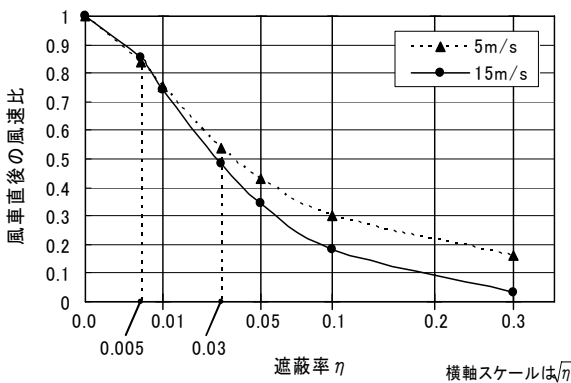


図-4.5 遮蔽率 η と風車前後の風速比

(3) 瀬棚における過去の検討事例との比較検討例

瀬棚港で実際に運用されている洋上風車の発電実績データと風速観測結果をもとに、前面推定風速に対する風車背後の風速比を算定した結果を、図-4.4 に示す (白石

ら, 2005)。風速比は風速 7-11m/s の範囲で極小値である 0.87 程度の値をとり、この範囲を離れると、より大きい値となっている。この結果は、風車前後で風速変化が小さかった光波レーダによる観測結果を裏付けるものであった。

白石ら (2005) および永井ら (2006) は、さらに、図-4.4 で得られた風速比の推定結果を、風車の影響を風況シミュレーションに反映させるため、風車周辺の気流分布の推定法を提案している。すなわち、風車を地表面付近の気流障害物の一種としてとらえ、 $k-\epsilon$ モデルをベースに「局所的風況予測モデルの開発」(日本気象協会, 2003) に示された植生 canopy モデル (加藤ら, 2001) の考え方をふまえて、平均流に対する樹木の風速低減効果に相当する項の設定を試み、気流の遮蔽率に相当するパラメータ η (植生モデルにおける格子体積に占める樹冠部分の体積比) を提言した。 η が 1.0 の場合は完全に遮蔽 (透過せず)、0.0 の場合は完全透過である。 η の適切な値については、式(1)と(2)を仮定して、瀬棚港における実際の風速データと発電量データから得られた風車背後の推定風速比を示す図-4.4 をもとに試みた。

図-4.5 は、洋上風車前面に作用する風速を 5m/s および 15m/s に仮定し、それぞれの風速に対応した遮蔽率 η と風車前後の風速比の関係を、シミュレーションによって求めたものである (永井ら, 2006)。横軸には η を示し、 η を 0.0 から 1.0 の間で変化させた。図-4.5 からわかるように、図-4.4 で得られた風速比 0.87 程度に相当する η は、風速 5m/s の場合であっても、15m/s の場合であっても、概ね 0.005 程度の値となっていることがわかる。すなわち、風速 5-15m/s の範囲では、風速によらず、 η を概ね 0.005 程度に設定できることがわかる。

図-4.6 は、本試験で得られた風速比である。ここでは、風速比を、(観測ポールでの風速 U_b) / (風車背後での風速 U_a) として定義した。(a) は全ケースであり、(b) と (c) は観測ポールが風車の風上に位置する場合である。(b) と (c) は、図-4.3 の“領域 e” の範囲 45 度、“領域 f” の範囲 20 度のケースに、それぞれ相当する。

観測ポールが風車の風上に位置していたケースが少なく、特に風速 8m/s 以上のデータが得られなかったため、瀬棚港で得られた図-4.4 との整合性を、必ずしも十分には確認・検証するには至らなかったものの、図-4.6 (b), (c) を見ると図-4.4 に近い、プロットの分布を示していることがわかる。なお、 η を 0.005 に仮定した図中の曲線が、図-4.6 (b), (c) では概ねプロット群の上限の包絡線となっているのは、式(1)の発電以外にも振動や熱等のエネルギーロスがあることを反映しているものと考えられる。

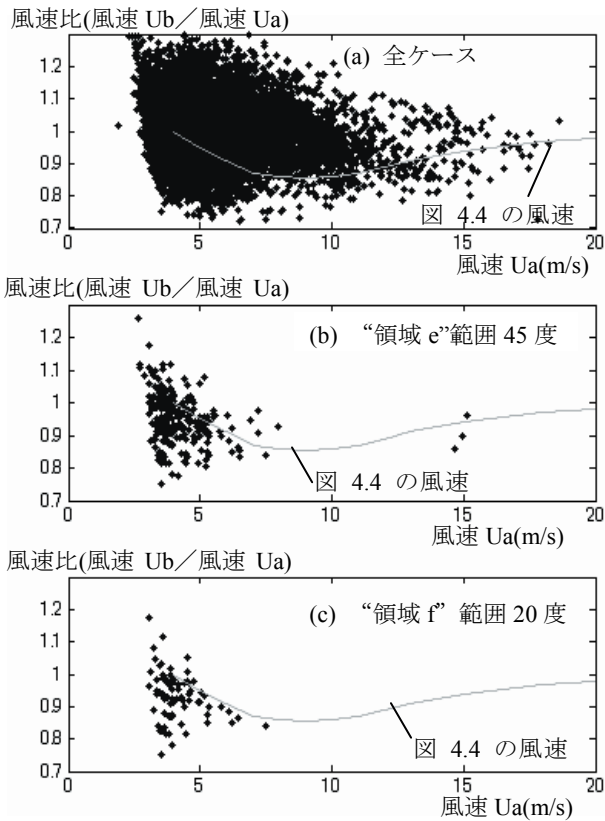


図-4.6 本実証試験での風速比

4.4 騒音評価

風車騒音計測については、JIS および IEC の要求に基づき実施し評価した。本実証試験における測定結果から、ローター中心における見かけの音響パワーレベルは評価風速 10m/s で 103dB になり、大型風車の標準的な値の 110dB より小さい値であることが確認できた (図-4.7)。

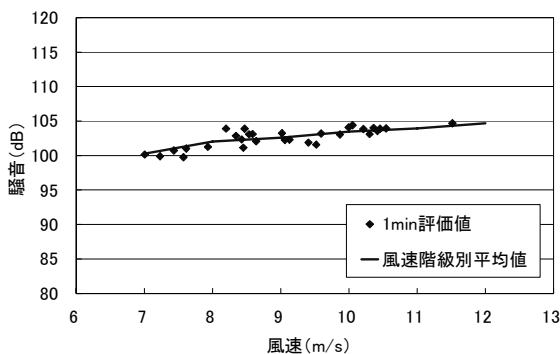


図-4.7 騒音測定による風車騒音の推定

4.5 塩害対策

洋上部や沿岸部に風力発電設備を建設する場合は、さらに塩害対策を配慮することが重要な課題である。

本実証試験におけるプロトタイプは、護岸部からの離

隔が 20m 以内の位置に建設されており、塩害が生じやすい立地条件下にある。このため、換気方式は空冷であるが塩害の可能性を考慮して以下の対策を施した。

- ① ナセルにおいて換気口は風下側に向けて配置する。
- ② タワー下の換気には海側の岸壁とは反対側に設置する。
- ③ 換気口には外部からの水の浸入を防ぐため、フードおよびフィルターを取り付ける。

上記対策の効果を確かめるため、塔内付着塩分量の計測を行った。計測結果を表-4.2、4.3 に示す。20年間の堆積付着量として換算した塩分付着量は、汚損区分で最も塩分付着量が少ない一般区分であり、本風車は塩害に比較的強い風車であることが推察される。ただし、塩害による機器への影響や電気製品への影響度合いは、まだまだ未知な領域が多く今後も経年的な計測をしていくことが望ましい。

今後の塩害対策の課題としては、基礎やタワーに対して重防食塗装を施すことや、電気防食などの腐食対策を行うことを検討している。さらに、風車機器への塩害対策は重要な検討項目である。対策としては、開口部へ塩害仕様フィルターの設置や、風車ナセルの密閉度を上げるような簡易的方法や、エアコンディショナー設置などにより、ナセル内と外気を完全に分離する方法などがあり、これらの対応も今後の検討課題である。

表-4.2 実証試験風車の塔内付着塩分量測定結果

暴露期間 (日)	付着塩分量 (mg)	塩分付着量 ^{*1} (g/cm ²)	汚損区分
25	0.12	2.4×10^{-4}	一般
82	0.40	2.4×10^{-4}	一般

※ 1: 20年間の堆積付着量として換算

表-4.3 汚損区分 ((社) 電気協同研究会(1964) より)

汚損区分	塩分付着量
一般	0.01 g/cm ²
A	0.03 g/cm ²
B	0.06 g/cm ²
C	0.12 g/cm ²
D	0.35 g/cm ²

4.6 安全・制御システムの検証

2007年9月6日から7日にかけて、台風0709号が関東地方を通過した。図-4.9はその時の実証試験における発電出力および風速の時系列を示したものである。図より、風速が徐々に高くなり、カットアウト風速である 25m/s を超えると同時に、風車制御システムが作動し、

カットアウトしたことが確認でき、安全制御システムが稼動したことがわかる。しかしながら、前述した表-4.1で紹介したように、安全制御が過敏に機能しすぎている結果、定格出力が期待される風速 12m/s 以上の強風時において、しばしば風車の運転が停止し、強風時に定格発電が継続できない問題点は残されているので、強風時における制御システムの改良は、今後の課題として残されている。

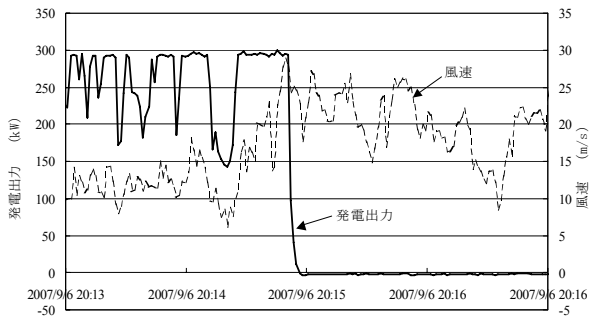


図-4.9 カットアウト状況

5. 課題と将来展望

5.1 サンドバイパスへの応用

(1) 背景と目的

日本では、ダムや港湾・漁港における土砂の堆積や河川からの供給土砂量の減少や海岸・港湾構造物による沿岸漂砂量の減少などによる海岸侵食など土砂に関する様々な問題が生じている。

これらの問題に対して局所的な観点のみで解決を図ると、対象となっている領域では問題が解決しても、それが別な領域における新たな問題の発生を引き起こすことがある。そこで、広域的視点から海岸侵食に取り組むことが改正海岸法の下で定められた海岸保全基本方針で示されるとともに、河川上流から海岸までの広域かつ連続的な土砂の流れを考慮した「総合的な土砂管理」が提唱され、今までにそれらに関するいくつかの調査研究が実施されてきた（例えば、加藤ら(1985)、栗山(2001)、佐藤ら(2004)）。

「総合的な土砂管理」の観点から注目されている工法としてサンドバイパス工法がある。これは、土砂を堆積している領域から不足している領域に人工的に輸送するものであり、沿岸におけるサンドバイパス工法は、河川からの流下土砂量が増加した場合に懸念される港湾・漁港の航路・泊地における埋没対策工法となるとともに、海岸侵食の生じている領域では、構造物を少なくしてよ

り自然に近い状態で海岸を防護する工法となりうる。

反面、本工法は、定期的・定常的に土砂を移動させなければならない、土砂をトラック等で輸送する際に、CO₂を排出して地球環境に負荷を与えるとともに、交通渋滞や騒音等の問題を起こす可能性もある。こうした問題に対しては、輸送に伴うエネルギーとして、現地の風力等のクリーンエネルギーを活用し、必要最小限の土砂輸送を半自動的に行うことができるパイプを用いたスラリー輸送方式が、望ましい解決策の一つと考えられる。海浜および海面上は、障害物の多い都市とは異なり、安定した強い風が期待できるため、風力発電に適しているためである(永井ら, 2002)。

本節では、風力エネルギーを利用したサンドバイパス工法の可能性を検討するため、関東地方近郊の太平洋に面した海岸を想定し、土砂輸送量の想定の下で、定常的なサンドバイパスを可能とするシステムの試設計を行った。そして現地実証試験データを基に、必要電力量の試算とその電力をまかなう風車システムについて検討した。

(2) 有孔管土砂輸送工法の原理と概要(野口, 2006)

a) 工法概要

サンドバイパス工法において、砂を集積する場所は、砂の堆積している場所に設定される。砂の集積装置は原則として移動せず、波等により集まる砂を海水とともに集積装置内に取り組み、そのまま土砂水流として、パイプラインによる輸送を行うものである(図-5.1)。

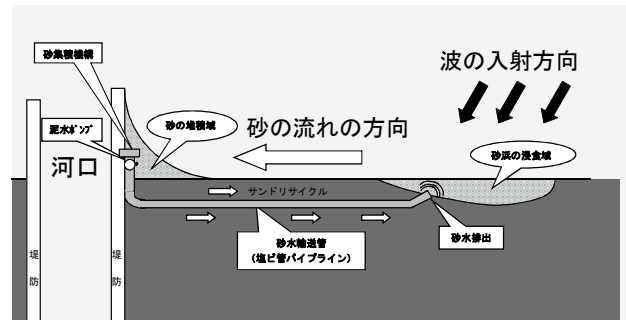


図-5.1 有孔管土砂輸送工法概要平面図

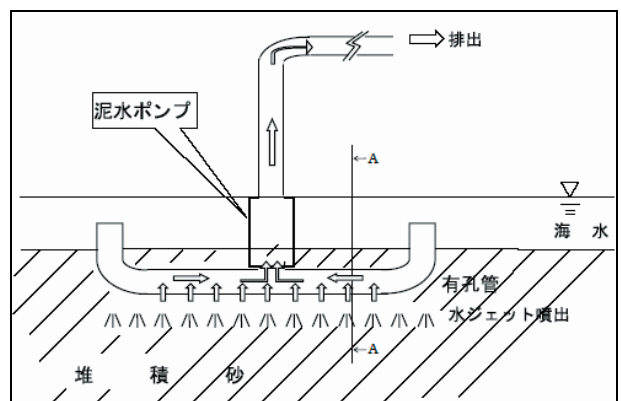


図-5.2 砂集積装置部概要図(正面図)

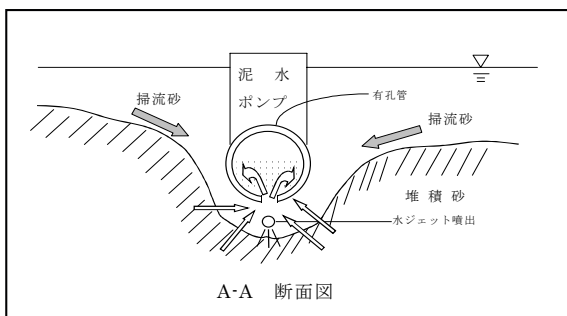


図-5.3 集積装置概要 (A-A 断面図)

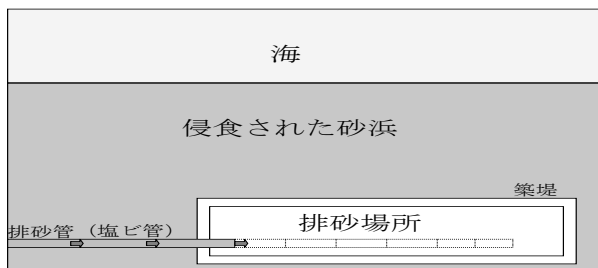


図-5.4 排砂場所平面図

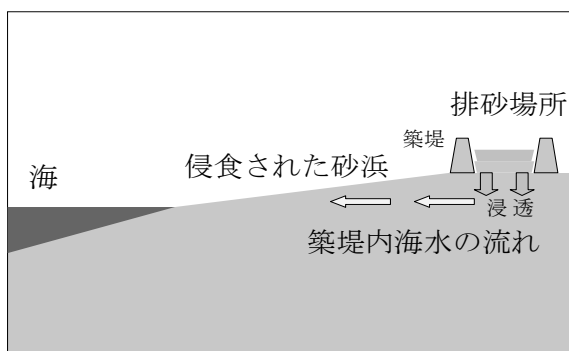


図-5.5 排砂場所断面図

b) 砂の集積装置部

砂の集積に用いる有孔管の下部に、沈設及び周囲の砂を流動化させるための水ジェット口を並べておく (図-5.2)。有孔管の中央部は、管に搭載された泥水ポンプに接続されている。両端部は、通水用の孔を設け海水中に通じている。

水ジェット噴出口よりジェット水を噴出させると、下部の砂が流動化し、有孔管がその自重 (含むポンプ等重量) により砂の中へ沈下していく。泥水ポンプを稼働させると、流動化した砂が、有孔管の孔を通して、管内に海水と混合して流入する (図-5.3)。砂と海水が混合した泥水は有孔管内を流れて泥水ポンプに吸引され泥水ポンプから排砂管を通して排砂場所まで輸送され排出される。

波が作用する場所では、装置が自沈して形成された窪みに周囲から砂が掃き流されて流入する。装置の自沈が進行するにつれて窪みも大きくなり窪みに流入する砂量も多くなり、吸引する砂量と流入砂量がバランスした時

点で装置の自沈は進行しなくなる。

砂の集積場所は、波の力を利用して砂を集積する点では、「①汀線付近」の波打ち際が望ましい。しかし「②砂浜 (陸域)」及び、浚渫船が近づけないような「③狭い水域、水深の浅い水域等」における施工も想定している。

c) 輸送管部

泥水ポンプから排出された砂と海水が混合した泥水は、硬質塩化ビニル管 (以下塩ビ管と記す) を用いたパイプラインを通して排出場所まで輸送される。パイプラインは、海浜の背後の陸上部に布設されることを想定している。

輸送管には流量計及び密度計 (含泥率を算出) を設置しておき、泥水流量、含泥率 (砂濃度) を計測し、これらのデータから砂流量を算定する。

d) 排砂部

侵食された海浜の陸側に築堤で囲われた排砂場所へ泥水を排出する (図-5.4, 5.5)。海水は、底面の砂層に浸透し、砂層でろ過され、ろ過されたきれいな海水は、海へゆっくりと浸出する。残った砂は築堤内に堆積される。排砂地点が堆積砂で盛り上がり塩ビ管を延長し、排砂地点を少しずつ移動させる。海開きの数日前にブルドーザを用いて、海浜の前面に押し広げる。

e) 期待される効果

期待される主な効果及び特徴を以下に記す。

- ①砂集積効果が継続的に発揮される。
- ②専用の移動機構は不要である。
- ③基本的な動力は、土砂水流の吸引・排出及びジェット水等供給用のポンプ動力だけであり、駆動部の少ない簡易な工法である。
- ④可搬式であり、機材はトラック等により簡易に陸上輸送が可能である。
- ⑤砂集積場所は、汀線付近の他、陸上及び狭水域等、汎用的に活用が期待される。
- ⑥簡易な装置・構造の工法のため、経済的である。

(3) サンドバイパス設備

関東およびその周辺において太平洋に面している遠州灘海岸や鹿島灘海岸などの沿岸漂砂量 (例えば, Sato・Tanaka(1966), 宇多(1997), 栗山(2001), Kuriyama・Sakamoto(2007)) を参考にして、本研究では、サンドバイパスで輸送する土砂量を 50 km^3 (粒径 0.2mm) と想定した。この量は、延長 500m 奥行き 100m 長さの砂浜に厚さ 1m の砂層を敷く量に相当する。サンドバイパス工法による土砂輸送期間としては、海水浴シーズン (7~8月) を避けた通年 (10 か月間) を想定し、土砂輸送距離とし

ては、1km 程度の距離を想定した。

これまでのフィールド実験では砂の輸送距離は 50～60m 程度であったため、泥水ポンプは主に出力 9kW のポンプを使用していた。1km の輸送距離を想定した必要揚程を計算すると 49.9m となり、37kW 泥水ポンプ（揚程 27m：流量 2.3m³/分）2 台使用するものとした。設備の諸仕様を下記に記す。

- ・泥水ポンプ（37kW）× 2 台（1 台は中継ポンプ）
- ・水ジェットポンプ：9.2kW
- ・波が無い場合の装置牽引ウインチ：1kW

これら設備の稼働に必要な電力は計 84kW となる。

システムの起動時には定格以上の電流が流れることや、システムの運転停止にあたっては輸送管内を水清掃し土砂の滞留を排除しなければならないこと等を考慮し、ここでは所要電力量に若干の余裕を見込むこととし、100kW 以上の電力供給がなされる時にシステムが順調に稼働して砂が集積・輸送される状態とした。電力供給量が 100kW 以下となる際には砂の集積を停止するため水ジェットポンプ及び牽引ウインチの稼働を止め、通水だけの状態として輸送管内の砂を排出させた後に泥水ポンプを停止させる運用状況を想定する。なお、輸送距離が 1km では、本設備では、砂が有孔管に集積され輸送・排出されるまでに 7.6 分を要する。

稼働時における本設備の土砂集積・輸送能力は 21m³/h と設定しているため、年間 50 千 m³ の砂を輸送するには 100kW（以上）の電力が供給される時間が、2,380 時間以上必要となる。これは、7-8 月を除いた 10 ヶ月の期間内での、100kW 以上の電力供給時間率が、33%以上であることに相当する。

(4) 風力発電設備の適用に向けての課題整理

a) 風力発電設備

土砂をトラック等で輸送することによる、二酸化炭素の排出や、交通渋滞・騒音などの問題を回避するため、風力エネルギーの活用を以下に検討する。ここでは、100kW 以上の電力供給をめざすが、風力発電設備は一般に時空間的に発電量の変動が大きいことため余裕を持った発電設備の設置が望ましいこと、および、こうした中規模の風力発電設備の市場は今のところ小さく風力発電設備の規模選択の範囲が限られていることを考慮し、沿岸域を対象として設計開発が進められている 2～4 章で述べた風力発電設備 1 式を設置することを与条件とし、以下の検討を進める。

この風力発電設備の概要は、2～4 章のとおりである。

4 章のパワーカーブ（入射風速と発電量の関係）より、サンドバイパス設備 1 セットを稼働させるために必要な

100kW の電力を得るには 7.84m/s の風速が必要と算定され、システム 2 セットを並行稼働させるための 200kW の電力を得るには 9.81m/s 以上の風速が必要であり、システム 3 セットを並行稼働させるための 300kW の定格電力を得るには 11.7m/s 以上の風速が必要と算定される。

b) 観測データに基づく風況の特性

近年、ナウファス（全国港湾海洋波浪情報網：NOWPHAS：Nationwide Ocean Wave information network for Ports and Harbors）の一環として、全国沿岸域における風観測データの蓄積と解析が進められつつある。

こうした中で、風力エネルギーは、沿岸域においては、空間的に変動が大きいため、風車の設置場所に応じて期待される発電量は、陸域と海域では大きく異なるものとなることが知られている。すなわち、洋上風は陸上風に比べて、一般に、平均的な風速が大きく、かつ、風況が安定しており、主軸および主軸直角方向の短時間内の風変動が小さく、安定的な電力を得るためには、洋上に風車を設置することが望ましい。

表-5.1 は、ナウファスによって観測された、関東地方における 4 風観測点、すなわち、常陸那珂（陸上）、鹿島（陸上）、第二海堡（東京湾内人工島）、アシカ島（東京湾内岩礁）の概要を示したものである。1996-2000 年の風観測データより、各地点の 7-8 月を除いた 10 ヶ月間のデータの測得率が 90%以上の年度のデータを対象として、各データを 1/7 乗則を用いて風車高さの 43.5m に高さ補正を行った。

これらのデータを、風力設備のカットアウト風速 25m/s も考慮し、100kW 以上の電力が得られる風速 7.84-25m/s の出現頻度、200kW 以上の電力が得られる風速 9.81-25m/s の出現頻度、定格 300kW 以上の電力が得られる風速 11.7-25m/s の出現頻度に整理したグラフを図-5.6 に示す。

図-5.6 で示すように、鹿島、常陸那珂の陸上観測地点では 100kW 以上の電力を得られる風速の出現頻度は設定目標の 33%に達しないが、アシカ島、第二海堡の洋上観測地点では 100kW 以上の電力を得られる風速の出現頻度は約 43%と設定の 33%を上回ることから風力発電設備が洋上に設置されると、本システムが成立し得ることが示された。

また、アシカ島、第二海堡の洋上観測地点では、200kW 以上の出力の出現頻度が約 28%、300kW 以上の出力の出現頻度も約 17%あることから、本設備を 2-3 セット設備しておき、風速に応じて 2～3 セット稼働のような運用形態とすれば、風力エネルギーの有効活用の点からは効率が向上する。

表-5.1 関東地方の4風観測点の概要

観測地点	アシカ島	第二海堡	鹿島	常陸那珂
観測場所	洋上	洋上	陸上	陸上
地上高(m)	13.5	7.0	10.0	29.5
使用データ年	'99-'00 (2年)	'96-'00 (5年)	'97-'00 (4年)	'96-'00 (5年)
測得率 (除7-8月)	98.0%	97.5%	99.9%	98.3%
年平均風速 (m/s) (除7-8月)	6.64 (6.57)	5.75 (5.88)	3.99 (4.04)	4.20 (4.30)
43.5m高換算係数	1.18	1.30	1.23	1.06

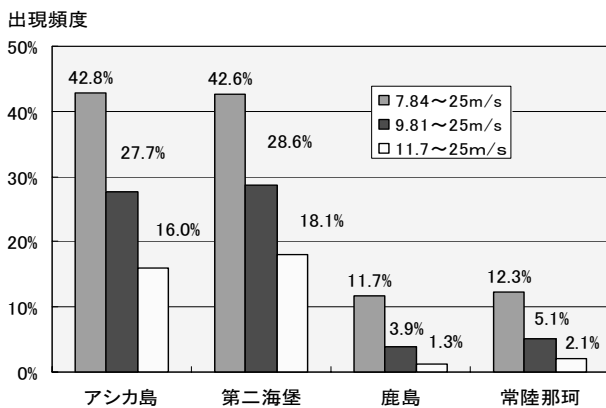


図-5.6 風速段階別出現頻度

c) 余剰電力の付加的活用

表-5.1 に示すアシカ島、第二海堡の洋上観測地点の風データ及び風力発電設備のパワーカーブを用いて、平均の年間期待発電量を試算すると、989MWh となる。サンドバイパス設備を一セット設け 5 万 m³ の砂を集積・輸送するための電力量は 100kW の設備を 2,380 時間稼働させる 238MWh であり、活用される電力量の割合は 24%と約 1/4 である。残りの余剰電力 751MWh の有効活用策として下記事項が考えられる。

①売電：系統連携がうまくいって売電できれば火力発電所への負荷を減らし、CO₂ 排出削減に貢献する。

②エネルギーの現地利用：系統連携がうまくいかず売電できない場合、現地利用の照明システム（蓄電システムと組み合わせ）等が考えられる。

d) CO₂ 削減効果

従来の一一般的なサンドバイパス工法である「バックホウ積み込み→ダンプトラック輸送」により 50 千 m³ の土砂を掘削・輸送する場合の毎年排出される CO₂ を試算した。

港湾土木請負積算基準により試算すると、バックホウ

(クローラ型山積み 1.4m³)は、延べ 100 台・日必要となり、消費される軽油は 16,900l と試算される。同様にダンプトラック(10 t 積)は、延べ 900 台・日必要となり、消費される軽油は 56,700l と試算され、合計 73,600 l の軽油が消費されることとなる。軽油の CO₂ 排出原単位を 2,623.0 kg-CO₂/kl とすると毎年の CO₂ 排出量は 193 トンに値する。

さらに余剰電力 751MWh を売電により有効に活用できれば発電による負荷軽減効果として、石油火力発電の CO₂ 排出原単位を 200g-CO₂/kWh とすると 150 トンの削減効果に値する。両者を合わせると 343 トン/年の CO₂ 削減効果が見込まれる。

なお、本節では風力と発電量の観点からサンドバイパス工法への応用を検討したが、今後コスト面における検討も必要である。

5.2 大型風車設置困難地域への活用

(離島の急峻な地形への設置の検討)

5.2.1 はじめに

わが国は多数の有人離島を有しており、それらの離島の電力系統は本土と連系しておらず、ほとんどが離島の独立電源により、需給関係をバランスさせる必要のある独立系統である。また、本土の発電が主に火力、原子力、水力発電などで発電しているのに対し、離島では液体燃料を用いた内燃機関、いわゆるディーゼル発電機で電力をまかなっている場合がほとんどである。

液体燃料のみを用いた発電は一般に本土における発電単価を大きく上回ることも知られており、加えて原油価格が高騰している昨今において、さらに発電単価が高騰しているのが現状である(伊藤・細木, 2006)。また、化石燃料のみの発電となるため、CO₂ の排出も多くなることから、風力発電設備の導入が期待されている。

しかしながら、わが国の離島は急峻な地形が多く、ロジスティクスのための港湾を含め風車の建設インフラが不十分であるなどの立地環境、また強風・乱流や落雷など日本特有の自然環境があり、さらに現在の主流である 1-2MW クラスの大型風力発電機を設置するには、輸送のための道路の確保が必要である。

これら大型風力発電機のブレードの長さは 1MW 機で 27~30m、2MW 機では写真-5.1 に示すような 40m にもなり、本土においても、輸送のための道路の幅員や長さを確保しなければならず、沿岸、山間部へ設置するには、既存の道路の改修が必要となり、道路拡幅の工事によって、樹木伐採など環境に対する大きな影響を及ぼす



写真-5.1 大型風力発電機 N80/2500 のブレード

ことが少なくなかった。また、道路の拡張工事を施工するためには、地図上での確認に加えて現地の測量調査を実施し、さらには監督官庁に対して、測量調査を基礎にした工事計画の申請手続き等を行う必要があるため、計画から設置まで予期する以上の時間がかかってしまうのが実情であった。

そこで本節において、(独)新エネルギー産業技術総合開発機構 (NEDO) および (財) 日本気象協会 (JWA) が開発した配布版 LAWEPS による風況マップと国土地理院の数値地図を地理情報システム (GIS) を使用して平均風速 7m/s 以上の離島を抽出すると共に、国内の離島系統の分布と規模を調査し、さらに中規模風車の離島の急峻な地形への設置の可能性について数サイトを選定し、西沢らが考案した簡易解析手法 (西沢ら, 2008) を用いて検討した結果を報告する。

5.2.2 データベースおよびソフトウェア

本研究において使用したデータベースおよびソフトウェアと、それらの概要について以下に示す。

(1) 国土地理院・数値地図 200,000 (地図画像)

20 万分 1 地勢図のラスターデータ。全国を整備し、図葉ファイル (地図部分) と陰影図ファイルを別ファイルで収録している。図葉ファイルは、色版毎にデータ化され、TIFF 形式である。陰影図ファイルは Jpeg 形式である。なお、TIFF 形式および Jpeg 形式ファイルは、グラフィックソフトなどで編集可能である。

(2) 国土地理院・数値地図 50,000 (地図画像)

5 万分 1 地形図のラスターデータ。(1) と同形式のファイルで提供されている。

(3) 国土地理院・数値地図 50m メッシュ (標高)

2 万 5 千分 1 地形図の等高線から求めた標高データ。約 50m メッシュの精度 (南北方向 1.5 秒, 東西方向 2.25 秒) を持つ、国土地理院が全国を整備する、もっとも詳細な標高データであり、3 次元 CG の作成に適

したものである。

(4) 局所風況予測システム (LAWEPS) Ver. 3.0

複雑地形上においても年平均風速が高精度で予測できる、多段階ネスティングモデルによる風況予測システム。本研究では、日本全体の概要のみの把握を目的としたため、「風況マップ表示システム」の 5km メッシュ風況マップ (地上高 50m) を使用した。

(5) Super Map Editor 2003

地図データ等をひとつのプラットフォーム内で編集・解析を行うソフトウェア。各種データ形式に対応しており、代表的なデータ交換用フォーマットの Arc/Info 形式 (.e00) の入出力ができる廉価版ソフトウェアのひとつである。また、国土交通省国土計画局が平成 17 年から整備を進めている「国土数値情報ダウンロードサービス (新フォーマット (JPGIS) 準拠データ)」を専用の変換ツールによって利用することが可能である。(XML 形式⇒Shape 形式に変換)

なお、上位版の Super Map Deskpro と比較すると、標高データから 3 次元 CG の表示ができないこと、解析ツールで GIS のもっとも必要とするオーバーレイ解析 (2 つのポリゴンデータの和・差分など一連の幾何演算を行う空間解析) やネットワーク解析 (経路解析, アクセス可能解析など) ができないなどの制限はあるが、地図データの作成・編集機能に特化しているため、比較的使用しやすい。

(6) カシミール 3D (Ver. 8.72)

フリーソフトウェアではあるが、3 次元 CG 表示、GPS 機器の NMEA および IPS データの入出力、Arc/Info 形式の入力 (ベクタデータのみ) および CSV 形式の入出力などが各種プラグインによって対応可能となっており、本研究におけるデータ解析のメインソフトウェアである。ただし、国土地理院・数値地図 (空間データ基盤) が扱えないため、道路などの空間情報を数値データとして認識しておらず、そのためネットワーク解析 (ルート解析) ができない。

なお、これらの座標系の設定は、すべて「世界測地系 (JGD2000)」として解析を行っている。この JGD2000 は、緯度経度座標系、平面直角座標系、UTM 座標系を扱うことができ、GPS などに使用されている世界測地系 (WGS84) と互換性が高いため採用した。

5.2.3 簡易解析手法 (西沢ら, 2008)

本研究で用いた簡易解析手法を以下に記す。

この簡易解析手法の目的は、風力発電に適した風況のサイトまで、ブレード等をトラックもしくはトレーラに

平積みした際に、その輸送のために使用する道路上において、進行方向にブレード等の長さに相当する直線距離が存在するかを簡便に判定することである。

風力発電事業に適した風況は、一般的に年間平均風速が 6.5m/s 以上であるとされている。しかし、本研究で用いた LAWEPS の「風況マップ表示システム」は、5, 6, 7, 8, 9 および 10m/s と 1m/s 毎にラスタデータ化されているため、6.5m/s 以上である 7m/s 以上をベクタデータ化し、解析の対象とした。また、それ以上の風速であれば、さらに風力発電に適している箇所となるため、参考までに年間平均風速 8m/s 以上のラスタデータ部分のベクタデータ化を行った。

道路法による車両に対する一般的制限値（最高限度）は、車両諸元として幅 2.5m、長さ 12.0m、高さ 3.8m、最小回転半径 12.0m であり、風車の部品を輸送する際には、この制限値を超えるため、特殊車両通行許可が必要となる。この申請は、国土交通省管轄の「特殊車両オンライン申請システム」等で行うことができる。このシステムでは、申請書一式（特殊車両通行許可申請書、車両に関する説明書、通行経路表、経路図、車検証の写し、車両内訳書）を作成するため、デジタル地図により経路を算定するほか、C/D 条件や個別審査箇所および通行不可能箇所の確認が可能であるが、長尺物の輸送の際に検討しなければならない道路上の進行方向の直線距離を算出・出力する項目がない。そこで、本研究で用いた簡易解析手法と併用する事で、最適なルートを短時間で決定することが可能となる。

また、ブレード等の長尺物を輸送する際には、自動車の長さにその長さの 10 分の 1 の長さを加えた長さを超える場合などがあり、特殊車両通行許可証のほかにも、警察署管轄の制限外積載等許可証も必要である。

なお、これらトラックやトレーラの最小回転半径については、道路法および道路構造令等により、どちらでも最小回転半径の一般的制限値が 12m 以下になるよう車体設計に関する規制があり、道路もこれらが安全かつ円滑に通行できるように施工されていることから、**図-5.8**のように 10t トラックにて 16m のブレードを輸送する際の問題はない。さらには長尺物を積載したときのオーバーハング分を補うため、各運送会社では車両の切返しを何度も行って走行することから、オーバーハングによる最小回転半径の評価はあまり意味をなさないため、これに対する判定作業は実施しなかった。

また、道路構造令において、小型道路（乗用車専用道路）と定義され、最小回転半径 7m 以上で施工される道路は、10t トラックやトレーラが走行できないため、本研

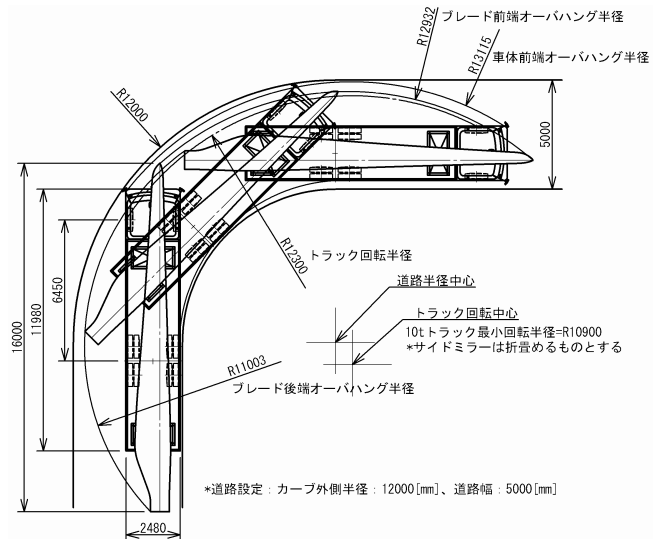


図-5.8 10t トラックによるブレード輸送の軌跡
(図中の寸法は mm 標記)

究の対象としていない。

○解析手法の手順○

- (1) LAWEPS の 5km メッシュ風況マップのラスタデータ (画像データ) および緯度経度情報を取得する。
- (2) 風況ラスタデータから風速 7m/s 未満の消去加工を施した後、メッシュのスムージング処理を行う。
*Photo Shop などの画像編集ソフトのコマンドを利用した。
- (3) SuperMapEditor (SME) 上で、風況ラスタデータを風速 7m/s 以上のエリアと風速 8m/s 以上のエリアをベクタデータ化し、Arc/Info 形式にエクスポートする。
- (4) カシミール 3D 上に GIS データとしてインポートする。
- (5) 風況ベクタデータ内に国土地理院・数値地図 50,000 (地図画像) のラスタデータの道路が存在するかを目視にて確認する。
- (6) 道路の存在を確認した後、もっとも近い港湾もしくは高速道路のインターチェンジ、通過点等をウェイポイントとして登録し、**図-5.9** に示すように、それらを手動でトレースしてルートの作成を行う。ルートのトレースの際、直線と次の直線をつなぐカーブの道路の中心を 1 点だけ抽出し、それをルートポイントとして登録する。その抽出したカーブ点からカーブ点までの直線距離を計算できるようにした。
- (7) ウェイポイントおよびルートポイントを CSV 形式でエクスポートする。
- (8) CSV ファイルには、いくつかの主要数値が出力されるが、ここではポイント名、緯度、経度、標高のみを使用する。各ポイントにおける緯度経度の差から平面上の



図-5.9 ルートポイントの作成例
 (—がルート, ●がルートポイント.
 ポイントはカーブあたり1つで作成した.)

距離を算出し, これに標高の差を加味し再計算して, 道路の長さを算出した. さらに, 標高の差から道路の勾配を算出した.

計算式は下記の通りである.

$$l_n = \sqrt{((x_n - x_{n-1}) \times 111,120)^2 + ((y_n - y_{n-1}) \times 111,120)^2}$$

$$L_n = \sqrt{l_n^2 + (h_n - h_{n-1})^2}$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{h_n}{l_n} \right)$$

ここで,

x_n, x_{n-1} : ルートポイントの経度座標[度分秒]

y_n, y_{n-1} : ルートポイントの緯度座標[度分秒]

* 緯度経度 1[度] = 60[海里] = 111,120[m]

(1[海里] = 1,852[m]換算)

h_n, h_{n-1} : ルートポイントの標高[m]

l_n : ルートポイント間の平面上の距離[m]

L_n : ルートポイント間の道路長さ[m]

α_n : ルートポイント間の勾配[°]

(9) (8)における計算結果と輸送対象となるブレード長を比較し, そのルート上で道路がブレードを輸送できるだけの長さがあるかどうかの判定を行う.

(10) (9)の結果をカシミール上に CSV 形式でインポートし, そのポイントが可視化できるようマッピングを行った.

5.2.4 風況ラスタデータからベクタデータへの変換

図-5.10にLAWEPSの各地域ごとのラスタデータを日本の行政区界, 海岸線(ベクタデータ)にマッピングしたものを示す. また, 図-5.11にはラスタデータをベクタ化したものを示す.

なお, ここで使用した行政区界, 海岸線は「みんなの地球地図プロジェクト」から無料配信されているものを使用した. 現在, 同プロジェクト web では, Shape 形式データにて, 行政区(ポリゴンデータ), 行政区界, 海岸線(ベクタデータ), 行政区(ポイントデータ), 水系(ポリゴン, ベクタ, ポイントデータ), 交通網(ベクタデータ), 人口集中域(ポリゴン, ポイントデータ), 海部(ポリゴンデータ)がある.

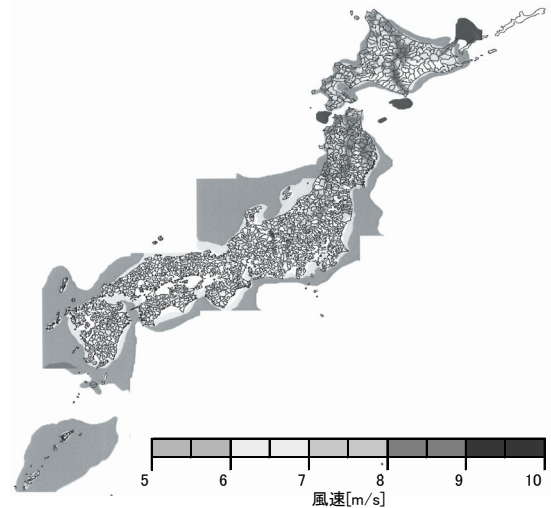


図-5.10 風況ラスタデータ(統合)

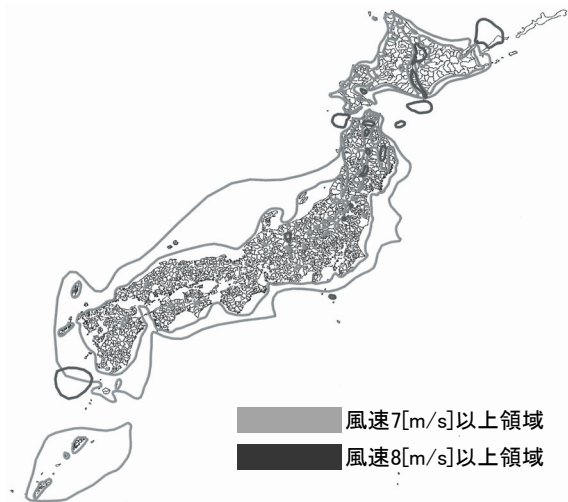


図-5.11 風況ベクタデータ

5.2.5 離島の選定および系統

5.2.3.(4)の手法により風速7m/s以上の離島(一部は沿岸部)の箇所を表-5.1に示す. また, 図-5.12に国内における独立系統を有する離島の分布を示す. なお, 便宜的に各離島が保有する発電機の設定容量で大中小規模に分類した.

これより、独立系統の多くは東京地区、九州地区、沖縄地区に多く存在することがわかる。またその数は57系統であり、発電設備容量の単純合計は約83万kWであった(西沢ら, 2008)。

なお、離島系統を多く抱える東京電力、九州電力、沖縄電力管内には、東京電力:10離島系統、九州電力:23離島系統、沖縄電力:12離島系統が存在し、その系統規模は、下は60kWから上は92,800kWまでとかなりの幅がある。表-5.2に規模別に分類して整理したものを示す(富士重工業株式会社, 2003)。

表-5.2 離島系統数

電力会社	規模	系統数
東京電力	小 (~999kW)	4
	中 (1,000~9,999kW)	4
	大 (10,000kW~)	2
九州電力	小	12
	中	2
	大	9
沖縄電力	小	2
	中	7
	大	3

表-5.1 風速7m/s以上の離島(沿岸)一覧

太平洋側	
新島(北側)	大島(南側)
三宅島	
種子島の北と南	屋久島
上屋久町	巽島
甌島列島	
日本海側	
隠岐島郡	舌岐島
対馬(北側, 南側)	的山大島
生月島(北側)	福江近辺の諸島
野崎島	小値賀島
宇久島	江島
平島	中通島(北側)
その他(本土・日本海側の岬, 半島)	
夏泊半島	大間
小泊岬	男鹿半島
猿山	

5.2.6 適地サイトの選定および道路の直線距離および勾配に関する検証

図-5.13に5.2.3(5)の手法にて選定した4箇所を示す。また、5.2.3(6)の手法により、各サイトまでのルートを作成した。それをもとに、5.2.3(8)から(10)の手法により、検証した結果を表-5.3から表-5.6および図-5.14から図-5.17に示す。なお、三宅島沿岸は風況が良いことから、他のサイトのように港湾から好風況サイトまでのルート設定は行わず、港湾を基点とした周回ルートのみを検証対象とした。

道路輸送の可否の判定基準となる距離は、中型機、大型機および超大型機の一般的なブレードの長さである16m, 25mおよび40mとし、それら基準値の距離以下を不可判定として、箇所の個数をカウントした。

また、16m以下の不可判定箇所に○印を、25m以下の不可判定箇所には□印を、見島サイトのみ40m以下の不可判定箇所には×印にて地図上にトラッキングした。また、参考までに設定勾配を20°として、それ以上を不可判定となった箇所の個数もカウントした。

これらの判定結果より、直線距離が16m以下であったサイトは、津和崎サイトのみであった。よって今回選定した4サイトのうち、3サイトでは中型機の風車ブレードを輸送する際に道路の制限にとらわれることなく、10tトラックによる輸送が可能であるといえる。また、津和崎サイトにおいて最小直線距離は15.9mであった。道路幅についての詳細を本地図データ上では見ることができないが、ルートは1車線の道路以上を対象に設定しているため、3.25m以上の道路幅は確保されている。よって、カーブ部の前後に3.25mの余裕があるとすれば、これを加算して直線距離が16m以下であるサイトは、ひとつも無いことになる。なお、道路幅については、現地調査もしくはさらに細かい地図により確認が必要である。

以上の結果より、離島における風車設置は、現在主流

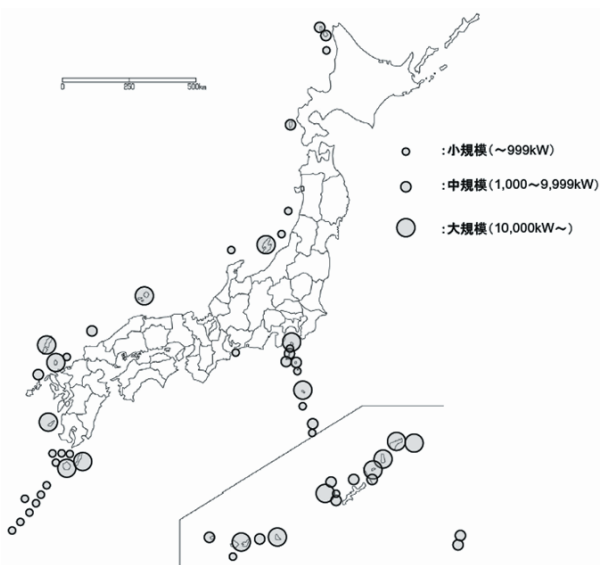


図-5.12 国内の離島系統の分布(伊藤・細木, 2006)

表-5.6 三宅島沿岸ルート判定

ルートポイント数	188
16m不可判定箇所数	0
25m不可判定箇所数	3
40m不可判定箇所数	31
最小直線距離	17.4 [m]
(参考)20°勾配以上箇所	3

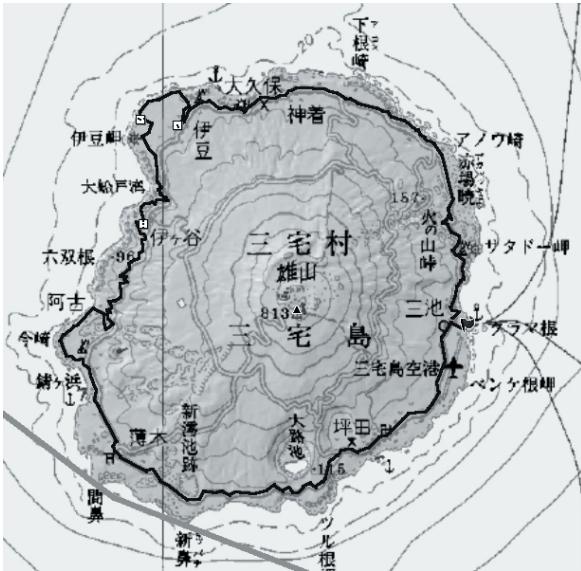


図-5.17 三宅島沿岸ルート判定

5.2.8 まとめ

NEDO および JWA が開発した配布版 LAWEPS による風況マップと国土地理院の数値地図を GIS 上で整理し、風車設置の際に陸送可能な箇所の選定および設置可能限界箇所を推定するため、本研究で用いた簡易解析手法が離島においても有効であることを確認することができた。

また、日本の離島およびそれらの沿岸に風車を設置する場合は、現在主流となっている 1MW 以上の大型機よりも 300kW 程度の中型機を設置した方が、輸送制限にとらわれず、環境影響が少ない状態での設置が可能であることが明らかになった。

なお、本研究において使用する予定であった国土数値情報データベース・JPGIS (新データベース) は未整備の部分が多く、風車設置に必要な自然公園や自然環境保全区域など考慮できなかったことが今後の課題として残った。今後はこれらのデータベースの整備を待ち、GIS 上でできる風車設置サイトの整理を行っていくことになる。

6. おわりに

平成17年度から19年度の3か年にわたって、当所は、足利工業大学および駒井鉄工株式会社との共同研究を実施し、沿岸域への適用を視野に入れた中規模風力発電シ

ステムの開発と、これによって生産された電力エネルギーの現地活用に関する検討を行った。以下に、この共同研究の成果を整理する。

1) 300kW中規模風車のコンセプトと設計仕様をとりまとめた。特にここでは、今後設置が見込まれる離島や市街地から離れた岬などへの展開を考慮し、風車の現地における容易な施工法についても検討するとともに、安全・制御システムの開発・改良も行った。(第2章)

2) 設計された定格出力300KWの中規模風車 (KWT300) を用いて、東京湾沿岸においてその実証試験を行った。(第3章)

3) 実証試験を行った富津における風速は、陸上の地形や建物の影響を受けており、月平均風速を東京湾口のアシカ島洋上風観測点と比較すると小さかった。風車の他に別途設置された観測ポールでの風向風速、および風車で発電された発電量を整理した結果、設計で想定されていたパワーカーブ通りの発電量が得られていた。ただし、安全制御が過敏に機能しすぎた結果、定格出力が期待される風速12m/s以上の強風時において、しばしば風車の運転が停止したので、強風時における制御システムの改良は、今後の課題として残された。風車によるエネルギーロス considering 風車前後の風速比を想定する永井ら¹³⁾のモデルと今回の観測データで得られた風車前後の風速比を比較したところ、両者はほぼ一致していることが確認された。(第4章第1-3節)

4) 実証試験結果に基づき、騒音・塩害耐久性・安全制御などの基本的なシステムの性能について検討し、当該風車は、概ね設計通りの性能を発揮していることが確認された。ただし、塩害耐久性については、今後の経年的な経過を引き続き確認する必要がある。(第4章第4-6節)

5) 沿岸域の風力エネルギー現地活用の検討例として、定常的に海岸の砂を堆積域から侵食域に運搬し、海岸保全をめざす、サンドバイパスの電力としての風力エネルギーの活用を検討した。例えば、5万m³の砂を有孔管土砂輸送システムによるサンドバイパス (100kW容量) で21m³/hの速度で輸送する場合、年間約2,380時間の稼働時間が必要となり、必要電力量は238MWhとなる。この量は、ここで開発した風車を東京湾洋上のアシカ島における風況で使用する場合の総発電量989MWhの24%であり、十分サンドバイパスを制御可能であることが示された。ただし、実施にあたっては経済性に関する検討が必要となるので、土砂輸送距離の設定など、より具体的な現地と条件の設定が必要である (第5章第1節)

6) 離島や急峻な山間地の迫った沿岸においては、大型

ブレードを設置地域まで搬送できないため、風車の設置が困難となる場合が想定される。ここでは、GISを用いた風車設置可否を判定する解析手法を提案し、風車の可搬性に関して検討した。この解析手法により、我が国沿岸、特に中規模風車の最適な設置地点を選定することが可能となる。(第5章第2節)

(2008年2月受付)

謝辞

本資料のとりまとめにあたっては、アシカ島・第二海堡・鹿島・常陸那珂など、ナウファス(全国港湾海洋波浪情報網)の一環として当所が観測情報の管理・解析を担当している、国土交通省関東地方整備局管内の風観測記録を活用するとともに、白石ら(2005)および永井ら(2006b)で示される北海道開発局管内の瀬棚町によって取得された洋上風車の運用に伴う貴重な現地記録を活用した。これらの現地における風況等の観測に関与されている数多くのご担当の方々、およびナウファス観測情報の管理・解析に日々奮闘されている当所海象情報研究室ナウファスデータ処理班の各位に、改めて謝意を表す。

参考文献

- 伊藤学・細木訓(2006)：調査研究報告「離島における新エネルギー導入可能性調査」について、季報エネルギー総合工学, Vol. 29, No. 3.
- 宇田高明(1997)：日本の海岸侵食, 山海堂, pp. 415-423, 1977.
- 加藤敦子, 持田灯, 吉野博, 村上周三(2001)：植生canopyモデルを組み込んだk-εモデルによる単独樹木周辺の風速分布の予測, 日本建築学会学術講演梗概集, pp. 929-930.
- 加藤一正・入江功・田中則男(1985)：大井川河口周辺海岸の海浜変形の巨視的把握, 第32回海岸工学講演会論文集, 土木学会, pp. 390-394.
- 栗山善昭(2001)：広域土砂収支図作成の試み, 水工学シリーズ01-B-5, 土木学会, pp. B-5-1-B. 5-13.
- 建築物の構造関係技術基準解説書編集委員会(2007)：建築物の構造関係技術基準解説書2007年度版, 全国官報販売協同組合, 720p.
- 港湾・沿岸域における風力発電推進研究会(2005)：港湾・沿岸域における風力発電推進研究報告書.
- 国土交通省国土計画局国土情報整備室ホームページ, <http://nlftp.mlit.go.jp/ksj2/index.htm>
- 国土地理院：地図センターホームページ, http://net.jmc.or.jp/digital_data_gsi.html
- 佐藤慎司・宇多高明・岡安徹矢・芹沢真澄(2004)：天竜川一遠州灘流砂系における土砂移動の変遷と土砂管理に関する検討, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 571-575.
- (社)電気協同研究会(1964)：送变电設備の塩害対策, 電気協同研究, 第20巻第2号.
- (社)日本道路協会(2002)：道路橋仕方書・同解説 V 耐震設計編, 丸善.
- 白石悟・永井紀彦・林宏典・西和宏・久米仁司・堂端重雄(2005)：瀬棚港における実測データを用いた洋上風車背後の風の分布特性とその考察, 土木学会, 海洋開発論文集第21巻, pp. 1059-1064.
- (独)新エネルギー・産業技術総合開発機構(2007)：日本型風力発電ガイドライン策定事業中間報告, 102p.
- 永井紀彦・橋本典明・横井博志・鈴木善光・魚崎耕平(2000)：観測データに基づく沿岸域および海上の風出現特性の検討, 第27回土木学会関東支部技術研究発表会講演集, pp. 374-375.
- 永井紀彦(2002)：風力エネルギー活用の観点から見た沿岸域洋上風力の特性, 港湾空港技術研究所資料, No. 1034, 34p.
- 永井紀彦・小川英明・中村篤・鈴木靖・額田恭史(2003)：観測データに基づく沿岸域風力エネルギーの出現特性, 海岸工学論文集第50巻, 土木学会, pp. 1306-1310.
- 永井紀彦・牛山泉・根本泰行・川西和昭・額田恭史・鈴木靖・乙津孝之(2005)：現地利用型エネルギー活用をめざした沿岸風力照明システムの検討, 海洋調査技術Vol. 17, No. 1, pp. 1-12.
- 永井紀彦・清水勝義・牛山泉・李在炯・細見雅生・小川路加(2006a)：沿岸域における中小型風力発電装置の適用可能性に関する現地実験, 第18回研究成果発表会講演要旨集, 海洋調査技術学会, pp. 17-18.
- 永井紀彦・白石悟・清水勝義・成瀬英治・八木一浩・乙津孝之(2006b)：実測データに基づく洋上風車群近傍の風況推定と発電予測手法の構築, 土木学会, 海洋開発論文集第22巻, pp. 869-874.
- 西沢良史・牛山泉・細見雅生・小川路加：大型風車設置可能限界地点の簡易解析手法に関する研究(2008), 風力エネルギー, Vol. 31, No. 4.
- 日本気象協会(2003)：NEDO委託調査報告書「平成14年度ニューサンシャイン計画 離島用風力発電システム等技術開発 局所的風況予測モデルの開発」, pp. 48-51.
- 日本通運株式会社ホームページ, http://www.nittsu.co.jp/press/2003/20030312_3.htm

- 野口仁志(2006)：省力化・効率化を図る施工法の開発～
「自沈有孔管による土砂集積輸送工法」及び「網チェーン式ブロック撤去装置」～，平成18年度港湾空港技術講演会講演集，(独)港湾空港技術研究所，
pp. 59-82.
- 富士重工業株式会社(2000)：離島用風力発電システム等
技術開発「離島における風力発電システムの開発」，
平成11年度ニューサンシャイン計画報告書(NEDO図
書・資料室)，NEDOBIS，E99026，pp. 4-80-4-90.
- みんなの地球地図プロジェクト，<http://www.globalmap.org/download/kanni001.html>
- IEC 61400-1(1999)：Wind turbine generator systems -
Part 1: Safety requirements.
- IEC 61400-24(2002)：Wind turbine generator systems -
Part 24: Lightning protection.
- Sato, S. and Tanaka, N. (1966)：Field investigation on
sand drift at Port Kashima facing the Pacific
Ocean, Proc. 10th Int. Conf. Coastal Eng., ASCE,
pp. 595-614.
- Kuriyama, Y. and Sakamoto, H. (2007)：Cross-shore
variation of predominant longshore sediment
transport rate, Proc. Coastal Dynamics '07, ASCE.

港湾空港技術研究所資料 No.1180

2008. 6

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL.046(844)5040 URL.<http://www.pari.go.jp/>

印刷所 株式会社 大成社

Copyright © (2008) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。