

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE
OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1234 June 2011

沿岸域中型風車の開発・検証と港湾や漁港における
自己利用型風力エネルギーの活用に関する検討

永井 紀彦
白石 悟
鈴木高二朗
田中 陽二
牛山 泉
西沢 良史
細見 雅生
小川 路加

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. 中型風車の開発と現地実証試験の概要	4
2.1 300kW級中型風車の開発コンセプト	4
2.2 基本的な仕様と設計条件	5
2.3 現地実証試験の概要	7
3. 現地実証試験結果	8
3.1 強風時の風速および発電特性	8
3.2 風の乱れ特性の検討	13
4. 風車ナセル上の風速特性の実験的検討	20
4.1 実験の目的と概要	20
4.2 供試風車の可視化実験装置および方法	23
4.3 供試風車の可視化実験結果	24
4.4 ナセル模型の可視化実験装置および方法	25
4.5 ナセル模型の可視化実験結果	26
4.6 ナセル風速に関する検証	27
4.7 実験結果のまとめ	28
5. 港湾や漁港における自己利用型風力エネルギーの活用に関する検討	28
5.1 ヒヤリング調査の概要	28
5.2 ヒヤリング調査の結果	28
5.3 港湾や漁港における中型風車の活用に関する提言	33
6. おわりに	36
謝辞	36
参考文献	37
記号表	38

Development and Verification of Coastal Medium Size Wind Power System and its Application to Local Wind Energy Utilization for Ports and Harbors

Toshihiko NAGAI*
Satoru SHIRAISHI**
Kojiro SUZUKI***
Yoji TANAKA****
Izumi USHIYAMA*****
Yoshifumi NISHIZAWA*****
Masao HOSOMI*****
Ruka OGAWA*****

Synopsis

This note introduces results of 3 years cooperative research among the Port and Airport Research Institute, Ashikaga Institute of Technology, Hokkaido Institute of Technology and Komaihaltec Inc. for application of the 300kW sized middle scale wind power generator system for local wind energy utilization of ports, fishery ports and harbors in order to reduce CO₂ emission. Following results are obtained;

- (1) 300kW sized middle scale wind power generator system was developed and installed at the Tokyo Bay coast and proto-type field experiment was conducted.
- (2) Proto-type wind and power generation rate data proved the designed power-curve of the system.
- (3) Small scaled model experiment in a wind flume was also conducted in order to clarify the characteristics of the observed winds on the nacelle of the proto type wind-power-generator. It is concluded that the observed wind speed and direction does not show large difference to the input outside winds, for the mixed effects of the wind energy consumption by the wind-fan and the wind concentration due to the nacelle shape.
- (4) Energy demand investigation to the 5 ports and fishery ports in Japan-Sea coast of Hokkaido-Island was conducted. It is clarified that 300kW sized wind-power generator system is able to satisfy the total annual demands of the electricity of some ports and fishery ports.

Key Words: Wind Power, Ports, Fishery Ports, Wind Energy Application, Medium Size Generator

* Distinguished Researcher
** Visiting Researcher (Hokkaido Institute of Technology)
*** Chief, Marine Environment Information Group, Marine Information Division, Marine Environment and Engineering Department
**** Researcher, Marine Environment Information Group, Marine Information Division, Marine Environment and Engineering Department
***** Ashikaga Institute of Technology
***** Komaihaltec Inc.
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan
Phone : +81-46--844-5010 Fax : +81-46-841-8307 e-mail: nagai@pari.go.jp

沿岸域中型風車の開発・検証と港湾や漁港における 自己利用型風力エネルギーの活用に関する検討

永井 紀彦*
白石 悟**
鈴木高二朗***
田中 陽二****
牛山 泉*****
西沢 良史*****
細見 雅生*****
小川 路加*****

要 旨

本資料は、2005年度から2007年度までの3か年にわたって、港湾空港技術研究所、足利工業大学および駒井鉄工(株)(駒駒井ハルテックの前身会社)の3者共同研究を進展させ、2008年度から2010年度までの3か年にわたって北海道工業大学を加えて実施した4者共同研究の成果をとりまとめたものである。以下に、主要な成果を述べる。

- (1) 中型風車の開発を行い、実機風車を東京湾沿岸に設置し、現地実証試験を実施した。
- (2) 現地実証試験結果の結果、強風時についても、風速と発電量の関係は、風車の設計パワーカーブと一致していることが確認され所定の発電がなされていることが確認された。さらに、強風時の風の特性として、突風率や乱れ強度を、東京湾内の洋上風観測点である港湾空港技術研究所アシカ島観測点と比較検討したが、実証試験サイトとアシカ島の間での特性の相違や、既往の設計式との対応を、明らかにするには至らなかった。
- (3) ナセル風速の速度比が理論による速度低減率まで低下しなかった理由を検討するため、風洞模型実験を実施した。その結果、ナセル形状による増速効果によって、ナセル風速が上昇する可能性があることが判明した。300kW 風力発電機からの実証試験結果による風速比 (U_b/U_a) も 0.8 以上を示しており、本風洞模型実験によって、この風速比を再現することができた。
- (4) 北海道日本海沿岸の3港湾と2漁港を対象とした自己利用型エネルギーの活用に関するヒヤリングを行い、通年および既設別の電力需要をとりまとめ、小規模な港湾や漁港では、総量として300kW級の風力発電システムは、需要に見合った量の発電が期待できることを明らかにした。ただし、季節毎の詳細な発電予測量と需要量との間にはギャップも見られるので、夏季の不足分は太陽光発電などを併用して補うことなどの検討も必要となる。

キーワード：風力発電，港湾，漁港，風力エネルギー，中型風車

* 研究主監
** 客員研究官（北海道工業大学）
*** 海洋・水工部海洋情報領域海洋環境情報研究チームリーダー
**** 海洋・水工部海洋情報領域海洋環境情報研究チーム
***** 足利工業大学
***** 株式会社 駒井ハルテック

〒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

地球環境問題が大きく取り上げられ、二酸化炭素の排出量の削減が強く求められる中、化石燃料に頼らない風力等の自然再生エネルギーの活用が、持続的な社会経済の発展のため喫緊の課題となっている。特に、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（永井ら,2000；永井ら,2001a；永井ら,2001b）、これまでに多くの風力発電設備が設置されてきており、今後とも増加していくものと考えられる。さらに、洋上や沿岸域の風況は、陸上に比較して時空間的な乱れや変動が比較的小さく、風力発電にはよりふさわしいことも、近年、観測データに基づき実証的に示されており（永井,2002；永井ら,2003）、港湾や漁港などの沿岸域への風力発電の導入への機運は高まっている。

反面、我が国では、近年ようやくスマートグリッドの構築の必要が叫ばれるようになりつつあるものの、電力供給網が基本的には地域ごとの電力会社単位に分割されており、時空間的な変動が大きい風力のような自然エネルギーの受け入れ容量に制約があり、西ヨーロッパ諸国のような大規模ウィンドファームの建設は、なかなか進んでいないのも現実である。このため、港湾や漁港を含めた沿岸域において風力エネルギーの導入を検討する際、電力会社に売電可能な電力量には一定の制約が生じるため、MW級の風車群による大規模ウィンドファームの建設よりは、数百kW級の中型風車によるエネルギー自己利用型の風力発電システムの導入の方が、より現実的な風力エネルギーの活用方策とならざるを得ない。このため、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きわめて高い。

風力のような時空間的な変動の大きな自然再生エネルギーを、自己利用型として活用するため、港湾空港技術研究所では、はじめに風力照明システムに注目し、研究所構内に小型風車と小規模蓄電システムを設置した共同研究を実施してきた（永井ら,2004；永井ら,2005a；永井ら,2005b）。また、風車そのものが空間的な風力エネルギーの分布に与える影響を、北海道瀬棚町の洋上風車群で得られた実測データなどから検討し、風力エネルギーの空間的ポテンシャル分布特性についても研究成果をとりまとめている（白石ら,2005；永井ら,2006a）。

本資料は、こうしたこれまでの風力エネルギー活用に関する研究成果をもとに発展させたものであり、港湾空港技術研究所、足利工業大学、北海道工業大学および㈱駒井ハルテックによる4者共同研究の成果をとりまとめ

たものである。この共同研究は、300kW規模の中型風車を開発し、東京湾沿岸の㈱駒井ハルテック工場内に設置された実機風車を用いた実証試験を行うとともに、追加的な風洞模型実験や現地調査なども実施し、港湾や漁港への自己利用型風力エネルギーの展開をめざすことを目的としたものである（永井ら,2009；Nagai,et.al.(2010a)；Nagai,et.al.(2010b)；白石ら,2010）。同時に、本資料は、これに先立って2005年度から2007年度までの3か年にわたって、港湾空港技術研究所、足利工業大学および駒井鉄工㈱（㈱駒井ハルテックの前身会社）の3者共同研究（永井ら,2006b）を進展させたものでもあり、前報の港湾空港技術研究所資料 No.1180（永井ら,2008）を進展させたものでもある。

本資料の構成は、以下の通りである。2.では、中型風車の開発と現地実証試験の概要を述べる。ただし、この章の内容は前報で詳しく紹介されているため、ここではその概要の紹介に留めた。3.では、2.で紹介した実風車を東京湾沿岸に位置する㈱駒井ハルテック工場内に設置し、実機風車を用いた現地実証試験結果を述べる。ただし、前報との重複を避けるため、ここでは特に、強風時の風速および発電量特性と風の乱れ特性の検討とに焦点を絞り論じることとする。4.では、3.で紹介した現地実証試験結果として整理された風車ナセル上の風速の特性について、ナセル風速の速度比が理論による速度低減率まで低下しなかった理由を風洞模型実験を行い検討した結果を紹介する。5.では、2.から4.の検討結果をふまえた上で、港湾や漁港における自己利用型エネルギーの活用に関する検討を行った。すなわち、北海道日本海沿岸の港湾や漁港を対象に実施したヒヤリング調査結果をふまえて港湾や漁港における中型風車の活用に関する提言を整理した。その上で、6.で全体をとりまとめた。

2. 中型風車の開発と現地実証試験の概要

2.1 300kW級中型風車の開発コンセプト

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、上述の海外機種の内、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型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おり、港湾や漁港における自己利用型の風力エネルギー供給システムの開発も重要と考えられる。ここでは、上記コンセプトにより開発した中型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。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

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）の規格（IEC 61400-1, 1999）を満足すると共に、日本特有の風の特長も考慮して、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、基準風速と乱れ特性はクラス II より大きく設定して「II A+」とした（表-2.2 参照）。耐震設計については、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）に準拠して、地震に対しても安全な設計を行った。

表-2.1 開発風車の基本仕様

項目	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	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

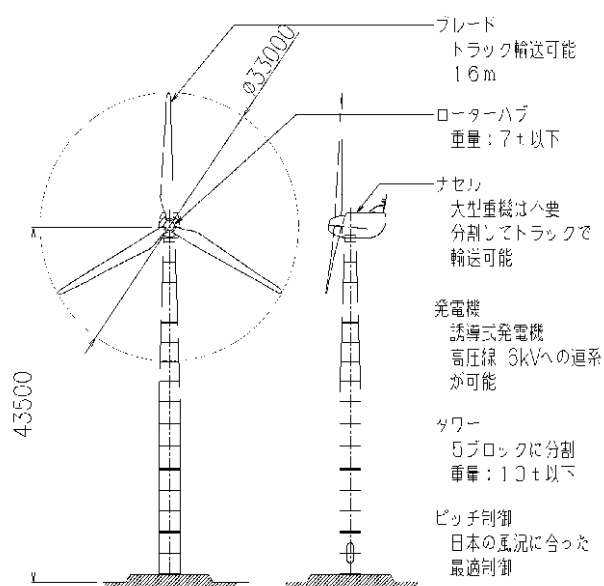


図-2.1 開発風車の特徴

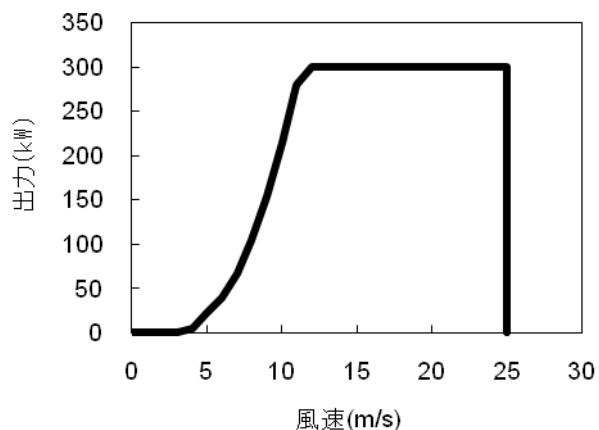


図-2.2 開発風車のパワーカーブ



写真-2.1 実証試験の全景（駒井ハルテック富津工場）

表-2.2 IEC 風車クラスと開発風車（IIA⁺）の位置付け

項目	IEC 風車クラス			IIA ⁺
	I	II	III	
基準風速 V_{ref} (m/s)	50.0	42.5	37.5	50
乱流 カテゴリ	A	0.16		0.18
	B	0.14		
I_{ref}	C	0.12		

ここに、 I_{ref} ：風速 15m/s 時の乱れ強度の期待値

(3) 落雷対策

落雷対策としては、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 JIS 規定（JIS A4201, 2003）と、国際的風力発電設備の規定である IEC 規格（IEC/TR 61400-24, 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 落雷の IEC 保護レベル（本風車は保護レベル I）

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					45
IV	100	2,500	100	150	60

(4) 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 30~40m 程度にもなるため、ポールトレーラでの輸送が困難になることが多く、場合によっては道路改良が必要になる。これらの条件が、建設コストを増大させることになる。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-2.3 に示す。

表-2.4 開発した風車の輸送条件

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

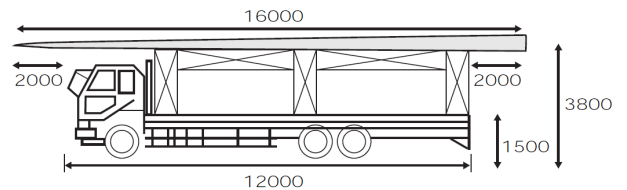


図-2.3 ブレードの輸送

(5) 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。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-2.4 にナセル架設のステップ図を示す。

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。

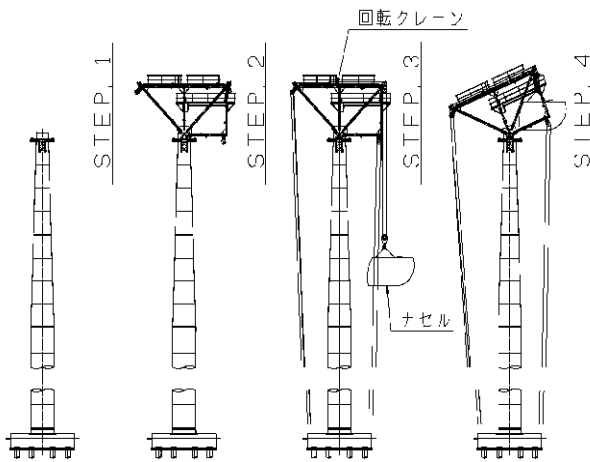


図-2.4 ナセル架設ステップ図

2.3 現地実証試験の概要

本研究では、千葉県富津市の駒井鉄工(株) (2010.10 より(株)駒井ハルテック) 富津工場内に建設された中型風車の観測記録を解析することにより風車の基本性能を把握する。図-2.5に、富津試験サイト位置を示す。

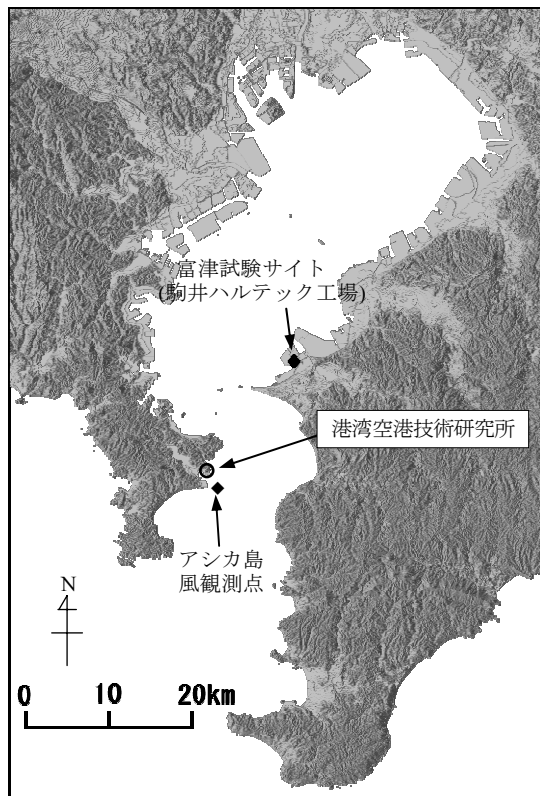


図-2.5 富津試験サイト位置図

富津試験サイトでは、風車プロト機と併設して風観測ポールを設置しており、その距離は2D (D:ローター径33m)である。また、風観測ポールでの風速および風向の観測高さは、ローター中心と同じ43.5mであり(写真-2.2~2.5)、三杯型風速計と矢羽根型風向計によって風況観測を行った。風車側ではナセル上に風速計と風向計を設置しており、風況および発電量を観測している。また、上記の計測結果などに基づいてサイトの評価(サイトキャリブレーション)と風車性能評価を実施している(松下ら,2008; 幽谷ら,2008; Matsushita et al., 2010)。



写真-2.2 上から見た風車と風観測ポールの位置関係



写真-2.3 風車と風観測ポールの位置関係

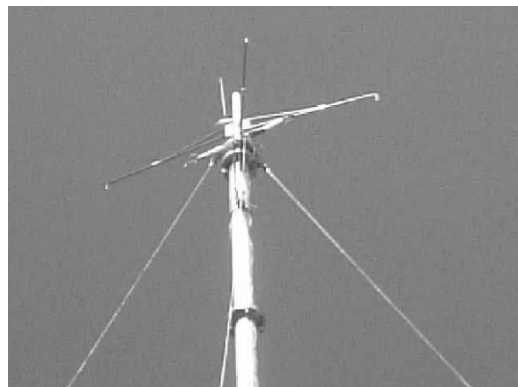


写真-2.4 風観測ポールの風速計と風向計の設置状況



写真-2.5 風車の外観

3. 現地実証試験結果

3.1 強風時の風速および発電特性

(1) データ解析日

2.3 で述べた現地実証観測の結果については前報（永井ら,2008）で報告している．本資料では，まず低気圧通過時と台風通過時の強風が作用したときの風速の特性と300kW 風車実証試験機の発電性能について述べる．検討対象とした観測日と気象要因を表-3.1 に示す．

表-3.1 検討対象とした観測日（2007年）と気象要因

観測日	気象要因
3月5日	低気圧が北日本を通過
4月13日	低気圧が日本海を東進
4月14日	低気圧が北日本に接近
4月22日	低気圧が日本海を東進
5月13日	北日本を低気圧が通過
5月25日	低気圧が日本海を東進
6月7日	寒気を伴う低気圧が日本海を南東進
7月15日	台風4号が伊豆諸島神津島付近を通過
9月6日	台風9号が伊豆半島に上陸
9月17日	台風11号が日本海で温帯低気圧に
10月18日	上空の気圧の谷が通過

(2) 低気圧通過時

図-3.1 は 2007 年 3 月 5 日の天気図である．低気圧が北日本を通過し，それに伴う寒冷前線が関東地方を通過した．これに伴って現地実証観測サイトでは午前 4 時頃から風速 10m/s 以上の強風が継続した．

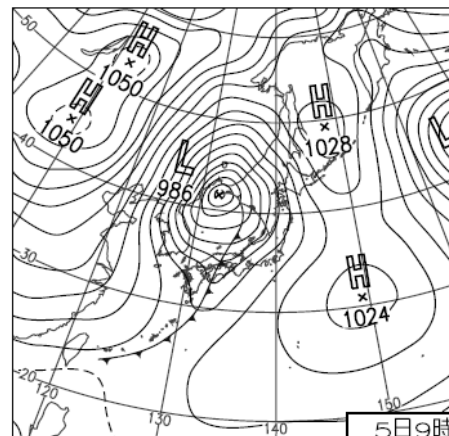


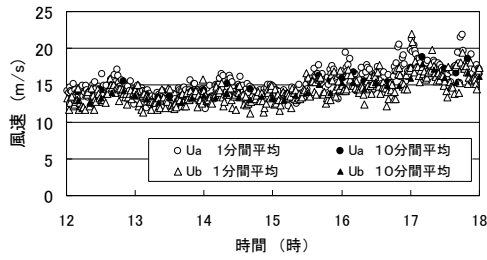
図-3.1 2007年3月5日の天気図（気象庁,2007）

図-3.2(1)～(5)は現地実証観測を行った風車および併設された観測ポールで観測された2007年3月5日の12～18時の風速と発電量のデータである．

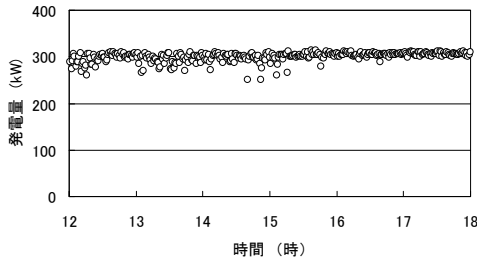
図-3.2(1)は平均風速を示しており， U_a は観測ポールでの風速， U_b は風車ナセル背後での風速である．平均風速は1分間平均値と10分間平均値を示している．この時間帯の観測記録では，低気圧が日本海を東進した影響により風速は12～15m/sから15～20m/sに増大傾向にある．

図-3.2(2)は発電量（1分間平均値）を示す．この風車は風速11.5m/sで定格となるため発電量は300kWに近い値を推移している．図-3.2(3)は風速 U_b と発電量の関係（1分間平均値）を示している．図の実線は風車の性能曲線を示しており，実測の風速と発電量の関係は，おおむね性能曲線と一致している．

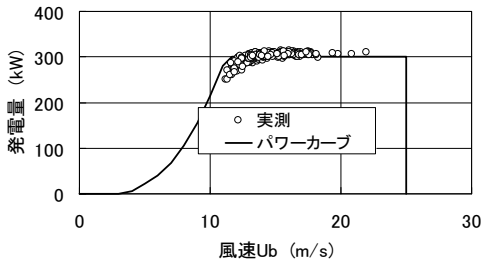
図-3.2(4)は発電量（10分間平均値），図-3.2(5)は風速 U_b と発電量の関係（10分間平均値）を示している．10分間平均値を取ることで発電量は性能曲線と一致していることがわかり，風車は性能どおりに発電されていることがわかる．図-3.2(3)で示す1分間平均値と比べて10分間平均値では，データのばらつきがより少なくなっている．



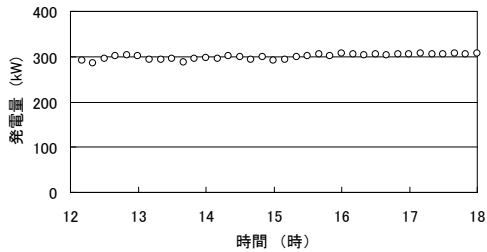
(1) 平均風速



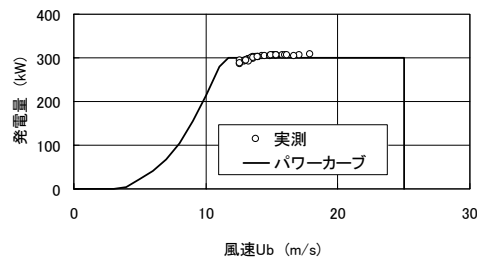
(2) 発電量 (1 分間平均値)



(3) 風速と発電量の関係 (1 分間平均値)



(4) 発電量 (10 分間平均値)



(5) 風速と発電量の関係 (10 分間平均値)

図-3.2 風速と発電量 (2007年3月5日12~18時)

図-3.3 は同じ時刻の風速について観測ポールで観測された風速 U_a と風車のナセル背後で観測された風速 U_b

について、観測ポールで観測された風向 θ_1 を横軸にとり、風速比 U_b/U_a を 1 分間平均値および 10 分間平均値について示したものである。この時間帯の風向は、ほぼ 180° であり、風は海側から吹いていることがわかる。ナセル背後の風速 U_b の観測ポールでの風速 U_a に対する比 U_b/U_a は 1 分間平均値では $0.7 \sim 1.2$ の間に分布し、比較的短い時間における風速比の差異が大きいことがわかる。これに対して、10 分間平均値では、その比は $0.9 \sim 1.0$ の間になっており、観測時間を長くとると U_b/U_a の変動の幅が小さくなることがわかる。また、この例では 10 分間平均値では、ナセル背後では風速が低下していることがわかる。ただし、評価時間を短くとった 1 分間平均値では U_b/U_a が 1.0 を超えることがある。

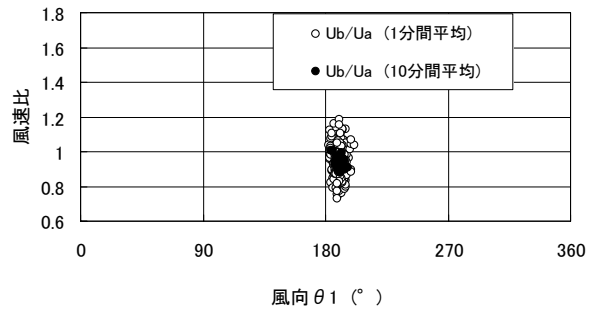
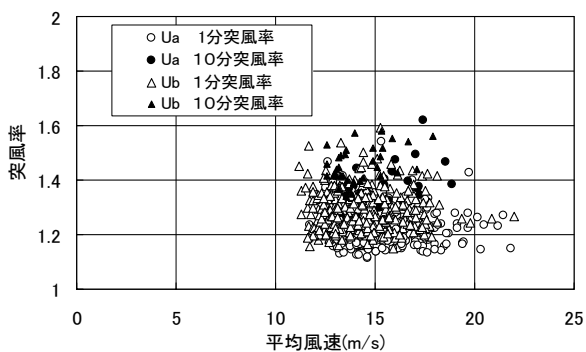
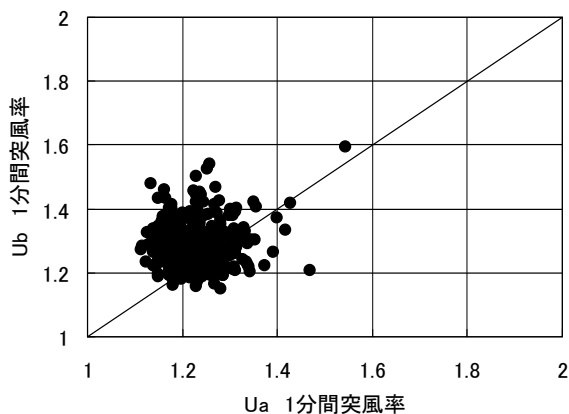


図-3.3 風向 θ_1 と U_b/U_a の関係

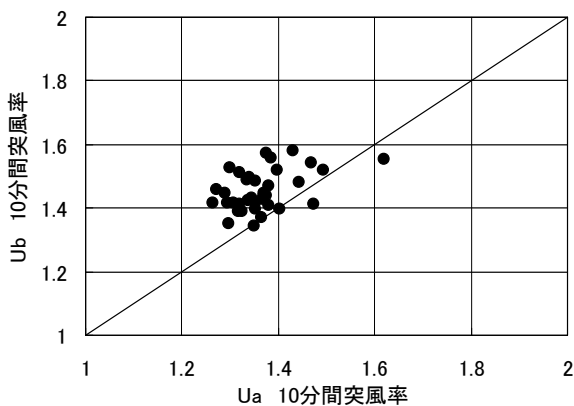
図-3.4(1) は同じ時刻の風速について観測ポールで観測された風速 U_a と風車のナセル背後で観測された風速 U_b について、突風率を 1 分間平均値および 10 分間平均値のそれぞれについて示したものである。なお突風率は、それぞれの評価時間における瞬間最大風速とその平均値との比である。図-3.4(2)~(3) は突風率の 1 分間値と 10 分間値について U_a と U_b を比較したものである。突風率は U_a と U_b については U_b の方が大きく、その傾向は 10 分間値で顕著であり、海風が作用しているこの観測ケースについては、ナセル背後では風の乱れが大きくなっていることがわかる。



(1) 平均風速と突風率



(2) 1分間突風率



(3) 10分間突風率

図-3.4 風速と突風率の関係

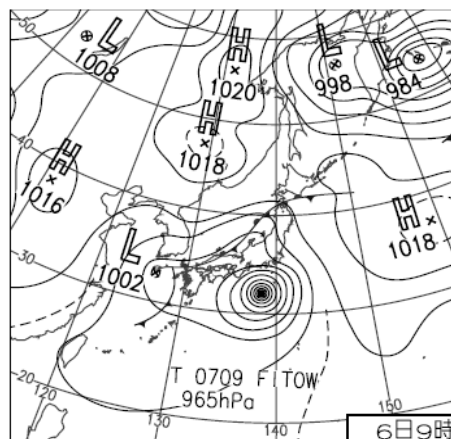
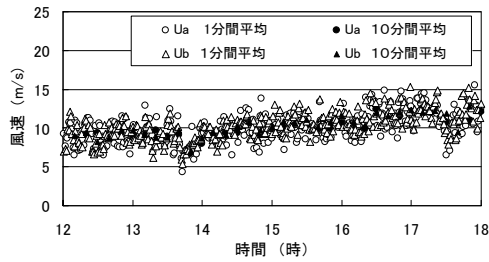


図-3.5 2007年9月6日の天気図(気象庁, 2007)

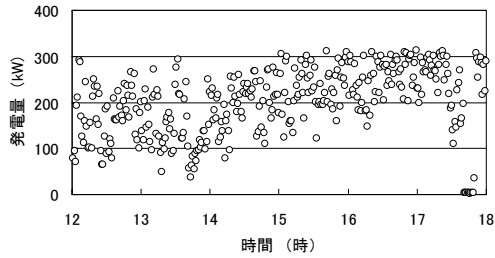
図-3.6(1)～(5)は2007年9月6日の12～18時の風速と発電量のデータである。この事例についても、風速と発電量の関係は、性能曲線と一致していることがわかる。図-3.6(3)および(5)において発電量が風車の性能曲線からはずれている点があるが、これは風車の安全制御システムが作動し、風車の発電が一時的に停止している影響である。

(2) 台風通過時

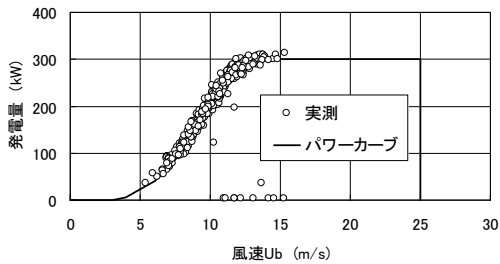
図-3.5は2007年9月6日の天気図である。この事例では、台風が伊豆半島に上陸し、関東西部を北進した。この台風の移動により富津サイトでは東風が吹いた。



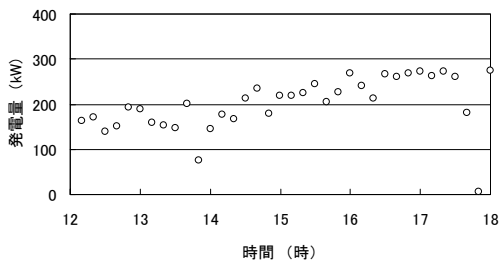
(1) 平均風速



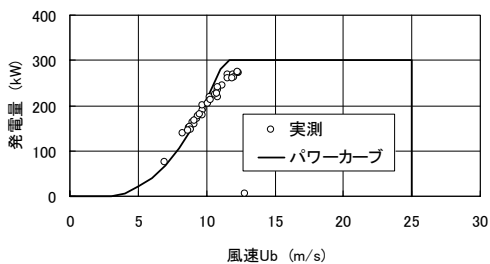
(2) 発電量 (1分間平均値)



(3) 風速と発電量の関係 (1分間平均値)



(4) 発電量 (10分間平均値)



(5) 風速と発電量の関係 (10分間平均値)

図-3.6 風速と発電量 (2007年9月6日12～18時)

図-3.7 は同じ時刻の風速について観測ポールで観測された風速 U_a と風車のナセル背後で観測された風速 U_b について、観測ポールで観測された風向 θ_1 を横軸にとり、風速比 U_b/U_a を1分間平均値および10分間平均値について示したものである。この時間帯の風速は、ほぼ 90° であり、風は陸側から吹いていることがわかる。ナセル背後の風速 U_b の観測ポールでの風速 U_a に対する比は1分間平均値では $0.7 \sim 1.6$ の間に分布し、図-3.3 で示した低気圧通過時に比べて差異が大きいことがわかる。これに対して、10分間平均値では、その比は $0.8 \sim 1.2$ の間となっており、観測時間を長くとるとその変動の幅が小さくなることがわかる。また、この例では $U_b/U_a > 1.0$ となっている点が多くみられ、観測ポールの風速 U_a がナセル背後での風速 U_b よりも低下していることがある。これは、台風が伊豆半島に上陸し関東西部を北進したことに伴い東風が作用し、陸側からの風となりその影響を受けていること、観測ポールが相対的に風車に対して下流側になっている影響による。

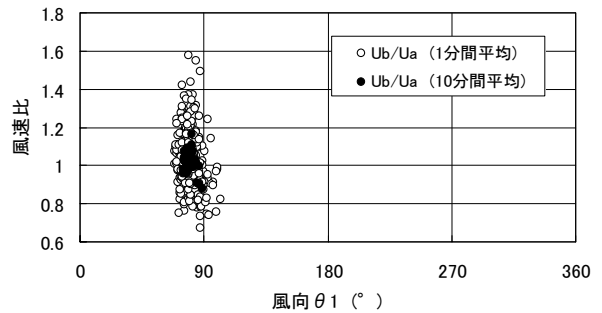
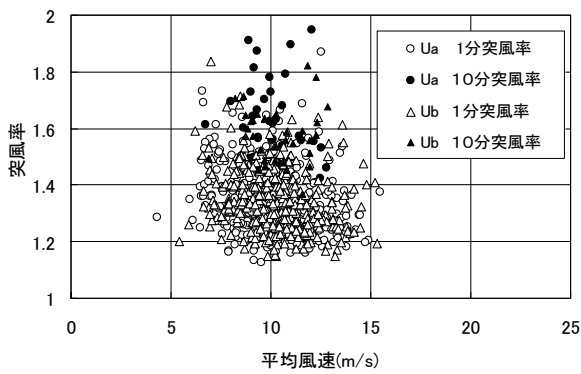
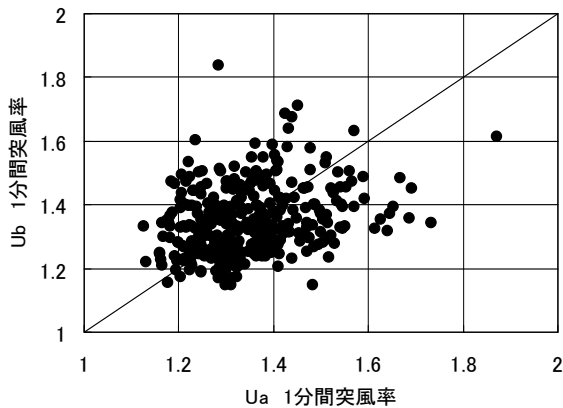


図-3.7 風向 θ_1 と U_b/U_a の関係

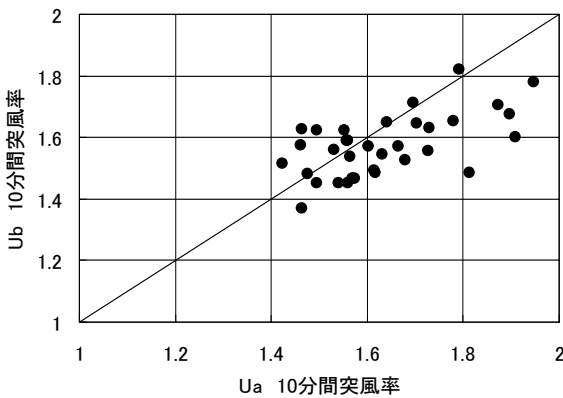
図-3.8(1) は同じ時刻の風速について観測ポールで観測された風速 U_a と風車のナセル背後で観測された風速 U_b について、突風率を1分間平均値および10分間平均値について示したものである。図-3.8(2)～(3) は突風率の1分間値と10分間値について U_a と U_b を比較したものである。 U_a と U_b の突風率については両者の大小関係については、ばらつきが大きく、図-3.4(2)～(3)で見られたような U_b の突風率が大きく、ナセル背後では風の乱れが大きくなるという傾向はこの観測例では見られない。図-3.7 に示すように風向がほぼ 90° で陸風であることにより上流側の周辺構造物による風の乱れの影響がより大きかったことが原因と思われる。また、台風時の突風率は図-3.4 で示した低気圧通過時の突風率よりも大きいことがわかる。



(1) 平均風速と突風率



(2) 1分間突風率



(3) 10分間突風率

図-3.8 風速と突風率の関係

(3) 突風率

ここでは、表-3.1に示した日時についてのデータを取りまとめて示す。解析は各観測日のデータについて、0～6時、6～12時、12～18時、18～24時の6時間ごとに分割し、それぞれについて1分間平均値、10分間平均値を求め、ついで6時間中の平均値、標準偏差を求めている。図-3.9は観測ポールにおける風速 U_a の10分間風速

の6時間中での平均値と10分間突風率の平均値を示す。ただし、風速の平均値が5m/s以上で、かつ平均風向(10分間平均値)の6時間内での標準偏差が 30° 以下のケースのデータのみをプロットしている。これを見ると突風率はおおむね1.3前後であるが、一部台風を起因とする気象擾乱において1.6を超える場合もあることがわかる。

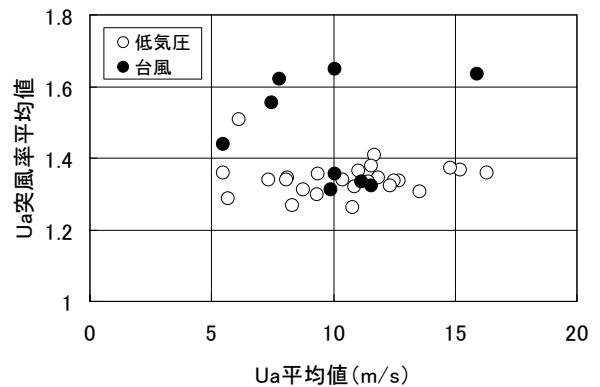


図-3.9 風速と突風率の関係

(4) 観測ポールとナセル背後の風速の比較

図-3.10は観測ポールにおける風速 U_a とナセル背後での風速 U_b の関係を示す。いずれも10分間平均風速の6時間内での平均値を比較している。図-3.3および図-3.7に示すように1分間平均値あるいは10分間平均値では、 U_b/U_a のばらつきが大きい。10分間平均値の6時間内での平均値を取ると、ほとんどの場合において U_b が U_a よりも小さいことがわかる。

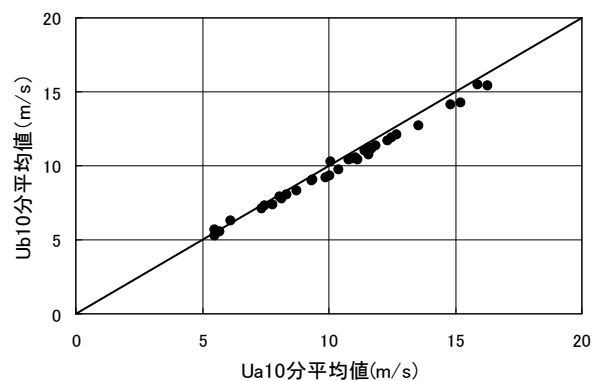


図-3.10 観測ポールでの風速 U_a とナセル背後での風速 U_b の関係

図-3.11はナセル背後での風速 U_b の観測ポールにおける風速 U_a に対する比 U_b/U_a と観測ポールにおける風向 θ

θ_1 との関係を示す。 U_a 、 U_b はいずれも10分間平均風速の6時間内での平均値を用いて比較している。図-3.3および図-3.7に示すように1分間平均値あるいは10分間平均値では、 U_b/U_a のばらつきが大きい、10分間平均値の6時間内での平均値を取ると、そのばらつきが小さくなっていることがわかる。風向 90° 付近の条件では U_b/U_a は1.0前後であるが、風向 180° 付近の条件では U_b/U_a は0.95程度に低下していることがわかる。これらの相違については、4.において風車ナセル上での風速変化に関する実験結果をふまえて考察する。

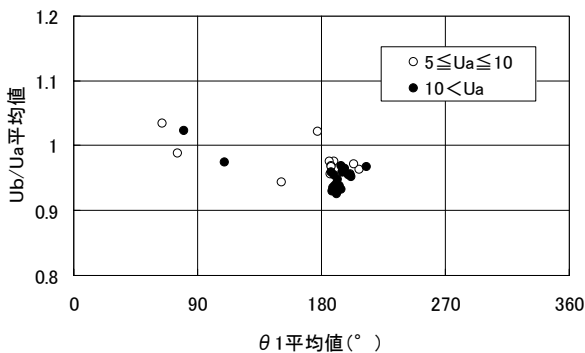


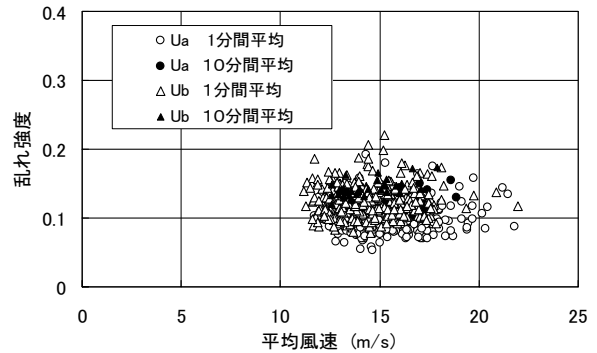
図-3.11 風向 θ_1 と U_b/U_a の関係

3.2 風の乱れ特性の検討

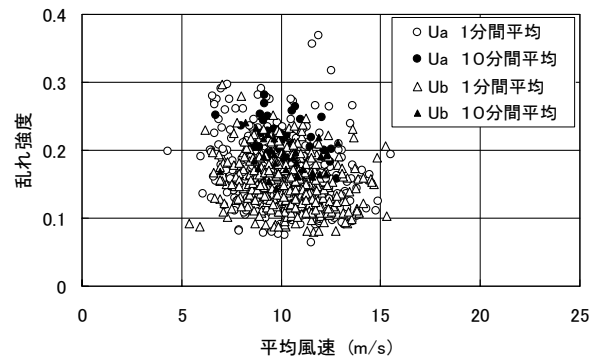
(1) 検討の方法

風はその強さおよび向きを時々刻々と変化させる。風車の設計においては、その乱れの評価が重要である。風の乱れは発電そのものに影響を与えるだけではなく、風車の機械部分の疲労および風車を支持する構造体へも疲労の影響を与える。

図-3.12(1)～(2)は2007年3月5日と9月6日のケースの風速 U_a と U_b について、平均風速と乱れ強度(=風速の標準偏差/平均風速)の関係を示す。両ケースにおいて、風の乱れ(乱れ強度)については大きな違いがみられる。すなわち、低気圧通過時については、乱れが小さいのに対して、台風時には乱れが大きい。両事例において乱れ強度には相違があるが、先に示した図-3.2(3)、(5)と図-3.6(3)、(5)に示すように所定の性能カーブどおりの発電量が得られていることがわかる。



(1) 2007年3月5日(12～18時)



(2) 2007年9月6日(12～18時)

図-3.12 平均風速と乱れ強度の関係

なお、図-3.12においては、風向が時間的変化しているが、軸を固定せずに風速のデータ整理を行っている。そこで、風速と風向の観測データより風速の東西成分、南北成分の時系列を求め、これらを用いて10分ごとの風向の主軸を求め、主軸方向の風速とこれに直交する成分の風速をそれぞれ求めて乱れ特性を解析する。さらにそれに加えてNOWPHAS観測点であるアシカ島における風速との比較も行う。アシカ島は東京内湾の入り口に位置し、より海上の乱れの少ない風速を観測していると想定されるからである。

(2) 低気圧通過時の風の乱れ特性

3.1で示した2007年3月5日はアシカ島では風速データが欠測であったため図-3.13に示す2007年4月22日の事例について解析する。この日は低気圧が日本海を東進したためこの低気圧に向かって南西の風が吹くという条件にあった。

図-3.14(1)～(4)は2007年4月22日の富津およびアシカ島における平均風速、平均風向、風速の標準偏差、および乱れ強度の1日の変化を示す。富津においては、風速は連続観測であるが、アシカ島においては2時間ごと

に 10 分間の 5s サンプル間隔の観測である。両地点の観測された風速を比較すると富津サイトの方が大きい結果となっている。これは富津サイトにおいては、風速はナセルの高さである高度 43.5m で観測されているのに対して、アシカ島では観測高度が 13.5m であるためである。観測高度の違いを見るためべき乗則で富津における観測高さの風速に補正すると、べき指数 α が 1/7 である場合にはアシカ島の観測風速は $(43.5/13.5)^{1/7} = 1.18$ 倍されることになる。図-3.14(2)で示される観測風向についても違いが見られる。アシカ島の方がやや西寄りの風向となっている。図-3.14(3)で示される風速の標準偏差についても違いが見られる。アシカ島の方が風速の標準偏差が大きいが、三浦半島による影響と観測高度が低いことによる乱れの大きさが影響していると考えられる。このことより図-3.14(4)で示される乱れ強度についてもアシカ島の方が大きくなるという結果になっている。

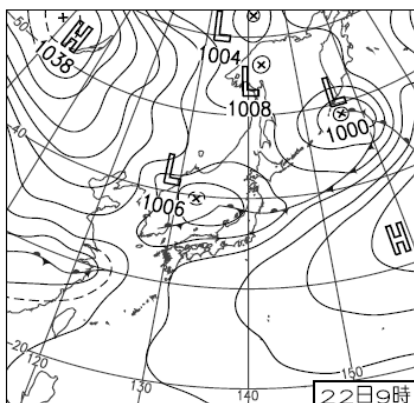
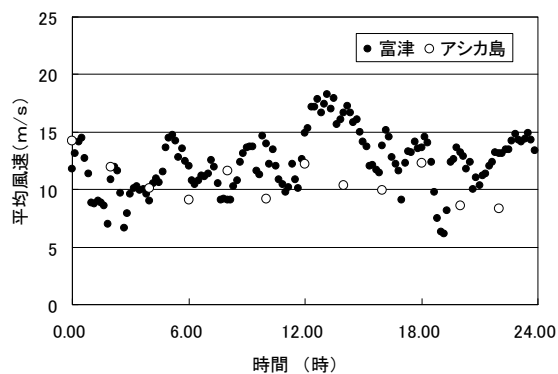
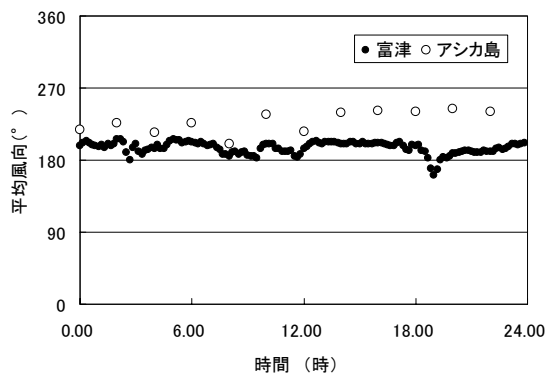


図-3.13 2007年4月22日の天気図 (気象庁, 2007)

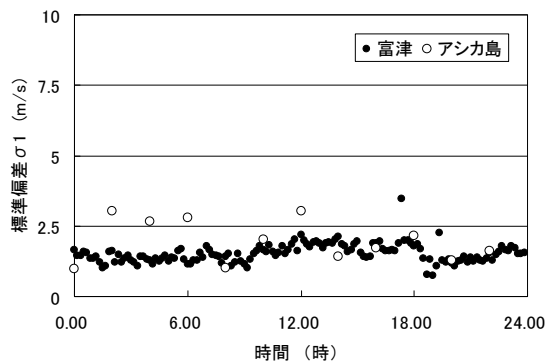
図-3.14 は主軸方向の風速の標準偏差より乱れ強度を求めているが、図-3.15 は同日の富津における主軸方向の風速の標準偏差 σ_1 と主軸直角方向の風速の標準偏差 σ_2 を求めたものの時系列を示している。この図より風速の標準偏差は主軸方向とそれと直交する方向とで差異が大きいことがわかるが、このことは、永井 (2002) で得られた解析結果と同様であった。



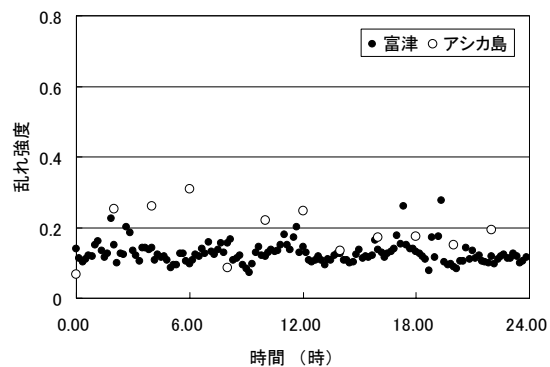
(1) 10分間平均風速



(2) 10分間平均風向



(3) 風速の標準偏差



(4) 乱れ強度

図-3.14 平均風速と乱れ強度 (2007年4月22日)

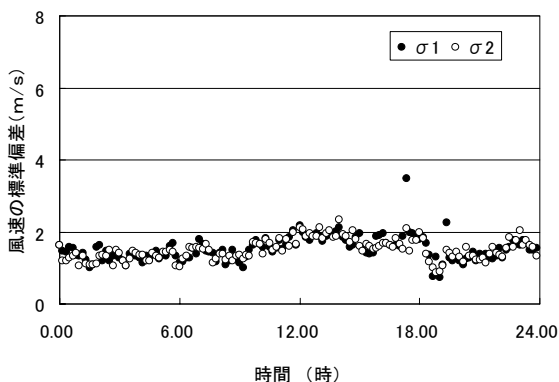
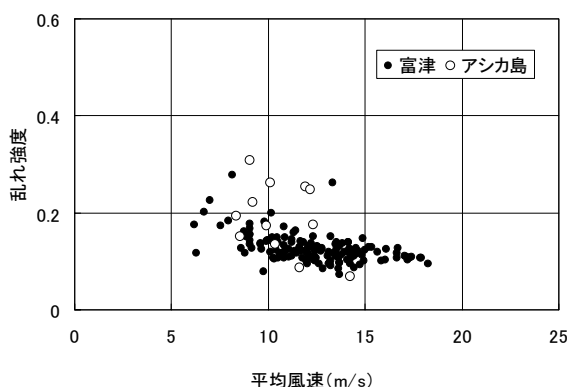
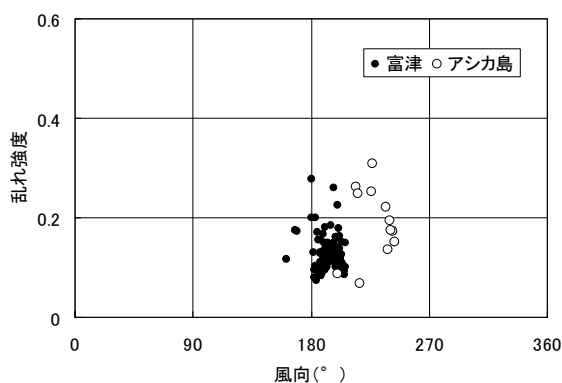


図-3.15 主軸と主軸直角方向の風速の標準偏差の比較 (2007年4月22日)

図-3.16(1)～(2)は富津とアシカ島について、主軸方向の風速の乱れ強度を図示したものであり、(1)は平均風速との関係を、(2)は風向との関係を示す。平均風速との関係では、平均風速が小さなおきほど乱れ強度が大きいという既往の研究と同様な結果が得られている。また、風向との関係では明確な関係は見出すことができない。



(1) 10分間平均風速と乱れ強度



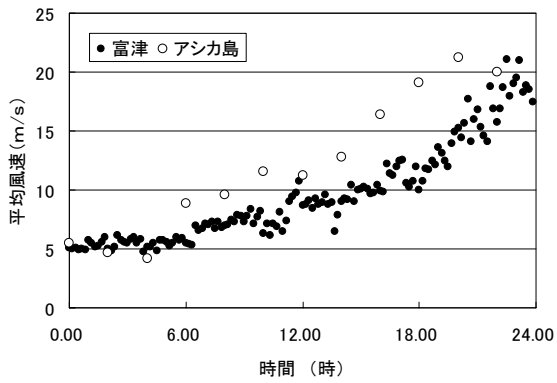
(2) 10分間平均風向と乱れ強度

図-3.16 乱れ強度の特性 (2007年4月22日)

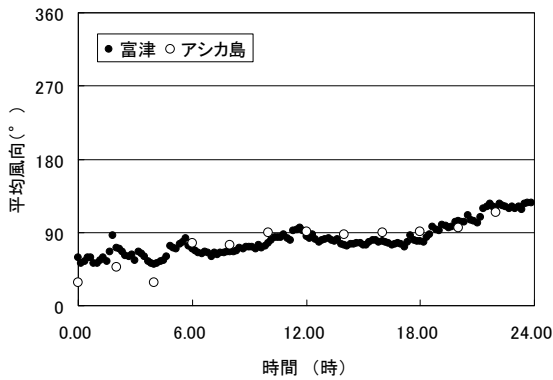
(3) 台風通過時の風の乱れ特性

3.1で示した2007年9月6日の事例について解析する。

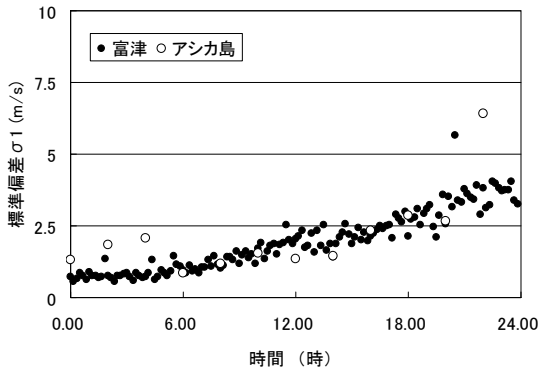
図-3.17(1)～(4)は2007年9月6日の富津およびアシカ島における平均風速、平均風向、風速の標準偏差、および乱れ強度の1日の変化を示す。この事例では、両地点の観測された風速を比較するとアシカ島の方が大きい結果となっている。観測高度については先の事例と変わらないが、風向が房総半島側から関東西部の台風の原因に向かう東であったため富津サイトでは陸上の影響をより強く受けていたのに対し、アシカ島では陸による遮蔽の程度が小さかったことの影響によると思われる。観測高度の差を考慮すると、アシカ島の風速は1.18倍されることになるので、その相違はさらに大きかったと考えられる。図-3.17(2)で示される観測風向についてはこの場合にはほとんど違いが見られない。図-3.17(3)で示される風速の標準偏差については風速が小さな時間帯ではアシカ島の方が大きい傾向が見られるが、風速が増大するに従い相違は小さくなる。図-3.17(4)で示される乱れ強度については風速の小さな時間帯ではアシカ島の方が大きい、風速が大きくなると富津に比べて小さくなるという結果になっている。ただし台風の場合には、台風の原因がある程度近いところを通過するケースにおいては、低気圧の場合と比べ気圧傾度の勾配変化が大きいため、台風の移動に伴う風場の変化に伴う風速の時間変化も大きい。したがって、2地点間の同時刻の風速や乱れ強度の大きさを単純には比較できない。この場合も、図-3.17(1)にアシカ島の風速が富津の風速に比べて約3時間早く増大し、風速のピーク値が生じている。台風のケースについては、観測サンプルが少ないことに加え、2地点における風速の観測高度も異なることから、今後は洋上における観測高度の異なるデータや多くの台風に対するデータ蓄積を行い分析する必要があると思われる。



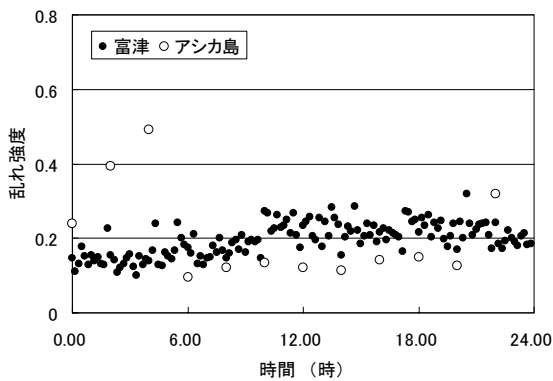
(1) 10分間平均風速



(2) 10分間平均風向



(3) 風速の標準偏差



(4) 乱れ強度

図-3.17 平均風速と乱れ強度 (2007年9月6日)

図-3.18 は同日の富津における主軸方向の風速の標準偏差 σ_1 と主軸直角方向の風速の標準偏差 σ_2 を求めたものの時系列を示している。この図より風速の標準偏差は台風の場合においても、主軸方向とそれと直交する方向とで差異が大きくないことがわかる。

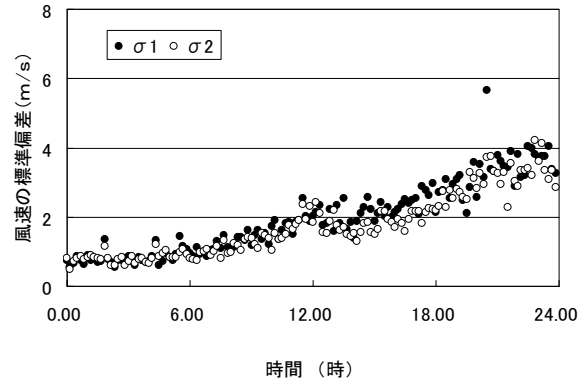
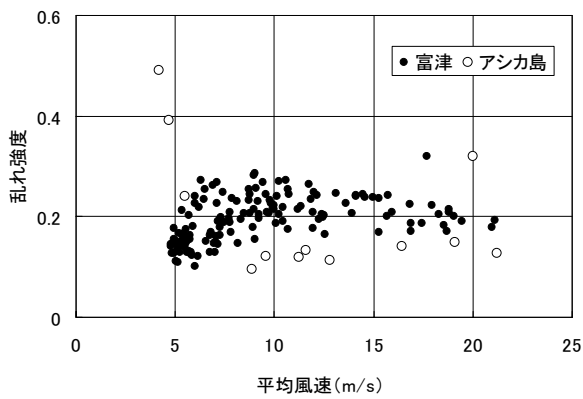
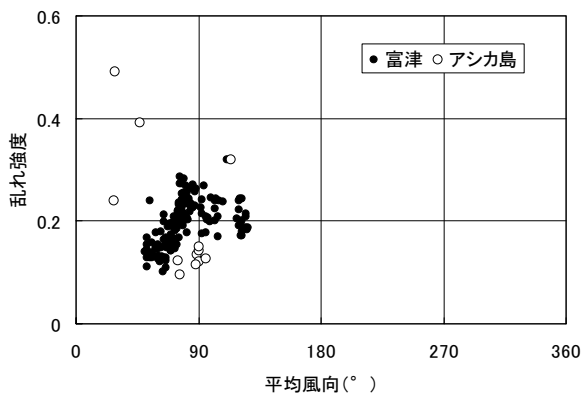


図-3.18 主軸と主軸直角方向の風速の標準偏差 (2007年9月6日)

図-3.19(1)~(2)は台風通過時の2007年9月6日の富津とアシカ島における風速の観測結果について、主軸方向の風速の乱れ強度について図示したものであり、(1)は平均風速との関係を、(2)は風向との関係を示す。平均風速との関係では、平均風速が小さなきほど乱れ強度が大きいという既往の研究と同様な結果が得られている。また、風向との関係では明確な関係は見出すことができない。

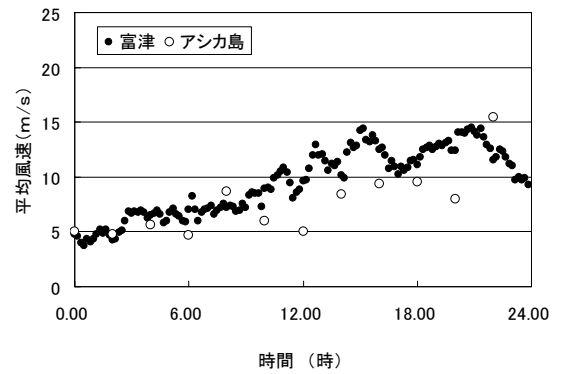


(1) 10分間平均風速と乱れ強度

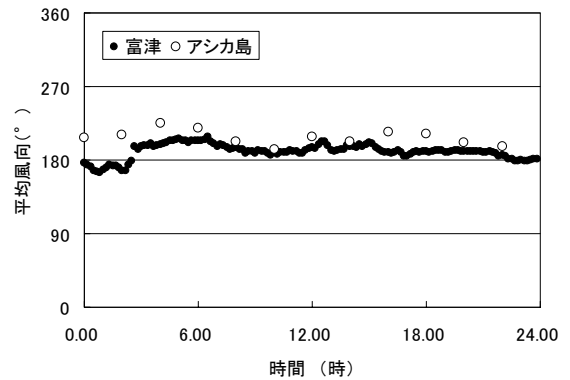


(2) 10分間平均風向と乱れ強度

図-3.19 乱れ強度の特性 (2007年9月6日)



(1) 10分間平均風速



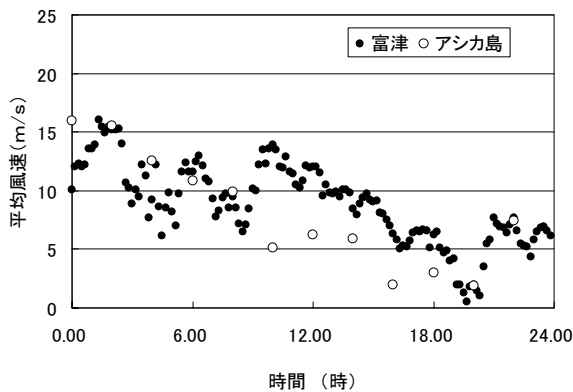
(2) 10分間平均風向

図-3.20 平均風速と風向 (2007年4月13日)

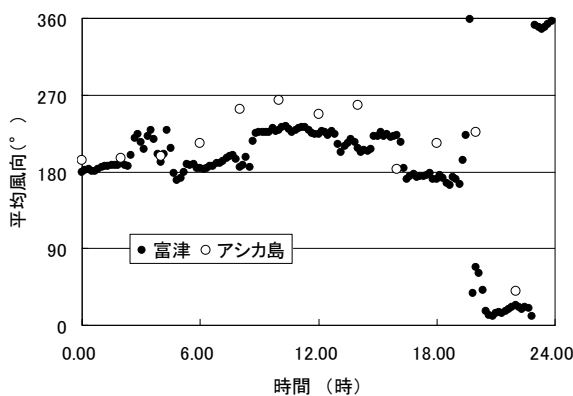
(4) 風の乱れ特性に関する考察

(2),(3)節では低気圧通過時と台風通過時の事例について風の乱れ特性の特徴を述べた。ここでは、さらに事例を加えて考察する。

まず、低気圧通過時について述べる。図-3.20 および図-3.21は低気圧通過時の2007年4月13日と4月14日の1日の10分間平均風速と平均風向の変化を示したものである。両日もとも低気圧の通過に伴い平均風速が最大で15m/sに達している。風向は、4月13日は終日200°で変化は少ないが、4月14日は低気圧の通過による変化が大きい。



(1) 10分間平均風速



(2) 10分間平均風向

図-3.21 平均風速と風向 (2007年4月14日)

図-3.22 および図-3.23 は低気圧通過時の平均風速と乱れ強度の関係および平均風向と乱れ強度の関係を示す。アシカ島の4月13日、14日について乱れ強度が大きいことがわかる。アシカ島については風速の観測高度が低いいため乱れの影響が大きいことがわかる。

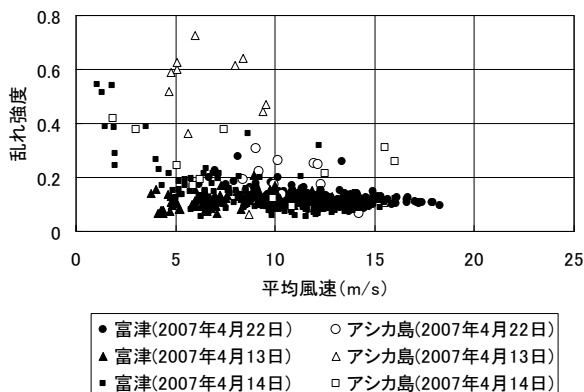


図-3.22 平均風速と乱れ強度の関係 (低気圧)

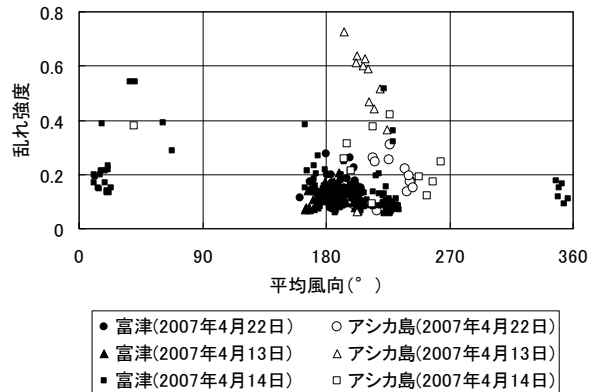
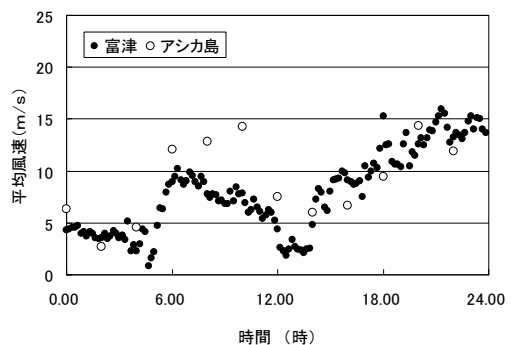
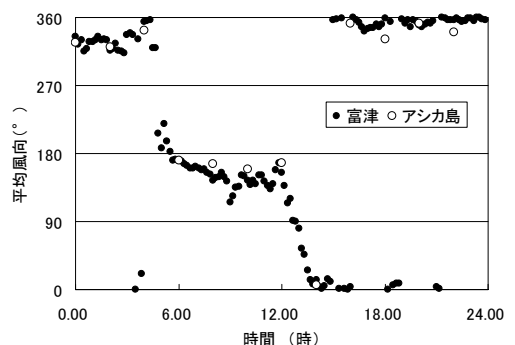


図-3.23 平均風向と乱れ強度の関係 (低気圧)

つぎに、台風通過時について述べる。図-3.24 および図-3.25 は台風通過時の2007年7月15日と9月17日の1日の10分間平均風速と平均風向の変化を示したものである。両日とも台風の接近に伴い平均風速が最大で15m/sに達している。風向は、9月17日は終日180~200°で変化は少ないが、これは台風から温帯低気圧に変化し、日本海を東進し、それに向かって南風が終日吹いたことによる。7月15日は台風が伊豆諸島神津島付近を通過し東進したため、台風中心が富津サイトに対して南西側から南東側に変化した影響により風向の変化が大きい。

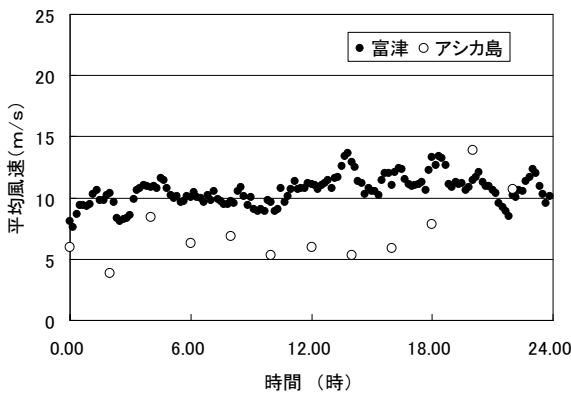


(1) 10分間平均風速

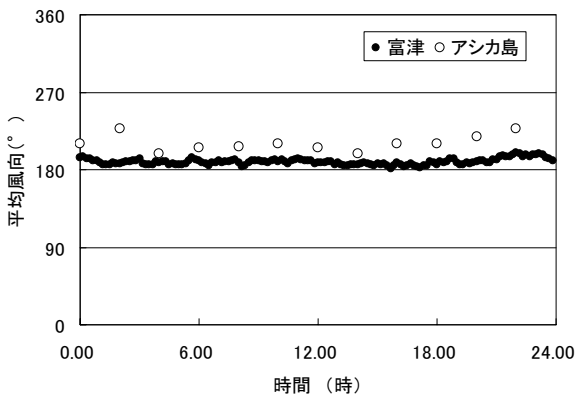


(2) 10分間平均風向

図-3.24 平均風速と風向 (2007年7月15日)



(1) 10分間平均風速



(2) 10分間平均風向

図-3.25 平均風速と風向 (2007年9月17日)

図-3.26 および図-3.27 は台風通過時の平均風速と乱れ強度の関係および平均風向と乱れ強度の関係を示す。アシカ島の7月7日、9月17日について乱れ強度が大きいことがわかる。アシカ島については風速の観測高度が低いため乱れの影響が大きいことによる。

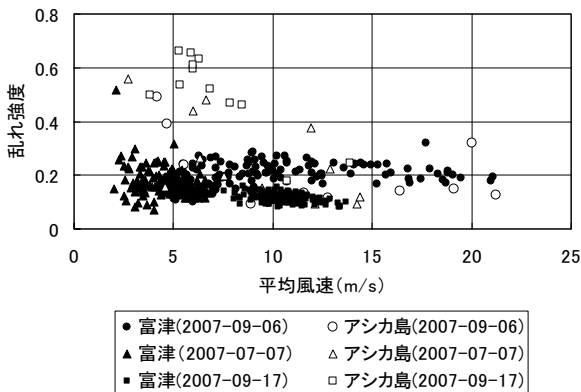


図-3.26 平均風速と乱れ強度の関係 (台風)

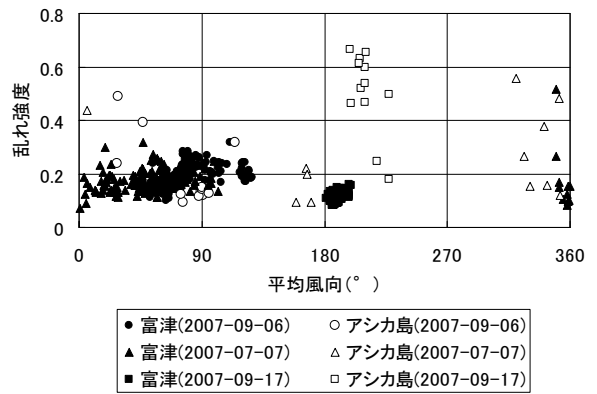


図-3.27 平均風速と乱れ強度の関係 (台風)

土木学会風力発電設備支持物構造設計指針・同解説 [2007年版] ((社)土木学会,2007) によれば平坦とみなせる地点におけるハブ高さ H_b での乱れ強度 $I_p(P(\theta))$ は式 (3.1), (3.2) であらわされる。

$Z_b(P(\theta)) < H_b \leq Z_G(P(\theta))$ のとき

$$I_p(P(\theta)) = 0.1 \left[\frac{H_b}{Z_G(P(\theta))} \right]^{-\alpha(P(\theta)) - 0.05} \quad (3.1)$$

$H_b \leq Z_b(P(\theta))$ のとき

$$I_p(P(\theta)) = 0.1 \left[\frac{Z_b(\theta)}{Z_G(P(\theta))} \right]^{-\alpha(P(\theta)) - 0.05} \quad (3.2)$$

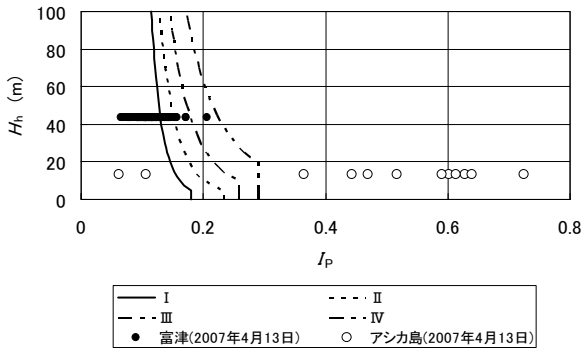
ここで、 Z_b , Z_G , α は表-3.2 で表される。

表-3.2 平均風速と乱れ強度の高度補正を定めるためのパラメータ

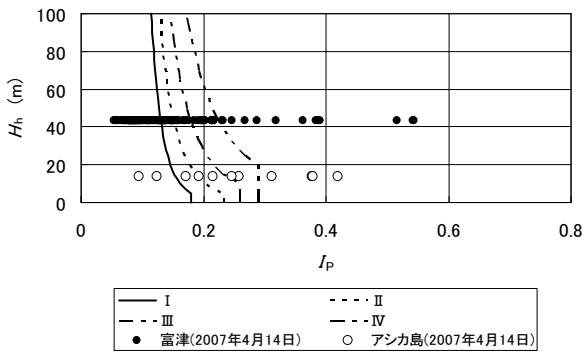
	地表面粗度区分 (P)			
	I	II	III	IV
Z_b (m)	5	5	10	20
Z_G (m)	250	350	450	550
α	0.1	0.15	0.2	0.27

図-3.28(1)～(3)および図-3.29(1)～(3)は、式(3.1)および式(3.2)を図化し、その上に低気圧通過時と台風通過時の富津およびアシカ島における風速の乱れ強度の実測値をプロットしたものである。実測値は、ばらつきが大きいのが、観測高度の低いアシカ島において、富津における乱れ強度が大きいことがわかる。一般に乱れ強度は海上の方が小さいとされているが、観測高度の影響が大きく、洋上風といえども観測高度による影響が大きい可能性が高い。なお、海上風の乱れの高度分布については、

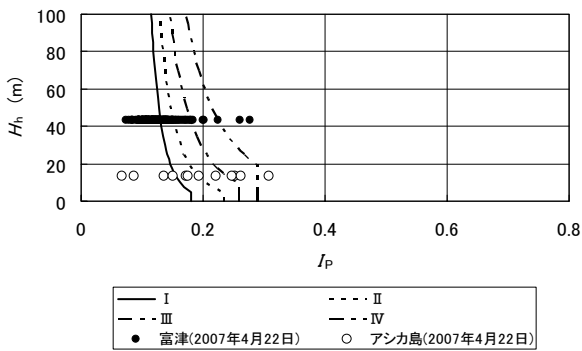
新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）からの委託による洋上風況観測システム実証研究として建設が進められている洋上気象海象観測タワーによる、風速の鉛直方向の風速分布や乱れ強度の分布の観測記録に、期待されるところが大きい今後の研究課題である（Nagai et.al., 2010c）.



(1) 2007年4月13日

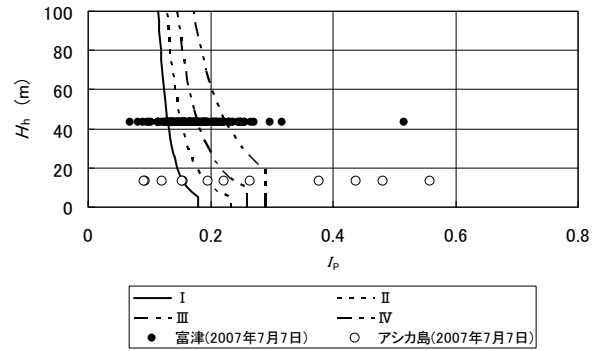


(2) 2007年4月14日

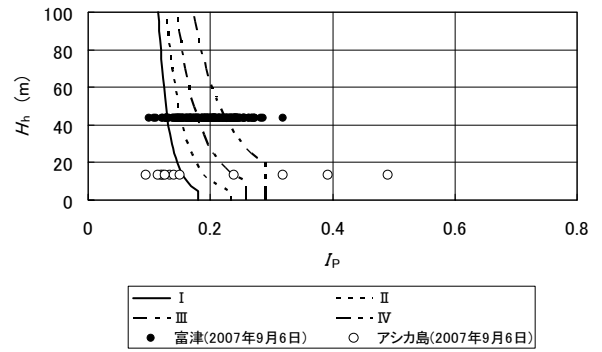


(3) 2007年4月22日

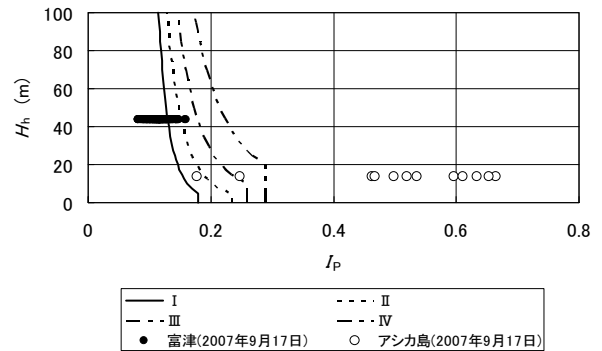
図-3.28 高度と乱れ強度の関係（低気圧）



(1) 2007年7月7日



(2) 2007年9月6日



(3) 2007年9月17日

図-3.29 高度と乱れ強度の関係（台風）

4. 風車ナセル上の風速特性の実験的検討

4.1 実験の目的と概要

2007年より東京湾東岸部の駒井ハルテック富津工場敷地内に300kW風力発電機を設置して実証試験を行っており、そこでは風車から66m（風車直径の2倍：2D）離れた風況観測ポールにて風速 U_a 、ナセル風速 U_b および発電出力等を計測している（永井ら,2008；白石ら,2010）.

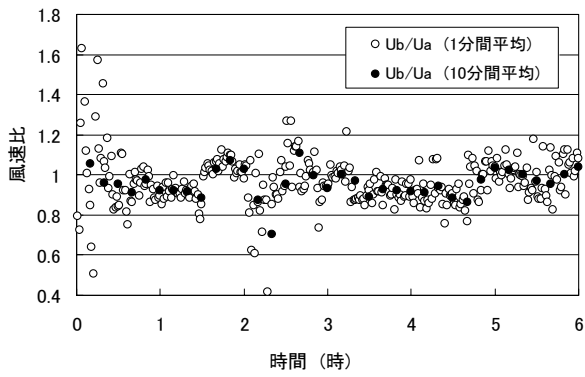


図-4.1 風速比 (2007年3月5日0~6時)

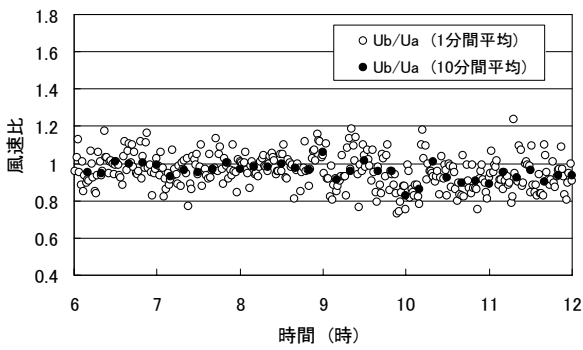


図-4.2 風速比 (2007年3月5日6~12時)

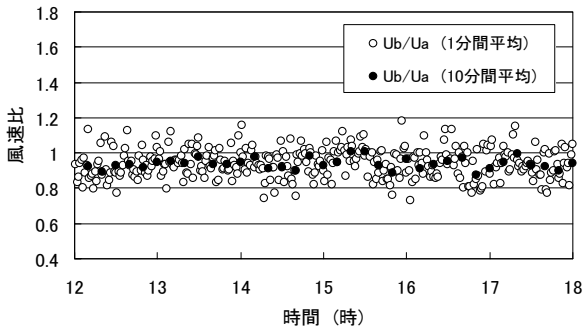


図-4.3 風速比 (2007年3月5日12~18時)

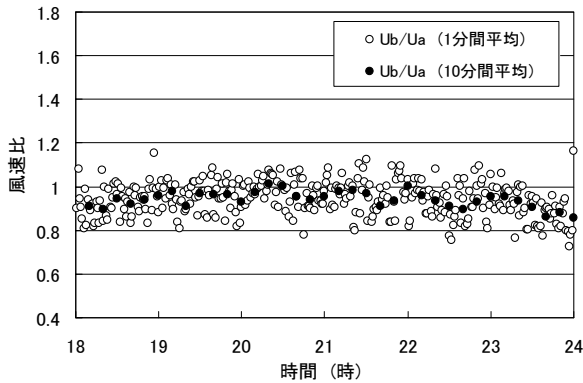


図-4.4 風速比 (2007年3月5日18~24時)

その計測データのうち、2007年3月5日の風況ポール風速（10分間平均）とナセルの風速（10分間平均）の比 (U_b/U_a) を図-4.1~4.4に示す。この結果より、風速比 (U_b/U_a) は、概ね0.8~1.0となっていた。

また、2007年3月5日の風向は、図-4.5~4.8に示すように、 180° から 200° であり、この方向は図-4.9の風向と風車・観測ポールの位置関係から、風況観測ポールが風車より風上に位置し、海風となることから、建物や風車後流の影響を受けていない観測データであった。

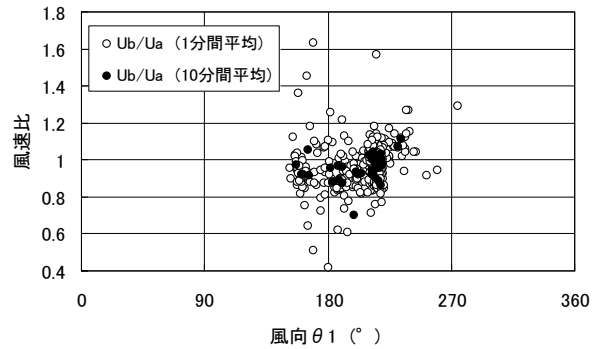


図-4.5 風向と風速比 (2007年3月5日0~6時)

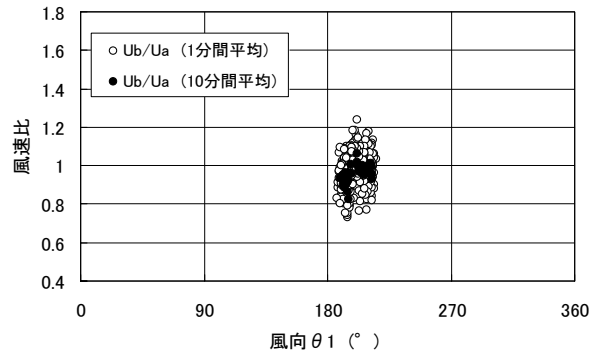


図-4.6 風向と風速比 (2007年3月5日6~12時)

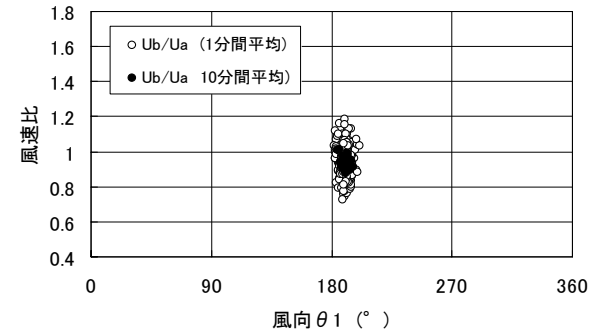


図-4.7 風向と風速比 (2007年3月5日12~18時)

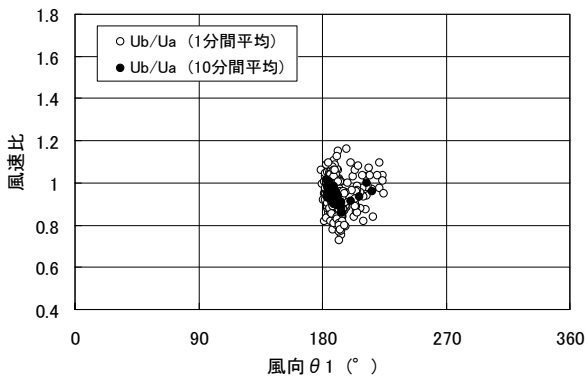


図-4.8 風向と風速比 (2007年3月5日12~18時)

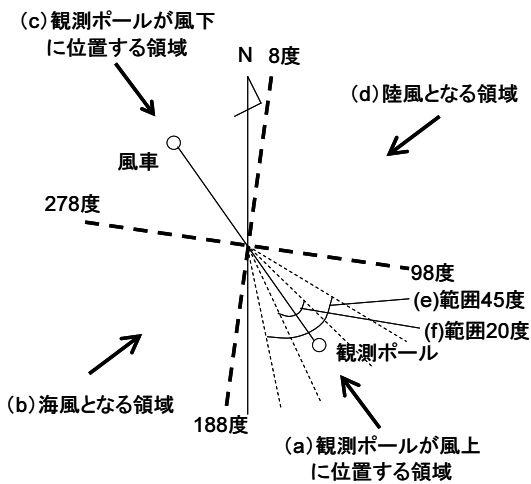


図-4.9 風向と風車，観測ポールの位置関係

しかし、300kW 風力発電機の風車ローターは、各風速において最大のパワー係数が得られる周速比で運用されるよう設計されているにも関わらず、風速比 (U_b/U_a) が 0.75~1.2 程度であり、翼素運動量複合理論において最大パワー係数が得られるのは後流風速が流入風速の 1/3 まで減速する時 (最大速度低減率) であり、実測データより得られた風速比は、その減速まで至っていない。これは、ナセル風速が何らかの要因によって、風況ポール風速よりもわずかながら高いことを示唆している。この要因として考えられるのが、①風速計特性、②校正の誤差、③ナセル形状に起因する増速効果などが上げられる。この中で、③に関連して、ローター周りや後流の速度分布に関する CFD によるシミュレーションや風洞実験等による研究はなされているが、ナセル形状がナセル上に設置された風速計への影響について研究された報告は少ない。

そこで、本研究ではこの現象を検証するため、小形供試風車と 300kW 風車のナセル模型を用いて、PIV (Particle Image Velocimetry : 粒子像相関流速計) によって風車後流場とナセル模型周りの流れ場の計測を行い、ナセル形状に起因する風速の増速効果の検証を行った。

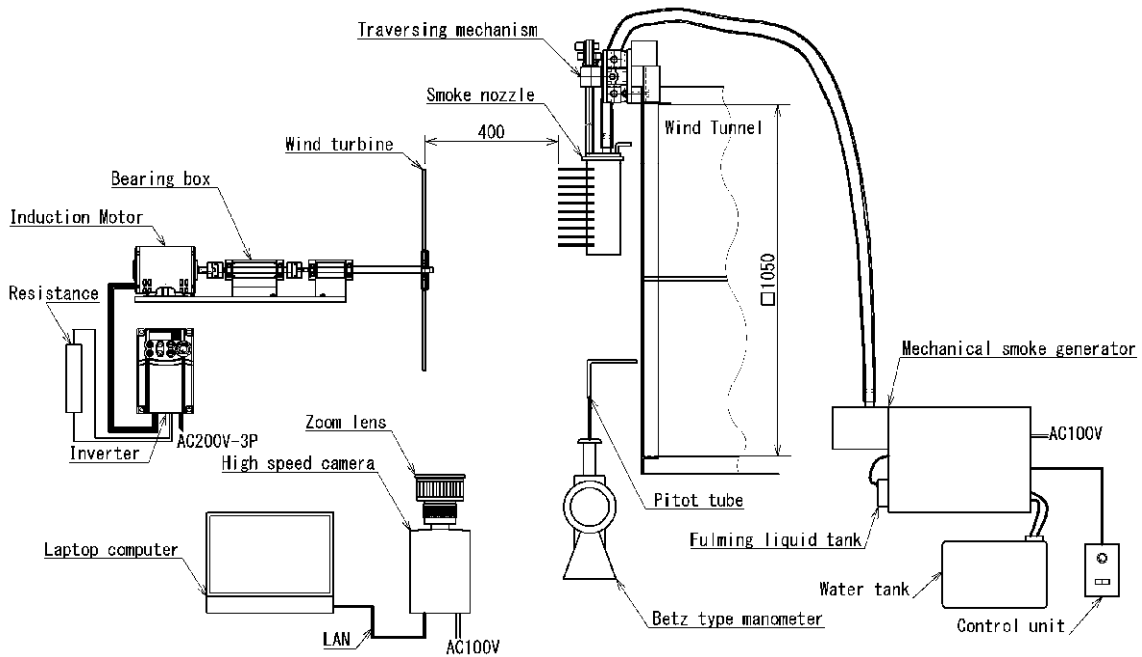


図 4-11 供試風車の可視化実験装置概要図

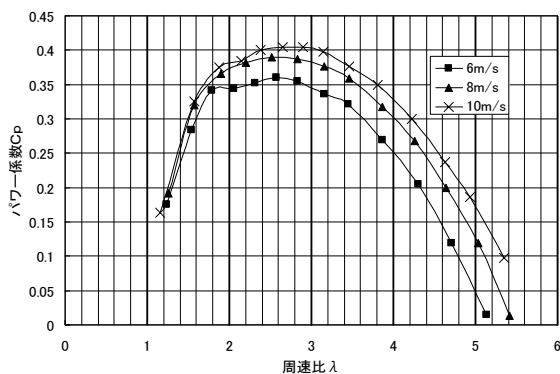


図-4.10 供試風車のパワー係数 (西沢ら,2009)

4.2 供試風車の可視化実験装置および方法

本実験で使用した供試風車は、翼素運動量複合理論を用いて設計されており、直径 0.6m である。

なお、300kW 風車の翼枚数は 3 枚翼であり、設計周速比は $\lambda_d=7$ であるが、実機と同様の設計値を用いて直径 0.6m の供試風車の性能試験を行うと、パワー係数が著しく低下する傾向があるため、実機と同様のパワー係数が得られる設計値を用いて供試風車を製作している。そのため、翼枚数は 5 枚を採用した。その設計値を表-4.1 に示す。

図-4.10 は、風速 6m/s、8m/s および 10m/s の時の供試風車のパワー係数の結果である。これより、風速 8m/s で最大パワー係数 $C_{pmax}=0.38$ 、風速 10m/s で最大パワー係数 $C_{pmax}=0.41$ が得られており、対象とする 300kW 級風車の最大パワー係数に近い値となっている。

図-4.11 に可視化実験装置の概要を示す。本実験に用いた風洞は、足利工業大学が所有する吹き出し型 (エッフェル型) で風速 2~20m/s まで変化させることができる。吹き出し口の断面は 1.05m×1.05m である。

風速は、ピトー管とマノメータを用いて計測した。風速は 8m/s に設定し、供試風車の最大パワー係数が得られる周速比に対応する回転数でローターを回転させた。回転数の調整は、インバータおよび誘導電動機を用いており、周速比は 2.67、回転数は 680rpm である。

表-4.1 供試風車の設計パラメータ (西沢ら,2009)

項目	仕様
翼型	Clark Y
直径	0.6m
揚力係数 C_L	1.1
迎角 α	8deg
設計周速比 λ_d	2
翼枚数	5 枚

トレーサは、図-4.12、表-4.2 に示す煙発生装置を用いて、図-4.13、表-4.3 に示す煙ノズルより放出した。トレーサへの光源は、ハロゲンランプを 6 灯用いている。そのトレーサを図-4.14 に示す高速度カメラを用いて撮影し、解析に必要な動画を抽出した。

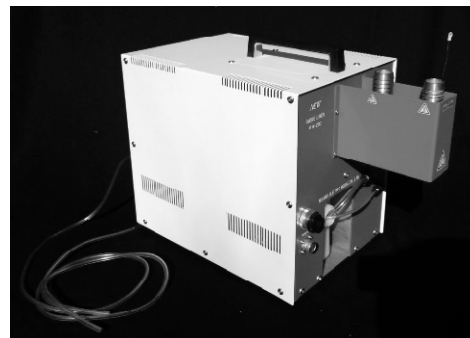


図-4.12 煙発生装置の外観

表-4.2 煙発生装置の仕様

項目	仕様
液消費量	約 0.2L/h
スモーク量	30m ³ /min
スモーク粒子	約 1~50 μm
吐出口径	φ 25mm
メーカー	日章電機 (株)



図-4.13 煙ノズルの外観

表-4.3 煙ノズルの仕様

項目	仕様
吐出口数	10本
吐出口径	φ 5mm
吐出口間隔	25mm
メーカー	日章電機 (株)



図-4.14 高速度カメラの外観

表-4.4 高速度カメラの仕様

項目	仕様
画素数	800×600
濃度諧調(bit)	モノクロ：10 カラー：30
撮影速度(fps)	フルフレーム：1,200 分割フレーム：95,000
感度(ISO/ASA)	モノクロ：4,800 カラー：1,200
メーカー	(株) ノビテック

なお、この後に PIV ソフトウェアによって流れ場の計測を行うが、その最適粒子移動ピクセル数が 10pix であるため、各風速の高速度カメラのフレームレートを算出し、設定する必要がある。今回は、撮影範囲の左端から右端までの距離を実測した結果、0.95m であったため、今回の撮影解像度 800×600pix より、1pix あたりの長さ l は、式(4.1)となる。

$$l = \frac{0.95}{800} = 0.0011875 \text{ (m)} \quad (4.1)$$

PIVの最適移動距離は、上式の解を10倍することで、式(4.2)のように算出される。

$$l = 0.0011875 \times 10 = 0.011875 \text{ (m)} \quad (4.2)$$

これを風速 V で除することで、0.011875m 移動するための時間が求められ、一コマあたりの時間となる(式(4.3))。

$$t = \frac{0.011875}{V} \text{ (s)} \quad (4.3)$$

高速度カメラのフレームレート(FR)は、フレーム間の時間の逆数として求められるため、式(4.4)で算出できる。

$$FR = \frac{V}{0.011875} \text{ (fps)} \quad (4.4)$$

式(4.4)より、風速 8m/s におけるフレームレートは、673.7 fps となるが、高速度カメラのフレームレート設定

は計算結果のように細かく設定できないため、700 fps で可視化実験を行った。

4.3 供試風車の可視化実験結果 (Nishizawa et al., 2010)

可視化実験では、風速 8m/s の時の風車周りの動画を高速度カメラにより撮影し、風車ローターが2回転する間の123フレームを対象にしてPIVによって各フレーム間で計測処理を行い、各解析グリッドの速度および角度を取得した。さらに各解析グリッドに対して速度および角度の平均化処理を行った。平均化処理を行った後の各グリッドの平均ベクトル図および流れ場の平均風速分布を図-4.15および図-4.16に示す。半径方向および軸方向の座標軸は、ベクトル図に記載している。なお、ローターのフランジにより気流が遮られる部分は、 $r/R=0.2$ 以下の部分であること、煙ノズルの吹出口の全幅が 250mm とトレーサ面に限りがあるため、PIV 計測の対象エリアは $r/R=0.3$ 以上とした。ここに r は風車中心からの距離、 R は風車の半径を意味する。

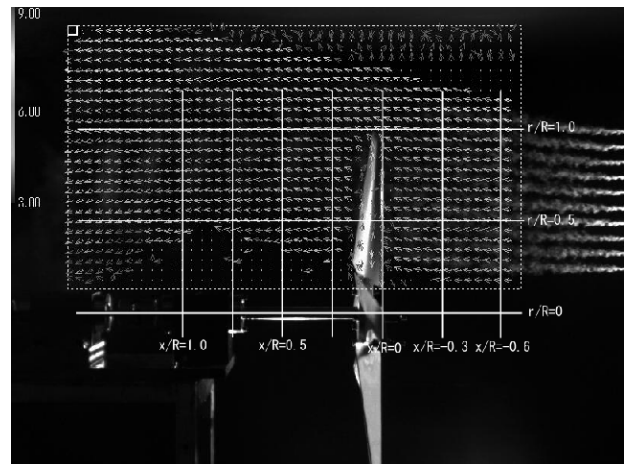


図-4.15 供試風車の流れ場のベクトル図

図-4.16より、供試風車の後流場の風速は、4.0～5.0m/s となっており、ブレードのスパン方向30%から100%の領域において、ほぼ均一に速度の低減が見られることがわかった。また、その速度低減率は、0.5～0.625であった。

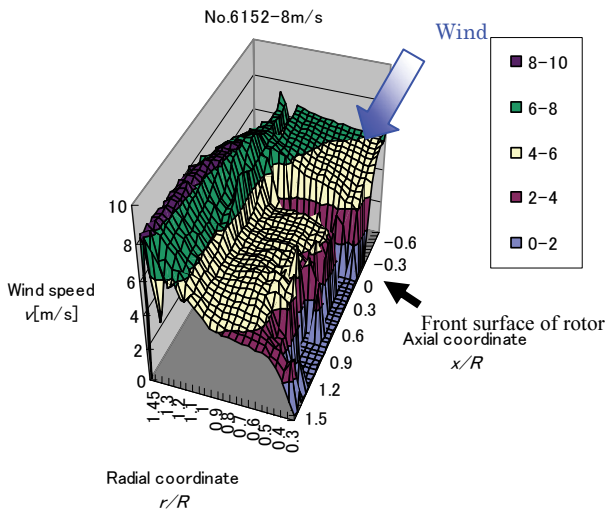


図-4.16 供試風車の平均風速分布

4.4 ナセル模型の可視化実験装置および方法

図-4.17 にナセル模型の概寸図を示す。なお、本模型には、ブレードは取付けられておらず、風車ローターが回転した時の後流の風速分布までは再現できないが、ブレード根元およびスピナーは再現されている。そこで、本実験では、ブレード根元のアジマス角が 0° および 180° の時のナセル形状の周りの流れ場を計測し、その風速の増減比に前節の供試風車による速度低減率を乗じて検証を行う。

なお、アジマス角とは、鉛直上向き方向から時計回りに測られたロータ中心回りのブレード角度であり、スピナー（スピナーキャップとも言う）とは、ハブやブレード根元を覆うカバーのことである。

ナセル模型の風洞装置への設置は、図-4.18 に示すように、カメラ用の三脚を用いており、ナセル模型と三脚の固定にはタイラップを用いた。図-4.19 に実験装置の概要図、図-4.20 に実験中の概観を示す。

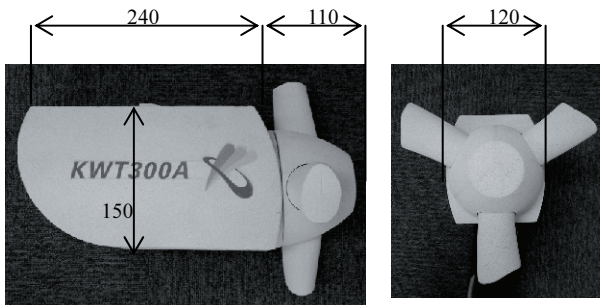


図-4.17 ナセル模型の概寸図

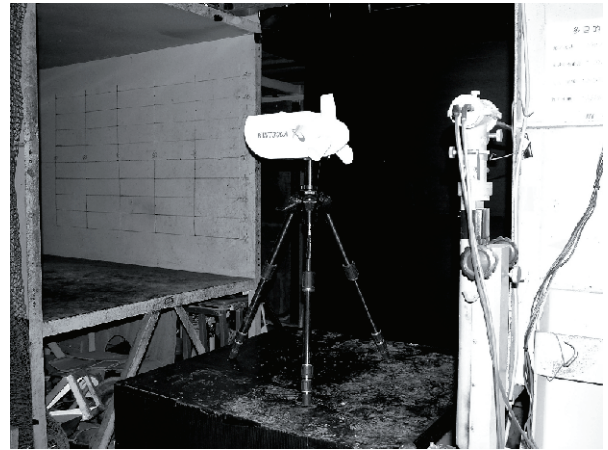


図-4.18 ナセル模型の設置方法

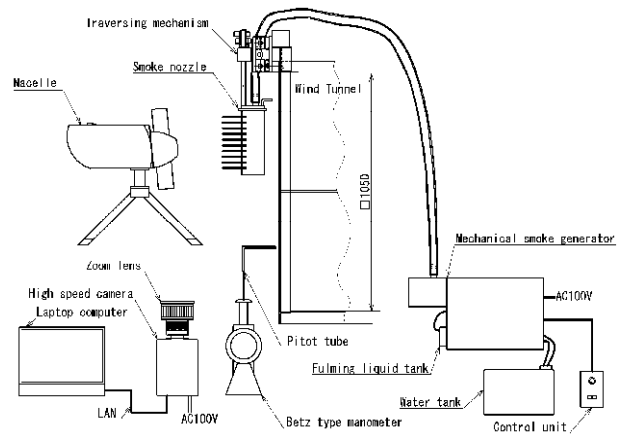


図-4.19 実験装置概要図



図-4.20 実験中の概観

前節と同様に、実験にて撮影した動画を基にして PIV ソフトウェアによって流れ場の計測を行うため、フレームレートの算出を行った。今回は、撮影範囲の左端から右端までの距離を実測した結果、0.62m であったため、

今回の撮影解像度 800×600pix より、フレームレートは $FR=8/0.00775=1032.26$ (fps)となった。しかし、高速度カメラのフレームレート設定は、上記のように細かく設定できないため、 $FR=1000$ (fps)として、可視化実験を行った。

以上の条件によって、撮影した動画を PIV によって流れ場の計測処理をするが、撮影した動画の 30 フレームを対象に計測処理の後に、各解析グリッドの速度および角度に対しての平均化処理を行い、各グリッドの速度ベクトルおよび全体の流線を算出した。

4.5 ナセル模型の可視化実験結果

ブレード根元のアジマス角が 0° の時の速度ベクトルを図-4.21 に、流線を図-4.22 に示す。なお、ナセル本体およびスピナー部分に速度ベクトルが表示されているが、これはトレーサの濃淡を計測したのではなく、高速度カメラのコマ毎に変化する露光の濃淡を誤解析したものであるため、エラーデータである。

図-4.21 の速度ベクトルの結果より、流入した風は、スピナー前方で 7m/s 以下に減速されるものの、ブレード根元の後方では、風速が回復し、ナセル風速計が設置されている部分では、 $8.0\sim 9.5\text{m/s}$ まで増速されていた。また、ナセル上部の速度ベクトルの角度は、ほとんどが水平方向を示しており、実証機のナセルに設置された風速計には、風がほぼ直角に流入していると推測される。

図-4.22 の流線の結果より、スピナーによって風の流れる方向が変えられ、上方もしくは下方に約 30° の流入傾斜角が発生するものの、ナセル上部では、その傾斜角が緩やかになっている。また、ナセル表面付近においては、空気排出口の突起物によって、その前方では風が上方へ向かうものの、その中間および後方では、ナセル上部に再付着するように、下方に向かって流れていた。

次に、ブレード根元のアジマス角が 180° の速度ベクトルを図-4.23 に、流線を図-4.24 に示す。

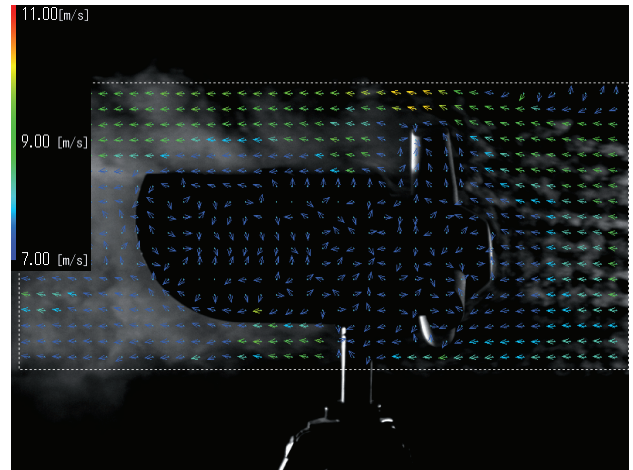


図 4-21 速度ベクトル図 (アジマス角 0°)

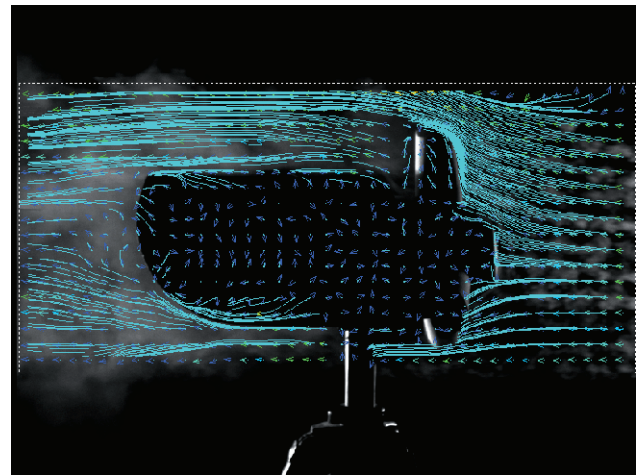


図 4-22 流線図 (アジマス角 0°)

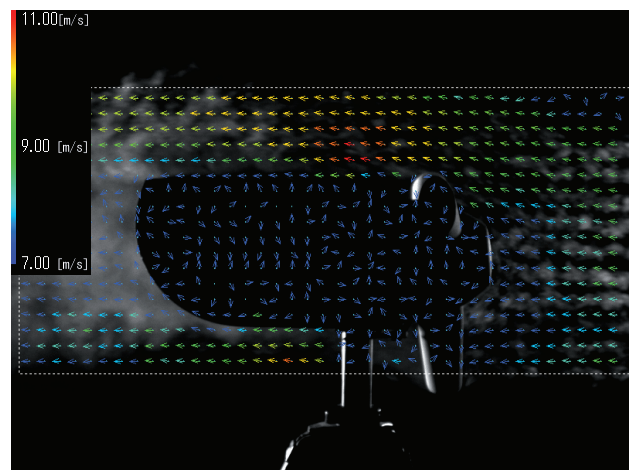


図 4-23 速度ベクトル図 (アジマス角 180°)

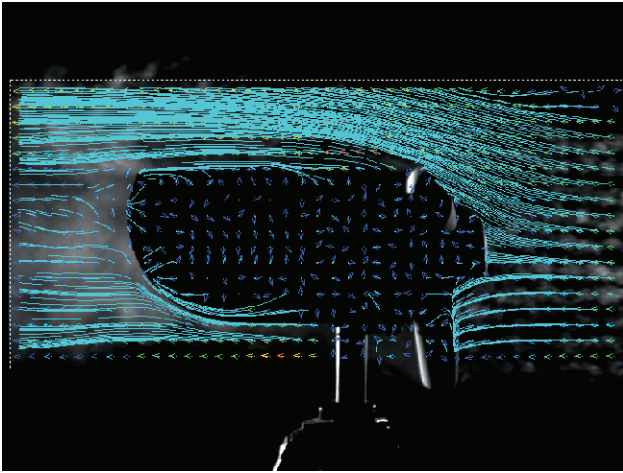


図 4-24 流線図 (アジマス角=180°)

図-4.23 の速度ベクトルより、ブレード根元の影響を受けていないスピナー後方のナセル上部では、流れが加速され、約 11m/s となる箇所が存在した。その後、空気排出口の突起物前方で減速し、ナセル表面に近いほど減速するものの、実証機のナセルに取付けられている風速計の位置では、風速がおよそ 9.5~10.5m/s に増速されている可能性があることが、この結果より判明した。また、ナセル上部の速度ベクトルの角度について、ナセル上部の前方では、上方に+10°程度、後方では下方に-3°程度の傾斜角があるが、実証機のナセルに設置された風速計には、影響のない程度に風が流入していると推測される。

図-4.24 の流線の結果より、アジマス角が 0° の時と同様に、スピナーによって風の流れの方向が変えられ、上方もしくは下方に約 30° の流入傾斜角が発生するものの、ナセル上部では、その傾斜角が緩やかになっている。また、前記と同様に、ナセル表面付近においては、空気排出口の突起物によって、その前方では風が上方へ向かうものの、その中間および後方では、ナセル上部への再付着が生じるように、下方に向かって流れていた。

以上の結果より、スピナーによって風の流れの向きが変えられたことによる風の増速効果は存在し、その効果は、ナセル後方まで影響を及ぼすことが判明した。また、ナセルの突起物によって風速計への流入傾斜角を調整する効果もあることが判明した。

なお、ナセル上部の後方の流線では、ナセル背面部分に風が流れることがなく、スムーズに後方に流れている。それに対し、ナセル下部の後方では、最大+45°の傾斜角でナセル背面に風が流れており、その流線はローター中心線よりも上方まで伸び、その箇所の風速は約2m/sまで減速している (図-4.25)。このような風の流れがナセル後方に存在するため、ナセル背面には大きな乱れや渦が

ほとんど発生せず、ナセル上部の後方の流線がスムーズになる要因であると考えられる。これは、円弧型で後端を切り落としたナセル形状が、流体の中を進む上で最も効率の良い形とされる流線型の物体の場合、その後端を切り落としても抵抗はほとんど増加しないとされるスポーツカーのコーダトロンカ (カムテール) 形状と同様の効果が得られたためと思われる。

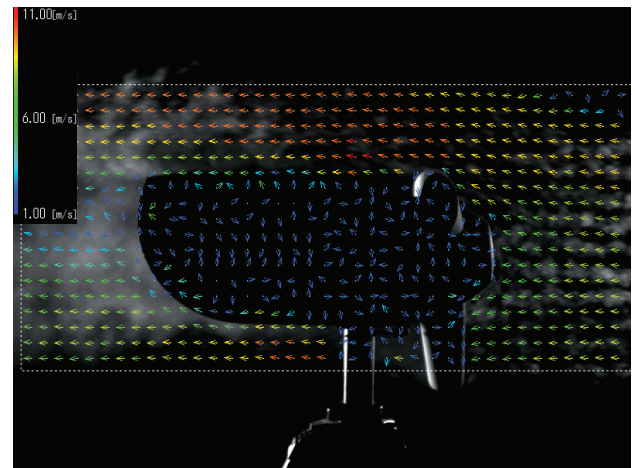


図 4-25 速度ベクトル図 (アジマス角=180°)
【流速カラー設定を 1~11m/s に変更】

4.6 ナセル風速に関する検証

供試風車の可視化実験によって、風車の後流場の風速は 4.0~5.0m/s、速度低減率は 0.5~0.625 であった。

また、ナセル模型の可視化実験によって、風速計が設置される箇所での風速はアジマス角が 0° の時 8.0~9.5m/s、速度増加率は 1~1.19 であり、アジマス角が 180° の時 9.5~10.5m/s、速度変化率は 1.19~1.31 であった。

この速度変化率に上記の結果を乗じたものを表-4.5 に示す。上記結果より、ナセル形状による増速効果によって、ナセル風速が上昇し、風速比 (U_b/U_a) が 0.819 程度になる可能性があることが判明した。

表-4.5 予測されるナセル上風速の変化率

	ブレードのアジマス角	
	0°	180°
ブレードによる風速の低減率	0.500~0.625	
ブレード後のナセル風速の増加率	1.000~1.188	1.190~1.310
最終的なナセル風速の変化率	0.500~0.743	0.595~0.819

300kW 風力発電機からの計測結果 (図-4.7 および図

-4.8)による1分間平均データに基づく風速比(U_b/U_a)も0.75以上を示しており、本実験によって、実機による風速比の一部を再現することができた。

ただし、図-4.7および図-4.8の1分間平均データの風速比 U_b/U_a は0.75~1.2となっており、さらに10分間平均データの風速比 U_b/U_a は0.9~1.1を示している。模型による実験結果と実機による計測データの間、このような乖離が生じた理由として、模型のレイノルズ数が $Re=6.15 \times 10^4$ であるのに対し、実機は同風速の8m/sの時に $Re=5.12 \times 10^5$ であり、模型のレイノルズ数が実機よりも低いことがあげられる。そのためにナセル境界層付近での風速の増加率を、本実験では過小評価した可能性が考えられる。また、ブレード根元は翼型形状ではない部分があり、あまり速度低減していない可能性があるが、本実験ではブレード根元の速度低減率まで再現していないことも、模型と実機の風速比の間に乖離が発生したと考えられる。これらを踏まえた実験的研究が今後の課題である。

4.7 実験結果のまとめ

本研究では、PIV (Particle Image Velocimetry : 粒子像相関流速計)を用いて、供試風車と300kW風車のナセル模型周りの流れ計測を行い、風車による速度低減効果およびナセル形状に起因する風速の増速効果の検証を行った結果、以下の結論を得た。

- 1) スピナーによって流入傾斜角が変えられたことによる風の増速効果は存在する。
- 2) スピナーによる増速効果は、ナセル後方まで影響を及ぼす。
- 3) ナセルの突起物は、流速計への流入傾斜角を変化させる効果がある。
- 4) ナセル下部の後方を円弧型にし、その後端を切り落とすことで、ナセル上部の後方の流れをスムーズにする効果につながる。
- 5) ナセルの増速効果によって、風速比が0.75以上になる可能性がある。

5. 港湾や漁港における自己利用型風力エネルギーの活用に関する検討

5.1 ヒヤリング調査の概要

本章では中型風車を用いた自己利用型風力エネルギーの活用について港湾や漁港を事例として検討を行う。検討に際しては、電力の使用実態や導入に際しての課題を

明らかにしておく必要があることから、北海道北部の日本海側に面する港湾・漁港において、電力の使用状況を調査した。この地域では、年間の平均風速が大きく風力発電施設の立地上の有利さがある。このため、わが国における大型windファーム導入の初期の段階では風車建設が進んだが、系統連系上の容量の限界や電力会社の電力買取量の制約により、メガワット級の風車の更なる建設が厳しい状況となっている。このようなことから、本研究で提案する中型風車を用いた自己利用型の風力エネルギー利用の可能性を探るとともに、導入に際しての諸問題を明らかにすることを目的にヒヤリング調査をおこなった。調査を行った港湾・漁港および調査日は表-5.1のとおりである。

表-5.1 港湾・漁港へのヒヤリング調査日

港湾・漁港	調査日 (2009年)
A港	9月25日
B港	10月16日
C港	10月16日
D漁港	10月15日
E漁港	10月15日

図-5.1は調査を行った地域の2005年1月~2006年12月のアメダス観測点における月別平均風速を示す。各観測点はいずれも日本海側に面している。観測点を表すアルファベットは表-5.1の港湾名とは異なる。いずれの観測点においても冬季に平均風速が大きく、夏季に平均風速が小さいという傾向がある。

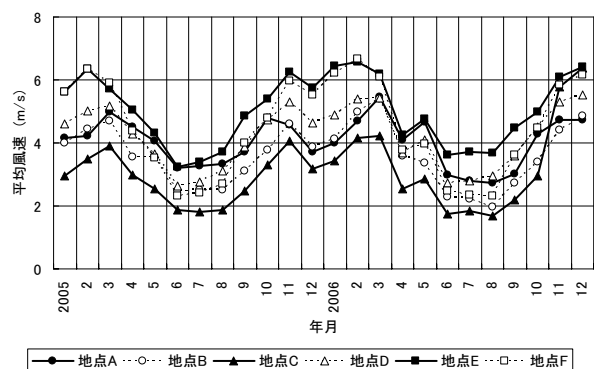


図-5.1 調査を行った地域におけるアメダス観測点の月別平均風速 (2005年~2006年)

5.2 ヒヤリング調査の結果

(1) A港

a) 港湾の概要

2009年9月25日にA港の港湾管理者においてヒヤリ

ングを実施した。A 港は北海道の日本海側に位置する重要港湾である。

取扱貨物は平成 13 年（2001 年）から平成 18 年（2006 年）にかけては 328 万 t から 349 万 t の間を推移していたが、平成 19（2007）年度、平成 20（2008）年度は 400 万 t を超えている。主たる取扱貨物（平成 20 年実績）は林産品 142.5 万 t、石油類 90.6 万 t、砂利・砂・石材 67.8 万 t である。

b) 使用電力量の実態

A 港における高圧電力の電力使用量（2008.4～2009.3）を表-5.2 に示す。

高圧電力で、使用量の多いものは、A-3 ふ頭荷捌き地の冷凍コンテナ（写真-5.1）のリーファーコンセント（写真-5.2）が年間 261,144kWh、A-2 ふ頭上屋（定温庫、くん蒸庫、天井走行クレーン）が 229,319kWh である。この表に示している港湾管理者以外の支払い分として民間利用業者の荷役機械の電力として、年間 354,576kWh の使用電力量がある。

表-5.2 A 港における高圧電力の年間使用電力量（2008.4～2009.3）

施設名	主たる電力用途	使用電力量 (kWh)
A-1 ふ頭上屋	シャッター, 送風機	73,997
A-2 ふ頭上屋	定温庫, くん蒸庫, 天井クレーン	229,319
A-3 ふ頭荷捌き地	リーファーコンテナ用コンセント	261,144
A-4 ふ頭	陸電装置	48,363
A-5 ふ頭上屋	天井クレーン	40,907
A-6 ふ頭上屋	シャッター, 送風機	55,712
A-7 ふ頭	ガントリークレーン	67,536
A-7 ふ頭	レールヒーティング	68,675
合計		845,653



写真-5.1 A-3 ふ頭荷捌き地の冷凍コンテナ



写真-5.2 リーファーコンセント

A-7 ふ頭のガントリークレーン（写真-5.3）動力用の電力使用量は 67,536kWh、ガントリークレーンのレール（写真-5.4）のロードヒーティングの使用電力量は 68,675kWh である。ロードヒーティングの電気代は 1 月から 4 月分に計上されている。ロードヒーティングは、冬季の間、ガントリークレーンのレール部分の降雪による雪氷の凍結防止のため使用している。



写真-5.3 ガントリークレーン

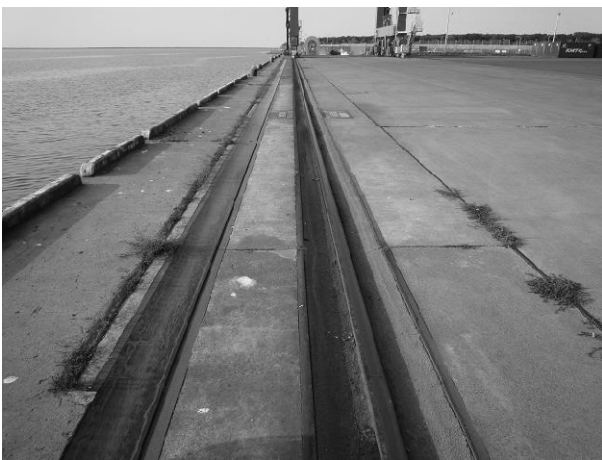


写真-5.4 ガントリークレーンのレール

表-5.2 に示した以外に A 港の港湾管理者が支払っている低圧分の使用電力量は年間約 200,000kWh であり、高圧分の約 1/4 の使用量である。低圧分は臨港道路等の街路灯、監視カメラ、照明等に用いられている。

図-5.2 に高圧電力について、施設別の月別使用電力量を図示している。A-3 ふ頭荷捌き地については、11 月～12 月に使用電力量が増大している。使用用途は冷凍コンテナ用の電源であり、この時期に水産物、水産製品の利用が多かったことによる。

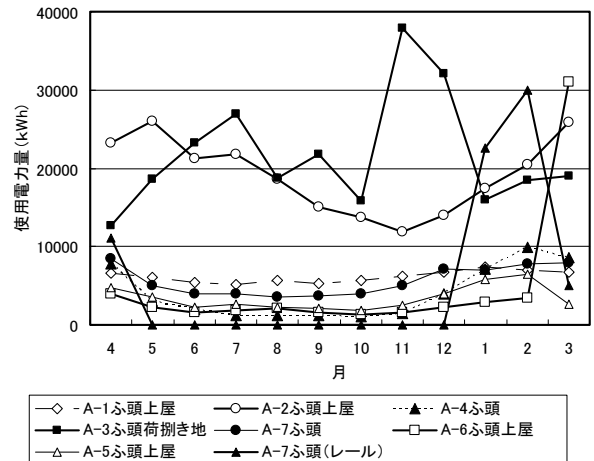


図-5.2 A 港における施設別の月別使用電力量 (2008.4～2009.3)

図-5.3 は A 港における月別使用電力量の合計値を示している。冬季の 1～3 月に電力使用量が多いことがわかる。A 港において冬季の使用電力量が多いことは、この地域では冬季に風が強く期待される発電量が多いことから、風力発電の利活用においては好条件である。なお、低圧電力についてはデータの入手が年間の使用電力量の総計のみであったので、ここでは、それに 12 か月で除して月別使用電力量として表示している。

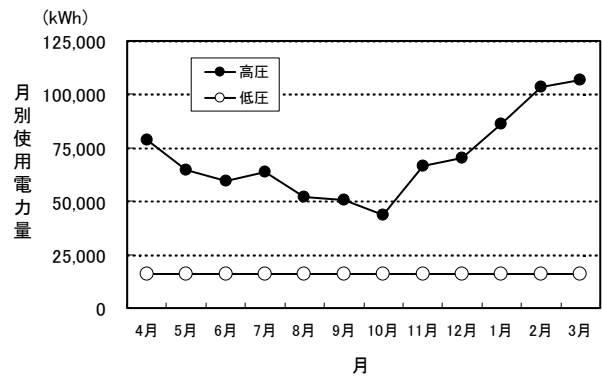


図-5.3 A 港における月別使用電力量 (2008.4～2009.3)

(2) B 港

a) 港湾の概要

2009 年 10 月 16 日に地方港湾 B 港の港湾管理者である町役場においてヒヤリングを行った。B 港は北海道の北部日本海に流下する河川の河口を利用した河口港として整備された。港湾の整備は河口特有の砂洲のため河口(港口)が閉塞したことから昭和 6(1931)年の河口改良工事に始まり、昭和 28(1953)年に地方港湾の指定を受けて本格

的河口工事が進められた。昭和 55(1980)年からは新港地区の整備が開始された。平成 19(2007)年の取扱貨物は移出が 63.1 万 t, 移入が 2.9 万 t で、そのほとんどが砂利・砂である。

b) 使用電力量の実態

表-5.3 は B 港における使用電力量を示す。使用電力量の多いものは、高圧契約の冷凍倉庫の電力 (166,337kWh) である。低圧契約の港湾内照明施設の使用電力量は 39,277kWh である。数年前から街路灯は電気代節約のため減灯している。

事務所用電力としては港湾内事務所のクリーントイレの使用電力量が大きく、循環式をとっており、また、冬季間凍結防止用にヒーターを入れている。ただし、使用電力量は 8,254kWh であり多くはない。以前に離島との間にフェリーが試験運航をしていたことがあり、陸電を供給したことがあるが、現在は契約を解除している。ただし、電源供給の配線は残っている。

漁協契約分については冷凍冷蔵庫の電力で、加工場もある。ただし、製氷施設はなく、漁協管轄内の他の漁港から氷を運搬してくるほか、漁業者が個別に所有している小型製氷機による製氷を使用している。

表-5.3 B 港における年間使用電力量(2008.4~2009.3)

施設名	主たる電力用途	使用電力量 (kWh)
港湾内照明	ナトリウム灯 (低圧)	39,277
港湾内事務所	管理棟, トイレ (低圧)	8,254
冷凍倉庫	冷凍庫, 水産加工場 (高圧)	166,337
合計		213,868

図-5.4 は B 港の高圧電力, 低圧電力について月別の使用電力量を示したものである。使用電力量のうち高圧分は 5~8 月に他の時期と比べて少なく、後に述べる D 漁港の月別の使用電力量と異なる傾向を示している。

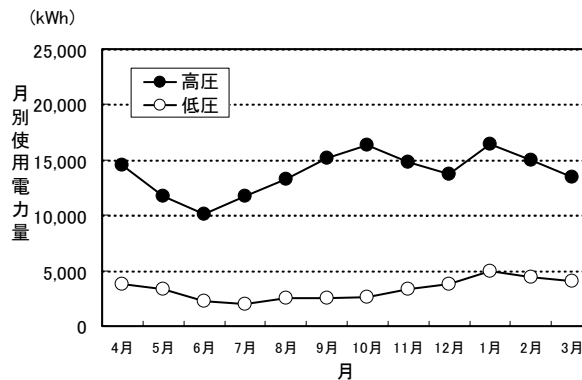


図-5.4 B 港における月別使用電力量 (2008.4~2009.3)

(3) C 港

a) 港湾の概要

2009年 10月 16日に地方港湾 C 港の港湾管理者である町役場においてヒヤリング調査を行った。C 港は離島航路の拠点港として整備されている。昭和 7(1932)年に着工されて以来、整備が進められてきたが、港湾に流入する河川の流出土砂による埋没と冬季の季節風による港内波浪のため利用が阻害されてきた。昭和 50(1975)年より流入河川の切替工事が進められ、昭和 62(1987)年をもって完了した。平成 19(2007)年の取扱貨物は移出 3.9 万 t, 移入 3.3 万 t であり、そのうち移出, 移入ともに離島フェリー分が 2.5 万 t であり、それ以外の取扱貨物は少ない。

b) 使用電力量の実態

表-5.4 は C 港における使用電力量を示す。港湾管理者である町が支出している電力量は港湾区域内の街灯関係の 16,975kWh である。そのほかフェリーが待合所および事務所の電力として 12,255kWh, フェリーの倉庫の電力として 3kWh 使用している。

漁協契約分では、冷蔵庫, 自動製氷機の使用電力量が多いが、これらはいずれも高圧契約である。

表-5.4 C 港における年間使用電力量(2008.4~2009.3)

施設名	主たる電力用途	使用電力量 (kWh)
港湾内照明	ナトリウム灯 (低圧)	16,975
ターミナル施設	管理棟 (低圧)	12,255
貨物倉庫	照明 (低圧)	3
漁協事務所	照明他 (低圧)	79,341
漁協冷蔵庫	(高圧)	213,031
自動製氷機	(高圧)	187,749
水産加工場	(高圧)	34,194
合計		543,548

図-5.5はC港の高压電力、低压電力について月別の使用電力量を示したものである。高压電力量は6月に最も少なく11月に多い使用電力電力量の多くは、冷蔵庫および自動製氷機によるもので、水産物の漁獲の時期に影響しているものと考えられる。

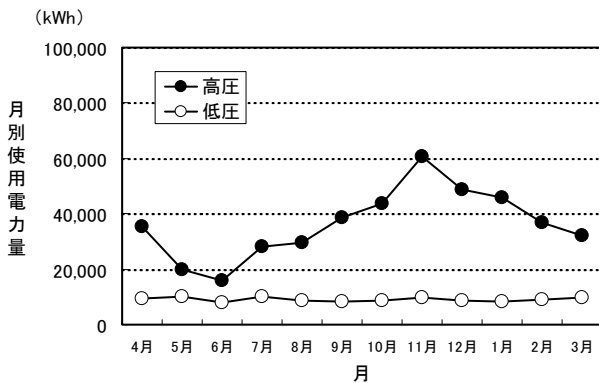


図-5.5 C港における月別使用電力量 (2008.4~2009.3)

(4) D漁港

a) 漁港の概要

2009年10月15日にD漁港のある町役場においてヒヤリング調査を行った。D漁港は北海道北部の日本海側に面する。気候は対馬暖流の影響を受け、内陸部よりも温暖であるが、夏の一時期を除いて風が強まるので、冬季には出漁機会が限られる。D漁港は第4種漁港に指定され、避難港としての機能も有する。

b) 使用電力量の実態

表-5.5はD漁港における使用電力量を示している。高压電力において使用電力量の多いものは、タコ加工場の電力(355,577kWh)、ホタテ加工場の電力(125,741kWh)である。旧加工場は魚の一時保管等、現在は加工とは違う用途で使用している。ホタテの加工場は、現在は漁期である夏場のみ乾燥機を使用している。他の時期は電灯のみの使用となっている。最も使用量が多いタコ加工場は漁の最盛期である夏場に乾燥用の電力使用が多いがホタテ加工場、冷蔵庫については年間の変動量は比較的小さい。

表-5.5 D漁港における年間使用電力量(2008.4~2009.3)

施設名	主たる電力用途	使用電力量 (kWh)
港湾内照明	ナトリウム灯 (低压)	定額契約のため不明
公園公衆トイレ	照明 (低压)	1,876
事務所	照明 (低压)	26,340
荷捌き所	動力 (低压)	61,491
蓄養施設	動力 (低压)	59,059
蓄養施設	電灯 (低压)	5,179
船揚げ場	動力 (低压)	53
船揚げ場	電灯 (低压)	34
タコ加工場	動力 (高压)	355,577
ホタテ加工場	動力 (高压)	125,741
旧加工場	動力 (高压)	21,667
冷蔵庫	(高压)	68,151
合計		725,168

低压分のうち漁港内街灯は、電力会社との定額契約のため使用電力量は不明である。これらの電力使用のうち、みなと公園公衆トイレは町役場の支出、その他は漁協の支出である。低压分の荷捌き所の使用電力量は冷蔵庫の使用電力である。みなと公園のトイレは開放期間が4月から10月で、冬場の電気使用はない。

船揚げ施設の使用回数は年40回程度であるが、使用電力量としては極めて少ない。蓄養施設のポンプは、1回まわすと24時間以上は回る。漁業者は港の中で別途に養殖施設を所有しており電力を使用しているが、個別の契約なので、この表には含まれていない。おおむね15kWhの契約で、3月から9月までの7か月間の使用が多い。

図-5.6はD漁港の高压電力、低压電力について月別の使用電力量を示したものである。使用電力量のうち高压分は6月~9月の夏季に多いことがわかる。これはタコ加工場の使用電力量が多いためである。

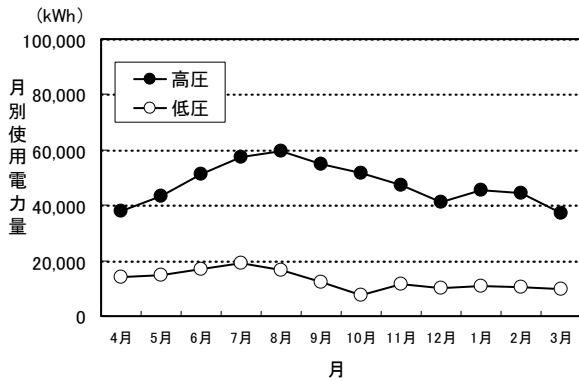


図-5.6 D漁港における月別使用電力量（2008.4～2009.3）

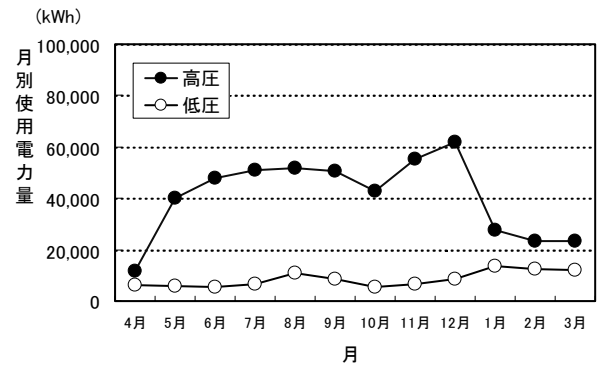


図-5.7 E漁港における月別使用電力量（2008.4～2009.3）

(5) E漁港

a) 漁港の概要

2009年10月15日にE漁港のある町役場においてヒヤリング調査を行った。E漁港は第3種漁港である。

b) 使用電力量の実態

表-5.6はE漁港における使用電力量を示す。使用電力量の多いものは、冷凍倉庫の電力（487,160kWh）、港湾内の事務所用電力（87,101kWh）である。2008.5より冷凍倉庫を新設し、その製氷能力は13.77t/日である。漁獲物は-40℃で凍結させ、その冷凍能力は10tである。

港湾緑地の駐車場の照明装置の使用電力量は2,198kWhで漁港全体の使用電力量に占める割合は小さい。

表-5.6 E漁港における年間使用電力量（2008.4～2009.3）

施設名	主たる電力用途	使用電力量 (kWh)
港湾内照明	(低圧)	99,527
港湾緑地の照明	(低圧)	2,198
冷凍倉庫	(高圧)	487,160
漁港内トイレ	(低圧)	532
陸電施設	(低圧)	405
その他	(低圧)	10,329
合計		600,151

図-5.7はE漁港における月別の使用電力量を示す。高圧の使用電力量は夏場の6月から9月、年末の11月から12月にかけて多いことがわかる。

5.3 港湾や漁港における中型風車の活用に関する提言

(1) 自己利用型風力エネルギー利用モデル

図-5.8は港湾における自己利用型風力エネルギーモデルの評価フローを示している。この評価フローにおいては、中型風車による電力は基本的には自家消費とするが、5.2で示した使用電力量の現地調査結果によれば、港湾・漁港ごとに電力の使用状況に季節変動性を有する。また、発電量についても季節的な変動がある。そこで、需給バランスのギャップをうめるために、必要に応じて蓄電池の利用による発電量の平滑化を図る必要がある。また、自家消費ではなく、電力会社との売買電とする 것도条件によっては必要になる。ただし、具体的な検討は個別条件ごとに大きく異なるので、本資料では発電量、使用電力量についてマクロな検討のみにとどめることとし、月単位での需給バランスについての計算結果のみを示す。

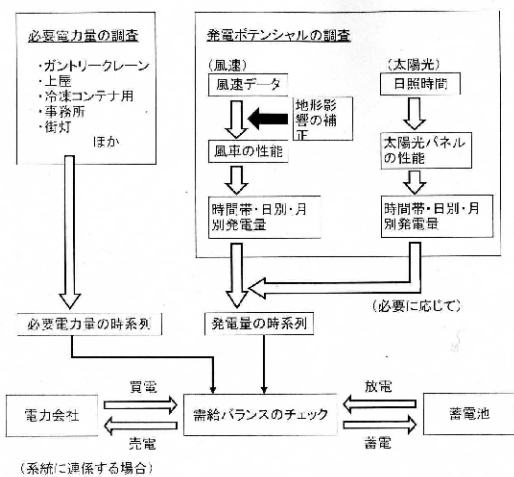


図-5.8 自己利用型風力エネルギーモデルの評価フロー

(2) 月別発電量の推定と月別使用電力量との比較

立地地点における発電ポテンシャルの推定については、以下の方法について検討した。

- ① 風速の平均値を用いレーリー分布によって発電量を推定する方法
- ② 実測データ等を用いて時系列的に発電量を推定する方法

まず、①の方法による検討を行って、使用電力量を調査した港湾における中型風車導入の可能性を検討する。ただし、調査した5港のうちB港は表-5.3で示したように年間の使用電力量が約210,000kWhであり、その他の4港に比べて半分以下であり、ここで検討する300kW風車1台の年間発電量に比べても少ないと想定されたため計算の対象から除外した。

表-5.7はA港、C港、D漁港、E漁港についてアメダス平年値、またはNEDOの風況精査実測値による月別平均風速を示す。

表-5.8はA港、C港、D漁港、E漁港について表-5.7に示したアメダス平年値、またはNEDOの風況精査実測値に基づきNEDOの風況マップを参考に風車のハブ高さである高度41.5m/sにおける月別平均風速を推定したものである。

図-5.9は表-5.8で示した月別平均風速を用いて発電推定量と5.2で示した各港湾・漁港における月別使用電力量と比較したものである。港湾・漁港ごとに推定発電量と使用電力量は年間の総量では300kW風車1台で需給がほぼバランスしているが、月別には過不足が生じている。とくにD漁港、E漁港においては夏季に電力使用が多

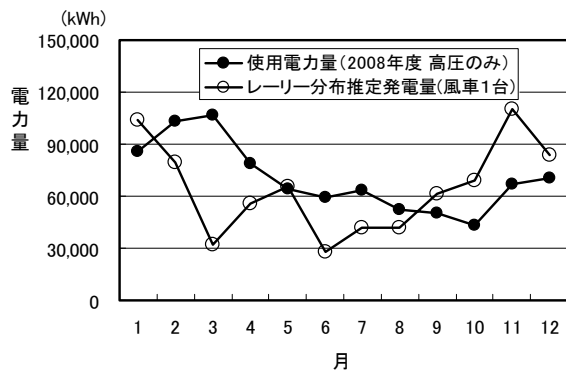
いのに対して、その時期は平均風速が小さいため、風力発電単独では、大幅に不足する傾向が見られる。これに対してA港、C港においては使用電力量と発電推定量の差が相対的に少なくなっている。

表-5.7 月別平均風速 (単位 m/s)

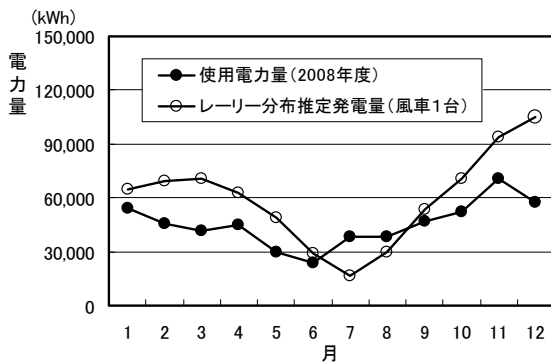
	A 港	C 港	D 漁港	E 漁港
1 月	8.9	4.0	4.3	7.0
2 月	7.8	4.4	3.8	6.4
3 月	4.8	4.2	3.8	7.9
4 月	6.1	4.0	3.5	5.3
5 月	6.5	3.5	3.2	4.5
6 月	4.6	2.9	2.5	3.4
7 月	5.3	2.4	2.2	3.4
8 月	5.3	2.9	2.3	3.9
9 月	6.4	3.7	2.8	4.6
10 月	6.7	4.2	3.8	8.1
11 月	9.8	5.2	4.8	9.9
12 月	7.5	5.6	4.7	7.9
年平均	6.6	3.9	3.5	6.0
観測高さ	40m	-	-	15m
引用元	NEDO	アメダス	アメダス	NEDO

表-5.8 高度 41.5m の月別平均風速の予測値 (単位 m/s)

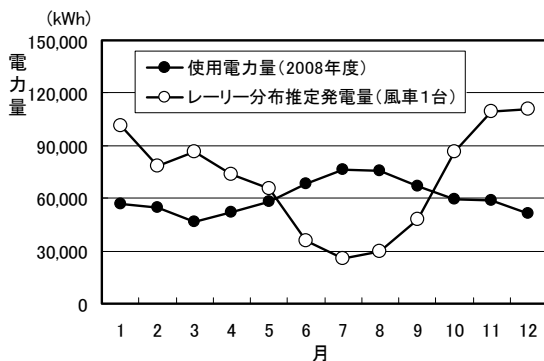
月	A 港	C 港	D 漁港	E 漁港
1 月	9.6	6.9	9.4	8.1
2 月	8.4	7.6	8.3	7.4
3 月	5.2	7.3	8.3	9.2
4 月	6.5	6.9	7.6	6.2
5 月	7.0	6.1	7.0	5.2
6 月	4.9	5.0	5.4	4.0
7 月	5.7	4.2	4.8	4.0
8 月	5.7	5.0	5.0	4.5
9 月	6.9	6.4	6.1	5.4
10 月	7.2	7.3	8.3	9.4
11 月	10.5	9.0	10.4	11.5
12 月	8.1	9.7	10.2	9.2
年平均	7.13	6.78	7.56	7.01



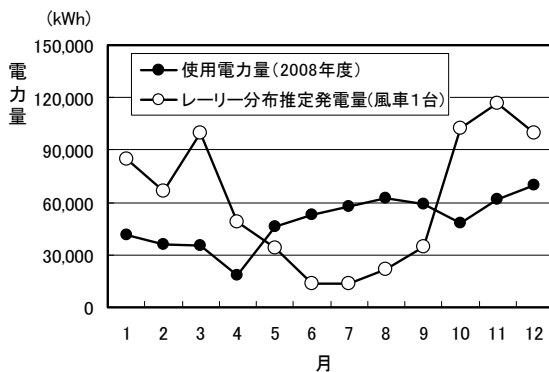
(1) A港



(2) C港



(3) D漁港



(4) E漁港

図-5.9 発電推定量と使用電力量の比較

次に②の方法について述べる。計算の具体的手順を以下に示す。

- イ) アメダス観測記録(時系列記録)を入手する
- ロ) NEDO 風況マップまたは港湾地域風況マップ等を用いて風車設置地点の風速に換算する
- ハ) 地形・地表条件より決まる α 値を用いてべき乗則を用いてハブ高さの風速に換算する
- ニ) 計算機種(300kW)のパワーカーブを用いて各風速に対する発電量を算定する
- ホ) 日別発電量, 月別発電量, 年間発電量を算定する

図-5.10は、A港について2005年と2006年の気象庁のアメダスの風速観測値に基づいて推定した発電推定量と5.2で述べた2008年の使用電力量を月別に示している。風力発電量の推算では図-5.8のフローにしたがい300kW風車の発電特性とアメダスの10秒ごとの風速データを用いて時系列的に発電量を求め、日別、月別に推定電力量を求めている。A港では300kW風車1台による発電推定量と使用電力量の差は月ごとに見ても小さい。ただし、夏季の6月から9月においては、発電推定量は使用量の半分程度に留まる。夏季の6月から9月にかけての使用電力量が発電推定量を超えているので、これらの月の使用電力量を充足させるためには、風車の台数を増やすこと、あるいは、冬季においては、風車1台でも必要な電力量が供給可能であることから夏季の不足分は太陽光発電などを併用して補うことなどの検討も必要となる。

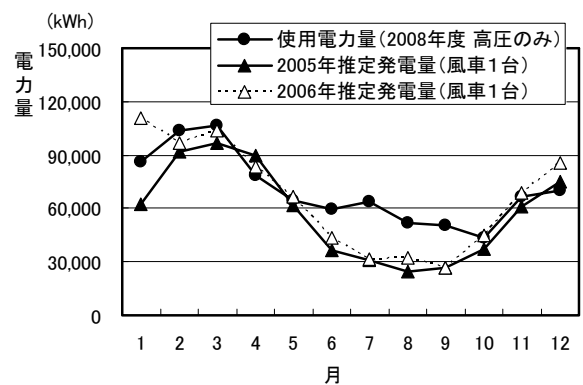


図-5.10 発電推定量と使用電力量の比較

(3) 港湾・漁港における風力発電導入のための課題
 ここまでは各種の法規制等を考慮せずに、沿岸部における風力エネルギーの導入可能性について港湾・漁港をモデルとして検討している。具体的な導入にあたっての

課題を以下に述べる。

① 港湾・漁港ごとの使用電力量の実態把握と風力エネルギー導入ポテンシャルの把握

本資料では、北海道の北部日本海側に面する港湾・漁港五港を対象に使用電力量を調査している。調査した港湾・漁港での月別の使用電力量の傾向には大きな差異が見られた。今後は、調査対象地域を広げ、使用電力量の実態把握を進めるとともに、当該地域における風速データに基づき発電ポテンシャルを調査することにより、導入可能性を把握することが、港湾・漁港におけるクリーンエネルギー利用拡大につながると考えられる。

また、船舶の停泊中のアイドリングストップのための陸電供給や臨港道路の沈埋トンネルの照明や換気、橋梁の照明やライトアップ等、利用方法についての検討も必要である。

② 発電量の時間変動性の緩和

本資料においては、発電量の時間変動性については月別変動性についてのみ言及している。発電量については、このほか日別変動性、時間帯別変動性があり風力エネルギーを自己利用型エネルギーとして利用することを難しいものにしていく。発電量の時間変動性の緩和のためには、蓄電池の利用、太陽光発電等の他のクリーンエネルギーとのハイブリッド化等が考えられるが、いずれも発電単価のアップにつながるため、その点を考慮しつつ検討することが必要となる。

③ 法規制の緩和

港湾管理のための設備として風力発電を導入した場合、発電電力の使用は港湾施設での使用に限定される。地方港湾では使用電力量が少ないため、港湾施設単独では余剰電力が生ずるので、港湾の漁港地区に立地する冷蔵冷凍倉庫への電源供給や水産加工施設への電源供給を行うことが事業性を向上させることになる。こうした施設は漁業協同組合や民間事業者の管理となるため、現行の法制度の下では余剰電力の転用ができない。第三セクターの事業として、地域で総合的に電力供給する手段も考えられるが、いずれにしても風力発電をはじめとするクリーンエネルギーの導入促進が図れる法制度の確立や規制の緩和が必要となる。

6. おわりに

本稿では、沿岸域に適した中型風車を開発しその実証試験結果を紹介するとともに、港湾や漁港への風力発電システムの導入に関するヒヤリング結果をふまえた提言をとりまとめた。以下に、主要な成果を述べる。

- 1) 中型風車の開発コンセプトをとりまとめ、実証試験風車を東京湾沿岸に設置し、現地実証試験を実施した。
- 2) 現地実証試験結果をとりまとめ、低気圧や台風が通過した際の、強風時の風速および発電量特性、および、沿岸域における風の乱れ特性を明らかにした。この結果、強風時についても、風速と発電量の関係は、風車の設計パワーカーブと一致していることが確認され所定の発電がなされていることが確認された。さらに、強風時の風の特性として、突風率や乱れ強度を、東京湾内の洋上風観測点である港湾空港技術研究所アシカ島観測点と比較検討したが、実証試験サイトとアシカ島の間での特性の相違や、既往の設計式との対応を、明らかにするには至らなかった。海上風の乱れの高度分布については、現在建設が進められている洋上気象海象観測タワーによる風速の鉛直方向の風速分布や乱れ強度の分布の観測記録に期待されるところが大きい、今後の研究課題として位置づけられる。
- 3) 風洞模型実験を通じて、現地実証試験における風車ナセル上で得られた風向風速記録の特性について考察した結果、ナセル形状による増速効果によって、ナセル風速が上昇する可能性がある。このため、ナセル上の風速と発電量との関係がパワーカーブと結果的にほぼ一致した、3. で述べた事実の説明ができた。300kW 風力発電機からの実証試験結果による風速比 (U_b/U_d) も 0.8 以上を示しており、本風洞模型実験によって、この風速比を再現することができた。
- 4) 北海道日本海沿岸の3港湾と2漁港を対象とした自己利用型エネルギーの活用に関するヒヤリングを行い、通年および既設別の電力需要をとりまとめた。この結果、小規模な港湾や漁港では、総量として300kW 級の風力発電システムは、需要に見合った量の発電が期待できることが明らかにされた。ただし、季節毎の詳細な発電予測量と需要量との間にはギャップも見られるので、夏季の不足分は太陽光発電などを併用して補うことなどの検討も必要となることが示された。

(2011年1月26日受付)

謝辞

本資料は(独)港湾空港技術研究所、足利工業大学、北海道工業大学、(株)駒井ハルテックの4者共同研究と実施しているものの一部の成果をまとめたものである。使用電力量の調

査においては国土交通省北海道開発局港湾空港部ならびに港湾・漁港管理者の協力を得ており関係者に謝意を表します。データ整理の一部は北海道工業大学の卒業生である高橋泰央, 二本松誠司, 山田祥弘, 安達和の諸君の協力によるものであり感謝の意を表します。

参考文献

- 気象庁 (2007) : 日々の天気図, 平成 19 年標準版, <http://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/hibiten/>.
- 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.
- 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.
- 白石悟・永井紀彦・鈴木高二朗・田中陽二・牛山泉・西沢良史・細見雅生・小川路加・久高政信 (2010) : 中型風車による沿岸域における自立型風力エネルギー利用について, 第 32 回風力エネルギー利用シンポジウム講演概要集, 日本風力エネルギー協会, pp.139-142.
- 社団法人 日本道路協会 (2002) : 道路橋仕方書・同解説 V 耐震設計編, 丸善, 567p.
- 社団法人 土木学会 (2007) : 風力発電設備支持物構造設計指針・同解説 [2007 年版], 土木学会, pp54-56.
- 独立行政法人 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, 土木学会, 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・菅原一晃・佐藤和敏・川口浩二 (2001a) : 我が国沿岸の風観測結果に基づく風力エネルギーの試算, 港湾空港技術研究所資料, No.999, 59p.
- 永井紀彦・勝海務・岡島伸行・隅田耕二・久高将信 (2001b) : NOWPHAS データより推定した洋上沿岸域での風力発電の可能性, 土木学会, 海洋開発論文集, 第 17 巻, pp.19-24.
- 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, 土木学会, 海岸工学論文集, 第 50 巻, 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 (2004) : 現地実証試験と風況シミュレーションに基づく沿岸風力照明システムの合理的構築, 足利工業大学総合研究センター, 自然エネルギー利用総合セミナーテキスト, pp.1-10.
- 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 (2005a) : 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, 海洋調査技術学会, 海洋調査技術, Vol.17 No.1, pp.1-12.
- 永井紀彦・下迫健一郎・牛山泉・根本泰行・川西和昭・塚本泰弘 (2005b) : 沿岸風力照明システムの計画・設計に関する検討一点灯稼働率事前予測法の開発などについて, 港湾空港技術研究所資料, No.1105, 23p.
- 永井紀彦・白石悟・清水勝義・成瀬英治・八木一浩・乙津孝之 (2006a) : 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.
- 永井紀彦・清水勝義・牛山泉・李在炯・細見雅生・小川路加 (2006b) : 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, 海洋調査技術学会, 第 18 回研究成果発表会講演要旨集, 第 18 回, pp.17-18.
- 永井紀彦・鈴木高二朗・牛山泉・西沢良史・細見雅生・小川路加・野口仁志 (2008) : 沿岸域中型風車の開発とその沿岸域への適用について, 港湾空港技術研究所資料, No.1180, 31p.
- 永井紀彦・鈴木高二朗・田中陽二・牛山泉・西沢良治・白石悟・細見雅生・小川路加・久高将信 (2009) : 中規模風車による沿岸域自立型クリーンエネルギー活用システムをめざして, 海洋調査技術学会, 第 21 回研究成果発表会講演要旨集, pp.43-44.
- 西沢良史, 谷口英人, 鈴木政彦, 牛山泉 (2009) : 水平軸小型風車のブレード形状に関する実験的研究 (低設計周速比ローターの最適形状の検証), 日本機械学会論文集, B 編, Vol.75, No.753, pp.1092-1100.
- 松下大介・幽谷栄二郎・松宮輝・細見雅生 (2008) : 臨海工業地域に設置した 300kW 風車のサイトキャリブレーション技術を適用した性能計測, 風力エネルギー, Vol.32, No.3, pp132-139.
- 幽谷栄二郎・松下大介・松宮輝・細見雅生 (2008) : 臨海工業地域に設置した 300kW 風車のサイトキャリブレーション技術を適用した性能計測および性能評価,

第 30 回風力エネルギー利用シンポジウム,
pp175-178.

IEC 61400-1(1999): Wind turbine generator systems - Part 1:
Safety requirements.

IEC 61400-24(2002): Wind turbine generator systems - Part
24: Lightning protection.

JIS A 4201(2003): 建築物等の雷保護.

Matsushita, D., Yukoku, E., Matsumiya, H., and Hosomi, M.
(2010): Estimation of Power Performance of 300kW
Wind Turbine Located in the Seaside District, Book of
Abstract, Renewable Energy 2010 Conference,
CD-ROM.

Nagai, T., Suzuki, K., Tanaka, Y., Ushiyama, I., Shiraishi, S.,
Ogawa, R. and Kudaka, M. (2010a): Field
Experimentation of the 300kW Wind Power Generator at
the Tokyo-Bay Coast, Book of Abstract, Renewable
Energy 2010 Conference, Paper No. O-Wd-2-1,
CD-ROM.

Nagai, T., Suzuki, K., Tanaka, Y., Ushiyama, I., Nishizawa, Y.,
Shiraishi, S., Ogawa, R. and Kudaka, M. (2010b): Field
Testing for Offshore Wind Farm in Tokyo Bay, Proc. of
the TECHNO-OCEAN 2010 Paper No.14-1-012,
CD-ROM.

Nagai, T., Kawaguchi, K., Yoshimura, Y., Yoshioka, T.,
Tanikawa, R. and Aoki, I. (2010c): Study on Offshore
Wind Turbines in Japan using NOWPHAS Data, Proc. of
the TECHNO-OCEAN 2010 Paper No.14-1-010,
CD-ROM.

Nishizawa, Y., Ushiyama, I., et al. (2010): An Experimental
Study of the Shapes of Rotor for Horizontal – Axis Small
Wind Turbines with and without Winglet, Book of
Abstract, Renewable Energy 2010 Conference, Paper No.
O-Wd-10-3, CD-ROM.

P : 地表面の粗度区分

pix : ピクセル (画素数)

r : 風車中心からの距離(m)

R : 風車の半径(m)

t : 1 コマ当たり時間間隔

U_a : 観測ポールにおける風速(m/s)

U_b : ナセル背後における観測風速(m/s)

V : 基準風速(m/s)

Z_b : 基準高さ (べき乗則が成り立つ上限高度)

Z_G : 基準高さ (べき乗則が成り立つ下限高度)

α : べき乗則の係数

λ_d : 設計周速比

θ_1 : 観測ポールにおける風向 (°)

θ_3 : ナセルにおける風向 (ナセル角度) (°)

σ_1 : 主軸方向成分の風速の標準偏差

σ_2 : 主軸直角方向成分の風速の標準偏差

記号表

C_p : パワー係数

C_{pmax} : 最大パワー係数

D : ローター径(m)

fps : フレームレートの単位 (1s あたりのコマ数)

FR : フレームレート (シャッター時間間隔の逆
数)

H_b : 地点におけるハブ高さ

I_p : 風の乱れ強度

I_{ref} : 風速 15m/s 時の乱れ強度の期待値

l : 単位ピクセルに相当する長さ(m)

港湾空港技術研究所資料 No.1234

2011. 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 大應

Copyright © (2011) 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。