

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

EVALUATION ON THE WIND SPEED DISTRIBUTION BEHIND
THE OFFSHORE WIND POWER GENERATION USED FIELD DATA
OBTAINED AT THE PORT OF SETANA

白石悟¹・永井紀彦²・林宏典³・西和宏⁴・久米仁司⁵・堂端重雄⁶

Satoru SHIRAISHI, Toshihiko NAGAI, Hironori HAYASHI,
Kazuhiro NISHI, Hitoshi KUME and Shigeo DOHATA

¹正会員 工博(独) 港湾空港技術研究所 地盤・構造部長(〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

²フェロー 工博(独) 港湾空港技術研究所 海洋・水工部海象情報研究室長(同上)

³理修 (財)日本気象協会首都圏支社調査部(〒170-6055 東京都豊島区東池袋3-1-1サンシャイン60 55F)

⁴(財)沿岸技術研究センター 調査部主任研究員(〒102-0092 東京都千代田区隼町3-16)

⁵正会員 前(株)ニュージェック 港湾・空港部(〒531-0074 大阪市北区本庄東2-3-20)

⁶北海道瀬棚町 企画商工課長(〒049-4812 北海道瀬棚郡瀬棚町字本町719番地)

This paper described on the wind speed distribution behind the offshore wind generation by use of the filed observation carried out at the port of Setana and the result of numerical simulation on the wind speed distribution by means of $k-\epsilon$ model. The profiles of vertical wind speed distribution at the offshore site are examined by use of observed data. And also the numerical simulation model and its parameter η on the ratio of sheltering effect by the wind power generation are examined.

Key Words : Offshore wind generation, wind speed distribution, field observation, numerical simulation

1. はじめに

わが国の風力発電量は2010年迄に300万kwh導入を目標としているが、風力発電施設の多くは陸上に設置されており、欧州と比べ海上に設置された事例が少ない。海上は陸上に比べて風速が大きく、風の乱れが少ない安定した環境にあるといわれている。国土が狭いわが国において陸上での適地が少なくなっていく昨今、港湾や沿岸に風力発電施設を建設していくことが有望であり、目標達成につながる。しかしながら、港湾・沿岸域への風力発電施設導入には、設置における荷重条件が陸上に比べて厳しいことや経済性、さらには法制度の面で課題も多く、海上への展開に向けこれらの解決が急がれる¹⁾。

しかしながら、洋上では風車影響によるウエイク(後流)域も陸上に比べて広範囲に及ぶとの知見もあり、多数の風車を設置する場合には設置場所および設置間隔についての配慮が必要と考えられる。本研究で北海道瀬棚港内において光波レーダにより取得された風の3次元

分布と、数値シミュレーション結果を比較することにより、洋上風車背後の風の分布特性を把握し、今後の設置の際の参考となる知見を得ることを目的とした。

なお、本論文は(財)沿岸技術研究センターにおける「港湾・沿岸域における風力発電推進研究会」²⁾における研究成果に基づいてとりまとめたものである。

2. 瀬棚港における風の観測

(1) 瀬棚港の洋上風力発電施設

北海道瀬棚港においては、日本初の洋上風力発電施設が建設された³⁾。写真-1はその設置状況を示すが、防波堤の背後の海域に定格出力600kWの風車が2基建設された。風車の基礎は杭基礎方式である。発電開始風速は4m/s、発電停止風速は25m/sである。ロータ直径は47m、ハブ高さは40mである。

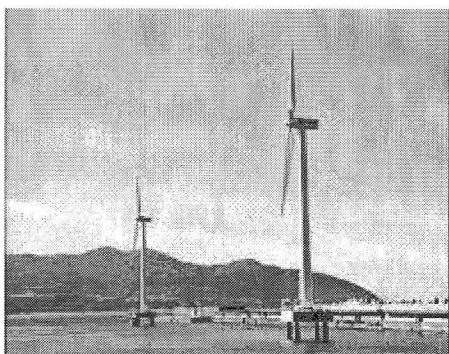


写真-1 洋上風力発電施設（愛称：風海鳥）

写真-2 は瀬棚港の港湾施設配置と風力発電施設の位置、および後述する風向・風速の観測装置の配置を示している⁴⁾。写真中の番号はそれぞれ①風力発電施設、②防波堤上のキャリブレーション用風杯型風速計・矢羽型風向計(高さ 10m ポール上に設置)、③光波レーダ(観測小屋)、④陸上風測定用風杯型風速計・矢羽型風向計(高さ 10m ポールに設置)に対応する。

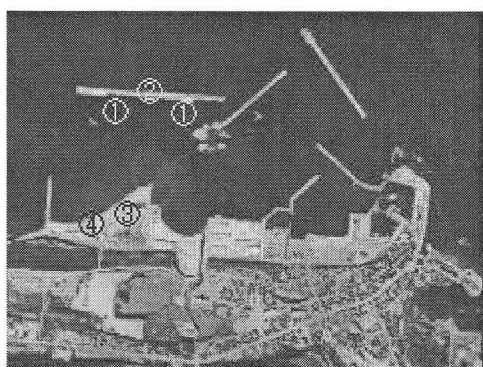


写真-2 瀬棚港の施設配置と計器の配置

(2) 観測の方法

a) 観測システム

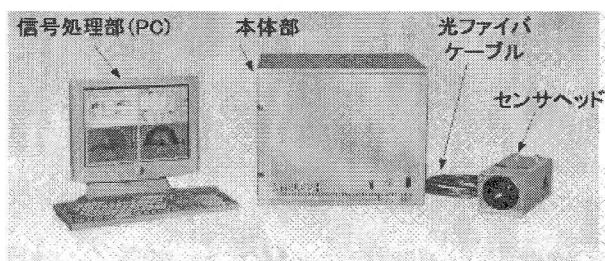


写真-3 観測システムの外観

写真-3に使用した光波レーダのシステムの外観を示す。システムは、本体部、センサヘッド部および信号処理部からなる。本体部で、目に対して安全な波長 $1.5\mu\text{m}$ の単一波長レーザを発生させ、光ファイバケーブルを介してセンサヘッドから大気中に送信する。大気中のエアロゾル(微小浮遊物)からの散乱光は、上記センサヘッドで

収集された後、光ファイバケーブルで本体部へ送られる。本体部で送受信光のドップラーシフト(周波数偏移)を検出し、信号処理部でこのドップラーシフトからエアロゾルの移動速度を算出し風向・風速を求める。

b) 観測原理

大気中に発射したレーザ(波長 λ)は、空間に存在するエアロゾルにより散乱を受ける。エアロゾルはその近傍の風で移動すると考えられるため、上記散乱光は風速に比例したドップラーシフト F_D を受ける。式(1)を用いて視線方向(レーザ発射方向)の風速 V_m が測定できる。

$$V_m = \frac{\lambda F_D}{2} \quad (1)$$

図-1に示すように地表面に平行でかつ光波レーダに到来する方向を $+r$ 、それに垂直かつ地表面に平行な方向を x と定義する。

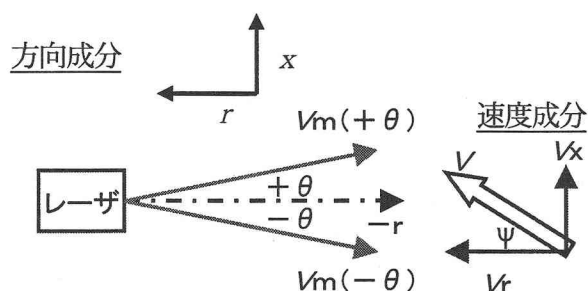


図-1 観測原理

このとき風速 V は r 方向成分 V_r と x 方向成分 V_x とで式(2)のように表すことができる。

$$V = \sqrt{V_r^2 + V_x^2} \quad (2)$$

今回の計測では、各視線方向の測定をできるだけ同時刻に設定するため、レーザ位置から r 方向に対して、2方向($\pm\theta$ の角度)で発射する方法を採用した。各方向に対する視線方向の風速測定値を $V_m(+\theta)$ 、 $V_m(-\theta)$ とすると風速 r 方向成分 V_r と x 方向成分 V_x は式(3)~(5)のように表すことができる。

$$V_r = \frac{V_m(-\theta) + V_m(+\theta)}{2 \cos \theta} \quad (3)$$

$$V_x = \frac{V_m(-\theta) - V_m(+\theta)}{2 \sin \theta} \quad (4)$$

$$\psi = \tan^{-1} \left[\frac{V_x}{V_r} \right] \quad (5)$$

以上のように、2つの視線方向風速の測定値 $V_m(+\theta)$ 、 $V_m(-\theta)$ に、式(2)~(5)を適用することで、風速 V 、

風向 ψ の算出が可能となる。なお、3次元的な風ベクトルを捉えるには3方向のレーザが必要となるが、本計測では風は水平面内を吹き、上昇・下降流がないものと仮定する。それは下部境界が平らな海上の大気下層(10m~200m)を計測範囲とするため、上昇・下降流が平面風速に与える影響は無視できると判断したことによる。

c) 防波堤・洋上風車と計測位置の関係

図-2は風車背後における風速の測定範囲を示す。防波堤背後の風車位置からロータ直径の2.5, 5.0, 7.5, 10.0倍の位置で風速を観測した。また、計測の測線は2基の風車の直背後とその中央部とした。

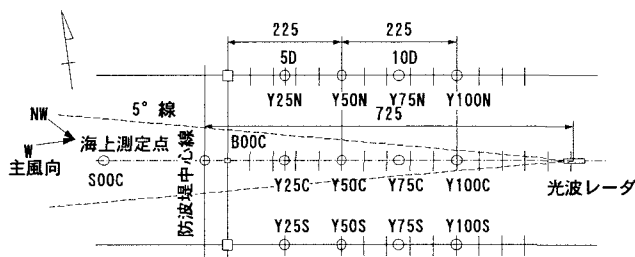


図-2 風車背後での風速の測定位置

図-3に防波堤と風車の位置関係を示す。今回の計測においては防波堤があることについても風車周辺の風況に影響があることを考慮しなければならない。後述する数値計算においては防波堤の影響をモデルに取り入れている。

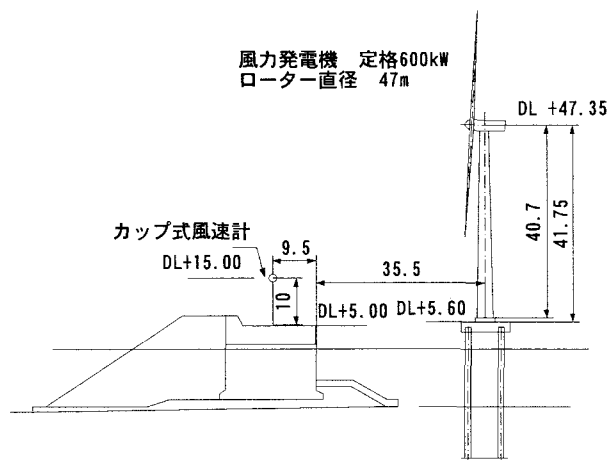


図-3 洋上風車と防波堤の関係

3. 観測結果

(1) 観測期間中の風向・風速

防波堤上の風杯型風速計・矢羽型風向計で観測した測定期間中(2004/2/18~2/20)の風向・風速を図-4に示す。図の下側に風速を、図の上側に風向を示した。風向は北を0°及び360°として示した。観測日2/18の風は風速10m/s以上の強風で風向は約315°(NW)の海側からの風である。観測日2/19の深夜から早朝にかけて風向が海側から山側に転じ風速が約5m/sと低くなっている。

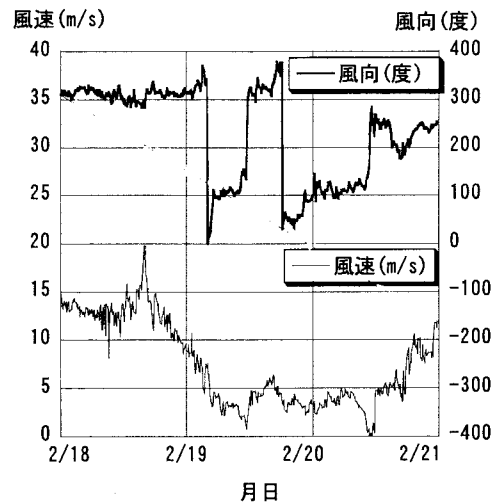


図-4 観測期間中の風速風向

(2) 海上の風速の鉛直分布

光波レーダにより陸上から距離約1000mのDL+15mからDL+205mの海上の風速を鉛直方向に10m間隔で測定した。測定は各標高において約6秒間測定し高さ方向に順番に移動しそれを繰返し実施した。図-5に2/18、図-6に2/20の風速の鉛直分布を示す。測定結果を標高DL+15の平均風速を基準とし風速比で示した。

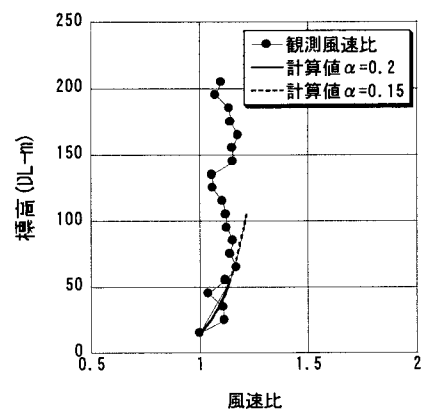


図-5 海上の風速の鉛直分布(2004/2/18)

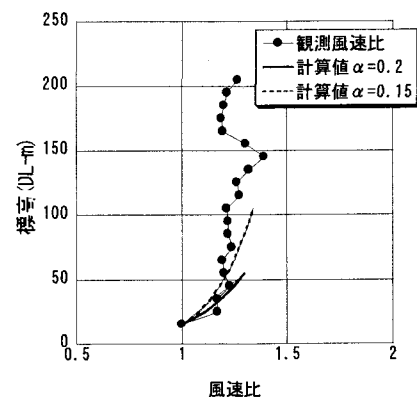


図-6 海上の風速の鉛直分布(2004/2/20)

基準とした標高DL+15mの風速は2/18のデータが12.6m/s、2/20のデータが4.6m/sである。

一般に風速の鉛直方向の分布はべき法則で次式のように表せられるとされている。

$$V(z)/V(z_p) = (z/z_p)^\alpha \quad (6)$$

ここに、 z 及び z_p は高さ、 $V(z)$ 及び $V(z_p)$ は高さ z 及び z_p における風速で、 α は係数である。

観測値を見ると標高が低い部分は標高の上昇とともに風速比が大きくなり式(6)のべき指数 α を0.15~0.20とするとよい一致を見るが、標高が約DL+50mより上空になると風速の変化は小さくなりほぼ一定の値となる。2/18のデータ(図-5)を用いて高度15mを基準にべき指数を求めると0.178となった。これは、一定値として一般に与える場合の設定値1/7(=0.143)や、1/5(=0.2、JISの風速プロファイルモデル)に比較的近く妥当な値と考えられる。また、海上では陸上に比べて境界層が薄いため高度とともに風速が増大する層も下層に限定されると考えられる。

4. 風況分布の数値シミュレーション

(1) 計算手法

風車周辺の気流分布の推定にあたっては、風車を地表面付近の気流障害物の一種としてとらえ、 $k-\varepsilon$ モデルをベースに「局所的風況予測モデルの開発」⁵⁾に示された植生canopyモデル⁶⁾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 F_i を設定した。

$$\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial t} + \frac{\partial \langle u_i \rangle \langle u_j \rangle}{\partial x_j} = -\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\langle p \rangle}{\rho} + \frac{2}{3} k \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \nu_t \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right) \right\} - F_i$$

$$F_i = \eta C_{\beta} \langle u_i \rangle \sqrt{\langle u_j \rangle^2} \quad (7)$$

ここで $\langle u_i \rangle$ は平均風速の3成分、 k と ε は乱流エネルギーとその散逸、 $\langle p \rangle$ は圧力、 ρ は密度である。また、 η は気流の遮蔽率に相当するパラメータ(植生モデルにおいては、格子体積に占める樹冠部分の体積比)であり、1の場合は完全に遮蔽(透過せず)、0の場合は完全透過である。

計算領域はほぼ写真-2に含まれる図-7の枠内とした。

図-2および図-3の観測点配置をふまえて水平には格子間

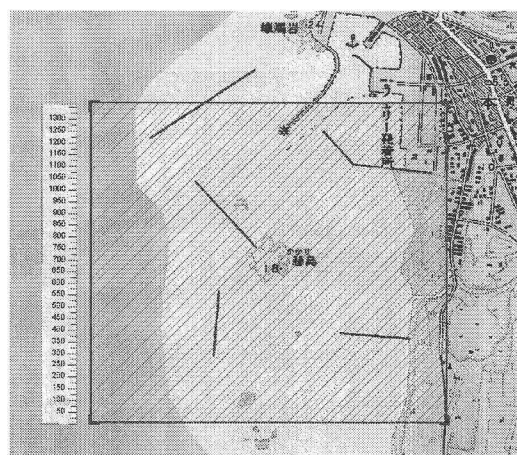


図-7 計算領域

隔22.5m、格子数60×60とした。また、鉛直にも風車高さや観測高度を考慮して、下層は地上5mから55mまでは10m間隔とし、上層ではより粗い間隔で高度300mまで計16層を設定した。風車は水平には各1×2格子分、鉛直には第4層から7層までを占めると設定した。海面および陸面粗度は、海上および陸上の観測データを用いた解析⁷⁾を基にそれぞれ0.0001m、0.2mとした。なお、計算領域内の島や防波堤についても陸面粗度を適用した。計算は次項で述べる各対象ケースについて入力風(風向・風速)を設定し、風車前面の風速比を算出して実測値との比較を行った。

(2) 計算対象ケース

図-4からもわかるとおり、風向・風速が比較的安定しており、かつ海側から陸側へ向かう風向であるのは、2/18の日中(夕方を除く)および2/19の午後(夜遅くには陸からの風に転じる)である。光波レーダによる風車後面における測定時刻も考慮して、表-1に示す2ケースを計算対象とした。

表-1 計算対象ケース

事例	日時	風向・風速 (防波堤15m)
1	2/18 13:10~14:00 15:20~15:30	WNW 12~15m/s
2	2/19 13:30~13:50 16:30~16:50	NNW~N 4~6m/s

事例1(以下、強風事例と呼ぶ)および事例2(弱風事例)について、実測値をもとに風車ナセル上の風速と防波堤15m(べき指数を適用して高度45m相当に換算)の風速比を求めると、強風事例では風車1で0.93~1.00、風車2で0.88~0.98であるのに対し、弱風事例では風車1で0.77~0.84、風車2で0.70~0.79となっており、強風事例より弱風事例のほうが風車直近における風速の減少率が大きい傾向が2基の風車に共通してみられた。

(3) 遮蔽率 η による風速比の相違

前項の解析結果をふまえ、式(7)の η を変化させた場合の風車後面における風速比(基準は風車より海側に2格子寄った格子の高度45mの風速平均値)の変化を算出した。なお、強風事例ではWNW15m/s、弱風事例ではNNW5m/sの定常風をそれぞれ入力条件として与えている。

η がある程度大きい場合には風速比の η 依存性はほとんどみられなかった。また $\eta=0.3$ 程度でも風車近傍における風速比は0.5未満まで大きく低下し、前項の結果から判断すると η が過大であるとみられるため、 $\eta=0.1$ 以下の小さい値での検討を行い、図-8にまとめた。図中の各折れ線は風速比の小さい(減少率の大きい)ほうから順に $\eta=0.1, 0.05, 0.03, 0.01$ である。強風事例については $\eta=0.005$ とした場合の値も点線で付記している。

弱風事例では $\eta=0.01$ の設定で直近で風速比0.75程度、

約100m後方では風速比0.9程度まで回復する。一方、強風事例では同じ $\eta=0.01$ の設定としても直近～100m後方にかけての風速比は0.8未満で推移している。実測のナセル上風速比は、強風事例のほうが大きく0.9以上となっていたことから、強風事例では η をより小さい値（0.005程度）に設定するほうが、実測との整合性が良いことが明らかにされた。

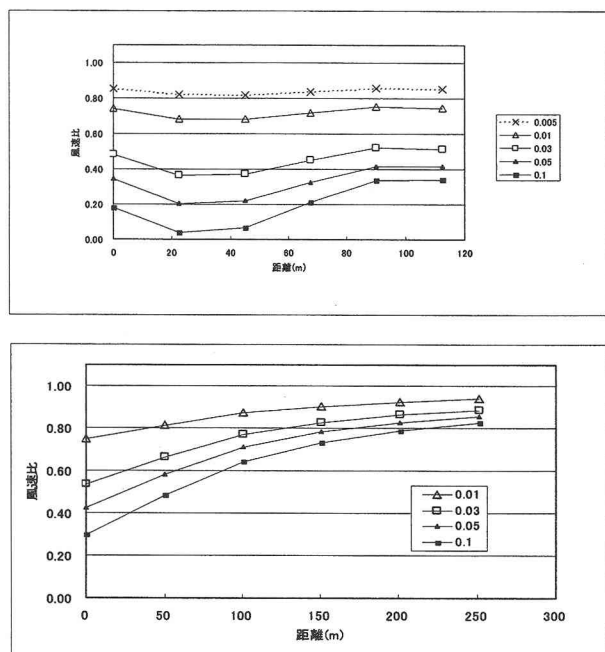


図-8 遮蔽率 η と風車背後の風速比の関係
(上図：強風事例、下図：弱風事例)

(4) 風車後面の風速分布

光波レーダによる風速水平分布の測定高度であり、風車ハブ高さにもほぼ相当する高度45m（モデルの鉛直第6層）における風速比分布を図-9に示した。前項をふまえ強風事例では $\eta=0.005$ 、弱風事例については $\eta=0.01$ とした場合の結果を掲載している。

強風事例では風車近傍でも風速比は0.8以上を保持し風車による風速低下はそれほど著しくないが、影響域は風下側のかなり長距離にまで延びていることがわかる。一方、弱風事例では風車直近の風速比は0.7程度まで低下するが、影響は比較的近傍に留まり風下側300m付近では風速比は1.0近くまで復帰している。

また、これらの計算結果を3本の測線N, C, S（図-9上図中に記載）ごとに風車ナセル上および光波レーダによる観測結果と比較したものを図-10に示した。さらに弱風事例について風車の風下（SSE）方向の測線A（図-9下図参照）において、約100m間隔で抽出した計算値による風速の鉛直プロファイルを図-11に示した。

実測値は対象解析期間の風速の平均値であり、風向・風速ともばらつきを持っていることに留意する必要があるが、強風事例では比較的对応は良いと判断される。なお測線Nの約100m後方地点で観測値の風速比が1よりかな

り大きくくなっているポイントがあるが、計測上の理由から、同一時刻の風速を比較できていないこと、計測時間が約6秒と短かったことも原因の一つと推定される。一方、弱風事例では風車直近の対応は良いが後方では実測の風速比が小さくなっている。ただし図-11にもみられるとおり、風下の測線Aの計算値では風車後方100m（a1）～200m（a2）で風速比が0.8～0.9の値となっており、風車背後の風速低減については、実測値とのある程度の対応は得られていると思われる。数値シミュレーションは一方向の風向で行っているが、実際の風は風向についても変動していることが、計算値との相違の原因として考えられる。また、実測では風車の風下方向から外れている測線Nの約300m後方地点において風速比が0.7程度とかなり小さく、実測値については風車による乱れ以外の要因も影響している可能性が高いとみられる。

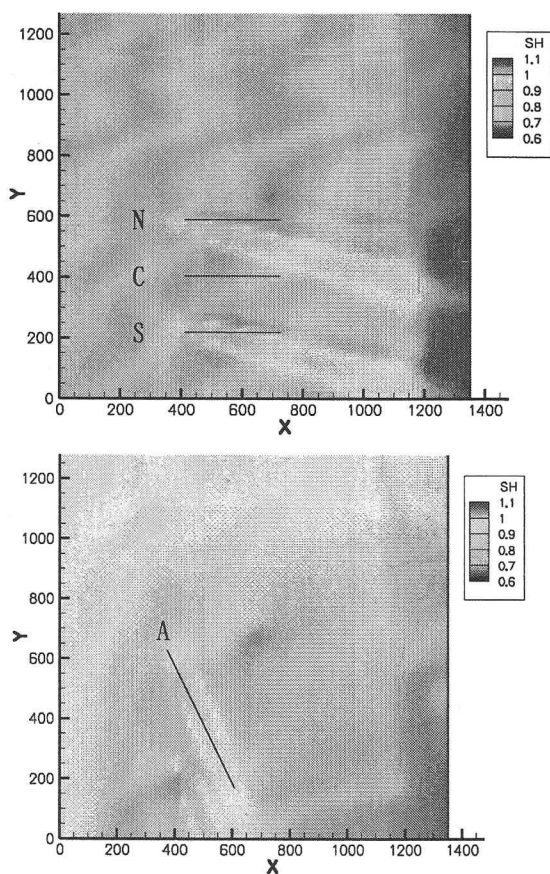


図-9 風速比の水平分布（高度45m）
(上図：強風事例、下図：弱風事例)

(5) 考察

(3)に記述したとおり、風車近傍の風速については強風事例の場合に、より小さい遮蔽率（ η ）の設定が妥当であると推定される。これは通過する空気のうち風車回転等に費やされる比率が強風時のほうが低いことに対応していると考えられる。本風車とほぼ同型とみられる風車のスラスト係数の値は風速15m/sに対しては5m/sの合の約1/3となっている。今後、他の事例もふくめたスラ

スト係数やパワーカーブと関連づけた解析により、 η の設定への知見が得られることが示唆される。さらに、後方の風速分布も考慮した η の最適値の検討には、より多くの事例による総合的検討が必要であると考えられ、今後の同種のデータの蓄積に期待したい。

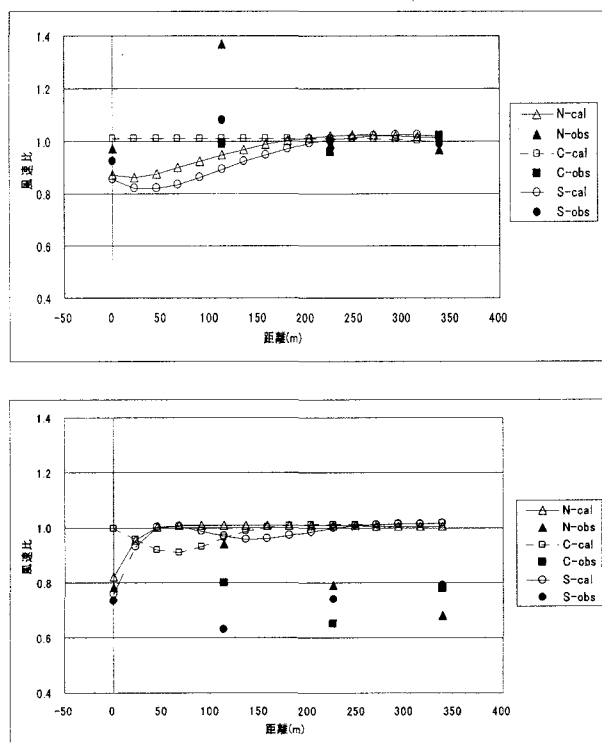


図-10 風車後面の風速比（計算値と実測値の比較）
（上図：強風事例，下図：弱風事例）
（N, C, Sは図-9中の測線に対応）

5. まとめ

本論文の内容を以下のようにまとめる。

(1) 海上では陸上に比べ境界層が薄いため、海面上50m以上の高度では、風速がほぼ一定となる傾向が認められた。今回の観測は陸域から近い領域ではあるが洋上の安定した風況が風力発電に対して良い影響を与えるものとする。今後は、さらに洋上風の観測例を増やすことが望まれる。

(2) $k-\varepsilon$ モデルにより風況シミュレーションを実施した。風車による影響については「局所風況モデル」における植生モデルの考え方の適用を試みた。遮蔽率 η をパラメータとし、風車背後の風速の低減影響を、実測値と比較検討した。この結果、 η の値は風速に応じて設定すべきことを提案した。適切な η の値の選定によって風車

背後の風速の低減効果を評価できることが確認された。しかし、 η の値の選定基準については、他の事例もふくめたスラスト係数やパワーカーブと関連づけた解析が、今後の課題である。

最後に本論文をしめくくるに当たり「港湾・沿岸域における風力発電推進研究会」の会員各位に感謝の意を表するとともに、地球温暖化防止等の観点から、今後の港湾・沿岸域における風力発電の更なる立地の拡大を願うものである。

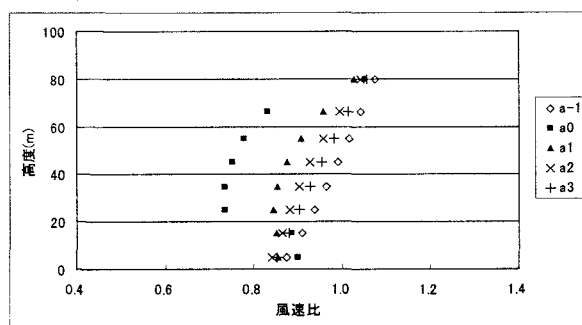


図-11 風速比の鉛直分布（弱風事例）
（図-9中の測線Aに沿った4点での計算値）
a-1 風上側100m, a0 風車付近,
a1~a3 風下側100~300m

参考文献

- 1) 和田康太郎：港湾空間への風力発電導入に向けた取り組み，港湾，Vol.81，No.11，pp.6-7，2004.
- 2) 白石悟：わが国における洋上風力発電推進へ向けた研究，港湾，Vol.81，No.11，pp.32-33，2004.
- 3) 堂端重雄：日本初の洋上風力発電「風海鳥」，港湾，Vol.81，No.11，pp.6-7，2004.
- 4) 西和宏，白石悟：風力発電のための光波レーダーを用いた海上の風況調査，沿岸センター研究論文集，No.4，pp.101-104，2004.
- 5) 日本気象協会：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.48-51，2003.
- 6) 加藤敦子，持田灯，吉野博，村上周三：植生canopyモデルを組み込んだ $k-\varepsilon$ 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.929-930，2001.
- 7) 永井紀彦，小川英明，中村篤，鈴木靖，額田恭史：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，pp.1306-1310，2003.