

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

DEVELOPMENT OF THE OFFSHORE WIND AND POWER-GENERATION RATE
ESTIMATION SYSTEM BASED ON FIELD DATA

永井紀彦¹・白石悟²・清水勝義³・成瀬英治⁴・八木一浩⁵・乙津孝之⁶
Toshihiko NAGAI, Satoru SHIRAISHI, Katsuyoshi SHIMIZU, Eiji NARUSE,
Kazuhiro YAGI, Takayuki OTSU

¹フェロー 工博 (独) 港湾空港技術研究所 海洋・水工部長 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

²正会員 工博 北海道工業大学工学部教授 (〒006-8585 北海道札幌市手稲区前田7条15-4-1)

(前 (独) 港湾空港技術研究所 地盤・構造部長)

³正会員 (独) 港湾空港技術研究所海洋・水工部海象情報研究室長 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

⁴正会員 (財) 沿岸技術研究センター研究主幹 (〒102-0092 東京都千代田区隼町3-16)

⁵非会員 川崎重工業(株)大型構造物ビジネスセンター参事 (〒675-0155 兵庫県加古郡播磨町新島8番地)

⁶非会員 (財) 日本気象協会首都圏支社応用調査部気象課技師 (〒170-6055 東京都豊島区東池袋3-1-1)

A new system was developed to estimate wind velocity distribution around the offshore wind-power generators, by assuming the wind energy conservation equation. Based on the long-term wind and power-generation observed data at the offshore and on-land stations, applicability of the tri-dimensional numerical wind simulation based on the $k-\epsilon$ model was confirmed. Interactions among the wind-power generators were estimated by using the numerical simulation, and example of the estimated power generation rate distribution around the existing generators was introduced. It was concluded that wind power generators reduce the wind velocity and wind-power potential of the surrounding sea-surface in the large area more than 5 times of the wind generator's diameter.

Key Words : Offshore wind, Wind power Generation, Field data, Numerical simulation

1. はじめに

洋上風力発電の潜在的な資源量は、立地の制約が大きい陸上よりもはるかに豊富であり、将来のクリーンエネルギー資源として注目されている¹⁾。しかし、洋上の大規模風車群の計画に際しては、風車自体の周辺風況への影響が明確ではなく、適正な風車間隔設定に関する知見が不足している。こうした、事前発電予測評価の不確実性が、洋上風力エネルギー資源活用の普及にむけて、大きな阻害要因となっている²⁾。

本稿は、こうした不確実性を解消し、精度と信頼性の高い発電量予測評価法の確立をめざしたものであり、特に、風車相互の影響範囲の明確化を目的としたものである³⁾。

2. 瀬棚港洋上風力発電と検討概要

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⁴⁾・⁵⁾。図-1にその位置を示すが、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47mである。

本稿では、この瀬棚港洋上風車群における風況観測値および風車発電実績値をもとに、実証的検討を行った。観測データとしては、①陸上に位置する北海道開発局瀬棚港湾事務所における長期風況観測値⁶⁾、②1999年から2000年にかけて洋上風車群建設前に防波堤上で実施された通年風況観測値¹⁾、③2004年の1年間を通じた2基の洋上風車群で測定された風況観測値および風車発電

実績値等を取りまとめた。空間的な風況分布を考慮した発電予測手法は、沿岸風力照明システム設計法の検討フロー²⁾に倣って構築・検討し、 $k-\varepsilon$ モデルによる3次元風況分布シミュレーション法^{7)・8)}に、風車の影響を樹木等の影響に倣って部分透過境界として表現する手法³⁾を組み合わせ、風車周辺の洋上風況分布を推定した。

図-1に、瀬棚港における検討対象領域を示す。2基の風車群による洋上風速の空間変動分布は、図中に示す狭領域の範囲で数値的に検討した。

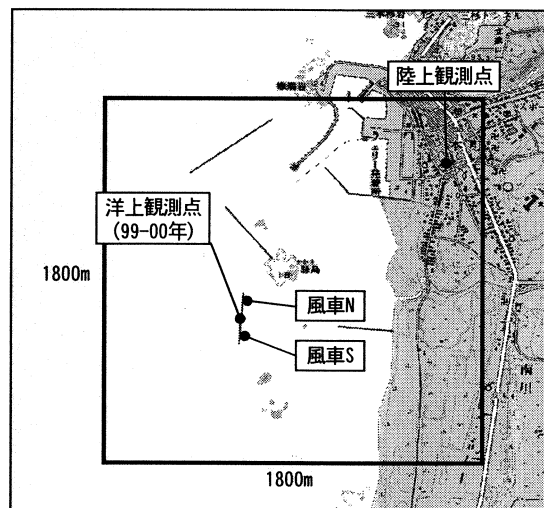


図-1 瀬棚港シミュレーション領域

3. 陸上と洋上の風況比較

図-2は、風車建設前（1999年8月-2000年7月）および建設後（2004年1月-12月）における洋上および陸上の風況を、4枚の風配図で示したものである。いずれの図もWNW方向（海風）およびESE方向（陸風）の2方向からの風が卓越しており、海岸線平行方向からの風の出現頻度は極めて小さくなっていることがわかる。

表-1は、陸上および洋上の平均風速を取りまとめた結果である。洋上風観測点は、風車建設前（海面上高度15m）と建設後（40m）の相違を考慮して、 $1/7$ 乗則¹⁾を仮定して建設後の高度に換算した。また、建設後の風速は、風車の裏側で測定したデータであるため、風車によるエネルギーロス considering 風車前面に來襲する風速を想定した。すなわち、風車前面の風エネルギーを E_f 、発電量を E_g 、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。

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

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/m^3)、 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。

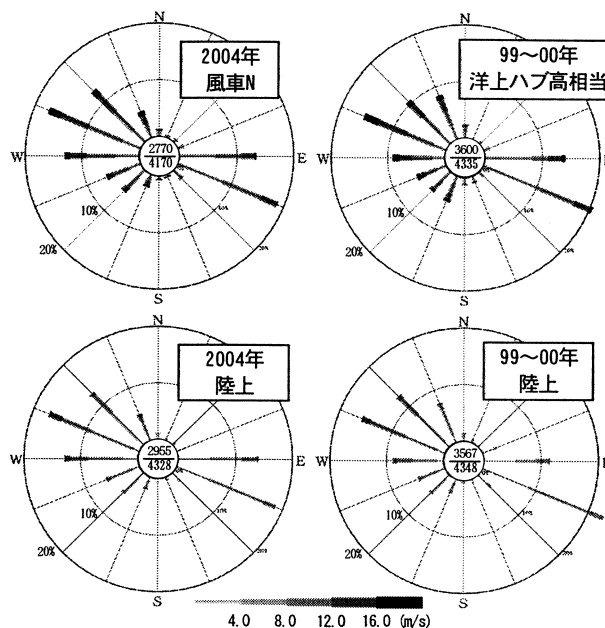


図-2 陸上および洋上の風配図

この式(1)と(2)を用いて、10分間平均値としての風車背後の風速と発電実績量から風車前面の風速を推定した。

洋上および陸上の両観測点に共通して、年平均風速は、1999-2000年より2004年は5%程度大きかった。しかし、洋上と陸上の風速比は極めてよく一致しており、洋上風は陸上の64%程度風速が大きいことがわかる。

表-1 陸上および洋上の平均風速 (m/s)

	2004年	99-00年
陸上	6.23	5.93
洋上	風車S 10.29, 風車N 10.05 (風車S・N平均 10.17)	9.71
風速比	1.63	1.64

図-3は、月別の平均風速を示したものである。北側に設置された風車 (N) は、2004年4月から5月にかけて風速計の欠測が見られたものの、他の月では北側の風車 (N) と南側の風車 (S) との風速の測定結果は、極めてよく一致しており、データの信頼性は高いと考えられる。また、月平均風速の季節変動についても、風車設置前後において大きな相違は見られないことが確認された。

図-4は、洋上/陸上の風向別風速比を示したものである。ここで、風向は、同時刻における陸上観測点による観測結果を用いて整理した。風車Sおよび風車Nの観測結果は、ここでも極めてよい一致を示している。風車設置前後の風速比も、図中に下線で示した8方位

(N, NNE, NE, ENE, SE, SSE, S, SSW)を除き、よく一致している。これらの8方位は、図-2の風配図からわかるように、出現頻度が極めて少ない方位であることを考え合わせれば、風車建設前後を通じて、洋上/陸上の風向別風速比は、一定値が保たれていると結論付けられる。

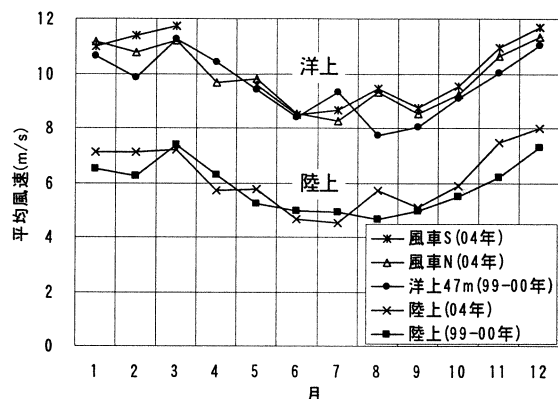


図-3 陸上および洋上の月別平均風速

こうした、洋上・陸上風の統計的な観測結果の比較結果は、風車背後の測定風速から風車前面風速を推定した式(1)および(2)の仮定の妥当性を、間接的に示唆するものでもある。

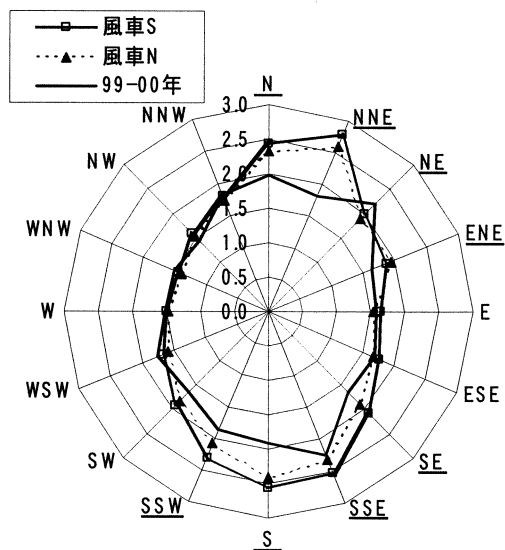


図-4 洋上/陸上の風向別風速比

4. 風車のパワーカーブ特性

図-5は、横軸に換算して算定された10分間平均風車前面風速を、縦軸に10分間平均発電量を示し、実測値による風車のパワーカーブを考察したものである。図中の3次曲線は、風車断面積を通過する全風力エネルギーに対する発電量の比（発電効率）を、パラメータとして示したものである。発電下限風速（約5m/s）から定格出力600kwに対応する風速（約12m/s）の範囲では、発電効率

は0.3程度となっていることがわかる。ここに、発電効率とは、発電量と風車断面を通過する全風力エネルギーとの比（ E_j / E_p ）として定義される値である。ただし、風速が12m/sよりも大きくなると発電効率は低下する。特にカットアウト風速である25m/sを超えると、設備保護のため風車を止め発電を中断するため、強風時の風力エネルギーをいかに取り込むかが、今後の長期的な技術課題となっている。

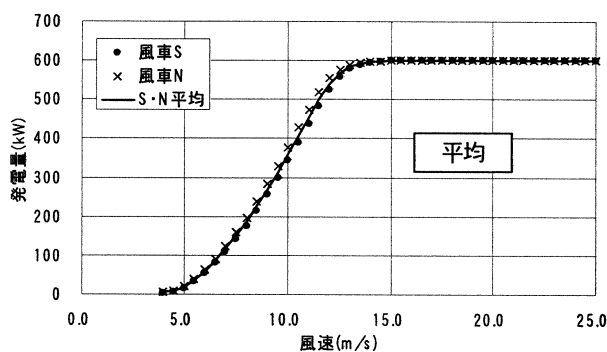
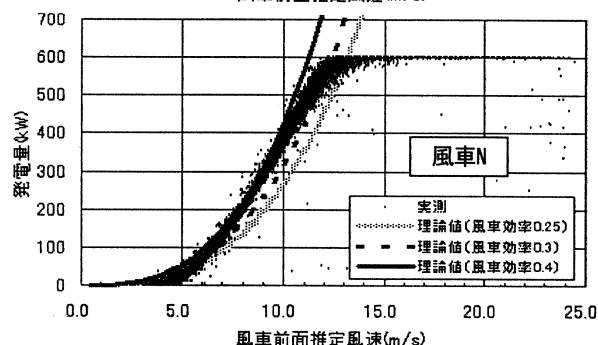
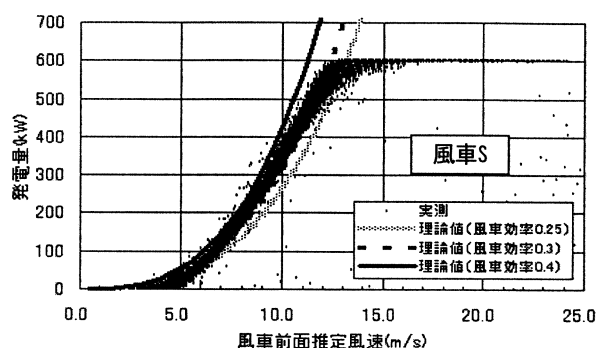


図-5 風車のパワーカーブ

5. 風車前面および周辺風況の推定法

図-5で得られた発電効率をもとに、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-6に示す。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³⁾を裏付けるものであった。

本稿の前報である文献³⁾では、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

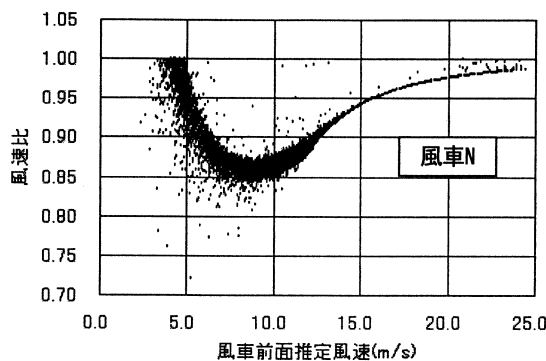


図-6 風車背後の推定風速比

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」⁷⁾に示された植生canopyモデル⁸⁾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を設定し、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。しかしながら、 η の適切な値については今後の課題として残されていたため、本稿では図-6をもとに、 η の値の設定を試みた。

図-7は、洋上風車前面に作用する風速をパラメータとして、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。横軸に示す η は、0.0と1.0の間で変化させたが、ここでは図を見やすくするため横軸には η の平方根を示した。図-7から、図-6で得られた風速比0.87程度に相当する η は、発電が有効に行われる範囲の風速5-15m/sでは、風速によってはほとんど変化せず、概ね0.005程度に設定できることがわかる。

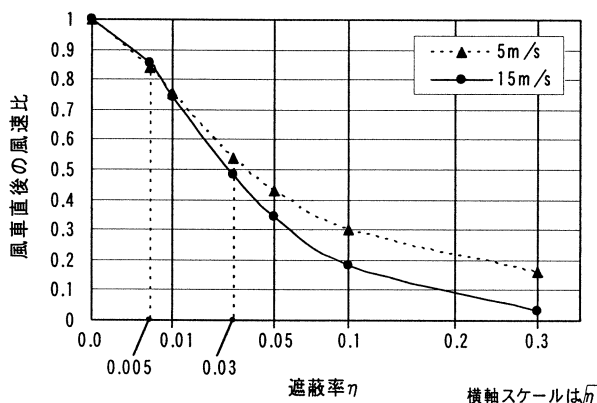


図-7 遮蔽率 η と風車前後の風速比

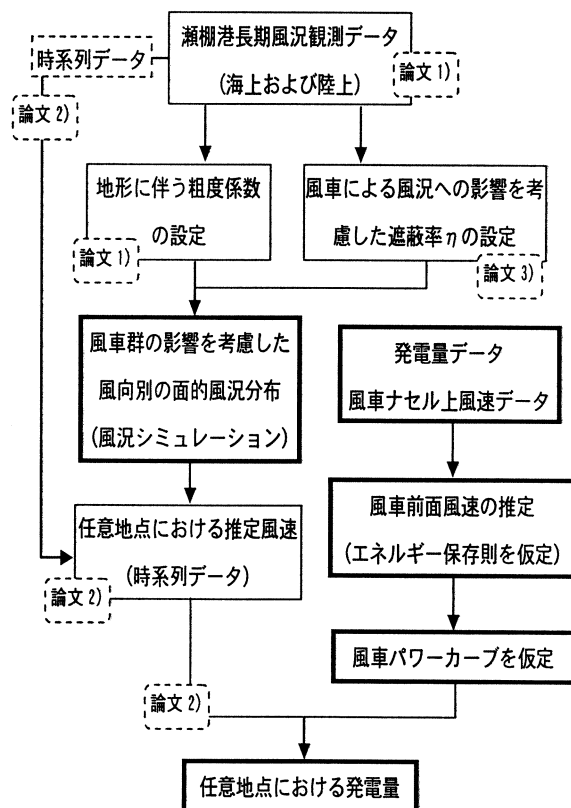
図-8は、図-7で示されたように η を0.005と設定した場合における、さまざまな方位から風が入射した場合の風速空間変動算定結果例を紹介したものである。反対方

向から風が入射するWNWとESE、およびNNEとSSWについて、風速場が完全に対称とならないのは、数値シミュレーション上の境界条件の相違である。すなわち、西側境界は洋上であるのに対して東側境界は陸上となっており、陸上では洋上より粗度が大きい影響が現れたものと考えられる。シミュレーションでは、陸上・洋上にかかわらず風上側境界で一定風速（図中にUとして示す）を与えているため、陸風と海風の風速分布に、微妙な差異が生じたものと推定される。

6. 発電量予測モデルの提案

図-9は、検討した風車群背後における発電量予測フローをとりまとめたものである。こうしたフローによって、従来は経験的に設定されていた風車群の適正配置の検討を合理的に行うことができるようになり、風車群建設における風車相互間隔についての目安となる情報を提供することが可能となった。

7. 洋上風車周辺域の潜在発電予測量の試算



太線：新規検討部

図-9 発電量予測フロー

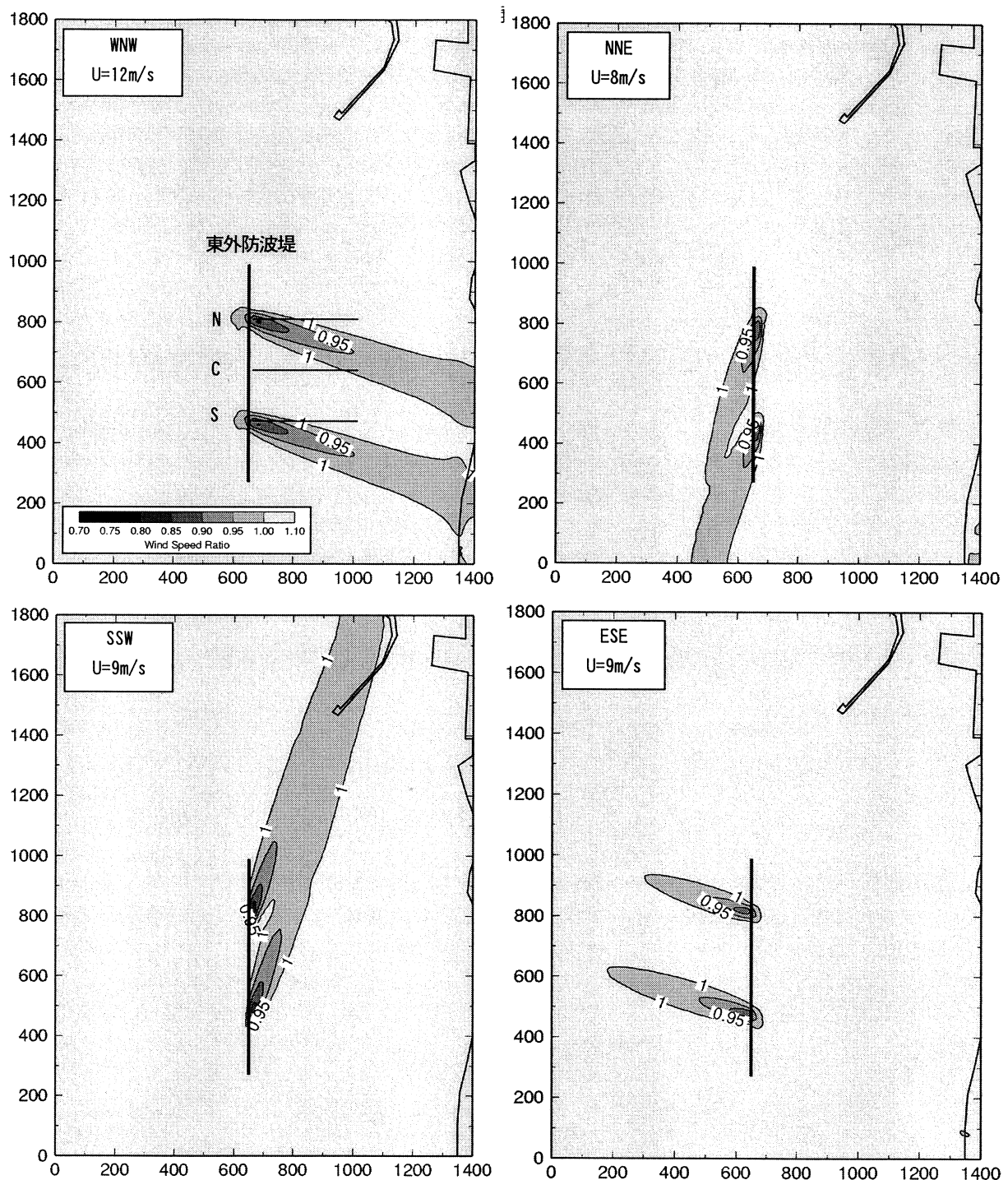


図-8 風車背後の風速比分布

図-8によって得られた風速の空間変動と、2004年の通年における陸上観測点における風向風速の時系列変動とを組み合わせ、周辺海域上に3番目の同型風車を設置する場合の、既存風車の影響を考慮した発電予測計算を、図-9に示すフローで実施した結果を図-10に示す。

風車・防波堤・島などの影響によって、年間予測発電量は空間的に大きく異なったものとなり、風車群の計画・建設にあたっては、局所的な風況変動を考慮した事前計画が極めて重要となることが改めて示された。既設

の影響範囲は、図-2の風配図からも明らかな通り、WNWからESEにかけての線上で最も強く現れている。

図-11は、風車Nの設置位置を $X = 0$ で示し、WNW方向を $X < 0$ 、ENE方向を $X > 0$ として表示し、図-10に示した最も既設風車の影響が強く現れるX軸上の年間発電量予測値を示したものである。図の横軸には、既設風車からの距離を風車ロータ直径 ($D = 47m$) で無次元化した距離を併記しているが、 $X > 0$ 方向については、風車の影響距離は $5D$ を超え広がっている状況がよく理解

できる。洋上は陸上に比べ底面粗度が極めて小さいため、洋上風車の影響範囲は陸上風車群設置にあたっての風車間隔の目安とされている $5D$ より広く、風車群の計画設計にあたって留意が必要であることが改めて確認された。

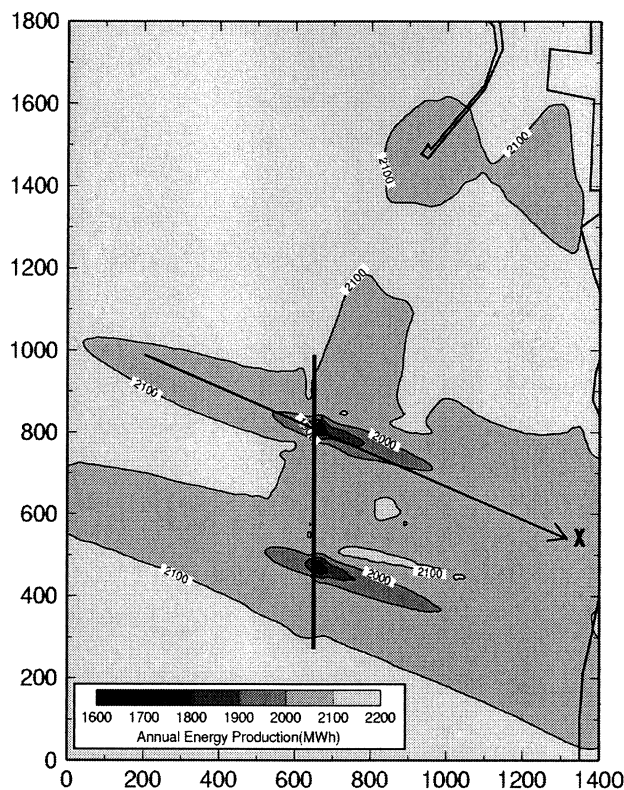


図-10 年間発電量分布予測

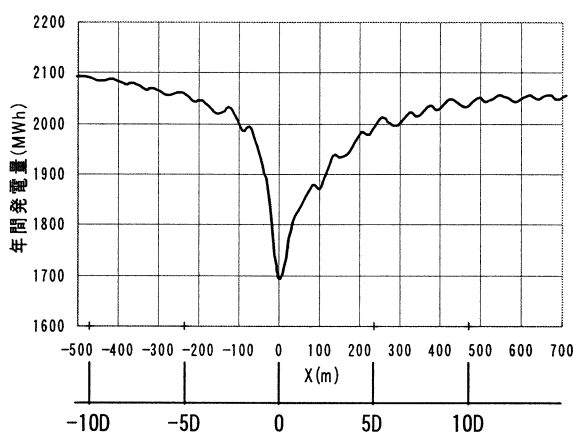


図-11 WNW-ESE方向の年間予測発電量

8. おわりに

本稿では、瀬棚港洋上風力発電施設における通年実測データをもとに、エネルギー保存式から導かれる風車背

後における観測風速を前面風速に換算する方法を提案した。その上で、推定される風車前後の風速をもとに、文献³⁾で今後の課題として残された風況シミュレーションにおける風車の影響を評価する遮蔽率 η を0.005として設定し、陸上風長期観測結果と風向別風況シミュレーションとを組み合わせた図-9に示す発電量予測フローを提言した。さらに、このフローにより既設風車周辺に新たな風車を設置する場合を仮定し、設置位置による年間発電予測変動を試算した結果、洋上風車の影響範囲は陸上風車群設置にあたっての風車間隔の目安とされている $5D$ より広く、風車群の計画設計にあたって留意が必要であることが改めて確認された。

本稿で述べた事前発電予測の精度と信頼性の向上を通じて、二酸化炭素を排出しないクリーンエネルギーの中でも大きな潜在エネルギー資源を有するとされる、洋上風力発電の促進に貢献することができれば、著者らにとって何よりの幸いである。最後に、本稿のとりまとめにあたって、北海道開発局、瀬棚町および(財)沿岸技術研究センターに設置された「港湾・沿岸域における風力発電推進研究会」から貴重な観測情報のご提供を受けたことを紹介し、改めて謝意を表する。

参考文献

- 1) 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，土木学会，pp.1306-1310，2003.
- 2) 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：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，海洋調査技術学会，pp.1-12，2005.
- 3) 白石悟・永井紀彦・林宏典・西和宏・久米仁司・堂端重雄：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.1059-1064，2005.
- 4) 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.
- 5) 西和宏・白石悟：風力発電のための光波レーダ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.
- 6) 永井紀彦：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，2002.
- 7) 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.
- 8) 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- 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.929-930，2001. pp.20-33，1994.