

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE
OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1105 September 2005

沿岸風力照明柱の計画・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

永	井	紀	彦
下	迫	健	一
牛	山		郎
根	本	泰	泉
川	西	和	行
塚	本	泰	昭
			弘

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. 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	4
2.1 はじめに	4
2.2 観測結果に基づく久里浜湾沿岸における風況	4
2.3 点灯稼働実績の整理	5
2.4 局所風況シミュレーション	7
2.5 風況の時空間変動を考慮した点灯稼働シミュレーション	10
2.6 富山県新湊における追加実証試験	13
2.7 まとめ	14
3. コンセントレータを用いた風車の発電性能向上	14
3.1 はじめに	14
3.2 記号	14
3.3 供試風車およびコンセントレータ	14
3.4 実験装置および方法	15
3.5 実験結果および方法	15
3.6 まとめ	17
4. 照明柱に作用する越波による波力の評価	18
4.1 はじめに	18
4.2 防波堤や護岸上部の構造物に作用する越波による波力の計算法	18
4.3 風力照明システムに作用する波力の計算例	20
4.4 まとめ	22
5. おわりに	22
参考文献	23

Study on the Design and Planning of the Coastal Wind Powered Light System

Toshihiko Nagai*
Kenichiro Shimosako**
Izumi Ushiyama***
Yasuyuki Nemoto***
Kazuaki Kawanishi****
Yashuhiro Thukamoto****

Synopsis

This paper introduced three research results on the coastal wind powered light system.

Optimal design of coastal wind-powered lights and battery system was investigated with consideration of topographical and time variation of wind characteristics by means of a field test and numerical simulations, as one typical example of on-site wind power utilization. Field test was conducted at the Kurihama-Coast faced to the entrance of the Tokyo-bay. The experimental system with a 12W powered light was set to operate daily 6 hours after sunset. Wind velocity and direction at the three points, light on-off signal, electric power generation rate, and battery voltage corresponding to the stored electric power were recorded continuously for eight months without interruption. Three dimensional wind characteristics were numerically simulated to estimate topographical wind distribution.

Concentrator system was also studied by a series of model experiments in order to make most use of the wind power acting to the wind fan. Results of the tests showed the optimal conditions of the concentrator locations and dimensions.

Wave overtopping forces acting on the pole of the wind powered light and guard fences were also studied applying the calculation method of the wave force on the superstructure of the breakwater or sea-wall. It was concluded that the structurally resistive design against wave forces must be considered as well as the load generated by wind.

Key Words: force of the wind, energy, lighting system, windmill, concentrator, wave overtopping, wave force

* Head, Marine Information Division, Marine Environment and Engineering Department

** Head, Marine Structure Division, Marine Environment and Engineering Department

*** Ashikaga Institute of Technology

**** Sankyo Aluminum Industry Co., LTD.,

沿岸風力照明システムの計画・設計に関する検討

— 点灯稼働率事前予測法の開発などについて —

永井 紀彦*
下迫健一郎**
牛山 泉***
根本 泰行***
川西 和昭****
塚本 泰弘****

要 旨

風力照明システムのような現地利用型風力エネルギー活用システムの稼働状況（点灯稼働率）は、局所的な風況、発電容量、蓄電容量、コントロールシステムの設定などに依存する。従来は、時空間的に変動が大きい風況を精緻に把握・予測することが困難であったため、発電容量、蓄電容量、コントロールシステムの設定などは経験的に設定するしかなく、このため、システムの稼働状況（点灯稼働率）を事前に適切に予測することができなかった。このため、風力にエネルギー源を求める現地利用型施設の稼働状況は、不確実性が大きいものとされ、このことが、風力エネルギーの有効活用を普及するための大きな問題点であった。

本研究は、こうした問題の克服をめざしたものであり、久里浜湾護岸近傍の風況観測データ、風力照明システム点灯稼働状況実証試験結果、および、近年開発された局所風況シミュレーションモデルを活用し、①沿岸風況の局所的時空間変動の解明、②発電・蓄電効率の実証的検討、③照明点灯稼働率の的確な評価といった観点の検討を経て、沿岸風力照明システムの合理的な点灯稼働率の事前予測を可能とするとともに、照明支柱群における合理的な風車・蓄電・制御システムの設定事例を示したものである。

本研究では、こうした最適設計法の検討に加えて、弱風時における風車の発電効率を確保するための工夫の一つである、コンセントレータについて、その効果を室内風洞実験で検討した。ここ結果、以下の場合に特に大きな出力増強効果が得られることが判明した。

- ① コンセントレータ出口後方に風車ロータを配置した場合
- ② コンセントレータ出口径を風車直径以下にした場合
- ③ コンセントレータ入口径が、風車直径に比べ十分大きい場合

さらに、沿岸部の越波による越流水が作用する位置に沿岸風力照明システムが設置される場合を想定し、照明支柱に作用する波力の試算を行い、本システムを防波堤や護岸上に設置する場合、風荷重に対する安定性だけでなく、波力に対する安定性の検討が不可欠であることが明らかになった。

キーワード：風力、エネルギー、照明システム、風車、コンセントレータ、越波、波力

* 海洋・水工部海象情報研究室長

** 海洋・水工部耐波研究室長

*** 足利工業大学

**** 三協アルミニウム(株)

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 独立行政法人港湾空港技術研究所
電話：046-844-5048 Fax：046-842-5246 e-mail：nagai@phri.go.jp
<http://www.pari.go.jp/bsh/ky-skb/kaisho/>
<http://www.mlit.go.jp/kowan/nowphas/>

1. はじめに

風力照明システムのような現地利用型風力エネルギー活用システムの効率向上と合理化をめざして、当所と足利工業大学と三協アルミニウム(株)との3者共同研究により、3つの観点から、研究を行なった。

第1の観点は、発電容量、蓄電容量、コントロールシステムの設定などの、システムの稼働状況(点灯稼働率)を事前に適切に予測した上での合理的な計画・設計法の開発である。従来は、風力にエネルギー源を求める現地利用型施設の稼働は不確実性が大きく、予測困難であったため、風力エネルギーの有効活用普及の大きな障害であった。ここでは、久里浜湾護岸近傍において風況観測と風力照明システム点灯稼働状況実証試験を実施するとともに、風況シミュレーションモデルを活用し、①沿岸風況の局所的時空間変動の解明、②発電・蓄電効率の実証的検討、③照明点灯稼働率の的確な評価を通じて、沿岸風力照明システムの合理的な点灯稼働率の事前予測を可能とし、照明支柱群における合理的な風車・蓄電・制御システムの設定事例を示した。

第2の観点は、風車の発電効率を向上させるためのコンセントレータ活用に関する検討であり、室内風洞実験を実施した検討結果を紹介する。

第3の観点は、越波による越流がある場合に、風力照明柱に作用する流体力を検討したものである。当所で行なわれた水理模型実験から導かれた経験式を活用し、作用流体力を試算した。

2. 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

2.1 はじめに

本章では、風況推定結果にもとづく沿岸風力照明システムの最適設計手法確立を目標とした。

風力発電は二酸化炭素を排出しない自然エネルギーとして普及しつつあり、欧州各国では洋上風力発電が急速に増えつつある。洋上での観測データは少ないが、洋上を含む沿岸域は陸上部よりも風速が強く、また風の乱れが小さく安定した風力発電が期待できる^{1), 2), 3)}。

従来は、時空間的に変動が大きい風況を精緻に把握・予測することが困難であったため、発電容量、蓄電容量、コントロールシステムの設定などは経験的に設定するしかなく、このため、システムの稼働状況(点灯稼働率)を事前に適切に予測することができなかった。このため、風力にエネルギー源を求める現地利用型施設の稼働状況は、不確実性が大きいものとされ、このことが、風力エ

ネルギーの有効活用を普及するための大きな問題点であった。風力照明システムのような現地利用型風力エネルギー活用システムの稼働状況(点灯稼働率)は、局所的な風況、発電容量、蓄電容量、コントロールシステムの設定などに依存するためである。

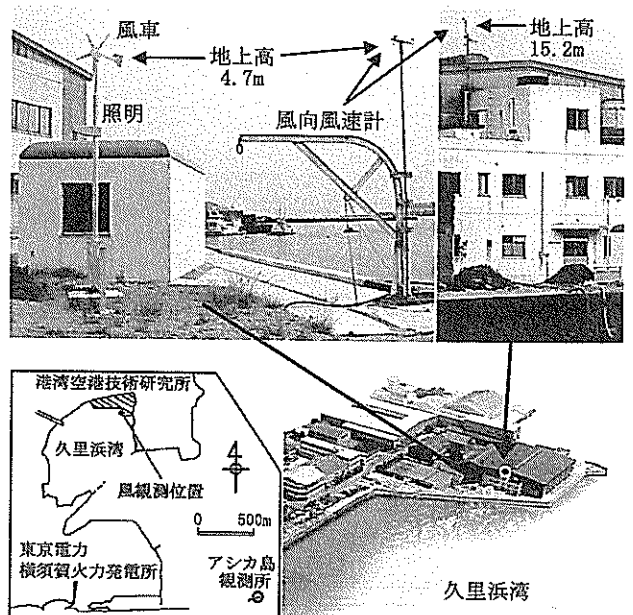


図-1 久里浜湾実証実験観測サイト

本章は、こうした問題の克服をめざしたものであり、久里浜湾護岸近傍の風況観測データ、風力照明システム点灯稼働状況実証試験結果、および、近年開発された局所風況シミュレーションモデル^{4), 5), 6)}を活用し、①沿岸風況の局所的時空間変動の解明、②発電・蓄電効率の実証的検討、③照明点灯稼働率の的確な評価といった観点の検討を経て、沿岸風力照明システムの合理的な点灯稼働率の事前予測を可能とするとともに、照明支柱群における合理的な風車・蓄電・制御システムの設定事例を示したものである。

2.2 観測結果に基づく久里浜湾沿岸における風況

洋上を含む沿岸域の風況特性把握のために、図-1に示す、①東京湾口に位置する洋上のアシカ島観測所(地盤上13.5m)、②港湾空港技術研究所敷地内の実験棟屋上(地盤上15.2m)および③実証試験サイトである照明柱近傍護岸(地盤上4.7m)の3点で風況を2002年11月から2003年7月にかけて比較観測し、各観測点における風力の出現特性を検討した。それと同時に、日没後6時間にわたって12Wの照明を行なうように設定された風力照明柱を護岸に設置し、実際の点灯状況や蓄電池電圧(蓄

電量に対応)を連続的に監視し、システム稼働状況を
確認した。

図-2左は、各観測点の月平均風速を比較したものであ
る。屋上観測点ではデータ記録システムの不備により欠
測が多く、12月-4月の月平均風速が算定できなかった。
図-2右は、8か月間を通算したアシカ島の観測風を基準
とした方向別平均風速比を示したものである。周辺建物
の影響によって、照明柱における風速は、W方向でアシ
カ島の約50%、N-E-Sにかけては10-20%の風速にすぎ
ない。沿岸域の局所的な風況変動が非常に大きいことが
わかる⁷⁾。

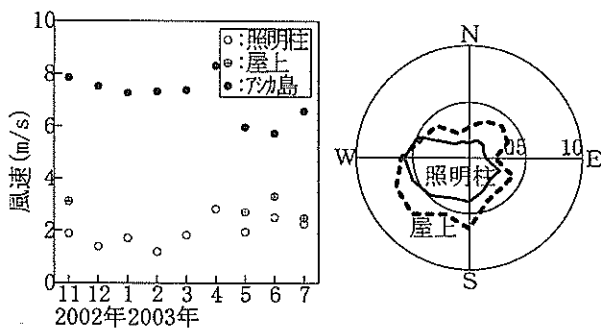


図-2 3観測点における風況比較

2.3 点灯稼働実績の整理

(1) 風車による発電特性

図-3は、本実証試験で使用した風車による発電システ
ムの特性を示したものであり、沿岸風力支柱上の風速V
(m/s)と発電量P(W)の関係を示している。図中の式($P = \frac{1}{2} \rho A S V^3$)
で、 ρ は空気密度(1.2kg/m³)、Aはエネルギー変換
効率、Sは風車の受風断面積(ここでは0.72m²)であり、
風速4m/s以上の期間中のデータをプロットした。

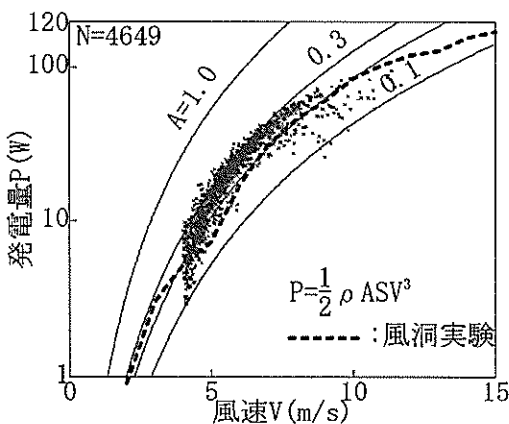


図-3 風速と発電量との関係

発電量Pは、理論通り概ね風速の3乗に比例しており、
その効率Aは0.1-0.3程度であった。図中には、あわせ
て、メーカーカタログに基づく本風車発電システムのパワ
ーカーブを破線で示すが、実証試験結果は、このパワ
ーカーブと良好な一致を示している。

(2) 照明システム実証試験結果

図-4に期間中である8か月間の点灯実績を示す。また、
図-5に蓄電池の放電電圧と蓄電量との関係を示す。ここ
で用いた蓄電池は、満容量(1200Wh)の半蓄電量(600Wh)
に対応する放電電圧は11.5Vである。満容量対応電圧
(13.2V)よりも高い電圧を与えると、さらに満容量の
10%増程度まで充電が進む性質を有している。

本システムでは、蓄電池保護のため、蓄電池の蓄電量
が満容量の50%以下ならば点灯させない。そして、いつ
たん不点灯となると、蓄電量が満容量になるか、瞬間的
にでも風によって所定の発電量が得られるかの、いずれ
かの条件を満たさなければ再点灯しないように設定され
ている。図-4に見られるように、不点灯時電圧は11.5V
であることが多いものの、より高い電圧が得られても点
灯しないことがあるのは、このコントロールシステムの
条件設定のためである。

こうした条件設定は、太陽電池による蓄電の経験をも
とにして経験的に設定されたものであるが、蓄電池保護
には十分と考えられる50%以上の蓄電容量がある場合
にも不点灯となることが多く見られ、合理的な設定とは
言えないことが、実証試験結果から示された。

図-4の点灯・不点灯の繰り返しには、一定の周期性の
ようなものが認められそうである。不点灯継続日数は最
長で10日間程度であった。さらに細かく見ると、図中の
矢印で示す、ある程度の風が吹いて蓄電量と電圧が増加
する時間間隔は、概ね数日-10数日となっている。

関西国際空港沖合洋上風観測記録を年間スペクトル
解析した結果、応答関数としての最も変動の顕著な周期
帯は、1-10日程度であることが示されている⁸⁾。これ
は、図-4で得られた矢印の間隔の周期とよく一致して
おり、我が国における気象変動周期と対応したものであ
ると推定される。

図-6は、風速・発電量・蓄電池電圧の経時変化例を
示したものである。発電量は風速の3乗に比例するため、
図右側の対数軸を用いてより滑らかに経時変化を記述し
た。

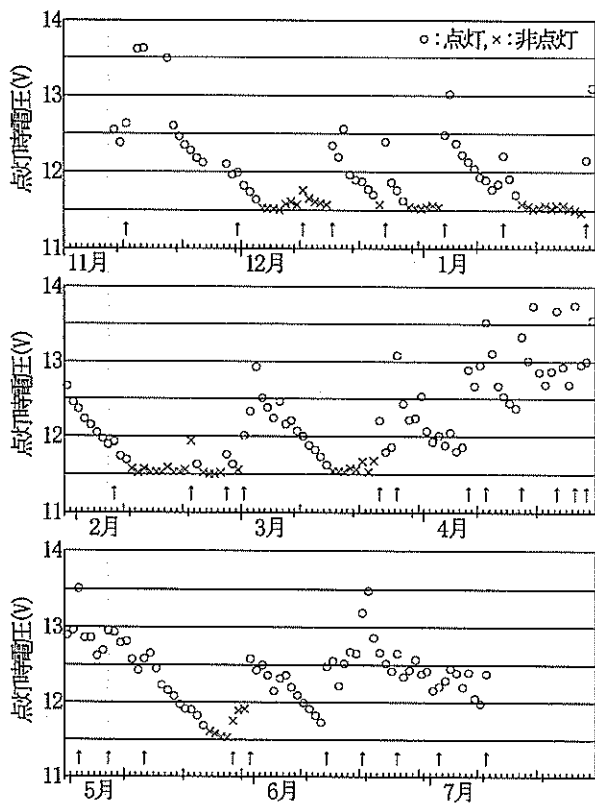


図-4 日没時の点灯実績と蓄電池電圧

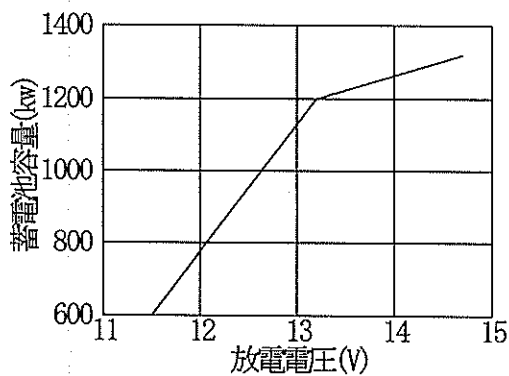


図-5 蓄電池放電電圧と蓄電容量との関係

ここで注意が必要なのは、図-6における電圧の測定値は、蓄電池から放電されている電圧と、発電機から蓄電池にむけて充電されている電圧との、2つの値の大きい方が示されていることである。図-6で、強風時に電圧測定値が急増し、風がやむと電圧が若干低下したのは、強風時における測定電圧は、蓄電容量に対応するものではなく、発電された電圧を測定したためであった。したがって、蓄電池の蓄電容量は電圧測定結果から求めるしかないが、これは、前者の状態、すなわち風速が小さい状態における測定電圧に関して、蓄電容量を推定しなければなら

ない。

1月3日には蓄電容量が十分でなく電圧が約11.5Vであったため、点灯しなかった。その後、4日および5日に10m/sを超える強風が出現し、蓄電池出力電圧と蓄電容量が増加した。6日以降は、太字の照明支柱点灯中にほぼ一定の割合で電圧と蓄電容量が減少していることがわかる。

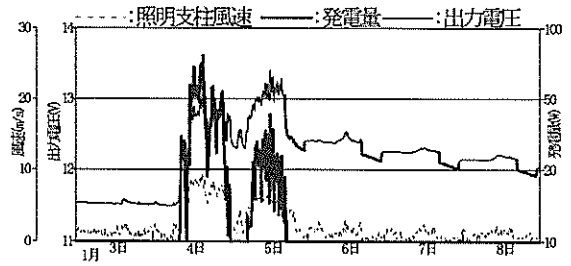


図-6 風速・発電量・蓄電池電圧の経時変化例

(3) 強風状態の出現特性をふまえた制御システムの考察

実証試験システムのコントローラによる日没時の制御は、従来の太陽電池型の制御に倣って、以下のように行われていた。

- ①毎日、日没時から6時間点灯させる
- ②ただし、日没後、瞬間的にはあっても測定電圧が満充電(1200Wh)に対応する電圧(13.2V)以上を検出するまでは、点灯させない
- ③蓄電容量が50%容量以下となった場合(測定電圧が11.5V以下となった場合)は、点灯中であってもただちに消灯させる

このうちの②の制約条件は、前述した通り、太陽電池による蓄電の経験をもとにして経験的に設定されたものであるが、蓄電池保護には十分と考えられる50%以上の蓄電容量がある場合にも不点灯となることが多く見られるので、必ずしも合理的な設定とは言えない。システムの点灯稼働率向上のためには、制約条件②は除外・緩和することが望ましい。例えば、前出の図-4では、5月30日から6月1日にかけて、測定電圧が11.5Vを上回っているにもかかわらず、不点灯の×印が示されているが、これは②の制約条件による不点灯であった。すなわち、現地利用型風力エネルギー活用システムにおいては、コントローラの制御システムの設定が、システム稼働率に大きく影響することが明らかにされた。

表-1は、蓄電が行なわれると考えられる状態(強風状態)の出現特性を、強風の出現間隔と継続時間という観点からとりまとめたものであり、波浪の継続時間統計⁹⁾に準じた整理を行ったものである。ここでは、図-3をも

とに、照明に必要な電力（12W）以上の発電が行われ蓄電池に蓄電が行われると考えられる5 m/s 以上を、強風状態と考えた。

表-1 上の実証試験サイトにおける5 m/s 以上の風速の出現状況に注目すると、8 か月間の実証試験期間中、のべ490 時間（全体の8.6%の期間）だけしか出現していないことがわかる。また、強風状態はあまり長時間は継続せず、6 時間以下の継続時間であるものがのべ146 時間、6 時間を超え1 日以下の継続時間であるものがのべ312 時間であり、これらをあわせて、全強風状態490 時間のうち、458 時間（93%）が、強風状態の継続が1 日以下のものであった。すなわち、実証試験に用いた発電・蓄電およびコントロールシステムの下では、風車による発電によって蓄電がなされる時間は、全体の8.6%しかなく、かつ、発電状態の継続時間も大部分が1 日以下しかなく示された。このことが図-4 に示されたように不点灯となる事象が多く出現した原因であり、発電特性が異なる太陽電池システムの経験に頼ったシステムの計画設計が必ずしも合理的なものではなかったことが明らかにされた。

表-1 強風の出現特性（出現間隔と継続時間）

【地点A】

出現時間（度数）	< 5m/s	5m/s ≤
～ 6 hour	56 (21)	146 (43)
6 hour ～ 1 day	250 (16)	312 (24)
1 day ～ 10 days	2424 (27)	32 (1)
10 days ～	2474 (5)	0 (0)
総時間 (%)	5204 (91.4 %)	490 (8.6 %)

【アシカ島】

出現時間（度数）	< 5m/s	5m/s ≤
～ 6 hour	622 (177)	410 (119)
6 hour ～ 1 day	1000 (79)	1332 (97)
1 day ～ 10 days	214 (7)	2274 (48)
10 days ～	0 (0)	0 (0)
総時間 (%)	1836 (31.4 %)	4016 (68.6 %)

ただし、図-2 で示したように、実証試験サイトでは、建築物等の影響を受け、沖合（アシカ島）よりも風速が大きく減衰していることには注意が必要である。アシカ島では、表-1 下に示すように、のべ4016 時間（全体の68.6%の期間）にわたって、5 m/s 以上の風速が出現しているため、風車の設置位置を含めた発電システムの配置の見直し、蓄電システムの見直し、およびコントローラ制御システムの見直しを通じて、風力照明システムの稼働率を高める余地は多く残されていると考えられる。

しかし、いずれにせよ、蓄電池に風力エネルギーを蓄積することができる強風状態は、数日毎にしか出現しないので、分散型風力エネルギー活用システムから常時（毎晩）照明エネルギーを利用するためには、蓄電システムが重要となる。他方、十分な容量の蓄電システムがあればシステム（点灯）稼働率は向上するものの、システムが高価なものとなる難点があるので、風況に応じた合理的な蓄電システムの設定が実用上重要となる。

2.4 局所風況シミュレーション

(1) 再現範囲と領域区分

2.2 で述べたように、沖合い洋上のアシカ島定常観測局と、護岸沿岸の実証試験サイトでは、風況に大きな相違がある。このため、アシカ島から護岸沿岸の範囲の面的風況特性を明らかにする数値局所風況シミュレーションを行った。実証試験サイトにおける風況は、周辺の建築物によって大きく影響を受けているものと推定される。こうした影響を評価するためには、5 m 間隔程度の詳細な数値格子が必要となる。反面、実証試験サイトからアシカ島までは2 km 程度は離れており、この間をすべて5 m 格子でカバーするのは、既存の計算機容量の制約を考えると現実的ではない。

こうした理由によって、数値風況シミュレーションは、広領域（久里浜港を含む5 km 四方の領域を100 m メッシュで分割）および狭領域（港空研護岸および実験棟を含む250 m 四方の領域を5 m メッシュで分割）において、各々16 方位の計算を2 段階で実施した。

(2) 広領域風況シミュレーション

広領域風況シミュレーション数値メッシュを図-7 に、広領域風況シミュレーションの条件設定を表-2 に、それぞれ示す。

ここでは、数値風況シミュレーションは、微気象モデル（k-εモデル）を用いた^{5), 6)}。乱流の渦粘性を考慮したものであり、局所的な急変地形場における風況の空間変動特性を計算できる特徴を有している。広領域風況シミュレーションでは、水平格子間隔が100 m と比較的大きいため、建築物による鉛直にとがった高低段差を考慮する必要がなく、底面境界条件は連続的に変化すると考え、底面（海水面および地盤面）を鉛直座標基準とした。鉛直方向の格子は、0 m から1000 m までを、低高度では細かく高高度では粗い不等間隔20 層として演算した。すなわち、0 m, 10 m, 30 m, 60 m, 90 m, 120 m, 150 m, 190 m, 225 m, 265 m, 310 m, 360 m, 420 m, 480 m, 540 m, 610 m, 690 m, 770 m, 840 m, 920 m, 1000 m の各高度で層分割を行った。境界条件として風上側の境界に沿

って一様な風を設定し、初期条件として水平方向に一様な風を与えて、定常状態になるまで数値差分を継続する。この際、境界面における風向風速の水平分布は一定と仮定し、鉛直分布は1/7乗のべき乗則を仮定した。このように、一様な風条件を与えたのは、広領域のメッシュ間隔 100m に対して、狭領域のメッシュ間隔 5m が極端に小さい条件であったためである。時間積分は、安定のため、表-2 に示すように、0.5s 間隔とし、最大で局所的に 50m/s の強風が生じて、100m 間隔の水平格子を 1 時間増分内に飛び越すことがないように配慮した。

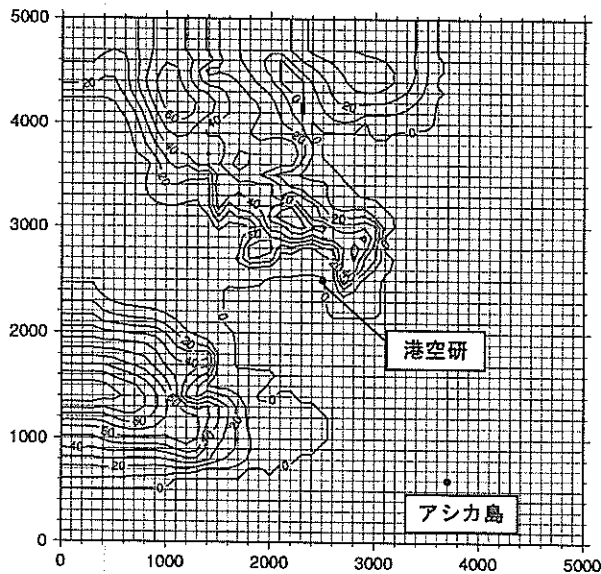


図-7 広領域風況シミュレーション数値メッシュ

表-2 広領域風況シミュレーションの条件設定

	設定値
計算領域	5X5X1km(東西X南北X鉛直方向)
格子間隔	100X100X10(1層目)m
格子数	50X50X20=50000
粗度長	国土数値情報をもとに設定
風向	16方位
風速	7.0m/s(高度14.5m) 鉛直分布は1/7乗則に従う
時間増分	0.5s

底部における粗度係数としては、国土地理院による国土数値情報をもとに、それぞれの土地利用形態に応じて設定した。具体的には、海表面は 0.0001m、海浜は 0.0003m、田畑は 0.1m、森林は 0.3m、建物用地は 1.0m、というように設定した。

(3) 狭領域風況シミュレーション

狭領域風況シミュレーション数値メッシュを図-8 に、狭領域風況シミュレーションの条件設定を表-3 に、それぞれ示す。狭領域風況シミュレーションでは、数値モデ

ル自体は広領域風況シミュレーションと同様であるが、水平・鉛直格子間隔を細かくし、時間増分は 0.05s 間隔に設定した。狭領域風況シミュレーションでは、格子間隔を小さく設定したため、建築物等の影響をある程度再現することが可能である。大型実験施設等の建築物では、最低鉛直格子間隔 (1.2m) よりも大きな鉛直壁面が存在するため、底面 (海水面および地盤面) を鉛直座標基準とすると計算の発散が生じてしまう。このため、狭領域風況シミュレーションでは、平均海水面を鉛直基準面 (Z=0) に設定した。このため、陸上部では、両領域の計算結果の鉛直高さの座標系が異なったものとならざるを得なかった。鉛直方向の格子は、海面高度 0 m, 1.2m, 2.4m, 3.6m, 4.8m, 6.8m, 9.3m, 11.8m, 13.8m, 15.0 m, 16.2m, 19.5m, 25m, 32m, 39m, 48m, 57m, 67m, 77m, 88m および 100m の各高度で層分割を行った。

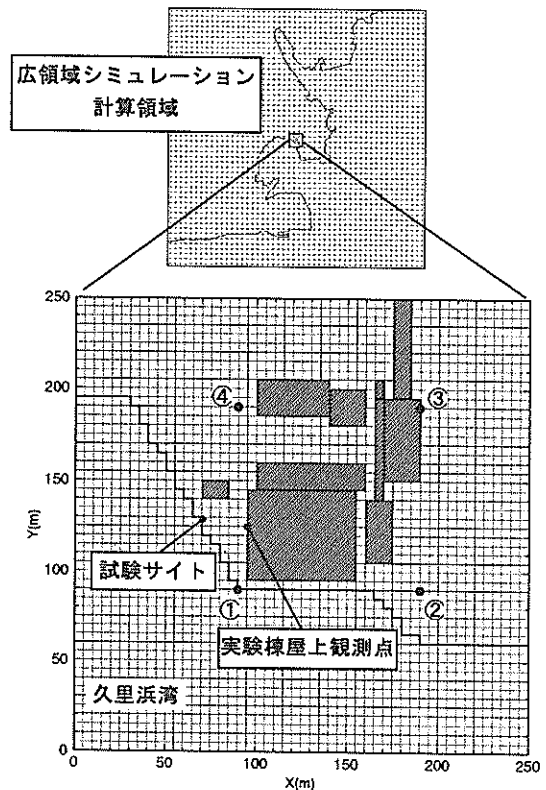


図-8 狭領域風況シミュレーション数値メッシュ

境界における初期条件としての風条件は、広領域風況シミュレーションによって設定したが、ここでは、計算の発散を避けるため、以下のように条件設定を行なった。すなわち、境界面における風向風速の水平分布は一定と仮定し、広領域風況シミュレーションで得られた周辺格子点における高度 10m における風速を平均して与える

こととした。また、鉛直風速分布は、やはり1/7乗のべき乗則を仮定した。

表-3 広領域風況シミュレーションの条件設定

項目	設定値
計算領域	250X250X100m(東西X南北X鉛直方向)
格子間隔	5X5X1.2(1層目)m
格子数	50X50X20=50000
粗度長	海面：0.0001m 建物：0.005m
風向	16方位
風速	広領域の結果をネスティング
時間増分	0.05s

図-9 は、こうした2段階の数値計算の結果得られた、アシカ島と試験サイトとの16方位別風速比を比較したものである。図中の破線は、通年の観測結果から求められたアシカ島における風速と同時刻に観測されたサイトにおける風速の比を、アシカ島で観測された方位別に示したものであり、図中の実線は、2領域の数値風況シミュレーションの結果求められた、アシカ島に対応する数値格子点とサイトに対応する数値格子点との計算風速の比を、やはり、アシカ島に対応する数値格子点における風方位別に示したものである。

実線と破線は、概ね良好な一致を示していることから、2段階格子によって局所的な風況変化特性を風況シミュレーションによって、空間的に大きな変動を示す沿岸域の風況を詳細に再現することが可能であることが明らかになった。なお、図-9では、アシカ島からサイトにかけての風向の変化については考慮していないが、これは、風力発電においては、風車は自在に向きを変えるため風向はあまり重要ではなく、発電量につながる風速がより重要であると考えたためである。

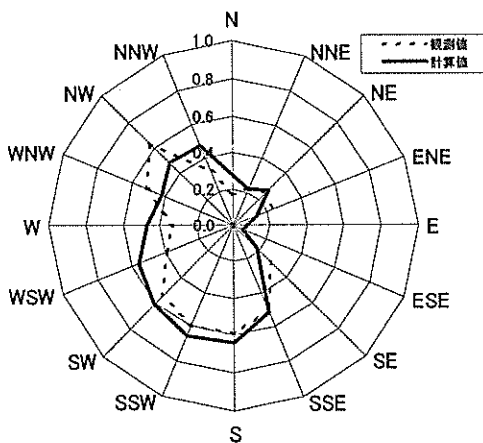


図-9 風速比の観測値と実測値の比較
(試験サイト/アシカ島)

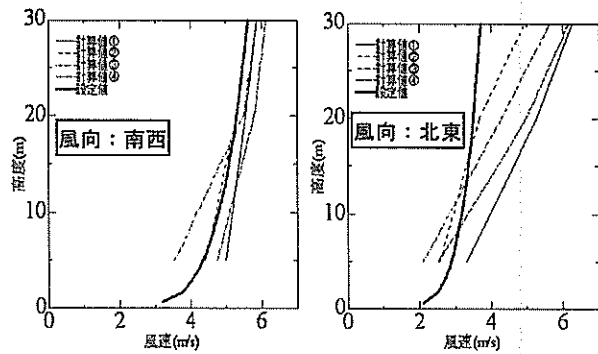


図-10 領域接続部分における鉛直風速分布

図-10 は、広狭の両領域接続部分における鉛直風速分布を示したものである。

本狭領域風況シミュレーションでは、広領域風況シミュレーションの結果得られた境界面上の代表高さ(海面上10m)における平均風速が鉛直方向には1/7べき乗則によって分布していると仮定し、一様な境界条件を仮定した。

しかしながら、建築物の影響が強い風向に関してはこの仮定は必ずしも妥当でないことを図-10は示している。すなわち、図-10中に示される①～④は、図-8中に示した①～④の各点に対応しており、広領域風況シミュレーションで得られた計算結果を表示したものである。

海側からの風である南西風に対しては、ここで用いた境界における風入力条件の鉛直分布は概ね広領域風況シミュレーションで得られた計算結果と一致している(図-10左)。しかし、背後の山を越えて来襲する陸側からの風である北東風に対しては、風入力条件の鉛直分布は広領域シミュレーションとはかなり異なったものとなっている(図-10右)。境界条件のより合理的な設定は、今後の数値風況シミュレーションモデルの改良にあたって、重要な検討課題であると考えられる。図-9で述べた実測値と計算値の相違を、より一層小さなものにできる可能性が残されていると思われる。

(4) 護岸沿いの風速分布

図-11上は、広・狭領域風況シミュレーションで得られた、沖合のアシカ島風観測点における風速との比としてとりまとめた、護岸沿いの方向別風速比の分布を、やはり16方位別に示したものである。No.1からNo.21は護岸沿いの位置を意味しており、図-11下に示す位置にそれぞれ対応している。ここでも、図-9と同様に、風力発電量は風速によって決まり風向はあまり重要ではないことから、アシカ島からサイトにかけての風向変化は考慮していない。

沿岸風力照明システムは、単体で導入されることは稀であり、通常は護岸沿いに複数を並べて配置されるものと考えられる。このため、沿岸風力照明システムの試設計として、図-11 下に示すように、護岸沿いに約5m間隔で21基の照明柱を配置することを想定し、次章の点灯稼働シミュレーションを実施することとした。

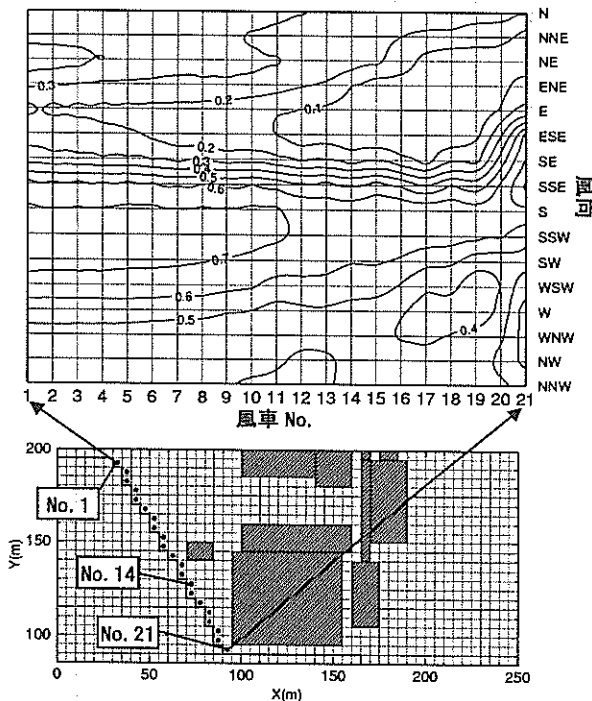


図-11 護岸沿いの方向別風速比(護岸/アシカ島)

2.5 風況の時空間変動を考慮した点灯稼働シミュレーション

(1) 点灯稼働シミュレーションの目的

図-11 下の No.14 の位置に、単体として、図-3 に示すパワーカーブを有する小型風車と、満充電容量 1200Wh の蓄電池とを設置して、システムを既存のコントローラ制御システムを用いて実証試験運用した結果が、図-4 に示すように点灯稼働率約 80% (日没後点灯した日が全体の約 80%であり、20%は不点灯であったこと)であった。稼働率 80%というのは、一般的には、必ずしも十分な稼働率とは言いがたい。平均的に 5 日に 1 日程度の割合で、設置された照明システムが点灯していないというのでは、にぎわいのある港湾域の沿岸空間の演出には不十分であると考えられる。システム稼働率をより高いものにしていかなければならないであろう。他方、実用化されるシステムには、常に経済性が求められる。たとえ 100% の点灯稼働率を得られるにしても、発電風車や蓄電池の大

型化や増設は、コストを高めることになってしまうので、必要最小限に抑制しなければならない。

したがって、点灯稼働率(照明システムの信頼性)を高めるためには、以下のような、さまざまな工夫が必要であると考えられる。

- ① 発電蓄電コントロールシステムの合理的設定
- ② システム全体での発電風車の集中化と最適配置
- ③ システム全体での蓄電池の共有化
- ④ 点灯稼働率を考慮した蓄電池容量の合理的設定

言葉を変えれば、こうしたさまざまな工夫による効果を、例えば点灯稼働率という表記によって定量的に示すことができれば、これまでは経験的に行われていた沿岸風力照明システムに代表される分散型風力エネルギー活用システムを、定量的に合理的に計画・設計することが、可能になる。風況の時空間変動を考慮した点灯稼働シミュレーションは、このような目的をもって開発されたものである。

(2) 検討フロー

図-12 は、点灯稼働シミュレーションの検討フローを示したものである。ここでは、久里浜湾沿岸の代表的な風観測点としては、長期間の継続的な観測がなされているアシカ島観測所のデータを用いることとした。

アシカ島では、2 時間毎に 10 分間の風観測がなされ、その平均風速と風向が記録されている。1998 年から 2003 年までの 6 年間は比較的安定したデータが測得されているため、点灯稼働シミュレーション対象期間はこの 6 年間に設定した。すなわち、2 時間のうちの残りの 110 分間の風況は、観測が行われた 10 分間と同じ状態が続いたと仮定した。

次に、図-11 下で示した護岸沿い検討対象 21 地点それぞれについて、図-11 上で示す 16 方位別のアシカ島との間の風速比を乗じて、2 時間毎 6 年間の風速時系列変化を求めた。計算は風向に関しても実施したものの、風車は自動的に風向を向くように回転制御されるので、2 時間以上の長時間スケールの風向変動は発電量にほとんど影響しないので、発電量試算上は考慮しなくてもよい。

そして、各地点毎に得られた 2 時間毎の風速に対して、図-3 で示したパワーカーブを乗ずることによって、2 時間毎の発電量を得ることができる。

さらには、こうして発電された電力は、蓄電池メーカー資料に基づき 80% の効率を仮定し、図-5 のような電圧・蓄電容量特性を有する蓄電池(蓄電池)に蓄電されると考え、他方、蓄電池(蓄電池)からは、常時、0.2W のコントローラ制御用電力が消費されるとともに、毎日の日没時において、3.3 で述べた制御がなされた上で、点灯条

件が満たされた場合には 12W の照明用電力消費が 6 時間行われる (ただし途中で蓄電池電圧が、50%蓄電容量に対応する 11.5V 以下になった場合は、消灯する) と仮定した。

このように点灯稼働シミュレーションすれば、実証試験が行われた No.14 の地点ばかりでなく、護岸沿いの No.1 から No.21 までのすべての検討対象地点の、点灯不点灯状況を、各々の点で観測することなく 6 年間のうちの任意期間について示すことができるわけである。

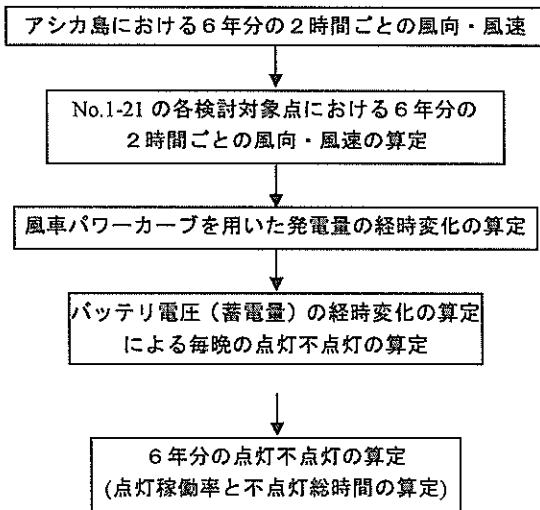


図-12 照明柱点灯シミュレーションのフロー

(3) 実証試験結果の再現

前項(2)で述べた手法で、No.1 から No.21 までのすべての検討対象地点について、それぞれ、点灯稼働シミュレーションを行った。

図-13 は、この点灯稼働シミュレーション結果のうち実証試験が行われた No.14 地点を対象とし、2003 年 1 月から 2003 年 7 月にかけての実証試験期間中の点灯不点灯実績と点灯稼働シミュレーション結果とを比較したものである。蓄電池電圧が比較的低位限界値 11.5V に近い場合や、強風によって急に電圧が上昇した際には、判定には若干の差があったが、期間中の点灯稼働率は、実証試験では 76.3%であったのに対して、点灯稼働シミュレーションでは 79.6%であり、極めて近い値となった。すなわち、本点灯稼働シミュレーションは、高い信頼性をもって、システムの点灯不点灯状況を再現できることが示された。

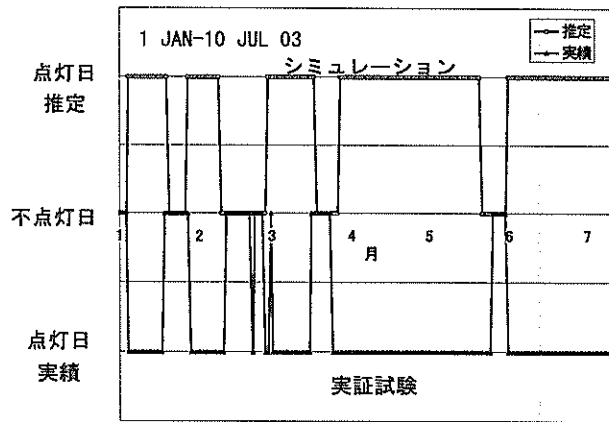


図-13 風車 No. 14 における点灯シミュレーションと実績との比較

(4) 風車・蓄電池独立型照明支柱群システムの検討

再点灯条件の緩和が点灯稼働率向上に寄与すると考えられるので、蓄電池保護と両立する合理的な再点灯条件設定が望まれる。こうしたコントローラ制御の条件として、a)実証試験で用いられた条件および b)測定電圧が満充電 (1200Wh) に対応する電圧 (13.2V) 以上を検出するまでは点灯させないという再点灯条件を除き 50%充電に対応する電圧 (11.5V) 以上であれば点灯させるという条件、の 2 ケースを想定し、護岸沿い 21 地点について、それぞれ点灯稼働シミュレーションを実施した結果を図-14 に示す。横軸の番号は、No.1 から No.21 までの各地点を意味している。それぞれの地点に独立して、図-3 のパワーカーブを有する風車を設置したと仮定した。なお、ここでは、風車相互の影響 (上流側風車によって下流側風車に伝わる風況が変化する影響) は無視した。

図-14 には、実証試験結果との対比を明確にするため、右側に実証試験結果 (exp) および実証試験が実施された No.14 地点の点灯予測結果 (14) をあわせて示している。

地点毎の点灯稼働率は、図-11 上で示した風速比の大小によく対応している。すなわち、No.1 から南側の No.19 にむかって、建物の影響を受けて S から W にかけての海側から吹く風、および N から E にかけての山側 (建物背後) から吹く風に対して、ともに風速比と点灯稼働率が減少している。ただし、No.21 では、No.19 に比べて、S E および NW 方向の風に対する建物の遮蔽効果が小さくなるため、若干高めの風速比と点灯稼働率が得られた。同じ構造の風力照明支柱であっても、局所的な設置位置の違いによって、点灯稼働率は大きく変化しており、実証試験時のコントロールシステムについて見れば、最大

値を示した No.1.では 96%と想定されるのに対して、最小値を示した No.19.では 68%と想定されている。実証試験時における制御条件では地点平均点灯稼働率が 85.8%であったが、著者らが提案するように半充電に対応する電圧 (11.5V) 以上であれば常に点灯させるように変更すれば、91.2%に地点平均点灯稼働率が向上している。この相違は、不点灯率で表現すれば、14.2%が 8.8%まで減少するということになるので、実用上、極めて大きな相違である。

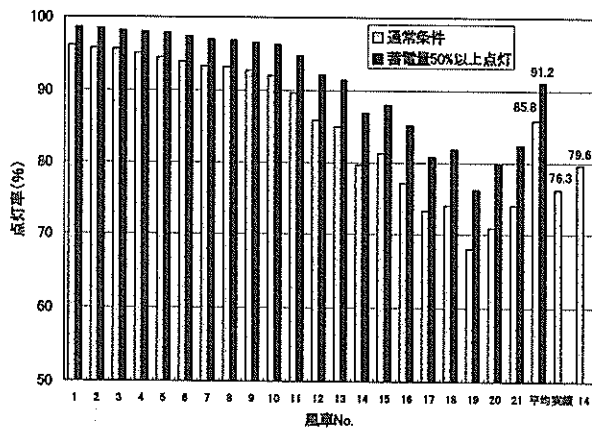


図-14 蓄電池制御条件の相違による点灯稼働率変化 (“実績”は、2002年11月～2003年7月の実証試験における点灯率を表す。)

(5) 風車・蓄電池集中型照明支柱群システムの検討

一般に、風車発電システムや蓄電池は、同じ容量を確保するのであれば、集中化を行うことによって、価格の低減化をはかることができる。このため、21基の照明支柱システムを構築することを想定すれば、もっとも風況の良好なポイントに大容量の風車発電システムを1式設置し、また、蓄電池も、それぞれの照明支柱に分散させるのではなく、集中・大容量化させることが望ましい。このような集中化の観点から、試設計を実施した。

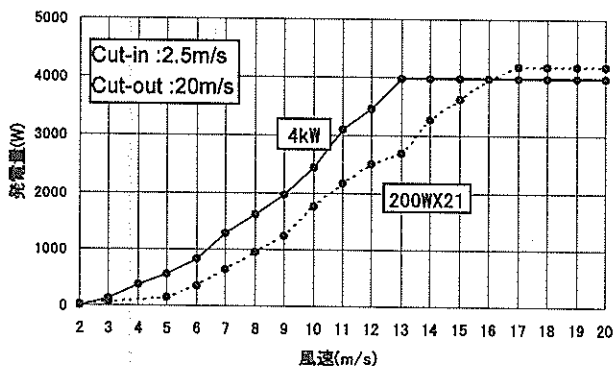


図-15 設置を仮定した4kW級風車のパワーカーブ

図-15は、ここで検討対象とした4kW風車想定の方車発電システムのパワーカーブである。図中には、21基の照明支柱を想定し図-3に示す200W風車のパワーカーブを21倍したものを、あわせて表示している。ここで想定した4kW風車は、実証試験で用いた小型風車システムを21倍したものよりもかなり大きい発電量が得られるものであるが、現在、2kW程度の市販風車がありませんことを考え、実用化しやすいものとして想定した。しかも、価格面では、実証試験で採用した200W風車21式よりも、4kW風車発電システム1式は、はるかに安価なシステムとなるので、実用上は有望な構想である。この4kW風車は風車直径が4.4m(受風面積約15m²)なので、風車軸の地盤上の高さは10mと想定した。

図-16は、地上高10m(狭領域風況シミュレーションでは海面高12.4m)における、点灯稼働シミュレーション対象期間6年間の平均風速分布を表示したものである。最も平均風速の大きなNo.1.地点と、実証試験が行われたNo.14.とを比較すると、平均風速が、それぞれ、3.8mと3.5mというように大きな相違があることがわかる。

図-17は、横軸に集中型蓄電池容量を、縦軸に点灯稼働率を、それぞれ示し、両者の関係を見たものである。2種の棒グラフは、それぞれ、集中型風車を、No.1.とNo.14.の地点に設置した場合を想定している。なお、縦軸のスケールを図-14と同じにしたため表示できなかったが、横軸がゼロの場合(蓄電がない場合、すなわち、照明に必要な(12+0.2)W*21基=256.2W以上の発電がなされる風速3.5m/s以上の出現率に一致)の値は、No.1.で36.7%、No.14.で30.5%であった。ただし、図-17では、コントロールシステムの制御方法は、著者らが提唱する、半充電に対応する電圧以上であれば常に点灯させる方式を仮定している。

図-17を図-14と比較すると、集中型は独立型に比べて、点灯稼働率がきわめて良好であり、別の言い方をすれば、同じ点灯稼働率を得るためには、はるかに容量の小さい蓄電池でシステムを経済的に維持できることを示している。

例えば、図-14のNo.14.地点で得られた約87%の点灯稼働率を得るためには、図-17の同じ地点(No.14.)では、蓄電池容量は6kWh程度でよい。実証試験では、図-5に示したように満充電容量1.2kWhの蓄電池を採用したことを考えると、同じ点灯稼働率を得るために、照明支柱台数の21倍ではなく、その約1/4の5倍程度の蓄電池があればよいことになる。風車発電システムの大型化・集中化によって、全体系の蓄電池容量の大幅な軽減化をはかることができると、結論付けられる。

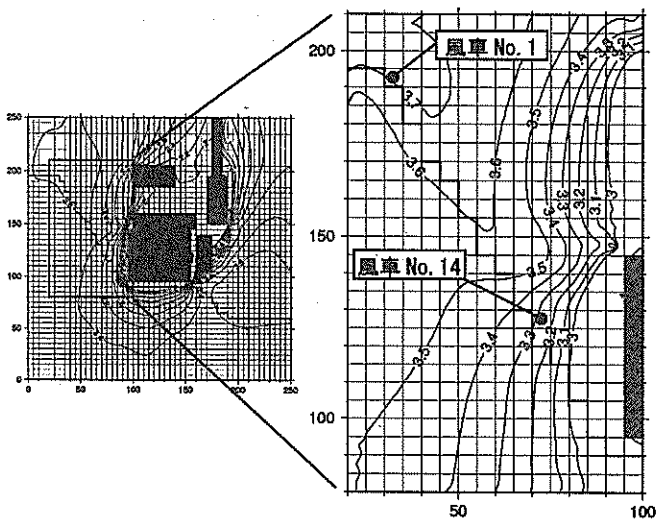


図-16 地上高 10m における平均風速分布推定値

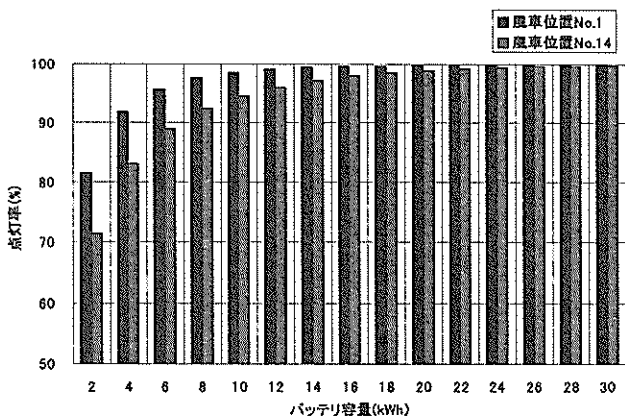


図-17 点灯シミュレーションによるバッテリー容量と点灯稼働率との関係

2.6 富山県新湊における追加実証試験

港湾空港技術研究所構内における実証試験の検討結果を、さらに確認する目的で、実験サイトを変え、富山県新湊市の沿岸部で追加実証試験を行なった。

図-18 は、実証試験サイトを示したものである。伏木富山港新湊港区海竜マリンパーク内の緑地上に、図の右下の写真に示す試験システムを設置した。なお、この試験システムは、港湾空港技術研究所で用いたシステムをそのまま移設したものであり、試験期間は、2003年8月から2004年8月までの約1年間であった。建物の遮蔽効果を強く受けた港湾空港技術研究所構内のサイトとは異なり、建物等による風の遮蔽がほとんどないサイトであったため、風況は比較的良好であり、96.5%という、きわめて高い点灯稼働率を得ることができた。ただし、ここでは、コントローラの制御は、半充電に対応する電圧(11.5V)以上であれば常に点灯させるように設定した。

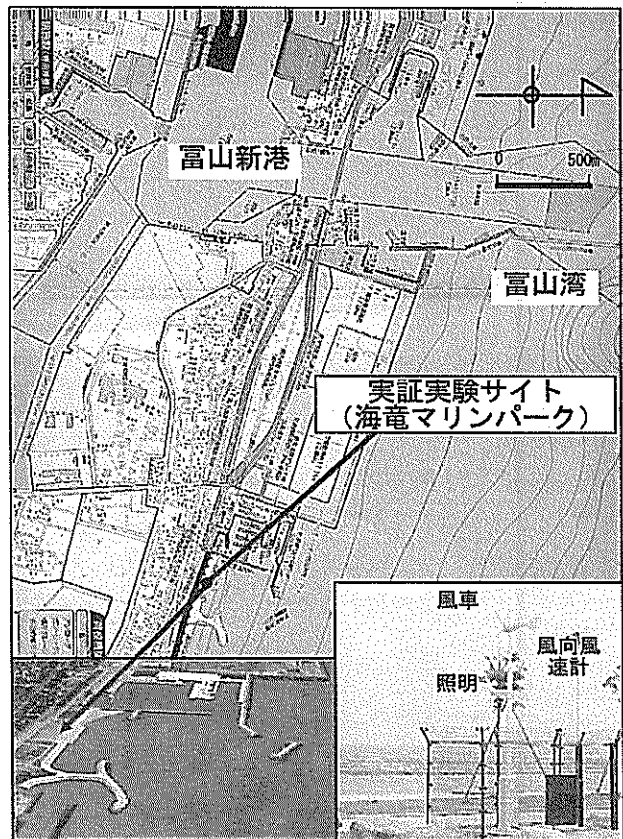


図-18 新湊実証実験観測サイト

図-19 は、点灯シミュレーションと実証試験結果とを比較したものである。ただし、シミュレーションの入力条件としての風況は、サイトで実測された値をそのまま用いた。実証試験では96.5%という点灯率が得られたのに対して、シミュレーションでも98.6%という値が得られ、両者が概ね一致していることが確認された。

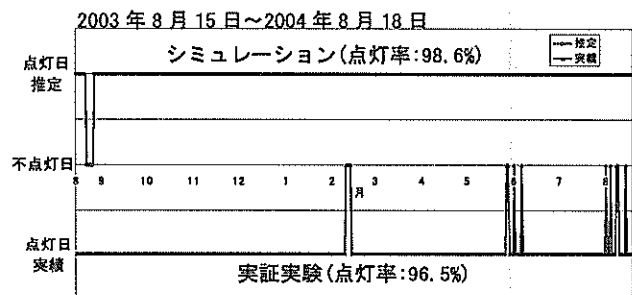


図-19 新湊における実証実験と点灯シミュレーションとの比較

ただし、シミュレーションの前提となるパワーカーブは、図-3で示す実際の試験結果に近い $A=0.25$ の値を仮定した。図-3中に太い破線で示す風洞実験値(風車メーカーカタログ値)を用いて試しに同様なシミュレーション

したところ、点灯率は84.1%となり、試験結果を反映できるものとはならなかった。点灯シミュレーションにあたっては、適切なパワーカーブを与えることが重要であることが、確認された事例であった。

2.7 まとめ

- ① 久里浜港周辺の風況特性を調査した結果、周辺地形の影響を受けて沿岸域の風況は局所的に大きく変動していることが示された。
- ② 風力照明支柱における風速・発電量・蓄電池電圧の経時変化を検討した。数日に一回の風力発電による蓄電を徐々に使って点灯させるため、できるだけ蓄電容量をおさえた安価なシステムとするためには、最適な蓄電容量と風力発電出力および設置位置を、風況推定値をもとに設計することが必要である。
- ③ 広狭両領域の2段階の風況シミュレーションを行い、観測値と比較することによって風況シミュレーションの検証を行った。広狭の両境界領域における合理的な境界条件の入力については課題が残されたものの、面的な風況変化を明らかにすることができた。
- ④ アシカ島における6年間の風況時間変動記録をもとに、風況シミュレーションで明らかにされた久里浜湾岸の16方位別風速比と、実証試験によって明らかにされたシステムの発電・蓄電特性をもとに点灯稼働状況を再現する点灯稼働シミュレーションを実施した。この結果、久里浜湾護岸沿いの具体的な事例で、風車発電システムおよび蓄電池の集中化、および点灯制御システムの合理化によって、システム全体の点灯稼働率を、大きく向上させることができることを、定量的に示すことができた。

3. コンセントレータを用いた風車の発電性能向上

3.1 はじめに

風車性能の向上を目指し、これまでに様々な出力増強法が提案されてきた。これらの代表的なものとして、ダクトドロータに関する研究が行われてきた。しかしながら、その研究の多くはディフューザの効果に着目したものであり、¹⁰⁾ コンセントレータ(ノズル)に関する研究例は少ない。

本稿では、コンセントレータ方式出力増強法の効果を明らかにすべく研究を行い、従来コンセントレータ内部に位置していた風車を、コンセントレータ後方に一定距離離して設置し、かつその直径をコンセントレータ出口径よりも大きくしたときに最も大きな出力増強効果が得

られるという興味深い結果を得たので、報告する。

3.2 記号

- d : 風車ロータ直径[m]
- D : コンセントレータ入口側直径[m]
- D_o : コンセントレータ出口側直径[m]
- A_d : 風車ロータ受風面積[m²] = π d²/4
- A_D : コンセントレータ受風面積[m²] = π D²/4
- ρ : 空気密度[kg/m³]
- n : 風車回転数[rpm]
- V : 基準風速[m/s]
- Z : コンセントレータ出口～風車間距離[m]
- R : コンセントレータ出口～半径方向距離[m]
- Q : 風車トルク[N・m]
- P : 風車パワー[W]
- C_p : パワー係数(風車ロータ受風面積基準) [-]
= P / {(1/2) ρ A_d V³}
- C_{p-D} : パワー係数(コンセントレータ入口面積基準) [-]
= P / {(1/2) ρ A_D V³}
- λ : 風車周速比(風車ロータ径基準) [-]
= π d n / 60V
- λ_D : 風車周速比(コンセントレータ入口径基準) [-]
= π D n / 60V

3.3 供試風車およびコンセントレータ

(1) 供試風車

本研究では、翼素運動量複合理論に基づき設計した、直径d=500(mm)の2枚翼プロペラ形風車を供試風車として用いた。

予備実験の段階では、設計周速比3, 4, 5の3種類の風車について実験を行ったが、ソリディティの違いによる出力増強効果に大きな違いが生じなかったため、以後の実験は設計周速比4, C_{pmax}=35%のものを用いることとした。

(2) コンセントレータ

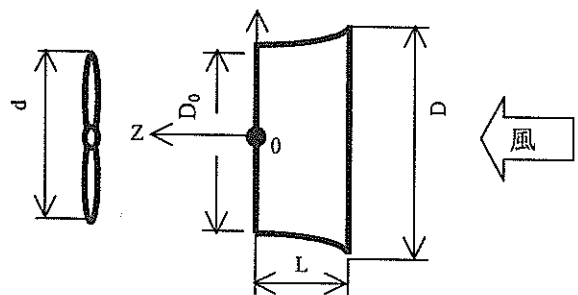


図-20 コンセントレータおよび座標系

本研究では、ロータ直径一定の下で、円筒形コンセントレータの形状パラメータおよびその位置を変化させて風洞実験を行ない、風車性能に与える影響を評価した。

図-20 にコンセントレータの配置図を、表-4 に実験で変化したコンセントレータの形状パラメータを示す。

表-4 コンセントレータの形状パラメータ

形状パラメータ	変更範囲
入口側直径 D (mm)	680~880
出口側直径 D_0 (mm)	400~600
長さ L (mm)	65~250
形状	ベルマウス形, テーパー形
風車との距離 Z (mm)	-50~200

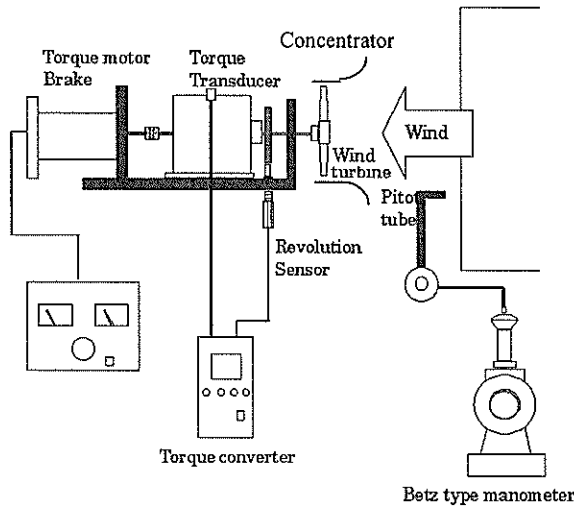


図-21 実験装置概略図

3.4 実験装置および方法

実験は、足利工大風洞（開放型吹き出し形：開口部 $\square 1.05\text{m} \times 1.05\text{m}$ ）で行った。設定風速 8m/s において、風洞内に保持した供試風車に無負荷からブレーキモータにより徐々に負荷を加えていき、各風車回転数におけるトルク値を、回転計およびトルク変換器で計測した。実験装置の概略図を図-21 に示す。

3.5 実験結果および方法

(1) 距離 Z の影響

図-22(a) に示すコンセントレータ ($D=680\text{mm}$, $D_0=550\text{mm}$) と風車間の距離 Z を、 -50mm から $+200\text{mm}$ の間で変化させ、風車性能曲線を比較した。その結果を図-23 に示す。

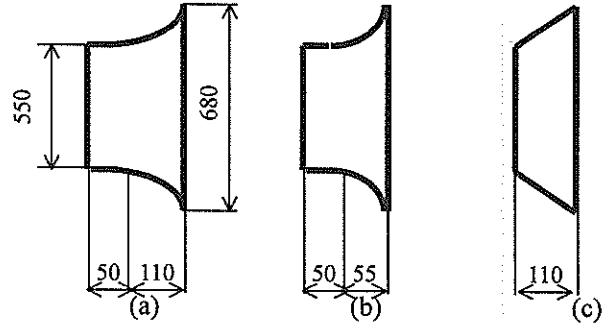


図-22 供試コンセントレータ (その1)

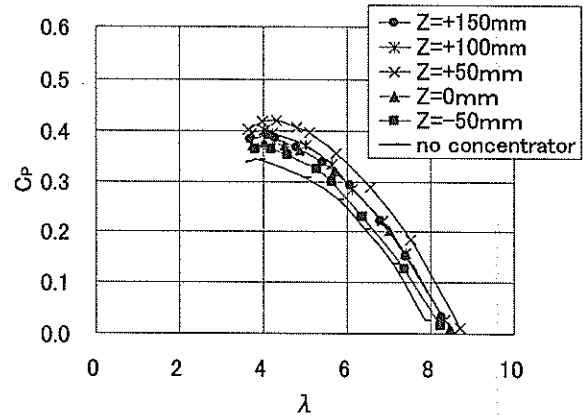


図-23 風車性能曲線 (図-22(a) コンセントレータ)

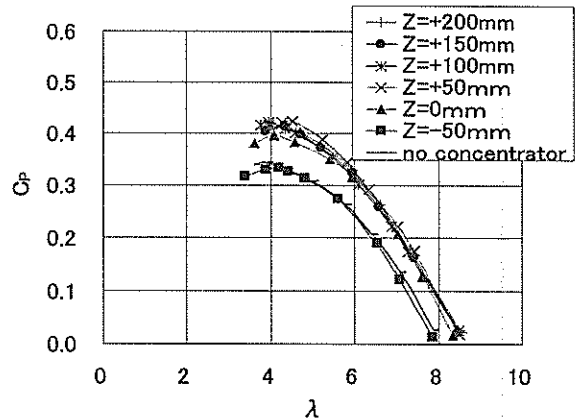


図-24 風車性能曲線 (図-22(b) コンセントレータ)

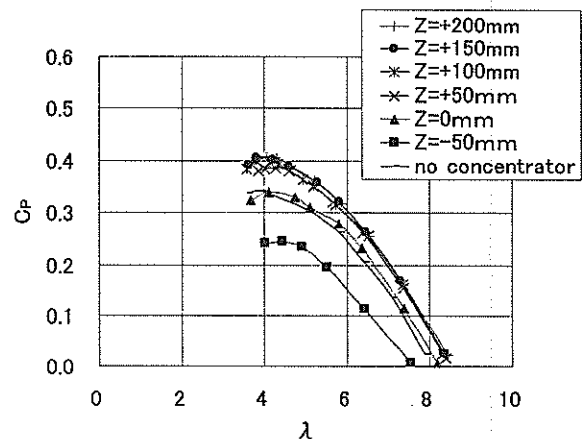


図-25 風車性能曲線 (図-22(c) コンセントレータ)

この図から、風車をコンセントレータ内に設置する場合に比べ、コンセントレータ後方に設置した方が出力増強効果が大きく、 $Z=+50\text{mm}$ で $C_{p\text{max}}=42\%$ が得られることがわかった。

(2) コンセントレータ形状の影響

図-22(a)のコンセントレータと、そのベルマウス部分を短くしたもの(図-22(b))、直管部を削除し形状をテーパー状にしたもの(図-22(c))を用いた際の出力増強効果を比較した。結果を図-24および図-25に示す。

どのコンセントレータを用いても、 $Z=50\sim 150\text{mm}$ において $C_{p\text{max}}=42\%$ が得られた。これらのことから、風車をコンセントレータ後方に設置した場合 ($Z>0$) には、コンセントレータ形状は性能に大きな影響を与えないことが判明した。一方、風車をコンセントレータ内に設置した場合 ($Z\leq 0$) には、コンセントレータ形状によって性能が大きく変化することがわかった。

(3) 入口側直径 D の影響

風車とコンセントレータ間距離を $+50\text{mm}$ に固定し、コンセントレータ入口側直径を 680mm から 880mm の間に変更し、風車性能曲線を比較した。実験に用いたコンセントレータの寸法を図-26に、その結果を図-27(a)に示す。

図-27(a)から、入口側直径が大きいほど出力増強効果が大きく、 $D=880\text{mm}$ で $C_{p\text{max}}=57\%$ が得られることがわかった。

この結果を、コンセントレータ入口側直径 D を基準に取ったパワー係数 $C_{p,D}$ 、周速比 λ_D を用いて整理し直したものを図-27(b)に示す。

この図から、 $C_{p,D}$ は C_p とは逆に、入口側直径 D が大きいほど低下することがわかる。即ち、入口側直径が大きいコンセントレータを設置する場合、風車出力性能は向上するものの、コンセントレータを含めたシステム全体での出力性能が低下することを意味する。

一方、 λ_D は D が大きいほど増加している。このことは次のように言い換えることができる。

- ・ コンセントレータ入口側直径と同じ大きさの風車ロータを用いて発電することを考えると、コンセントレータを用いた場合、発電機の定格回転数を高くすることができる。
- ・ あるいはコンセントレータを用いた場合、風車ロータのソリディティーを大きくとることができる。

これらは、コンセントレータ使用の際の利点となると考えられる。

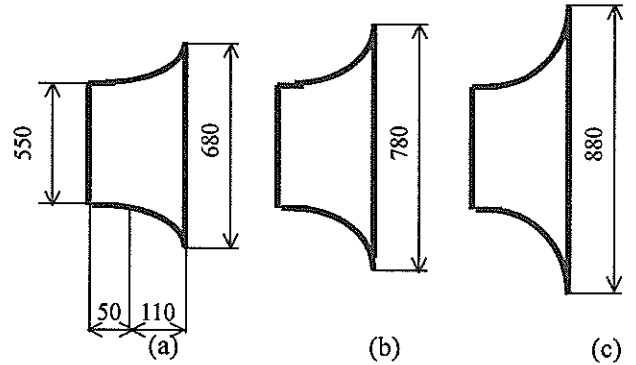
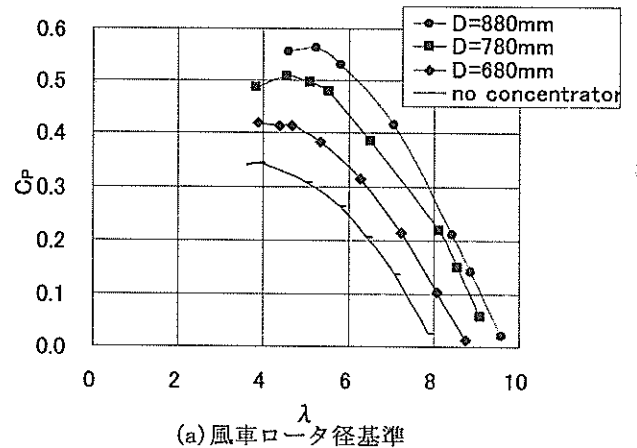
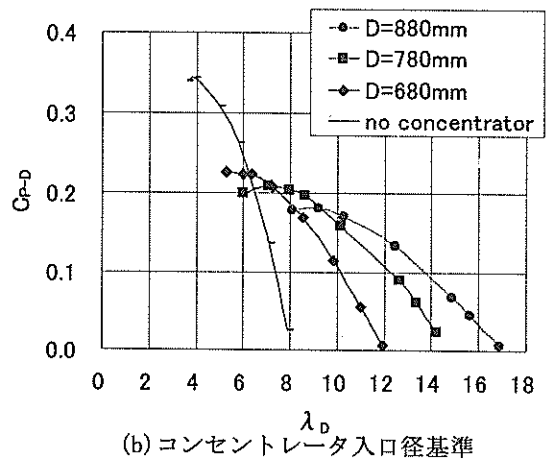


図-26 供試コンセントレータ (その2)



(a) 風車ロータ径基準



(b) コンセントレータ入口径基準

図-27 風車性能曲線 (入口径の影響)

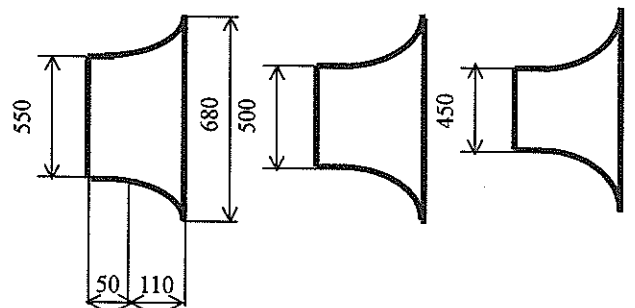
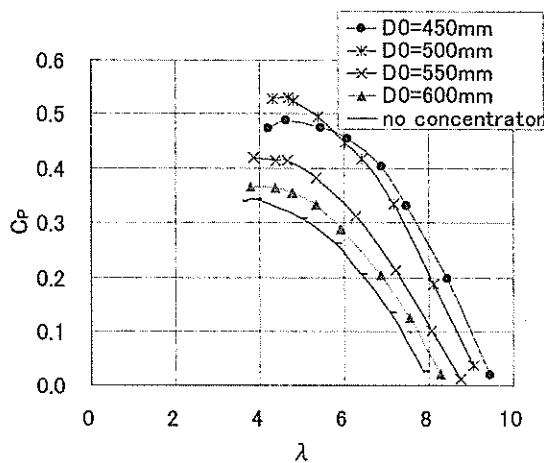
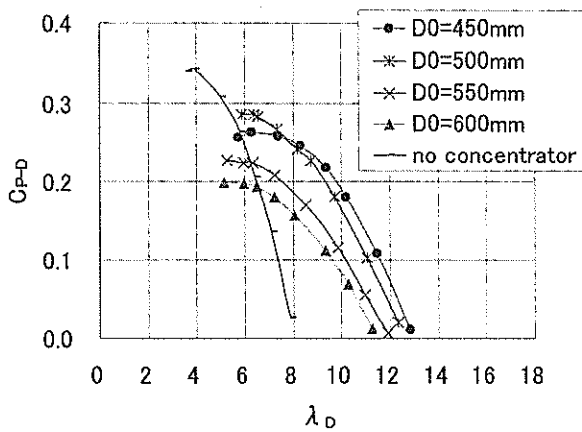


図-28 供試コンセントレータ (その3)



(a) 風車ロータ径基準



(b) コンセントレータ入口径基準

図-29 風車性能曲線 (出口径の影響)

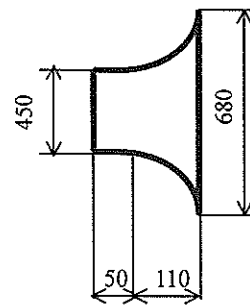
(4) 出口側直径 D_0 の影響

風車とコンセントレータ間距離を +50mm に固定し、コンセントレータ出口側直径を 450mm から 550mm の間で変更し、風車性能曲線を比較した。実験に用いたコンセントレータの寸法を図-28 に、その結果を図-29(a) に示す。

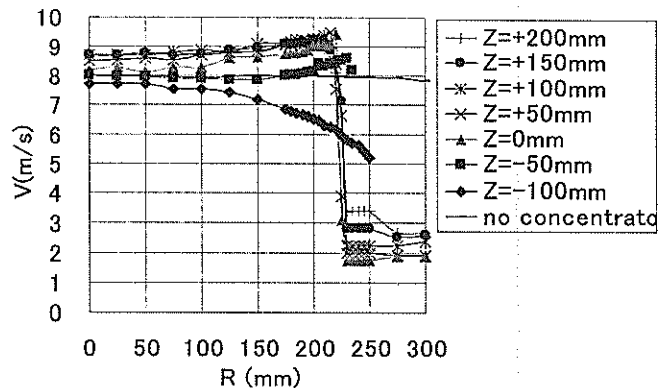
この図から、出口側直径が小さいほど出力増強効果が大きく、風車ロータ径 500mm と同じ $D_0=500$ mm において $C_{pmax}=52\%$ が得られることがわかった。

この結果を、コンセントレータ入口側直径 D を基準に取ったパワー係数 C_{p-D} 、周速比 λ_D を用いて整理し直したものを図-29(b) に示す。

この図から、コンセントレータ出口側直径 D_0 を小さくすることにより、システム全体におけるパワー係数 C_{p-D} の低下を抑えることができることが判明した。



(a) 供試コンセントレータ (その4)



(b) コンセントレータまわり風速分布

図-30 風車性能曲線および風速分布

(5) コンセントレータまわりの風速分布

コンセントレータによる風車出力増強のメカニズムを調べるため、コンセントレータまわりの風速分布の測定実験を行なった。

実験には、風車出力増強効果が大きかった図-30(a) に示すコンセントレータを用いた。

このコンセントレータは、風車直径より出口側直径の方が小さいが、 $C_{pmax}=55\%$ 、 $C_{p-D max}=30\%$ の高い値が得られた。

その風速分布測定結果を図-30(b) に示す。この図から、出力増強効果が大きかった $Z=50\sim 150$ mm において、風速が増大していることが判明した。また、この風速増大は、 $R=150\sim 225$ mm の領域において最も顕著であるが、この領域は、半径 250mm (直径 $d=500$ mm) の風車ロータの最も性能に寄与するとされる 60~90% 区間に相当する。これらのことから、高い出力増強効果が得られたものと推察される。

3.6 まとめ

コンセントレータによる風車出力増強の効果を明らかにすべく風洞実験を行った結果、以下の場合に特に大きな出力増強効果が得られることが判明した。

- ① コンセントレータ出口後方に風車ロータを配置した場合
- ② コンセントレータ出口径を風車直径以下にした場合
- ③ コンセントレータ入口径が、風車直径に比べ十分大きい場合

4. 照明柱に作用する越波による波力の評価

4.1 はじめに

沿岸風力照明システムを防波堤や護岸上に設置する場合、高波浪時においては、照明柱に越波による波力が作用する。したがって、照明システムの設計においては、風荷重に対する安定性だけでなく、越波による波力に対する安定性についても検討する必要がある。照明システムに作用する波力については、親水性防波堤における上部構造物に作用する波力算定法^{11) 12)}を適用することができる。

本章では、照明システムに作用する波力の計算法の概要を説明するとともに、具体的な設計条件に基づいた耐波安定性の試算の結果を紹介する。

4.2 防波堤や護岸上部の構造物に作用する越波による波力の計算法

(1) 基本的考え方

高橋ら¹¹⁾ および菅原ら¹²⁾は、越波現象を「打ち込み時」と「越流時」に分けて考え、越波時における防波堤天端上の水位や流速、上部構造物に作用する波力を算定する式を提案している。水位と流速についてはその最大値を計算するものであり、波力も堤体全体との位相差を考慮せず、各部材に作用する最大値を計算するものである。対象とした上部構造物は、水平天端面と階段を含む緩傾斜斜面、直立壁、比較的細い柱状部材であり、本風力照明システムについては、柱状部材の計算法が適用可能である。

ここでは、まずその計算法の概要について説明する。図-31(a)は、越波時の水位、流速、波力を求める際の計算の流れを示したものである。初めに、打ち込み時と越流時のパラメータを計算し、目的に応じパラメータを使って、水位や波力などを計算する。たとえば、越流時の水位を求める際には、越流時のパラメータの η_1 および l_1 を計算すればよい。図-31(b)は、計算において使用する各パラメータと入力条件となる主要な記号を説明したものである。

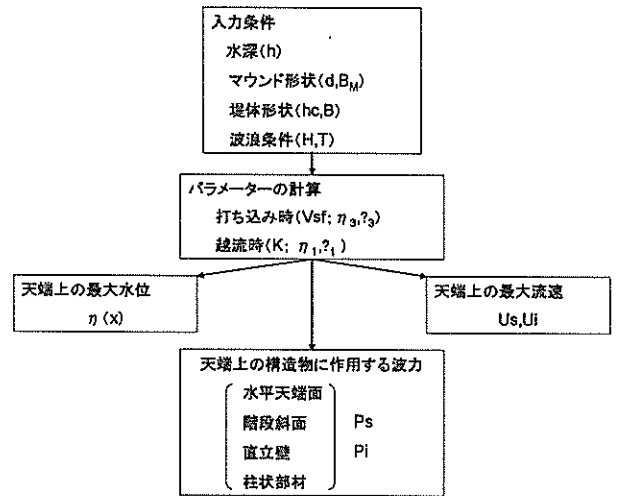


図-31(a) 計算のフロー

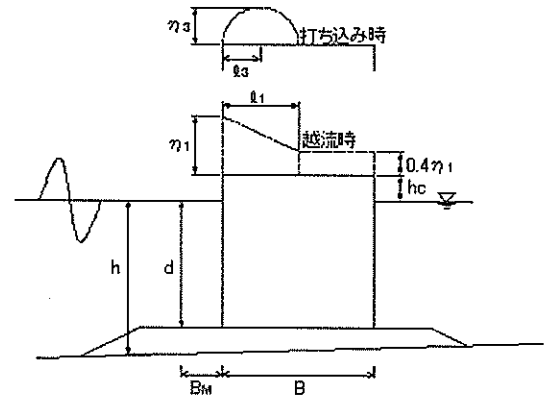


図-31(b) パラメータの主要な記号

(2) 打ち込み時と越流時のパラメータの計算

① 換算水深 h_m の計算

マウンドがある場合には、マウンドの影響を考慮して換算水深 h_m を計算する。

$$h_m = \begin{cases} d & : B_M / L \geq 0.16 \\ d + (h - d) \frac{0.16 - B_M / L}{0.05} & : 0.11 \leq B_M / L < 0.16 \\ h & : B_M / L < 0.11 \end{cases} \quad (1)$$

ここに、 B_M : マウンド肩幅、 h : 堤体前面の水深、 d : マウンド上の水深、 L : 堤体前面水深での波長

② 打ち込み時のパラメータ η_3 と l_3

打ち込み時における越波水先端の最大高さ η_3 および港外側端からの落下距離 l_3 は、波速および港外側端での水面上昇速度 V_{sf} から計算される。

$$V_{sf} = \frac{2\pi\alpha_s H}{T} \sqrt{1 - \beta_s^2} \left\{ 1 + \pi \frac{\beta_s H}{L_m} \cdot \frac{\cosh 2\pi h_m / L_m (2 + \cosh 4\pi h_m / L_m)}{\sinh^3 2\pi h_m / L_m} \right\} \quad (2)$$

$$\beta_1 = \frac{\pi H \cosh 2\pi h_m / L_m (2 + \cosh 4\pi h_m / L_m)}{2L_m \sinh^3 2\pi h_m / L_m} \quad (3)$$

$$\beta_2 = 1 \quad (4)$$

$$\beta_3 = \frac{\pi H \cosh 2\pi h_m / L_m (2 + \cosh 4\pi h_m / L_m)}{4L_m \sinh^3 2\pi h_m / L_m} - \frac{h_c}{H} \quad (5)$$

$$\beta_4 = \frac{-\beta_2 + \sqrt{\beta_2^2 - 4\beta_1\beta_3}}{2\beta_1} \quad (6)$$

$$\alpha_5 = \begin{cases} 1.0 & : H/h_m < 0.4 \\ 1.4 - \frac{H}{h_m} & : H/h_m \geq 0.4 \end{cases} \quad (7)$$

したがって

$$\eta_3 = \frac{V_{sf}^2}{2G} \quad (8)$$

$$l_3 = \frac{0.6\alpha_6 C_m V_{sf}}{g} \quad (9)$$

$$\alpha_6 = \begin{cases} 1.0 & : H/h_m < 0.4 \\ \frac{1}{3} \left(10 \frac{H}{h_m} - 1.0 \right) & : H/h_m \geq 0.4 \end{cases} \quad (10)$$

ここに、 V_{sf} : 波面の鉛直速度、 h_c : 天端高さ、 H : 波高、 T : 周期、 L_m : 換算水深での波長、 α_5 : V_{sf} の補正係数、 C_m : 換算水深での波速、 g : 重力加速度、 α_6 : 越波水先端の水平速度の補正係数

③ 越流時のパラメータ η_1 と l_1

越流時における堤体前面の最大水位 η_1 は、波頂高比 K と波高 H 、天端高さ h_c により計算される。最大水位の減少距離 l_1 は、 η_1 および h_c 、波速 C_m から計算される。

$$K = \begin{cases} 1.0 + \alpha_1 \frac{H}{h_m} & : \frac{H}{h_m} < \frac{-1 + \sqrt{1 + 4\alpha_1 h_c / h_m}}{2\alpha_1} \\ \frac{1 + \sqrt{1 + 4\alpha_1 h_c / h_m}}{2} & : \frac{H}{h_m} \geq \frac{-1 + \sqrt{1 + 4\alpha_1 h_c / h_m}}{2\alpha_1} \end{cases} \quad (11)$$

$$h_c' = \frac{H/h_m}{2 \frac{H}{h_m} - \frac{-1 + \sqrt{1 + 4\alpha_1 h_c / h_m}}{2\alpha_1}} h_c \quad (12)$$

したがって

$$\eta_1 = KH - h_c \quad (13)$$

$$l_1 = C_m \sqrt{\frac{1.2\eta_1^2}{g(\eta_1 + h_c)}} \quad (14)$$

ここに、 α_1 : 防波堤の構造による補正係数であり、直立堤や混成堤の場合 1.0

(3) 防波堤上の水位および流速の計算

天端上の任意点での最大水位 $\eta(x)$ は、 x を天端上における港外側端からの距離とすると、越流時のパラメータ η_1 と l_1 により次式で計算できる。

$$\eta(x) = \begin{cases} \frac{l_1 - 0.6x}{l_1} \eta_1 & : x < l_1 \\ 0.4\eta_1 & : x \geq l_1 \end{cases} \quad (15)$$

防波堤上の任意の位置 x での最大流速 U_{MAX} は、打ち込み時の流速 U_i と越流時の流速 U_s から求められる。打ち込み時の流速 U_i は波高と波速から、越流時の流速 U_s は越流時のパラメータ η_1 と l_1 から計算される。なお、 U_i は越波水の打ち込む範囲 ($x \leq l_1$) において生じると考える。

$$U_{max}(x) = \max\{U_i, U_s\} \quad (16)$$

$$U_i = \begin{cases} 0 & : H/h_m < 0.4 \\ 0.8C_m(1.67H/h_m - 0.67)^{1/3} & : H/h_m \geq 0.4 \end{cases} \quad (17)$$

$$U_s(x) = \begin{cases} \alpha_4 \frac{C_1 l_1}{l_1 - 0.6x} \eta_1^{1/2} & : x < l_1 \\ 2.5\alpha_4 C_1 \eta_1^{1/2} & : x \geq l_1 \end{cases} \quad (18)$$

$$\alpha_4 = \begin{cases} 0.68 + 1.10H/h_m & : H/h_m < 0.4 \\ 0.8 + \frac{0.32}{(10H/h_m - 4)^2 + 1.0} & : H/h_m \geq 0.4 \end{cases} \quad (19)$$

ここに、 α_4 : 越波流量と流速の補正係数、 C_1 : 流量係数で通常の防波堤の場合 $C_1=1.61(\text{m}^{0.5}/\text{s})$ 、 x : 天端上での港外側端からの距離。

(4) 細い柱状部材の上部構造物に作用する波力の計算
防波堤上の位置に設置したてすり等の柵に作用する波力 F_{sx} は、その位置での最大水位および最大流速から次式で示される。

$$F_{sx} = C_D \frac{\rho}{2} A U_{max}^2(x) \quad (20)$$

ここに、 C_D : 抗力係数、 A : 最大水位中における部材の水平投影面積

4.3 風力照明システムに作用する波力の計算例

(1) 計算条件

ここでは、2章で紹介した港湾空港技術研究所敷地内の実証試験サイトに設置した風力照明システムを対象として、波力の計算を行う。なお、設置位置については、実際の設置位置だけでなく、護岸前面からの位置を変化させて波力の違いを比較した。また、波浪条件については、平成14年に来襲した2つの台風時の波浪データを参考にして波高および周期をある程度変化させ、潮位については台風時の最高潮位を用いた。計算条件を表-5に、また、照明システムの形状を図-32に示す。

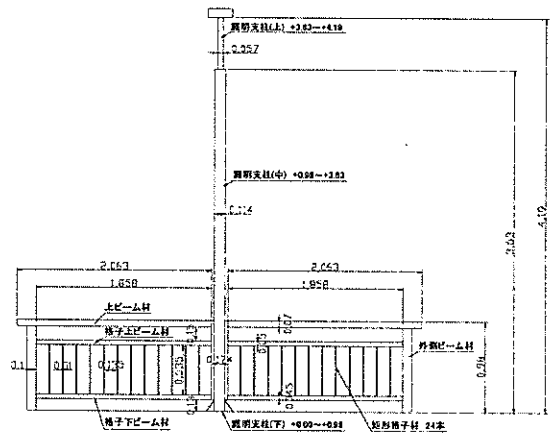


図-32 風力照明システムの形状

表-5 構造条件と波浪条件

	台風0206号	台風0221号
水深 h (m)	4.70	5.00
基面水深 h' (m)	4.70	5.00
マウンド上水深 d (m)	4.70	5.00
マウンド前肩幅 B_s (m)	4.00	4.00
波向き β (°)	0	0
ケーソン天端高さ h_c (m)	1.90	1.60
前面からの距離 x (m)	0.3, 1.0, 2.0, 6.0, 10.0	0.3, 1.0, 2.0, 6.0, 10.0

(2) 波力計算

① 最大流速と最大水位

防波堤および護岸上の細い柱状構造物に作用する波力は、前述の式(20)で計算される。抗力係数については、円柱の場合1.0、角柱の場合2.0を用いた。ここで、前述の方法により、上記の計算条件における構造物に作用する最大流速 $U_{max}(x)$ および最大水位 η を計算する。表-6は、計算結果の一覧を示したものであり、網掛けの部分は打ち込み時の流速が大きいケース、それ以外は越流時の流速が大きいケースである。

表-6(1) 最大流速と最大水位 (台風 0206 号)

周期 T (s)	波高 H (m)	防波堤前面からの距離 x (m)									
		0.3		1.0		2.0		6.0		10.0	
		U_{max} (m/s)	η (m)	U_{max} (m/s)	η (m)	U_{max} (m/s)	η (m)	U_{max} (m/s)	η (m)	U_{max} (m/s)	η (m)
10.0	3	3.86	1.607	3.86	1.257	4.189	0.759	4.523	0.703	4.523	0.703
	4	4.780	2.748	4.780	2.347	4.780	1.774	5.605	1.168	5.605	1.168
	5	5.438	3.896	5.438	3.449	5.438	2.811	6.568	1.635	6.568	1.635
12.0	3	3.899	1.608	3.899	1.262	4.135	0.768	4.523	0.703	4.523	0.703
	4	4.827	2.750	4.827	2.353	4.827	1.786	5.605	1.168	5.605	1.168
	5	5.493	3.898	5.493	3.455	5.493	2.823	6.568	1.635	6.568	1.635
										= $U_{max}(i)$	= $U_{max}(s)$

表-6(2) 最大流速と最大水位 (台風 0221 号)

周期 T (s)	波高 H (m)	防波堤前面からの距離 x (m)									
		0.3		1.0		2.0		6.0		10.0	
		U_{max} (m/s)	η (m)	U_{max} (m/s)	η (m)	U_{max} (m/s)	η (m)	U_{max} (m/s)	η (m)	U_{max} (m/s)	η (m)
10.0	3	3.747	1.777	3.747	1.444	3.820	0.968	4.818	0.768	4.818	0.768
	4	4.726	2.890	4.726	2.507	4.726	1.961	5.760	1.222	5.760	1.222
	5	5.411	4.009	5.411	3.582	5.411	2.972	6.664	1.677	6.664	1.677
12.0	3	3.787	1.778	3.787	1.449	3.787	0.978	4.818	0.768	4.818	0.768
	4	4.776	2.892	4.776	2.513	4.776	1.972	5.760	1.222	5.760	1.222
	5	5.469	4.011	5.469	3.588	5.469	2.984	6.664	1.677	6.664	1.677
										= $U_{max}(i)$	= $U_{max}(s)$

② 照明支柱に作用する波力

照明支柱における波力の作用面積は、支柱の直径×最大水位ηで求められる。すなわち、波力は式(20)を用いて以下のように計算される。

$$F=1.0 \times 1.03 / 2 \times 0.114 \times \eta \times U_{\max}(x)^2 \quad (21)$$

ここで、照明支柱の形状は以下のとおりである。

下部：直径φ174mm，+0.00m（支柱根元）～+0.98m

中央部：直径φ114mm，+0.98m～3.63m

上部：直径φ57mm，+3.63m～4.19m

表-7は、これらの値から支柱全体に作用する波力を計算した結果を示したものである。基本的には波高が大きいほど波力は大きく、また、護岸前面からの距離が近いほど波力は大きくなっている。ただし、ある程度以上距離が離れると、流速および水位が一定となるため、波力も一定の値となっている。

表-7 照明支柱に作用する波力

	周期 T(s)	波高 H(m)	護岸前面からの距離(m)				
			0.3	1.0	2.0	6.0	10.0
台座0206号	10.0	3.0	1.857	1.552	1.193	1.288	1.288
		4.0	4.377	3.839	3.071	3.106	3.106
		5.0	7.429	6.884	5.775	5.447	5.447
	12.0	3.0	1.896	1.587	1.177	1.288	1.288
		4.0	4.468	3.924	3.149	3.106	3.106
		5.0	7.580	7.033	5.914	5.447	5.447
台座0221号	10.0	3.0	1.890	1.616	1.266	1.597	1.597
		4.0	4.468	3.964	3.247	3.384	3.384
		5.0	7.453	7.044	5.996	5.716	5.716
	12.0	3.0	1.932	1.654	1.258	1.597	1.597
		4.0	4.564	4.057	3.332	3.384	3.384
		5.0	7.815	7.207	6.147	5.716	5.716

単位：kN

③ 防護柵に作用する波力

防護柵に作用する波力についても、照明支柱と同様に式(20)を用いて計算できる。矩形格子材および外側ビーム材における波力の作用面積は、部材の幅×（最大水位η一部材下端高さ）で求められる。また、横方向のビーム材については、最大水位がビーム下端より低ければ波力は作用せず、ビーム上端より高ければ部材全体に波力が作用する。また、最大水位がビーム上端と下端の間にある場合、最大水位からビーム下端までの部分にのみ波力が作用することになる。ここで、防護柵の各部材の形状は以下のとおりで、断面形状はいずれも矩形である。

矩形格子材：幅 10mm，奥行 60mm，本数 24 本、

格子間隔 135mm

上ビーム材：厚さ（高さ）70mm，奥行 120mm、

総延長 4,126mm

格子上ビーム材：厚さ（高さ）50mm，奥行 80mm、

総延長 3,716mm

格子下ビーム材：厚さ（高さ）45mm，奥行 75mm、

総延長 3,716mm

外側ビーム材：厚さ（高さ）100mm，奥行 100mm、

本数 2 本

表-8は、これらの値から防護柵全体に作用する波力を計算した結果を示したものである。照明支柱とは逆に、波高の小さい一部のケースを除いて、護岸前面からの距離がある程度離れたほうが、波力は大きくなっている。これは、護岸前面に近いと最大水位は高くなるものの、防護柵の上端以上になっても波力はそれ以上増加しないため、最大水位よりも流速のほうが波力に及ぼす影響が大きく、護岸前面からある程度離れた位置のほうが流速が大きいためである。

表-8 防護柵に作用する波力

	周期 T(s)	波高 H(m)	護岸前面からの距離(m)				
			0.3	1.0	2.0	6.0	10.0
台座0206号	10.0	3.0	14.619	14.619	11.346	9.152	9.152
		4.0	22.406	22.406	22.406	30.815	30.815
		5.0	29.006	29.006	29.006	42.307	42.307
	12.0	3.0	14.913	14.913	11.185	9.152	9.152
		4.0	22.856	22.856	22.856	30.815	30.815
		5.0	29.589	29.589	29.589	42.307	42.307
台座0221号	10.0	3.0	13.771	13.771	13.596	15.183	15.183
		4.0	21.904	21.904	21.904	32.539	32.539
		5.0	28.722	28.722	28.722	43.552	43.552
	12.0	3.0	14.067	14.067	13.974	15.183	15.183
		4.0	22.374	22.374	22.374	32.539	32.539
		5.0	29.338	29.338	29.338	43.552	43.552

単位：kN

表-9 風力照明システム全体に作用する波力

	周期 T(s)	波高 H(m)	護岸前面からの距離(m)				
			0.3	1.0	2.0	6.0	10.0
台座0206号	10.0	3.0	16.477	16.171	12.539	10.440	10.440
		4.0	26.783	26.245	25.477	33.921	33.921
		5.0	36.435	35.690	34.781	47.753	47.753
	12.0	3.0	16.809	16.501	12.382	10.440	10.440
		4.0	27.324	26.781	26.006	33.921	33.921
		5.0	37.169	36.622	35.503	47.753	47.753
台座0221号	10.0	3.0	15.661	15.387	14.662	16.790	16.790
		4.0	26.370	25.868	25.151	35.924	35.924
		5.0	36.175	35.767	34.718	49.268	49.268
	12.0	3.0	15.998	15.721	15.232	16.790	16.790
		4.0	26.938	26.431	25.706	35.924	35.924
		5.0	36.953	36.545	35.485	49.268	49.268

単位：kN

④ 風力照明システム全体に作用する波力

表-9 は、照明支柱と防護柵に作用する波力を合計し、風力照明システム全体に作用する波力を示したものである。照明支柱に作用する波力よりも防護柵に作用する波力のほうが全体に占める割合が大きいため、防護柵のみの波力の傾向と同様で、波高の小さい一部のケースを除いて、護岸前面からの距離がある程度離れたほうが、波力は大きくなっている。なお、周期の違いによる波力の差は非常に小さく、波高の影響が大きいことがわかる。

(3) モーメントの計算

風力照明システムの耐波安定性は、システムの基礎部にかかるモーメントによって評価できる。表-10 は、照明支柱および防護柵の各部材に作用する波力をもとに、照明支柱下端にかかるモーメントを計算した結果を示したものである。システム全体に作用する波力は護岸前面からの距離が遠いほうが大きかったが、モーメントの場合、作用高さも影響してくる。そのため、システムの設置位置が護岸前面に近いと最大水位が大きくなり、照明支柱にかかる波力によるモーメントの割合が大きくなる。今回の条件では、波高が5mと大きいケースでは、護岸前面からの距離が0.3mの場合と10mの場合とで、モーメントはほぼ等しくなっている。一般に、照明システムにかかるモーメントは、護岸前面からの距離が近い場合と遠い場合とどちらが大きくなるかは、静水面からの護岸天端高さや波高等の条件によって異なり、一概には言えないため、ここで紹介した計算方法を用いて検討する必要がある。

表-11 は、今回対象とした風力照明システムに風速60mの風荷重が作用した場合の、各部材およびシステム全体にかかるモーメントを示したものである。

表-10 システム全体にかかる波力によるモーメント

	風期 T(s)	波高 H(m)	護岸前面からの距離(m)				
			0.3	1.0	2.0	6.0	10.0
台風0206号	10.0	3.0	10.173	9.735	5.375	3.200	3.200
		4.0	18.923	17.554	15.971	20.320	20.320
		5.0	30.250	28.269	24.600	29.554	29.554
	12.0	3.0	10.379	9.936	5.347	3.200	3.200
		4.0	19.310	17.925	16.319	20.320	20.320
		5.0	30.884	28.876	25.361	29.554	29.554
台風0221号	10.0	3.0	9.820	9.378	5.552	7.256	7.256
		4.0	19.026	17.671	16.070	21.582	21.582
		5.0	30.337	28.794	25.357	30.605	30.605
	12.0	3.0	10.033	9.585	5.013	7.256	7.256
		4.0	19.441	18.070	16.444	21.582	21.582
		5.0	30.994	29.452	25.968	30.605	30.605

単位：kN・m

表-11 各部材およびシステム全体にかかる風荷重によるモーメント (風速 60m)

部位	風荷重 N	高さ m	モーメント N・m
風車	1,875.7	4.50	8,440.7
太陽電池	185.2	3.75	694.6
灯具	90.2	3.00	270.5
フェンス	1,365.1	0.58	785.0
ポール上	74.5	4.13	307.2
ポール中	475.3	1.88	891.2
ポール下	170.5	0.50	85.3
モーメントの合計			11,474.4

今回の計算条件では、波力によるモーメントは風荷重によるモーメントと比べて最大で3倍近い値となっており、耐波安定性の検討が重要であることがわかる。

4.4 まとめ

風力照明システムを防波堤や護岸上に設置する場合には、風荷重に対する安定性だけでなく、波力に対する安定性の検討が不可欠であることが明らかになった。

今回の検討で用いた波力の算定式は越波時の流速に基づくものであり、堤体前面で水位が最大となるモデルとなっているため、堤体前面からの距離がある程度離れた位置のほうが流速は大きくなり、結果的に波力も大きくなる場合が多い。これは通常の防波堤上部工（不透過な壁面）に作用する波力とは逆の傾向である。また、周期の違いによる波力の差は小さく、波高の影響が大きいことが明らかになった。

なお、今回の検討では静水面から堤体天端面までの高さを一定としているが、一般的にはこの高さや波高の比（相対天端高： hc/H ）が波力の大きさを決める主要なパラメータとなる。

5. おわりに

本研究は、従来、経験的に計画設計されていたため、稼働状況の事前予測が困難であった風力照明システムのような現地利用型風力エネルギー活用システムに関する問題の克服をめざしたものであり、風力エネルギーの一層の有効活用をめざしたものである。

足利工業大学・三協アルミニウム(株)および当所の3年間の共同研究の結果、以下の3項目に関する成果を得た。

- ①久里浜湾護岸近傍の風況観測データ、風力照明システム点灯稼働状況実証試験結果、および、近年開発

された局所風況シミュレーションモデルを活用し、
a) 沿岸風況の局所的時空間変動の解明、b) 発電・蓄電効率の実証的検討、c) 照明点灯稼働率の的確な評価といった観点の検討を経て、沿岸風力照明システムの合理的な点灯稼働率の事前予測を可能とするとともに、照明支柱群における合理的な風車・蓄電・制御システムの設定事例を示した。

②風車にコンセントレータを設けることによって、弱風時における風力エネルギーの有効活用をはかることが可能であることが、室内実験結果から明らかにされた。実験によって、合理的なコンセントレータの形状と諸元を提案することができた。

③越波の影響を受ける場所に照明柱を設置する際の波力について、防波堤天端上の構造物に作用する波力の算定法を準用する方法を検討し、試計算を行なった。これによって照明柱基部の耐波安定性が検討でき、照明柱構造の合理的検討が可能になった。

沿岸域における風力エネルギーの活用を進め、二酸化炭素を排出しないクリーンエネルギーの普及に貢献するばかりでなく、沿岸域におけるエネルギー社会教育にも貢献することが期待される。本稿が、沿岸域の風力エネルギーの一層の活用にあ資することができれば、何よりの幸いである。

本稿のとりまとめにあたっては、(財)日本気象協会によって開発された局地風況シミュレーションを活用したことを述べ、関係の方々に謝意を表す。

本稿のとりまとめは、以下の分担で行なった。すなわち、第2章は当所海洋・水工部海象情報研究室および三協アルミニウム(株)が分担し、第3章は足利工業大学が分担し、第4章は当所耐波研究室および三協アルミニウム(株)が分担した。その上で、第1章および第5章を、筆頭著者である永井が執筆し、全体をとりまとめた。

(原稿受付：2005年5月13日)

参考文献

- 1) 永井紀彦・菅原一晃・佐藤和敏・川口浩二：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，港湾技研資料 1999, 59P., 2001.
- 2) 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徴，港湾空港技術研究所資料, No.1034, 34p., 2002.
- 3) 永井紀彦・橋本典明・横井博志・鈴木善光・魚崎耕平：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, 2000.
- 4) 鈴木靖・宇都宮好博・三嶋宣明・橋本典明・永井紀彦：局所的風況予測モデルLAWEPSによる海上風推定，土木学会，海洋開発論文集第19巻, pp.49-52, 2003.
- 5) 標宣男・鈴木正昭・石黒美佐子・寺坂晴夫：数値流体力学，朝倉書店, pp.16-19., 1994.
- 6) 数値流体力学編集委員会：数値流体力学シリーズ No. 3, 乱流解析，東京大学出版会, 27p., 1995.
- 7) 永井紀彦・小川英明・牛山泉・川西和昭・額田恭史：沿岸風力照明支柱の久里浜湾における実証試験，第15回研究成果発表会講演要旨集，海洋調査技術学会, pp.46-47, 2003.
- 8) 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.
- 9) 永井紀彦：ナウファス(全国港湾海洋波浪情報網)による我国沿岸の波浪特性の解明，港湾技研資料 No.863, 運輸省港湾技術研究所, 113p., 1997.
- 10) Foreman, K.M., Gilbert, B.L. and Oman, R.A. "Diffuser Augmentation of Wind Turbines", Solar Energy, Vol20 (1978), pp.305-311
- 11) 高橋重雄・遠藤仁彦・室善一朗：混成防波堤上の越波水の運動と波力に関する実験的研究—親水性港湾構造物に関する水工的研究(第一報)—, 港湾技術研究所報告第31巻第1号, pp.3-50, 1992.
- 12) 菅原邦彦・遠藤秀則・高橋重雄・遠藤仁彦・高野聖三：親水性防波堤上の手すりの耐波設計法，海岸工学論文集第39巻, pp.716-720, 1992.

港湾空港技術研究所資料 No.1105

2005.9

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 有限会社つばさ印刷技研

Copyright © (2005) 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。