

風力エネルギーを利用した有孔管方式による サンドバイパスシステムの試設計

DESIGN OF SAND BYPASS SYSTEM USING WIND POWER AND PIPES WITH HOLES

野口仁志¹・栗山善昭²・永井紀彦³・鈴木高二朗⁴

Hitoshi NOGUCHI, Yoshiaki KURIYAMA, Toshihiko NAGAI and Kojiro SUZUKI

¹正会員 工修 (独)港湾空港技術研究所施工・制御技術部新技術研究官 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

²正会員 工博 (独)港湾空港技術研究所海洋・水工部漂砂研究室長 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

³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)

⁴正会員 工修 (独)港湾空港技術研究所海洋・水工部主任研究官 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

This paper introduces a new concept of coastal management system in order to protect beaches against erosion, by transporting sand materials from the near-by deposition area to the eroded beach using wind power energy without CO₂ emission. A new Sand Bypass system using pipes with holes was developed and the field tests were conducted at the Northern Kanto area beach faced to the Pacific Ocean. Results of the tests showed that 100kW electric power supply was necessary in the system, and 300kW-typed offshore wind generator was recommended with the system. Estimated CO₂ emission reduction rate was also discussed.

Key Words : Beach Protection, Coastal Management, Sand Bypass, Wind Power, NOWPHAS

1. はじめに

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

これらの問題に対して局所的な観点のみで解決を図ると、対象となっている領域では問題が解決しても、それが別な領域における新たな問題の発生を引き起こすことがある。そこで、広域的視点から海岸侵食に取り組むことが改正海岸法の下で定められた海岸保全基本方針で示されるとともに、河川上流から海岸までの広域的かつ連続的な土砂の流れを考慮した「総合的な土砂管理」が提唱され、今までにそれらに関するいくつかの調査、研究が実施されてきた(例えば、加藤ら¹⁾、栗山²⁾、佐藤ら³⁾)。

「総合的な土砂管理」の観点から注目されている工法としてサンドバイパス工法がある。これは、土砂を堆積している領域から不足している領域に人工的に輸送するものであり、沿岸におけるサンドバイパス工法は、河川からの流下土砂量が増加した場合に懸念される港湾・漁港の航路・泊地における埋没

対策工法となるとともに、海岸侵食の生じている領域では、構造物を少なくしてより自然に近い状態で海岸を防護する工法となりうる。

反面、本工法は、定期的・定常的に土砂を移動させなければならず、土砂をトラック等で輸送する際に、CO₂を排出して地球環境に負荷を与えるとともに、交通渋滞や騒音等の問題を起こす可能性もある。こうした問題に対しては、輸送に伴うエネルギーとして、現地の風力等のクリーンエネルギーを活用し、必要最小限の土砂輸送を半自動的に行うことができるパイプを用いたスラリー輸送方式が、望ましい解決策の一つと考えられる。海浜および海面上は、障害物の多い都市とは異なり、安定した強い風が期待できるため、風力発電に適しているためである⁴⁾。

本研究は、風力エネルギーを利用したサンドバイパス工法の可能性を検討するため、関東地方近郊の太平洋に面した海岸を想定し、土砂輸送量の想定の下で、定常的なサンドバイパスを可能とするシステムの試設計を行ったものである。現地実証試験を通じて、必要電力量の試算とその電力をまかなう風車システムについても検討を行ったものである。

2. 有孔管土砂輸送工法の原理と概要⁵⁾

(1) 工法概要

サンドバイパス工法において、砂を集積する場所は、砂の堆積している場所に設定される。砂の集積装置は原則として移動せず、波等により集まる砂を海水とともに集積装置内に取り組み、そのまま土砂水流として、パイプラインによる輸送を行うものである（図-1）。

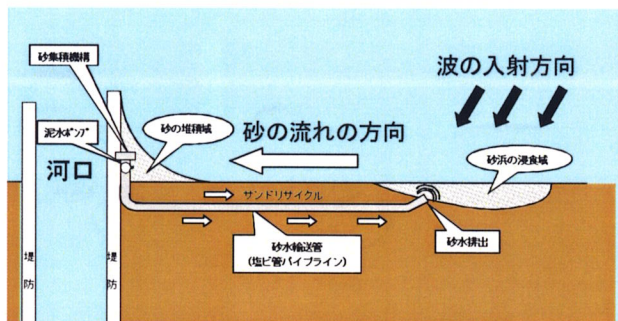


图-1 有孔管土砂輸送工法概要平面図

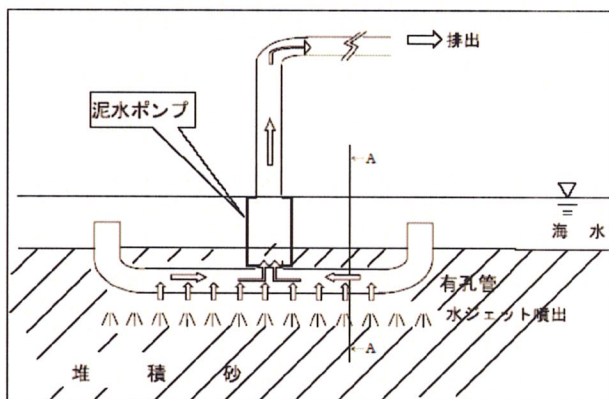


図-2 砂集積装置部概要図（正面図）

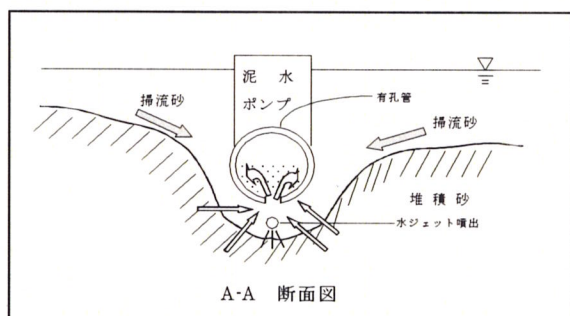


图-3 集積装置概要 (A-A 断面図)

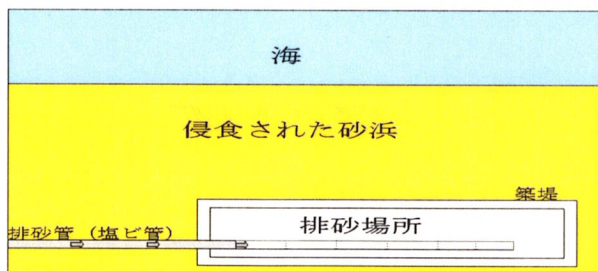


図-4 排砂場所平面図

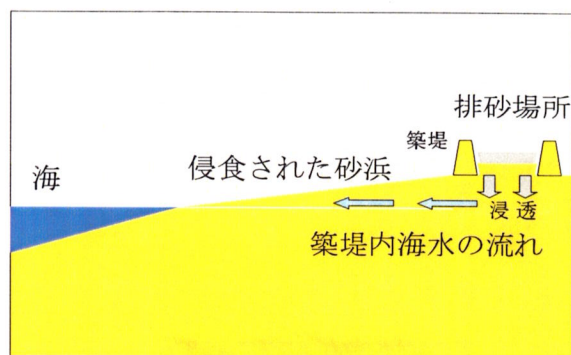


図-5 排砂場所断面図

(2) 砂の集積装置部

砂の集積に用いる有孔管の下部に、沈設及び周囲の砂を流動化させるための水ジェット口を並べておく(図-2)．有孔管の中央部は、管に搭載された泥水ポンプに接続されている．両端部は、通水用の孔を設け海水に通じている．

水ジェット噴出口よりジェット水を噴出させると、下部の砂が流動化し、有孔管がその自重（含むポンプ等重量）により砂の中へ沈下していく。泥水ポンプを稼働させると、流動化した砂が、有孔管の孔を通して、管内に海水と混合して流入する（図-3）。砂と海水が混合した泥水は、有孔管内を流れて泥水ポンプに吸引され泥水ポンプから排砂管を通して排砂場所まで輸送され排出される。

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

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

(3) 輸送管部

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

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

(4) 排砂部

侵食された海浜の陸側に築堤で囲われた排砂場所へ泥水を排出する(図-4, 5). 海水は、底面の砂層に浸透し、砂層でろ過され、ろ過されたきれいな海水は、海へゆっくりと浸出する. 残った砂は築堤内に堆積される. 排砂地点が堆積砂で盛り上がると塩ビ管を延長し、排砂地点を少しずつ移動させる. 海開

きの数日前にブルドーザを用いて、海浜の前面に押し広げる。

(5) 期待される効果

期待される主な効果及び特徴を以下に記す。

- ①専用の移動機構は不要である。従来のポンプ浚渫船では土砂を集積する浚渫ヘッドを常時、上下左右前後に移動させるために種々の駆動装置及び重厚長大な船体を必要とするが、本工法では、そのような専用の移動機構は不要である。
- ②砂集積効果が継続的に発揮される。
- ③基本的な動力は、土砂水流の吸引・排出及びジェット水等供給用のポンプ動力だけであり、駆動部の少ない簡易な工法。
- ④可搬式であり、機材はトラック等により簡易に陸上輸送が可能。
- ⑤砂集積場所は、汀線付近の他、陸上及び狭水域等、汎用的に活用が期待。
- ⑥簡易な装置・構造の工法のため、経済的。

3. フィールド砂集積実験⁵⁾

(1) 汀線付近における実験

茨城県常陸那珂港南端海域で実験を行った。実験場所の土砂は、平均粒径 0.2mm の細砂であった。

砂集積実験装置は、 $\phi 150\text{mm}$ 長さ約 4.5m の有孔管の中央部に泥水ポンプ（出力 9kW：揚程 16m、吐出量 2.0 $\text{m}^3/\text{分}$ ）を搭載した(写真-1)。そして、有孔管下部に水ジェット噴出口を並列し、給水ポンプ（出力 9.2kW：揚程 40m、吐出量 0.8 $\text{m}^3/\text{分}$ ）により水を供給した。装置の総重量は約 0.4 t である。

砂浜の汀線付近において、小型クレーンで吊り下げた砂集積実験装置を降ろし稼働させた(写真-2)。砂が海水とともに連続的に集積され輸送・排出された(写真-3)。砂集積実験装置は約 1m 程度沈下した状態で、沈下は止まり、この状態を数時間継続していると、砂集積実験装置のある窪みの広さが徐々に拡大されるのが観測された。

砂の集積・輸送量は、1 時間連続実験値では、最高 47 m^3/h 、半日の実験値（約 3 時間連続平均値）としては、28 m^3/h であった。

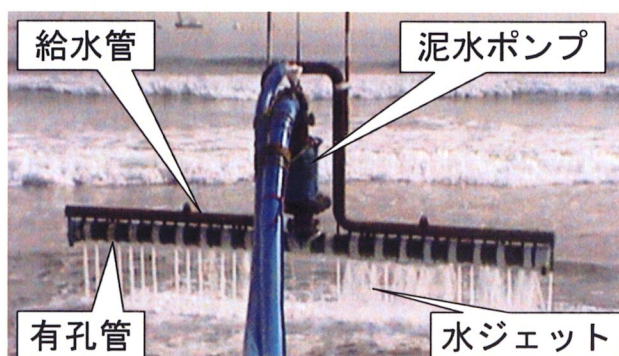


写真-1 砂集積実験装置

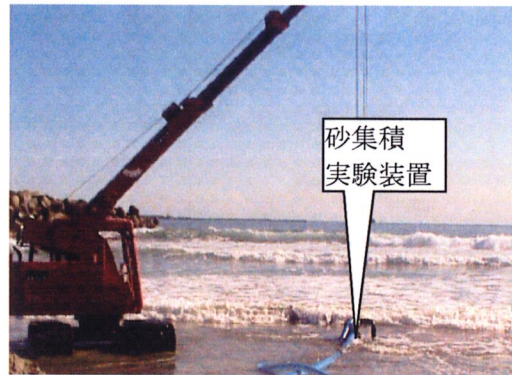


写真-2 汀線実験状況



写真-3 排砂管敷設状況

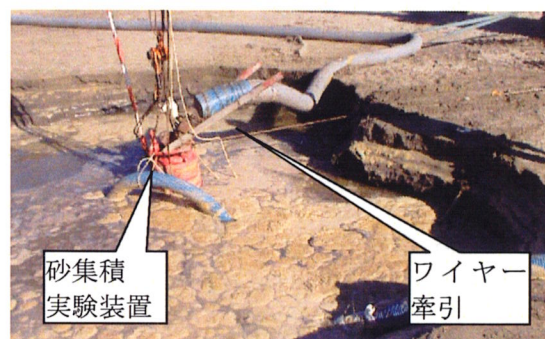


写真-4 砂集積装置のワイヤー牽引

(2) 砂浜における砂集積実験

波が作用しない陸上の砂浜に堆積している砂を対象として、このような施工場所においても、本装置を用いて砂を連続的に集積し輸送することを試みた。

茨城県常陸那珂港南端砂浜において、海岸線より約 500m 離れた、ある程度締め固まった状態の砂浜（平均粒径 0.2mm の細砂）において実験を行った。実験装置は(1)汀線付近実験で用いたものと概ね同様のものである。周囲に水深 20cm 程度の広い水貯まりがあり水は確保されている状態であった。この実験では、ワイヤーによって水平方向に砂集積実験装置の自重程度の張力を与え、土砂を集積しながら水平方向にゆっくりと移動することで連続的に土砂を集積することを試みた(写真-4)。

その結果、砂集積実験装置は、連続して土砂を集積し、輸送・排出しながら、ゆっくりとした速度（数 m/時間程度）で移動した。砂流量は 28 m^3/h であった。

(3) 施工能力の検討

施工能力としての砂の集積・輸送量は、砂の集積・輸送に用いる管径の大きさにより、概ね制限・設定される。これまで、管径 150mm の管を用いて各現地実験等を実施しており、実工事想定値として砂の集積・輸送能力を $21\text{m}^3/\text{h}$ (想定含泥率 15%、泥水流量 $2.3\text{m}^3/\text{分}$) と設定している。

各実験等での実績値を実工事想定値($21\text{m}^3/\text{h}$)と比較したものを図-6 に示す。各実験等においては、輸送距離が数十 m 程度と短く高含泥率でも管内閉塞は生じにくい状況であったことから、概ね実工事想定値を上回る結果となっている。

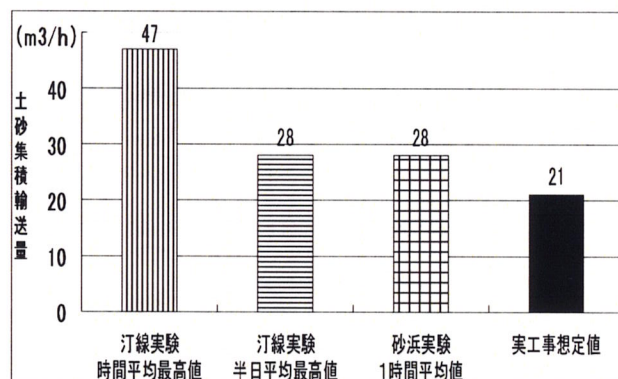


図-6 砂集積輸送量の実験結果

また、実工事想定値を $21\text{m}^3/\text{h}$ としたときの、昼間 8 時間稼働及び昼夜 22 時間稼働の日施工量及び月 20 日稼働及び 30 日稼働とした場合の月施工量を表-1 に示す。

表-1 直径15cm管による砂集積・輸送量

砂流量	日施工量(稼働時間)	月施工量(稼働日数)
$21\text{m}^3/\text{h}$	168m^3 (8h)	$3,360\text{m}^3$ (20日)
	462m^3 (22h)	$13,860\text{m}^3$ (30日)

4. サンドバイパス設備

関東およびその周辺において太平洋に面している遠州灘海岸や鹿島灘海岸などの沿岸漂砂量（例えば、Sato・Tanaka⁶⁾、宇多⁷⁾、栗山²⁾、Kuriyama・Sakamoto⁸⁾）を参考にして、本研究では、サンドバイパスで輸送する土砂量を $50,000\text{m}^3$ （粒径 0.2mm ）と想定した。この量は、延長 500m 奥行き 100m 長さの砂浜に厚さ 1m の砂層を敷く量に相当する。サンドバイパス工法による土砂輸送期間としては、海水浴シーズン（7～8 月）を避けた通年（10 か月間）を想定し、土砂輸送距離としては、1km 程度の距離を想定した。

これまでのフィールド実験では砂の輸送距離は 50～60m 程度であったため、泥水ポンプは出力 9kW のポンプを使用していた。1km の輸送距離を想定した必要揚程を計算すると 49.9m となり、37kW 泥水

ポンプ（揚程 27m：流量 $2.3\text{m}^3/\text{分}$ ）2 台使用するものとした。設備の諸仕様を下記に記す。

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

これら設備の稼働に必要な電力は計 84kW となる。

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

$50,000\text{m}^3$ の砂を、7～8 月を除いた 10 か月間で輸送することを設定したが、稼働時における本設備の土砂集積・輸送能力は $21\text{m}^3/\text{h}$ と設定しているので、100kW（以上）の電力が供給される時間が、2,380 時間以上必要となる。これは、7～8 月を除いた 10 か月の期間内での、100kW 以上の電力供給時間率が、33%以上であることに相当する。

5. 風力発電設備の適用に向けての課題整理

(1) 風力発電設備

土砂をトラック等で輸送することによる、二酸化炭素の排出や、交通渋滞・騒音などの問題を回避するため、風力エネルギーの活用を以下に検討する。ここでは、4 章で述べたように、100kW 以上の電力供給をめざすが、風力発電設備は一般に時空間的に発電量の変動が大きいため余裕を持った発電設備の設置が望ましいこと、および、こうした中規模の風力発電設備の市場は今のところ小にさく風力発電設備の規模選択の範囲が限られていること、を考慮し、沿岸域を対象として設計開発が進められている 300kW 定格出力の風力発電設備⁹⁾ 1 式(図-7)を設置することを与条件とし、以下の検討を進める。

この風力発電設備の概要を以下に記す。

- ・形式：水平軸プロペラ型
- ・WTGS クラス：II A+
- ・定格出力：300kW
- ・ロータ直径：33m
- ・カットイン風速：3m/s
- ・カットアウト風速：25m/s
- ・定格風速：11.7m/s
- ・耐風速：70m

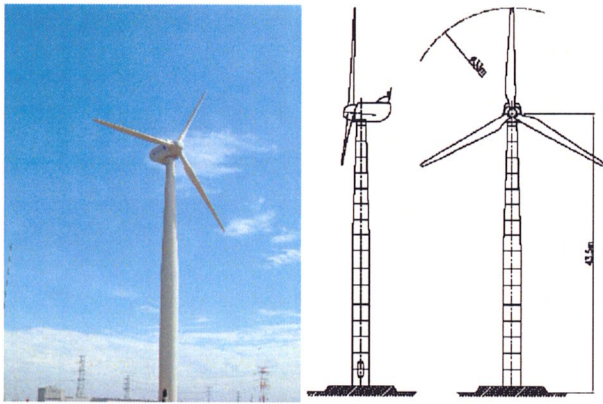


図-7 風力発電設備全景写真及び側面・正面図

図-8 は、ここで検討対象とした風力発電設備のパワーカーブ（入射風速と発電量の関係）を示したものである。このパワーカーブより、システム1式を稼働させるために必要な100kWの電力を得るには7.84m/sの風速が必要と算定され、システム2式を並行稼働させるための200kWの電力を得るには9.81m/s以上の風速が必要であり、システム3式を並行稼働させるための300kWの定格電力を得るには11.7m/s以上の風速が必要と算定される。

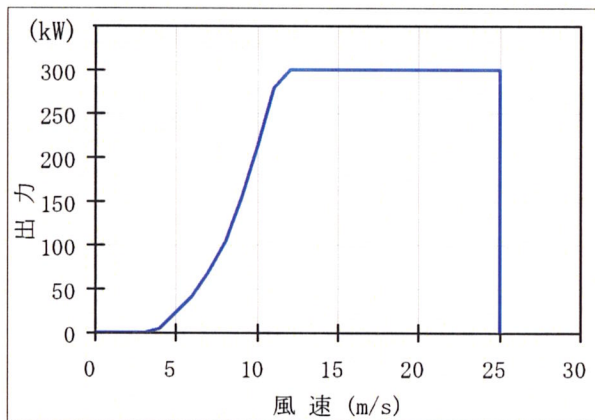


図-8 風力発電設備のパワーカーブ

（2）観測データに基づく風況の特性

近年、ナウファス（全国港湾海洋波浪情報網：NOWPHAS：Nationwide Ocean Wave information network for Ports and Harbors）の一環として、全国沿岸域における風観測データの蓄積と解析が進められつつある¹⁰⁾。

こうした中で、風力エネルギーは、沿岸域においては、空間的に変動が大きいため、風車の設置場所に応じて期待される発電量は、陸域と海域では大きく異なるものとなることが知られている^{11) 12)}。すなわち、洋上風は陸上風に比べて、一般に、平均的な風速が大きく、かつ、風況が安定しており、主軸および主軸直角方向の短時間内の風変動が小さく、安定的な電力を得るためには、洋上に風車を設置することが望ましい。

表-2 は、ナウファスによって観測された、関東

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

これらのデータを、風力設備のカットアウト風速25m/sも考慮し、100kW以上の電力が得られる風速7.84-25m/sの出現頻度、200kW以上の電力が得られる風速9.81-25m/sの出現頻度、定格300kW以上の電力が得られる風速11.7-25m/sの出現頻度に整理したグラフを図-9に示す。

表-2 関東地方の4風観測点の概要

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

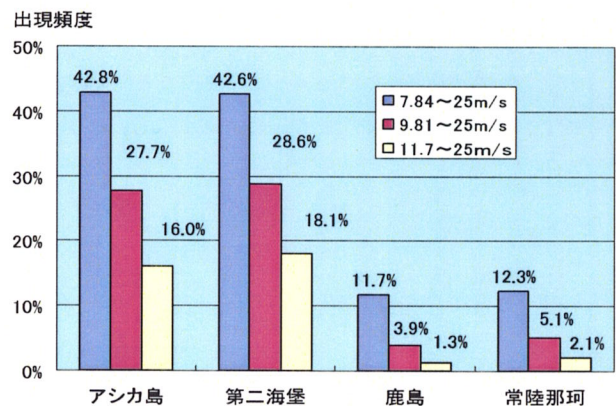


図-9 風速段階別出現頻度

図-9で示すように、鹿島、常陸那珂の陸上観測地点では100kW以上の電力が得られる風速の出現頻度は設定目標の33%に達しないが、アシカ島、第二海堡の洋上観測地点では、100kW以上の電力が得られる風速の出現頻度は約43%と設定目標の33%を上回り、本システムが成立し得ることが示された。

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

(3) 余剰電力の付加的活用

表-2 に示すアシカ島、第二海堡の洋上観測地点の風データ及び図-8 に示すパワーカーブを用いて、平均の年間期待発電量を試算すると、989MWh となる。サンドバイパス設備を一セット設け 50,000m³の砂を集積・輸送するための電力量は 100kW の設備を 2,380 時間稼働させる 238MWh であり活用される電力量の割合は 24%と約 1/4 である。残りの余剰電力 751MWh の活用策として下記事項が考えられる。

a) 売電：系統連携がうまくいって売電できれば火力発電所への負荷を減らし、CO₂ 排出削減に貢献する。
b) エネルギーの現地利用：系統連携がうまくいかず売電できない場合、現地利用の照明システム（蓄電システムと組み合わせ）^{13) 14)} 等が考えられる。

(4) CO₂削減効果

従来のサンドバイパス工法である「バックホウ積み込み-ダンプトラック輸送」による土砂 50,000m³の掘削・輸送により排出される CO₂ を試算した。

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

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

6. 結論

本研究は、風力エネルギーを利用したサンドバイパス工法の可能性を検討するため、関東地方の太平洋に面した海岸を想定し、土砂輸送量の想定の下で、定常的なサンドバイパスを可能とするシステムの試設計を行った。その結果を以下に記す。

a) 水ジェットと有孔管を組み合わせた簡易な構成の装置によるフィールド砂集積輸送実験より、21m³/h の砂集積輸送が可能ことが確認された。
b) この結果を基に、50,000m³の砂を毎年 10 ヶ月の間に 1km の距離を輸送するサンドバイパス設備を想定し、必要電力を約 100kW と試算した。
c) 電力供給として定格 300kW 風力発電設備を想定した。関東地方の風況観測結果をもとに検討を行うと、洋上においては、100kW の発電が期待できる風速の出現率は設定目標 33%を上回る 43%で、砂 50,000m³の集積輸送が成り立つことが示された。
d) 余剰電力も売電等により有効に活用を図ることにより、CO₂ 削減効果は 343 t/年と試算された。

以上により、風力エネルギーを利用したサンドバイパス工法が、地球環境負荷の少ない持続的な海岸侵食対策として大きな可能性を有していることが確認された。

謝辞：本論文をまとめるにあたり、足利工業大学副学長牛山泉教授、国土交通省港湾局海岸・防災課、駒井鉄工(株)の皆様、ご助言、あるいは資料提供等をいただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 加藤一正・入江 功・田中則男：大井川河口周辺海岸の海浜変形の巨視的把握，第 32 回海岸工学講演会論文集，土木学会，pp. 390-394，1985.
- 2) 栗山善昭：広域土砂収支図作成の試み，水工学シリーズ 01-B-5，土木学会，pp. B-5-1-B. 5-13，2001.
- 3) 佐藤慎司・宇多高明・岡安徹也・芹沢真澄：天竜川-遠州灘流砂系における土砂異動の変遷と土砂管理に関する検討，海岸論文集，第 51 巻，pp. 571-575，2004.
- 4) 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.
- 5) 野口仁志：省力化・効率化を図る施工法の開発～「自沈有孔管による土砂集積輸送工法」及び「網チェーン式ブロック撤去装置」～，平成 18 年度港湾空港技術講演会講演集，独立行政法人港湾空港技術研究所，pp. 59-82，2006.
- 6) Sato, S. and Tanaka, N.: Field investigation on sand drift at Port Kashima facing the Pacific Ocean, *Proc. 10th Int. Conf. Coastal Eng.*, ASCE, pp.595-614, 1966.
- 7) 宇多高明：日本の海岸侵食，山海堂，pp. 415-423，1997.
- 8) Kuriyama, Y. and Sakamoto, H.: Cross-shore variation of predominant longshore sediment transport rate, *Proc. Coastal Dynamics '07*, ASCE, 2007. (印刷中)
- 9) 永井紀彦・清水勝義・牛山泉・李在炯・細見雅生・小川路加：沿岸域における中小型風力発電装置の適用可能性に関する現地実験，第 18 回研究成果発表会講演要旨集，海洋調査技術学会，pp. 17-18，2006.
- 10) 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 No.999，59P，2001.
- 11) 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特性，港湾空港技術研究所資料，No. 1034，34p，2002.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) 永井紀彦・下迫健一郎・牛山泉・根本泰行・川西和昭・塚本泰弘：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，2005.