

「新潟西海岸飛砂対策」 の技術的内容

1. 海浜幅の限られた養浜海岸における 侵食対策としての飛砂対策工

策工

養浜は他の場所に有る砂を該当海岸に持ち込み海浜（砂浜）を形成する，あるいは該当海岸の沖合にある海底砂を海浜まで運び，海浜を拡幅する事業である．砂浜が形成され，風が吹くと砂の移動（飛砂運動）が生じる．飛砂運動により砂は砂浜から流出する．風の方向によって流出する場所は異なる．以後，風は海側から陸側へ吹き，海浜砂は陸側に流出（移動，流失）することを前提に話を進める．

侵食が進んだ海岸に養浜し海浜を回復する場合においても，養浜の目的と規模によって飛砂現象に対処する制御法は異なる．幅広く（概略 100 m 以上）養浜し，砂浜陸側端に飛砂によって前砂丘を形成し，前砂丘と砂浜で高波浪，津波，海岸侵食，強風への対処を目的とする場合と必要最小限の海浜幅の確保への対処を目的とする場合では，対処への考え方，対処制御法は異なる．

新潟西海岸日和山地区の養浜は，海岸侵食に対する面的防護法（突堤，幅広潜堤，養浜）の一部であり，かつ養浜に対して，次のような条件が課せられている．

- 1) 夏季，海浜で行われる行事に必要な海浜幅を確保すること．
- 2) 海岸景観に配慮すること（見苦しい建物，構造物の建設不要）
- 3) 陸側背後地（居住地）への飛砂の侵入が無いこと（住民からの苦情）

加えて，養浜砂の供給に限りがあり，十分な養浜砂の確保が期待できない，という事情がある．以上の状況を勘案すれば，日和山地区の養浜海岸に課せられた侵食対策としての飛砂対策工は，飛砂の陸側背後地（居住地）への飛砂の侵入を阻止し，海浜内に閉じ込める工法に帰結する．

図 1-1 に砂制御施設（構造物）の機能（海岸施設設計便覧；海岸工学委員会，2000³⁵）を示す．

³⁵ 土木学会工学委員会：海岸施設設計便覧 373-376.，2000

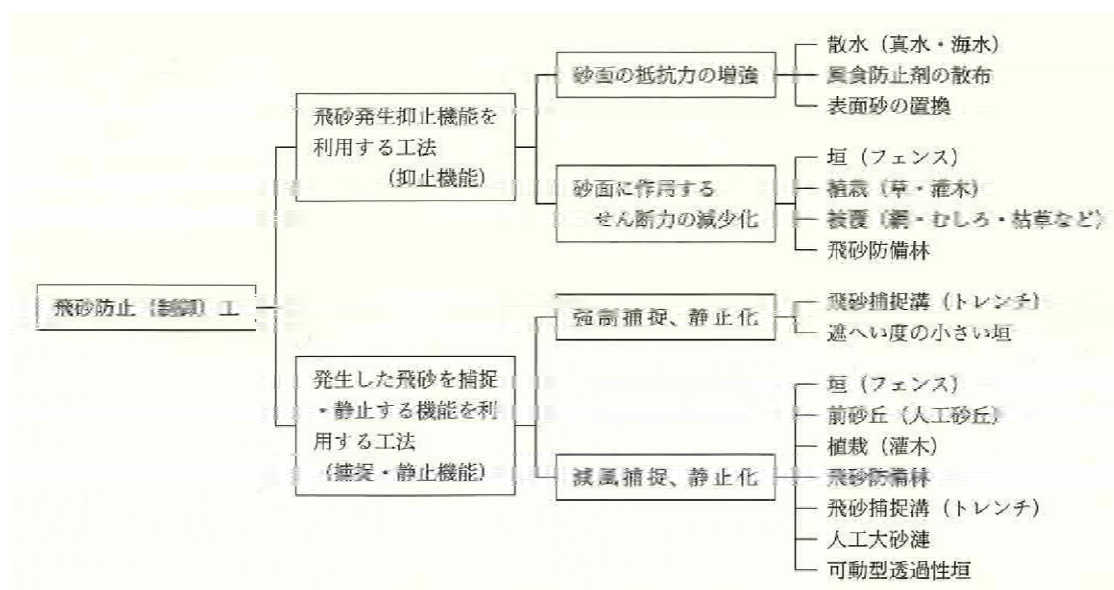


図 1-1 飛砂防止工の機能と分類 （海岸施設設計便覧，2000，p373）

日和山地区の養浜海岸において，“砂浜から飛砂による砂流失を阻止する”という観点から，飛砂制御施設（構造物）の機能を勘案すれば，砂浜の海側，中央部の領域に飛砂発生抑止機能が高い，柵，堆砂垣，土塁を配置して，飛砂の発生を抑え，発生した飛砂は砂浜領域で捕捉し，砂浜上に貯留すれば良い．砂浜陸側領域には，捕捉・静止化機能が高いトレンチ，低砂丘，堆砂垣を利用すればよいと判断できる．

これらの制御施設を使用するに当たって留意すべき事項がある．各々の制御構造物が飛砂によって埋没すれば，それらの構造物が持つ飛砂捕捉機能を失う．養浜海岸から養浜砂の流失を防止するには飛砂捕捉機能の欠損があってはならない．絶えず飛砂捕捉機能を保つために管理維持が必要になる．

一方，風の吹き方も念頭に置いておく必要がある．新潟西海岸日和山地区では，冬季12月から3月に飛砂が発生する強風が吹く．この期間に飛砂制御構造物が機能を失うことが無いように維持管理が必要である．1年間の残りの約9カ月間は，飛砂制御構造物が不要となる．見方を変えれば，この期間飛砂制御構造物は不要であり，海浜の利用に不都合が生じることもあり得る．それ故，飛砂制御構造物を必要とする冬季のみに用意する，期間限定の仮設ということも考慮の対象になる．

2. 堆砂垣, トレンチ (飛砂捕捉溝), 植栽の飛砂制御効果

課せられた条件下で適切な制御体系を構築するために必要な構造物について、図 1-1 を参考にして、各々の構造物の適性を検討し、適用可能な構造物として、堆砂垣、トレンチ、植栽を選定した。これ等の構造物を現地にて効果的に利用するために、事業の進捗状況に合わせて、調査・現地実験を実施した。以下に、今後、養浜海岸、あるいは通常の海岸における飛砂対策工の計画に資するために、本事業で得られた知見を要約する。

2.1. 堆砂垣

飛砂を捕捉、静止化する目的で使用する垣を堆砂垣 (sand fence) と呼んでいる。多様な材料、多様な形式の堆砂垣が用いられている (海岸施設設計便覧 2000 版³⁵)。ここでは、当事業で使用された堆砂垣、堆砂垣配置の形式、本事業で求められた適切な配置の開発過程について述べる。

2.1.1. 堆砂垣

海浜の形態 (状態) は事業の進捗状況によって年々変わる。しかし、海浜が有る限り、風が吹けば飛砂が発生する。冬季に強風が吹かない年は無い。海浜が如何なる状況に有っても、海浜砂を海浜に留め (侵食軽減)、居住地区への飛砂の侵入を最小 (住民からの苦情対処) にする必要があった。事業進行中は、変わりゆく海浜において、柔軟に飛砂制御に対応できる構造物が必要であった。飛砂発生抑制機能、発生した飛砂の捕捉・静止化機能が海浜の状況に対応可能な構造物が必要とされたのである。その構造物として、仮設堆砂垣が選定された。仮設堆砂垣は垣の高さ、垣の材料の透過性、配置形式を変えることに拠って、飛砂発生抑制機能、発生した飛砂の捕捉・静止化機能の調整を図ることが可能な構造物である。

仮設堆砂垣は経費の面からも制約を受ける。高さは 2 m, 打設した単管パイプで組んだ枠にポリエチレン幕を張った堆砂垣が使用された。ポリエチレン幕には径 1 mm 程度の小径があり、空隙率は (空隙率は空隙と投影した全面積の比) 約 30 % である。しかし、径が小さい為風の透過性は低く、ほぼ不透過性の垣として機能している。それ故、飛砂の大部分は仮設堆砂垣風上側に堆積している。

2.1.2. 堆砂垣の配置形式 (線形) と当事業に用いられた配置形式に至る経緯

堆砂垣は通常汀線に平行に設置される。その理由は：

- i) 防護を目的とする領域は通常汀線に平行にある。
- ii) 領域を防砂する堆砂垣の長さが最短となる。
- iii) 堆砂垣の設置作業が容易である。
- iv) 管理維持作業に便利である。
- v) 海への眺望を妨げない。

しかし、特別の目的がある場合には、その目的に合わせて設置している。通常、汀線に平行に設置される堆砂垣の配置形式 (線形, Fence alignments) には、図 2-1 に示すような形式

がある。

図 2-1 に示す配置形式を以下のように呼んでいる：

- a) 直線配置 (straight alignment),
- b) 翼垣 (袖垣) 付き直線配置 straight alignment with side spurs (wing fences),
- c) ジグザグ配置 (zigzag alignment),
- d) トランスバース配置 (transverse alignment)

直線配置が普遍的に用いられている配置である。配置 b), c), d) は、風が汀線に斜めに吹く海岸で堆砂垣の飛砂捕捉効率を高めることを意図して用いられる配置である。ジグザグ配置とトランスバース配置は、アメリカ合衆国東海岸で多く用いられている配置であるが、日本ではほとんど用いられていない。e) は b) の堆砂垣と翼垣を離して設置するパターンであり、新潟港海岸で試験的に実施した配置である。

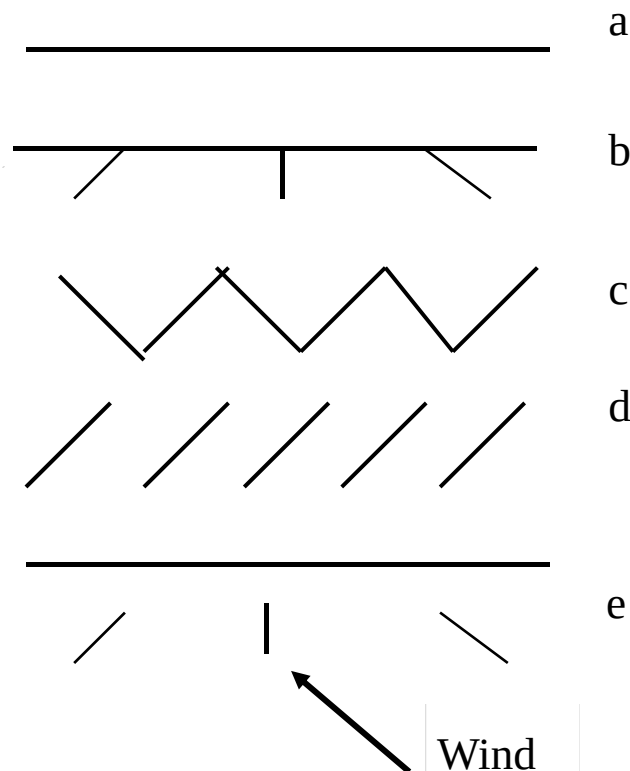


図 2-1 堆砂垣の配置形式

翼垣付直線配置は、風が汀線に斜めに吹く場合、堆砂垣前面で堆砂垣に沿って移動している飛砂を捕捉して、飛砂捕捉効果を高めることを意図して、汀線に平行に設置してある堆砂垣（主垣）から、ある角度、ある長さの補助垣を海側に付けた形式である。補助垣は通常、翼垣（富樫，1937，p110，写真 17，18 1964(昭和 39)年復刻），袖垣と呼ばれている。しかし，富樫（1937）は現地実験で，翼垣の取付部（隅角部）に飛砂が集中して異常な堆積，また翼垣背後に局所洗堀が発生して，主垣と翼垣の倒壊の危険性が生じることを報告し，翼垣の効用を否定している（写真 2-1）。一柳（1958）は主垣に取り付ける翼垣の角度を，卓越風向に直角及び平行，主垣に直角な方向，に変えた現地実験を実施している（図 2-2）。図 2-2 から分

かるように、富樫（1937）の現地実験に見られるような垣の倒壊に至るような地形は生じていないが、取付部に飛砂は集中的に堆積している形状を示している。図中、主垣堆砂状況（縦断）を見れば、主垣の取付部周辺は既に垣頂まで埋没しているが、取付部から離れた場所での堆積は堆砂垣の高さの半分（50 %）以下である。取付部から離れた場所の主垣部分は未だ飛砂捕捉能力を残している。このままの状態が続けば、埋没している取付部付近から飛砂が陸側へ侵入することになる。翼垣の取付は、意図したように飛砂を速やかに捕捉するが、ある程度の飛砂が捕捉された後は、堆砂垣の安定と捕捉能力に問題が生じる。

上述のような取付部の堆積形状を勘案して、翼垣を主垣からある距離を離して、主垣と翼垣陸端にある空間を設け、その空間から、取付部に集中してくる飛砂の一部を風下側に逃がし、主垣に沿う堆積を一様にできるのではないかと、との発想がでる（図 2-1 e）。堆砂垣のトランスバース配置は岸沖方向に幅がある。この空間（幅）に相当量の飛砂の収容が期待できる。この二つの発想を組合せると、汀線に平行な主垣の海側にある間隔を取りトランスバース配置の翼垣群を設ける配置になる。事業の初頭にはトランスバース配置の飛砂捕捉に関する知見はほとんどなかった。陸側への飛砂流失の可能性を減じるために予備として汀線に平行な堆砂垣を 2 列にする配置が適切であろうと判断された（図 2-3）。上述の判断に基づき事業の当初から、基本的にこの配置形式を用いることになった。

事業の進展に伴い海浜の状況は年々変わる。変わる海浜状況に対応するために仮設堆砂垣で対処する。

変わる海浜状況に対応しつつ、この形式で、最も効果的で経済的な形式はどのような配置になるか。以後、多年に渡って、現地調査・現地実験がなされた。適切な数値を求めて試された諸元は図 2-3 に示してあるように、2 列堆砂垣の垣間隔(F_{ed})、2 列堆砂垣の隔壁間隔(P_d)、2 列堆砂垣の前垣、後垣の高さ(h_s, h_l)の相違、翼垣群の配置（長さ(W_l)、高さ(h_w)、配置角度(α)、個々の翼垣の重なり度(O)）、主垣と翼垣陸との距離（ S_d ; 離垣距離）等である。

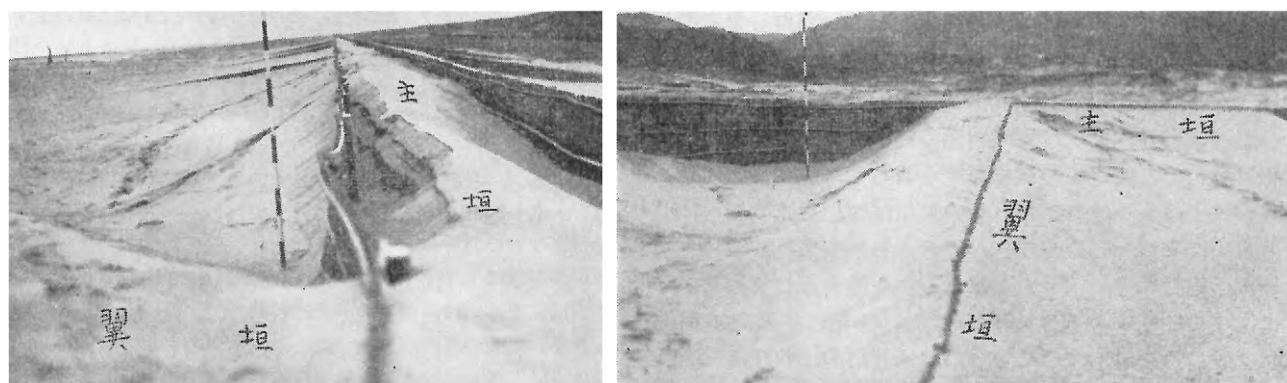


写真 2-1 翼垣設置と砂丘形³⁶

³⁶ 富樫兼治郎：日本海北部沿岸地方に於ける砂防造林，秋田営林局，p.126-132，1937

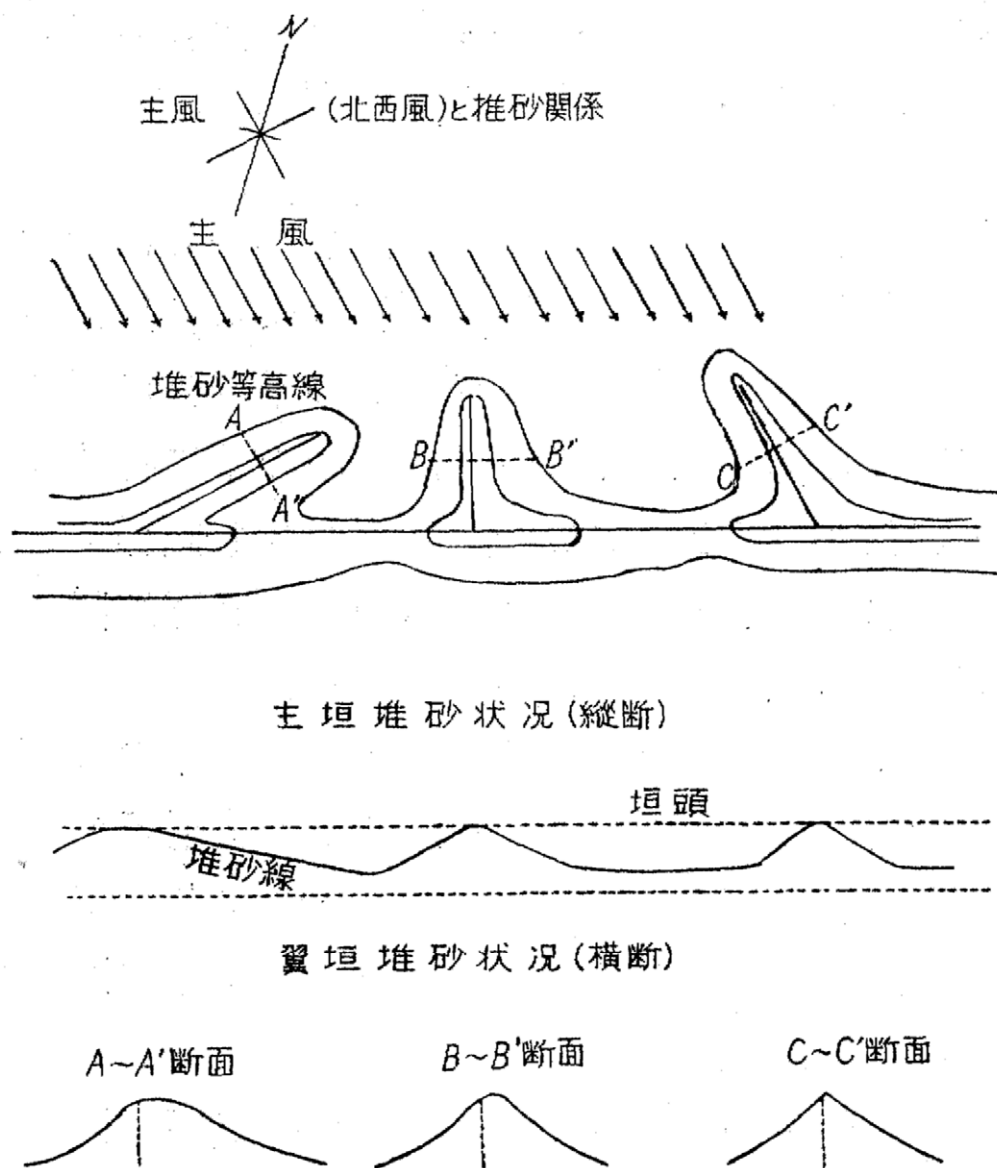


図 2-2 主垣・翼垣への堆砂状況³⁷⁾

³⁷⁾ 一柳壽行：飛砂に関する調査（第一報），新砂防，11 巻，3 号，pp.9-21., 1958

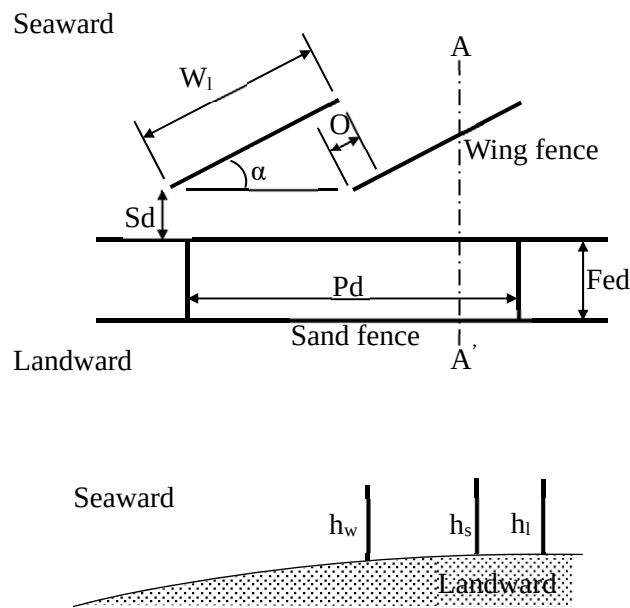


図 2-3 現地実験された堆砂垣配置の要素

2.1.3. 二列堆砂垣と翼垣群配置の変遷

事業の進展に伴い海浜の状況は年々変わる。変わる海浜状況に対応するために仮設堆砂垣で対処する。

変わる海浜状況に対応しつつ、この形式で、最も効果的で経済的な形式はどのような配置になるか。以後、多年に渡って、現地調査・現地実験がなされた。適切な数値を求めて試された諸元は図 2-3 に示してあるように、2 列堆砂垣の垣間隔、2 列堆砂垣の隔壁間隔、2 列堆砂垣の前垣、後垣の高さの相違、翼垣群の配置（長さ、高さ、配置角度、個々の翼垣の重なり度）、主垣と翼垣陸との距離（離垣距離）等である。

2.1.4. 堆砂垣、堆砂垣形状に関する現地調査・実験から得られた成果

堆砂垣の機能を評価する一つの指標は堆砂垣周辺の飛砂堆積量である。事業開始当初から、海浜地形測量はトランシットとレベルを使用する通常の地形測量で成されてきた。測量される横断面の間隔は 25 m～50 m 程度であった。このような測量から得られる地形図からは、配置された堆砂垣群周辺の地形変化（主に堆砂垣周辺の堆積状況、その海側の海浜地形の変化）、ある領域の砂移動の傾向などの判読は難しかった。堆砂垣周辺の堆積土量をある程度の精度で推算をするには無理があった。従って、評価は限られた測線の横断面形状、視認による堆積量、堆積形状で成されてきた。前項で述べた 2 列堆砂垣とトランスバース配置の翼垣群の合理的な配置（飛砂捕捉効果と経済性）の追求はこの判断基準で行われている。ここでは、上述の判断基準で為された堆砂垣の特性と堆砂垣配置に関して、調査・実験で得られた成果の概略を報告する。

(1) 堆砂垣の特性に関する成果

堆砂垣周辺の風の状況(風況), 堆積形状等既知の知見^{35,38,39,40}は参考文献を参照されたい。

堆砂垣周辺の堆積形状は垣の空隙率によって全く異なる。一般的に云えば, 空隙率が多い場合は垣の風下側に, 空隙率が小さい場合は垣の風上側に堆積する。しかし, その境界値は空隙の大きさ, 形状によって異なる。最も単純な形式の堆砂垣, スラット型堆砂垣では空隙率 40 %程度である。本事業で使用した仮設堆砂垣のプラスチック幕の空隙率は約 30 %であった。しかし, 飛砂の堆積は風上側に限られ, 風下側の堆積はほとんど認められなかった。幕の破損あるいは幕下端に隙間が生じたような予期しない場合を除き, 通常の状態では空隙が小さいので, ほぼ不透過性堆砂垣のように作用していた。

事業期間を通して同一の仮設堆砂垣が使用されたので, 堆砂垣の透過性に関する堆砂垣機能の特性に関する情報は得られなかった。

(2) 堆砂垣配置形状に関する現地調査・現地実験から得られた成果

毎年変わる砂浜の状況に対応して, 堆砂垣の配置(主として, 二列堆砂垣海側の翼垣群の配置)が工夫された。以下に幾つかの適切な配置が得られた事例をしめす。

○二列堆砂垣の有用性と隔壁(仕切垣)間隔 (田中ら⁴¹, 清水ら⁴²)

2006(平成 18)年度, 2007(平成 19)年度冬季に, 2 列の仮設堆砂垣(高さ約 2 m, 列間隔 20 m, 隔壁間隔 50 m), その海側の仮設補助翼垣群(高さ約 2 m, 長さ 20 m)から成る堆砂垣配置の飛砂制御効果に関する調査がなされている。翼垣は冬季の主卓越風向に直角に設置されている。2006(平成 18)年度冬季の堆砂垣配置を示す(図 2-4 参照)。

田中ら⁴¹は, 浮遊砂観測と地形調査から, 1) 翼垣群が飛砂を捕捉し 2 列堆砂垣の海側堆砂垣の前面に堆積する飛砂量を低減している。2) 堆砂垣群を越えて陸側に流出する飛砂の量は極めて少なく, 堆砂垣群は効果的に機能しているとの結論を得ている(写真 2-2 参照)。

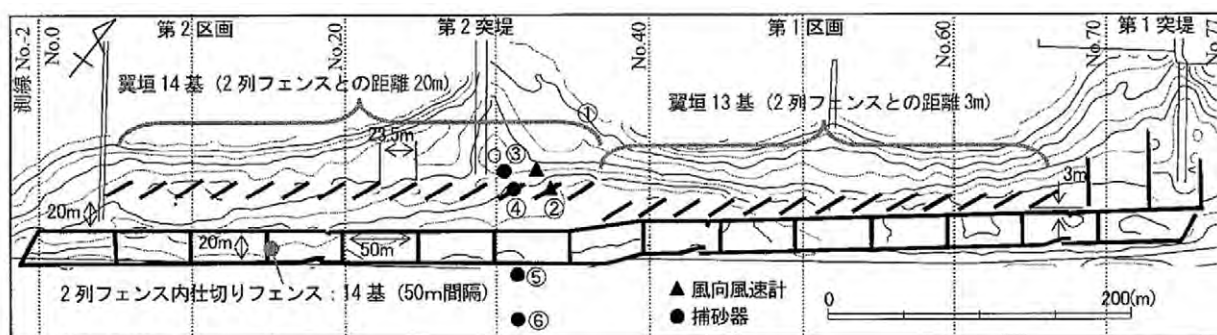


図 2-4 フェンス配置⁴¹

³⁸ 堀田 新太郎: 飛砂による地形変化: 堆砂垣周辺に生じる二次元堆積形状, 地形, 35, 1-23., 2014

³⁹ 堀田 新太郎: 飛砂による地形変化: 二列堆砂垣周辺に生じる二次元堆積形状, 地形, 36, 1-22, 2015

⁴⁰ Li, B. and D. J. Sherman: Aerodynamics and morphodynamics of sand fence: A review, Aeolian Research, Vol. 17, pp33-48, 2015, Elsevier

⁴¹ 田中純彦, 蜂須賀和吉, 土田吉昭, 伊藤晃, 伊東啓勝: 新潟西海岸での飛砂対策の有効性検討, 海岸工学論文集, 第 54 巻, pp.546-550., 2007

⁴² 清水利浩, 蜂須賀和吉, 中川洋一, 吉田秀樹, 伊東啓勝, 坂井隆行: トレンチによる飛砂防止対策の試み, 海岸工学論文集, 第 55 巻, pp.541-545., 2008



(a) 翼垣群風上側の堆積状況



(b) 陸側から見た堆砂垣群

写真 2-2 フェンス群の飛砂捕捉状況

○ 多列堆砂垣間内の隔壁（仕切垣）の間隔

風が斜めに吹く場合、透過性の小さい堆砂垣の風下に循環流（セル）と堆砂垣列方向に沿う流れが発生する。風速の変動と相まって複雑な風況を生じる（静岡県農林水産部⁴³，堀田ら⁴⁴）。堆砂垣の列間は「風の通り道」と成り、飛砂流が生じる場合がある。飛砂流の発生を阻止するためには隔壁（仕切り）を設ける。列間の風況は風向，垣間隔，垣の透過率などに関係し複雑である。適切な隔壁間隔に関する調査研究は見当たらない。

2007(平成 19)年度冬季に，同じ堆砂垣群配置で隔壁間隔 50 m を 100 m に変えて（堆砂垣の高さ 2 m で正規化すれば，25 H から 50 H に変えて）現地実験が成されている。清水ら⁴²は，25 H 隔壁間隔内での砂面変動が少なかったが，50 H 隔壁間隔では風下側隔壁の風上側に (0.5-1.0) H 程度の堆積があることを観測し，この事例から隔壁間隔は 50 H 以下，(25-30) H 程度が適切であろうと推定している。堀田・堀川⁴⁵の文献調査に拠れば，不透過性の堆砂垣に直角な方向から風が当たる場合，垣の風下側に循環流が形成され減風域が形成されるが，堆砂垣の風下側 (25-35) H あたりで，風は上空からのエネルギーの補給を受け，元の状況に戻ることが報告されている。得られた値 (25-30) H は不透過性堆砂垣風下側の風の状況が元の状況に戻るまでの距離と同じかあるいは多少小さい値と考えて良い。隔壁間隔は，風の状況が元に戻る距離より多少小さい値，(25-30) H 程度の値が良いとの結論になる。

⁴³ 静岡県農林水産部：静岡県の海岸林，農林水産部，p.31，2001

⁴⁴ 堀田新太郎，畑中勝守，田中寛好，小泉圭佑，大塚香織：人工砂丘周辺の風の場合による砂丘形状決定に関する研究，砂防学会誌，Vol.53，No.2，p.22-33，2000

⁴⁵ 堀田新太郎，堀川清司：堆砂垣の機能についての実験的研究，海岸工学論文集，Vol.37，p.444-448.，1990

○適切な離垣間隔

汀線に平行な堆砂垣（主垣）から縦堆砂垣（以後、簡単に縦垣と記す）あるいは翼垣の陸側端まで距離を仮に”離垣間隔”と呼ぶことにする。取付部に集中する飛砂を適度に風下側に流出させ、取付部の埋没を防止しつつ、主垣に沿う堆積の頂部の高さ（crest line）がほぼ一定な滑らかな形状を生じさせ、かつ縦垣あるいは翼垣近傍に飛砂が堆積する離垣間隔を”適切な離垣間隔”と呼ぶことにする。

2017(平成 29)年度冬季の現地調査から、奥田ら⁴⁶は、適切な離垣距離 5 m (2.5 H) を得ている。2019(令和元)年度冬季の現地調査から、片野ら⁴⁷は、適切な離垣距離 5 m (2.5 H) を得ている。

離垣距離 5 m (2.5 H) の広さ（幅）は、堆砂垣設置時、維持管理時の工事車両の通路幅を確保できる。

2.1.5. 堆砂垣の縦垣群配置

2.1.5.1. 縦堆砂垣群配置の開発

2 列堆砂垣とその海側に配されたトランスバース配置翼垣群の飛砂制御効果が高いことは、事業開始後間もなく現地で確認された。2 列堆砂垣の間隔は 20 m（海側の堆砂垣の高さを H とすれば、垣間隔は 10 H）である。以後、基本的にこの配置が使用されることになった。その後の課題は、経済的、合理的な翼垣群を構成することに有った。この試みの中で、「海浜を斜めに移動する飛砂を遮断する」、との発想が有り、縦堆砂垣群配置開発の基に成った。

2.1.5.2. 堆砂垣群配置形状（線形）と線形の目的

縦堆砂垣群配置とは、汀線に平行な方向に設置される堆砂垣（以後、簡単に堆砂垣と記す）と堆砂垣に直角（汀線に直角）な方向に設置する縦堆砂垣群（以後、簡単に縦垣群と記す）を配置する形状（線形）である（図 2-5 参照）。加えて、縦垣の陸端と堆砂垣の間にある程度（約 5 m 程度）の空間（離垣間隔）を設けてある形式⁴⁸である。以後、この堆砂垣配置形状を、縦垣群配置形式（線形）、と記すことにする（図 2-5 参照）。

縦垣群配置の基本的な考え方は、「海浜を斜めに移動する飛砂を遮断し、その移動範囲をある領域に限定し、領域内に飛砂を閉じ込める」ことである。1 シーズンのみを考慮し、風の季節終了後、堆積した飛砂を海浜に戻し、整地する維持管理を前提としている。堆砂垣は 6, 7 割埋没すると飛砂捕捉能力が減少する⁴⁹ので、風の季節途中でも、堆砂垣あるいは縦垣群が 7 割程度埋没したら堆積した飛砂を除去する。離垣間隔⁴⁸は、垣設置時の作業空間の確保、垣の維持管理、堆砂垣と縦垣の交差部（隅角部）における飛砂堆積の集中を制御するために設ける。

⁴⁶ 奥田聡，中村聡孝，高野篤，片野明良，加辺圭太郎：3D レーザースキャナ測量を用いた堆砂垣・翼垣群周辺の飛砂堆砂形状の観測，土木学会論文集 B2（海岸工学），第 74 巻，pp.967-972.，2018

⁴⁷ 片野明良，林寛之，千田奈津子，加辺圭太郎：堆砂垣周辺の平面的な飛砂堆積特性と飛砂量推定，土木学会論文集 B2（海岸工学），第 77 巻，pp.439-444.，2021

⁴⁸ 奥田聡，中村聡孝，高野篤，片野明良，加辺圭太郎：3D レーザースキャナ測量を用いた堆砂垣・翼垣群周辺の飛砂堆砂形状の観測，土木学会論文集 B2（海岸工学），第 74 巻，pp.967-972.，2018

⁴⁹ 荒木誠一，志賀守，片野明良，伊藤義将，坂井良輔：面的防護方式による飛砂対策工の効果土木学会論文集 B2（海岸工学），第 71 巻，pp.661-666.，2015

堆砂垣と縦垣群に空隙率の小さい材料を使用し、堆砂垣と縦垣の風上、風下近傍にほぼ飛砂全量を捕捉堆積させるようにする。以後、飛砂は堆砂垣、縦垣近傍に捕捉されると仮定して議論を進める。

(1) 縦垣群配置における飛砂の運動範囲と飛砂堆積量の推定

堆砂垣に沿ってある間隔で堆砂垣に直角に縦垣を配する(図 2-5 参照)。ある縦垣海側端を N 点、縦垣の陸側への延長線が堆砂垣と交差する点を O 点、堆砂垣と縦垣の陸側端の間に空間 S_d を設ける。 $\overline{NO}$ を縦垣の長さを L 、汀線に直角な方向と主卓越風向方向の成す角度 α 、縦垣海側端 N を通り、卓越風向に直角な線が堆砂垣と交差する点を M_u 、縦垣海側端 N を通り、卓越風向方向の線が堆砂垣と交差する点 M_b とする。ここで、 $D_u = \overline{OM_b} = L \tan \alpha$ 、 $D_b = \overline{OM_u} = L \cot \alpha$ とする。

O 点より風上側(図 2-5 では左側)、距離 D_x 離れている O_x 地点にて、長さ L_x の別の縦垣(S_d を含む)が設置されているとする。縦垣 L_x の海側端 N_x を通り、卓越風向の線が堆砂垣と交差する点を M_{bx} とする。別の縦垣 L_x の位置(O_x 地点の位置)によって、地点 M_{bx} と地点 M_u の位置関係に次のような 3 つの場合が考えられる。それぞれ場合の飛砂の通過断面と堆積範囲を仮定する。ただし、 O_x 地点の縦垣の位置は、 O 地点の縦垣の堆積範囲に含まれない位置に設置され、 O 地点の縦垣の M_u 地点より風上側にあるものとする。

Case1) M_{bx} 点が M_u 点に一致する場合、この場合の添字 x を 1 にする(図 2-5a)。

$O_x \rightarrow O_1$, $M_{b1} = M_u$, $D_1 = \overline{OO_1}$ とする。

この場合の既知量は、 α , L , L_1 , D_1 (L_1 , D_1 は垣配置から)となる。

断面 ($\overline{M_u N}$) を通過する飛砂は、堆砂垣区間 ($\overline{M_u M_b}$) に堆積すると仮定する。

通過断面長: $\overline{M_u N} = L / \sin \alpha = L \operatorname{cosec} \alpha$

堆積長: $\overline{M_u O} + \overline{OM_b} = D_b + D_u = L \cot \alpha + L \tan \alpha = L(\cot \alpha + \tan \alpha)$ となる。

Case2) M_{bx} 点が M_u 点より風上にくる場合、この場合の添字 x を 2 にする(図 2-5b)。

$O_x \rightarrow O_2$, $\overline{M_{b2} O} > \overline{M_u O}$, $D_2 = \overline{OO_2}$ とする。

この場合の既知量: α , L , L_2 , D_2 (L_2 , D_2 は垣配置から)となる。

点 M_{b2} を通り、線分 ($\overline{M_u N}$) に平行な線が線分 ($\overline{NM_b}$) の海側への延長線と交わる点を N' とする。この場合、断面 ($\overline{M_{b2} N'}$) を通過する飛砂は、堆砂垣区間

($\overline{M_{b2} M_b}$) に堆積すると仮定する。三角形 ($N' - M_b - M_{b2}$) の関係を利用すると

通過断面長: $(\overline{M_{b2} O} + \overline{OM_b}) \cos \alpha = \{(D_2 - L_2 \tan \alpha) + L \tan \alpha\} \cos \alpha$

堆積長: $\overline{M_{b2} O} + \overline{OM_b} = (D_2 - \overline{O_2 M_{b2}}) + \overline{OM_b} = (D_2 - L_2 \tan \alpha) + L \tan \alpha$

ここに、 $\overline{O_2 M_{b2}} = L_2 \tan \alpha$

Case 3) M_{bx} 点が M_u 点より風下にくる場合、この場合の添字 x を 3 にする(図 2-5c)。

$O_x \rightarrow O_3$, $M_{b3} O < \overline{M_u O}$, $D_3 = \overline{OO_3}$ とする。

この場合の既知量: α , L , L_3 , D_3 (L_3 , D_3 は垣配置から)となる。

点 M_{b3} を通り、線分 ($\overline{M_u N}$) に平行な線が線分 ($\overline{NM_b}$) と交わる点を N'' とする。

この場合、断面 $(\overline{M_{b3}N''})$ を通過する飛砂は、堆砂垣区間 $(\overline{M_{b3}M_b})$ に堆積すると

仮定する。三角形 $(N'' - M_b - M_{b3})$ の関係を利用すると、

通過断面長： $(\overline{M_{b3}O} + \overline{OM_b}) \cos \alpha = \{(D_3 - L_3 \tan \alpha) + L \tan \alpha\} \cos \alpha$

堆積長： $(\overline{M_{b3}O} + \overline{OM_b}) = (D_3 - \overline{O_3M_{b3}}) + \overline{OM_b} = (D_3 - L_3 \tan \alpha) + L \tan \alpha$

ここに、 $\overline{O_3M_{b3}} = L_3 \tan \alpha$

上記をまとめると、ある1基の縦垣の飛砂捕捉範囲は、その風上側にある縦垣の位置と長さによって決められ、風向に直角な断面 $(\overline{M_{bx}N_x})$ の長さと堆砂垣の堆積区間 $(\overline{M_{bx}M_b})$ の堆積量が計測できれば、その区間の平均的な単位長当たりの飛砂量を求めることができる。

実際問題としては、砂浜幅（堆砂垣と汀線までの距離）を勘案して、縦垣の長さ L 、 D を決めればよい。

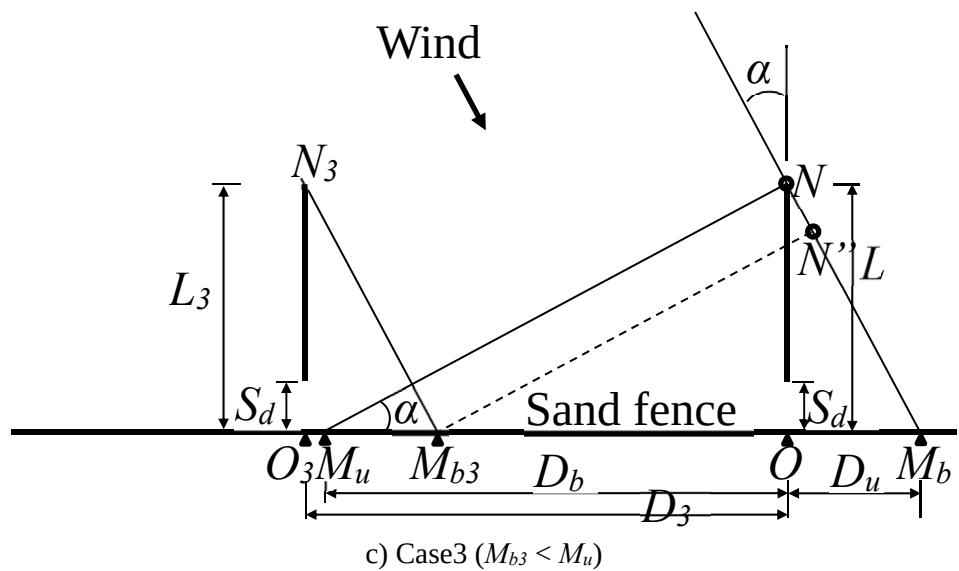
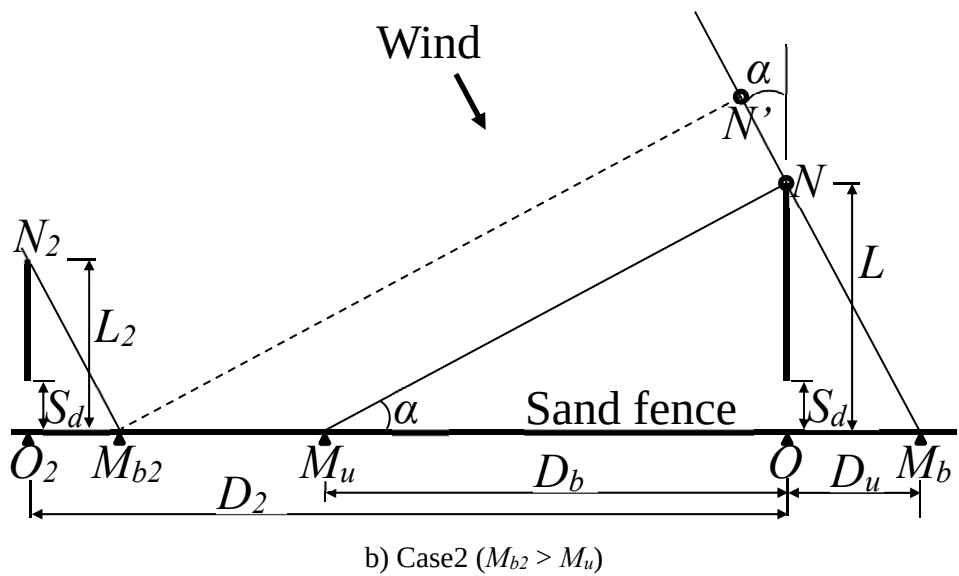
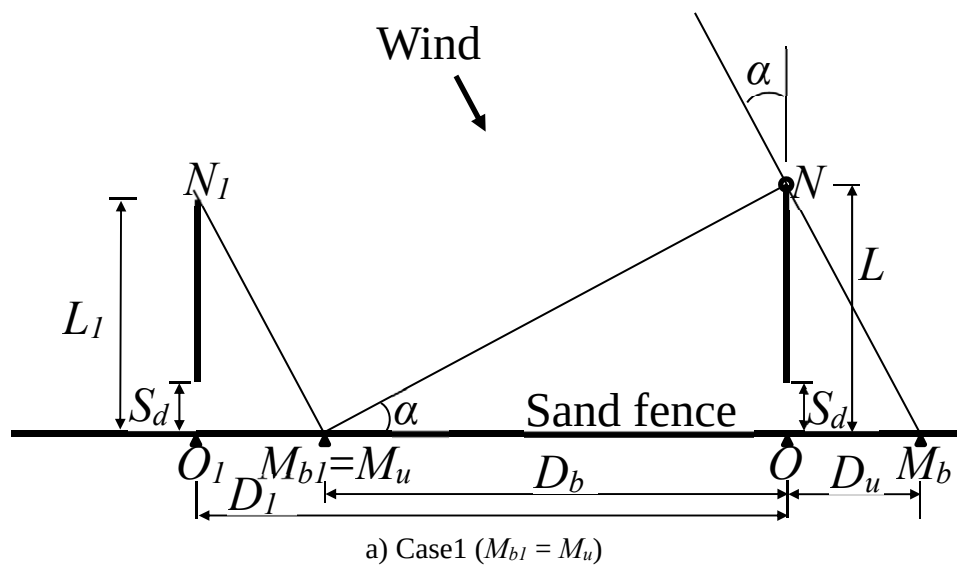


図 2-5 縦垣群配置における飛砂の運動範囲

(2) 縦垣群観測結果の例

① 観測結果

図 2-5 に観測事例を示す。2019(令和元)年度に実施した第2区画の観測結果である。縦垣周辺と海側堆砂垣の周辺に飛砂が堆積しており、縦堆砂垣群形式の堆砂垣配置は意図したように飛砂を捕捉堆積させている。二列堆砂垣の陸側堆砂垣より陸側の飛砂の侵入は、無視できるほど少ない。図 2-6 の中で、陸側堆砂垣の沿岸距離 350 m 周辺の局所的な堆積は、重機置場の確保のため、周辺の砂を集積した人為的な行動によるものである。

② 飛砂量推算

強風の第1卓越風向 NW, 第2卓越風向 WNW, 及びその中間 NWbW を計算する。

図 2-6 に、卓越風向 NW, NWbW, WNW, に対する、前節で述べた方法による通過断面長及び堆積長（堆積土量計算区域）を示す。

なお、NW に対する縦垣 a の通過断面は、図 2-5 の定義によれば縦垣 b, c の海側を通り、縦垣 b, c が縦垣 a の飛砂捕捉効果の影響範囲となる。このような場合、縦垣 a の通過断面は、隣接する縦垣 b の N_b - M_{bb} 線の海側延長上で交点までと定義して縦垣 a による捕捉飛砂量を定義する。

表 2-1 に計算結果を示す。表 2-1 から、飛砂発生卓越風向は、WNW, あるいは NWbW (NW より半方位 W 寄り) であることが分かる。図 2-7 に示す測量間の風向の出現頻度からも強風の卓越風向は NWbW であることが分かる。縦垣 a の飛砂量は、堆砂垣 b, c, d よりが大きい。その原因として、堆砂垣 a の位置と風上側の広い砂浜幅、この海岸の冬季の荒天時の風向変化の特徴に起因すると考えられる。現地での荒天は南西の風から始まり西、北西、北、北東と変化する。荒天の初め、西よりの強風が吹き始めの頃は、砂面が比較的乾燥状態にあり、飛砂が発生し易い。この場合、縦垣 a は縦垣 b, c, d に比べて海側に張り出しており、縦垣 b, c, d の海側端の外側を通過し、捕捉されない飛砂が縦垣 a の海側端に捕捉される可能性が考えられる。

得られた各々の縦垣の飛砂量を沿岸方向の各々の縦垣の F_d の始点にて表示すれば、各々の縦垣が捕捉する飛砂量沿岸方向分布を示すことになる。

表 2-1 縦垣群周辺の飛砂量推算結果 (NA: 通過断面長)

	NW				NWbW				WNW			
	堆砂量 (m^3)	NA(m)	F_d (m)	飛砂量 (m^3/m)	堆砂量 (m^3)	NA(m)	F_d (m)	飛砂量 (m^3/m)	堆砂量 (m^3)	NA(m)	F_d (m)	飛砂量 (m^3/m)
縦垣a	630	131.5	54.6	4.79	615	132	57.4	4.67	582	127	63.3	4.58
縦垣b	159	72.8	44.5	2.18	174	69.9	47.7	2.49	185	64.3	53.8	2.87
縦垣c	164	71	56.5	2.31	156	66.2	59.7	2.36	152	58.9	65.7	2.58
縦垣d	164	90.3	54.8	1.81	176	88.4	57.6	1.99	186	83.1	63.4	2.23
全体	1451	509.1	52.6	2.85	1121	356.5	55.6	3.14	1105	333.3	61.6	3.32

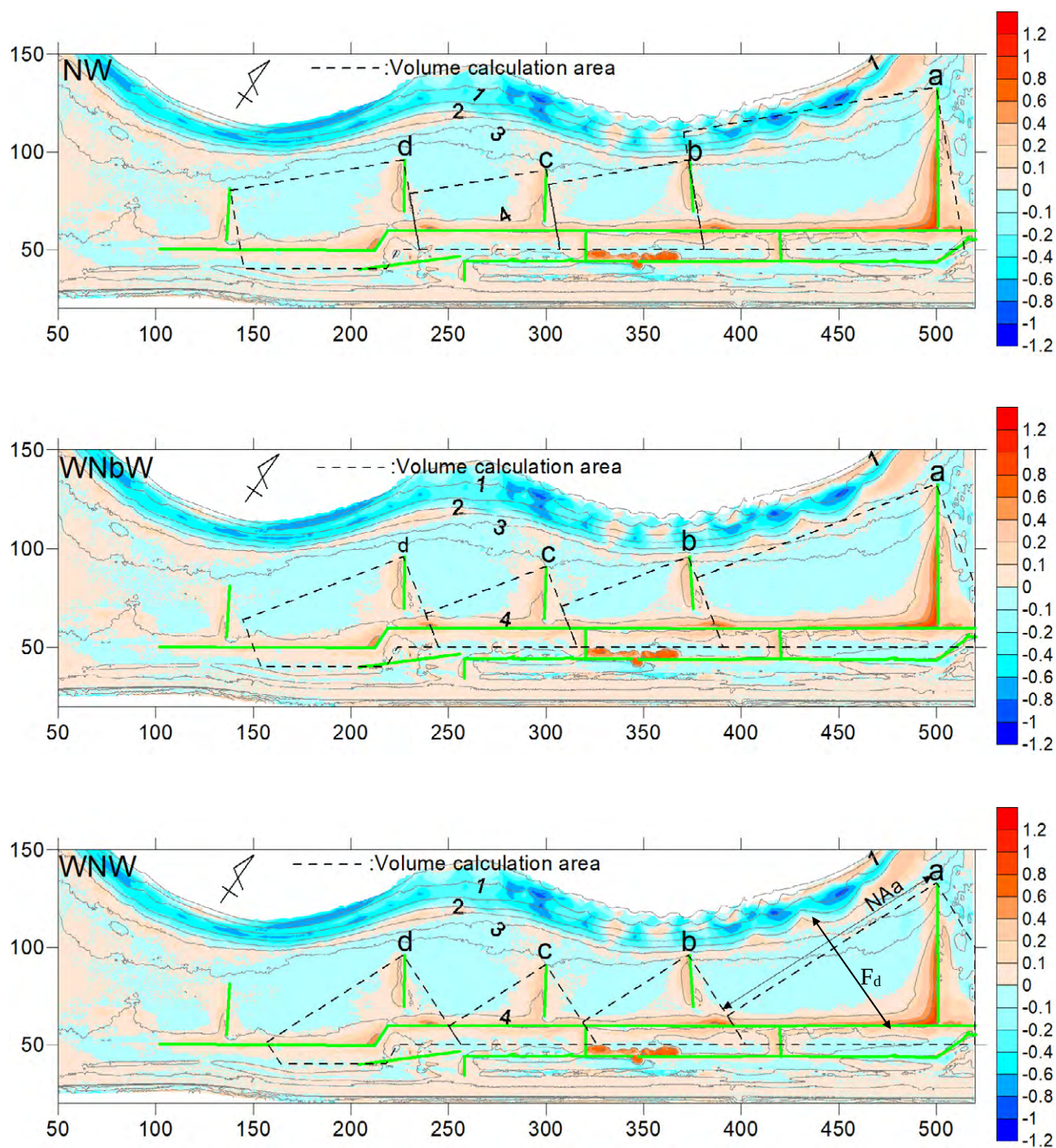


図 2-6 縦垣群の堆積土量算定領域

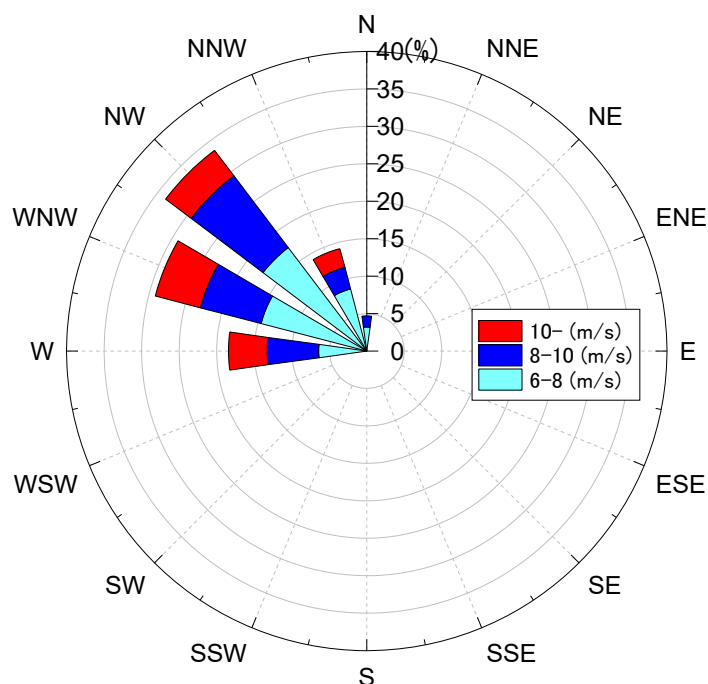


図 2-7 風速別風向の出現頻度 (2019(令和元)年度)

(3) 海浜における飛砂発生可能砂面長の導入(定義)

乾燥した砂面に一定の風速(飛砂発生限界風速以上)の風が吹く場合、飛砂発生可能な砂面風上端から、風下側のある距離にて、飛砂量が近似的に平衡状態に成っていると仮定出来る距離がある。乾燥砂面の飛砂に関する議論は、上記の平衡状態を仮定して行われている⁵⁰。

湿潤砂面上でも、若し、砂面の湿潤度と風速が一定であるならば、乾燥砂面におけると同様な飛砂量が近似的に平衡状態に成っている距離を仮定できる。しかし、冬季日本海側海岸の海浜での飛砂現象は次の要因により複雑となっている。①風向・風速が変動する。②砂面の湿潤度は場所と時間で変動する。③飛砂の発生は砂面の状態(砂漣, 起伏)の影響を受ける。従って、上述のような「飛砂量が近似的に平衡状態に成っていると仮定出来る距離」を求めることは難しい。ある地点の飛砂量がどのような状況にあるのかを判断することが出来ないためである。したがって、湿潤状態にある現地海浜上の飛砂発生可能性と発生飛砂量を指標化することは難しい。

ここで、観測地点より風上側領域の飛砂発生特性を検討する。そのために、一つの指標として、「飛砂発生可能砂面長(F_d)」:「観測地点から風上側遡上帯陸端までの距離」を導入する(図 2-6WNW 参照)。飛砂発生可能砂面長(F_d)は、発生している飛砂の状況を示す一つの指標ではあるが、飛砂は、風速変動、湿潤度、砂面状の凹凸などの影響を受けるから、飛砂発生可能砂面長は同じであっても、観測される飛砂量は異なることを念頭に置く必要がある。

図 2-8 に飛砂卓越方向(NWbW)の飛砂量と F_d の関係を示す。縦垣 a の値が堆砂垣 b, c, d の値より大きい。この事実は図 2-6 を参照すれば理解できる。前述のように縦垣 a の飛砂量は大きい。しかし、 F_d の値はほぼ同じである。この結果は F_d の有用性を否定するものではない。縦垣 a の F_d の値は縦垣 b, c, d の値とほぼ同じであるが、縦垣 a の飛砂捕捉範囲は

⁵⁰ 堀田新太郎：砂質海岸における飛砂現象：物理量の数的表示とその適用限界, 地形, 第 33 巻 3 号, 259-280., 2012

縦垣 b, c, d に比べて大きい。縦垣 a の飛砂捕捉状態も縦垣 b, c, d と異なる。F_d における飛砂量の異常値は、飛砂発生状況の差異を表す一つ指標として使用できる可能性がある。更なる、データの積み重ねと検討が必要である。

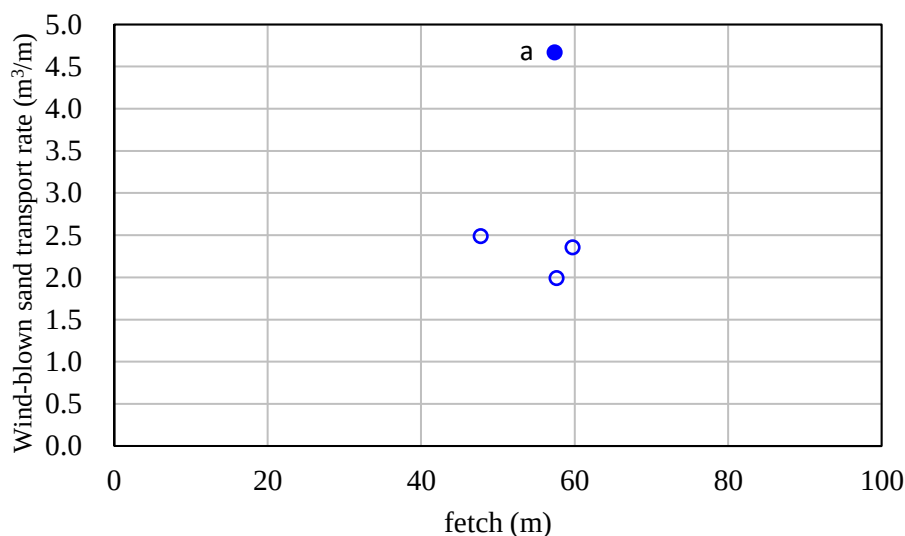


図 2-8 フェッチと飛砂量の関係 (NWbW)

2.1.5.3. 砂浜海側での堆砂垣設置

砂浜海側での飛砂制御の堆砂垣設置事例が有る。富樫⁵¹は荒天時遡上波到達点近傍で高さ 1 m 程度の堆砂垣あるいは柵を設置し、通常時の飛砂によって小砂丘を構築し、内陸側に構築中の人工前砂丘を異常な荒天時における侵食から防止した事例を報告している。この事例では遡上帯からの飛砂発生を予測している。遡上帯から飛砂が発生していることは認識しているが、その発生量についての数量的認識は無い（発生量は未知である）。このようにして形成された小砂丘を防浪砂堤と呼んでいる。防浪砂堤は異常荒天時の高波遡上を緩和するための障害物、侵食を緩和する漂砂補給源となり（このような砂丘を犠牲砂丘, sacrificial dune と呼ぶことがある）、かつ通常の時期においては飛砂捕捉構造物として機能している。

米代西部森林管理署⁵²は構築中の人工前砂丘を異常な荒天時における侵食から防護する目的でバーム頂点海側近傍に防浪垣（あるいは防浪編柵）と呼ばれている柵状の構造物を構築している。防浪垣は風上、風下側に減風域を生じ、飛砂発生抑止機能、飛砂捕捉機能がある。防浪垣をバーム頂点海側近傍から通常の荒天時遡上波の到達点近傍に構築すれば防浪砂堤となる。

⁵¹ 富樫兼治郎：日本海北部沿岸地方に於ける砂防造林，秋田営林局，p.128，1937

⁵² 米代西部森林管理署：風に学んで，米代西部森林管理署，p.43-48，2001



写真 2-3 防浪垣

(米代西部森林管理署, 写真集「風に学んで」, 2001(平成 13)年, 写真 No.59)

これ等の事例の目的は風の力を利用して造成中の人工砂丘の防護である。本事業で目的とする海浜から陸側への飛砂流出阻止と目的が異なる。奥田ら⁴⁶、片野ら⁵³は、冬季に、遡上帯から 2~3 m³/m 程度の飛砂発生が有り、海浜陸端で計測される飛砂量の 1/4 ~ 1/3 の量になることを報告している。相当量の飛砂が遡上帯から発生している。防浪砂堤や防浪垣は、海浜から陸側への飛砂流出阻止に直接寄与しないが、海浜陸端に至る飛砂量を低減する。海浜海側のみならず中央部での堆砂垣の使用を考えても良い。海浜陸端に至る飛砂量が低減すれば、陸端における制御構造物の管理が容易になる。飛砂が発生する冬季には海浜の利用は少ない。冬季限定の仮設堆砂垣の使用は飛砂制御の選択肢の一つである。

この場合、堆砂垣の高さは、砂浜での視界を遮らない高さ、120 m 以下が適切である。堆砂垣の空隙率は、堆砂垣の風上側風下側に最大の飛砂を捕捉する空隙率 40 %程度が良い(堀田・堀川⁴⁵)。しかし、空隙率が同じでも空隙の形状、大きさで風の透過性が異なり、飛砂の捕捉効率が異なる。冬季における新潟海岸に設置されている穴開き鋼板のフェンスの観察では、大きさ 1 cm 程度の孔でも、塵芥、砂、氷で目詰まりしている例が多々見られる。空隙の大きさは 1 cm 上が望ましい。

2.2. トレンチ⁵⁴

2.2.1. 飛砂制御構造物としてのトレンチ(飛砂捕捉溝)開発の経緯

岩垣⁵⁵は、飛砂粒子は風の乱れによって空中に浮遊状態にあると仮定し、拡散方程式を用いて飛砂現象を解析した。その結果の一つ、風が陸より海に向かって吹く場合、風速 15 m/s 程度で浮遊する砂粒子の約 99 %が汀線からおよそ 7 m 以内の範囲に落下すると予測し、その予測の妥当性を示す事例として鳥取県河内川における幅約 7 m の河川による飛砂の内陸への侵入阻止の例を挙げている。

⁵³ 片野明良, 清水利浩, 千田奈津子, 眞井 里菜, 有川太郎: 海浜地形変化から推定する遡上帯から発生する飛砂量について。土木学会論文集 B3 (海洋開発), 第 78 巻, pp.78-97, 2022

⁵⁴ 清水利浩, 蜂須賀和吉, 中川洋一, 吉田秀樹, 伊東啓勝, 坂井隆行: トレンチによる飛砂防止対策の試み, 海岸工学論文集, 第 55 巻, pp.541-545., 2008

⁵⁵ 岩垣雄一: 海岸地における飛砂について, 土木学会誌 35(6), pp.31-35, 1950

岩垣の結果および Horikawa and Shen⁵⁶の水平全量型捕砂器の捕砂効率が高いという実験結果を考慮して、堀川ら^{57,58}, Kubota et al.,⁵⁹, Horikawa et al.⁶⁰は、砂浜上に深さ1 m 以上、幅数 m の凹地（トレンチ）を開削することで、飛砂量の測定が可能であると考え現地観測を実施した。その結果は、深さ1 m 幅数 m のトレンチは効果的に飛砂を捕捉することを示した。その後、Hotta・Horikawa⁶¹は、粒径 0.3 mm の砂粒子の飛行距離を風洞内で測定し、摩擦速度が 100 cm/s 以上であっても砂層末端より 1 m 以内に 95 %以上の砂が落下する実験結果を報告している。

塩沢ら⁶²は、新潟西海岸にて水平分布型捕砂器を用いて砂粒子の飛行距離を計測し、ほぼ 100 %に近い砂粒子の飛行距離は 2 m 以下であることを報告している。堀川ら⁶³, Hotta et al.⁶⁴は風洞内のトレーサー実験、及び数値実験から、トレンチの形状として、アスペクト比（縦と横の長さの比）約 6 程度が良い事を報告している。

以上の結果からトレンチ（飛砂捕捉溝）は現地における飛砂制御構造物として十分に活用できると考えられた。堀川ら^{57,58}の現地観測期間は約 1 週間に限られている。現地におけるトレンチの飛砂捕捉効果、長期使用を検証するために現地実験を実施した。2.2.2 節、2.2.3 節にその結果を示す。

トレンチ内、トレンチ近傍の飛砂移動の理解を助けるためにトレンチ内の「風の間」（風況）の風洞実験、数値実験の例を図 2-9 に示す。図 2-9(1),(2) は風洞におけるトレーサー実験の結果である。

図 2-9(1)の上端はアスペクト比 2 のフローパターン（flow pattern, 風の間）を示す。トレンチ内に循環流が形成されている様子が解かる。ここで、矢印はトレーサー（tracer, 追跡子）の軌跡を示すもので、風速ベクトルでは無い。風速測定には熱線風速計を用いている。風向は検出されない。風下側 1 H の風速分布を参照すると、下方に風速は減じ、底面から 0.5 H 辺りで風速はゼロになり、更に下方では風速が大きくなっている。トレーサーの方向から、この部分は風向が逆になっていることが解かる。厳密に云えば、更に底面に近づくと風速はゼロに近づく。しかし、測定点が疎なため、その様相は検出されていない。図は風の間の概略を示すものである。

⁵⁶ Horikawa, K. and H. W. Shen : Sand movement by wind action the characteristics of sand traps, U.S.Army Corp of Engrs, B E B Tech Memo., No 119, 51p, 1960

⁵⁷ 堀川清司, 堀田新太郎, 久保田進：現地海浜にける飛砂量分布の観測, 第 29 回海岸工学講演論文集, pp.269-273., 1982

⁵⁸ 堀川清司, 堀田新太郎, 久保田進, 香取完和：トレンチトラップによる飛砂量の現地観測, 第 30 回海岸工学講演会論文集, pp.303-307., 1983

⁵⁹ Kubota, S., K. Horikawa, S. Hotta : Blown sand on beaches, Proc. 18th ICCE, ASCE, pp.1181-1198., 1982

⁶⁰ Horikawa, K., S. Hotta, S. Kubota, S. Katori : Field measurement of blown sand transport rate by trench trap, Coastal Engineering in Japan, Vol. 27, JSCE, pp.213-232., 1984

⁶¹ Hotta, S and K. Horikawa : Vertical distribution of sand transport rate by wind, Coastal Eng. in Japan, Vol.36, No.1, pp.91-110, JSCE, 1993

⁶² 塩澤俊彦, 中谷内信一, 赤澤守, 玉城重則, 黒木敬司：新潟西海岸における飛砂の現地観測, 海岸工学論文集, 第 40 巻, pp.281-285., 1993

⁶³ 堀川清司, 田中寛好, 畑中勝守, 山谷直昭, 堀田新太郎：飛砂捕捉溝に関する研究, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp.671-675., 1996

⁶⁴ Hotta, S., K. Hatanaka, H. Tanaka, K. Horikawa : The trapping trench as a countermeasure to control wind-blown sand on beaches, Proc. of ICCE, 2534-2547., 1998

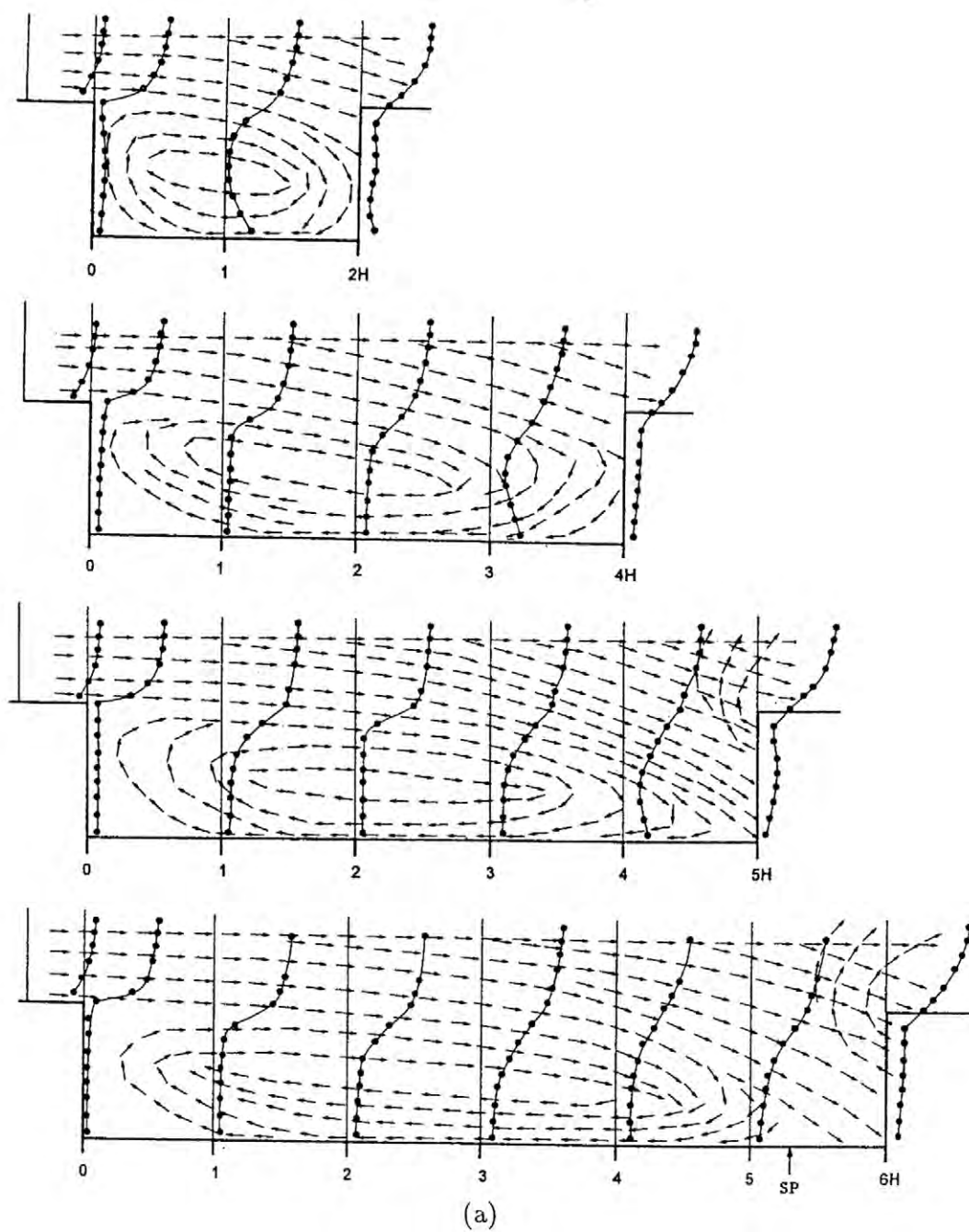
図 2-9(2)の下端はアスペクト比無限大（流れの段落ち）のフローパターンを示す。トレンチ風上端から $7.2 H$ のあたりでよどみ点があり、主流は $8 H$ あたりで接地している。若し、 $H=50 \text{ cm}$ であるなら、トレンチ風上端から $4 H$ 、 2 m の間に飛砂量の約 99% 程度がこの範囲内に堆積することになる。主流が接地する $8 H$ (4 m) 辺りから新たに飛砂が発生することになる。

トレンチ形状では、アスペクト比 B/H が小さくなるとよどみ点は風上に移動している。 B/H が 5 の場合では、よどみ点が明確に識別されていない。 B/H が 6 以上になると、トレンチ風上端から下降を始めた主流がトレンチ風下端壁面全体に直撃している。トレンチ風下端壁から反流が生じ、風下端近傍に激しい乱れが生じることが予想できる。この様相は B/H が 5 の場合から風下端壁面からのトレーサの軌跡から理解できる。同様な事象（結果として、トレンチ風下端壁面の崩壊が激しい事実）は、堀川ら^{57,58}も現地で観測している。結果として、トレンチの規模は深さ、 H が 50 cm 以上、アスペクト比 B/H は 5 より小さいことが望ましいことになる。

以上は、風がトレンチに直角な方向から吹く場合である。風がトレンチに斜めに吹く場合、トレンチの形状が異なる場合についてのトレンチ内の風の場合についての研究は見当たらない。

【補足】

トレンチ (Trench) 流体力学では Open cavity
アスペクト比 (Aspect ratio : B/H) 幅／深さの比
段落ち Step down or Back step
循環流 Cell
よどみ点 Stagnation point



SP : Stagnation point.

図 2-9(1) トレーサー実験によるトレンチ内の風の間 (風況)

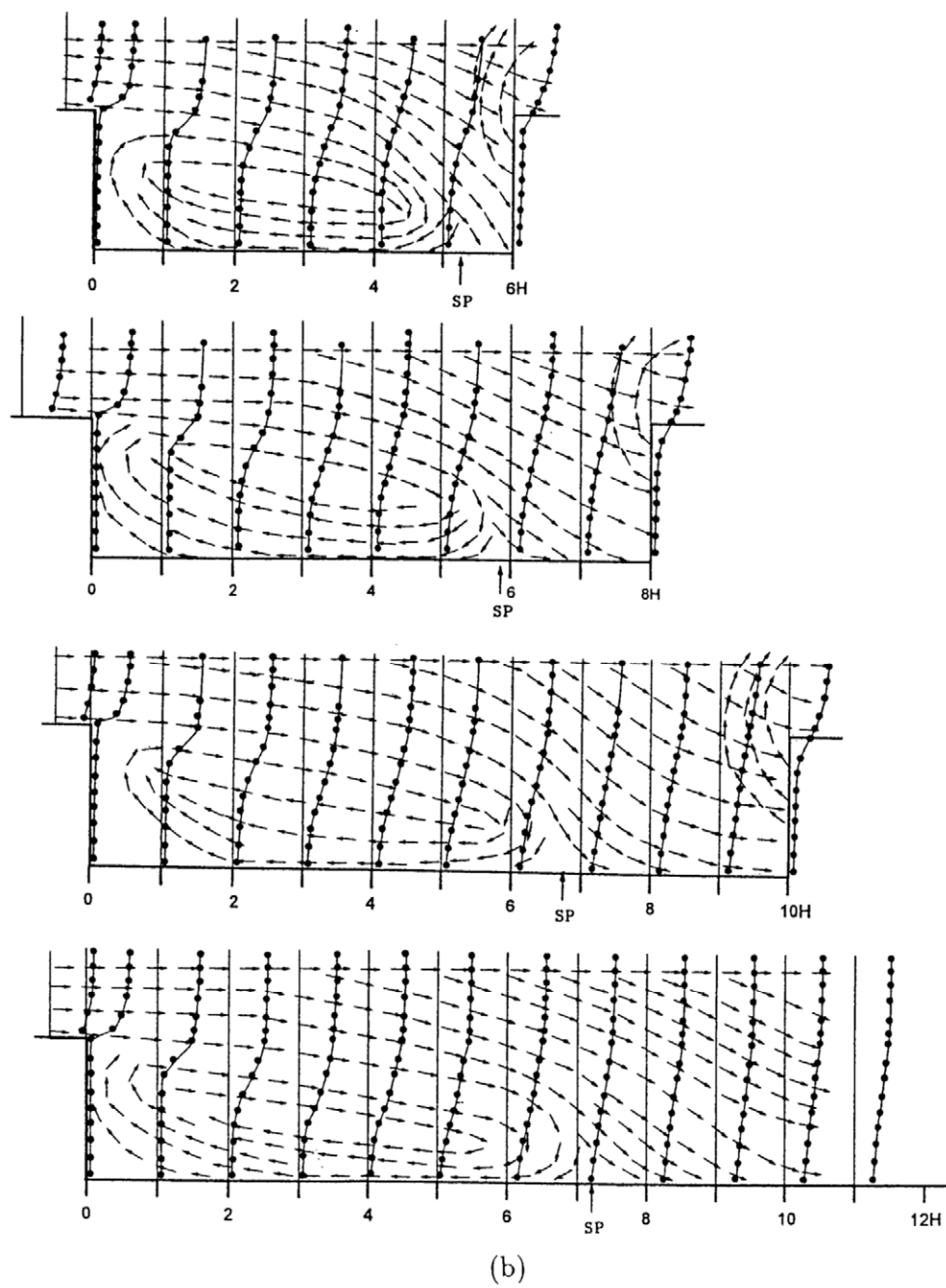


図 2-9(2) トレーサー実験によるトレンチ内の風の間 (風況)

2.2.2. 長方形断面トレンチの現地実験

飛砂量測定のために短期間トレンチを利用した事例は有ったが(堀川ら⁵⁸, 塩澤ら⁶², 船越ら⁶⁵), 砂制御構造物として長期に使用した事例は無かった. それ故, トレンチの飛砂制御構造物として実用性を検証するために, 2008(平成 20)年冬季に現地実験を実施した.

図 2-10 にトレンチの配置を示す. トレンチは長さ 30 m, 幅 5 m, 深さ 1 m で卓越風向に直交するように掘削してある. 記号 A, B, C, D は地形変化測量線である. 図 2-11 にトレンチ内の飛砂堆積過程を示す.



写真 2-4 翼堤と2列フェンスによる飛砂対策工

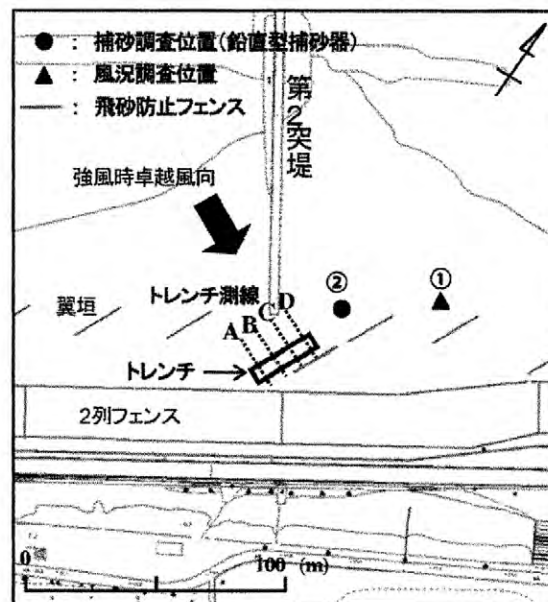


図 2-10 第2突堤周辺のファンス配置とトレンチ調査位置⁵⁴

⁶⁵ 船越晴世, 大野正人, 阿部勝雄, 鈴木幸一, 黒木敬司, 玉城重則: 飛砂防止対策について, 海岸工学論文集, 第 40 巻, pp.291-295., 1993

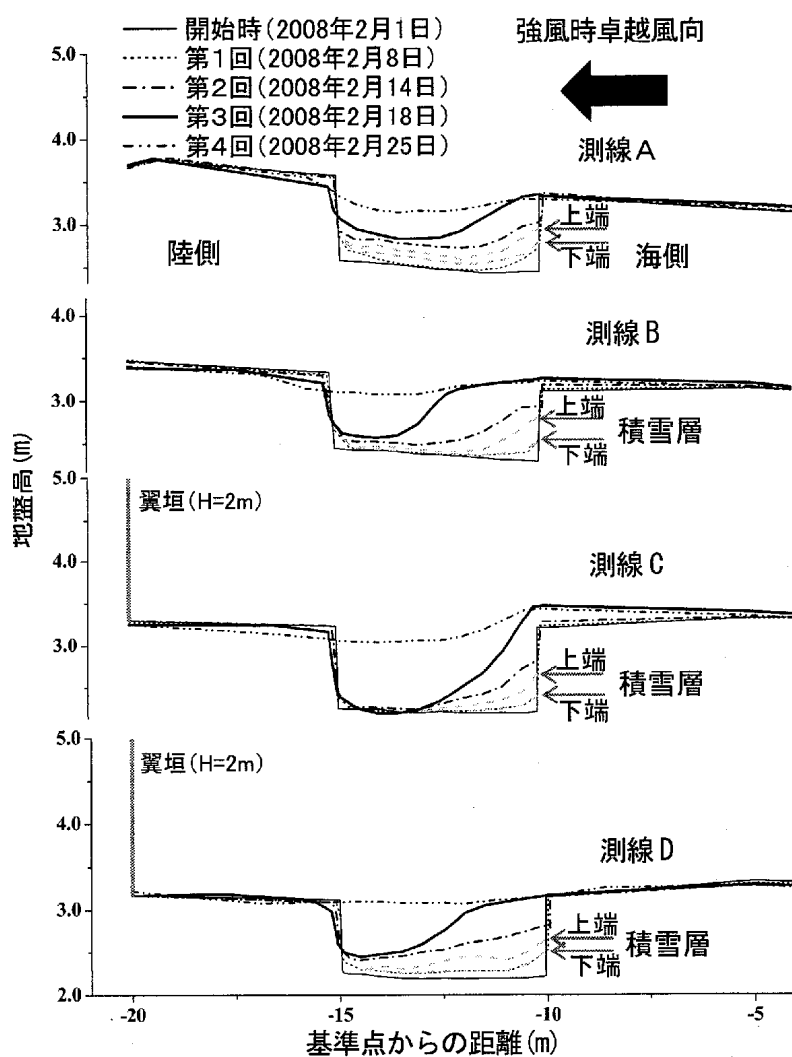
図 2-11 トレンチの断面測量結果⁵⁴

写真 2-5 トレンチ掘削直後 (2月1日撮影, 陸側より)



写真 2-6 第3回測量時（2月18日撮影，海側より）



写真 2-7 2月24日の荒天後（2月25日撮影，陸測より）

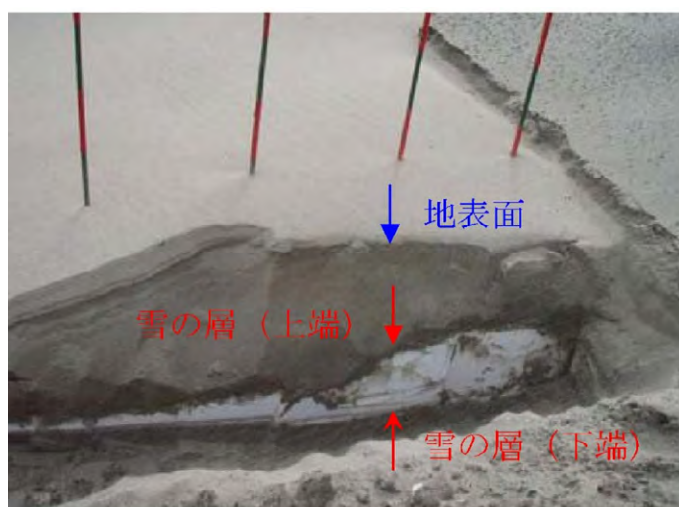


写真 2-8 トレンチ内の積雪層（2月14日撮影）

写真 2-4～写真 2-8：2007(平成 19)年度新潟西海岸技術委員会（第3回）資料より引用

2008(平成 20)年 2 月 1 日のトレンチ掘削時から 2 月 24 日の異常高波遡上によるトレンチ埋没するまでに 4 回、埋没後に 1 回の断面地形が測量されている。地形変化測量範囲はトレンチ内 5 m, 風下側 5 m, 風上側 10 m, 計 20 m である。図 2-11 の埋没以前(第 4 回測量まで)測量結果は次のような結果を示している。

- 1) 時間が経過してもトレンチ風上側端はほぼトレンチ掘削時の地盤高を保ちながら(あるいは堆積して多少地盤高を上げながら、測線 B,C), トレンチ内部は風下側にある角度(安息角より小さい)を持つ斜面を形成し、風下側に堆積が進行している。
- 2) トレンチ風下端の風上側に凹部が残っている(飛砂保留能力の余力がある)。
- 3) トレンチ風下端から風下側 3~4 m の範囲では時間の経過に伴い、僅かであるが砂面は低下している。
- 4) 2), 3)の事実からトレンチを超えて陸側に移動する飛砂がほとんど無いことが推定できる。

新潟西海岸は気象の変動、海象が厳しい海岸である。現地実験の結果は、管理維持(飛砂捕捉、保留能力の維持)を前提としたある一定期間、気象・海象の厳しい海岸でもトレンチは飛砂制御に応用できることを実証している。

最終的には、2 月 24 日の異常高波の遡上によってトレンチは埋め戻されている。図 2-11 の 2 月 25 日の測量結果(細実線)を見ると、トレンチ海側での地盤高の低下が無いが、トレンチ陸側での地盤が低下している。荒天時の遡上波は侵食性が強い。トレンチを埋め戻した砂は陸側から移動してきた砂の可能性が高い。トレンチは遡上波の引き波によって海側に移動する砂を残存していた凹部に保留したことになり、トレンチは侵食に対しても有効に機能すると考えることもできる。

2.2.3. 逆台形断面トレンチの現地実験

上述の現地実験では、トレンチの形状として、矩形断面が用いられている。次節に述べる現地実験では、トレンチの形状として逆台形の断面が用いられている。飛砂の捕捉能力には問題は無かった。トレンチは、跳躍距離が短い飛砂粒子を風が直接砂面に作用しない空間に至らしめ、その空間で飛砂の運動を弱め静止化する。飛砂の運動が継続できない風速でのある程度の大きさの空間を用意できれば、飛砂の運動を止めることが可能である。トレンチの風上側勾配を緩くすることは、飛砂の運動が継続できない風速での空間(飛砂を収容する空間)を減少させることになる⁶³。しかし、現実の問題として、トレンチ風上端の急勾配は、湿润状態にある砂層の粘着力を期待している。砂層の安定性を考えると、勾配は乾燥砂の安息角まで緩やかにしても良い。

2.2.3.1. 2013(平成 25)年度の現地実験概要

2013(平成 25)年度冬季に植生帯風上側に掘削した逆台形型トレンチトラップの堆積過程の検証実験をした。以下に、その概要を示す。

(1) トレンチの位置

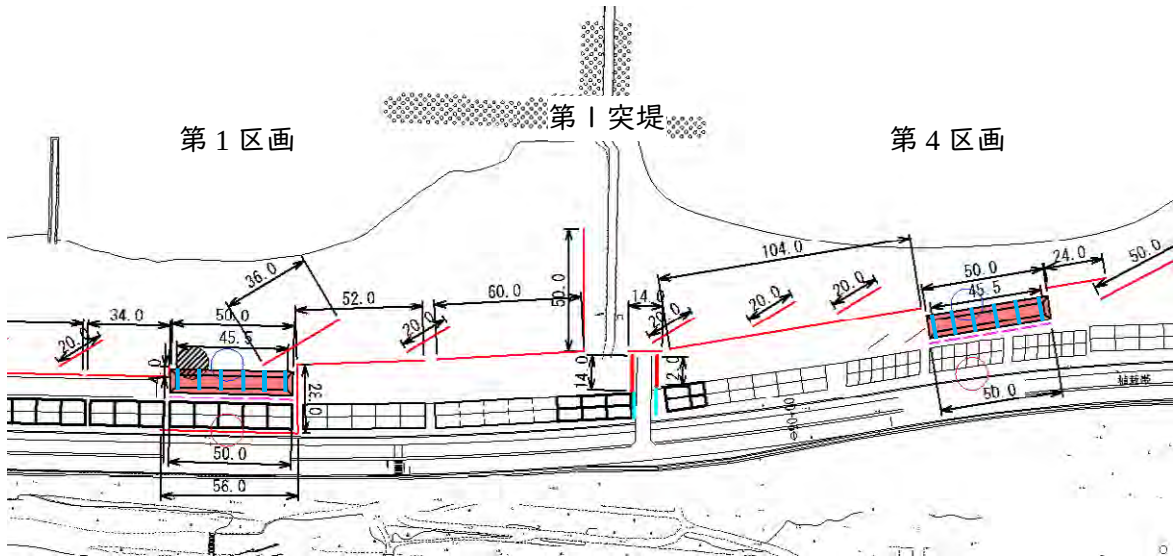


図 2-12 横断測量（トレンチ）の測線図

(2) トレンチの詳細

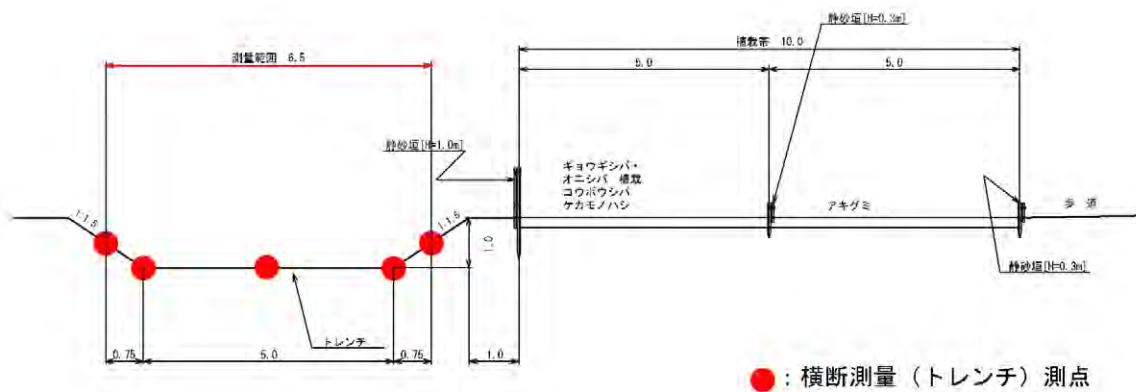


図 2-13 測量（トレンチ）詳細図

(3) トレンチ内測量日

表 2-2 横断測量（トレンチ）の実施日と目的

回数	実施日	実施目的
1 回目	2013(平成 25)年 12 月 24 日	トレンチの初期形状.
2 回目	2014(平成 26)年 1 月 24 日	1 カ月が経過後. トレンチの埋没状況の把握.
3 回目	2014(平成 26)年 1 月 30 日	1 月 26 日に強風発生. トレンチ内の堆積状況把握.
4 回目	2014(平成 26)年 2 月 3 日	トレンチ内の堆積状況把握.
5 回目	2014(平成 26)年 2 月 18 日	トレンチ内の堆積状況把握.
6 回目	2014(平成 26)年 2 月 26 日	観測終了時のトレンチ形状

2.2.3.2. 観測結果

トレンチの状況を写真 2-9, 横断面形状を図 2-14, 図 2-15 に示す。

- 1) トレンチは徐々に埋没する傾向を示す。
- 2) 2月26日の時点でも埋没状況は3割前後である。トレンチが十分に機能していると考えられる。
- 3) 第1区画, 第4区画ともに, 西側(関屋側)の測線ではトレンチ底面の全底面に堆積している。2次元的な地形変化が支配的であることを示している。

第1区画

1月6日



第4区画



1月24日



2月16日



写真 2-9 トレンチの状況

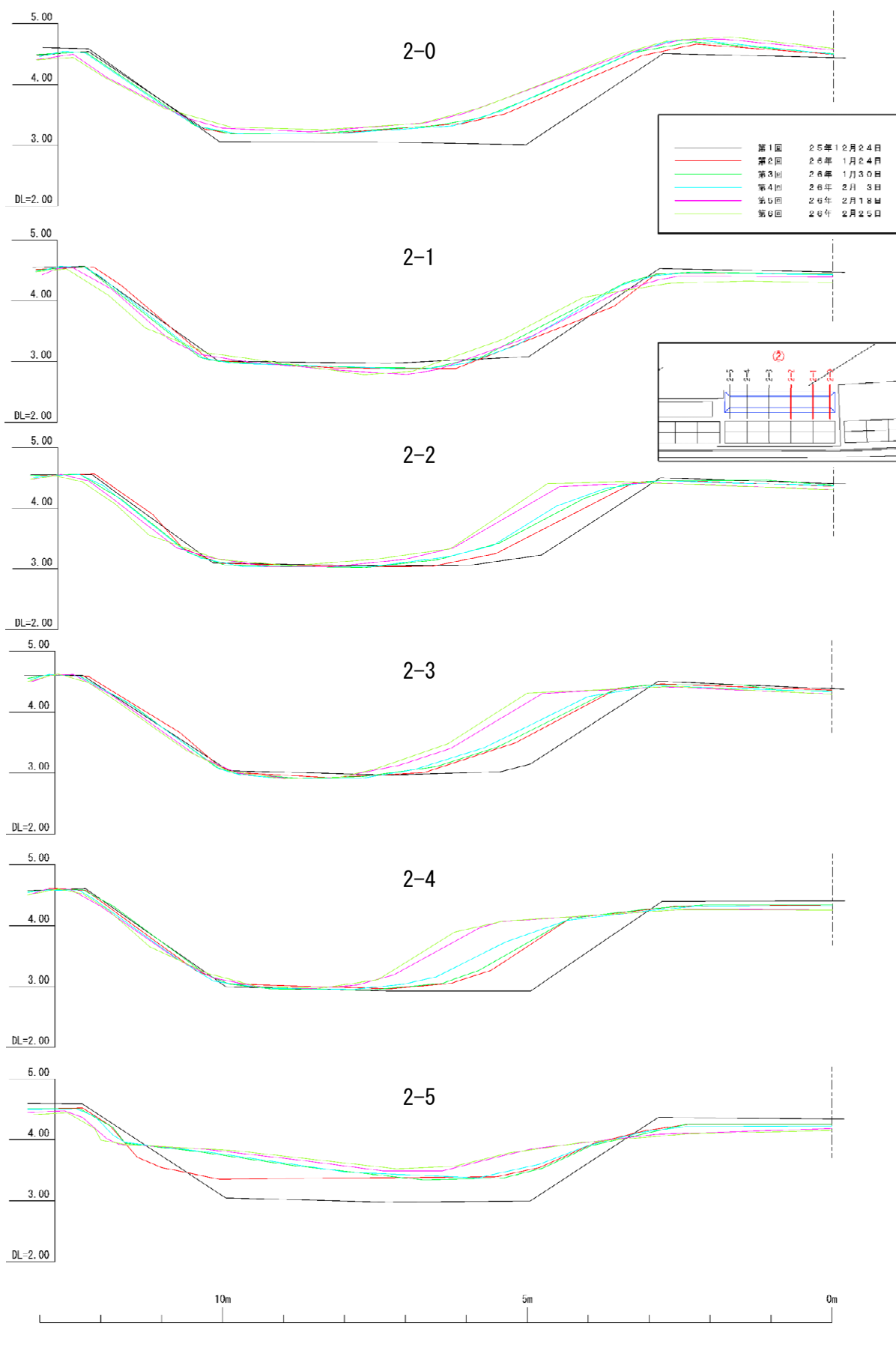


図 2-14 第1区画のトレンチの横断面図

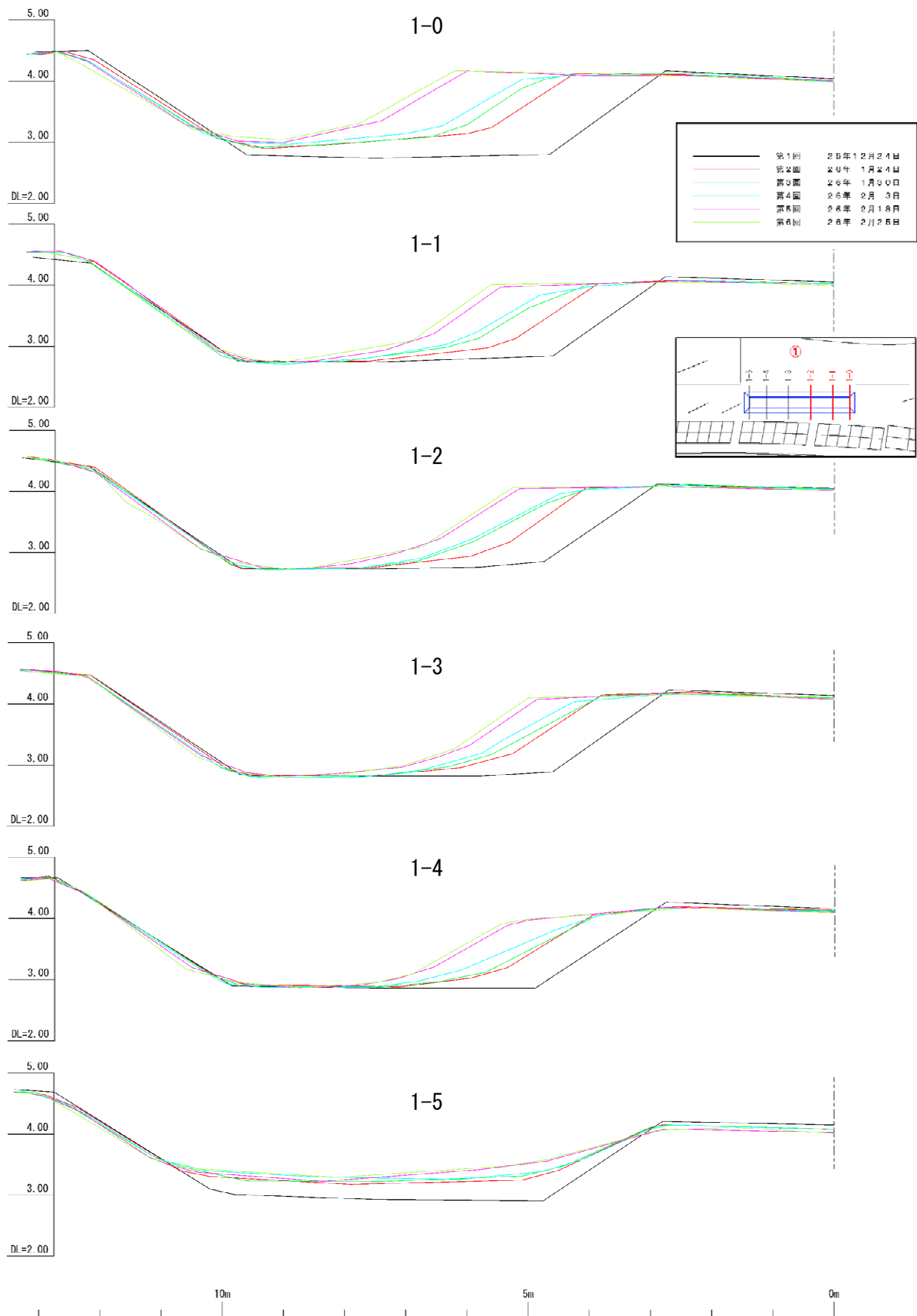


図 2-15 第4区画のトレンチの横断面図

2.3. 植栽（砂草）^{66,67,68,69,70}

2.3.1. 植栽の飛砂制御機能と当海岸への適用性

砂地に生育できる砂草や灌木（樹高 2 m 以下の低木）を砂浜に植付けることを植栽と呼ぶ。植栽は飛砂制御法として有力な工法であり、古くから使用されている工法である。砂草植栽は砂面を被覆し、砂面に作用する風の力を低減し、飛砂発生を阻止する。また、砂草群の空間に飛砂を取り込むこともできるが、その捕捉量は限られており、大量の飛砂の捕捉は期待できない。灌木林は、風に乱れを与え風速を減じ、飛砂を捕捉・静止化する能力がある。適切な密度にある灌木林には相当量の飛砂の捕捉・静止化が期待できる。しかし、灌木林の密度が疎な場合、飛砂は灌木林を通過し、飛砂の捕捉・静止化が出来ない。

植栽による飛砂の制御についての多くの現地調査、現地実験がある。風洞実験もある。しかし、工学的に有用であり一般に適用できる植栽法は、未だ確立されていない。参考となる植栽についての簡略な指針は、「治山技術基準解説、防災林造成編、林野庁、1992」にある。

植栽に用いられる砂草・灌木の成長繁茂は海岸砂の特性、気象条件、植物の特質に関係する。植栽に拠る飛砂制御を考慮する場合、以下の点に留意する必要がある。

- i) 海岸砂の特性（粒度、粒度組成、砂の形状）と砂草・灌木に合い性がある。
- ii) 砂草・灌木の成長は季節（気温、降雨）の影響を受ける。冬期は植物の成長しない季節である。それ故、砂草や灌木の成長による捕捉・静止化能力の維持は期待できない。冬期は、植栽は枯れた砂草の砂面の被覆、葉の落ちた灌木による減風作用に限定されることになる。
- iii) 長期の飛砂制御のために植栽される砂草・灌木に求められる性質は、飛砂の堆積速度よりその成長速度が早いことである。飛砂の堆積速度が早く、砂草や灌木が飛砂によって埋れてしまえば、もはや植栽の捕捉・静止化能力は期待できない。
- iv) 上記 3 項目に関連して、砂草・灌木の種の選択において、他の海岸にある砂草や灌木を導入して劇的な効果を得ることもあるが、失敗することも多い。植栽する草木は現地に自生している草木を用いる方が無難である。日本で用いられている砂草はコウボウムギ、ケカモノハシ、ハマニンニク、オニシバなどである。灌木としてはアキグミ、ハマナスなどがある。

前述の植栽の特性の基に新潟西海岸日和山地区の状況を検討する。

- a) 養浜海岸である。養浜砂は新潟東港の浚渫砂である。採取地点は信濃川河口右岸、投棄地点は信濃川河口左岸にあり、距離的には遠く離れていない。養浜砂と現地砂との差異はほとんどない。
- b) 飛砂制御が必要な時期は冬季である。砂草は枯れ、葉を落とす灌木が多い。

⁶⁶ 田中一夫・中島勇喜・遠藤治郎・金内英司：海岸の砂防，岩崎書店，東京，p.86。（絶版）同一の内容は土砂災害対策-崩壊・地滑り・落石・飛砂対策（2）-砂防学講座 7（2），山海堂，pp.160-246.，1985

⁶⁷ 林野庁監修：治山技術基準解説，防災林造成編，砂草植栽，pp.139-191，1992

⁶⁸ 藤原宣夫：海浜地の緑化と植栽基盤の整備，岩田・喜田監修 土の環境圏，第 10 章 2 節，フジテクノシステム，東京，p.736.，1997

⁶⁹ 海岸工学委員会：海岸施設設計便覧，5.3.5 飛砂・飛沫対策施設，土木学会，2000

⁷⁰ 財団法人港湾空間高度化センター港湾・海域環境研究所，港湾緑地の植栽設計・施工マニュアル

c) 砂浜の幅に限りがあり，狭い．

以上の条件下で植栽の可能性を考える．砂浜の幅に限りがあることから，背後地に流出する飛砂を収容するに足りる植栽に必要な領域の確保が難しい．背後地に流出する飛砂を許すこと無く，植栽の空間に飛砂を収容し，地表面を高めて行く方法は砂浜裸地の砂を減少させることになる．植栽地から裸地砂浜に堆積した砂を戻す場合は植栽を破壊することになる．以上の観点から，植栽は当海岸における主要な制御構造物としては適切ではない．

一方，海岸景観から植物帯の形成の要求がある．この要求を満たすために，海浜の陸側端に限られた幅の植栽帯を設ける必要がある．この植栽帯は，異常な強風時に植栽帯の海側にある主制御構造物を越えて飛来する飛砂を収容する予備空間として，制御体系に組入れれば良いことになる．この植栽帯の形状として，幅の限られた帯状の植生帯，高さの低い三角形形状（低小砂丘，簡単に低砂丘と呼ぶことにする）などが考えられる．

上述の検討により，当海岸において植栽の飛砂制御効果について，積極的に評価することは無かった．

2.3.2. 日和山地区に自生する海岸植物

2001(平成 13)年度に，対象地に自生する植生についての現地調査を実施した．調査は夏季と冬期で実施され，以下の結果を得た．

- 1) ハマヒルガオ・ハマニガナは夏季には高い占有率を誇るが，冬期には減少し砂の地下に埋没するか，上層部が枯れた状態となっているため飛砂防止には寄与していない．
- 2) ハマニンニクとカモガヤの地被率は夏季と冬期と変わることがない．ハマニンニクとカモガヤは飛砂防止に大きく寄与している．
- 3) 十分成長したハマニンニク・カモガヤ等の風下側に，落葉したアキグミ，ナワシログミが自生しており，飛砂防止に大きく寄与している．

上記の結果は，通常の日本の砂浜における植生の状態と同じである．汀線からある程度の陸側で，風と飛砂との攻防を繰り返す疎な砂草帯，その風下側で繁茂した砂草帯，さらに，その風下側に灌木帯が構成されていることを示している．

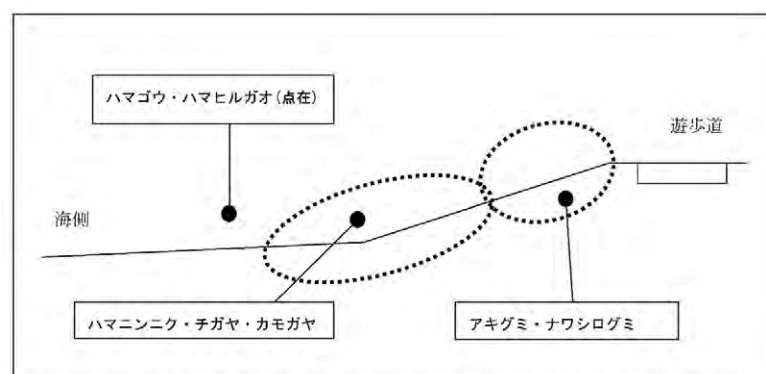


図 2-16 冬期における飛砂防止を考慮した断面イメージ⁷¹

⁷¹ 新潟西海岸の飛砂対策技術検討 資料,新海委 19-1-3,平成 19 年 8 月 28 日



ハマゴウ



ハマヒルガオ



ハマニンニク



チガヤ



カモガヤ



アキグミ



ナワシログミ

写真 2-10 対象地に自生する植⁷¹

2.3.3. 西海岸（日和山地区）の植栽の方向⁷²

植栽の機能，上記の現地調査，海岸景観から，日和山地区の植栽（砂地植物）の適切な配置は以下に示すようになる。

1) 草地の植栽

a. 冬の飛砂防止を考慮した草地の植栽

ハマニンニク，カモガヤ，チガヤ，コウボウシバ

b. 鑑賞的機能を有する草地の植栽（飛砂防止機能は期待できない）

ハマヒルガオ，ハマゴウ，ハマナス

2) 低木の植栽

c. 飛砂発生抑止機能と捕捉・静止機能を併せ持つ低木の植栽

アキグミ，ナワシログミ

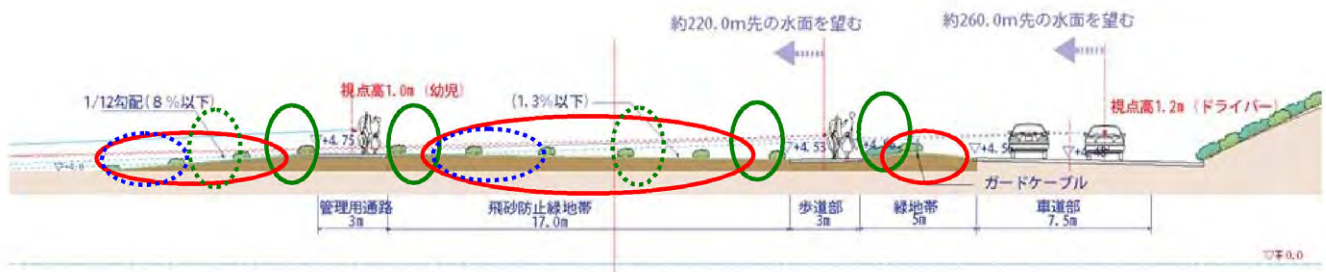


図 2-17 機能的分類による植栽配置の例⁷²

（赤：a，青：b，緑：C，点線は各緑地帯の中で場所的な自由度を持たせて配置する）

2.3.4. 現地海浜の長期観察

継続した現地砂浜の観察は砂浜上での植物について，以下のような事象が観察された。

- 養浜後の砂浜陸端では，波の遡上がなければ2年目で砂草の自然発芽が見られた。
波の遡上が無い限り，砂草は海側に広がる。しかし，冬季に波の遡上があれば，その年の砂草の発生は無くなる。
- 砂浜幅が限られている場合，冬季の波の遡上状態，風の状態によって，砂草発生海側端は異なる。相応の砂浜幅が有り波の遡上が無い領域では，経年で砂草発生域は海側に拡大する。
- 植栽に関する幾つかの現地実験が実施された。実験終了後，その実験した場所の施設，植生が撤去されないで，放置された場合があった。

その後の観察によると，次のような状況が観察された，

- 実験地が裸地砂浜であった場合，2，3年後には植生を保護していた堆砂垣，静砂垣が損傷し，植物は枯死し，元の裸地砂浜に戻った。
- 実験地が既存の植生帯に合った場合，植栽された植物種より周囲の既存の植生帯に生育

⁷² 新潟西海岸の飛砂対策技術検討資料，新海委 19-1-3，平成 19 年 8 月 28 日

していた植物種が優勢に繁茂していた。

この観察は、人為的な保護が無くなれば、植物は自然の条件に合うように同化することを意味する。つまり、自然に合わない、特定の植生状態を保つためには、絶えず人為的な保護（管理維持）をしなければならない、こと意味する。

3. 飛砂対策工の平面配置^{73,74}

当該海岸の飛砂制御に対応可能と判断された制御構造物、植栽（低砂丘）、トレンチ、堆砂垣のどのような組み合わせが最も効果的かを検証するために制御効果に関する現地実験を実施した。以下がその内容の概略と得られた結果である。

3.1. 現地実験の内容

複数の制御構造物（植生帯、静砂垣、トレンチ、複数の堆砂垣、除砂帯）を組合せた複合構造物群（面的防護体系）の飛砂制御効果を検証するため、2009(平成 21)年の冬季、現地実験を実施した。^{注 1)}

注 1) 堆砂垣：飛砂を捕捉・堆積を目的とする垣、静砂垣：植栽の初期の防護を目的とする垣

4 組の組合せ（パターン）が検証された。

パターン 1 は海側から翼垣群（トランスバース形式）、除砂帯、静砂垣、植生帯からなる。

パターン 2 は翼垣群、除砂帯、トレンチ、静砂垣、植生帯からなる。

パターン 3 はトレンチ、静砂垣、植生帯からなる。

パターン 4 は植生帯、堆砂垣、除砂帯からなる。

図 3-1 に構造物の平面配置、図 3-2 に配置横断面を示す。図中×印は吹流し捕砂器を使用して浮遊砂鉛直分布を測定した地点である。

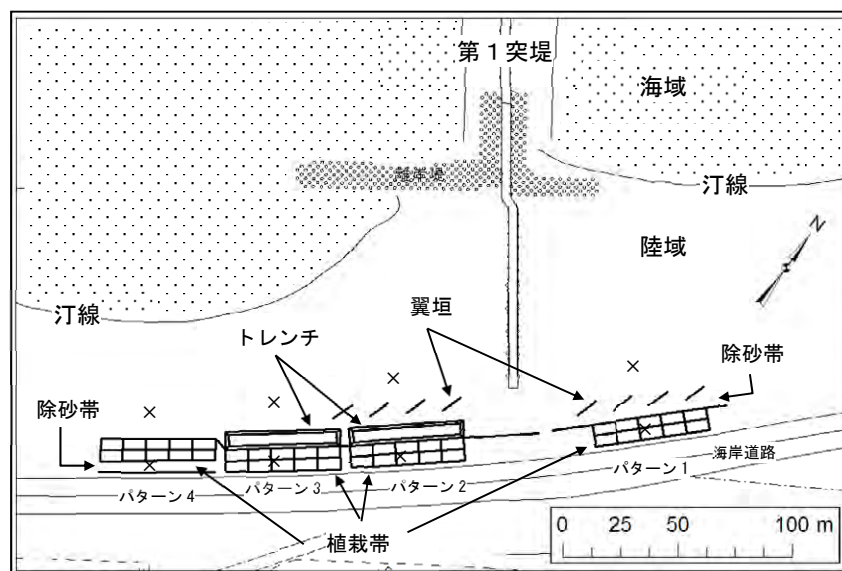


図 3-1 構造物の平面配置

⁷³ 松井康彦，佐藤敏文，澁谷覚，赤塚宣：新潟西海岸における飛砂対策について，2010

⁷⁴ 片野明良，久留島暢之：飛砂対策工の効果に関する現地観測，土木学会論文集 B3（海洋開発），Vol.67，No.2，pp. I -1081- I -1086.，2011

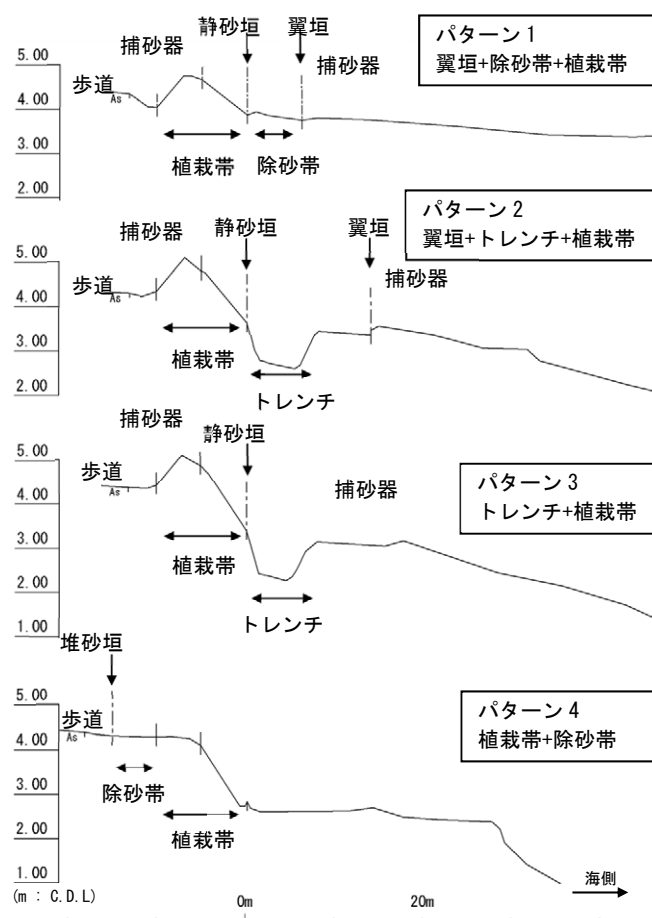


図 3-2 配置横断面

植栽帯の岸沖方向の幅は 10 m で砂草の苗が 2009(平成 21)年 10 月に植付けられている。苗を保護するため植栽帯の海側端，中央，陸側端に高さ 30 cm 静砂垣が立てられ，砂表面全体が敷き藁で覆われている。植栽帯の海側 5 m は勾配 1/10 の斜面，陸側 5 m は水平になっている。

トレンチは深さ 1 m，地表面幅 8 m，底面幅 5 m，斜面勾配 1.5/1.0 の逆台形形状に掘削されている。

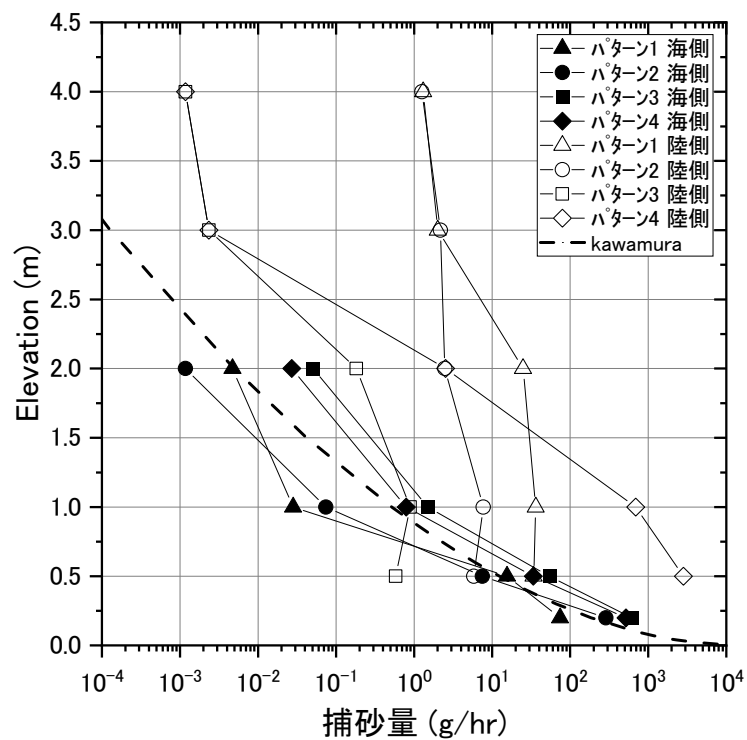
除砂帯とはトレンチが埋没あるいは翼垣群が埋没し機能が低下した時に除砂する（管理維持）のための重機の活動範囲であり，同時に海側の構造物を越えてきた飛砂の予備収容空間としての機能を持たせることを意図している。パターン 4 における堆砂垣は高さ 1 m の葦簀垣である。翼垣群は高さ 1 m，長さ 10 m の葦簀垣 4 基を 15.8 m 毎にトランスバース形式（図 3-4 参照）で配置したものである。葦簀垣は，卓越風向西北西（WNW）に直角な方向に配されている。



写真 3-1 パターン 1 の植栽の写真

3.2. 浮遊砂観測

浮遊砂観測を 2010(平成 22)年 1 月 14 日, 1 月 22 日, 3 月 11 日, 3 回実施した. いずれの日も風速 10 m を超える強風日であった. 図 3-3 に 1 月 22 日の観測結果を示す.



Kawamura の係数 $G_0=1.0$ (g/cm²) $h_0=1.3$ (cm) $a=300$ (cm^{1/2}/s)

図 3-3 浮遊砂捕砂量の鉛直分布

図 3-3 から、次のような事柄が読み取れる。

- i) 構造物群の海側での 4 測点に多少のデータのバラツキがあるが、鉛直分布形状は同じと判断できる。図中実線は、河村の鉛直分布式を示す。平坦な砂浜上での鉛直分布に河村の式が適用できると判断してよい。
- ii) パターン 4 陸側では、鉛直分布形状はほぼ同じであるが、量が多い。パターン 4 では植生帯の海側に他の構造物が無い。植栽は砂浜からの飛砂で覆われ、砂面となっている。海側からの風は植生帯の斜面で加速され、かつ植生帯風下端にある堆砂垣による風の乱れの増加によって浮遊砂が増大したと考えられる。
- iii) パターン 3 陸側では高さ 1 m 以下では、その捕捉量は激減しているが、高さ 1 m、2 m では海側と陸側での捕捉量は概略同じである。トレンチは風場を乱すことが少ない構造物である。飛砂の約 90 %程度は高さ 0.2 m 以下の範囲に集中し、飛砂の約 95 %程度の 1 回の跳躍距離は 2 m 以下である。そのため海側から移動してくる飛砂のほとんど（100 %に近い）はトレンチ内に落下する。実際、観測時には植生帯への飛砂の堆積がほとんど無かった。地表面近くを浮遊していた浮遊砂の多くはトレンチ内に落下、高い領域（概略 1 m 以上）を浮遊状態で移動していた浮遊砂は、その浮遊の状態を多少は変えるが、変化が少ない状態で移動していたと考えればこの分布形状が理解できる。トレンチ風下端、植生帯風上端の境にある高さ 1 m の堆砂垣が有る。堆砂垣周辺に風場の変化によって、堆砂垣周辺に飛砂が発生する可能性はある。しかし、堆砂垣近傍での地形変化は見当たらない。発生した局所的な流れは弱く、飛砂の発生が生じなかったと推定できる。この堆砂垣は陸側の浮遊砂分布に影響を及ぼすことが無かったと推定される。
- iv) パターン 2 においては、高さ 50 cm は陸側と海側の高さの捕砂量はほぼ同じであるが、1 m より高い地点では陸側が多い。iii)項で述べたように、トレンチは風場を乱すことは無く、浮遊砂を減少させる。高い領域の浮遊砂の増大はトレンチの海側にある翼垣群に捩る風場の乱れの増大に起因すると考えることは妥当である。高さ 2 m の堆砂垣群の風の乱れによって発生した浮遊砂が陸側の高い領域の浮遊砂が増大させていると考えることが出来る。
- v) パターン 1 陸側の鉛直分布形状はパターン 2 に類似しているが、高さ 0.5～2.0 m の高さでは、パターン 1 が多い。パターン 1 にはトレンチが無い。トレンチの空間が無くなった分（この空間に落下した浮遊砂）浮遊砂が多くなったと考えられる。
- vi) 海浜平坦部（植栽帯より海側）に限っていえば、地表面上に凸形状の構造物（翼垣群）は風下側の浮遊砂を増大させている。

3.3. 各々のパターンの堆砂の状況（飛砂捕捉）

2009(平成 21)年 12 月 24 日, 2010(平成 22)年 1 月 18 日, 1 月 28 日に実施した地形測量, 及び期間中の観察から各々のパターンの堆砂の状況（飛砂捕捉）まとめると表 3-1 のようになる。

表 3-1 各パターンの堆砂の状況

パターン 1		パターン 2	
構造物	堆砂の状況	構造物	堆砂の状況
植栽帯 背後	地表面に僅かに浮遊砂の堆積が認められる程度。地形変化が生じるほどの堆積は無い	植栽帯 背後	地表面に僅かに浮遊砂の堆積が認められる程度。地形変化が生じるほどの堆積は無い
植栽帯	海側斜面に 20～30 cm 程度の堆積あり	植栽帯	堆砂は認められない。
静砂垣 近傍	20～30 cm 程度の堆積	静砂垣 近傍	風上側とトレンチ風下端に侵食（砂面低下）があり
除砂帯	堆積あり	トレンチ	20～30 cm の堆積あり。風上側の翼垣群の風の通り易い部分で堆積が多い。
翼垣群	埋没。風上風下 5 H 程度まで堆積。風下側での堆積が多い。	除砂帯	堆積と侵食がある。風上側の翼垣群の風の通り易い部分で侵食が見られる。
		翼垣群	埋没。風上風下 5 H 程度まで堆積。風下側での堆積が多い。

パターン 3		パターン 4	
構造物	堆砂の状況	構造物	堆砂の状況
植栽帯 背後	地表面に僅かに浮遊砂の堆積が認められる程度。地形変化が生じるほどの堆積は無い	堆砂垣 近傍	堆砂垣 30 cm 程度埋没 風下側, 風上側 2 m の範囲で堆積
植栽帯	堆砂は認められない。	除砂帯	20～30 cm の堆積あり。
静砂垣 近傍	堆積, 侵食は無い	植栽帯	植栽は埋没。20～30 cm の堆積あり。
トレンチ	1 月 18 日の時点でほぼ埋没		

表 3-1 から各パターンの飛砂捕捉機能をまとめると次のように記述できる。

- ・ パターン 1：堆砂垣群がほとんどの飛砂を捕捉する。風下側の堆砂垣、植栽帯への流下は埋没した堆砂垣群を越えて、あるいは翼垣群の風に対する遮蔽されていない部分から流下している。翼垣群の高さを高くする配置形状の工夫でほとんど（100%に近い）の飛砂を捕捉可能と考えられる。
- ・ パターン 2：パターン 1 の翼垣群を越えて風下側に流下した飛砂をトレンチで捕捉している。植栽帯への飛砂の侵入は無い。トレンチ風下端（堆砂垣前面）砂表面の侵食はこの部分に直接作用する風によって生じるが、その量は僅かで、風下側の堆砂垣、植栽帯への堆積として評価されていない。
- ・ パターン 3：トレンチは、ほぼ全量の飛砂を捕捉、風下側への流下は無視できるほど少量である。トレンチ風下端（堆砂垣前面）砂表面の侵食は少ない。トレンチ内の堆積が侵食の増加を妨げている、と考えられる。
- ・ パターン 4：植栽帯が埋没すれば、飛砂捕捉保留は期待できない。植栽帯で飛砂捕捉保留を期待するなら植栽に相応の高さが要求される。

図 3-4 に現地実験終了時の海浜地形を示す。幾つかの典型的な飛砂堆積地形が見られる。翼垣群（トランスバース配置）周辺の堆積地形はトランスバース配置の目的とする堆積地形である。パターン 3 とパターン 2 のトレンチ内の堆積は西側に多い。トレンチの風上側地形は、卓越風向 WNW の風下側に高くなることを示している。パターン 3、パターン 2 におけるトレンチ、パターン 2、パターン 1 における翼垣群は、飛砂捕捉機能を発揮している様相が見られる。

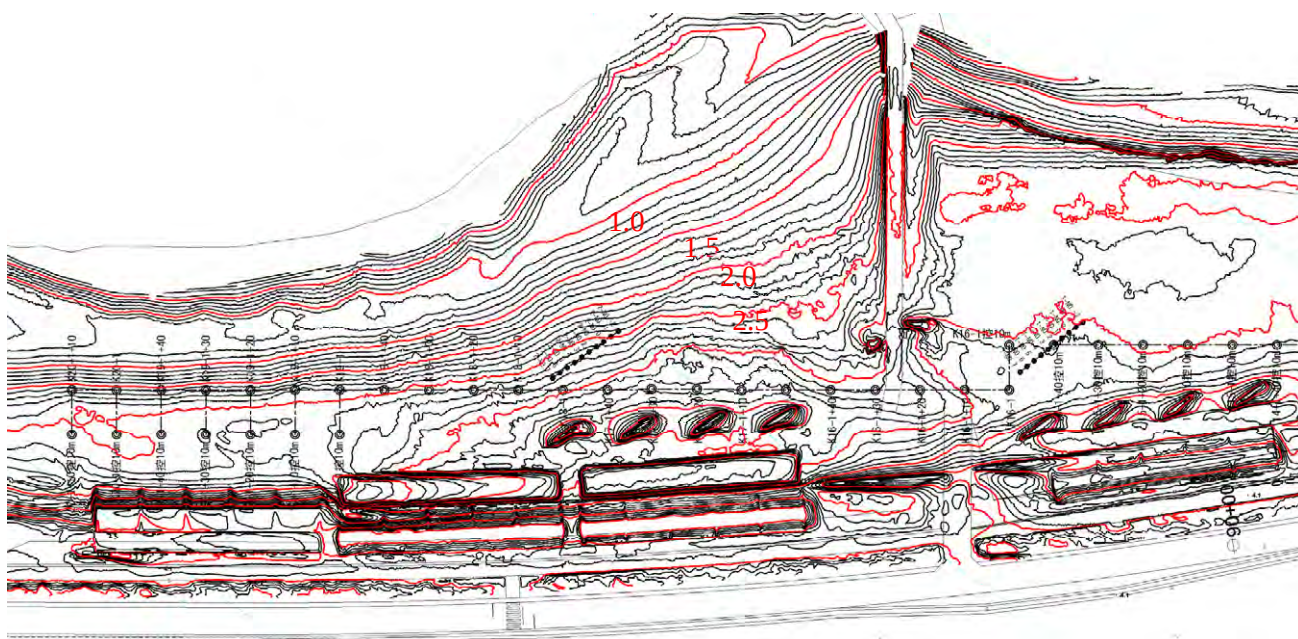


図 3-4 現地実験終了時の海浜地形（2010(平成 22)年 3 月 14・15 日）

3.4. 現地実験の結論

パターン 1, 2, 3 のいずれのパターンでも植栽帯背後に浮遊砂は存在するが、その量は地形変化が生じるほどの量では無い。内陸部への飛砂阻止の観点から、飛砂捕捉・保留の観点から見れば、パターン 3 が最良となる。パターン 2 は、浮遊砂の内部侵入はパターン 3 より多少多いが、植栽帯への飛砂堆積は、最も少ない。目的とする飛砂制御の観点（砂を海浜に留める）からはパターン 2 が最良と判断できる。パターン 4 は考慮中の海岸（日和山地区）の制御法として適切ではない。幅広い堆積性の海岸で植生、堆砂垣を用いて前砂丘を構築する場合に使用する制御法である。

松井ら⁷³は、各パターンのライフサイクルコストについて検証している。期建設費用、管理維持の観点からパターン 3 が経済的であると推定している。

4. 飛砂対策工の管理維持

4.2 項に記したように、飛砂の発生は冬季（12 月末から 3 月末）に限られる。この時期、海浜から養浜砂の流失を防止する飛砂捕捉機能の欠損があってはならない。

管理維持作業を二つの期間に分けて管理作業を行う。4 月中旬から 12 月初頭、飛砂の発生が少ない期間に各々の制御構造物の飛砂捕捉・堆積機能が想定の通り作用するように整備をする。12 月中旬から 4 月初旬までの期間は、制御構造物周辺に飛砂が有る程度堆積し、飛砂捕捉機能の欠損が生じるような場合には、直ちに対応（除砂）することにある。除砂した砂は必ず海浜に戻すこと。

4.1. 飛砂発生のない期間（4 月下旬から 12 月初旬）に行う維持作業

4.1.1. 堆砂垣

○ 常設堆砂垣の維持作業

堆砂垣群の点検、破損場所の修復、損傷個所の補修、冬季（飛砂のある時期）の砂浜維持作業のための重機の通路確認と重機待機場所の確保など。

○ 仮設堆砂垣設置時に留意すべき事項

仮設堆砂垣には簡便な垣が使用される。本事業では、砂浜に単管パイプを打ち込み、ネット（網）を張る構造の仮設堆砂垣が用いられている。このような構造では、堆砂垣設置時に、ネットの下端に隙が生じ易い。ネットの下端に隙間があると、その場所を通過する風が加速され、砂面が侵食され、凹地形状の局所洗堀溝が形成される。場合によっては支柱の安全性が損なわれ、仮設堆砂垣の変形、倒壊を生じる。設置時には、ネット下端の充填に注意し、隙間を残さないようにする。隙間が有った場合、下端を通過した飛砂、侵食された砂は風下側に堆積する。

Savage⁷⁵や本事業での観測では、隙間のある場合の風下側に堆積する量と隙間が無い場合に堆砂垣風上側に堆積する量はほぼ同じである。堆砂垣の風下側に十分な空間を用意出来る場合、かつ意図的に堆砂垣の風下側に堆積を期する場合は、下端隙間を残しても良い。しかし、堆砂垣周辺に堆積した飛砂を海浜に戻すという観点からは、作業上余分な手数を必要とする。そのため、ネット下端に隙間を設けることは避けた方が無難である。

○ 常設堆砂垣及び仮設堆砂垣海側（風上側）砂面の整備（引き均し）

初冬、12 月上旬に堆砂垣基部（根本）より 1 m 程度（堆砂垣の安定を損なわれない程度の距離）海側の地点から海側に数メートルから 10 m 程度、深さ数十 cm 程度の凹地を作成することが望ましい。この凹地はトレンチの飛砂保留機能を利用して飛砂運動を停止させ、かつ堆砂垣風上の飛砂堆積領域の増大を期し、堆砂垣風上の堆積飛砂の海側への引き戻し時期を遅らせることを目的としている。砂浜利用者の安全の阻害、砂浜の景観を損なわないよう、

⁷⁵ Savage, R. P. : Experimental Study of Dune Building with Sand Fences, Proc. 8th Coastal Eng. Conf. , ASCE, pp.671-700, 1963

配慮が必要である。

4.1.2. トレンチ

12 月中旬には掘削が完了していることが望ましい。3 月に入り晴天の日の強風により大量の飛砂が発生する年がある。埋戻しは 4 月に入ってからの方が良い。

4.1.3. 植栽帯

植栽帯に求められている機能は、景観の保持と強風時に海浜上にある主要な制御構造物から抜けた飛砂を収容する場である。冬季の強風時の風の吹き方によるが、多かれ少なかれ植生帯に飛砂が流入堆積することが予想される。流入量が少なく植生の中に取り込まれるならば、景観を乱すことは無い。しかし、何年か繰り返されると、砂面が高まり、植生も成長する。時には、部分的に相当量の飛砂が侵入堆積することも予想される。堆積量によっては春季、夏季に植生に覆われる場合もあるが、裸地のままに残る場合もある。放置すれば、灌木、砂草、裸地の入り混じった不規則な高低差のある植生帯になる。

汀線に平行な方向の砂地の高まりに小さな凹部が生じると、その部分に風が集中し、ブローアウト (blow-out) が形成され、植生帯が破壊される可能性もあり、海岸景観を損なうことになる。植生帯に対して、どの程度の景観を保つかを想定して、その時期に修復作業を行うのが望ましい。修復作業を行う時期として、概略次のように考えられる。

- a) 想定 of 植生帯の景観が保たれるように毎年維持作業を行う。
- b) 2, 3 年あるいは数年放置し、ある程度、植生帯が破壊された時に修復作業を行う。
- c) 放置する。住民の要望やあるいは夏季に行われる砂浜行事に支障がでるまで放置する。

飛砂の流入堆積が有った年は、春先早期に堆積した飛砂を海浜に戻すことが望ましい。

また、重機によって植生が破壊された場所は、藁束、莫莖、木屑等で被覆し、真水を散水しておけばよい。それにより、その年の夏季、あるいは次年の夏季までには砂草が自然発生する。

4.2. 飛砂発生の有る期間（12 月下旬から 3 月下旬）に行う維持作業

以下は各種制御構造物の機能回復を必要とする時期の目安である。

4.2.1. 堆砂垣

冬季、飛砂発生 of 時期は、強風の発生後、海浜の見回り視察が必要である。その際、以下の 2 項目に分けて視察する。

1) 堆砂垣本体近傍の飛砂堆積による埋没 of 程度

堆砂垣周辺の飛砂堆積形状は堆砂垣の空隙率によって相違する。本事業では、主に堆砂垣の風上側に堆積させることを意図して、空隙率の小さい堆砂垣を使用している。堆砂垣は高さの約 60 %程度埋没すると飛砂の捕捉能力の減少が始まる。堆砂垣の風上が 70 %程度埋没する以前に除砂することが望ましい。

2) 堆砂垣配置形状に起因する局所的な地盤変動（洗堀と堆積）への対処

堆砂垣配置（線形）の不連続な場所に局所的地形変動（局所洗堀と堆積）が生じ易い。例えば、沿岸方向に配された堆砂垣における人や作業車両の砂浜への通路、堆砂垣の方向変更部、翼垣両端、縦堆砂垣の海側端、縦堆砂垣の陸端と沿岸方向堆砂垣との空間（離垣空間）などである。

堆砂垣配置図を作成し、これらの重点的に点検する場所を決めておく。現地では、堆積が予想される部分の支柱に目盛を付けておく。強風（たとえば、平均風速 10 m/s を越えた強風）が吹いた後、堆砂垣全体の見回りをすると同時に、これら重要な地点を点検する。その際、支柱の目盛を記録しておく。堆積が堆砂垣の高さ 70 % まで堆積する前に、堆積した砂を海側へ戻す。

局所的な洗堀の発生も予想される。堆砂垣の端部等局所的洗堀が予測できる個所は堆砂垣設置工事時に対処しておく。見回り視察時に局所洗堀の予兆が見られたら、その場所と兆候を記録しておく。仮設堆砂垣では支柱部の局所洗堀は、堆砂垣の倒壊を招きやすいため、早期に対処（埋戻し）することが望ましい。

上記 2 項に共通するチェックシートを作成しておく事が望ましい。チェックシートには、上記の堆砂垣配置図に加えて、巡回路、何処で、何を点検し、何を記録するか、を定めておく。点検視察する人が変わっても、点検視察の経験にも関係なく、的確で同質の視察結果が得られようにしておくことが必要である。

4.2.2. トレンチ

トレンチの飛砂貯留能力、飛砂粒子の 1 回の跳躍距離（サルテーションの水平飛行距離）を勘案するとトレンチの幅が 2 m 程度まで埋没した時期に除砂する。

4.2.3. 植栽帯

通常の年では、砂浜上の主制御構造物が機能し、植生帯に流入、堆積する飛砂量は限られる。

特別の機能維持作業は必要無い。異常な量の流入が有り、植生帯すべてが飛砂で覆われ、その堆積した飛砂が植生帯を越えて陸側に移動するような事態が頻繁に生じる場合には、植生帯の陸側に応急的に仮設堆砂垣を設置しても良い。

その他留意すべき事項は、異常な強風によって飛砂が道路侵入した場合の対処である。

道路を異常な強風時における非常時の予備空間として考えてある。自動車の走行に支障が来すような場合が生じることを想定しておき、直ちに対応できるように準備しておく。この場合、重要なことは、道路上から採取した砂は海岸（日和山地区）に戻すことである。

第2編 付録 飛砂量現地観測に関する論文への註釈

【下記の論文に対するコメント】

○船越晴世，大野正人，阿部勝雄，鈴木幸一，黒木敬司，玉城重則：飛砂防止対策について，海岸工学論文集，第40巻，pp.291-295.，1993

論文中図-6 摩擦速度と飛砂量の関係

図中，摩擦速度，20～35 cm/s の範囲に値の大きな飛砂量データがプロットされています。

粒径として， $d_{50}=0.48$ mm を使用しています。風速が一定の乾燥砂面における移動開始摩擦速度は，約 32 cm/s と成ります（Bagnold, 1936；Bagnold, 1973；本間・堀川，1985）。しかも，観測時の砂面は湿潤状態に有り，移動開始摩擦速度は更に大きくなります（堀川ら，1984）。現地においては，移動開始摩擦速度以下でも飛砂量は観測されます。しかし，摩擦速度，約 32 cm/s 以下での多量の飛砂の発生は考えられません。有ったとしても僅かの量です（後述）。

業務報告書が残されていたので，調べましたところ，2月1日，2日，3日のデータで，1月28日の観測とほぼ等量の飛砂量が測定されている時間帯の平均風速の値が小さく記録されていました。2月1日から風速計に異常が生じ，出力が低くなった，と考えるのが妥当なようです。図中1月28日のデータは摩擦速度が妥当に評価されています。2月1日，2日，3日のデータの摩擦速度が過少評価されていると推定されます。

○塩澤俊彦，中谷内信一，赤澤守，玉城重則，黒木敬司：新潟西海岸における飛砂の現地観測，海岸工学論文集，第40巻，pp.281-285.，1993

論文中図-6 摩擦速度と飛砂量の関係

粒径として， $d_{50}=0.30$ mm を使用しています。乾燥砂面における移動開始摩擦は，約 26 cm/s です。図-6では，摩擦速度 26 cm/s より小さい摩擦速度でもデータが有ります。しかし，その量は微小です。これは，風速の代表値として，10分間平均風速を用いているからです。以下，外力の記述に，摩擦速度から風速に変えます。風速変動は工学的には，正規分布の仮定が妥当とされています。風速として，10分間平均風速を用いた場合，平均風速が移動開始風速より小さくても，平均風速より大きい風速が吹く時間帯があります。その時間帯に飛砂が発生します。外力の標記を風速から摩擦速度に変えます。図-6にて，摩擦速度 26 cm/s より小さい摩擦速度の範囲に少量の飛砂量がプロットされていますのは，妥当な結果と判断できます。

移動開始限界摩擦速度を考慮した飛砂量推算式は Horikawa, et al. (1984) が提案しています。風速分布の正規分布を仮定して，河村 (1951) の式を拡張して得られた飛砂量式です。この式には次のような特徴があります。1) 風速分布の標準偏差値が必要である。2) 標準偏差値を変数とする誤差関数が含まれる係数の計算を必要とする。3) 風速が十分に大きくなると（飛砂運動が停止するような風速が無くなる）元の河村式に近似する。しかし，1) 通常，気

象観測では風速分布の標準偏差値は記録されていない。2)工学的には、強風時が重要である。その為、Horikawa, et al. (1984) が提案した式は、ほとんど利用されていません。

本間仁監修，堀川清司編（1985）：海岸環境工学，pp.195-197.

河村竜馬（1951）飛砂の研究，東京大学理工学研究所報告，5，pp.95-442.

堀川清司・堀田新太郎・久保田進・香取完和（1984）：湿潤砂面上の飛砂についての研究，第31回海岸工学講演会論文集，土木学会，pp.391-395.

Bagnold, R. M. (1936) : The movement of desert sand, Proc of Roy. Soc., London, A, 163, pp.250-264.

Bagnold, R. M. (1973) : The physics of blown sand and desert dunes, Chapman & Hall, London, p86

Horikawa, K., S. Hotta, S. Kubota and S. Katori (1984) : Field measurement of blown sand transport rate by trench trap, Coastal Engineering in Japan, Vol. 27, pp.213-232.