

養浜海岸における飛砂制御について

Controlling wind-blown sand on a nourished beach

都市人間環境学専攻 片野明良
Akiyoshi Katano

Key words : Wind-blown sand, Beach, Swash zone, Terrestrial laser scanner survey, Sand fence alignment

1. はじめに

我が国における海岸侵食は、大規模河川におけるダムなどの河川構造物の建設、砂利採取等に伴う河川からの供給土砂の減少、沿岸構造物による沿岸漂砂の連続性の阻止、防波堤等による波の遮蔽域の形成、天然ガス採取や地下水の過剰くみ上げによる地盤沈下などにより、1950年代中頃(昭和30年代初め)から顕在化しはじめた。

内陸地を海岸侵食から守るために護岸、堤防を建設すると、護岸、堤防前面の砂浜の侵食が助長されるなどの問題から、線的防護方式から面的防護方式による保全対策が実施されるようになり、近年では、河川から海岸までの流砂系全体の土砂を総合的に管理することで、効果的、効率的な海岸侵食対策が行われ、養浜を実施する海岸も多くなっている。養浜を実施すると、砂浜幅拡大による飛砂発生源域の拡大、後背地への飛砂害の拡大等により、結果として飛砂に関する問題が発生する。また、飛砂が海岸侵食の一因になることも報告されている。

激しい侵食により砂浜が失われた新潟港海岸では、面的防護方式(潜堤、突堤、養浜)による海岸保全により、砂浜の回復に成功した。養浜後浜の直ぐ陸側に養浜天端高と同じ高さの海岸道路が整備され、海岸道路への飛砂害を防止することを主目的として飛砂制御対策を実施してきた。この過程で、波の作用による絶えず変化する遡上帯領域からも飛砂により陸側に養浜砂が損失していることを明らかにした。遡上帯領域から陸側に飛砂が流出することで、海域の養浜砂量が減少し、養浜による波エネルギー低減機能が低下するため、結果として背後域の安全性が低下する。このため、海岸侵食対策として飛砂制御の必要性が強く示唆された。本研究は、養浜海岸における侵食対策、背後域の飛砂害を防止する観点から、飛砂制御方法を検討するものである。

2. 遡上帯領域から発生する飛砂

図-1は、事後測量時(2017年2月)の海浜地形、事後測量時と事前測量時(2016年12月)の地盤高変化を示したものである。測量精度が高く、詳細な微地形(侵食と堆積)を描き出している。海浜を次の3領域に分ける。領域S:事前測量時の汀線と測量期間中の推定最大遡上地点に囲まれる領域とする。推定最大遡上地点は、観測期間中に実施した遡上域の地盤変動観測と事後測量の地形から推定し、既設離岸堤背後でD.L.+2.0m程度、開口部でD.L.+2.5mの範囲にあった。この領域における外力は遡上波と風である。領域B:測量期間中の推定最大遡上地点と道路海側端に囲まれる領域であり、砂移動の外力は風のみである。領域R:領域Bの陸側に隣接する道路帯とする。同様の計測は2017年度、2018年度、2019年度の4ヵ年に亘り実施した。表-1は領域別に求めた土量変化を示したものである。表-1(3, 4, 5列)は興味深い事実を示している。領域Bが堆積(+)であることは、領域Sから領域Bに流入する量が、領域Bから道路側に流出する量より多いことを意味する(質量保存則)。飛砂が発生する強風時は荒天時であり、遡上帯は常時湿潤の状態にある。湿潤度の高い遡上帯からも飛砂が発生していることを意味する。湿潤状態でも飛砂が発生することは報告¹⁾されているが、遡上帯領域からの飛砂発生に関する報告はない。領域Rから陸側へ流出する量は無いとすれば、領域Sから陸側へ風によって流出した量は(B+R)(表-1, 6列)となる。単位長さの遡上帯領域の流出量を求めると、

2016 : $2658 \text{ m}^3 / 1180 \text{ m} = 2.25 \text{ m}^3/\text{m}$ 2017 : $1959 \text{ m}^3 / 790 \text{ m} = 2.48 \text{ m}^3/\text{m}$

となる。第1区画に限れば、

$$2016 : 846 \text{ m}^3 / 460 \text{ m} = 1.84 \text{ m}^3/\text{m} \quad 2017 : 752 \text{ m}^3 / 460 \text{ m} = 1.63 \text{ m}^3/\text{m}$$

となる。つまり、2016年と2017年の冬季に、概略1.6~2.5 m³/mの量が遡上帯から砂浜部に流出していることが明らかになった。第2区画において、砂浜陸端に設置されている堆砂垣周辺の堆積量から、観測期間中の単位長当たりの飛砂量を推定すると、2016年度は4.6 m³/m、2017年度は7.5 m³/mとなる²⁾。

第2区画に限れば、単位長の流出飛砂量は、

$$2016 : 1068 \text{ m}^3 / 470 \text{ m} = 2.27 \text{ m}^3/\text{m} \quad 2017 : 1207 \text{ m}^3 / 330 \text{ m} = 3.66 \text{ m}^3/\text{m}$$

となる。遡上帯領域から発生する飛砂量と陸端にて測定された飛砂量の比は、

$$2016 : 2.27 \text{ m}^3/\text{m} / 4.6 \text{ m}^3/\text{m} = 0.49 \quad 2017 : 3.66 \text{ m}^3/\text{m} / 7.5 \text{ m}^3/\text{m} = 0.49$$

飛砂量の約50%が遡上帯から発生しており、侵食対策として飛砂制御が必要であることを強く示唆する。

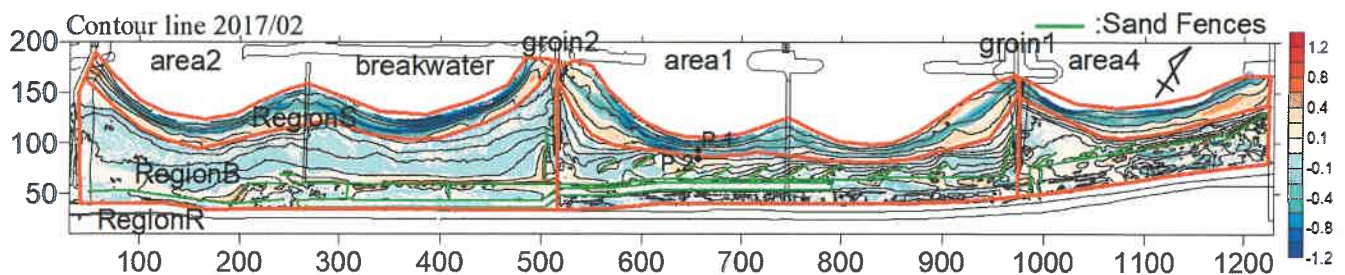


図-1 事後測量等高線，期間中の地盤変化量(2016年度)と区画区分，土量算定範囲

表-1 各区画，領域の土量変化

	区画	領域S (m ³)	領域B (m ³)	領域R (m ³)	B+R (m ³)	(B+R) / S	B+R/沿岸距離 (m ³ /m)
2016年度	第2区画	-2652	1021	47	1068	0.40	2.27
	第1区画	-1348	800	46	846	0.63	1.84
	第4区画	-716	719	25	744	1.04	2.98
2017年度	第2区画	-3110	1174	33	1207	0.39	3.66
	第1区画	-2291	706	46	752	0.33	1.63
2018年度	第1区画	-1239	1202	46	1248	1.01	2.71
2019年度	第2区画	-2536	961	28	989	0.39	2.10

3. 堆砂垣の課題と飛砂制御機能

飛砂を制御する最も一般的な工法は堆砂垣である。堆砂垣は、次の理由により通常汀線に平行に設置される。

① 防護を目的とする領域は通常汀線に平行にある。② 領域を防砂する堆砂垣の長さが最短となる。③ 堆砂垣の設置作業が容易である。④ 管理維持作業に便利である。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、汀線に平行に設置した堆砂垣から、海側に翼垣，袖垣を取り付けることがある。翼垣の取付部（隅角部）に飛砂が集中堆積する一方で取付部から離れた場所の堆砂垣では未だ飛砂捕捉能力を残し，翼垣背後に局所洗堀が発生して堆砂垣と翼垣の倒壊の危険性が生じるなどの問題から，堆砂垣周辺の堆砂量を平準化する線形を検討することが課題となっている。堆砂垣は，埋没するとその機能が失われることから，適切な維持管理が必要となる。維持管理



図-2 飛砂数量カウンター計，砂面計配置図

を実施するためには、堆砂垣の埋没状況と飛砂制御機能の関係を明らかにする必要がある。そこで、堆砂垣前面の堆積高、堆砂垣を通過する飛砂量を連続観測することで、堆砂垣の飛砂制御機能と前面堆砂高の関係を検討した。図-2 は、観測機器の設置位置を示したものである。飛砂量は圧電飛砂計³⁾ ((有)中央工測社製) により計測し、翼垣の2m 海側に砂面計 ((有)中央工測社製) を設置して、翼垣前面に堆積する砂の砂面変動を連続観測した。観測期間中の風向・風速(KADEC-R-KAZE)は、地盤上2 m の高さで計測した。

図-3 に海側飛砂量(CS1) (=発生飛砂量) に対する翼垣上を通過する飛砂量(CS2)および飛砂対策工背後の飛砂量(CS3)の経時変化を示す。期間 I では、発生飛砂量に対する飛砂対策工背後への飛散量は 0.1%程度であり、飛砂制御効果が十分発揮されているといえる。堆積高が翼垣高の 0.5~0.7 倍程度に達する期間 II では、翼垣上や飛砂対策工背後での飛砂量が急激に増加する。これは翼垣前面に堆積した砂がジャンプ台となり背後へ飛散し易くなったためと考えられる。その後も翼垣前面での堆積砂量は増加し続け (期間 III)、1 月 18 日頃には $h/H \approx 1$ となり、このとき翼垣前面はほぼ満砂状態となっている。2 月 10 日頃以降 (期間 IV) では、発生飛砂の 10%程度が対策工背後へ飛散しており、これは翼垣背後の砂面高が翼垣高さに達した時期と一致している。特に、観測期間後半では CS3/CS1 と CS2/CS1 の差が徐々に大きくなる傾向にあり、翼垣と堆砂垣の間においても砂が堆積し、その範囲が更なる飛砂の発生源になっている。

図-4 は、横軸を翼垣高さ H に対する翼垣前面の堆積高 h、縦軸を発生飛砂量に対する対策工背後の飛砂量とした相関図である。翼垣前面での堆積高が翼垣高さに対して 0.7 倍程度になると対策工背後の飛砂量が急激に増加し、翼垣の捕砂機能が低下する。そのため、翼垣前面に溜まった砂を除砂するタイミングは、堆積高さが翼垣高さの 0.7 倍前後の高さに達する時期が適当である。適切な時期に除砂することで、堆砂垣背後への飛散量を 0.1~1%に抑制することができる。

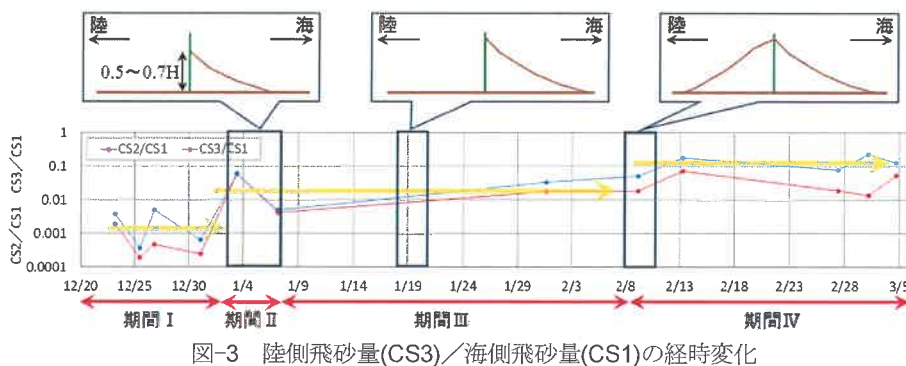


図-3 陸側飛砂量(CS3)/海側飛砂量(CS1)の経時変化

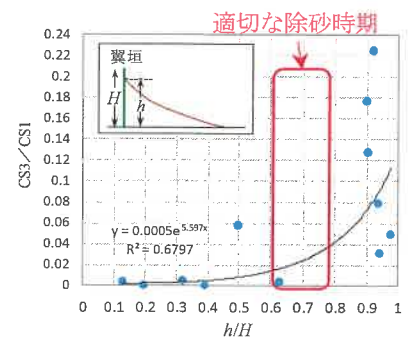


図-4 堆砂垣の適切な除砂時期

4. 堆砂垣による飛砂制御 (堆砂垣の線形)

風が斜めに吹く海浜に対し、海浜上を斜めに移動する飛砂を遮断し、ある領域内に閉じ込めるという考えに基づいて、汀線に平行な堆砂垣、直角な縦堆砂垣群を設置する垣配置を案出した。縦垣の陸端と堆砂垣の接続部は、隅角部に飛砂が集中する。このため、局所的に飛砂制御効果が低下する。そこで、飛砂の一部を風下側に逃がし、かつ、垣設置時、維持管理作業用に、縦垣陸側と堆砂垣の間に空間を設ける。この空間を離垣間隔(Sd)と呼ぶ。この堆砂垣配置形状を、縦垣群配置形式 (線形) と記す。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。図-5 に示すように、ある縦垣と堆砂垣との交差点を O、縦垣海側端を N、NO を縦垣の長さ L、汀線に直角な方向と卓越風向方向の成す角度 α 、N を通り卓越風向に直角な線が堆砂垣と交差する点を Mu、N を通る卓越風向方向の線の堆砂垣との交点を Mb とする。O 点より風上側 (図-5 では左側)、距離 Dx 離れている Ox 地点にて、長さ Lx の別の縦垣を考える。縦垣 Lx の海側端 Nx を通る卓越風向の線が堆砂垣と交差する点を Mbx とする。Lx の位置に

よって、地点 Mbx と地点 Mu の位置関係に 3 つの場合がある。ただし、Ox 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 Mu 地点より風上側にあるものとする。それぞれ場合の飛砂の通過断面と堆積区間を表-2 のように仮定する。縦垣、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ることが確認できる(図-6)。縦垣群の各セルに堆積した土量から、飛砂発生卓越風向は、WNW あるいは NWbW であり、期間中の風向の出現頻度とも一致する。

図-7、垣高(H)、離垣距離(Separation distance; Sd)として、相対離隔距離(Sd/H)と隅角部の集中的な堆砂の緩和効果について整理したものである。適切な離隔距離は、5m 程度と判断されるものの、堆砂垣となす角度によっても、適切な距離が異なる可能性が示唆された。

表-2 飛砂通過断面と堆積区間

Case	通過断面	堆積区間
x = 1	$L \cos \alpha$	$L(\cot \alpha + \tan \alpha)$
x = 2	$\{(D_2 - L_2 \tan \alpha) + L \tan \alpha\} \cos \alpha$	$(D_2 - L_2 \tan \alpha) + L \tan \alpha$
x = 3	$\{(D_3 - L_3 \tan \alpha) + L \tan \alpha\} \cos \alpha$	$(D_3 - L_3 \tan \alpha) + L \tan \alpha$

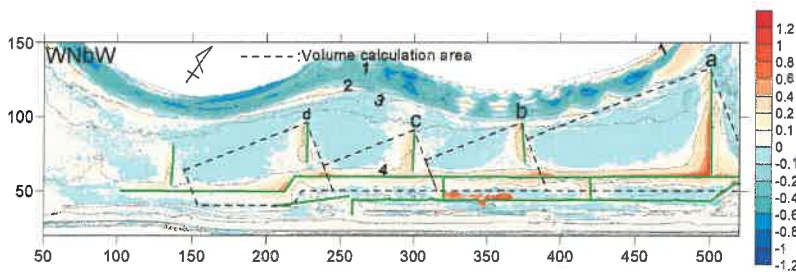


図-6 縦垣群の地形変化と堆積土量算定領域

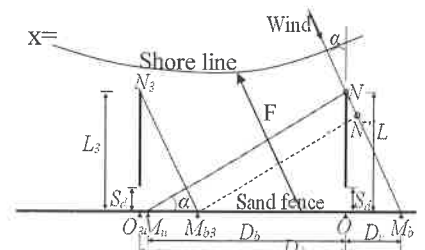
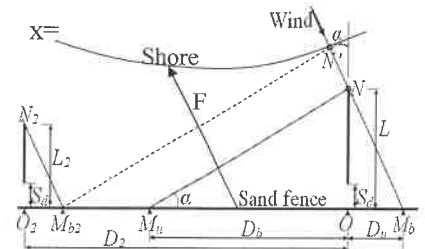
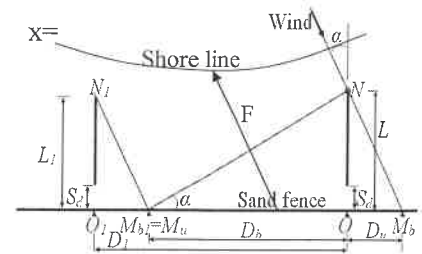


図-5 飛砂の運動範囲・堆積範囲

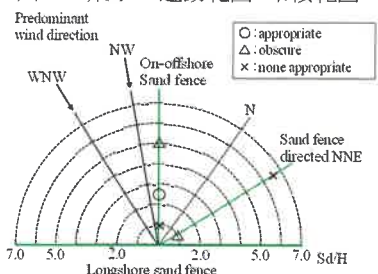


図-7 無次元離隔距離と集中的な堆砂緩和効果

6. 結論

- (1) 砂面が湿潤状態でも飛砂は発生する。海から陸に向かう強風発生時は、波高が増大し遡上帯領域が広がる。遡上帯領域は波の遡上により湿潤状態となるものの、新潟港海岸では $2 \sim 3 \text{ m}^3/\text{m}$ 程度の飛砂が遡上帯から陸側に流出する。飛砂が多く発生する海岸では、侵食対策として飛砂制御が必要になる。
- (2) 堆砂垣は適切に維持管理することで、飛砂制御機能を維持することが可能であり、堆砂垣前面の堆砂高(h)、堆砂垣高(H)とした場合、堆砂垣の維持管理時期は $h/H=0.7$ が適当である。
- (3) 汀線に対して風が斜めから吹く場合、堆砂垣の効果的な線形は、汀線に平行に設置する堆砂垣と、汀線に直角に設置する縦垣の組み合わせにより、飛砂を領域に閉じ込めることが可能である。

参考文献

- 1) 堀川清司, 堀田新太郎, 久保田進, 香取完和 : 湿砂面上における飛砂についての研究, 第 31 回海岸工学講演会論文集, pp.391-395., 1984.
- 2) 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砂特性と飛砂量推定, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 77, No.2, pp. I_439-I_444, 2021.
- 3) 有働恵子 : 飛砂の限界摩擦速度に関する現地観測, 海岸工学論文集, 第 54 巻, pp.536-540., 2007.