

航空レーザー測量を用いた飛砂量推定に関する研究

Estimation of Wind Blown Sand by using Aviation Laser Survey

佐藤慎司¹・上谷昌史²・小越千春³・橋本新⁴

Shinji SATO, Masashi KAMITANI, Chiharu OGOE, Shin HASHIMOTO

Sand transport rate due to wind was estimated on Niigata Coast by using successive topographic surveys by the aviation laser system. Beach topographies were measured in a 7.8km by 0.3km region with a horizontal resolution of 0.5m. The amount of sand entrapped by sand fences and other facilities was estimated at 89 thousand m³ from the topography difference between Dec 21, 2006 and Mar 15, 2007. The average rate of wind blown sand transport was found to be 50 thousand m³/year for this stretch of the coast.

1. はじめに

海岸侵食対策など海岸保全計画を策定するためには、海岸域の土砂収支を明確にすることが重要である。通常、海岸域の土砂収支を検討する場合には波浪による土砂移動を主な外力として検討するが、砂丘などが発達している砂浜海岸では、風による土砂移動、すなわち飛砂も考慮する必要がある。しかしながら、飛砂は砂浜からその背後域の広範囲で移動することから、従来の地形測量などからはその土砂変化量を正確に測定することは困難であった。

本研究では、航空レーザー測量を用いて、新潟海岸（有明浜・五十嵐浜工区）における飛砂によって変化した微地形を広範囲にわたって精度良く測量することにより、冬季における砂浜域の変化土砂量を把握するとともに、既往の飛砂量式を用いて飛砂量の再現を試み、海岸域での土砂収支における飛砂の影響の程度を把握するものである。

2. 調査対象

調査対象海岸は、河川局所管新潟海岸のうち、関屋分水河口左岸から新川漁港までの延長約7.8kmの沿岸域（図-1）とした。この区間では昭和50年頃までは、著しい侵食により砂浜が殆ど消失していたが、離岸堤・人工リーフ等の対策により、現在ではほぼ全域で砂浜が回復している。岸沖方向の調査対象範囲は、汀線から陸側へ0.3~0.35kmの範囲の砂浜部および海浜植生地帯とした。航空レーザー測量は標高精度は±0.15mであり、水平方向解像度0.5m格子で標高をデータ化したものを用いた。測量は飛砂が顕著となる冬季期間の2006年12月21日、2007年2月3日および同年3月15日の合計3回実施した。

3. 調査期間中の気象・海象

調査期間中における関屋観測所（図-1）における平均波向・有義波高および平均風向・平均風速（10分間）の方向分布特性を図-2、図-3に示す。図中には平均的な汀線の傾き（E31°N）も示した。卓越波向はN-NNW方向であり、高波浪はNNWからが多い。卓越風向はW方向であり、風速10m/s以上の強風もW方向からが卓越している。陸から海へ向かうS-SE方向も出現頻度は多いが、5m/s以下の弱い風が大半を占めている。なお、観測期間中の最大風速は2007年1月7日15時20分~30分に観測された25.1m/s(W方向)であった。

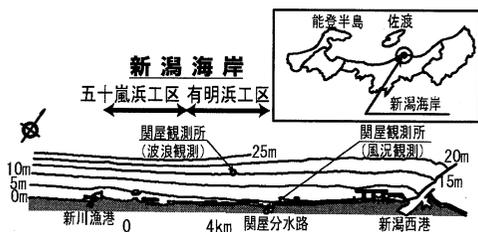


図-1 調査対象位置

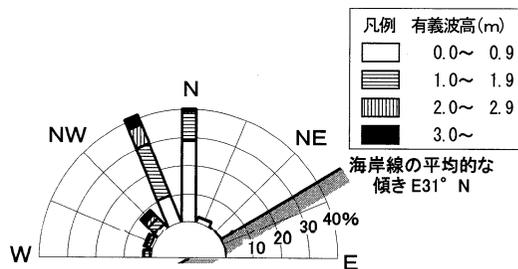


図-2 調査期間中の波向-波高出現頻度

- | | | | |
|---|------|----|---|
| 1 | フェロー | 工博 | 東京大学教授大学院工学系研究科社会基盤学専攻 |
| 2 | 正会員 | | (財)ダム水源環境整備センター企画部長兼調査第一部長(前 国土交通省北陸地方整備局信濃川下流河川事務所長) |
| 3 | | | 国土交通省北陸地方整備局信濃川下流河川事務所海岸課 |
| 4 | 正会員 | 水修 | (株)アイ・エヌ・エー 海岸部 |

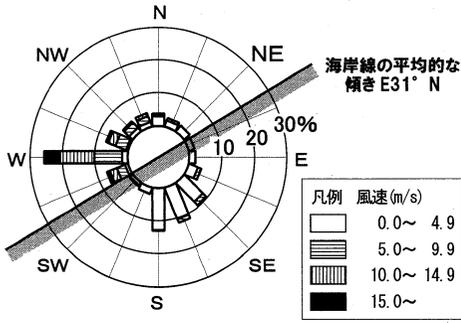


図-3 調査期間中の風向・風速出現頻度

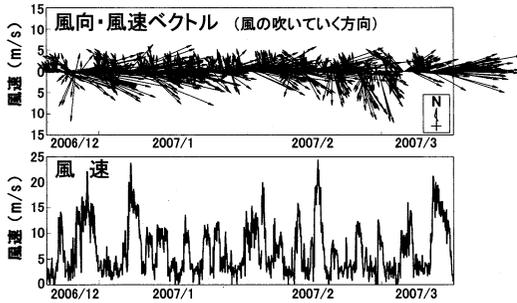


図-4 調査期間中の風向・風速の経時変化

4. 飛砂に起因する地形変化の実態

(1) 波による地形変化の識別

汀線より陸側の砂浜の地形変化を生じさせる外力としては、風による地形変化以外に波の遡上による地形変化が考えられる。波による地形変化を除外するために、波浪データから波の遡上高を推定した。調査期間中において来襲頻度が95%超過の波浪は換算沖波でH=4m程度、T=12s程度であった。この波浪条件での遡上高は標高T.P.+2.0m程度となることから、標高T.P.+2.0m以下の範囲は波の影響による地形変化帯とし、標高T.P.+2.0mより高い海浜部の地形変化を飛砂により生じた地形変化として解析を行った。

(2) 飛砂による地形変化の実態

a) 断面地形変化

飛砂による代表的な地形変化が生じた断面地形を図-5に示す。代表断面の沿岸方向の基準位置は関屋分水路河口とし、西側を正とした。岸沖方向の基準位置は、護岸・背後道路・海岸林縁等とし、海側を正とした。測量年月日は、第1回測量：2006年12月21日、第2回測量：2007年2月3日、第3回測量：2007年3月15日である。図-5(1)は標高T.P.+12~13m程度の人工砂丘が連続している区域の代表的な断面地形である。人工砂丘の海側法面には堆砂垣が設置されており、その捕捉効果により堆砂していると考えられる。また、人工砂丘の頂部にも最大1m程度

の堆砂が生じている。人工砂丘の陸側法面は海側法面に比べて堆砂は少なく安定していることが伺える。図-5(2)は、図-5(1)の人工砂丘と同様な断面ではあるが、海側法面の堆砂垣は殆ど埋没している状態であるため、海側法面での堆砂は少なく、陸側法面において著しい堆砂が生じている。図-5(3)は、海岸背後に位置する国道402号の海側沿いに飛砂防止フェンスが設置されている代表的な断面地形である。フェンス近傍の海側・陸側ともに堆砂が見られる。図-5(4)は海浜中央に小規模な砂丘と堆砂垣があり、その陸側には図-5(3)と同様な飛砂防止フェンスが設置されている断面地形である。砂丘の陸側法面およびフェンス近傍において堆砂が生じている。図-5(5)は、飛砂対策が行われていない区間であり、顕著な地形変化は認められない。この区域も飛砂は発生していると考えられることから、発生した飛砂は砂浜域に留まらず、背後陸域もしくは砂浜上を沿岸方向に移動していることが推察される。以上のように新潟海岸では飛砂による地形変化が随所に生じていること、地形変化状況は砂浜の微地形や人工砂丘、堆砂垣等の設置状況により異なっていることが明らかとなった。従来の測量ではこのような詳細な地形変化の把握は困難であり、航空レーザー測量の特長であるといえる。

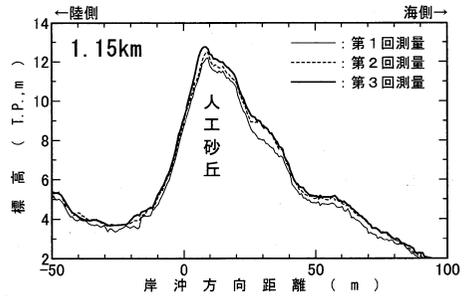


図-5(1) 代表断面の地形変化

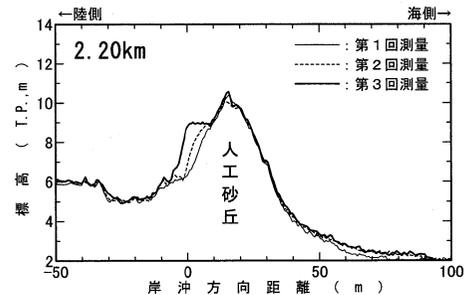


図-5(2) 代表断面の地形変化

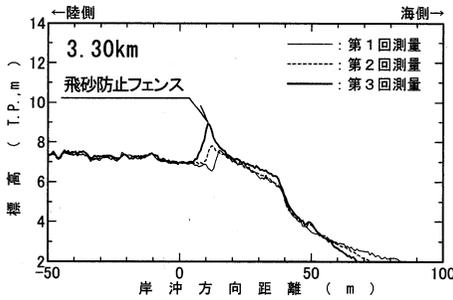


図-5(3) 代表断面の地形変化

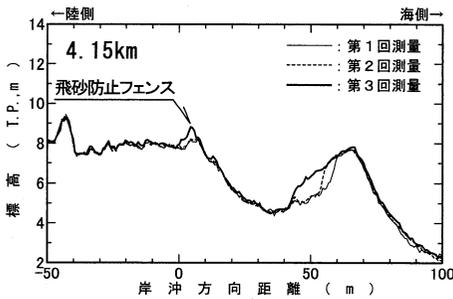


図-5(4) 代表断面の地形変化

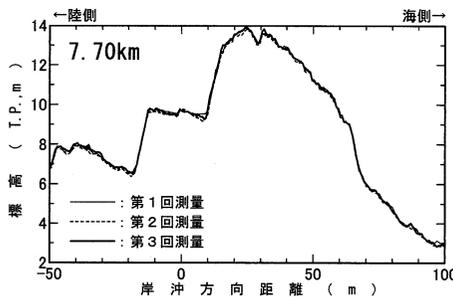


図-5(5) 代表断面の地形変化

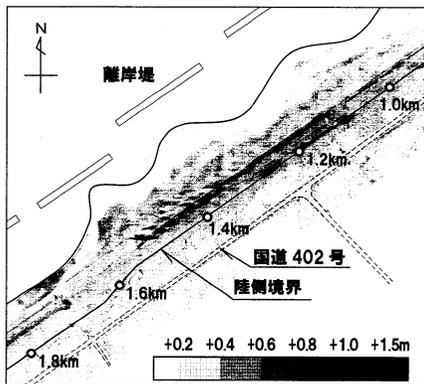


図-6 地形変化の平面分布 (2006.12.21~2007.3.15)

b) 地形変化の平面分布

図-5(1)に示した代表断面周辺の地形変化の平面分布を図-6に示す。地形変化量は第1回測量(2006年12月21日)と第3回測量(2007年3月15日)の差分値であり、図-6には堆積箇所のみ着色して示した。代表断面でも示したように、人工砂丘の海側法面に顕著な堆積が確認できる。また、斜め方向に筋状の模様も読み取れる。この方向は卓越する風向であるW方向に向いていることから、飛砂の飛ぶ方向が地形変化に現れたものと考えられる。

(2) 土砂変化量の沿岸方向分布

海岸砂浜域での飛砂による土砂変化量を算定するためにT.P.+2.0m~陸側境界(砂浜と背後陸域の境界として護岸、道路、松林林縁により設定)の範囲に対して、堆積域と侵食域で各々土砂変化量を求め、沿岸方向の土砂変化量分布として図-7に示した。図-7には飛砂に関連する要因として、主要な飛砂防止対策工および砂浜幅(第1回測量の汀線~陸側境界)の沿岸分布も合わせて示した。

土砂変化量の沿岸方向分布をみると、堆積域の変化量は東側(関屋分水路側)に向かうに従って増加する傾向が見られる。一方、侵食域の変化量はやや西側(新川漁港側)が多い傾向がみられる。堆積域の変化量と侵食域の変化量を比較すると堆積域が多く、新川漁港付近の7.5~7.8kmを除くほぼ全域において堆積となっている。

また、その堆積量は東側に向かうにしたがって増加する傾向が見られる。次に、図-7に示した砂浜幅の沿岸方向分布をみると、関屋分水路左岸の0.0~0.4km区間は砂浜が存在しないが、それ以外の区間は70~250mの砂浜が存在し、平均的には100m程度の砂浜が存在する。砂浜幅は新川漁港に近い西側でやや広い傾向がみられるものの、顕著な沿岸方向の分布傾向は認められない。また、飛砂防止対策工は、東側~中央部で多く整備されている。

5. 飛砂量の推定

ここでは、風速データから河村公式(堀田, 1985)により飛砂量を推定し、実際の飛砂に起因する堆砂量と比較することで飛砂量係数 K の同定を試みた。

(1) 推定方法

関屋観測所の風向・風速計の地上高は17.9mであり、摩擦速度と高さ17.9mにおける風速値 $u_{17.9}$ との間に(1)式を仮定する。

$$u_{17.9} = 5.75u \cdot \log_{10} \frac{17.9}{z} + u \tag{1}$$

ここに、 u : 摩擦速度、 (u, z) : focal point (砂表面上の砂粒子が運動状態にあるときの風速の鉛直分布を表す直線群のすべてが集中する点)。

(u, z) は、砂の粒径により規定される以下の実験式で表す(Zingg, 1952)。

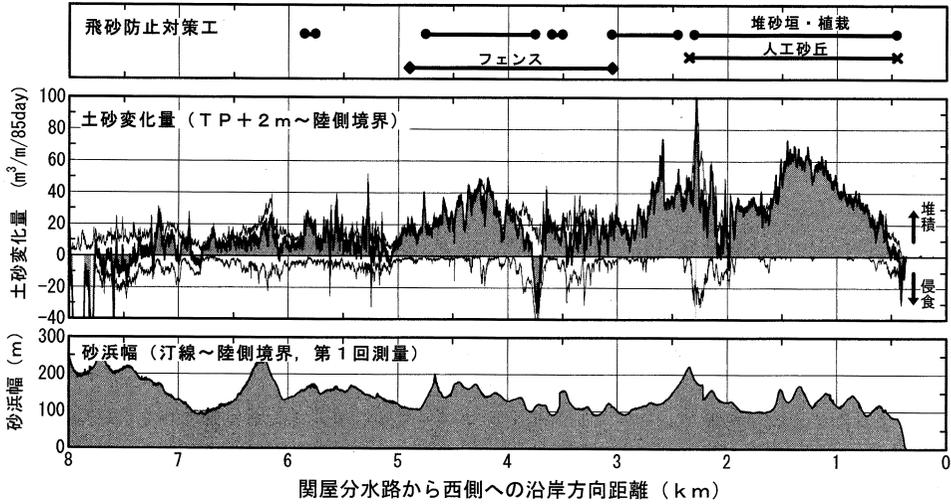


図-7 砂浜地形変化の実態

$$z' = 10d(mm)$$

$$u' = 20d(mil/hour) = 8.94d(m/s)$$

飛砂量は下記の河村公式(2)を用いる。

$$q = K \frac{\rho_a}{g} (u + u_{c'})^2 (u + u_{c'}) \quad (2)$$

ここに、 q ：飛砂量 ($kg/m \cdot s$)、 K ：飛砂量係数、 ρ_a ：空気の密度、 g ：重力加速度、 $u_{c'}$ ：移動限界摩擦速度 (Bagnord, 1954の算定図より決定) であり、乾燥砂面 (湿潤状態を考慮しない) とする。

以上の手順により、調査期間中の関屋観測所における10分間毎の平均風向・風速を入力条件として与えて全飛砂量を算定した。砂の粒径 d は、現地海浜の中央粒径 d_{50} を参考にして $d = 0.3mm$ とした。計算される摩擦速度 u が移動限界摩擦速度 $u_{c'}$ より小さい場合には、飛砂は発生しないとした。

(2) 飛砂の方向特性

当海岸の卓越風向は図-3に示したようにW方向であり、強風もW方向に集中しているため、飛砂の卓越方向はE方向となると考えられる。この飛砂の卓越方向および量について詳細に把握するために、(2)式を用いて検討した。調査期間中の度単位の風向出現頻度および飛砂量算定結果を図-8に示す。なお、飛砂量係数は後述する $K=1.65$ を用いている。横軸の風向については風が吹き去る方向 (通常の風向の逆方向) を示している。風向の出現特性を見ると、 90° (E方向) 付近および 0° (N方向) 付近が多いこと、全風向において出現が見られる。一方、飛砂の発生は 90° 付近に集中し、 $45 \sim 180^\circ$ にほぼ限定されていることがわかる。次にこの飛砂について、卓越ベクトルを算定した結果を風配図とともに図-9に示す。卓越方向はほぼE方向 ($E1^\circ S$) であり、海岸線がE-Wに対し

て約 30° 傾いていることから、飛砂による土砂の大半は沿岸方向の移動となるが、陸側への損失も少なからず生じることが推察される。

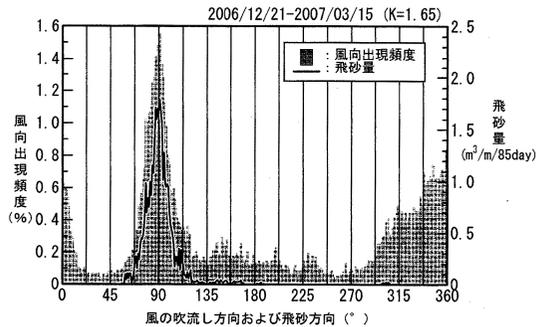


図-8 度単位の風向出現頻度および飛砂量算定結果

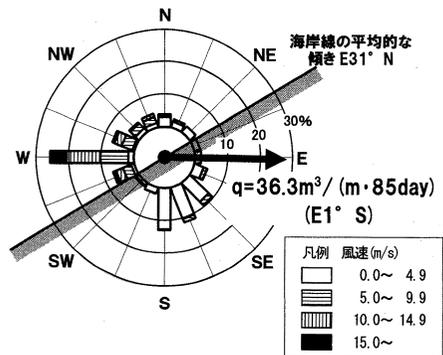


図-9 飛砂の方向特性

(3) 飛砂量係数Kの同定

飛砂量係数について河村(1951)では、乾燥砂面における水平捕砂器での観測値をもとに $K=2.78$ を与えている。佐藤ら(1999)では、当海岸の飛砂防止フェンス近傍の堆積土砂量の測量結果を用いての同定を行い、 $K=1.0$ 程度(河村の提案値の50%程度)を得ている。また、塩澤ら(1993)では、本調査対象海岸の5km程度東方に位置する新潟西海岸において水平捕砂器を用いた現地観測結果をもとに K の同定を行い、 $K=1.0$ を得ている。本研究では海岸域からの飛砂による損失土砂量を算定することを目的として、航空レーザー測量で得られた土砂変化量を用いて飛砂量係数 K の同定を試みた。まず、海岸域からの飛砂による損失土砂量を航空レーザー測量成果より直接算定するために、海岸背後(護岸や背後道路の陸側)の土砂変化量の算定を試みたが、保安林内部については航空レーザー測量では地形変化状況を明確に把握することはできなかった。この理由としては、松林内の地表面に生育する底層草木によりレーザーが遮断されたことが想定される。

航空レーザー測量により詳細な地形が把握できた海岸前面(護岸や背後道路より海側の砂浜帯)の土砂変化量は新潟海岸全域では、 10.2 万 m^3 (第1回測量2006年12月21日と第3回測量2007年3月15日の差分値)の堆積となった。また、図-7に示した土砂量変化の沿岸方向分布を見ると、東側の堆積量が多くなる傾向が明瞭に現れている。この原因としては、東側には飛砂防止対策工が設置されており、発生した飛砂が捕捉されていること、飛砂が発生する強風の風向はW方向であるため、飛砂は沿岸方向に移動し、東側に吹き寄せられていることが想定される。この堆積が顕著な区間($L=0.45\sim 4.9$ km)の土砂変化量は 8.9 万 m^3 であり、この値を検証値として飛砂量係数を同定した。検証における収支の仮定を図-10および以下に示す。

- ①海側からの飛砂量 q_{in} は沿岸方向に一樣と仮定する
- ②卓越風向は海岸線に対して斜めであるため、沿岸方向に移動する飛砂も発生する(q_{move})
- ③東側の飛砂防止工が設置されている区間を堆砂域とし、この区間では陸側への飛砂(q_{out})が生じない q_{in} および q_{move} を(2)式により算定し、レーザー測量より得られた土砂変化量 8.9 万 m^3 と比較することにより、飛砂量係数 $K=1.65$ を得た。

(3) 海岸域からの飛砂損失土砂量の推定

上記飛砂量係数 $K=1.65$ を用い、飛砂防止対策工が設置されていない区間($L=4.9\sim 7.8$ km)における海岸域からの飛砂による損失土砂量(海岸線に対して垂直陸側方向の土砂移動)を算定すると 5.6 万 m^3 (2006年12月21日～2007年3月15日の風況データより算定)となった。当海岸で

の推定されている海岸域の沿岸漂砂量が年間数万～十数万 m^3 のオーダーであることを考えると、飛砂による土砂移動量は無視できない量であるといえる。

6. まとめ

- 航空レーザー測量により、従来の測量では把握が困難であった堆砂垣・植栽、フェンス、人工砂丘などの飛砂対策工周辺の微細な地形変化が平面的に把握可能である。ただし、保安林内部については底層草本等の影響により航空レーザー測量では地形変化を明瞭に把握できなかったため、計測・解析技術面の今後の課題であるといえる。
- 飛砂対策工として実施されている堆砂垣・植栽、フェンス・人工砂丘等は飛砂を海岸砂浜域に留める効果が確認できた。ただし、いずれの対策工も埋設されてしまうと飛砂捕捉効果が落ちると考えられるため、維持管理(除砂)は必要と考えられる。
- 航空レーザー測量を用いることで精度の高い飛砂量が推定された。飛砂損失量は対象海岸の冬季間で約5万 m^3 /年に達するものと推定され、沿岸域の土砂収支を考える上で無視できない量と考えられる。

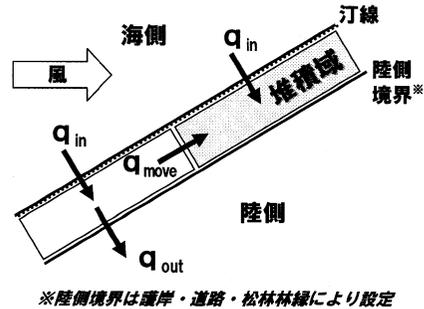


図-10 飛砂量係数 K の同定における収支の仮定

参考文献

- 河村龍馬(1951): 飛砂の研究, 東京大学理工学研究所報告, Vol.5, No.3-4, pp. 95-112.
- 佐藤慎司・大谷靖郎・橋本新・堀口敬洋(1999): 新潟海岸における飛砂の実態と防砂フェンスの機能, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 496-500.
- 塩澤俊彦・中谷内信一・赤澤守・玉城重則・黒木啓司(1993): 新潟西海岸における飛砂の現地観測, 海岸論工学文集, 第40巻, pp. 281-285.
- 堀田新太郎(1985): 本間仁監修・堀川清司編 海岸環境工学, 第2編第5章, 東京大学出版会, pp. 191-209.
- Bagnold, R. M. (1954): The Physics of Blown Sand and Desert Dunes, Methuen & Co. Ltd., London, 265p.
- Zingg, A. W. (1952): Wind tunnel studies of the movement of sedimentary material, Proc. of 5th Hydraulics Conf., IAHR, pp. 111-135.