

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 11 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420515

研究課題名(和文) 地形乱流場における飛砂メカニズムの解明

研究課題名(英文) Wind turbulence effects on sand transport

研究代表者

有働 恵子 (Udo, Keiko)

東北大学・災害科学国際研究所・准教授

研究者番号：80371780

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：海岸砂丘周辺における風向風速特性および飛砂フラックス特性を明らかにするため、鳥取県鳥取市浜坂の鳥取砂丘において、水平風速、鉛直風速、ならびに飛砂フラックスを計測し、風場特性と飛砂フラックスとの関係について調べた。乱流強度と飛砂フラックスの間には、異なる風場条件下でも統一的な関係性が認められ、飛砂フラックス式にこれまで考慮されていなかった乱流の影響を取り込むことに成功した。さらに、LESモデルを用いて、鳥取砂丘周辺の風場の再現を試みた。再現された水平風速場は妥当であったものの、鉛直風速場と水平および鉛直乱流強度はいずれも現地データとの差異が大きく、今後改良する必要があることが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：This study investigated wind turbulence effects on dune sand transport through field experiment of three dimensional wind velocity and aeolian sand flux. Horizontal turbulence intensity has a negative relationship with mean horizontal wind velocity and also with the aeolian sand flux in various wind conditions. The spatial wind field during the experiment was simulated with large eddy simulation (LES) and the results show wind characteristics reasonably consistent with measured ground elevation change. However, the results also demonstrate that accurate simulation of vertical wind velocity and both horizontal and vertical turbulence intensity in the field is a great challenge compared to simulation of horizontal velocity.

研究分野：海岸工学

キーワード：飛砂フラックス 地形乱流 飛砂センサー LES

1. 研究開始当初の背景

砂浜から砂丘にかけての空間は、豊かな生態系を育むと同時に、高波浪時には後背地への波や土砂の侵入を防ぐ機能をも有する貴重な空間である。この空間の土砂輸送を生起する外力は通常時は風であるものの、荒天時には波が遡上する。砂浜-砂丘変形に関して、短期的には風と比して波の外力が大きいことから、海岸工学分野では波を外力とする漂砂に注目されることが多く、風を外力とする飛砂による変形研究は少ない。砂浜-砂丘の変形特性について十分な知見が得られておらず、海岸管理上十分な精度を有する変形予測技術は開発されていないことから、従来経験的に管理が行われている。

筆者らは、数10年程度の現地データ解析結果より、風食孔の発生による規則的な砂丘の分裂が普遍的に生じること、および、短期的には飛砂と比して漂砂による地形変化が顕著であっても、長期的には飛砂による顕著な不可逆的砂丘変形(砂丘発達)が生じる場合があることを示した。これらの事実は、砂丘が貯砂機能を持ち、津波や台風等の沿岸災害ハザードに対して自然堤防の役割を果たすことを考えれば、長期的な砂丘変形が砂浜の防災機能に多大なる影響を及ぼすことを意味する。将来、気候変動に伴う海面上昇により深刻な海岸侵食が生じることも懸念される中で、効率的な砂丘管理が行われない状態が続けば、将来の管理がより困難なものになる可能性が高い。

著者はまた、自ら発展させた最先端の飛砂計測技術を駆使することにより、様々な風場や降雨等の気象条件下における飛砂輸送特性を明らかにしてきた。しかし、地形の起伏に起因する乱流と飛砂輸送の関係については従来指摘されているものの、今までの飛砂に関する現地計測は、その多くが平坦な場所や風向方向に一樣な勾配をもつ場所で行われてきたため、砂丘のような3次元性の高い地形についての知見は少ない。また、このような複雑地形上での観測は行われているものの、詳細な風速特性と飛砂フラックスとの関係に関する研究は少ない。

2. 研究の目的

本研究では、複雑な地形をもつ砂丘周辺において、瞬間風向風速および飛砂フラックスを計測することにより、砂丘付近の風向風速および飛砂フラックスの特性を調べ、風場の乱れも含む風場特性が飛砂フラックスに及ぼす影響を明らかにすることを目的とする。さらに、砂丘周辺の風場の再現を行い、現地調査で得られた風向風速データを用いて精度検証を行う。

3. 研究の方法

現地観測は、広大な砂丘地帯にある鳥取県鳥取市浜坂の鳥取砂丘で行った(図-1)。計測期間は大型低気圧が通過した2012年12月

5日20:30~12月6日5:00で、天候は曇時々雨で、12月6日の1:50以降に0.5mmの降雨が30分間観測された。鳥取砂丘の過去の風向風速データによれば、風速10m/s以上の強風時の卓越風向は北西である。「馬の背」と呼ばれる高さ50mの大規模砂丘列の海側(測点A)と陸側(測点B)を計測点に設定した。計測期間中の卓越風向はS(12月5日20:25~12月6日1:39, 時間帯①)、WSW(同日1:39~5:18, 時間帯②)で、時間帯①における測点A、BのデータをそれぞれA1、B1、時間帯②における測点A、BのデータをそれぞれA2、B2として議論を行う。測点AはSE方向の緩い上り勾配上にあり、測点Bは砂丘列に囲まれた平坦な地形であった。計測期間中の中央粒径 D_{50} は0.25mmであった。

計測項目は瞬間風向風速と飛砂粒子数(飛砂フラックス)である。瞬間風向風速は、超音波式風向風速計(Delta OHM社, HD2003)を用いて、サンプリング周波数1Hzで砂面からの高さ1.5mにおいて計測した。風向はN方向を0度として時計回りに正とした。飛砂粒子数は、1方向飛砂センサーUD-101を4方向に配置した飛砂センサーUD-401を用いて、サンプリング周波数1Hzで砂面からの高さ0.05mにおいて計測した。飛砂粒子数の単位はcounts/sで、直径6mmの円形のセンサーに1秒間に衝突する砂粒子数で表される。得られた時系列データは、5分毎に分割して統計解析を行った。

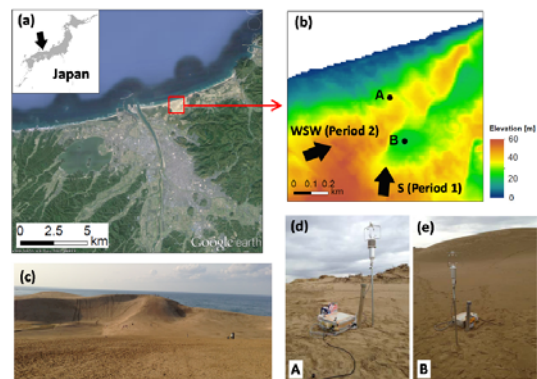


図-1 鳥取砂丘周辺のGoogle Earthの衛星画像、地形、ならびに現地写真。測点AおよびBは、現地観測の測点を示す。

非定常・非線形風況シミュレータであるRIAM-COMPACT(Uchida, 2014)を用いて、砂丘周辺の風場の再現を試みた。地形データとしては、2009年に国土地理院がレーザー測量によって取得した10mメッシュデータを用いた。計算領域は水平方向4km×4km、鉛直方向1.7kmの範囲である。流入境界は風向と垂直に設定し、水平方向は各200メッシュ、鉛直方向は50メッシュに分割し、計算領域の中央で格子サイズが小さくなるように設定した。流入境界面は一樣流入条件で、流入風速は1/7乗則とし、測点AおよびBにおける3

次元風速特性が一致するように流入境界の風向風速を与えた。また、流出境界は対流型流出条件とした。数値計算方は差分法に基づき、LESを行った。流れの支配方程式は連続式とナビエ・ストークス方程式である。

4. 研究成果

(1) 砂丘における風場特性

計測期間中の飛砂フラックスおよび風向風速の時系列変化を図-2に示す。卓越風向が変化するまでの風速は、測点 A では u_{mean} が 8.68 m/s, w_{mean} が 0.48 m/s であり、測点 D の 5.96 m/s および 0.26 m/s と比べて大きかったもの、 α は A で 184° , B で 186° であり、概ね一致していた。 u_{mean} は、風上側の地形勾配が上り勾配の場合に大きく、下り勾配の場合に小さかった。また、時系列データより、水平風速の乱流強度 (u' / u_{mean}) は A1~B2 のいずれにおいても同程度であったが、鉛直風速の乱流強度 (w' / w_{mean}) は、特に D2 で大きかった。

時系列データを5分毎に分割して行った統計解析により得られた統計量(平均風速 u_{mean} , w_{mean} , 平均風向 α_{mean} , 風速変動 u_{sd} , w_{sd} , 乱流強度 $u_{\text{sd}}/u_{\text{mean}}$, $|w_{\text{sd}}/w_{\text{mean}}|$) 間の関係について述べる。A1~B2 のいずれにおいても、 u_{mean} と w_{mean} は概ね比例関係にあり、風速変動 u_{sd} および w_{sd} は、 u_{mean} および w_{mean} とそれぞれ正の相関関係にあった。これは、水平風速が大きい場合には、鉛直風速も大きく、また、これらの変動は平均風速が大きくなるにつれて増大する傾向にあることを示す。 u_{mean} と α_{mean} との間には明確な関係は認められなかったものの、 w_{mean} と α_{mean} との間には、測点 A で風向が西よりになるにつれて鉛直風速が上向きに増大し、測点 B で風向が S の場合 (B1) 上向きで、W の場合 (B2) 下向きになるという関係性が認められた。

A1~B2 のケース別に風場特性をまとめると、風上側の地形勾配が上り勾配である A2 については、他ケースと比して、同じ u_{mean} に対して w_{mean} が正で比較的大きく、同じ u_{mean} に対して u_{sd} が比較的小さく、同じ w_{mean} に対して w_{sd} が比較的小さかった。これらは、A2 では他ケースと比して風速や風速の変動が小さい、地形に沿った流れが生じていたことを示す。一方、風上側の地形勾配が下り勾配である B1 および B2 については、他ケースと比して、同じ u_{mean} に対して w_{mean} が比較的小さく、同じ u_{mean} に対して u_{sd} が比較的大きく、同じ w_{mean} に対して w_{sd} が比較的大きかった。これらは、B1 および B2 では、他ケースと比して、平均風速が小さく、乱れの大きい流れが生じていたことを示す。風上側の地形勾配が平坦である A1 については、A2 と B1 および B2 の中間的な特性となっていた。

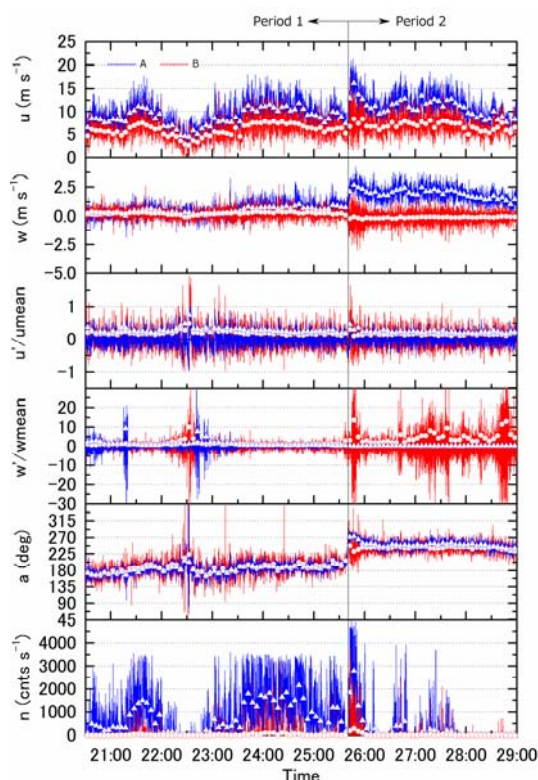


図-2 測点 A および B における水平・鉛直風速 u , w , その乱流強度 u' / u_{mean} , w' / w_{mean} , 風向 α , ならびに飛砂フラックス n の時系列 (2012年12月5日20:30~12月6日5:00). 乱流強度の時系列図中の白丸は5分毎の乱流強度 $u_{\text{sd}}/u_{\text{mean}}$ および $w_{\text{sd}}/w_{\text{mean}}$ を、その他の時系列中の白丸は5分間平均値を示す。

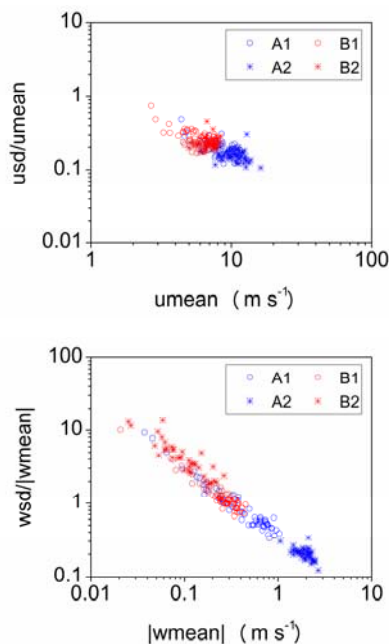


図-3 A1~B2 における水平および鉛直方向の平均風速と乱流強度との関係。

図-3 に水平・鉛直風速の平均風速と乱流強度との関係を示す。鉛直風速については、ケースによって符号が異なるため、これらの値

の絶対値を用いることとした。水平・鉛直風速のいずれにおいても、平均風速と乱流強度との間には一律に負の相関関係が認められ、A1~B2の異なる環境下でも概ね以下の累乗近似曲線上にあった。

既存の飛砂量式は風速と飛砂量との関係で与えられており、既存の現地における飛砂観測データ解析においても、これらの関係で解析を行う場合が多い。近年、現地の複雑地形上の風速の乱流強度やこれと飛砂との関係に関する研究も進められているものの、十分な知見は得られていない。図-3に示された結果は、飛砂量式で用いられる風速にかえて、これと高い相関関係にある乱流強度を用いることで、飛砂量式に乱れの効果を取り込み、様々な乱れ条件下の飛砂を統一的に表現できる可能性を示す興味深いものである。

(2) 風場と飛砂フラックスとの関係

飛砂フラックスは、風速が大きい場合に大きく、降雨があった6日1:50以降顕著に減少しており、既存の研究と同様の結果となった。nが比較的大きいA1およびA2に示されるように、nはuの2乗に依存する関係にあった。一方で、これらの関係は統一的に表現することは困難であり、また、A1とB1を比較した場合にも、風速が10 m/sをこえるときA1では飛砂が発生していたのに対し、B1では飛砂が発生しないケースも多数確認された。

これを解決し、飛砂フラックスを様々な条件下で統一的に表現するために、前節で示したように、平均風速と高い相関関係にある乱流強度と、飛砂フラックスとの関係を調べることとした。乱流強度と飛砂フラックスとの関係は、風速とのそれと比べると、特に乱流強度が大きいとき、すなわち、飛砂フラックスが小さいときのばらつきは大きいものの、飛砂フラックスが大きいときにはA1~B2でその関係性が概ね一致した。

図-4は、上記の関係を5分間統計値に置き換え、A1~B2をまとめて表示したものである。図より、乱流強度と比して平均風速の方がばらつきが小さく、また、鉛直風速と比して水平風速の方が飛砂フラックスとの関係においてばらつきが小さかった。一方で、瞬間値における関係性と同様に、乱流強度を用いた場合に、統一的に関係性を表現することが可能であった。これは、現在平均風速に対して提案されている飛砂量式において、平均風速を乱流強度に置き換え、飛砂量式に乱流効果を取り込める可能性を示唆する、極めて重要な知見である。

乱流強度と飛砂フラックスとの関係においてばらつきが大きくなる原因としては、風速変動 u_{sd} を算定する上で、風速データの取得頻度 (1 Hz) がより高頻度である必要があることが考えられる。現在の飛砂現地観測においては、16 Hz をこえる観測も行われており、高頻度で観測を行う必要性も報告されて

いる。また、風速データの取得位置が飛砂フラックスの計測位置より1.5 m近く高い位置にあることが、この u_{sd} の算定に影響を及ぼしていたことも考えられる。今後、これらについての検討が必要である。

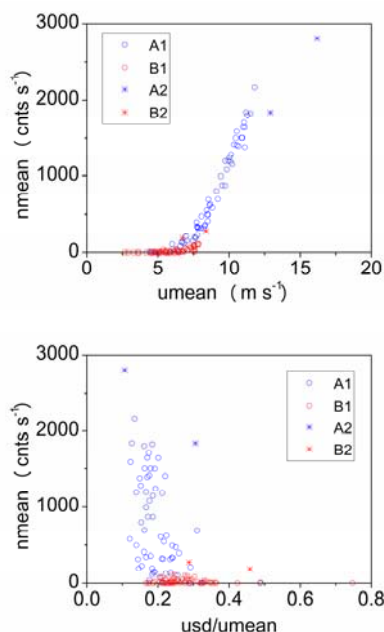


図-4 A1~B2における(a) u_{mean} と n_{mean} 、および (b) u_{sd}/u_{mean} と n_{mean} との関係。

(3) Large Eddy Simulation (LES) による砂丘周辺の風場の再現

Period 1 および 2 における砂丘周辺の風場の再現結果を図-5に表す。A1 および B1 の水平風速 u_{mean} は比較的良好に再現できていたものの、 w_{mean} や乱流強度の再現性は低かった。Period 2 においては、いずれの再現性も低かった。この不一致の原因の一つとして、流入風向風速が、一様に1/7乗則で、測点AおよびBの観測結果に合うように試行錯誤で与えられていることがあげられる。また、計算の際、2009年に計測された砂丘地形が与えられており、現地観測が行われた2012年と大きく変わっていた可能性もある。

このように砂丘周辺の風場の再現において、特に鉛直方向風速や乱流強度の再現に困難はあるものの、砂丘頂部で風速が増大し、その後で減速し地形の起伏に起因する渦を形成するなど、既存の知見に照らして妥当な風場を再現することは可能であった。

砂丘周辺の地形変化を再現するためには、まずは風場をより高精度で再現し、さらにこれを用いて、より高精度の飛砂モデルを用いた飛砂フラックスの再現が必要である。本研究で得られた成果をもとに、今後これらの改良を進めていく必要がある。

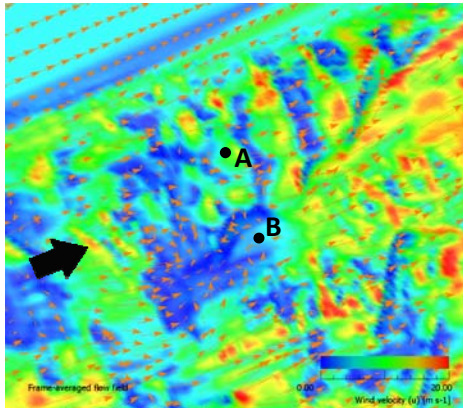
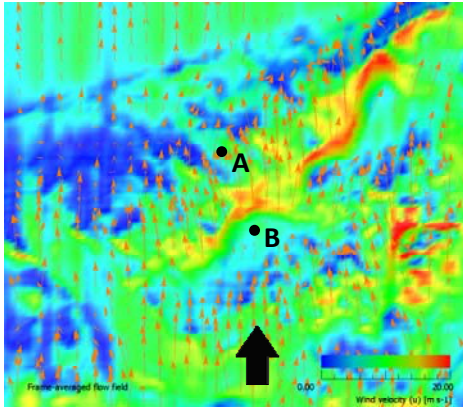


図-5 Period 1 および 2 における砂丘周辺の風場の再現結果. 赤表示は風速が大きいことを青表示は小さいことを表す. 橙矢印は水平風速ベクトルを, 黒矢印は流入風向を表す.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

1) Udo, K. : Wind turbulence effects on dune sand transport, Journal of Coastal Research (2016), Sp. Iss. 75, 333-337. (査読あり)

2) 有働恵子 : 砂丘周辺の飛砂フラックスと風向風速特性との関係, 土木学会論文集 B2 (海岸工学) (2015), 71, I_529-I_534. (査読あり)

[学会発表] (計 2 件)

1) Udo, K. : Wind turbulence effects on dune sand transport, International Coastal Symposium 2016, Sydney, March 2016.

2) 有働恵子 : 砂丘周辺の飛砂フラックスと風向風速特性との関係, 第 62 回海岸工学講演会, 東京, 2015 年 11 月.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称 :
 発明者 :
 権利者 :
 種類 :
 番号 :
 出願年月日 :
 国内外の別 :

○取得状況 (計 0 件)

名称 :
 発明者 :
 権利者 :
 種類 :
 番号 :
 取得年月日 :
 国内外の別 :

[その他]
 ホームページ等
<http://potential1.civil.tohoku.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

有働 恵子 (**KEIKO UDO**)

東北大学・災害科学国際研究所・准教授

研究者番号 : 80371780

(2) 研究分担者

()

研究者番号 :

(3) 連携研究者

()

研究者番号 :