

夏季の砂浜温熱環境に及ぼす海岸砂草の影響

Effect of Beach Grass Cover on Beach Thermal Environment in Summer

有働恵子¹

Keiko UDO

This study conducted field observations in terms of beach surface temperature, ground cover ratio of beach grass, water content, and grain size of beach sand in August 2003 at an open ocean beach in Japan, in order to investigate the effect of the ground cover on thermal environment at beach. The temperatures of sandy area and grass area had strong proportional relationships with solar radiation. In addition, the proportional coefficient of the grass area was one-tenth of that of the sandy area, indicating that beach grass was effective in moderating the thermal environment in summer. Clear effects of the water content on the thermal environment could not be observed. These results obtained from high temporospatial resolution data will contribute to beach management.

1. 緒言

海岸砂草は、海岸砂丘周辺に繁茂し、豊かな生態系を育む一方で、荒天時にはその葉茎部分で砂丘に及ぼす波や風の外力を減ずるとともに根部分で砂面下の土砂を捕捉し、砂丘の強度を高める等、重要な役割を担っている。また、夏季には砂浜の温度上昇を緩和し、その温熱環境に多大な影響を及ぼす。これに関する情報が得られれば、砂浜を利用した、より快適なレクリエーション空間の提供を考える際の一助となる。

海岸砂草については、風の外力変化との関係 (Udo・Takewaka, 2007) や、土砂輸送との関係 (辻本・西澤, 1999; Yura・Ogura, 2006; Udo・Takewaka, 2007)、地形変化との関係 (栗山・望月, 1997; 加藤・佐藤, 1998; 有働・武若, 2001)、汀線位置との関係 (西ら, 1998)、大気・土壌環境との関係 (灘岡ら, 1996; 仲座ら, 1996; Lichter, 1998; Yura・Ogura, 2006)、あるいは砂草の生長・繁茂過程 (田中ら, 2002; Foreyら, 2008) 等、様々な研究が蓄積されている。しかしながら、砂草が砂浜の温熱環境に及ぼす影響について高い時間・空間分解能で調査された例は見当たらない。

本研究では、夏季の砂浜温熱環境に着目し、砂浜の表面温度、底質粒径、ならびに含水比を調べると同時に、砂草温度および砂草繁茂分布を調べることで、砂草が砂浜温熱環境に及ぼす影響について明らかにすることを目的とする。

2. 現地調査

(1) 調査地

現地調査は、鹿島灘に面する茨城県波崎海岸 (HORS)

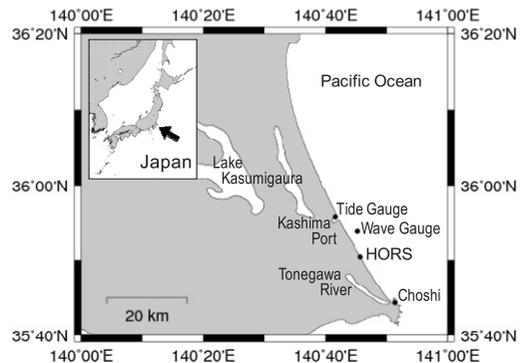


図-1 調査地の位置

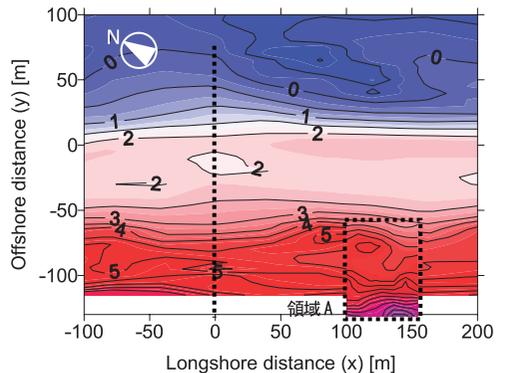


図-2 2003年8月11日の調査地の平面地形。点線：HORS 棧橋測線、点線枠内：空間計測領域A (8月18日計測、表-1参照)。

で行った (図-1)。波崎海岸は前浜勾配が1/50程度の遠浅の海岸 (図-2) で、後浜の平均粒径は0.2~0.3mm程度である。計測領域は汀線より陸上部分である。低気圧通過時および冬季には波および風の外力が大きくなる傾向にあるものの、夏季は穏やかである。2004年の1年間ほぼ毎日撮影された後浜写真の写真判読によれば、急激な地

1 正会員 博(工) 東北大学准教授 災害制御研究センター

表-1 使用データの概要

計測項目	計測位置	計測点間隔	計測頻度
平均地形, z_b	HORS栈橋 HORS空間	5m 10m	毎日 8/18
砂面温度, T_s	HORS栈橋 HORS空間	5m 10m	毎時* 8/21, 1.5hr
汀線位置, y_s	HORS栈橋	—	毎時*
底質粒径, D_{50}	HORS栈橋	5m	不定期**
砂面含水比, w	HORS栈橋	5m	不定期**
砂草温度, T_v	HORS栈橋	砂草領域	毎時*
砂草被覆率, R_v	HORS栈橋	5m	8/7
全天日射量, S	銚子气象台	—	毎時
降雨量, Pr	銚子气象台	—	毎時
気温, T_a	銚子气象台	—	毎時
湿度, hr	銚子气象台	—	毎時
風速, u	HORS栈橋	—	毎時

*2003年8月4~6日および12日の概ね日中の計測で、夜間の計測は2003年8月5日のみ。 T_v については12日の計測は行っていない。
**2003年8月5日9:00および21:00, 6日9:00, 12日6:00の計測



図-3 2004年4月12日, 8月26日, 10月18日, ならびに2005年1月4日のHORS観測棟 ($x = 55\text{m}$, $y = -105\text{m}$) から見た南東方向の眺望。砂丘付近 (写真右側) の濃い部分が植生領域。

形変化や土壤塩分増加等の波の影響が小さい $y < -60\text{m}$ の領域に4月上旬頃からコウボウムギやハマヒルガオ等の砂草が繁茂しはじめ, 5月上旬~10月中旬頃には密に繁茂し (8月下旬最盛期), その後徐々に枯渇する (図-3)。砂草領域付近では飛砂が捕捉される (有働・武若, 2001)。

(2) 調査項目

2003年8月4~6日および12日に, HORS栈橋測線上の岸沖断面地形 z_b , 砂面温度 (T_s), 底質粒径 (D_{50}), 砂草温度 (葉温, T_v), 砂草被覆率 (R_v), ならびに砂面含水比 (w) の計測を行った。これに加えて21日に, 地形の3次元性の高い領域A (図-2) における砂面温度空間分布の計測を行った (表-1)。HORS栈橋測線周辺の地形は, 沿岸方向に比較的一様である。砂面温度と砂草温度については, 林電工社製の放射温度計RT50 (計測精度: 指示

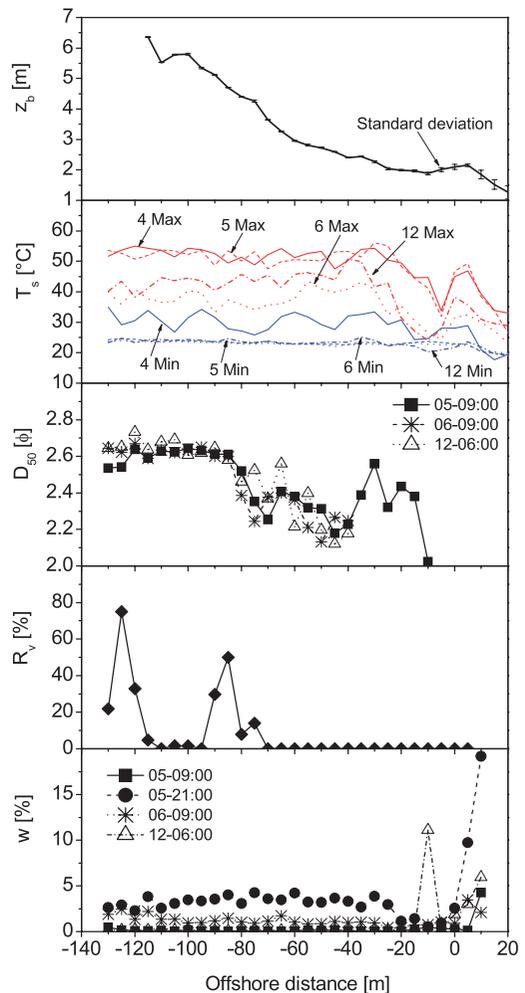


図-4 2003年8月4日~6日および12日の平均地形 z_b と最大・最小の砂面温度 T_s , 底質粒径 D_{50} , 砂草被覆率 R_v , ならびに含水比 w の岸沖方向分布

値の $\pm 1\%$ あるいは $\pm 1\text{C}$ の大きい方の値, 距離係数: 7.5) を用いて, [対象物から放射温度計までの距離/距離係数] が対象物の大きさより小さくなる地点から計測した。砂草被覆率は各調査点において $1\text{m} \times 1\text{m}$ のコドラートを含む写真を撮影し, 写真判読により砂草の被覆面積の割合を求めた。底質粒径はふるい分けにより計測し, 砂面含水比は砂乾燥前後の重量差より求めた。気象条件のデータとしては, 銚子地方气象台で取得された気象データ (全天日射量 S , 降雨量 Pr , 気温 T_a , 湿度 hr) と HORS 栈橋海側先端の海上 10m 地点で取得された 10 分間平均風速 (u) を用いた。

3. 調査結果と考察

(1) 砂面温熱環境と気象および砂草との関係

2003年8月4~6日および12日に計測された z_b と T_s の日

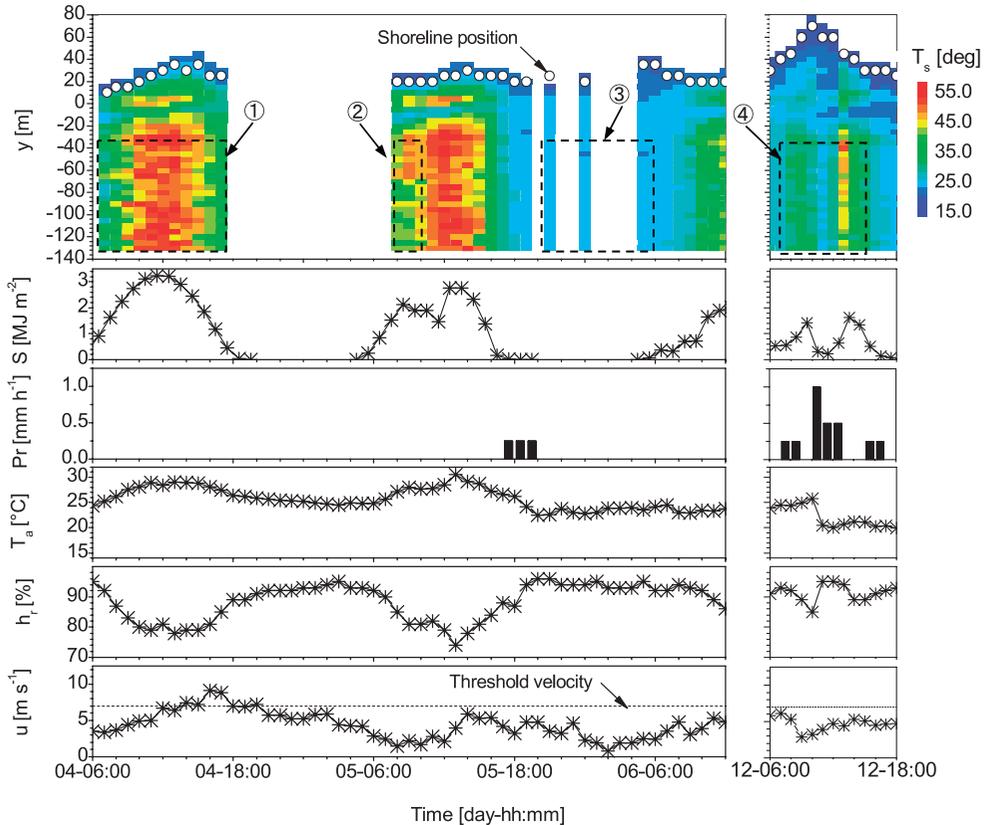


図-5 砂面温度 T_s の岸沖分布および汀線位置 y_s ，全日射量 S ，降雨量 Pr ，気温 T_a ，湿度 h_r ，ならびに平均風速 u の時系列． 0.5mm h^{-1} 未満の降雨量は 0.25mm h^{-1} として表示した．

最大値、 D_{50} 、 R_v 、ならびに w の岸沖分布を図-4に、8月4～6日、12日の T_s および y_s 、 S 、 Pr 、 T_a 、 h_r 、ならびに u の時系列データを図-5に示す。

平均地形は計測期間中概ね一定であった。計測期間中の u は最大 9.1 m s^{-1} 程度で、波崎海岸におけるUdoら(2008)の観測データより、 $u > 7\text{ m s}^{-1}$ のとき飛砂の発生が認められるようになり、 $u > 11\text{ m s}^{-1}$ のとき常時飛砂が発生し続けることを考慮すると、飛砂による土砂輸送量は極めて小さかったと考えられる。 R_v が大きい砂草領域($y = -130 \sim -115\text{m}$ および $-95 \sim -70\text{m}$)で D_{50} が小さい傾向にあるが、これは飛砂のふるい分け効果により砂丘まで飛来した細砂が砂草により捕捉されるというメカニズム(有働・武若, 2001)によるものと考えられる。

T_s の岸沖分布の時系列より、 T_s は最大で 56.1°C まで上昇していた。 $y = -5\text{m}$ 付近で T_s が小さくなる傾向にあるが、これは波の遡上高の変化の影響で、地盤高の低い場所では海水が浸透しているためである。 y_s および Pr の変化に伴う w の増加が認められない8月4日7:00～5日17:00の $y = -130 \sim -20\text{m}$ 地点において(図-4参照)、8月4日(図-5, 期間①)には、 D_{50} および R_v の変化とは無関係に T_s が上昇

していたものの、5日8:00～9:00(同図, 期間②)には、砂草領域で裸地領域($y = -110 \sim -100\text{m}$ および $-65 \sim -20\text{m}$)と比べて T_s の増加量が小さかった。また、5日夜間(21:00～翌5:00; 同図, 期間③)には $23 \sim 24^\circ\text{C}$ 、すなわち、 T_a と同程度の値であった。降雨が観測された12日(同図, 期間④)には5日8:00～9:00(期間②)と同様に、砂草領域では裸地領域と比べて T_s の増加量が小さかった。5日17:00～20:00に観測された降雨は 0.5 mm h^{-1} 未満と小さかったものの、5日21:00の w は5日9:00の0.1%から3.2%まで上昇し、6日9:00には1.2%まで低下していた。このことは、少雨であっても土壌水分への影響が大きいことを示唆する。観測期間中の同時刻における砂草領域と裸地領域の T_s の平均値を比較したところ、概ね等しいものの砂草領域で若干小さくなる傾向にあった。

(2) 砂面温度と砂草温度(葉温)との関係

同時刻におけるコウボウムギおよびハマヒルガオの T_v と砂草近傍の T_s との関係を図-6に示す。参考のため、2003年11月7日(秋季)の計測値も示す。 T_v と T_s を比較すると、 T_s と T_v の間には $T_s > 23.4$ の場合に $T_s > T_v$ の関係が認められ、 T_s は最大で 56.1°C であるのに対し、 T_v は最

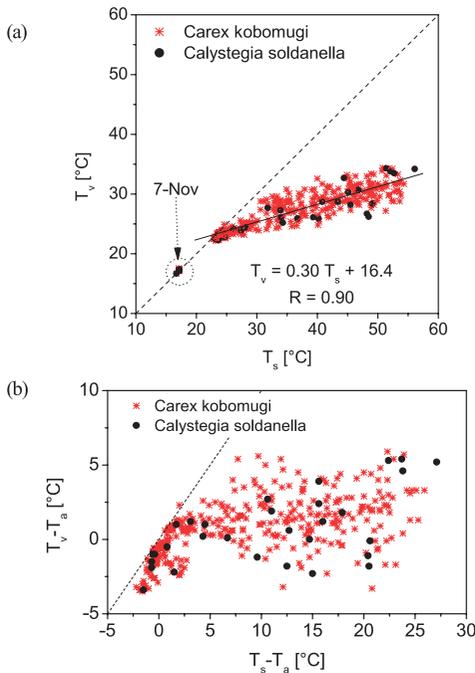


図-6 コウボウムギおよびハマヒルガオの (a) T_v と T_s との関係および (b) $T_v - T_a$ と $T_s - T_a$ との関係。(a) の近似曲線式は $T_s > 23.4$ のときの全てのプロットに対する式を示す。

大で 35°C 程度であった。 $T_v - T_a$ と $T_s - T_a$ との関係からも、 T_s が $T_a - 2 \sim T_a + 28^{\circ}\text{C}$ で変化したのに対し、 T_v は $T_a \pm 5^{\circ}\text{C}$ 程度と気温との差異が小さく、砂草が砂浜を被覆することにより夏季における砂浜の温熱環境は緩和されると推察される。ここではコウボウムギとハマヒルガオについて調べたが、本観測においては種による差異は認められなかった。また、この関係性に及ぼす降雨の有無の明確な影響も認められなかった。

次に、各時刻における全領域 ($y = -110 \sim -100\text{m}$) の平均砂面温度を T_{smean} 、砂草領域全体に繁茂していたコウボウムギの平均砂草温度を T_{vmean} とし、降雨影響の有無により場合分けした $T_{smean} - T_a$ および $T_{vmean} - T_a$ と S との関係性を調べた (図-7)。ここで、降雨前後の含水比変化および砂面温度変化から、降雨後24時間は降雨の土壌環境への影響が無視できないと仮定して5日17:00～6日12:00および12日7:00～18:00を降雨影響期間とした。降雨時には、 S が小さいため全体として温度上昇量は小さいものの、図-6と同様に降雨の有無の $T_{smean} - T_a$ および $T_{vmean} - T_a$ に及ぼす明確な影響は認められなかった。 $T_{smean} - T_a$ および $T_{vmean} - T_a$ は、 S とそれぞれ次式で表される比例関係にあった。

$$T_{smean} - T_a = 7.03S \quad (R=0.84) \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$T_{vmean} - T_a = 0.72S \quad (R=0.56) \quad \dots\dots\dots (2)$$

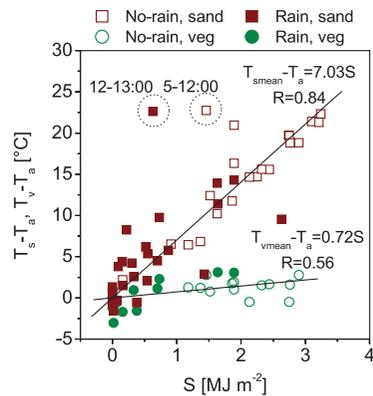


図-7 降雨の有無を考慮した $T_{smean} - T_a$ および $T_{vmean} - T_a$ と S との関係。

S が極小となった5日12:00と12日13:00における $T_{smean} - T_a$ と S との関係のみ、式 (2) との乖離が大きかった。

式 (1) と (2) の比例定数を比較すると、砂草 (葉) においては砂面の1/10程度となっており、葉温上昇に消費される日射エネルギー S の割合は、砂面温度上昇に消費される割合と比して極めて小さいと考えられる。砂面においては S のうち反射 (10～20%程度) を除く大部分が砂温上昇や砂面の水の蒸発に消費されるのに対し、砂草では S のうち反射 (15～25%程度)・透過 (10～20%程度) を除く大部分が葉温上昇や葉表面の水の蒸発に加えて光合成や蒸発散にも消費される (水理公式集, 1999; Larcher, 2007)。式 (1) と (2) の比例定数の差異は、砂草の反射が砂面のそれと比して若干大きいこと、および、砂草の場合には光の透過、蒸発散、ならびに光合成が生じることに起因すると考えられる。

一方、 T_s や T_a 、 S がある閾値をこえる場合には、高温や放射ストレスにより砂草が枯渇すると考えられる。生物の機能にとって常に安全で好適な温度は $5 \sim 25^{\circ}\text{C}$ で、温帯の植物が高温障害を受ける閾値温度は、種によって異なり $40 \sim 70^{\circ}\text{C}$ 程度である (Larcher, 2007)。観測期間中の目視観測では、このようなストレスによる致死は認められなかった。

(3) 砂面温度の空間分布

8月21日に計測した、領域A (図-2参照) における T_s の空間分布変化を図-8に示す。このときの波の遡上位置は $y = 20\text{m}$ であった。 $y < -60\text{m}$ の領域において T_s が小さいが、これは含水比の少ない移動可能な表層の砂が8月14～17日にかけて生じた $u > 7\text{m s}^{-1}$ (最大 12.7m s^{-1}) の海風により陸側へ輸送され、含水比の大きい地盤が露出したためである。

21日の12:00～17:00の1時間毎の S は、3.00, 2.72, 2.12, 1.31, ならびに 0.77 MJ m^{-2} で、観測前の1:00～3:00および7:00～8:00に 0.5 mm h^{-1} 未満の降雨が観測された。

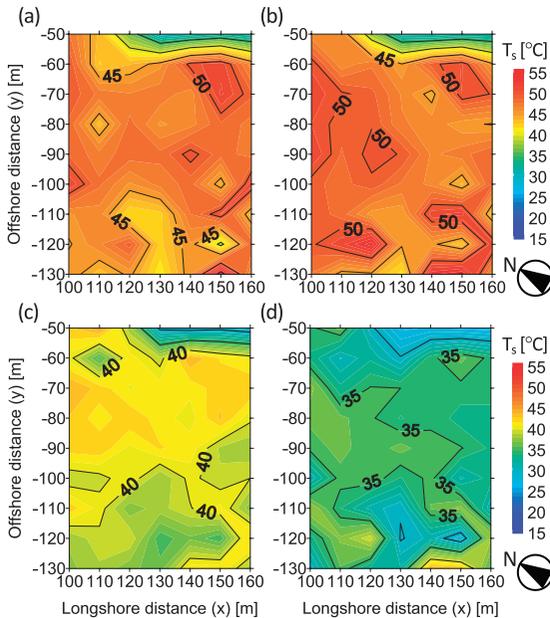


図-8 8月21日 (a) 12:00, (b) 13:30, (c) 15:00, ならびに (d) 16:30の T_s の空間分布。砂草は前砂丘付近 ($y = -80 \sim -70\text{m}$) および砂丘付近 ($y < -110\text{m}$; 頂部: $x = 150\text{m}$, $y = -130\text{m}$, $z_b = 9.7\text{m}$) に繁茂し、特に砂丘付近で R_p が大きい。図-2および図-3参照

$y > -60\text{m}$ の領域においては、12:00および13:30には砂浜全域で T_s が大きかったものの、15:00および16:30には砂丘の北側斜面や砂丘周辺の砂草が密に繁茂する領域で比較的 T_s が小さくなった。しかしながら、砂丘頂部付近では T_s が大きく、 S が小さくなった16:00時点でも 40°C を保持していた。以上は前述した砂草の砂浜温熱環境への影響と矛盾しないものの、地形の3次元性に起因して日照角度が異なる場所においてはこの影響が無視できないことを示唆する。

4. 結論

鹿島灘に面する茨城県波崎海岸で、砂面と砂草の温度、砂面の含水比、砂草の被覆率を計測することにより、砂草が砂浜温熱環境に及ぼす影響について検討した。

日射量大きい夏季の砂面温度および砂草温度について全天日射量と比較したところ、これらの温度と気温の差は全天日射量と正の相関関係にあり、砂草についての比例近似式の比例定数は砂面についてのその約1/10であった。一方、今回の観測においては、降雨による含水比の差異がこれらの関係に及ぼす明確な影響は認められなかった。

砂面温度の空間分布を調べた結果、砂丘の北側斜面で砂面温度が小さくなっており、砂浜温熱環境に関する解

析においては、地形の3次元性の影響が無視できないことを示唆した。

生態学的なエネルギー収支については、現時点では不明な点が多いが、今後、砂面含水比の詳細な変化特性の解明や、砂草の生態まで考慮したエネルギー収支の定量的な解析を行うことにより、より良い砂浜管理に資する砂浜温熱環境に関する知見を蓄積していく必要がある。

謝辞：現地観測においては、独立行政法人港湾空港技術研究所 海洋・水工部 漂砂研究室（現 沿岸環境研究領域 沿岸土砂管理研究チーム）にご協力頂いた。また、同研究室からは、地形および風速データを提供していただいた。記して謝意を表する。

参考文献

- 有働恵子・武若 聡 (2001)：後浜の地形変動に関する研究，土木学会論文集，No. 677，II-55，pp. 175-187。
- 加藤史訓・佐藤慎司 (1998)：砂浜海岸の植生群落と地形変化の現地調査，海岸工学論文集，第45巻，pp.666-670。
- 栗山善昭・望月徳雄 (1997)：後浜から砂丘前面にかけての地形変化と植生，海岸工学論文集，第44巻，pp.681-685。
- 田中規夫・渡辺 肇・谷本勝利・小松原肇 (2002)：海浜植生コウボウムギの生長および平面拡大解析，海岸工学論文集，第49巻，pp.506-510。
- 辻本哲郎・西澤謙二 (1999)：海浜植生を用いた飛砂制御に関する基礎的研究，海岸工学論文集，第46巻，pp.506-510。
- 土木学会編 (1999)：水理公式集，pp.14-18。
- 仲屋栄三・津嘉山正光・北村康司・日野幹雄 (1996)：植生帯を有する海岸における飛来塩分量に関する研究，第43巻，pp.1181-1185。
- 灘岡和夫・内山雄介・山下哲弘 (1996)：海岸空間アメニティ構成要素としての微気象および温熱環境の解析，土木学会論文集，No.533，II-34，pp.193-204。
- 西隆一郎・宇多高明・佐藤道郎・西原幸男・井ノ上由人 (1998)：吹上浜海岸における汀線と海岸植生および砂丘林境界の長期的変動特性，海岸工学論文集，第44巻，pp.661-665。
- Forey, E., Chapelet, B., Vitasse, Y., Tilquin, M., Touzard, B., and Michalet, R. (2008)：The relative importance of disturbance and environmental stress at local and regional scales in French coastal sand dunes, *Journal of Vegetation Science*, Vol. 19, pp. 493-502.
- Lichter, J. (1998)：Primary succession and forest development on coastal Lake Michigan sand dunes, *Ecological Monographs*, Vol. 68, pp. 487-510.
- Larcher, W. (2007)：植物生態生理学，シュプリンガー・ジャパン株式会社，350p。
- Udo, K. and Takewaka, S. (2007)：Experimental study on blown sand around vegetation area, *Journal of Coastal Research*, Vol. 23, pp. 1175-1182.
- Udo, K., Kuriyama, Y., and Jackson D.W.T. (2008)：Observations of wind-blown sand under various meteorological conditions. *Journal of Geophysical Research* 113: F04008, doi: 10.1029/2007JF000936.
- Yura, H. and Ogura, A. (2006)：Sandblasting as a possible factor controlling the distribution of plants on a coastal dune system, *Plant Ecology*, Vol. 185, pp. 199-208.