土木学会論文集B2（海岸工学）
Vol. B2-65，No.1，2009，551-555

Rouse浮遊砂濃度分布式の飛砂への適用に関する研究

Application of Rouse Concentration Profile to Aeolian Sand Transport

有働恵子[1]・高橋　悠[2]・真野　明[3]

Keiko UDO, Yu TAKAHASHI and Akira MANO

This study demonstrated applicability of Rouse concentration profile in suspension for fluvial sand transport to aeolian sand transport in order to investigate universal system for the sand transports in water and air and to obtain knowledge of vertical profile of aeolian sand transport flux. Comparison of the Rouse concentration profile and wind-tunnel experimental results indicated that the Rouse concentration profiles underestimated the experimental results when the mode of sand particle motion was classified into saltation by Rouse number; however, the Rouse profiles agreed with the experimental results when the mode was suspension during strong wind conditions. It is revealed that the aeolian sand is transported in suspension during strong wind events and the Rouse profile can be applied to the aeolian sand transport.

1. 緒言

飛砂は，砂漠等の砂地地域周辺における砂漠化や海岸に隣接する農地における塩害および道路への堆砂の原因となるなど，様々な分野で深刻な問題となっている．飛砂に関する問題を扱う際には飛砂量の算定が必要となるが，粒径が0.1～2.0mm程度の砂の飛砂量算定には主に掃流砂量式（Bagnold，1941；河村，1951；Owen，1964）が用いられ，浮遊砂量を考慮することは極めて少ない．

掃流砂量式と浮遊砂量式の最も大きな違いは，浮遊砂量式では砂の拡散現象に主眼が置かれるのに対し，掃流砂量式では砂面における砂粒子同士の衝突による運動に主眼が置かれることにある．この砂の輸送形態（掃流，浮遊）については，実質的にRouse数を用いて整理される場合が多く（Bagnold，1966；中川ら，1990；Rijn，1993；Hu・Hui，1996），流体と砂の密度比や流体速度等の条件によって輸送形態が異なる．砂を輸送する流体の差異，すなわち，気体中で輸送される飛砂と水中で輸送される流砂の差異に着目すると，飛砂の場合には掃流砂が卓越する現象が多いのに対し，流砂の場合には掃流砂および浮遊砂のいずれも卓越する現象がみられ，掃流砂量式（Meyer-Peter・Muller，1948；芦田・道上，1972）と浮遊砂量式（Rouse，1937；Lane・Kalinske，1941；Itakura・Kishi，1980）の両方を用いて流砂量が算定される．これは，流砂のように流体と砂の密度比が小さい場合には，砂粒子の沈降速度が小さいことから砂の跳躍（saltation）距離が長くなり，浮遊状態で輸送される砂量が大きくなるのに対し，飛砂のように密度比が大きい場合には，砂の跳躍距離が短くなるためである．

飛砂の多くは掃流により輸送され浮遊砂量は少ないことは報告されているものの，飛砂における掃流から浮遊移動への遷移過程や浮遊移動に関する研究が少ない中で，主に掃流移動のみを対象とした研究が行われている．本研究では，飛砂の輸送過程に関する基礎的な知見を蓄積するため，浮遊に関しても比較的多くの知見が蓄積されている流砂に着目し，Rouse数による飛砂と流砂の土砂輸送形態を比較して流砂における浮遊砂量算定の際に用いられるRouse浮遊砂濃度分布式の飛砂への適用に関する検討を行った．

2. 飛砂の鉛直分布に関する風洞実験

飛砂と流砂の濃度鉛直分布の比較に際しては，飛砂の濃度分布$C(z)$を算定する必要がある．$C(z)$は飛砂量$q(z)$を砂粒子移動速度$u_p(z)$で除すことにより算定されることから，qとu_pの鉛直分布データが必要となる．飛砂におけるqの鉛直分布に関してはこれまで多くの風洞実験（Nalpanisら，1993；久保田ら，2006）や現地観測（Namikas，2003）が行われているが，u_pに関する研究は少ない．ここでは，全長35mの風洞を用いた中国科学院の研究グループの実験結果より濃度分布を算定することとした．風速uおよびqの鉛直分布の実験結果（Niら，2002）とu_pの鉛直分布式（Dongら，2006）について以下に示す．

（1）風速および飛砂質量フラックスの鉛直分布

uおよびqに関するNiら（2002）の実験条件は**表-1**のとおりである．実験で使用した砂の中央粒径dは0.17mmおよび0.35mm，分級度σはそれぞれ0.35および0.60である．uの鉛直分布を図-**1**に示す．uの分布は砂面付近を除けば概ね対数則による推定風速分布と一致した．Niらは

1　正会員　博(工)　東北大学助教
2　学生会員　修(工)　伊藤忠テクノソリューションズ(株)
1　正会員　工博　東北大学教授

表-1　Niら（2002）の実験の概要

Case	d	U	u_*	z_0	H	N
17O	0.17	－	0.19（u_{*t}）	0.05	－	－
17A	0.17	8.5	0.60	0.77	0.19	4.65
17B	0.17	11.5	0.90	1.75	0.29	3.10
17C	0.17	13.5	1.20	2.37	0.33	2.33
17D	0.17	16.5	1.73	7.86	0.34	1.62
17E	0.17	22.5	2.33	9.56	0.35	1.20
35O	0.35	－	0.30（u_{*t}）	0.05	－	－
35A	0.35	8.5	0.48	0.39	0.31	10.30
35B	0.35	11.5	0.78	1.82	0.33	6.37
35C	0.35	13.5	1.14	3.27	0.35	4.37
35D	0.35	16.5	1.65	8.67	0.38	3.00
35E	0.35	22.5	2.38	11.75	0.41	2.09

d：砂の中央粒径［$\times 10^{-3}$m］，U：自由流の流速［m/s］，u_*：摩擦速度［m/s］，z_0：粗度高［$\times 10^{-3}$m］，u_{*t}：限界摩擦速度［m/s］，H：飛砂層高［m］，N：Rouse数

z_0の値を示していないため，砂面付近（$z<0.03$m）で風速分布の計測誤差が大きいことを考慮し$z>0.03$mの範囲における対数近似曲線をu分布としてu_*およびz_0を求めた．著者らが求めたu_*とNiらのu_*の値の差は-1.2～8.2％で概ね等しい．

qの分布を図-2に示す．dが0.17mmの場合にはNが小さくなる（Uが大きくなる）につれて対数分布の鉛直勾配が大きくなり鉛直方向に一様な分布となるのに対し，dが0.35mmの場合にはいずれのNにおいても概ね等しい勾配となった．Rouse数Nは$w_0/\kappa u_*$（w_0：砂の沈降速度，κ：カルマン係数，u_*：摩擦速度）で表され，土砂の沈降速度と巻き上げ速度の比に相当する変数である（例えば，Shao，2000）．

（2）砂粒子移動速度の鉛直分布

Dongら（2006）はsaltationを対象として自由流の流速$U=8$～14m/sおよび砂面から0.12mの範囲（$0\leqq z\leqq 0.12$m，境界層内）における砂粒子の移動速度u_p（z）を実験により計測し，次の経験式を提案した．

$$u_p(z)=a_1\left(\frac{z}{Z}\right)^{b_1}U \quad \cdots\cdots(1)$$

無次元係数a_1の値はdが0.17mmのとき0.90，0.35mmのとき0.57とし，b_1はいずれの粒径の場合にも0.5とした．境界層高さZは0.12mである．

式（1）の適用範囲は境界層内に限られるため，境界層外のu_p分布について検討が必要である．流砂の場合にはu_pとして流体速度uが用いられることを考慮して，Niらのu分布の実験結果（図-1参照）と式（1）のu_p分布とを比較した．風速が大きいCase 17C，17D，ならびに17Eにおいてはzのすべての範囲においてu_p（z）がu（z）より大きい値となり，他の実験ケースにおいてはdが

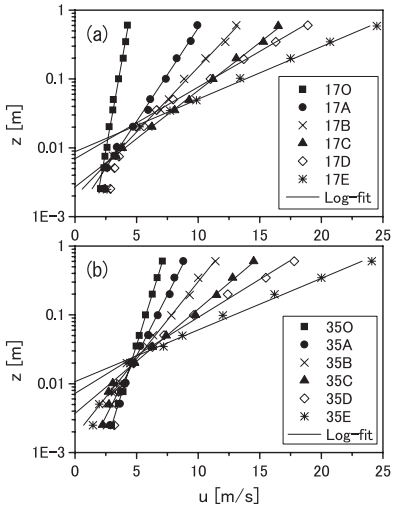

図-1　砂粒径（a）0.17mmおよび（b）0.35mmのときの風速uの鉛直分布と対数近似曲線（17O～17E，35O～35E：**表-1**参照）

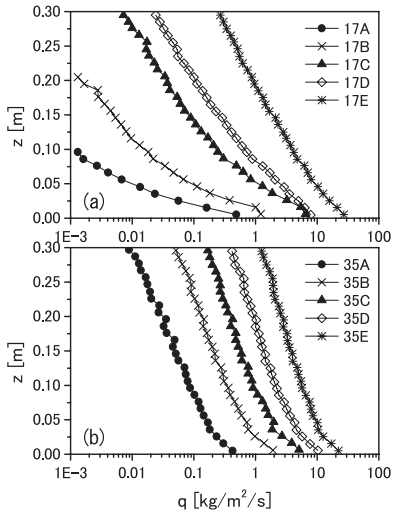

図-2　砂粒径（a）0.17mmおよび（b）0.35mmのときの飛砂質量フラックスqの鉛直分布（17A～17E，35A～35E：**表-1**参照）

0.17mmの場合には$z>0.1$mの範囲で，0.35mmの場合には$z>0.2$～0.3mの範囲でu_p（z）がu（z）より大きい値となった．これは，Niらの実験条件がDongらの実験条件（$U\leqq$14m/s，$z<0.12$m）の範囲外にあり式（1）の適用性が確認されていないためである．風速が大きくなるにつれて粒子移動速度は風速に近づくと考えられることから，ここではu_p（z）$\geqq u$（z）のときにはu_p（z）の値としてu（z）を与えた（図-3）．

（3）飛砂濃度の鉛直分布

q（z）をu_p（z）で除して得られるCの鉛直分布を図-4に示す．Cについてもqと同様の傾向が認められた．$z\leqq z_0$

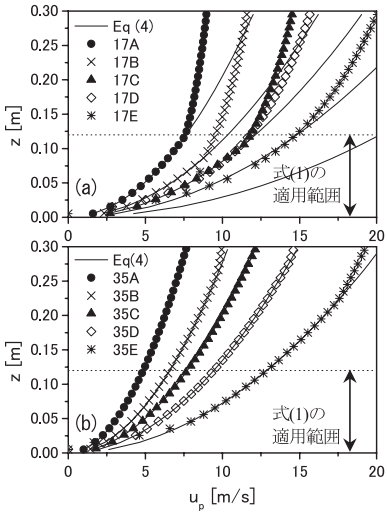

図-3　砂粒径（a）0.17mmおよび（b）0.35mmのときの砂粒子移動速度u_pの鉛直分布（17A～17E，35A～35E：表-1参照）

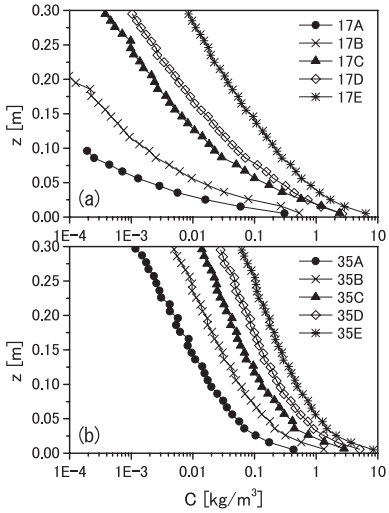

図-4　砂粒径（a）0.17mmおよび（b）0.35mmのときの飛砂濃度Cの鉛直分布（17A～17E，35A～35E：表-1参照）

において$u_p(z)$が0となる地点については表示していない．

3. Rouse分布式の飛砂への適用性に関する検討

（1）Rouseの鉛直濃度分布式の飛砂への適用

流砂の鉛直濃度分布式と2章の実験結果より得られる飛砂の濃度分布を比較することで飛砂の土砂輸送特性を調べるとともに，流砂の鉛直濃度分布式の飛砂への適用性について検討する．流砂の濃度分布式としては様々な式が提案されているが，ここでは飛砂の実験結果との比較および飛砂への適用を目的としていることから，変数が少なく最も基礎的な式であるRouse（1937，式（2））の浮遊砂濃度分布式を流砂の鉛直濃度分布とした．

$$C(z)/C(a)=\left[\left(\frac{h-z}{z}\right)\left(\frac{a}{h-a}\right)\right]^{N} \quad \cdots\cdots(2)$$

ここにaは基準点高さ，C（a）はaにおける土砂濃度，hは水深，κはカルマン定数，u_*は摩擦速度である．沈降速度w_0はRubey式（1933）より，

$$w_0=\sqrt{(s-1)gd}\left(\sqrt{\frac{2}{3}+\frac{36\nu^2}{(s-1)gd^3}}-\sqrt{\frac{36\nu^2}{(s-1)gd^3}}\right) \cdots\cdots(3)$$

で与えた．sは砂の流体中比重（$=\sigma/\rho$），gは重力加速度，dは砂粒径，νは動粘性係数である．Vanoni（1946）の流砂濃度分布の実験結果とRouse式との比較により，$N=0.34$～1.46となる場合に実験結果とRouse式が概ね一致することが確認されている．

一方，aは流砂や漂砂において$0.05h$（Rijn，1993）や$100d$（柴山ら，1994）等で与えられ，aの値により結果が異なる．さらに，飛砂の場合には水深に相当する変数がないため，hの与え方について検討する必要がある．Rijn（1993）は各輸送形態におけるNとhの関係を示しており，流砂および飛砂のいずれにおいてもNを用いて土砂輸送形態が区分されることから，Nとhの関係から飛砂におけるhの与え方を検討する．

Rijn（1993）およびDade・Friend（1998）の流砂における土砂輸送形態の区分とShao（2000）の飛砂における区分を表-2に示す．流砂における輸送形態の境界のN値は飛砂と比べて全体的に値が小さいもの，いずれにおいても掃流から浮遊移動に遷移するにつれてNが減少し，RijnとShaoの値を比較するとbed loadとsaltation，suspension（$z<0.5h$）とmodified saltation，suspension（$z<h$）とshort-term suspension，ならびにwash loadとlong-term suspensionの値が概ね一致した．これは，Nを用いることで流砂および飛砂のいずれにおいても統一的に土砂輸送の形態が判断できることを示唆する．無次元粒径D_*およびShields数ψに対するNの分布（図-5）を比較する．D_*およびψはそれぞれ

$$D_*=\left\{\frac{sg}{\nu^2}\right\}^{1/3}d \quad \cdots\cdots(4)$$

$$\Psi=\frac{u_*^2}{sgd} \quad \cdots\cdots(5)$$

で表される．ここでは$0.0001\mathrm{m}\leqq d\leqq 0.01\mathrm{m}$および$0.25\mathrm{m/s}\leqq u_*\leqq 10\mathrm{m/s}$を網羅する範囲，すなわち，飛砂においては$4.6\leqq D_*\leqq 460$および$0.030\leqq\psi\leqq 0.46$の範囲（点線枠内）を，流砂においては$0.41\leqq D_*\leqq 41$および$39\leqq\psi\leqq 620$の範囲を示す．飛砂の区分境界にあたる$N=0.25$，1.25，ならびに5.0の等高線と，Niらの実験条件についてもあわせて表示した．

飛砂および流砂の場合のD_*およびψに対する区分境界の等高線は概ね一致し，Nの分布は概ね一致していた．

表-2　流砂および飛砂におけるNと土砂輸送形態の比較

Rijn（1993），流砂		Dade・Friend（1998），流砂		Shao（2000），飛砂	
N	土砂輸送形態	N	土砂輸送形態	N	土砂輸送形態
5.0	bedload（z＜0.1h）	>3.0	bedload	>5.0	saltation
2.0	suspension（z＜0.5h）	0.3～3.0	mixed-load	1.25～5.0	modified saltation
1.0	suspension（z＜h）			0.25～1.25	short-term suspension
0.1	wash load（z＜h）	<0.3	suspension	<0.25	long-term suspension

（ ）内：流砂層の鉛直方向範囲

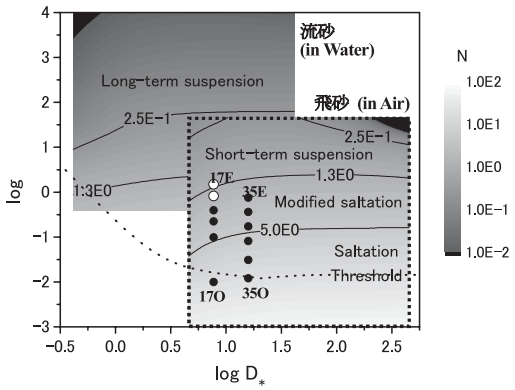

図-5　N分布と土砂輸送形態との関係
（Threshold：飛砂の発生限界；Greeley・Iversen，1985）

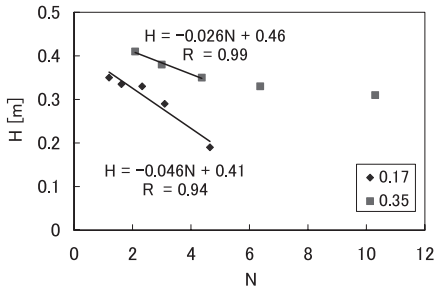

図-6　粒径0.17mmおよび0.35mmのときのNとHとの関係（**表-1**）

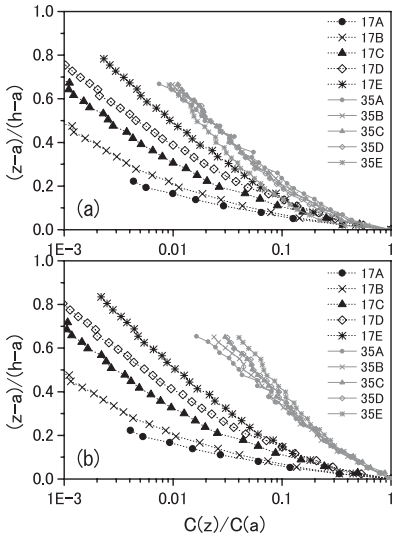

図-7　（a）a = 0.05hおよび（b）a = 100dの場合の飛砂の鉛直濃度分布$C(z)/C(a)$（17A～17E，35A～35E：**表-1**参照）

Niらの実験結果はCase 17Eの場合のみsuspensionの状態にあり，これ以外についてはsaltationあるいはmodified saltationの状態にあったと考えられる．Rijnによれば（**表-2**），流砂においてN = 1.0のときsuspensionが水面まで達した状態となることを考慮して，hはN = 1.0のときの飛砂層高Hで与えることとした．

Dongらの実験結果（2006）よりNとHは図-**6**のような負の相関関係にあった．N＜5における線形近似曲線より，N = 1.0のときのHすなわちhはd = 0.17mmの場合には0.37mで，d = 0.35mmの場合には0.44mとなる．このときaは0.05hと100dのいずれもDongらの実験の平均saltation高さ（0.01～0.04m）と同オーダーの値となった．

（2）飛砂実験の鉛直濃度分布

Dongらの実験結果（2006）を用いて，aを0.05hもしくは100dで与えてRouse分布（式（2））と同様の無次元化を行った場合の飛砂の鉛直濃度分布を図-**7**に示す．a = 0.05hとした場合にはd = 0.35mmにおいて濃度分布のNに対する明確な傾向は認められなかったものの，a = 100dとした場合にはd = 0.17mmおよび0.35mmのいずれの場合においても粒径毎にみればNが小さくなるにつれて対数分布の鉛直勾配が大きくなる傾向にあった．aはdの関数で与えた方が妥当のようである．

一方，Case 35A-35Eの場合には17A-17Eの場合と比べてNの値が大きいにもかかわらず全体的に$C(z)/C(a)$が大きくなった．これは，Case 35A-35Eの場合にはN値が比較的大きく浮遊砂層が存在しなかったため，あるいは，h計測の際に掃流砂層と浮遊砂層との境界が明確であった場合には浮遊砂層が無視されたためと考えられる．

Rouse分布の適用範囲（0.34＜N＜1.46）に近いCase 17D（N = 1.62）およびCase 17E（N = 1.20）について，aを100dで与えた場合の飛砂の濃度分布とRouse分布とを比較する（図-**8**）．飛砂の$C(z)/C(a)$の分布は，理論的には17Eの方がsuspensionの状態にあるためRouse分布に近づくと考えられるものの，Case 17Dの場合にRouse分

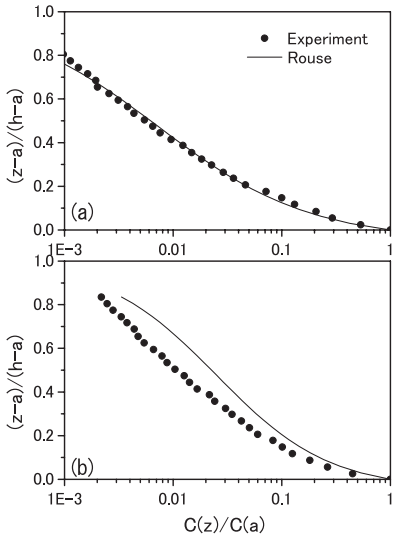

図-7 （a）Case 17Dおよび（b）17Eにおける飛砂の鉛直濃度分布$C(z)/C(a)$（実験値）とRouse分布の比較

布とほぼ一致し，17Eの場合にはRouse分布より小さい値となった．この原因としては，hの定義が明確でなく，Rijnの提案している流砂層高とDongらの飛砂層高の定義や計測方法が異なることや，D_*およびψに対するN分布が流砂と飛砂で若干異なること（図-5参照）等が挙げられる．Case 17Dおよび17E以外の場合には$C(z)/C(a)$の分布の方がRouse分布より大きい値となった．

以上のように，u_pおよびaの与え方や，hの定義・計測方法等に検討の余地は残されているものの，少なくともN値がRouse分布の適用範囲に近い場合には流砂および飛砂の分布をRouse分布により統一的に表すことが可能と判断された．現地においても強風時（例えば，d = 0.2mm，u_*＞2.6m/sのときやd = 0.5mm，u_*＞5.0m/sのときN＜1.25）には浮遊による砂輸送量を無視できないと考えられ，今後飛砂の浮遊現象に関する知見の蓄積が必要とされる．

4. 結論

本研究では，飛砂の輸送過程に関する基礎的な知見を得るため，流砂について得られているRouseの浮遊砂量式の飛砂への適用を試みた．u_pおよびaの与え方，hの定義や計測方法等に検討の余地は残されているものの，流砂と飛砂の土砂輸送形態区分は概ね一致しており，suspensionに区分されるRouse数＜1.6程度の場合にはRouse式の飛砂への適用が可能であると判断された．強風時には現地においても浮遊による土砂輸送が生じると考えられ，これを考慮する必要がある．

謝辞：本研究は，（財）前田記念工学振興財団 研究助成（代表者：有働恵子）の援助を受けて行われた．

参 考 文 献

芦田和男・道上正規（1972）：移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究，土木学会論文報告集，第206号，pp. 59-69.

河村龍馬（1951）：飛砂の研究，海岸工学論文集，第36巻，pp. 359-363.

久保田進・保坂幸一・鵜飼正志・堀田新太郎（2006）：風洞実験データに基づく飛砂量鉛直分布予測法の確立，海岸工学論文集，第53巻，pp. 431-435.

柴山知也・Winyu Rattanapitikon・岡安章夫（1994）：砕波帯内の浮遊漂砂量の算定モデル，海岸工学論文集，第41巻，pp. 431-435.

中川博次・辻本哲郎・村上正吾・後藤仁志（1990）：掃流から浮遊への遷移の出現機構とその流砂過程における役割，土木学会論文集，第417号，pp. 149-156.

Bagnold, R. A. (1941): The Physics of Blown Sand and Desert Dunes, Methuen, London, 265p.

Bagnold, R. A. (1966): An approach to the sediment transport problem from general physics, US Geological Survey Professional Paper 422-I, 37p.

Dade, B. and P.F. Friend (1998): Grain size, sediment-transport regime and channel slope in alluvial rivers, Journal of Geology, Vol. 106, pp. 661-675.

Dong, Z., G. Qian, W. Luo and H. Wang (2006): Analysis of the mass flux profiles of an aeolian saltating cloud, Journal of Geophysical Research, Vol. 111, D16111.

Greeley, R. and J. D. Iversen (1985): Wind as a geological process on Earth, Mars, Venus and Titan, Proceeding Royal Society of London, Serie A, Vol 224, pp. 1325-1343.

Hu, C. and Y. Hui (1996): Bed-Load Transport. I: Mechanical Characteristics, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 122, pp. 245-254.

Itakura, T. and T. Kishi (1980): Open channel flow with suspended sediments, Journal of the Hydraulics Division, 106(HY8), pp. 1325-1343.

Lane, E.W. and A.A. Kalinske (1941): Engineering calculations of suspended sediments, Trans. AGU, 22, pp. 603-607.

Meyer-Peter, E. and R. Muller (1948): Formulas for bedload transport, Proc. 2nd IAHR Meeting, Stockholm, pp. 39-64.

Nalpanis, P., J. C. R. Hunt and C. F. Barrett (1993): Saltating particles over flat beds, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 251, pp. 661-685.

Namikas, S. L. (2003): Field measurement and numerical modeling of aeolian mass flux distributions on a Sandy Beach, Sedimentology, Vol. 50, pp. 303-326.

Ni, J.R., Z.S. Li and C. Mendoza (2002): Vertical profiles of aeolian sand mass flux, Geomorphology, Vol. 49, 205-218.

Owen, P. R. (1964): Saltation of uniform grains in air, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 20, pp. 225-242.

Rouse, H. (1937): Nomogram for the settling velocity of spheres, Division of Geology and Geography, Exhibit D of the Report of the Commission on Sedimentation, 1936-37, National Research Council, Washington, D.C., pp. 57-64.

Rubey, W. W. (1933): Settling velocities of gravel, sand, and silt particles, American Journal of Science, Vol. 25, pp. 325-338.

Shao, Y. (2000): Physics and Modeling of Wind Erosion, Kluwer Academic Pub., 393p.

van Rijn, L.C. (1993): Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas, Aqua Publication, Amsterdam.

Vanoni, V. A. (1946): Transportation of suspended sediment by water, Transactions of ASCE, Vol. 111, pp. 67-133.