海岸工学論文集，第55巻（2008）
土木学会，721-725

浮遊砂による底質の沖合い流出量の定量評価に関する研究

Evaluation of a Cross-shore Outflow Rate of Suspended Sediment

泉　正寿[1]・泉宮尊司[2]

Masatoshi IZUMI, Takashi IZUMIYA

A cross-shore outflow rate of suspended sediment is important in estimating coastal sediment budget. On estimating an outflow rate, vertical distributions of concentration of suspended load were evaluated as a function of bottom friction velocity due to wave action and settling velocity of suspended load. With these results, by solving numerically the conservation equation of sediment and the advective diffusion equation of the suspended load, and integrating it in the cross shore direction from the location of a berm to that of the critical depth for drift sand movement, a sediment loss flowing to a deeper region than the critical depth for drift sand movement was obtained. As a result, the bottom changes due to suspended load cannot be neglected.

1. はじめに

これまでの海浜変形に関する研究では，海底勾配が急な海岸や海底谷が存在する場合を除いて，底質の沖合い流出の存在は余り認識されておらず，その評価手法も確立されていない．しかしながら，泉宮ら（1999）のADCP観測によると，波高1m程度の海象条件で，波浪に対応した浮遊砂が地形変化の限界水深を超える水深約10mの海域で観測されていることや，砂面計，濁度計および流速計等の現地データからは，荒天時に底質が巻き上がり流れに乗って浮遊状態で輸送される現象が観測されていることから（田村ら2000，2001），高波浪時には砕波帯内だけでなく，砕波帯外においても高濃度の浮遊砂が発生し，波動流速および乱れの強さなどから判断して，常に沖向きの拡散力が働くために，底質は沖側へ輸送され，時化がおさまると沈降・堆積する傾向にあると考えられる．このような浮遊砂による沖合い流出量の定量的な評価は難しく，これまでは土砂収支を満たすように間接的に取り入れられていたに過ぎなかった．

海岸保全対策を検討するためには，土砂収支を把握することが重要であり，特に，供給土砂量が減少し侵食が進んでいる海岸では，沖合いへの土砂流出量を含めた土砂収支を正確に把握する必要がある．そこで本研究では，浮遊砂の移流拡散方程式を厳密に取り扱い，浮遊砂の沖合いフラックスを評価することにより，浮遊砂による底質の沖合い流出量を定量的に評価する手法を確立することを研究の目的とする．

2. 浮遊砂濃度の鉛直分布の評価

泉宮ら（1999）のADCP観測によると，波高約0.9m，周期約7sの海象条件で，波浪に対応した浮遊砂が水深約6mから10mの海域で観測されている．このことから，浮遊砂濃度を表すために，浮遊砂濃度の鉛直分布を決定する基準面濃度C_aを式(1)に示すように波浪による摩擦速度u_*と底質の沈降速度w_oの比のベキ乗に比例するものとして考えた．

$$C_a = A\left(\frac{u_*}{w_o}\right)^m \tag{1}$$

浮遊砂の鉛直濃度分布式は，拡散係数が水の乱流拡散係数に等しいとして導かれたRouseの濃度分布式（Rouse, 1937）と水深方向の平均値を用いて導かれたLane-Kalinske型の濃度分布式（Laneら,1941）に基準面濃度を表す式(1)を代入し，実験結果の再現性を比較した結果，式(2)に示すRouseの濃度分布式を用いることとした．

$$\frac{C}{C_a} = \left(\frac{h-z}{z}\cdot\frac{a}{h-a}\right)^N \tag{2}$$

ここに，zは鉛直座標であり，h，aは水深，浮遊砂の基準面高さ，$N=w_o/(\beta\kappa u_*)$，$\beta=1+k_1(w_o/u_*)^{k_2}$，$\kappa$：カルマン数，$k_1$=1.56，$k_2$=2.0（辻本，1986）である．係数$A$，$m$は，電力中央研究所の大型，中型造波水路実験（鹿島ら，1982）およびDettaら（1986）の浮遊砂データから決定した．これらの実験データを用いたのは，不規則波による実現象に近い波高，周期で実験が行われているためである．

係数A，mの評価に際し，浮遊砂の鉛直濃度は式(2)から基準面高さおよび基準面濃度で決定されること，式(1)から基準面濃度は波浪による摩擦速度u_*の関数であり，u_*はニクラーゼの相当粗度k_sにより決まる．これらのことから，浮遊砂の基準面高さaとニクラーゼの相当粗度k_sは等しいとし，相当粗度k_sは底質が移動していない平坦床の場合には底質粒径dあるいはその2倍程度の値が用いられることから，aおよびk_sを底質粒径の1～4倍に

1正会員　工博　国際航業株式会社防災海洋部
2正会員　工博　新潟大学工学部教授

変化させて実験データが最もよく再現できる係数A，mを求めた．その結果，**図-1**に示す$a=k_s=2d$の場合に最も相関がよく，係数A=0.021，m=2.1が得られた．この係数を用いると式(2)は式(3)のとおりとなり，浮遊砂濃度は，波浪による摩擦速度u_*と底質の沈降速度w_oの比のほぼ2乗に比例することが示される．式(3)から浮遊砂濃度の鉛直分布を計算し，実験データの鉛直分布と比較した結果を**図-2**に示す．これから，浮遊砂の鉛直濃度分布がよく再現できていることが分かる．

$$C=0.021\left(\frac{u_*}{w_o}\right)^{2.1}\left(\frac{h-z}{z}\cdot\frac{a}{h-a}\right)^{N} \tag{3}$$

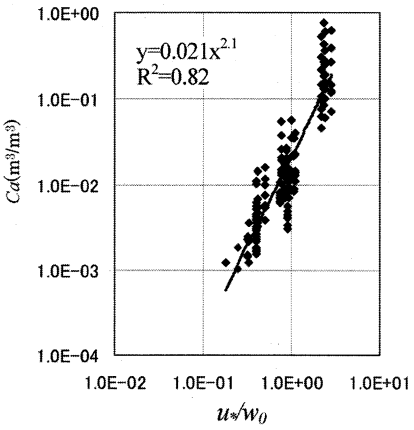

図-1　基準面濃度C_aとu_*/w_0の関係

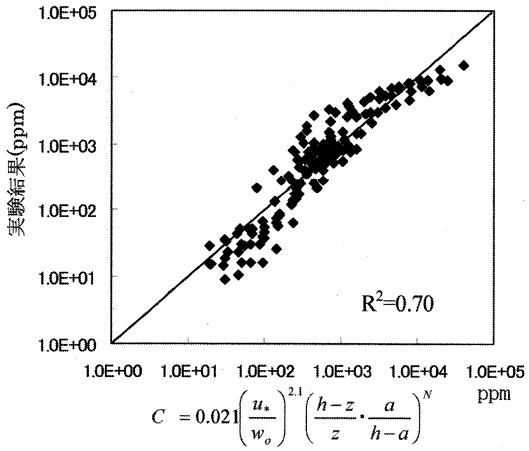

図-2　$C_a=A(u_*/w_0)^m$による浮遊砂濃度の鉛直分布の評価

3. 浮遊砂による沖合い土砂流出量の評価

(1) 評価式の導入

底質の沖合い流出量を評価するため，式(4)に示す地形変化と土砂収支の関係式および式(5)の浮遊砂の移流拡散式を用いる．

$$\frac{\partial h}{\partial t}=\left(\frac{\partial q_x}{\partial x}+\frac{\partial q_y}{\partial y}\right)+q_{p-h}=\overline{C_o w_o} \tag{4}$$

$$\frac{\partial C}{\partial t}+\frac{\partial (Cu)}{\partial x}+\frac{\partial (Cv)}{\partial y}+\frac{\partial (Cw)}{\partial z}-\frac{\partial (Cw_o)}{\partial z}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\varepsilon_x\frac{\partial C}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\varepsilon_y\frac{\partial C}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\varepsilon_z\frac{\partial c}{\partial z}\right) \tag{5}$$

ここに，x，y，z:岸沖，沿岸，鉛直方向の座標，t：時間，q_x，q_y: x，y方向の土砂移動量 u，v，w：x，y，z方向の平均流速，ε_x，ε_y，ε_z：x，y，z方向の拡散係数，q_{p-h}：底面における浮遊砂の巻き上げ量，C_o：浮遊砂の海底面における濃度である．

式(5)を$z=-h$（底面）から$z=\zeta$（水面）まで積分して周期平均をとり，ライプニッツ則および底面と水面での境界条件を用いて変形すると，次式が得られる．

$$q_{p-h}-\overline{C_o w_{o-h}}=\frac{\partial}{\partial t}\overline{\int_h^{\zeta} C dz}+\frac{\partial}{\partial x}\overline{\int_h^{\zeta} C u dz}+\frac{\partial}{\partial y}\overline{\int_h^{\zeta} C v dz}-\frac{\partial}{\partial x}\overline{\int_h^{\zeta}\varepsilon_x\frac{\partial C}{\partial x}dz}-\frac{\partial}{\partial y}\overline{\int_h^{\zeta}\varepsilon_y\frac{\partial C}{\partial y}dz} \tag{6}$$

ここに，w_{o-h}は底質の底面における沈降速度であり，式 (6)を地形変化の連続式(4)に代入すると，次式が得られる．

$$\frac{\partial h}{\partial t}=\frac{\partial q_x}{\partial x}+\frac{\partial q_y}{\partial y}+\frac{\partial}{\partial t}\overline{\int_h^{\zeta} C dz}+\frac{\partial}{\partial x}\overline{\int_h^{\zeta} C u dz}+\frac{\partial}{\partial y}\overline{\int_h^{\zeta} c v dz}-\frac{\partial}{\partial x}\overline{\int_h^{\zeta}\varepsilon_x\frac{\partial C}{\partial x}dz}-\frac{\partial}{\partial y}\overline{\int_h^{\zeta}\varepsilon_y\frac{\partial C}{\partial y}dz} \tag{7}$$

式(7)を沖側移動限界x_lからバームの位置x_oまで積分を行い，式(2)を代入して係数αを用いて$\varepsilon_x=\alpha u_* h$とすると，沖側単位長さ当りの浮遊砂による土砂流出量q_{off}は，次のように表せる．

$$q_{off}=\alpha A m u_* h_c\left(\frac{u_*}{w_o}\right)^{m-1}\frac{\partial}{\partial h}\left(\frac{u_*}{w_o}\right)\frac{\partial h}{\partial x}\int_h^{\zeta}\left(\frac{h-z}{z}\cdot\frac{a}{h-a}\right)^{N}dz \tag{8}$$

ここに，h_cは地形変化の限界水深である．さらに，微分項と積分項を関数$g(w_o/\kappa u_*)$とし，$\partial h/\partial x=\tan\beta$（沖側境界での海底勾配）とすると，土砂流出量$q_{off}$は，

$$q_{off} \cong \alpha A m u_* h_c \left(\frac{u_*}{w_o}\right)^{m-1} \tan\beta \times g\left(\frac{w_o}{\kappa u_*}\right) \tag{9}$$

となる．また，u_*は波浪による摩擦速度であるので，底面流速とエネルギーとの関係を用いて，土砂流出量q_{off}を書き換えると，

$$q_{off} = \alpha A m \frac{h_c}{w_o^{m-1}} \left(\frac{f_w E}{\rho h}\left(\frac{2C_g}{C}-1\right)\right)^{\frac{m}{2}} \tan\beta \times g\left(\frac{w_o}{\kappa u_*}\right) \tag{10}$$

となる．ここに，Cは波速，C_gはエネルギー輸送速度である。式(10)から，底質の沖合い流出量は，波浪のエネルギーあるいはエネルギー流束のベキ乗に比例し，地形変化の限界水深付近の海底勾配に比例していることが分かる．この限界水深付近の海底勾配が大きいほど流出量が大きくなる関係は，経験的に知られていることである．この関係式を用いて，波浪条件および地形変化の限界水深h_cと海底勾配$\tan\beta$から底質の沖合い流出量を容易に評価することが可能となる．ここで，A=0.021，m=2.1であり，係数αはRouse式が拡散係数ε_zは水の乱流拡散係数に等しいとして導かれていることから，底面および水面で0となり，1/2水深で極大値となるような放物線分布の水深平均値から0.067となる．関数$g(w_o/\kappa u_*)$は，**図-3**に示すとおりである．

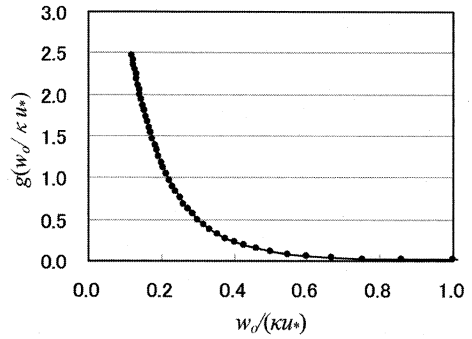

図-3　関数gと$w_o/(\kappa u_*)$との関係

(2) 新潟海岸における浮遊砂による底質の沖合い流出量の評価

新潟沖6ヶ年データ（(財) 沿岸開発技術研究センター，1996）の年間当たりの波高周期結合確率分布を用いて，式(9)より底質の沖合い流出量$q_{off}(H,T)$を式(11)に示すように出現する波高周期すべての組み合わせについて粒径別に算出した．**図-4**に波高周期の出現頻度分布と底質粒径0.15mmの場合の年間当たり海岸線1m当りの波高周期別沖合い流出量分布を示す．地形変化の限界水深hcは8mとした．これから，波高2.0m以下の波浪は，出現頻度は高いがほとんど沖合い流出に寄与せず，出現頻度の低い波高3.0m以上の波浪が沖合い流出に寄与していることが分かる．

$$\sum q_{off}(H,T) = p(H,T) \times dH \times dT \tag{11}$$

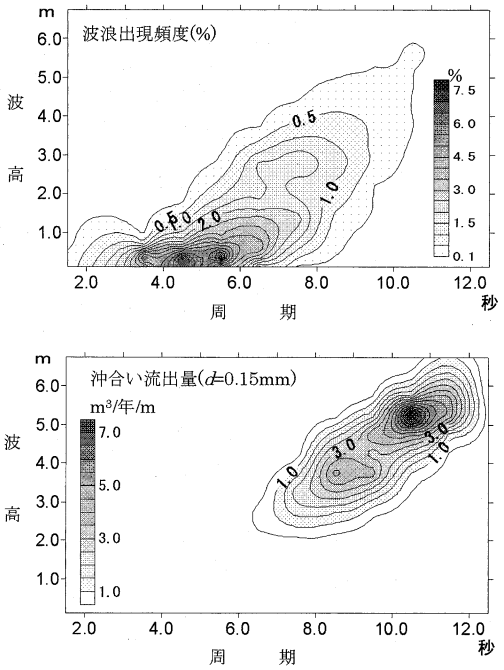

図-4　波高周期別底質の沖合い流出量(d=0.15mm，新潟海岸)

粒径別の沖合い流出量は，**表-1**および**図-5**に示すとおりとなる．この粒径別沖合い流出量は，底質が単一粒径の場合の評価結果である．実際に新潟海岸に存在する底質の粒度組成は，**図-6**に示すとおりである．これから，汀線付近で底質を構成する粒径は，およそ0.2mmから0.9mm程度であり，水深が深くなるにしたがい粒径の小さいものの量が多くなり，新潟海岸の地形変化の限界水深である水深8mでは0.25mm以下の粒径の底質がほとんど大部分を占めている．このことは，汀線付近から沖へ向かって底質の移動が生じており，粒径の細かいも

のほど沖へ運ばれやすく，およそ0.1mm以下の粒径の底質は汀線付近にはほとんど留まらず沖へ輸送されること，およそ0.25mm以上の粒径の底質は沖へ輸送されにくいことを示している．沿岸漂砂によって運ばれてきた土砂が沖向きの土砂輸送による分級作用を受けなければ，底質の粒度組成は汀線付近もその沖側も同じはずである．したがって，岸側の底質は沖向きの土砂移動が生じた後の粒度組成，沖側の底質は岸側から移動してきたものと考えることができるので，**表-1**および**図-5**の底質の粒径別沖合い流出量に岸沖の平均粒度組成を乗じることにより底質の沖合い流出量が評価できると考えられる．

表-1　底質の粒径別沖合い流出量

粒径(mm)	沖合流出量(m^3/年/m)
0.075	7.88E+03
0.106	8.13E+02
0.110	6.29E+02
0.120	3.42E+02
0.130	1.95E+02
0.140	1.16E+02
0.150	7.20E+01
0.160	4.64E+01
0.170	3.11E+01
0.180	2.15E+01
0.190	1.54E+01
0.200	1.13E+01
0.210	8.60E+00
0.220	6.69E+00
0.230	5.32E+00
0.240	4.33E+00
0.250	3.59E+00
0.425	8.79E-01
0.850	8.12E-01
2.000	1.36E+00

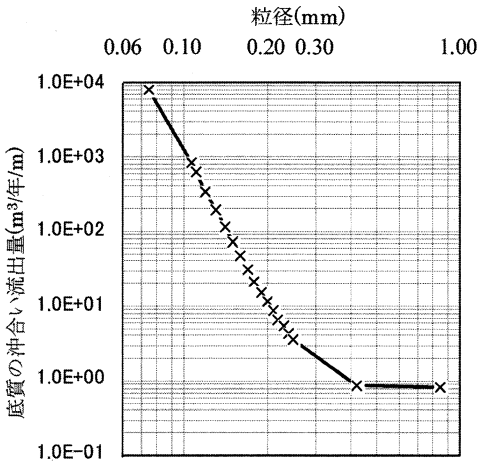

図-5　底質の粒径別沖合い流出量

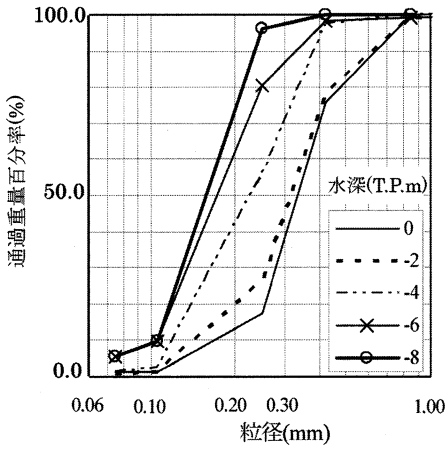

図-6　新潟海岸の水深別底質の粒度組成分布図

水深0mから8mの平均粒径の通過質量百分率をWeibull分布および対数正規分布に当てはめ，**図-7**に示すように最も相関のよいWeibull分布(k=1.9)を用いて補間し，これを用いて底質の粒径別沖合い流出量を算出した．

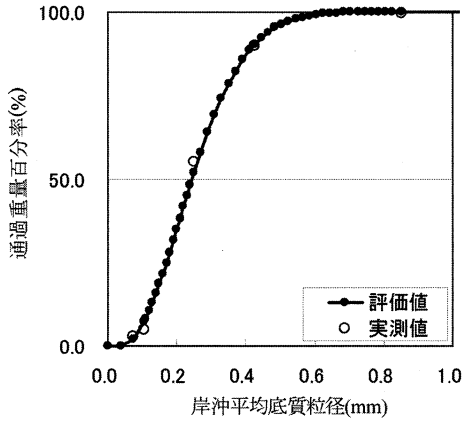

図-7　新潟海岸の岸沖平均粒度組成

評価結果を**表-2**に示すが，新潟沖の波浪条件では，沖合い土砂流出量は粒径がおよそ0.15mm以下ではかなり大きく，逆に粒径がおよそ0.4mm以上ではかなり小さくなることが示された．この結果は，多くの自然海浜において，地形変化の移動限界水深付近の底質粒径が0.15mm～0.2mmとなっている結果とほぼ一致している．また，新潟海岸で海岸を構成する粒径0.15mm以上の底質は，単位幅当りの年間沖合い流出量が約7.5m^3と推定でき，これは，海岸線1km当たりに換算すると，年間約7,500m^3の沖合い土砂流出量と評価できる．同様に粒径0.2mm以上の底質では，単位幅当りの年間沖合い流出量が約1.8m^3

と推定でき，海岸線1km当たりに換算すると，年間約1,800m³の沖合い土砂流出量と評価できる．これは，新潟海岸など日本海側に位置する海岸の沿岸漂砂量が年間数万から10数万m³であるので，中長期的な土砂収支を評価する上で無視できない量である．

本手法により，波浪条件と地形変化の限界水深および海底勾配が決まれば，粒径別の沖合い流出量の算定が可能となり，海浜の土砂収支が深浅測量データから精度良く把握することができ，3次元海浜モデル，等深線モデル等と併せて評価することにより，中長期的な土砂管理方策の検討に役立てられるものと考える．

表-2 新潟海岸における底質の粒径別沖合い流出量

粒径(mm)	組成比率(%)	q_{off} (m³/年/m)
0.075	2.0	155.88
0.106	5.2	42.14
0.110	0.9	5.44
0.120	2.3	7.98
0.130	2.6	4.98
0.140	2.8	3.19
0.150	2.9	2.10
0.160	3.1	1.42
0.170	3.2	0.99
0.180	3.3	0.70
0.190	3.3	0.51
0.200	3.4	0.38
0.210	3.4	0.29
0.220	3.4	0.23
0.230	3.4	0.18
0.240	3.3	0.14
0.250	3.3	0.12
0.425	38.7	0.34
0.850	9.7	0.08
2.000	0.0	0.00

4. 結論

地形変化の連続式と浮遊砂の移流拡散方程式を用いて，沖合い流出土砂量を理論的に評価した結果，以下の事柄が明らかとなった．

(1)本研究で得られた沖合いへの浮遊砂による底質の流出量は，波浪のエネルギーあるいはエネルギー流束のベキ乗に比例し，地形変化の限界水深付近の海底勾配に比例していることが分った．この限界水深付近の海底勾配が大きいほど流出量が大きくなる関係は，経験的に知られていることとも一致している．

(2)本評価式により浮遊砂による底質の沖合い流出量は，波高，周期，底質粒径，地形変化の限界水深，海底勾配が求められれば容易に評価することができる利点を有している．

(3)新潟海岸では，波高2.0m以下の波浪は，出現頻度は高いがほとんど沖合い流出には寄与せず，出現頻度の低い波高3.0m以上の波浪が沖合い流出に寄与していることが分かった．

(4)新潟沖の波浪条件では，沖合い土砂流出量は粒径がおよそ0.15mm以下ではかなり大きく，逆に粒径がおよそ0.4mm以上ではかなり小さくなることが示された．この結果は，多くの自然海浜において，地形変化の移動限界水深付近の底質粒径が0.15mm～0.2mmとなっている結果とほぼ一致しており，本評価式の関係が現地海浜に適用できることの1つの根拠となっている．

(5)新潟海岸を例にとり，0.15mm以上の底質の1年間当たりの沖合い流出量を算定したところ，7.5m³/m/yと算定された．この値は海岸線1km当りに換算すると，年間7,500m³にも及び，細粒径の底質が卓越する海岸では無視できない量である．

(6)本評価式により海浜の土砂収支が深浅測量データから精度良く把握可能となり，3次元海浜モデル，等深線モデル等と併せて評価することにより，中長期的な土砂管理方策の検討に役立てられるものと考えられる．

(7)底質の沖合い流出量の適用性をさらに高めるためには，できる限り多くの海岸に適用し，精度の高い海浜地形測量データと水深別の粒度分布を用いることにより，比例係数の精度を高めることが必要と考えられる．

謝辞：浮遊砂の実験データは，電力中央研究所清水隆夫氏に提供いただいた．ここに謝意を表す．

参考文献

泉宮尊司・國田知基・泉　正寿・永松　宏・石橋邦彦(1999)：船体取付型ADCPによるシルトおよび微細砂の濃度の時空間変動の現地観測，海岸工学論文集，第46巻，pp.576-580.

鹿島遼一・清水隆夫・斉藤昭三・丸山康樹(1982)：大型造波水路による岸沖漂砂の実験，データ集No.1，電力中央研究所.

(財)沿岸開発技術研究センター(1996)：全国港湾海洋波浪観測25ケ年統計NOWPHAS1970～1994，pp185.

田村　進・赤澤　勝・和田耕造・永松　宏・泉　正寿(2000)：新潟西海岸の地形変動機構の検討—VHFレーダー，ADCPの現地観測—，海岸工学論文集，第47巻，pp.456-460.

田村　進・近川喜代志・西條正輝・高野剛光・山谷弘幸・泉正寿(2001)：風を考慮した2層海浜流モデルによる新潟西海岸の流況特性，海岸工学論文集，第48巻，pp.41-45.

辻本哲郎(1986):乱流による土砂輸送－浮遊砂の拡散係数に対する検討－，第30回水理講演会論文集，pp.637-642.

Detta, H. H. and K. Uliczka (1986): Velocity and sediment concentration field, Proc.20th Coastal Engineering Conf., ASCE, pp.1062-1076.

Lane, E. W. and A. A. Kalinske (1941): Engineering calculation of suspended sediment Trans. AGU, Vol.22, 307-603.

Rouse, H. (1937): Modern conceptions of mechanics of turbulence, Trans. ASCE, Vol.102, pp.463-543.