

岸沖・沿岸漂砂量則の統一表示

河田 恵昭*・土屋 義人**

1. 緒 言

近年、3次元の海浜変形予測モデルを適用し、海岸構造物築造などの種々の境界条件のもとで、海浜過程が考察されるようになってきた。そこでは、波や海浜流という外力の評価に対して、運動量やエネルギーの保存則が適用され、物理的に妥当な表示を得る努力が続けられている。しかし、同時に用いられる任意の海底地形を対象とした漂砂量式については、これまでいくつか提案されているものの、それらは漂砂のメカニズムに立脚して定式化されたものでは必ずしもない。

現在用いられている諸式の特徴は、つぎのようにまとめられる。まず、Bailard・Inman (1981 a, 1981 b) は、Bagnold (1963) のパワーモデルを波と流れの共存場に適用しようとして、いくつかの仮定のもとで実際に適用し易い形で定式化を行っている。この式では、掃流漂砂と浮遊漂砂を機械的に分けて取り扱っているほか、漂砂の移動方向についての考え方や沿岸方向に勾配のある場合への適用などの問題があろう。わが国でも渡辺(1981)や清水ら(1983)は、漂砂現象を単純化し、かつ従来研究成果の導入や数値シミュレーションへの適用性を考慮した比較的簡単な表示式を提案している。

本論文は、河田(1989)が誘導した砂粒の saltation 機構に基づく岸沖漂砂量則を、任意海底地形で、かつ任意の波向と流向をもつ波や海浜流の外力条件のもとにおける漂砂量則へと拡張したものである。そして、力学的に一貫した取り扱いから、沿岸漂砂量則や浜漂砂量則が求められる。この解析の特徴は、海浜上で継続跳躍し、定常跳躍に達している砂粒は、その沿岸方向の速度成分も、定常速度になっていると考えていることである。したがって、従来のように、海浜上の砂粒の運動方向が底面せん断応力や流速の方向に等しいというような仮定を付加する必要はない。砂粒の運動機構の解析から、岸沖・沿岸方向の砂粒の速度成分の合成ベクトルとして、漂砂の移動方向が自然に求められる。

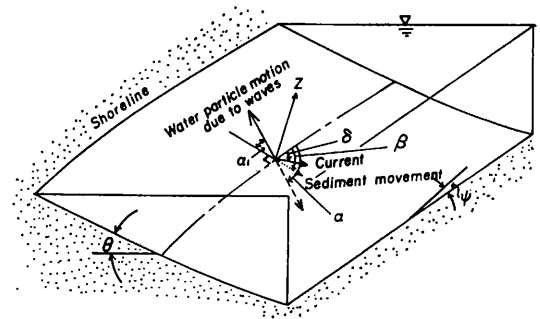


図-1 座標系と変数の定義

(1) 沿岸方向の運動方程式と飛距離

図-1 に示すような座標系と変数の定義のもとで、外力として波と流れが共存している場を考える。岸沖方向の漂砂量則の誘導の場合(河田, 1989)と同じく、流体抵抗は相対速度の2乗に比例するとし、流体の乱れの影響が省略でき、かつ砂粒の抗力係数が鉛直・流下方向に変わらないと仮定すれば、1個の砂粒の saltation の沿岸方向の運動方程式は、近似的に次式ようになる。

$$dV_s/dt = \{- (\sigma/\rho - 1)g \sin \psi + (3/4) \times (C_D/d)(u_b - V)(u_{bs} - V_s)\} / (\sigma/\rho + 1/2) \dots (1)$$

$$u_b = u_w^2 + u_f^2, u_w \cos \alpha + u_f \cos \delta = u_{bs} \dots (2)$$

ここに、 u_b および V : それぞれ流体および砂粒の速度、 C_D : 砂粒の抗力係数、 σ および ρ : それぞれ砂粒と流体の密度、 d : 砂粒の直径および g : 重力の加速度、添字 w, f および s : それぞれ波と流れおよび沿岸方向を表し、 ψ の符号は沿岸方向に上昇する場合を正としている。これと岸沖方向および斜面と直角方向の運動方程式を連立して解き、砂粒の速度の3方向成分を求めればよい。しかしながら、なんらの近似もせず解くことは困難であって、ここでは、現実的な観点からつぎのような仮定を用いることにする。すなわち、

- 1) 浅海域では波の入射角 α_1 が小さい。
- 2) 岸沖方向の海浜の傾斜角 θ の絶対値は沿岸方向の傾斜角 ψ の絶対値に比べて大きい。

結局、これらは、波動による半周期岸沖漂砂量が波動

* 正会員 工博 京都大学助教授 防災研究所

** 正会員 工博 京都大学教授 防災研究所

による半周期沿岸漂砂量よりも多いと仮定することに対応する。同様の仮定は、河川の側岸における、主流と2次流による砂粒の運動機構を解析した Ikeda (1988) が用いている。さらに、付加条件として、海浜流のみでは底質は動かないと仮定する。

以上のような条件では、式 (1) は近似化され、次式のように無次元表示される。

$$\begin{aligned} d\bar{V}_s/d\bar{t} &= (\bar{u}_b - \bar{V})(\bar{u}_{bs} - \bar{V}_s) - K^2 \sin \phi, \tau_* \\ &= u_*^2/(\sigma/\rho - 1)g d, K^2 = (4/3)/(\tau_* C_D), \\ \bar{t} &= (3/4)\{C_D/(\sigma/\rho + 1/2)\}(u_* t/d) \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

ここに、 u_* : 摩擦速度である。これ以降、速度はすべて摩擦速度で無次元化したものを取り扱う。そこで、いま $A_1 = \bar{u}_b - \bar{V} \equiv \bar{u}_{bn} - \bar{V}_n$ (添字 n は岸沖方向を表す) とおいて、式 (3) を積分すれば、砂粒の沿岸方向の無次元流速 \bar{V}_s は、次式で表される。

$$\begin{aligned} \bar{V}_s &= \bar{u}_{bs} - (1/A_1)\{K^2 \sin \phi + (A_1 N_0 - K^2 \sin \phi) \\ &\quad \times \exp(-A_1 \bar{t})\}, N_0 = \bar{u}_{bs} - \bar{V}_{s0} \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

式 (4) をさらに積分し、初期条件として $t=0$ で無次元沿岸方向の飛距離 $\xi_s = 0$ とおけば、沿岸方向の飛距離 ξ_s は、次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \xi_s &= (8/3)(\sigma/\rho + 1/2)/C_D[(\bar{W}_0/\cos \theta)\{(\bar{V}_{s0}/K^2) \\ &\quad + (1/A_1) \sin \phi\}] \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

ここに、 \bar{W}_0 および \bar{V}_{s0} は、それぞれ砂粒の鉛直および沿岸方向の saltation の初速度である。

(2) 定常跳躍における初速度

岸沖漂砂の場合、定常跳躍の近似が適用できることがわかっている (河田, 1989)。斜め入射波の場合にも、前述した仮定のもとでは、運動砂粒は移動方向に定常跳躍になり、その岸沖および沿岸方向の速度成分も、それぞれ定常速度になっていると考えてよいだろう。そこで、まず、式 (3) から砂粒が跳躍を終えて床面に衝突する寸前の速度が計算され、つぎのようになる。

$$\begin{aligned} \bar{V}_{s1} &= \bar{V}_{s0} + (2\bar{W}_0/\cos \theta)\{A_1(\bar{u}_{bs} - \bar{V}_{s0})/K^2 \\ &\quad - \sin \phi\} \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

ここに、添え字 1 は衝突直前を表す。このように衝突直前の沿岸方向の速度も初速度の関数で与えられる。そこで、跳躍砂粒と床面の静止砂粒の衝突の前後で運動量保存則を適用し、かつ継続跳躍の初速度と反発後の初速度が同じであるという条件を付加すれば、定常跳躍の初速度を求めることができる。それらの関係式に式 (4) および (6) を代入すれば、定常初速度は次式のように表される。

$$\begin{aligned} \bar{V}_{ss} &= \frac{2\bar{W}_m}{\{(1/e) - 1\} \cos \theta + 2A_1 \bar{W}_0/K^2} \\ &\quad \times \{(A_1 \bar{u}_{bs}/K^2) + \sin \phi\} \dots\dots\dots (7) \end{aligned}$$

式 (7) を式 (5) に代入すれば、定常跳躍の場合の沿岸方向の飛距離が、つぎのように得られる。

$$\begin{aligned} \bar{L}_{ms} &= \frac{8}{3} \frac{(\sigma/\rho + 1/2)}{C_D} \left(\frac{\bar{W}_m}{K \cos \theta} \right)^2 A_2 \\ &\quad \times \left(\frac{A_1 \bar{u}_{bs}}{K^2} + \sin \phi \right), \end{aligned}$$

$$A_2 = 2/\{(1/e) - 1 + (3/4)A_1 C_D \tau_{*c}/\cos \theta\} \dots (8)$$

ここに、 \bar{W}_m : 砂粒の鉛直方向の定常速度である。

3. 岸沖・沿岸・浜漂砂量則の表示

一般に、フラックスとしての漂砂量は、海底から単位面積・単位時間当たり飛び出す砂粒の個数 G_0 とある方向への砂粒の平均飛距離 L_m の積で与えられる。ところで、岸沖および沿岸方向にも傾斜している海浜上でせん断応力を求め、 G_0 を評価することは非常に困難である。そこで、前述した浅海での仮定を適用すれば、漂砂量は、それぞれつぎのように与えられる。ただし、単位幅当りの漂砂量はすべて摩擦速度と砂粒の直径で無次元化してある。

(1) 波のみの場合

(a) 岸沖漂砂量 q_{cross} については、河田 (1989) の結果から無次元せん断応力 τ_* の岸沖方向成分を用いて、次式で評価される。

$$\begin{aligned} q_{cross, u} &= a_1 [1 + e + (1 - e) \sqrt{\sin \theta}] / (\sqrt{3/2} A_r \sqrt{C_D \tau_{*n}}) \\ &\quad - \sqrt{\{1 - e + (1 + e) \sqrt{\sin \theta}\} / (\sqrt{3/2} A_r \sqrt{C_D \tau_{*n}})} \\ &\quad + 8(1 - e) \cos^2 \theta / (3\lambda C_D A_r^2 \tau_{*n}) \} (\tau_{*n} - \tau_{*c}) \dots\dots\dots (9) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} q_{cross, a} &= a_1 [1 + e - \sqrt{(1 - e)^2 + 8 \cos^2 \theta (1 - e - 2e \lambda \tan \theta)} \\ &\quad / (3\lambda C_D A_r^2 \tau_{*n}) \} (\tau_{*n} - \tau_{*c}) \dots\dots\dots (10) \end{aligned}$$

ここに、 $a_1 = (e/1 - e) \tan \beta_m (1 + \rho/2\sigma) A_r / \sqrt{\cos \theta}$, β_m : 砂粒の飛び出し角度、 $\tau_{*n} = \tau_* \cos^2 \alpha_1$ であり、 α_1 は波の入射角である。なお、岸沖方向の平均飛距離 \bar{L}_{m0} は、次式のように求められている。

$$\begin{aligned} \bar{L}_{m0, u} &= (\lambda/2A) \{(\sigma/\rho + 1/2)/C_D \cos \theta\} \lambda^2 [1 + e \\ &\quad - (1 - e) \sqrt{\sin \theta} / (\bar{u}_b/K') - \sqrt{\{1 - e + (1 + e) \\ &\quad \sqrt{\sin \theta}\} / (\bar{u}_b/K')^2 + 2 \cos^2 \theta (1 - e) / \lambda (\bar{u}_b/K')^2}] \\ &\quad (\bar{u}_b/K')^2 \dots\dots\dots (11) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{L}_{m0, a} &= (\lambda/2A) \{(\sigma/\rho + 1/2)/C_D \cos \theta\} \lambda^2 [1 + e \\ &\quad - \sqrt{(1 - e)^2 + 2 \cos^2 \theta (1 - e - 2e \lambda \tan \theta)} \\ &\quad / \{[\lambda (\bar{u}_b/K')^2]\}^2 (\bar{u}_b/K')^2, K'^2 = K^2 / \cos \alpha_1 \dots\dots\dots (12) \end{aligned}$$

(b) 沿岸漂砂量 q_{long} は、

$$q_{long}/q_{cross} = \bar{L}_{ms}/\bar{L}_{m0} \dots\dots\dots (13)$$

で与えられるので、式 (13) に式 (8) および式 (11) あるいは式 (12) を代入すれば、次式のように1つにまとめて表示することができる。

$$q_{long} = q_{cross} \frac{A_2 \lambda}{\cos \theta} \left(\frac{A_1 \bar{u}_{bs}}{K'^2} + \sin \phi \right) \dots\dots\dots (14)$$

(c) 浜漂砂量 q_{beach} は、漂砂の swash movement に伴うものである。波の uprush 時には汀線に対して波の入射角で海浜上を運動し、downwash 時には汀線にはほぼ直角に沖方向に戻るので、浜漂砂量としては前者の半周期沿岸漂砂量そのまま寄与することになる。したがって、つぎのように評価されよう。

$$q_{beach} = q_{cross} \cdot u(Lms/Lmo, u) \dots\dots\dots (15)$$

ここに、添字 u は uprush を表す。式 (15) は式 (14) で計算される 1 つのケースに対応している。

(2) 波と流れが共存する場合

本理論の誘導過程から明らかなように、ここでは摩擦過程として bed material load を取り扱っている。したがって、たとえ波と流れの共存場であろうと、海浜に働くせん断応力が基本的に評価できれば適用可能である。それ以外に、たとえば、式 (13) において砂粒に働く代表流速として、流れの成分を考慮することによってその効果を取り込むことができる。

なお、とくに岸沖方向漂砂には戻り流れの影響が大きいことがわかってきたので(河田ほか, 1990), 従来のような水深方向に平均化した方程式系を用いた海浜流の解析を進めるのではなく、砕波変形過程を含む海浜流の3次元モデルを構築して、流速構造を解明することが、海浜変形の数値予測に必須となっている。

4. 漂砂量則の特性

ここでは誘導した各漂砂量則の特性を明らかにすることを目的として、基本的な検討を加える。いま、いくつかの海浜形状が考えられるが、簡単のために、岸方向には傾斜角 θ で一様に浅くなっている海岸を対象とし、 $\tan \theta = 1/5, 1/10$ および $1/30$ とする。さらに、外力は波のみとし、入射角 α_1 として、 $5, 10$ および 20° の3ケースとする。もちろん、流速波形は対称と仮定している。なお、本理論と比較することのできる斜め入射波の場合の、空間的な岸沖・沿岸漂砂量と局所波向や波高に関する実験値が見あたらないので、適用性の検討は行っていない。

(1) 岸沖漂砂量

図-2 は、式 (9) および (10) に $\tan \theta = 1/5$ を代入して半周期岸沖漂砂量を計算

し図示したものである。向岸漂砂量と離岸漂砂量の差はかなりのものがあるが、波向の影響はそれほど大きくないことがわかる。図-3 は、net の岸沖漂砂量であり、すべて離岸漂砂である。海浜勾配の影響が大きく、それに比べて入射角の影響は大きくないことが見いだされる。

(2) 沿岸漂砂量

まず、沿岸方向に勾配のない場合 ($\psi = 0$), 式 (13) に基づく計算結果を示したものが 図-4 (a), (b) および (c) である。記号の説明は 図 (a) 中に示す通りであり、半周期沿岸漂砂量として、向岸漂砂に対応した $q_{long,1}$ と離岸漂砂のそれの $q_{long,2}$ が計算例として図示されている。この場合、岸沖方向の勾配の影響のために、net の沿岸漂砂量は離岸漂砂の場合に発生しており、図面に向かって右手に進行することになる。これらの図から、波向 α_1 の影響が大きく、岸沖方向の傾斜角が大きいほど半周期および net の沿岸漂砂量が多くなることが認められる。また、 $\tan \theta = 1/30$ では半周期沿岸漂砂量に及ぼす入射角の影響が少なくなり計算値がかなり狭い範囲に分布するため、図 (c) では代表的に $\alpha_1 = 5^\circ$ の $q_{long,2}$ を示してある。

図-5 は、式 (13) から、半周期の沿岸漂砂量と岸沖漂砂量の比の無次元掃流力(シールズ数)による変化を表したものである。まず、入射角が大きくなるにつれて、半周期の沿岸漂砂量が極めて大きくなるのがわかる。しかも向岸漂砂量との比を表す破線と離岸漂砂のそれの実線が重ならず、前者の方が大きいことから、半周期ごとの沿岸漂砂量と岸沖漂砂量の合成ベクトルの方向

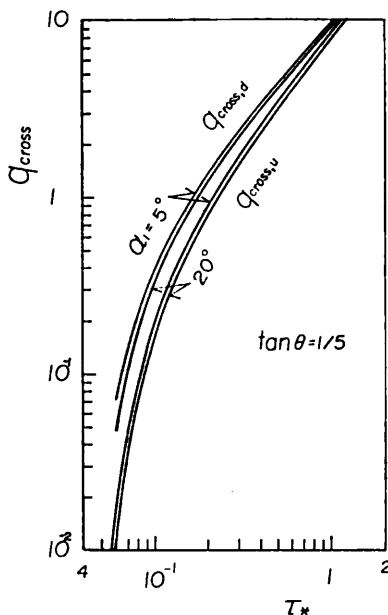


図-2 半周期岸沖漂砂量

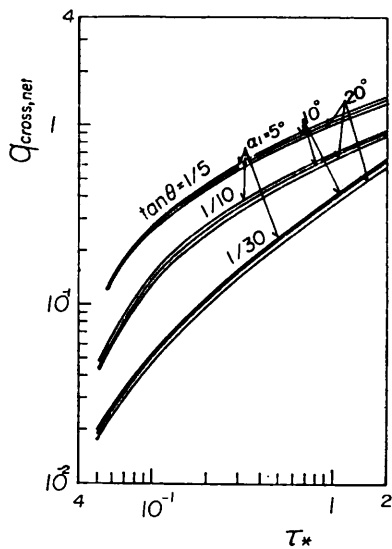


図-3 net の岸沖漂砂量

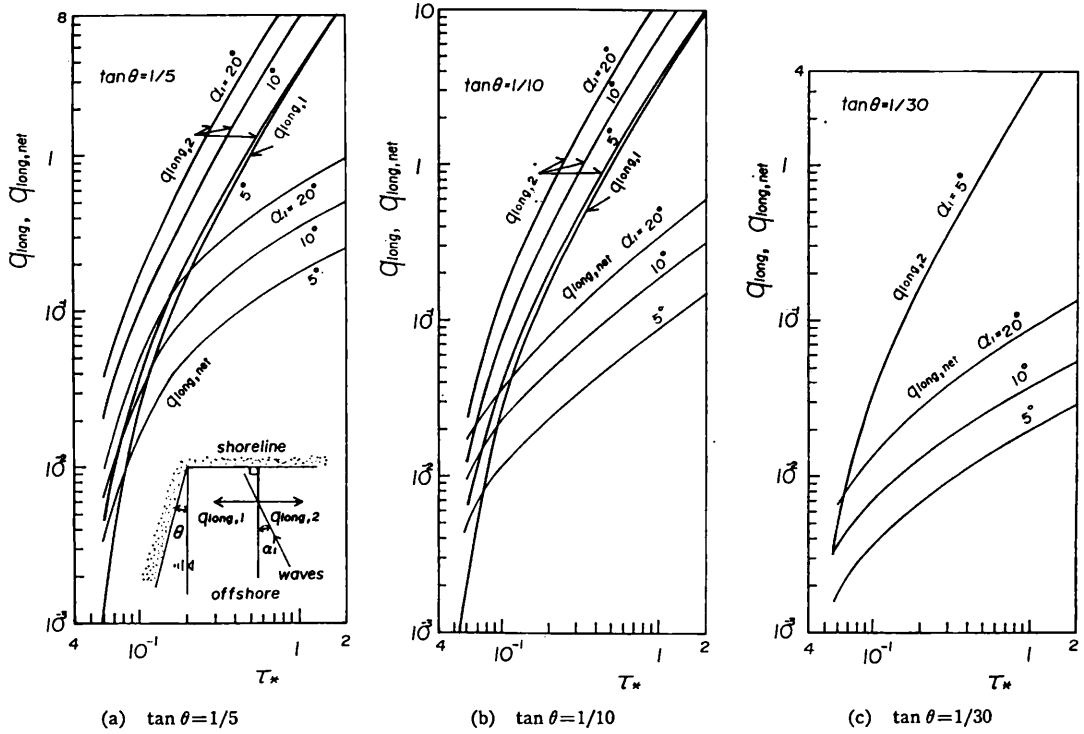


図-4 半周期および net の沿岸漂砂量

は、正反するのではなく、沿岸方向の下手側に折れ曲がるのが理解される。すなわち、波の流速波形がたとえ対称であっても、海浜勾配のために、漂砂は1直線上を往復運動するのではなく、ジグザク運動となることを表している。

図-6 は 図-5 と同じ条件での net の沿岸および岸沖漂砂量の変化の1例である。波の入射角の増加とともに、net の沿岸漂砂量が岸沖漂砂量に比べて大きく増加することが認められる。なお、シールズ数が1程度までは、入射角が20°になってもまだ net の岸沖漂砂量が net の沿岸漂砂量よりも多いこともわかる。

つぎに、沿岸方向に海底勾配のある場合 ($\psi \neq 0$) について、式 (13) に基づいて計算した結果の数例が 図-7 (a) および (b) である。なお、図 (a) の中に記号の説明があるが、(a) は沿岸方向の下手側に向かって上り勾配の場合 ($\psi = 0$) であり、(b) は、逆に下り勾配の場合である。まず、(a) では、沿岸方向の傾斜角 ψ の影響は、net の沿岸漂砂量に顕著に現れ、図-4 (b) と比較

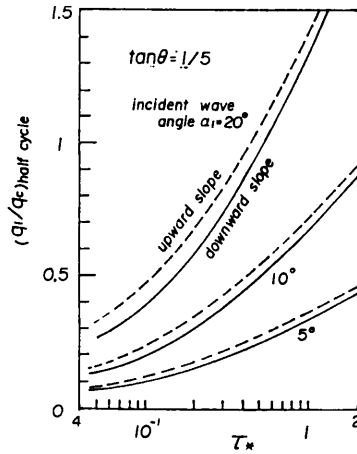


図-5 半周期沿岸・岸沖漂砂量の比の変化

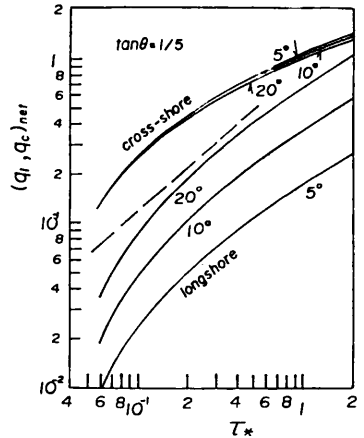


図-6 net の岸沖・沿岸漂砂量の比較

してもよくわかる。その影響の大きさは、波の入射角の場合と同程度であることも見いだされる。なお、この場合、net の沿岸漂砂量の向きはその下手側、すなわち図面に対して左手の方向となる。

一方、(b) では net の沿岸漂砂量の向きがその上手側となるほかは (a) と同様のことが指摘できる。さらに、(a) と (b) の比較から、シールズ数が小さい間は、net の沿岸漂砂量は (a) の方、すなわち上手側に移動す

の方が多いが、シールズ数が大きくなるに従って、両者の差は小さくなることを見いだされる。なお岸沖および沿岸方向の海底の傾斜角 θ および ψ の各組合せによって同様の計算が可能であり、上述したことが確認できた。

(3) 浜漂砂量

すでに指摘したように、半周期沿岸漂砂量が浜漂砂量となることから、図-4などからその特性を検討できる。まず、netの沿岸漂砂量は、シールズ数の大きい領域ではほぼそれに比例して大きくなるのに対して、浜漂砂量は同じ範囲でシールズ数のほぼ2乗に比例することが見いだされる。しかも、シールズ数が大きくなるにつれて、浜漂砂量はnetの沿岸漂砂量より1オーダー以上大きくなるのがわかる。

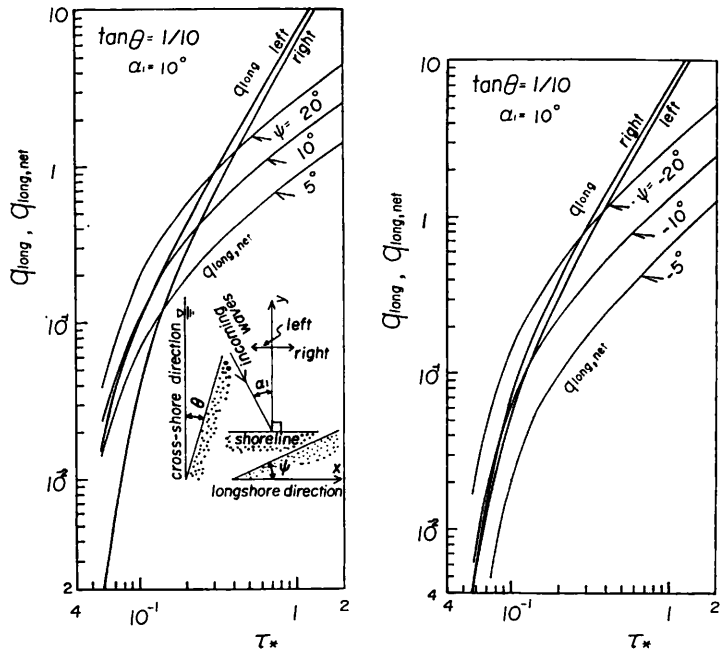
このことは、swash zoneにおける saw tooth movement による浜漂砂量がかなり多いことを示すものである。したがって、海浜変形の1次元解析はもとより、2Dおよび3Dモデルによる数値計算で、従来、ほとんど考慮されていなかった浜漂砂量の評価の重要性を表しているといえよう。

5. 結 語

ここでは、1989年に誘導した岸沖漂砂量則を沿岸方向に拡張した理論を展開し、岸沖・沿岸・浜漂砂量則を求め、それらの特性を示した。得られた成果を要約すると、つぎのようである。

1) 砂粒の saltation 機構と運動量保存則の適用によって、任意の海底形状における、波と流れの共存場に適用できる漂砂量則を誘導することができた。それによって、岸沖・沿岸・浜漂砂量則を力学的に統一表示することに成功するとともに、各漂砂量に及ぼす波向と岸沖および沿岸方向の海底勾配の影響を明らかにした。

2) 波の入射角の増加とともに、netの沿岸漂砂量が岸沖漂砂量に比べて大きく増加し、その傾向がシールズ数の増加によってより顕著になることを見いだされた。しかも、沿岸方向に海底勾配のない場合、波の半周期毎の岸沖・沿岸漂砂量の合成ベクトルの方向は逆転するのではなく、沿岸方向の下手方向への漂砂量が増え、漂砂



(a) 沿岸方向下手側に上り勾配の場合 (b) 同下手側に下り勾配の場合

図-7 沿岸方向に海浜勾配のある時の半周期・netの沿岸漂砂量

はジグザクの軌跡を描いて移動することがわかった。

3) netの沿岸漂砂量に比べて浜漂砂量の絶対値は大きく、シールズ数の大きい領域では、その2乗にほぼ比例して増加するので、無視できないことが示された。

参 考 文 献

河田恵昭 (1989): 傾斜海浜における漂砂量則について, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 289~293.
 河田恵昭・土屋義人・西良一 (1990): 沖浜における海底微地形の形成, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 324~328.
 清水琢三・三村信男・渡辺 晃 (1983): 波浪・海浜流共存場における海浜変形と漂砂量のモデル, 第30回海岸工学講演会論文集, pp. 229~233.
 渡辺 晃 (1981): 海浜流と海浜変形の数値シミュレーション, 第28回海岸工学講演会論文集, pp. 285~289.
 Bagnold, R. A. (1963): Mechanics of marine sedimentation, The Sea, Vol. 2, ed., M. H. Hill, Interscience, pp. 507~528.
 Bailard, J. A. and D. L. Inman (1981a): An energetics bedload model for a plane sloping beach: Local transport, J. G. R., Vol. 86, No. C3, pp. 2035~2043.
 Bailard, J. A. (1981b): An energetics total load sediment transport model for a plane sloping beach, J. G. R., Vol. 86, No. C11, pp. 10938~10954.
 Ikeda, S. (1988): Lateral bed load transport on side slopes, Hydraulics/Mechanics, Vol. 2, ed., P. N. Cheresimino et al., Technomic Pub., pp. 299~307.