

海浜変形の数値シミュレーション

西 村 仁 嗣

1. 緒 論

海岸における波と流れは漂砂現象を誘起し、これが海浜地形の変化となって現われる。全く自然の状態の海浜でも季節的、経年的な営力の変動、あるいは漂砂源の消長に応じて海岸地形に変化が生じるが、この種の現象におよぼす人工構造物の影響もまたしばしば問題となる。海岸構造物には海岸の積極的利用のために建造される諸施設と海岸保全の目的で設置されるものがある。諸工業の海岸立地の傾向が強まる一方で、環境維持の立場からあるいはレクリエーションの場として砂浜の重要性を叫ぶ声は近年とみに高まっている。

これに対して、基礎研究、技術開発の進捗は残念ながら未だ十分とは言い難い状況にある。もとより海岸漂砂、およびこれに伴う海浜地形変化の問題については我が国における海岸工学研究の発足以来、最も重大かつ緊急の課題の一つとして各方面から多大の関心が寄せられ、努力もなされて来た。しかしながら、現象の複雑さと難解さにその解明が阻まれている現時点では相似則の確立は困難であり、したがって実験的手法による問題解決にも自ら限界がある。現地調査によるより直接的な資料の蓄積と現象の把握が重要視される所以である。

この小論は以上の現状認識に立ち、これまでに考えられて来た海浜変形の理論モデルについて概説したものである。こうした一面からの解題が現象理解の一助となれば幸いである。なお、この問題の重要性を反映して、海浜変形に関連する主題は過去の夏期研修会においてもしばしばとり上げられている。最も近い例では昨年度も海浜流ならびに海浜地形の諸様態に関する高知大学、玉井助教授(1977)の講演および海浜過程の現象論的考察、模型実験によるシミュレーション手法等を主体とする大阪大学、樫木教授(1977)の講演が行なわれた。他に日米セミナーにおける東京大学、堀川教授(1978)の講演等も参考となろう。本稿においてはこれら過去の講演との重複を極力避けるよう配慮がなされている。

2. 海浜地形変化概説

海浜地形の変化は当然のことながら底質の移動に起因し、底質の移動は海水の運動に伴って生じる。ただし、ここでは飛砂現象は別個の問題として考慮外に置かれている。海水の運動のうち波動としては風浪、うねり、陸棚波、潮汐等があり、流れとしては波にともなう海浜流、風による吹送流、河川流等の他に人為的な取放水によって生じる流れもあり得る。とくに、浮遊砂については波と流れに伴う海水の乱れが大きな影響を及ぼすものと考えられる。底質の移動は海水の活発な運動が海底面近傍にまでおよぶ砕波帯内外の比較的浅い領域で顕著である。深海からこうした浅い領域に進入する波をとり扱かう場合、砕波ならびに砕波後の波の変形に関する知識が要求される。現実の海岸では多くの場合海底地形は複雑であり、さらに人工構造物の存在まで考慮するならば、波の屈折、回折、反射といった問題も関与することになる。流れもまた地形の影響を受ける。ある特定の海岸を対象とする場合、その海域の波の特性について十分な資料が得られなければ、波浪推算技術が必要となろう。以上述べて来たところから明らかなように、海浜変形の予測を行なうには海学工学の分野のほとんどすべての知識を結集せねばならない。また、漂砂源を考える際には河川工学、地理学、地質学方面の知識も往々にして要求されるのである。

工学的には広範囲にわたる海岸線の全般的な変形が問題となる場合もあり、また比較的限られた地域の海浜変形が主たる興味の対象となることもある。同様に時間的にもさまざまなスケールの問題が考えられる。いずれの場合にも与えられた入射波等の条件から砕波帯内外の波と流れの状況を求めて漂砂量を算定し、これを底質の連続式によって地形変化の計算へと結び付けて行くことになる。地形に相当量の変化が生じた場合、これによって波や流れの状況が変化するので、ここで問題としている現象は結局、海水の運動と海浜地形の変化との相互作用として把握する必要がある。

多くの研究者による従来の研究実績を概観すると、海岸における砂の移動現象のうち岸沖方向の底質移動と沿岸方向の漂砂とが通常別個にとり扱われている。前者は主として波動にともなう往復流の結果生じるもので、海浜縦断面地形の変化に直結する。これに対して後者は波の場に沿岸方向の流れが加わることによって生じるものとされ、その空間的不均等は等深線形状の変化をもたらす。もとより現実の海浜では双方の現象が同時に進行している。そこで、各時刻、各地点における波と流れの諸元からその点における平均的な漂砂量を算定し、これを積分する形で時々刻々の3次元的な海底地形を計算するというアプローチが最も一般的である。以下の各節においては海浜変形に直接関わる過去の研究業績に的を絞り、これら各種の研究を可能な範囲で系統づけながら解説して行くこととする。

3. 海浜縦断面地形の変化

3.1 bar型海浜とstep型海浜

2次元水槽内に移動床斜面を設け、一定条件の波を連続的に作用させると、断面地形は徐々に変化して最終的にはある平衡地形に漸近するようである。しかしながら、地形が平衡状態に達するまでには極めて長時間にわたる波の作用を要し、実験室で200時間以上も一定の波を送り続けた後に未だ有意な地形変化が見られたとの報告がある。作用する波の波形勾配が比較的大きい場合には汀線近傍領域の砂が沖に運ばれ、砕波線近傍領域に堆積して一重もしくは多重のbarを形成する。このような海浜をbar型海浜、あるいは暴風海浜、冬型海浜等と呼び、その特徴的な結果として汀線の後退が挙げられる。逆に波形勾配が小さい場合には底質は岸向きに移動してstepを形成し、汀線は前進する。これがstep型海浜、正常海浜、夏型海浜等と呼ばれる海浜地形である(図-1)。

Johnson (1949) による上記のような海浜断面地形の分類の提起以来、多くの研究者がその分類基準を検討して来た。当初Johnsonは沖波波形勾配のみによって海浜形態が分類できるものとして、その限界値を0.03付近と考えた。後にIwagakiら(1963)は底質の粒径もまた海浜断面地形の分類に際して重要な要因であることを示し、実験データに基づいて分類基準を図示した。同様の議論はNayak(1970)によってもなされている。

Dean (1973)は理論的な考察とRector, Saville, Iwagakiらのデータに基づいて分類基準となる波形勾配を次式で与えた。

$$H_o/L_o = 1.7 \pi w_s(d)/gT \dots\dots\dots (3.1)$$

ここに、 H_o は沖波波高、 L_o は沖波波長、 g は重力加速度、 T は波の周期、 w_s は底質の沈降速度で粒径 d の関数である。

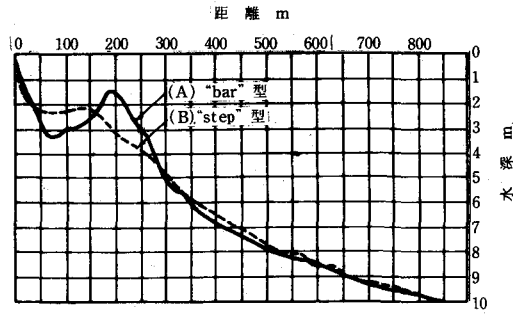


図-1 東海村海岸の海浜縦断面形状(堀川, 1973)

堀川ら（1973, 1974, 1975）は一連の実験的研究を通じて初期海底勾配 $\tan \beta$ の重要性を指摘し、

$$H_0/L_0 = C (\tan \beta)^{-0.27} (d/L_0)^{0.67} \quad \dots\dots\dots (3.2)$$

なる形の基準を提唱した。これに従って他の研究者による実験結果をも併せまとめると、汀線は $C \leq 3$ で前進、 $C \geq 10$ では後退するとの結論に達する（図-2）。遷移領域 $3 \leq C \leq 10$ では汀線の前進、後退の別は確定的ではない。堀川らは現地海浜で得られた資料についても同様の整理を行ない、 $C \geq 18$ なる条件の下ではほとんど例外なく汀線が後退するとし

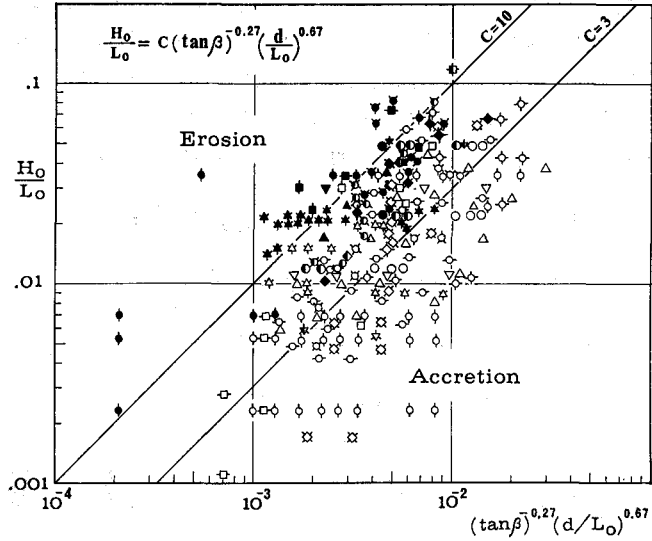


図-2 海浜形状の分類（堀川・砂村・近藤・岡田，1975）

ている。不規則波を有義波で表現した場合、限界がこの方向にシフトすることは風波による土屋ら（1974）の実験でも示されたところである。また、堀川ら（1973）は海浜断面の変形を、汀線が後退して沖側に堆積を生じるⅠ型、汀線が前進して沖側に堆積を生じるⅡ型、汀線は前進するが沖側に堆積を生じないⅢ型の3種に分類した。尾崎ら（1976, 1977）もこの分類の妥当性を認め、

$$C' = (H_0/L_0)^{0.75} \sqrt{gH_b} \cdot d_{50}^{-1.8} \tan \beta \quad \dots\dots\dots (3.3)$$

なるパラメータ C' を用いれば、 $C'=164$ (cm-sec単位) が汀線の後退およびⅡ型もしくはⅢ型の前進の限界値として適当であるとした。

服部ら（1977）は、砕波帯内の海底斜面上で一旦浮遊した底質の移動が沈降性であるか、浮遊性であるかの限界が

$$(H_b/L_b) \tan \beta = C' w_s / gT \quad \dots\dots\dots (3.4)$$

で与えられることから、上式中のパラメータ C' を汀線の前進後退の予測基準として用いた。 H_b/L_b は砕波時の波形勾配であるが、便宜上これを沖波波形勾配 H_0/L_0 に読みかえ、 β を最終的な砕波帯内の海浜勾配として既往のデータを再整理すると、 $C'=0.5$ が限界値となる。不規則波を平均波高で代表させることにすれば、現地海浜についてもほぼ同様の基準を得る。

3.2 海浜断面モデル

海浜縦断面地形の数値モデル化に関する研究は数少ない。Eaglesonら（1963）は海水の波動運動下における斜面上の砂の動きを解析し、沖浜領域の海浜断面形状の理論的な説明を試みたが、その結果は実験によって得られた平衡地形と比較すると良好とはいえない。ここではより大きな工学的興味を持たれる砕波帯内の断面地形を扱ったSwart（1974, 1976）のモデルについて概説する。

漂砂はその移動形態によってしばしば浮遊漂砂と掃流砂に大別される。前者は水中に巻き上げられて浮遊状態となった砂が水流によって運ばれるものであり、後者は底面付近の流れによる底面に沿った底質の移動に対応する。Swart はこれら双方の形態をとって底質が比較的活発に移動する範囲を考え、この領域の縦断面地形をD-profileと名付けた。D-profileの変形およびこの領域の沖方向漂砂量を

計算するための Swart モデルは U.S. Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center (CERC) における現地スケールの実験およびオランダの Delft Hydraulics Laboratory における実験の結果を根拠とする全く経験的なものである。用いられたデータはすべて欠潰型の海浜に関するもので、波の条件は広範囲にわたっているが、中央粒径 $0.1 \sim 0.23 \text{ mm}$ と比較的限られた条件の底質が対象とされている。

D-profile の岸側の限界は波の最高遡上線であり、平均水面から測ったこの限界の高さ $h_0(\text{m})$ は沖波波高 $H_0(\text{m})$ 、波の周期 $T(\text{sec})$ および底質の中央粒径 $d_{50}(\text{m})$ を用いて次式のように表わされる。

$$h_0/d_{50} = 7644 - 7706 \exp(-0.000143 H_0^{0.488} T^{0.93} d_{50}^{-0.786}) \quad \dots\dots\dots (3.5)$$

一方、D-profile の沖側の限界となる水深 h_m は

$$h_m/L_0 = 0.063 \exp(4.347 H_0^{0.473} T^{-0.893} d_{50}^{-0.993}) \quad \dots\dots\dots (3.6)$$

で与えられ、その沖側には底質の移動が顕著でなく掃流砂のみが見られる遷移領域を経て有意な底質移動の見られない領域が続く。上式中、 L_0 は沖波波長である。

いま、図-3 に示したように任意の時刻 t における D-profile を任意の水平面で分割し、この面と D-profile の上限および下限との高低差をそれぞれ δ_1 および δ_2 とする。 $\delta = \delta_1 + \delta_2$ である。各領域の底質量を考慮に入れて D-profile を図-3 中に破線で示したような階段状の地形で表現するとき、2つの鉛直壁間の水平距離 W_t が地形の水平方向の特性距離となる。 W_t を δ_1 もしくは δ_2 の関数として表示することができれば、断面形状は完全に定まる。

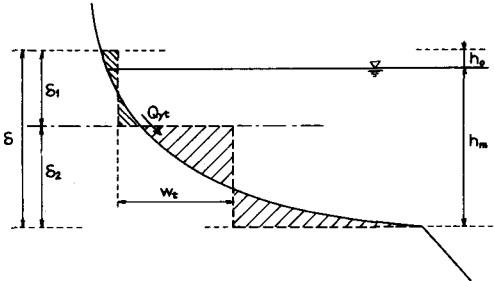


図-3 D-profile (Swart, 1974)

ここで、一定の波が長時間作用した場合、D-profile はある平衡地形に達するものと仮定する。この前提には約 4000 時間におよぶ実験を通じて根拠が与えられている。実験によれば平衡地形における特性距離は W_* は、平均水面から測った鉛直位置を表わす無次元量 $d = (h_m - \delta_2)/\delta$ の関数として次式のように表わされる。

$$\frac{W_*}{W_r} = \begin{cases} 1 + 0.7 d & (d \leq 0) \\ 1 + 0.7 d + 3.97 \times 10^7 d_{50}^{13600} d^{d_{50}} & (d > 0) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (3.7)$$

ここに、特性半幅員 W_r は平均水面 ($d = 0$) における W の平衡値であり、特性海浜勾配 m_r に関する定義式およびその経験的表示から得られる。

$$\begin{aligned} m_r &= \delta / 2 W_r \\ &= 1510 (L_0/H_0) [H_0^{0.132} d_{50}^{-0.447} (H_0/L_0)^{-0.77-2.38}] + 0.00011 \quad \dots\dots\dots (3.8) \end{aligned}$$

各地点における単位汀線長当りの沖向き漂砂量 Q_{yt} は特性距離の現在値と終局値の差に比例する形で

$$Q_{yt} = s_y (W_* - W_t) \quad \dots\dots\dots (3.9)$$

と表現される。上式中の s_y は coastal constant と呼ばれているが、これは h_m 、 H_0 、 L_0 および鉛直位置 d の関数である。Swart は s_y の値について沿岸流をも考慮に入れた議論を行ない、また平衡地形の生じる水平位置についても経験式を与えた。図-4 および 5 はそれぞれこの方法による平衡断面地形および沖方向漂砂量の計算結果を対応する実験の結果と比較したものである。

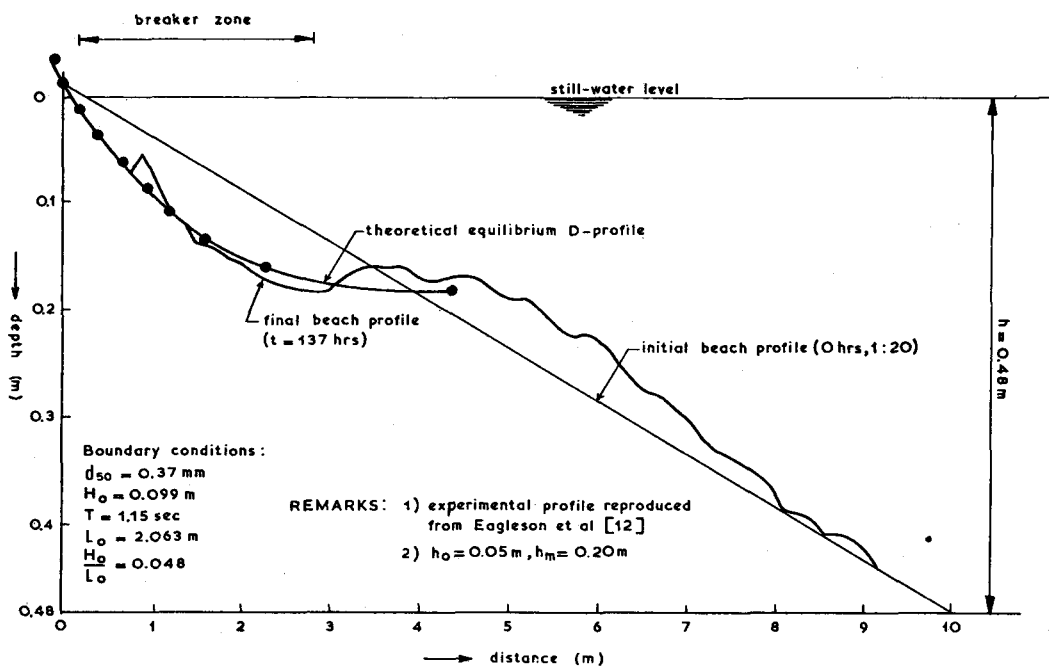


図-4 実験および計算による地形の比較 (Swart, 1974)

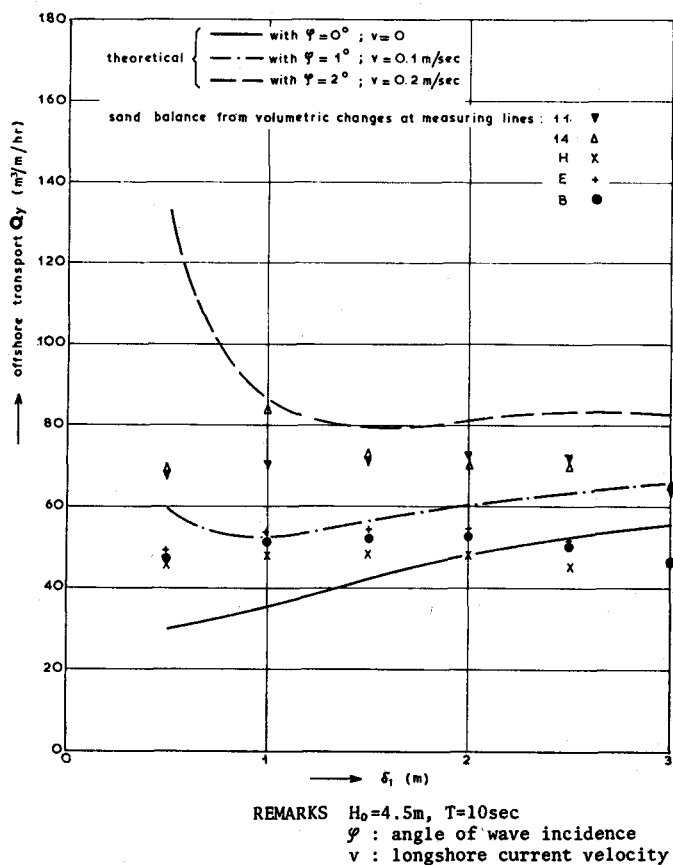


図-5 実験および計算による漂砂量の比較 (Swart, 1974)

4 沿岸漂砂による海浜変形

4.1 底質の連続式

本節では沿岸方向の漂砂によって生じる海浜地形の変化をとり上げる。岸沖方向漂砂による地形変化が単なる季節的変動に過ぎないような海岸でも、沿岸漂砂は往々にして切実な問題を提起する。沿岸方向に一樣な底質の移動があったとしてもその範囲の海浜地形が変化することはないが、漂砂量が場所によって異なる場合にはその不均等に応じて局地的な砂の堆積もしくは海岸の欠潰が生じる。

沿岸方向に x 軸、沖向きに y 軸をとれば、微小平面区域内の砂量保存則すなわち任意地点の底質に関する連続の方程式は一般に次式で与えられる。

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} \quad \dots\dots\dots (4.1)$$

ここに、 h は平均水面から測った水深、 t は時間、 q_x 、 q_y はそれぞれ単位幅当りの体積漂砂量の x, y 成分である。質量で表現した各方向の漂砂量 i_x 、 i_y は底質の密度を ρ_s 、海底における底質の空隙率を λ として、

$$i_x = \rho_s (1 - \lambda) q_x, \quad i_y = \rho_s (1 - \lambda) q_y \quad \dots\dots\dots (4.2)$$

となる。

本節では岸沖方向の漂砂は考えないので

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial q_x}{\partial x} \quad \dots\dots\dots (4.3)$$

上式を y 方向漂砂帯全域にわたって積分すれば次式を得る (岩垣, 1966)。

$$\frac{\partial \bar{h}}{\partial t} = \frac{h_i - \bar{h}}{B} \cdot \frac{\partial B}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial Q}{\partial x} \quad \dots\dots (4.4)$$

ここに、 Q は断面内の全沿岸漂砂量、 B は漂砂帯幅、 $\bar{h}$ は漂砂帯全幅にわたる平均水深、 h_i はその外縁における水深である。沿岸のある地点で漂砂の供給がある場合にはこれに対応する項を上式に追加する必要がある (土屋, 1973)。

波の条件が時間的に変化せず、海浜の縦断面形状も一定とすれば平面地形の変化は汀線の変位で表現することができる。このような場合には、式 (4.4) は汀線的位置 $y = y_0(x, t)$ について

$$\frac{\partial y_0}{\partial t} = - \frac{1}{h_i} \frac{\partial Q}{\partial x} \quad \dots\dots\dots (4.5)$$

と書かれる。

4.2 沿岸漂砂量

沿岸漂砂量 Q については Watts (1953) 以来, Caldwell (1956), Savage (1959, 1962), 井島ら (1960, 1964), Manohar (1962), 佐藤 (1966), Das (1972), Komar ら (1969, 1970) 等多くの研究者によってさまざまな経験公式が提唱されて来たが、その大部分は海岸線の単位長当りの energy flux の沿岸方向成分 P_s を用いて

$$Q = K P_s^r \quad \dots\dots\dots (4.6)$$

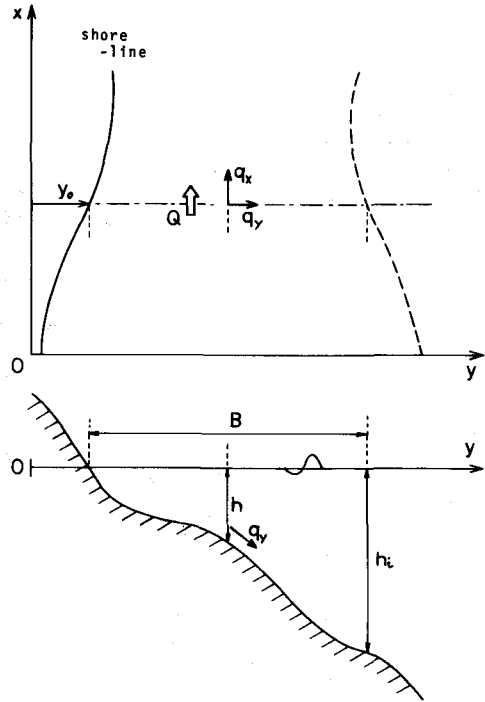


図-6 座標系

の形の表示となっている。ここに、 K 、 r はいずれも定数であり、 $P_s = (1/2) E_b C_{gb} \sin 2 \alpha_b$ 、 C_{gb} は砕波点における波の群速度、 α_b は砕波点において波峯線が汀線に対してなす角である。また、 E_b は単位水面積当りの波の全エネルギーで $E_b = \rho g H_b^2 / 8$ 、 ρ は海水の密度、 E_b は砕波波高である。堀川ら(1972)はこれらの経験式の主なものを表にまとめ、計算図表中で相互の比較を行なっている。

近年に至って背後の考察も若干進められた (Komar (1971), Dean (1973), Galvin ら (1976) 結果、現在では沿岸漂砂量は energy flux の沿岸方向成分に単純に比例するという形の公式が用いられるようになった。すなわち、

$$Q = K P_s \dots\dots\dots (4.7)$$

CERC は "Shore Protection, Planning and Design" (1966) で $K = 4110$ なる Savage (1962) の式を採用していたが、"Shore Protection Manual" (1973) ではこれを $K = 6090$ と改めた。ただし、 K は次元をもつ定数で、これらは Q に対して $yd^3/year$ 、 P_s に対して $ft-lb/sec/ft$ なる単位を用いた場合の係数値である。係数値の決定の根拠となった現地ならびに実験データ、および上記の改変の経緯の詳細については Galvin ら (1976) が解説している。

一方、沿岸流速を与える公式がいくつか提案されているので、これに河川の漂砂量公式を援用し、漂砂量を表示しようとする試みもなされた。Kalinske-Brown 公式を用いた Iwagaki ら (1962) の式、Einstein 公式を用いた Bijker (1968) の式等がそれである。

4.3 1-Line Theory

岸沖方向の海浜断面が常に平衡状態にあつて変化せず、したがって地形変化が等深線の前進、後退のみで表現できるものとし、その平面形状を解析的に扱かう試みは Pelnard-Considère によって始められた。この方針は Grijm, Bakker らによって引き継がれ、河口付近の汀線変形、突堤の設置に伴う海浜変形などさまざまな状況に対応する解析解が得られた。こうした一連の研究の解説は土屋 (1973), 橋本 (1974 a) らによって行なわれている。

各地点で入射波高が一定で、波の進入方向が y 軸となす角 α_0 も一定とする。この場合、沿岸漂砂量 Q は汀線が x 軸に対してなす角 θ の関数と考えられる。 θ を微小角として θ に関する Q の Taylor 展開の最初の 2 項のみをとれば、

$$Q = Q_{\theta=0} + \left(\frac{dQ}{d\theta} \right)_{\theta=0} \cdot \theta \dots\dots\dots (4.8)$$

そこで、 $Q_{\theta=0} = Q_0$ 、 $(dQ/d\theta)_{\theta=0} = -q_0$ 、 $\theta = Q y_0 / \theta x$ と書けば

$$Q = Q_0 - q_0 \frac{\partial y_0}{\partial x} \dots\dots\dots (4.9)$$

q_0 が x によらないものとするれば、上式を連続式 (4.5) に代入することによって y_0 に関する拡散型の方程式を得る。

$$\frac{\partial y_0}{\partial t} = \frac{q_0}{h_i} \frac{\partial^2 y_0}{\partial x^2} \dots\dots\dots (4.10)$$

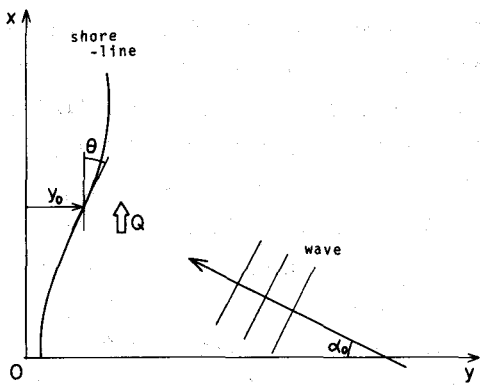


図-7 1-Line Theory

上式を状況に応じて与えられた境界条件の下に解けば、汀線もしくは任意の等深線の平面形状が得られる。図-8 は突堤周辺の地形に関する Pelnard-Considère の解を模式的に示したものである。縦断面地形が変化しないという前提の不合理性は突堤先端部より沖側の海底地形を考えれば明らかであり、この辺りに 1-Line Theory の限界がある。

Grijm (1960) はこの研究を継続し、汀線のとり得る曲線形状の特性を一般的に論じた。ここでは漂

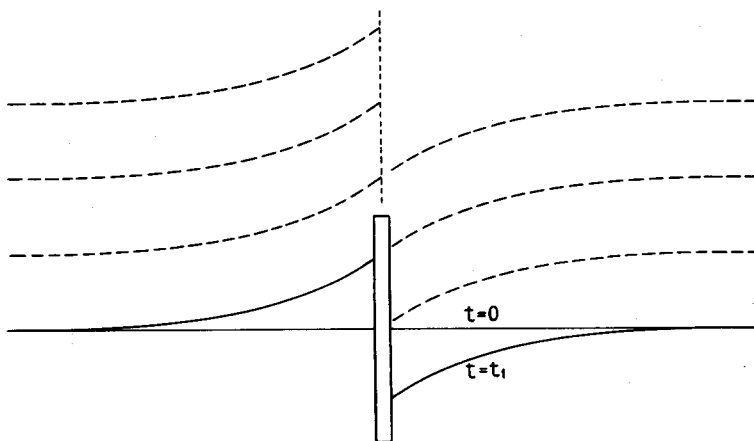


図-8 突堤付近の海浜地形 (1-Line Theory, Bakker, 1968)

砂量 Q が汀線に対する波の入射角 α の関数として $Q \propto \sin 2\alpha$ の形に仮定されている。同じく Grijm (1964) は極座標表示を用いて汀線形状を具体的に計算する方法をも示した。また, Bakker ら (1970) は突堤による波の回折を考慮に入れた汀線形状の計算を試みている。

4.4 1-Line Theory の拡張

1-Line Theory の本質は連続の式 (4.5) において沿岸漂砂量 Q を与え, 汀線の位置 y を計算する点にある。 Q について漂砂量公式 (4.7) を適用すれば, 波の屈折等による波高および波向の沿岸方向の変動をも考慮に入れることができ, より現実的なモデルが構成される。このような方針で差分計算を行ない, 実験結果と比較した例としては Price ら (1972), Komar (1973), 橋本 (1974b), Sasaki (1975), 同じく現地海岸への応用例として Mogel ら (1974), 橋本 (1976), Sasaki ら (1978) 等の研究がある。Le Blond (1972) および Rea ら (1975) は岬状の突出地形の背後にしばしば見られるらせん状の汀線形状を理論的に説明する目的で同様の計算を行なっている。

以上においては漂砂帯断面内の全漂砂量 Q から汀線の変形を論じる手法について述べたが, もし漂砂帯内における岸沖方向の沿岸漂砂量分布 $q_x(y)$ が知られれば, より詳細な地形変化を計算することができる。すなわち, 対象領域内に縦横の計算格子を設定し, 各地点における波の条件から局地的な漂砂量 q_x を求める。さらに連続の式 (4.3) を用いて各地点における海底面上昇, 下降を算定するわけである。こうして海浜縦断面地形の変動をも計算に組み入れることになるが, ここでは岸沖方向の漂砂はあくまで考慮の外に置かれている。

全沿岸漂砂量 Q については既述の経験公式があるので, その岸沖方向の分布形状が与えられれば q_x が確定する。Wang ら (1975) は Dean (1973) にならって碎波帯内における波動エネルギーの減衰量のうち一定の割合が底質を浮遊状態に保つために消費されるものと考えた。この仮定から導かれた浮遊砂濃度分布と Longuet-Higgins (1970) の与えた沿岸流速分布の積として沿岸漂砂量分布を求め, 海浜変形の試算を行なったが, 実測資料による検証はなされていない。樫木ら (1976) は入射波の条件に応じて沿岸漂砂量を台形もしくは三角形分布とし, Wang らと同様の試算を行なってある程度の成功をおさめた。これらの分布形状は自らの実験データに基づいて経験的に得たものである。

5. 海浜変形の3次元モデル

5.1 2-Line Theory

岸沖方向漂砂を無視し、沿岸漂砂のみを考える1-Line Theoryではとくに地形の不連続部沖側で非現実的な結果が得られることは既に述べた通りである。Bakker (1968) はこの難点を克服するために海浜地形を2本の平面曲線で表現することを考えた。図-9に示したように、1本は岸側、他は沖側領域の平面位置を代表する曲線で、これらをそれぞれ $y = y_1(x, t)$, $y = y_2(x, t)$ と書くことにする。ある時刻、ある位置における2本の曲線の間隔 $W = y_2 - y_1$ が平衡間隔 W_* より大きい時は、平均的な海浜勾配が小さいことになり、沖側領域から岸側領域への底質移動が生じる。 W が W_* より小さい時は急勾配であり、逆向きの底質移動が生じるものとして、単位時間、単位幅当りの沖向き移動砂量 Q_y を次式で表現する。

$$Q_y = s_y (W_* - W) \quad \dots\dots\dots (5.1)$$

3.2で説明したSwartモデルの漂砂量式(3.9)はこの考え方を縦断面全般に拡張したものである。

この場合、2本の曲線が代表する領域の底質に関する連続の方程式はそれぞれ次のように書かれる。

$$\frac{\partial y_1}{\partial t} = -\frac{1}{D_1} \left(\frac{\partial Q_1}{\partial x} + Q_y \right) \quad \dots\dots\dots (5.2)$$

$$\frac{\partial y_2}{\partial t} = -\frac{1}{D_2} \left(\frac{\partial Q_2}{\partial x} - Q_y \right) \quad \dots\dots\dots (5.3)$$

ここに、 Q_1 , Q_2 は各領域毎の全沿岸漂砂量、 D_1 , D_2 は図-9中に示した各領域の鉛直範囲である。

さらに、1-Line Theoryにおける近似的な Q の表示式(4.9)に対応して次式を導入する。

$$Q_1 = Q_{01} - q_{01} \frac{\partial y_1}{\partial x} \quad \dots\dots\dots (5.4)$$

$$Q_2 = Q_{02} - q_{02} \frac{\partial y_2}{\partial x} \quad \dots\dots\dots (5.5)$$

以上の各式は Q_{01} , Q_{02} , q_{01} , q_{02} 等をすべて定数と見なすことにより、

$$Q_y = s_y (y_1 - y_2 + W_*) \quad \dots\dots\dots (5.6)$$

$$\frac{\partial y_1}{\partial t} = \frac{1}{D_1} \left(q_{01} \frac{\partial^2 y_1}{\partial x^2} - Q_y \right) \quad \dots\dots\dots (5.7)$$

$$\frac{\partial y_2}{\partial t} = \frac{1}{D_2} \left(q_{02} \frac{\partial^2 y_2}{\partial x^2} + Q_y \right) \quad \dots\dots\dots (5.8)$$

なる形にまとめられるので、適当な境界条件の下にこれらを連立させて解けば海浜地形の変化の状況が知られることになる。

Bakker (1968) は突堤が岸側領域の沿岸漂砂を完全に妨げるものとして、その周辺の地形に対する

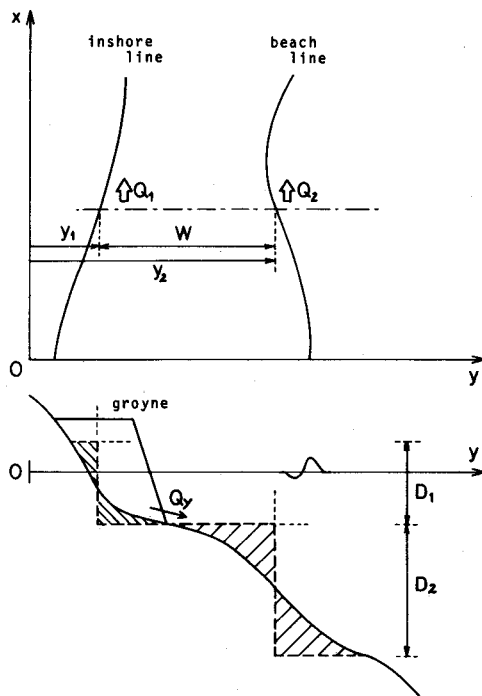


図-9 2-Line Theory

級数解を得たが、これは図-10のような地形を示唆しており、対応する1-Line Theorの解(図-8)に比して実際の地形特性をよく表わしていると言えよう。Bakkerら(1970)は差分法による上記方程式系の数値解法にも触れている。Hulsbergenら(1976)はこれらの解の実験的検証を行ない、複雑かつ不安定な海浜流系が発生しない限り定量的にも十分に現象を説明し得るものと結論した。ただし、解の実算に際しては方程式中の各係数(coastal constants)の決定にBijker(1971)およびSwart(1974)の研究成果が利用されている。

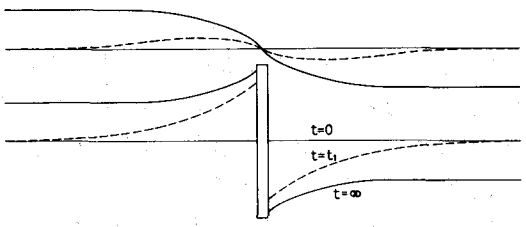


図-10 突堤付近の海浜地形
(2-Line Theory, Bakker, 1968)

5.2 海浜変形予測への一般的アプローチ

海浜の地形変動はさまざまな要因の相互作用の結果として生じるものであり、その様態は複雑の一語に尽きる。しかしながら、極く限られた微小区域について見れば、一方向流と波動に伴う往復流との共存の場で浮遊ならびに掃流形態の砂の移動状況がどのようなものであるかという命題に帰着する。これは複雑というよりはむしろ難解な問題と言えよう。こうした局地的な現象が集積した形で海浜地形の変化が生じるのであるが、仮りに局地的現象が解明されたとしてもそれを積分して地形変化を求めるには全域にわたる波と流れの場が与えられねばならない。

砕波後の波の変形、沿岸流、離岸流等の海浜流の発生機構およびその形態、規模に関する研究は近年とみに活発となっているが、その一般的な数値計算モデルとして発表されたものは数少ない。Nodaら(1974)は格子点法による波の屈折計算、砕波指標を利用した砕波帯内の波高分布計算、およびLonguet-Higginsのradiation stress理論に基づく海浜流計算よりなる数値モデルを提唱した。この方法には波の回折、wave set-upなどさらに考慮すべき要因があり、境界条件の与え方、計算効率といった技術的な面でも改良の余地が残されているが、実用モデルとして注目に値するものである。波高および波向の分布から海浜流を計算する類似の手法と試算例は橋本ら(1974c)によっても示されている。

(1) Madsen らのモデル

Madsenら(1976)は瞬間的な無次元漂砂量 ϕ がShieldsのパラメータ ψ の関数として表現できるものと考え、Brownの経験公式を採用することを提案した。

$$\phi = 40 \psi^3 \dots\dots\dots (5.9)$$

ここに、 $\phi = q_s / w_s d$ 、 $\psi = \tau_o / (\rho_s - \rho) g d$ 、 q_s は単位幅当りの漂砂量、 w_s は底質の沈降速度、 d は底質の粒径、 ρ_s および ρ はそれぞれ底質および海水の密度である。また、 τ_o は波と流れの共存場における底面剪断力で、合成流速を u とすれば、

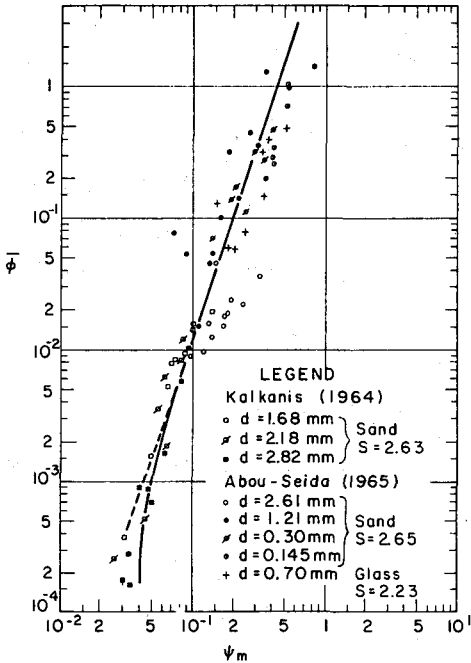


図-11 平均的な無次元漂砂量とShieldsパラメータ値の関係(Madsen・Grant, 1976)

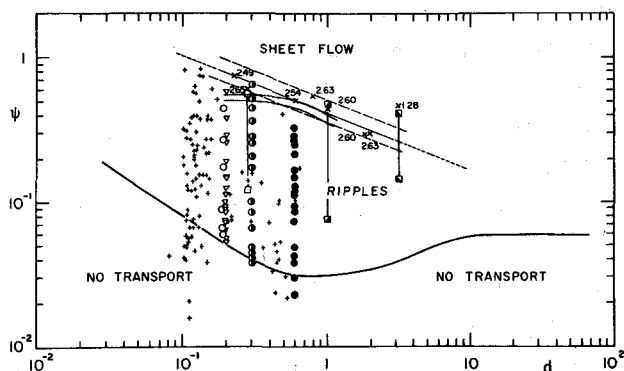
と書かれる。上式中の抵抗係数 f_b については現時点では十分な知見が得られていないので、波の場における抵抗係数 f_w と流れの場における抵抗係数 f_s を参考にしながらそれぞれの効果に応じて適宜に定める必要がある。

$$\bar{\phi} = 12.5 \phi_m^3 \dots\dots\dots (5.11)$$

波による水平床上の砂の動きを観察すると、底面に作用する流れの剪断力がある限界値を超えると底質の移動が生じ、海底面上に砂漣が見られるようになる。さらに大きな剪断力に対しては砂漣が消滅して、底面付近に高密度の移動砂層が生じるとされている。こうした顕著な底質の移動状態は sheet flow と呼ばれる。Komar ら (1975) が与えた図-12 から判断すると、上記モデルの sheet flow 領域における妥当性についてはさらに検討の余地があると思われる。

Fleming ら (1976) は、波は主として底質を攪乱し、底質濃度 C の鉛直方向分布を生ぜしめる作用をするのに対して、流れは主に海水中に分布する底質の輸送に寄与するものと考えた。そこで、ある地点における漂砂量 q_b は

で与えられる。ここに、 u は流速、 z は底面から上向きにとった鉛直座標で h は水深である。



上式の積分は底面からある高さ e なる面を境界とする上、下 2 領域について別個に行なわれる。底面近傍 $z < e$ は掃流砂領域で、底面剪断力と粒子相互の衝突が底質の流送に重要な役割を果す。ここでは、濃度分布は指数型とし、流速分布は底面摩擦を考慮しつつ剪断流として求める。一方、 $z > e$ なる領域は浮遊砂領域で、流れとしては 1/7 乗則に従う一方向流のみをとる。また、濃度分布 C は拡散方程式

を解くことによって得られる。ここに、 ε は渦拡散係数で、 z の関数として、

の形に仮定する。ただし、 ε_0 は $y = 0$ における ε の値で、 ξ は定数である。

本稿の執筆に当っては“沿岸利用に伴う海洋環境の変化，特に海浜地形変化の予測手法の開発”

(代表研究者：東京大学工学部，堀川清司教授)の一環として行なわれた文献調査の成果に負うところが大きであった。なお，上記の研究はトヨタ財団の昭和52年度生活・自然環境領域研究助成を得て行なわれたものであることを付記して謝意を表する。

参 考 文 献

- Bakker, W. T. (1968) : The dynamics of a coast with a groyne system, Proc. 11th Conf. on Coastal Eng., pp. 492-517.
- Bakker, W. T., Klein Breteler, E. H. J., and Roos, A. (1970) : The dynamics of a coast with a groyne system, Proc. 12th Coastal Eng. Conf., pp. 1001-1020.
- Bijker, E. W. (1968) : Littoral drift as function of waves and currents, Proc. 11th Conf. on Coastal Eng., pp. 415-435.
- Bijker, E. W. (1971) : Longshore transport computations, Proc. ASCE, Vol. 97, No. WW4, pp. 687-701.
- Caldwell, J. M. (1956) : Wave Action and Sand Movement near Anaheim Bay, California, U. S. Army Corps of Engineers, B. E. B., Tech. Memo. No. 68.
- Das, M. M. (1972) : Suspended sediment and longshore sediment transport data review, Proc. 13th Coastal Eng. Conf., pp. 1027-1048.
- Dean, R. G. (1973) : Heuristic models of sand transport in the surf zone, Proc. Conf. on Eng. Dynamics in the Surf. Zone, Sydney, pp. 208-214.
- Eagleson, P. S., Glennie, B., and Dracup, J. A. (1963) : Equilibrium characteristics of sand beaches, Proc. ASCE, Vol. 89, No. HY1, pp. 35-57.
- Fleming, C. A., and Hunt, J. N. (1976) : Application of a mathematical sediment transport model, Proc. 15th Coastal Eng. Conf., pp. 1184-1202.
- Galvin, C. J. Jr., and Vitale, P. (1976) : Longshore transport prediction — SPM 1973 Equation, Proc. 15th Coastal Eng. Conf., pp. 1133-1148.
- Grijm, W. (1960) : Theoretical forms of shorelines, Proc. 7th Conf. on Coastal Eng., pp. 197-202.
- Grijm, W. (1964) : Theoretical forms of shorelines, Proc. 9th Conf. on Coastal Eng., pp. 219-235.
- 橋本宏 (1974a) : 海岸線の変形モデルについて, 海岸, 14号, pp. 55-61.
- 橋本宏 (1974b) : 離岸堤による隣接海岸への影響予測モデル, 第21回海講論文集, pp. 181-185.
- 橋本宏, 宇多高明 (1974c) : 海浜流の数値計算法とその応用, 第21回海講論文集, pp. 355-360.
- 橋本宏 (1976) : 海浜変形モデルの富士海岸への適用, 第23回海講論文集, pp. 218-222.
- 服部昌太郎, 川又良一 (1977) : 砕波帯内の海浜地形変化, 中央大学理工学部紀要, 第20巻, pp. 95-117.
- 堀川清司, 砂村継夫 (1972) : 新潟県柏崎海岸における沿岸漂砂量の推定, 東京大学工学部付属総合試験所年報, 第31巻, pp. 55-60.
- 堀川清司 (1973) : 海岸工学, 東京大学出版会。
- 堀川清司, 砂村継夫, 鬼頭平三 (1973) : 波による海浜変形に関する一考察, 第20回海講論文集, pp. 357-363.
- 堀川清司, 砂村継夫, 近藤浩右 (1974) : 波による二次元海浜変形に関する実験的研究, 第21回海講論文集, pp. 193-199.
- 堀川清司, 砂村継夫, 近藤浩右, 岡田滋 (1975) : 波による二次元汀線変化に関する実験的研究, 第22回海講論文集, pp. 329-334.
- Horikawa, K. (1978) : Coastal sediment processes, U. S. - Japan Seminar on Sedimentation, Honolulu (印刷中).
- Hulsbergen, C. H., Bakker, W. T., and Bochove, G. van (1976) : Experimental verification of groyne theory, Proc. 15th Coastal Eng. Conf., pp. 1439-1458.

- 井島武士, 佐藤昭二, 青野尚, 石井晃一 (1960): 渥美湾福江海岸の波と漂砂の特性, 第7回海講講演集, pp. 67-79.
- 井島武士, 佐藤昭二, 田中則男 (1964): 鹿島港海岸の漂砂について, 第11回海講講演集, pp. 175-180.
- Iwagaki, Y., and Sawaragi, T. (1962): A new method for estimation of the rate of littoral sand drift, Coastal Eng. in Japan, Vol. 5, pp. 67-79.
- Iwagaki, Y., and Noda, H. (1963): Laboratory study of scale effects in two-dimensional beach processes, Proc. 8th Conf. on Coastal Eng., pp. 194-210.
- 岩垣雄一 (1966): 海岸侵食論, 1966年度水工学に関する夏期研修会講義集, 66-17.
- Johnson, J. W. (1949): Scale effects in hydraulic models involving wave action, Trans. A. G. U., Vol. 30, pp. 517-525.
- Komar, P. D. (1969): The Longshore Transport of Sand on Beaches, Unpublished Ph. D. Thesis, Univ. of California, San Diego.
- Komar, P. D., and Inman, D. L. (1970): Longshore sand transport on beaches, Jour. Geophys. Res., Vol. 75, No. 30, pp. 5914-5927.
- Komar, P. D. (1971): The mechanics of sand transport on beaches, Jour. Geophys. Res., Vol. 76, No. 3, pp. 713-721.
- Komar, P. D. (1973): Computer models of delta growth due to sediment input from rivers and longshore transport, Jour. Geol. Soc. Amer. Bull., Vol. 84, pp. 2217-2226.
- Komar, P. D., and Miller, M. C. (1975): The initiation of oscillatory ripple marks and the development of plane-bed at high shear stresses under waves, Jour. Sedimentary Petrology, Vol. 45, No. 3, pp. 697-703.
- Le Blond, P. H. (1972): On the formation of spiral beaches, Proc. 13th Coastal Eng. Conf., pp. 1331-1345.
- Longuet-Higgins, M. S. (1970): Longshore currents generated by obliquely incident sea waves, Jour. Geophys. Res., Vol. 75, No. 33, pp. 6778-6789.
- Madsen, O. S., and Grant, W. D. (1976): Sediment transport in the coastal environment, Proc. 15th Coastal Eng. Conf., pp. 1093-1112.
- Manohar, M. (1962): Discussion to the R. P. Savage paper, Proc. ASCE, Vol. 88, No. WW 4, pp. 141-147.
- Mogel, T. R., and Street, R. L. (1974): Computer evaluation of littoral transport, Proc. 14th Coastal Eng. Conf., pp. 715-725.
- Nayak, I. V. (1970): Equilibrium Profiles of Model Beaches, Univ. of California, Berkeley, Tech. Rept. HEL-2-25.
- Noda, E. K., Sonu, C. J., Rupert, V. C., and Collins, J. I. (1974): Nearshore Circulations under Sea Breeze Conditions and Wave-Current Interactions in the Surf Zone, Tetra Tech, Inc., Tech. Rept. TETRAT-P-72-149-4.
- 尾崎晃, 渡辺揺 (1976): 波による二次元汀線変化の相似に関する実験的研究, 第23回海講論文集, pp. 200-205.
- 尾崎晃, 曳田信一 (1977): 波による二次元汀線変化の相似に関する実験的研究 (続), 第24回海講論文集, pp. 167-169.
- Price, W. A., Tomlinson, K. W., and Willis, D. H. (1972): Predicting changes in the plan shape of beaches, Proc. 13th Coastal Eng. Conf., pp. 1321-1330.
- Rea, C. C., and Komar, P. D. (1975): Computer simulation models of a hooked beach shoreline configuration, Jour. Sedimentary Petrology, Vol. 45, No. 4, pp. 866-872.
- Sasaki, T. (1975): Simulation on shoreline and nearshore current, Proc. Specialty Cont. on Civil Eng. in the Oceans/III, Newark, pp. 179-196.
- Sasaki, T., and Sakuramoto, H. (1978): Field verification of a shoreline simulation model, Proc. Int. Conf. on Water Resources Eng., Bangkok, pp. 501-518.
- 佐藤昭二 (1966): 漂砂, 1966年度水工学に関する夏期研修会講義集, 66-19.

- Savage, R. P. (1959): Laboratory Study of the Effect of Groins on the Rate of Littoral Transport, U. S. Army Corps of Engineers, B. E. B., Tech. Memo. No. 114.
- Savage, R. P. (1962): Laboratory determination of littoral transport rates, Proc. ASCE, Vol. 88, No. WW2, pp. 69-92.
- 樫木亨, 出口一郎 (1976): 海浜変形の予測に関する基礎的研究 (第1報), 第23回海講論文集, pp. 212-217.
- 樫木亨 (1977): 海浜変形とその予測, 1977年度水工学に関する夏期研修会講義集, 77-B-5.
- Swart, D. H. (1974): Offshore Sediment Transport and Equilibrium Beach Profiles, Delft Hydraulics Laboratory, Publication No. 131.
- Swart, D. H. (1976): Predictive equations regarding coastal transport, Proc. 15th Coastal Eng. Conf., pp. 884-900.
- 玉井佐一 (1977): 海浜流と海浜変形, 1977年度水工学に関する夏期研修会講義集, 77-B-4.
- 土屋義人 (1973): 海岸土砂収支と海浜変形, 1973年度水工学に関する夏期研修会講義集, 73-B-3.
- 土屋義人, 稲田和則 (1974): 風波による海浜変形に関する実験, 第21回海講論文集, pp. 219-224.
- U. S. Army Corps of Engineers, CERC (1966): Shore Protection, Planning and Design, Tech. Rept. No. 4.
- U. S. Army Corps of Engineers, CERC (1973): Shore Protection Manual, 3 volumes, U. S. Govt. Printing Office.
- Wang, H., Dalrymple, R. A., and Shiau, J. C. (1975): Computer simulation of beach erosion and profile modification due to waves, Proc. Symp. on Modeling Techniques, San Francisco, pp. 1369-1385.
- Watts, G. M. (1953): A Study of Sand Movement at South Lake Worth Inlet, Florida, U. S. Army Corps of Engineers, B. E. B., Tech. Memo. No. 42.