

Meso-scale Sediment Budget Analysis

栗山善昭

Yoshiaki KURIYAMA

1. はじめに

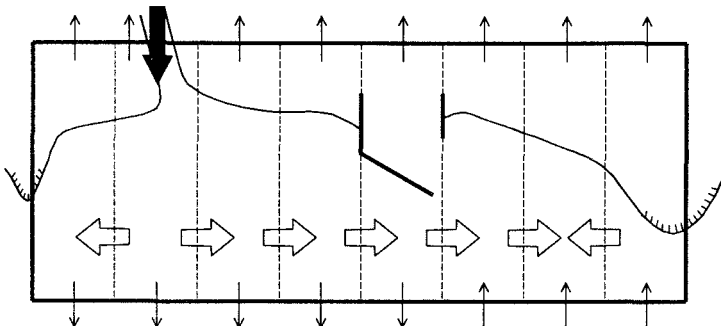
新海岸法のもとで作成された海岸基本方針によって全国 71 の広域海岸ごとに海岸保全基本計画を作成することが求められることとなった。海岸保全基本計画の作成にあたっては広域の土砂移動特性をできるだけ定量的に把握しておくことが望ましく、そのためには、数十 km～百数十 km の延長をもった領域の土砂移動特性を定量的に示す広域土砂収支図の作成が望まれる。

土砂収支図とは、ある領域における土砂の移動量の分布を地形変化量の分布とともに示す図面である。土砂収支図の作成は 1960 年代後半から始まり、アメリカの南カリフォルニア海岸やノースカロライナ海岸、日本の九十九里浜海岸などの土砂収支図が作成された (Komar, 1998)。最近では、深淺図や航空写真を基に宇多ら (1991) が遠州灘海岸の土砂収支図を、田中ら (1997) が石川海岸における土砂収支図を作成している。さらに、Kana (1995) は延長 140km に及ぶアメリカ、ロングアイランド海岸における土砂収支図を深淺図をもとに作成し、Byrnes and Hiland (1995) は 1800 年代後半と 1900 年代後半の深淺図を基に St. Marys Entrance を中心とした延長約 50km のフロリダ東海岸の長期かつ広域の土砂収支図を作成している。一方、Rosati and Kraus (1999) は、inlet 周辺のやや狭い領域ではあるが複雑な場における土砂収支図の作成方法ならびに誤差の評価の方法をまとめている。

本論文では、まず、入手が比較的容易なデータを基に広域の土砂収支図を作成する方法を紹介する。続いて、広域土砂収支図の作成例として、遠州灘海岸、鹿島灘海岸における土砂収支図を示し、最後に本論文で紹介する広域土砂収支図作成方法の問題点を述べる。

2. 広域土砂収支図の作成方法

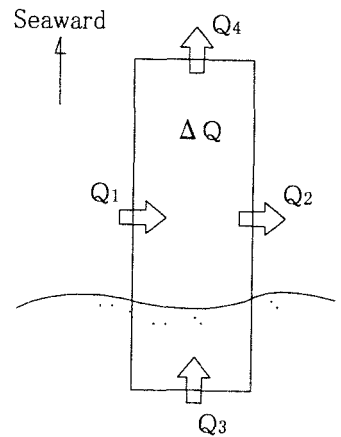
土砂収支図作成では、対象とする領域をいくつかの小領域に分割し、その小領域における各境界（側方、岸、沖）での土砂移動量を推定していく。図－1 は土砂収支図を概略的に示したもので、図中の太い実線で囲まれた領域が土砂収支図作成の対象領域（大領域）を示しており、破線で囲まれた領域が小領域を示して



図－1 土砂収支図のイメージ

いる。土砂収支図の沿岸方向の範囲としては沿岸漂砂量（側方境界における土砂移動量）が0の地点から沿岸漂砂量が0の地点まで取ることが望ましい。これは、この範囲で一つの底質移動の系（漂砂系、あるいは漂砂セルと呼ばれる）が形成されているという物理的な理由と、大領域の側方境界における土砂移動量を0とおくことによって沿岸漂砂量の推定誤差を小さくできるという土砂収支図作成上の理由とによる。岸沖方向の岸側境界は波による漂砂の影響が無くなる荒天時の波の遡上位置に、沖側境界は漂砂量が小さくなる移動限界水深あたりに設定することが望ましい。

土砂移動量の推定方法としては地形変化をもとに求める方法と波浪データから求める方法とがあり、以降、その手法を順に説明していく。



図－2 土砂移動の模式図

2. 1 地形変化を基にする方法

図－2はある領域における土砂移動を模式的に示したものである。岸沖方向には沖向きを正、沿岸方向には沖を見て右向きを正とし、 ΔQ をこの領域内の土量増加量、 Q_1 、 Q_2 をそれぞれ左、右側方境界における土砂移動量、 Q_3 、 Q_4 をそれぞれ岸、沖側境界における土砂移動量とすると、以下の連続の式が成り立つ。

$$\Delta Q = Q_1 - Q_2 + Q_3 - Q_4 \quad (1)$$

本方法は、この連続式を利用して、大領域のある側方境界に接する領域から反対側の境界に向けて、地形変化を基に底質の連続式を満たすように順に土砂移動量を決定していく方法である。その場合、未知数が二つ以上あるとそれらの値を決定することができないため、岸側境界における土砂量と沖側境界における土砂量とは予め与えておく（与え方については後述する）。すると、大領域のある側方境界における沿岸漂砂量（0であることが多い）が与えられると、式（1）を使って順に沿岸漂砂量が求めていくことができる。

以降、式（1）における各項の値を推定する方法を示す。

2. 1. 1 小領域における土量変化の推定方法

① 深浅図による推定方法

各小領域における地形変化量を求める最も精度の高い方法は深浅測量図を基にする方法である。2枚の深浅測量図があれば、その差を取ることで2枚の深浅図が得られた期間の地形変化量を求めることができる。しかしながら、地形変化量の推定精度を向上させるためには複数枚の深浅図を用いる必要がある。その理由は以下の通りである。

地形変化には短期の地形変化と長期の地形変化とが存在し、両者は重なりあっている。土砂収支図で対象とするのは、長期の地形変化であり、短期の地形変化は取り除いて考えるべきである。そのためには、2枚の深浅測量図だけでは不十分で、複数枚の深浅図を用いて、最小二乗法などによりその長期の地形変化速度を求める必要がある。

なお、浚渫ならびに土砂投入があった場合には、土砂収支図において各境界からの土砂移動量とは区別して表すようにする。

② 航空写真による推定方法

深浅図が手に入らない場合には、航空写真を用いて地形変化量を推定する。航空写真は、戦後間もなく米

軍によって、その後は国土地理院によって全国で数年に1回の頻度で撮影されている。

航空写真によって各小領域における土量変化を計算する場合には、地形変化量は汀線変化量に比例すると仮定する。図-3はその仮定を模式的に示したもので、汀線の変化量を Δy_s 、小領域の沿岸方向の延長を L 、漂砂移動範囲の高さを D とすると、土量変化量 ΔQ は

$$\Delta Q = \Delta y_s L D \quad (2)$$

で表される。

航空写真による汀線位置変化把握の方法は田中ら(1973)や田中・沢本(1974)などによって検討され、現在では実務で頻繁に用いられている。その基本的な手順を簡単に説明すると、

- 1枚の航空写真上に基準点を最低2地点設定する(道路の交差点や橋など)。
- 航空写真上の基準間の距離と地形図から読みとった基準点間の実際の距離から航空写真の縮尺を算出する。
- 基準点の位置を参考に汀線の位置を読みとる。
- 汀線位置の潮位補正を行う。

当然のことながら、汀線位置は潮位によって変動する。航空写真撮影時の潮位は必ずしも各写真毎に一致するわけではないので、読み取った汀線位置を基準潮位時の汀線位置に補正する必要がある。上向きおよび沖向きを正とすると、基準潮位の汀線位置 y_s は写真撮影時の汀線位置 y_m と基準潮位 η_s 、航空写真撮影時の潮位 η_m 、前浜勾配 $\tan \beta$ (上向きと沖向きを正とすると前浜勾配は通常マイナスとなる)から以下の式で求まる。

$$y_s = y_m + (\eta_s - \eta_m) / \tan \beta \quad (3)$$

基準潮位としては平均潮位が適当である。その理由は、基準潮位として平均潮位を取ると、基準潮位と航空写真撮影時の潮位との差に比例する汀線位置の補正量が小さくなり、全体として誤差が小さくなるからである。

航空写真撮影時の潮位は航空写真に記載されている撮影時間と潮位表より求める。ただし、米軍によって撮影された写真には撮影時間が記載されておらず、この場合は、影の方向によって撮影時間をおおよそ推定することができる。

前浜勾配にも実測値を用いることが望ましい。ただし、過去の実測値が無い場合には、現在の実測値を代用する。

深淺図による地形変化量把握の場合と同様、汀線位置の変化速度把握の場合も短期変動成分を取り除き長期変動成分を取り出す必要があり、その手順は前述した通りである。ただし、汀線位置の変動の場合、深淺図より求める小領域内の地形変化量に比べて長期変動に対する短期変動の影響が大きいと考えられるので、長期変動の抽出の重要性は地形変化量の場合に比べると高い。と言うのは、地形の短期変動は岸沖漂砂によって支配されていることが多いと考えられる。岸沖漂砂による地形変化の大半は土砂収支図の岸沖範囲である波の遡上位置から移動限界水深までの範囲で生ずるため、土砂収支図の小領域内の土量の短期変動は小さ

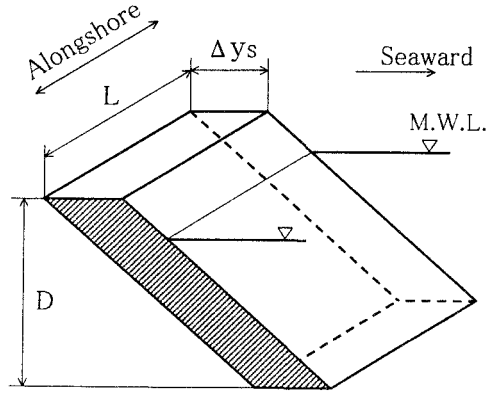


図-3 汀線変化量と地形変化量との関係に関する仮定

い。一方、前浜ではバームの成長と侵食というサイクリックな地形変化が生じている（例えば、加藤ら、1987）。よって、汀線変動では、深浅図より求められる小領域内の土量変動に比べて相対的に短期変動成分が大きいと考えられる。

漂砂移動範囲の高さ D は、対象海岸における深浅図等の地形データを基にした汀線の変動量と地形変動量との関係から求めることが望ましい。地形データが無い場合には、宇多（1997）によってまとめられている漂砂移動範囲の高さの一覧を参考にするか、同じく宇多（1997）によって示されている漂砂移動の高さ D の算定式（式（4））を基に求める。

$$D = h_r + h_c / 2 - h_r (h_r / h_c)^2 - h_r (h_r / h_c)^3 / 2 \quad (4)$$

ただし、 h_c は移動限界水深、 h_r は波の遡上高さである。

移動限界水深 h_c は、以下に示す佐藤・田中の完全移動限界水深（佐藤、1966）の推定式から求めることができる。

$$\frac{H_0}{L_0} = 2.4 \left(\frac{d_m}{L_0} \right)^{1/3} \left(\frac{H_0}{H} \right) \sinh \frac{2\pi h_c}{L} \quad (5)$$

ここで、 H_0 は沖波波高、 L_0 は沖波波長、 d_m は底質の中央粒径、 H 、 L はそれぞれ水深 h_c における波高と波長である。

波の遡上高さ h_r は、Swart の提案式（Swart, 1974）で求めることができる。

$$h_r / d_m = 7644 - 7706 \exp \left(-0.000143 \frac{H_0^{0.488} T^{0.93}}{d_m^{0.786}} \right) \quad (6)$$

ただし h_r 、 d_m 、 H_0 は m で与え、 T は s で与える。

なお、既往の推定式による波の遡上高さの推定結果と人工海浜における後浜高さ（波の遡上高さに等しいと考えられる）の実測値との比較は栗山ら（1989）に示されている。

2. 1. 2 岸側境界における土砂移動量の推定方法

岸側境界における土砂移動としては、河川からの土砂流出と沖向きおよび陸向きの飛砂とが考えられる。

① 河川からの流出土砂量の推定方法

河川からの流出土砂量は水理公式集 平成 11 年度版（土木学会、1999）にも記載されている芦田・奥村（1974）の研究成果を基に推定する。芦田・奥村（1974）は、全国の容量 200 万 m^3 以上、堆砂率 25% 以下の貯水池の堆砂量と流域面積との関係を調べて、図-4 に示される流域面積 A (km^2) と年平均比流出土砂量 q_s ($\text{m}^3/\text{km}^2/\text{year}$) との関係（式（7））を見出した。

$$q_s = K_s A^{-0.7} \quad (7)$$

ここで、 K_s は定数で、各河川毎に一定となる。対象となる河川が図-4 に含まれている場合にはその係数を用い、含まれていない場合には対象河川の特徴から該当すると思われる係数を見出す。また、タムの堆砂データがある場合にはそのデータを式（7）に当てはめて係数の値を求める。

タムによる河川からの流出土砂量の減少は以下の方法で考慮する。

- 式（7）の係数 K_s を前述の方法で決定する。
- 対象河川の流域面積 A_1 よりタムがない場合の流出土砂量 Q_{r1} ($=q_{r1} \cdot A_1$) を求める。
- タムの流域面積 A_2 よりタムより上流の流出土砂量 Q_{r2} ($=q_{r2} \cdot A_2$) を求める。
- タムより上流で生産された土砂は全てタムに堆積すると仮定し、また、流出土砂の 35~40% が砂で

あること（藤田，2000）を考慮して，以下の式より海岸形成に寄与する河川からの流出土砂量 Q_r を求める．

$$Q_r = 0.4(Q_{r1} - Q_{r2}) \quad (8)$$

主要な河川の流域面積は河川便覧（例えば，国土開発調査会，1998）に，主要なダムの流域面積はダム年鑑（例えば，財団法人 日本ダム協会，1999）に記載されている．また，各種のホームページにも河川やダムの流域面積が示されていることがある．

② 飛砂量の推定方法

飛砂量は，風速の対数則分布を仮定した上で，アメダス等の風データより求める．まず，次式にしたがって風の進行方向の摩擦速度 v_* を求める．

$$v_* = \frac{v_m}{\left| \frac{v_m}{5.75 \log_{10}(z_m/z')} - v' \right|}, \quad (9)$$

$$v' = 8.94d \text{ (m/s)}, \quad z' = 10d \text{ (mm)}$$

ここで， v_m は風速の実測値， z_m は風の測定高さである．また， d は砂の粒径で式（9）では mm で与える．

このようにして求めた摩擦速度 v_* と河村公式（堀田，1985）とを用いて飛砂量 q_e を計算する．

$$q_e = \cos \alpha_w K_e (\rho_a / g) (v_* + v_{*c})^2 (v_* - v_{*c}) \quad (10)$$

ここで， α_w は風向き， ρ_a は空気密度， K_e は無次元係数でここでは 1.0 とした． v_{*c} は流動開始摩擦速度であり，無次元係数 A_e を 0.1 とおいた次式より求める（堀田，1985）．

$$v_{*c} = A_e \sqrt{gd(\rho_s - \rho_a) / \rho_a} \quad (11)$$

ρ_s は砂粒子の密度である．

なお，式（10）によって求めた飛砂量は重量単位なので，体積に変換するときには空隙率（0.4 程度）を考慮する．また， $v < v_{*c}$ の場合は飛砂量を 0 とする．

2. 1. 3 沖側境界における土砂移動量の推定方法

現時点では沖へ流出する（あるいは沖から流入する）土砂量を精度良く推定する方法は確立されていない．前述したように沖側境界は通常漂砂量が十分に小さくなる地点に設定するけれども，少量の土砂移動は存在している．そこで，本方法では，大領域における岸側境界と両側方境界からの土砂移動量と大領域内の土量変化量との差が沖側境界から出入りすると仮定し，沖側境界における土砂移動量を求める．解析領域内に漂砂を完全に遮断する岬や構造物が存在する場合には，そこを境界として二つの領域に分けてそれぞれ独立に沖側境界における漂砂量を推定する．

- | | | |
|------------|--------|--------|
| ○ 石狩川，十勝川 | ● 木曽川 | ◇ 十津川 |
| ● 只見川，阿賀野川 | ◎ 信濃川 | ⊙ 吉野川 |
| ○ 三面川 | ● 黒部川 | ⊗ 物部川 |
| ● 赤川 | ⊙ 神通川 | ⊕ 四万十川 |
| ⊙ 利根川 | ⊗ 常願寺川 | ⊙ 耳川 |
| ● 多摩川 | ● 庄川 | ⊗ 一瀬川 |
| ● 大井川 | ■ 桂川 | ◇ 中国地方 |
| ● 天龍川 | ○ 相模川 | |

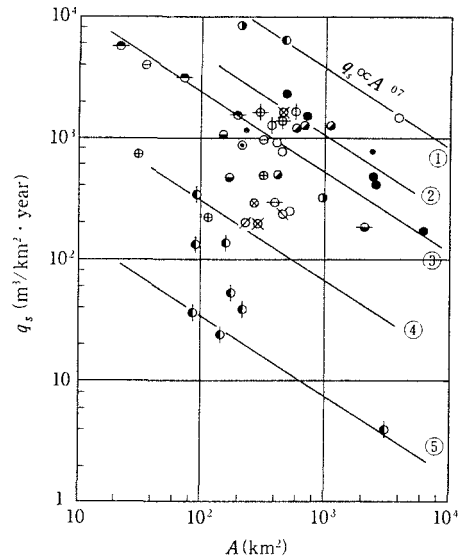


図-4 流域面積と年平均比流出土砂量との関係（土木学会，1999）

2. 1. 4 側方境界における土砂移動量の推定方法

前述したように、土砂収支図作成の範囲の両端は、沿岸漂砂量が0と考えられる地点（岬など）であることが望ましい。しかしながら、やむを得ず両方の側方境界を沿岸漂砂量が無視できない地点にとる場合には、最低どちらか一方の境界の沿岸漂砂量を推定する必要がある。推定方法としては、(a)後述する波浪データを基にする方法、(b)既往の研究成果を利用する方法、がある。

2. 2 波浪データを基にする方法

波向きも含めた波浪データを入手することができる場合には、これらのデータから沿岸漂砂量を推定することが可能である。波のエネルギーを E 、群速度を C_g 、波向きを α とすると沿岸漂砂量 Q_l は以下の式で求まる。

$$Q_l = \frac{K_1}{(\rho_s - \rho_w)g(1 - \lambda_v)} (EC_g)_b \cos \alpha_b \sin \alpha_b \quad (12)$$

ここで、 ρ_w は海水の密度、 g は重力加速度、 λ_v は空率 (=0.4) であり、下付の b は碎波位置の値であることを示している。 K_1 は定数で 0.1~0.4 の値を取る。

波浪データとしては、全国 51 地点での観測データをまとめた国土交通省港湾局による全国港湾海洋波浪情報網 (NOWPHAS) のデータが利用できる (例えば、永井ら、2001)。ただし、波向き観測が実施されているのは 51 地点中 34 地点 (1999 年度；永井ら、2001) なので、現時点ではどの地点でも本方法による沿岸漂砂量の推定が可能なのでは無い。

3. 土砂収支図の作成例

3. 1 遠州灘海岸

静岡県焼津港から愛知県の伊良湖岬までの範囲の土砂収支図を図-5 (1)、(2) に示す。主な流入河川は天竜川と大井川であり、それぞれ解析対象範囲の中央よりやや西側および東側に位置している。天竜川の流域面積は 5,090km² で主なダムとしては佐久間ダムがある。大井川の流域面積は 1,280km² で、井川ダムや畑薙第一ダム等がある。天竜川より西側約 20km の地点には外海に面している浜名湖が存在している。

主な海岸構造物としては、御前崎港、大井川港、福田漁港の防波堤や浜名湖今切口の導流堤などがある。航空写真から判断すると、御前崎港、大井川港では 1970 年代に防波堤が沖に延伸されており、また、今切口の突堤も 1970 年代に沖に延伸されている。福田漁港では 1980 年後半になると防波堤配置は現在に近い形となっている。

本解析では、解析対象期間を御前崎港、大井川港および福田漁港の防波堤が延伸される以前と以後との二期間 (1962 年~1986 年、1977 年~1997 年、一部重複) に分け、それぞれの期間の土砂収支図を作成した。

本解析領域では両端が開境界となっており沿岸漂砂量を 0 とできない。そこで、本計算では、御前崎港の防波堤が延伸された以降の 1977 年~1997 年の期間については、御前崎港を通過する沿岸漂砂量は 0 であると仮定し、さらに沖側境界における土砂移動量を 0 として沿岸漂砂量を計算した。このようにして計算すると、御前崎を回り込んで御前崎港に流入してくる土量は 56,000m³ となる。1962 年~1986 年の期間については、この値を基準として沿岸漂砂量を計算した。

河川からの排出土砂量の計算では、図-4 の直線①の値である $K_1=503,570$ を用いた。漂砂の移動高さは宇多 (1997) を参考に御前崎港よりも西側では 9.7m、東側では 8m とし、飛砂量計算では御前崎港よりも西側については御前崎のアメタスデータを、東側については清水のアメタスデータを使用した。波浪データより沿岸漂砂量を求める計算では $K_1=0.23$ とした。

御前崎港より西側の土砂収支に注目し (図-5 (1))、まず第二期 (1977 年~1997 年) を見てみると、天竜川からの供給土砂量は 21.4 万 m³ となっている。この値は、宇多ら (1991) によって示された 16 万

m³（1980 年～1985 年）に近く、今回の推定値が妥当なものであることがわかる。沿岸漂砂量を見てみると、天竜川よりも東側において地形変化を基にした求めた沿岸漂砂量と波浪データから求めた沿岸漂砂量の向きとが一部異なっているけれども、天竜川よりも西側では向きおよび量が両者でほぼ一致しており、今回の沿岸漂砂量の推定が妥当なものであったと考えられる。一方、第一期（1962 年～1986 年）を見ると、天竜川よりも西側で沿岸漂砂の向きが東側となっており、波浪データから求まる沿岸漂砂の方向と逆向きとなっている。これは、河川からの流出土砂量を過小評価したことが原因ではないかと考えられる。宇多ら（1991）によると、1960 年代には現在よりも流出土砂量が大きかったという結果が示されているけれども今回の解析ではそれは考慮されていない。これが、両者の差になったのではないかと考えられる。

御前崎港よりも東側を見てみると（図－5（2））、大井川よりも西側の領域 E-6 と領域 E-7 付近で沿岸漂砂の向きが西向きから東向きに変化しており、この変化点は次第に西に移動している。これは、地元の人たちが汀線近傍の地形変化の様子から経験的につかんでいる土砂移動の実態と一致する。一方、大井川より東側を見てみると 20 万～40 万 m³ の漂砂が東向きに流れている。これは、波浪データから求められた沿岸漂砂量に近い値となっており、また、20 万～30 万 m³ 程度の土砂が和田鼻沖の海底谷に流出している可能性が高いことを示している観測結果（佐藤ら、1999）とも一致している。

3. 2 鹿島灘海岸

茨城県の利根川河口から大洗港までの土砂収支図を図－6 に示す。当海岸では、南の境界において利根川が流れ込んでおり、北側境界のやや北には那珂川河口が位置している。利根川の流域面積は 16,840km² で、矢木沢ダム、下久保ダム等がある。一方、那珂川の流域面積は 3,270km² で深山ダム等がある。

解析対象区域の中央のやや南に鹿島港が存在し、南側境界には波崎新漁港、北側境界には大洗港が存在している。鹿島港の建設は 1963 年に始まり、1970 年代前半までに南防波堤が約 3 km まで延長された。大洗港では、南防波堤の建設に引き続き西防砂突堤の建設が 1977 年より、沖防波堤の建設が 1981 年より始まり（三村ら、1991）、1985 年には現在の形状に近い形となっている。一方、波崎漁港は 1974 年より建設が始まり（宇多、1997）、1983 年には現在の形状に近い形状になっている。鹿島港の北側海岸におけるヘッドランドの建設は 1984 年に始まっている（宇多、1997）。

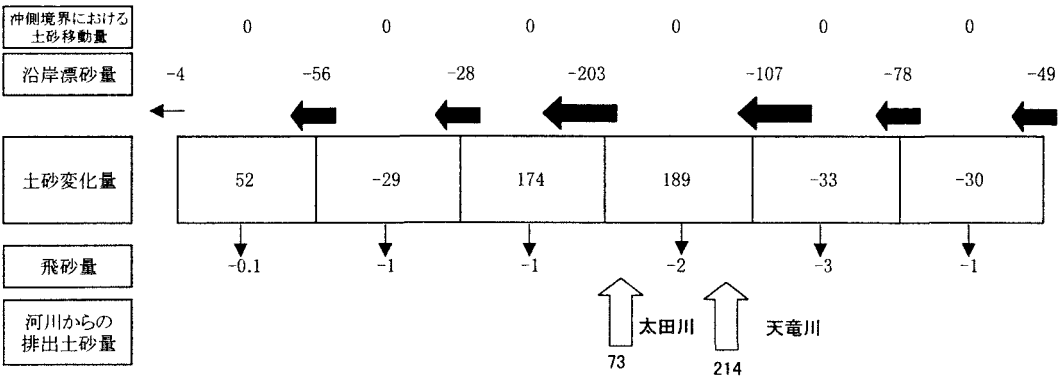
本解析では、解析対象期間を鹿島港建設以前と以降の二期間（1947 年～1965 年、1964 年～1992 年、一部重複）に分けて土砂収支図を作成した。河川からの流出土砂量の計算では、利根川についてはダムにおける堆砂量より求めた $K_1=19,900$ を用い、那珂川については図－4 の直線④の値である $K_1=8,000$ を用いた。漂砂の移動高さは実測値及び計算値を基に 8 m とするとともに、波浪データより沿岸漂砂量を求める計算では $K_1=0.06$ とした。

田中ら（1973）によれば、本海岸では北向きの漂砂が卓越しており、波浪データから計算される沿岸漂砂量もそのようになっている。しかしながら、地形データより求めた土砂収支図を見てみると、必ずしもそうっていない。鹿島港建設以前の第一期（1947 年～1965 年）を見てみるとほとんどが南向き漂砂となっている。第一期の土砂収支図の作成では 1947 年と 1960 年、1964 年の航空写真を用いたけれども汀線変動が特に鹿島港北側で大きく短期変動成分の影響を十分に抜くことができなかった影響が土砂収支図に現れている可能性がある。一方、鹿島港建設後の第二期（1964 年～1992 年）を見てみると、北向きの漂砂と南向きの漂砂とがほぼ同じ割合となっている。漂砂の卓越方向が北向きであると考え、鹿島港や波崎漁港の遮蔽域に向かう漂砂が大きめに評価されていると解釈することができる。遮蔽域は沿岸方向のみならず沖からも相当量の土砂を取り込んでいるのかも知れない。

4. 問題点と今後の課題

① 沖側境界における土砂移動量

御前崎港以西土砂収支図 第一期 (1962-1986) (単位: $\times 10^3 \text{ m}^3/\text{year}$)



御前崎港以西土砂収支図 第二期 (1977-1997) (単位: $\times 10^3 \text{ m}^3/\text{year}$)

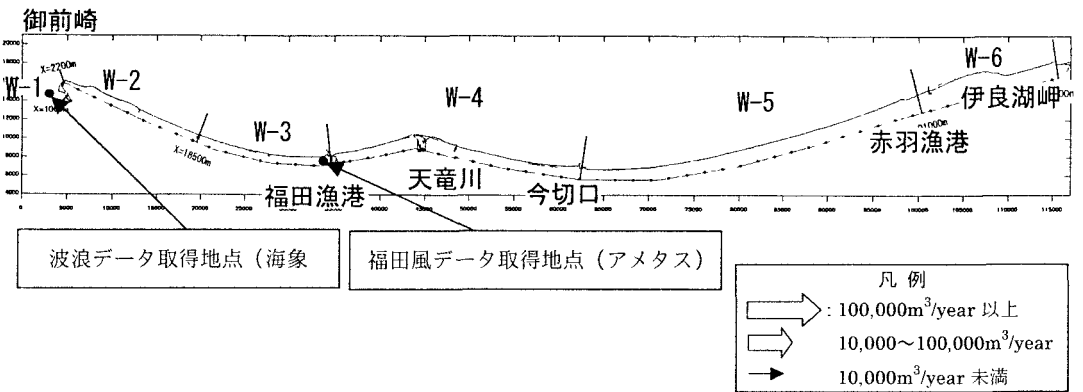
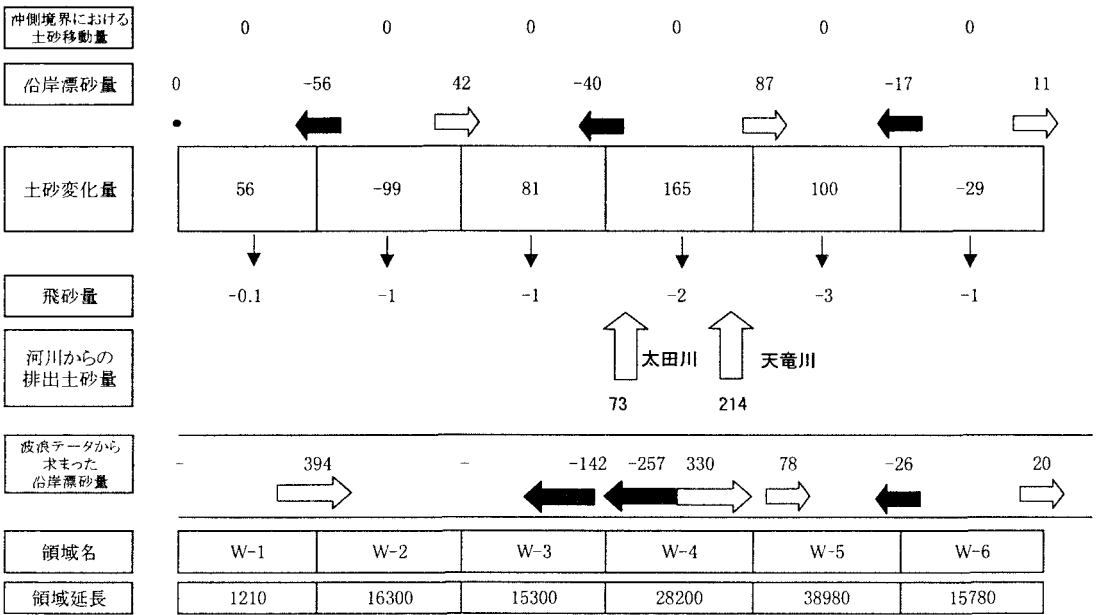
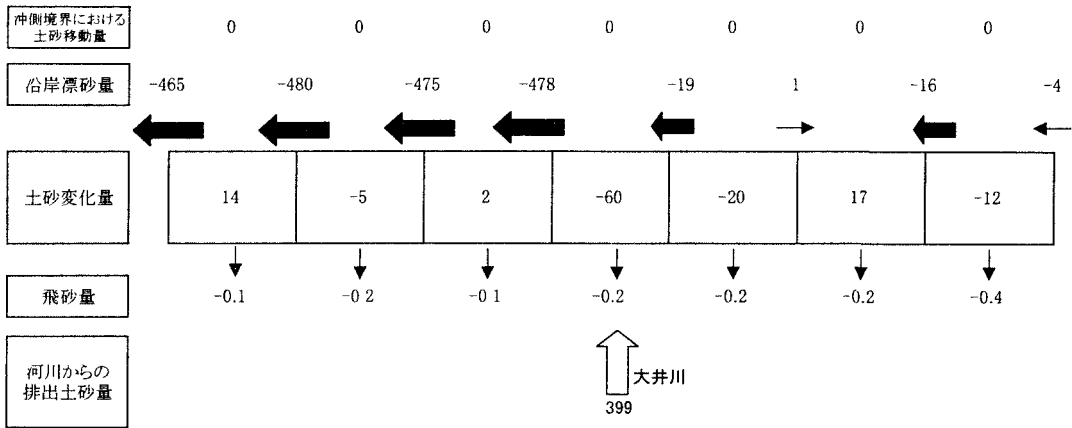


図-5 (1) 遠州灘海岸の土砂収支図 (御前崎港以西)

御前崎港以東土砂収支図 第一期 (1962-1986) (単位: $\times 10^4 \text{ m}^3/\text{year}$)



御前崎港以東土砂収支図 第二期 (1977-1997) (単位: $\times 10^4 \text{ m}^3/\text{year}$)

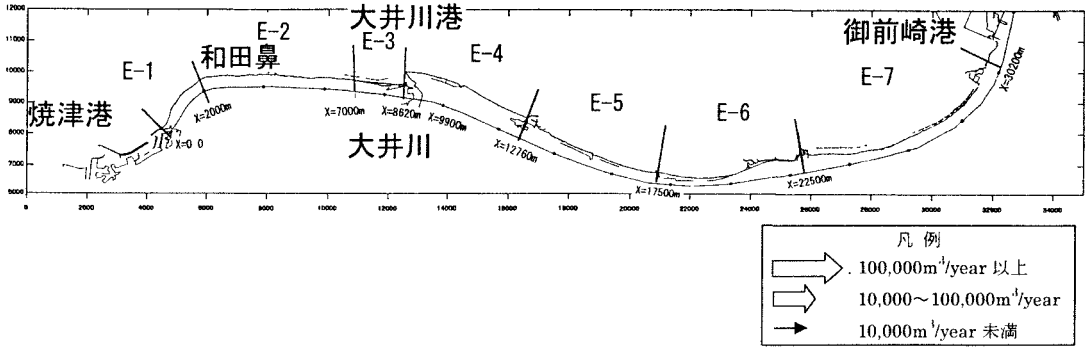
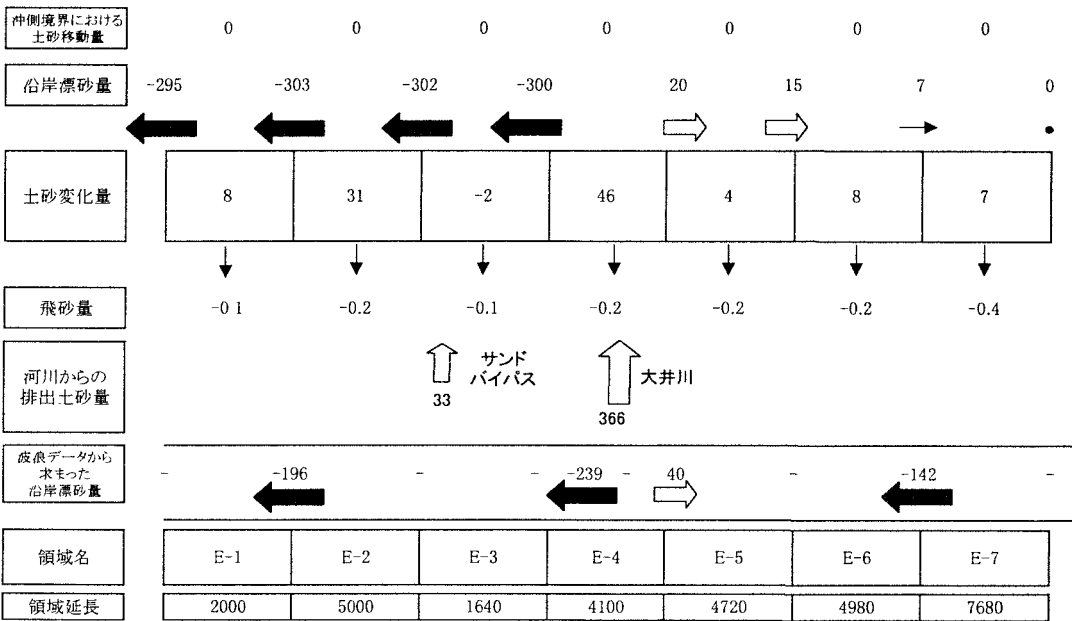
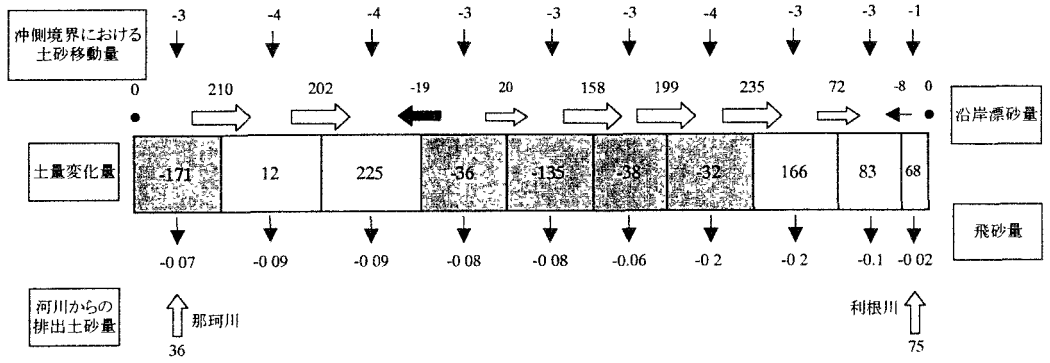


図-5(2) 遠州灘海岸の土砂収支図(御前崎港以東)

鹿島海岸土砂収支図 第一期 (1947-1964) (単位: $\times 10^4 \text{ m}^3/\text{year}$)



鹿島海岸土砂収支図 第二期 (1964-1992) (単位: $\times 10^4 \text{ m}^3/\text{year}$)

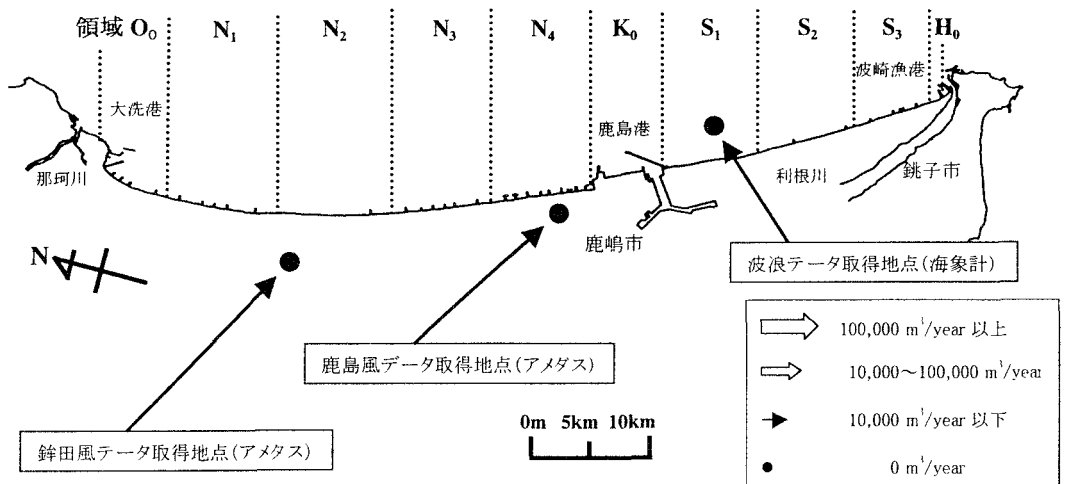
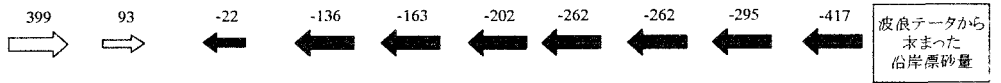
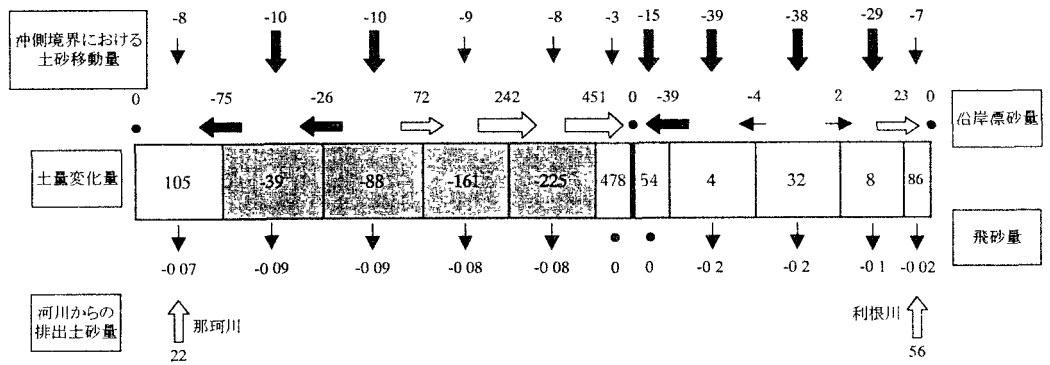


図-6 鹿島灘海岸の土砂収支図

前述したように、現時点では沖側境界における土砂移動量を精度良く推定する方法は確立されていない。本方法では、地形変化量と河川からの流出土砂量の推定誤差が全て沖側境界における土砂移動量に集約されている。今後は、波浪データを基に沖側境界における土砂移動量を推定する方法を開発し、誤差を1箇所に集中させることなく分散させることにより土砂収支図の精度を向上させる必要がある。

② 河川からの流出土砂量

河川からの推定流出土砂量にも相当量の誤差が含まれているものと考えられる。例えば、ダムの捕砂率（ここでは100%を仮定）や河川から流出する土砂の海岸形成に対する寄与率（ここでは0.4と仮定）など不明な点が多い。後者に対しては、河川では粒径別の土砂移動量の推定の試みがなされており（例えば、藤田、2000）、また、海岸では河口周辺の地形変化と底質移動特性が調べられており（例えば、佐藤ら、2000；山下ら、2000）、土砂収支図の精度向上につながる今後の成果が期待される。

③ 航空写真の読み取り誤差

田中・沢本（1974）によると波の打ち上げによる読み取り誤差や汀線の季節変動による誤差などを考慮すると航空写真の読み取り誤差は10～20m程度である。ここで、撮影年が10年離れた2枚の航空写真から変化土量を求める場合を想定し、それぞれ+10m、-10mの読み取り誤差があったとすると、汀線の変化速度には2m/yearの誤差が生ずる。漂砂の移動高さを10m、解析対象の沿岸方向距離を50kmとすると、解析領域全体では1,000,000m³の誤差が生ずることになる。この値は、地形変化量に比べて大きな値であることが図-5、6からわかる。漂砂の移動高さにも誤差が含まれることを考えると、より精度の高い土砂収支図を作成するためには深浅測量データの蓄積が必要になってくると考えられる。

④ 飛砂量

図-6に示されている鹿島灘海岸における飛砂の計算結果を、沿岸方向の単位長さ当たりの値に変換すると約0.01m³/(year・m)となる。しかしながら、鹿島港の南約10kmの波崎海岸での後浜の地形変化（栗山ら、2001）から推測される飛砂量は約6m³/(year・m)である。これを沿岸方向距離50kmの値に直すと、前者が500m³であり、後者が300,000m³となる。この差の原因の一つは、風の測定地点の違いによるものと考えられる。鹿島灘海岸における飛砂量の基となった風データは海岸より約4kmほど内陸に入った地点（鹿嶋市）で取得されたものである。このため、飛砂の生じている砂浜に比べると風が減衰していたと考えられる。飛砂量は風速の3乗に比例するため（式（10））、風速の小さな差が推定飛砂量の大きな差につながる。海岸における風向・風速の効率良い推定方法の開発が今後の課題である。

5. おわりに

本論文では、重要性および必要性が今後増大すると思われる広域土砂収支図の作成方法を述べるとともに、その作成例を紹介した。その結果、本論文で述べた土砂収支図作成方法の妥当性、有効性を示すだけではなく、その限界や問題点をも浮き彫りにする形となった。もちろん、ここで紹介した方法によって作成した土砂収支図が広域の土砂移動に関する多くの情報を含んでいることは確かであるけれども、現時点では、広域の土砂移動特性を一つの結果だけで判断することは危険であり、複数の結果から、例えば、本論文で紹介した地形データを基にした方法と波浪データを基にした方法とによって作成した土砂収支図に既往の調査結果を加えて総合的に判断する必要がある。

最後に、本論文は運輸省（現国土交通省）海岸・防災課が平成11年度、12年度に行った沿岸漂砂に係わる土砂収支の総合的管理に関する技術検討ワーキンググループにおける議論をもとにまとめたものである。座長の港湾技術研究所 加藤前水工部長（現独立行政法人港湾空港技術研究所）およびワーキンググループ

での議論に加わっていただいた、あるいは、資料作成に携わっていただいた海岸・防災課、港湾建設局（現地方整備局）、マリーナビーチ協会、（株）エコー、国土環境（株）、港湾技術研究所漂砂研究室（現独立行政法人港湾空港技術研究所）の皆さんに感謝の意を表します。

参考文献

芦田和男・奥村武信（1974）：ダム堆砂に関する研究，京大防災研究所年報，第 17 号 B，pp.1-16.

宇多高明（1997）：日本の海岸侵食，山海堂，442p.

宇多高明・坂野 章・山本幸次（1991）：遠州海岸の 1960 年代以降における海浜変形，土木研究所報告，第 183 号－2，48p.

加藤一正・柳嶋慎一・村上裕幸・末次広児（1987）：汀線位置の短期変動特性とそのモデル化の試み，港湾技術研究所報告，第 26 巻，第 2 号，pp.63-96.

栗山善昭・加藤一正・入江 功（1989）：離岸堤を備えた人工海浜の地形特性，港湾技研資料，No.659，49p.

栗山善昭・中島 剛・上堂蘭孝一・望月徳雄（2001）：後浜から砂丘前面にかけての植生が地形変化に及ぼす影響に関する現地観測と植生を考慮した飛砂量の数値計算，港湾技術研究所報告，第 40 巻，第 1 号，pp.47-80.

国土開発調査会（1998）：河川便覧 1998，国土開発調査会，425p.

財団法人 日本ダム協会（1999）：ダム年鑑 1999，財団法人 日本ダム協会，1510p.

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，19-1 - 19-29.

佐藤慎司・笠井雅弘・河野龍男・諸田 勇・加藤俊夫・桜庭雅明（1999）：駿河海岸和田鼻地先における砂礫の粒径別移動特性，海岸工学論文集，第 46 巻，pp.526-530.

佐藤慎司・前田 亮・磯部雅彦・関本恒浩・笠井雅弘・鳥居謙一・山本幸次（2000）：鹿島灘南部海岸の地形形成機構に関する現地調査，土木学会論文集，No.663/II-53，pp.89-100.

田中茂信・佐藤慎司・川岸眞一・石川俊之・山本吉道・浅野 剛（1997）：石川海岸における漂砂機構，海岸工学論文集，第 44 巻，pp.661-665.

田中則男・小笹博昭・小笠原 昭（1973）：海浜変形調査資料（第 1 報）－航空写真による汀線変化の解析（東日本編）－，港湾技研資料，No.163，95p.

田中則男・沢本正樹（1974）：砂浜港湾周辺における海浜変形－航空写真による現状把握と海浜変形形態類型化の試み－，港湾技研資料，No.180，121p.

土木学会（1999）：水理公式集 平成 11 年版，土木学会，716p.

永井紀彦・佐藤和敏・菅原一晃・川口浩二（2001）：全国港湾海洋波浪観測年報（NOWPHAS 1999），港湾技研資料，No.988，402p.

藤田光一（2000）：流砂系における土砂動態のとらえ方と広域土砂動態制御への展望，2000 年度（第 36 回）水工学に関する夏期研修会講義集，土木学会，pp.B-4-1 - B.4.15.

堀田新太郎（1985）：飛砂，本間仁監修／堀川清司編 海岸環境工学，東京大学出版会，pp.191-209.

三村信男・加藤 始・角田義紀・宮本英明・伊佐治進（1991）：大洗における港湾構造物の建設に対する海岸地形の応答，海岸工学論文集，第 38 巻，pp.401-405.

山下俊彦・新山雅紀・菅沼 剛・早川哲也（2000）：石狩川から供給された粒径別土砂の河口沿岸域での堆積特性と土砂収支の試み，海岸工学論文集，第 47 巻，pp.676-680.

Byrnes, M. P. and Hiland, M. W. (1995): Large-scale sediment transport patterns on the continental shelf and influence on shoreline response: St. Andrew Sound, Georgia to Nassau Sound, Florida, USA, *Marine Geology*, 126, pp.19-43.

Kana, T. W. (1995) : A mesoscale sediment budget for Long Island, New York, *Marine Geology*, 126, pp.87-110.

Komar, P. D. (1998) : Beach processes and sedimentation, Second edition, Prentice-Hall Inc., 544p.

- Rosati, J. D. and Kraus, N. C. (1999): Advances in coastal sediment budget methodology –with emphasis on Inlets, *Shore & Beach*, Vol.67, No.2 & 3, pp.56-65.
- Swart, D. H. (1974) : A schematization of onshore-offshore transport, *Proc. 14th International Conference on Coastal Eng.*, pp.884-900.