

港湾空港技術研究所 資料

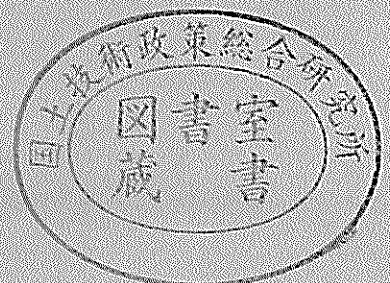
TECHNICAL NOTE
OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1078 June 2004

航空写真を用いた広域土砂収支図作成方法とその適用例

栗山 善昭

独立行政法人 港湾空港技術研究所
Independent Administrative Institution,
Port and Airport Research Institute, Japan



目 次

要 旨	3
1. はじめに	4
2. 広域土砂収支図の作成方法	4
2.1 概要	4
2.2 小領域における土量変化量の推定方法	5
2.3 岸側境界における土砂移動量の推定方法	6
2.4 沖側境界における土砂移動量の推定方法	7
3. 土砂収支図の作成例（遠州灘海岸）	8
4. 誤差の検討	8
5. おわりに	10
謝辞	11
参考文献	11

Sediment budget analysis with aerial photograph and its application

Yoshiaki KURIYAMA*

Synopsis

A sediment budget analysis with aerial photographs was developed. The longshore sediment transport rates at the side boundaries of compartments, into which a study area is divided, are estimated on the basis of a mass conservation equation, and the volume changes in the compartments are assumed to be proportional to the shoreline position changes obtained from aerial photographs. The amount of sand supply from a river is estimated on the basis of the relationship between the annual sediment yield and the catchment area of reservoirs. The developed method was applied to the sediment budget on the Enshu-nada Coast in Japan during a period from 1977 to 1997. The longshore sediment transport rates and the amount of sediment discharge from the Tenryu River estimated with the present method were compared with those estimated in a previous study mainly with topographic and bathymetric data at microscales, the volume of sand accumulated in a dam and the eroded and dredged sand volumes in the river. The comparison showed that most of the sediment budget quantities estimated with the present method almost agreed with those in the previous study, whereas there were some discrepancies between them.

Key Words: sediment budget, aerial photograph, longshore sediment transport, sediment discharge

* Head, Littoral Drift Division, Marine Environment and Engineering Department
Nagase 3-1-1, Yokosuka, Kanagawa 239-0826, Japan
Phone : +81-46-8445045 Fax : +81-46-841-9812 e-mail: kuriyama@pari.go.jp

航空写真を用いた広域土砂収支図作成方法とその適用例

栗山 善昭*

要 旨

入手が比較的容易である航空写真を用いた広域土砂収支図作成方法を開発した。本方法では、解析領域をいくつかの小領域に分割し、各小領域間の沿岸漂砂量を底質の連続式を基に推定する。小領域の土量変化量は、それが航空写真から読み取った汀線変化量に比例すると仮定して推定し、河川からの流出土砂量は、河川の流域面積と年平均比流出土砂量との関係を用いて推定する。続いて、本方法を静岡県御前崎から愛知県伊良湖岬までの遠州灘海岸における1977年～1997年の土砂移動量推定に適用するとともに、推定された土砂移動量に含まれる誤差を検討した。その結果、本方法は遠州灘海岸における土砂移動量をある程度精度良く推定することができたけれども、場所によっては土砂移動量に含まれる誤差が比較的大きなものとなった。本方法によって推定された沿岸漂砂量の精度を向上させる方法としては、狭量域の深淺データによって求められた沿岸漂砂量を利用する方法が有効であった。

キーワード：土砂収支，航空写真，沿岸漂砂，河川からの流出土砂

* 海洋・水工部 漂砂研究室長
〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 (独) 港湾空港技術研究所 海洋・水工部 漂砂研究室
電話：046-844-5045 Fax：046-841-9812 e-mail: kuriyama@pari.go.jp

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 の沿岸区分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。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。さらに、Gelfenbaum ら (1999, 2000) は、アメリカ、Columbia 川河口からの流出土砂量を流量から推定するとともに、深淺データから河口周辺の土量変化を求め、Columbia 川河口周辺の土砂収支を検討している。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方法をまとめている。

以上の土砂収支図の作成においては深淺図、航空写真、河床変動量、河川流量などのデータが用いられているけれども、それらのデータの中には入手が困難なものも含まれている。今後、広域土砂収支図を海岸保全基本計画策定に役立てていくためには、土砂収支図作成に用いるデータは入手が比較的容易なものであることが望ましい。そこで、本論文では、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。さらに、広域土砂収支図の作成例として、本方法を遠州灘海岸の土砂収支図に適用した結果を示すとともに、その結果を基にした土砂収支図における誤差の検討結果を示す。

なお、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栗山 (2001)、Kuriyama (2003) に追加検討を加えたものである。

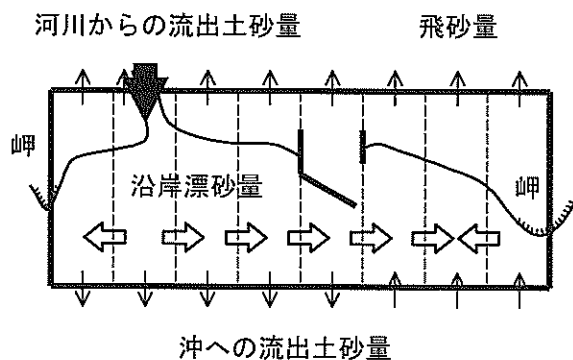


図-1 土砂収支図のイメージ図

2. 広域土砂収支図の作成方法

2.1 概要

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。

各小領域における土砂移動量は以下に示す連続の式を基にする。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、沿岸方向には岸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

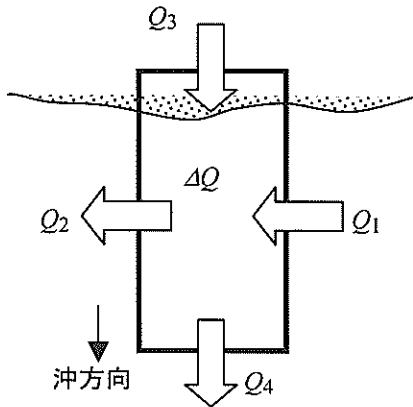


図-2 小領域における土砂移動

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。

2.2 小領域における土量変化量の推定方法

(1) 深淺図による推定方法

深淺図は必ずしも入手が容易なデータではないけれども、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淺図を基にする方法なので、深淺図を用いて地形変化量を求める際の注意を本項で示す。

2枚の深淺図があれば、その差を取ることによって2枚の深淺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淺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。そのためは、2枚の深淺測量図だけでは不十分で、複数枚の深淺図を用いて、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

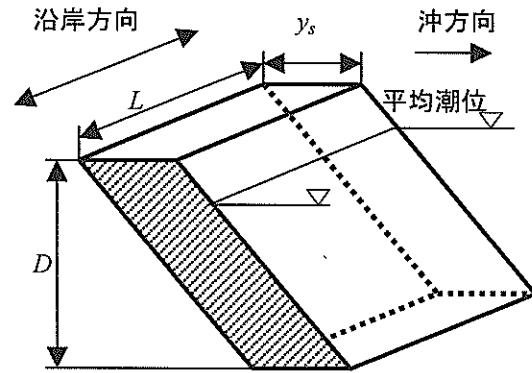


図-3 汀線変化量と土量変化量との関係に関する仮定

深淺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、深淺図より求ま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、深淺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淺図等の地形データを基にした汀線の変動量 Δy_s と地形変動量 ΔA との関係 $\Delta y_s = D \Delta A$ 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。

2.3 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冲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 ($m^3/km^2/year$) 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、ダムの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。

ダ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 よりダムがない場合の流出土砂量 Q_{r1} ($= q_s \cdot A_1$) を求める。
- ダムの流域面積 A_2 よりダムより上流の流出土砂量 Q_{r2} ($= q_s \cdot A_2$) を求める。
- ダムより上流で生産された土砂は全てダ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。

- | | | |
|-------------|--------|--------|
| ○ 石狩川, 十勝川 | ● 木曾川 | ◇ 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 | |

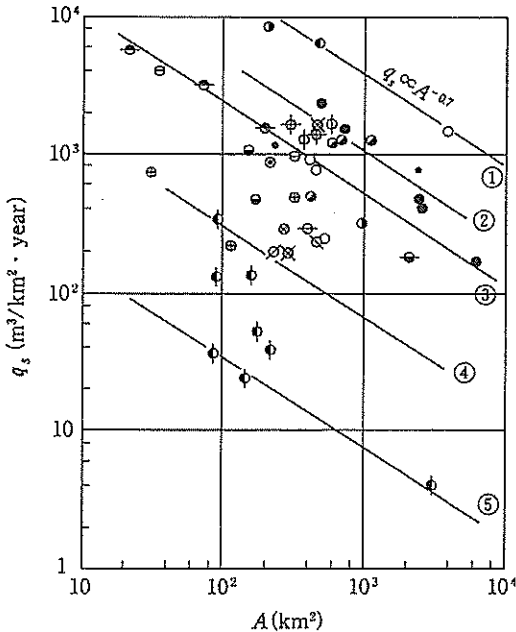


図-4 流域面積と年平均比流出土砂量との関係
(土木学会, 1999)

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

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, 主要なダムは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。

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

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

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 は空気の密度, 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。

2.4 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。

2.5 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)既往の研究成果を利用する方法, (b)波浪データを基にする方法, がある。

波浪データを用いる場合には, 以下の式を基に沿岸漂砂量 Q_l を推定する。

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

ここで, ρ_w は海水の密度, g は重力加速度, λ_v は空隙率(=0.4)であり, E は波のエネルギー, C_g は群速度を, α は波向きを示しており, 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わけではない。

なお, 波浪データの入手が可能な場合には, 側方境界の沿岸漂砂量のみならず, 各小領域間における沿岸漂砂量の推定も可能である。その様にして求めた各小領域間における沿岸漂砂量は, 本論文で紹介した土砂収支図作成方法によって求めた沿岸漂砂量の検証データとなる。

3. 土砂収支図の作成例 (遠州灘海岸)

本論文で示した広域土砂収支図作成方法を静岡県御前崎港から愛知県伊良湖岬までの遠州灘海岸における 1977 年～1997 年の土砂移動量推定に適用した。図-5 は, 解析領域を示したもので, 岬や海岸構造物の位置に応じて解析領域を W1～W6 の小領域に分割した。

主な海岸構造物としては, 御前崎港, 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。

主な流入河川である天竜川の流域面積は $5,090\text{km}^2$ であり, その下流では流域面積 $4,490\text{km}^2$ の秋葉ダムの建設が 1958 年に完了している。

航空写真を基に推定された 1977 年～1997 年の平均汀線変動速度を図-6 に示す。推定に用いた航空写真は 1977 年, 1986 年, 1991 年, 1997 年に撮影されたものであり, 汀線変化速度は最小二乗法を用いて求めた。汀線位置の読み取り間隔は 20m である。福田漁港 (小領域 W3 と W4 との境界) 西側における汀線の前進は, ここでは東向き沿岸漂砂が卓越していることを示している。

一方, 浜名湖今切口 (小領域 W4 と W5 との境界) および赤羽漁港 (小領域 W3 と W4 との境界) の東側における汀線の前進は, 西向き沿岸漂砂が卓越していることを示している。

この汀線変化速度を基に土砂移動量を推定した。解析領域の西側境界に位置する御前崎港の防波堤が水深 17m まで延伸されていることから, 西側境界における沿岸漂砂量を 0 とした。また, 沖への土砂流出量も 0 と仮定した。天竜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 $K_p=503,570$ を用い, ダムとしては秋葉ダムを考慮した。漂砂の移動高さは宇多 (1997) を参考に 9.7m とし, 飛砂量計算では福田漁港近傍の海岸近くで観測されたアメダスの風データを使用した。

図-7 (a) は, 以上の方法で求めた土砂移動量を示しており, (b) は宇多ら (1991) が深淺図, 航空写真, 河床低下量, 砂利採取量などを基に求めた土砂移動量を示している。両者を比較すると, 天竜川からの流出土砂量は, 本方法による値は宇多ら (1991) の値の 2 倍程度となっている。天竜川より西側においては, 本方法で求めた浜名湖今切口 (W4 と W5 との境界) での沿岸漂砂量は宇多ら (1991) の値とほぼ等しい値となっている。しかしながら, 赤羽漁港 (W5 と W6 との境界) では, 本方法による沿岸漂砂が東向きであるのに対して宇多ら (1991) の値は西向きとなっている。前述したように, 汀線変化速度結果 (図-6) から判断するところでは西向き漂砂が卓越すると考えられることから, 本方法による沿岸漂砂量の推定に誤差が含まれたと考えられる。

天竜川よりも東側の福田漁港 (W3 と W4 との境界) では, 両者の絶対値は異なるものの, 方向は共に東向きとなっている。また, 御前崎 (W1 と W2 との境界) では, 両者とも非常によく一致している。

4. 誤差の検討

(1) 河川からの流出土砂量に含まれる誤差

河川からの推定流出土砂量には, 河川から流出する土砂の海岸形成に対する寄与率の誤差の影響が含まれる。本論文では, 河川から流出する土砂の海岸形成に対する寄与率を藤田 (2000) を基に 0.4 と仮定したけれども, 清水 (2001) は石狩川における粒径別の土砂移動量を計算し, その寄与率が 0.2 程度であることを示した。河川からの流出土砂量の推定精度を向上させるためには, 数値シミュレーション結果や現地観測結果などを基に各河川毎に寄与率を決定する必要がある。

(2) 飛砂量に含まれる誤差

遠州灘の土砂収支を求める際に使用した福田における風データは海岸近傍で取得されたものなので風の補正は行っていない。しかしながら, 栗山 (2001) で指摘されているように, 飛砂量は風速の 3 乗に比例するため, 内陸部で測定された風を用いて飛砂量を計算すると飛砂量を 2 オーダー近く過小評価する可能性がある。したがって, 内陸部の風を用いる場合には風の補正が必要である。

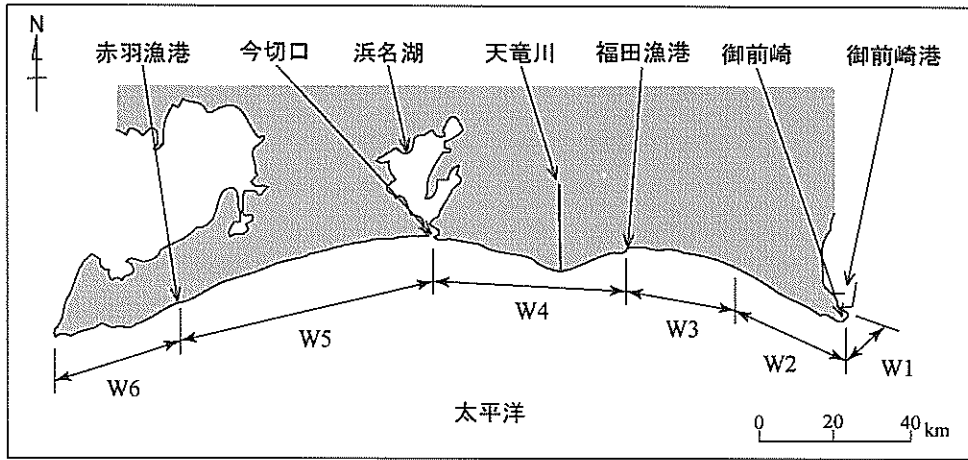


図-5 解析対象領域と各小領域の位置

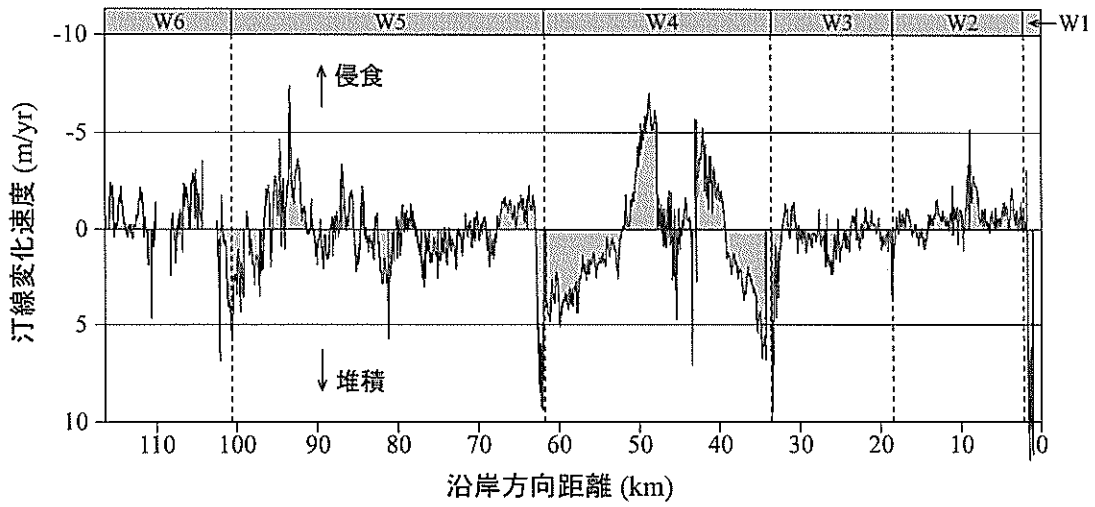


図-6 航空写真より求められた1977年～1997年の平均汀線変化速度

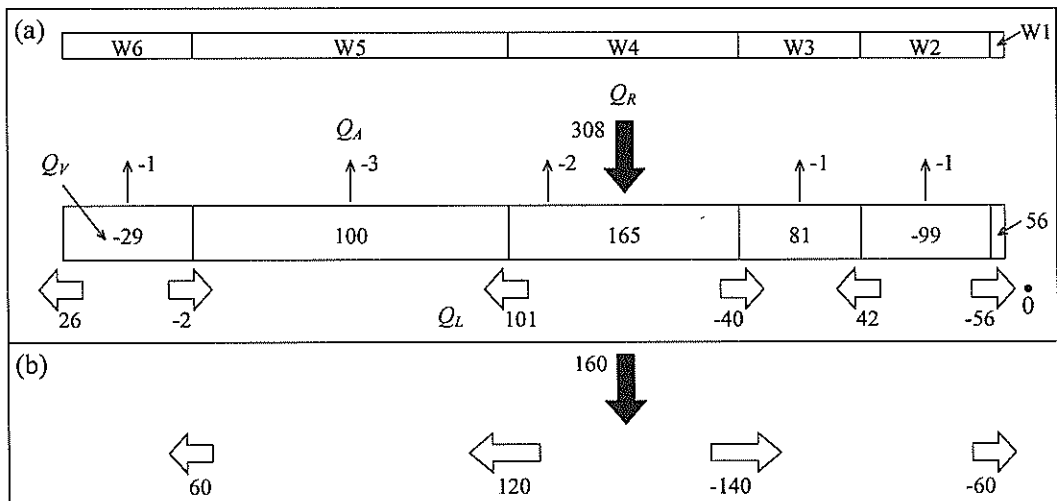


図-7 土砂移動量 ($\times 10^3 \text{ m}^3/\text{yr}$)。 Q_R は河川からの流出土砂量、 Q_A は飛砂量、 Q_V は各小領域の土量変化量、 Q_L は沿岸漂砂量（西向きを正とする）を表している。パネル(a)は本方法による値、(b)は宇多ら(1991)による値を表している。

(3) 土量変化量に含まれる誤差

土量変化量に含まれる誤差には漂砂移動高さ推定の誤差によるものと汀線位置推定の誤差によるものがある。後者には、遡上波によって生ずる汀線位置の読み取り誤差や不正確な前浜勾配を用いて平均潮位時の汀線位置に変換することによって生ずる誤差が含まれる。また、汀線変動の短期的変動も土量変化量の推定誤差の原因となる。

汀線位置推定の誤差が土量変化量の推定に与える影響を検討するために、前述の遠州灘海岸における検討結果を基に航空写真の誤差を考慮して汀線変化速度のばらつきを求めた。具体的には、解析領域全域平均の20年間の平均汀線位置変化速度が0.26m/yrであることから、航空写真が撮影された1977年、1986年、1991年、1997年における解析領域全域平均の汀線位置を0m、2.34m、3.64m、5.2mと仮定するとともに、田中・沢本(1974)を参考に、汀線位置は平均値の周りを-5m~5mの範囲でランダムに分布すると仮定した。続いて、これらの仮定の下でモンテカルロ法によって汀線位置を求め、最小二乗法を用いて20年間平均の汀線変化速度を求めた。

以上の計算を1000回の行ったところ、汀線変化速度の標準偏差は0.2mとなった。この値を解析領域全域(沿岸長116.8km、漂砂帯の高さ9.7m)の土量変化量に変換すると22.7万m³となり、解析領域内の沿岸漂砂量とほぼ同程度の値となる。

遠州灘海岸の土砂収支図作成においては、東側の境界から西に向かって順に沿岸漂砂量を求めており、この方法では西に行くほど誤差がたまりやすくなっている。赤羽漁港(W5とW6との境界)において本方法によって求めた沿岸漂砂量の方向が航空写真から示唆される沿岸漂砂の方向や宇多ら(1991)の沿岸漂砂の方向と異なったのは、これが原因であると考えられる。

この誤差の影響を小さくする一つの方法として、狭量域の深淺データから求められた沿岸漂砂量を利用して本方法によって推定された沿岸漂砂量を補正する方法がある。例えば、赤羽漁港における宇多ら(1991)の沿岸漂砂量(60,000m³/yr)を用いて、この値と本方法で求めた沿岸

漂砂量(-2,000m³/yr)との差(62,000m³/yr)を各小領域の沿岸長に比例して各小領域の変化土量から減ずる方法がある。そのようにして補正された各小領域間の沿岸漂砂量は表-1に示すとおりである。補正された沿岸漂砂量は宇多ら(1991)の沿岸漂砂量に近い値となっており、本補正が土砂移動量の推定精度の向上に役立つことがうかがえる。

(4) 沖側境界における土砂移動量に含まれる誤差

現時点では、沖に流出する土砂量の実態は不明であり、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。よって、本方法によって推定された沖側境界における土砂移動量に含まれる誤差の大きさは不明である。ただし、土砂収支図作成の主たる目的は沿岸漂砂量の把握にあり、沖側境界での土砂移動量に含まれる誤差は結局、沿岸漂砂量に反映されることになるので、沖側境界における土砂移動量を推定する方法が確立されるまでは(3)で述べた方法などによって沿岸漂砂量の精度向上を図ることが望ましい。

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考えられる航空写真を用いた広域土砂収支図の作成方法を述べるとともに、それを遠州灘海岸の土砂収支に適用した結果を示した。本論文で述べた土砂収支図作成方法により遠州灘海岸における土砂移動量のある程度の精度で量的に把握することができたけれども、場所によっては土砂移動量に含まれる誤差が比較的大きなものとなった。

本方法によって得られた土砂収支図を実務で利用していくためには、狭量域の深淺データから求められた沿岸漂砂量を利用して推定沿岸漂砂量を補正するなど誤差を小さくすることに努めることが望まれる。また、ある領域における土砂収支を判断する場合には、本方法によって求められた土砂移動量に波浪データを基に推定された沿岸漂砂量や既往の調査結果を加えて総合的に検討することが望ましい。

(2004年2月6日受付)

表-1 補正された沿岸漂砂量

	W6	W5-W6	W4-W5	W3-W4	W2-W3	W1-W2
沿岸漂砂量 (x10 ³ m ³ /yr)	95	57	136	-20	53	-55

謝辞

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したものである。ワーキンググループ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 理事）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）、日本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。また、函面作成等でお世話になった橋本孝治氏（漂砂研究室 研修生、(株)アルファ水工コンサルタンツ）にも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（2001）：広域土砂収支図作成の試み，2001年度（第37回）水工学に関する夏期研修会講義集，Bコース，pp.B-5-1-B-5-13.
- 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.
- 清水康行（2001）：沖積河川の土砂移動と変動，2001年度（第37回）水工学に関する夏期研修会講義集，Aコース，pp.A-7-1-A-7-18.
- 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.
- 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.
- Kuriyama, Y. (2003): Sediment budget analysis with aerial photographs, *Proc. Coastal Dynamics '03*, CD-ROM Published by World Scientific Publishing Corp. and East Meets West Productions.
- 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.
- Gelfenbaum, G., Sherwood, C. R., Peterson, C. D., Kaminsky, G. M., Buijsman, M., Twichell, D. C., Ruggiero, P., Gibbs, A. E. and Reed, C. (1999): The Columbia River cell: a sediment budget overview, *Proc. Coastal Sediments '99*, ASCE, pp.1660-1675.
- Gelfenbaum, G., Buijsman, M. C., Sherwood, C. R., Moritz, H. R. and Gibbs, A. E. (2001): Coastal evolution and sediment budget at the mouth of the Columbia River, USA, *Proc. Coastal Dynamics '01*, ASCE, pp.818-827.

港湾空港技術研究所資料 No.1078

2004.6

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所

横須賀市長瀬3丁目1番1号

TEL.046(844)5040 URL.<http://www.pari.go.jp/>

印刷所 株式会社 シ ー ケ ン

Copyright © (2004) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI.

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。