

# 天竜川河口テラス地形と沿岸域への土砂供給過程の長期変化

## Long Term Change of Terrace Morphology and Longshore Sediment Transport around the Tenryu River Mouth

和田麻美<sup>1</sup>・田島芳満<sup>2</sup>・佐藤慎司<sup>3</sup>

Asami WADA, Yoshimitsu TAJIMA and Shinji SATO

This study investigates long-term change of terrace morphology and longshore sediment transport around the Tenryu River mouth based on bathymetry data of past 50 years. Based on the sediment budget around the terrace and the assumption of little sediment supply from the river in recent years, CERC formula was calibrated to estimate the longshore sediment transport rates at both east and west boundaries of the focusing area. Obtained boundary conditions then yielded distribution of the longshore sediment transport around the terrace and estimations of sediment supply from the river. These results and additional numerical analysis clearly showed increasing impacts of the detached breakwaters and indicated that the terrace morphology in 1984 may be required for dynamic equilibrium of the sediment budget around the river mouth.

### 1. はじめに

ダム建設や河床材料の採取に伴い、天竜川では下流、河口、周辺沿岸域での侵食問題が半世紀にわたって慢性化している（例えば宇多ら，1991）。天竜川河口域での地形変化や侵食問題に対する最近の研究としては、2007年台風4号および9号来襲時における河口周辺域の大変形を対象に、定点観測画像やイベント前後の地形測量結果の分析、河口域における波・流れ干渉場の数値解析などを通じて、外力場と地形変化の相互関係を検討したものの（田島ら，2008a, 2008b）や、河口右岸側の浜松海岸における侵食実態を実測データに基づき分析し、その現象把握を試みたもの（佐藤，2008）、さらには、等深線変化モデルに基づき長期的な河口テラスの発達・消失過程の検証および将来予測を試みたもの（宇多ら，2009）が挙げられる。

この中で田島ら（2008a）は2007年台風4号が8,000m<sup>3</sup>/sを超える大出水を伴ったものの、土砂排出量は比較的小さかったこと、また土砂の排出方向は河口東側に限定されていたことなどを指摘している。また宇多ら（2009）は、河口兩岸に設置された侵食対策構造物による影響を考慮した数値計算を実施することによって、兩岸で非対称に侵食・後退する汀線変化の再現を試みている。このように、天竜川河口部の地形は東西方向に非対称に変形し、それに伴い東西への土砂供給量にも偏りが生じてきているようであるが、その実態の定量的な把握には至っていない。

そこで本研究では、過去約50年間の深淺測量データおよび波浪、河川流量の実測データの分析に基づき、天竜川河口域における東西に非対称な侵食、堆積の実態を定量化し、さらに数値モデルによる分析を併用することにより河口テラス及び沿岸域への土砂供給過程の長期的な特性を把握し、周辺海岸における効果的な土砂管理に本質的な知見を得ることを目的とする。

### 2. 河口周辺地形の分析

#### (1) 河口テラス形状の変化

浜松海岸と竜洋海岸において1962年以降国土交通省及び静岡県によって最小200m間隔で取得された深淺測量データを、東西南北に10m間隔の正方形格子データに再構成し、河口テラス周辺の等深線の経年変化を比較した。図-1に特徴的な変化が見られた1984年、1994年、2005年の等深線（ $h=5,10\text{m}$ ）を比較する。図に示すように、1984年頃までは、河口テラスが沖向きに突き出していたものが、1990年から1994年にかけてその西側が大きく削られて先端が東に移動し、その後は等深線が後退し岸向きに潰れるように縮小し、浅瀬の面積が小さくなっているこ

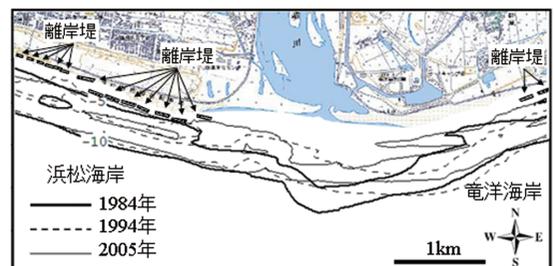


図-1 河口周辺の等深線（ $h=5,10\text{m}$ ）形状の変化（以下、陸上部は国土地理院発行地図を引用）

1 正会員 修(工) 株式会社前田建設工業  
2 正会員 Ph.D. 東京大学准教授 大学院工学系研究科社会基盤学専攻  
3 フェロー 工博 東京大学教授 同上

とが分かる。

(2) 侵食・堆積量の定量化

上述した河口テラス周辺域の水深格子データを用いて、様々な領域における侵食・堆積量を算定し、その特性を分析した。その結果、テラス形状の変形に呼応した土砂量の変化が顕著に見られた領域区分として、図-2に示した河口部および浜松海岸（西側）・竜洋海岸（東側）の3領域を比較対象とし、それぞれの領域における侵食堆積量の経時変化を算定して図-3に整理した。なお、土砂量算出時の沖側境界水深は、全データにおける領域別・水深別水深変化量の標準偏差が20cm以下となる水深として決定した。このようにして決定した領域は図-2に示したように岸沖1kmの範囲であり、沖側境界の水深は、浜松、竜洋海岸では10m~12m付近、河口部では15m程度であった。

また天竜川における土砂輸送は出水時に集中するため、河口域への供給土砂量は年変動が大きい、河口テラスの発達・消失過程と沿岸方向への供給土砂収支を把握するためには、このような供給土砂量を年変動まで含めて把握することが重要である。しかしながら、侵食に伴う河道の固定化や砂州の樹林化など、河川流量から実際の土砂排出量を推定するのは困難である。そこで本研究では、出水を含む河川流による年間土砂排出量と高い相関があると考えられるウォッシュロードの推定値を、河口部の土砂変化量と比較することとした。ウォッシュロード $Q_s$ の算定には次式（土木学会編, 1985）を用い、

$$Q_s = \alpha Q^2 \dots\dots\dots (1)$$

係数 $\alpha$ には $4 \times 10^{-8} (s/m^3)$ 、河川流量 $Q$ には河口から約



図-2 土砂収支の算定領域

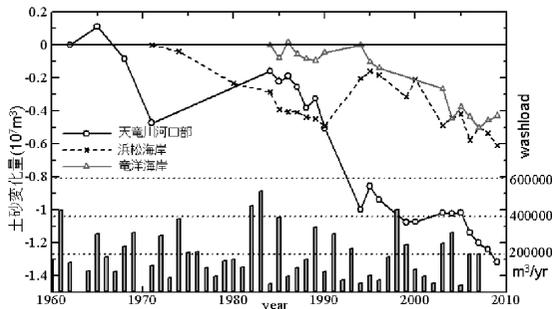


図-3 浜松海岸、河口部、竜洋海岸における土砂変化量と河川流量から推定したウォッシュロード推定値の経年変化

25km上流に位置する鹿島観測所で観測された時刻流量データを用いた。ここで得られた毎時のウォッシュロードを時間積分して年間のウォッシュロードを算定し、その値を図-3に棒グラフで示した。

図に見られるように、1980年代には1982年、1983年におけるそれぞれ戦後2位、3位の出水、1985年にも $8000m^3/s$ ほどの大規模出水があり、河川から大量の土砂が供給されたことにより、河口部と竜洋海岸の堆積量に増加傾向が見られた。1980年代は全ての領域で土砂変化量が小さく、河口からの豊富な土砂供給により天竜川河口域周辺ではほぼ動的平衡状態を保っていたと言える。一方、1991年には戦後4位となる大規模な出水が発生しているが、1990年から1994年にかけて河口部では土砂量が約 $500万m^3$ 減少し、浜松海岸および竜洋海岸でそれぞれ $300万m^3$ 、 $50万m^3$ の増加が見られる。これは、この期間に卓越的な高波浪が沿岸漂砂移動を引き起こしたこと、後述するように出水時においても上流域からの土砂供給量が減少したことなどを示唆している。吉井・佐藤(2010)によれば、1980年代以後に河道の樹林化やそれに伴う滲筋の固定化が進行しており、ここで見られる1990年代以降における土砂供給量の減少は、1950年代のダム建設が下流河道域環境を徐々に変化させ、その影響が時間差をもって出現したことによるものであると推察されるが、本研究ではその実証には至っておらず今後の課題としたい。1990年代後半以降は、出水に応じて小刻みに土砂量の増加が見られる。2007年には台風4号が来襲し、約 $8000m^3/s$ の出水が発生したが、この際には竜洋海岸では土砂量が増加している一方、浜松海岸では土砂量が減少していることが分かる。発達した形状が安定していた1980年代以降から河口テラスが縮小し続けている現在に至るまで、約 $1000万m^3$ の土砂が河口テラスから流失してしまったと言える。

以上より、浜松海岸では1990年から1994年の急激な堆積期間を除いて常時侵食傾向、河口部でもウォッシュロードと呼応して堆積することもあるが、基本的に侵食傾向、一方、竜洋海岸では1994年頃から侵食傾向が顕在化し、その時期が河口テラスの先端位置の東進、後退と一致していることが分かった。深浅測量データの分析に基づく以上の知見は、後に示す河川供給土砂量の減少に伴い東西方向への沿岸漂砂供給量が非対称に変化してきたことを示唆している。

3. 沿岸漂砂量分布の推定

土砂変化量を遡上帯から移動限界水深まで岸沖方向に積分し、さらにその値を沿岸方向に積分すれば、積分領域における沿岸方向への土砂収支が算定できる。例えば、積分領域の左端を大型沿岸構造物などの沿岸漂砂量がゼ

口となる地点にとれば、任意の地点まで積分した土砂収支は、積分領域右端における沿岸漂砂量と一致する。

しかしながら天竜川河口域では、沿岸漂砂移動に加えて河口からの土砂供給量が甚大であり、また沿岸漂砂量が既知である地点が対象領域の近傍に存在しないため、この算定手法をそのまま適用することができない。そこで本研究では、実際の深浅測量データに基づく土砂収支とCERC公式とを組み合わせることで、沿岸漂砂量分布および天竜川河口からの土砂供給量の推定を試みる。

(1) 土砂変化量に基づく河口域の土砂収支

仮に西側境界の沿岸漂砂量をゼロとし、積分範囲を東側に広げながら全地点における相対的な沿岸漂砂量を算定した(図-4)。漂砂量の算定対象期間は、地形変化の傾向が似ている1984~1987年、1987~1990年、1994~2000年、2000~2005年、2005~2009年とした。ここで得られた東側境界での東向きの相対沿岸漂砂量は、該当領域における正味の土砂収支(河口からの供給土砂量と総流失土砂量の和)を表している。それぞれの期間を比較すると、正味の土砂流失量が増大傾向にあることが分かる。慢性的なテラス地形の侵食に伴い等深線の傾きが年々緩やかになり、河口両岸への沿岸漂砂量が減少傾向にあることも勘案すると、河口からの土砂供給量がそれよりも大きな割合で減少していることが予想される。

(2) CERC公式に基づく沿岸漂砂量の推定

宇多ら(2009)と同様に、天竜川からの近年の土砂供給量をゼロと仮定すれば、図-1に示した2005~2009年における正味の土砂流失量80万m<sup>3</sup>/yearは、図-2に示した土砂収支算定領域の東西両端における沿岸漂砂量の収支と等価であると考えられる。この仮説に基づき、ここでは次式で定義されるCERC公式(Komar・Inman, 1970)における無次元定数Kのキャリブレーションを行い、得られたKに基づき他の期間における沿岸漂砂量の推定を試みる。

$$Q = \frac{K(E \cdot C_g)_b}{(\rho_s - \rho)g(1 - \lambda)} \sin \alpha_b \cdot \cos \alpha_b \dots\dots\dots (2)$$

ここで、Qは全沿岸漂砂量、ρ<sub>s</sub>、ρは砂及び海水の密度、λは空隙率、Eは波のエネルギー、C<sub>g</sub>は群速度、α<sub>b</sub>は汀

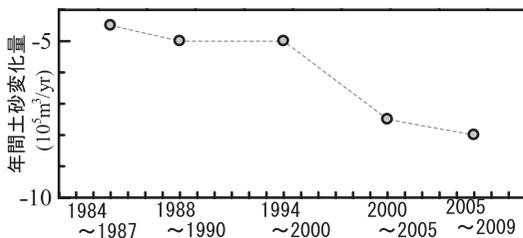


図-4 対象全領域における年間土砂変化量の経年変化

線に対する碎波角、添え字bは碎波点での値を意味する。

東西境界における沿岸漂砂量の計算では、河口沖の水深40m地点に位置する竜洋波浪観測所で得られた1999年から2009年までの時々刻々の波浪データを代表する入射波条件として、波向(真南を境界に2分割)、波高(4段階)別に分割した8つの区域におけるエネルギー平均値を用いて決定した表-1に示した諸量を用いた。ここでCERC公式を用いた一般的な汀線変化モデルでは、代表波浪条件を決める際に、波高段階を分類せず代表的なエネルギー平均波高を与えることが多い。しかしながら、本研究では、後述する局所漂砂量モデルで平面的な漂砂量分布を算定し、テラス地形や沿岸域構造物による沿岸漂砂量への影響を検証するため、出現頻度別に変化する波高の影響を考慮することが重要となる。そのためここでは、局所漂砂量モデルとCERC公式による検証結果に整合性を保つため、同じ波浪条件を用いることとした。

碎波変形計算には田島・Madsen(2004)の碎波モデルを用い、α<sub>b</sub>の算出に必要な汀線角度は実測データを用いるが、長期的なトレンドを評価するため、図-5に示した近似曲線で汀線角度の経年変化を推定した。以上の入射波条件および汀線角度に基づき式(2)における無次元定数Kのキャリブレーションを行った結果、2005~2009年

表-1 代表波浪緒元

E系	H(m)	T(s)	θ(rad)	days	case
3.5≤H	4.2	10	0.093	1	E1
2.5≤H<3.5	2.3	8	0.117	2.3	E2
1.5≤H<2.5	1.7	8.3	0.151	14.3	E3
0.5≤H<1.5	0.8	6.8	0.171	147.4	E4
W系	H(m)	T(s)	θ(rad)	days	case
3.5≤H	4.7	11	-0.13	2.3	W1
2.5≤H<3.5	2.8	9.3	-0.136	5.3	W2
1.5≤H<2.5	1.8	7.8	-0.166	27.7	W3
0.5≤H<1.5	0.9	6.2	-0.164	152.7	W4

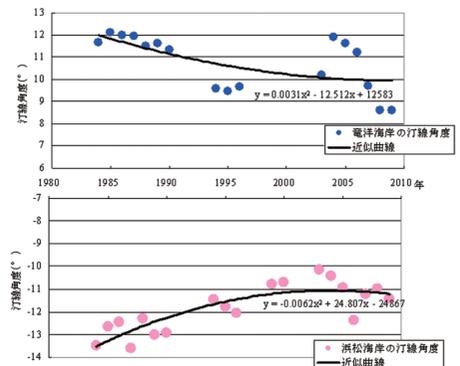


図-5 地点AおよびB(図-2)における汀線角度の経年変化

におけるAおよびB点での沿岸漂砂量の総和を $80 \text{万 m}^3/\text{年}$ とする係数 $K$ は $K=0.29$ となり, Valleら (1993) による現地データに基づく推定結果 ( $K=0.2\sim 1.0$ ) と整合した。

### (3) 沿岸漂砂量分布の推定

得られた $K$ の値および図-5に整理した汀線角度を用いて, 他の期間についても沿岸漂砂量分布を算出し, 得られた東西端における沿岸漂砂量と各地点における土砂収支に基づき, 沿岸漂砂量分布 (東向きを正) を推定した (図-6)。その結果, 西端での漂砂量は5つの時期で変動は小さく $29 \text{万}\sim 35 \text{万 m}^3/\text{年}$ となったのに対し, 東端での漂砂量は, 1984年から1990年では $50 \text{万 m}^3/\text{年}$ 程度であった漂砂量が, それ以降は汀線角度の変化に伴い年々減少していることが分かった。

図-6においては, 波浪データから定めた東西境界での沿岸漂砂量を境界条件として用い, それぞれ土砂変化量を河口に向かって積分しながら沿岸漂砂量を算出したものである。図の沿岸方向 $1 \text{km}$ の河口開口部で沿岸漂砂量が不連続に変化している点は, 西側及び東側から別々に積分して求めた沿岸漂砂量の境界であり, この差が, 河川からの供給土砂量の推定値に相当する。この値に着目すると, 1984年から1987年では河口部で約 $40 \text{万 m}^3/\text{年}$ , 1987年から1990年では約 $35 \text{万 m}^3/\text{年}$ , 1994年から2000年では約 $20 \text{万 m}^3/\text{年}$ と, 年々減少していることが分かる。ただしこの推定値は2005年から2009年までの河口への土砂供給量をゼロとして仮定した場合の推定値であり, 過小評価されている可能性がある。また, 2000年から2005年では2005年から2009年と同様に漂砂量は連続的であり, 河川からの土砂供給はほとんどないことが推測される。漂砂量分布を見ると, 変動はあるものの西向きの漂砂量はどの期間も左肩下りの侵食傾向であり, また1987年以降は離岸堤群による漂砂の低減が見られる。そして東向きの漂砂量は1984年から1990年までは東向きにほぼ一定値を取っていた分布が, それ以降は右肩下りの侵食傾向に転じていることも分かった。

## 4. テラス周辺環境と漂砂量分布

東西に非対称な沿岸漂砂量分布と, 漂砂制御構造物を含む複雑なテラス周辺地形との関係を更に詳細に分析するため, 数値モデルに基づき局所漂砂量分布の空間分布を推定した。テラス形状の変化を比較するため, 地形条件としては1984年および2009年の地形を用い, 入射波条件には前述した表-1に整理した波浪諸元を用いた。

波浪場, 海浜流場, および局所漂砂量の算定には, 清水ら (1996) の手法を用いた。またここでは, 来襲波浪条件やテラス地形条件の違いによる局所漂砂量分布の変化に着目し, 河川流や潮流流による影響については無視した。

図-7および図-8に, 表-1における東寄り高波浪 (E1)

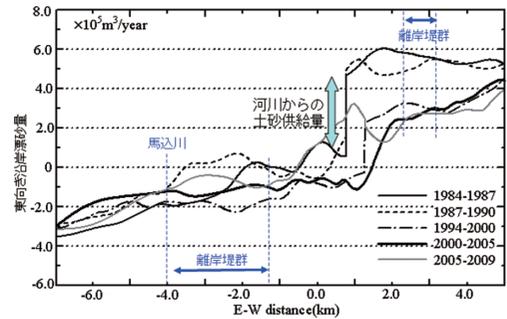


図-6 深浅測量データおよびCERC公式に基づく沿岸漂砂量分布の推定値

および東寄り中波浪 (E3) を入射させた場合における局所漂砂量の空間分布を示す。図中のベクトルはモデルにより算定した局所漂砂量フラックスのベクトルを示し, 背後の等値線および濃淡は局所漂砂量の絶対値の大きさを示している。漂砂量の絶対値は, それぞれ出現日数を乗じた年間の値で表している。図に見られるように, 局所漂砂量の絶対値は, 中程度の波浪を入射させたE3のケースの方が, 高波浪を入射させたE1のケースよりも大きく, テラス周辺における年間の漂砂移動には, 出現日数の多い有義波高 $1\sim 2 \text{m}$ の波浪の方が卓越的に寄与していることが分かる。また, 高波浪のケース (E1) では, テラス周辺での局所漂砂量が広範囲で均一に広がっているのに対し, 中波浪のケース (E3) では, 漂砂量の沿岸方向分布に偏りが見られ, 特に離岸堤群の前面では局所漂砂量が相対的に小さくなっていることが分かる。

次にテラス地形の変化に伴う局所漂砂量分布への影響を考察する。1984年のテラス地形に対する局所漂砂量の計算結果 (図-7) と比較して, 2009年のテラス地形に対するそれ (図-8) では, 高波浪時における漂砂量の大きさが広範囲で小さくなっている。また2009年のテラス地形条件では, 高波浪条件においても, 西側離岸堤前面での漂砂量の低減が認められる。さらに, 中波浪時の計算結果を比較すると, 2009年のテラス地形条件では, 東西両岸の離岸堤群前面における漂砂量の低減が更に進行していることがわかる。以上より, テラス形状や離岸堤による影響は, 特に有義波高 $1\sim 2 \text{m}$ 程度の中程度の波浪条件下で顕著に表れるものの, 最近のテラス形状では, 高波浪時においても離岸堤群による沿岸漂砂遮断への影響が見られるようになってきていることが分かった。

最後にそれぞれの年において, 計算した沿岸方向の局所漂砂量フラックスに出現日数を乗じ, 年間の沿岸漂砂量分布を算出した (図-9)。テラスの縮小に伴う離岸堤前面での沿岸漂砂量の遮断が, 西側では1988年の地形条件から, 東側では2005年の地形条件から顕著に表れる様子が分かる。以上の比較から, 現在の護岸や離岸堤群の配

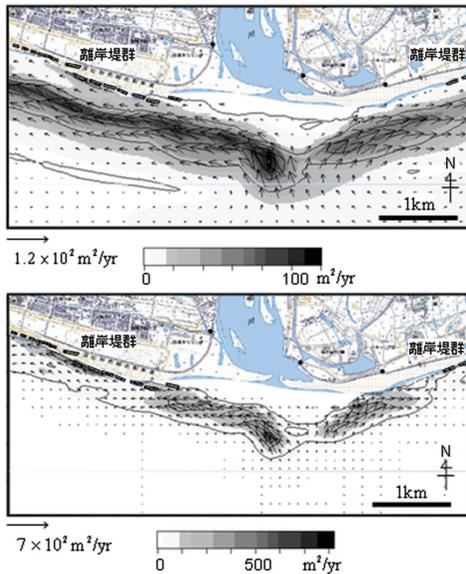


図-7 1984年のテラス地形に対する局所漂砂量分布の算定結果 (上：高波浪時 (E1), 下：中波浪時 (E3))

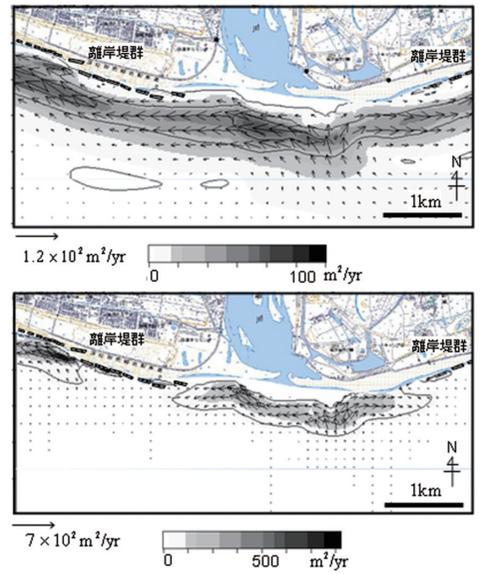


図-8 2009年のテラス地形に対する局所漂砂量分布の算定結果 (上：高波浪時 (E1), 下：中波浪時 (E3))

置条件において、東西両岸への土砂供給過程を健全な動的平衡状態に保つためには、1984年時のテラス形状が必要であることが示唆される。

### 5. おわりに

実測データ及び数値解析に基づき、天竜川における河口テラス地形と沿岸域への土砂供給過程の長期的な特性を分析した。その結果、天竜川河口域における侵食・堆積の実態を定量化した上でCERC公式の比例定数 $K$ を推定し、沿岸漂砂量分布を推定することができた。またこれにより、分析対象期間において河口からの土砂供給量が約40万 $m^3$ /年減少していることが分かった。そして河口テラス形状が変化したことにより、特に西側海浜への土砂供給量が顕著に減少しており、現在の護岸や離岸堤群の配置条件下において土砂供給の動的平衡状態を保つためには、1984年時のテラス地形及び河口からの土砂供給が必要であることが分かった。

本研究は、科学技術振興調整費重要課題解決型研究「先端技術を用いた動的土砂管理と沿岸防災」の研究成果の一部であり、国土交通省浜松河川国道事務所、静岡県より貴重なデータをご提供いただいた。ここに記して深甚なる謝意を表する。

### 参考文献

宇多高明・坂野 章・山本幸二 (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，pp. 23-70.  
 宇多高明・古池 鋼・宮原志帆・芹沢真澄・三波俊郎・石川仁憲 (2009)：ダム再編事業に伴う天竜川河口デルタの長期

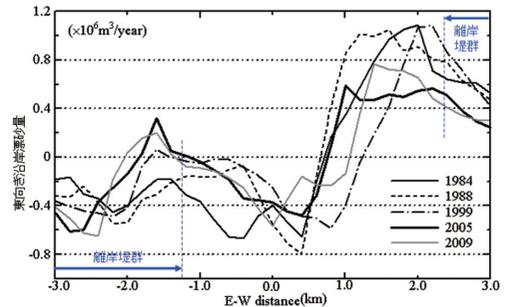


図-9 数値モデルによる年間沿岸漂砂量分布の算定値

変化予測，土木学会論文集B2，Vol.65，No.1，pp.651-655.  
 佐藤慎司 (2008)：遠州灘浜松海岸の土砂移動実態，土木学会論文集B，Vol.64，No.3，pp.192-201.  
 清水琢三・山田晶子・渡辺 晃 (1996)：沿岸漂砂量の岸沖分布と漂砂量係数，海岸工学論文集，第43巻，pp.571-575.  
 田島芳満・高川智博・浅野泰志・佐藤慎司・武若 聡 (2008a)：特性の異なる二つの台風による天竜川河口砂州の大規模変形，海岸工学論文集，第55巻，pp.646-650.  
 田島芳満・劉 海江・佐々木勇弥・佐藤慎司 (2008b)：砂州の決壊を伴う大出水時における波・流れ干渉場の変動特性とその再現モデル，海岸工学論文集，第55巻，pp.6-10.  
 土木学会編 (1985)：水理公式集，230P.  
 吉井拓也・佐藤慎司 (2010)：天竜川・遠州灘流砂系における広域土砂動態の解明と将来予測，土木学会論文集B，vol.66，No.1，pp.1-18.  
 Komar,P.D. and D.L.Inman (1988)：Longshore sand transport on beaches, J. Geophys. Res., Vol.75, No.30, pp.5914-5927.  
 Tajima,Y. and O.S. Madsen (2002)：Shoaling, breaking, and broken wave characteristics, Proc.28th Int. Conf. on Coast. Eng., pp.222-234.  
 Valle,R.D., P.Medina and M.A.Losada (1993)：Dependence of coefficient K on grain size, J.Wtrway., Port, Coast. and Oc. Eng., Vol.119, No.5, pp.568-574.