

天竜川—遠州灘流砂系における土砂移動の変遷と土砂管理に関する検討

佐藤 慎司*・宇多 高明**・岡 安徹也***・芹沢 真澄****

河川と海岸を一体とした流砂系の総合的な土砂管理のための計画づくりには、考慮すべき現象が土砂の量だけでなく、質(粒径)にも強く依存するため、粒径を考慮した検討が不可欠となる。しかし、実務における総合的な土砂管理計画の立案では、土砂の量と質を考慮して流砂系全体の土砂移動を検討する定量的な手法が確立されていなかった。そこで本研究では、総合的な土砂管理計画策定に役立てるため、天竜川—遠州灘海岸流砂系を対象としたケーススタディーを実施し、土砂の量と質を分析して流砂系の変遷の把握と予測を定量的に行う手法を提案するとともに、具体的な土砂管理対策について論じる。

1. はじめに

全国的に顕在化している海岸侵食は、一般にダム・河川横断工作物の建設や砂利採取による河川からの土砂供給量の減少、防波堤等の構造物建設に伴う沿岸漂砂量の変化に伴う土砂の供給と流出の不均衡が大きな要因となっている(宇多, 2004)。この問題の解決のための一方策として、河川から海岸に至る流砂系における土砂移動を適正に確保するための総合的な土砂管理計画の策定が求められている。河川・海岸を一体とした流砂系の総合的な土砂管理のための計画づくりには、過去の人為的インパクトを含めた流砂系の変遷を定量的に把握すること、および実行可能で具体的な土砂管理手法を選定するための定量的モデルの構築が不可欠である。ダム排砂などの土砂管理対策の効果と影響は、土砂の量だけでなく質(粒径)にも強く顕われるため、粒径を考慮した計画の検討が不可欠である。しかし、実務における総合的な土砂管理計画の立案では、土砂の量と質を考慮して流砂系全体の土砂移動を定量的に検討する手法が確立していなかった。そこで本研究では、総合的な土砂管理計画策定に資することを目的として、天竜川—遠州灘海岸の流砂系を対象として、一次元河床変動計算と熊田ら(2002)の混合粒径砂の分級過程を考慮した海浜変化予測モデルを組み合わせることで、河川と海岸が一体となった流砂系の変遷の把握と、定量的予測を行う手法を提案し、総合的な土砂管理対策に関し論じるものである。

2. 対象流砂系の概要

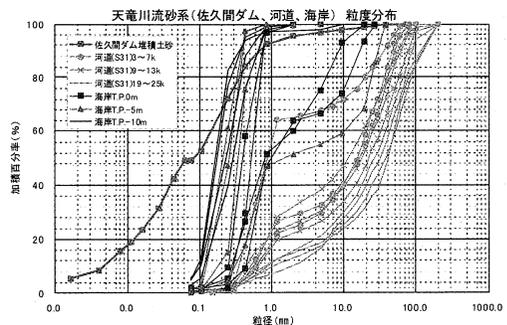
ケーススタディーの対象は、天竜川—遠州灘流砂系とした。河川部は、河口から佐久間ダムまでの下流域約 76 km 区間を対象とし、海岸部は、河口を中心として御前崎から伊良湖岬までの延長約 109 km を対象とした。

対象区間の天竜川—遠州灘海岸の流砂系は、以下の特性を有する。

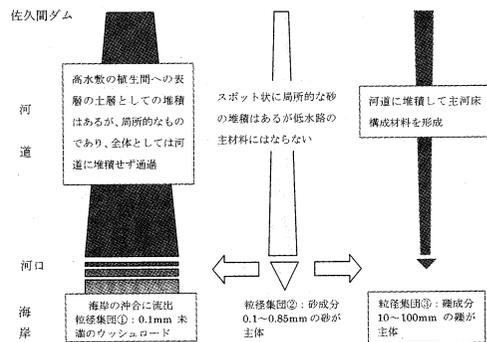
- * 正会員 工博 東京大学教授 大学院工学系研究科社会基盤専攻
- ** 正会員 工博 (財)土木研究センター審議役 なぎさ総合研究室長
- *** 正会員 (財)国土技術研究センター調査第一部
- **** 正会員 海岸研究室(有)

- ① 天竜川は急勾配の河川で、河床の主材料が礫 ($4.75 \text{ mm} < d \leq 100 \text{ mm}$) で構成されている。
- ② 河口部や海岸を構成する主材料は砂 ($0.106 \text{ mm} < d \leq 0.85 \text{ mm}$) で構成されている。
- ③ 河川と河口部・海岸を構成する土砂の粒径集団の平均粒径が 2 オーダー異なる。

このような土砂特性を有する天竜川下流部は、礫成分と砂成分が異なる流砂形態で河道を流下し、海岸まで運ばれている河川である(松尾ら, 1999)。一次元河床変動計算の実施に際しては、このような土砂の掃流特性を考慮する必要がある。



図一 天竜川流砂系(佐久間ダム, 河道, 海岸)の粒度分布



図二 天竜川粒径別土砂動態のイメージ

3. 流砂系の変遷と定量的予測手法の概要

佐久間ダム下流から河口までについてまず一次元河床変動計算を実施し、その計算結果の粒径別土砂量を河口部からの流入土砂量として、海岸汀線部の混合粒径砂の分級過程を考慮した海浜変形予測を実施することとした。

(1) 一次元河床変動計算と計算条件

一般的な一次元河床変動計算では、全ての粒径成分が各計算ステップ毎に交換層内で完全に混合すると仮定して計算を実施する。これに対し、河床勾配(約1/1,000)の急な天竜川下流区間では、河床材料を構成する土砂の粒径集団の平均粒径が2オーダー異なり、河道は礫成分を主体として構成されており、砂成分は河道では主材料である礫間を埋める程度にスポット状にしか存在せず、河口部を除き、河道を構成する主材料とはなっていない。以上より2つの粒径集団の流砂形態は、平均的に見れば砂成分は浮遊形態であり礫成分は掃流形態になっていると推測され、2つの粒径集団が有意に干渉することはないと想定される。すなわち一般的な一次元河床変動計算

表-1 一次元河床変動計算の計算条件一覧

検証期間	昭和54年(1979)~平成11年(1999)20年間 (モデル作成対象区間の測量データの存在状況から決定)
対象区間	10 km 沖合~佐久間ダム
流量条件	鹿島地点において500 m ³ /s(代表粒径4.2 cmが動き始める流量)以上の時刻流量を対象。支川からの流入量は鹿島地点の流域面積比で与える。
下流端水位	下流端水位は、河口から沖合10,000 mの地点で御前崎検潮所平均潮位 T.P 0.063 mを用いる。
初期河床	昭和54年(1979)の測量結果を用いる。河口から沖合10,000 m地点までは、海底の平均勾配と11'広がる仮想断面を設定した。
支川からの流入土砂量	水窪ダムおよび新豊根ダムの堆砂実績から、流域面積当たりの流入土砂量を求め、その土砂量を支川からの流入量の流量規模に応じて与える。
支川からの流入土砂の粒度分布	支川からの流入土砂の粒度分布は、佐久間ダム堆積土砂の粒度分布を用いる。
河床材料の粒度分布	2ピッチで1K~29KまでS41の粒度分布を用いる。(29K以上は、29Kの粒度分布を使用)
砂利採取量	砂利採取が各年度末に実施されるものとして、当該区間の砂利採取量を河床高から差し引く。

表-2 一次元河床変動計算に用いた土砂の粒度クラス区分

	粒径区分	代表粒径
1	$d \leq 0.005$ (mm)	0.003 mm
2	$0.005 < d \leq 0.075$ (mm)	0.030 mm
3	$0.075 < d \leq 0.106$ (mm)	0.091 mm
4	$0.106 < d \leq 0.25$ (mm)	0.178 mm
5	$0.25 < d \leq 0.425$ (mm)	0.338 mm
6	$0.425 < d \leq 0.85$ (mm)	0.638 mm
7	$0.85 < d \leq 2.00$ (mm)	1.425 mm
8	$2.00 < d \leq 4.75$ (mm)	3.375 mm
9	$4.75 < d \leq 9.5$ (mm)	7.125 mm
10	$9.5 < d \leq 19.0$ (mm)	14.250 mm
11	$19.0 < d \leq 26.5$ (mm)	22.750 mm
12	$26.5 < d \leq 37.0$ (mm)	31.750 mm
13	$37.0 < d \leq 75.0$ (mm)	56.000 mm
14	$75.0 < d$ (mm)	100.000 mm

をそのまま用いた場合、天竜川下流区間では粒径別の土砂動態を適切に評価できない可能性が高い。

従って天竜川下流区間における一次元河床変動計算では、砂成分と礫成分の2つの粒径集団は交換層で混合しないという考え方のもとでモデルの改良を行い、計算を実施した。具体的には、砂成分が河床に堆積している場合、その下に堆積している礫成分には掃流力が働かないものとし、その計算断面の礫成分の流砂量はゼロとして河床変動計算を実施する。また砂成分は、河床が上昇する場合は礫成分の上に堆積するが、河床が低下する場合は礫成分と混合せず、砂成分だけが輸送されるとして計算を実施する。なお、砂成分、礫成分とも各々の粒径集団の中での各粒径成分は、それぞれの成分の流砂計算の中における交換層で混合する計算となっている。

(2) 混合粒径砂の分級過程を考慮した海浜変形予測と計算条件

海浜変形予測には熊田ら(2002)の計算モデルをそのまま用いた。初期地形は1/75の平均海底勾配、波による地形変化の限界水深 $h_c = 10$ m、入射波の碎波波高 $H_b = 1.7$ m、周期 $T = 6$ sである。

4. 予測計算手法の検証

上述の計算モデルの検証は、河川区間に関しては、河床高や河床変動量より現況再現を行い、河床変動計算により得られた海岸への河口流出土砂量の妥当性は、縄文海進以降、天竜川によって形成された扇状地の土砂量から推定した結果との検証を行った。また、海岸部に関し

表-3 海浜変形予測計算の計算条件一覧表

数値計算手法	混合粒径砂の分級効果を考慮した1-lineモデル(熊田ら:2002)
計算対象範囲	計算範囲:御前崎~伊良湖岬:延長約109 km
計算ケース	ケースA:要因なし(ダム建設なし・砂利採取なし) ケースB:要因あり(ダム建設・砂利採取あり)
初期汀線	ダム建設・砂利採取等の要因を受ける前のデルタ地形を形成するため、まず、直線汀線に波向直角入射の条件で河口から土砂を流入させ、汀線形状および粒径分布が平衡状態にある自然状態の想定安定汀線を求めた。この安定汀線を初期汀線に使用。また初期粒径分布にはその安定汀線の粒径分布を使用。 ○初期汀線:安定汀線 ○初期粒径分布:安定汀線の粒径分布
計算期間	○50年 (初期条件に使う河口デルタの安定形状の計算では、汀線形状と粒径分布が平衡状態に達するように十分長時間波浪を作用させた:10万年)
入射波条件	碎波波高 $H_b = 1.7$ m、周期 $T = 6.6$ sec、 波向:デルタ形成前の初期汀線に直角 (エネルギー平均波:浜岡原子力発電所の1980年~1994年の観測値による:静岡県土木部河川課・(株)アイ・エヌ・エー:1997)
粒径の構成	一次元河床変動計算の14の粒径区分を基本とするが、汀線変化に直接寄与しない0.2 mm以下の細粒分は除外し、河川から流出土砂量の少ない9.5 mm以上の粒径は一つの区分とし、下記の $N = 7$ 粒径で区分けて代表粒径を設定した。 $d = 0.2$ mm ~ 0.250 mm → $d(1) = 0.224$ mm で代表 $d = 0.250$ mm ~ 0.425 mm → $d(2) = 0.326$ mm で代表 $d = 0.425$ mm ~ 0.850 mm → $d(3) = 0.601$ mm で代表 $d = 0.850$ mm ~ 2.00 mm → $d(4) = 1.30$ mm で代表 $d = 2.00$ mm ~ 4.75 mm → $d(5) = 3.08$ mm で代表 $d = 4.75$ mm ~ 9.50 mm → $d(6) = 6.72$ mm で代表 $d = 9.50$ mm ~ 19.0 mm 以上 → $d(7) = 13.4$ mm で代表
河口流出土砂量	・ケースA(要因なし):83.3万 m ³ /年 ・ケースB(要因あり):10.7万 m ³ /年 (汀線変化に直接寄与しない0.2 mm以下の細粒分は除外) ・粒度組成:河床変動計算結果を使用
源砂量係数	熊田ら(2002)によって定義された源砂量係数 $A = 0.025$ (安定形状の再現計算よりデルタ頂角の再現性の良いものを使用)
移動高	$h = 10$ m

では、汀線変化量や沿岸漂砂量、汀線部土砂の沿岸方向粒径分布の実態と比較した。

(1) 一次元河床変動計算の検証

長期的、広域的に土砂収支が再現されているかを、河床高と粒度分布の両者の観点から検証した。代表的計算結果を以下に示す。計算結果と実績とを比較するといずれの結果も再現性が高いことが確認できる。

次に、一次元河床変動計算による河口流出土砂量の検証を行った。河口流出土砂量のうち、粒径が細かい成分は海岸に流出すると波や流れの作用により、沖合に拡散してしまうため、汀線部の地形変化には寄与しない。そこで宇多ら(1997)を参考に、移動限界水深よりも浅い領域に存在する土砂の粒径の下限値を0.2mmと設定して、一次元河床変動計算結果による河口での流下土砂

($Q_n=131.7$ 万 m^3 /年)のうち0.2mm以下の細粒の土砂を除いたもの($Q_n=83.3$ 万 m^3 /年)を一次元河床変動計算結果から得られた海岸への流出土砂量とした。河口からの流出土砂量 $Q_n=83.3$ 万 m^3 /年は、約2万年前(最終氷期の最大海退期)以降に堆積した天竜川扇状地の総土砂量を算定した芝野ら(1988)の研究の土砂量50万 m^3 /年とオーダー的には同じであり、妥当な値と考える。

(2) 海浜変形予測計算の検証

海浜変形予測計算結果は、沿岸漂砂量、汀線変化量、粒度組成の空間分布の面から検証した。沿岸漂砂量は、ダム建設なし・砂利採取なし状態の計算結果と、福田漁港、今切口、赤羽根漁港の3地点での既往研究(宇多, 1997)による沿岸漂砂量の実績値と比較した。この実績値は防波堤等の構造物によって阻止された堆積土砂量の経年変化より推定されたものである。実績値は、福田漁港を除けば1960~1970年代について求められており、流下土砂量の減少の影響はほとんど及んでおらず、ほぼ自然状態に近い沿岸漂砂量を与えていると考えられる。

図-6に示すように計算結果、実績値とも河口から遠ざかるに従って沿岸漂砂量が小さくなる傾向を示す。また計算結果は実績値の1~2倍の範囲にあり、ほぼ妥当と考えられる。なお、計算値が実績値に比べて大きくなる要因として、河口左右岸の砂丘地に飛砂により運び去られる土砂や限界水深の沖に流出する土砂などの要素を今回の数値計算では考慮していないことが考えられる。

汀線変化量は、ダム建設・砂利採取の要因を与えた場合における河口部の汀線変化量の計算結果と実績値と比較検証した。図-7に示したように離岸堤や護岸などの海岸構造物の影響のない1946~1962年における河口部の最大汀線後退量の実績推定値と計算結果は概ね一致している。また河口部の後退範囲についても、実績推定値と計算結果は概ね一致しており、ほぼ妥当な結果と考えられる。なお、河口部の最大後退量に関しては、実績推定値が河口部に設置された離岸堤などの海岸構造物による効果を含んだ実測値であるのに対して、今回の数値計算では海岸構造物の効果を取り込んでいない計算のた

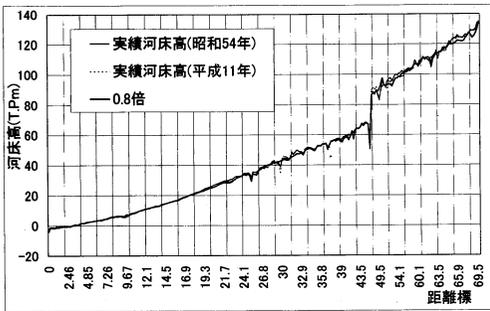


図-3 天竜川の河床高再現結果

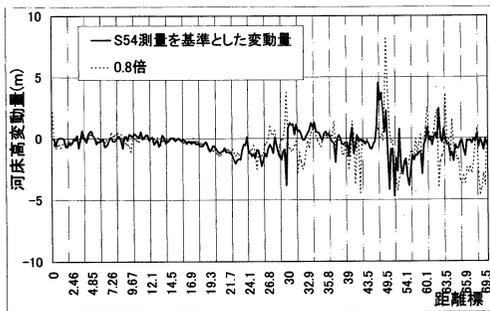


図-4 天竜川の河床変動量再現結果

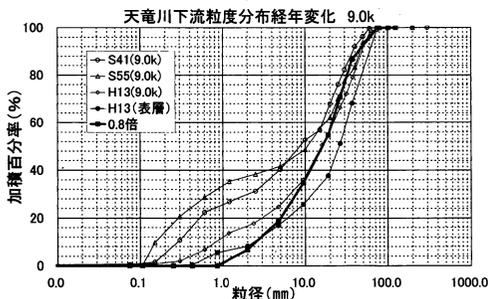


図-5 天竜川の粒度分布累加曲線

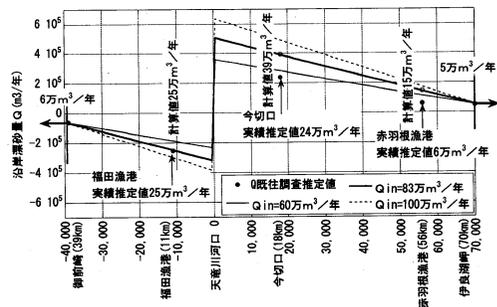
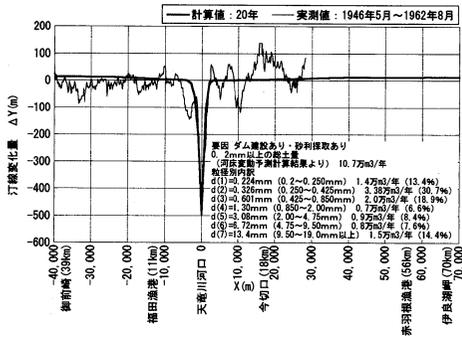
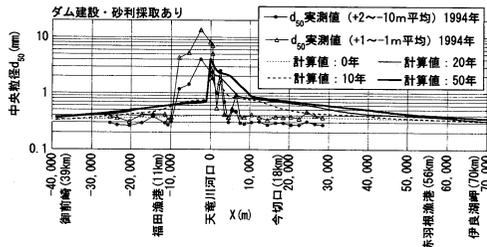


図-6 沿岸漂砂量の計算結果と実績推定値との比較



図一七 汀線変化量の計算結果と実測値との比較



図一八 中央粒径 d_{50} の計算結果と実測値との比較

め、差異が生じているものと考えられる。

粒度組成の空間分布は、ダム建設・砂利採取の要因を与えた場合の中央粒径 d_{50} の沿岸方向分布の計算結果と1994年の実測値を比較検証した。図一八のように計算結果によれば、河口から海岸端部に向けて時間とともに粒径の粗粒化が進む傾向が計算されている。50年間の計算結果を実測値と比較すると、河口で粒径が最も粗く海岸の両端部に向って粒径が細くなるという特性は一致している。計算結果で河口の左右で段差が見られるが、これは河口の左右岸の沿岸漂砂量は右岸の沿岸漂砂量の方が大きいことと右岸には流下土砂のうち大きい粒径しかとどまれない状態にあるためと解釈される。実測値で河口周辺の粒径が急激に細粒化しているが、これは河口周辺の離岸堤群、福田漁港、今切口における突堤などの構造物の影響を含んでいるためと考えられる。

5. ダム下流への土砂供給の効果に関する分析

天竜川一遠州灘海岸流砂系の土砂管理の具体的方策を検討するため、本検討で策定した検討手法を用いて佐久間ダム下流に土砂を供給した場合の河川および海岸における河床や海岸地形への影響を分析した。

(1) 土砂供給による河川内土砂動態の影響予測

佐久間ダムに堆積している土砂のうち、海浜変形に寄与する粒径を対象に、①細粒成分 $0.2 < d \leq 0.25$ mm, ②中粒成分 $0.25 < d \leq 0.425$ mm, ③粗粒成分 $0.425 < d \leq 0.85$ mm, ④極粗粒成分 $4.75 < d \leq 9.5$ mm の各々の土

表一四 秋葉ダム下流に土砂を放流した場合の河口流出土砂量

現状	0.106 < d ≤ 0.25 (mm)				0.25 < d ≤ 0.425 (mm)				0.425 < d ≤ 0.85 (mm)				4.75 < d ≤ 9.5 (mm)			
	10万m ³	20万m ³	40万m ³	60万m ³	10万m ³	20万m ³	40万m ³	60万m ³	10万m ³	20万m ³	40万m ³	60万m ³	5万m ³	10万m ³	20万m ³	
0.106 < d ≤ 0.25 (mm)	15.5	25.4	45.4	65.3	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	
0.25 < d ≤ 0.425 (mm)	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	
0.425 < d ≤ 0.85 (mm)	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	
4.75 < d ≤ 9.5 (mm)	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	

砂を秋葉ダム下流へ供給した場合の、河床変動量の変化、河口流出土砂量と粒径分布の変化を分析した。

その結果、細粒、中粒並びに粗粒成分の土砂はダム下流へ供給すれば直ちに河口まで供給量と同じ粒径の土砂量が到達し、河道の平均粒径の縦断変化は土砂を供給しない場合とほとんど変わらない。これに対し極粗粒分の土砂は供給すると河床に堆積するだけで40年間経過しても河口へ到達することはなく、河道の平均粒径の縦断変化は放流地点から20k地点前後までの区間で粗粒化する。また河床高は鹿島上流部で最大3m、秋葉ダム下流の32k~37k地点では最大2.5m程度上昇する。

(2) 土砂供給による海岸部土砂動態の影響予測

河川と同様の考えに基づき、秋葉ダム下流へ供給した場合の、海岸部での汀線変化と中央粒径 d_{50} の空間分布の変化を分析した。投入土砂量については、本来は一次元河床変動計算の上流端に土砂を投入し、河川の分級作用を経た河口部流出土砂量を汀線変化予測計算の河川から海岸への供給土砂量として設定することになる。ただし、天竜川の場合には、上流で投入した砂成分の土砂は概ね全量河口まで到達するのに対し、礫成分は河口まで到達しないという流送特性を有しており、礫成分を海岸に供給するためには人為的に運搬しなければならないので、今回の検討では、河口部に土砂を直接投入する設定として検討することとした。また、投入土砂量は、計算時間ステップ $\Delta t = 0.1$ yr に均等分割して Δt 毎に河口部に土砂が投入される設定として計算した。投入粒径及び投入土砂量 α を変えた計算を行い、汀線変化(図一九)、中央粒径及び含有率(図一十、一十一)の変化を求めた。

この結果、河口部の汀線を維持するためには、細粒成分で概ね40万m³/年、中粒成分で概ね30万m³/年、粗粒成分で概ね25万m³/年、極粗粒成分で概ね7.5万m³/年が必要である。中央粒径 d_{50} の空間分布の変化を沿岸域方向の分布で見た場合、細粒、中粒並びに粗粒分は10万m³/年程度の土砂投入量で河口部を中心に細粒化に向かう傾向にあり、投入量の増加により要因なしの状態の中

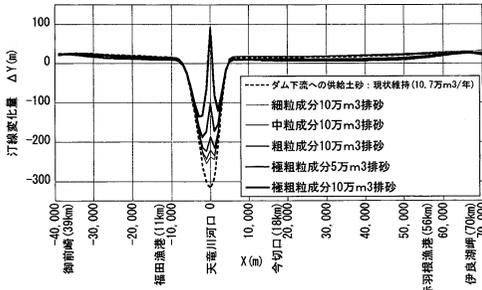


図9 排砂量 10 万 m³/年の場合の訂線変化量 (50 年後)

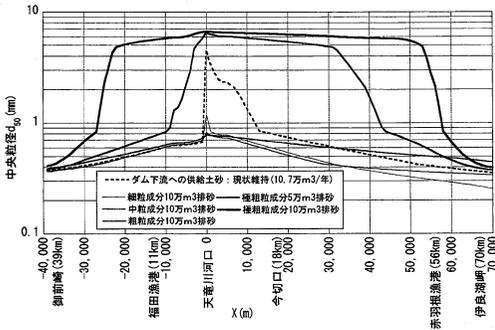


図10 中央粒径 d_{50} の変化 (50 年後)

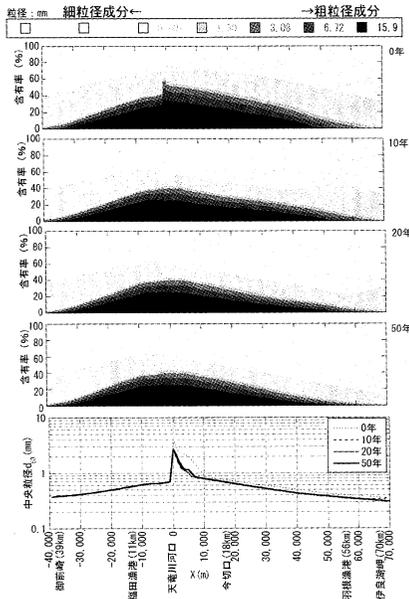


図11 代表粒径の含有率と中央粒径 d_{50} の変化 (50 年間)
：細粒成分の土砂 20 万 m³/年投入

中央粒径 d_{50} の沿岸方向分布に近づく。しかし、極粗粒分は 5 万 m³/年程度の土砂投入量でも河口部を中心に現況よりも粗粒化に向かう傾向にある。代表粒径の含有率を沿岸方向での分布で見た場合も、投入量の増加により、細

粒、中粒並びに粗粒分は細粒化、極粗粒分は粗粒化の傾向を示す。

6. まとめ

本研究で明らかになった点は以下に要約される。

- ① 砂成分 ($0.2 < d \leq 0.85 \text{ mm}$) は、相対的に河道に堆積しにくく河口まで流出しやすい。ただし、河川でダム建設や砂利採取が実施されている場合には、河口への供給量は減少し、河口テラスに堆積していた砂成分の土砂が沿岸漂砂として海岸下手側へ運ばれるため、河口付近を中心に訂線が後退傾向となる。
- ② 従って、海岸部への砂成分の供給は、必要土砂量を佐久間ダム等の上流ダム貯水池から排砂し、河川を流下させることによって可能となる。
- ③ 礫成分 ($0.85 \text{ mm} < d$) は、河道による分級作用を受けて河道に堆積しやすく、上流域での生産土砂量と比較して河口まで流出しにくい。なお、河川でダム建設や砂利採取が実施されている場合には、河口への流出土砂はさらに減少するが、河道からの補給分もあり、各々の量と空間的な規模のバランスにより河口部への流出土砂量は定まると考えられる。
- ④ また、そのバランスの結果、河口部への供給土砂量が河川へのインパクト前と比較して減少した場合には、海岸での沿岸漂砂量は変化しないので、供給不足分は河口テラスから補給されることになり、結果として河口付近を中心に訂線が後退傾向となる。
- ⑤ 従って、海岸部に礫成分 ($0.85 \text{ mm} < d$) を供給するには、海岸部に必要な土砂量を直接河口部に運搬して供給させる必要がある。

謝辞：本報告は、名古屋大学辻本哲郎教授を委員長とする「海岸侵食対策と利水ダムの機能の維持・回復のための土砂管理対策検討委員会」での検討を踏まえとりまとめたものである。ここに委員並びに関係機関各位に謝意を表します。

参考文献

熊田貴之・小林昭男・宇多高明・芹沢真澄・星上幸良・増田光一 (2002): 混合粒径砂の分級過程を考慮した海浜変形予測モデルの開発, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp. 476-480.
 松尾和巳・藤田光一・小藪剛史 (1999): 河道縦断形と河床材料縦断変化についての全国分類, 土木学会第 54 回年次学術講演会, pp. 330-331.
 宇多高明・小菅 晋・芹沢真澄・三波俊郎・古池 鋼 (1997): d_{50} の水深方向分布からの波による地形変化の限界水深を推定する方法, 海岸工学論文集, 第 44 巻, pp. 521-525.
 宇多高明 (2004): 海岸侵食の実態と解決策, 山海堂, pp. 304.
 芝野照夫・土屋義人・富谷 雄・山本武司 (1988): 天竜川扇状地と遠州灘海岸の形成, 京都大学防災研究所年報, 第 31 号 B-2, pp. 775-791.
 宇多高明 (1997): 日本の海岸侵食, 山海堂, pp. 442.