

天竜川からの供給土砂量の増加と遠州灘海岸の侵食の関係

Relationship between Increase in Sand Supply from Tenryu River and Beach Erosion of Enshu-nada Coast

宇多高明¹・吉添高兆²・横山卓司³・甲賀 肇⁴・古池 鋼⁵・村井健太⁵・石川仁憲⁶

Takaaki UDA, Takayoshi YOSHIZOE, Takuji YOKOYAMA, Hajime KOUGA
Kou FURUIKE, Kenta MURAI and Toshinori ISHIKAWA

Long-term beach changes after the completion of sand-bypassing project in the Tenryu River, which takes 10 years from the present, were predicted using the contour-line-change model. Even if beach nourishment of $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$ is continued in front of Nakatajima sand dune, and $3 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{yr}$ of sand is additionally supplied to the river mouth as the effect of sand bypassing at the dam reservoir, supplied sand is only effective for recovering the river mouth terrace severely eroded in the past, and newly supplied sand is ineffective to nourish further downcoast. To conserve the Enshu-nada coast, further overall comprehensive management of sand movement is required.

1. はじめに

天竜川からの大量の土砂流出によって広大な河口デルタとして発達してきた遠州灘海岸(図-1)では, 天竜川上流でのダム群の建設および骨材採取により河川流出土砂量が激減し, 河口両翼の海岸線が急速に後退しつつある。長島ら(2005)は, 天竜川から湖西海岸まで約 30 km の海岸線を対象として深浅データ・空中写真をもとに長期的地形変化を分析し, 天竜川からの流出土砂量の減少に起因して河口沖テラスが縮小しつつあること, さらに中田島海岸では 1962 ~ 2004 年の最大汀線後退量が 210 m に達することを明らかにした。このような急速な侵食に対し 9 万 m^3 の養浜も行われてきているが侵食はなお激しい。宇多ら(2006)は, 芹沢ら(2002)による等深線変化モデルを用い, 動的平衡状態にあった遠州灘海岸の海浜変形予測を行い, 離岸堤群と養浜工を組み合わせた対策案について比較検討した。その場合, 予測期間として天竜川にあっては現在国土交通省によりダム再編事業が行われていることから, 少なくとも 10 年後には天竜川から土砂供給が可能と仮定し, それまでの間中田島砂丘前面の海岸の侵食をできる限り抑制する手法を考えた。この結果, 離岸堤 3 基を配置すれば $5 \text{ 万 m}^3/\text{yr}$ の維持養浜でも中田島前面の汀線維持が可能なが分かった。この方法は, 中田島砂丘前面の侵食に対して 10 年程度

の期間を限って考えるのであれば有効であるが, 侵食自体は場所を変えて進むことも分かっており, いずれ大量の土砂供給が必要となる。また, 実際にはダム再編事業の効果が出るまでには長い時間を要するから, さらに長い時間スパンでの地形変化予測が必要となる。そこでまず河口デルタにおける海浜変形のモデル化の基本的考え方を整理した上で, ダム再編事業が本格化した後 20 年を想定して芹沢ら(2002)のモデルを用いて長期地形変化予測を行った。

2. 河口デルタにおける海浜変形のモデル化の基本的考え方

直線状海岸において河川からの流出土砂により河口デルタが形成される場合を考える。河口中心線に対して左右対称形の河口デルタを想定し, 右半平面上(河口より西側)での河口デルタの形成・縮小を考える。河川流出土砂が 0 の条件では, 図-2(a)のように海岸線に対して卓越波が直角入射するので, 沿岸漂砂はいずれの地点でも 0 となり, 海岸線は卓越波向に対して直角となる。

いま, 海岸線右端部での沿岸漂砂量は 0 のまま, 河口から Q_m の土砂が連続的に流入する場合, 河口とその周辺の海岸線は図-2(b)のように卓越波向に対して θ の角度を持つ。一方, 河口から十分離れた右端部の海岸線は, 卓越波向に対して直角のままなので沿岸漂砂量は 0 である。このため, 河口と海岸線端部の間の沿岸漂砂量は空間的に緩やかに減少することとなり, 海岸線は緩やかな

- 1 正会員 工博 (財)土木研究センター理事なごさ総合研究室長
兼日本大学客員教授理工学部海洋建築工学科
2 静岡県建設部建設管理局企画監
3 静岡県建設部河川海岸整備室副主任
4 静岡県浜松土木事務所企画課査課主任
5 海岸研究室(有)
6 正会員 工修 (財)土木研究センターなごさ総合研究室主任研究員

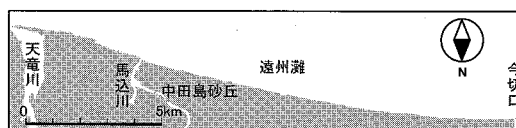


図-1 対象海岸

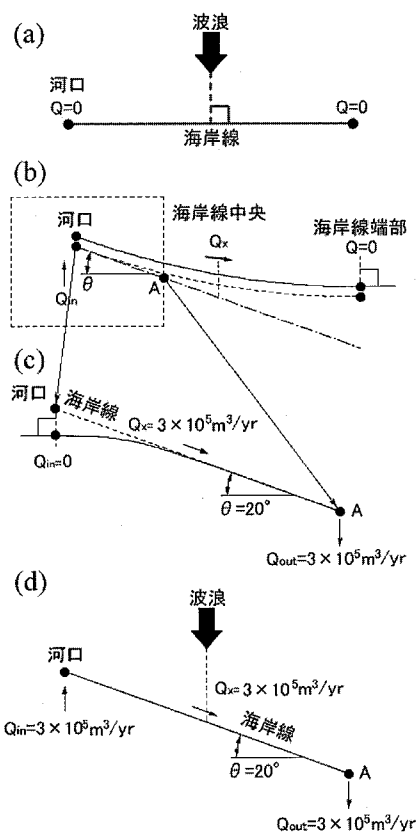


図-2 河口デルタにおける海浜変形の模式的説明

弧を描く。この漂砂系では、系内に土砂が左端部から流入しているため、結果的に海岸線は破線から実線へ平行移動しつつ前進する(宇多ら, 2002)。

ここで、図-2(b)において、河口近傍で海岸線がほぼ直線と見なし得る区域(図の破線)を選び、この区域の右端と海岸線との交点をAとする。以下では河口からA点までの区域について考える。いま河川流出土砂量 Q_m が0になった場合を考えると、河口が卓越波向に対して直角になろうとして、図-2(c)のように河口部から侵食域が右向きに広がることになる。ここで左端部は天竜川河口と考えるとき、右端部をどこに設定するかが問題となる。現在侵食が問題になっている区間は河口から10 km以内にあり、卓越波向に対する旧海岸線の方角角は河口とほぼ同じ 20° である。したがって図-2(d)のような動的平衡となる境界条件を採用できる。すなわち左端から一定量の土砂が流入し、海岸線に沿って同量が流れ、右端から流出するものである。図には対象海岸における各数値を示す。次節ではこのような区間を予測対象として選定した。この条件では、海岸線は卓越波向に対して一定の角度を持つ。なおこの場合 Q_m を増やせばデルタは突出し、減らせばデルタは縮小する。また Q_m を

固定して作用波高を大きくするとデルタは縮小し、作用波高が小さいとデルタは突出する。一方、 Q_m は実測から平均的な値が与えられている。また作用波高も波浪統計から分かっている。したがってこれらを固定し、沿岸漂砂量係数を調節して卓越波向と海岸線の方角角が 20° になるようにして地形変化を再現する。これらは河口デルタ周辺における海岸線の変化の模式的説明であるが、等深(高)線についても同様な結果となる。

3. 天竜川からの供給土砂量の推定と予測計算の条件

天竜川河口を中心として広がる遠州灘海岸は前節で述べた河口デルタ海岸であり、河口を中心として東西に弧状の海岸線が延びる。この海岸の河口以西が計算対象であるが、そこで動的平衡海浜を造り出すには、境界条件として河口デルタ形成に預かった天竜川からの供給土砂量の推定が必要である。芝野ら(1988)は、扇状地の堆積土砂量から天竜川からの供給土砂量を $50 \text{ 万 m}^3/\text{yr}$ と推定した。また佐藤ら(2004)は、縄文海進以降の河口デルタ前置層の発達過程を考慮した推定と、一次元河床変動計算に基づいて供給土砂量を $(50 \sim 83.3) \text{ 万 m}^3/\text{yr}$ と推定した。これらより、自然状態での浜松側への供給土砂量は $Q_m = 30 \text{ 万 m}^3/\text{yr}$ と設定できる。一方、侵食が顕著となる以前の河口部汀線形状から接線角を調べると θ は 20° となる。これに相当する沿岸漂砂が連続的に流れていたが、ダムによる土砂流下阻止、および中流域での砂利採取により供給が途絶えたことが遠州灘海岸の侵食要因となる。実測データによれば河口から侵食が広がっていることから、40年前に土砂供給が途絶えたと考え $Q_m = 0$ とした。

数値計算手法は宇多ら(2006)と同様とし、天竜川河口から今切口までの延長20 kmの海岸線を計算対象とする。予測計算は3ケース行った。いずれのケースでも、まず宇多ら(2006)で有効と判断された3基の離岸堤を建設した上で毎年 5 万 m^3 の土砂を馬込川河口右岸に投入する。それに加えて、ダム再編事業の効果が10年後から発揮されると仮定し、天竜川本来の供給土砂量 $30 \text{ 万 m}^3/\text{yr}$ が10年後から河口に流入するとして今から30年後(すなわち土砂流入が始まってから20年後)を予測した。またこれとの比較のために流下土砂量が0と $10 \text{ 万 m}^3/\text{yr}$ の場合についても計算を行った。ここでは供給土砂量が少ない順にケース1, 2, 3と呼ぶ。計算に用いた初期地形は、宇多ら(2006)で予測した2015年の海底形状とする。

この初期形状には、現況で設置されている6基の離岸堤と14基の消波堤、および馬込川導流堤、さらには対策施設としての3基の離岸堤が取り込まれている。数値計算ではまず供給土砂量と沿岸漂砂が完全に均衡した動的平衡海浜を再現した。作用波はエネルギー平均波を与え、

$H=1.6\text{ m}$, $T=7\text{ s}$ の波浪を卓越波向Sから入射させた。潮位条件は $\text{MSL}=\text{TP}+0.0\text{ m}$ である。波による地形変化の限界水深 h_c は 10 m 、バーム高 h_R は 3 m とした。沿岸・岸沖漂砂の水深方向分布には宇多・河野 (1996) の3次式を与えた。さらに平衡勾配については $\tan\beta_c=1/50$ とした。沿岸方向には $\Delta X=20\text{ m}$ で、鉛直方向には $\Delta Z=1\text{ m}$ で分割した。計算時間間隔は $\Delta t=1\text{ hr}$ であり、境界条件として左端(天竜川河口)では土砂供給なし、右端(今切口)では等深線位置を固定することにより漂砂が通過可能な境界とした。さらに波高伝達率は離岸堤の場合 $K_r=0.4$ 、消波堤の場合 $K_r=0.6$ とした。

4. 現況再現と放置した場合の影響予測

図-3(a)は、天竜川河口から浜松五島海岸を経て浜松篠原海岸までの 13 km の海岸線を対象として、1962年撮影の空中写真より定めた汀線を基準とした2005年までの実測汀線変化を示す。浜松五島海岸には離岸堤と消波堤群が設置されているために、近年では汀線の後退は防がれているが、天竜川河口では 280 m もの汀線後退が生じている。また馬込川河口西側の中田島砂丘前面では楔状に海岸線が後退している。汀線の後退は時間経過とともに顕著となり、汀線後退域が西側へと広がっている。一連の汀線変化の結果、浜松五島海岸が海側に大きく取り残され、汀線は構造物で維持されている。

図-3(b)は、初期勾配が $1/50$ の平行等深線形状を与え、天竜川からの供給土砂量が0となったとして、1962年基準での2005年時点の等深線変化の再現計算結果(宇多ら, 2006)を再度示したものである。図には2005年1月の実測汀線も示すが、天竜川河口から馬込川河口の西 3 km 付近までの区間では計算と実測はよい対応を

示している。一方、今切口に近接する部分では、初期海岸線が直線で近似できないことにより、非定常状態での汀線前進が起こり、予測とのずれが大きくなる。

ダム再編事業は現在検討が行われており、その成否は今後の検討にかかるが、ここでまず最悪の条件として何らの施設も建設できず、かつ養浜も行いうことができない事態を想定した予測計算を行った。図-4はこうした状態が50年間続いた場合の等深線の予測結果である。馬込川河口から東側では、全体的に海岸線の後退が続き、天竜川河口では今後さらに 180 m 海岸線が後退する。一方、馬込川河口の西側でも天竜川河口方面からの沿岸漂砂が枯渇状態のため著しい侵食が起こる。図-5は汀線の時系列変化を示したもので、中田島砂丘前面では 220 m もの汀線後退が生じ、著しい侵食域が西側へと広がる。この結果図-6のように、目標浜幅の確保が困難となるのみではなく、 200 m も基準線を割り込むという結果となる。これらの結果は、何の対策も行われない場合、中田島砂丘の前面では激しい侵食が起こることを意味している。

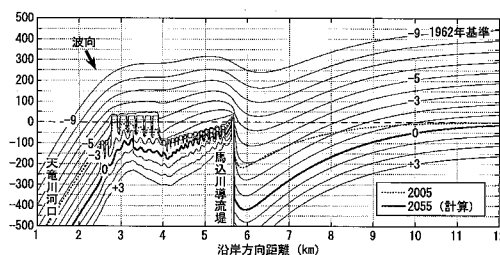


図-4 無対策状態が50年間続いた場合の等深線の予測結果

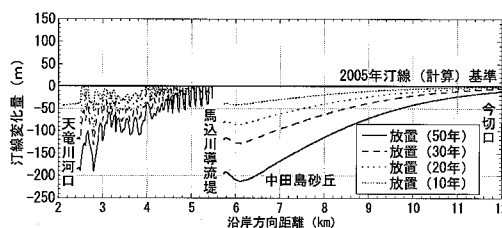


図-5 汀線の時系列変化

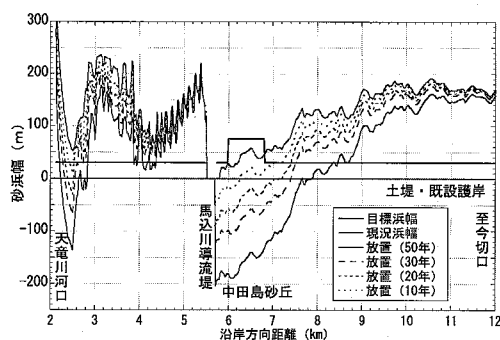


図-6 浜幅の変化

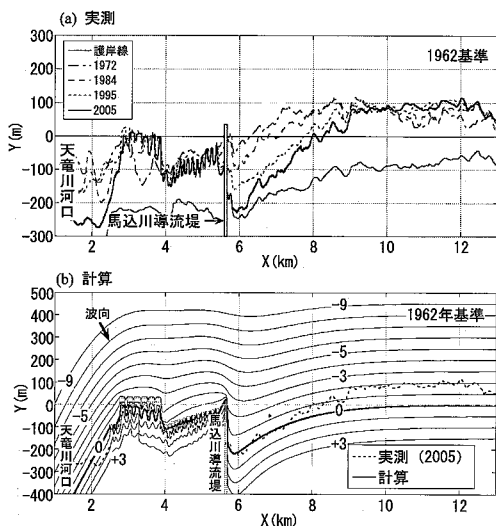


図-3 1962～2005年の汀線変化

5. 天竜川からの土砂供給の復活が海岸にもたらす効果の検討

宇多ら (2006) による保全対策の最適案である3基の離岸堤群の建設と毎年5万 m^3 の土砂投入の継続を前提とし、天竜川ダム再編事業の効果が出ると予想される、10年後の2015年から河川流出土砂が河口に流入する場合の効果について検討した。

(1) 等深線変化の比較

図-7は、天竜川からの供給土砂量 Q_{in} を0, 10, 30万 m^3/yr と変えた場合における、1962年からの等深線変化量の比較結果である。 Q_{in} が0の場合、天竜川河口から馬込川河口までの汀線は全体に後退傾向を示す。とくに3号離岸堤の西側では汀線の後退が著しい。すなわち Q_{in} が0の場合、一部区域を除いて全体として侵食がさらに進むことが分かる。 Q_{in} が10万 m^3/yr の場合、図-7(b)のように河口部汀線はほぼ現況位置を保つが、浜松五島海岸以西では Q_{in} が0の場合と大きな差異は見られない。 Q_{in} =10万 m^3/yr の土砂流入を確保するにも多額の経費を要すると考えられるが、もともとの流出土砂量30万 m^3/yr と比較してその量が1/3では、広域の海岸侵食を防ぐ上でほとんど効果が見られないことが分かる。 Q_{in} が30万 m^3/yr と、ダム建設以前の土砂流入水準まで回復した場合、図-7(c)のように河口部汀線は大きく前進し、過去に消失した河口テラスが復元され

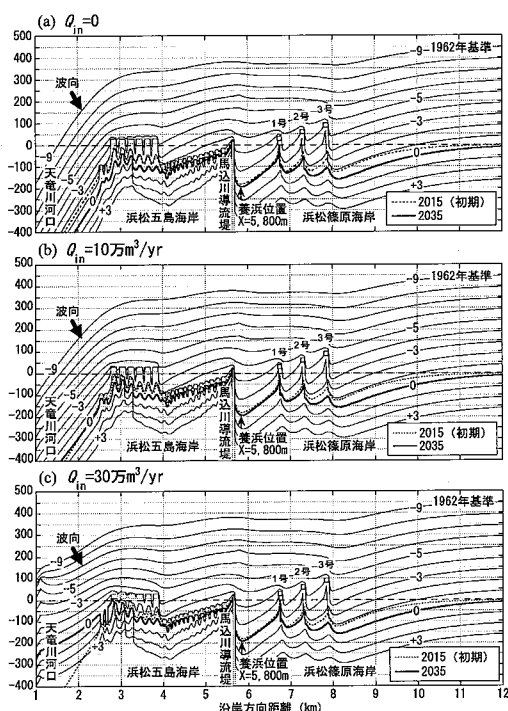


図-7 1962年からの等深線変化量の比較

始める。しかし、この場合においても浜松五島海岸以西では Q_{in} が0の場合と大きな差異は見られない。

(2) 地形変化量の平面分布の比較

図-8は、 Q_{in} を変えた場合における2015年からの水深変化量の平面分布の比較である。これらはそれぞれ図-7(a), (b), (c)に対応した地形変化量を示す。 Q_{in} =0では、天竜川河口から浜松五島海岸までの全域で侵食が進んでいる。とくに3号離岸堤 ($X=8\text{ km}$) の西側で侵食が著しい。天竜川からの土砂供給が枯渇した状態では離岸堤により一部区域を堆積傾向に変えることはできても、全体的には侵食傾向となる。 Q_{in} =10万 m^3/yr では、 Q_{in} =0の場合と馬込川河口以西ではほとんど同じ結果であり、唯一変化が見られるのは天竜川河口部である。そこでは Q_{in} =0の場合全域で侵食傾向であったが、河口前面を中心に堆積傾向に変わっている。また、河口では堆積傾向に変化した、土砂量の増加の効果は河口から離れた区域 ($X=4 \sim 12\text{ km}$) には及んでいない。 Q_{in} を30万 m^3/yr まで増加させた場合、他のケースと比較して著しい差異が見られる。天竜川河口前面の大量の土砂が堆積して等深線が前進するとともに、土砂堆積域が一部浜松五島海岸沖にまで到達する。河口での地盤高の最大増加量は7mにも達する。このように流出土砂量の増加は河口部海浜を広げ、水深を減少する上で非常に高い効果を有する。しかしながら、この場合においても河口から離れた馬込川河口以西 ($X=5.8 \sim 12\text{ km}$) では Q_{in} が0の場合と大きな差異は見られない。

(3) 沿岸漂砂量の沿岸分布の比較

図-9は、 Q_{in} を変えた場合における沿岸漂砂量の沿岸分布の比較である。 Q_{in} =0の場合、これとバランスす

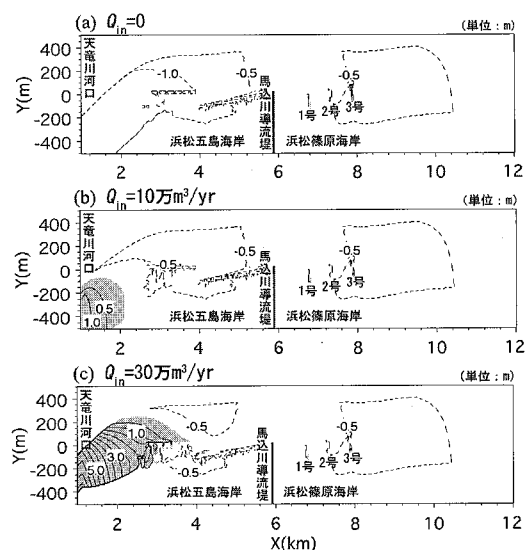


図-8 2015年からの地形変化量の平面分布

るために沿岸漂砂量は河口では0であり続け、西端ではもとから流れていた $30 \text{ m}^3/\text{yr}$ に漸近する。沿岸漂砂は浜松五島海岸～馬込川河口の間に設置された離岸堤・消波堤群では沿岸漂砂が通過しているために滑らかな変化を示すが、馬込川河口では不連続が生じる。全体に西側ほど沿岸漂砂量が大きいため、海岸線の各地点では侵食が進むこととなる。 Q_{in} を $10 \text{ m}^3/\text{yr}$ とした場合、河口での沿岸漂砂量が増加し、沿岸漂砂量分布は $Q_{in}=0$ の場合より緩やかになるが、それでも西向き増加傾向には変わりがない。 Q_{in} が $30 \text{ m}^3/\text{yr}$ の場合、沿岸漂砂量は河口と3号離岸堤の間で窪みを持つ分布となる。とくに河口部では西向きに沿岸漂砂量が減少傾向となるため、堆積域が西向きに広がるが可能となる。

(4) 汀線変化の比較

図-10は、 Q_{in} を変えた場合における2005年再現汀線を基準とした汀線変化量の比較である。3ケースの計算結果とも、馬込川河口の西側ではほとんど変化がない。離岸堤3基の建設と、併せて行われている馬込川河口西側隣接部での毎年 5 m^3 の土砂投入による効果のみが現れており、

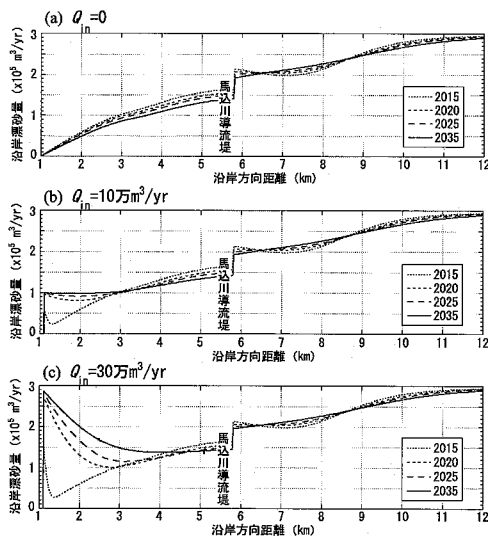


図-9 Q_{in} を変えた場合の沿岸漂砂量の比較

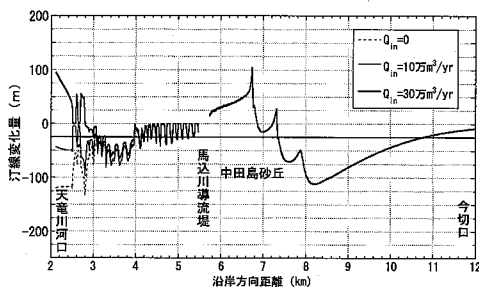


図-10 Q_{in} を変えた場合の汀線変化量の比較

ここでは天竜川河口への土砂流入の増加の効果はほとんどないことが分かる。一方、天竜川河口では、 Q_{in} の増加とともに汀線は前進するが、その効果は浜松五島海岸の消波堤群までは及んでいない。このように天竜川河口への土砂供給を増加させたとしても、その土砂は失われた河口テラスの復元に使われ、土砂投入開始後20年でも西側の海岸への養浜効果はないことが分かる。

6. 結 論

予測計算によれば、中田島砂丘前面での年間 5 m^3 の養浜の継続に加え、10年後から天竜川ダム再編事業の効果として年間 30 m^3 の土砂が河口に供給されたとしても、その土砂は過去に河口部で失われた砂州の復元に使われるため、浜松五島海岸の離岸堤・消波堤群を越えて西側の海岸へはほとんど供給されないという結果となった。年間 30 m^3 の土砂量は、ダム再編事業が完全に成功し40年前以前の土砂供給量が回復したとしているので、それより供給土砂量が少ない場合効果は一層低下する。一方で、中田島海岸の汀線維持を図るには毎年 5 m^3 の土砂を入れ続ける必要があり、それを中止した場合、宇多ら(2006)で述べたように中田島海岸では侵食が激化する。これらの点を考慮すると、ダム再編事業が成果を上げれば直ちに海岸侵食が止まると考えるのは間違いであり、ダム再編事業の成果の如何にかかわらず、遠州灘海岸全体を対象としていかにして侵食を軽減させるかについてさらなる検討が必要である。

参 考 文 献

- 宇多高明・河野茂樹(1996): 海浜変形予測のための等深線変化モデルの開発, 土木学会論文集, No.539/II-35, pp. 121-139.
- 宇多高明・芹沢真澄・古池 鋼・三波俊郎(2002): 石川海岸の地形学的変化と手取川河口デルタの変形, 海洋開発論文集, 第18巻, pp.485-490.
- 宇多高明・石井 隆・内田光一・甲賀 肇・影山安秀・古池 鋼・石川仁憲(2006): 遠州灘海岸における長期的海浜変形予測と養浜の効果検討, 海岸工学論文集, 第53巻, pp. 666-670.
- 酒井和也・小林昭男・宇多高明・芹沢真澄・熊田貴之(2003): 波の遮蔽構造物を有する海岸における3次元静的安定海浜形状の簡易予測モデル, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 496-500.
- 佐藤慎司・宇多高明・岡安徹也・芹沢真澄(2004): 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, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 571-575.
- 芝野照夫・土屋義人・富谷 雄・山本武司(1998): 天竜川扇状地と遠州海岸の形成, 京都大学防災研究所年報, 第31号B-2, pp. 775-791.
- 芹沢真澄・宇多高明・三波俊郎・古池 鋼・熊田貴之(2002): 海浜縦断面の安定化機構を組み込んだ等深線変化モデル, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 496-500.
- 長島郁夫・岩崎伸昭・宇多高明・有村盾一(2005): 遠州灘海岸の天竜川河口以西の侵食実態, 海岸工学論文集, 第52巻, pp. 596-600.