

相模川河口で観測された土砂移動サイクル

宇多高明* ・木村一雄**・寺田好孝***
小倉和範****・見附敬三*****

1. ま え が き

河川流下土砂の河口周辺海岸への供給プロセスを理解する、あるいは河口部での適切な河道計画を立案するには、洪水による河口砂州のフラッシュと、沖に流出した土砂の岸向き移動およびそれに伴う河口砂州の再形成についての十分な知識が必要である。これらのうち、前者についてはかなり多くの研究が進められ、砂州のフラッシュと河口テラスの形成の数値予測も可能になりつつある(例えば、桑原・田中, 1994)。しかし、後者に関する研究は依然として不十分な状況にある。この種の研究の一環として、宇多・松田(1995)は、雄物川河口で繰り返し行われた深浅測量データをもとに、河口テラスと河口砂州間の土砂移動を実態的に調べ、河口テラスの外縁に沿って岸向きに運ばれた砂が、波の入射条件に応じて砂州の両側または片側に突起を形成しつつ砂州の再形成が進む状況を明らかにした。しかし、用いられたデータが限られていることから、その一般性については議論の余地がある。このことから、本研究では実例として相模川を選んで洪水による河口テラスの変形と砂州の再形成について調べ、河口部での土砂移動サイクルが成立することを明らかにする。相模川河口での土砂移動サイクルについては、宇多ほか(1994)で仮説を立てたが、ここでは新たに多くのデータを追加して検討を進める。

2. 1991年洪水による河口テラスの変形と土砂移動サイクル

最初に、宇多ほか(1994)の観測結果を参照する。図-1は1991年8月21日における $Q=3600\text{ m}^3/\text{s}$ の洪水前後の深浅図の比較である。破線が洪水前、実線が洪水後の等深線である。流量規模が大きいため、河口砂州の一部もフラッシュされている。この洪水時には河口中心線上の沖合および河口左斜め前方の-5~-8m付近で等深線の前進が見られる。これと対照的に、河口テラスの

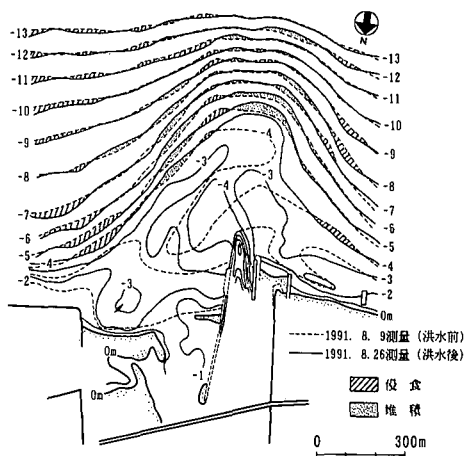


図-1 相模川河口沖の海底地形の比較(1991年8月9日 vs. 1991年8月26日)

両翼では浅海部を中心として等深線は後退傾向にある。洪水に起因する河口テラス周辺での土砂堆積は拡散型の現象として生ずると考えられるので、河口テラス周辺では堆積量が減少することは起こり得ても局部的な侵食が起こることは考えにくい。図-1に示した洪水後の深浅図は洪水より5日後の深浅測量によって得られたものであるから、この間の波の作用も無視できないであろう。一方、河口左岸側より河口テラスの外縁を形づくる-4mの等深線に沿って細長く沿岸砂州が伸び、その岸側にトラフが発達している。このような沿岸砂州の発達には河口テラス上での碎波を促進し、またその内側のトラフは斜め岸向きの海浜流を助長させる働きをもつと考えられる。また、図-1に示した侵食域は、この沿岸砂州の発達区域と場所的には対応を示す。以上のことから、宇多ほか(1994)では、河口部における洪水流による砂州のフラッシュと波による砂州の再形成は図-2に示す土砂移動サイクルにより説明されるとした。

砂州および河道の土砂の沖向き流出の外力は河川流である。砂州がフラッシュされるような規模の大きな洪水を考えると、導流堤間の狭窄部で河道水位がせき上げられ、砂州高を越えると砂州のフラッシュが始まる。フラッシュされた土砂は河口沖テラスの先端部を中心とする区

* 正会員 工博 建設省土木研究所河川部長
.. 前建設省京浜工事事務所海岸課長
... 前建設省京浜工事事務所海岸課係長
.... 前建設省京浜工事事務所海岸課
***** 正会員 工修 日本建設コンサルタント(株)

域に堆積する(ステージⅠ)。河口テラスは海に突出した形状を有するため、入射波は河口テラス周辺で大きく屈折するが、河口より流出した土砂は河口テラスの過剰な突出をもたらすために、流出した土砂を岸側へ運ぼうとする営力が働く(ステージⅡ)。洪水前後の深浅図(図-1)によると、河口テラスの外縁のやや内側に細長く沿岸砂州が伸び、その内側にトラフを抱えている。このバー・トラフ地形は河口テラスの等深線とほぼ平行に伸びているが、これは河口テラスに対して屈折した波がバー上で碎波し、その岸側で強い岸向きの沿岸流が生じていることを意味している。このような波と流れの分布があるからこそ、この沿岸砂州の外側で顕著な侵食が生じると考えられる。岸向きに運ばれた土砂も、河口テラスの突出度が小さくなる地点ではエネルギーフラックス自体が小さくなるので、沿岸方向にはあまり移動できず、河口の左右岸近くに堆積する。この土砂は砂州の前面へうちあげられると、図-2のステージⅢのように砂州に沿う沿岸漂砂により砂州の先端方向へ移動し、河道内に砂嘴を形成する。洪水後における、砂州先端での砂嘴の急速な発達には藤井ほか(1988)や宇多(1989)が現地観測により示したとおりである。そして再び洪水があれば洪水によるフラッシュが起こり、ステージⅠが繰り返される。以上が土砂移動サイクルの仮説である。この場合、洪水流の作用は波の作用時間と比較してはるかに短い期間

に、集中的に起こり、波の作用は継続的である点が特徴である。以下では、新たに深浅測量データを加えて、上述の土砂移動サイクルの成立の是非について検討する。

3. 1994年洪水に伴う砂州のフラッシュと土砂の回帰

1994年9月には、 $Q=1250 \text{ m}^3/\text{s}$ の洪水が発生して砂州が再びフラッシュされた。ここではこの洪水前後における深浅図の比較を行う。図-3は、洪水前の1994年2月と洪水後の同年10月の深浅図である。この間砂州中央部はフラッシュされ、その土砂が沖向き流出した。テラス上には堆砂が見られるが、テラスの外縁は細長く侵食されている。この理由として、第2回の深浅測量が8か月後であることから、洪水による堆砂と、波によるテラスの外縁部の侵食とが重なっていることが考えられる。一方、汀線付近では、河口部の左岸護岸を守るために、河口に離岸堤が造られた結果、その背後の汀線が大きく湾曲している。河口砂州の汀線は洪水によるフラッシュに伴う土砂損失と、左岸の離岸堤背後への土砂移動が重なったため、砂州中央部を中心として最大53mも後退した。

図-4は、1994年10月と1995年2月の深浅図である。これによると、河口沖のテラスの外縁の地形変化はほとんどないが、テラス上の沖合部分で侵食が進む一方、-3mの等深線の移動に明瞭に見られるように、テラスの外縁線とほぼ沿うようにして離岸堤沖斜め岸向きで堆砂が進んでいる。この状況は図-2に示したテラスに沿う斜め岸向きの土砂移動をかなりよく説明する。

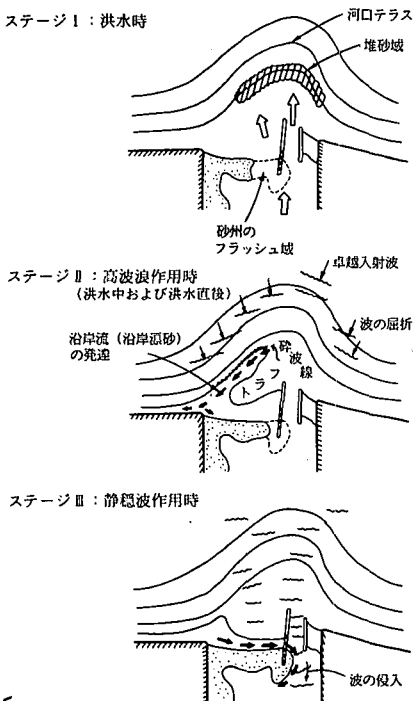


図-2 河口砂州周辺における土砂移動サイクルの模式図

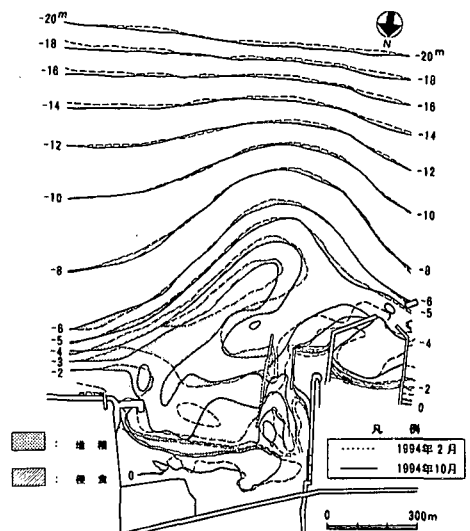


図-3 相模川河口沖の海底地形の比較 (1994年2月 vs. 1994年10月)

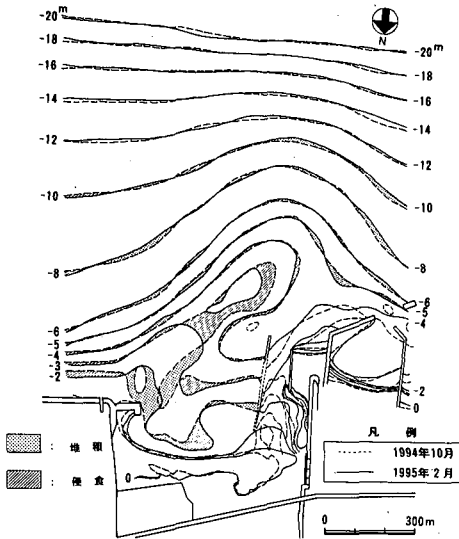


図-4 相模川河口沖の海底地形の比較 (1994年10月 vs. 1995年2月)

4. 深浅図の詳細比較

ここでは、河口砂州周辺の詳細な地形変化について調べる。図-5には1994年2月の地形を示す。河口砂州の汀線は、下水道放流口に隣接する護岸の付け根より中導流堤方向へとほぼ直線的に伸びている。河口砂州は大きく右岸側に伸び、右岸の護岸との間にわずかな開口部を持つのみである。また中導流堤は一部透過性を有するが、斜めに伸びるため波の遮蔽域が形成され、そのため中導流堤の付け根部分で舌状砂州が形成されている。図-5の状況下において、1994年9月30日に最大流量1250 m^3/s の洪水が発生し、砂州は中央部でフラッシュされた。また、1994年3月～7月の間には、相模川河口左岸の護岸の被災を防止するために、長さ60mの離岸堤が河口左岸に造られた。図-6は1994年10月の深浅図である。離岸堤背後の汀線は大きな湾入形状となった。砂州中央部は洪水によるフラッシュによって開口したが、その部分は波の作用で直ちに塞がった。以上の結果、砂州の汀線は大きく湾曲するとともに、中央部の砂州幅が狭くなった。また、図-6によると、河口砂州の先端と右岸との間の開口幅が洪水前の15mより洪水後の80mまで大きく広がったことが明らかである。さらに図-7には1994年12月の深浅図を示す。図-6と比較して、左岸の離岸堤背後の等深線がさらに前進すると同時に、中央部の砂州幅が狭くなった。また砂州の先端では再び砂州が右岸側へと伸び、開口幅が図-6の80mより40mと狭くなった。このことは、砂州の中央部では右岸の離岸堤背後への土砂移動と同時に、砂州の先端方向へと漂

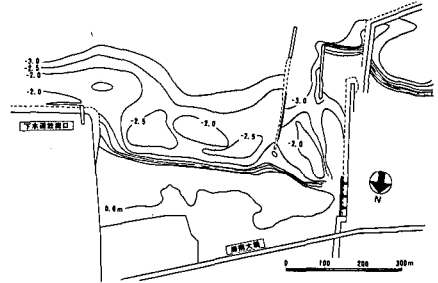


図-5 河口砂州周辺の詳細海底地形 (1994年2月)

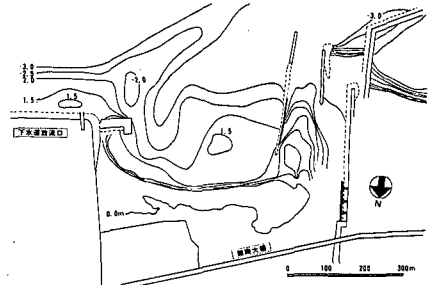


図-6 河口砂州周辺の詳細海底地形 (1994年10月)

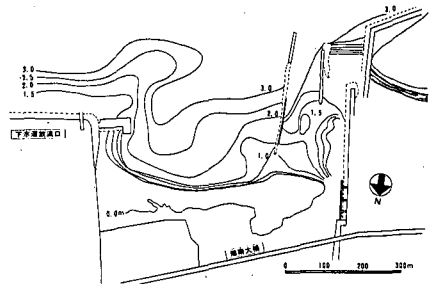


図-7 河口砂州周辺の詳細海底地形 (1994年12月)

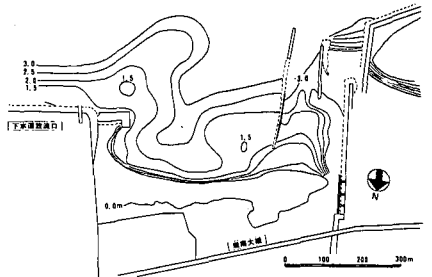


図-8 河口砂州周辺の詳細海底地形 (1995年2月)

砂移動が生じたことを示している。一方、沖合の海底形状に着目すると、図-6では、河口テラスに沿って斜め沖向きに細長く伸びていた-3mの等深線が、岸向きにつぶれるようにして岸側に近づいている。このことは、テラスに沿った岸向きの漂砂移動の存在を示唆している。

図-8は、1995年2月の深浅図である。図-7の状態と比較して、離岸堤の斜め沖方向に等深線の大きな膨らみがある点はよく似ているが、離岸堤の先端部が浅くなり、しかも離岸堤の延長方向に-2, -2.5mの等深線が大きく膨らみ、図-7の段階では深みであった場所が浅くなっている。また、離岸堤の背後でも等深線が前進している。以上の等深線の変化は、離岸堤の周辺へと沖合より岸向きに漂砂が移動し、離岸堤の先端部が浅くなったことを示している。

5. 河口砂州の汀線変化

1991年8月と、1994年2月～1995年2月における砂州の変化は既に明らかであるが、これらの変化が長期的意味でどのような時期に当たっていたかを調べることは重要である。そこで、砂州汀線の長期的変化を調べた。河口砂州上では図-9に示す測線配置にもとづいて測量が行われている。すなわち測線 No. 1～No. 6 は右岸側に、No. 7～No. 29 は左岸側に配置されている。図-10には、河口兩岸の代表測線における汀線の経時変化を示す。汀線変化の基準は、1988年8月とし、それからの変化量が示されている。これによると、中導流堤より東側の測線は互によく似た変化を遂げ、1990年以降後退傾向が続いている。図-10によると、図-1に地形変化を示した1991年は著しい汀線後退の開始直後に、また1994年～1995年の汀線変化は1988年の状態と比較して全体に汀線が100～150mも後退した後の変化であり、しかもいまだ安定状態には達していない時期であったことが分かる。

図-11には、汀線の後退が最も典型的に起きた測線 No. 14 を選んで、砂州の縦断面変化を示した。これによると、河口砂州は砂州高の T.P. 2.5m より水深約 2m の間で、1/7 のほぼ一定勾配を保ちつつ後退したことが分かる。また図-12に示すように $\Delta A(m^2)$, $\Delta y(m)$ を定義して両者の相関を調べると、相関係数 $R=0.99$ で次式が成立する。

$$\Delta A = 4.39 \Delta y \quad (1)$$

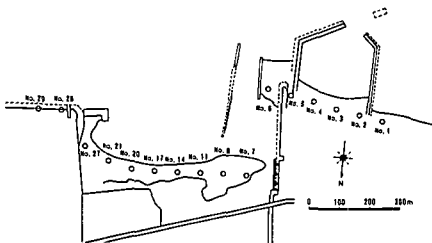


図-9 河口砂州上の測線配置

式(1)の相関関係が良好なことからも、砂州の平行移動状況が理解できる。

6. 河口テラス上の海浜流の計算

洪水により沖向きに流出した土砂の砂州への回帰過程には、河口沖テラス上での海浜流が重要な効果を持つと考えられる。そこで、海浜流の数値計算を行った。まず、波浪場については、放物型方程式の数値計算法を用いて予測した。波の入射方向は河口部で卓越すると考えられる S 方向とし、入射波高としては、平塚沖での波浪観測データをもとに過去 10 年間の年最大有義波高の平均とし、 $H=4.3m$, $T=8.3s$ とした。海底地形条件としては、1994年10月の深浅データを与えた。波浪変形・海浜流計算ともに 10m 間隔の正方形格子で、境界からの流入・流出および河川流量は 0 とした。また海底摩擦係数は一般的に用いられている $f=0.01$ を採用した。図-13には海浜流計算の結果を示す。河口中心より左岸側の流れに注目すると、テラスの外縁に沿う碎波により斜め岸向きの強い流れが発達し、河口出発点で減速しつつ砂州方向へ流

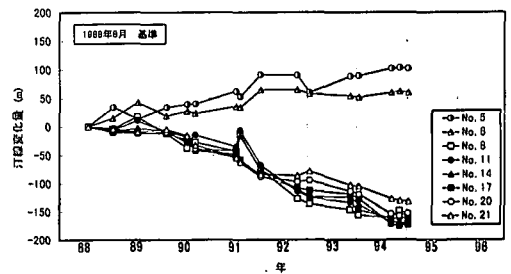


図-10 各測線上における汀線の経時変化

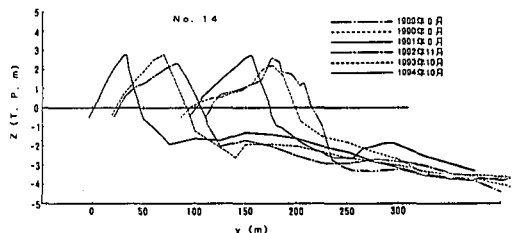


図-11 測線 No. 14 における海浜縦断面形の変化

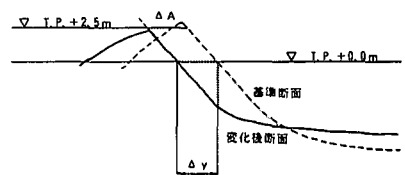


図-12 砂州の断面積変化量と汀線変化量の定義

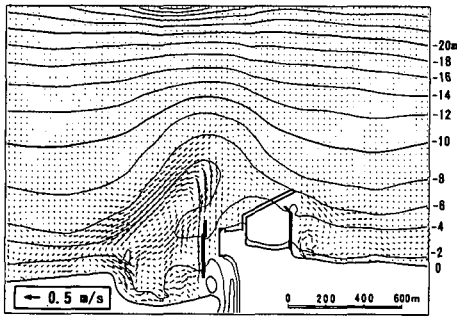


図-13 河口テラス上の海浜流の流況

れの向きを変え、その後は緩やかに沖向きの流れとなつて流出し、全体として反時計回りの循環流が形成されている。この流れは、図-2の土砂移動サイクルにおいて、洪水により沖へ流出した土砂の岸側への回帰の直接的外力になりうると考えられる。

7. 考 察

本研究で得られたいくつかのデータを総合的に検討し、図-2の土砂移動サイクルの妥当性について検討してみる。まず、図-2のステージⅠについては、1991年洪水(図-1)と1994年洪水(図-3)で妥当性が確認される。ただし、1994年洪水では流量規模が $Q=1250 \text{ m}^3/\text{s}$ と1991年洪水の $Q=3600 \text{ m}^3/\text{s}$ と比較して小さかったため、砂州からのフラッシュ土砂はテラスの外縁まで流出せず、テラス上で堆積した傾向が強い。図-2のステージⅡについては、図-6, 7, 8の比較においてテラスに沿って斜め岸向きに土砂が移動したことが明らかであり、またその外力としては、図-13に示した斜め岸向きの流れがあげられる。さらに図-2のステージⅢの過程は、図-6, 7, 8において河口砂州の先端部が時間経過とともに右岸に向けて伸びていくことから理解できる。以上のように、本研究では宇多ほか(1994)が立てた河口での土砂移動サイクルの仮説が妥当なことを現地データにもとづいて確認することができた。

相模川河口砂州とその沖のテラスの間で上述の土砂移動サイクルが生じている限り、長期的にはネットの意味で土砂量は減少しない。一方、河口砂州はすでに示したように大きく後退してきている。この原因は、砂州の先端が右岸側に大きく伸びて航路の障害となるため、航路の浚渫が行われ、これによりこのサイクル系の外へ土砂が搬出されていることにある。現在のところ浚渫土砂の一部は図-9に示す右岸導流堤と東防波堤の間に、またその他は左岸の護岸付近に置かれている。浚渫が続くと、土砂移動サイクルのステージⅡの機構により砂州先端への土砂移動が起こるので、ただちに砂州の後退を招くことになる。これを防止するためには、図-9に示す中導流堤を上流方向に延長し、ステージⅡでの土砂移動を断つことが必要である。

8. あとがき

現在、相模川河口では中導流堤が上流方向に延長されつつあるが、この導流堤は河道法線に対してやや斜行している。したがって洪水時に水位の堰上げ要因となるが、一方でこのまま砂州を放置すれば、砂州自体が消失する恐れが強い。砂州の消失は、塩水・波の遡上や、砂州背後の干潟の喪失を招くなど、環境へ大きな影響を及ぼす。このことから、現地で追跡調査を進めつつ慎重に工事を進める必要があると考える。

参 考 文 献

- 藤井友睦・宇多高明・綿貫布征・鴨下由男・木村慎二(1988): 相模川河口部の地形変化実態, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 447-451.
- 桑原直樹・田中 仁(1994): 名取川河口地形変化の数値計算, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 501-505.
- 宇多高明(1989): 洪水流と波による相模川河口デルタの変形実態の調査, 第33回水理講演会論文集, pp. 307-312.
- 宇多高明・高橋 晃・松田英明(1994): 実測データに基づく河口部での土砂移動サイクルの提案, 第49回年講演概要集, pp. 750-751.
- 宇多高明・松田英明(1995): 雄物川河口に見る河口沖テラスと河口砂州の形成・消失の相互関係, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 566-570.