

礫の挙動に着目した天竜川河口周辺の土砂移動機構の解明

A Field Study on the Movement of Sand and Gravel around the River Mouth of the Tenryu River

佐藤慎司¹・大畑俊和²・田島芳満³

Shinji SATO, Toshikazu OHATA and Yoshimitsu TAJIMA

A field investigation was conducted on the eroding coast around the river mouth of the Tenryu River, where the coast covered by sand and gravel experienced severe erosion due to the decrease in sand supply from the river. The movement of gravels was monitored in the period from August to December, 2006, when sand and gravels supplied by a flood in July were transported alongshore. The beach surface was found to be mostly covered by sand under moderate waves. Gravels were found to be predominant only in the vicinity of structures, such as detached breakwaters and a jetty. However, gravel layers were found to be present below the surface sand layer. The role of the gravel layer in maintaining the beach topography around the river mouth was discussed.

1. はじめに

ナイル川や黄河など土砂輸送量の豊富な河川の河口周辺で海岸侵食が激しいところが多い。わが国でも、安倍川と静岡・清水海岸、信濃川と新潟海岸、日野川と皆生海岸など、土砂採取や各種構造物の建設など流砂系の環境変化が海岸侵食に大きな影響を与えている事例も多い。天竜川・遠州灘流砂系でも激しい侵食が進行中であり(例えば宇多ら, 1994), 特に河口部では右岸側の浜松五島海岸では1972年から、左岸側の竜洋海岸では1992年から離岸堤の施工を中心とする侵食対策が実施されている。最近では、侵食域がさらに下手へと広がり、馬込川西部の中田島砂丘でも、砂丘内低地に埋めたゴミが流出するなどの問題が生じている。

天竜川ダム再編事業などで、貯水池から土砂を排出し河川からの土砂供給を増やす方策が検討されているが、流砂系の環境復元を効率的に進めるには、大小さまざまな粒径の混合砂礫で特徴づけられる天竜川の供給土砂に対して、河道・河口・海岸での挙動をきめ細かく予測することが必要である。佐藤ら(2004)は、混合粒径砂礫の河川および沿岸における輸送を表現する数値モデルを用いて、河口部にさまざまな粒径の砂礫を供給した場合の海岸地形の応答を分析している。しかしながら、波と流れが複雑に影響する河口周辺における混合粒径砂礫の挙動については、モデルを検証するための現地データも乏しいのが現状であり、環境変化予測の信頼性を高めるためにも、過去数十年にわたる土砂移動履歴を含めた土

砂移動機構を実証的に解明する必要がある。

本研究では、土砂供給量が豊富で河口および海岸部で広い範囲の粒径の砂礫が観察される天竜川河口部において、河道部では卓越するものの、砂が卓越する海岸では観察されにくくなる礫の挙動に注目した調査を実施し、河口地形の維持における礫の役割を明らかにすることを目的とする。そして、砂礫の移動機構を解釈して、今後の土砂供給シナリオの有効性を検討するうえで有用なデータを取得することを目指す。

2. 天竜川河口周辺の地形変化と侵食対策

図-1および図-2に、空中写真から読み取った河口部左右岸の汀線変化を示す。本研究では、右岸では馬込川から河口砂州つけ根までの浜松五島海岸および砂州部、左岸では河口から離岸堤群東端までの竜洋海岸および磐田海岸を対象とする。

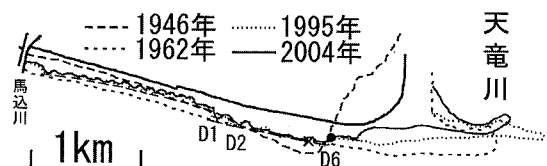


図-1 河口部右岸(浜松五島海岸・砂州部)の汀線変化 (×:旧五島灯台, ●:五島灯台移設位置, 細実線は海岸堤防)



図-2 河口部左岸(竜洋海岸・磐田海岸)の汀線変化 (×:旧掛塚灯台, ●:掛塚灯台移設位置, 細実線は海岸堤防)

1 フェロー 工博	東京大学教授 大学院工学系研究科社会基盤学専攻
2 非会員	元東京大学工学部社会基盤学科
3 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

左右両海岸ともに河口デルタ特有の海に向かって突出した地形であるが、近年の変形状況には大きな違いが見てとれる。浜松五島海岸では、1962年にすでに侵食が顕著であり、突堤、消波堤に続き、1972年からは図中D1からD6の記号で示した離岸堤の建設が始まっている（建設省浜松工事事務所、1991）。これに対して竜洋海岸ではやや遅れて1990年頃に侵食が顕著となり、1992年から1995年にかけて図に示したB1からB5の5基の離岸堤が設置された。このように侵食時期や地形変化が非対称であるのは、右岸から伸びて固定化している砂州により、河口部のみお筋が近年では左岸側に固定し、そのために土砂供給も主として左岸側に偏っているためと考えられる。空中写真の分析では、少なくとも1962年以後は砂州が右岸から伸び、みお筋が左岸側に固定化していることが推定された。近年では特に右岸側の侵食が激しく、本調査の期間中においても砂州のつけ根部分で、堤防の一部が被災して、復旧工事が進められていた。

河口部の侵食の激しさと左右非対称な海浜変形は、灯台位置の変遷からも伺い知ることができる。河口部には、右岸に五島灯台、左岸に掛塚灯台が設置されていたが、侵食により、灯塔基礎部の露出などが進み、機能の維持が難しくなったため、五島灯台は1963年に若干内陸側に移動した位置に移設され、その後2002年に両灯台を左岸側の掛塚灯台に統合するのに合わせて五島灯台は廃止され掛塚灯台も移設された。図-1、2の中には、海上保安庁から提供された情報をもとに推定したそれぞれの新旧灯台の位置を記載してある。写真-1は、移設前の1962年頃の旧五島灯台が基礎の侵食により傾いていることを示したものである。

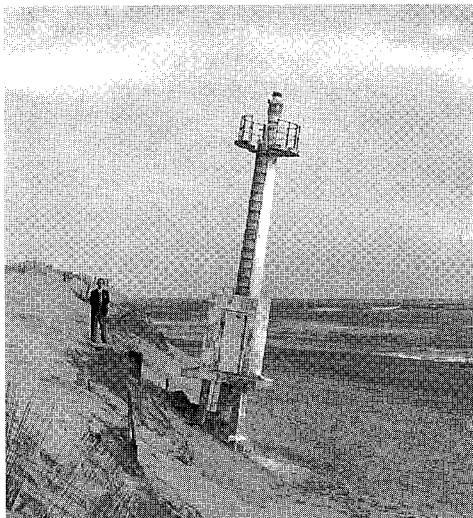


写真-1 1962年頃の旧五島灯台（海上保安庁提供）

3. 河口周辺における礫の挙動

（1）調査の方法

2006年8月25、26日、9月20日、10月4日、12月11日に計4回の調査を実施した。7月19日には鹿島観測所における水位から換算した流量で $6,170 \text{ m}^3/\text{s}$ （暫定値）の出水があり、河口部にも大量の砂礫が供給された。そのため、8月の調査時には、河口左岸に長さ300m程度の砂嘴が海方向に伸びる形で形成されていた。砂嘴の表面はほぼ全面が最大粒径10cm程度の礫で覆われていた。その他の海岸部では、粒径0.3mm程度の砂の上に、礫がパッチ状に散在しているのが観察された。調査では図-1および図-2に示した区間の海浜において、表面に礫が1m四方以上の大きさで集団として分布する箇所的位置を携帯GPSで記録するとともに海浜表面に方形の標尺を当ててデジタルカメラで撮影した。10月以降の調査では、礫パッチの大きさを把握するためにその境界位置形状も記録した。これに加えて8月の調査では最大礫の長径と短径を測定し、9月20日には右岸の離岸堤周辺で海浜の地形を測量した。

（2）礫分布の変化

図-3は、河口部右岸（浜松五島海岸・砂州部）の礫分布を示したものである。黒く塗りつぶされている部分が、表面に礫が分布する領域であり、×印は、礫が散在した箇所を示している。8月の調査では礫領域の境界を記録できなかったため、礫の存在箇所はすべて×印のみで表示してある。8月には砂州部や馬込川導流堤東側の広い範囲で礫が分布していたが、10月と12月には離岸堤開口部付近のみにしか見られなくなった。汀線位置はほとんど変化しなかったが、10月の調査では一部の区間で汀線形状を記録できなかったため、8月の汀線位置を記入してある。図-4は、河口部左岸（竜洋海岸・磐田海岸）の礫分布である。左岸でも8月には河口部で新たに形成された砂嘴上などで大量の礫が見られたが、12月には離岸堤周辺のものに卓越するようになった。左右岸ともに出水直後を除くと、礫は自然海岸部にはほとんど見られないが、構造物周辺で多く見られる傾向が確認できる。ただし、右岸側の離岸堤部では、開口部に礫が安定して見られたのに対し、左岸側の離岸堤部では、出水直後には砂で覆われている部分が多く見られた。

写真-2、写真-3は、竜洋海岸の離岸堤開口部の同一箇所でも撮影されたものであるが、出水直後の8月には砂が卓越しているのに対し、12月には礫が卓越していることが確認できる。竜洋海岸には出水により大量の流木が打ち上げられていたのに対し、右岸側にはほとんど打ち上げられていなかったことから、今回の出水の影響は左岸側のみ顕われていると考えられる。左岸側の離

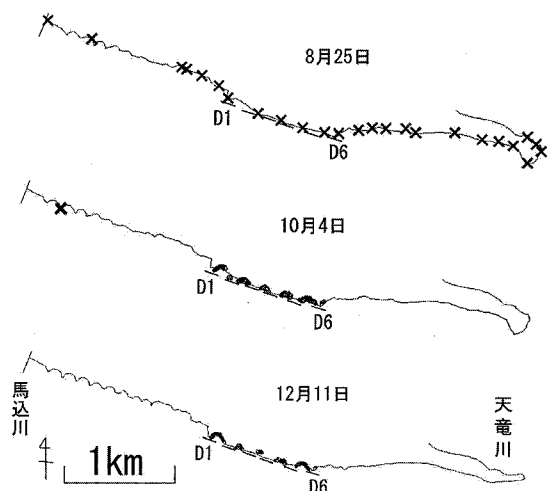


図-3 河口部右岸（浜松五島海岸・砂州部）の礫分布

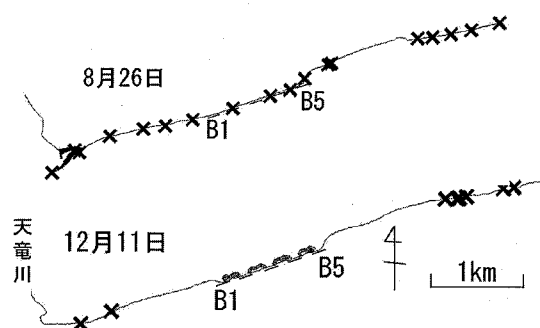


図-4 河口部左岸（竜洋海岸・磐田海岸）の礫分布

岸堤開口部は、写真-2 に示したように出水により供給された砂によって表面が覆われたのに対し、右岸側の離岸堤では土砂の供給がほとんどなかったため、離岸堤開口部表面は礫のままで変化がなかったものと考えられる。

図-5 および図-6 に、8月26日に観測した河口部の表層最大礫の粒径を示す。粒径は、長径と短径の測定値から礫の体積を推定し、球形礫に換算した場合の直径として定義した。礫の最大粒径は、左岸では数 km 離れた地点でも河口部と同様な粒径 10 cm 程度の礫が観察されるが、右岸では、河口から離れるにつれて粒径が漸減する傾向がある。このことから、右岸側では近年は礫の輸送がほとんどないと推定され、沿岸の土砂輸送が非対称であることが推定される。

離岸堤周辺の地形と礫分布は、平面的にも標高で見ても離岸堤の間隔に合わせて規則的に変化していた。例えば、開口部では地形に凹部が見られ、その部分に選択的に礫が集中する傾向があった。図-7 は、9月20日に測量した、右岸側離岸堤周辺の地形と礫の分布を示したものである。地形測量は、岸沖方向には 10 m、沿岸方向

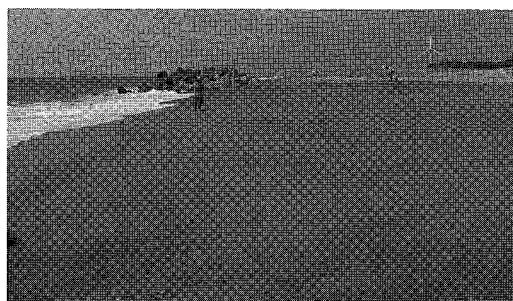


写真-2 砂で覆われた竜洋海岸 B1・B2 離岸堤間の開口部 (8月26日撮影)



写真-3 礫で覆われた竜洋海岸 B1・B2 離岸堤間の開口部 (12月11日撮影)

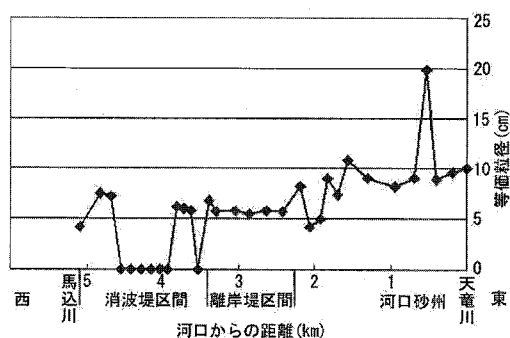


図-5 河口部右岸（浜松五島海岸・砂州部）の最大礫粒径 (8月26日)

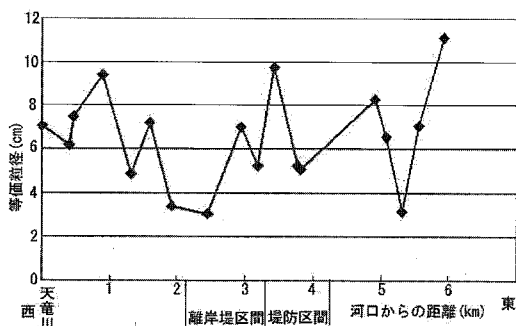


図-6 河口部左岸（竜洋海岸・磐田海岸）の最大礫粒径 (8月26日)

には約 20 m ビッチで合計 28 点での標高を測定した。等高線で表した標高の値は観測時の平均水面からの高さである。開口部の凹部に集中する礫領域のさらに陸側では、主として砂で覆われた凸部が見られ、このような規則的な地形と礫分布は、汀線から約 100 m までの帯状の領域で見られた。この領域が、離岸堤開口部から入射する波の影響を受けて地形が変化する領域であり、これよりさらに陸側の領域は砂で覆われた植生も見られる領域で、飛砂が卓越するものと考えられる。ただし、表面は主として砂で覆われている構造物近傍の海浜も、数十 cm 下層には礫層が存在することを地盤貫入試験やジオスライサによる堆積物調査により確認した。

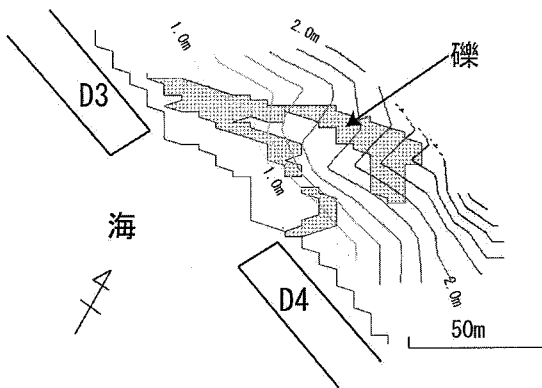


図-7 離岸堤周辺の地形と礫の分布 (9月20日測量)

(3) 砂礫の移動機構

天竜川河口周辺海岸では、砂と礫が観察されるが、砂の粒径は 10^{-1} mm のオーダーなのに対し、礫径は 10¹ mm 以上であるため、両者の粒径には 10² 倍程度の差がある (佐藤ら, 2004)。また、河道には礫が卓越するのに対し、海岸では砂が卓越することが多く、不連続な粒径分布が見られる。出水で河口部に供給された砂と礫は、主として秋冬期の高波の作用により、礫は岸へ、砂は沖へ選択的に移動するものと考えられる。静穏波のもとでは、礫は移動しにくく、砂は岸へ戻る傾向が強まるため、これらの過程が繰り返された結果、海岸部では、写真-4 に示したような砂と礫の互層が形成され、静穏波が継続する通常時には表面は主として砂で覆われていることになる。静穏波のもとでは表層の砂のみが移動することになるため、沿岸漂砂で下手側に輸送されるのは主として砂成分である。礫成分は高波の来襲時にのみ、表面に露出し輸送されるので、移動頻度が低く、移動量も小さいと考えられる。そのため、河口部のように堆積性の海岸では、堆積速度が速い場合には、礫層が河口部付近に残り残されることになる。

図-8 は、河口右岸域における過去のボーリング調査の

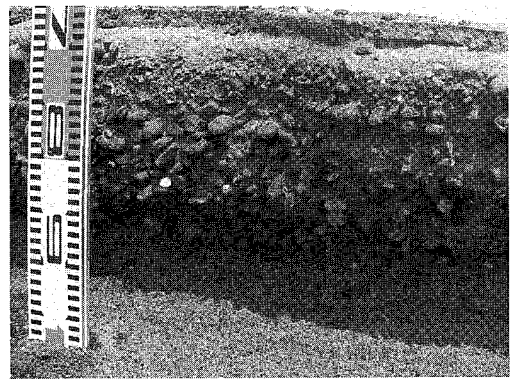


写真-4 砂礫の互層構造 (竜洋海岸離岸堤区間)

結果を収集し、標高を合わせた地質柱状図で並べたものである。かつての天竜川は現在の馬込川付近まで流路となっていたことが知られているが (門村, 1971)、旧河道や河口近くの海岸部に礫と砂の層状構造が残っていることが確認できる。河道や河口周辺に位置した歴史のない中田島砂丘以西では礫層は極めて少なくなる。また、海岸に近い地点である①, ④, ⑨などの地点には、礫混じり砂層または砂礫層と砂層との互層構造も確認できる。これらより、天竜川から供給された礫成分は、河口周辺のせいぜい約 10 km 以内の海岸で砂礫互層構造を形成し、それより遠方には輸送されていないことが確認できる。

海浜過程の点から礫層の役割を考えると、通常は表面の砂層の下に存在する礫層は、高波時には表面に露出し、海岸を保護するものと考えられる。したがって、表面には砂成分が卓越する河口部周辺の海岸でも、土砂供給量が減少し侵食に転じると、礫の露出頻度が上がり、より多くの礫が下手へ輸送されるようになると考えられる。その結果、砂礫の互層が形成できなくなり高波に対して脆弱な海浜に変化していくことになる。これらより、天竜川河口部のデルタ地形を安定して維持するためには、一定量の礫を供給し続けて礫層を維持する必要があると考えられる。

上に述べたような砂と礫の選択的挙動により、自然海浜は通常時には砂で覆われていることが多くなるが、図-3、図-4 に示したように、構造物周辺では表面にも礫が露出していることが多い。この理由としては、構造物周辺では土砂の移動が制限されるため砂成分が十分に供給されないこと、構造物の存在により波が局部的に高くなること、などが考えられる。そのため、構造物周辺の波当たりの強い場所では常時表面に礫が観察されるようになる。ただし、構造物を回り込んで十分な土砂の供給があると、竜洋海岸の 12 月の調査結果のように一時的に表面を砂で覆われることもある。礫は構造物を越えて移動することは少ないが、砂は比較的容易に移動するため、供給が少なくなると再び礫が露出するようになる

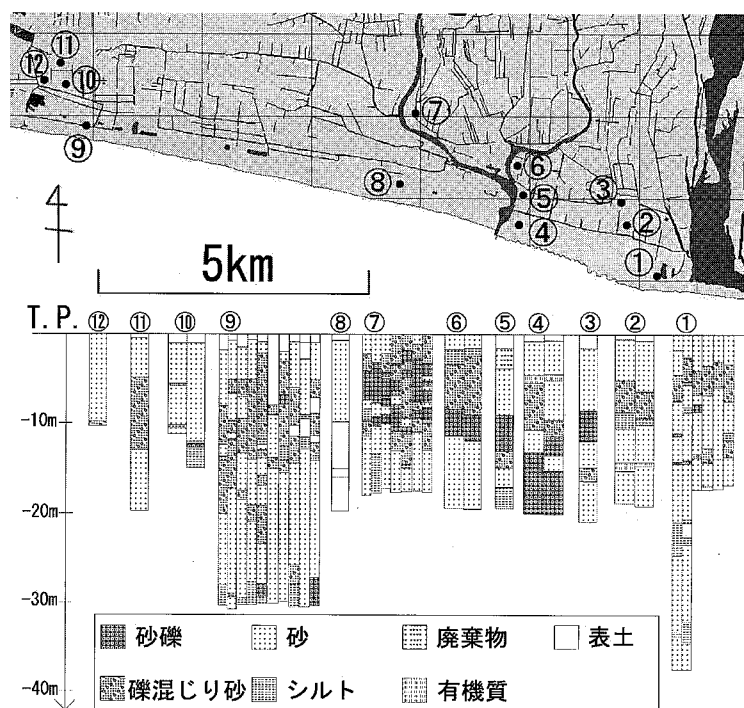


図-8 河口右岸域におけるボーリング調査地点と地質柱状図

と考えられる。右岸側の浜松五島海岸においても、設置水深の大きい離岸堤区間では礫が卓越しているが、消波堤区間では表面を砂で覆われている部分が多い。これも、消波堤の方が構造物を回り込む漂砂量が多いためと考えられる。これらより、今後さらに侵食が進むと、消波堤区間でも礫が卓越するようになる可能性があると考えられ、地形形状だけでなく底質の変化にも注意した監視が重要である。

馬込川導流堤上手側では、図-3 に示したように8月には礫が露出していたが、10月および12月には、表面は全面を砂で覆われていた。これは、東から入射する波が多くなる秋から冬にかけては西向きの沿岸漂砂が卓越するため、導流堤で沿岸漂砂が捕捉された結果、礫層が砂で覆われたものと考えられる。このように、土砂の輸送が強く制限される構造物近傍では、通常時においても礫が卓越する可能性が高くなり、礫の露出頻度は土砂供給量の変化を監視する有効な指標となると考えられる。

4. おわりに

激しい海岸侵食が継続している天竜川河口において、出水直後から約4ヶ月の期間にわたって礫の挙動を追跡した。海浜表面では、礫は構造物周辺にのみ卓越して見られ、自然海浜では小さなパッチ状で見られるのみであった。出水直後には大量の礫で覆われた河口部においても通常波のもとでは砂が表面に卓越することが観察され

た。同時に、表層の砂層の下には広い範囲で礫層が分布しており、砂と礫の互層構造が、耐波性能の高い海浜を形成していることが確認できた。河口部の地形を維持するためには、海浜表層を形成する砂成分だけでなく、互層構造を形成して地形を維持する一定量の礫の供給が不可欠であると考えられる。

今後は海浜のコア試料を採取・分析するなどして、河口周辺地形の維持に必要な砂礫量と、離岸堤や導流堤による砂礫の捕捉量などを定量的に解明する予定である。

謝辞：本研究の一部は、科学技術振興調整費重点課題解決型研究「先端技術を用いた動的土砂管理と沿岸防災」および日本学術振興会科学研究費による研究成果である。現地観測と各種データの収集には、浜松市、国土交通省浜松河川国道事務所、海上保安庁の協力を得た。ここに記して深甚なる謝意を表す。

参考文献

- 宇多高明・鈴木忠彦・大石守伸・山本雅彦・大谷靖郎(1994)：天竜川河口砂洲の伸長に伴う河岸侵食と海浜変形，海岸工学論文集，第41巻，pp. 481-485.
- 建設省浜松工事事務所(1991)：遠州海岸，319p.
- 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.
- 門村 浩(1971)：扇状地の微地形とその形成，扇状地（矢沢・戸谷・貝塚編），古今書院，pp. 55-96.