

流域と海域を繋ぐ総合的土砂管理の実現 に向けた実践的フィールド研究

筑波大学 教授 武若 聡

概要：

わが国は流域から海域にかけての「総合的な土砂管理」の推進を閣議決定し、高度に土砂移動を管理することを目指している。本研究は、これを実現するのに必要な土砂移動量の観測と診断をする総合的なシステムを構築することを目的とする。フィールド観測、数値解析、モデル実験を行い、流域から海域にかけての土砂移動をモニタリングし、その特性を理解することを目指す。天竜川で展開した研究により次の成果を得た。(1) 河川域の土砂移動を数値モデルで再現し河道の形状の影響を調べた、(2) Xバンドレーダによる出水、暴浪等による河道、砂州等の地形変化を連続的に観測した、(3) 固定カメラ、高頻度測量の組み合わせによる河口砂州の変形過程ならびに沿岸域の地形変動を分析した、(4) 多数のシラス漁船に装着した測深器による流域-海域の広範囲・高頻度水深測定を行い、沿岸域の地形変動特性を明らかにした、(5) 砂浜形成に寄与しない深海部への土砂損失の評価を実験的に行った。

キーワード：総合土砂管理，流域，河口域，沿岸域，地形の観測，天竜川

1. 研究の目的

わが国は、流域から海域にかけての「総合的な土砂管理」の推進を閣議決定し、高度に土砂移動を管理することを目指している。本研究は、これを実現するのに必要な土砂移動量の観測と診断をする総合的なシステムを構築することを目的とする。具体的には、フィールド観測、数値解析、モデル実験を行い、流域から海域にかけての土砂移動をモニタリングし、その特性を理解することを目指す。

研究は天竜川とその沿岸域で実施した。図-1に研究項目と各研究者の役割を示す。研究項目の概要は以下であり、以降では、各研究項目の成果を説明し、最後に研究の総括を示す。

- 1) 河川域の土砂移動を数値モデルで再現し、樹林化、ダム堆砂等の影響の評価
- 2) Xバンドレーダによる出水、暴浪等による河道、砂州等の地形変化の連続観測
- 3) 固定カメラ、高頻度測量の組み合わせによる河口砂州と沿岸域地形の変形過程の分析
- 4) 多数のシラス漁船に装着した測深器による流域-海域の広範囲・高頻度水深測定
- 5) 砂浜形成に寄与しない深海部への土砂損失の評価

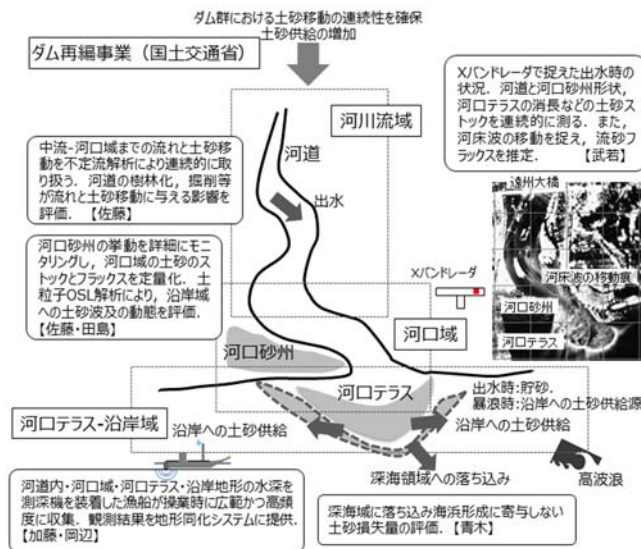


図-1 研究項目と各研究者の役割

2. 流域から海域への土砂供給の分析

遠州灘海岸の汀線維持に有効な土砂は、現在、天竜川下流部の支川気田川からの流入土砂によるところが大きいとされている。また中流部にはこの他にも大千瀬川や水窪川など、自然状態であれば土砂供給量が期待される重要な

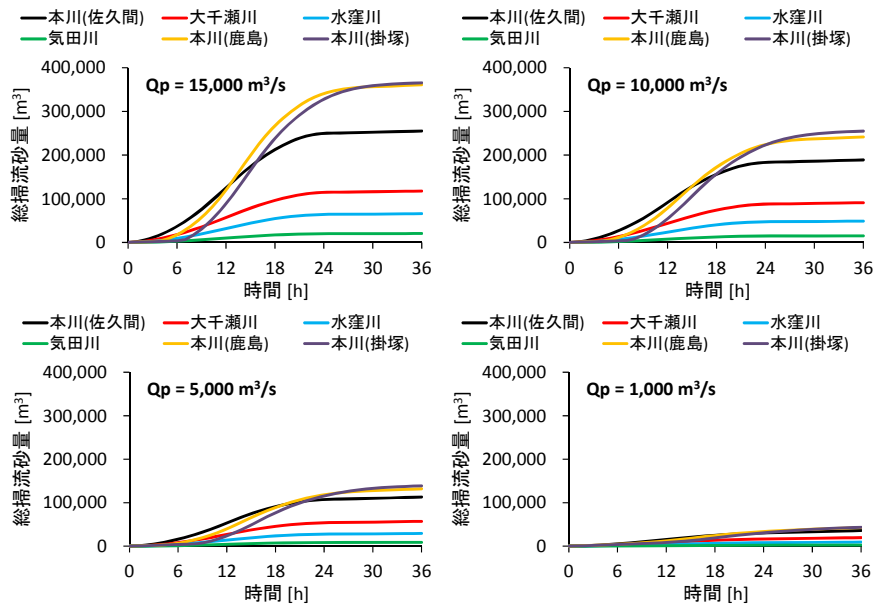


図-2 各計算地点の総掃流砂量

支川群が流入している。このような支川群の合流部では、流速が落ち堆砂し、土砂の一部が海岸まで到達しないことや、本川でも輸送土砂が河道の幾何形状（幅や勾配）によって河道内に残存する可能性がある。河道を通過する、あるいは、滞留する土砂輸送の評価は今後の当該流砂系保全にとって重要であり、ここでは1次元の河道網に対する不定流計算と河床変動計算を行った。

計算モデルは、流れ場を1次元のDynamic Wave ModelをTVD-MacCormack法で解き、土砂輸送量は掃流砂を仮定して芦田・道上による修正Egiazaroff式を用い、掃流砂量を推定した。限界掃流力の評価には岩垣式を用いた。

土砂は、現在の遠州灘海岸の構成砂の粒径から0.5 mmの単一砂とした。河道は、天竜川本川は佐久間ダム直下から、潮位の影響を受ける上流端である掛塚までの69 km区間とした。この区間に大千瀬川、水窪川、気田川をそれぞれ6 kmの延長で合流させた。河道の形状は平成15年の測量結果（平均河床勾配等）を用い、また堤防間幅で計算横断面は矩形近似し、粗度係数は全て0.025 s/m^{1/3}とした。洪水は鹿島基準地点での基底流量を200 m³/s、ピーク流量を計画規模相当の15,000 m³/sの他、10,000 m³/s、5,000 m³/s、1,000 m³/sと様々な規模を想定した。ハイドログラフは、単峰三角形で洪水継続時間を24時間、ピーク発生を12時間とし、これを一定の割合で各河川の上流端に按分した。各河川の上流端と本川下流端の河床標高は動的平衡状態とした。なお、ダム操作モデルは内部境界に含んでいない。

上で設定した河道モデルに単一洪水を流下させると、多くが鹿島上流の河床に堆積し、極端に下流の通過土砂量が少なくなった。これを緩和させるために、河床変動と掃流砂量がほぼ正常になるまで基底流量200 m³/sを長時間流下させスピナップした上で、あらためてモデル上の初期河床標高とした。

図-2に各計算地点の総掃流砂量を示す。各河川上流端か

らの土砂流入量と鹿島と掛塚からの流出量を比較すると、鹿島では洪水規模によって63-79%程度、掛塚では64-80%となった。つまり、単一の洪水イベントでは20-40%程度の土砂が上流河道にとどまることを意味している。合流部や川幅の拡幅部、緩勾配への遷移部などでこのような土砂捕捉がなされていることが示唆される。

現在、置土などにより、佐久間ダム下流からの土砂供給量を増加させる計画がある。ここではそのような状況を想定し、本川上流端から約1.5倍となる掃流砂を与え、下流での増加について追検討した。その結果、鹿島や掛塚で顕著な土砂量の増加は見られなかった。すなわち、増加土砂量は数回の洪水イベントを経た後、遠州灘海岸に到達すると考えられる。

3. 河口域の地形変動特性

ダム再編の効果が現れるのに備え、河川から海域への土砂供給プロセスを調べた。土砂が流出する出水時に注目し、Xバンドレーダによる河口地形の観測、数値計算による土砂移動の再現を行い、河川から海域の土砂の到達過程を調べた。Xバンドレーダによる地形の観測は静岡県浜松市に位置する天竜川河口で行い、2007年から2017年にかけて収集されたデータを解析した。

右岸と左岸の最短距離を河口幅と定義し、この変化を調べた。出水時には急拡し、その後、徐々に狭くなるというサイクルが見られた。河川流量が500 m³/s以上となる期間を出水と定義し、計24回の出水について河口の拡幅状況を分析した。出水期間中の平均流量 Q_A と河口幅拡幅量 ΔB との関係を調べた。その結果、 Q_A が増加すると ΔB が大きくなること、出水前の河口幅 B_0 が小さいほど同程度の Q_A に対して ΔB が大きくなる傾向にあることがわかった。具体的には、超過確率3年程度の出水($Q_A \sim 1,500 \text{ m}^3/\text{s}$)の場合、河口幅の拡幅 ΔB は150 mから200 m程度となる。

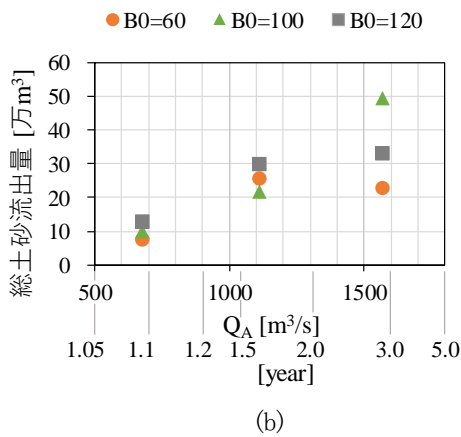
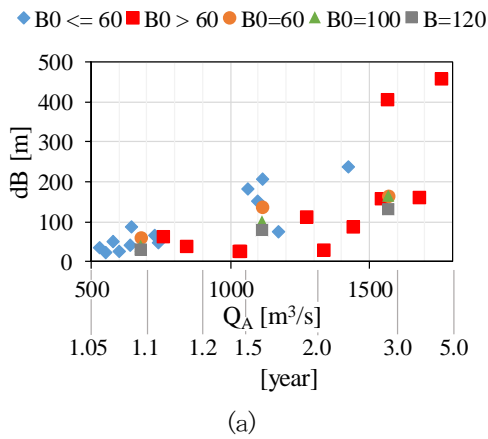


図-4 出水規模 Q_A とその超過確率年

(a) Q_A と河口幅量 dB の関係

(b) Q_A と河口テラス域への土砂排出量の関係

iRIC (<http://i-ric.org>) が提供する河床変動解析ソフト (Nays2DH ソルバー) を使用し出水時の河口付近の流れ場とこれに伴う地形変化を計算した。まず、地形変動の再現計算を行い、計算パラメータ (河床材料粒径, 河床摩擦係数, 植生の有無設定等) のチューニングを行った。その結果、出水中の洪水波形, 出水前後の地形変化等をおおむね再現することが可能となった。これらのパラメータを用い、 Q_A と B_0 を変化させて dB を調べた。計算結果では、出水により河口砂州の先端が侵食され、河口部の滞筋が明確になる状況が再現された。図4は出水の規模を変化させて、河口幅量 dB と河口テラス域への土砂排出量の間を調べた結果である。超過確率3年程度の出水 ($Q_A \sim 1,500 \text{ m}^3/\text{s}$) の場合、河口幅の幅量 dB は 150 m から 200 m 程度、河口テラス域に供給される土砂量は 20 から 40 万 m^3 となると評価された。

4. 沿岸域の海底地形変化の分析

流砂系の土砂管理を進めるうえでは、河川と海岸の結節点である河口の諸現象の理解が重要となる。河口砂州の存在, 形状等は簡単に観察をすることが可能で、河口砂州の変形, 消滅, 再生等を追跡することで土砂供給に関する状況を知ることができれば、土砂管理の基本的な情報とする

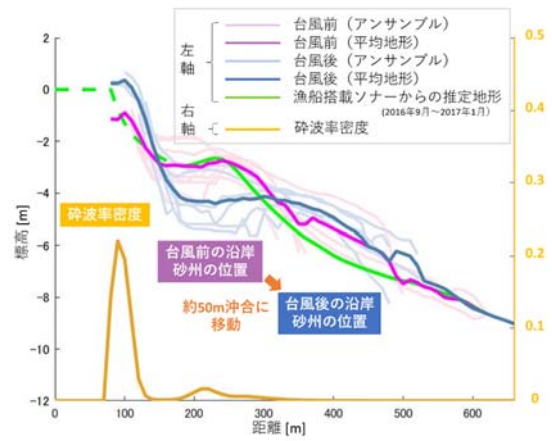


図-5 砕波率密度と台風前後の海岸地形 (静岡県福田浅羽海岸)

ことが可能になる。海岸侵食の機構解明や対策検討においては、砕波帯を中心とする沿岸域地形を、高精度、高頻度、広範囲で把握する必要がある。精度は高いものの高価となりがちな深浅測量や音響測深に加え、近年では、監視カメラ時間平均画像の解析などによる浅海域の地形変化分析があるが、定量的な評価を行うまでには至っていない。本研究では、監視カメラによって撮影された画像を用いて、汀線近傍から底質の移動限界水深までの海岸地形を高解像度で定量化できる手法の構築を目的とした。

遠州灘にある静岡県福田浅羽海岸に設置された8台の監視カメラによって2秒間隔で撮影された画像を平面直角座標に変換し、各ピクセルにおける輝度値の変化を分析した。砕波により輝度値が急増するため、輝度値がある閾値を超えた回数から砕波率密度を推定した。一方、不規則波の砕波モデルを導入すれば、入射不規則波の諸元と海浜断面地形が既知であれば、砕波率密度の岸沖分布を計算することができる。本研究では、監視カメラ画像から推定された砕波率密度の分布が、合田(1975)の砕波モデルの砕波率密度に最も適合するように沖から順に水深を逆推定することにより、海浜地形を評価することとした。沿岸砂州の背後など、砕波率がゼロとなる地点では、砕波を生じさせない最小水深を推定値とした。砕波率密度の評価においては、カメラから遠い位置ほど縮小率が高くなるとともに、俯角が小さくなり砕波の白波範囲が引き延ばされて写しこまれるなどの理由により、カメラからの距離に基づく補正係数を導入することにより砕波率密度の修正を行うこととした。水深が既知である岸沖測線において、合田の砕波モデルを適用して得られた砕波率密度と監視カメラから得られた砕波率密度の比をより、砕波率密度の補正係数はカメラからの距離の4乗に反比例すると設定した。

2017年10月23日に来襲した台風21号前後の海浜地形変化を分析対象とした。竜洋観測所の毎時波浪観測値を用い、沖から岸に向けて順に水深を推定した。これを監視カメラの撮影範囲全域の岸沖断面に対して適用した。台風来襲前の10日間において、さまざまな波浪条件における海

浜地形を推定し、それらのアンサンブル平均を取ることで、図5の赤線に表されるように、沖浜から汀線近傍までの海浜地形を推定した。観測時期は半年から1年程度異なるものの、岡辺らの漁船搭載ソナーから推定した地形や、深淺測量の結果と概ね一致する結果となり、さらに同海岸の特徴である沿岸砂州の形状も再現することができた。構築した手法を用いて台風21号来襲後の地形を推定したものが、図中の青線である。台風前の地形（赤線）に比べて、沿岸砂州の位置が沖に50 mほど移動しているのが確認でき、台風による高波浪による沖向きの土砂移動を捉えたものと考えられる。構築した手法は、砕波密度の推定を介して変動の大きい汀線付近の地形を高解像度で監視でき、土砂動態の解明や各種侵食対策の性能評価として活用が可能である。

5. 沿岸域の地形変動のモニタリング

河口テラスにストックされた土砂が、波浪によって周辺の沿岸へ供給されるプロセスを把握するためには、頻度の高いテラス域の地形モニタリングを実施するとともに、その情報から沿岸漂砂量を把握する必要がある。これまでに、漁船に搭載されている魚群探知機とプロッタのロギング情報を用いた海底地形モニタリング手法を構築してきた。ここでは、この地形データを基に、天竜川河口域から分配された土砂が近傍海岸でどのように移動しているかを検討した。

天竜川河口から約10 km 東側に位置する太田川河口および福田漁港周辺の海域を対象とした。天竜川河口から東向きに分配された沿岸漂砂 (Q_{in}) により、太田川は河口閉塞を生じるとともに、漁港防波堤前面に顕著な堆積が生じているほか、漁港内の堆積や航路埋没リスクの高い状態が続いている。

遠州灘を操業する26隻の漁船から取得する対象海域の地形データ（以下、漁船データ）は、その航行中の水深、位置、時刻情報から算出したものを用いた。漁船の安全のため汀線近傍の地形取得できないものの、水深約4 m以深の海底地形を広域・高頻度にモニタリングできる。沿岸漂砂量推定のために2014、2015、2016年の毎秋の海底地形を用いた。地形データを生成した期間は2014年10月中旬～11月末、2015年10月下旬～12月初旬、2016年10月末～2016年11月下旬であり、これらを毎年11月の地形として扱った。

海底地形データは、漁船が操業できない水深およそ4 m以浅の情報が欠落している。ここでは、それ以深の地形変化量を算出し、沖合での沿岸漂砂として評価した。従って、正確な沿岸漂砂量ではなく、沖合で生じている沿岸漂砂の特徴を定性的に捉えている点に注意が必要である。推定領域の設定と土砂フラックスを行うが、計測できない領域については次の仮定を行った。地形データが欠落している領域には海岸との土砂のやりとり Q_b のほか、浅いエリアでの

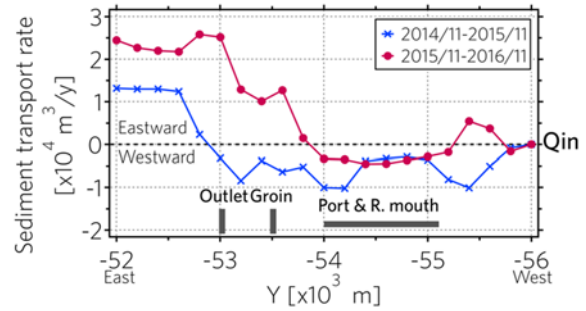


図-6 対象海域の沖合における沿岸漂砂量の分布（静岡県福田浅羽海岸）

沿岸漂砂量 Q_{in1} 、 Q_{in2} や沖合領域との岸沖漂砂量 Q_{oc} が存在するものの、ここでは、これら漂砂量は考慮しないものとし、沖合での沿岸漂砂量 Q_1 および Q_2 を土砂量の保存則より求めた。なお、水深の差分分析においては、本手法による地形の精度を考慮し、0.5 m より小さな水深変化は考慮していない。

図-6 は対象海域における2014～2015年および2015～2016年の沖合（水深約4～15 m）の沿岸漂砂量分布である。ここでは天竜川河口からの沿岸漂砂 Q_{in} を基準とし、正が東向きを示している。漁港東端と比較して、港の下手側では東向きの漂砂量が $2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{y}$ 以上へと増加しており、海域の土砂量減少が続いていることを示している。領域東端の沖合では Q_{in} に対して $1 \sim 2.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{y}$ の土砂量が東向きに通過していることがわかる。河口・漁港前面では両年とも漂砂量に大きな差はないものの、その漂砂上手（天竜川）側では侵食と堆積の傾向は逆転していた。福田漁港を通過する土砂量は約 $13 \sim 14 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{y}$ との既報があるが、本手法でも同程度の沿岸漂砂量を示している。ここで得られた沖合での沿岸漂砂量は定性的ではあるものの、天竜川河口から近隣海岸へ分配された土砂が、構造物や異なる河口によって捕捉されつつ、下手側へ輸送されていく土砂収支の傾向を捉えていると考えられる。

6. 河口から供給された土砂の深海部への輸送

近年、河道での土砂対策が本格化しており、大規模出水時には河口域で高濃度の泥水流が発生することが考えられる。一方、河川から流出した土砂が河口周辺海域でどのように輸送・堆積し、波によって海岸に供給されるか、という一連のプロセスについては不明な点が多い。河川からの供給土砂を海岸保全に有効利用するためにも、流出土砂の河口海域での挙動や堆積特性を把握することが重要であり、今後の土砂管理における鍵になると思われる。本研究は、出水時に高密度の泥水流として海域に放出された土砂が、土砂堆積を伴う密度流として海域を流下する際の挙動と堆積特性を実験的に明らかにすることを目的として行ったものであり、特に泥水流に含まれる海浜形成材料とされない細粒分の影響に着目した。

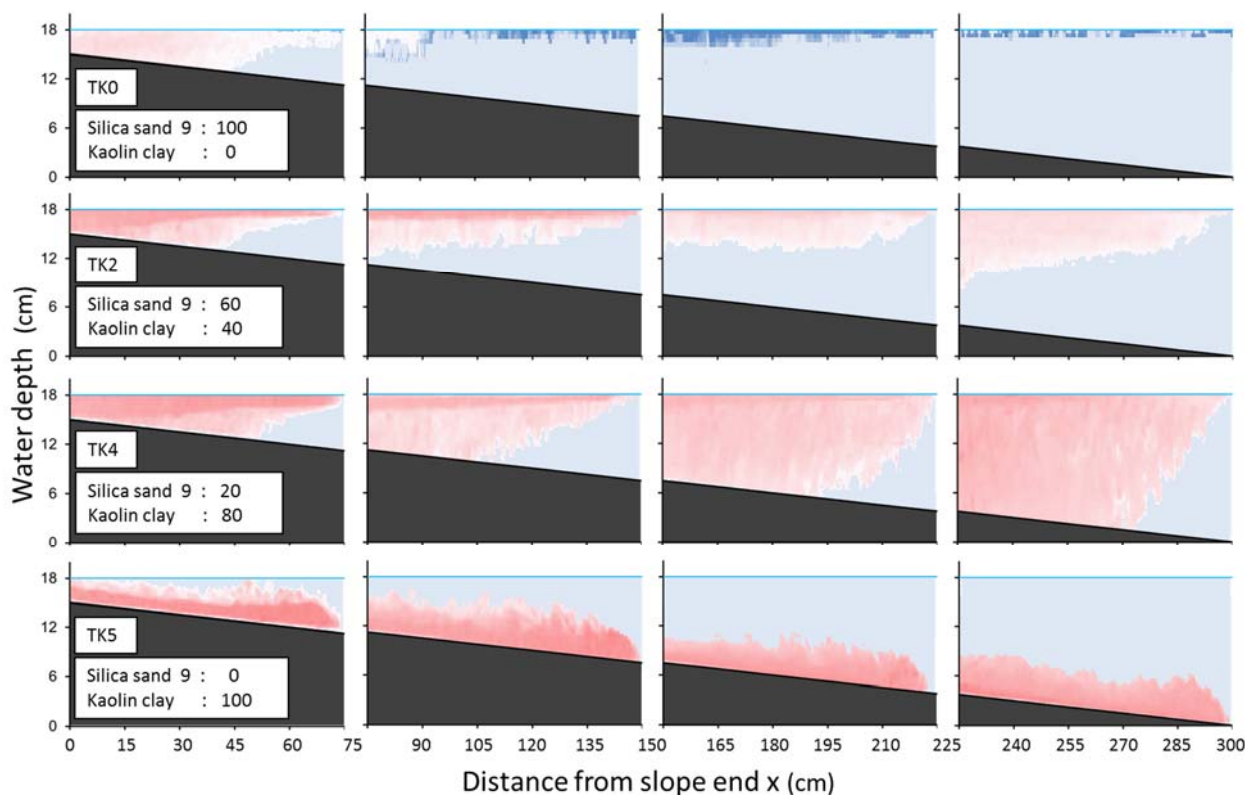


図-6 斜面を流下する泥流の先端速度と層厚の時間変化

模型実験は長さ4 mの水槽を用いて行った。泥水は、淡水に珪砂9号 ($d_{50} = 38.4 \mu\text{m}$) および細粒分としてカオリン ($d_{50} = 6.2 \mu\text{m}$) を混合して作成した。実験は、泥水をポンプでくみ上げ、水槽端部のゲートを開いて淡水または塩水を満たした水槽に流入させた。その時の泥水流の挙動を2台のビデオカメラで撮影した画像から求めた。また、流下に伴って底部に堆積した土粒子は、水槽内の区間①～④でサンプリングし、LISST-100を用いて粒度分析を行った。

実験のケースとしては、TK0は珪砂のみ、TK5はカオリンのみのケースであり、TK2、TK3、TK4はそれぞれ珪砂とカオリンの配合割合を6:4、4:6、2:8としている。

図-6は、長さ75 cmの各区間を泥水塊の先端が通過したときの状況を画像の輝度値をもとにカラー化して示したものである。赤色が濃いほど土粒子の密度が高く、青色は淡水が流動していることを示す。これより、TK0の珪砂のみのケースでは、流入直後に砂が沈降・堆積し、その後は淡水の表層密度流となっていることがわかる。カオリンの割合が高いTK4のケースについても、比較的早く珪砂の沈降が生じるため、高密度の泥水であるにもかかわらず下層密度流にはならないが、表層からの沈降により深部にまで珪砂が運ばれている様子が確認できる。一方、TK5のカオリンのみのケースでは、泥水の密度が低下せず、明確な底層密度流（ハイパーピクナル流）を形成している。

これらの実験結果より、河口部に生じる泥水流は粗粒分の沈降によってその挙動が支配されるが海水よりも高密

度の泥水流であっても粗粒分の沈降にともなう密度低下により表層密度流となる場合が多いことがわかった。ただし、細粒分を多く含む場合は粗粒分の沈降が遅くなり、粗粒分がより深部に輸送される可能性が示唆された。

7. 結言

流域から海域を繋ぐ総合的な土砂管理を行う際には様々な要素技術（土砂移動量の観測と予測技術、土砂の移動量を制御できる構造物等）が必要となる。これを受け、本研究は、土砂移動量の観測と診断をする総合的なシステムを構築することを目標として、天竜川流域から遠州灘海域にかけての土砂移動の実態について様々な計測と解析手法を組み合わせた分析を行い、以下の成果を得た：

- 1) 河道形状・水面勾配等が河道の土砂動態に与える影響を把握するための土砂輸送モデルの基本コンセプトの確立、これに必要なパラメータ較正するため水理実験の準備を完了し、これに対応する数値計算モデルを提案した。
- 2) Xバンドレーダ、その他の機器を組み合わせ、継続的に河口地形、河川流動、波浪場を観測する体制を整えた。観測結果を分析し、出水確率規模と河口拡幅量の関係を定めた。さらに、流動と地形変化に関する数値計算を行い、出水確率規模とそれぞれの規模に応

じた河口拡幅量，河口テラス域への土砂供給量の関係を定めた。

- 3) 暴浪・台風時の波浪データを分析し，砂州変形と波浪特性の関係を把握した。河口砂州の越流は通常波浪よりも周期の長い長周期成分により支配されることを明らかにし，モデルに組み込むための知見が得られた。また，カメラ監視結果より，土砂移動が活発となる浅海域の地形推定手法を確立した。
- 4) 河口テラスの変化とその種変の沿岸に生じる地形変化を分析するための手法を確立した。これに必要と

なる深浅測量データ入手し，漁船測深データと比較するためのデータベースを整備した。収集したデータに基づき，遠州灘にある福田漁港周辺の沿岸漂砂量を推定した。

- 5) 河川出水時に河口沖で発生する濁水流を分析するフレームワークを定めた。周囲流体との密度差，濁水を構成する粒子の粒径等の影響を調べるモデル実験を行った。その結果，河川より供給される土砂の含有割合により，海域に留まる土砂量が異なることが示唆された。