

洪水時流出懸濁物質の堆積学的調査研究

研究予算：運営交付金（一般勘定）

研究期間：平 20～平 22

担当チーム：技術推進本部 特命事項担当

研究担当者：稲崎富士

【要旨】

河川は、源流部から河口部に向けて水を流下させる機能に加えて非定常な流水の作用に伴う土砂運搬機能を有している。河川によって運搬される土砂は、しばしば土石流や洪水氾濫などの災害を引き起こしてきた。これらを制御するために設置された砂防ダムや多目的ダムは、下流域の土砂災害や洪水被害の低減に貢献してきたが、中上流部に多量の土砂を堆積させダム本来の機能の低下を引き起こすとともに、下流域での河床低下や海岸浸食の原因となっていた。この問題に対処するためには、源流部から河口・海域までを含む流域における土砂移動の実態を一体的かつ総合的に把握管理する視点が必要とされる。水流による土砂の生産、運搬、堆積を取り扱う研究領域の一つとして堆積学があるが、従来の土砂動態調査にはこの堆積学的視点からの調査研究はほとんど適用されていなかった。そこで本研究では、洪水時に河川系を流下し、河床あるいはダム貯水池内に堆積した土砂を対象とし、それに対する堆積学的な検討の有用性を検証することを目的とした。本研究の結果、従来の土質試験・分析では識別困難な詳細な堆積構造と堆積メカニズムを明らかにすることによって、土砂動態の解明が可能であることがわかった。

キーワード：河川，洪水，河川堆積物，粒度，レーザー回折散乱粒度分析装置

1. はじめに

陸域にあって、時空間的にほぼ固定した流路を有する細長い筋状の地形領域として定義される河川は、その源流部から河口に向けて定期的に水を流下させるだけでなく、流水の作用として特に源流部で支配的な浸食、中・上流部における運搬、下流・河口域で特徴的な堆積作用によって大量の土砂を移動させる機能を有している。これらの作用は流水の速さに対して強い非線形性を示し、洪水時や源流部での土石流発生時などにイベント的に顕在化する。一方で河川流域に設置されているダムや堰などの河川管理施設は、下流部への土砂移動を抑制する一方で貯水池内等に大量の土砂を堆積させてきた。これによりダムや砂防施設は本来保有すべき洪水調整機能等が低下するとともに、河口部への土砂供給の減少に伴って深刻な海岸浸食を引き起こす原因の一つとなっていた。河川系が本来有すべき土砂運搬機能を回復させ、水災害を最小限に抑えるとともに、河道の安定的な維持、河川施設の調整機能保持や河川生態系の保全を図るためには、流域を通じた総合的な土砂管理の推進が求められていた。

従来の河川系の管理においては、大規模水資源開発やダム建設による洪水防御、河道掘削等による流

水の正常な機能の維持等に主眼が置かれてきたが、これにより河川系の土砂運搬機能に変化し、土砂移動に関わる上述のような問題が顕在化してきたことから、1998年に当時の建設省河川審議会総合土砂管理小委員会は総合的包括的な土砂管理の方策を提案した¹⁾。具体的な課題として、適正な土砂管理を行なうための予知・予測手法の向上、森林と土砂移動の関係の把握、河畔林等の生態系・景観などの環境と土砂移動の関係に関する調査研究を推進すること、土砂の量・質のモニタリングを効率的・効果的に行なうためのシステムの構築、適正な量と質の土砂をダムから排出する新たな技術の開発、海岸部における土砂管理の技術の開発に関する技術開発を推進することが挙げられた。これらの課題のなかで、河川系における土砂の時空間分布、すなわち源流域から河口域までの土砂の移動実態を把握することは、土砂移動のメカニズムを解明し、適切な土砂管理手法と対応策を策定するための基本情報として最も重要な課題の一つとして位置づけられる。

流水によって運搬・堆積する土砂の基本物性情報の一つに粒度特性がある。実際、流速と粒径によって土砂の移動形態が異なることがよく知られており、流速が大きいときには粗粒の土砂が河床近傍を移動

する掃流砂，中程度の流速で流下し河床堆積物と相互作用する浮遊砂，流れに伴って懸濁状態で流下するウォッシュロードに大別される。逆に河床堆積物の粒度特性と堆積構造を調べることで，流速や流向などの堆積環境を推定することが可能であり，堆積学の基本課程となっている。河川系の土砂動態の実態把握の手法として，これまでも粒度特性分析が多用されてきた^{2),3)}が，それらは土質試験で提案されてきた従来の分析法を採用しており，堆積学分野で採用されている詳細な堆積物分析および粒度特性分析ではなかった。そこで本研究では，主として洪水時に流出する土砂を対象に堆積学的な分析を加え，分析手法の適用性について検証した。

2. 調査研究成果

本研究期間中に実施した主な調査研究成果の概要を以下に示す。

2.1 粒度試験方法の検討

上述のように，土質試料に対して採用されている粒度試験の方法は，河川堆積物の粒度特性分析手法としては問題がある。元来材料試験の一種として位置づけられる土質試験分野の粒度試験は，標準的な仕様⁴⁾(JIS A 1204)では，ふるいの目の間隔がフェイスケールで1前後と粗い。これにより累積曲線に不自然な屈曲が生じることがある。また細粒分に対して適用される沈降法では，通常1 μm 程度が下方測定限界であり10%粒径値やそれから計算される均等係数が求められない場合がしばしば生起する。さらに累積百分率曲線の接合の問題があげられる。標準仕様では75 μm までをふるい分析で，2mmふるい通過分を用いて沈降分析を実施することとなっている。この区間は両方の分析データが存在することになるが，両者の結果が一致することは稀で，いずれかの累積曲線（通常は沈降法データ）を上下にずらして接合させている。その結果，累積曲線が不自然な形状をとることがある。通常は重量百分率軸表示ではそれを識別することは困難であるが，図-1に示すように，正規確率紙上にプロットしなおすと，多くの分析曲線（特に下方にプロットされる粗粒試料データ）では，両分析法の接合部（ ϕ スケールで3.25-3.75間）で曲線が屈曲していることがわかる。このことは，ふるい分析法と沈降法を組み合わせた粒度分析方法では，試料の粒度分布を適切には再現できていないことを強く示唆している。

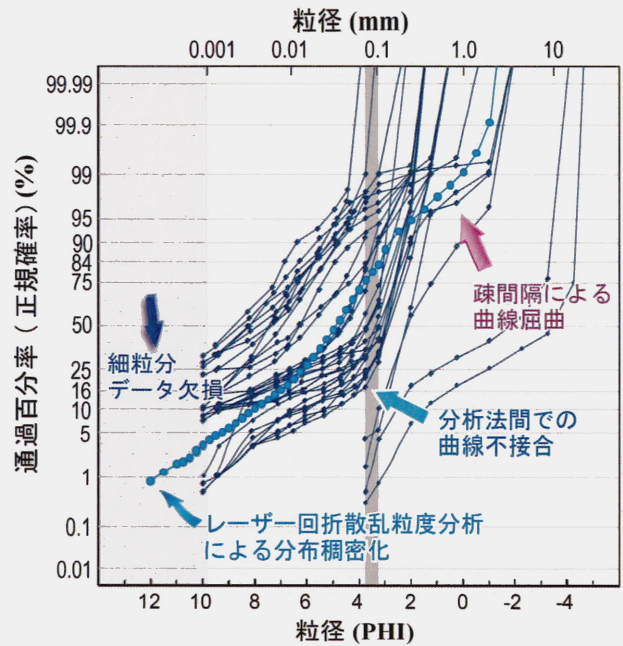


図-1 標準規格粒度試験の諸問題とレーザー回折散乱粒度分析結果との比較

粒度試験データを堆積環境指標として利用しようとする場合，試料調製の仕方に細心の注意をはらうことが求められる。現行の規格⁴⁾では，乱した試料（標準貫入試験採取試料）から四分法により100g程度を分取すると定められているが，標準貫入試験採取試料は通常ビニール袋に詰めて回収保管されているために粒度分析試料の調整過程において異なった堆積相の試料が混合される場合がしばしば生じうる。平均的な試料の粒度を測定するという名目でむしろこのような混合が積極的に容認される場合もあるが，このような試料調整法では堆積相の詳細な解析は不可能である。

近年堆積学分野では，粗粒分の分析には篩分け法あるいは画像解析法を，細粒分に対してはレーザー回折散乱粒度分析装置を用いた詳細な粒度分析が一般的になってきている^{5),6)}。同装置を用いれば，0.05 μm 程度までの細粒分を稠密な粒径間隔で測定することが可能となる。分析に供する試料重量も10g程度以下で済むので，コア採取試料の場合数cm間隔での粒度特性分析が可能となる。そこで本研究では粗粒分に対してはふるい分け法を，細粒分分析にはレーザー回折散乱粒度分析装置を用いた。これにより図-1に示すように，稠密な粒径間隔で，かつ滑らかな粒度分布を再現できることがわかった。ただし分析試料が少量であることから粗粒粒子の有無を受けやすいという弱点がある。

2.2 洪水堆積物コア試料の分析

2.2.1 分析対象コア試料

九州北西部を流れる筑後川は、有明海に流入する河川のなかでは最大の流域面積を有しており、有明海の環境に対する負荷率も大きいことが想定されている。有明海は近年底質の泥化が進行し、その原因として筑後川流域からの砂の供給量の減少が疑われた⁷⁾。そこで筑後川を管理する国土交通省筑後川河川事務所では、筑後川下流域における土砂流出の動態を明らかにすることを目的として、感潮域および河口部海域において底質調査や河床変動調査等のモニタリング実施してきている。その一環として2008年には感潮域の河道部で19地点、海域部6地点で底質コア試料採取が実施された⁸⁾。このうち河道内の4ヶ所では出水の後にもほぼ同一地点で底質コアが採取され、出水前後のコア対比による底質の変動解明が期待された。コア採取に加え、同時に実施された音波探査等から、感潮域の河床部には表層の粘性土の下位に比較的厚い砂層が分布することが確認された。しかし採取コアに対する地盤工学的な分析結

果からは洪水による土砂移動を明らかにすることはできなかった。この採取コア試料は筑後川河川事務所によって半割処理され、半分は上述の分析に使用され残りの半分は保管されていた。この半割保管コアの提供を受け、別途堆積学的な観察・分析を実施した。

対象とした試料は、筑後川下流部0km, 4km, 10km, および14km(河川距離程)においてパイプレーションコアサンプラーを用いて潜水下で採取された河床底質コア試料である。このうち最も最下流に位置する河川距離程0kmで採取されたコア試料を主に分析した。コア試料採取位置を底質音波探査断面図上に重ねて図-2に示す。同図に示すように、採取位置は水深約4.5m、デ・レーケ導流堤で分流された本流部の流心から約100m右岸側の低水路内に位置する。コア試料の長さはサンプリングパイプとほぼ等しく、約2mである。採取日時は2008年6月11日、および同年11月4日であった。以後同年6月採取コアをC-0K前、11月採取コアをC-0K後と区別する。両採取時期の間には、図-3に示すように瀬ノ下水位観測諸地点(河川距離程24.8km)で最大2,480立方m/s

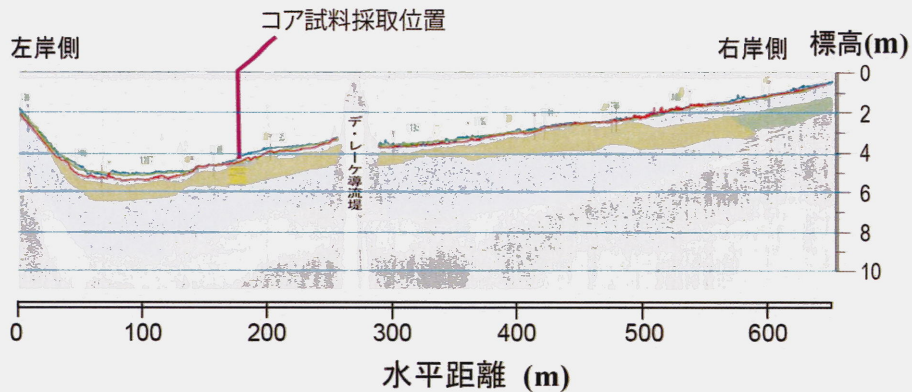


図-2 筑後川河口部河床堆積物コア試料採取地点および河床断面形状。(入江ほか⁸⁾を改変)

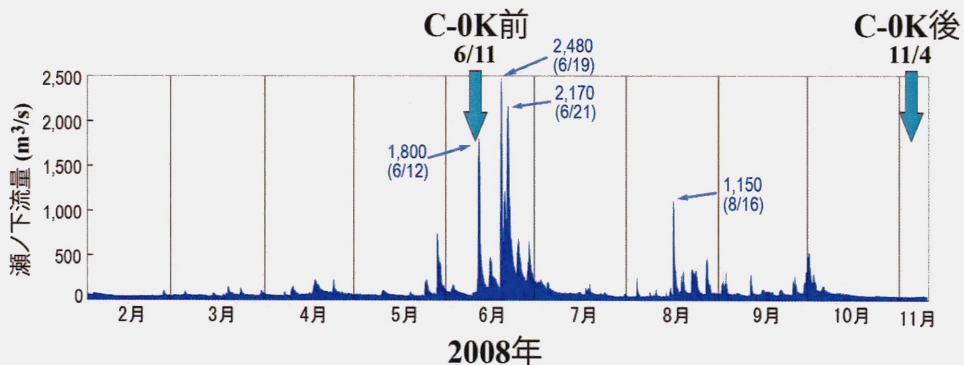


図-3 筑後川河口部河床堆積物コア試料採取時期および瀬ノ下水位観測所流量記録。(入江ほか⁸⁾を改変)

に達する出水が4回記録されていた。この出水によって大規模な土砂移動の発生とそれによる底質の変動がコア試料にも記録されていることが期待された。

2.2.2 コア試料分析概要

脱気密封保存されたコアを開封し、表面を整形して平滑面を形成した後に近接写真撮影を行ない、堆積構造や含有物を観察・記載した。つぎに軟X線撮影用の試料と剥ぎとり標本を採取し、残部から2cmないし2.5cm間隔でシリンダ（内径20mm×高さ20mm）試料および粒度分析用試料を採取した。残試料は再度密封し脱気保存した。シリンダ試料は炉乾後乾燥重量を測定し、帯磁率を測定した。粒度分析用試料は秤量炉乾後、125 μ mふるいで裏ごしし、ふるい残渣試料はふるい目0.5 ϕ 間隔でふるい分けし、通過試料はレーザー回折散乱粒度分析装置（SALAD-3100）を用いて分析した。粒度分析試料数はC-0K前コアで88試料、C-0K後コアでは109試料に達した。

2.2.2 コア試料分析結果

コア観察および剥ぎとり標本作成例を図-4に示す。同図には堆積環境同定の指標となる粒径、堆積構造、特徴的の含有物および堆積ユニット区分が記載されている。同図に示した区間のコア観察結果を以下に示す。

- 0.0~7.5cm：中粒~細粒砂からなり、斜交層理が認められる。パッチ状の粘土を含む。
- 7.5~10.0cm：高含水の粘土~砂混じり粘土。粘土の上面は10°前後傾斜し、下面は乱されている。
- 10.0~16.0cm：細粒~中粒砂からなり、貝殻、植物片および材を含む。下位との境界はやや不明瞭で、15°前後傾斜している。
- 16.0~30.5cm：上方粗粒化し、上部は分級の悪い中粒砂~極細粒砂を主体とし、中部の4cm間は粘土混じり細粒~極細粒砂、下部の26.5~30.5cm間は、塊状の粘土からなる。炭質物や貝殻を多く含む。下位との境界は10°~20°程度に湾曲する。
- 30.5~42.0cm：上方粗粒化する極細粒砂~砂混じり粘土からなり、上部3cm間に材、貝殻、ガラス片および化石（カニ）を含む。湾曲した層理や堆積構造の乱れが見られる。下位との境界は凹凸があり、生物擾乱により乱されている。

図-5は、C-0K前後の採取コアの層相および含泥

率（4 ϕ ：62.5 μ m以下の累積重量百分率）を並べて比較したものである。ほぼ同一地点で採取された試料であるにもかかわらず、その層相は特に上部で大き

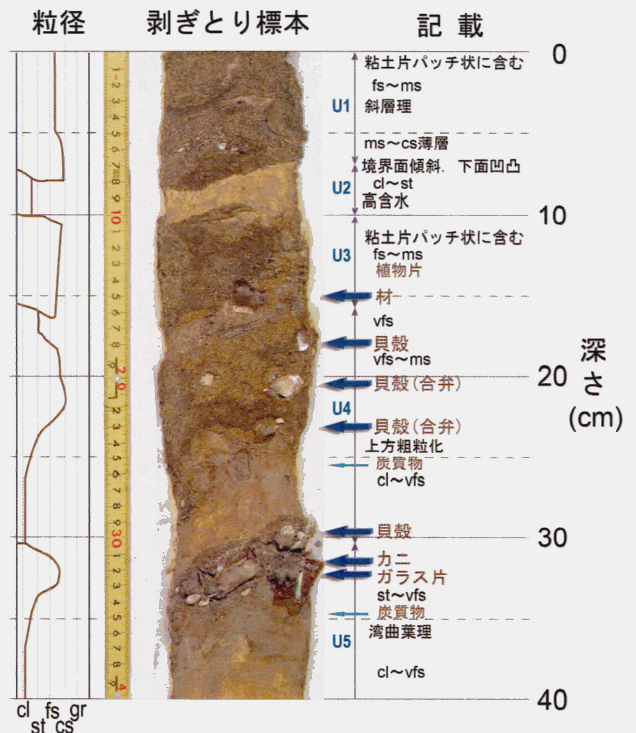


図-4 河床堆積物コア試料剥ぎとり標本および堆積構造・含有物記載例

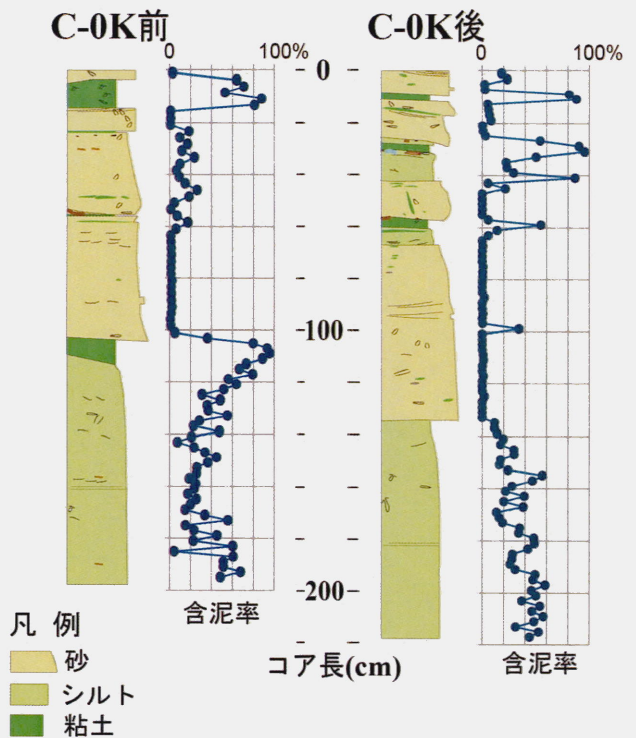


図-5 筑後川河口部河床堆積物コア試料層相および含泥率分布

く異なっている。しかし下部の層相は共通しており、上方細粒化する厚い砂層とその下位の微細砂～シルト層の組み合わせからなっている。両コアとも砂層は粘土をパッチ状あるいは偽礫として含み、部分的に不明瞭な斜交層理が認められる。貝殻片を多く含み、一部ではそれが水平に配列している。一方下位のシルト層には全体的に貝殻片が散在し、生物擾乱や生痕が認められた。

採取コアの孔口標高は C-0K 前で-4.65m、C-0K 後では-4.50m とされており⁸⁾、両者の間には 15cm の標高差が想定されていた。しかし図-5 に示した層相分布からはより大きな標高差の存在が示唆された。

これまで粒度分析結果の表示には累積曲線あるいは含泥率、均等係数などの特徴的な指標が用いられてきた。しかし累積曲線を深度軸方向に並べて示すことは図学上困難であった。さらに従来の疎な粒径間隔データでは有意な差異を見出すことも困難であった。前述のように本研究では 12～-2φ (0.25μm～4mm) 程度の間を基本的に 0.25φ 間隔で稠密に分析しており、粒度特性の詳細な比較が可能である。で再現することが可能である。そこで粒度特性の深度変化を容易に表現できる頻度分布図として表示し、層相の対比に利用した。

図-6 はシリンダ試料測定帯磁率、粒度特性（頻度分布）およびコア層相柱状図を、両コアデータが最も適合するようにずらして対比したものである。コア採取地点の標高差は記録では出水後が+15cm とされていたが、層相対比によると出水前コアでは深さ

15～60cm、出水後コアでは深さ 42～66cm に特徴的な生物擾乱層が認められたことに加え、粒度分布および帯磁率の変動カーブの対比から、標高差は+31cm が妥当である。すなわち 31cm シフトさせることによって、両コアの下部に認められる砂層～シルト層境界出現標高は完全に一致し、帯磁率の急変部も一致する。また頻度分布のパターンも上部を除いてほぼ一致する。ただし出水前の C-0K 前コアの最表層部 5cm は出水後 C-0K 後コアと対比が困難なことから、出水を挟んだ 5 ヶ月の間に、この地点では表層約 5cm が削剥され、36cm の堆積物が付加されたと解釈することができる。

2.2.3 河口部での洪水時土砂移動の推定

洪水前後に筑後川河口部のほぼ同一地点で採取された河床堆積物コア試料に対する詳細な堆積学的分析により、河口部では洪水により表層約 5cm が削剥され、36cm の堆積物が付加されたことが推定された。この付加堆積物は主として 0.5φ 付近にピークを有する中～粗粒砂で構成されていることから、中規模の出水でも河口まで土砂が供給されていることがうかがえる。C-0K 後コアの当該部分には逆級化を示す細粒～中粒砂層（図-4 中の U5,U4）および貝殻片、パッチ状粘土を含む細粒～中粒砂層（図-4 中の U3,U1）の 4 枚の砂の薄層が認められる。一方両コアの採取時期の間には、図-3 に示すように 1,000 立方 m/s 以上の流量を伴う 4 回の出水イベントが記録されている。U4 と U3 層との間には潮汐に伴う細粒

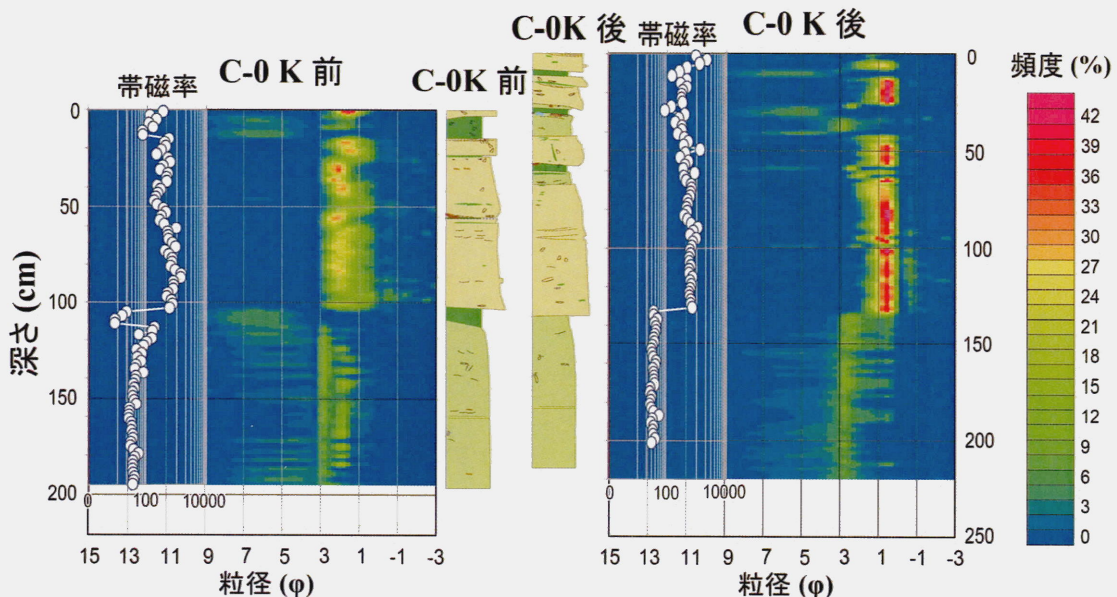


図-6 層相、粒度特性(頻度分布)および帯磁率に基づく筑後川河口部河床堆積物コアの対比

堆積物が認められないことから、両層が短い間隔で堆積したことが示唆される。以上の層相解釈より、最上部のこの4枚の砂層が各々4回の出水イベントで形成された洪水堆積物であると推定することが可能である。これらの砂層中にはガラス片、カニ、合弁の貝殻、木材片などが含まれていた。本研究では未実施であるが、これらの遺骸の種の同定に加え珪藻や有孔虫などの微化石分析を実施することによって洪水堆積物の同定確度の向上と土砂移動の実態解明への貢献が可能である。

3. まとめ

洪水時等にイベント的に発生して河川系を流下する土砂の移動実態を把握することを目的として、河床底質堆積物に対する堆積学的な調査研究を実施した。従来の河川系の管理においては、大規模水資源開発やダム建設等による洪水防御や流水機能の維持等に主眼が置かれてきたが、これにより河川系の土砂運搬機能が阻害され、土砂移動に関わる問題が顕在化してきたことから、流域一体的な総合的包括的な土砂管理が重視されてきている。そのためには河川系における土砂の時空間分布、すなわち源流域から河口域までの土砂の移動実態を把握することが必要とされる。流水による土砂の生産・移動・堆積を取り扱う専門領域の一つに堆積学があるが、従来の土砂移動実態調査には堆積学的なアプローチが欠けていた。そこで洪水時に河川系を流下し、河床に堆積した土砂を対象に堆積学的な検討を加えた。

研究対象とした河床堆積物は、有明海に流入する筑後川の河口部付近で採取された河床底質コア試料である。筑後川を管理する国土交通省筑後川河川事務所では、筑後川下流域における土砂流出の動態を明らかにすることを目的として、感潮域および河口部海域において底質調査や河床変動調査等のモニタリング実施してきていた。その一環として2008年に採取されたコア試料の提供を受け、詳細なコア観察、粒度分析、帯磁率測定等からなる堆積学的分析を加えた。その結果、従来の地盤工学的な分析では不明であった洪水時の堆積物を同定することができた。約5ヵ月間に中程度の出水が4回発生したが、それに対比可能な層厚5～15cm程度の細粒～中粒砂層4枚

を最表層部に識別できた。この解析結果は、中程度の洪水でも河口部に10cm程度の砂層を堆積させるだけの土砂が上流部から供給されることを示唆している。

有明海域では筑後川流域からの土砂供給の減少が生態環境の悪化の要因となっていることが指摘されてきている。その検証には河口部だけでなく、海域および下流河道部の底質堆積物に対する総合的な堆積学的調査研究の推進が期待される。

参考文献

- 1) 建設省河川局砂防部砂防課(1998): 河川審議委員会「流砂系の総合的な土砂管理に向けて」(総合土砂管理小委員会報告。
- 2) 海野修司・辰野剛志・山本晃一・渡口正史・本多信二(2004): 相模川水系の土砂管理と河川環境の関連性に関する研究, 河川技術論文集, Vol.10, 185-190, 土木学会水工学委員会。
- 3) 早川博(2005): 海跡湖に注ぐ河川流域の土砂動態に関する研究, 北海道河川防災研究センター・研究所紀要, XVI, 147-158。
- 4) 日本工業規格 JIS A 1204 (2009): 土の粒度試験方法, 11p.
- 5) Hajek, E. A., Huzurbazar, S. V., Mohrig, D., Lynds, R. M., and Heller, P. L (2010): Statistical Characterization of Grain-Size Distributions in Sandy Fluvial Systems, Journal of Sedimentary Research, Vol. 80, 184-192.
- 6) 大上隆史, 須貝俊彦, 藤原 治, 山口正秋, 笹尾英嗣(2009): ボーリングコア解析と14C年代測定にもとづく木曾川デルタの形成プロセス, 地学雑誌, Vol. 118, 665-685.
- 7) 環境省 有明海・八代海総合評価委員会(2006): 委員会報告書, <http://www.env.go.jp/council/20ari-yatsu/rep061221/all.pdf>, 169p, 環境省。
- 8) 入江 靖・石川博基・前田昭浩・山口広喜・坂本哲治・福岡捷二・渡邊明英(2009): 筑後川感潮域における洪水流と土砂移動, 河川技術論文集, Vol.15, 297-302, 土木学会水工学委員会。

SEDIMENTOLOGICAL RESEARCH OF FLUVIAL SEDIMENTS

Budget : Grants for operating expenses

General account

Research Period : FY2008-2010

Research Team : Advanced Technology Research
Group (Special Unit on
Geophysical Exploration)

Authors : INAZAKI Tomio

Abstract : Production, transportation and deposition of sands or solid materials are intrinsic nature of river systems. The nature is usually activated in flood event but interfered by flood control structures constructed in river systems, and it has resulted in severe environmental problems such as coastal erosion, river bed armoring, sand accumulation in dam reservoir. To control the sand transportation and deposition, it is essential to clarify its distribution along river systems in time and space, especially during fluvial events. Sedimentology would play an important role to this issue, however, previous works were mainly implemented based on geotechnical engineering. Then the research purposed to corroborate the capability of sedimentological investigations to fluvial sediments.

Core specimen sampled at the mouth of Chikugo River in 2008 before and after flood events were analyzed in the view point of fluvial sedimentology. Detailed description of sedimentary structure and intercalated materials or fossils, susceptibility measurements, wide-range grain size analysis using laser diffraction particle size analyzer SALD-3100 combined with conventional sieve shaking method.

As a result, fluvial event layers were successfully identified from the river bed sediments. This indicates detailed core analysis on the basis of fluvial sedimentology is helpful not only to evaluate not only the dynamic properties of flood sediments but also to estimate sand transportation and flux to the offshore area.

Key words : river, flood, fluvial sedimentation, grain size, laser diffraction particle size analyzer