

筑後川の河床変動要因と土砂動態の変遷

HUMAN IMPACT ON BED DEGRADATION AND TRANSITION OF SEDIMENT LOAD IN THE CHIKUGOGAWA RIVER CHANNEL

横山勝英¹・鈴木伴征²・味元伸親³

Katsuhide YOKOYAMA, Tomoyuki SUZUKI and Nobuchika MIMOTO

¹正会員 博(工) 首都大学東京准教授 都市基盤環境コース(〒192-0397 東京都八王子南大沢1-1)

²正会員 博(工) 株式会社アイ・エヌ・エー 総合技術部(〒112-8668 東京都文京区関口1-44-10)

³学生会員 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科(〒192-0397 東京都八王子南大沢1-1)

Numerous records on river works and topographic surveys conducted in the Chikugogawa river were collected and digitized, and the annual sand quantity removed from the river channel and the degradation volume during the last 50 years were analyzed. The river bed degradation was remarkable during the 1960s; however, the influences of river works were not understood because records on gravel quarrying for that period do not exist. The 1D numerical model for river bed evolution was applied to the channel along a 64 km length, and the simulation reproduced the surveyed topography. The model determined the volume of gravel quarrying during the 1960s. The simulation showed that the sediment load decreases every year and gravel quarrying has a significant impact on this load reduction.

Key Words: gravel quarrying, sediment load, 1D numerical model, bed degradation

1. はじめに

日本の河川及び流域は明治以降、様々な人為的改変を受けている。例えば、砂防工事、ダム建設、河川改修、砂利採取、河口堰建設、干拓、航路の維持浚渫などであり、それぞれ実施された年代が異なる。各事業は当時の社会的な要請を受けて実施されたが、国土の近代化が進められて約120年が経過した現在、河川の適正な土砂動態が分断されて、地形や環境に歪みが生じている。

これを解消しようというのが総合的な土砂管理であるが、しかし「ダムの排砂」「サンドバイパス」などの事業が影響するところを慎重に検証してから実施しないと、将来に予期せぬ問題を引き起こす可能性がある。

影響予測の基本は現状把握であり、前述のように長期にわたる人為的変容を受けてきた河川水系の流砂環境を把握するためには、時系列的な整理を行う必要がある。特に1960年代からの高度経済成長期には各種の河川事業や砂利採取が全国的に積極的に行われたため、そのインパクトが流砂環境に及ぼした影響を具体的に把握しておくことは、今後の河道・海岸管理のあり方を考えていくうえで重要である。しかし、高度経済成長期前後における流砂の実測資料は大変少なく、また河床変動計算に

必要な実測データも年代が古くなるほど不揃いになる場合が多いため、事業実施前からの変遷を検討した研究例は少ない。¹⁾²⁾

本研究では、筑後川を対象として1950年代以降の河床変動の履歴とその要因となる河川事業について資料を整理した。横山ら³⁾は筑後川の河床変動状況の概要を報告しているが、砂利採取規制前の土量が不明であり、また河床変動と流砂量の関係性についての検討が不十分である。そこで筑後川河川事務所の資料倉庫において河床材料、水位流量や河床横断測量などに関する未公開の古資料(1884～1962)を独自に発掘して考察を深めた。さらに、1957年から2003年までの47年間の一次元河床変動計算を実施し、以上から土砂動態の変遷について考察した。筑後川(図-1)は流域面積が2,860km²で、流路長が143kmであり、河床変動計算は沖積平野を流れる64kmを対象に実施した。

2. 筑後川の変遷

(1) 河川事業の概要

筑後川では江戸時代の300年間に約180回の洪水被害が発生しており、その対策として1887年(明治20年)か

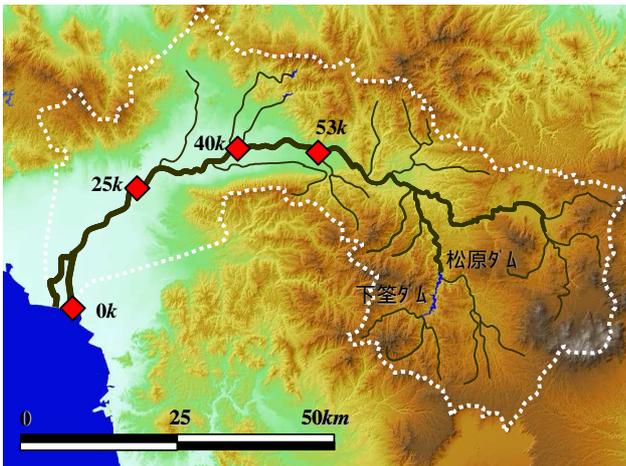


図-1 筑後川流域図

表-1 各種事業の実施状況⁴⁾

西暦	災害、事業	土量(10 ³ m ³)
1887～	低水工事(舟運)	
1896～	高水対策の改修工事	
1935～	掘削, 築堤, 捷水路開削 河道掘削, 下流浚渫	7,700 3,207
1953	既往最大洪水が発生	
1953～	河道掘削, 下流浚渫 干拓築堤用土砂の採取	4,101 1,607
1960～	砂利採取が活発化	不明
1967	砂利採取規制	
1969	下釜ダム完成	
1970	松原ダム完成	
1969～	砂利採取(工事と一体化) ダム堆砂量(全量)	10,243 7,942
1983	河口堰本体完成	

ら第一期改修工事がはじまり、以後、各種の治水・利水事業が実施された(表-1)。また、図-2に1950年以降の年最大流量の時系列を示す。

1953年6月に既往最大洪水が発生したが、それまでの60年間で河川改修で除去された土量は約1,000万m³である⁴⁾。1953年以降も掘削・築堤を主体とした改修が続く、河道から除去された土量は図-3のようになる。

1960年代に入ると都市基盤整備のための砂利骨材の需要が高まった。1959年頃に機械採取船が導入されると砂利採取が民間事業者によって活発に行われたが、過剰採取によって河床低下が著しくなった。そのため建設省は1966年から順次規制を強化し、1965年には52機稼働していた採取機を翌66年には24機に減じ、以後徐々に採取機を減らしていった⁴⁾。

1965年以前の砂利採取に関する数値資料は現存しないが、採取機の稼働数や規制に関する記述⁴⁾を参考にすると、全盛期には年間200万m³程度が採取されていたと推測される。なお、規制後は改修による掘削と砂利採取が一体的に行われ、両者はまとめて砂利採取量として整理されている。砂利の持ち出しは2003年に停止した。また河口周辺に国営干拓地を造成するために、1959年から

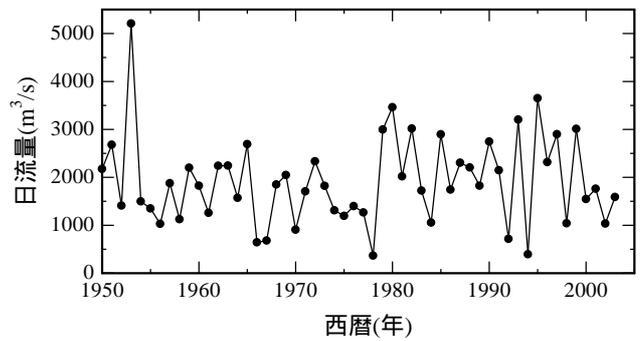


図-2 年最大流量の時系列(25.5km)

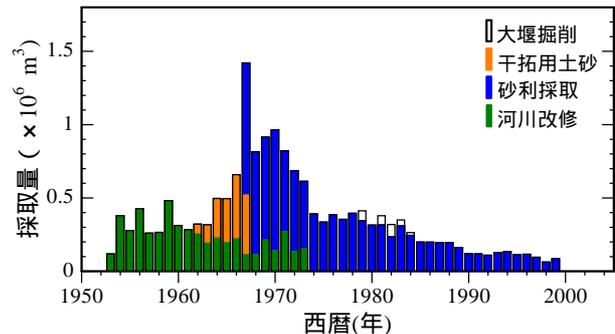


図-3 河道から除去された土砂量(記録分)

68年にかけて感潮域において土砂の採取が行われた。

1970年代以降は治水・利水目的の大型ダムが順次竣工した。主な大ダムは、治水用として下釜ダム(1969年)と松原ダム(1970年)が、利水用として江川ダム(1972年)と寺内ダム(1977年)がある。これらのダムにおける30年間の堆砂量は約800万m³であり、横山ら⁵⁾は松原・下釜ダムのボーリングデータをもとにして堆砂量のうち約3割が砂礫、約7割がシルト粘土であると推定している。したがって筑後川の河床変動に寄与する堆砂量は、砂礫の約240万m³と考えられる。

1985年には23km地点に河口取水堰(筑後大堰)が完成した。もともと23km地点には固定堰(床固)が設置されていたが、洪水疎通能力の増大、塩害の防除、各種用水の取水のために可動堰に作り替えられた。これに伴って堰周辺の河道は拡幅され、27.3万m³の土砂が除去された。なお筑後大堰は流量が1,000m³/sを超える洪水時にはゲートを引き上げて全開にする操作を行っている。

(2) 河床変動

本節では河床横断測量データから河床変動の様子について整理する。筑後川では過去120年間における既往最大洪水が1953年に発生しているため、洪水による河床変動の有無を把握しておく必要がある。しかし、電子化された正式資料は1953年以降しか無いため、それ以前の関係資料を収集した。図-4は25.4km地点及び36.2kmの河床横断図である。25.4kmでは1919年と比較して1953年は全体に1m程度の低下が見られる。36.2kmでは既往最大

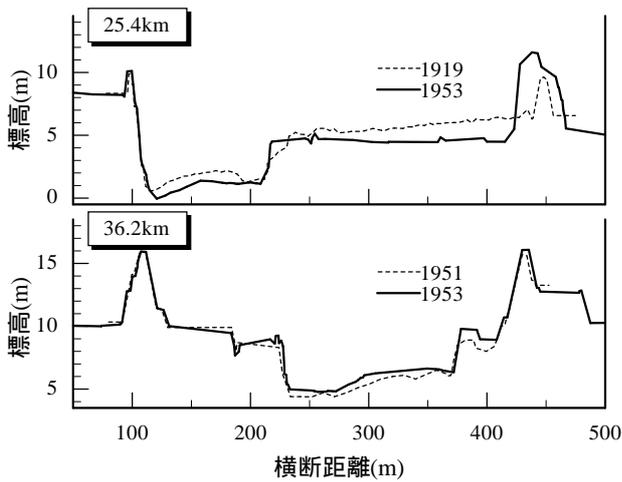


図-4 筑後川河床横断面図

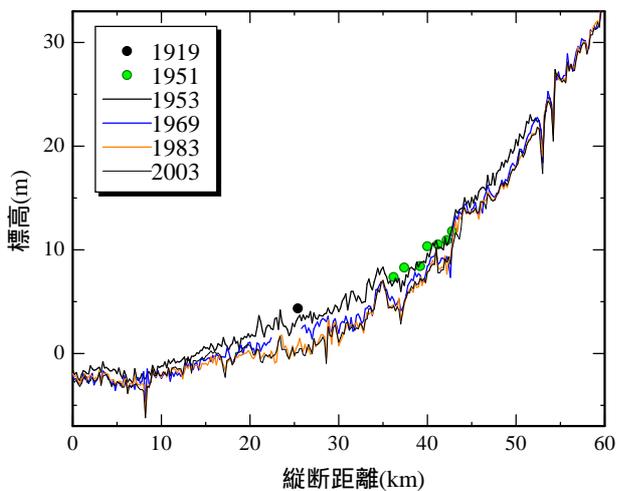


図-5 平均河床縦断面図

洪水の2年前(1951年)に測量が実施されているが、洪水前後の変動は非常に小さい。

図-5に主要な年に関する平均河床縦断面図を示す。河道からの土砂の持ち出し量を考慮するために、堤防間の地盤高を全て平均した。そのため、一般に用いられる低水路平均河床とは若干異なる。図中の印が既往最大洪水よりも以前の測量データであるが、洪水前と後を比較すると変動は0～1mの低下であり、既往最大洪水による大幅な河床上昇は無かったと考えられる。

1969年には河床が全区間で大きく低下しており、低下量は最大で4m程度であったが、これは「既往最大洪水で堆積した土砂が自然に洗い流された」現象ではないと言える。1960年代は砂利採取が活発化した時期であり、採取量は不明であるが河床低下の要因になっている可能性がある。

1969年から1983年までの河床低下は22kmから28kmまでで顕著であるが、これは筑後大堰の建設に伴って低水路を拡幅したことによる。これ以外の区間では低下量は1m程度となっている。

1983年以降はほとんど河床の変動は見られず、筑後大

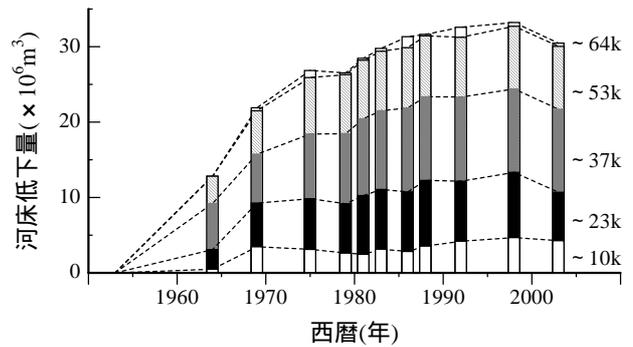


図-6 セグメントごとの河床低下量の累積表示

堰の湛水区間でも土砂の堆積は見受けられない。これは洪水時にゲートを全開するためであると考えられる。

区間ごとにみると、37km～54kmでは平行低下の傾向を示しており、掃流力の変化は少ないと考えられる。10～37kmでは10kmはヒンジとした上流低下の傾向を示しており、緩勾配化によって掃流力が低下していると予想される。

これらの河床低下量をセグメントごとに累積表示すると図-6が得られる。河床低下は1953年から1975年までの間に10～37kmにおいて顕著であり、23年間の低下量は2,690万 m^3 であった。また、1998年までの46年間では3,330万 m^3 の土砂が河床から失われたことが分かった。なお、2003年には10～23kmの感潮域で223万 m^3 の堆積が見られるが、これは河口域特有のシルト粘土の堆積現象によるものだと考えられ、次に考察する。

(3) 河床材料の変化

河床材料調査は1956年から1969年まではほぼ毎年実施されていたが、その後は25年間空いて1994年に実施された。図-7にデータが最も揃っている1961年と1994年の河床材料分布図を示す。1961年は38kmよりも下流の全区間で砂分が主体であったが、1994年には河口から22kmまでの区間でシルト分が大幅に増大している。これについて横山⁶⁾は、1980年代から泥化が進んでおり、河床低下が主たる原因としている。

感潮河道(10～23km)では1998年から2003年にかけて河床が1m上昇している。横山⁶⁾は、この区間では砂層の上部に最大で1.7mのシルト・粘土層が堆積していることや、シルト・粘土層が洪水時にフラッシュされることを示しているため、河床変動がシルト・粘土層の挙動を捉えている可能性がある。実際の測量がデータ記載年の前年末に実施されているとすれば、1997年の最大流量は2,899 m^3/s であるのに対して、2002年は1,034 m^3/s と少ない。したがって、1997年末には洪水がシルト・粘土層をフラッシュした状態を、2002年末には残存した状況を測量したと考えれば、河床の上昇を説明しうる。

24kmから36kmまでの中流区間では砂分が減少しており、区間平均を取ると1961年は0.075～2mmの砂が93%

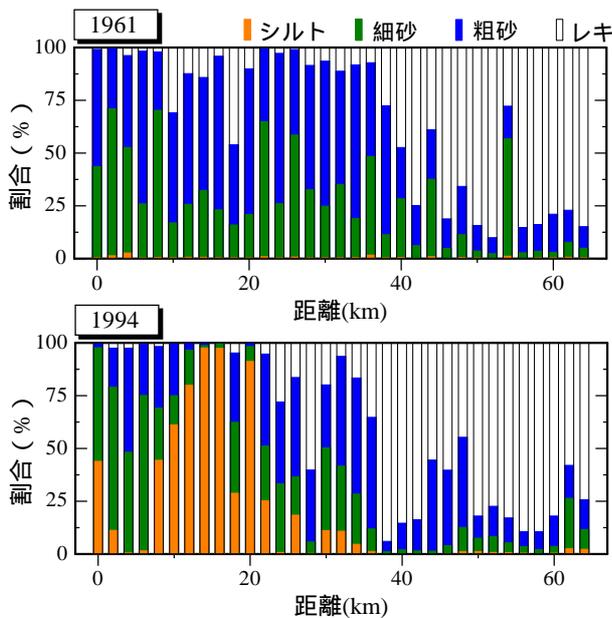


図-7 河床材料分布図

であったが、1994年には67.2%に減少した。38kmよりも上流のセグメントでも同様に砂が減少しており、区間平均で見ると1961年には35.9%であったが、1994年には26.7%となっている。また54kmよりも上流では目立った変化はない。

以上をまとめると、筑後川では河口から52kmまでの平野区間において全体的に砂が減少しており、感潮域ではシルト粘土の堆積が見られ、24kmよりも上流では粗粒化している。また感潮河道で近年河床が上昇しているのは、縦断形の復元傾向を示しているのではなく、シルト・粘土堆積層の季節的な変動を捉えていると考えられる。

3. 河床変動計算

(1) 検証方針

これまでの整理結果をもとにして、筑後川の流砂環境を解析する。河床に大きな変化が生じていない1950年代から河床変動計算を開始し、変化が収束している最近までの状況を計算する。最初に、河床変動履歴を再現することで河川事業と河床低下の関連性を明らかにし、その上で流砂量の経年変化や地点別通過状況を調べる。

(2) 計算方法

計算には混合粒径を取り扱える一次元河床変動モデルを用いた。基礎方程式は流水に関する1次元不定流の連続式と運動方程式、流砂に関する連続式、浮遊砂濃度の輸送方程式、及び交換層における粒径別土砂収支式から成っている。

掃流砂量式には芦田・道上式⁷⁾を用い、浮遊砂の浮上量算定には芦田・道上の底面濃度式⁸⁾を用い、浮遊砂の非平

衡性を考慮に入れている。解析手法には常射流混在場の河床変動計算で実績のあるMacCormack法を採用した。また、本モデルでは河川事業による掘削も考慮しており、予め設定した時期・区間・掘削量に従って河道掘削が可能である。

計算区間は沖積平野の全河道区間であり、山岳区間から平野区間に切り替わる64km地点から河口0kmまでを対象とした。空間刻みは50mであり、時間刻みは2secである。0.075mm以下のウォッシュロード成分については浮遊砂と区別して取り扱っており、一旦浮上したら沈降しないこととした。

(3) 入力データ

計算の各種入力データは、過去50年間に渡って揃っているわけではなく、精度の悪いデータもある。特に砂利採取量は1965年以前についてはデータが現存しない。そのため、データセットの作成方法を示す。

a) 上流端流量

流量は山岳区間から平野区間に切り替わる53km地点のデータを用いる。流量の妥当性を検討するために53km地点の流量と23km地点の流量を比較したところ、両者はほぼ等しく、2地点間の横流入がほとんど無いという結果になった。

一方、両地点の流入を降雨流出の観点から考えると、流出率が場所によらず一定と仮定すれば、流量比は流域内総雨量の比と同一になる。雨量を計算した結果、2地点間の流量には2割程度の差が生ずることが分かった。

そこで不定流計算により水位の再現性を検証したところ、53km地点の流入量を0.8倍したときに、河道各地点の水位を最もよく再現出来たので、流量補正係数として0.8を採用した。

b) 支川流量

計算区間に横流入する主要な支川は8河川あるが、流量は50年前から計測されていない。そこで雨量と流出量(比流出量)の関係を洪水イベントごとに整理し、本川23km地点の比流出量との関係を調べたところ、支川の比流出量は本川の0.52倍となった。本川は支配面積の約7割が山岳地帯であるが、支川は標高の低い山々と平野を流れているため、雨量が少ないことが原因と考えられる。一方、流出率が流域内で一定と仮定して流域内雨量の比を求めると支川は本川の0.59倍であった。

2つの方法で得られた本川と支川の比流出量の比は若干の差があるが、誤差を議論できる精度ではないので、ここでは0.6倍とする。よって、支川流量は本川23kmの流量ハイドロを比流出量の考え方で換算して与える。

c) 流入土砂量

流入土砂量は横山ら⁵⁾が推定した粒径別の土砂生産量を基準にして与えた。1970年以降は大ダム群によって一部の土砂がせき止められているので、供給量を約3割減らしている。

表-2 河川事業による土砂採取量(m³)

測量年	1953年 ～1969年
河床低下量	21,566,000
河川改修	4,329,000
干拓用土砂	1,607,000
既知の砂利採取量 (1967～1969)	2,660,000
砂利不足分	12,970,000
砂利採取量の初期値 (1959～1966)	年平均 1,621,000

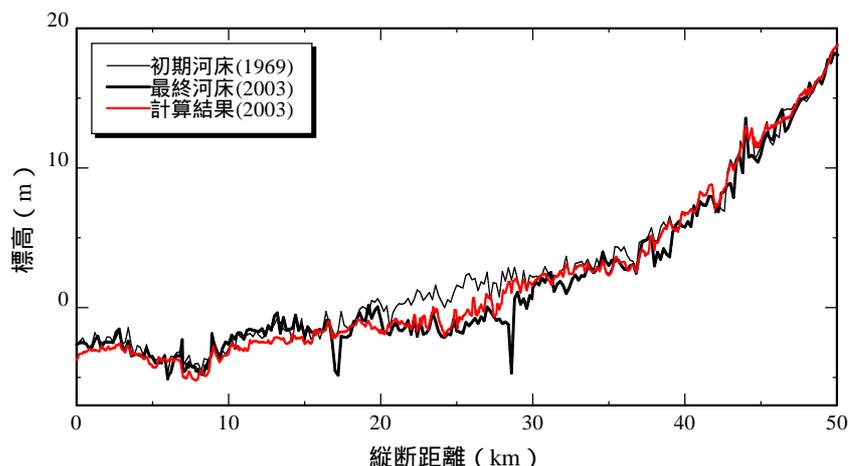


図-8 河床変動計算結果

d) 下流端水位

計算区間の下流端は河口付近とした。河口付近では水位は0km, 3km, 6.5kmの3地点で計測されているが、古い年代は欠測が多いため3地点の水位を使い分けた。1957～1961年では6.5kmの水位を使い、計算は6kmより上流を対象に行った。また1962年以降では基本的に0kmの水位を用い、データが欠けている5年分については3km水位を0km水位に換算して用いた。

e) 河川事業による土砂採取量

土砂を河道から除去する事業としては、河川改修と砂利採取があり、図-3の土量を計算に入力する。

1965年以前については河川改修と干拓用土砂採取の土量は判明しているが、砂利採取量は規制前であったため不明である。文献⁴⁾によれば、砂利採取量は1959年頃から大規模化し、1965年には年間採取量が220万m³程度と推測されたとある。この土量は他の事業に比べて非常に大きな数値であるため、河床変動計算によって確定させる必要がある。初期の入力値としては、上流端からの流入土量と下流端からの流出土量が均衡しており、河床変動量が全て工事土量によって表されると仮定して(表-2)、年間の砂利採取量を設定した。

4. 計算結果と考察

(1) 河床変動の再現と掘削土量の推定

河床変動計算は1957～1968年と1969～2003年の2期間に分けて実施した。初期河床の粒度分布と河道横断地形は、1957年と1969年の実測データを使った。河床材料はいずれの年も0.1mm以上であり、シルト・粘土は微量である。最初に入力データが全て揃っている1969年以降の計算を行い、モデルの妥当性を検討した。

図-8に1969～2003年の再現計算結果を示す。河床の低下状況は概ね再現できているが、局所的な洗掘と河口付近の再現性が悪い。実測で見られる28.5kmと17.2kmの窪みは床固め直下の局所洗掘であり、一次元モデルでは再現が困難である。

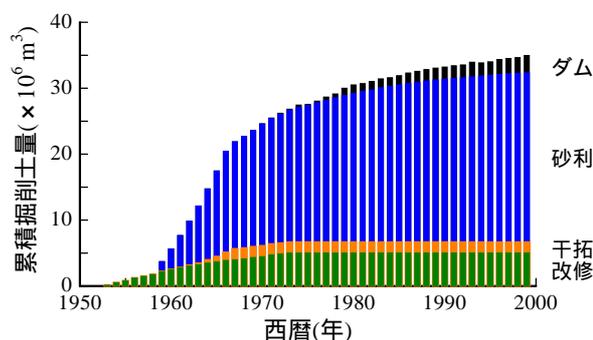


図-9 河川事業による累積土砂量(砂利を含む確定値)

また、10～16kmは河床が1～2m低い。この領域は計算開始時(1969年)は砂河床であるが、現地は途中からシルト・粘土の堆積が進んだ⁶⁾。本モデルでは感潮域における粘着性細粒土の運動を組み込んでいないため、計算結果と実測河床との差はシルト・粘土堆積層を表していると考えられる。堆積層厚は既往のボーリングデータ⁶⁾と一致するため、砂質河床面の再現性として言えば計算精度は高い。

以上より、構築した一次元河床変動計算及び各種入力データ、流入土砂量の調整は妥当であると判断し、次に1968年以前の計算を行った。

この期間は砂利採取量が不明であるため、採取量と区間配分を調整して計算を繰り返し、河床変動を再現した。その結果、不明期間の全砂利採取量が1,540万m³と確定された。表-2で河床変動量の収支から推定した砂利採取量は1,297万m³であったので、243万m³の増量となる。このことは、流入土砂量と流出量が平衡しておらず、流出量が少なくなっていることを示している。

図-9に50年間に実施された河川事業による累積土量を示す。河川への供給を妨げているダムの堆砂量(砂のみ)も積み上げている。筑後川では50年間に3,500万m³の砂が河道から除去され、その結果3,300万m³の河床低下が生じたことが明らかにされた。各事業の占める割合

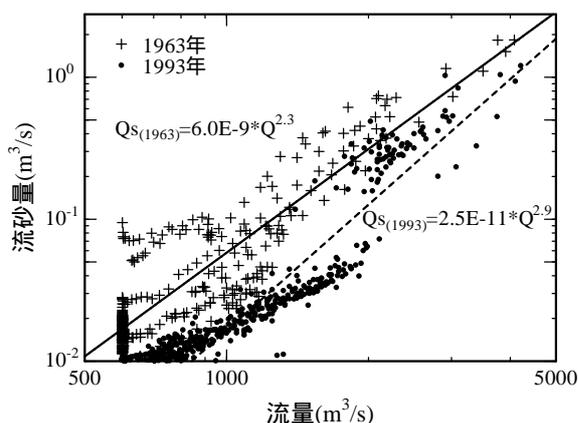


図-10 流量 - 流砂量相関図 (25.5km地点, 実質量)

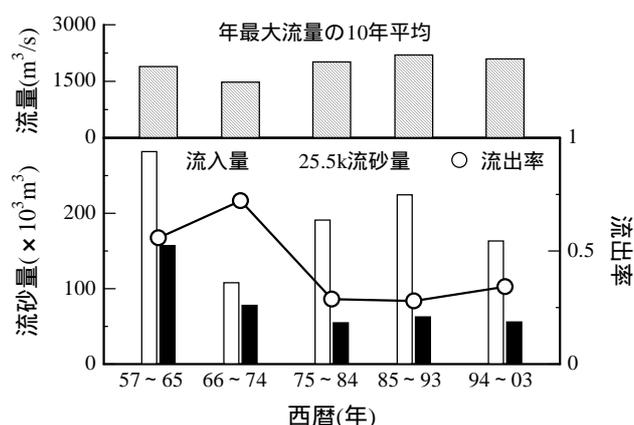


図-11 流入土砂量と25.5km流砂量の関係(空隙率0.6)

は、河川改修が14.4%、干拓用土砂採取が4.6%、砂利採取が73.5%、ダム堆砂が7.5%であり、砂利採取の影響が最も強いことが分かった。

特に、1960年代の砂利採取量は年平均で193万 m^3 のほり、他の年代・事業に比べて格段に多い。採取量の37%を中流(24~44km)が占める。河川改修量も含めれば中流区間での採取率は全域の44%になる。これによって中流を主体とした河床低下及び緩勾配化が引き起こされ、筑後川の流砂環境は大きく変貌したと考えられる。

(2) 流砂量に関する考察

図-10に25.5km地点における過去と現在のQ-Qs図を示す。河床変動に寄与する砂についての掃流および浮遊成分を合計してプロットしており、ウォッシュロードは含まない。30年間離れた2つの期間を比較すると、1993年は1963年よりも流砂量が少なく、筑後川で平均的に発生する2,000~3,000 m^3/s の洪水では流砂量が80~50%減少していることが明らかになった。

図-11に流入土砂量と25.5km流砂量の関係を示す。流砂量は流量規模に依存するため、傾向を理解するために10年ごとに平均した。1960年前後は25.5km流砂量が年間15.3万 m^3 であるが、経年的に減少して1975年以降は平均的に5万 m^3 程度となっている。平均年最大流量は1990年前後が最も高いが、流量の変動にかかわらず流砂量の減少傾向が明確に現れている。ダムが順次竣工した1970年以降は流入土砂量が約3割減少しているが、25.5km流砂量は6~7割減少しており、流砂量の減少にはダム堆砂だけではなく河道自身の緩勾配化や粗粒化が影響していると言える。流入量と25.5km流砂量の比率(流出率)も1957~1974年に比べて最近では半減しており、河道を土砂が流れにくい状況になっていることが分かる。

5. まとめ

1950年代から現在に至る筑後川の流砂環境の変遷を資料分析と河床変動計算によって詳細に調べた。筑後川で

は1953年以降の約50年間に3,300万 m^3 の河床低下が生じたが、その原因は各種河川事業により3,500万 m^3 の砂を河道から除去したことにいることが明らかになった。河床変動計算により、これまで資料が存在しなかった砂利採取規制以前の採取量が1,540万 m^3 と推定され、河床低下の最大の要因であることが分かった。

河道の流砂量は1960年前後には年間約15万 m^3 であったが、近年は年間約5万 m^3 になっており、河道の緩勾配化や河床材料の粗粒化、ダム堆砂の影響を受けて経年的に減少傾向にあることが示された。

謝辞:本研究を実施するにあたり、筑後川河川事務所と筑後大堰管理所から解析に必要な各種データの提供を受けた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1)阿部真人,佐藤慎司,磯部雅彦:鯉川・勿来海岸流砂系における土砂動態の長期的変遷に関する研究,海岸工学論文集,第50巻,pp.561-565,2003.
- 2)海野修司,辰野剛志,山本晃一,渡口正史,本多信二: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,第10巻,pp.185-190,2004.
- 3)横山勝英:河川の土砂動態が有明海沿岸に及ぼす影響について - 白川と筑後川の事例 -, 応用生態工学,8号1巻,pp.61-72,2005.
- 4)筑後川工事事務所:筑後川50年史,1976.
- 5)横山勝英,中村岳由,五十嵐麻美:堆積学的手法による筑後川の土砂供給能に関する長期変遷解析,水工学論文集,第50巻(CD-ROM),2006.
- 6)横山勝英:筑後川感潮河道における1950年代以降の底質変化と河床変動の関係,海岸工学論文集,第53巻2006(印刷中)
- 7)芦田和男・道上正規:移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究,土木学会論文報告集,第206,pp.59-69,1972.
- 8)芦田和男・高橋保・道上正規:河川の土砂災害と対策,森北出版,260p,1983.

(2006.9.30受付)