

河道設計のための基本は何か—水面形時系列観測値と洪水流—土砂流の解析を組み合わせた河道水理システムとその見える化

WHAT IS THE FUNDAMENTALS OF RIVER DESIGN—UTILIZATION OF VISIBLE TECHNIQUES OF SEDIMENT LADEN-FLOOD FLOWS

福岡捷二¹
Shoji FUKUOKA

¹フェロー Ph.D 工博 中央大学研究開発機構 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

The paper proposes a synthetic river hydraulics and sediment observation system which assures the mutual coincident relation of data among water level hydrographs, discharge hydrographs, sediment discharge hydrographs and bed levels. The unsteady two dimensional flow equation and river bed variation analysis are conducted so as to satisfy measured water surface profiles over time.

This system supplies data for river planning and maintenance and proves the usefulness for river administration although sediment discharge has not been measured yet. The author emphasizes the importance of sediment discharge measurements for the synthetic observation system installed at important positions of river system and recommends to adopt this method to the comprehensive sediment management plan in rivers.

Key Words : *synthetic hydraulic observation system, temporal changes in water surface profiles, bed variation analysis, sediment measurement, comprehensive sediment management plan*

1. 水文・水理観測に求められること

河道設計, 管理の基本は, 確かな品質の水文・水理データに基づいて行われることである。これまでの水文・水理観測は, 過去から定められた観測点を中心に河川管理に資するように観測, 収集し, 観測値の精度向上を図ってきた。しかし, データを集めることが目的化している面が見られ, 今一度, 降雨, 水位, 流量等のデータを収集する意味および河川管理の新しい技術に伝えるデータ収集の意味を考えてみる必要がある。

今日の河川には, 治水と環境の調和, 適切な維持管理が期待されている¹⁾。このような要請に応える水文・水理データは, 河川の広がり, 多様な流れ場の議論を可能にするものであり, データの精度と共に, データ間の関係性が保証されていなければならない。すなわち, 一つの流域における降雨, 水位, 流量等の観測値の間には, 降雨-流出システムとして決まる相互の定量的な関係が概ね成立するものでなければならない。一測定点で測った降雨, 水位, 流量, 流送土砂量などの水文・水理観測データは, その地点の上下流の河道地形の影響を受けて流れていることから, 河道で起こっている水理現象を総合的に判断するうえでは必ずしも有効な情報になり得ていない場合が起こり得る。適切な計画, 設計, 管理のた

めには, 水位ハイドログラフ, 流量ハイドログラフ, 流砂量ハイドログラフ等が河道の不規則な形状や広がりを反映しながらも, 互いに整合性を持ち, 統合的に観測されていることが必要になる。

この統合的視点を重視した新しい水理観測・解析システムにより得られたデータを用いた河川計画, 河川管理が, 福岡らと国土交通省の河川事務所との共同によって1990年代から進められて来た。福岡らは, 水位観測が, 流量観測など他の観測項目よりも測定精度が高く, かつ, 時・空間的に密に, 広く, 容易に観測が行えること, 水位縦断面すなわち水面形についてその時間変化の観測値には河道の広い範囲で起こっている時々刻々のすべての水理現象が反映されていること, その結果, 観測水面形の時間変化を解とした非定常二次元洪水流解析から求めた流量ハイドログラフや流速等の水理項目も観測水面形との整合性をもって, 推定可能であり, 測定量間の相互の関係を確認できること等河道計画に果たす水面形の時間変化の重要な役割が明らかにされてきた^{2), 3)}。

福岡らの研究^{2), 3)}では, 水面形の時間変化の観測値が, 非定常二次元運動方程式の解となるように洪水流解析を行うことにより, 任意地点の流量, 貯留量等の評価が出来ること, また, 水面形から河道, 堤防等の危険箇所を推定できること等が示された。しかし, 調査研究を始め

た頃は次の2つの理由から、水面形時系列観測値の河道計画・管理に果たす重要性については、十分理解されていなかったように思う。第一の理由は、洪水流の水面形の持つ力学的意味をどう捉えるかに関係する。すなわち、洪水流の水面形は水理解析から求める未知量であり、解析に与える既知量ではないという考え方、また、与える条件が多いほど答えは求めやすいという水工学の考え方に関係している。第二の理由は、水面形の時間変化の中には、洪水中に起こっている河床変動の影響も含まれているが、その影響は小さいとしていることにあった。

第一の問題については、水面形は、広がりをもった流れの中で種々の水理現象を反映した河川の流れを代表する水理量であり、容易に、高精度で測ることができ、それを解として与えることにより未知量である流量ハイドログラフや、流速分布等を高精度に求め得ることは、洪水流のような工学問題においては大変に実用的で有効な方法で、問題ではない。近年のADCP等の新しい流量観測法は、一つの測定点で高精度に流量を求めようとするもので重要な技術ではあるが、測定点が河道を代表し、流れを代表するものとなっているかについては十分な検討が必要である。それに対し浮子観測は、河道地形、洪水流の状況を反映した観測方法であるが、水位、流量の低い時には、測定誤差が入りやすい欠点を有している。ここで述べている水面形の時系列から求まる任意の場所での流量ハイドログラフは、その区間の水理量を代表する水面形と関係した量であり、河川の流れに即した観測法であると言える。事実、本解析法は、その後、樹木群のある河道の洪水流解析^{4),5)}、河川の分合流解析^{6),7)}、遊水地のある河道の洪水流解析⁸⁾、破堤氾濫量解析⁹⁾、支川からの流入量ハイドログラフ¹⁰⁾と低平地河川のポンプ排水量¹¹⁾の解析等多くの河道管理の重要問題の解明に応用され、今や河道計画の重要な技術となっている。これらの解析では非定常平面二次元解析を用いているが、著者らのその後の検討で、非定常準二次元解析においても、非定常平面二次元解析の結果とほぼ同じ結果が得られることが示されている¹²⁾。どちらの解析法を用いるかは、対象とする問題によるが、観測水面形時系列を既知として解析する限り両者の結果にほとんど差が現れない。しかし、第二の河床変動については、指摘された通りで、洪水中に大きな河床変動が生ずる場合については、水面形が時間的に変化する。したがって、水位ハイドログラフの縦断形（水面形の時間変化）、流量ハイドログラフ、河床変動（流砂量ハイドログラフ）は、相互に関係しておりこれらは同時に決定すべきものである^{13),14)}。この課題については次の2章、3章で述べる。

2. 河道設計の基本—統合水理観測システムを用いた洪水流と河床変動の一体解析

前述したように洪水時の河床高を正しく測ることが難し

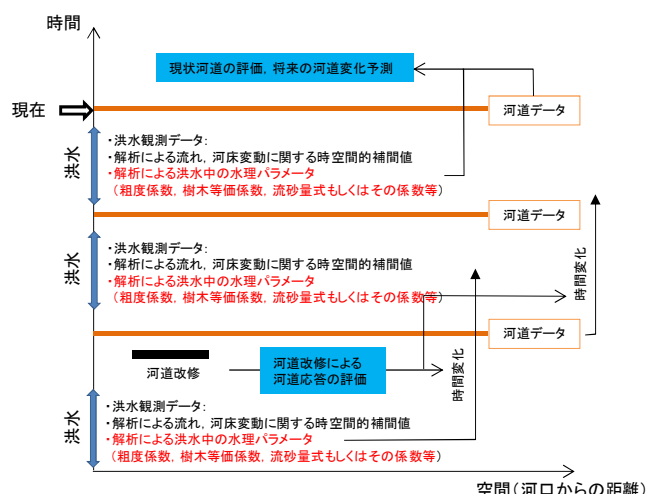


図-1 時空間的に見た河道維持管理に対する水面形時系列観測を用いた洪水流-土砂流解析の役割

いが、水面高を測ることは容易であり、その測定精度も高い。一般に用いられている無線式の高精度水位計（たとえば水晶式水位計）は、直轄河川では、縦断的に概ね10 km間隔に設置されている。しかし、このような水位計の設置間隔では、複雑な河道縦横断面形を有する区間の正しい水面形を観測するには間隔が広すぎる。近年、河川管理の検討を要する区間には、安価で簡易な圧力式水位計を補助的に1~2 km間隔に設置され、詳細な水面形時系列観測値から河道構造の洪水流に及ぼす影響について理解が深まった。著者の知る限り直轄河川では、現在、約40河川で数km区間にわたって、また、近年、県河川でも簡易水位計が多点で設置され、目的に応じた洪水観測、解析が行われている。

洪水中の河床高は、洪水流量に対応して変化しており、洪水後に測られた河床高は洪水中の河床高を示すわけではない。河床高がいつ最大の変動値を示し、その変動量がどの程度かを知ることは、河床変動解析で特に重要である。河床変動解析には、一般に流砂量式が必要となるが、流砂量式の河川への適用性には多くの課題を残している^{1),15)}。にもかかわらず、洪水中の河床高、流砂量の測定が困難であることから、河床高の変化を河床変動計算で推定せざるを得ないのが現状であり、合理性の高い河道計画策定のために、河床高と流砂量の時間変化を観測出来る技術の開発が待たれている。

このような洪水流—土砂流観測技術の背景の中で、国土交通省の河川事務所と著者らが進めている統合的な水理観測・解析システムの適用は、合理的な河道設計、維持管理を行うための一つの試みである。

検討対象区間には、洪水時水面形の時系列データの収集のため、簡易水位計が適切な間隔で多点設置され、また、そこでは洪水流量ハイドログラフ、洪水前後の河床高が測定されている。洪水時の流れと土砂移動は、水面と河床面という変形する二つの境界の間を移動すること

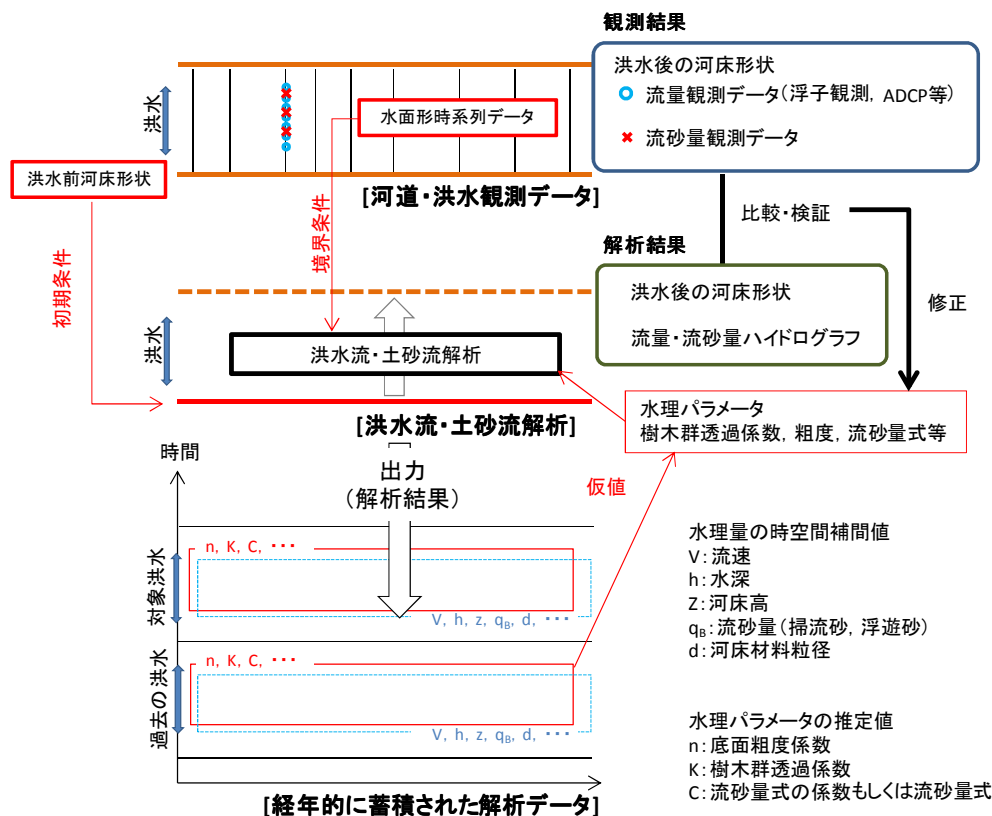


図-2 水面形時系列観測と洪水流-土砂流解析を組み合わせた洪水時の河道水理システムの見える化

から、洪水流の水位と河床高に關係する流量と土砂移動量(流砂量式)が決まれば、流れと河床を支配する二つの基礎方程式から河道設計に必要な水理量が求まる。ここでは、境界面の一つである観測水面形の時間変化を解とするように二つの基礎方程式を同時に解いた時に得られるもう一つの境界面である時々刻々の河床面の高さを求めることになる。

図-1は、経年的に発生した洪水流に対して、河道がどのように応答し、また改修の効果はどうであったのか等を明らかにするために、水面形時系列を用いた洪水流—土砂流解析を実行し、時間・空間の広がりをもつ河道の動態を検討するための著者の考えていることを図示したものである。今後も適切な河川改修と維持管理を進めていくためには、洪水—土砂流データの観測と解析を通じて対象とする河道データや樹木群透過係数、粗度係数等の水理パラメータを蓄積し、現状河道の評価、将来河道の変化予測に生かしていくことになる。

図-2は、水面形時系列観測と洪水流土砂流解析を組み合わせた洪水時の河道水理システムを示す。この図では、河川の設計や維持管理に必要とされる洪水流—土砂流の観測と解析技術を組み合わせ、それから導かれる結果がどのようにして決まるかを見える化している。

洪水時の河床波の発達、変形や植生の変形、流失など生じた場合、流れの抵抗は変化する。事実、一次元洪水流、河床変動解析では、河床波、樹木群等のスケールの変化は粗度係数の値に大きく影響する。しかし、実測水

面形の時間変化を解とする非定常の二次元洪水流解析では、河道の広い範囲で流れの抵抗系の変化が生じない限り、洪水期間中は、ほぼ一定の粗度係数及び樹木群超過係数を用いて実洪水の水面形の時間変化を表すことが可能である^{4), 13)}。河口付近など、河床波が発生しやすい河川では、その影響は抵抗増加となって水面形に現れており、大きな粗度係数を用いなければ水面形の時間変化を説明できない¹⁶⁾。しかし、ひとたび流れの抵抗値が決まると、洪水時の粗度係数の変化は小さい。

河床変動計算において、事前にどの流砂量式が適用可能かは分からないので、いくつかの流砂量式を用い検討することになる。同じ河道区間で異なる規模の2～3の洪水流について同様の検討を行い、洪水後の実測河床変動に適合性の高い流砂量式を用いることになる。このとき、用いる流砂量式は、その関数形はそのまま、係数のみを対象河川に適合するものに代えて用いることもある^{13), 15), 16)}。このとき、河床高の初期条件データは、砂州河床の場合には、河床変動計算の結果に敏感に影響することが多いので、縦断間隔を小さくとした断面間の横断測量結果を用い、横断測量断面に挟まれた区間の河床高については、航空写真等を用い流れと河床の状況を考慮し、出来るだけ初期河床形状を近似し、計算精度を高めることが望ましい^{13), 17)}。

これら一連の解析によって、検討対象区間の任意地点の水面形の時間変化(水位ハイドログラフの縦断形変化)と流量ハイドログラフ、平均河床高と最深河床高の時・



写真-1 常願寺川での流砂観測

空間変化、流砂量の時・空間変化（流砂量ハイドログラフの縦断変化）を求めることが出来る。本解析では、洪水時のそれぞれの時刻の水面形に対応する各断面の平均河床高及び最深河床高が求まる。このことは、解析から求まる各時刻、各断面の平均河床高及び最深河床高に対し、それぞれの対応する断面の平均河床高及び最深河床高が測定されていれば、比較検証が出来ることを示している。しかし、洪水時の任意時間の河床高を空間的に測定することは困難あることから、まずは、洪水後に測定された縦断的な平均河床高と最深河床高と洪水終了時のそれぞれの河床高の解析結果の良好な対応を目指すことになる。この対応の程度が高ければ洪水時の河床高の変化についてもかなりの精度で推定が可能になると考えてよい。本解析法を用いた石狩川における大洪水による縦横断河床変動の解析結果は、平均河床高、最深河床高とも現地観測結果を良好に説明している^{13), 16)}、これより、洪水流量ピーク時付近の河床高と洪水終了時の河床高の相対関係等が推定でき、河道設計、管理にとって重要な判断材料を与える。洪水時の河床変動量が測定出来れば、解析法の精度は一層向上することから、観測法の確立が喫緊の課題である。

著者らは、常願寺川の河川敷に水路を掘削し、そこで、**図-2**に示す洪水流—土砂流観測システムを設置し、**写真-1**、**写真-2**に示す洪水流による河道形成と土砂輸送量について調査し、水理観測システムの実効性の検討を行った。そこでは、これまで行ってきた水面形時系列、流量ハイドログラフ観測に比較して、流砂量観測の難しさが明らかになった¹⁹⁾。一方で、**図-2**に示した方法で求める河床高分布、流砂量分布が、実測河床高、流砂量の時系列変化について、かなりの説明力をもつことも明らかになった¹⁶⁾。

3. 河川基準点で総合土砂管理計画を見える化する技術

河川の基準点は、河道計画、管理上の基準となる重要な地点で、そこでは水位ハイドログラフ、流量ハイドログラフが長年にわたって観測されている。また、観測値からH-Q式が作られており、水位を測ることによって、流量が換算できるようになっている。本章では、**図-2**の



写真-2 常願寺川での下流端土砂貯めによる流砂観測

統合的な水理観測システムを河川の基準点に設け、洪水流と土砂流の同時測定を行い、これらを用いて河川の総合土砂管理計画の見える化につなげる考え方を示す。

総合土砂管理計画は、流域で生産された土砂の移動と収支を明らかにし、治水と環境の両面から健全な河川流域の形成を目指している。すなわち、生産された土砂が洪水による洗掘、堆積、流送の過程を経て、山地、河道、海岸の各地点においてどのような分布をし、治水と環境の両面からその分布に問題があれば、望ましい姿に改修していくことを狙いとし、洪水流—土砂流システムについて正面から取り組もうとするものである。この考え方は重要であるが、対象範囲が流域スケールと大きく、また洪水流—土砂流という河川計画の最も基本的な部分を扱い、何を、どこから、どのように検討をするべきか判断が難しい。また、流域での土砂の生産量、流下量の把握は容易でなく、また、ダム貯水池が存在している流域での流域一貫土砂管理の評価が単純ではない場合が多い。ダムを有する流域での土砂収支について、山地—河道モデルをつくり、モデル計算結果に基づく総合土砂管理研究が行われているが、流域における洪水流、土砂流について観測データの不足からモデルの検証が不十分であり、計算の段階で終わっているものが多い。このような背景から、まずは、ダム下流域で統合水理観測・解析システムを用いて土砂移動量の把握、河道内の土砂量の分布を調べ、ダム下流域の河道における総合土砂管理計画の検討を提案する。

ダム下流域で、総合土砂管理の議論を進めなければならない理由は、以下のとおりである。①ダムより上流と下流から海岸までは、洪水流、土砂流の挙動が異なっており、まずは、土砂水理学の基本に基づいてデータの多いダム下流の洪水流と土砂移動量の関係を明らかにし、土砂管理の基礎データを得る。②ダム下流河道の土砂環境が変化しており、治水上、環境上の問題解決に資する基礎データを得る。③今後のダム貯水池からの排砂施設設計に必要な基礎データを得る。④ダム下流河道に流入する支川からの洪水流入量、土砂流入量を把握する。

河川の基準点、主要点は、支川が合流する地点、派川が分流する地点の下流にあり、各種水理量と共に土砂移動量の状態把握が必要な地点である。このため、河川の

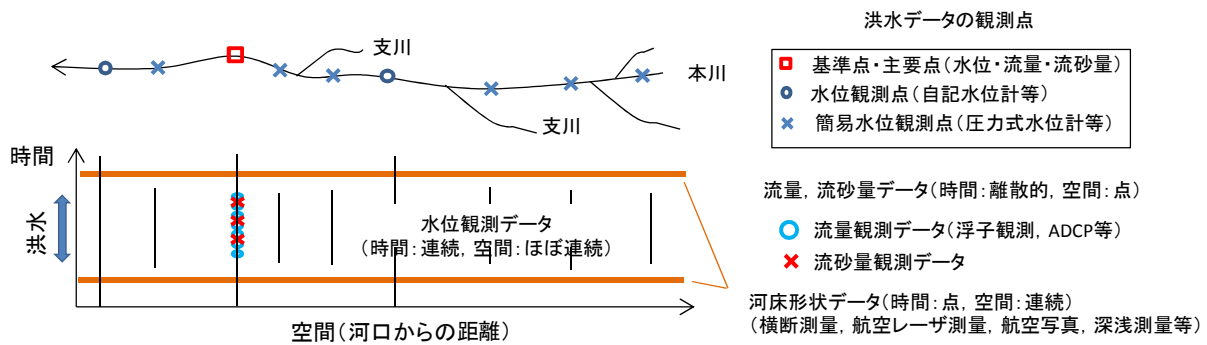
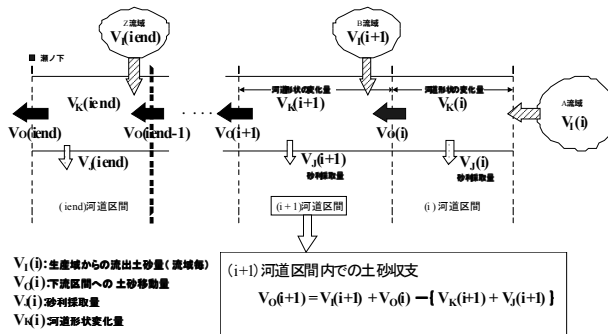
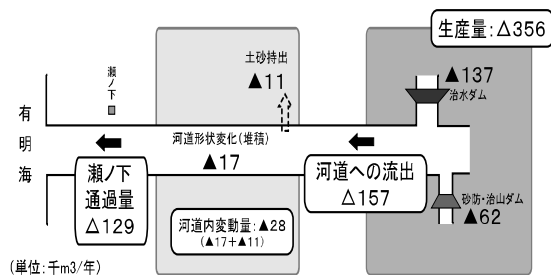


図-3 総合土砂管理計画を進めるための洪水流—土砂流データの時空間的な観測体制



(a) 筑後川流域での土砂収支算定方法

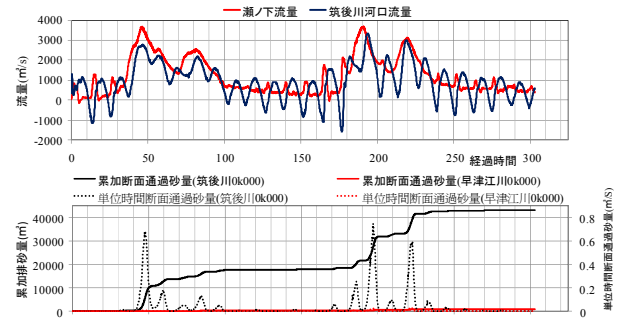


(b) 土砂収支模式図 (H12~H20)

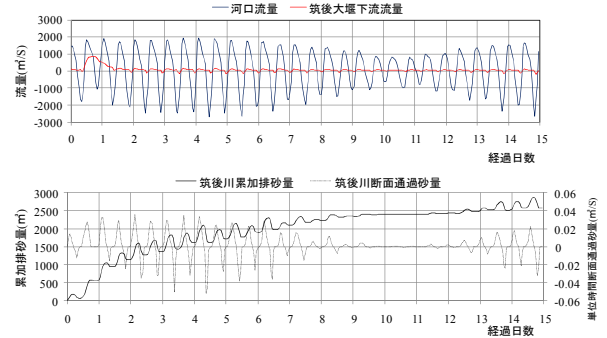
図-4 筑後川流域の土砂収支 (H12~H20)

基準点、主要点で洪水流—土砂流システムを見える化し、数値化して、これをベースに問題点を明確にし、検討する。そのため、図-3に示すように基準点で、水位、流量のみならず、新たに土砂移動量および支川からの流入量、流砂量のハイドログラフを把握できるようにする。基準点と出来れば主要点も併せてそれぞれの地点を挟む河道区間に、水位計を縦断的に設置し、洪水の水面形の時間変化を記録する。図-2に示した方法で、水面時系列観測と洪水流—土砂流の解析を組み合わせることによって洪水ごとに基準点、主要点で土砂移動量ハイドログラフを求め、土砂の移動に関する情報を蓄積していく。土砂移動量を河床変動解析で求めるだけでは不十分で、解析結果の検証のために掃流土砂量、浮遊土砂量を観測する施設を基準点に設置することが望まれる。

また、支川では流量観測が行われることが少ないために、支川の流入量ハイドログラフが把握できず、本川の



(a) 洪水時



(b) 平水時

図-5 流量時系列と有明海への土砂流出量

河道管理に支障をきたす河川が多い。本川において、支川流入地点を含む上・下流に対して簡易水位計を設置し、本川水面形の時間変化から、支川流入量ハイドログラフを求め¹⁰⁾、また支川からの土砂流入量の把握が必要な区間では、図-3に示す観測システムを構築する。

図-4 は、国土交通省筑後川河川事務所が行った筑後川流域での土砂収支の最近の検討結果を示している。ここでは、筑後川の河床がほぼ安定している平成 12 年から平成 20 年までの流域からの生産土砂量、ダムでの堆砂量、砂利採取による河道からの持ち出し量、河道における洗掘、堆積による河道形状変化量等の土砂収支から基準地点、瀬の下経由で有明海へ流出する年間平均砂礫量が 12.9 万 m³ / 年と概算されている²⁰⁾。一方、鈴木らは、図-5 に示すように筑後大堰 (23km) から有明海まで平成 21 年に発生した 2 回の洪水流の水面形の時間変化の観測値を用い、実測河床変動を概ね説明できるように

河床高を解き、これと有明海の毎日の大きな潮位差から生ずる河川の流れにより有明海への年間砂礫流出量を12万 m^3 /年と算定し、両者の有明海への年間砂礫流出量は、ほぼ同じ値を与えることが示された^{14), 20)}。今日、河川流域全体を対象に洪水流—土砂流を実測データに基づいて検討できる流域が限られていることから、流域全体の総合土砂管理計画に先立って、まずは、ダム下流域の河道での洪水流と土砂移動量を治水、環境と関係づけて議論することは重要である。筑後川の検討結果は、総合土砂管理計画の今後の方向性を示すものであると考えてよいであろう。

4. まとめ

河道設計、河道管理にあたっては、治水と環境について流域・河道を広い視点で見た検討が必要であり、そのためには設計や管理の目的に適うような水文・水理資料が存在していることが重要である。現在の水文・水理観測は、個々の観測技術の精度向上が中心課題となっており、必ずしも治水と環境の両面から河川を統合的に捉え、それを設計、管理に生かす観測体制、技術になり得ていない。本文では、水文・水理観測を設計、管理に位置づける考え方について述べている。最初に、河道全体を統合的に見て設計、管理する必要性を述べ、次に、洪水時の水文・水理データの相互の関係性を考慮した観測体制と、対象とする河道区間で必要とされる観測はどのようなもので、それらの観測値が互いに整合が取れ、かつ精度が保証されるような統合的な水理観測・解析システムの構築とその必要性について示した。さらに、河川の基準点で、洪水流と土砂流を一体的に管理できるように観測体制を整えることが、治水と環境の調和を考えた流域の総合土砂管理につながることを、提案する統合的な水理観測・解析システムを用いることによって、河道設計、河道管理の見える化が可能になることを示している。

参考文献

- 1) 福岡捷二：温暖化に対する河川の適応技術のあり方—治水と環境の調和した多自然川づくりの普遍化に向けて、土木学会論文集 F, Vol. 66, No. 4, pp. 471-489, 2010.
- 2) 福岡捷二，渡邊明英，原俊彦，秋山正人：水面形の時間変化と非定常二次元解析を用いた洪水流量ハイドログラフと貯留量の高精度推算，土木学会論文集，No. 761/II-67, pp. 45-56, 2004.
- 3) 福岡捷二：洪水流の水面形観測の意義と水面形に基づく河川の維持管理技術，河川技術論文集，第12巻，pp. 1-6, 2006.
- 4) 福岡捷二，佐藤宏明，藤澤寛，大沼史佳：洪水流と河道の樹木繁茂形態に基づく樹木群透過係数と粗度係数の算定法，水工学論文集，第51巻，pp. 607-612, 2007.
- 5) 中井隆亮，須藤純一，福岡捷二：樹木群スケール，河道スケールと樹木群透過係数の関係，河川技術論文集，第16巻，pp. 431-436, 2010.
- 6) 福岡捷二，永井慎也，佐藤宏明：河川合流部を含む本・支川の流量ハイドログラフ，貯留量の評価—利根川・渡良瀬川の平成13年9月洪水を例として—，水工学論文集，第49巻，pp. 625-630, 2005.
- 7) 福岡捷二，渡邊明英，田端幸輔，風間聡，牛腸宏：利根川・江戸川分派点を含む区間における流量ハイドログラフと粗度係数・樹木群透過係数の評価，水工学論文集，第50巻，pp. 1165-1170, 2006.
- 8) 福岡捷二，昆 敏之，岡村誠司，鶴見川多目的遊水地の洪水調節効果の評価，土木学会論文集 B, Vol. 63, No. 3, pp. 238-248, 2007.
- 9) 安部友則，福岡捷二，塚本洋祐：破堤による氾濫流量ハイドログラフ計算法の構築と河川への適用方法の研究，土木学会論文集，Vol. 65, No. 3, pp. 166-178, 2009.
- 10) 内田龍彦，福岡捷二，工藤美紀男：河川上流域における本川・支川流量ハイドログラフの合理的推定法，河川技術論文集，第15巻，pp. 309-314, 2009.
- 11) 内田龍彦，福岡捷二，濱邊竜一：多地点からの横流入のある河道システムにおける本川水位観測法を用いた洪水流解析法とその活用法，水工学論文集 第55巻，pp. 1081-1086, 2011.
- 12) 福岡捷二，佐藤宏明，出口桂輔，洪水流の非定常準二次元解析法の研究，土木学会論文集 B, Vol. 65, No. 2, pp. 95-105, 2009.
- 13) 岡村誠司，岡部和憲，福岡捷二：洪水流の縦断水面形変化と準三次元流解析法を用いた石狩川河口部の洪水時の河床変動解析，河川技術論文集，第16巻，pp. 125-130, 2010.
- 14) 鈴木健太，島元尚徳，久保世紀，福岡捷二：筑後川感潮域の洪水時の河床変動解析，水工学論文集，第55巻，pp. 877-882, 2011.
- 15) 浅野文典，福岡捷二：河幅及び断面形状を考慮した掃流砂量式の導出とその適用性に関する研究，水工学論文集，第55巻，pp. 793-798, 2011.
- 16) 岡村誠司，岡部和憲，福岡捷二：河幅及び断面形状を考慮した掃流砂量式を用いた河床変動解析—石狩川河口部昭和56年8月洪水を例として—，河川技術論文集，第17巻，2011.
- 17) 忠津哲也，内田龍彦，石川武彦，福岡捷二：洪水時の砂州の変形と河川構造物周辺の局所洗掘，水工学論文集，第54巻，pp. 829-834, 2010.
- 18) 前嶋達也，岩佐将之，長田健吾，福岡捷二：石礫複断面直線—蛇行河道の河床変動および河床材料分布に関する研究，水工学論文集，第55巻，pp. 769-774, 2011.
- 19) 曾山和宏，大熊義史，畠中泰彦，浅野文典，福岡捷二：河川の掃流砂量の測定と掃流砂量観測技術・評価技術に関する研究，河川技術論文集，第17巻，2011.
- 20) 国土交通省 筑後川河川事務所内部資料，2011.

(2011. 5. 19 受付)