

流下能力評価の精度向上にむけた洪水中的の実態把握

UNDERSTANDING THE ACTUAL SITUATION DURING FLOODS TO IMPROVE THE ACCURACY OF FLOW CAPACITY EVALUATION

川上 拓*・渡邊 晋也*・本松 七海*

Taku KAWAKAMI, Shinya WATANABE and Nanami MOTOMATSU

In the unequal flow calculation, which is the basis of the flow capacity evaluation, various condition settings are set while performing the reproduction calculation of the past flood. However, in the lower reaches of the Jinzu River, cases have been confirmed in which sufficient reproducibility for past floods can not be ensured, and the problems are thought to be the starting water level, low channel roughness coefficient, and riverbed decline during floods. Based on this, it was confirmed that it is effective in setting calculation conditions that reflect the actual conditions during floods by observing the vertical water level during floods, three-dimensional surveying of riverbeds, and observing and analyzing riverbed fluctuations.

Keywords : departure water level, riverbed level fluctuation observation, roughness, riverbed degradation

1. はじめに

河道改修の基本となる不等流計算の条件設定(出発水位、低水路粗度係数等)は、「河道計画検討の手引き」¹⁾に従って行われる。この手引きは、出版された平成 14 年当初までの知見に基づいて作成されているが、洪水中的の河床変動状況は未解明な部分も多いことから、手引きに従って条件設定を行っても、実績洪水の再現性に課題が生じることがある。神通川も同様の課題を有していたことから課題解決に向けた現地観測を実施しており、縦断水位観測や水中の 3 次元測量、STIV 法を前提とした流速観測のほか、従来難しいとされていた洪水中的の河床変動状況の観測も試みている。これまでの取り組みの中で、近年の計測技術の向上も相まって、洪水中的の河床変動状況の一部を把握するデータを取得できたことから、得られたデータに基づいて洪水中的の河床変動状況を考察した。

2. 神通川河口部および観測の概要

本報告の主な調査対象区間は、富山県富山市を流れる神通川の河口-0.6k~2k の区間であり、セグメントは 2-2、河床勾配 1/2,500、河床材料は砂、低水路の水深は約 4~5m、水面幅は約 200m の感潮域である。洪水発生期間(6 月~10 月)における日々の干満差は最大でも 30cm 程度であり、潮位変動が小さい特徴がある。

課題解決に向けた観測として図-1、図-2 に示すとおり、簡易水位計および河床変動観測のための水温計およびリング計を縦断的に設置した。また、流速観測のためのカメラを 1 箇所設置した。なお、縦断水位観測は 2014 年、河床変動観測および流速観測は 2018 年より開始している。



図-1 観測機器位置図(2019年)



図-2 観測機器位置図(2020年 1.2k までを拡大)

* 流域水管理事業本部 河川水資源事業部 河川部

3. 洪水前後測量に基づく粗度係数の考察

粗度係数は不等流計算で逆算粗度から設定するが、その検証材料がないことが課題となっている。そこで、神通川下流部で洪水前後の河床の3次元測量を行い、その調査をもとに粗度係数の考察を行った事例を報告する。

(1) 観測概要

2018年7月洪水(神通大橋ピーク流量 4,842m³/s(計画高水流量は 7,700m³/s)、実測流量では戦後第3位)の前後に水中の3次元測量を実施した。3次元測量にはスワス式測深機(製品名 C3D-LPM、ソフトウェア:HYPACK2015)を用い、30cm 程度の間隔で得られた点群データに対し、TIN による内挿補間で標高分布を推定した。図-3 に示す洪水後の測量結果に示すとおり、洪水後の測量では、低水路内に形成されたうろこ状模様を明瞭に確認することができた。また、洪水前には水面上にあり、測深器で計測できないほど発達していた砂州が、洪水後にはフラッシュされて水面下となる様子も確認することができた。

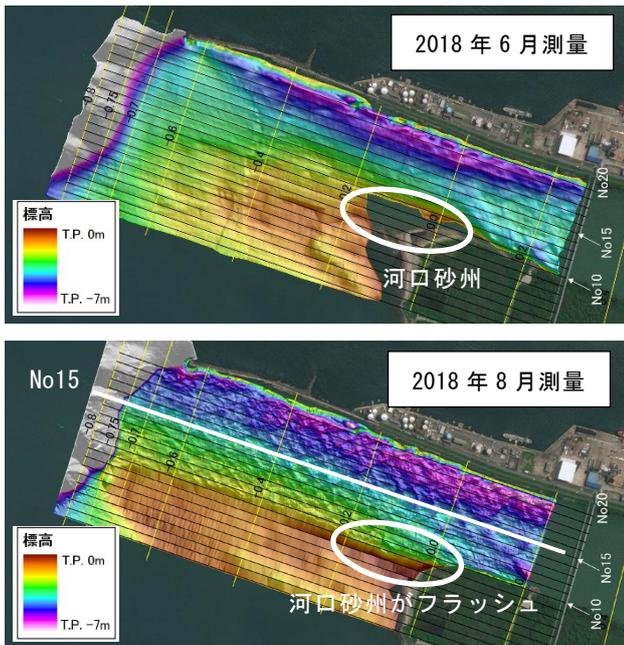


図-3 2018年7月洪水前後の水面下地形・標高の変化

(2) 洪水時の粗度係数の推定

秋田ら²⁾は水中の3次元測量を活用して、小規模河床波を把握するとともに、洪水時の粗度係数の把握に向けた報告を行っていることから、これを本検討にも適用して、2018年7月洪水時の粗度係数の推定を行った。

1) 河床波スケールの計測および河床材料調査

検討に使用する河床波スケールを計測するため、低水路内に10測線を設け、目視によって縦断波長 λ と波高 Δ を計測した。計測例を図-4に示すが、地形の凹凸が繰り返されていることが分かる。10測線全体の縦断波長 λ は20~70m

(平均で42.5m)、波高 Δ は20~90cm(平均で49cm)となっていた。また、代表粒径は2018年7月洪水後の0.0k地点のコアサンプリング(図-5)結果より、1.37mmであった。

2) 粗度係数の推定

吉川・石川³⁾は、河床波の形状特性と水流の抵抗との関係を論理的に整理していることから、この関係式に計測した河床波スケールおよび代表粒径をあてはめ、水深に応じた粗度係数を推定して図化した。また、その図に準二次元不等流計算により求めた2018年7月洪水の下流部の逆算粗度の結果をプロットした。作成した図を図-6に示すが、逆算粗度は形状抵抗ありの曲線にほぼ沿った位置にプロットされた。この結果から推測すると、当該洪水では、流量ピーク時には形状抵抗なし(平坦河床)の状態に至っていなかったと判断できるとともに、そのときの粗度係数は、準二次元不等流計算で逆算した0.020と同程度であったと考えることができる。

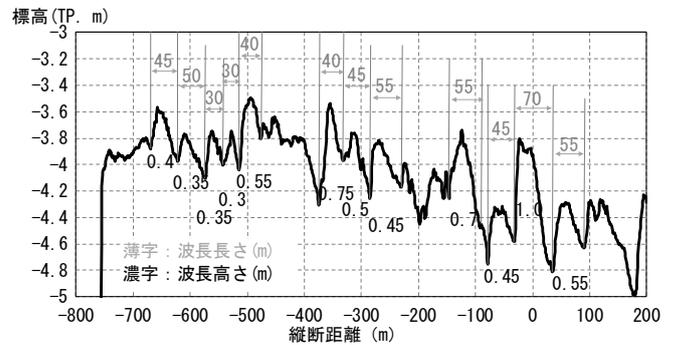


図-4 No15 測線の河床波スケールの読み取り例

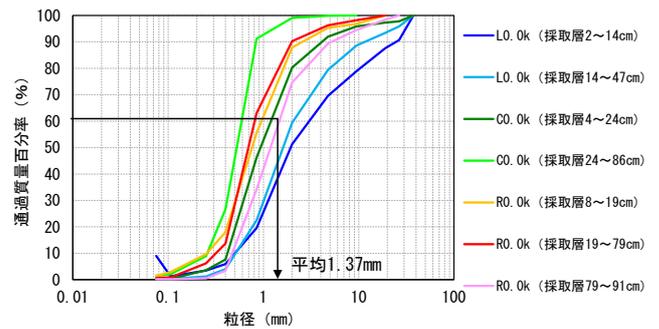


図-5 0.0kのコアサンプリング結果(2018年7月実施)

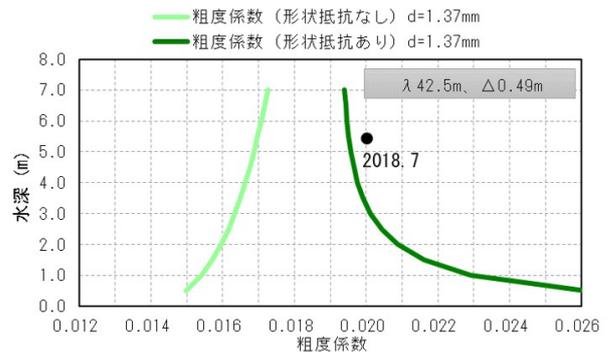


図-6 砂堆波長と河床材料に基づく粗度係数の推定

(3) 粗度係数の把握に対する観測の重要性

従来の再現計算では準二次元不等流計算で逆算粗度係数を求めるしか方法がなかった。しかし、実態の河床波スケールと代表粒径を把握することで、逆算粗度係数を検証する情報を得ることができた。水中の 3 次元測量により洪水後の河床地形を把握することは、極めて重要な意味を持っていることを把握することができた。

4. 洪水中の河床変動観測に基づく河床低下の可能性と、洪水中の河床変動状況に関する考察

河口付近の逆算粗度係数を算定すると、著しく粗度係数が小さくなることがある。これは、洪水中の河床低下に伴う河積拡大が測量断面に反映されていないことが要因となって、実績水位を計算で再現しようとする粗度係数を小さくせざるを得ない、ということが考えられる。この問題を解消するためには洪水中の河床低下を観測する必要があるが、観測事例は極めて少なく、実態も分かっていない。これをふまえて、神通川下流部で河床変動観測を行い、洪水中の河床低下に関する考察を行った事例を報告する。

(1) 観測概要

神通川では、洪水中の河床低下ならびに河床変動状況を把握するため、河床水温計および河床リング計を用いた観測を実施している。

1) 河床水温計

横山ら⁴⁾は、筑後川において水温計を活用した河床変動観測を実施している。この事例をもとに、洪水中の時系列的な河床変化を把握することを目的として、神通川下流部の河床に河床水温計(水中の水温計と河床下に埋まった水温計では温度が異なることを利用して、河床低下を時系列的に把握)を設置した。設置例は図-7、図-8 に示すとおりである。水温計は Onset 社製 MX ペンダント温度(MX2201)を使用し、ネグロス電気社製 ダクターチャンネル S-D1R に 10~15cm 間隔で配置した。これを 5m の単管に固定して、潜水作業により河床に埋設した。このとき、河床より上の水温も把握する必要があることから、河床から最低でも 50cm 程度は露出するように設置した。

2) 河床リング計

河床リング計⁵⁾の設置例は図-7、図-8 に示すとおりである。河床リング計は JFE スチール社製 jfe-ssg を潜水作業により河床に埋設し、リングはシーケー金属社製 CK 鋳鉄製合フランジを使用した。なお、河床水温計を用いた観測は事例が少なく、水温から判断する河床低下量の妥当性を確認するため、水温計の上流側に河床リング計を 2 本併設した。2019 年 6 月洪水後の観測結果によると、河床リング計に流

下物を多数捕捉していたことから、結果的に河床リング計が河床水温計に対するゴミ除け機能も発揮したと考えられる。

3) 配置計画

河床水温計と河床リング計の配置は、図-1、図-2 に示したとおりである。2019 年は、それまでの検討から、河床変動が大きいと想定される 0.0k~1.0k 区間に河床水温計を配置した。2020 年は、より広い範囲で河床低下量を捉えることを目的として、河床水温計の数量を減らして、河床リング計をメインに配置した。

4) 設置に関する関係機関との協議

設置の事前協議として、海上保安庁伏木海上保安部、富山県富山港事務所に必要書類を提出したほか、富山県水産漁港課の助言により、とやま市漁業協同組合(海面)四方本所および岩瀬支所、富山漁業協同組合(内水面)に事前説明を行った。

5) 設置作業

2019 年、2020 年で設置数量に差はあったものの、作業の慣れによる効率化もあり、設置に要した日数は表-1 に示すように、変わらなかった。

6) データ回収および撤去

データ回収や撤去に要した日数は表-2 のとおりである。

2019 年は中間データ回収を 1 回実施し、機器の撤去は 11 月後半以降に実施したが、冬が近づくにつれて悪天候が続いたことで、撤去に 5 日を要した。一方、2020 年は中規模の洪水発生に伴って機器が曲がったり(図-9)、河床に埋没していたり、1m 以上低下しているリングを捜索するなど、洪水後の観測に 10 日を要した。

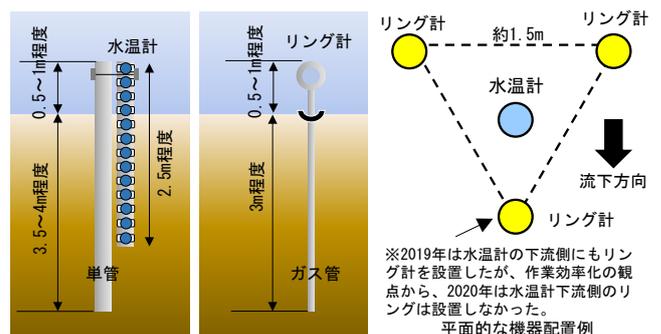


図-7 河床水温計とリング計の設置例

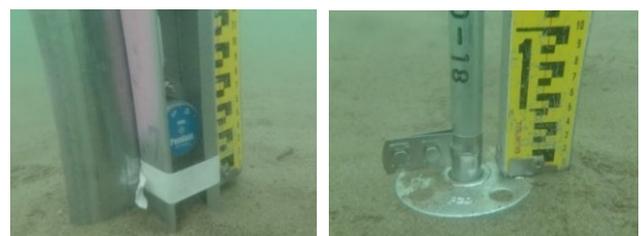


図-8 河床変動計の設置例(左:水温計 右:リング計)

表-1 設置に要した日数

	水温計	リング計	設置日数
2019年	6箇所	3本×6箇所=18本	4日
2020年	3箇所	2本×13箇所=26本	4日

表-2 データ回収および機器撤去に要した日数

	中間データ回収	機器撤去
2019年	2日	5日
2020年	10日	3日

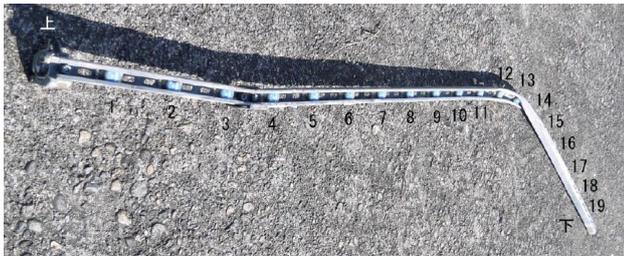


図-9 2020年7月洪水後に引き上げた水温計の例

(2) 2019年の観測データからの考察

2019年の年最大流量は6月30日に発生した1,708m³/sであり(平均年最大流量は2,000m³/s:神通大橋地点)、大きな洪水のない年であった。しかし、この洪水後に中間データ回収を行い、河床変動観測データの考察を行った。0.2k地点の観測データと考察結果を図-10に示す。

1) 河床変動の開始直前の挙動

0.2k地点の河床水温計は、河床よりも上の水温計がNo17~19であったが、流量の上昇とともにこの3つの水温低下が始まっている。これは塩水くさびの流出によるものと考えられ、流量が900m³/s程度になるまでに塩水くさびは流出したものと推測できる。

2) 河床変動の開始直後の挙動

河床付近の水温計No17の水温低下からやや遅れて、河床下に埋まっていたNo8~16の水温計も相次いで水温低下が始まっている。これより、河床変動が始まるタイミングでは、比較的急激に河床が動き出していることが推測できる。

3) 河床低下の判断

最も上部のNo19水温計と同じ水温が継続している水温計まで、河床が低下したと判断することができる。この場合はNo8まで河床が低下したと判断できる。洪水前河床のNo17からNo8まで河床低下したと判断すると、最大で90cm程度低下したと判断できることになる。

4) 水温計による河床低下量の妥当性

河床低下量の妥当性を確認するため、水温計周りの3つのリング低下量を確認したところ、最大で約70cm低下していた。これより、水温計による河床低下量の解釈も概ね妥当と判断している。

5) 河床変動観測に基づく河床低下量と、洪水前後測量の比較による河床低下量の比較

河床変動観測では、70~90cm程度の河床低下が観測できた。一方、水温データをもとに洪水前後の河床高から判断できる河床低下量を想定すると、洪水前河床位はNo17、洪水後河床位はNo16と判断でき、このときの河床低下量は水温計1個分の10cmとなる。これより、洪水前後の測量からは、洪水中的の河床変動を把握することは難しいといえる。

6) 河床変動が停止するタイミングの挙動

洪水後半になると、水温が徐々に高まっている。これは、塩水が遡上していることを示していると考えられるが、どのタイミングで河床変動が停止しているかを判断することは難しい。

7) 2019年洪水から得られた知見

今回の河床水温観測は、洪水中的の河床変動を捉えたばかりでなく、1,700m³/s程度の小規模洪水であっても、大きな河床変動が生じていることを確認することができた。ただし、今回の観測方法では、平坦河床に至ったかを判断することはできないほか、特に洪水後期の水温上昇期の解釈が難しく、再堆積過程を判読することも困難であった。横山らが適用した筑後川の河床は細砂以下であったが、中砂~粗砂の多い神通川では間隙水の影響も大きく、水温による河床位の推定には限界があるものと考えられる。

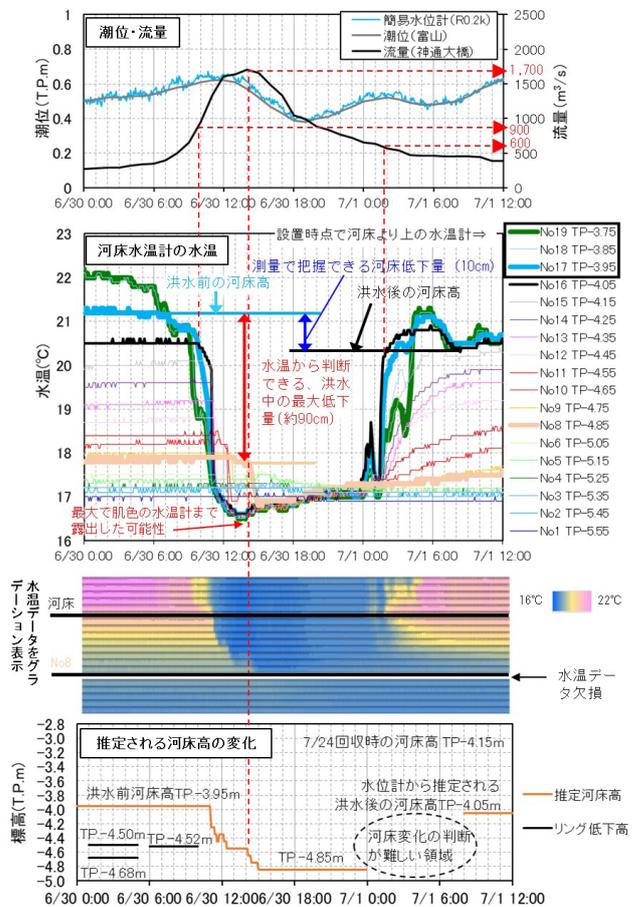


図-10 洪水中的の河床変動の分析 (2019年6月洪水 0.2k地点)

8) 洪水中の河床変動の模式化

これらの観測結果をもとに、現時点で想定した洪水中の河床変動状況を模式的に示したものが図-11、図-12 である。図-3 で示した 2018 年 7 月洪水前後の河床変化もふまえると、洪水時は塩水くさびの流出後に河床変動が始まり、小規模河床形態が形成されると考えられる。洪水後期は塩水くさびの侵入に合わせて河床変動が停止している可能性が推測されるが、詳細は分からない。

なお、水温計やリング計に伴う河床低下は、河床変動が生じたことを表しているものの、この低下量を「小規模河床波の波長高さ」と捉えるか、「河床低下」と捉えるかを現時点で明言することはできず、今後解明すべき実態の一つとなっている。

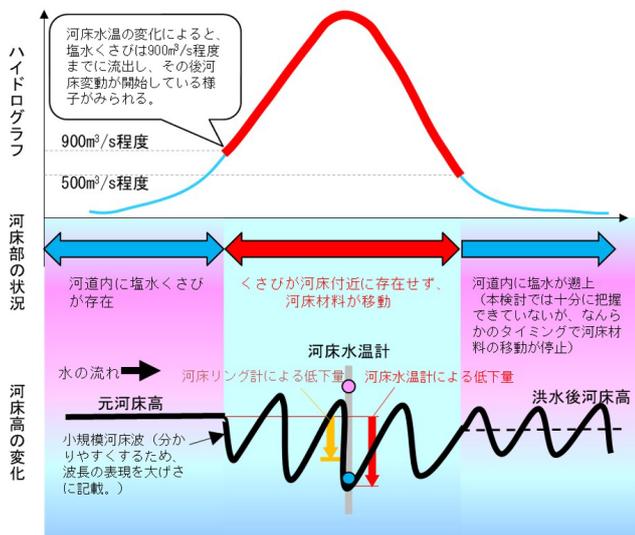


図-11 洪水中の河床変動状況の時間変化イメージ

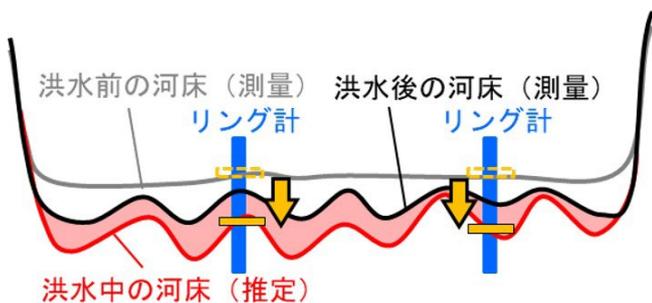


図-12 洪水中の河床変動状況の推定(横断イメージ)

(3) 2020 年の観測データからの考察

2020 年は 7 月 8 日にピーク流量 3,892m³/s (暫定値) の中規模洪水が発生したことから、これをもとに河床変動観測データの考察を行った。この年は図-9 で示したように水温計が折れてしまったことから、リング計の低下量を用いて考察を行った。なお、この考察は「リング低下量」＝「河床低下量」と仮定した場合の考察である。

1) 河床リング計の計測状況

図-13 は 0.4k 地点に設置したリング計の低下状況の例である。右岸側の 2 本のリング計は洪水後河床高よりそれぞれ 41cm、55cm 低下していた。左岸側の 2 本のリングのうち 1 本は流出したが、もう 1 本は洪水後河床高より 139cm 低下していた。

2) 洪水中の河床高平面図の作成

各観測地点で洪水後河床高からのリング低下量を整理し、GIS に点データとしてプロットして平面的に補間することで、平面的なリング低下量を求めた。この低下量を洪水後の 3 次元測量に基づく河床高から差し引き、洪水中の河床高を推定した。その結果を図-14、図-15 に示す。

3) 推定した洪水中心河床高の妥当性確認

推定した河床低下断面の妥当性を確認するため、0.0k 右岸の簡易水位計の時刻水位および時系列の流速観測結果 (STIV 法で表面流速を求めるため、低水路内に等間隔の検査線を設けてそれぞれ流量を算定し、単純横断平均した流速) を活用して、0.0k の流量検証を行った。図-16 は 0.0k の洪水後測量断面を用いる場合と、本検討で推定した河床低下断面を用いる場合の流量の違いを比較したものである。図-16 によると、推定した河床低下断面を用いた流量は、神通大橋地点のハイドログラフと酷似していることが分かる。

この結果より、今回推定した河床低下断面は流量収支の側面から妥当性を確認できたことから、リング低下量を河床低下量として表現することの可能性を見出すことができた。

(4) 洪水中の河床低下の把握に対する観測の重要性

今回実施した河床水温計による河床変動観測は観測の限界も見られるものの、洪水中の時系列的な河床変動実態を把握する重要なデータを取得することができた。一方、河床リング計は、河床低下量の絶対値を把握する方法として有益な方法であることを把握できた。

これらの観測を行うことで、これまで想像しかできなかった洪水中の河床変動実態を、具体的なイメージとして表現できたことは有益であったと考えている。

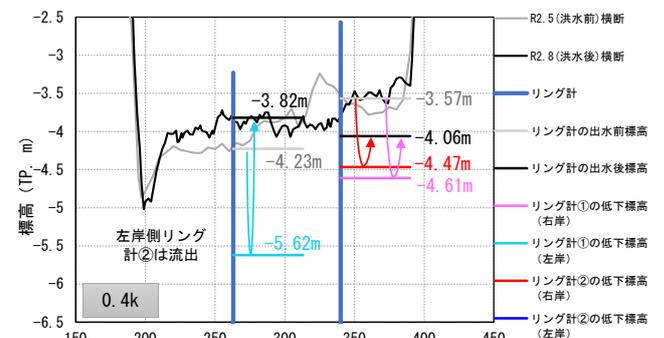


図-13 2020 年 7 月洪水後のリング計の計測結果 (0.4k 地点)

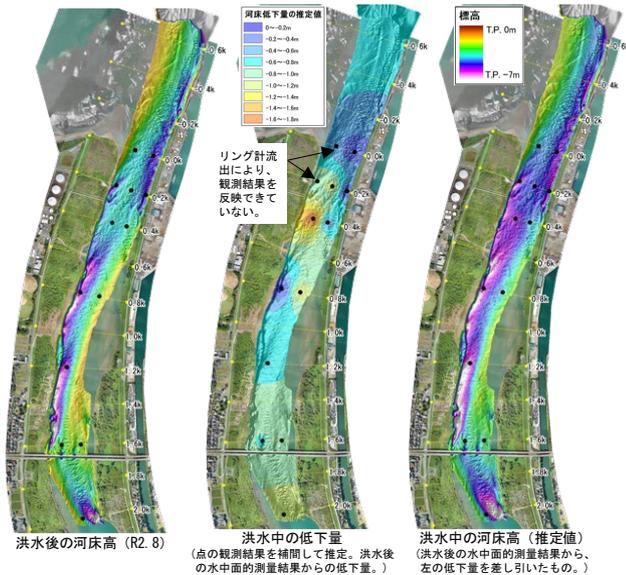


図-14 リング低下量の面的な展開と
洪水中の河床高の推定

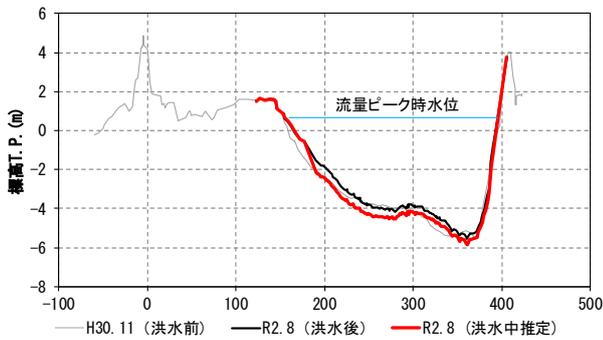


図-15 リング低下量を活用した洪水中の河床高の推定
(0.0k)

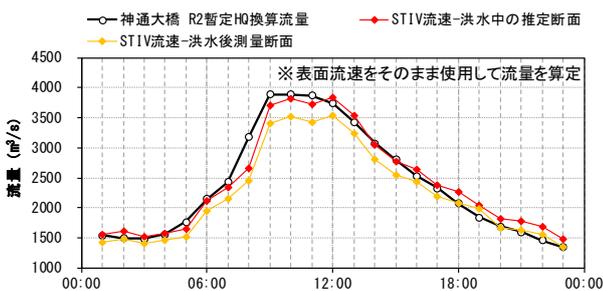


図-16 0.0k 地点の河床低下断面(推定)の妥当性確認

5. 結論

本調査は神通川下流部を対象に、不等流計算の再現精度向上にむけた取り組みとして、粗度係数、河床低下に着目して調査、検討を行い、以下の成果を得ることができた。また、洪水前、洪水中、洪水後の観測が、洪水中的の実態を把握するうえで極めて重要な情報を与えてくれることを認識することができた。

(1) 粗度係数の検証

洪水後に水中の3次元測量を実施することで小規模河床波を把握できる場合がある。また、その小規模河床波のスケールと代表粒径をもとに粗度係数を推定することができ、不等流計算から求めた逆算粗度係数の検証材料に活用できる。

(2) 洪水中の河床低下と河床変動状況

今回の調査により、未解明であった洪水中的の河床変動状況の一部を推定することができた。また、そのときの河床変動規模は、洪水前後の測量比較から判断できる河床低下量よりも相当大きいと推定できた。さらに本検討では、「リング低下量」＝「河床低下量」と仮定して、洪水中的の河床低下断面を推定して0.0k地点の流量を検証したところ、河床低下断面の妥当性を確認することができた。

(3) 河川観測の重要性

本報告では、洪水時の縦断水位観測、河床の3次元測量、河床変動観測の結果を主に活用したが、河床低下の可能性検討においては、STIV法を用いた流速観測の結果も活用している。このような新たな観測手法を取り入れることで、洪水中的の実態を把握できるばかりでなく、これまでは難しかった考察を行うことができた。これらの知見をさらに積み重ねることによって、洪水中的の実態に即した計算条件が設定できるようになり、適切な流下能力評価に結び付くと考えられる。

6. おわりに

本稿は、河口域を対象とした洪水の再現計算における適切な条件設定について多様な現地観測を通して検討したものである。特に、不等流計算における粗度係数について検討を深めた。河床変動観測においては、現象をより深く理解できるように、洪水中的の河床土砂移動を模式化して整理した。

この結果、河床低下と小規模河床波の関係が曖昧であることなど、さらに解明すべき点も明らかになってきている。このため、今後も観測と考察を継続することで、洪水中的の実態把握に結び付くものと考えている。

なお、今後の調査で実感した特徴や留意点を挙げれば、以下のような事項が挙げられる。これを参考に今後も調査を継続していく予定である。

- 砂河床において河床波分析を行って粗度係数を算定する方法は極めて有効である。しかし、河床波を把握するためには、できるだけ洪水後の早い時期に3次元測量を行う必要がある。
- 河床リング計による観測は河床低下量の絶対値を把握するために非常に有効な手法であった。機器の費

用も比較的安価であることから、面的に多数配置することが有効である。

- 河床水温計による観測は、洪水時の河床変動実態を時系列で把握する方法として非常に有効であった。しかし、近距離で縦断的に配置しても、どれも似たデータが得られる傾向があった。また、リング計のように、河床低下の絶対値を把握（解釈）することは難しかった。
- これらをふまえると、水温計は最小限とし、リング計を面的に多数配置することで、時系列変化と面的な変化の両方を、効率的に把握できると考えられる。
- なお、河床リング計、河床水温計ともに、洪水後の検索には労力がかかるほか、洪水時に流出する場合もある。このため、より効率的に洪水時の河床変動を把握するための技術開発も必要である。

謝辞：河床変動調査結果の解釈や、洪水時の河床変動の考察にあたり、東京都立大学の横山勝英教授には、大変丁寧にご指導頂きました。また、河床変動の現地観測においては、海洋プランニング株式会社の寺尾弘氏、有限会社測地開発の野口仁志氏、有限会社中央航測の小栗保二氏をはじめ、多くの方にご尽力頂きました。ここに記して感謝申し上げます。

参考文献

- 1) (財)国土技術研究センター：河道計画検討の手引き、2002
- 2) 秋田麗子、西口亮太、野間口芳希：水中の河床地形の面的計測とその活用方策について、河川技術論文集、第 23 巻、pp.176-177、2017
- 3) 吉川秀夫、石川忠晴：砂漣・砂堆上の流れの抵抗について、土木学会論文報告集、第 281 号、pp.55-61、1979
- 4) 横山勝英、山本浩一、金子祐：筑後川感潮河道における洪水時の底質浸食過程と有明海への土砂輸送現象、土木学会論文集、Vol.64、No.1、pp.71-82、2008
- 5) 原田大輔、知花武佳、日野将人：土砂交換厚に着目した二河川間の土砂動態の比較、土木学会論文集 B1(水工学)、Vol.72、No.4、pp. I_788、2016