

流量算出に関する既往モデルの 適用性に関する研究

STUDY ON THE APTITUDE OF MODELS FOR DISCHARGE RATING

本永良樹¹・萬矢敦啓²・岩見洋一³・山坂昌成⁴

Yoshiki MOTOANGA, Atsuhiko YOROZUYA, Yoichi IWAMI and Masashige YAMASAKA

¹正会員 博(工) 土木研究所ICHARM (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

²正会員 Ph.D. 土木研究所ICHARM (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

³正会員 工修 土木研究所ICHARM (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

⁴正会員 工博 国土館大学理工学部教授 (〒154-8515 東京都世田谷区世田谷4-28-1)

HQ curve (rating curve) is usually adopted in Japan to calculate water discharge in rivers on a continuous basis from water level observed by water gauges in the same river section, although it has been said that this curve does not consider the effect of water surface slope and river-bed elevation change during flooding. Recently, HK curve is proposed to take the effect of water surface slope into consideration, but the applicability of this curve has not been confirmed actually. So the authors tried to verify the suitability of this curve in the actual rivers during flooding. As the result, HK curve method can calculate accurate discharge in rivers without river-bed change, but in rivers with river-bed change, this method doesn't show better result than that of HQ curve method. It is shown that this result is caused by the lack of the consideration about the river-bed change.

Key Words : HQ curve, HK curve, water surface slope, river-bed change, ADCP

1. はじめに

河川計画において必要な流量を知るためには年間を通して毎正時の流量を把握する必要がある。しかしながら降雨量や水位と異なり、一般的には流量は連続して測ることはできない。そこで通常は流量を求めたい地点において水位と流量の関係式を求め、その式に水位計により連続観測している水位を代入して流量に換算する手法が取られている。この関係式は水位-流量曲線 (HQ曲線) と呼ばれる。HQ曲線とはそれぞれの河川について、観測水位および観測流量の関係を図にプロットし、その関係に対して最小二乗法により求めた2次の近似曲線式である。この近似曲線式に別途水位計により連続観測している水位を代入し、毎正時における流量を換算している。この手法を以降HQ曲線法と呼ぶ。HQ曲線法の使用については既に60年以上にわたる歴史があり、河川計画、河川管理に資する貴重なデータの蓄積がなされている。HQ曲線を作成する際、基になる観測は低水時・高水時それぞれにおいて実施されるが、高水時の流量観測に関しては対象とする出水のピーク時を含め、水位の立ち上

がりから通減時まで観測を実施することが求められている。しかしながらよく知られているように、実際の河川では高水時において水位の立ち上がり時と通減時では同一水位でも水面勾配の違いにより流量が異なることがある。この場合の観測流量、観測水位について、観測流量を横軸、観測水位を縦軸にしてプロットすると、いわゆる反時計回りのループを描く。このような観測データに対して最小二乗法を適用すると、得られるHQ曲線では水位と流量が一对一の関係になり、上述したような実際の水位と流量の関係に見られる二価性が表現できない¹⁾。実際、本永ら²⁾は国内の一級河川であるI川における浮子測法による流量観測データと、それを用いて作成した実際に使用されているHQ曲線式を比較し、同河川で出水の水位立ち上がり時と水位通減時で同一水位における実際の流量がHQ曲線式により換算される流量よりも立ち上がり時で大きく、通減時で小さくなっており、ピーク時の流量が約4000m³/sであるのに対し、それぞれの差が250~400m³/sと無視できない大きさとなっている例を示している。(ただし、最も重要な出水ピーク時においては河川流れはほぼ等流状態と見なせることから、実際の観測流量とHQ曲線法による換算流量とが等しくなるこ

とも示されている。) 水面勾配の違いを考慮して水位から流量を換算する手法として本永ら²⁾はHK曲線法を提案している。この手法により、水面勾配の違いによる実際の流量と換算流量値との誤差は理論的には改善される。しかしながらHQ曲線法、HK曲線法のいずれも出水中における河床変動およびそれに伴う河床粗度の変化が考慮されていない。これらの流量換算モデルは流量を算出する断面の形状は一定であるという前提の基に成立している。実際には出水中の河川内では河床変動が生じていることが多く、例えば出水時に河床が数m程度洗掘され、水位通減時にまた埋め戻されるという河床変動現象が様々な方法で確認されている。例として、河川中州において低水時に数mボーリングしてその中に炭の粉を詰め、出水前後でどの程度炭が流されたかを調べた江川³⁾、予め河床に差し込んだ金属杭にリングを通しておき、出水後に河床高とリングの潜り深さを計測することで、出水間の河床の洗掘量及び埋戻し量を把握するリング法を用いた植木ら⁴⁾、大沼ら⁵⁾、あるいは光電式砂面計により出水中の河床変動を連続的に把握した末次ら⁶⁾、原田ら⁷⁾の研究がある。このような顕著な河床変動は流況に無視できない影響を与えることが考えられる。例えばYorozuya et al.⁸⁾、本永ら⁹⁾、Motonaga et al.¹⁰⁾の研究に見られるように、河床変動に伴い流れの三次元的な構造や河道特性が変動することがADCPによる連続した横断観測により示されている。このような現象が見られる実河川において、上述した各種の流量換算モデルを用いて実際に流量を算出し、それぞれの適用性を検討した事例は少ない。そこで本論文においては実際の河川を対象として、河床変動が生じている場合と生じていない場合に流量観測を行い、その結果を基に上述した流量算出モデルを用いて流量値を算出し、実際の流量との誤差について比較・検討することを試みた。

2. 研究の内容

本研究を実施するに当たり、実河川での出水期を対象として流量、水位および水面勾配を測定した。対象とした河川／観測地点を表-1に示す。K川は出水中に河床変動の生じている河川、S川、U川は河床変動が生じていない河川である。流量は橋上操作艇登載ADCPによる横断観測により測定した。また、このADCP横断観測では出水中の河床高横断分布の変化も測定している。水位および水面勾配を測定するため、河川縦断方向に複数の水位計を設置した。基本的な並べ方はADCP観測実施面の直上流、直下流および上流側、下流側にそれぞれ500m程度離れた地点である。水位は観測実施断面直下流の水位計のデータを用いた。4台の水位計による水位に対し、最小二乗法により直線近似式を与え、その勾配を水面勾配とした。これらの観測データ（ADCP流量、水位、水

表-1 各河川諸元

河川	U川	S川	K川
観測地点	H地点	U地点	I地点
観測期間	2012年4月 2013年4月	2012年9～10月 2013年9～10月	2011年9～10月 2013年9～10月
出水状況	融雪出水	台風による出水	台風による出水
河床勾配	1/430	1/13000	1/300
水面幅	約140m	約100m	約80m
観測時の河床変動特性	河床変動なし	顕著な河床変動なし。	2011年：大きな河床変動が見られる。最大変動幅約1.5m。 2013年：左岸側で約1mの堆積が見られた。

面勾配) を利用することによりHQ曲線法、HK曲線法を用いて流量を算出した。HQ曲線式については表-1に示す各河川の水位とADCPにより観測された流量をグラフにプロットし、最小二乗法により次式の形式のような2次の近似曲線式を求めた。

$$Q = a(H + b)^2 \quad (1)$$

ここに、 Q ：流量(m^3/s)、 H ：水位(m)、 a, b ：係数である。係数 a, b を最小二乗法で求める。

HK曲線式の算出についてはHQ曲線式のように算出方法が公的に決まっているわけでないため、本永ら²⁾の方法に準じて求める。まず、水面勾配とADCPにより観測された流量を用いて次式より通水能を算出する。

$$Q = K \cdot i^{1/2} \quad (2)$$

ここに、 K ：通水能、 i ：水面勾配である。(2)式より K が求まったら水位 H と通水能 K をグラフにプロットし、その関係に対してHQ曲線式と同様に最小二乗法により次式の形式のような二次の近似曲線式を求める。

$$K = a'(H + b')^2 \quad (3)$$

ここに、 a', b' は最小二乗法により求める係数である。HK曲線法においては、水位計により連続して測定している水位を(3)式に代入して通水能を求め、別途縦断方向に複数設置した水位計により測定している水面勾配を用いることで(2)式より水位から流量への換算を行う。HQ曲線法、HK曲線法それぞれにより算出した流量を実際の流量と比較し、各算出モデルの誤差について検討する。この時、流量の真値はわからないため、ADCPによる観測流量を算出流量との比較用の基準値として取り扱う。

3. 結果と考察

(1) 河床変動

図-1～図-3はADCPによる河床高横断分布の重ね合せ

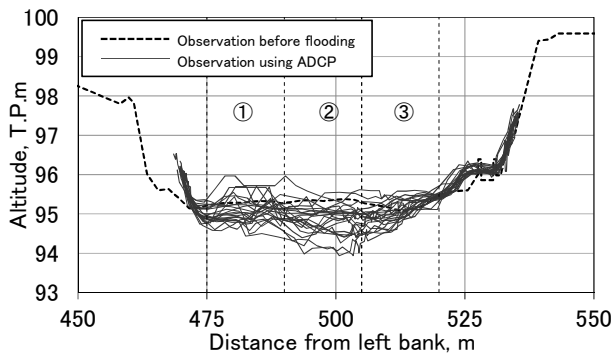


図-1 ADCP観測により得られた河床高横断分布
(KJII, 2011年出水時)

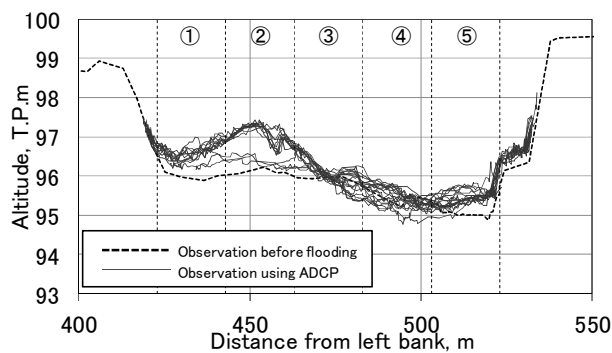


図-2 ADCP観測により得られた河床高横断分布
(KJII, 2013年出水時)

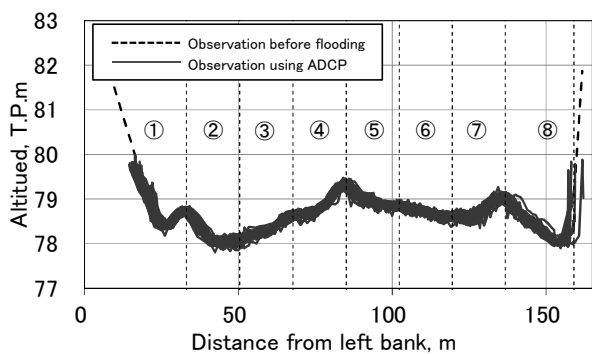


図-3 ADCP観測により得られた河床高横断分布
(UJII, 2012年出水時)

図である。図-1、図-2が出水中に河床変動の生じたK川、図-3が河床変動の生じなかったU川における観測結果である。図中、○数字は各河川の測定断面において設定した区分断面の番号である。K川は2012年に左岸側の高水敷を掘削して低水路を50m程度拡幅している。そのため2011年と2013年の出水結果をそれぞれ図-1と図-2に分けて示した。K川では2011年、2013年のいずれの出水においても顕著な河床高変動が生じていることがわかる。図-1より2011年出水時には流心に該当する区分断面②において最大で約1.5mの河床変動が生じているのがわかる。図-2より2013年出水時には前年に高水敷を掘削した左岸側（区分断面①、②）で約1mの堆積が生じていることがわかる。後述するがK川における2011年出水と2013年

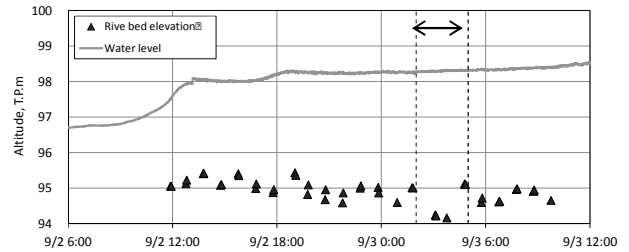


図-4 平均河床高、水位の時系列
(KJII, 2011/9/2~9/3)

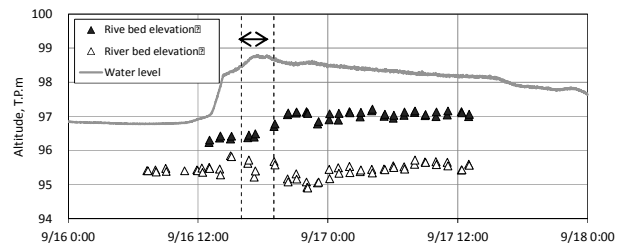


図-5 平均河床高、水位の時系列
(KJII, 2013/9/16~9/17)

出水は流量で比較するとピーク時の出水規模に顕著な差は見られないが、異なるタイプの河床変動が生じていることが分かった。図-3より2012年のU川での観測においては河床変動は生じていないことがわかる。紙面の都合上省略するが、2013年観測でもU川では同様に河床変動は見られなかった。またS川においても著者が観測を実施した出水中においては顕著な河床変動は見られなかった。図-4、図-5はそれぞれ2011年、2013年出水時におけるK川地点での河床変動が特に顕著な区分断面内における平均河床高と水位の時系列図である。図-4から2011年の出水時には9/3 2:00~5:00（図-4中、両矢印で示した時間帯）にかけての短時間内に平均河床高が約1.0m低下し、その後すぐに埋め戻されるという急な変動が見られる。また図-5から2013年の出水時には前年に掘削した左岸側にて9/16 16:00~19:00（図-5中、両矢印で示した時間帯）にかけて約0.8m平均河床高が上昇していることがわかる。このように河積が大きく変動する河川においては、河積が一定であることを前提とした従来の流量換算モデルでは適切に流量を算出できていない可能性が考えられる。

(2) HQ曲線、HK曲線の算出

表-1に示した各河川における観測結果を基にHQ曲線、HK曲線をそれぞれ算出した。K川については先述の通り2012年に低水路の拡幅工事を実施しているため、2011年と2013年を分けてそれぞれの曲線を算出した。図-6~図-9はそれぞれの河川における観測データとそれを基に算出したHQ曲線である。図-6は河床変動の生じなかったU川における結果である。U川では河床変動がなかったこと、勾配が急であることなどから観測水位 H と観測流量 Q がほぼ一対一の関係を示しており、HQ曲線で実

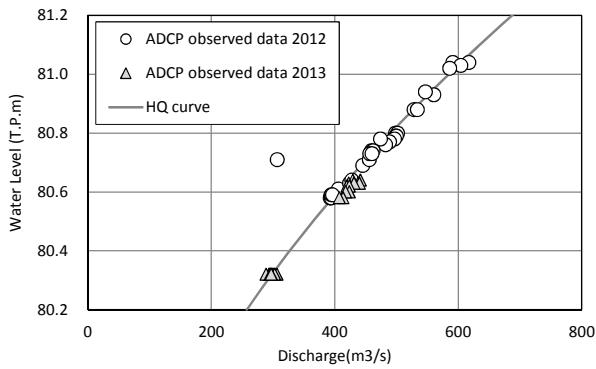


図-6 観測データおよびHQ曲線 (U川, 2012年・2013年)

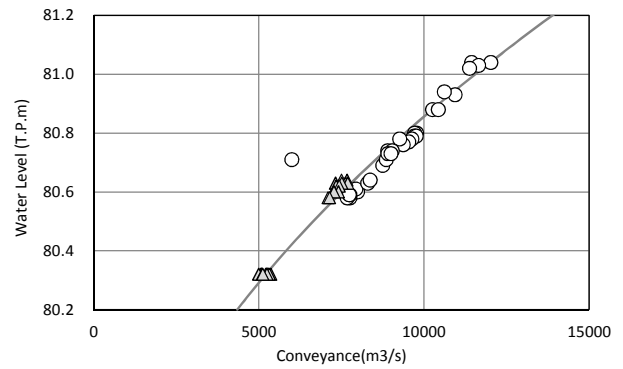


図-10 観測データおよびHK曲線 (U川, 2012年・2013年)

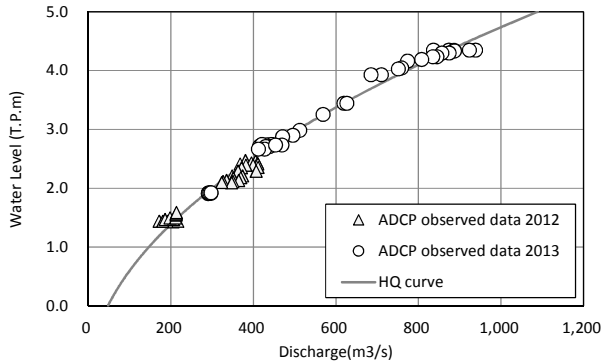


図-7 観測データおよびHQ曲線 (S川, 2012年・2013年)

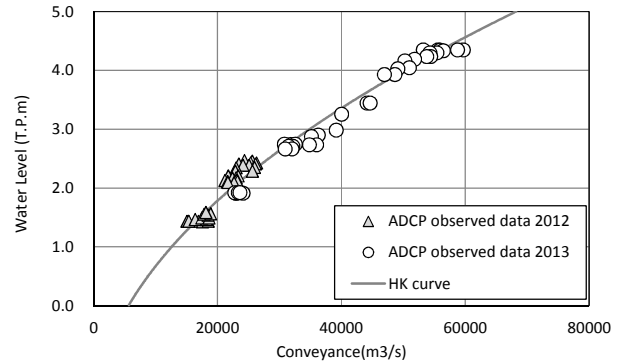


図-11 観測データおよびHK曲線 (S川, 2012年・2013年)

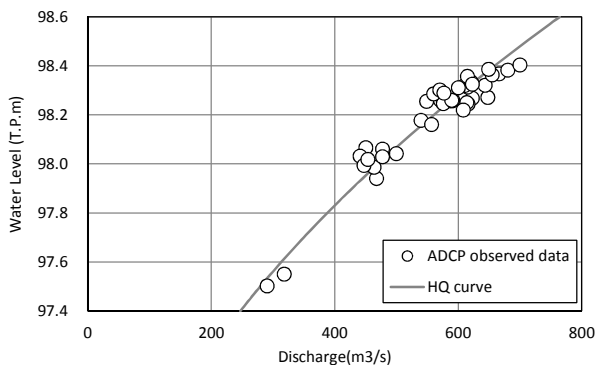


図-8 観測データおよびHQ曲線 (K川, 2011年)

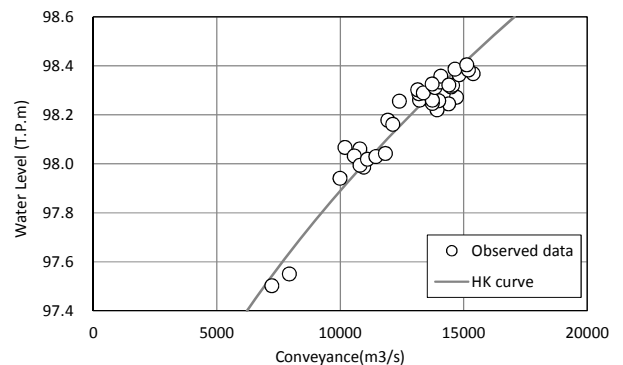


図-12 観測データおよびHK曲線 (K川, 2011年)

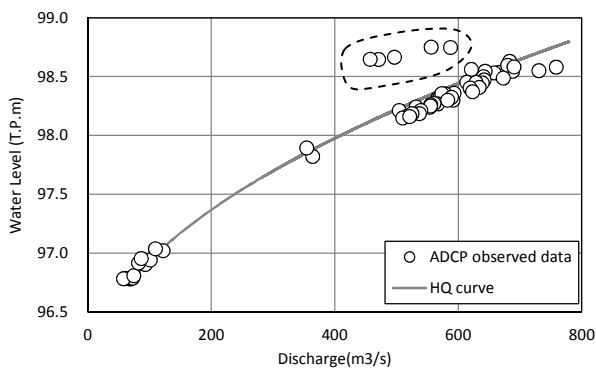


図-9 観測データおよびHQ曲線 (K川, 2013年)

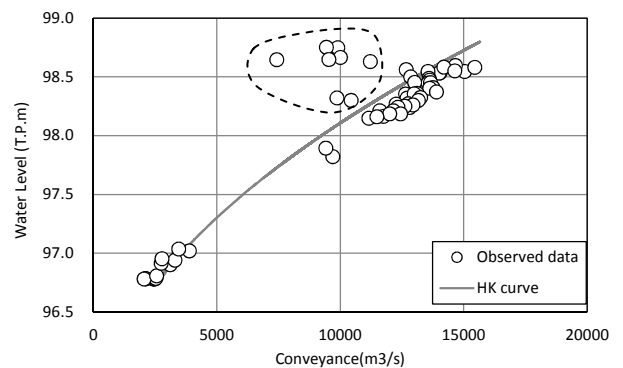


図-13 観測データおよびHK曲線 (K川, 2013年)

際の水位-流量関係が精度良く表現できることがわかる。図-7は河床変動が生じているS川であるが、同川での河床変動は顕著なものではなかった。S川でも観測 H と観測 Q の関係が一对一の関係を示し、HQ曲線が実際の現象を表現できているように見えるが、S川では2012年観

測時には出水の規模が小さかったこと、また2013年観測時には観測態勢の遅れにより出水ピーク期以降しか観測が実施されなかったためと考えられる。実際にはS川U地点は緩勾配河川であり、2013年観測時は出水規模が大きかったことから観測 H と観測 Q の関係は先述したよう

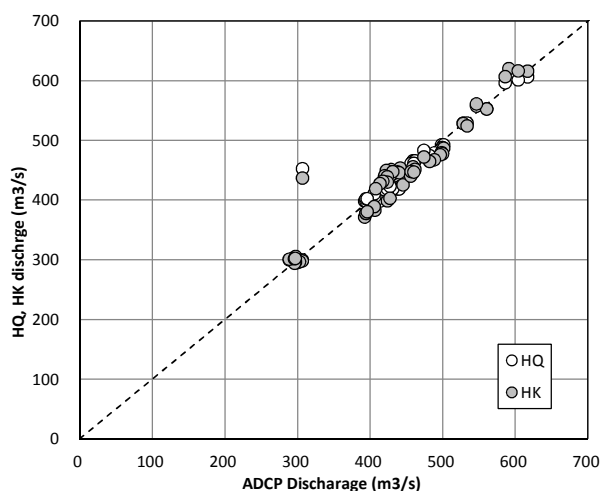


図-14 実測流量とHQ流量、HK流量の比較
(U川, 2012年・2013年)

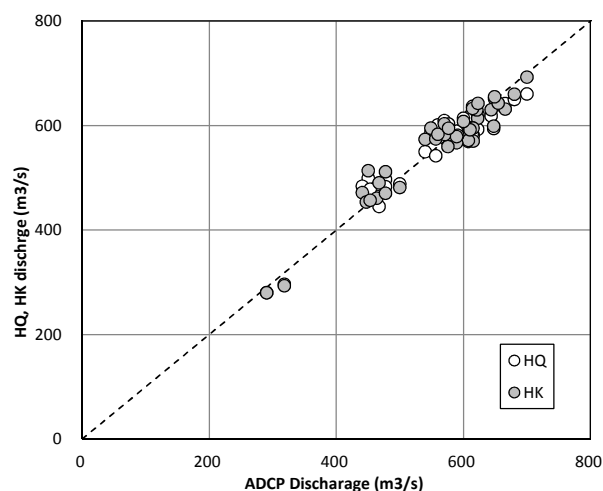


図-16 実測流量とHQ流量、HK流量の比較
(KJ川, 2011年)

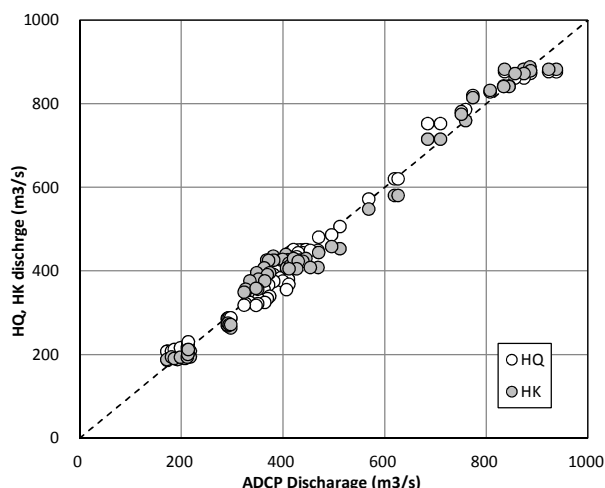


図-15 実測流量とHQ流量、HK流量の比較
(S川, 2012年・2013年)

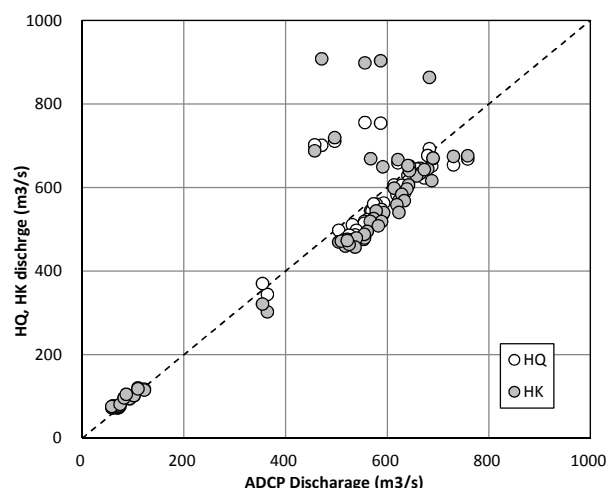


図-17 実測流量とHQ流量、HK流量の比較
(KJ川, 2013年)

な非定常性（二価性）を示すものと推定される。図-8、図-9は顕著な河床変動の生じたK川における結果である。S川、U川と比較して観測 H と観測 Q の関係にバラツキが見られる。特に出水規模の大きかった2013年の出水ピーク付近（図-9中、点線で囲った部分）で観測データのバラツキが大きい。これらのデータは図-5で見ると区分断面②で1m程度の河床堆積の進行が見られる時間帯（9/16 16:00～19:00頃）に観測されたデータであった。このことからK川で見られる観測データのバラツキは出水時の顕著な河床変動に起因するものであり、先述した出水時の水位と流量の関係が二価性を示す現象とは異なる。このようなデータについてもHQ曲線で関係を表すことができていない。図-10～図-13はそれぞれの河川におけるHK曲線である。観測 H と観測 Q が一对一対応を示している場合、観測 H と観測 K の関係もほぼ一对一対応である。観測 H と観測 Q に顕著なバラツキの見られた2013年のK川では、観測 H と観測 K の関係は観測 H と観測

Q の関係よりもよりばらついているように見える（図-13中、点線で囲った部分）。これらは図-5中で河床堆積が進行した時間帯（9/16 16:00～19:00頃）の観測データに加え、その直前の15:00～16:00頃の観測データが含まれている。この時間帯は区分断面②の河床高は一定だが、流心に該当する区分断面⑤にて約50cmの河床変動が生じているように見える。これらのデータからは河床変動は、観測 H と観測 Q の関係に対するよりも、観測 H と観測 K の関係に対してより影響を及ぼすことが見て取れる。このため求まるHK曲線式と観測データとの差はHQ曲線式と観測データの差よりも大きくなっている。

(3) 算出モデルの誤差について

先述した通りHQ曲線法、HK曲線法により算出した流量を実際の流量と比較して各算出手法の誤差について検討する。実際の流量については真値がわからないので、ADCP観測流量を基準値とする。

図-14～図-17は各河川におけるADCP観測流量とHQ曲線法による流量，HK曲線法による流量との比較図である。図-14，図-15より河床変動の発生していないU川，S川においてはいずれの流量算出モデルを使用しても算出流量に大きな違いは見られない。ただしS川については先述した通り観測態勢の遅れにより出水ピーク以降のみ観測が実施されたことが原因で両手法に差異が出ていない可能性がある。これについては今後の課題としたい。図-16，図-17は河床変動を伴うK川におけるADCP観測流量とHQ流量，HK流量との比較図である。短時間で河床が顕著に低下し元に戻るという河床変動の見られた2011年の観測においてはHQ流量，HK流量で大きな差は見られない。しかしながら，出水のピーク付近の約3時間において低水路内の左岸側約50mの範囲内で1m程度の堆砂が生じ，その後は河床高がそのままほぼ固定された2013年の観測結果ではHQ流量よりもHK流量の方が実際の流量との誤差が大きくなることがわかる。特に図-5に示した左岸側で堆積が進行する時間帯（9/16 16:00～19:00）においてHQ流量とHK流量の差が顕著になる。この時間帯においてはその前後の時間に比較して水面勾配が急になっているが，これは河積が減少したことにより流心近くに水が集中し，これにより水面勾配が急になったため，その効果がHK流量を実際より大きく算出されたものと考えられる。このことから河床変動の顕著な河川においてはHQ曲線法，HK曲線法ともに現状では精度が高くないことが示された。2013年のK川における結果に関しては，基準値であるADCP観測流量に対してHQ曲線法，HK曲線法それぞれによる算出流量の誤差は最大でそれぞれ約50%，約90%であった。

4. まとめ

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- 1) ほぼ流量規模の同じ出水であっても，出水前の河道断面形状の違いにより発生する河床変動のタイプが異なる場合があることを観測結果より示した。
- 2) 河床変動の生じない河川においては水位 H と通水能 K の関係が理論通り一対一になることを観測結果より示した。この時，HK曲線法による算出流量はADCPによる基準流量と良く一致した。ただし，本研究においてこれまでに実施された河床変動を伴わない河川における観測は，出水規模の小さい場合や，出水規模が大きくてもピーク時以降に観測された場合が多く，水位 H と流量 Q に元々二価性の関係は見られなかった。その結果，本研究においては河床変動のない河川ではHQ曲線法によっても算出流量はADCPによる基準流量と良く一致した。これについて

では今後の課題とする。

- 3) 河床変動の顕著な河川においては H と K の関係は一対一にならない場合もあり，特に出水規模の大きい場合についてはHK曲線法による算出流量は実測流量と顕著な差を示し，その際はHQ曲線法による算出流量よりも大きくなることもある。これは出水中の河積の変動が考慮されていないこと，河道断面形状の変化により水面勾配が大きく変動したことなどが理由である。河床変動の伴う河川における流量算出モデルについては，今後も様々なケースにおいての観測事例を蓄積して，検討を進める予定である。

参考文献

- 1) 木下武雄：超音波により連続的に観測された洪水・潮汐等の流量変化の不定流としての挙動，国立防災科学技術センター研究報告，第27巻，pp.1-11，1982。
- 2) 本永良樹，銭潮潮，山田正，山坂昌成：水位-通水能曲線（HK曲線）を利用した新しい流量算出手法，土木学会論文集B1（水工学），Vol.68, No.4, pp.1357-1362, 2012。
- 3) 江川太郎：河川工学入門，財団法人河川情報センター，pp.46-48，1997。
- 4) 植木真生，福島雅紀，末次忠司：河道内への砂礫の敷設供給が下流河川の河床形状に与える影響，河川技術論文集，第12巻，pp.415-420，2006。
- 5) 大沼克弘，藤田光一，望月貴文，天野邦彦：太田川放水路を事例とした河口干潟の設計・管理方法の枠組みに関する研究，河川技術論文集，第17巻，pp.185-190，2011。
- 6) 末次忠司，日下部隆昭，坊野聡子：土砂管理施策のためのキーノート～土砂動態の時空間的不連続性を考慮した流域管理に向けて～，国土技術政策総合研究所資料，第231号，2005。
- 7) 原田芳朗，福岡捷二，田中浩史，黒田勇一，戸谷三知郎：河床洗掘深，洗掘速度に及ぼす洪水波形・河道特性の影響—中小河川と大河川の比較—，水工学論文集，第54巻，pp.775-780，2010。
- 8) Yorozyu, A., Fukami, K. : Study about Velocity Index in Actual River during Flooding, Proceeding of Third International Symposium on Shallow Flows, Iowa City, Iowa USA(CD-ROM), Page No.130, 2012
- 9) 本永良樹，萬矢敦啓，深見和彦，山坂昌成：異なる河床変動特性に応じた流速補正係数に関する考察，河川技術論文集，第19巻，pp.195-198，2013。
- 10) Yoshiaki MOTONAGA, Atsuhiko YOROZUYA, Shigenobu TANAKA, Masashige YAMASAKA : Changes in River Course Characteristics according to the Scale of Water Discharge, Proceedings of 7th International Symposium on ENVIRONMENTAL HYDRAURICS, Singapore, (CD-ROM), pp.395-398, 2014。

(2014. 4. 3受付)