感潮域におけるADCPを用いた河川流量の推定

ESTIMATION OF RIVER DISCHARGE USING ADCP IN AN ESTUARY

横尾 啓介1・吉田 静男2・岡田 幸七³・野村 佐和美³ Keisuke YOKOO, Shizuo YOSHIDA, Koushichi OKADA and Sawami MOMURA

¹正会員 (株) 福田水文センター 調査部 (〒001-0024 札幌市北区北24条西15丁目)
²正会員 工博 ユニヴ・テック 環境流体研究所 所長 (〒001-0030 札幌市北区北30条西13丁目)
³北海道開発局 石狩川開発建設部 (〒060-8541 札幌市中央区北2条西19丁目)

Discharge can be considered one of the most essential hydraulic parameters to know about a river for managing it. Ordinarily, the H-Q equation is used to estimate the discharge from the level of a river. Certainly, this provides acceptably accurate estimates in the upper reaches of rivers. In estuaries, however, its accuracy is fatally degraded. In the initial part of this study, a river was divided into 15 zones in the traverse direction, and the discharge in each zone was compared with the actual discharge of the river itself to see what kind of cross section allowed the local discharge to show the best correlation with the river discharge. Then, ADCP were placed on the riverbed and long-term measurements of the flow speed distribution were taken for comparison with the discharge as indicated by actual measurements. A clear proportional relationship was obtained between the two sets of data. It is clear that the equation relating the data sets provides a far superior estimate of discharge over the H-Q equation.

Key Words : Estuary, water level, river discharge, ADCP, discharge of unit width, H-Q equation

1. はじめに

河川の流量は、洪水時の治水管理、渇水時の維持流量 の監視、農工業や水道、発電などの利水等において、基 本的かつ重要な水理量である.通常河川流量は、各観測 所において流量観測(測量)を行い、その結果から水位 (H)と流量(Q)間に成立する、いわゆるH-Q式を用い て推定される^{1).2)}.全国の主要な河川では、河川情報シ ステムにより水位の経時データが取得され、H-Q式を もとに河川流量がかなりの精度で得られている.

しかし、感潮域の、特に渇水時における流量の把握は、 上流域に比べて著しく困難を極めている。その理由は、 水面勾配が極めて小さいことに加え、河川流量以外に水 位が、潮汐、気圧、風向・風速等の影響を受けて、刻々 様々な値をとるためである^{3,4}. そのため、最小二乗法 で*H-Q*式を得たとしても、多くの場合、現実の流量を 精度良く推定することは困難であると考えられてきた. そこで、この課題を解決するため、本研究では、まず、 石狩川において実施された流量観測の結果から、感潮域 の河川に関する流れ場の特性を明らかにした.次に,得 られた結果から流量と相関の良い代表的な区間を選定し, その区間の河床にADCPを設置した.最後に,ADC Pにより得た上記代表区間での単位幅流量と,同時刻の 全断面流量間の関係式(以後,ADCP式と略称する) を求め,これを用いて流量時系列を推定した.この手法 により得る推定流量は,従来のH-Q式による手法と比 較して格段に精度が良い.

2. 観測方法及び観測結果

本研究において、対象とする石狩川下流部の地形を図 -1に示す.石狩川は、延長268km、流域面積14,330km² を有する我が国有数の大河川である.その下流部は低平 な石狩平野を通り石狩湾南東部に河口を持ち、感潮区間 は最大約45kmにおよぶ.

図-2は感潮域上限近傍である岩見沢大橋水位流量観測 所(KP44.5)の過去5ヶ年の実測値の中から,洪水時を除 く流量1,000m³/s以下の水位Hと流量Qの関係を示した ものである.同図より,水位と流量は一対一の良好な相 関関係を示している.一方,その下流である石狩大橋水 位流量観測所(KP26.6)において,同様な方法で調べると 図-3を得る.同図より,水位と流量の関係は大きく散乱 しており,その度合いは,流量が小さくなるほど増大し ている.例えば,後述する平水流量に相当するQ=350m³/s付近に着目すると,水位は0.3 < H < 0.8m と なっており,散乱の幅が極めて大きいことがわかる.な お,紙面の都合上割愛するが,より高水位のH > 1.0mで は,外海小樽港年平均潮位約0.25mの影響を受ける感潮 区間は下流に後退し,石狩大橋においても図-2の岩見沢 大橋と同様,良い相関となっていることを付記しておく.

図-4は石狩大橋における2006年1年間の時刻水位頻度 を示したものである.図には、低水側からの累加頻度も 同時に実線で示している.同図より、水位は年平均水位 である0.40m付近を中心に分布している.また、累加頻 度を見ると、HとQの散乱が大きい1.0m以下で全体の約 90%を占めている.したがって、同観測所では非常に長 い期間、現行H-Q式による流量算出では大きな誤差が 生じている可能性が指摘でき、実際に正常流量の設定、 農工業や水道への取水等にも大きな影響をおよぼす結果 となっている.これらの問題を解決するためには、水位 のみに依らない新たな流量推定手法を開発する必要があ る.

(1) 代表測点の選定

感潮域の流量推定には、昨今、特にADCPを用いた 多くの方法が試みられ、得られた知見も少なくない。例 えば、H-ADCPを用いて河道横断方向に流速を計測 する方法なども行われているが^{5,6,7)}、石狩大橋のよう に川幅400mもある地点では、同手法で観測を行うには難 しい条件となる。

他の試みとして,西田らは高瀬川水系高瀬川高瀬橋に おいて,横尾らは天塩川水系サロベツ川浜里において, ADCPを用いた流量の推定を行っている^{8,9}. 両者に 共通する観測法は,ADCPを流心部の河床に設置し, 時系列で計測された層厚と層流速から単位幅流量を求め, 観測流量との相関式を作成して全断面流量を推定する方 法である. 結論として,ADCPの設置位置が観測所の 流況(流量)を良く反映する場の代表点である,という条 件を満たせば,十分な精度で流量の推定が可能であるこ とを示している.

これらの知見から、まず、石狩大橋における流量代表 区間の選定を試みた.石狩大橋は、石狩川下流部の基準 観測所に指定されており、年間36回の低水流量観測を 行っている.この結果から、過去5ヶ年における流量 1,000m³/s以下を抽出し、区分流量と全断面流量との関 係を示すと図-5を得る.同図は、15点ある区分横断面か ら、一例として左岸からの距離D=329.3~360.0mを示し ている.図より、区分流量 q_i (m³/s)と全断面流量Q



(m³/s)は良い相関を示し、単純な1次式よって関係づけられている.この作業を全ての区分断面について行い、



図-6 石狩大橋河床横断形状および区分流量と 全断面流量の相関係数

相関係数を求めると図-6を得る.図には石狩大橋の河床 横断形状も同時に示している.

同図より,最も相関の高い位置はr=0.98のD =345.0m(D=329.3~360.0mの流速測定位置)であった. つまり,この測点が1,000m³/s以下における石狩大橋の 流況を良く反映する代表点と判断できる.

(2) ADCPによる長期間連続計測

前節によって判明した石狩大橋D=345.0mを代表点と して、同位置にADCPを長期間設置し、流速を測定し た. ADCP(RDI WorkHorse 1200kHz)は**写真-1**に示す 架台によって河床部に設置し、設定はWM1、層厚0.25m, 1Hz, 60ping,毎正時1時間間隔とした.計測は2005年6 月30日から開始し現在も継続中である.途中、機器の点 検、データ回収は月1回の頻度で行っている.



写真-1 ADCPの設置



図-7 水位と流速鉛直分布

これまでの結果から一例として、夏期渇水時であった 2006年7月の流速鉛直分布を図-7に示す.図には水位も 同時に示している.図中,流速分布と水位の間に空白部 が存在するが、この部分はADCPの不感帯となってい る.図より流速鉛直分布は、通常の河川流とは異なり上 層から下層までの差が小さく、全層一様な値となってい る.同期間の平均流速を求めると約0.35m/sとなるが、 時系列を見ると、流速は潮汐の影響による水位変動に呼 応して0.20~0.50m/s程度の増減を繰り返している.ま た、7月18~21日には小規模の降雨出水があり、この時 は上下層で流速差が生じており、最大流速は19日5:00の 表層で1.25m/sであった.

3. ADCPを用いた流量の推定とH-Q式流量の比較

2006年1年間に31回実施された石狩大橋の観測流量Qと、水位Hの関係を調べると図-8を得る.次に、上述A DCPの層厚と層流速を鉛直方向に積分して算出される 単位幅流量q(m³/s/m)と、観測流量Qの関係を調べると 図-9を得る.図には、それぞれの近似式から得られる H-Q式と、ADCP式を実線で同時に示している.

これら2つの図を比較すると、図-8は、2006年においても前述図-3と同じく水位と流量の関係は大きく散乱している.一方、図-9を見ると、単位幅流量 q と観測流量 Qは、単純な1次直線で回帰できる程良い関係となっており、相関係数は図-8のr=0.89に比べてr=0.98と高い値 となっている.それぞれの式から算出される流量を、観 測流量と比較すると、H-Q式の場合は-243.50~ 374.51m³/sと大きな誤差が生じているのに対し、ADC P式の場合は-36.97~27.61m³/sと小さな値となってい る.また、流量比はH-Q式の場合は53~326%となるの に対し、ADCP式の場合は85~114%と±15%以内の誤











図-11 流量, 気圧, 風向・風速の関係(2006年9月18~23日)

差となり、非常に良い精度で流量が再現できている.以上の結果から、感潮域での流量推定に関しては、H-Q 式によるよりもADCP式を用いる方が格段に高い精度 で流量を推定できるといえる.

実際に図-7と同様な期間,2006年7月におけるADC P式を用いて推定した流量をH-Q式流量と同時に図-10 に示す.同図から,両者とも2回潮に対応する流量変動 が確認できるが,その位相は一致しておらず,約3時間 の位相差がある.具体的に,水位の関数となるH-Q式 による推定流量では水位の極小,極大時に流量ピークが 存在するが,ADCP式では、上げ潮最盛時と下げ潮最 盛時にそれぞれ極小,極大流量が発生しており,理にかなった推定結果となっていることがわかる.また,全体的に*H-Q*式よりも*ADCP*式の方が小さい流量となっていることも見逃せない.

ところで、2006年は1年間にわたり様々な状況下での 計測を行うことができたが、ここで、気象条件によって 極端な流量差が生じた例を紹介しておく.

9月20日には台風13号が北海道を通過したが、石狩川 流域内での降雨は、流量に大きな影響を与えるほど認め られず、風台風として急激な気圧変化と強風のみをもた らした.図-11は、2006年9月18~23日の結果である.図 は上から気圧(KP4.5で測定),流量,風向(4方向分類)・ 風速(石狩大橋で測定)である.同図より,その変化を時 系列的に追ってみよう.

台風の通過に伴い、20日5時には992.7hPaの最低気圧 を観測した. 同時刻の風向・風速はSE方向11.4m/sで あったが、その1時間後の6時には風向が180°変化し、 NW方向17.8m/sの強風へ急激に転じた. この気圧低下に よる潮位の上昇と、急変した下流方向からの強風に起因 する河口からの吹き寄せによって、石狩大橋では急激に 水位が上昇し、7時にはADCPによって鉛直方向全層 逆流が計測され、図-9のADCP式より流量を推定する と最小値-763.60m³/sとなった.1時間後の8時には最高 水位1.24m, H-Q式流量は最大値1,360.31m³/sとなって おり,流量差は2,000m³/sを越える大きなものとなった. ここでさらに注目すべきは逆流現象の存否である. 流量 観測はこの期間行っておらず、未だ逆流の観測結果はな いものの,石狩大橋では鉛直6層(標高-3.6~-1.1m)に塩 分計を設置しており、海水約半分の塩分濃度18‰が観測 されている. これらのデータから, 河口から侵入した海 水が河川水を押し戻し、全層を逆流させたと予想できる が、このときの負の流量は、ADCP式による推定流量 時系列に明白に捕らえられている. また, その逆流した 水塊は、上流部で一種の河道内貯留状態となり、その後、 気圧の上昇と風速の低減とともに順流に転じ、下流に流 下した.実際に、11時のADCP式によれば流量 489.67m³/sとなっており、最終的に20日の日流量が 147.00m³/sと推定され,前後日との整合が保たれている のに対し, H-Q式によれば日流量が766.07m³/sと突出 した値となっており、実際の流量より約600m³/s程度過 大に評価する結果となる.

これらの結果を含め、水文統計によって得られる2006 年1年間の石狩大橋における流況を表-1に示す.表より、 両者の流量比での比較では豊水103.4%、平水100.7%と差 は小さいものの、低水120.1%、渇水175.7%と流量が小さ くなるほど差が大きくなり、*H*-Q式による推定流量は 低流量になるほど過大評価していることがわかる.

4. おわりに

本研究で得た結論を以下に要約する.

(1)感潮域では、水位と流量の関係は大きく変動するが、 その度合いは、流量が小さくなるほど増大する.

(2) 観測地点の横断区間の中には、その区分流量が河川 流量と良い相関を示す代表的な区間が存在する.

(3) ADCP式を用いた感潮域の推定流量は、従来採用 されてきたH-Q式によるものに比べ、格段に精度が良い.

(4) ADCP式によれば、潮汐による流量変動の極値が 水位の極値ではなく、上げ潮と下げ潮の最盛時に発生す

表-1 石狩大橋の流況(2006年)

	H-Q式(m ³ /s)	ADCP(m^3/s)	比(%)
豊水	613.87	593.83	103. 4
平水	365.59	363.20	100. 7
低水	289.02	240.72	120. 1
渇水	236.85	134.80	175.7
平均低水	336.65	302.62	111.2
年平均	559.39	526.66	106.2
最小	170.18	-774.43	

ることが把握できる.

(5) ADCP式によれば、気象条件が急変し負の流量を もたらす場合にも忠実に流量を推定できる.

(6)水文統計量の流況によるADCP式とH-Q式による 推定流量の差異は、豊水、平水流量では小さく、低水、 渇水流量と低流量になるほど大きくなる.

今後は、さらにADCP式の有効性に関する検証を進め、感潮域における最適な流量観測システムの構築を目 指したい.

参考文献

- 1)国土交通省河川局監修:水文観測(平成14年度版),社団 法人 全日本建設技術協会,2002
- 2) 土木学会水理委員会編:水理公式集(平成11年度版),土 木学会, pp. 75-86, 1999
- K. Yokoo, S. Yoshida, C. P. Caulfield, P. F. Linden & I. Ito: Effect of wind on highly stratified flow, COASTAL ENGINEERING VII, WIT PRESS, pp. 25-35, 2005
- 4)横尾啓介 吉田静男 西田修三 荒川範彦:感潮域における河川水位決定要因の定量的評価,水工学論文集,第47巻, pp. 961–966,2003
- 5) 橘田隆史 岡田将治 新井励 下田力 熊田康邦: ADCPを 用いた河川流況計測法における課題と国内外における応用 観測事例,河川技術論文集,第12巻, pp. 133-138, 2006
- 6) 岡田将治 森彰彦 海野修司 昆敏之 山田正:鶴見川感 潮域におけるH-ADCPを用いた流量観測,河川技術論文集, 第11巻, pp. 243-248, 2005
- 二瓶泰雄 北山秀疲 江端萌奈美 色川有:江戸川におけるIH-ADCPの流速連続モニタリング,河川技術論文集,第12 巻,pp.139-144,2006
- 8)西田修三 中辻啓二:緩混合河川における流量と塩分輸送 量の算定,水工学論文集,第43巻,pp.869-874,1997
- 9) 横尾啓介 中津川誠 羽山早織 大熊正信:超音波流速計の連続観測に基づく流量推定手法,河川技術論文集,第10巻,pp.369-374,2004

(2007.9.30受付)