

実河川洪水時における ADCP を用いた流量観測の信頼性・適用性向上のための一考察

菅野 裕也¹・萬矢 敦啓¹・深見 和彦¹

¹ (独) 土木研究所 水災害・リスクマネジメント国際センター (〒305-8516 つくば市南原1-6)

流量観測はこれまで多くの手法が提案されてきているが、どの手法も何らかの仮定を必要としている。その中でADCPを用いた横断観測は、流れの非定常性を除けば、流量観測に必要な情報を最も多く取得することができる。しかしながら、洪水時など計測条件が厳しい場合、データ取得率の低下および信頼性の低下が生じる。著者らは、これらを改善するための技術開発を行っており、ADCP観測の適用範囲を拡大し、かつ信頼性の高いデータが取得可能となる計測を実行するための試みを報告する。

キーワード ADCP, 流量観測, トリマラン型, VTG

1. はじめに

日本において洪水時の流量観測は、浮子測法によって実施されているが、近年、河川の流量観測手法として Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) を用いた計測事例が数多く報告されており、浮子測法のさまざまな技術上および運用上の課題を解決するための試みが報告されている。河川流量を精度良く計測するためには、河川の流速分布、河床変動により変化する流下断面積を把握し、流量を算出することが必要であるが、特に洪水時の河川流況は観測条件としては厳しく、これらの実現を計測することはそれほど簡単ではない。また、そのような状況において、河床がどのように変化しているのか、掃流砂はどの程度あるかなどは、現象的にも非常に興味深く、かつ工学的にも重要であり、このような現象を把握することができる唯一の計測機器が ADCP である。しかしながら、ADCP 単体だけでは河川の流況計測は成り立たず、それを完成させるためには、ADCP を河川表面に接触させるための船体¹⁾²⁾³⁾、ADCP 自体の移動速度を計測するための GPS 等が必要である。河川の流量を計測する場合、ADCP を橋上操作艇などのボートに搭載し、横断方向に移動させることで、流水断面内の横断方向流速分布、鉛直方向流速分布および流下断面積を計測し流量を算出することとなる。これらの機器を組み合わせることで、ADCP が持つ能力を最大限に活かし、信頼性の高い計測を実施することが重要である。著者らは、これらの厳しい観測条件にも対応可能となるよう、ADCP 観測の適用範囲を拡大し、かつ信頼性の高いデータが取得可能となる計測手法等確立することを目指している。

ここでは安全・確実に信頼性の高い計測を実行するための著者らの試みを報告する。なお ADCP を用いた計測に関しては、ラジコンボートを使用する方法¹⁾等、複数の手法があるが、ここでは橋上操作艇を用いた手法を基本として議論を進める。また、ADCP の計測原理に関する論文は複数あるため、詳細については参考文献⁴⁾⁵⁾を参照されたい。ここでは必要な部分のみ説明を行う。

2. 橋上操作艇の検討

(1) 揺れにくい橋上操作艇の必要性

Work Horse (WH-ADCP) を含めたボートに搭載するタイプの ADCP は傾斜センサーが内蔵されており、流れによるボートの揺動で、ADCP から発射される超音波ビームが傾くことによる影響を補正している。岡田らは WH-ADCP に搭載されている傾斜センサーが液面検知式であることに着目し、そこから派生する傾斜センサーの揺動追従性などの問題点を示唆し、大型実験水路での実験および実河川での観測を実施している⁶⁾⁷⁾。その結果、WH-ADCP は、水面が振動するような観測条件であっても流量を正しく計測していることを示している。しかしながら、非常に厳しい水理条件下においては、計測データそのものが欠測となる場合がある。

図-1 に一般的な流量観測地点において橋上操作艇を用いて流況計測を行った事例を示す。図-1(a)は傾斜角(ピッチ角・ロール角)を、図-1(b)は流速コンター図を示す。両図の横軸は左岸からの距離を表している。流心部付近は比較的流速が大きく、大部分がデータ欠測とな

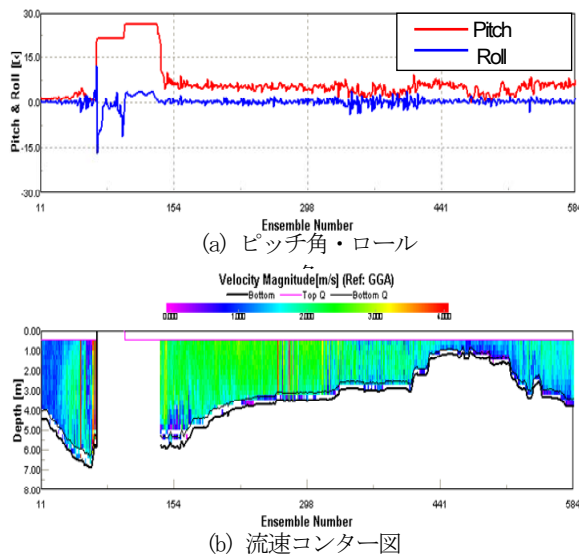


図-1 データ欠測が多い ADCP 流況観測事例

っており、その区間では傾斜角が大きくなっている。ボートによる ADCP 観測において生じるデータ欠測は、一般にボートが水面を跳躍して ADCP のトランスデューサー(送受波部)が水面上に出てしまう場合、あるいはボートの揺動が大きく傾斜角が 15 度程度よりも大きくなる場合に発射した超音波が受信できないことによって生じる。これらの問題点を克服するために、現地において複数のタイプの橋上操作艇による比較実験を行い、データ取得率の違いなどについて検討を行った。ここでは現地実験の方法と結果について概略のみを述べる。詳細は参考文献²⁾を参照されたい。

(2) 利根川高流速部における現地実験

現地実験は利根川前橋観測所付近の高流速部で行った。この地点は、平水時においても流速が最大 4m/s を超え、水面が大きく変動する流況であるため、実際の洪水観測を想定した計測が常時可能である。現地では約 40m の川幅に対して横断するようにワイヤーを張り、実験用ボートには 1200kHz タイプの ADCP に加え、RTK-GPS を搭載して流況計測を行った。計測モード、層厚、層数等は一般に用いられる設定条件を用いているが、流速を計測するウォーターピングは、傾斜角(ピッチ角とロール角)のデータと流速データを同期させるために、1 ピングとしている。

図-2 に本研究で用いた 4 種類の橋上操作艇を示す。図-2(a)は市販のトリマラン型のボートである。これは船艇の取り回しがしやすいよう船艇全体の長さを短くし、かつセンサーの重量を船艇全体で十分に支えることができるようにサイドハルの容積を増やしている。図-2(b)は高速流速時においても揺動が小さく安定的にデータ取得できることを目的として、USGS が基本設計を行った高速・低揺動型のボートである。Type A の基本設計を踏襲したうえで、全長を 20%程度サイズアップして縦揺



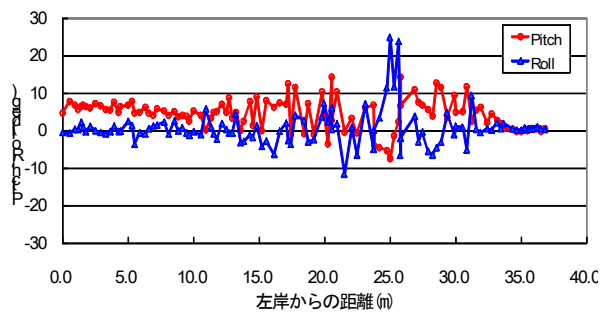
図-2 実験に用いた橋上操作艇

れへの安定性を向上させたことと、サイドハルの設計を大幅に改善して横揺れの安定性を向上させている。図-2(c)は船艇の横揺れを最小限に抑えることに配慮した設計に基づいたトリマラン型のボートであり、国土技術政策総合研究所河川研究室と共同で、現地実験、概略設計、室内実験を経て制作したものである。この特徴はセンサーの重量をメインハルの浮力で主に支え、サイドハルの役割は船艇の横揺れを抑えるためだけにある。その結果、他のボートと比較するとメインハルの容積が大きくサイドハルが小さくなっている。さらに、流下物への対策のため、浮遊物対策のゲージを設置している点が特徴的である。図-2(d)は流下物に対して最も安全と考えられ、著者らが検討を続けてきたモノハル型のボートである。

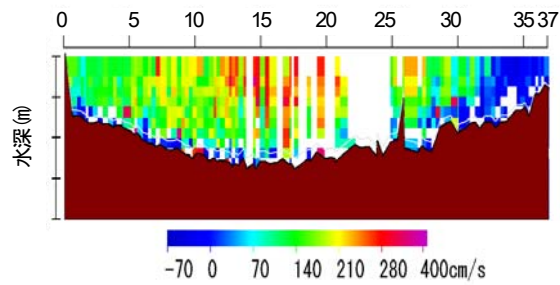
(3) ボートの安定性とデータ取得率

図-3 から図-6 に各橋上操作艇で横断方向に曳航させて観測を行った際の ADCP 内部傾斜センサー(1Hz)で計測したピッチ角およびロール角と流速コンターを示す。横軸は左岸からの距離を表している。なお、コンター図の白色の領域はデータ欠測を意味する。ボートの位置および移動速度の計測は RTK-GPS を用いた。なお、本観測実験中において、ボートの対地速度を算出するボトムトラックはほとんど機能しておらず、このような流況下において流速データを得るためには RTK-GPS との併用が必須であることがわかった。

図-3 の Type A では、流心部付近においてピッチ角、ロール角が大きく変動し、その地点で連続的にデータ欠測が生じている。図-4 の Type B および図-5 の Type C では、横断面全体で欠測がほとんどなく、データが十分に取得できている。図-6 に示すモノハル型の Type D ではピッチ角が 20 度を超過して大きく変動しており、データの欠測も多く生じている。ピッチ(縦揺れ)に対する安定性には、水面波の波長に対する船体の長さ、重心位置が重要な要素と考えられ、船艇が比較的長かった Type B と Type C が有利であり、特に Type C は重心位置も優れていた。なお、トリマラン型は水面の波がメインハルと

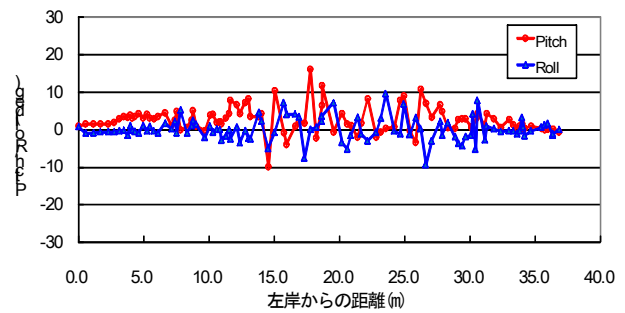


(a) ピッチ角およびロール角

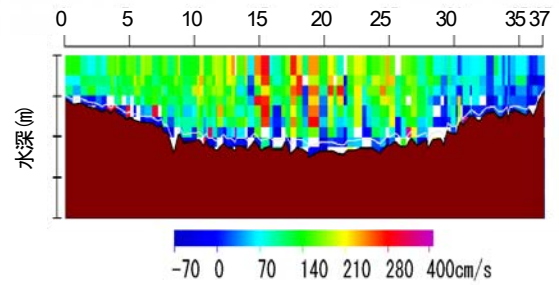


(b) 流速コンター

図-3 Type A の観測結果

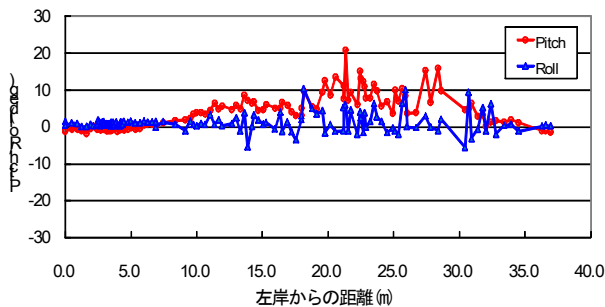


(a) ピッチ角およびロール角

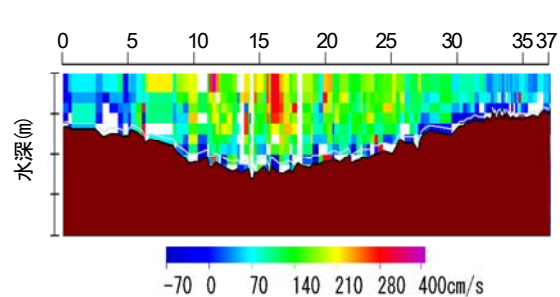


(b) 流速コンター

図-4 Type B の観測結果

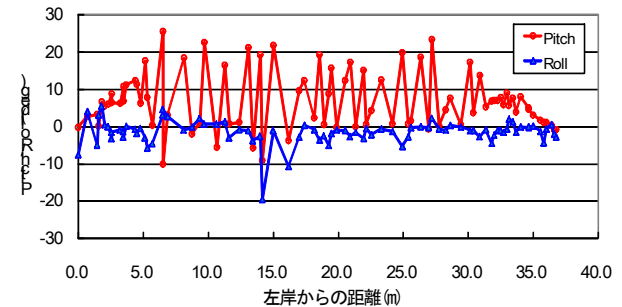


(a) ピッチ角およびロール角

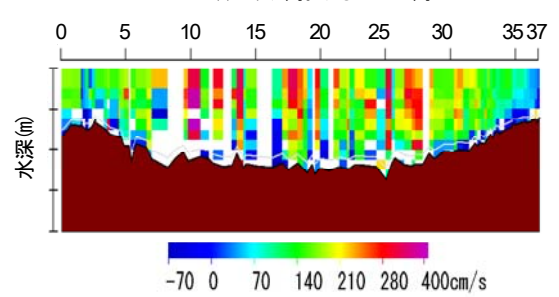


(b) 流速コンター

図-5 Type C の観測結果



(a) ピッチ角およびロール角



(b) 流速コンター

図-6 Type D の観測結果

サイドハルの中から抜けている様子が、撮影したビデオから明確に確認され、波の震動の影響が低減されているものと推定された。その一方で、モノハル型はその波の震動を船艇全面で受けるため、揺れが激しく、ADCP のデータ取得率が低下したものと推定される。

他方、ロール(横揺れ)に対しては、サイドハルの構造が重要な要素となり Type A はサイドハルがメインハルに比べて大きすぎるためにロール角が大きくなったものと考えられる。Type B および Type C の船体構造は、サイドハルの長さがメインハルの約半分であり、さらに船

体の後半分に取り付けていること、サイドハルの浮力が小さいために過大な復元力が加わりにくいことが安定性に寄与したものと考えられる。

ここでの課題として、トリマラン型はモノハル型と比較すると水面に浮遊している流下物が絡まり可能性があるということである。図-2(c)に示すように、それを防止するためにゲージを搭載している。今回の観測実験では流下物に対するゲージの効果については確認できていないが、ゲージの流体抵抗による観測への悪影響、すなわち余分な揺れは認められなかった。

(4) ADCP 計測の適用範囲に関する考察

ADCP 移動計測による流量観測手法が、日本の河川における洪水流量観測に、どの程度適用可能であるかについて把握するため、全国の主要な流量観測所の観測流量データと、これまでの研究事例から推定される ADCP 移動観測の観測限界をもとに、網羅的な検討をおこなった。

対象とした流量観測所は、国土交通省の各地方整備局等管理の 160 観測所とし、2002 年～2006 年の計 5 年間の観測流量データを用いて洪水流量観測時の平均流速およびフルード数を算出した。平均流速は観測流量を断面積で除することで算出した。フルード数は、水面幅と断面積から流下断面内の平均水深を算出し、平均水深と平均流速から算出した。フルード数および平均流速それぞれについて、各観測所毎に 5 カ年の最大値を算出した。ADCP 移動観測の観測限界として、木下ら⁸⁾は、ラジコンボートによる洪水時流量観測において、瞬間最大表面流速が 5.0m/s 程度、かつ、主流部のフルード数が 0.65 以下あたりとしている。一方、著者らが行ったボートの比較観測実験時の最大流速は 4.0m/s 程度、フルード数は 1.0 以上であった。これらを指標とした検討結果を図-7 に示す。対象期間内の洪水時の最大流速が 4.0m/s を超える観測所は、38 観測所(24%)、5.0m/s を超える観測所は 12 観測所(8%)であった。一方、フルード数 0.65 を超える観測所は 56 観測所(35%)であり、1.0 を超える観測所は 9 観測所(6%)であった。

著者らのボート開発を受けて、ADCP 観測の適用範囲をさらに拡大可能となることが期待される。すなわち、前述のとおり、木下らが示している観測限界は、モノハル形状のラジコンボートによるものであり、フルード数 0.65 以下としている対して、著者らが行ったボートの比較観測実験時のフルード数は 1.0 以上であり、トリマラン形状 (TypeB, TypeC) のデータ取得率は良好であった。このため、フルード数を指標とした適用範囲は 1.0 程度まで拡大したものと考えられる。さらに、4.0m/s の流速において取得率は良好であり、更に早い流速においても適用可能であることが示唆される。

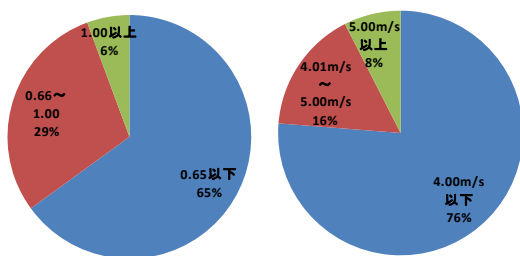


図-7 全国主要観測所の高水流量観測時の流況
(5 カ年の最大値)

左：フルード数，右：平均流速

3. GPS による ADCP 本体速度の計測に関する提案

(1) ADCP 本体速度の計測方法

図-8 は ADCP による移動計測に関する概念図である。ADCP に限らず、船体に搭載した計測機を移動させて計測する場合、一般的に次の式ようになる。

$$\vec{V}_{abs} = \vec{V}_{non-reference} + \vec{V}_{boat} \quad (1)$$

式(1)の左辺が計測結果として必要な流速 (図-8 の流水の流速)，右辺第一項が ADCP の出力結果 (図-8 の ADCP が観測する流速)，右辺第二項が船体の移動速度 (図-8 のボートの移動速度，すなわち ADCP 本体の移動速度) となる。式(1)が示すように、流水の流速の計測精度を向上させるには、ADCP の計測精度もさることながらボートの移動速度に対する精度を上げる必要がある。ボートの移動速度を計測するために、WH-ADCP はボトムトラック機能を内蔵している。それが出力する速度は対地速度と呼ばれており、河床が移動しないという条件において、これをボートの移動速度と考えることができ、またこの計測精度も高い。しかしながら、河床が移動する場合や前述した厳しい流況下においてはその限りではない。そのような条件では高い精度を持つ RTK-GPS を併用することが必須となる。この高い精度の位置情報の時間差分からボートの移動速度を算出することになる。RTK-GPS の位置情報の精度は数 cm でありその差分から移動速度を求めると、オーダーで数 cm/s 程度となる。また最近では、VTG(Vector track an Speed over the Ground)を取得できる RTK-GPS が利用可能となってきた。この情報は衛星と GPS 本体のデータ通信に使用している電波のドップラー効果による周波数変化を活用し、GPS 本体の移動速度を算出するものである。この VTG は、位置情報 (RTK-GPS) とは独立した手法で移動速度を算出している。

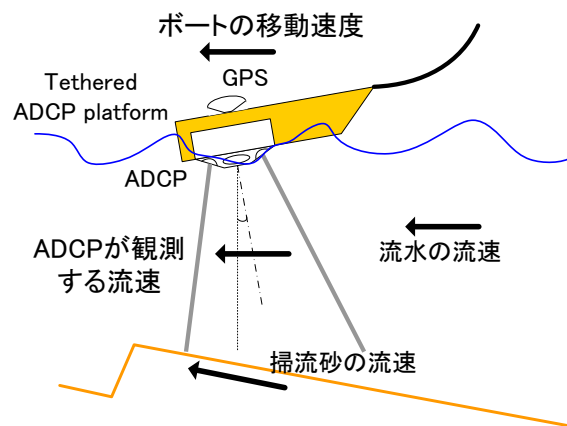


図-8 移動計測の概念図

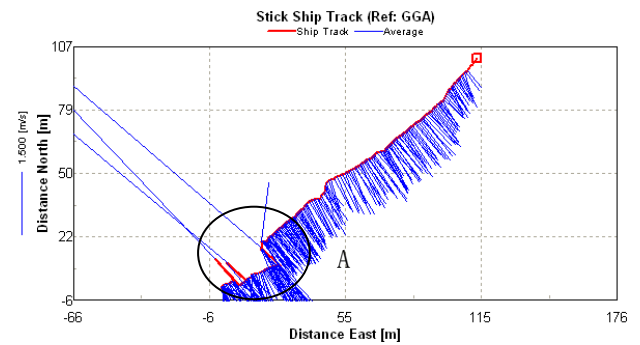
(2) RTK-GPS の位置情報に異常値が発生したときの例

RTK-GPS を用いて計測するときの注意点は、RTK モードで計測するという点である。計測条件の悪さにより RTK モードでの計測とならない場合、ボートの移動速度の算出に大きな誤差をもたらす、正しい流速値が算出されない。このため、例えば NMEA フォーマットであれば、GPS quality indicator が「4」である必要がある。以下に、GPS のクオリティが確保されなかったときの計測例を示す。

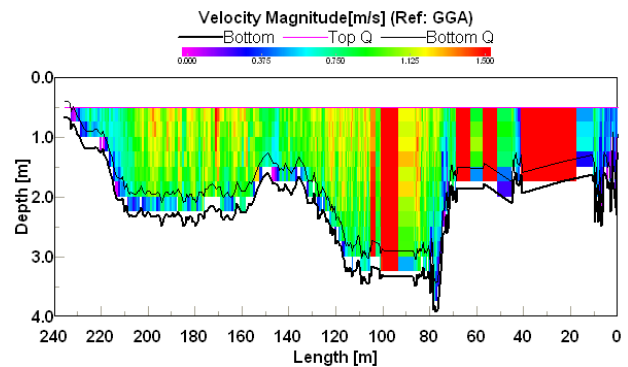
図-9a)b)c)は橋上操作艇を用いた ADCP と RTK-GPS の同期観測結果の一例である。図-9a)は ADCP 観測時の航跡及び平均流速を示す。このときの橋上操作艇の移動は右岸から左岸へ向かって行われ、流向は北西から南東となっている。図中の領域 A が示す付近で航跡に 4 カ所程度の不連続な点が生じている。そのときの河床高、絶対流速分布を図-9b)に示す。流速は 0~1.5m/s 程度の値を持つが、ところどころ流速が極端に早い部分が存在する。例えば 20~40m, 60m 近辺に 2 カ所、100m 近辺に 1 カ所である。ここでは同時に 1 アンサンブルあたりの距離が大きくなっている。図-9c)は RTK-GPS から算出した橋上操作艇の移動速度を示す。橋上操作艇の移動速度は、操作員がロープを用いて橋上を歩きながら操作したため、操作員が歩く程度の早さにしかない。ここでは 0.5m/s 程度である。しかしながら 2m/s を超えるような場所が 5 カ所存在する。この位置は図-9b)で流速が早くなっている位置と同じであった。このようなことがおきている場所と図-9a)の橋上操作艇の航跡の不連続点に対応している。図-9a)b)c)から言えることは、GPS が出力する座標値が異常値を持つと、その座標値の時間差分から算出される橋上操作艇の移動速度も異常値となり、式(1)が示すように、計測された絶対流速（流水の流速）に異常値として反映されるということである。この一連の観測で GPS のクオリティは時系列として観測当初「5(Float RTK-GPS)」, 途中「1(GPS 単独測位)」, 最終的には「4(RTK)」となった。このような計測結果は本来であれば「正しい観測」として採用すべきでは無いのかも知れないが、現場における洪水観測で電子機器を扱っている以上、あらゆる問題が起きる可能性があり、さらに洪水のピークが短時間に通りすぎる可能性もある。このような状況の中で、現場の技術者が苦労して取得した貴重なデータを不採用にするのは何とも切ない話である。次の節では GPS の異常値が発生したときのデータを信頼性の高い流量観測結果として採用するための手法を説明する。

(3) VTG 情報を利用することの意味

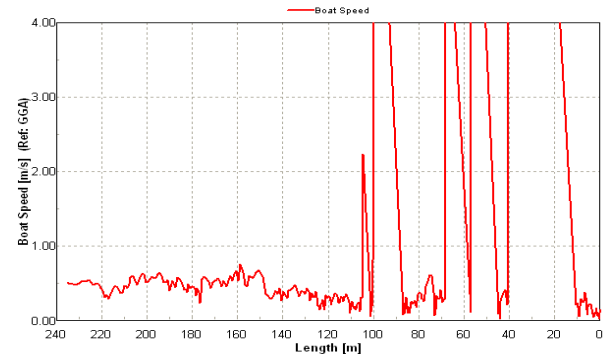
図-10 はボートの移動速度と GPS quality indicator の時間変化を示す。これらは図-9 と同じ観測結果を用いていて、その特徴的な一部を取り出した。青線が示す RTK は GPS の位置情報からそれらを時間的な差分を取り



(a) ADCP 観測の航跡



(b) 絶対流速分布と河床形状



(c) ボートの移動速度

図-9 WinRiver を用いた計測結果の一例

さらに時間を合わせるための平均を取っているため、かなり平滑化されている。他方 VTG は生データである。両者を比較すると VTG は若干凸凹している。しかしこの凸凹加減は数 cm 程度であるため、数 10cm 程度の流速の凸凹を議論するうえでは無視できる程度である。また iGPS で示す GPS quality indicator はこの一連の区間では「5(Float RTK-GPS)」であり、約 80 秒と 105 秒に一度、「1(GPS 単独測位)」になっている。このとき、RTK の速度は 1400cm/s 程度の数字を持ち VTG とは大きく異なる結果となった。これは前述のように歩く速度から考えると明らかに異常値である。他方、それ以外の GPS quality indicator が「5」又は「4」のときの両者を比較するとほぼ等しい。そのときの両者の差は、数 cm/s 程度となった。すなわち RTK-GPS が計算する位置座標はそのときのモードにより大きく依存し、VTG はそれによらず最も正しい値を算出することが理解できた。これら

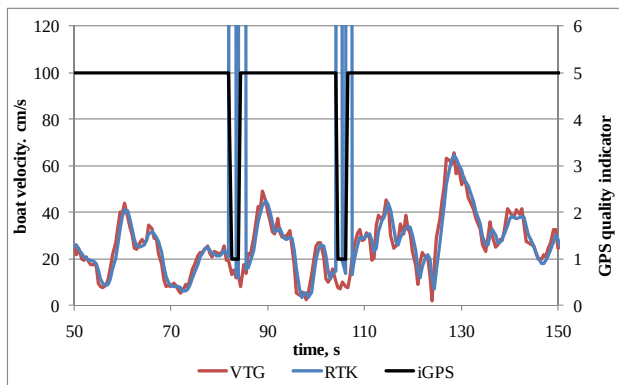


図-10 ボート移動速度と GPS quality indicator

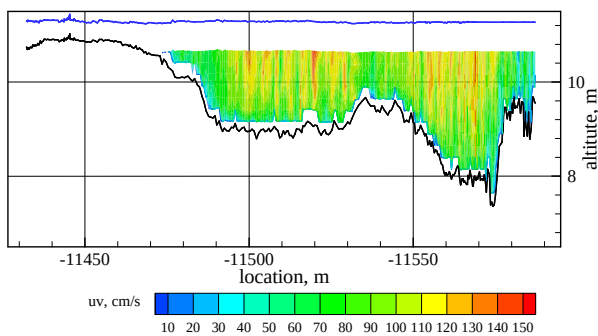


図-11 流速分布と河床高

の知見を基に、日本国内において ADCP の観測に GPS を用いて行う場合の注意点を以下のように考える。

a) VTG 情報を出力する GPS を用いる、b) GPS quality indicator が「1」等の値を持つときは、それが「4」になるまで待つ、c) 仮に計測中に GPS quality indicator が下がる可能性がある場合は、VTG を用いて橋上操作艇の移動速度とする。このような手法を用いて図-9(b)を描き直すと図-11になる。具体的には橋田ら⁹⁾が示した河川横断方向に平行な測線への正射影を行っている。図-11が示すように図-9(b)に存在していたような極端に大きな流速分布がなくなった。また1アンサンブル毎のサイズもほぼ一定となっている。

4. まとめと今後の課題

1) 揺動に対する安定性はトリマラン型の Type B および Type C が優れており、データ欠測も少なかった。観測実験中の流速及びフルード数はそれぞれ 4.0m/s 程度、1.0 以上であり、更に厳しい流況条件においても信頼性の高い観測が可能となることが期待される。今後は、実際の洪水観測において実用性や観測精度、ゴミ回避能力などを検証していくことが課題である。

2) 本観測条件のような高流速場の流況観測においては、ADCP のボトムトラッキングが十分に機能せず、欠測が生じ、計測精度が低下するため、洪水流況および河床移動速度等の計測を行う際には RTK-GPS を併用することが極めて有効である。

3) 全国の主要観測所のデータから ADCP 移動観測の適用可能な観測所数を検討した結果、現在の観測技術において 76%程度の観測所において信頼性の高い観測データが取得できる可能性が示された。更に、本研究で紹介したボートを採用することで、その適用範囲が拡大されるされることが期待される。今後は様々な河川で観測を行い、実際の洪水時における適用性を明らかにする必要がある。

4) RTK-GPS が異常値を示した場合、VTG 情報を用いた補完手法を提案し、VTG 情報を出力可能な GPS を用いることが有効であることを示した。

謝辞：本文で使用した ADCP の観測結果は国土技術政策総合研究所河川研究室から提供を受けた。また、国土交通省の各地方整備局および北海道開発局から、貴重な観測流量データの提供を受けた。記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 木下良作：河川下流部における洪水流量観測法に関する一提案，水文・水資源学会誌，Vol. 11, No. 5, pp. 460-471, 1998.
- 2) 萬矢敦啓・岡田将治・橋田隆史・菅野裕也・深見和彦：高速流におけるADCP観測のための橋上操作艇に関する提案，土木学会河川技術論文集，第16巻，pp. 59-64, 2010. 6.
- 3) Michael S. Rehm, James A. Stewart and Scott E. Morlock：Tethered Acoustic Doppler Current Profiler Platforms for Measuring Streamflow, USGS Open-File Report 03-237, 2003.
- 4) 金子新，伊藤集通：ADCPの普及と海洋学の発展，海の研究，Vol. 3, No. 5, pp. 359-372, 1994.
- 5) Michael R. Simpson：Discharge Measurements Using a Broad-Band Acoustic Doppler Current Profiler, USGS Open-File Report 01-1, 2001.
- 6) 岡田将治，萬矢敦啓，橋田隆史：ADCP搭載ボートの観測時の揺動が流速分布および水深計測値に及ぼす影響，水工学論文集，第54巻，pp. 1087-1092, 2010. 2.
- 7) Shoji Okada, Atsuhiko Yorozyu and Takashi Kitsuda; Effect of Fluctuation of a Moving Boat Equipped with ADCP on Velocity-Profiles and Water-Depth Measurements, 33rd International Association of Hydraulic Engineering & Research (IAHR) congress, August 9-14, 2009, Vancouver, Canada, full paper in CD-ROM
- 8) 木下良作・中尾忠彦：ADCPによる河川流量の測定と河道水理機構の観測，土木学会誌，2007年10月号，pp. 68-71
- 9) 橋田隆史，岡田将治，新井励，下田力，出口恭：ラジコンボートを用いたADCP移動観測の計測精度評価法に関する一考察，河川技術論文集，第14巻，pp. 295-300, 2008. 6.