

外部コンパスを併用したADCP観測に関する提案

PROPOSAL OF ADCP MEASUREMENT USING AN EXTERNAL COMPASS

菅野裕也¹・萬矢敦啓²・橘田隆史³・井上拓也⁴・深見和彦⁵

Yuya KANNO, Atsuhiko YOROZUYA, Takashi KITSUDA, Takuya INOUE and Kazuhiko FUKAMI

¹正会員 国土交通省北海道開発局網走開発建設部北見河川事務所鹿ノ子ダム管理支所
(〒099-1254 北海道常呂郡置戸町字常元)

²正会員 Ph.D 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)

³正会員 修士(農学) (株) ハイドロシステム開発 (〒552-0007 大阪府大阪市港区弁天5丁目10-23)

⁴正会員 (株) 水文環境 (〒103-0005 東京都中央区日本橋久松町10-6)

⁵正会員 修士(工学) 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)

Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) employs a magnetic compass for obtaining direction of the sensor, which indicates that most of the observed values are relying on appropriate values by the compass. In an actual river, which is authors' field of measurements, there are a number of sources which disturbs natural magnetic field, such as waterway bridges, forepoles along the river, H-steel structures, even in a tethered ADCP platform. For better understanding an actual situation, the authors conducted field measurements with ADCP and external compass. In this paper, the authors describe the results which were affected by local magnetic fields. Also we propose the observational method with external, non-magnetic compass for solving the problem.

Key Words : *Acoustic Doppler Current Profiler, GPS Compass, Discharge observation*

1. はじめに

近年、電波、音響、画像技術等を活用した多くの新しい流量計測技術が国内外で紹介されてきている。その中でもADCP(Acoustic Doppler Current Profiler)による横断観測は、木下の業績¹⁾により洪水時の河道内のモニタリングが可能であることが示され、洪水流量観測のあり方を大きく変えると期待されている。洪水時の河川流量を正確に測るには、河道内の流速分布を計測するとともに、河床変動により変化する流積も計測することが必要であるが、現状ではADCP以外にこうした観測を実施できる装置は実用化されていない。これまで著者らは、急流河川の高流速場において適用可能な橋上操作艇の実用化²⁾や、ADCP本体の移動速度および航跡を把握するためのGPSデータ処理について、異常値の補完手法等を提案³⁾してきた。しかしながら、未だ解決されていない課題として、磁場の影響がADCP観測データの精度低下をもたらすことが挙げられる。すなわち、ADCPは自らの方位情報を得るために内部に磁気コンパスを有しているが、河道内に設置されたH鋼や矢板護岸などの鋼構造物による磁場や、観測船に搭載された金物等の影響を受け、方位情報に誤差が生じ、結果、流量値にも影響を及ぼすこ

とがある。この問題は既に認知されており、例えば、ADCPの開発会社であるTeledyne RDI社(以下、TRDI社)は、コンパスキャリブレーションを行うことをマニュアル⁴⁾に明記している。しかしながら、その手法は日本の河川での適用はほぼ不可能に近いこと、河道内の鋼構造物などによる環境磁場には対処できないという問題がある。本論文では、磁場の影響を受けない外部コンパスを併用することでこれらの課題解決を試みた結果を報告する。

2. ADCP観測における磁場の影響

(1) 河道内の磁場について

実河川の河道内にはさまざまな鋼構造物が設置されている。例えば、水位観測のための量水標および水位センサー、超音波流速計(設置型)、河床変動を把握するための砂面計などの設置にあたっては、H鋼が用いられることが多い。また、軟弱地盤での護岸基礎工として鋼矢板等が用いられており、これらは磁性体として環境中に磁場を発生させる。前者は河道内の一部に設置されている場合が多いため、その箇所を避けてADCP観測を実施することで磁場の影響を回避することが可能であるが、

重要な水位・流量観測所である場合が多く、このような場所で、流量や河床高の比較検証のためにADCP観測が実施される可能性は高い。他方、後者は縦断的に設置されている場合が多く、特に河岸部においてその影響を回避することは困難となる。

(2)ADCP観測船内部から発生する磁場について

ADCPを用いた流量観測では、ADCPを搭載する観測船のほか、複数の周辺機器が必要となる。観測船に搭載する機器としては、ADCP本体の位置および速度を計測するためのGPS、遠隔操作を行うためのデータ転送装置、場合によっては音響測深器を搭載することがある。これら観測船に搭載される電子機器のほか、観測船本体の部品となるネジ、フック、プレートなどにはステンレスを使用するなどの配慮をする必要がある。一方、ラジコンボートや動力付きの有人船を用いる場合には、エンジンから発生する強い磁場も想定される。これについては、ADCP本体をエンジン部分から離れた位置に搭載するなどの配慮が行われているが、その影響がどの程度あるかについては明らかになっていない。これら観測船内部から発生する磁場が、計測値に影響を与える可能性は十分考えられる。

(3) ADCPのコンパスキャリブレーション

ADCPの製造元であるTRDI社は、コンパスキャリブレーションの方法をマニュアル⁴⁾に明記しており、ADCPを用いた流量観測を実施する前段階で、観測船を含めた周辺機器や観測地点から発生する磁場の影響を補正することが必要としている。コンパスキャリブレーションの方法については、複数提案されており、いずれの方法も流量観測を実施する地点において、本観測時に使用するADCPや観測船を含めた観測機器一式を用いて実施する必要があるとされている。その内の一つの手法（ここでは手法Aとする）について述べる。前提条件として、河床の移動がない平水時で行う必要がある。この手法は河岸に杭を設置するなど基準となる目印を起点として、河道内を円周350m程度の真円を描くように航行しながら、航行距離が1000m以上となるよう、連続的に3～10週の計測を行い、最後に起点に戻す。このとき、内部コンパスにズレが生じている場合はボトムトラックにより得られた計測開始位置と計測終了位置が乖離するため、コンパスの補正でこれを改善する。このときの補正限界の目安は30cm以内である。一方、流速が速く観測船の制御が困難な場合は、救済措置もあるようであるが同マニュアルには明確に記されていない。これらにより、当該観測環境に応じたADCP内部磁気コンパスの補正値を得ることができる。著者らは、手法Aについて、RTK-GPS を搭載したラジコンボートを用いて平水時の河川で試行した。その結果を図-1に示す。図が示すように補正前航跡のRef.Btmの始点と終点が乖離している。

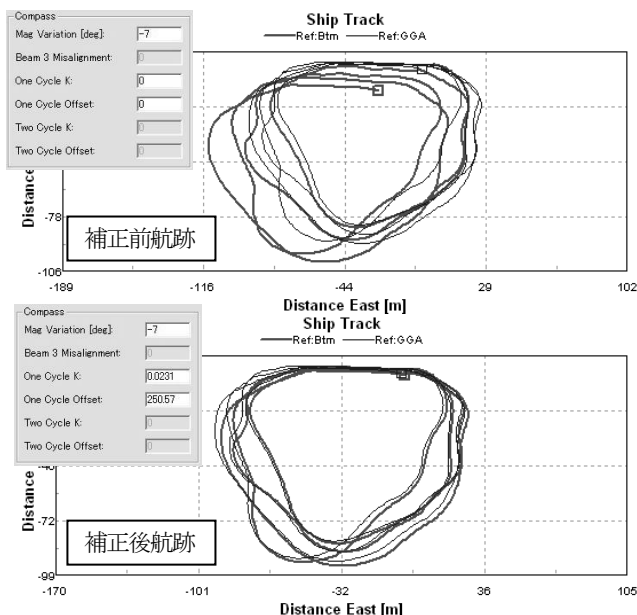


図1 Method1における補正結果（ボトムトラック）

また航行にあたっては、流れの影響を受け、真円を描くように曳航することは非常に困難であった。手法Aでキャリブレーションを実行した結果、補正後航跡が示すように、ボトムトラック航跡とGPS航跡が概ね一致することが確認できた。

次に、他の手法（手法B）は、ADCPにコンパスキャリブレーション用のコマンドを入力し、ADCPを搭載した観測船を通常の計測時と同じ姿勢に保ちながら、定点において連続的に一定速度で回転する。その後、物理的な回転量と計測機器が算出した回転量の差をコンパスのエラーとして、その差がゼロになるように補正する。手法AがADCPオペレーションソフト上で補正値を設定する手法であるのに対し、手法BはADCP内部磁気コンパスを直接的に補正する手法である。手法Aはより簡易な手法であり、ADCP観測船内部から発生する磁場に対しては有効な手法となる。しかし、これらの手法はそれぞれ課題があり、国内外ではあまり実施されていないのが実態である。手法Aについては、著者らも経験したように、低水時であってもある程度の流速を持つ場所を実施することは非常に困難であり、まして、出水時等の高流速場では不可能である。また、近年、洪水時観測の適用性が向上しつつある橋上操作艇を用いたADCP観測⁵⁾では、このような航行計測ができない。すなわち、両手法については、ラジコンボートもしくは有人船を用いたADCP観測に限定される。さらに、補正値はコンパスキャリブレーションを実施した観測地点のみ有効であり、円周が350m程度の範囲内の磁場が一樣となることを前提とした手法であるため、局所的な磁場が存在する場合には当然のことながら対処することはできない。また手法Bについては、橋上操作艇そのものの磁場に関しては対処することができるが河道内の鋼構造物など環境が持つ磁場には対処できないという問題があり、何れの手法

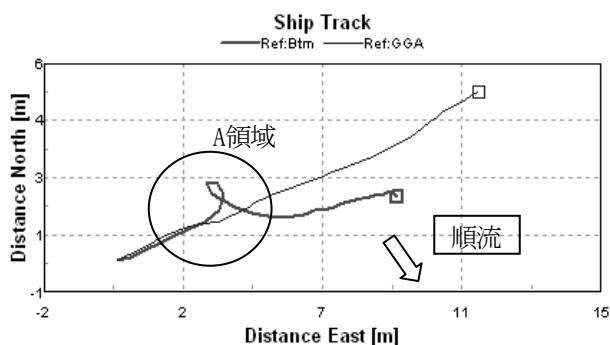


図-2 ADCP航跡図 (ボトムトラック, RTK-GPS)

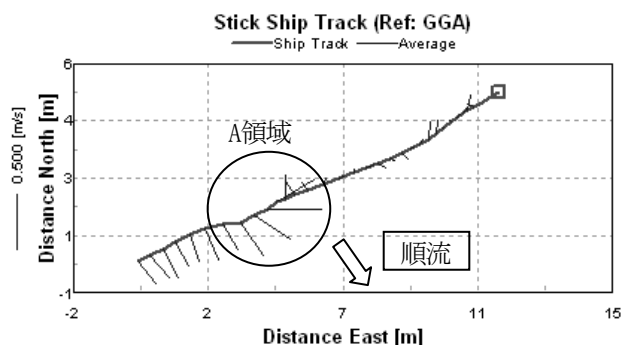


図-3 ADCP航跡図 (RTK-GPSによる航跡と流向・流速)

も磁場による問題を根本解決することは困難である。

(3) 磁場の影響を受けたADCP観測の一例

図-2および図-3に著者らが行ったADCP観測結果を示す。この観測箇所では、設置型超音波流速計による流速計測が実施されており、河道内には計測器を固定するために複数本のH鋼が設置されている。図-2はその周辺で行われたADCP観測における航跡図である。Ref:Btmで示す線はADCPのボトムトラックによる航跡、Ref:GGAで示す線はRTK-GPSによる航跡である。図中のA領域付近にはH鋼が設置されており、その付近においてボトムトラックによる航跡は不自然に回転している。一方、RTK-GPSによる航跡は磁場の影響を受けない実際の航跡を示している。ボトムトラックによる航跡はADCP内部磁気コンパスによる方位情報と、河床との相対速度から描かれているが、このように不自然な航跡が描かれるのは、内部磁気コンパスが磁場の影響を受け、方位を誤認することで生じたものと考えられる。次に図-3にRTK-GPSをリファレンスにした場合の航跡および流速・流向を示す。Ship Trackで示す線はRTK-GPSによる航跡、Averageで示す線は、鉛直方向の平均流速及び流向を示している。図-2で示した領域と同様に、H鋼が設置されているA領域付近において逆向きの流向を計測している。観測時は満潮時であり河道全体が順流（上流から下流への流れ）であったこと、またH鋼のサイズは0.3×0.2m程度であることから、流況は全体的に順流であり、逆流があったとしてもH鋼の裏の範囲だけであったと考えられる。このことからRTK-GPSリファレンス時の逆向きの流れは、H鋼による後流と磁場の影響を受けた結果であることが理解できる。これらの磁場の影響がどの程度流速値の計測に影響を及ぼすかについては、この観測結果だけでは明らかにならない。なぜなら、ボトムトラックを使用した場合およびRTK-GPSを使用した場合のいずれについても、内部磁気コンパスを使用しているため、流向流速ベクトルの算出において磁場の影響を受けている可能性があるからである。この影響を明らかにするには、磁場の影響を受けない外部コンパスを使用してその影響を評価する必要がある。このため著者らは外部コンパスとしてGPSコンパスを併用したADCP観

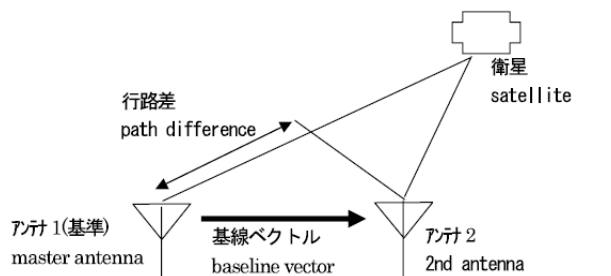


図-4 GPSコンパスの方位計算原理⁶⁾

測を行い、磁場による影響を検討する事とした。

3. GPSコンパスを併用した現地実験観測

(1) GPSコンパスの原理

磁場の影響を受けない外部コンパスとしては、大型船でADCP観測を行う際に利用されている光ジャイロやレーザージャイロと呼ばれるものがあるが、数百万円と高額である。一方、比較的安価なものとして、電子コンパスがあるが、これは半導体式の磁気コンパスであり、電子部品ではあるものの、結局磁場の影響を受けてしまう。このため著者らは、価格も比較的安価で、近年海洋観測での使用実績が多くなっているGPSコンパス⁶⁾を使用した。GPSコンパスは、2つのGPS受信機を用いて、それらの相対的な位置関係からリアルタイムに方位を求めるものである。ADCPの橋上操作艇の場合、船首方向もしくは船首と直角方向に2つのアンテナを配置することが可能であるが、本研究では橋上操作艇のサイドハルを利用して2つのアンテナを装着させた。方位計測原理は図-4に示すとおり、まずアンテナ1（基準）からアンテナ2への基線ベクトルを算出させる。これは、衛星-アンテナ1間と衛星-アンテナ2間との距離の差、すなわち行路差をGPS電波の位相差から算出している。また、衛星-アンテナ1間、衛星-アンテナ2間の両ベクトルの差から両アンテナ間のベクトルが得られそれを基線ベクトルとし、そのスカラー量のある角度成分が行路差である。衛星の位置を求めることができるが、両アンテナの方向（即ち求めるべき方位）を未知とするならば基線ベクトルは同様に未知となる。ここでアンテナの方向を複数変

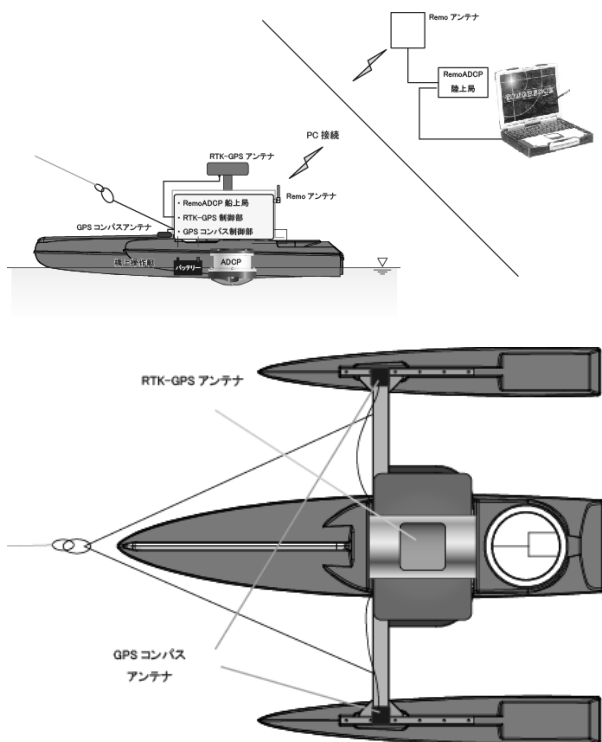


図-5 観測機材構成

化させながら幾つかの行路差を計算し、測定で求めた行路差と、計算で求めた行路差を比較し、誤差が最も小さくなる基線ベクトルを真の基線ベクトルとし、その方位を両アンテナ間の方位とする。この計算を毎秒行えば、リアルタイムで船首方位を得ることができる。

ただし基線ベクトルはGPSアンテナの配置状況に依存することからミスアライメントを想定し、正しいアライメントの確認とその修正方法を議論しておく必要がある。大型船舶の船底にADCPを艀装しているケースでは、一定距離を直線的に航走させ、GPSによる航跡とボトムトラッキングによる航跡の偏角からGPSコンパスのミスアライメントを導く手法が用いられている。GPSコンパスの装着時にはこの様なキャリブレーションを事前に実施しておくことが必要である。ただしこのとき河床が移動していない場において行わなくてはならない。

なお、ここで用いるDGPSの位置情報の精度はDGPS程度であり、水平方向の精度は1m程度である。このことからADCPの位置情報に使用するには精度が粗すぎる事が理解できる。

また内部コンパスの方位精度は $\pm 2^\circ$ 程度とされている一方GPSコンパスの方位精度は $\pm 1^\circ$ 以内である。さらにGPSコンパスの回頭速度は100度/秒である。内部コンパスに関しては特にメーカーのカタログなどには標記されていないため不明確ではあるが、Davidら⁷⁾によると、船の加速度から起因する内部コンパスの追従の遅れを与える流速値への影響が少なく無いことを示唆していることを付記する。

表-1 ADCP設定コマンド

入力コマンド	コマンド内容
CR1	工場出荷時に戻す
CF111111	外部出力、内蔵記録
CB411	ボーレート 9600bps
WB0	ブロードバンドモード
WP00001	1 アンサンブルの発信ピング数
WN050	設定層数 50 層
WS20	設定層厚 20cm
WF20	ブランク距離 20cm
WV175	モード 1Ambiguity 速度
BP001	1 アンサンブルの発信ボトムピング数
BX100	最大探地深度 10m
WD111100000	潮流測定結果の出力項目設定
TP000000	ピング発信間隔 インターバルなし
TE00000000	アンサンブル間隔インターバルなし
EZ1111101	外部センサーの信号入力設定
EX00000	ビーム座標
EB00000	偏差（真方位と磁方位の差） 0°
ED00000	トランスデューサ深さ 0m
ES0	塩分値 0ppm
CK	設定上書き保存

(2) 観測方法

現地実験観測ではADCPの他、RTK-GPS、GPSコンパス、遠隔操作装置を橋上操作艇に搭載した。観測機材構成を図-5に示す。GPSコンパスは(株)ハイドロシステム開発社製GPSコンパスを用いた。GPSコンパス用のアンテナはマルチパスを極力防ぐために、橋上操作艇のサイドハル頂部から10cm上に装着した。表-1に本観測で使用したADCPの設定コマンドを示す。

(3) 観測地点の特徴

現地観測実験は2つの観測地点A,Bで行った。観測地点Aでは、磁場の影響が少ないと想定される地点を想定し選定し複数回の横断観測を行った。また観測地点Bは著者らが過去からADCP観測を行っている地点であるが、往路と復路で計測される流量値が10%程度異なるという計測結果がいくつか確認されている。著者らは、この現象が生じる原因が、磁場の影響によるものであると想定し、その検証のため観測地点として選定した。

(4) 観測実験方法

観測地点Aについては、観測機器を搭載した橋上操作艇を有人船で曳航し横断観測を行った。一方、観測地点Bについては、橋上操作艇を橋上から曳航し横断観測を行った。データ取得にあたっては、ADCP内部磁気コンパスと、GPSコンパスを同時に取得し比較するため、ADCPオペレーションソフトとしてTRDI社製のVmDasを用いた。これにより、内部磁気コンパスを使用したADCP計測データと、GPSコンパスを使用したものを同時に取得し同期することが可能となる。

また、観測地点Bでは、ADCPを搭載する観測船に磁

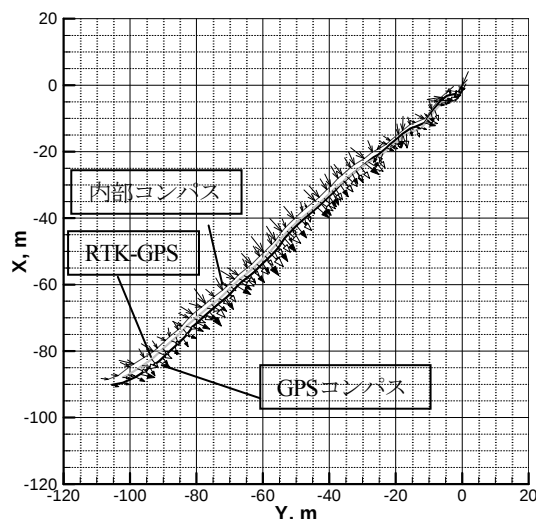


図-8 観測地点Aにおける観測結果（流況及び航跡）

場を発生するものが搭載されている場合を想定し、使用する橋上操作艇に、あえて磁場を発生させる物体（磁石）を搭載して、横断観測を行った。なお、両コンパスの比較にあたっては、偏角補正を行っている。すなわち内部磁気コンパスが示す北は磁北であり、真北と異なる。一方、GPSコンパスが示す北は真北である。この磁北と真北の角度の差が偏角であるが、これを補正するために、国土地理院の磁気偏角の計算式を用いた。

4. 結果と考察

(1) 観測環境から発生する磁場による影響

図-8は観測地点Aの計測結果である。この箇所は、過去の観測経験から、周辺に磁場を発生する構造物が無く、磁場の影響が少ないと想定された観測地点である。図中の航跡は①内部コンパス及びボトムトラックを用いた航跡及び流況、②外部コンパス及びボトムトラックを用いた航跡及び流況、③外部コンパス及びRTK-GPSを用いた航跡及び流況を示したものである。①及び②を比較すると航跡については両者に若干のズレが確認できるが、これは両コンパスの微妙なズレが積分されていくことにより、距離が長くなるにつれて両者の差が大きくなったものと考えられる。また②及び③の航跡を比較すると両者は完全に一致はしないものの①よりは正しい。これはGPSコンパスを用いて算出したボトムトラックの値が、内部コンパスを使用した場合と比較するとRTK-GPSに近い航跡を示すことから、GPSコンパスが内部コンパスより矛盾のない値を出力することが推察される。

一方、流向流速ベクトルについては顕著な差は見られない。他方、計測された流量値は①内部コンパスを用いたものが $116.3\text{m}^3/\text{s}$ 、②GPSコンパスを用いたものが $116.2\text{m}^3/\text{s}$ であり、これについても両者に顕著な差は見られなかった。なお、流量の算出に当たっては、実測流量値のみを算出したものであり、水面、河床付近および河

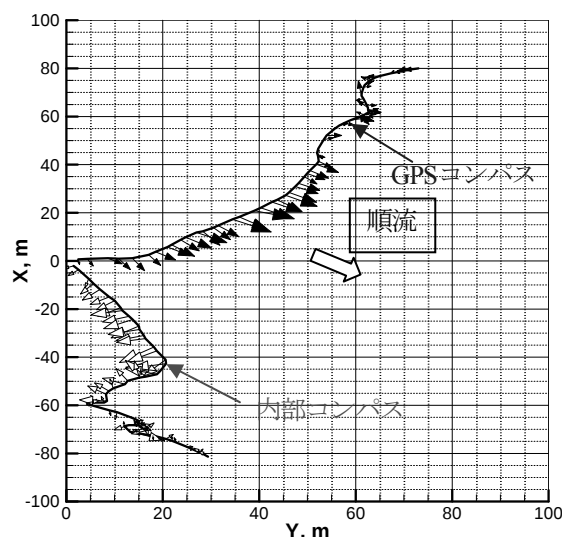


図-9 磁石を搭載した状態での観測地点Bにおける観測結果（流況及びボトムトラック航跡）

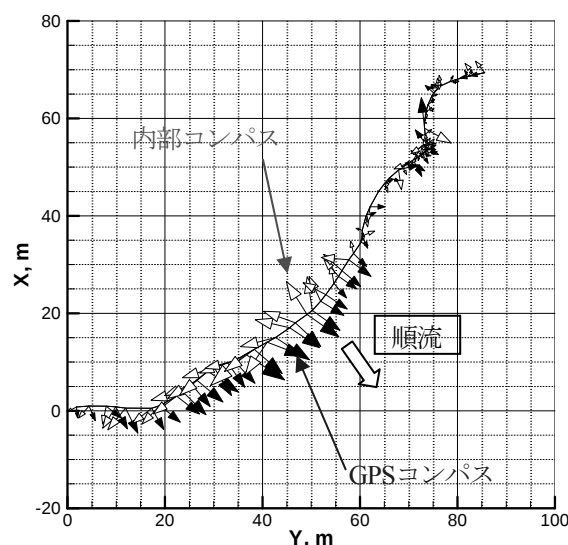


図-10 磁石を搭載した状態での観測地点Bにおける観測結果（流況及びRTK-GPS航跡）

岸付近の未計測エリアの補間も行っていない。これらの傾向は、複数回の計測結果についても変わらなかった。

(2) 観測船から発生する磁場による影響

ADCPを搭載する観測船に磁場を発生するものが搭載されている場合を想定し、観測船にあえて磁場を発生させる物体を搭載して、観測地点Bにおいて実験観測を行った。結果の一例を図-9, 10に示す。図-9のとおり、これらのケースにおいては、内部コンパスによる航跡は思わぬ方向に進んでおり、観測データとしては無意味なデータとなっている。図-10はRTK-GPSによる航跡を示したものであるが、流向流速ベクトルも同様に異常な結果を示しており、磁場の影響が甚大であり、このような状況ではたとえRTK-GPSを用いたとしても流況を補正することができない。一方、GPSコンパスはこれら磁場

表-2 観測地点Bにおける観測時の流量値一覧

条件	測線	流量 (m³/s)			
		GPS コンパス		内部磁気コンパス	
		観測流量	往復流量差/ 誤差%	観測流量	往復流量差/ 誤差%
磁石無	1回目往路	86.5	0.8	90.3	2.90
	1回目復路	85.7	0.93 %	87.4	3.26 %
	2回目往路	87.2	1.0	91.1	4.30
	2回目復路	86.2	1.15 %	86.8	4.83 %
	3回目往路	88.5	2.0	87.6	3.70
	3回目復路	86.5	2.29 %	91.3	4.14 %
磁石有	1回目往路	79.3	1.1	62.6	69.40
	1回目復路	80.4	1.38 %	-6.8	248.8 %
	2回目往路	82.3	2.4	66.7	75.20
	2回目復路	79.9	2.96 %	-8.5	258.4 %

による影響は受けておらず、実際の操船経路に等しい航跡が得られている。

次に、本実験観測により得られた流量値を表-2に示す。磁石を搭載しない状態における流量値は、GPSコンパスによる往復流量誤差が1～3%程度であるのに対して、内部磁気コンパスは3～5%程度であり、GPSコンパスを用いることで往復による流量差が少なくなることがわかる。他方、磁石を搭載した場合、内部磁気コンパスを用いた流量値は異常な値を示している一方で、GPSコンパスはその影響を受けず、磁石を搭載しない場合の流量値とほぼ同じ値が得られている。内部コンパスを用いた実際のADCP観測において、観測船のエンジンや、他の観測機材の中に磁場を発生させる物体が含まれていた場合などには、このような状況に陥ることは十分に考えられる。

(3)外部コンパスの有効性

磁場の影響が小さいと想定された場所として選定した観測地点Aにおける実験観測の結果、今回使用したGPSコンパスが、内部コンパスよりもより正しい値を出力することを確認した。さらに、観測地点Bにおける、観測船に磁場を発生させる物体を搭載したケースでは、内部コンパスの問題、及びGPSコンパスの効果が顕著に示されたと言える。また、今回のように無人橋上操作艇に搭載できる小型GPSコンパスはこれまで使用されておらず、橋上操作艇を用いたADCP観測システムのオプションとして、GPSコンパスの有効性を確認できたことは有意義であったと考える。

5. まとめと今後の課題

本論文では、ADCP観測において磁場の影響を強く受けた事例を紹介し、その解決手法として、GPSコンパスを用いた実験観測を試みた。ADCPの実務経験者からの報告として、河川の流量観測で往復の流量差が生じることが多く、しかも往路だけが小さいなどという系統誤差

である場合が多い、という問題がよく知られている。また、労力をかけて観測を行ったにも関わらず、航跡および流向流速がまったく予期せぬ方向に向いている、といった報告も散見され、これらは一般に、内部コンパスのズレが原因であろうと言われてきた。内部コンパスをキャリブレーションするコマンドがメーカーから提供されてはいるものの、確実性及び実効性に乏しく、不適正にキャリブレーションを実施するとかえって誤差の拡大を招く恐れもあり、国内（国外でも）ではあまり実施されていないのが実態である。また、河道内には、矢板護岸、水道橋、高圧線の鉄塔、H形鋼、床固めなど、様々な磁場発生源が存在し、ADCP観測においてこれら磁場の影響から完全に逃れることは困難である。このような場合は、内部コンパスのキャリブレーションだけではもはや解決できず、磁場の影響を受けない外部コンパスを導入する必要があると考え本実験観測を行った。本観測では、磁場の影響が小さいと想定された場所においてGPSコンパスは内部コンパスよりも矛盾のない値を算出した。観測船に磁場を発生させる物体を搭載したケースでは、GPSコンパスの効果が顕著に示されたと言える。さらにこれまで疑問視されてきた往復での流量の誤差がGPSコンパスを使用することで小さくなることが示された。

今回検証した様にGPSコンパスを利用することで、磁場という不確実な要素の影響を完全に排除し、安定した観測データを担保できることは望ましいことである。今後はADCP観測システムの必須オプションとして普及することが望まれる。

参考文献

- 1) 木下良作：河川下流部における洪水流量観測手法に関する一提案, *J. Japan Soc. Hydrol. & Water Resour.* Vol.11, No.5, 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) 萬矢敦啓・菅野裕也・深見和彦：河川実務者の観点から見たADCPによる流量観測技術開発の論点, 河川流量観測の新時代, pp.46-55, 2010.9.
- 4) Teledyne RD Instruments, WinRiver II User's Guide P/N 957-6231-00 (September 2007) (September 2007), pp91-99
- 5) 菅野裕也・萬矢敦啓・深見和彦：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, 国土交通省国土技術研究会, 2010.
- 6) 高良裕二・小川浩治・鈴木弘也・中村幹男・柏柳太郎：GPSコンパス, 日本無線技報No.47, pp40-43, 2005.
- 7) David Gaeuman and Robert B. Jacobson, Aquatic Habitat Mapping with an Acoustic Doppler Current Profiler: Considerations for Data Quality, U.S.G.S. open-file report 2005-1163

(2011.5.19受付)