河川感潮域における 流量及び物質収支モニタリング手法の提案

楠本 仁麦1・鯉渕 幸生2・比嘉 紘士3・真野 純一郎4

 ¹株式会社ハイドロシステム開発 東京支店(〒132-0025東京都江戸川区松江6-7-22)
 E-mail: y-kusumoto@hydro-sys.com
 ²正会員 東京大学准教授 大学院新領域創成科学研究科(〒277-8563千葉県柏市柏の葉5-1-5)
 E-mail: koi@k.u-tokyo.ac.jp
 ³正会員 横浜国立大学助教 大学院都市イノベーション研究院 (〒240-0067神奈川県横浜市保土ケ谷区常盤台79-1)
 ⁴株式会社ハイドロシステム開発 大阪本社(〒550-0022大阪市西区本田3丁目2-18ハイドロ第一ビル)
 E-mail: j-mano@hydro-sys.com

都市部河口域において憩える親水空間の整備が進められる一方で、周辺の水環境は下水流入や赤潮等、 慢性的な悪化がみられる例が多い.適切なモニタリングが望まれるも感潮域の流動場は複雑であり、流量 の計測すら困難である.そこで本研究ではお台場海浜公園を対象に1台の固定H-ADCPによる感潮域の流量 推定法を考案した.ADCPによる観測結果との比較から同地点では上層と下層で潮汐流に位相差が表れる ことがわかり、これを各層境界の検出に利用した.使用したH-ADCPは約1.5°上向きに設置され、境界層 をまたいで計測することで、上下層の流速を同時に計測することを可能にした.同手法を適用し上層流量 の推算を行い.水質データと組み合わせた淡水流出量の算出を行った.水質の異なる各層の流量推算が可 能となったことより、本手法が河口域のモニタリングにおいて有効な手法となる事が期待される.

Key Words : ADCP, H-ADCP, river discharge, monitoring, estuary, upper layer thickness

1. はじめに

河川の河口部は資産・産業・人口が集中する地域が多 く,防災面でも利水面でも重要である.河口における河 川流量は、治水・利水のみならず、海岸への土砂供給や 沿岸域での水環境の計画及び管理を行う上で極めて重要 な基礎情報である.しかし、河口部は感潮域になってお り、水位が潮汐の影響を受ける、潮汐によって河口水位 が上昇すると、背水影響を受けるため流速が遅くなり流 量は減少する. 逆に、下げ潮で河口水位が低下すると、 流速が速くなり流量が増加する.加えて、河口部では、 密度の小さな河川水が表層に、密度の高い海水が底層に 分布するため、流速は鉛直方向に大きく変化し、上下で 流向が真逆となることも稀ではないことから、河口部で はその重要性に反して、通常のH-Qカーブによる流量推 定が困難であることが知られている^{1),2)}.そのため、河 ロにおける流量測定については、現状では昇降機とH-ADCPを組み合わせた高機能な装置の導入や³,感潮域よ り上流で推定した流量と流域面積の比などを用いて簡易 的な推定を行い対応しているのが実情である4.

一方、近年は、集中豪雨による局地的な洪水の発生な

どが問題になっており、従来法で予測が不可能な、局所 降雨による洪水災害が発生している.さらに今後は、気 候変動に伴って発生するさまざまな極端現象への適応策 が必要であり、現在は困難な河口における流量推定を可 能にし、さらに高精度に常時モニタリングすることが強 く求められている.

このような問題を解決するには、河口部にADCPを設 置することが効果的であるが、都市河口部には港湾が発 展していることが多く、都合よく目的の場所にADCPを 海底設置することは困難である.また一旦設置できたと しても、ADCPはダイバー作業によるメンテナンスが必 要である.都市の河口においては船舶の航行もあり、作 業には危険を伴い、高額な費用と労力が発生し、その継 続は現実的ではない.そこで本研究では、このような二 層化した河口においてH-ADCPを用いて流量推定する新 しいモニタリング手法を提案した.

2. 観測方法

本研究では河川流入水と海水が形成する流動場を調べるため,2013年に海上保安庁台場桟橋先端(St.1)に

ADCP (Teledyne RD instruments 社製Work Horse Sentinel ADCP 1200 kHz) を海底設置し, 層厚20 cm毎の各層流向 流速を計測した.また水平超音波多層流速計 (H-ADCP, Teledyne RD Instruments 社製Work Horse Horizontal ADCP 300 kHz) を設置し,東京港水路横断方向の流向流速水平プ ロファイリングを行った (図-1).



図-1 観測地点周辺図(GoogleEarthより)

H-ADCP は、センサーから 5 m 毎の流向流速を最大 200 m 先まで計測するよう設定した.また、機器の取り 付け角度は、測線方向が流下軸と直交するように調整し、 センサー正面が水平よりもやや上向き(ピッチ角 約 1.5 °)に取り付けた.そのため音波経路は境界層を跨い で海面に到達していると考えられ、図-2 で示すように H-ADCP 近傍では下層流速を計測しているが、離れた地 点では実際は上層流速を計測していると考えられる. 2014年4月から同年6月にかけて同地点に多項目水質計

(YSI 社製 YSI6600 V2) と,1台の水質計で複数層の計 測が行えるよう海水ポンプを増設して,鉛直水塊分布の モニタリングを実施した.センサと各ポンプの海底から の距離はそれぞれ,05 m,32 m,52 mとなるように設 置した.さらに,お台場海浜公園内の航路ブイ(St2) にメモリ水温塩分計(JFE アドバンテック社製 ACTW-CMP),及び小型メモリクロロフィル濁度計(同社製 ACLW-CMP)を2セットそれぞれ海面から05 mと3 m に設置し,観測を実施した.



図-2 設置機器の概略図

3. 観測結果

隅田川河口はSt.1から見てほぼ真北に位置し,河川水 の流下方向は南である.図-3に2013年のADCP観測によ り得られた北方流速データ8月分の一部抜粋を示す.北 方流速成分の鉛直分布時系列にはデータ全期間において, 鉛直二層構造が潮汐に関係する形で現れたり消えたりを 繰り返しており,強い潮汐流のパターンを確認できる.



また,2014年の観測で投入したポンプ式多項目水質 計の6月の水温・塩分データを図4に示す.水温・塩分 の各時系列には層毎の値の違いが現れており、本ポンプ システムにより各層サンプリング時の海水交換は良好に 行われていることがわかる.



図-4 2014年6月の3層水温塩分時系列 (赤:上層,緑:中層,青:下層)

St.2 では 2014年の係留設置期間中,頻繁に赤潮が観測 された.図-5 に H-ADCP の水圧計と St.2 における各層ク ロロフィル a 濃度を示す.小潮時に赤潮発生,大潮時に 消散という過程を繰り返すが,同年 4 月 29 日では大潮 にも関わらず大規模な赤潮が観測された.



4. 上層層厚推定方法の検討

上層の河川水と、下層の海水による二層構造が観測される海域において物質収支をモニタリングするためには、 各層流量に加えて境界の深度(=上層層厚)を知る必要 がある. ADCP 流速時系列鉛直プロファイルからは、お おまかに上層と下層で動きの異なる水塊が存在している 事は分かるが、上層と下層が同一方向に流れて境界が明 確に現れない時間もあるため、水質や流速プロファイル から単純に境界の位置を判別することは困難である。そ こで、下層流速潮汐成分と各層流速の位相差の鉛直プロ ファイル時系列を作成することで、境界層を特定する為 の特徴を捉えることができるか検討を行った。

(1) 下層代表流速の時系列作成

沿岸域では水深に対して潮位差が大きく, ADCPの計 測範囲が潮位により大きく変わる.水面や上層下層の境 界面位置が浮動的であるため,鉛直20 cm固定解像度の 観測結果は計算をする上で扱いにくい.そこで各時間点 における流速鉛直プロファイルをz軸方向に再サンプリ ングし,式(1),式(2)で定義されるの座標系に変換した.

$$z^{*}(n,t) = \frac{H + \eta(t)}{N}n \qquad (1)$$
$$\sigma(n,t) = \frac{z^{*}(n,t)}{H + \eta(t)} \qquad (2)$$

ここで z^* は σ 座標系変換後のADCPからの高度,Hは平 均水深, η は潮位偏差,Nは鉛直方向再サンプリング点 の数,nは鉛直方向再サンプリング点の通し番号(海底 から数えて1, 2, 3, ...,N)である. σ 値はADCP計測 第1層で0,海面で1となる.例えば水面が第35層に検出 された場合は、サイドローブからのノイズが含まれる表 層2層をカットし、第1~33層までのプロファイルを抽出 して、N層に等分割する.これを全時間点で実施し、第 3層~8層($0.06 \le \sigma \le 0.16$)の平均流速を下層代表流速と した.

(2) 下層代表流速と各層流速の相互相関解析

潮汐流の各層の位相差を調べる為に,まずADCP 各層 流速測定結果から,周期が1時間以下の短周期変動成分 と25時間以上の長周期変動成分について,それぞれハ イパス,ローパス処理を行って取り除いた.この処理に より,時系列に現れる半日及び一日周期を持つ潮汐成分 (主要4 分潮(M2, S2, O1, K1 分潮))のシグナルを 捕捉しやすくした.続いて(3)式で表される下層代表流 速時系列と,σ座標上の各層流速時系列の相互相関関数 を検討した.

$$C(\sigma,t,\tau) = \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} v_{sw}(t) v(\sigma,t+\tau) dt$$
(3)

ここで、Cは相互相関関数、 τ は時間点tからのラグ、 v_{sw} は下層代表流速、vは各層流速、Tは時系列の長さで ある.この式自体は下層代表流速時系列と各層流速時系列(時系列長さT)のラグ τ における類似度を表すものであり、 v_{sw} とvの共分散で除して正規化を行うと相関係数になる.

図4で示されるように、流速成分の時系列には一日に 2回のピークが表れるなど、上層・下層ともに半日周期 の変動が卓越していたため、この半日周期の潮汐に注目 し、本解析では切り取る時系列の長さTを720分(半日) とし、ラグτの範囲は - 360分~360分とした.式(3)を離 散データに適用できる形に書き換えると、

$$C_{k,t,\tau} = \sum_{t=-N}^{N} v_{sw_t} v_{k,t+\tau}$$
(4)

となる.ここで,NはT/(24t)であり,長さT/2の時系列に 含まれるデータ個数である.4tはサンプリング間隔で ADCPでは10分である.下層代表流速時系列との類似度 が最大になるラグをその層の位相差0とすると,

$$\theta_{k,t} = \arg\max_{\tau} C_{k,t,\tau} \tag{5}$$

となる. argmax C(t)は関数C(t)が最大となる時の τ である. ただし、上記の手順で求まる位相差 θ の解像度はADCP データのサンプリング間隔によるため粗くなる.例えば サンプリング間隔10分の場合では、ラグ τ も10分刻みと なるため、位相差 θ の解像度も同じく10分となる.そこ でCの最大値を二次曲線による補間で求め、その時の τ を 位相差 θ とした.図-6に位相差鉛直プロファイルを示す. 下層に対して変動が遅れている層は暖色で、下層よりも 進んで変動している層は寒色で示されている.また、自 く抜けたように表されている部分は欠測または相互相関 係数の低かった (R^2 -0.45) データ点で気象擾乱などに より、潮汐成分のシグナルが捉えにくかったことを示す. これにより流向流速鉛直プロファイルをプロットする場 合よりも明確に層構造を判別することができた.

(3) 上層層厚の推定

ここでは上記手順で作成された位相差時系列プロファ イルから、上層層厚(境界層から海面までの距離)を推 算する方法を検討する.図-6[a]には、下層から上層に向 かうにつれ位相が遅れていく様子が現れており、その遷 移の様子も、ある層で突如位相が大きくシフトするとい った特徴的なものである.この急激な位相差が現れる位 置こそが、密度や粘性など性質の異なる二つの水塊の境 界であると考え、位相差の鉛直勾配が最大となる深度を 上層層厚として時系列を作成した(図-6[b]).



(4) 上層層厚推定法のH-ADCPデータへの拡張

前項では海底設置型ADCPのデータから上層層厚を推 定する方法を提案したが、これを設置・維持管理、陸上 システムとの連結が容易なH-ADCPのデータに適用する ことを考えた. H-ADCPには水圧センサー及び姿勢セン サーが内蔵されているため、センサー直上の海面までの 距離及びセンサー姿勢角などの補助的な情報が利用可能 である. 密度境界層では音波の屈折が生じると考えられ るが、ひとまず海面まで音波が直進すると仮定して、水 路横断方向のデータを鉛直軸に投射し、ADCP 鉛直プロ ファイルデータと同様に扱った. H-ADCPデータから算 出した位相差鉛直プロファイルを図-7[a]、及び推算上層 層厚を図-7[b]に示す.



図-7[a] H-ADCP データから算出した 2014 年 6 月の位相差鉛直 プロファイル上層層厚



図-7[b] H-ADCPデータから算出した2014年6月の上層層厚

(5) 推算上層層厚の妥当性検証

St.1 に設置したポンプ式3層水質計データ(時間解像 度10分)を用いて密度躍層深度を計算し,推算値の比 較検証を行う.3層塩分値時系列には、しばしば上層 (海底からの高さ5.2m)と中層(同3.2m)の塩分値が一 定の間,近い値を示す様子が現れることがあり、この期 間中は上層層厚が中層以深に達していると考えられる. そこで、上層と中層の塩分値が同値以上になる時間点を 抜き出し、その時間における中層ポンプの深度を上層層 厚とした.比較のタイミングが上層層厚=中層ポンプ深 度となる時と限定的ではあるが、傾向は概ね対応しており、両者の相関係数は0.7と良好であった(図-8[a], [b]).







5. 考察

2014年6月は大規模な降水が観測され、その量はピーク時の6日から7日にかけて185 mm、5日から13日の降雨が続いた期間全体で246.5 mmであった.この期間中の風向は北風であり、上層流速を流出の方向に強化し、6日から7日の上層流出量は8.14×10⁷ m³であった.ポンプ式多項目水質計データから、降雨前の上層塩分を20PSUとして、降雨期間中の平均上層塩分を14.8 PSUとおくと、およそ2.85×10⁷ m³の淡水がSt.1に流れ込んだことになる.隅田川の流域面積690.3 km²にピーク時の雨量185 mmが均等に降り注いだと仮定すると、およそ1.18 x10⁸ m³の降水があり、出水時にその内の4分の1 がSt.1 を通じて湾内

に流出した計算になる.残りの雨水も時間をかけて流域 全体から集水され、やがてSt.1に流れるものと考えられ る.上層流量は連続降雨時間や降雨強度、風向風速にも 影響され、必ずしも降水量と一意に関係しているとは限 らないが、このように直接的な観測により上層への淡水 流入を定量化できたことは重要な知見となりうる.

また,2014 年度観測期間中のSt1のH-ADCP 水圧計デ ータ,St2 のクロロフィルa,日射量及びSt1の上層層厚 の時系列を図-10に示す.日射量は植物プランクトン量 との対応がよいとされる4日移動平均値を用いた.植物 プランクトンはその場で増殖する場合と,移流により別 の場所から運ばれてくる場合があると考えられるので, 日射量の他に潮汐流速を考慮し,大潮と小潮の時期に注 目しながら時系列の比較した.観測期間中の小潮に当た る時期は5月5-7日,20-22日,及び6月4-6日であり, いずれの時期においても植物プランクトンの増大が確認 され,同公園内の水は停滞気味であったとみられる.反 対に5月12~15日,27~30日,及び6月11~14日の大潮時に は植物プランクトン量の激減がみられ,潮汐流が増幅し, 公園内の水交換が活発化したことが伺える.

しかし、4月28~30日の大潮時にはクロロフィルa増 大が観測され、他の大潮時と逆の傾向になっている.こ れについて、クロロフィルaのピークが観測された直前 の上層層厚に注目してみると、26日と28日に層厚が小 さくなっており、同時期の日射量を見ると26日に極大 値が観測された.これは上層層厚減少に伴う有光層への 植物プランクトンの集積が起き、大規模な増殖が起きた ことを示唆する結果である.

以上をまとめると、お台場海浜公園の植物プランクトン量の変動は潮汐による影響が支配的であり、大潮時に 減少、小潮時に増加というパターンが基本であるが、上 層層厚の変動も重要な働きを担っており、厚みが小さい ほど、日射の影響を受けた植物プランクトンの増加が起 こりやすいことが分かった.



6. まとめ

本研究における成果は次の通りである.

1) 2013 年の河口感潮域におけるADCP 観測により流速 時系列鉛直プロファイルに位相差が存在する事がわかり, この位相差を用いて上層層厚(=密度躍層位置)を推定 できることがわかった.

2) 同推定方法はH-ADCP に適用可能であり、上層層厚 と上層流量の推算が可能となった.

3) 上層推算流量とポンプ式水質計の塩分値を用いて, 2014 年6 月6~8 日に観測された出水時の台場周辺海域に 流入した淡水量の定量化が可能となった.

4) 2014年4月から6月の観測により、春期のお台場海浜公園内(St.2)のクロロフィルa変動は、潮汐による水交換の寄与が大きく、基本的には小潮時増大・赤潮発生、大潮時減少・赤潮消失というパターンが見られた.唯一4月29日の大潮時にクロロフィルa増大が観測されたが、 直前の期間に上層層厚が小さく、日射量が大きかったこ とより、周辺海域にクロロフィルa高濃度水塊が形成さ

れ,移流により公園内に運ばれてきたものと推察された.

5) 比較的安価な機材構成による観測であり、機器の設

置・維持管理についても主に岸壁からの作業で済む利点 がある. 今後の河口域における流量モニタリングに有効 な手法となる事が期待される.

参考文献

- (横尾啓介,吉田静男,岡田幸七,野村佐和美.感 潮域における ADCP を用いた河川流量の推定,水工 学論文集,2008.
- 1 橋場雅弘,林克恭. 感潮域における河川流量連続モニタリング,河川流量観測の新時代,第3巻,pp. 23-30,2012.
- 二瓶泰雄,高村智之,渡邊敬之.東京湾主要流入河 川における流量モニタリングの現状と課題.海岸工 学論文集,第54巻,pp. 1221-1225,2007.
- 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, 2005.

A PROPOSED METHOD OF MONITORING FLOW FIELD AND MASS BUDGET IN ESTUARY

Yoshimu KUSUMOTO, Yukio KOIBUCHI, Hiroto HIGA and Junichiro MANO

While recreational waterfront in urban area has been developed, chronical water quality degradation such as red tide and sewage water inflow has been occurred. Monitoring flow field around estuaries is required for appropriate water management. However, it is technically challenging to measure or calculate river discharge in estuaries due to complexity of its flow structure. This study discusses a method of measuring discharge of two-layered flow field by a stationary H-ADCP at Odaibakaihin park. Firstly, in a preliminary survey by an ADCP, a phase shift was observed in tidal velocity components of upper layer and lower layer in the vertical direction, which can be utilized to detect boundary of two layers and to determine thickness of the upper layer. The H-ADCP was settled upward in an angle of 1.5 degrees. Current profiles across the boundary were monitored, and river discharge of two-layered flow field was simultaneously calculated. In addition, a water quality meter combined with two pumping devices was vertically arrayed to observe water properties of multiple layers. Freshwater discharge could be quantified by relating flow rate and salinity of upper layer. This proposed monitoring method enables to monitor discharge of respective water layers and will expand more observatories effectively along analogous estuaries.