2014 年度　修　士　論　文

河口域における流動場及び物質収支モニタリング手法の提案
—お台場海浜公園を例として—
A Proposed Method for Monitoring of Flow Field and Mass Budget in Estuaries: the Case of Odaibakaihin Park

楠本 仁麦
Kusumoto, Yoshimu

東京大学大学院新領域創成科学研究科

社会文化環境学専攻

目次

要旨 4

1　はじめに 5

1.1　研究背景 5

1.2　既往の研究 6

1.3　研究目的 8

1.4　台場周辺海域概要 8

2　観測手法 10

2.1 現地観測概要 10

2.2 各計測機器概要 12

超音波多層流向流速計（ADCP） 12

水温塩分計及びクロロフィル濁度計 14

ポンプ式多層水質計の製作 16

栄養塩センサー 19

水平超音波多層流向流速計（H-ADCP） 19

3　結果 20

3.1　流向流速分布の変動特性 20

3.2　水温，塩分，クロロフィル a，濁度の変動特性 22

4　流動場の鉛直構造分析 26

4.1　各層代表流速時系列の作成 26

4.2　調和解析 29

5　上層層厚推定方法の検討 30

5.1　下層時系列と各層時系列の相互相関解析 30

5.2　上層層厚の推定 33

5.3　上層層厚推定法の H-ADCP への適用 37

5.4　上層層厚の推算値と実測値の比較 38

6　観測結果の考察 44

6.1　St.1 における流動場の状況（2014 年 4 月） 45

6.2　St.1 における流動場の状況（2014 年 5 月）.....48
6.3　St.1 における流動場の状況（2014 年 6 月）.....53
6.4　2014 年観測お台場海浜公園内（St. 2）の水環境動態.....56
7　結論.....58
付図.....60
謝辞.....72
参考文献.....73

要旨

都市部において憩える親水空間の整備が進められている一方で，周辺の水環境は赤潮，青潮，アオサの発生等の問題を抱え，慢性的に悪化している例が多い．東京湾内の人工海浜の一つで，都内の観光名所でもあるお台場海浜公園は，東京湾への環境負荷の流入経路でもあるため，流量及び水質各項目のモニタリングの実施が望まれる地点である．しかし，同水域は隅田川河口域に当たり，河川水と海水が合わさり複雑な水理構造を示すため，従来のモニタリング方法では流動場の把握は困難であった．そこで本研究では鉛直 2 層構造を示す流動場を 1 台の固定 H-ADCP で行う観測手法を考案した．2013 年に行った ADCP による流況調査において，流速鉛直分布の各層に潮汐流速成分の位相差が表れることがわかり，この位相差を利用した上層/下層境界位置の検出が可能となった．本研究では同手法の H-ADCP への適用を行った．研究の特色としては，通常 H-ADCP を用いた水路流量観測では，水面や河床に音波が当たらない様になるべく水平に設置されるが，本研究で使用した保安庁台場桟橋に既設されている H—ADCP は約 1.5°上向きに取り付けられていることから，河川水—海水の境界層にまたがって計測していることが考えられ，上層と下層の境界を推定できる可能性がある．春季のお台場海浜公園内では赤潮発生・消失は潮汐による影響が支配的であるが，潮汐によらない赤潮イベントを，推算した上層層厚の変動と日射量から説明可能である事が分かった．さらに，多項目水質計と 2 台の海水ポンプを組み合わせて複数層の水質項目の計測を行うシステムを製作し，推算した流量と合わせて淡水流出量の算出を行った．水質管理の面からも河口域・河川感潮域の水環境動態モニタリング地点の拡大展開に有効な手法となる事が期待される．

1　はじめに

1.1　研究背景

近年，過密化した都市部沿岸において人工海浜や人工干潟の造成など，レクリエーション目的の利用も視野に入れたウォーターフロント開発の機運が高まっており，東京湾周辺でもこれまでに，金沢八景，お台場海浜公園，葛西臨海公園，幕張海浜公園など，都市部から近い地域の再開発が行われてきた．しかし東京湾をはじめ内湾性の水域では，一般に家庭や工場排出に由来する環境負荷が大きく，赤潮やそれに伴う貧酸素水塊の発生，青潮，アオコの発生など様々な水環境問題を抱えており，景観に悪影響が及んだり，利用客の水場へのアクセスが制限されたりするなど，高機能な親水空間を創出する上での妨げとなっている．

特に内湾性水域における海岸空間の設計においては，周辺環境との親和性を考慮した水環境の総合的な議論が必要となるが，内湾性水域の水環境動態における既往の研究では湾スケールの現象を対象としたものが多く，極浅水域における研究は水域の利用価値の高さの割には十分な知見が蓄積されているとは言い難い．水深も小さく，海岸線に囲われた海岸空間も多く，気象条件による影響を受けやすく外洋よりも短周期で複雑に変動をしていると考えられる．その為，極浅水域として区別した水環境動態の監視を行うため流動場及び水質変動の連続モニタリング手法の開発を行うことには意義がある．中でもお台場海浜公園の周辺海域は, 年間 160 万人(2009 年現在)の利用者が集う親水空間であるが, 現在, 慢性的な水質悪化のため水浴目的の開放は行っていない.

同公園は隅田川河口域に位置し，隅田川河川水の東京湾への流出経路でもあるため，利用水域の水質管理もさることながら，湾内への流入負荷量を明らかにするための流量及び栄養塩をはじめとした水質モニタリングの実施も望まれている地点である．沿岸域への負荷流入に関するこれまでの研究では，流域内の人口や家畜頭数から負荷の発生量を推定し，それに流出率を掛けて沿岸域への負荷量を見積もる原単位法や，直接計測した負荷物質濃度に流量を掛けて求める直接法が用いられているが，前者の方法では出水時や季節変化などの短期的な負荷量の変動を追う事が難しく，後者の方法では，特に河口域付近で流量測定を行っている河川が少なく，沿岸域への流入負荷の総量を見積もる際の問題となっている．河口域を通じた陸域からの流入負荷量は，特に内湾における物質循環を論じる上で有用なデータとなりうる．そこで本研究では，東京湾への負荷流入源でもあるお台場海浜公園を対象地点とし，鉛直 2 層構造をもつ閉鎖性極浅水域における上層層厚の推定方法など，モニタリング手法開発を行い，上層層厚の変動を含む鉛直各層の流動特性と，それによって決定される水環境動態を明らかにすることを試みた.

1.2　既往の研究

河川から沿岸域への流量や物質収支に関する研究

流入負荷の推算法は，原単位法と直接法に大別される．前者は流域の人口，家畜頭数，田畑面積から負荷発生量を求め，この値にどの程度の割合で沿岸に流入するかを示す比を乗じて河川流入負荷を算出する．これに対し，後者の方法では直接計測した流量と物質濃度を乗じて流入負荷を求める．高田（1997）は，多摩川の感潮域直上流にあたる田園調布堰における流量と水質データを用いて，同河川を通じた沿岸域への物質負荷量を見積もり，その結果，粒子状の物質は洪水による間欠的な輸送量の寄与が大きいが，栄養塩類は平水時にも連続的に流入していることを明らかにした．さらに高田は原単位法による推定値との比較を行い，河川由来の栄養塩負荷については原単位法により±25%程度の精度で推定できる可能性があるとした．

しかし松村ら（2004）は原単位法では負荷の時間変動を知ることが出来ないとし，直接法による東京湾への淡水流入量と栄養塩負荷量を算定し，季節変動について言及している．高田は日本全体の沿岸域への物質収支を見積もる為には，河川流量の常時測定が不可欠としているが，多くの河川で都市排水や工業排水の流入地点よりも上流においてのみ流量測定が行われていることを問題点として挙げている．直接法の一種であるが，流量 Q の時系列を各河川固有の L—Q 式（$L=aQ^b$，L：汚濁負荷量，a，b：係数）に関連づけて負荷量の時系列を作成する L−Q 法も広く用いられている（例えば二瓶ら，2007）．これら直接法では水路横断面流量の計測が必須となるが，特に家庭や工場からの排水が集まる河口域での観測が望ましい．

感潮域流量モニタリングに関する研究

本研究の対象地点であるお台場海浜公園は隅田川河口域にあたり，同河川は，その全長 23.5km にわたり全て感潮域であり，注ぎ込む各支川（神田川，石神井川，新河岸川）の流量データも上流域のものに限られ，流量推定は困難である事が指摘されている（二瓶ら，2007）.今日では，流量観測には水中で超音波を用いて多点流速データを同時に計測することのできる超音波多層流向流速計（Acoustic Doppler Current Profiler 以下，ADCP）などの高度観測機器を用いる例が感潮河川において増えてきている．例えば横尾ら(2008)は石狩川下流において，河床設置した ADCP による多層流向流速観測を行い感潮域においても流量を精度よく算出出来ることを実証した．その後，同 ADCP はテレメトリー装置と統合され，同河川における流量リアルタイムモニタリングは実用段階にある（橋場ら，2013）．同システムは橋梁に沿って設置されたものであり，河川流心部にも比較的簡単にアクセス可能であるなど，ADCP 設置には好条件の地点であった．ただし，河川や沿岸域の水路の中には川

幅が大きかったり，船舶の交通量が多い地点であったりと基礎工事やメンテナンス作業の為の立ち入りが容易でない場合も多い．

流心部での基礎工事を避け，同様の機器である水平超音波多層流向流速計（Horizontal Acoustic Doppler Current Profiler 以下，H-ADCP）を岸壁に設置する例もあり，筧ら（2013）は，宮城県万石浦において，内海への水路に ADCP と H-ADCP の両方を設置し，流速鉛直分布の変化も勘案して水路通過流量を推定した．その推定値は，曳航式 ADCP による横断面流量観測結果とよく一致した．また，昇降装置と組み合わせて水路横断面の流速分布を面的に取得するといった試みもなされており，鶴見川における観測で岡田ら（2005）によりその精度の高さが実証されている．しかしながら，昇降装置を用いた直接的・連続的な流量モニタリングは精度のよいデータを得る事が出来る反面，設備の導入・維持のコスト高の問題があり，全国の河川に普及させることは難しい．また，原田ら(2008)は，費用面の問題を解消すべく，H-ADCP の一層流速データと数値シミュレーションを用いた隅田川感潮域での流量推算を行い概ね良好な結果を得たが，密度成層時及び高濁度時には精度が低下することが報告されている．

都市部沿岸環境に関する研究

鯉渕ら（2000a）は，東京湾の現地観測結果における考察で，成層時の表層混合層厚の増減が遊泳力のない植物プランクトンの集積・発散をもたらし，赤潮の消長に関わっている可能性を指摘している．河口域においても頻繁に成層状態が観測されるため赤潮の発生消失過程の解明には，日射や栄養塩濃度の他に上層層厚が水質に影響を及ぼすことが考えられる．

また，鯉渕ら（2005）は国内で最も雨天時流出汚染物質負荷が大きいとされているお台場海浜公園周辺において，栄養塩の他に，大腸菌やアデノウイルスなどの雨天時に放流される未処理下水由来物質について，降雨後毎日の採水を行い，その変動過程を追跡した．その結果，同公園周辺の大腸菌濃度は数㎜程度の小規模の降雨でも，急増を示す場合があることがわかった．さらに NO_3-N や，NH_4-N および PO_4-P 濃度の降雨量への対応に違いがみられ，これが河川，底泥，処理場など，供給源が違うためであることが示されている．これは，同公園の河川水，海水，下水の混合の割合が，異なる栄養塩濃度を調べることで特定できる可能性を示唆している．

小野澤ら（2005）は同じくお台場周辺海域において 3 次元流動モデルと大腸菌モデルの開発を行い，数値シミュレーションによる各ポンプ所由来の CSO（Combined Sewage Overflow； 雨天時合流式下水道越流水）時空間的な挙動や，下水遮集用 CSO 施設を整備した場合の汚濁負荷改善効果の評価を検討した．その結果によれば，同公園の上流に位置す

る芝浦下水処理区からの CSO だけでなく，下流に位置する森ヶ崎下水処理区から放流される CSO も潮汐により，上げ潮時に同公園周辺に運ばれてくることが明らかにされた．以上より，同公園をレクリエーション目的に最大限有効利用するためには，適切な健康リスク制御を行うための水環境モニタリングが望まれる．

1.3　研究目的

お台場海浜公園を始めとする河川感潮域の水環境改善のためには，現地の水環境変動メカニズムを把握する事が不可欠である．このとき，河川感潮域は河川からの流入負荷の影響と海洋からの潮汐の影響を同時に受けるため，河川流量の推算すら困難である事が，水質変動メカニズムの把握を妨げる一つの要因であった．これまでに，感潮域での流量推算のために様々な取り組みが行われているが，密度境界層に注目して，各層流量を推算した例はこれまでに無い．密度境界層の位置が特定できれば，水質の異なる各層水塊の流量及び物質収支の推定に用いる事が出来る．さらに常時強成層状態にある河口域においては，密度成層は植物プランクトンを有光層に集積するなど，生物生産量への寄与が大きく，沿岸環境を論じる上で重要なパラメータともなる．本研究では，H-ADCP の流速時系列プロファイルから境界層位置を推定し，従来困難であった H—ADCP によるエスチュアリー循環が卓越する感潮域の流量モニタリング手法を開発すると同時に，推定される境界層位置が同公園の水環境にどのように影響しているのかを明らかにする事を目的とする．

1.4　台場周辺海域概要

台場地区は東京臨海副都心として 90 年代前半に本格的な開発が始まり，大規模な商業施設，観光・レジャー施設の誘致が進んで現在では多くの利用客で賑わいをみせるようになった．その中で都内有数の夜景スポットとして人気のお台場海浜公園は，人口ビーチや遊歩道が整備されており，都市部親水空間としての機能が期待されている．また昨年 9 月に 2020 年夏季オリンピックの東京での開催が決定し，同公園周辺の水域がトライアスロンの水泳種目の実施候補地となっている．周辺ポンプ所の降雨時下水放流や，屋形船からのし尿排出があるため，病原体との接触の危険が懸念され，また水深も深いので水浴目的の開放は行っていない．しかし，平成 16 年策定の「新合流改善クイックプラン」の実施などで，下水排出状況が改善されたこともあり，雨天時を除けば環境省の定める水浴場水質基準（糞便性大腸菌数 1000 CFU（コロニー数）/100ml 以下）を満たす日が多いとして，期間限定で海開きを行うなど積極的に同水域の利用を勧める試みが増えてきている．東京都港湾局でも 2014 年度からマリンスポーツ用にレクリエーションエリアを試験開放することを決定した．

周辺海域の水質及び生態系環境は慢性的に悪化しており，夏場をピークに赤潮が頻繁に観測される．表層付近では河川を通じた栄養塩供給が定常的にあり，植物プランクトンによる一次生産量が大きい．底層ではプランクトン死骸など堆積した有機沈殿物（デトリタス）の分解のために溶存酸素が消費され続け，年間を通じて常に貧酸素状態であるため，貝やカニの底層での窒息死や，酸欠に苦しむ魚が水面を跳ねる姿がよく観察される．鉛直方向の混合は表層河川水と下層海水が形成する密度境界層に阻害を受けていると考えられる．同公園内では釣りや潮干狩りができるが，赤潮時のプランクトン優占種によってはアサリなど貝類の毒化が懸念されるといった問題もあり，憩える親水空間の管理の為に今後ますます水環境モニタリングの必要性が増す地域である．

2　観測手法

2.1 現地観測概要

本研究ではまず河川流入水と海水が形成する流動場を調べるために，海上保安庁台場桟橋先端（St. 1）にて ADCP を設置し，流向流速の鉛直分布の観測を行った．観測期間は 2013 年 6 月 6 日から同年 11 月 21 日までの約 5 ヶ月半である．また，お台場海浜公園内航路ブイ（St. 2）に水質計を設置し，水温，塩分，クロロフィル a，および濁度の計測を行った. 観測期間は 2013 年 9 月 27 日から 2014 年 1 月 31 日までの約 4 ヶ月間である. さらに，St.1 の桟橋先端には既設の H-ADCP データが利用可能であるので，2013 年 6 月 6 日から同年 10 月まで, 及び 2014 年 4 月 1 日から同年 6 月 29 日までを用いた. なお, 同機器は 2013 年 10 月に故障が発生し，翌年 3 月に修理・再設置が行われるまでの期間はデータが存在しない.

2013 年の ADCP による流動場調査により現地の水環境変動についてある程度説明が可能になったことより，2014 年では既設の H-ADCP とテレメトリー装置に，新たに多項目水質計の増設を行い，複数層の計測が行える様，海水ポンプとポンプ制御装置も併設して水環境状態のリアルタイムモニタリングを行った．このポンプ式多層水質計の設置期間は 2014 年 4 月 29 日から同年 6 月 29 日である．さらに同期間，St. 2 でも航路ブイを利用して鉛直 2 層に水質計を設置した．観測地点を図 1 に示し，表 1 に使用した観測機材の詳細をまとめる.

図 1　観測地点周辺図（GoogleEarth より）

表 1　機器の設置地点及び期間

機器名	設置地点	測定項目	時間解像度	データ期間
水温塩分計	St.2 （第一回目： 水深 0.5m 第二回目： 水深 0.5m 及び 3m ）	水温, 塩分	10 分	（第一回目） 2013.9.27~ 2014.1.31 （第二回目） 2014.4.24~ 2014.6.20
クロロフィル 濁度計	〃	Chl−a, 濁度	10 分	（第一回目） 2013.9.27~ 2014.1.31 （第二回目） 2014.4.24~ 2014.6.20
ADCP (1200kHz)	St.1 桟橋先端 （水深 8m）	鉛直方向 20cm 毎 流向流速	20 分	2013.6.6~ 2013.11.21
多項目水質計	St.1 （水深 6m）	水温，塩分, 濁度，pH, Chl−a，DO	10 分	2014.4.29~ 2014.6.29
H-ADCP （300kHz）	St.1 桟橋先端 （水深 6m）	水平方向 5m 毎 流向流速	20 分	2013.6.6~ 2013.10.11 2014.4.1~ 2014.6.29
栄養塩 センサー	St.1 （水深 6m）	NO_3-N, NH_4-N	30 分	2014.4.29~ 2014.6.18

2.2 各計測機器概要

超音波多層流向流速計（ADCP）

河口域では図 2 に表されるようなエスチュアリー循環と呼ばれる水深方向に変動の大きい流動場が形成されるため，海底から海面まで複数点の流向流速を計測することが必要となる．本研究で用いた Teledyne RD Instruments 社製超音波多層流向流速計（ADCP: Acoustic Doppler Current Profiler）は，1200kHz 帯の超音波を利用して鉛直複数層の流れを同時に計測する機器である．多くの水質センサーと異なり音波を用いた非接触測定を行うので，生物付着によるセンサー面の汚れの影響が小さく，浅海域においても数ヶ月間の安定した観測が可能である．計測原理であるが，ADCP はある一定の長さを持つ超音波パルスを発振し，水中懸濁物からの反射波形に現れる周波数の変化量（ドップラーシフト量）を算出する事で，音波経路上の水粒子速度を測定する．超音波の送受信を行うトランスデューサー（送受波器）はそれぞれ四角錐の斜面に配置されるような位置関係で 4 個搭載されており, 三角関数の関係から音波経路上の水粒子速度を xyz 軸座標上の速度成分へ変換する.

なお，同機器には傾斜計，磁気コンパスも内蔵されており，水平流速を算出する際の傾きによる影響を補正した後，方位情報を用いて東方成分及び北方成分に変換したデータを記録することができる．ただし，海面に対して機器本体が傾いた状態で設置されると海面付近のデータにサイドローブによる雑音が入ってしまうので，なるべく機器の中心軸が鉛直方向を向くように設置する事が望ましい．底質は柔らかい泥質であるため，機器の姿勢を安定させるためには治具に沈み込みを防ぐような工夫を施す必要がある．過去に同地点で ADCP を設置した際, 転倒してデータが計測できなくなった経験を踏まえ，本観測では図 3 のようにジンバル架台の底面にネットを張った.

図 2　エスチュアリー循環

図 3　ADCP ジンバル架台

ところで本観測で用いられた ADCP は圧力計を搭載していないため，ADCP が流速と同時に記録する反射音波強度（Echo Intensity）の値から水位を推定した．反射音波強度は 0~255 のカウント値で記録され, およそ 0.45 dB/count の解像度に相当する. Terray ら（1997）の ADCP 海面検出アルゴリズムを参考にし，本研究では以下の手順で水位推定を行った.

（1） ADCP 反射音波強度の鉛直プロファイルから最大値を抜き出す.

（2） 隣り合う上下の観測層の反射音波強度も抜き出す.

（3） 3 点データから求めた二次曲線から反射音波強度のピークを求め, その高度を海面の位置とする.

（4） 上記手順で作成した水位時系列から異常水位と思われるデータ点（隣り合うデータ点との差が 1σ 以上）を取り除き，スプライン補間をかけて最終的な水位時系列を得る.

図 42-46 に示す各月のカラーコンター図では海面より上のデータ点はマスキングしている．東西方向に比べ南北方向の潮汐流の方が大きく表れたため，カラーコンターのレンジは北方流速成分が—0.3~0.3 m/s，東方流速成分では—0.15~0.15 m/s であることに注意する．横軸は時間（解像度：20 分），縦軸は ADCP からの距離（解像度：20 cm）である.

水温塩分計及びクロロフィル濁度計

お台場海浜公園内航路ブイ（St. 2）にアレック電子（現 JFE アドバンテック）社製メモリ水温塩分計（ACTW-CMP），及び同社製小型メモリクロロフィル濁度計（ACLW−CMP）を係留した．各項目の測定原理について簡単に触れておく．まず水温塩分計には，サーミスタと呼ばれる抵抗素子と，電気伝導度センサーが搭載されている．水温はサーミスタ温度と電気抵抗の関係式から求められる．塩分は海水中のイオンはナトリウムイオンと塩化物イオンにほぼ占められるとして，イオン総和量の指標となる電気伝導度を計測し，経験式から実用塩分（PSU: Practical Salinity Unit）に変換することで求められる．クロロフィル濁度計は，特定の波長帯（640～980nm）に感応する受光素子と，異なる 2 波長（470nm，及び 880nm）の発光素子から構成されている．本機器におけるクロロフィル a 量測定は，まず植物プランクトンの光合成を励起する 470nm 帯の光を水中に照射し，光合成の過程で発生するクロロフィル蛍光（640～980nm 波長帯）の強度を電圧値として計測する．機器にはこの電圧値をクロロフィル a 濃度に換算するための較正係数がインプットされており，クロロフィル a 濃度として記録される．同様に濁度についても 880nm 帯の光を照射し，懸濁粒子からの後方散乱光強度を電圧値として計測し，電圧値と濁度の関係式から測定を行っている.

上記のセンサー群は一般的に生物付着による影響を受けやすく，特にクロロフィル濁度計等の光学センサーは計測面の汚染に敏感で，生物付着が発生すると正しく計測出来なくなる等の問題がある．さらに浅い水深への設置や，夏季に行う設置では付着生物の成長が速く，長期の設置観測は難しいとされる．本機種には生物付着の影響を低減するためのワイパー機構が搭載され，長期安定計測のための工夫が施されている．

次章の図 10 において，その他の結果とお台場海浜公園内航路ブイ水質計設置観測により得られた水温，塩分，クロロフィル a，濁度の 2013 年 10 月データを示し，その他の月については付図にて示すことにする．また，2013 年 6 月から 2014 年 1 月にかけて東京管区気象台において観測された気温，日射量，降水量，風向風速の毎時間データも併せて示す．

図 4　お台場海浜公園内航路ブイへの水質計係留作業風景

ポンプ式多層水質計の製作

2014 年の本調査では上層および下層水塊の水質を同時に計測するためのシステムの製作を行った．同システムにおいて使用した多項目水質計（YSI 社製 YSI6600 V2）は一台で水温，塩分，クロロフィル a，濁度，溶存酸素量，pH の同時計測が可能な機種である．東京湾に展開されている水質観測施設（浦安沖，千葉港波浪観測塔，千葉港口第一号灯標，川崎人口島）などでは同機器に自動昇降装置を組み合わせて，上記水質項目の鉛直分布を毎時間計測し，湾内海水の鉛直構造のリアルタイムモニタリングを行っている．河口域においても水質動態の把握の為には各項目鉛直分布の連続モニタリングを行うことが望ましいが，自動昇降装置はやや大掛かりな構成になるので，本研究では安価に複数層の計測が行えるよう，海水用ポンプ（工進社製マリンペット BL-2512N）を用いて各層からセンサーに送水する装置を製作した．図 5 にポンプシステムの系統図を示す．

図 5　ポンプシステム系統図

上記のポンプシステムを海上保安庁台場桟橋水深約 6m の地点に設置した．また，図 6 で示す通り，3 層の観測ができるよう，2 台のポンプを底層のセンサーから 4.7 m と 2.7m の位置に取り付けた．同機種は上述のアレック電子社製水質計と同じくワイパー機構による生物付着対策が施されているが，センサーを生物生産量の低い底層に設置して，ポンプ送水でセンサーの周囲に乱流を起こすことでさらなる生物付着の低減が期待できる．各水質項目の計測は 10 分毎に行われ，毎回の制御シーケンスは表 2 で示される通りである．

取得された各層水質データは併設されているテレメトリー装置により携帯電話回線を介して，リアルタイムで陸上に伝送される．上層及び中層ポンプから送られた海水をセンサーの計測時間中滞留させておくため，センサー部には筒状のアタッチメントが取り付けられている．底層水の取水にはポンプは用いずに，約 7 分間の自然拡散によって海水交換が行われている．図 7 で示されるように水温・塩分の各時系列には層毎の値の違いが現れており，各層サンプリング時の海水交換は良好に行われていたことがわかる．設置期間は 2014 年 4 月 29 日から同年 6 月 29 日までである．なお，中層ポンプの実装は上層底層に遅れて同年 5 月 25 日からとなっている．

図 6 ポンプ・水質計係留索外観及び概略図

表 2　ポンプ式多項目水質計制御シーケンス

経過時間	制　御　内　容
0 分	水質計コントローラーが水質計に Wake up 信号を送信
0 分 5 秒	水質計コントローラーが計測開始コマンドを送信
	（底層計測開始）
0 分 35 秒	水質計から計測完了の Ack を受けて，リレーコントローラーがリレー1 を ON にする
	（20 秒間ポンプ 1 送水）
0 分 55 秒	リレーコントローラーがリレー 1 を OFF にする（ポンプ 1 送水停止）
1 分	水質計コントローラーが計測開始コマンドを送信（上層観測開始）
1 分 30 秒	水質計から計測完了の Ack を受けて，リレーコントローラーがリレー2 を ON にする
	（20 秒間ポンプ 2 送水）
1 分 50 秒	水質計コントローラーが計測開始コマンドを送信（中層観測開始）
2 分 20 秒	水質計コントローラーが Sleep コマンドを送信
~10 分	次回計測時間まで水質計は Sleep モード（省電力待機モード）

図 7　2014 年 6 月の St.1 における 3 層水温（上）・塩分（下）時系列

（赤：上層，緑：中層，青：下層）

栄養塩センサー

お台場海浜公園周辺には河川水の他に周辺ポンプ所からの下水も流入する．このことから，大雨時，同海域の淡水流入は，河川由来のものと下水道由来のものに分けられると考えられる．そこで，未処理下水はアンモニウムや栄養塩を高濃度に有した水塊であると考え，2014 年の本調査では，栄養塩センサー（WTW 社製 VARiON Plus 700 IQ）を設置し，上層のアンモニウム濃度，及び硝酸塩濃度の計測を行い，未処理下水の流入状況のモニタリングを試みた．同センサーはアンモニウムイオン及び硝酸イオンの感受性電極と，共同使用する参照電極の電位差を測定し，電位差とイオン濃度の関係式から，機器内部で各イオン濃度の値に変換し記録を行う．設置位置は St.1 のポンプ式多層水質計と同じ地点に，上層ポンプの設置水深と同じになるよう海底から約 5.2m の水深に設置した．設置期間は 2014 年 4 月 29 日～同年 6 月 18 日である．

水平超音波多層流向流速計（H-ADCP）

保安庁台場桟橋（St.1）先端には，水平超音波多層流速計（Teledyne RD instruments 社製 Work Horse H-ADCP 300 kHz）が設置されており，2010 年からデータが蓄積されている．本機器はセンサーから 5m 毎地点の流向流速を最大 200m 先まで計測することができるものである．前出の 2013 年調査で用いた海底設置式 ADCP と異なり，機器の正面が流下軸と直交するように角度を調整して取り付けられており，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ている．

H-ADCP を用いる利点として，St.1 のように船舶の交通量が多い場所で，機器設置やケーブル敷設が難しく，海底設置型 ADCP では水路中央の観測を行うことができない場合でも，H-ADCP であれば桟橋や岸壁から航路上の流速を狙って測る事ができるということが挙げられる．また，データ伝送装置（テレメトリー装置）に接続する場合や，陸上の固定電源から給電する場合でも，必要となるケーブル長が短く，比較的単純な工事ですむ事も多い．

本 H-ADCP はやや上向き（ピッチ角 ＝+1.5°）に取り付けられており，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る．H-ADCP 左右方向の傾斜（ロール角）はデータ全期間でほぼ 0°であった．従って図 8 で示すように H-ADCP 近傍では下層流速を計測しているが，センサーから離れた地点では上層流速を測っていると考えられる．

図 8　H-ADCP 設置状況概念図

3　結果

3.1　流向流速分布の変動特性

図 9 に 2013 年 10 月の降水量，風向風速，北方流速及び東方流速の時系列鉛直プロファイルを示す．St.1 では流下軸を南北方向にとり，北側が隅田川河口，南側が東京湾である．また，お台場海浜公園は東側に位置し，同公園内水塊の流入流出は東西成分で表されると考えられる．東京管区気象台によると，同月は，2 日，5 日，15 日，16 日，20 日，26 日に 30mm 以上のまとまった量の降雨があった月で，特に 15～16 日にかけては台風 26 号の接近に伴う強い風と激しい雨が観測されている．合計の降水量は 25 日が 65.5mm，26 日が 176.5mm で，平均風向は北北西であった．

上層水塊は基本的には風と潮汐によって駆動されていることがわかる．台風時に注目すると，ピーク時であった 16 日に，降水による上層層厚の増加と，強い北西風の連吹による効果で，ほぼ全層にわたって南向きの流れが卓越した．また，台風が通過し，風が弱まった 17 日以降，上層において潮汐による往復振動流が強化されていることがわかった．18～21 日が大潮であるため，大潮による影響とも考えられるが，同月の 3～6 日の大潮期間中は見られなかった変化であるため，増量した上層水塊が潮汐により大きく動かされたと考えられる．20 日に新たな降水があったが，この傾向は概ね 23 日頃まで観測された．同様の現象は 9 月 8 日の降雨（46mm）においても見られた．

また，東方流速成分については，潮汐流のシグナルは表層 1m までの範囲でわずかに確認できる程度にしか認められない．一方で，上層において風との対応はよく見てとれ，その様相から直接的に東西風が上層に働くというよりは，南北風が主水路の上層水塊の南北流を励起し，お台場海浜公園内の水塊がこれに引っ張られる形で変動していることが想

像される．風向が南のとき，主水路表層において北向きの流れが強化され，その期間中，西向き（同公園から流出の方向）の流れが生じ，逆に風向が北の時は，やや東向き（同公園流入の方向）成分を含む南向きの流れが生じる．したがって，同地点の主流向は真北—真南より少し傾き，北北西—南南東の方向である．北方流速成分と比較すると，全期間でちょうどカラーコンターの赤と青が反転したような形になる．

ただし唯一例外的に 10 月 16 日の台風時には, 卓越風向が北西であったにもかかわらず，南西向きの流れが生じている．これはお台場海浜公園までの水域が持つ，上層水塊のバッファ容量を越えた淡水流入が隅田川河口域から起きたため，水路も海浜公園内も表層流出方向となり，同水域の上層が全体的に東京湾に向かって流下していたためと考えられる．

図 9　2013 年 10 月における降水量，風向風速，及び St.1 の流速時系列鉛直プロファイル（上から，降水量，風向風速，北方流速成分，東方流速成分）

3.2　水温，塩分，クロロフィル a，濁度の変動特性

図 10 に 2013 年 10 月の St.2 における水質各項目及び気象各項目の時系列を示す．設置期間の 10 月から翌年 1 月にかけては生物生産量が大きくない時期であるので，クロロフィル a が全期間通じて低い値で観測されたが，7 日，8 日，及び 10 日に顕著な高まりが見られる．同時期の風速は弱く，鉛直混合は起きていなかったものと思われ，その間に表層クロロフィル a 濃度が高まったのだと考えられる．一方で，同時期の塩分値時系列には，降雨が無かったにも関わらず，塩分の低い水塊が同地点に流れ込んでいるかのような値の減少がみられる．これは，同月 5 日の降雨により St. 2 より上流区域で形成された低塩分上層水塊が，潮汐により St. 2 を行ったり来たりしていたのだと考えられる．植物プランクトンの増殖も低塩分水塊の流入に同期する形で観測されたことより，同期間における上層層厚の重要性が示唆される．

台風 26 号通過後には，大量の河川水流入により塩分が 10PSU にまで大幅に下がり，

17 日以降も断続的に降雨が観測され，表層塩分の低い状態が少なくとも 10 月 30 日まで続いた．また，河川水を介した陸からの懸濁物質の流れ込みや，海底浮泥の巻き上げの影響と見られる濁度の増加も確認できる．濁度の増加に伴い有光層厚が小さくなり，植物プランクトンの増殖が制限された．さらに冬に掛けて日射量が徐々に小さくなっていったこともあり，11 月 22 日～30 日まで 10μg/L 以内の微増が確認された以外では，センサー回収時までクロロフィル a の急激な高まりは見られなかった．

図 10　2013 年 10 月東京管区気象台の気温，日射量，降水量，風向風速時系列，及び St.2 表層水温，塩分，クロロフィル a，濁度の時系列

図 11　2014 年 4 月の St.2 表層水温，塩分，クロロフィル a，及び濁度時系列

図 12　2014 年 5 月の St.2 表層水温，塩分，クロロフィル a，及び濁度時系列

図 13　2014 年 6 月の St.2 表層水温，塩分，クロロフィル a，及び濁度時系列

4　流動場の鉛直構造分析

St.1 から見て隅田川河口はほぼ真北に位置し，河川水の流下方向は南である．また，お台場海浜公園は東に位置し，東方流速成分は同公園への流入または流出の程度をよく表している．前節の北方流速成分の時系列鉛直プロファイルにはデータ全期間において鉛直２層構造が潮汐に関係するような形で消えたり現れたりを繰り返しており，強い潮汐流のパターンが確認できる．気象項目時系列と比較してみると，降雨後の河川増水期間と思われる範囲において，表層で南向きの流れが強化される．特に 10 月 15 日の海面から最大で約 5m 深までの上層において 20 cm/s を越える南向きの流れが．東西流速成分をみると，降雨期間中にはやや西向きの成分も混じり，同期間中は常に表層水がお台場海浜公園から出て行くように動いている事が分かった．ここでは潮汐と気象条件が上層と下層にではその様相が異なるので，各層に分けた調和解析を行い，潮汐の各層に及ぼす影響にどの様な違いがあるのかを検討した．

4.1　各層代表流速時系列の作成

沿岸域では潮位差が水深に対して大きく，ADCP の計測範囲が潮位によって大きく変わる．上層の z 軸上の位置は浮動的であり，さらにその層厚も潮汐により変動していると考えられるため，鉛直 20cm 固定解像度データは，解析を行う上で扱いにくい．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，次式で定義される σ 座標系へ変換し，全時間点において水面以下の有効データ点の数を揃える処理を行った．

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

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

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 は再サンプリング点の数，nは鉛直方向サンプリング点の通し番号（海底から数えて 1~N）である．σ値は海底で 0，海面で 1 となる．使用した ADCP データは水面より上の空中も含む 50 層データだが，例えば水面を第 35 層に検出した場合は，まずサイドローブの影響が含まれる表層 2 層をカットし，第 1~33 層までを抽出して，その 33 層鉛直プロファイルを再度 N層に等分割する．これを全時間点で繰り返して行う．

σ 座標変換を行った後，各時間点の鉛直プロファイルを重ねてプロットを行い，上層及び下層を特徴付ける各層の特有の傾向を調べた．北方・東方流速プロファイルと標準偏

差プロファイルを図 14 と図 15 に示す．図 14 より σ=0.8 以上 1 以下の範囲で特に標準偏差が高く，振幅の大きい変動場である事がわかる．また，平均流速は南向きであり，平均的にほぼ滞留している下層と差別化できるため，0.8＜σ≦1（第 41～50 層）の範囲を当観測期間における上層と定義し，これらの層の流速の平均を上層の代表的な流測値とした．一方で，σ が 0.5 以下の層を細かく差別化できるような特徴は表れなかったが，上層の場合と平均するデータ点の数を揃えるため，0.1＜σ≦0.3（第 6～15 層）を下層と定義し，同様に代表流速値時系列を作成した. 各層代表流速時系列の平均値と標準偏差を表 3 にまとめる.

図 14　北方流速成分の鉛直分布（左）と標準偏差（右）

図 15　東方流速成分の鉛直分布（左）と標準偏差（右）

表 3　各層の平均流速と流速標準偏差

	平均	標準偏差
上層北方成分	-3.9 cm/s	10.6 cm/s
上層東方成分	-1.3 cm/s	4.2 cm/s
下層北方成分	0.5 cm/s	5.6 cm/s
下層東方成分	-0.7 cm/s	2.5 cm/s

4.2　調和解析

上記の手順で得られた代表流速時系列について調和解析を行い，表 4 で示される主要 4 分潮成分の抽出を行った．潮汐成分の標準偏差と全体の変動との比を見ると，潮汐の東方流速成分への寄与が小さい事が分かる．これは，お台場海浜公園内の水交換は，潮汐による日常的な対流よりも，降雨や風の連吹などの気象条件による寄与の方が大きいためと考えられる．

図 16 に抽出された潮汐成分の時系列を示す．図 16 より，上層と下層に位相差が認められた．北方流速について下層と上層でどの程度位相差があるのか，図 17 に示される通り，上層及び下層の北方流速時系列をについて相互相関解析を行った結果，上層の変動が下層に対して 200 分程度遅れていることが分かった．

位相差の原因としては，周辺海域の海底形状が影響していると考えられ，潮汐により各層水塊は水平方向に動かされているが，場所によって水深が違うので，上層と下層で水塊が移動できる領域が異なっているためと考えられる．また，順圧流体であれば下層水塊に働く摩擦力が上層に向けて伝わり，同位相の変動になると考えられるが，風による擾乱が境界層によって阻害されるのと同様に，下層の摩擦の影響が境界層より上に伝わっていないことも位相差の原因として考えられる．ここで得られた結果より，位相差の鉛直分布について詳しく調べ，境界層の検出に利用できる可能性について検討することとし，5 章でその詳細を述べる事にする．

表 4　各層の潮汐成分標準偏差

	潮汐成分標準偏差	全体標準偏差との比
上層北方成分	5.9 cm/s	0.56
上層東方成分	1.2 cm/s	0.27
下層北方成分	3.3 cm/s	0.59
下層東方成分	0.5 cm/s	0.19

5　上層層厚推定方法の検討

表層の河川水（及び雨天時の下水）と，底層の海水による二層構造が観測される海域において，各層の流量と物質収支をモニタリングするためには，境界層深度（＝上層層厚）を知る必要がある．2 章で示した 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方の異なる水塊が存在している事は分かるが，その境界位置を読み取るとなると，上層と下層が同一方向に流れる時間（両層とも赤か青一色で表される時間）もあるため，流速プロファイルからでは判別することはできない．そこで，調和解析で上層と下層の潮汐成分の間には位相差が存在することがわかったので，下層潮汐流との位相差を全層にわたって求め，潮汐成分の位相差の時系列鉛直プロファイルを作成し，境界層を特定する為の特徴が現れないかの検討を行った．

5.1　下層時系列と各層時系列の相互相関解析

潮汐流の各層の位相差を調べる為に，まず ADCP 各層流速データから，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する．続いて次式で表される下層の代表流速時系列と，σ 座標上の各層流速時系列の相互相関関数を考える．

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

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（第 3 層～8 層（0.06≦σ≦0.16）の平均流速），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．

前章の図 16 で示すように，抽出した潮汐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）とした．また，図 17 に示すように上層流速と下層流速の相互相関関数に明確な半日周期が表れたため，解析に必要なラグの長さは 720 分までで十分と考え，ラグ τの範囲は-360 分～360 分とした．

（3）式を離散時系列データに適用できる形に書き換えると，

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

となる．ここで，Nは $T/(2\Delta t)$であり，長さ $T/2$ の時系列に含まれるデータ個数である．Δt は ADCP のサンプリング間隔で，海底設置型 ADCP では 20 分，H-ADCP では 20 分である．下層時系列との類似度が最大になるラグをその層の位相差 θ と定義すると，

$$\theta_{k,t} = \underset{\tau}{\operatorname{argmax}}\, C_{k,t,\tau} \qquad (5)$$

となる．argmax $C(\tau)$は，関数 $C(\tau)$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 20 分の場合では，ラグ τ も 20 分刻みとなるため，位相差 θ の解像度も同じく 20 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 18~20 に各月毎の位相差時系列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，白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）データ点である．

図 16　下層潮汐成分 720 分時系列との各層位相差時系列鉛直プロファイル
（上：6 月，下：7 月）

図 17　　下層潮汐成分 720 分時系列との各層位相差時系列鉛直プロファイル

（上：8 月，下：9 月）

図 18　下層潮汐成分 720 分時系列との各層位相差時系列鉛直プロファイル

（上：10 月，下：11 月）

図 18～20 では，流向流速鉛直プロファイルを単純にプロットした場合よりも明確な層構造が現れている．上図は下層潮汐成分と各層潮汐成分の位相差を示すものであるので，相互相関解析の結果，相関係数が低く図中に白で表された部分については，気象擾乱による影響が大きかったことが考えられる．また，色のグラデーションは成層強度に関連している可能性が高く，9 月初旬までの夏季の成層が強まる時期には，位相差躍層がはっきりと現れている期間が長いが，9 月中ごろを過ぎると各層の下層との位相差が小さくなり，成層が弱まっている様子が現れていると解釈できる．例外は 10 月 16 日の台風通過に伴う大量の河川流入があった時期で，図 15 にて示す通り，台風が到着する前は成層状態が弱かったが，淡水流入後に強い成層状態が現れている．

5.2　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（海面から境界層までの距離）を推算する方法を検討する．前項で示した各月の位相差時系列プロファイルには，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ずれるといったような特徴的な現れ方をする．この急激な位相差が現れる位置こそが，密度及び粘性など性質が異なる水塊の境界層であると考え，位相差の差分が最大となる深度を上層層厚として，その時系列を作成した．また，上層層厚の推算後，境界層位置以浅の流速と，上層層厚と掛け合わせる事で，単位幅あたりの線流量が求まることになり，ADCP 直上を通った上層水塊の量を見積もる事ができる．図 21~23 に各月の上層層厚と上層線流量の時系列を示す.

3 章にて議論した 2013 年 10 月 7 日, 8 日及び 10 日のクロロフィル a 濃度の高まりについて，上層層厚の同時期の時系列と比較してみると，層厚が小さくなったタイミングでクロロフィルが高濃度化していることがわかる．7 から 10 日にかけた最小層厚の推移は 7 日が 2.4m，8 日が 2.2m，9 日が 4.2m でクロロフィル a 濃度は一旦減少し，10 日に上層層厚 2.3m で再びクロロフィル a の高まりが見られた．これは鯉渕ら（2000）の東京湾における現地調査で，上層層厚の増減がクロロフィル a 濃度に関係し，層厚が薄いと有光層に植物プランクトンが凝集されてクロロフィル a 濃度が高くなるという事例と同様の現象を捉えていると思われる．なお本推定の検証には密度の鉛直プロファイルデータが必要になるが，今回の ADCP の設置期間中において利用可能なデータが無いので，次節において検証方法を検討する事とする．

図 19　St.1 における推算上層層厚時系列

（上から順に 6 月，7 月，8 月，9 月，10 月，11 月，

青：推算値，緑：360 分移動平均値）

図 20　St.1 における推算上層北方線流量時系列

（上から順に 6 月，7 月，8 月，9 月，10 月，11 月，

青：推算値，緑：360 分移動平均値）

図 21 St.1 における推算上層東方線流量時系列

（上から順に 6 月，7 月，8 月，9 月，10 月，11 月，

青：推算値，緑：360 分移動平均値）

5.3　上層層厚推定法の H-ADCP への適用

本研究では海底設置型 ADCP のデータから，上層層厚を推定する方法を考案したが，ADCP の設置期間中には上層層厚を推定するための密度鉛直プロファイルデータの取得を行っていなかった．そこで，2014 年 4 月 1 日からデータがある H-ADCP データを用い，追加観測で得られた密度鉛直プロファイルデータとの比較から，本上層層厚推定法の妥当性を評価する事を考えた．

同機器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記録されている．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は直進すると仮定して，各データ点の深度を算出し，水路横断方向の測線上流向流速データを鉛直軸に投射し，ADCP 鉛直プロファイルデータのように扱う事を検討した．得られたプロファイルデータの傾向を図 22 に示す．

図 22　鉛直軸に投射した H-ADCP 北方流速成分の分布（左）と標準偏差（右）

H-ADCP 設置地点近傍のデータ点では，南北成分（水路流下軸方向）の流れが弱まっている様子が現れているが，これは当該 H-ADCP の設置されている構造物（桟橋）が，南北方向の流速を遮るように，水路中央に向かって突き出した形で位置していることが影響していると考えられる．センサー近傍以外では，下層流速は振幅が小さくほぼ停滞，上層流速は比較的振幅も大きく平均的に南向きの流れという，海底設置 ADCP データと同傾向の結果

が得られた．ただし，上層と下層の間に平均的に北向き（隅田川河口流入の方向）に流れている層が現れており，これは海底設置 ADCP データには見られなかった特徴である．原因としては, 海底設置型の ADCP データは桟橋付近の水平格子上一点の鉛直プロファイルデータである事に対し，H-ADCP データは水路横断方向の測線上の水平プロファイルデータを鉛直軸に投射しているものであるため，両データの計測地点が違っていると言う事が挙げられる．すなわち，ADCP では桟橋付近を観測しているが，H-ADCP は水路中央付近を観測しており，水路中央では隅田川河口に向かう定常的な下層流入（一般的なエスチュアリー循環）があることを表している．

以上の結果では下層の懸濁物質（Suspended Solid, 以下 SS）は河口付近に堆積しやすく，東京湾に向かって流出しにくい状態であることが示唆されたが，SS の動態を詳細に知るためには SS 濃度，上層および下層流量の時間変化を考慮する必要がある．以下では H-ADCP データから求めた上層層厚の推算結果の妥当性を検証する．

5.4　上層層厚の推算値と実測値の比較

H-ADCP データから推算された上層層厚との比較を行うため，同機器設置地点である St.1 の桟橋先端にて垂下式多項目水質計（アレック電子（現 JFE アドバンテック）社製 AAQ-1183）を用いた海水密度鉛直分布の計測を行った．観測期間は 4 月 27 日から 5 月 31 日まで毎週末に 1～2 回，計 11 プロファイルを取得し，さらに 6 月 15 日の午前 9 時から午後 5 時までに合計 12 プロファイルの集中観測を行った．取得された水温，塩分データより σt（= 密度（kg/m^3）—1000）の鉛直分布が求められ，各時間点における密度躍層深度を見積もった．図 25 は上記期間中に行った観測で得られた水温，塩分及び σt の鉛直分布である．時間帯によっては，はっきりとした密度躍層が現れない場合もあり，プログラムで機械的に躍層位置を判定することが好ましくない場合もあると考えられる．各プロット内の破線は，それぞれ，隣接する計測深度との密度差分が最大値を示す深度（黒）と，底層から σt を追跡していき，σt の値が急に変わる最初の深度を境界層深度として定義した場合（赤）である. 以下では, これらの異なる 2 つの基準により定義される境界層深度と H-ADCP データから推算される上層層厚との比較を行うことにした．

図 23　St.1 における σt（ピンク），塩分（青）及び水温（赤）の鉛直分布

図 24　6 月 15 日の H-ADCP 推算上層層厚時系列及び実測上層層厚
（ピンク: σt 最大差分値深度，赤: 底層からみて最初の密度躍層深度）

図 25　上層層厚実測値と推算値の比較（左: σt 最大差分値深度，中央: 底層からみて最初の密度躍層深度，　右: 同，実測値が 3.5m より深い場合のみ）

図 25 に示される水温塩分鉛直プロファイルの結果から分かるように, 躍層が顕著に現れない場合があるなど，実際の鉛直構造は様々な形態をとるため，プログラムにより一義的に境界層の定義を行うのは難しい. 図 26 に 6 月 15 日の密度プロファイル集中観測時の，実測値と推算値時系列の比較を示す.

密度鉛直プロファイル内の最大差分値を示す層とした場合，推算値から大きく外れてしまうことが多いが，同日観測された密度鉛直プロファイル図を見ると，境界層と判断できそうな深度が 2 カ所見られ，鉛直 3 層の複雑な構造を示しており，どちらを上層/下層境界層と定義するかで結果が変わってしまう．一方で底層から見て最初に密度がジャンプする層を境界層とおいた場合，つまり深い方の密度躍層を上層層厚とおいて比較を行った場合の方が推算層厚により対応している.

しかし，図 27 に示される散布図による比較結果からは，どちらの境界層の定義においても推算上層層厚との対応は良くない．後者の定義の方が若干良い相関係数（R^2=0.25）を

示したが，回帰直線の傾きが 0.13 であるなど，H-ADCP による上層層厚推算が実用的であることを示す結果とならなかった．そこでどういった場合に実測値と推算値が合わないのかを検討したところ，境界層が深度 3.5m 以浅で観測された場合に，推算値の対応が悪いことが分かった．実測値が 3.5m 以浅のデータ点を除いて比較すると，格段に両者の対応が良くなる．（R^2=0.7）

3.5m 以浅の境界層を H-ADCP による上層層厚推算でうまく表現できない理由についてであるが，H-ADCP のビーム角度（Beam Angle）が原因と推測される．ビーム角について説明をすると，H-ADCP は図 28 で示される 3 つのトランスデューサー（送受波器）を持ち，中央のものは水路横断方向を向いているが，両隣のトランスデューサーはそれぞれ上流側と下流側に 25°傾いており，この角度がビーム角度である．つまり，センサーから離れるにつれて，上流側のビームと下流側のビームの計測点の距離は大きくなっていき，これが誤差を生む要因となると考えられる．二瓶ら(2006)らは，H-ADCP 本体正面方向が流下軸に直交しない場合に，本体より離れた位置で流速誤差が大きくなる事を指摘している．

図 26 H-ADCP 本体外観図

（写真:Teledyne RD Instruments 社ホームページより

http://www.rdinstruments.com/）

なお，垂下式水質計の鉛直密度分布観測は現場に出向く必要があるため，どうしてもサンプル数が限られる上，時間的に連続して取得することが困難である．そこで St.1 に設置したポンプ式多項目水質計データ（時間解像度 10 分）から，次の方法で密度躍層深度の情報を抽出し，推算値の比較検証に役立てることを考えた．

ポンプ式多項目水質計の 3 層塩分値時系列からは，上層（海底からの距離 5m）と中層（海底からの距離 3m）の塩分値が一定の期間，同じ値を示したり，逆転したりする様子が確認され，この期間中は境界層位置が中層以深にあることが考えられる．そこで，上層と中層の塩分値が交差す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境界

層深度として比較に用いた．その結果，水質計データから求めた境界層位置は H-ADCP 推算値よりも 0.5m 程度小さく表れるが，傾向は概ねよく対応しており，さらにオフセットを補正すると図 29 で示す通り，両者は非常によく一致する．実測値と推測値の関係の詳細を調べるため，上層層厚実測値が利用できる時間の直近の時間点における推算値を抽出し，散布図による比較を行った．比較結果を図 30 に示す．

図 27　上層層厚推算値と実測値の比較

（赤丸：垂下式水質計による，水色：ポンプ式水質計による）

図 28　上層層厚実測値と推算値の比較

（赤丸：垂下式水質計による，水色：ポンプ式水質計による）

ポンプ式水質計から求めた結果では,回帰直線の傾きは1に近く,概ね良い相関（R^2=0.7）を示した．ただし，ポンプ式水質計による境界層深度の実測値の利用可能な時期は，明確な密度境界面が中層ポンプ水深より深くなる場合に限られているため，限定的な時期における推算上層層厚の信頼性についてのみ現段階では評価していることになる．

ここで，垂下式水質計による実測結果を含めると相関が低くなる（R^2=0.56）ことについて考えると，本手法による上層層厚推算結果には，信頼性の低くなる時期が存在していることが示唆される．考えられる要因として，本手法では各層流速時系列に含まれる潮汐流成分に注目して相互相関解析を行っているが，潮汐成分が全体の変動に対して小さくなる時期，すなわち小潮時には，風などの上層流速に与える影響が相対的に大きくなり，上層潮汐流成分の抽出がうまくいかなくなる可能性が高くなることが挙げられる．

図 29 と，次章の図 39 で示される潮位時系列とを比べてみると，ポンプ式水質計による実測値が利用できる点は大潮時に集中しており，推算上層層厚が良い相関を示した時期は大潮時であったことがわかる．反対に，次章の図 36 の下層-各層時系列の位相差時系列プロファイルには，小潮時の欠測（図 36 中の白く抜けた部分）が多く見られ，同時期では気象擾乱による推算上層層厚の誤差が大きかったことが想像される．ただし，この欠測域も気象条件が潮汐に対して相対的に大きく影響した層として，一定の意味を持つ結果と考えることができる．

6　観測結果の考察

これまでの結果より，お台場海浜公園内の水質に対して，成層強度が本質的に重要である事がわかった．成層化の要因には，日射による表層高温水塊の形成や，淡水流入による表層低塩分水塊の形成などが挙げられるが，河口域の場合は後者が主であると考えられる．前章の図 25 で示した水温，塩分，密度プロファイルを見ると，密度の鉛直分布は水温には因らず，ほとんど塩分で決定していることが見てとれ，上層は隅田川由来の淡水を多く含む低塩分水塊により形成されていると言える．この低塩分水塊による成層化は，日射により形成される温度躍層とは異なり，日スケールでの出現・崩壊を繰り返すことは可能性として低いと考えられ，上層層厚は水塊の挙動を追跡するための手がかりになると考えられる．

なお，上層層厚を求めた際に，同海域の淡水収支及び物質収支モニタリングに必要な上層流量を，層厚は水路横断方向に一様との仮定の下，

$$\text{上層流量} = \text{上層層厚} \times \text{水路横断距離} \times \text{上層平均流速}$$

として算出した．水路横断距離は 600m とした．図 26~28 で示されるように算出された上層流量は，上層平均流速の時系列と比較すると，ほぼ完全に一致した変動を見せ，敢えて分けて時系列に示す必要がないことがわかった．そこで，上層層厚と上層平均流速をそれぞれ平均値で除して無次元化した後に標準偏差を求めてみると，上層層厚は 0.2 程度であったのに対し，上層平均流速は 9.4 という結果になった．これは各項の全体の変動への寄与の大きさとして解釈され，上層流量の変動はほぼ上層平均流速の変動で決定されるということを示している．とは言うものの，上層平均流速を計算する際，平均化する鉛直データ点の数は上層層厚を使って決めているので，上層層厚推算は必要な手順である．

また，上層層厚の時系列には潮汐パターンが大きく現れた．このままでは気象条件による変動が見えにくいので，主要潮汐成分を除くために 25 時間移動平均値と，さらに定常状態からの偏差が分かりやすいように，データ全期間の平均上層層厚の値も重ねてプロットした．これより，境界層は深度 4.5m を中心として，主に潮汐により±2m までの範囲で日周期/半日周期の振動を繰り返しており，気象条件により±0.5m 程度の変動の中心深度が変化していることがわかる．

上層流動場とそれを決定する気象要因との対応を調べるため，図 31 に 2014 年 4 月から同年 6 月までの各月の日射量，上層平均流速，上層層厚，風速南北成分（25 時間移動平均），上層流量，風向風速，及び降水量の時系列を示した．風向風速は，エスチュアリー循環の強化および抑制に大きく関与すると期待されたが，全期間を通して上層層厚との一様な対応は見られなかった．これは観測地点において河川水由来の水塊が支配的である場合と，東京湾由来の水塊が支配的である場合の 2 通りがあると考えられ，それぞれの時期

で風向風速に対して異なった反応を見せたためと考えた．その詳細について以下の各月に分けた考察の中で述べることにする．

6.1　St.1 における流動場の状況（2014 年 4 月）

2014 年 4 月についてはポンプ式多項目水質計が未設置であった月であるため，ここでは気象条件のみから上層変動について議論する．各層塩分のデータが無く，同月の初期成層状態は不明であったが，ちょうど 3 日から 4 日に掛けてまとまった降雨が観測され，河川水流入により強い成層状態にあったと推察される．この降雨による合計降水量は 105mm であった．降雨直後は河川流入の増加により，上層層厚が増大し，上層水柱全体が境界層から受ける摩擦の影響が小さくなり，外力の作用に敏感に反応する傾向があることが 2013 年 10 月の大雨時の調査でも分かっている．その為，4 日の日中 4 時間程度の短い時間だが南風が強吹する時間帯があり，上層流入（北向きの流れ）のピークが観測された．その間上層層厚は平均より 0.5m 程度小さく表れている．

また，南風偏差と上層層厚の 25 時間移動平均値の対応をみると降雨後 10 日程度（図 31—期間 A）は，南風（北風）が強化されると上層層厚増大（減少）という関係が見られる．これは同月 3 日の降雨後しばらく St. 1 周辺に流入した河川水が図 32 で示される様な形で張り出しており，河口に向けて風が吹くと上層河川水のフロントが河口に向かって押し戻され，境界層の位置が浅くなるためと考えると説明がつく．

6 日に 7mm/day の小規模な降雨があった後は 21 日まで 1mm 以上の降雨が無かった．その間（図 31—期間 B）において，南風偏差と上層層厚の関係が期間 A と反対になっていた．これはしばらく淡水の流入がないために，周辺海域全体で混合が進み，水平方向にも鉛直方向にも密度勾配が小さかった期間であったと考えられ，図 33 に示されるように南風が強まると，広範囲に広がっていた密度一様の上層水塊が河口域に集められることになり，上層層厚が深まったのだと説明される．

21 日から 23 日にかけて合計 15mm の降雨があり，その間は南風偏差も変動が横ばいで，上層層厚との対応がはっきりしないが，24 日以降の期間 C においては，淡水流入による密度成層が強まったと思われ, 風に対して上層層厚の変動が期間 A と同じ傾向を示した．降雨イベント後は東京湾に向かう淡水流量が大きくなると期待されたが，実際には北向きに大きく流入が観測されるなど，15mm 程度の降雨イベント後は風による制限が大きい事が分かった．

図 29　2014 年 4 月における日射量，上層平均流速，上層層厚，
風速南北成分（25 時間移動平均値），上層流量，風向風速，及び降雨量時系列

図 30　強密度成層時（淡水流入時）の St.1 周辺海域における風向，上層流速，層厚の関係

図 31　弱密度成層時の St.1 における風向，上層流速，層厚の関係

6.2　St.1 における流動場の状況（2014 年 5 月）

同月はポンプ式多項目水質計のデータが利用できる期間である．水質各項目時系列を図 35 に示す．これらの水質項目のうち，クロロフィル a では同月 1 日から 13 日の期間において，図 34 に示される風向風速時系列との対応が確認され，南風が強まる期間に赤潮発生, 北風が強まる期間に赤潮消散の傾向が見られた. 図 39 に示される潮位時系列を見ると，St.1 で赤潮発生が確認される期間は小潮時期を中心とした潮汐による変動が小さい期間であり，この時期に南風が強まると，上層水塊が河口側で停滞し，反対に北風が強化される時期には上層水塊は海側に流出し，これが植物プランクトンの増加に関係していると考えられる．

クロロフィル a と風および上層水塊の関係は図 34 と図 35 に矢印で示す通り，小潮時においてその対応が見られ，流量とクロロフィル a の関係では，一日程度継続した流入が観測されるとクロロフィル a が増大の時期と対応していることがわかった．その後の 13 日から 17 日にかけた大潮の時期では，上層水塊は風よりも潮汐によって大きく駆動されていると考えられ，風向風速に関係なくクロロフィル a は抑制された状態であった．

以上のことから，St.1 のクロロフィル a の変動は小潮時には風，大潮時には潮汐に因り制限されていることがわかり，小潮時においては，St.1 の上層流量が一日程度継続して河口流入を示す場合に，河口側での上層水塊の停滞が起こり，植物プランクトン量は増加し，St.1 において継続した流出を示す場合には，河口側では上層水塊が動かされ，植物プランクトン量の増加が抑えられていると推測された．

また，図 25 に示す通り，同月では密度鉛直分布観測により，2 日，9 日，25 日，31 日に密度成層，17 日では密度躍層の崩壊が確認された．密度躍層崩壊は上層・下層水塊の鉛直混合が促進されていることを意味するため，現地の水環境変動を知る上で重要な情報となりえる．そこで，成層が崩壊した状態では，上層/下層水塊は混合がすすんで比較的均質であるため，各層流速時系列の位相差は小さくなると考え，図 36 で示される位相差時系列プロファイルに注目した．すると，成層崩壊が起きていた 17 日前後は，同月の強い成層状態にあったが時期（2，9，25，31 日）に比べて位相差が小さく表れていることがわかる．成層崩壊の原因として，初めに大潮時に潮汐往復振動流が強化されたためと考えたが，同月後半の大潮時（27~30 日）では成層状態が続いていた．図 34 の降水量時系列と比較すると, 成層崩壊時（17 日）の直前の一週間では 9 日と 13 日でそれぞれ 1.5mm/day, 6.5mm/day 程度の小規模な降雨が観測されていたのみで，まとまった降雨のない時期が続いていた．一方で, 大潮時に成層が強化されていた 27 日には 29mm/day 程度の降水が観測されており，同時期の位相差時系列プロファイルを見ても，淡水流入により強化されたと思われる成層

状態が表れている．さらに，図 25 に示される，25 日午後 1 時と 31 日午後 2 時半の密度鉛直分布には 3 層の成層構造が見られ，直前の降雨状況を見てみると，21 日と 22 日に 2 回に別れた降水量のピークが見られ，これが鉛直 3 層構造の形成に繋がったのだと考えられる．

以上のように，St.1 の成層の形成・崩壊には，潮汐による撹拌ではなく，降雨イベントによる淡水流入量が支配的要因であることが示唆され，その成層の強さは，上層層厚の推算過程で作成される位相差時系列プロファイルに表れることがわかり，St. 1 周辺の鉛直構造を定性的に知りたい場合に同時系列プロファイルを利用できることがわかった．

図 32　2014 年 5 月における日射量，上層平均流速，上層層厚，
風速南北成分（25 時間移動平均値），上層流量，風向風速，及び降雨量時系列

図 33　St.1 における 3 層水温，塩分，pH，クロロフィル a，濁度，溶存酸素，アンモニア態窒素，硝酸態窒素時系列

（赤：上層，緑：中層，青：底層）

図 34　H-ADCP データから作成された下層潮汐成分 720 分時系列との各層位相差時系列鉛直プロファイル（上: 2014 年 4 月，中央:同年 5 月，下: 同年 6 月）

6.3　St.1 における流動場の状況（2014 年 6 月）

図 37 の降水量時系列に示される通り，同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 185mm，5 日から 13 日の降雨が続いた期間全体で 246.5mm 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 8.14×10^{7}（m^3）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 14.8PSU とおくと，およそ 2.85×10^{7}（m^3）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（640km^2）全体にピーク時の雨量（185mm）が均等に降り注いだと仮定すると，およそ 1.18×10^{8}（m^3）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り，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 に流れてくると考えられる．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．

お台場海浜公園内の水質は大雨の後しばらくきれいになる事が知られており，図 10 で示す 2013 年の St.2 における水質観測でも 10 月 16 日の台風通過後にクロロフィル a 極小の期間が持続する様子が観測されていた．2014 年同月の出水イベントでも，出水直後の 7 日から次に赤潮が発生する 22 日までの間，クロロフィル a の顕著な高まりは観測されず，小潮時にあたる 19 日～21 日では, 河口側で上層水塊の停滞が起きるような南風が連吹している時期であったが, 同年 5 月の傾向とは異なり，St.1 において植物プランクトンの増殖は抑制されていた．これは図 37 の同月の上層流量時系列に見られるように，全体的に上層流量が湾内流出の方向であったことから，降雨後の河川増水が重力循環を強め，水塊の停滞が発生しにくく，植物プランクトンの増殖しにくい流動場を形成していたためと考えられた．

図 38 で示す通り出水イベント後初めての赤潮は 22 日に観測された. 図 37 と比較すると，同日は日射量が小さく，上層水塊も降水と北風の影響で湾内流出方向に大きく動いていた日であったのにも関わらず, St.1 において植物プランクトンが増加していたことが示される．これは 19～21 日の小潮時に南風が連吹し，St.1 よりも上流の停滞水塊中で植物プランクトンが増殖し，22 日にその高濃度クロロフィル a 水塊が流下し，St.1 に到達したためと推測された．

以上のことより，大雨後，2 週間程度の間，河川流量の増大により St.1 の上層流動場が湾内流出傾向となり，水塊の動きが大きかったため，植物プランクトンの増加が抑制されていたことが分かった．さらに，推算上層流量と風速南北成分，クロロフィル a の時系列比較から，同月 22 日の St.1 におけるクロロフィル a の急増は，河口域で形成された赤潮水

塊が St.1 へ移流してきたことによるものであることが明らかとなった.

図 35　2014 年 6 月における日射量，上層平均流速，上層層厚，
風速南北成分（25 時間移動平均値），上層流量，風向風速，及び降雨量時系列

図 36　2014 年 6 月の St.1 における 3 層水温，塩分，pH，
クロロフィル a，濁度，溶存酸素，（赤：上層，緑：中層，青：底層）
アンモニア態窒素，及び硝酸態窒素時系列

6.4　2014 年観測お台場海浜公園内（St. 2）の水環境動態

図 39 に 2014 年度観測期間中の St.2 の降水量，風速南北成分，上層層厚，日射量 4 日平均，クロロフィル a，濁度のそれぞれ上層と下層および HADCP の水圧計水位時系列を示す．4 日平均日射量は植物プランクトン量との対応がよいとされているが，観測期間中 St.2 ではクロロフィル a との関連が見られず，日射だけでは植物プランクトン量の増減が説明できなかった．植物プランクトンにはその場で増殖するものと，移流により別の場所から運ばれてくるものがあると考えられ，必ずしも日射量でクロロフィル a の変動が規定されていないことを考えると，同期間中は流れによる影響が大きかったとみられ，潮汐流速が最大及び最小となる大潮と小潮の時期に注目してみることにした．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 日であったが，いずれの時期においても同公園内の水交換量が小さくなったことによる植物プランクトンの増大が見られる．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，また 5 月 27~30 日では低層濁度も低下傾向にあることから，潮汐流振幅の増大による水交換量増大が示唆された．ただし，4 月 28～30 日の大潮時にのみクロロフィル a の増大が観測され，その他の大潮時と反対の傾向となった．水塊が大きく動く時期であるので，周辺海域で増大した植物プランクトンの流入があった可能性があることから，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 日に層厚減少の傾向が見られ，さらに日射量では 26 日に最大値が観測されたことより，この時期に有光層への植物プランクトンの集積と急増が起きたと考えられる．

以上より，お台場海浜公園の水質に重要な植物プランクトンの変動には潮汐に因る影響が最も支配的であり，大潮時には海水交換が促進される事より植物プランクトンが減少し，反対に小潮時には海水交換が弱まる事により，植物プランクトンが増加する事が分かった．潮汐に次ぎ，上層層厚の変動が表層で有光層厚とのバランスで，水柱の光合成量に影響し，例えば，上層層厚が有光層厚より大きければ同じ上層においても光合成に必要な光量が足りなくなる深度が発生するため，上層の厚さが小さいほど植物プランクトンの増加が起こりやすくなる事が明らかになった．

図 37　　2014 年 4 月から 6 月にかけた降水量，風速南北成分（25 時間移動平均値），
推算上層層厚，日射量（4 日移動平均），
St.2 におけるクロロフィル a（0.5m 深；赤，3.0m 深；青），
St.2 における濁度（0.5m 深；赤，3.0m 深；青），
及び HADCP 水位計水位時系列

7　結論

本研究では，台場海浜公園内の水質変動を調べる為に，同公園内航路ブイを利用し，2013 年は表層一層，2014 年は表層と下層の 2 層に水質計の設置を行ったさらに周辺水域の鉛直流速構造を調べるため，海底設置型 ADCP を保安庁台場桟橋近傍に設置した．測定した各層流速時系列より，上層層厚を推定する手法についての検討を行い，さらに同地点に既設であった H—ADCP による水路横断方向の流速分布データを，鉛直軸に投射することで，同推定方法が適用可能であるか検討を行った．その後，推算上層層厚の妥当性について，垂下式水質計と，本研究で製作されたポンプ式多層水質計による密度躍層の実測値より比較を行った．推算された上層層厚と気象項目，さらに測定した水質項目との関連について考察を行った．本研究における成果は以下の通りである．

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 に適用可能である事がわかり，上層層厚と上層流量の算出が可能となった．推算上層層厚は実測データとの比較において概ね良い対応であった．（R^2=0.7）

３）開発した層厚算定手法やお台場海浜公園内の水質観測結果を組み合わせて，水質の変動メカニズムについて検討したところ，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のクロロフィル a 変動は，日射量よりも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，大潮時減少・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，上層層厚が小さく，日射量が大きかったことより，周辺海域のクロロフィル a 高濃度水塊が移流により運ばれてきたものと推察された．

また課題としては以下の点が挙げられる．

１）H-ADCP による上層層厚推算では密度躍層深度が 3.5m よりも小さい場合に精度が落ちることが示された．これは H-ADCP が 3 本の音響ビームが上流/下流方向に広がるため，センサー本体より離れた位置では誤差が大きくなることが原因と考えられる．ビーム毎に個別に計測される流速を用いることで改善が可能と思われる．

２）上層/下層の密度差により音波経路が屈折する問題がある．H-ADCP データを鉛直軸に精度よく投射する為には屈折を考慮する必要がある．

３）保安庁台場桟橋における鉛直密度プロファイリングにおいて，密度成層崩壊や間欠的

な降雨イベントによる鉛直 3 層構造が観測されたため，これらの時期の境界層の判定方法についても検討する必要がある．

付図

図 38　北方流速成分時系列鉛直プロファイル（上：2013 年 6 月，　下：同 7 月）

図 39　北方流速成分時系列鉛直プロファイル（上：2013 年 8 月，　下：同 9 月）

図 40　北方流速成分時系列鉛直プロファイル（上：2013 年 10 月，　下：同 11 月）

図 41　東方流速成分時系列鉛直プロファイル（上：2013 年 6 月，　下：同 7 月）

図 42　東方流速成分時系列鉛直プロファイル（上：2013 年 8 月，　下：同 9 月）

図 43　東方流速成分時系列鉛直プロファイル（上：2013 年 10 月，　下：同 11 月）

図 44　東京管区気象台 6 月気温，日射量，降水量，風向風速時系列

図 45　東京管区気象台 7 月気温，日射量，降水量，風向風速時系列

図 46　東京管区気象台 8 月気温，日射量，降水量，風向風速時系列

図 47　東京管区気象台 9 月気温，日射量，降水量，風向風速時系列

図 48　2013 年 11 月 St.2 水温，塩分，クロロフィル a，濁度，気温，日射量，降水量，風向風速時系列

図 49　2013 年 12 月 St.2 水温，塩分，クロロフィル a，濁度，気温，日射量，降水量，風向風速時系列

図 50　2014 年 1 月 St.2 水温，塩分，クロロフィル a，濁度，気温，日射量，降水量，風向風速時系列

図 51　H-ADCP 北方流速成分時系列

（上から 2013 年 6 月，7 月，8 月，9 月，10 月）

図 52　H-ADCP データから作成された下層潮汐成分 720 分時系列との各層位相差時系列鉛直プロファイル（上から 2013 年 6 月，7 月，8 月，9 月，10 月）

図 53 St.1 における濁度（青）及びクロロフィル a（緑）の鉛直分布

図 54　H-ADCP 北方流速成分時系列

（上：2014 年 4 月，　中央：同年 5 月，　下：同年 6 月）

謝辞

本研究を遂行するにあたり終始ご指導ご鞭撻いただきました鯉渕幸生准教授に深い感謝の意を表します．研究室にいる時間が短く，つくづく時間管理の甘い私でしたが，先生には時に厳しく，時に優しく接していただき，充実して研究生活を過ごせたのは先生のおかげと思っています．本当にありがとうございました．磯部雅彦先生（現：高知工科大副学長）には最初のセメスターに短い時間でしたが大変お世話になりました．最後に先生の授業を受けられたことは良い思い出です．同研究室佐々木淳教授には輪講・ゼミ・研究においてたくさんのアドバイスをいただきました．ありがとうございました．同研究室メンバーの呉海鐘さん，比嘉紘士さんには相談役になっていただいたり，プライベートでも色々楽しませていただきました．同研究室秘書の室園英子さんにも大変お世話になりました．卒業生の古屋秀基さん，アクタールさん，スリチャンさん，トーフィックさん，同級生のデスさん，佐野弘明君，後輩のボドゥルジャマンさん，若狭一樹君，渡部雅也君にもお礼申し上げます．皆さんのおかげで楽しい研究室生活を送ることが出来ました．最後に株式会社ハイドロシステム開発の皆さんにも深く感謝いたします．皆さんのご支援のおかげで修了させることができそうです．これからもよろしくお願いいたします．

参考文献

岡田将治, 森彰彦, 海野修司, 昆敏之, 山田正. (2005). 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.

岡田知也, 高尾敏幸, 中山恵介, 古川恵太. (2007). 東京湾における淡水流入量および海水の滞留時間の長期変化. 土木学会論文集 B, 63(1), 67-72.

小野澤恵一, 鯉渕幸生, 古米弘明, 片山浩之, 磯辺雅彦. (2005). 台場周辺海域における雨天時合流式下水道越流水の数値解析, 海岸工学論文集, 第 52 巻.

海洋音響学会（2004）: 海洋音響の基礎と応用, pp.71

筧茂穂, 伊藤進一, 橘田隆史, 和川拓. (2013). 3 種類の ADCP を用いた万石浦水路における通過流量の定量化. 土木学会論文集 B2(海岸工学) Vol. 69 (2013) No. 2 p. I_466-I_470

川西澄, 大庭尚史, 金子新, 水野雅光. (2008). 感潮河川における音波の横断伝播特性と次世代超音波流速計による横断平均流速の測定, 水工学論文集, 52 巻.

鯉渕幸生, 小野澤恵一, 中村格之, 原本英二, 片山浩之, 古米弘明, 磯辺雅彦. (2005). 東京湾お台場海浜公園における雨天時合流式下水道越流水の影響調査, 海岸工学論文集, 第 52 巻.

鯉渕幸生, 五明美智男, 小倉久子, 安藤暗夫, 磯部雅彦. (2000). 東京湾湾奥部における栄養塩の周年変動に関する現地観測. 海岸工学論文集, 47(0), 1066-1070.

鯉渕幸生, 五明美智男, 佐々木淳, 磯部雅彦. (2000). 現地観測に基づく春季の東京湾における赤潮発生機構. 海岸工学論文集, 第 47 巻(0), 1071-1075.

古米弘明, 高田秀重, 福士謙介, 中島典之, 片山浩之. (2003). 環境中における雨天時下水道由来のリスク因子の変容と動態, 建設技術研究開発助成制度研究成果報告書, 177p.

鈴木高二朗, 磯部雅彦, 米山治男. (2012). 東京湾の海水交換と湾表層流速に及ぼす淡水流

入と風の影響. 土木学会論文集. B2, 海岸工学, 68(2), 946-950.

高田秀重. (1997). 陸域から沿岸海域への物質フラックス. 沿岸海洋研究, 34(2), 111-117.

中村裕樹. (2010). お台場における Urea の時空間変動に関する現地観測, 新領域創成科学研究科社会文化環境学専攻(未公刊).

二瓶泰雄, 北山秀飛, 江端萌奈美, 色川有. (2006). 江戸川における H-ADCP の流速連続モニタリング. 河川技術論文集, 12, 139-144.

二瓶泰雄, 江原圭介, 臼田美穂, 坂井文子, 重田京助. (2007). 江戸川・荒川・多摩川における水質環境と流入負荷特性. 海岸工学論文集, 54(0), 1226-1230.

二瓶泰雄, 高村智之, 渡邊敬之. (2007). 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, 54(0), 1221-1225.

橋場雅弘, 林克恭. (2012). 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

原田靖生, 二瓶泰雄, 北山秀飛, 高崎忠勝. (2008). H-ADCP 計測と数値計算に基づく感潮域の河川流量モニタリング～ 隅田川を例として～, 水工学論文集.

松村剛, 石丸隆. (2004). 東京湾への淡水流入量と窒素・リンの流入負荷量 (1997, 98 年度). 海の研究, 13(1), 25-36.

柳哲雄. (1993). 海洋観測データの処理法, 恒星社厚生閣.

横尾啓介, 吉田静男, 荒川範彦. (2004). 河口二層流に与える風の影響. 海岸工学論文集, 51(0), 361-365.

横尾啓介, 吉田静男, 岡田幸七, 野村佐和美. (2008). 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.

Terray, E., Gordon, R. L., & Brumley, B. (1997). Measuring wave height and direction using upward-looking ADCPs. In *OCEANS'97. MTS/IEEE Conference Proceedings* (Vol. 1, pp. 287-290). IEEE.