

# 小川原湖の環流特性について

## On Horizontal Circulations in a Mixed Layer of the Lake Ogawara

石川忠晴<sup>1</sup>・笹嶋悠達<sup>2</sup>・鶴田泰士<sup>3</sup>・天野光歩<sup>4</sup>・遠藤真一<sup>5</sup>

Tadaharu ISHIKAWA, Yuto SASAJIMA, Yasushi TSURUTA, Mitsuho AMANO  
and Shinichi ENDO

<sup>1</sup>フェロー 工博 東京工業大学大学院教授 総合理工学研究科 (〒226-8502 横浜市緑区長津田町4259)

<sup>2</sup>学生会員 東京工業大学大学院 総合理工学研究科 (〒226-8502 横浜市緑区長津田町4259)

<sup>3</sup>正会員 工博 (株)建設技術研究所 (〒330-0071 さいたま市浦和区上木崎 1-14-6)

<sup>4</sup>正会員 工修 (株)建設技術研究所 (〒330-0071 さいたま市浦和区上木崎 1-14-6)

<sup>5</sup>正会員 国土交通省 東北地方整備局 (〒039-1165 青森県八戸市石堂 3-7-10)

Wind induced currents in Lake Ogawara is discussed being based on field experimental data obtained in autumn of 2006. In the experiment, three ADCPs were set on the bottom of the north, the center and the south water areas for two months. The data showed a periodic appearance of intense shear layer in the metalimnion that seemed to be generated by internal seiche. Measurement from three boats equipped with ADCP was conducted for three days in the same water areas under predominant wind direction of west and south. The data suggested the existence of rather stable horizontal currents in the surface mixed layer. These facts suggest that substances entrained from anaerobic hypolimnion by the shear motion are carried by the stable horizontal current in the surface layer to develop uneven condition of water environment.

**Key Words :** wind driven current, brackish water lake, seiche, horizontal circulation

### 1. はじめに

平成17年の湖沼法改正により、湖沼の特性および汚濁原因に応じた均衡ある水質保全対策を適切に講ずるための種々の施策が法的に規定された。そのような施策を有効に発動するには、湖内の物質輸送および水質変化等の理解に基づく能動的（先を見越した）湖沼管理が同時に行なわれなければならない。

塩分を含んだ汽水湖は、密度流の発生により状態がダイナミックに変化する可能性があり、能動的湖沼管理が特に重要と考えられる。例えば、北海道にある網走湖と本研究で対象とする小川原湖は、地形的・水文的・水理的に類似した点が多いが、下流河道工事と流域の土地利用変化に伴って、水質的に非常に異なった特性を持つに至った<sup>1)</sup>。

小川原湖の流動特性に関しては、長尾ら<sup>2)</sup>、西田ら<sup>3,4)</sup>、鶴田ら<sup>5)</sup>が報告しているが、いずれも流れのある特徴的な部分に焦点をあてた研究となっている。本研究は、小川原湖の能動的な管理手法の今後の検討に資することを目的とし、湖内の流動に関するデータベースを構築するために企画された。その成果は汽水湖の一般的数値シミュ

レーションモデルの構築にも役立てられるように整理する予定でいる。

小川原湖には経年的に強い塩分躍層が存在し、その上下で水質が著しく異なる。塩分層は常に嫌気状態にあり、未分解の有機物や、硫化物や種々の栄養塩が溶解しており、魚類や貝類などは生息できない。この高塩分水の一部は、主に秋季から冬季にかけて、上部の混合層に連行されることが知られている<sup>1)</sup>。塩水とともに連行された物質の混合層内での輸送は、湖内の水質環境の分布および将来的変化を理解する上で重要であると考えられる。そこで本論文では、2006年11月に得られた観測データに基づき、混合層における水平循環流の特性を考察し取りまとめた。

### 2. 現地観測の概要

#### (1) 小川原湖の諸元と計測器の配置

小川原湖は青森県東部に位置する汽水湖で、湖面積は63.2km<sup>2</sup>、湖水体積は7.1×10<sup>8</sup>m<sup>3</sup>、平均水深は約11m、最大水深は約26mである。図-1に示すようにS字型の平面形状を持ち、主な流入河川は全て南西部に流入し、北東

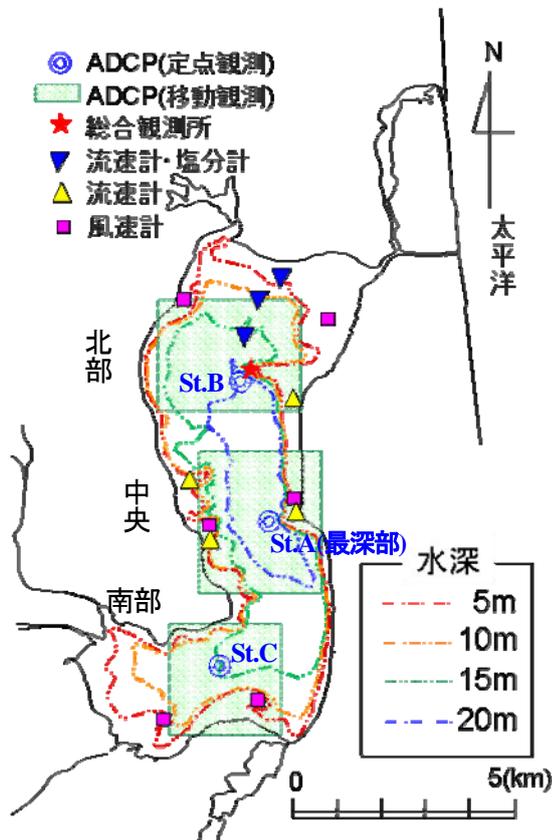


図-1 小川原湖の形状

部において流路延長約6kmの高瀬川により太平洋に接続している。常時の水面標高は0.3~0.4m(TP)で、大潮および高潮時には高瀬川を遡上した塩水が湖内に浸入し、底層密度流となって湖中央部に到達する。淡水流入による湖水の平均回転率は約1年である。また年間の海水進入量は淡水流入量の約1/30と見積もられている<sup>1)</sup>。

小川原湖の特徴の一つは浅く広い湖棚が存在することである。図-1において5mと10mの等深線が密になっているが、これより岸側は水深がほぼ2m以下の平坦地である。したがって、環流を考察する場合の“湖の実質的な輪郭”は湖棚と湖盆の間の急崖線であり、その意味で小川原湖は極めて細長い湖である。なお最深部は南北方向中央の東側急崖線の際にある。

小川原湖内の流動は、①.河川流入に起因する流れ、②.風に起因する流れ、③.海水流入に起因する流れに大別されるが、湖内の物質輸送という観点からすると、②の流れが重要であり、また最も未解明である。そこで2006年11月観測では、以下に述べる計測手法により、風によって生じる水平循環流の特性について検討した。

#### a) 定点観測

図-1の地形特性を考慮し、湖を「北部水域」、「中央水域」、「南部水域」の3つの水域に区分して観測計画を立てた。図-1に◎で示す3地点の湖底に、RD Instrument社製のADCPを設置した。中央水域での設置位置はほぼ最深部にあたる。ADCPの周波数は、北部および中央水域が600kHz、南部水域が1200kHzで、鉛直分解能はともに

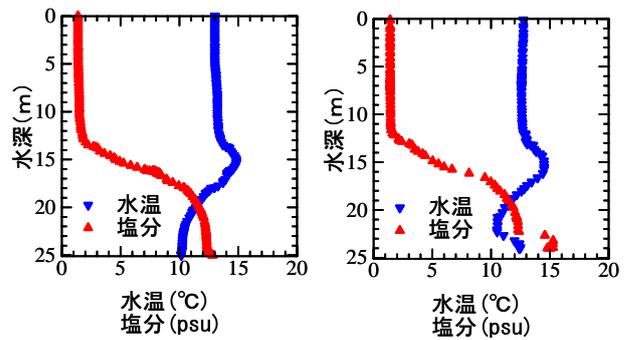


図-2 最深部 (St. A) における成層状況  
(左: 11月7日, 右: 11月9日)

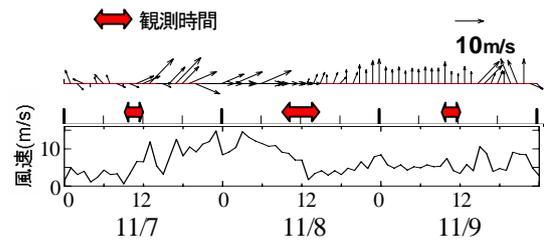


図-3 移動観測時の風向風速

50cmに設定した。観測期間は2006年10月13日~12月13日だが、本論文では、後述する移動観測の行なわれた11月上旬のデータを主に提示する。

また■で示す湖岸付近の浅瀬6地点に風向風速計(コーナシステム社製KADEC21-KAZE-C)を設置した。なお国土交通省が図中の★で示す総合観測所に風向風速計を設置している。本論文では紙面の都合から、風分布に関する考察は割愛し、総合観測所のデータを代表値として提示する。

#### b) 移動観測

2006年11月7、8、9日に、RD Instrument社製のADCPを搭載した3隻の漁船で、図-1にハッチで示す水域の流速分布を走査した。各水域のADCPの諸元は定点観測と同じである。船の位置はGPS(Trimble社製Pathfinder Pro XRS)で記録し、ADCPと連動させて流速の空間分布を求めた。この期間には、湖棚の部分の▲で示す地点の水底から100cmの位置に二次元の電磁流速計(アレック電子社製Compact-EM)を設置し、浅瀬の流動状況も把握した。また▼で示す地点の湖底に同型の二次元電磁流速計と塩分計を設置し、底層密度流の発生状況を監視した。ただし、これらのデータについては別の機会に述べることにする。

#### (2) 観測時の成層状態

11月7日と9日の最深部における成層状況を図-2に示す。水面から水深14mまではほぼ様な状態であることがわかる。水深15m付近で水温が上昇しているが、これは比較的最近進入した海水が湖水で希釈された結果である。この時期は海水温に比べて湖水温が低いので、水温を指

標として海水進入の様子を推測できる。水深20m以下の低温・高塩分の塩水は、前年あるいはそれ以前の冬季に進入した海水である。11月9日には水底直上で塩分が上昇しているが、これは11月7日に大規模に進入した海水が最深部に到達したためであると推察される。

### (3) 観測時の風特性と観測時間帯

移動観測実施時の総合観測所における風向風速記録を図-3に示す。11月7日の午前中は風速が小さく、また風向が不安定であった。低気圧の接近により昼ごろから西風が強まり深夜には15m/sに達した。8日には風速が徐々に減少し、正午過ぎから南風となった。それ以降、9日の昼ごろまで安定した南風が吹いていた。

観測した時間帯を図中に⇔で示している。7日の観測は風の弱い午前中に開始されたが、昼ごろから急に風雨が強まったために中止した。8日には主に西風が卓越している時間帯に観測を行なった。また9日の観測は安定した南風のもとで行なわれた。

## 3. 定点観測の結果

### (1) セイシュによる躍層付近のせん断流

ADCPの記録と総合観測所の風記録を図-4に示す。St.B(北部水域)とSt.A(中央水域)の塩分躍層付近には南北方向に顕著な周期的運動が見られる。北方流と南方流が交互につくる強いせん断層が下層から上層に伝達していることから、西田ら<sup>4)</sup>が報告している強風後のセイシュによる鉛直混合と同じ機構の混合が生じていると考えられる。そこでSt.Aの水深14mの流速変動スペクトル<sup>6)</sup>を求めると図-5のようになり、26時間付近にピークが見られる。この値は、西田らが水温変動から求めた変動周期(21時間)に近く、また彼らが概算した南北方向第一モードの内部セイシュ周期(26時間)と一致する。この運動は、強度は多少変化するものの、中央水域では長期間継続している。一方、St.Bでは躍層の位置が湖底に近いので安定性に欠けるが、かなり頻繁に生じている。そこで、この運動の空間モードを確認するために、St.AとSt.Bの水深14mにおける流速変動波形を比較した(図-6)。両者が同位相で推移していることから、第一モードの内部セイシュの特徴を持っているといえる。なおSt.C(南部水域)は躍層位置より水深が浅いので、この運動は見られない。以上の状況から、西田らが考察している密度躍層付近の混合形態は、小川原湖においてかなり一般的に発生しているものと思われる。

### (2) 躍層上部の比較的安定した流れ

St.A(中央水域)の東西方向流速を見ると、混合層下部で西方流が、上部で東方流が長期間にわたって継続していることがわかる。St.C(南部水域)でも同様の傾向

が見られる。またSt.B(北部水域)では、長期間にわたって北方流が生じている。図に示すように、この間に風向風速はかなり変動している一方で流向が比較的安定していることは、混合層における代表的な環流パターンの存在を窺わせる。またさらに、次のような物質輸送のメカ

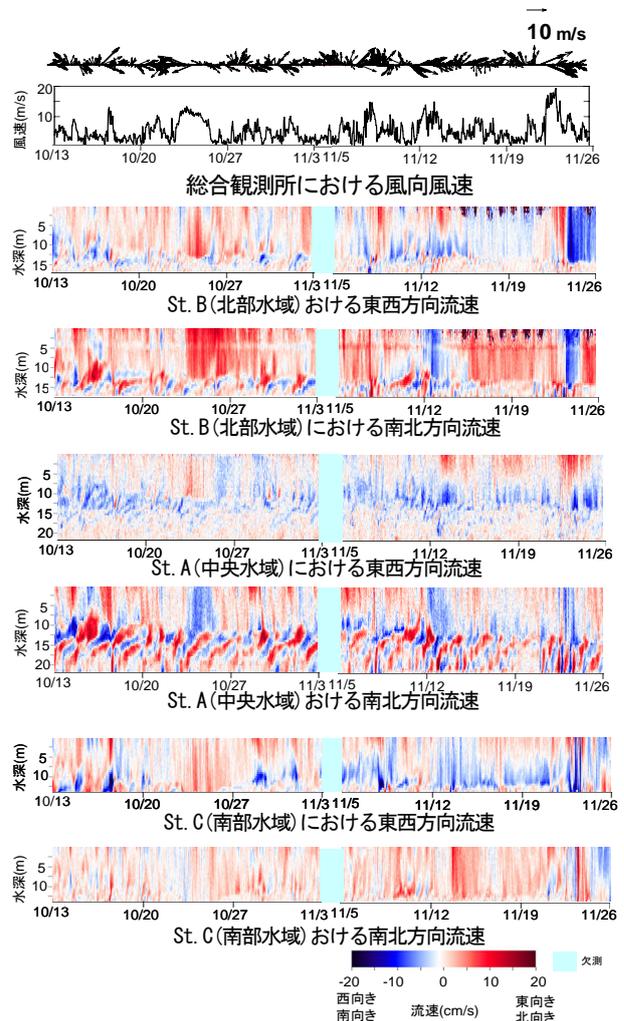


図-4 ADCPの結果と総合観測所の風記録

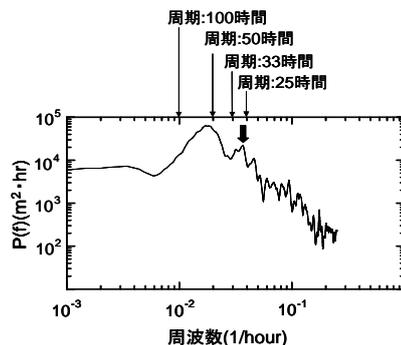


図-5 流速変動のスペクトル

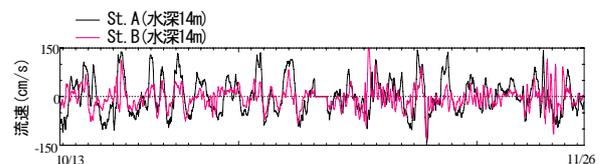


図-6 水深14mにおける南北方向流速

ニズムが想定される：躍層以深の高塩分層は常時嫌気化しており、未分解の有機物や、硫化物や種々の栄養塩が溶解している。内部セイシュに伴う躍層部のせん断によってこれらの物質が混合層に拡散されると、そこでの比較的定常な流れによって輸送され、湖内環境の分布特性を作り出す。ただし、定点観測では計測器設置地点の状況しか分からない。そこで次に移動観測の結果を示し、環流の空間分布を見ることとする。

#### 4. 移動観測の結果

11月7, 8, 9日に移動観測を実施し、図-7に示すような流速ベクトルを得た。この図は、1測線のADCP観測で得られた水平流速を走査断面図に重ねたものである。これ以降、紙面の制約のもとで多数の測線の流速ベクトルから環流特性を議論するために、混合層を3層に区分し、水深[2-6m]、[6-10m]、[10-14m]で平均された流速ベクトル図を示すことにする。なお以下では便宜的に、混合層の「上層」、「中層」、「下層」と言う。

##### (1) 11月7日

観測時の天候は雨で、風は比較的弱く風向も安定していなかった。各水域で同一の断面上を2~3回走査した。そのうちの各1回の結果を図-8(a)-(c)に示す。図中の○

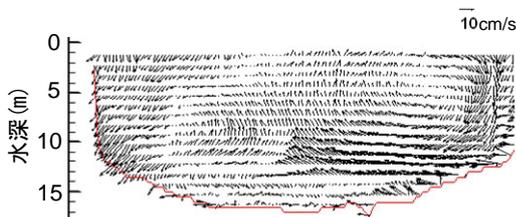


図-7 ADCP移動観測で得られた流速ベクトルの例

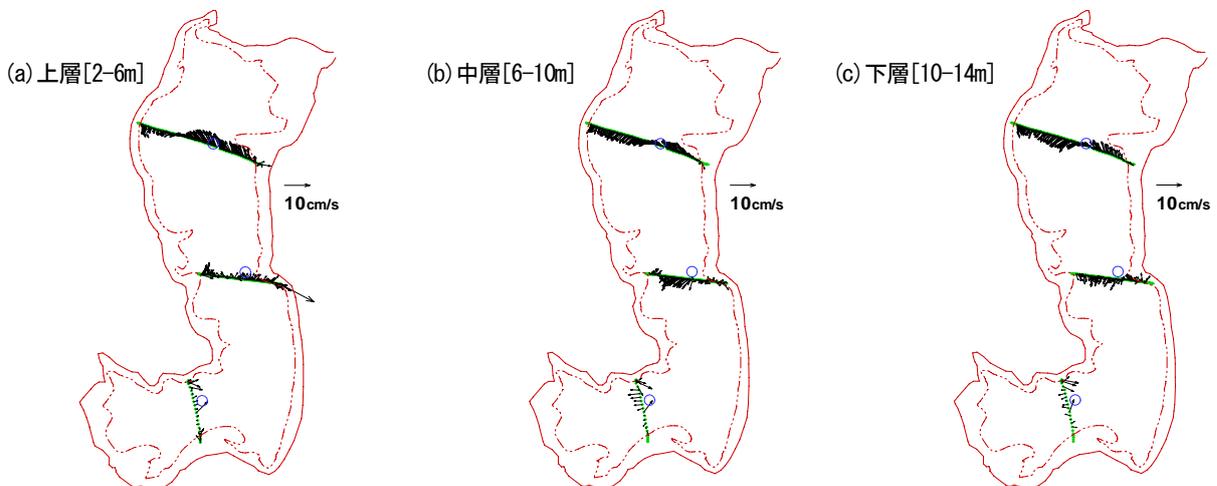


図-8 11月7日の流況

は定点観測のADCP設置位置を、線は移動観測の測線を示し、その上に各深度の流速ベクトルを描いている。また、図中の点線は5mの等深線で、前述した湖棚の縁に概ね対応する。

北部水域では、混合層全層において、東側で北方流、西側で南方流が生じている。中央水域では、上層では流速が小さく流向も不明確だが、中層では西側で南方流が見えており、下層では東側で北方流、西側で南方流となっている。この部分は第一モードの内部セイシュの節にあたるため、南北流速は時間的に変化しやすい。このこと考慮すると、混合層下部では東側で北方寄り、西側で南方寄りだが、東西成分としては西向きで、前述した固定観測結果と一致している。南部水域の流れは明確でない。

##### (2) 11月8日

当日の天候は晴れて、午前中は西の風が強く、午後には風が弱まり南寄りに変わった。ここでは西風時のデータを示す。なお北部水域では、前日と同じ測線で計測した後、さらに北側に測線を設定して計測したので、その結果も合わせて図-9(a)-(c)に示す。

北部水域では、水深によって形がやや変化するものの、2本の測線の西側半分で反時計回りの環流が存在するよう見える。なお東側には点線で示すように湖棚が張り出しているため、2つの測線の流速ベクトルをつなげて解釈できないが、湖棚の北側で閉じた環流が生じているよう見える。また、南水域では、全層にわたって反時計回りの環流が見られる。一方、中央水域では上層と下層で流向がかなり異なっている。しかし横断平均値（上層では北向き、下層では南向き）を差し引いた偏差成分は、三層とも比較的類似している。すなわち、鉛直方向に一樣な水平流と鉛直偏差流が重合しているとも見える。

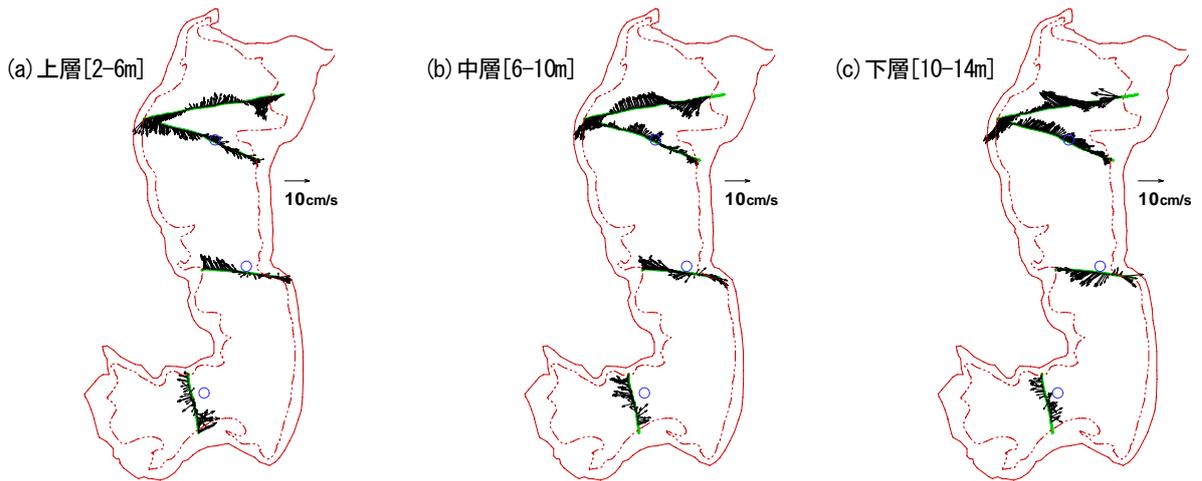


図-9 11月8日の流況

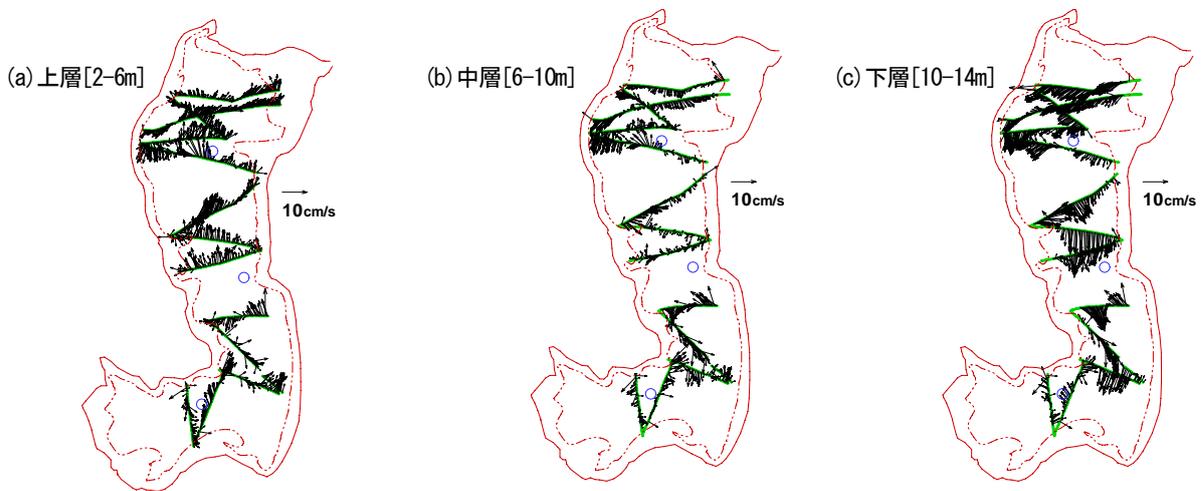


図-10 11月9日の流況

### (3) 11月9日

当日の天候は晴れて、南風が長時間安定して吹いていた。そこで多数の測線を走査し、できるだけ広い範囲で流速ベクトルを得ることとした。その結果を図-10(a)-(c)に示す。全体的特徴として、中央水域において上層は北方成分が大きく、下層は南方成分が大きい。この理由として以下のことが考えられる。図-2からわかるように、混合層内部でも密度がわずかに鉛直分布を持っている。したがって、南風による吹き寄せによって混合層内部に南北方向の偏差流（あるいは鉛直循環流）が生じ得る。そこで図-4の定点観測記録のうち、St.A（中央水域）の南北成分を拡大して、風記録との対応を調べた（図-11）。混合層下部（9-12.5m）の流向は複雑に変化しているが、南寄りの風では南方流が支配的であり、北寄りの風では北方流が支配的である。このことから、風向に対応した鉛直偏差流である可能性が高いと思われる。ただし、その下部にある躍層では、前述のように内部セイシュに関連すると思われる周期的せん断流が生じている。この流れと混合層下部の流れの接する部分では複雑

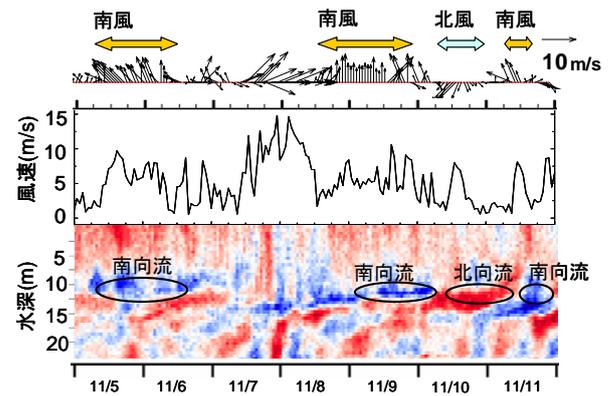


図-11 St. Aの南北成分の拡大図

な状況が生じており、混合層への物質輸送に影響を及ぼしていると考えられるが、この点については今後の課題である。

### (4) 混合層全体の水平循環

上記のように鉛直方向に流速の偏差があるものの、混合層内で物質の鉛直輸送が活発だとすれば、湖内の大局

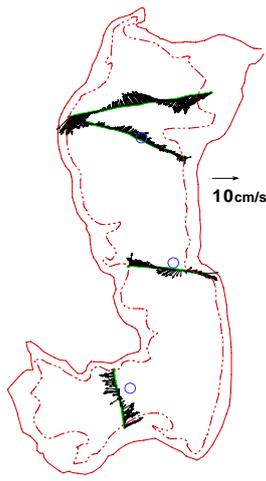


図-12(a) 11月8日の混合層平均

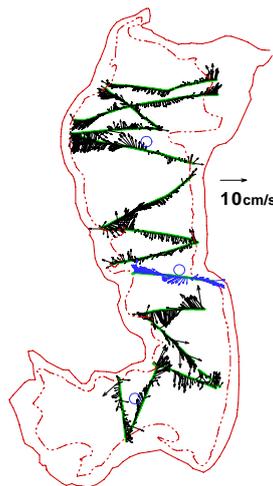


図-12(b) 11月9日の混合層平均

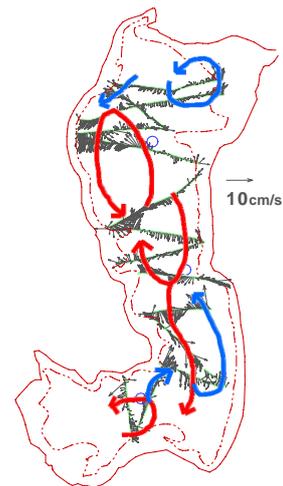


図-12(c) 11月9日の還流

的な物質輸送は、混合層の鉛直平均的な水平循環流に支配されるであろう。そこで、11月8日と9日について、混合層全層の水平流速ベクトルを計算した。その結果を図-12(a)、(b)に示す。なお(b)の中央部の青色のベクトルは、(a)の一部を転写したものである。これらをもとに、11月9日(南風)の環流を描くと図-12(c)となる。ここで赤色は11月8日(西風)の観測結果とも共通していると考えられる部分、青色は共通しないか不明である部分を表している。これから両者の共通部分は比較的多いことがわかる。もちろん他の風向の場合を観測していないので断定はできないが、比較的定常的な環流成分の存在する可能性がある。

## 5. おわりに

本研究では、6台のADCPを用いて、小川原湖の塩分躍層内の運動と混合層における水平環流の特性を現地観測により検討した。以下に観測から得られた主な知見をまとめる。

- (1) 観測時には水深 14m-20m に塩分躍層が存在した。定点観測から、塩分躍層内には強いせん断流がかなり長期間にわたって存在していた。
- (2) この流れは、南方流と北方流が層状に重なって全体的に上方にシフトしており、西田らが強風後の鉛直混合要因として報告している流れと同一のものであると考えられる。
- (3) このせん断運動は周期性が顕著で、観測期間内の代表周期は約 26 時間であった。この値は、西田らが推算している南北方向内部セイシュ第一モードの周期とほぼ一致している。
- (4) 中央水域では、混合層内に南北方向の鉛直偏差流が

存在すると思われる。その流れは混合層下部において風向に逆行することから、風による南北方向の吹き寄せによっているものと推測された。

- (5) 水平循環流は風状態について変化するものの、中央水域と南部水域および北方水域の西側では、西風と南風のもとでパターンに共通性が見られた。このことは、高塩分層から連行された物質の混合層での拡がり水平的に様でない可能性を示すものである。今後は、異なる成層条件および風条件のもとでのデータをさらに集積し、湖内の物質循環に関する知見を深めるとともに、小川原湖の能動的な管理手法の検討につなげていきたいと考えている。

## 参考文献

- 1) 湖沼技術研究会：湖沼管理のための流動機構調査、河川環境管理財団、2003.
- 2) 長尾正之、石川忠晴、長島伸介：小川原湖に発生する傾斜プルームの現地観測と連行係数の推算、土木学会論文集、No.579/II-41、pp.105-114、1997.
- 3) 西田修三、佐野俊幸、中辻啓二：汽水湖における流動構造と物質循環過程、海岸工学論文集、Vol.48、pp.1116-1120、2001.
- 4) 西田修三、佐野俊幸：小川原湖の内部流動と混合現象に関する現地観測、水工学論文集、45、pp.1159-1164、2001.
- 5) 鶴田泰士、石川忠晴、西田修三、成田舞、藤原広和：小川原湖におけるヤマトシジミの繁殖環境について、土木学会論文集、No.705/II-59、pp.175-187、2002.
- 6) 日野幹夫：スペクトル解析、朝倉書店、pp.199-209、1977.

(2007. 9. 30受付)