

# 狭水路で連結された2つの成層水域の風による海水交換について

## Wind-Induced Water Exchange between Stratified Basins Connected by a Narrow Channel

青木伸一<sup>1</sup>・陸 眞姫<sup>2</sup>

Shin-ichi AOKI and Jin-Hee YUK

Water exchange between Inohana and Hamana Lakes with density stratification is investigated based on the field data obtained in 2009. The basins are connected by a narrow channel with length of 200m through which waters, nutrients and other materials are exchanged between them. According to the authors' previous study, the water exchange was mainly caused by the wind, where even eastward wind induces significant exchange of waters. In this study, using the field data measured by ADCP and CTD, a mechanism of wind-induced water exchange is discussed. A simple theoretical approach suggests that the dynamic response of density surface in Hamana Lake to the wind force causes the circulating flow in the channel.

### 1. まえがき

2つの水域が連結されているような内湾においては、両水域間の海水交換およびそれにとりも物質の交換が水質や生産に大きな影響を与えることが考えられる。特に、両水域の規模、水塊構造、水質などの違いが顕著である場合には、その影響は大きいと思われる（上嶋，1982；銭ら，1996；福岡ら，2002）。著者ら（陸ら，2006，2007，2008；Yuk・Aoki，2008，2009）は、これまで、浜名湖の北西部に位置し浜名湖と細い水路でつながっている猪鼻湖（図-1）において、夏期の密度成層形成期を対象に、両水域間の物質交換に着目して研究を行ってきた。外洋からの海水の流入により、浜名湖および猪鼻湖はともに夏期には明確な密度成層が形成されているが、両者を繋ぐ水路が狭く、降雨後の水塊構造や水質には両水域間で相違が見られる。また、水域の規模の違いにより風による混合特性などが異なることが予想される。浜名湖と猪鼻湖をつなぐ狭水路におけるこれまでの流れの観測から、密度成層期には表層と底層の流れおよび水質に明確な違いがあり、ボックスモデルを用いて検討した結果、夏期の密度成層期には浜名湖側から高濃度のリンが猪鼻湖底層に流入し、猪鼻湖での1次生産を支えていることがわかった（陸ら，2008，2010）。また、その海水交換は主として風の影響によるものであることも明らかになっている。

本研究は、詳細な流速観測により、海水交換の実態を明らかにするとともに、風の条件や密度構造との関連から、その物理的なメカニズムを検討したものであり、密度成層形成期の物質輸送が両水域における密度境界面の風による挙動と強く関係していることを明らかにした。

### 2. 現地観測

猪鼻湖と浜名湖をつなぐ水路（瀬戸）は、長さ約200m、幅は100m以下であり、夏期の密度成層期には両水域の密度構造や外力条件により複雑な流れが生じている。著者らは、2005年から2007年までの3年間、夏期の密度成層期にADCPを用いて水路内の流れを観測し、湖水の交換特性について調べたが、1基のADCPでは流量の鉛直分布、特に底層流量の推定が正確に行えなかった。そこで、2009年9/7から10/19までの約40日間、水路北端（水路幅75m、最深部の水深16m）に2基のADCP（Nortek社製Aquadopp, 1MHz）を設置して横断面内の流動を詳細に計測した（1分平均流速，10分間隔，鉛直方向1m間隔）。

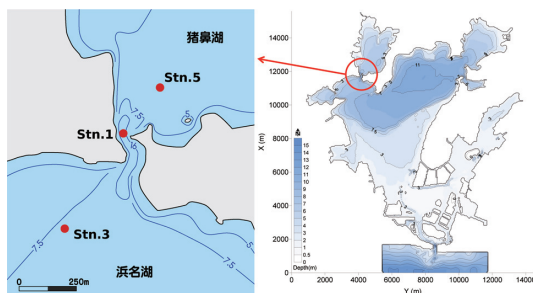


図-1 浜名湖と猪鼻湖を結ぶ水路（左図）（Stn.1はADCPの設置位置，Stn.3，Stn.5はCTD等水質観測地点）

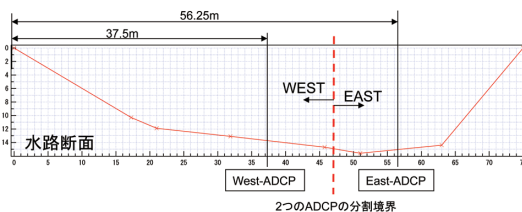


図-2 ADCPの設置状況（水路横断面図）

ADCPの設置位置は、図-1に示すStn.1である。水路断面内の設置状況は図-2に示すとおりである。図中West-ADCPは水路中央部に位置し、著者らの以前の研究（陸ら、2006, 2007, 2008）と同じ位置であるが、East-ADCPは今回新たに、水路最深部近傍に設置したものである。

期間中、約1週間間隔で計7回（9/7, 9/14, 9/20, 9/28, 10/5, 10/10, 10/19）のCTD観測（水温、塩分、クロロフィル-a濃度等）を実施した（JFEアレック社製、Compact-CTDを使用）。また、9/14, 9/28および10/10にはStn.1およびStn.3においてDO計測および採水分析（栄養塩濃度）を実施している。また、風や降雨データについては、猪鼻湖から北西方向約2kmに位置する気象観測点のデータを用いた。

### 3. 観測結果

#### (1) 瀬戸での流れ

図-3に2基のADCPによる流れの観測結果および期間中の降雨および風の状況を示す。図(c)および(d)は、それぞれEastおよびWestのADCPによって観測された南北方向流速（北向きが正）の鉛直分布を時系列としてコンター表示したものである。ただし、観測点付近は潮位差60cm前後の潮汐が存在するため、流速データは25時間移動平均を行って潮流成分を除去した平均流として示してある。

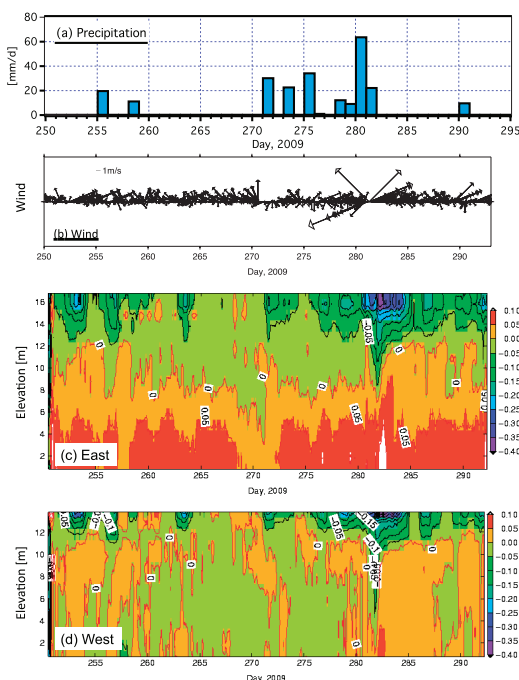


図-3 降雨量、風ベクトル、平均流速の断面分布  
(a) 日降雨量 (mm), (b) 風ベクトル (時間平均風速: m/s), (c) 東側ADCPによる流速 (m/s), (d) 西側ADCPによる流速 (m/s)

図より、水路内の平均流は、表層から3m-4mを境として向きが表層と中底層で大きく異なっており、ほぼ観測期間を通して表層では猪鼻湖から浜名湖へ流出する流れが、中底層では浜名湖から猪鼻湖へ流入する流れが卓越していることがわかる。ただし、2基のADCPのデータを比較すると、平均的に見て上述の傾向は共通しているものの、東側（最深部付近）のADCPの観測データでは底層からの流入流速が大きくなっており、表層流出に対応して生じる底層流入が明確に捉えられている。なお、図中の280日以降の強い流れ（表層流出、底層流入）は台風0918号による強風と淡水流入によるものである。ただし、観測開始前1ヶ月間程度はほとんど降雨がなく、観測期間初期の比較強い流れについては淡水流入の影響は小さいと考えられる。

図-4は、水路の断面変化および2基のADCPのカバーする範囲（図-2参照）を考慮して算定した観測期間中の平均流量の鉛直分布を示したものである。図には、東側および西側のADCPごとの流量も表示してあるが、底層流入は今回新たに設置した東側のADCPによりはじめて明確に捉えることができた。この図より、表層での猪鼻湖からの流出（ $10.45\text{ m}^3/\text{s}$ ）および底層での流入（ $5.59\text{ m}^3/\text{s}$ ）が定量的に明らかになった。なお、流入出の差（ $4.85\text{ m}^3/\text{s}$ ）は、期間中の降雨量と流域面積から推定した淡水負荷量（ $4.74\text{ m}^3/\text{s}$ ）にほぼ一致していた。

以上のような密度成層下で生じるいわゆるエスチュアリー循環は、陸域からの淡水流入および風の影響によって生じるが、著者ら（陸ら、2007; Yuk・Aoki, 2008, 2009）の検討によれば、風の影響が支配的であることがわかっている。特に、2009年は夏期に降雨が少なかったため、風の影響が顕著であった。図-5は、風向および風速（日平均風速）とともに、ADCPから求めた期間中の表層（0m-4m）と底層（-4m以深）の日平均流量および両者の差として与えられるnetの流量を示している。風向については、6時間ごとの風向を16方位（4=E, 8=S,

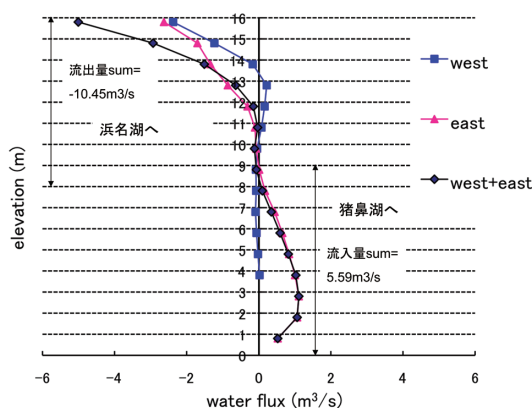


図-4 平均流量の鉛直分布

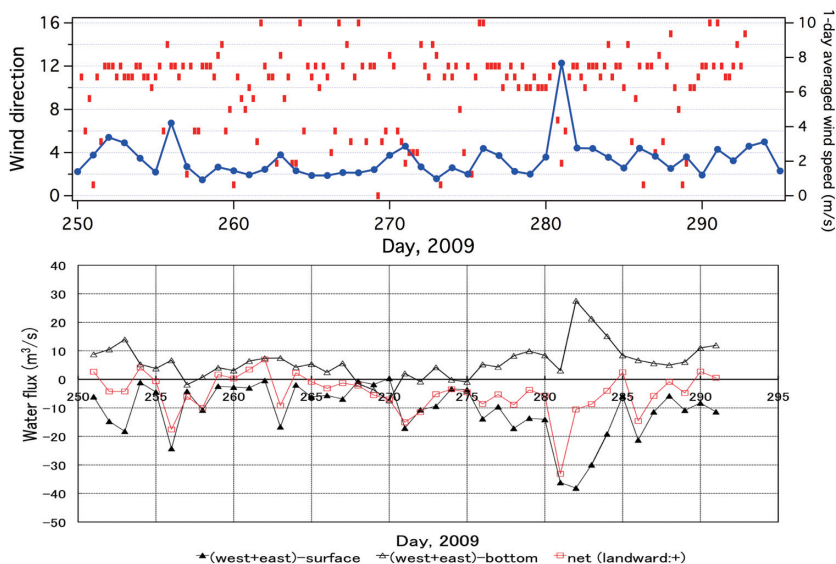


図-5 気象条件と流量の時系列の比較

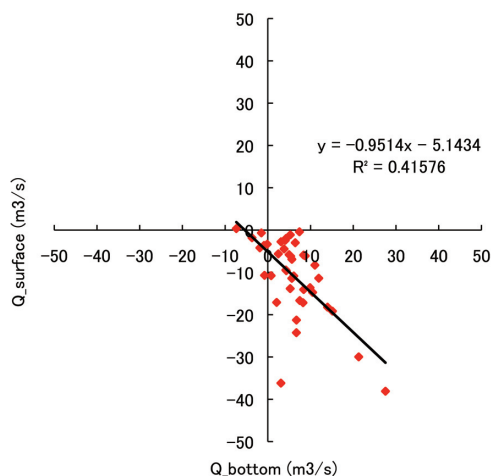


図-6 表層流量と底層流量の相関 (日平均)

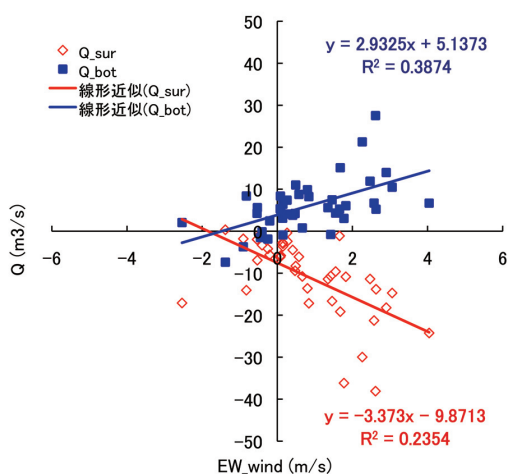


図-7 東西方向の日平均風速と表層・底層流量との相関

12=W, 16=N) でプロットしている。図より、観測期間中は概ね西風(東向き)の風が卓越しており、風速の大きな時期に流量が大きくなっていることがわかる。ただし、270日前後の東風が卓越している時期には、底層流量も流出(負値)を示していること、net流量は降雨量とほぼ対応して変化していることなどがわかる。特に281日の台風来襲時には、降雨のあと強風が吹いたために非常に大きな流れが発生している。

## (2) 風と流量の関係

図-6は、図-5のデータをもとに、表層流量と底層流量の関係を見たものである。観測期間を通して、両者には負の相関があり、表層流出と底層流入は対になって生じていることが確認できる。図-7は、風速の東西方向成分

(日平均、東向きが正)と表層流量および底層流量の関係を示したものである。これより、両者の流量は風速の東西方向成分と良く対応しており、東向きの風(西風)の風速が大きくなると表層での流出量、底層での流入量が增大していることがわかる。なお、2009年の観測では南北方向風速が頻度、風速ともに小さく明確な相関が得られなかったが、前述の著者らの研究では、北風によって表層流出と底層流入が促進されることがわかっている。

## 4. 湖水交換のメカニズム

### (1) 密度成層場での風による密度境界面の変化

以上、現地観測データの解析により、浜名湖と猪鼻湖の間には、密度成層期に風の作用に対応した湖水交換が

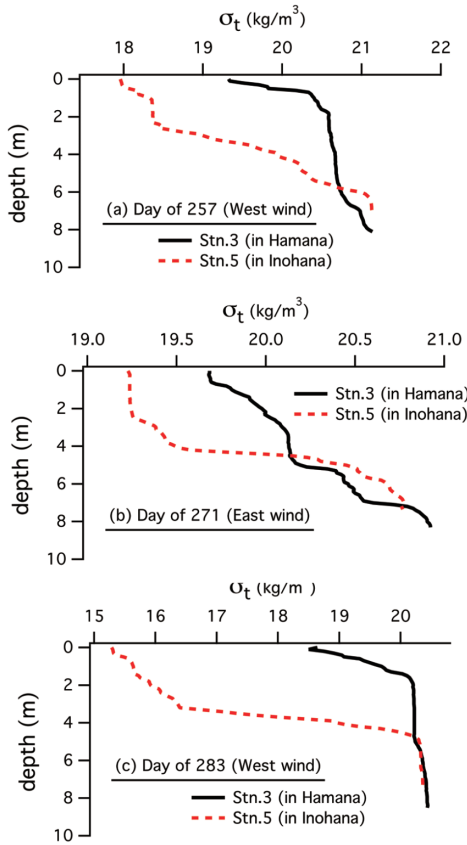


図-8 風の作用前後での密度界面の状況

顕著に生じていることがわかった。特に興味深いのは、湖水交換を生じさせる南北方向の流れ（エスチュアリー循環）が西風によって誘発されている点である。以下では、この発生原因について考える。

図-8は、期間中に実施したCTD観測で得られた水温と塩分から求められる湖水密度（ $\sigma_t$ ）の鉛直分布を、浜名湖内の観測点（Stn.3）と猪鼻湖内の観測点（Stn.5）で比較して示したものである。（a）図は257日のデータであり、比較的西風が強い時期に、（b）図は271日のもので、東風が卓越している時期にそれぞれ対応している。また、（c）図は台風直後にあたる283日のデータであり、台風通過後西風が強く吹いた期間の終わり頃に対応している。これらの図より、猪鼻湖内の観測点（Stn.5）では、表層の密度の値は変動が大きいものの、密度の鉛直分布の形は比較的似ており、風の条件に関わらず4m程度の位置に密度躍層が安定的に存在していることがわかる。これに対して、浜名湖側の観測点（Stn.3）では、密度の分布形状の変化が大きく、西風吹送時には躍層が高い位置に存在していることがわかる。

図-8に示した観測日当日の流量を図-5で確認すると、（a）、（b）についてはあまり明確に現れていない。しかし

ながら、（a）図に対応する257日は、観測日の数日前から強い西風により表層流出、底層流入が顕著に見られる。一方（b）図に対応する271日については、観測日前後は東風が吹いており、その時期には底層でも流出が見られる。また、（c）図の283日については強い流れが見られるが、西風の影響だけでなく、台風来襲前の降雨の影響も含まれると思われる。この台風は、280日には非常に強い東風が吹いたが、この日の流量を見ると底層でも流出となっており、風向きの急変によって流量も急変していることがわかる。

以上の検討から、浜名湖側の密度境界面の変化と風とは何らかの関係があり、またこれが湖水交換の特性と関連しているように思える。以下では、簡単なモデル化を行って、湖水流動のメカニズムについて考察する。

## （2）湖水流動のメカニズム

猪鼻湖と浜名湖を図-9のようにモデル化して考える。ここに、Aは浜名湖、Bは猪鼻湖に対応している。なお、西風の影響を単純化するために、南北方向については一様な水域としている。両水域の水深は同一とし、密度場は図中に示すように、表層密度 $\rho_1$ （層厚 $h_1$ ）、底層密度 $\rho_2$ （層厚 $h_2$ ）の2層構造とする。

いま、西風が吹く場合を考えると、せん断力の作用により水表面および密度境界面は図のように変化し、両者の勾配の関係式として次式が得られる（宇野木，1993）。

$$\frac{\partial D}{\partial x} = \frac{1}{\varepsilon_1} \frac{\partial \eta}{\partial x} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $D$ は静水面から密度境界面までの距離、 $\eta$ は水面変位、 $\varepsilon_1 = (\rho_2 - \rho_1) / \rho_1$ である。宇野木は表層の運動方程式を解いて $\eta$ 、 $D$ を求める方法を示しているが、多少煩雑となるので、仮に静的な釣り合いから求められるとして、 $\partial \eta / \partial x = I = \tau_s / \rho_1 g h_1$ （ $\tau_s$ は表面せん断力）と置き、 $\eta$ 、 $D$ を求めると、以下のようになる。

$$\eta = I \left( x - \frac{l}{2} \right) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$D = \frac{I}{\varepsilon_1} \left( x - \frac{l}{2} \right) + h_1 \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 $l$ は水域の東西方向の長さであり、図-9の $l_A$ 、 $l_B$ に対応している。なお、厳密解では、風上側でこの解よりも急勾配に、風下側で緩勾配になることがわかっていいる。上式をもとに、浜名湖および猪鼻湖の西端（ $x=0$ の地点）での圧力分布を求め、両者の差（ $p_A - p_B$ ）を計算すると、水底での圧力差として次式を得る。

$$p_A - p_B = \frac{\rho_1 g l}{2 \varepsilon_1} (l_A - l_B) \quad \dots\dots\dots (4)$$

これより、西風が吹く場合（ $I > 0$ ）には、水域の大きな浜名湖側の底層の圧力が猪鼻湖側の底層の圧力より大きくなり、これが猪鼻湖側への流動を誘起する可能性が



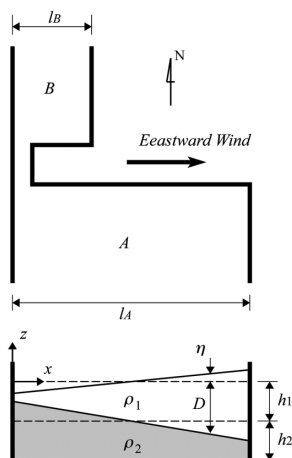


図-9 理論の説明図

あることがわかる。一方、東風が吹く場合 ( $l > 0$ ) には、逆に底層流出の方向に圧力が作用することになる。

以上より、猪鼻湖と浜名湖の東西方向の風による湖水交換は、両水域のスケールの違いから生じる密度境界面の変動量の違いに起因する圧力差によることが推察された。ただし、風的作用による鉛直混合によって密度成層が弱まるため、このメカニズムは継続的なものではないことに注意する必要がある。

#### 4. あとがき

本研究では、夏期の密度成層期に生じる猪鼻湖と浜名湖の間の湖水交換特性について、現地データをもとに考察した。得られた知見をまとめると以下の通りである。

- (1) 密度成層形成期においては、表層で猪鼻湖から流出、底層で猪鼻湖に流入する平均流（いわゆるエスチュアリー循環）が恒常的に存在しており、これによって湖水交換が行われている。

- (2) 上記の流れは風的作用によって引き起こされている場合が多いが、特に東西方向の風との相関が高かった。東西方向の風によって循環流が生じるメカニズムを検討した結果、風による密度境界面の変動に伴って生じる両水域間の水圧差に起因して生じていることが推察された。

謝辞：本研究で利用した気象データは三ヶ日農協に提供いただいたものである。ここに記して謝意を表する。

#### 参考文献

- 上嶋英機 (1982) : 台風通過に伴う物質輸送の変化, 第29回海岸工学講演会論文集, pp.549-598.
- 宇野木早苗 (1993) : 沿岸の海洋物理学, 東海大学出版会, pp.436-450.
- 銭 新・西部隆宏・石川忠晴 (1996) : 霞ヶ浦高浜入りににおける日成層形成時の湾水交換量の推定, 海岸工学論文集, 第43巻, pp.1216-1220.
- 福岡捷二・三浦 心・黒川岳司・松下智美・船橋昇治 (2002) : 強固な密度成層を有する水域における下層内の流動と水質変化, 海岸工学論文集, 第49巻, pp.356-360.
- 陸 真姫・青木伸一・大谷 聡 (2006) : 閉鎖性内湾における夏期密度成層形成時の海水交換と鉛直混合に関する研究, 海岸工学論文集, 第53巻, pp.981-985.
- 陸 真姫・青木伸一・大谷 聡・奥村和皓 (2007) : 狭水路で連結された湖における密度成層下の湖水流動と物質交換特性について, 海岸工学論文集, 第54巻, pp.981-985.
- 陸 真姫・青木伸一・奥村和皓・中尾知史 (2008) : 猪鼻湖における夏期密度成層形成期のリンの輸送過程に関する研究, 海岸工学論文集, 第55巻, pp.1046-1050.
- 陸 真姫・青木伸一 (2010) : 猪鼻湖における水質と栄養塩動態の季節変化に関する研究, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol.66, No.1, pp.976-980.
- Yuk, J.-H. and Aoki, S. (2008) : A study on process of water exchange in Inohana Lake, Coastal Engineering Journal, Vol.50 (1), pp. 1-18.
- Yuk, J.-H. and Aoki, S. (2009) : Effect of Wind and Rainfall on Water Exchange in a Stratified Estuary, Estuaries and Coasts, Volume 32, Issue1, pp. 88-99.