二次循環流を伴う吹送流の三次元構造と 湖沼の水温構造に関する現地観測

Field observation of three-dimensional structure of wind-driven currents
accompanied with secondary circulations and thermal structure of the lake.

鵜崎 賢一¹・荒木 陽介²・堀口 真弥³・天笠 達也⁴・戸屋 裕亮⁵
・山田 航⁶

Ken-ichi UZAKI¹, Yosuke ARAKI², Shinya HORIGUCHI³, Tatsuya AMAGASA⁴
Yusuke TOYA⁵ and Wataru YAMADA⁶

¹ 正会員 博(工) 群馬大学准教授 大学院工学研究科 (〒376-8515 群馬県桐生市天神町1-5-1)

^{2,3} 非会員 群馬大学大学院工学研究科 (〒376-8515 群馬県桐生市天神町1-5-1)

^{4,5,6} 非会員 群馬大学工学部 (〒376-8515 群馬県桐生市天神町1-5-1)

Wind-driven currents are very important on the material transport and the gas or thermal exchange through the water surface of lakes and oceans. Secondary circulations in wind-driven currents, which are called 'Langmuir circulations', may play an important role on such processes. However, they have not been well confirmed yet. In this study, field observations by using the horizontal and the vertical ADCP and the thermistor chain were conducted. Horizontally-periodic profiles of horizontal velocity and vertical velocity were obtained under the strong wind condition. Spacings from the results of velocity observations were well agreed with the empirical curve proposed by Faller and Caponi⁶. Vertical profiles of water temperature were varied from the stratified condition to the vertically-uniform condition. Under no wind condition, such variation may be caused by the thermal advection. On the other hand, under the strong wind condition, such variation may be caused by the water mixing due to Langmuir circulations from the results of velocity observations.

Key Words : wind-driven currents, Langmuir circulations, H-ADCP, thermistor chain, thermal profile

1. はじめに

風によって駆動される吹送流は、内湾や湖沼での物質輸送において非常に重要な役割を果たしている。内湾においては河川から供給される淡水や座礁したタンカーからの流出油の挙動予測において、潮流とともに非常に重要な因子であり、湖沼においては流動の支配的な因子と言っても過言ではない。内湾や湖沼の流動予測をする際には、風速と抵抗係数から水表面の風応力を算定し、それを境界条件として吹送流を計算する。従って、風速が空間的に一様であれば吹送流も水平方向に一様となる。吹送流は、鉛直方向には対数分布となることが知られており、水表面に風応力を与えて計算すると、通常対数分布が得られることがわかっている。しかしながら、吹送流中には風向きに軸をもつ二次循環流が形成されること

がある。この二次循環流は「ラングミュア循環流」と呼ばれ、古くから数多くの研究がなされている。図-1にラングミュア循環流を伴う吹送流の模式図を示す。この循環流が形成されると、水表面に収束流が生じる場所で気泡や海草等のストリークが形成されることがある。この循環流の最大鉛直流速は表層の吹送流速の1/3程度と言われており、二次循環流とはいえ比較的強い縦渦であると言える。そのため、この循環流が形成されるとその運動量輸送によって吹送流の水平流速分布は高速域と低速域が交互に並ぶ空間的に周期的な流速分布となることが示唆されている。Weller and Price¹⁾は、R.P.Flipと呼ばれる大型の観測システムを用いて、この循環流を伴う吹送流の現地観測を外洋で行った。そして、表層流速の高速域でストリークが形成され、その直下で強い下降流が生じる一方で、低速域では緩やかな上昇流となっている流速パターンが水平方向に周期的に繰り返されている様子

を捉えている。しかしながら、物質輸送や水塊混合の影響が問題となる内湾や湖沼において、より簡便な手法でより多くの観測結果を示すことが、水質予測においてこの循環流の重要性を認識し、予測計算において考慮する必要性の裏付けとなる。Leibovich, S and Paolucci, S.²⁾は、この循環流の発達を計算した上で、初期条件として与えられた水温の線形成層が循環流の水塊混合によって一様化する様子を示した。このことはWeller and Price¹⁾の観測でも示唆されているが、観測結果はさほど明瞭ではない。湖沼において水温の鉛直分布が吹送流によって一様化することは古くから示唆されているが、それがラングミュア循環流によるものであることは認識されていない。Weller and Price¹⁾やLeibovich, S and Paolucci, S.²⁾の示唆が湖沼でも生じていることを確認できれば、湖沼の流動予測においてラングミュア循環流を考慮することが、流れ場のみならず温度場においても重要であるということになり、湖沼の水質予測の高精度化につながっていくと考えられる。そこで本研究では、水平型と鉛直型のADCPを用いた流速観測とサーミスター・チェーンを用いた水温観測によって、この循環流の形成を捉えるとともに、それが水温構造に及ぼす影響について検討を行った。

図-1 ラングミュア循環流の概念図

2. 観測概要

現地観測は、群馬・栃木・茨城・埼玉県境にある渡良瀬遊水地で行った。渡良瀬遊水地は渡良瀬川と利根川の合流点のやや上流側に位置する人工の洪水調整池である。半径2km程度のハート形をしており、夏期の水深が3m、秋の最深時で6m程度の水深となる。冬期には北東風と北西からの赤城おろしが吹く。図-2に、渡良瀬遊水地の地図を示す。平野部の多くの湖沼に共通するように、渡良瀬遊水地も富栄養化が問題となっている。利根川合流点より下流部では上水取水がされており、かねてカビ臭が問題となったことから、その原因となる植物プランクトンを死滅させるために、冬期には短期間ではあるが遊水地の水を全て抜く干し上げを行っている。それ以外にも、浮草やヨシ原循環などの植生浄化法による水質対策を行っているが、環境省の公表データ³⁾によればT-Nや

SS濃度が経年的に増加傾向にある。従って、新たな水質対策やそれを評価できる水質シミュレーションが必要である。天野ら^{4),5)}は渡良瀬遊水地の底泥巻き上げを対象とした現地観測と数値シミュレーションを行っているが、吹送流の計算においてラングミュア循環流を考慮したものにはなっておらず、マクロな流れ場の再現性はある程度あるように見えるが、循環流による三次元的な水塊混合の影響評価が正確でないことが、詳細な流れ場の再現性やそれに伴う水質予測の精度の悪さにつながっていると考えられる。

現地観測は、2010、11年の秋に水平型のADCP（H-ADCP：RD Instruments社製WHH-600）を南ブロックの排水塔に、北西方向に向けて設置し、南西方向の吹送流の水平分布を約1か月間計測した。設置水深はいずれも約60cmとした。H-ADCPの設置位置と測線を図-3に示す。図中の黒い矢印が測線を示す。計測方法は、毎正時後30分間において4秒間隔で3pingの平均を取得した。また、2011年の秋には鉛直型ADCPを船に設置し、風の吹送方向を横断する測線で流速の三成分の鉛直分布を計測した。また、水温計を鉛直方向に10個並べてサーミスター・チェーンを作成し、ブイとアンカーでH-ADCPの測線の端部に1か月間設置した。図-4にサーミスター・チェー

図-2 渡良瀬遊水地の概要とH-ADCPの設置位置（排水塔）

図-3 H-ADCPの設置位置と測線の方向

図-4 サーマスター・チェーンの概要

図-5 サーマスター・チェーンの設置位置

ンの概要を、図-5にその設置位置を示す。

3. 観測結果と考察

(1) 流速観測の結果

図-6に、渡良瀬遊水地で撮影された、強風時の水表面における気泡のストリークを示す。写真奥が北西方向であり、ややわかりにくい水平方向に何本かのストリークが並んで形成されていることがわかる。図-7に、北東風によるストリークを示す。このストリークは図-6と異なり、水表面の粗滑によって可視化されている。これらのストリークの形成は、強風時にラングミュア循環流が形成されていることを示唆するものである。図-8に、H-ADCPによって得られた南西方向の流速成分の水平分布を示す。横軸が排水塔からの水平距離を示し、縦軸は流速値を示す。赤線は移動平均値を示す。図から、水平方

向に高速域と低速域が交互に並ぶ空間的に周期的な流速分布が認められる。図-9に、瞬時値の流速プロファイルの時間変化を示す。この図から、こうした周期的プロファイルが継続的に出現していることがわかる。図-10に、水平流速分布から算出した高速域の間隔（スペーシング）を、Faller and Caponi⁶⁾によるスペーシング λ_s と風波の波長 λ_w の関係と比較したものを示す。図中の○印は写真から読み取ったもの、+印は直接計測にもとづいたものであり、いずれも実験データである。また、Figure14 and 15はFaller and Caponi⁶⁾の論文中的図番号である。本研究の解析結果は、水平流速分布の高速域の間隔を読み取ったものであり、図-10のデータは基本的にはストリークの間隔であるが、いずれも1対のラングミュア循環流の空間スケールを示すものとして比較した。図から、本研究の観測結果はFaller and Woodcock (1964)の観測結果に比較的近く、Faller and Caponi⁶⁾が提案している経験式にやや近い値となっている。本研究では、風波波長の評価にNeumann and Pierson⁷⁾の式を用いているが、これは海洋における経験式であり、湖沼では風波の発達を考えても実際はより波長が短いと考えられるため、本研究結果は λ_w がやや過大評価となっていることが経験式との差異となっているものと考えられる。従って、本研究によって得られた周期的な水平流速分布は、ラングミュア循環流によるものであることが、この図からも推察できる。図-9の水平流速分布をもとに、鉛直方向に式(1)、(2)で示されるようなShemdin⁸⁾による対数分布則を適用して表層流速分布を推定した。対数分布に用いられる摩擦速度の値は、式(3)から風速値と水面の抵抗係数値から求めた。水面の抵抗係数については図-11のように諸式が提案されているが、本研究では本多・光易の式⁹⁾を用いた。相当粗度については加藤¹⁰⁾の値を用い、得られた表層流速分布を図-12に示す。図中の赤線は、通常考えられているような、 $Wu^{11)}$ の実験結果による風速の3.5%の表層流速値で水平方向に一樣な流速分布を示す。図から、従来予測値は高速値と低速値のほぼ中間を通り、従来予測が平均的には良好な推測となっていることがわかる。しかしながら、高速値は従来予測値の約2倍程度の値を示しており、このことは、湖沼表層の物質輸送において、その到達時間の見積りにおいてはラングミュア循環流を考慮した周期的流速分布を用いる必要があること示している。図-13に、観測船に設置した鉛直型ADCPを用いて得られた水平流速と鉛直流速の水平分布を示す。図から、水平流速分布は図-9に示すような空間的に周期的な流速分布となる一方で、鉛直流速は、水平流速の高速域で下降流、低速域で上昇流となる周期的構造となっていることがわかる。図-14にそれらの相関関係を散布図で示す。線形の近似曲線は右下がりとなり、水平流速が小さい場合には鉛直流速が正值となり、水平流速の増大に伴って鉛直流速が負値となる負の相関があることがわかる。これらことは、図-1

図-6 渡良瀬遊水地での水表面におけるストリーク（北西風）

図-7 渡良瀬遊水地での水表面におけるストリーク（北東風）

図-8 南西方向成分流速の水平分布（2010年12月22日 05:03）

で示したような周期的な縦渦構造が存在していることを示唆するものである。

$$u(z) = u_s - \frac{u_{*w}}{\kappa} \ln \frac{z}{z_0} \quad (1)$$

ここに、 $z=60\text{cm}$. として、

図-9 水平流速分布の時間変化（12月22日）

図-10 ラングミュア循環流のスペーシングと風波の波長の関係

$$u_s = U(60) + \frac{u_{*w}}{\kappa} \ln \frac{60}{z_0} \quad (2)$$

$$u_{*w} = U_{10} \sqrt{\frac{\rho_a}{\rho_w} C_D} \quad (3)$$

ここに、 $C_D=2.60 \times 10^{-4} U_{10}^{0.654}$ （本多・光易⁶⁾）

図-11 抵抗係数 C_D と U_{10} の関係

図-14 水平流速成分と鉛直流速成分の散布図 (2011年11月24日)

図-12 表層流速分布の推定 (2010年12月22日05:03)

図-13 水平流速成分と鉛直流速成分の水平分布 (2011年11月24日)

$z_0=0.01 \text{ cm}$ (加藤⁷⁾)

$\kappa=0.41$, $\rho_a=1.225 \text{ kg/m}^3$, $\rho_w=1040 \text{ kg/m}^3$

(2) 水温観測の結果

図-15に、各層の水温の時間変化を示す。横軸は2011年の10月1日～16日の観測期間を示し、縦軸は水温を示す。紫線が水深30cm、以降30cm毎の水深の水温を示し、赤線が水深3mの底部での水温を示す。また、赤線は最

大瞬間風速、青線は平均風速を示す。図から、日中に日射によって表層水温が上昇する一方で、底層水温はさほど変化せず、結果として3～4℃程度の水温差が生じるものの、夕方になると表層水温が低下して底層水温と一致し、水温分布は鉛直方向に一樣化する日周期変動が周期的に認められる。また黒矢印で示すように、10月7日のように風速が大きい日には、日中やや水温上昇が認められるが、基本的には鉛直方向に一樣に水温が変化していることがわかる。また赤矢印で示すように、夕方表層水温が低下する一方で底層の水温が上昇し、鉛直分布としては一樣化する現象が認められる。これは、風速が強い場合と弱い場合両方で生じている。後者は、大気の水温が低下することで表層水塊の水温が底層水塊のものより低下して熱対流が生じたことによるものと考えられる。このことは、地元の釣り師の人々の間ではよく知られた現象である。前者は、図-8, 9に示すような強風時の水平流速分布を鑑みると、ラングミュア循環流の水塊混合による鉛直一樣化であると推察される。このことをもう少し詳しく検討するために、強風時の水温の鉛直分布の時間変化を、図-16に示す。図から、14:00から18:00にかけて、初期の表層近傍の線形成層がやがて一樣化していく様子が認められる。10月初旬のデータではあるが、一樣化によって表層水温は1℃強低下する。しかしながら大気冷却の影響もあるので、今後一樣化による影響評価を厳密に行う必要がある。こうしたデータから、水温躍層位置までの鉛直勾配の平均値を求め、各時間の風速値に対してプロットしたものが図-17である。図において、横軸は最大瞬間風速を、縦軸は水温分布の鉛直勾配を示す。時間変化をプロットしているので、図の上から下に向けて一樣化していく傾向が認められる。また図から、鉛直勾配の風速依存性は2種類にわかれることがわかる。低風速時の左側のグループは熱対流による一樣化と考えられるが、高風速時、とくに風速の増加に伴う一樣化を示す右側のグループは、風速の増加とともに斜め

図-15 各層の水温の時間変化 (2011年10月1日～10月16日)

図-16 水温の鉛直分布の時間変化 (10月8日)

図-17 水温の鉛直勾配の風速依存性

右下にプロットが移動して鉛直勾配が低下していくことから、流速分布の観測結果を参考にして、ラングミュア循環流の水塊混合による鉛直一様化であると推察される。

今後は、水温観測と流速観測を同期間に行い、強風と周期的流速分布と水温の一様化が同時におこることを示し、水温の一様化がラングミュア循環流による確証を得ることと、それが渡良瀬遊水地において通年でどれくらい生起し、流動や水質にどの程度の影響があるかを明らかにする必要がある。

4. 結論

渡良瀬遊水地において、鉛直型と水平型のADCP、ならびに水温計を使ったサーミスター・チェーンを用いて流速観測ならびに水温観測を行った。主な結論は以下の通りである。① 強風時には、水表面において風向きに何本ものストリークが観測された。これは、水面下のラングミュア循環流の形成を示唆するものである。② H-ADCPを用いた流速観測の結果、強風時には、吹送流の水平流速分布は高速域と低速域が交互に出現する空間的に周期的な流速分布となる。また、鉛直型ADCPを用いた曳航観測の結果、吹送流の高速域では下降流、低速域では上昇流となる傾向があり、水平流速成分と鉛直流速成分は負の相関があることがわかった。③ 水温の鉛直分布は日中の日射によって表層水温が上昇するが、底層水温は変化しないために、日周期で成層化している。④ 風の強い場合は一様化している。⑤ 夕方、表層水温が低下する一方で中層以下の水温が上昇することがしばしば見受けられるが、これは低風速時と高風速時の両方で見られる。前者は熱対流によるもの、後者は流速観測の結果を鑑みてラングミュア循環流の水塊混合によるものと推察される。

参考文献

- 1) Weller, R.A. and Price, F.P. : Langmuir circulation within the oceanic mixed layer, *Deep-sea Research*, Vol.35, No.5, pp.711-747, 1988.
- 2) Leibovich, S. and Paolucchi, S. : The Langmuir circulation instability as a mixing mechanism in the upper ocean, *J. Phys. Oceanogr.*, 10, pp. 186-207, 1980.
- 3) 環境省公表データ：渡良瀬遊水地（谷中湖）の水質予測結果について、www.env.go.jp/council/09water/y092-16/mat03-1.pdf.
- 4) 天野邦彦, 安田佳哉, 鈴木宏幸 : 浅い貯水池における表層底泥の巻き上げによる水質変化のモデリング, 土木学会水工学論文集, 第46巻, pp.1085 - 1090, 2002.
- 5) 天野邦彦, 李健華, 鈴木宏幸, 野本岳志 : 渡良瀬貯水池における初夏の栄養塩回帰についての現地観測と解析, 土木学会水工学論文集, 第47巻, pp.1249 - 1254, 2003.
- 6) Faller, A. J. and E. A. Caponi : Laboratory Studies of Wind-Driven Langmuir Circulations, *J. Geophys. Res.*, Vol. 83 No.C7, pp. 3617-3633, 1978.
- 7) Shemdin, O.H. : Wind-generated current and phase speed of wind waves., *J. Phys. Oceanogr.*, 2, pp.411-419, 1972.
- 8) 本多忠夫, 光易恒 : 水面に及ぼす風の作用に関する実験的研究, 第27回海岸工学講演会論文集, pp.90-93, 1980.
- 9) 加藤始 : 対数分布の吹送流に対する波速の計算, 土木学会論文報告集, 第239号, pp.37-46, 1975.
- 10) Wu, J. : Wind-induced drift currents., *J. Fluid Mech.*, 68, pp. 49-70, 1975.

(2012. 9. 30受付)