二次循環流を伴う吹送流の水平流速分布に関する現地観測

Field Observation on the Horizontal Velocity Profile of Wind-driven Currents with Secondary Circulations

鵜﨑賢一1

Ken-ichi UZAKI

Field observation on the horizontal velocity profile of wind-driven currents with secondary circulations was conducted in the lake of Shinji by using the web camera and the horizontal ADCP, H-ADCP, in order to propose the convenient method of Langmuir observation and to investigate the horizontal profile of wind-driven currents and the occurrence frequency of secondary circulations. Observation results by using the web camera shows the formation of surface streaks when the west wind is strong. H-ADCP was set across the surface streaks. Observation results by using H-ADCP shows the horizontally periodic profiles of wind-driven currents when the west wind is strong. The FFT analysis shows that fourier coefficients and the predominant frequency increase immediately with the increase of wind velocity. It shows the rapid response of periodic profile to the wind velocity.

1.緒 論

吹送流は,海洋や湖沼の物質輸送を考える上で非常に 重要な流れである.吹送流の鉛直分布としては,対数分 布や水面のごく近傍における直線分布を用いることが一 般的であり、水平方向には、風応力分布が一様であれば 一様な分布を用いることが一般的である.しかしながら、 吹送流中には風の吹送方向に軸をもつ二次循環流が生起 することが知られており、この循環流の運動量輸送によ って吹送流の流速分布も水平方向に高速域と低速域が交 互に並ぶ、空間的に周期的な構造を示すことが示唆され ている.この二次循環流はラングミュア循環流と呼ばれ ている. ラングミュア循環流に関しては古くから研究が なされており、それらについてはLeibovich (1983)や Thorpe (2004) が詳細なレビューをしている. しかしな がら、この循環流を明瞭な流速分布として捉えた観測例 は意外と数少ない. Weller and Price (1988) は, R.P.Flip と呼ばれる大規模な観測システムを用いてこの二次循環 流の観測を行い,比較的明瞭な周期的流速分布を示して いる. それによれば、風の吹送方向を横断する断面内で 二次循環流列が生起し、その下降流の位置では吹送流は 高速となり、上昇流の位置では吹送流は低速となる. 吹 送流の高速域では収束流が発生し、泡や海草等の浮遊物 がストリークを描く.一方で,吹送流の低速域では発散 流となる.しかしながら、彼らの観測手法では頻繁かつ 長期的な観測を行うことは不可能であるとともに、浅海 域での観測は非常に難しい. Gargettら(2004)は、鉛直 型のADCPを用いてラングミュア循環流の観測を行い,

やや不明瞭ながらも水深スケールにまで発達した循環流 を捉えることに成功している.しかしながら、縦渦を1 本の鉛直測線で捉えることは非常に困難である.この循 環流の重要性を示し、その性質をより一層明らかにする ためには、実際の形成頻度を明らかにするとともに、詳 細な観測データを多く提供することが不可欠である. ま た,沿岸域の物理環境に及ぼす影響評価という観点から 浅海域での循環流の形成を考える上では, 浅海域で容易 に観測データを提供できるシステムが求められる.以上 のことから、浅海域でより簡便に、かつ長期的な観測が 可能であるとともに、詳細なデータが得られる観測シス テムを提案することを目的として、本研究では、Webカ メラとサイドスキャン型超音波流速計H-ADCPを用いた 観測システムを提案し、その手法を用いて二次循環流を 伴う吹送流の水平流速分布に関する長期的な観測を行っ て,その空間的に周期的な水平構造を捉えるとともに, この二次循環流の発生頻度を把握することを目的とした.

2. 観測手法

観測は、国土交通省中国地方整備局出雲河川事務所が 管理する島根県の宍道湖湖心観測所で行った.図-1に湖



図-1 湖心観測所・秋鹿中継所の位置(Googleより引用)



図-2 湖心観測所の外観



図-3 モニタリング・システムの概要

心観測所の位置を、図-2に外観を示す. 宍道湖を観測地 に選んだ理由としては、①沿岸域に比べて平均水位変動 が小さい、②沿岸域に比べて水面波高が小さい、等から 水平計測が容易であること、③地形的に東西方向の卓越 風向が存在するため、ストリークの発生方向が限定され る、④湖心観測所がある、⑤ストリークの目撃情報があ ることが挙げられる. まず湖心観測所の2.5m程度の高さ にWebカメラ(Canon社製VB-50iR)を設置した. 無線 LANによって北岸の秋鹿中継所と繋ぎ、そこからインタ ーネットを利用して茨城県神栖市にある(独)港湾空港 技術研究所波崎海洋研究施設内でカメラのリモートコン トロールをしながら、水面に形成されるストリークの常 時モニタリングを行った. 湖心観測所から電源供給を受 けることができないため、Webカメラと無線LANに関し ては、ソーラー発電システムを用いて電源供給を行った.



夜間については、タイマーを用いて電源を落とした. カ メラの画像は1分毎に撮影された.図-3にモニタリン グ・システムの概要を示す. そして、強風時に気泡によ るストリークが水面に形成されることを確認した上で、 ストリークを横断する向きにサイドスキャン型超音波流 速計H-ADCP (RD Instruments 社製 WHH600) を設置した. H-ADCPは、測定可能範囲内でビームが水面に接触しな いように水深0.5mの位置に設置され、毎正時後15分間 において、1秒間隔で水平流速データのサンプリングを 行った.水平方向の計測層厚は0.5mとし、トランスデュ ーサーから約50mまでの85点において計測を行った.同 時に、水圧式波高計を海底に設置した、波高計のサンプ リング間隔は0.5秒とした.風向・風速については、湖 心観測所に既設の風向・風速計によるデータを用いた. 観測期間については、Webカメラの設置は2008年10月 22日からH-ADCP観測終了まで、H-ADCP観測は2008年 12月11日から2009年1月7日までの約1ヶ月間とした.

3. 観測結果ならびに考察

(1) 風向・風速および波浪場

図-4に、H-ADCPによる観測期間を含む、12月の東西 方向成分の風速値の時系列変化を示す。風向・風速デー タは、出雲河川事務所からご提供頂いた。図において、 正は東風を示し、青線はH-ADCPの観測期間を示す。図 中に矢印で示すように、観測期間中に4回、10m/s強の強 い西風が吹いた。21、22日以外はいずれも1日、あるい はそれ以上西風が連風している。今日有力視されている 波と流れの相互作用による形成機構説からすれば、安定



(a) 10月27日15:06



(b) 12月25日10:00図-6 水面のストリークの観測例

した方向で強い風が連風すると,水面下でラングミュア 循環流が発達している可能性が高いと言える.図-5に, 強風時の12月24,25日における水面変動を示す.図に おいて,hは水深,ηは水面変動を示し,下図は水圧変 化に関して水深補正をかけた値となっている.図から, 風が強まると周期3~4秒程度,最大波高1.0m程度の風 波が発生していることがわかる.

(2) 水表面のストリーク

図-6 (a), (b) に, Webカメラによって得られた水表面 のストリーク画像の例を示す. ここでは明瞭なストリー クの例として (a) 10月27日15:06と,本論文でデータ解 析を行った (b) 12月25日10:00の画像を示す. いずれに おいてもカメラは西向きであり, (a) においては方向の 安定した西風で風速10.8m/sであった. (b) においては, やや強い西風が風速12~13m/sで吹いていた. (a) から, 東西方向に伸びる気泡のストリークが明瞭に確認できる. 写真前後の時間においてもストリークは確認することが できるが,形成時間と位置という点でやや安定性にかけ る. (b) においては, (a) のように気泡によるストリー クは形成されていないが,水表面におけるさざ波の形成



の違いによるストリーク模様が若干認められる.これも ラングミュア循環流の形成を示唆するものだと考えられ る.写真前後の時間においてはストリークの明瞭さ,形 成時間と位置という点での安定性にやや欠ける.

(3) 水平流速分布

図-7 (a), (b) に, 12月25日9:13においてH-ADCPに よって得られた水平流速分布の一例を示す.風向きにx軸



を、H-ADCPのトランスデューサーからx軸と直角方向に v軸を設定した。従って、図-6においてストリークが伸び る方向をx軸とした.(a)はx軸方向の流速成分uであり、 (b) はv軸方向の流速成分vである. (a) からv=6, 7.0m, 22.0m, 35.0m付近に高速域を、y=11.0m, 30.0m付近に 低速域をもつ,水平方向に周期的な流速分布が認められ る.uの水平分布の一部に見られるように、水深50cmの 位置で若干の負の流速値が観測される. これは物理的に は解釈しにくい.本観測の設定では、流速誤差は2~3cm/s 程度とされているが、実際には流速誤差がやや大きいの ではないかという懸念はある.しかしながら,uの最大流 速差は1.0m/s程度を示すことから、周期的な流速分布自 体は信頼性があるものと考えられる。(b)においては、 y=9.0m, 29.0mにおいて負から正へと転換する周期的な 流速分布が認められる.これは発散流を示しており、二 次循環流の上昇流によってuの流速分布が低速域となり, その水面近傍で発散流となることを示している.このこ とから、uとvの周期的流速分布とそのピークの整合性は、 こうした吹送流の水平構造が二次循環流の形成によるも のであることを示唆している.図-8に、図-7(a)のデータ とFFTから得られた空間周波数スペクトルの結果を示す. 図において矢印に示すように、f=7.5e-4に明瞭なピーク が認められることから、13m程度の波長の空間的周期性を もった水平流速分布であることがわかる.

図-9(a), (b) に, vの水平分布の周期性がより明瞭な 例として, 12月25日12:07において得られた水平流速分 布を示す. (a) から, y=8~9.0m, 24~25.0m, 35~ 40.0m付近に高速域を、y=15.0m, 29.0m付近に低速域を もつ,水平方向に周期的な流速分布が認められる.ここ でも若干の負値が認められるが、これは物理的には解釈 しにくい値であり、流速誤差の可能性が示唆される.し かしながら、図-7と同様に最大・最小の流速差は1.0m/s程 度生じており, 周期的な流速分布自体は信頼性があるも のと考えられる. (b) においては、y=15.0m、29.0mにお いて負から正へと転換する周期的な流速分布が認められ る.この位置でuは低速域を示しており、vの発散流との 整合性から、これらの周期的な水平流速分布が二次循環 流の形成によるものであることが示唆される.図-10(a) ~ (d) に, 12月24, 25日の水面変動と東西方向の成分風 速、ならびに各水平分布の卓越周波数におけるフーリエ 係数の絶対値 √(a²_k+b²_k) と卓越周波数から求めた卓越波長L (m) を示す. 図から急に西風が吹くと即座に水面に波が 立ち、やや遅れてフーリエ係数が増加し、卓越波長も20 ~30m程度に増加することがわかる.フーリエ係数と卓 越波長の増加は水平方向の周期的流速分布が明瞭に形成 されることを示し、それらは風速の増加に迅速に呼応し ていることがわかる.フーリエ係数の増加は、水平流速 分布における極大・極小の流速差の増大を示し、水平分 布の周期性がより明瞭になることを表している.このこ とは、二次循環流が強まって運動量混合が強化されたこ とを示唆している.また、風速がほぼ一定になると卓越 波長は一定値となった.このことは、風速に従って二次 循環流の空間スケールも一定になったものと考えられる.

式 (1) に示す, Shemdin (1972) による対数則と観測 データをもとに水表面流速を推定する.

z = 50cm, 高速域での値としてU(50) = 0.50m/s ならびに 加藤(1975)から $z_0 = 0.01$ cmとし,式(2)に示す摩擦 速度の式と $U_{10} = 10.0$ m/s,本多・光易(1980)から $C_D =$ $2.60 \times 10^{-4}U_{10}^{0.654}$,ならびに $\rho_a = 1.225$ kg/m³, $\rho_w =$ 1040kg/m³,とすると、 $u_s = 0.744$ m/sとなる.通例通り U_{10} の3.5%で表層流速を見積もると $u_s = 0.35$ m/sとなり, その値は高速域と低速域の中間程度の値になる.従って, 水表面の物質が最も早く輸送されることを考える上で は、 U_{10} の3.5%で表層流速を見積もると半分程度の過小 評価になることが示唆される.

4.結 論

WebカメラとH-ADCPを用いて吹送流に関する現地観



測を行い,二次循環流の形成によると思われる気泡のス トリークの映像と空間的に周期的な水平流速分布を得 た.主な結論は以下の通りである.Webカメラを用いた 観測から,比較的強い西風が吹くと,東西方向に気泡の ストリークが形成されることがわかった.このストリー クを横断する方向に向けてH-ADCPを設置し,吹送流の 水平流速u,vを計測した.その結果,比較的強い西風が 吹いている時に,水平方向に周期的な流速分布が得られ た.また,vの流速分布との整合性から,その周期的分 布が二次循環流のものであることが示唆された.風速が 増大するとすぐに周期的分布が出現するが,今回の解析 範囲においては風速の一定化によって二次循環流の空間 スケールもほぼ一定化していたことがわかった.以上の ことから,比較的強い風が吹くと常に二次循環流が形成 され,吹送流の水平流速分布は周期的構造を有すること が示唆された.

謝辞:本観測を遂行するにあたり,(株)環境システム の鮎川氏,島根大学総合理工学部物質科学科(化学分野) 環境分析化学研究室の清家先生ならびに学生の皆様,ま た日本シジミ研究所の皆様には,操船や測器の設置等に おいて多大なご協力を得た.また,H-ADCPのレンタル や設置に関して,(株)ハイドロシステム開発の橘田氏, ほかスタッフの皆様には多大なご協力を頂いた.ここに 記して感謝の意を表す.また本研究は,(独)港湾空港 技術研究所の所内競争的資金:萌芽的研究費によって遂 行されたことをここに記す.

参考文献

- 加藤 始(1975):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,239, pp.37-46.
- 光易 恒 (1983):海面に及ぼす風の応力,水工学に関する夏期 研修会講義集, 19, pp. B.1.1-B.1.17.
- Gargett, A., Wells, J., Tejada-Martinez, A.E. and Grosch, C.E. (2004) : Langmuir supercells : A mechanism for sediment resuspension and transport in shallow seas, *Science*, Vol.306, pp. 1925-1928.
- Leibovich, S. (1983): The form and dynamics of Langmuir circulations, *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 15, pp. 391-427.
- Shemdin, O.H. (1972) : Wind-generated current and phase speed of wind waves. J. Phys. Oceanogr. 2, pp.411-419.
- Thorpe, S.A. (2004) : Langmuir circulations, Ann. Rev. Fluid Mech., 36, pp. 55-79.
- Weller, R.A. and Price, F.P. (1988) : Langmuir circulation within the oceanic mixed layer, *Deep-sea Research*, Vol.35, No.5, pp. 711-747.