

# Langmuir 循環流の形成機構と湖沼・沿岸域の水質環境における影響

## Formation mechanism of Langmuir Circulations and their effects on the water quality of lakes and Oceans.

○ 鶴崎 賢一, 群馬大学大学院理工学府環境創生部門, 群馬県桐生市天神町 1-5-1, E-mail: k-uzaki@gunma-u.ac.jp

Ken-ichi UZAKI, Dept. of Environmental and Engineering Science, Gunma University, Tenjin-cho 1-5-1, Kiryu City, Gunma Pref.

Secondary circulations induced in wind-driven currents are called “Langmuir Circulations : LCs”. Experimental and numerical results of the formation mechanism of LCs were shown. Furthermore, field studies of velocity profiles of wind-driven currents with LCs and of water temperature structures of lakes due to LCs were conducted. From these observation results, the formation mechanism of LCs and effects of them on the water quality of lake were discussed.

### 1. 緒論

湖沼や海洋では、吹送流中に風向きに軸をもつ縦渦列が形成されることがあり、この二次循環流は「Langmuir Circulations」と呼ばれている。以降、本文中では「LCs」と表記する。この二次循環流は、風応力作用下で、泡や海藻等が水面に何本もの風向きストリークを形成することで、その存在が確認される。ストリークが形成される場所では収束流となり、風下向き的高速流と下降流が、ストリークの間では発散流となり、風下向きの低速流と上昇流が生起すると指摘されている。図-1に、LCsの概念図を、図-2に、著者が福岡県和白干潟で捉えたストリークを示す。

LCsについての研究は古くからあり、1938年にLangmuir<sup>(1)</sup>が観測データをまとめたものを皮切りに、数多くの研究例が存在する。そのレビューはLeibovich<sup>(2)</sup>, J.A.Smith<sup>(3)</sup>やThorpe<sup>(4)</sup>が詳しい。

LCsは、乱流中の cohesive structure として、その形成機構の解明が水理学的に重要である。また海洋では、それが表層混合層厚を決定していると言われており、大気から海への熱やガスの輸送過程における支配要因として重要であると考えられている。海岸においても、成層の破壊や流出油の移流・拡散予測において重要な要因となっていると考えられており、その形成機構や詳細な特性の解明は非常に重要な研究課題である。Leibovich<sup>(2)</sup>によれば、その最大下降流速は、風速の1%程度と言われ、10.0 m/sの風に対して表層の吹送流速が30.0 cm/s、LCsの最大下降流速はその1/3程度で10.0 cm/sとなり、二次流とはいえ無視できないオーダーであることが指摘されている。しかしながら、風が運動する水面下の二次循環流であるが故に、いつ・どこで形成されるか予測が難しく、またその計測も困難であったため、Faller&Caponi<sup>(5)</sup>のように水理実験による研究が主体であった。しかしながら、水理実験ではその形成における水槽側壁の影響が拭いきれず、その形成機構論として Craik&Leibovich<sup>(6)</sup>, Craik<sup>(7)</sup>, Leibovich<sup>(8)</sup>による「波と流れの相互作用」に基づく CL II theory が有力視されているものの、その検証データの不足から未だ十分に解明されたとは言えないのが現状である。CL II theory は、平均流の空間勾配とストークス・ドリフト速度の空間勾配の積で示される vortex force term が渦度の生成項となる渦度方程式 CL equation によって説明される。近年になって、Weller&Price<sup>(9)</sup>やGargett et al.<sup>(10)</sup>, 吉川<sup>(11)</sup>, 鶴崎<sup>(12)</sup>による現地観測例が示されている。Gargett<sup>(13)</sup>はまた、風波の影響のないケースでの類似した二次循環流の形成を指摘し、これまでのLCs研究の中での Couette Circulations : CCs との混在を指摘している。また、近年では数値計算による研究も数多く行われ、Li et al.<sup>(14)</sup>, Slyllingrad&Denpo<sup>(15)</sup>やNoh, Y et al.<sup>(16)</sup>の研究が挙げられるが、その多くは CL II theory に基づいたものとなっている。しかしながら、鶴崎<sup>(17)</sup>,<sup>(18)</sup>は、界面活性剤を用いた水理実験とリジッド・サー

フェイス・モデル : RSM による LES から、風波を伴わない場での類似した循環流の形成を示唆している。金<sup>(19)</sup>は、風応力作用下の開水路を対象とした DNS によって、底層の低速ストリークの他に、表層において高速ストリークが形成されることを示している。

このように、LCs 研究は今日なお解明すべき問題が山積されているが、観測器材の進化から、近年比較的明瞭な観測データが提供されるようになってきた。そこで本研究では、これまでの形成機構に関する著者らの水理実験と数値計算による示唆と問題点を踏まえ、H-ADCP による現地観測結果ならびに湖沼の水質環境に及ぼす影響について検討を行った。

### 2. LCs の形成機構に関する水理実験と数値計算

CL II theory で用いられる CL equation は、ストークス・ドリフト速度の空間変化があれば、縦渦が生成する方程式ではあるが、さほど強くない風で、微小な風波が形成される場合においてもストリークが綺麗に形成されることをしばしば見かけると、風波の役割にやや疑問をもつ。Gargett<sup>(13)</sup>は、LCs と CCs との混在を示唆し、これまでのLCsの研究成果も精査する必要があると指摘している。鶴崎<sup>(17)</sup>,<sup>(18)</sup>は、風波と伴う場合と界面活性剤を用いて風波の発達を抑制した場合において可視化実験と流速計測実験を行ない、風波を伴う場と比べてやや不安定ではあるが、風波を伴わない場においても類似した循環流の形成を示唆した。また、RSM を用いた LES によって、水理実験結果を定量的に再現した。図-3, 4にその結果の一例を示す。図-4において、プロットは実験結果、ラインは計算結果を示す。この結果から、RSM においても水深スケールの循環流が形成されること、計算結果は実験結果を定量的によく再現することがよくわかる。

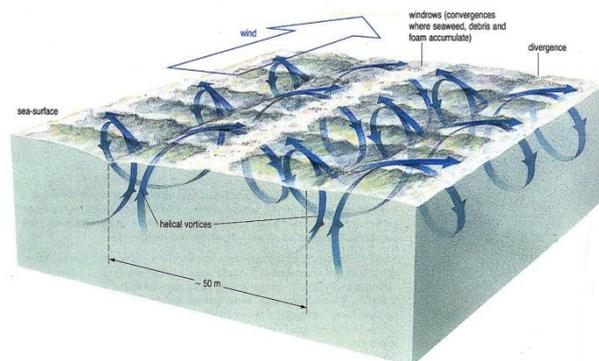
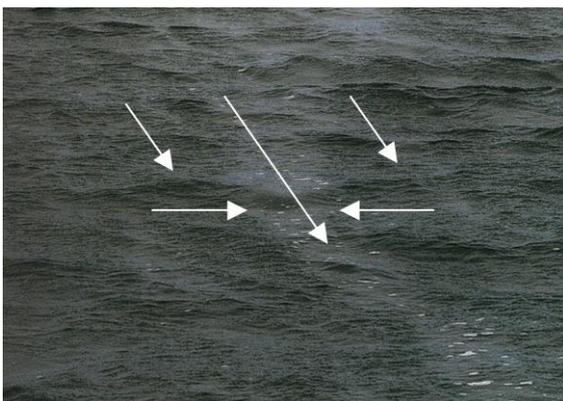


図-1 LCs の概念図 (“Ocean Currents in Ocean Circulation”, ed. G. Bearman, Pergamon Press)



(a) 和白干潟のストリーク



(b) 気泡の収束列

図-2 和白干潟のストリークと気泡の収束列

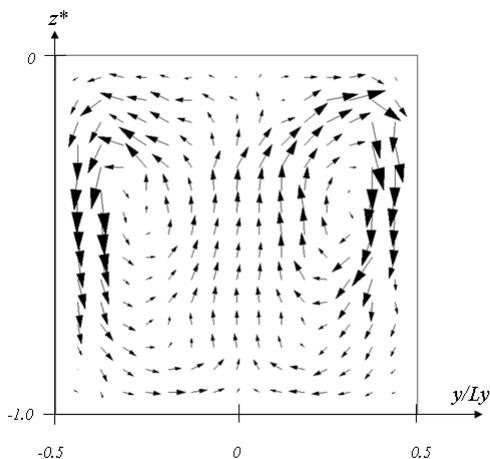
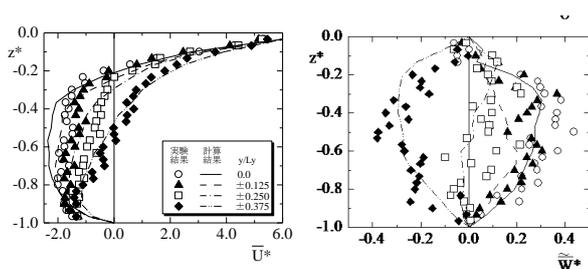


図-3 二次循環流のパターン



(a)  $\bar{U}^*$  (b)  $\bar{W}^*$   
図-4 計算結果と実験結果の定量的比較

### 3. LCsの形成に関する現地観測

水理実験では、wide tank を用いたとしても側壁の影響は拭いきれず、吹送流に対する補償流の存在も厄介である。近年では、H-ADCP 等の普及により、現地観測技術が飛躍的に向上している。このことから鶴崎<sup>12)</sup>は、島根県の宍道湖にある国土交通省の湖心観測所に H-ADCP と無線 LAN、Web カメラを取り付け、吹送流中の二次循環流の形成について現地観測を行った。宍道湖は北と南に山地があり、海と陸の風が中海と大橋川を経由して東西方向に吹く。従って、宍道湖では吹送流が東西方向に形成されることが多いことから、湖心観測所において H-ADCP (RD Instruments 社製 WHH600) を、水深 0.5m の位置に北向きに設置した。同時に Web カメラを観測塔の 2.5m の高さに設置し、無線 LAN とインターネットを介して茨城県神栖市から操作してモニタリングを行った。その結果、強い西風時に東向きストリークの形成が確認され、水面下では吹送方向と直角方向に、空間的に周期的な流速分布が得られた。

井出ら<sup>20)</sup>は、群馬・栃木・茨城・埼玉県境にある渡良瀬遊水地においても同型の H-ADCP と Web カメラを設置し、吹送流中の二次循環流の形成を追った。渡良瀬遊水地は長手方向で 4km 程度と小規模の遊水地であり、二次循環流が発達するには吹送距離が短いという懸念もあるが、秋から冬にかけての赤城おろしが 20m/s 以上吹くため、循環流形成が十分に期待できると考えられた。観測結果から、風下方向に数本のストリークの形成が認められ、その場合の風下方向成分流速の水平分布から、高速流と低速流を繰り返す空間的に周期的な流速分布が得られた。H-ADCP の設置水深が 0.6 m であった為、対数則を応用して、水表面の吹送流速分布を算定した。その結果、従来の 3~3.5% の推定値は高速流速と低速流速の平均的な値となるが、高速流速はその約 2 倍の流速値となり、タンカー事故の流出油や河川水の挙動予測等においては、従来予測よりも早く移流する可能性を示している。

### 4. LCs が湖沼の水質環境に及ぼす影響

海洋では、LCs は表層混合層の形成や大気から海洋へのガスのエントレイメントにおいて大きな役割を果たしていると考えられている。前述した渡良瀬遊水地では、浮島や葎原循環等の水質対策を施しているが、近年なお N, P の値が右肩上がりであり、chl a 値も上昇傾向にある。そこで、N, P 濃度と共に、水温構造の詳細を調べることが、プランクトン類の増殖対策の一助になると考え、夏季の長期間にわたってサーミスター・チェーンと DO 計を設置し、遊水地の水温構造変化を調べた。

その結果、夏季の遊水地では毎日午後になると 8.0 m/s 程度の比較的強い風が吹く。それに呼応して、日中低下した底層の DO 濃度が急激に回復するという日周期変化を繰り返していることがわかった。夕方には日射が低下して表層の水温も低下する一方で、中層以深の水温が上昇することがわかった。これは、なんらかの鉛直混合の存在を示すものであり、同じタイミングで風速が増加していることから、風に起因した水深スケールの鉛直混合であることが推察される。この鉛直混合は、(i) 風波の振動流による混合か (ii) 吹送流主流による乱れ、(iii) LCs による混合、あるいは (iv) 熱対流による混合と考えられる。本研究によるデータ解析の結果、LCs による鉛直混合が、水深スケールでの水温一様化を引き起こす可能性が十分にあることが示された。

### 5. 結論

LCs に関する既往の研究例をまとめ、その形成機構に関する水理実験と数値計算、ならびに現地観測について報告し、また LCs が湖沼の水質環境に及ぼす影響についても検討を行った。

本論文の主要な結論としては、(i) 風波の発達を抑えた場合で

も二次循環流は形成されるが、非常に不安定である。(ii) H-ADCP を用いて吹送流の空間的に周期的な水平流速分布を捉えることができる。(iii) 吹送距離が短く、さほど強くない風でも LCs は形成され、内水面でも比較的頻繁に生起している。これらのことから、従来の形成機構論に対し、循環流自体は風波が存在しない場合でも生起し、風波はその循環流を強化する働きではないかと考えられた。(iv) 海洋における LCs の効果と同様に、湖沼においてもその水温構造のひとつの決定要因であると推測され、その水質環境に大きな影響を与えている可能性がある。等が挙げられる。

#### 参考文献

- (1) Langmuir, I., "Surface motion of water induced by wind.", *Science*, 87 (1938), pp. 119-123.
- (2) Leibovich, S., "The form and dynamics of Langmuir circulations.", *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 15 (1983), pp. 391-427.
- (3) Smith, J. A., "Observations and theories of Langmuir Circulation : A story of mixing." *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 15 (1983), pp. 391-427.", *Fluid Mechanics and the Environment : Dynamical Approaches*.(2001), pp.295-314.
- (4) Thorpe, S. A., "Langmuir Circulations.", *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 36 (2004), pp. 55-79.
- (5) Faller, A. J. & E. A. Caponi, "Laboratory studies of wind-driven Langmuir circulations.", *J. Geophys. Res.*, 83 (1978), pp.3617-3633.
- (6) Craik, A. D. D. & S. Leibovich, "A rational model for Langmuir circulations.", *J. Fluid Mech.*, 73 (1976), pp.401-426.
- (7) Craik, A. D. D., "The generation of Langmuir circulations by an instability mechanism.", *J. Fluid Mech.*, 81 (1977), pp.209-223.
- (8) Leibovich, S., "Convective instability of stably stratified water in the ocean", *J. Fluid Mech.*, 82 (1977), pp.561-581.
- (9) Weller, R. A. & J. F. Price, "Langmuir circulations within the oceanic mixed layer.", *Deep-Sea Research*, Vol. 35, No.5 (1988), pp.711-747.
- (10) Gargett, A. J. Wells, A. E. Tejada-Martinez and C. E. Grosch, "Langmuir Supercells : A Mechanism for Sediment Resuspension and Transport in Shallow Seas.", *Science*, Vol.306 (2004), pp.1925-1928.
- (11) 吉川裕・馬場康之・水谷英明・久保輝広, "ラングミュア乱流の観測", 平成 28 年度 京都大学防災研究所 研究発表講演会講演概要集, (2017), C18.
- (12) 鶴崎賢一, "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", 土木学会海岸工学論文集, 第 57 巻 (2010), pp.336-340.
- (13) Gargett, A. E., "Couette vs. Langmuir circulations : Comment on "On the helical flow of Langmuir circulation - Approaching the process of suspension freezing" by Dethleff, Kempema, Koch and Chubarenko.", *Cold Regions Science and Technology*, 56 (2009), pp.58-60.
- (14) Li, M & C. Garrett, "Cell merging and the jet / downwelling ratio in Langmuir circulation.", *J. Mar. Res.*, 51 (1993), pp.737-769.
- (15) Skyllingsrad, E. D. & D. W. Denbo., "An ocean large-eddy simulation of Langmuir circulations and convection in the surface mixed layer. ", *J. Geophys. Res.*, 100, No.C5 (1995), pp.85101-8522.
- (16) Noh, T., H. S. Min & S. Raasch., "Large Eddy Simulation of the Ocean Mixed Layer : The Effects of Water Breaking and Langmuir Circulations.", *J. Phys. Ocean.*, Vol. 34 (2004), pp.720-735.
- (17) 鶴崎賢一・池畑義人・松永信博, "リジッド・サーフィス・モデルによる 1 対のラングミュア循環流の LES", 土木学会水工学論文集, 第 47 巻 (2003), pp.1303-1308.
- (18) 鶴崎賢一・松永信博, "ラングミュア循環流の形成機構に関する 3 次元 LES", 土木学会海岸工学論文集, 第 51 巻 (2004), pp.86-90.
- (19) 金 晟眞・杉原裕司・梶原鉄矢・Eljamal Osama・山口創一, "成層効果を伴う乱流場の界面物質移動機構の解析", 日本流体力学会年会 2017 講演概要集, CD-ROM (2017).
- (20) 井出航路, 本間聖也, 荒木陽介, 堀口真弥, 鶴崎賢一, "二次循環流を伴う吹送流の三次元構造に関する現地観測", 土木学会水工学論文集, 第 56 巻 (2012), CD-ROM.