

非成層期の霞ヶ浦(西浦・北浦)における 吹送流の特性

WIND DRIVEN CURRENT IN LAKE KASUMIGAURA OF UNSTRATIFIED SITUATION

小松伸行¹・石井裕一²・渡邊圭司³・本間隆満⁴・北澤大輔⁵
Nobuyuki KOMATSU, Yuich ISHII, Keiji WATANABE,
Takamitsu HOMMA and Daisuke KITAZAWA

¹正会員 茨城県霞ヶ浦環境科学センター 水環境研究室 (〒300-0023 茨城県土浦市沖宿町1853)

²正会員 博(工) 茨城県霞ヶ浦環境科学センター 水環境研究室 (同上)

³非会員 博(農) 茨城県霞ヶ浦環境科学センター 水環境研究室 (同上)

⁴非会員 博(理) 茨城県霞ヶ浦環境科学センター 水環境研究室 (同上)

⁵非会員 博(工) 東京大学 生産技術研究所 機械・生態系部門 (〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)

The long term simultaneous observation of the lake currents was conducted using an Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) deployed at eight sites in Lake Kasumigaura (Nishiura and Kitaura). Currents of the surface layer were affected easily by wind. From the intermediate layer to the bottom layer, the vertical profile of current was almost uniform. The results of EOF (Empirical Orthogonal Function) analysis applied to the current dataset show that Mode 1, containing 60.3 -94.9% of total variance, is highly correlated with wind speed. The typical vertical circulation pattern was observed at some observation sites, and horizontal circulation was suggested in the central basin of Nishiura under the southward wind condition.

Key Words : wind driven current, ADCP, EOF analysis, horizontal circulation

1. はじめに

霞ヶ浦の水質は様々な対策が実施されているにもかかわらず改善が進んでいない。湖内の水質問題に対処するためには、物質輸送や水質形成に深く関与する湖流の理解が不可欠であり、湖流の形成・変動要因や時間的・空間的分布特性の把握は極めて重要な課題である。

霞ヶ浦の湖流に関しては、村岡ら¹⁾、田中ら²⁾、銭ら³⁾が報告しているが、いずれも西浦が対象であった。また、実施された現地観測は湖心などに地点が限られており、数値解析結果等を検証する資料として利用されたが、現地観測結果の直接的な解析による湖流の把握は十分に行われていない。一方、北浦を対象とした研究には、設置型ADCPによる観測データにEOF解析を適用してNE風が卓越する時期の北浦湖流の時間変動要因を解析し、風や水門操作の寄与の大きさを検討した小松ら⁴⁾の報告しかない。これらの報告において、霞ヶ浦の湖流は西浦・北浦のいずれにおいても吹送流が支配的であることが示さ

れている。しかしながら、吹送流の水平分布や風に対する応答特性の地域性など、空間分布に関する研究は、琵琶湖など他の湖沼と比較して極めて少ない。

本研究では、現地観測による霞ヶ浦の湖流解明を目的とした。まず、吹送流の空間分布における基本的特性を把握するため、設置型ADCPを用いて実施された多地点同時連続観測のうち、密度分布の影響を無視できる非成層期の観測結果について解析した。特に、西浦については、既往の研究成果と比較しながら検討を行った。

2. 方法

(1) 観測地点の概要

図-1に示す霞ヶ浦は茨城県南部に位置し、西浦、北浦、外浪逆浦、北利根川、常陸川および鰐川から構成される総面積219.9km²の湖沼である。常陸川と利根川との合流点には洪水の逆流と塩水の遡上を防ぐことを目的に常陸川水門が設置されている。このため、現在の霞ヶ浦は淡

水湖となっており、水道用水、工業用水および農業用水の水源として利用されている。霞ヶ浦の大部分を占める西浦(171.5km²)と北浦(36.2km²)の平均水深はそれぞれ3.4mと4.5mであり、面積に対して水深が非常に浅い水域である。

(2) 現地観測

観測は図-1に示す北浦8地点(K1~K8)で2005年12月から2006年9月に、西浦8地点(N1~N8)で2007年11月~2008年10月に実施された。観測には超音波ドップラー流速計(ADCP; Nortek製アクアドッププロファイラーNB型2MHz)を8台使用した。ADCPは動揺しないように架台に固定し、ダイバーによって湖底に設置した。センサー部の高さは湖底上約50cmとした。ADCPの鉛直方向の分割幅は、センサー上20cmから水面方向へ50cm間隔とし、各層における流向・流速の60秒平均値を10分間隔で取得するように設定した。なお、発信する音波パルス(pings)数と層厚等から予測された誤差の理論値は1.4cm/sであった。各観測地点のセンサー部分の水深と観測層数は表-1

に示した。霞ヶ浦では風などの影響により±20~30cmの水位変動が生じて観測水深も変動したが、概ね湖底上70cmから水面下20~90cmの範囲が観測水深であった。

西浦の湖心観測所および北浦の釜谷観測所(図-1)における湖上風の観測データは、国土交通省関東地方整備局霞ヶ浦河川事務所から提供を受けた。

(3) データ解析

本研究では非成層期における西浦・北浦両水域の比較を行うため、北浦が2005年12月26日から2006年1月15日の21日間、西浦が2008年2月6日から2月26日の21日間を主な解析の対象期間とした。この期間におけるつくば(館野)地方の風配図を気象庁観測データから作成し図-2に示した。いずれもNW~WNWの風が卓越しており、解析の対象期間には霞ヶ浦周辺の基本的な風条件に大きな差はなかったと判断した。また、常陸川水門の操作が霞ヶ浦の水位や流動に影響し、特に北浦でその影響が顕著であるため⁵⁾⁶⁾、対象期間は水門操作が実施された期間を含まないように選定した。

表-1 各観測地点のセンサー部分の水深と観測層数

L. Nishiura								
Site No.	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8
Depth of sensor head (m)	3.98	5.53	3.56	4.96	4.91	6.10	5.95	4.37
(Min. - Max.)	(3.63-4.11)	(5.19-5.67)	(3.16-3.71)	(4.62-5.09)	(4.66-5.03)	(5.80-6.23)	(5.64-6.07)	(4.00-4.50)
Number of cells	7	10	6	9	9	11	11	7
L. Kitaura								
Site No.	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8
Depth of sensor head (m)	2.40	4.85	5.90	6.08	5.85	6.43	6.62	4.34
(Min. - Max.)	(1.92-2.55)	(4.57-5.01)	(5.67-6.08)	(5.83-6.25)	(5.57-6.02)	(6.14-6.60)	(6.38-6.79)	(4.05-4.51)
Number of cells	4	8	11	12	11	12	13	7

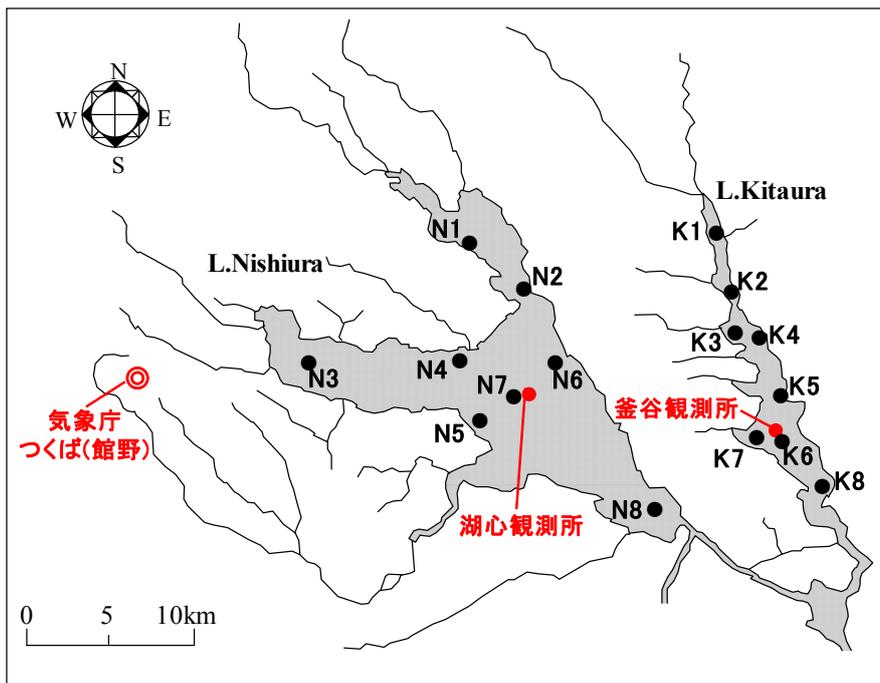


図-1 調査地点

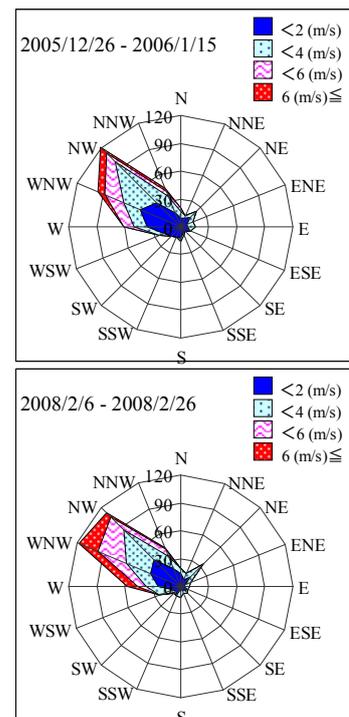


図-2 つくばの風配図の比較

霞ヶ浦では、セイシュの影響による振動が西浦で約70～140分¹⁾、北浦で約100分⁹⁾の周期で見られる。このため、各層の流況データには100分間の移動平均をかけてセイシュの影響を取り除き、風向・風速に合わせて毎正時の値を抜き出したデータを解析に使用した。

本研究では、膨大なデータセットからなるべく簡単な記述で西浦・北浦計16地点における湖流鉛直分布の変動特性を説明するため、地点ごとの流速EW成分およびNS成分の鉛直分布32組に対して各々EOF解析⁴⁾を行った。この解析は、多数のデータから相互に関連がありかつ変動の大きな成分を統計的に抽出する、いわゆる主成分分析の時系列データへの適用である。共分散係数を計算するにあたっては各層における時間平均からの偏差を求めた。計算には統計ソフト(SPSS:SPSS Inc.)を使用した。

3. 結果と考察

(1) 湖流鉛直分布の特徴

図-3に西浦と北浦の湖央部で観測されている湖上風の風配図を示した。図-2に示したNW～WNWから吹く陸上の風と比較して、西浦の湖心では風向がN～WNWにやや偏向するとともに風速が強く現れていた。一方、北浦の釜谷沖では湖面の長軸に沿ったNNWの風が卓越し、比較的強めの風はWの方向から吹いていた。また、風速は西浦のように大きくならなかった。これら湖上風の偏向は湖岸線など地形の影響と考えられ⁸⁾、西浦湖心における風速の増加は陸-水域間の表面粗度とフェッチの違いによる影響と考えられる⁹⁾。

いによる影響と考えられる⁹⁾。

湖上風とN7およびK6における湖流の鉛直分布を図-4に示した。湖流の図では最上層のベクトルを他の層の5分の1に縮小して表している。西浦N7の最上層である湖底上5.7mの湖流は、風の変化に良く対応していた。北浦K6の最上層である湖底上6.2mの湖流は、12月31日～1月1日あるいは1月14日に見られるように、NからSへ吹く風に対して湖流がSEの方向に傾いて形成される傾向があるためN7と比べると風との対応が読み取りにくい。基本的には風速の変動に従って流速も変動している。風と水面付近の湖流が良く対応する傾向は、ここに示さなかった西浦・北浦の他の地点においても共通していた。また、N7、K6ともに水面下2層目から最下層にかけて湖流分布は非常によく類似しており、その流速は最上層の10～20%とかなり小さかった。K6で明確だが、湖底付近には最上層と反対向きの流れが形成されることが多い。

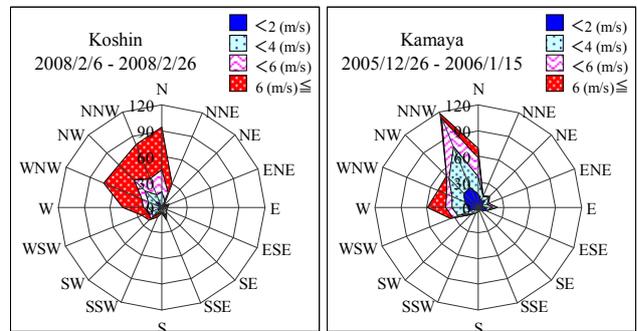


図-3 湖上風の風配図

左：西浦 湖心 右：北浦 釜谷沖

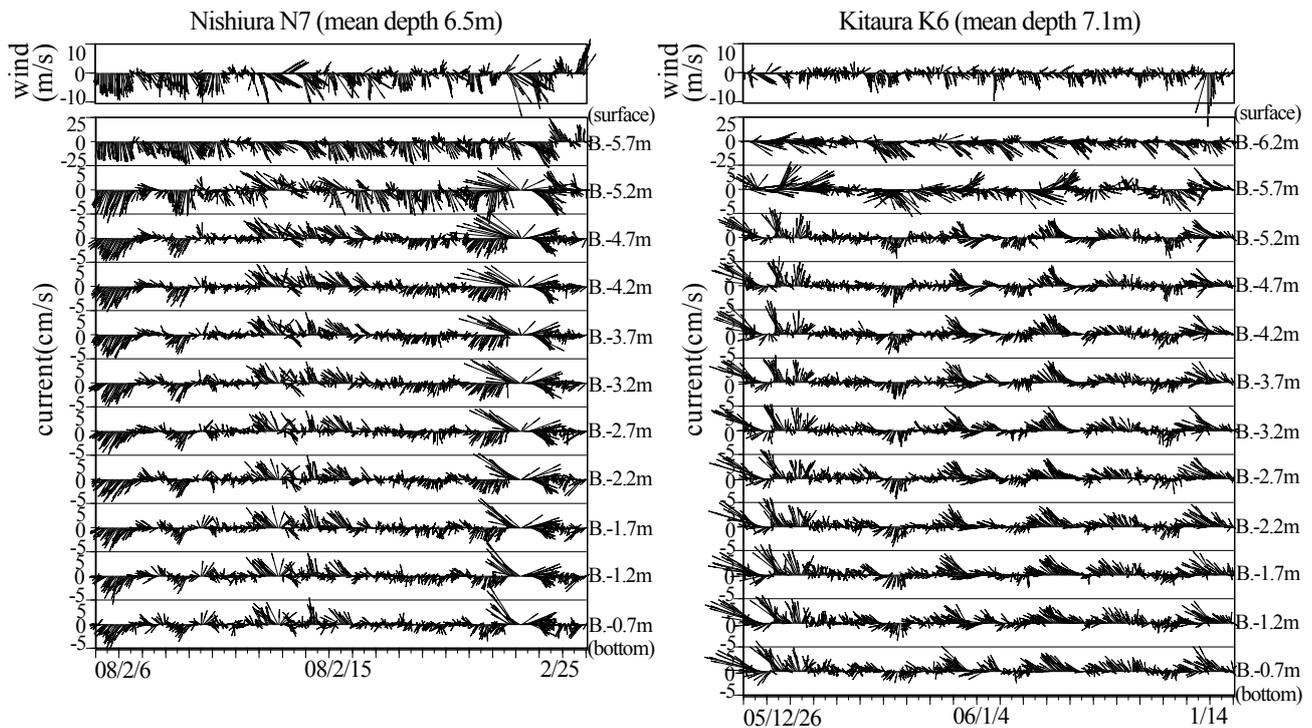


図-4 湖上風と湖流鉛直分布のベクトル図 左：西浦湖心の風とN7の湖流 右：北浦釜谷沖の風とK6の湖流

N7では2月6日のようにNからの風によりS向きの流れが形成される場合には湖底付近まで同一方向に流れるが、2月13日など最上層の流れにE向きの成分があると中・下層に最上層と反対向きの流れが現れる。これらの結果は、上層で風の吹送方向に早い流れが形成され、水深1.5～2m付近を境界として中・下層には上層と反対の小さい流れが形成されるとする村岡ら¹⁾の報告と概ね一致する。しかし、多地点で長期間の同時観測を行った本研究では、2層目から最下層の間の湖流は風条件の違いにより地点ごとに複雑な応答をしていることが明らかであり、各地点の特性をどのように明確にするかが課題である。

(2) 各地点の風に対する応答特性

風と湖流のベクトル図(図-4)の検討から、湖流の変動には風が深く関与するとともに、各層の湖流には共通の変動成分が含まれると考えられた。そこで、複数の時系列データセットから共通の変動要因を求めるEOF解析を適用することにより、各地点の湖流鉛直分布に現れる風に対する応答特性の違いを検討した。

表-2に示した流速EW成分とNS成分について各々算出した第1主成分(Mode 1)の分散寄与率は60.3～94.9%といずれも極めて高く、Mode 1のみで各地点の湖流鉛直分布に共通に含まれる変動の大部分を説明することが可能であった。また、多くの地点でMode 1は湖上風と高い相関が認められた。西浦のN2, N3, N4, N7およびN8では、流速EW成分のMode 1は湖心における湖上風のEW成分と、流速NS成分のMode 1は湖心における湖上風のNS成分と相関が高く、これらの地点では風の変動に湖流鉛直分布の変動が良く対応することが示された。同様に、北浦ではK1, K2, K4, K6およびK7で湖流鉛直分布の変動と釜谷沖の湖上風の変動が良く対応した。

N6の流速EW成分のMode 1は、同方向である湖上風EW成分との間にもある程度の相関($r=0.52$)が認められたが、交差する湖上風NS成分との相関の方が高くなった。また、N1, K3およびK5の流速NS成分のMode 1で、湖上風NS成分との間の相関($r=0.32\sim 0.41$)よりも、流速EW成分との相関が高くなった。さらに、K8については、流速EW成分のMode 1は湖上風のNS成分と、流速NS成分のMode 1は湖上風のEW成分と相関があり、これらの地

点では、湖流が湖上風に対して角度のズレを持って形成されることが示された。風向と流向が一致しない解析結果が得られた地点は、いずれの風向に対しても湖岸線あるいは等深線に沿った一定方向の流れが卓越する傾向が見られる地点であることから、湖の地形により吹送流が偏向したことが影響したと推察される。

N5では、流速EW成分のMode 1は湖上風EW成分に対応する変動であったが、流速NS成分のMode 1は、気象条件、水位、河川流入量など、いずれの変動要因を用いても相関関係が認められなかった。図示していないが、このMode 1の時間変動は顕著な2つのピークを持つ変動であり、10m/sを超えるWからの強風が連吹した期間とピークが一致したことから、相関は低いものの湖上風EW成分の影響がMode 1に含まれると考えられる。しかし、実際の流れには、湖上風とは別の変動要因や地形の影響が複雑に関与した可能性がある。なお、K5の流速NS成分における分散寄与率の26.5%を占めるMode 2は、湖上風NS成分との相関が高かった($r=0.81$)。

EOF解析で求められる固有ベクトルは、その地点における卓越エネルギーの鉛直分布を表す。図-5に西浦湖中部と北浦湖中部の断面方向に位置する観測地点について、固有ベクトルの鉛直分布を示した。ここでは風による変動エネルギーの分布を検討するため、N5の流速NS成分の固有ベクトルのみ湖上風と相関の高いMode 2を用いた。固有ベクトルのピークはいずれも水面に近い最上層に見られ、これらのModeが水面に作用する湖上風による変動であることを示唆する。なお、流速の成分や地点により最上層の固有ベクトルの正負が異なっているが、これはEOFの計算において除去する時間平均値とその偏差の正負によるものであり、実際の最上層の流れは、全て風と同方向である。固有ベクトルの鉛直分布で2～3層目に見られる固有ベクトルの大きな変化は、図-4に見られた最上層とそれ以下の層との間に見られる流速の差が反映されたものであり、最上層と値の正負が異なる層では、最上層とは反対向きに流れる傾向があることを示している。西浦N7の固有ベクトルは流速EW成分・NS成分ともに鉛直的にほとんど正値をとっており、本研究の対象期間に観測されたN～WNWの風では全層で同方向に流れる傾向が強いことがわかる。それに対し、N5ではNS成

表-2 各地点の流速EW成分およびNS成分について算出した第1主成分(Mode 1)の分散寄与率と推定された変動要因

Site No.	N1		N2		N3		N4		N5		N6		N7		N8	
流速2成分	EW	NS														
Mode 1の分散寄与率(%)	73.6	75.0	94.9	84.7	75.7	83.1	80.7	89.1	78.6	72.2	70.8	71.6	63.3	71.7	87.5	69.9
Mode 1と相関の高い変動要因…(a)	風EW	風EW	風EW	風NS	風EW	風NS	風EW	風NS	風EW	不明	風NS	風NS	風EW	風NS	風EW	風NS
Mode 1と(a)との相関係数 r	0.85	0.56	0.88	0.83	0.86	0.59	0.86	0.89	0.79	-	0.71	0.82	0.61	0.85	0.70	0.76

Site No.	K1		K2		K3		K4		K5		K6		K7		K8	
流速2成分	EW	NS														
Mode 1の分散寄与率(%)	77.8	90.1	60.3	79.0	87.3	85.3	91.4	83.9	89.4	85.8	80.2	59.1	86.9	76.0	74.5	90.4
Mode 1と相関の高い変動要因…(a)	風EW	風NS	風EW	風NS	風EW	風EW	風EW	風NS	風EW	風EW	風EW	風NS	風EW	風NS	風NS	風EW
Mode 1と(a)との相関係数 r	0.54	0.65	0.65	0.64	0.81	0.65	0.79	0.67	0.67	0.81	0.82	0.68	0.89	0.68	0.75	0.84

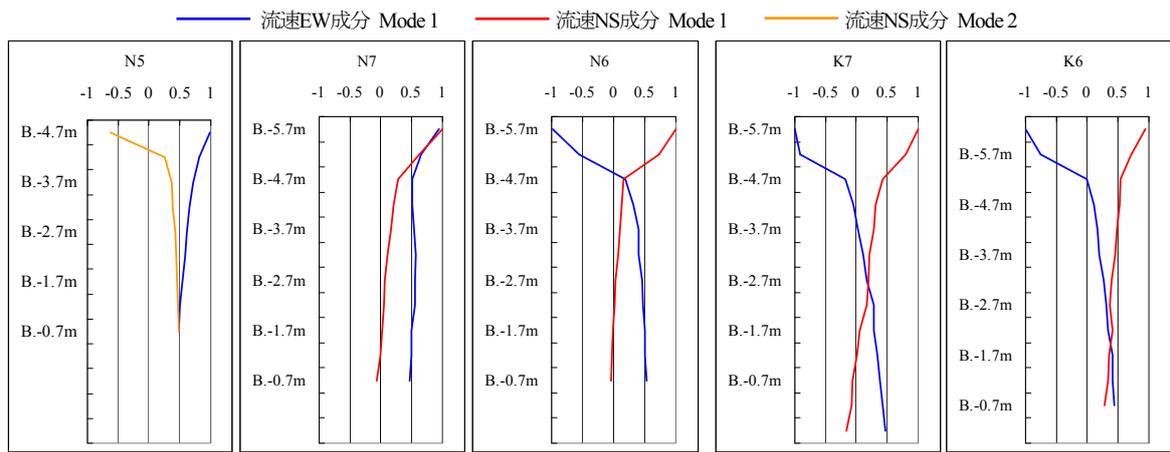


図-5 西浦湖央部横断面(N5-N7-N6)と北浦湖奥部横断面(K7-K6)における固有ベクトルの鉛直分布

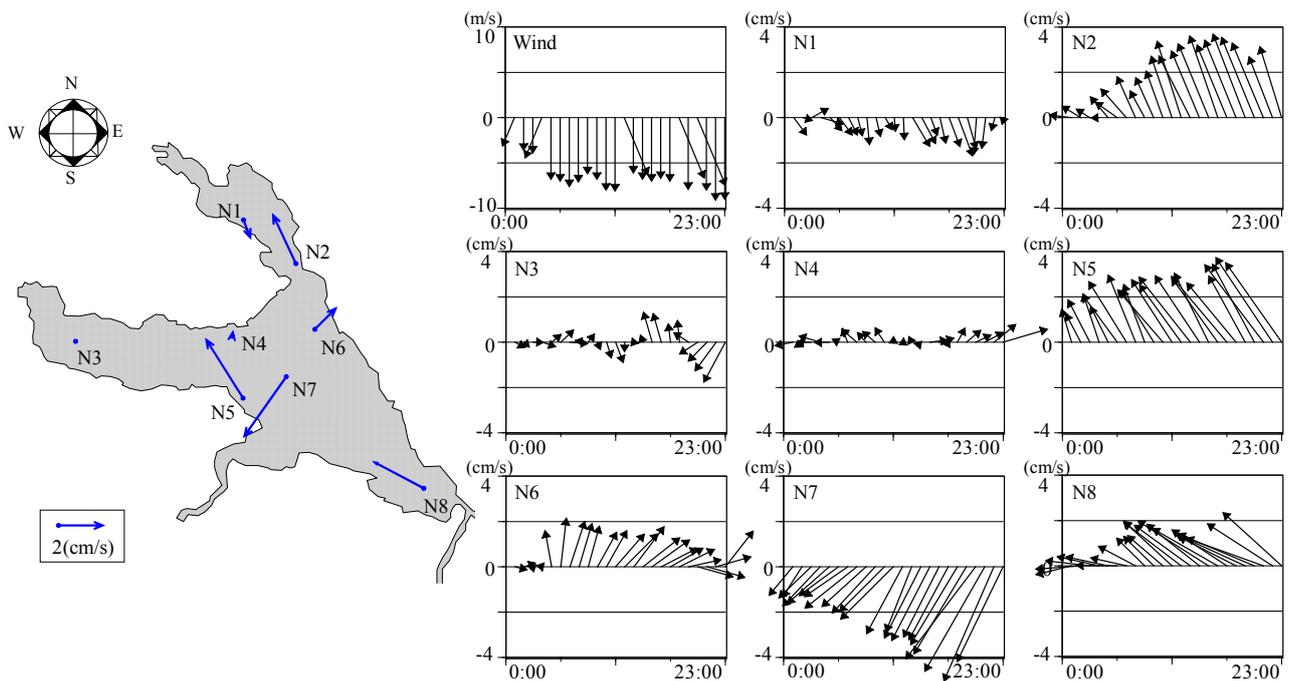


図-6 2008年2月6日の西浦における湖流分布 左：日平均値の水平分布 右：各地点の時系列変化

分について、N6ではEW成分について最上層と中・下層とで固有ベクトルの正負が異なることから、流向が反対向きに変化する傾向が認められる。このような風に対する応答特性の違いから、西浦湖央部の水面付近では一様に風と同方向の流れが形成されるが、中層から下層にかけては地点により異なる流向が現れ、水平的な循環が形成される可能性が示された。一方、北浦湖央部のK6とK7の固有ベクトル鉛直分布は比較的良く似ていた。小松ら⁴⁾の観測から、NEからの風に対してはK6とK7の中・下層に水平的に異なる流向が報告されているが、今回の解析対象期間に見られた水域の長軸方向と一致するNNWの風では、水平的な循環は形成されにくいと考えられる。

以上のように、EOF解析を用いることによって、膨大な観測データから西浦・北浦における湖流の変動について包括的な説明を行った。その結果、霞ヶ浦の湖流では風による変動が卓越し、最上層では風に対応した湖流が

形成されるが、中・下層では風向と地形との関係から湖流が偏向することにより、水平的・鉛直的な循環を形成することが明らかとなった。

(3) 西浦における水平循環

過去に実施された模型実験や数値解析では一定風が与えられることが多かったが、これにより得られた結果を十分な現地観測データで検証するのは困難であった。これは、実際の湖沼では実験条件として与えるような一定方向から一定の強さの風が十分に長い時間吹き続けることが少なく、また、そのような条件下で複数地点において湖上で観測を実施することが困難であったためである。湖底に設置した複数のADCPによる長期観測では、求める気象条件と一致する観測データが得られる可能性がある。図-6に5m/s以上の比較的強いNからの風がほぼ1日の間吹き続けた2月6日について、西浦各地点の湖流分布を示した。湖流の水平循環は、風に良く対応する最上層

よりも2層目から最下層の間で形成されやすいと考えられたため、ベクトル図には最上層を除いた湖流の鉛直平均値を用いた。

村岡ら¹⁾によると、N1、N2を含む高浜入と呼ばれる西浦北部の水域では、いずれの風向においても反時計回りの水平循環が卓越すると報告されている。Nからの風に対し、西岸側のN1ではS向きの流れ、東岸側のN2ではNNW向きの湖岸に沿った方向の流れが形成されており、反時計回りの湖流が形成された可能性が高いと考えられた。また、N3のある土浦入と呼ばれる西側の水域には複数の渦が形成されることが報告されているが¹⁾、N3の流れの時間変化は、ほぼ一定方向からの風に対して湖流のNS成分が振動するよう見えており、この水域の湖流が複雑な挙動を示すことが推察された。EOF解析により水平的な循環が形成されると考えられた西浦湖央部では、湖心となるN7でSW向きの流れ、南西に湖岸のあるN5でNW向きの流れが形成された。北東に湖岸のあるN6では風の吹き始めにN向きの流れが見られ、佐々木¹⁰⁾による模型実験のような湖心付近を境とした左右2つの水平循環流が一時的に存在した可能性がある。その後、N風の連吹でN7のSW向きの流れとN5のNW向きの流れが強まるに従い、N4でENE向き、N6でESE向きに流向が変化する様子が見られ、時計回りの大きな水平循環が形成されたと考えられる。この結果は、西浦湖央部ではNまたはWからの風により時計回りの大きな水平循環が形成されるとする村岡ら¹⁾の模型実験による報告と一致する。現地観測と定常状態まで一様風を与えた模型実験との結果が概ね一致したことから、西浦の水平循環流が、風から与えられた駆動力と地形効果によって形成されることが推察される。今後、他の風条件下の解析や移動観測の結果なども用いて、霞ヶ浦の水平循環の特性についてさらに解明する必要がある。

4. 結論

本研究では、北浦および西浦において実施された設置型ADCPによる多地点同時連続観測データを用いて、非成層期の霞ヶ浦における吹送流の特性について検討した。得られた知見は以下のようにまとめられる。

- (1) 霞ヶ浦の最上層の湖流は、いずれの地点でも湖上風の変化に良く対応し、風と同方向に形成される傾向が見られた。2層目から最下層にかけての湖流分布は非常によく類似しており、その流速は最上層の10～20%とかなり小さかった。
- (2) 鉛直循環により形成されると考えられる最上層と反対向きの流れは中・下層で観測された。中・下層の

湖流は、風向と地形との関係から地点ごとに異なって偏向することにより、水平的な循環を形成することが明らかとなった。

- (3) 本研究の対象期間に観測されたN～WNWの風条件下において、西浦で水平循環が形成される可能性が示唆された。Nからの風の連吹に対し、高浜入で反時計回り、西浦湖央部で時計回りの流れが中・下層に観測された。
- (4) 非成層期の霞ヶ浦の湖流は、風から与えられた駆動力と地形効果により循環流として形成される吹送流であることが、現地観測から明らかになった。

謝辞：観測の実施にあたり、霞ヶ浦漁業協同組合連合会と関係漁業協同組合の関係者各位、ならびに、きたうら広域漁業協同組合の関係者各位に多大なるご協力を頂いた。また、国土交通省関東地方整備局霞ヶ浦河川事務所ならびに(独)水資源機構利根川下流域総合管理所からは調査に対するご協力と貴重な観測データのご提供を頂いた。ここに記して感謝の意を表す。

なお、本研究は文部科学省「特別電源所在県科学技術振興事業補助金」の交付を受けて実施された。

参考文献

- 1) 村岡浩爾, 福島武彦: 霞ヶ浦(西浦)の湖流, 国立公害研究所研究報告, vol.19, 1981.
- 2) 田中昌宏, 石川忠晴: 日成層形成時の吹送流の特性について, 土木学会論文集, No.405/II-11, pp63-72.1989.
- 3) 銭新, 石川忠晴, 西部隆宏: 霞ヶ浦高浜入りにおける日成層形成時の湾水交換の数値シミュレーション, 海岸工学論文集, vol.44, pp1051-1055, 1997.
- 4) 小松伸行, 石井裕一, 本間隆満, 渡邊圭司, 根岸正美: EOF解析を用いた北浦の湖流変動要因の検討, 陸水学雑誌, vol.69, pp.39-49, 2008.
- 5) 湖沼技術研究会編: 湖沼における水理・水質管理の技術, 湖沼技術研究会, 2007.
- 6) 小松伸行, 石井裕一: 冬季の北浦における湖流観測, 茨城県霞ヶ浦環境科学センター年報, Vol.1, pp.114-121, 2006.
- 7) Preisendorfer, R. W.: *Principal component analysis in Meteorology and Oceanography*. Elsevier, Amsterdam, 1988.
- 8) 鶴田泰士, 石川忠晴: 小川原湖における風速分布の現地観測, 水工学論文集, vol.43, pp1043-1048, 1988
- 9) 平山彰彦, 和氣亜紀夫: 流況シミュレーションにおける水上風の補正, 水工学論文集, vol.42, pp703-708, 1988.
- 10) 佐々木道也: 霞ヶ浦の水塊構造について - I 模型実験による水塊の形成, 茨城県内水面水産試験場調査研究報告, vol.10, pp57-60, 1969.

(2008. 9. 30受付)