

諏訪湖において非一様風によって生じる 水平循環流に関する時系列的検討

STUDY ON THE TIME SERIES OF THE HORIZONTAL CIRCULATION
GENERATED BY THE NONUNIFORMITY OF WIND IN LAKE SUWA

豊田 政史¹・宮原 一道²・宮原 裕一³
Masashi TOYOTA, Kazumichi MIYAHARA and Yuichi MIYABARA

¹正会員 博 (工) 信州大学助教 工学部土木工学科 (〒380-8553 長野県長野市若里4-17-1)

²正会員 修 (工) 大東設計コンサルタント 水工部 (〒101-0025 東京都千代田区神田佐久間町3-38)

³薬博 信州大学准教授 山岳科学研究所山地水域環境保全学部門
(〒392-0027 長野県諏訪市湖岸通り5-2-4)

It has already been reported that the spatially nonuniformity of wind distribution over the lake and counterclockwise horizontal water circulation were observed in the strong north-west wind period at Lake suwa in the previous study. In this paper, it was examined the time series of this horizontal water circulation by means of the results of field measurement and a quasi 3-D numerical experiments assuming the various wind conditions.

The result indicated that ①The horizontal water circulation maintained by the existence of wind vortex due to the spatially nonuniform wind when the wind has fallen.② Wind history until the generation of the horizontal water circulation had an influence on the vortex scale.

Key Words :Lake Suwa, nonuniformity of wind, horizontal water circulation, vorticity

1. はじめに

日本の多くの湖沼において、人間活動の進展にともなう富栄養化が進行し、これまでにさまざまな富栄養化対策が行われてきた。しかし、一般に、富栄養化はアオコの発生や景観の悪化などの欠点がある反面、魚の生産量を増やすという利点をもつ¹⁾。一方、水質浄化は、利水・景観上の利点はあるが、魚の生産量を減らし、透明度の増大にともなう水草の生育域の拡大が船の航行の障害になるなどの欠点をもつ。このように、富栄養化と水質浄化はそれぞれの利点・欠点があるといえる。このため、われわれに求められていることは、湖沼の富栄養状態を解消することではなく、富栄養化でも水質浄化でも、人間の働きによって湖の生態系が変化する様子を予測し、それに基づいて多くの人々にとって望ましい湖の管理を行っていくことである¹⁾。

このような背景のもと、それぞれの湖沼の理想的な姿をめざして、従来からの物理・化学・生物学的な個々の検討のみではなく、湖の生態系の変化を広い視点でとらえるような研究が多くなされるようになってきた^{2)~5)}。

本研究で対象とする諏訪湖では、1960年代から長年

続いてきたアオコの発生量が、1999年以降になって大きく減少し、透明度が大きく上昇傾向を示すようになった⁶⁾。そのメカニズム解明のためには、生物・化学的な調査だけでなく、「水の動き」の調査が不可欠である。豊田ら⁷⁾は、諏訪湖のような浅い湖では吹送流が卓越すると考え、船に風向風速計と超音波ドップラー流速計を取り付け、風と湖流の同時観測を行った。その観測結果をもとに、湖上風の空間的な非一様性が湖流形成に与える影響について検討し、それを数値実験により確認した。その結果、諏訪地方の卓越風である西北西の強風時には、湖上風の空間的な非一様性によって、湖内において水平循環流が生じるという結論を得た。また、天野ら⁸⁾や矢島ら⁹⁾は、POM (Princeton Ocean Model) やELCOM (Estuary and Lake Computer Model)を用いて、湖流再現計算を行っているが、これらの計算において風応力を平面的に一様に与えていることにより再現性が低下することを報告している。石塚ら¹⁰⁾が行った琵琶湖における湖流計算においては、今後の課題として、実際には風の空間変化にともなう渦度の供給や水深の変化にともなう渦度の生成によって、夏季の表層に複数の環流が形成されるため、湖上風の風速分布を与えた計算を行う必要があると

のべている。

豊田ら⁷⁾の研究では、上述したように湖上風の風速分布を与えた計算を行っているが、湖内物質循環を検討する上で必要になると思われる水平循環流に関する時系列的な検討は行われていない。そこで本研究では、豊田ら⁷⁾の観測結果をさらに検討するとともに、数値実験により、水平循環流に関する時系列的な検討を行った。

2. 観測概要

図-1 に諏訪湖の概要および風・流速の測線と測点、風速・風向の連続観測点である諏訪特別地域気象観測所の位置を示す。また、図中には等深線も示してある。

ADCPによる流動観測は、2004年10月26日の11:00~14:00および27日の7:00~10:00、28日の7:00~10:00(以後、1回目と呼ぶ)、10:45~13:00(以後、2回目と呼ぶ)に行った。測点については、26、27日は、A、B、C測線上の計26点とし、B9~B1、C7~C1、A1~A10の順に1回ずつ、各測点において2分間以上船を停止させた状態で行った。また、28日は、諏訪湖全体を面的にとらえられるように、E-A-B-C-D1(1回目)、E-A-B-C-

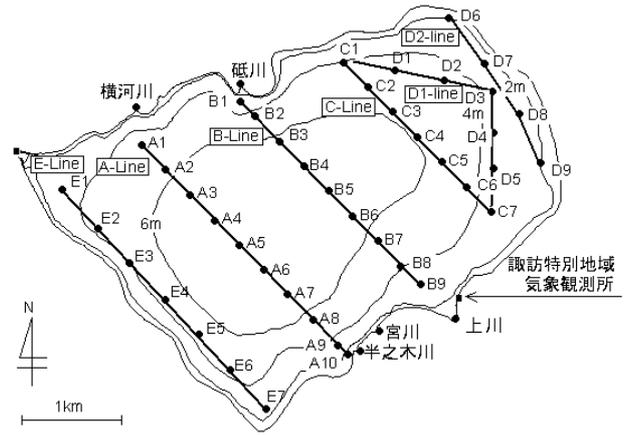


図-1 諏訪湖の概要と観測点の場所

D2(2回目)測線の順に曳航観測を行った。なお、26、27日は、各測点において、風速・風向(使用機器: R.M.Young社製 ULTRASONIC ANEMOMETER)、水温・電気伝導度(使用機器: 堀場製作所製マルチ水質モニタリングシステム U-21)、測定水深: 1mごと)を同時観測した。諏訪湖および現地観測の詳細については、文献7)を参照されたい。

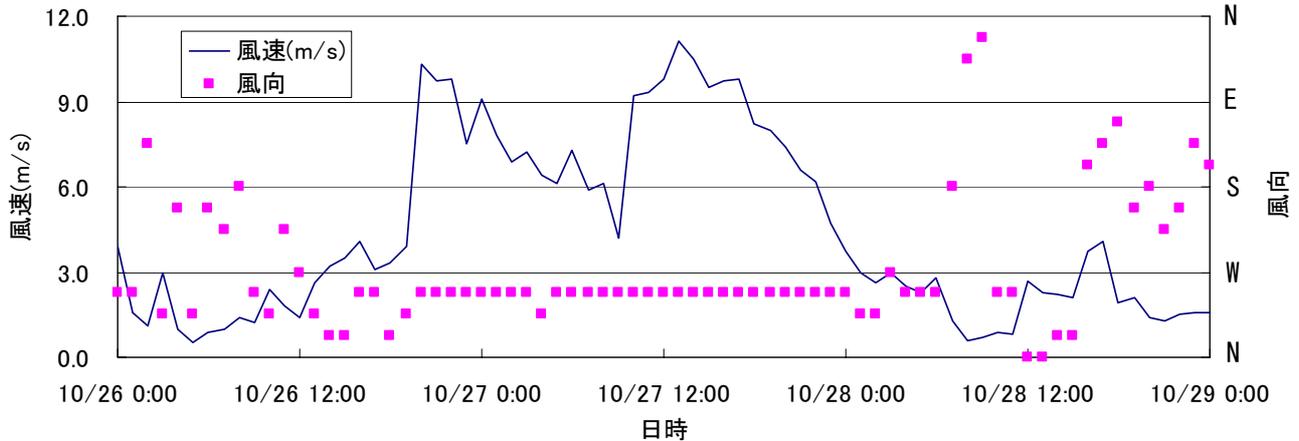


図-2 観測期間中の風速および風向(諏訪特別地域気象観測所)

3. 観測結果

(1) 風の観測結果

図-2に、観測期間中の諏訪特別地域気象観測所で観測された風速および風向を示す。26日の夕方から27日の夜遅くまで西北西の強風が吹き続け、風向を変えずに3m/s程度の風が6時間程度吹き続けた後に、微風へと変化している。

図-3に、27日の湖上風の観測結果を示す。豊田ら⁷⁾の検討から、西北西の強風時には、この図のように、湖の北東部の風速がかなり小さくなり、湖の東部で北風を示す傾向にあることがわかっている。

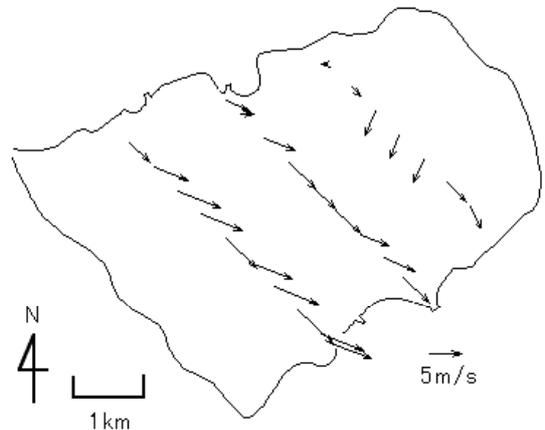


図-3 10月27日(7:00~10:00)の湖上風観測結果(豊田ら⁷⁾より引用)

(2) 湖流の観測結果

図4～図6に、27日、28日の1回目および2回目の水平方向流速観測結果を示す。ここで、(a)上層（水面下1.05m）、(b)下層（水面下4.05m）である。なお、図中の流速については、27日は各測点で計測したものの時間平均値を、28日は表示のために空間平均値を示した。27日、28日の1回目（図4、図5）には、図3に示した湖上風の特徴に起因する反時計回りの水平循環流⁷⁾が上層・下層ともに湖の東部でみられる。一方、28日の2

回目（図6）では、下層では同規模の循環流がみられるが、上層では循環流は弱まっており、2回目には、水面から循環流が消滅し始めていることが推測できる。紙面の都合上掲載しないが、上層における渦度の計算結果によると、湖北東部の $5.0 \times 10^5 \text{ (s}^{-1}\text{)}$ 以上（注：正の値は反時計回りを示す）の面積は、27日と28日の1回目の間では差がほとんどなかったが、28日の2回目で減少していた。その原因としては、風の急な弱まりによる渦度供給の減少と表面静振や表面波などが考えられる。

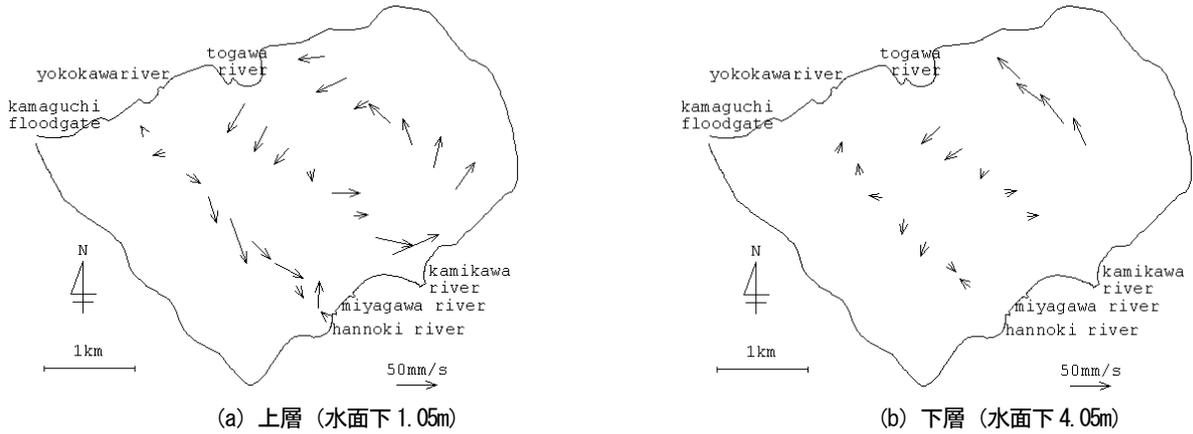


図4 10月27日(7:00~10:00)の流速観測結果（豊田ら⁷⁾より一部引用）

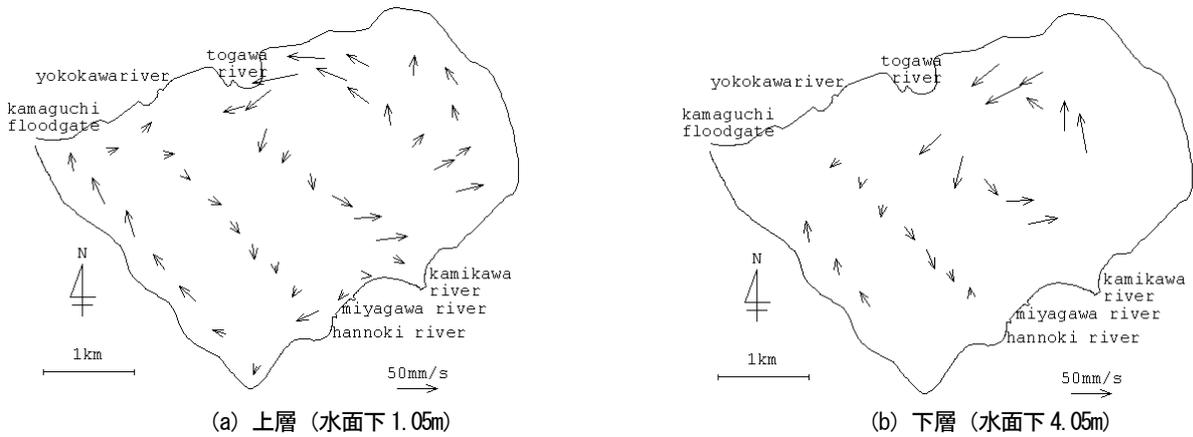


図5 10月28日(7:00~10:00)の流速観測結果

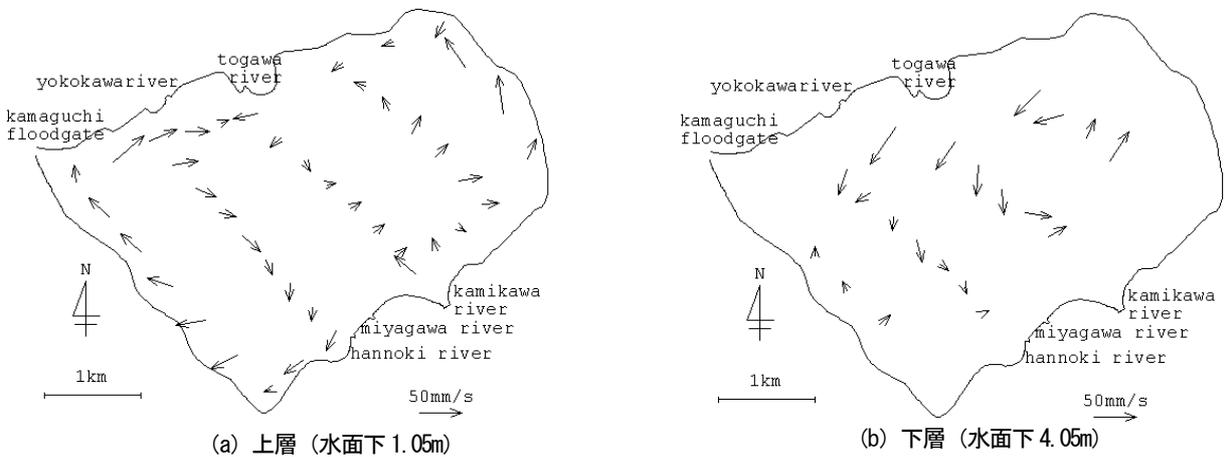


図6 10月28日(10:45~13:00)の流速観測結果

また、**図-5 (a)**、**図-6 (a)**において、湖の西側で時計回りの循環流があるように見受けられる。上述した渦度の計算では、実際に湖の西側で時計回りの渦度が得られている。強風が吹いていた27日には、湖西側のE測線の観測結果がないため、湖の西側の実際の流況はわからない。28日にみられた時計回りの循環の原因としては、湖上風の空間的な非一様性や水深の違いによる放射冷却の影響¹¹⁾などが考えられ、今後の検討課題としたい。

4. 数値実験による水平循環流の時系列的検討

前章の観測結果から、湖上風の空間的な非一様性によって形成された水平循環流が、風が弱まった後もある程度継続されることがわかった。ここでは、数値実験（解析）により、水平循環流に関する時系列的検討をし、観測結果の特徴との比較を行う。

(1) 解析条件

本研究では、豊田ら⁷⁾と同様に、**図-3**に示した風の現地観測結果の特徴に基づいて、**図-7**に示す領域Iで風速2m/sの西北西の風、領域IIで風速4m/sの北東の風、領域IIIで風速4m/sの北の風、領域IVで風速7m/sの西北西の風を吹かせた場合の解析（以後、条件aと呼ぶ）を行った。また、26日、27日ともに河川近傍の測点を除いて、水温は水平方向・鉛直方向にほぼ同様であったので、湖全体への流れに対しての影響は小さいと考えて、本研究においては密度変化を考慮しなかった。また、解析に考慮する流入河川は、流域面積の大きい上川・宮川・砥川・横河川の4河川のみ、流出河川は天竜川（釜口水門）とし（**図-1**参照）、各河川には、観測当日の流量を与えている。なお、湖流の解析には、富所¹²⁾の有限要素法による準三次元モデルを用いた。解析条件の詳細は、文献7)を参照されたい。

ここでは、**表-1**に示す4ケースの解析を行うことにより、水平循環流に関する時系列的検討を行った。まず、**case-1**では、水平循環流形成後に風が完全に止んだ場合を想定した。次に、3.(1)で述べたように、本観測時には強風が止んだ後に風向を変えずに弱風が吹いていたことがわかっているが、そのときの湖上風分布は観測していない。そこで強風が止んだ後の条件として、弱い一様風（**case-2**）と弱い非一様風（**case-3**）を与えた場合を想定した。さらに、最初から弱い非一様風を与えた場合（**case-4**）に、どの程度の規模の水平循環流ができるかを検討した。

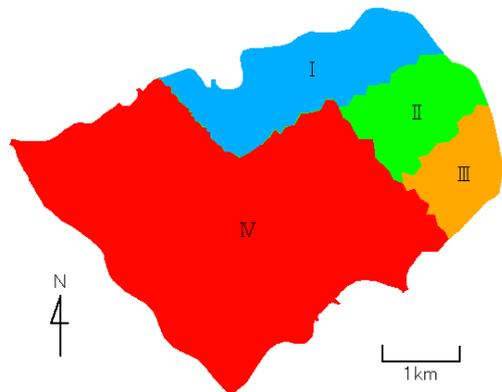


図-7 解析領域区分

表-1 解析条件

| | |
|--------|-------------------------------------------------|
| case-1 | 条件aの非一様風を15時間吹送後、風を止める。 |
| case-2 | 条件aの非一様風を15時間吹送後、2.1m/sの西北西の一様風を与える。 |
| case-3 | 条件aの非一様風を15時間吹送後、条件aの30%（最大2.1m/s）の風速の非一様風を与える。 |
| case-4 | 計算開始から、条件aの30%（最大2.1m/s）の非一様風を与える。 |

(2) 解析結果

図-8、**図-9**に、それぞれ上層（水面下1.05m）および下層（水面下4.05m）における**case-2**の水平方向流速結果（解析開始15時間後、21時間後）を示す。これらの図から、15時間後には、湖の東部で、非一様風による反時計回りの水平循環流が上層、下層ともに認められるが、21時間後には、その循環流は消滅していることがわかる。このことは、本解析で取り扱った規模の水平循環流形成時には、その後に渦度を持たない2m/s程度の一様風が吹いた場合、循環流は消滅することを示している。なお、ここには示さないが、**case-1**の解析結果は、**case-2**とほぼ同様であった。

図-10に、**case-3**における上層（水面下1.05m）および下層（水面下4.05m）の水平方向流速結果（解析開始21時間後）を示す。**図-8**および**図-9**の右図と比較すると、**case-2**とは異なり、上層・下層ともに規模は小さくなっているものの、循環流が存在していることがわかる。

ここで、**図-2**の風の観測結果を鑑みると、28日の観測1回目は、強風のあとに弱風が6時間吹き続けた直後であり、ここでの解析開始21時間後と近い状態であると考えられる。**図-8**および**図-9**の右図と**図-10**を、観測結果である**図-5**と比較すると、**図-10**の方が循環流が残っている観測結果に近い。このことから、今回の観測時における強風が止んだ後の弱風は一様風ではなく、風速分布は不明であるが渦度を持った非一様風であったことが予想される¹³⁾。

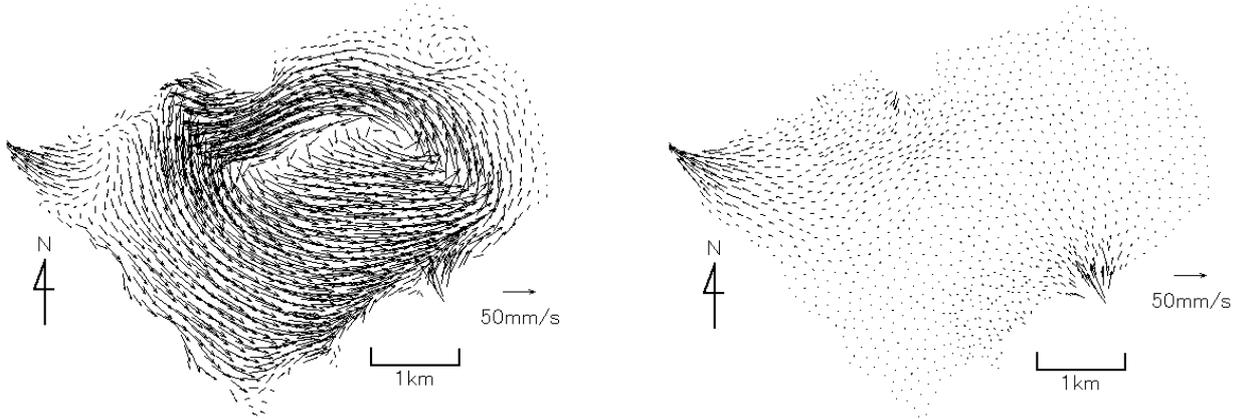


図-8 case-2の解析結果（上層（水面下1.05m）；左：解析開始15時間後，右：解析開始21時間後）

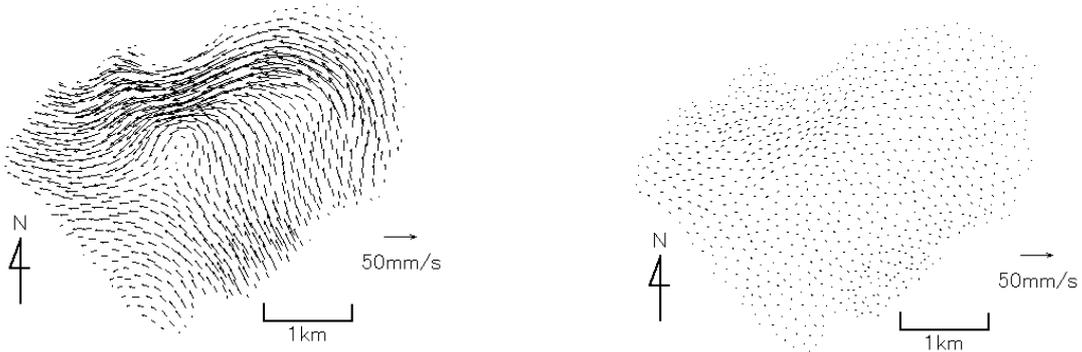


図-9 case-2の解析結果（下層（水面下4.05m）；左：解析開始15時間後，右：解析開始21時間後）

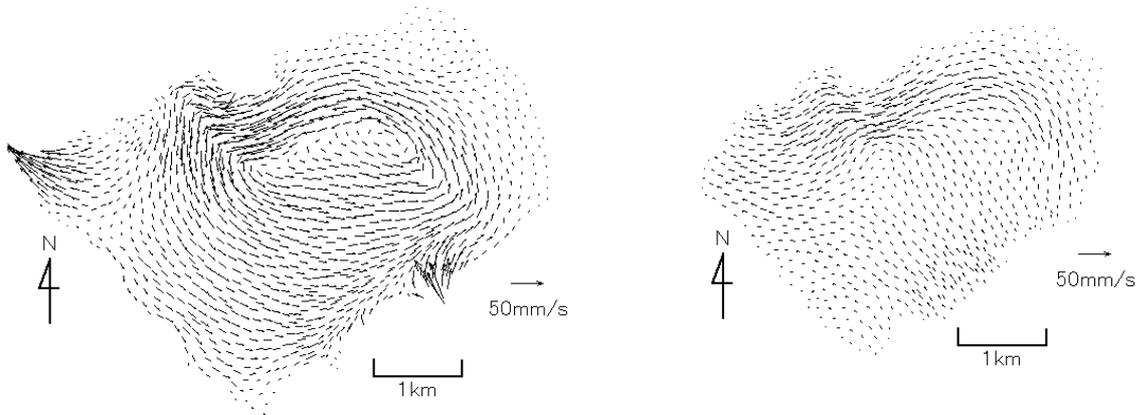


図-10 case-3の解析結果（解析開始21時間後；左：上層（水面下1.05m），右：下層（水面下4.05m））

次に、湖心（図-1中のB5地点）における全ケースの渦度（上層；水面下1.05m）の時間変化を図-11に示す。すべてのケースにおいて、渦度は反時計回りの循環を示す正の値を示している。ケースごとに比較すると、case-1とcase-2の間にはほとんど差がみられない。case-3では、風速が小さくなるとともに渦度も減少するが、解析開始20時間後くらいからはほぼ一定値をとっている。case-4では、case-3と比べて渦度は小さく、十分に時間が経過してもcase-3の渦度には達しない。このことは、湖内の水平循環流の形成規模に風の履歴が影響することを意味し

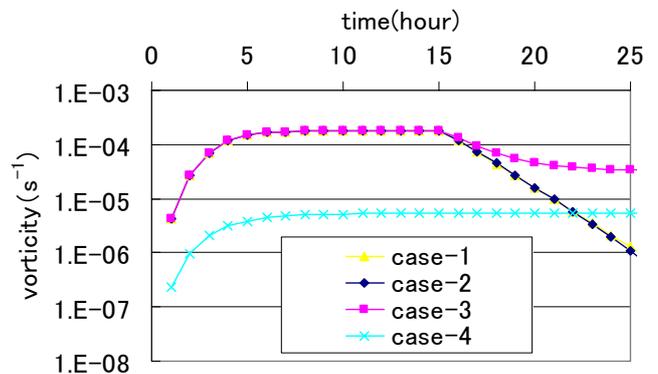


図-11 湖心における渦度の時間変化

ている。また、すべてのケースの解析結果から、今回与えた非一様風によって生じる水平循環流が定常状態になるまでには5時間程度の時間を要することもわかった。

5. おわりに

本研究では、諏訪湖において豊田ら⁷⁾によって検証された諏訪地方の卓越風である西北西の強風時に生じる反時計回りの水平循環流について、現地観測と数値実験により、時系列的検討を行った。その結果、以下の結論が得られた。

①水平循環流形成時において、その後弱い一様風が吹いた場合には、風が完全に停止した場合と同様に、循環流は消滅する。一方、渦度をもつ弱い非一様風が吹いた場合には、循環流は規模を小さくしながらも継続する。

②水平循環流の形成規模には、同時刻の風速分布だけでなく、それ以前に吹いた風の履歴が影響する。

今後は、諏訪湖において、石川ら¹⁴⁾が述べている「能動的湖沼管理手法」の検討に資するような諏訪湖の物質輸送および水質変化の理解のためのさらなる検討を行っていく予定である。具体的には、まず、さまざまな条件下での湖内流速観測結果を増やす。それに並行して、湖周における複数地点における風速・風向の観測により、湖上風の時空間特性の把握および定量化を行う。そして、それらの風に起因する湖流の基本的特性について、観測結果との検証を行いながら、数値実験を用いて検討するというような手順を考えている。

謝辞: 本研究をすすめるにあたり、信州大学名誉教授富所五郎先生から適切なお指導・ご助言をいただきました。データ整理および現地観測にあたっては、本学卒業生である寺沢和晃氏（現一宮市）に多大なるご協力をいただきました。また、現地観測では、株式会社エス・イー・エイの疋田真氏、降矢利勝氏および信州大学山岳科学研究所の池中良徳氏（現北海道大学）、犬塚良平氏および本学修了・卒業生である松浦和也氏（現パブリックコンサルタント）、八木剛氏（現長野県）、萩庭康光氏（現須坂市）にご協力をいただきました。気象庁長野地方気象台より風向・風速データを、長野県諏訪建設事務所より河川流量データを提供していただきました。また、本研究は日本学術振興会科学研究費補助金基盤(A)17201012「水質浄化対策が引き起こす富栄養湖の生態系構造の変化とそのメカニズムの解明（研究代表者：花里孝幸）」の補助を受けている。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 花里孝幸：湖の浄化における下水処理場のはたらきと、水質浄化に伴う生態系の変化—浄化が進んだ諏訪湖を例として—、月刊下水道第29巻、第3号、pp.66-71, 2006.
- 2) 奥宮英治・中村由行・中山恵介・井上徹教・石飛裕：湖沼の物質循環に及ぼす夜間の水面冷却の影響、水工学論文集第45巻、pp.1147-1152, 2001.
- 3) 鶴田泰士・石川忠晴・西田修三・成田舞・藤原広和：小川原湖におけるヤマトシジミの繁殖環境について、土木学会論文集 No.705/II-59, pp.175-187, 2002.
- 4) 池永均・向山公人・大島伸介・吉本健太郎・山田正：網走湖における青潮発生に関する現地観測と数値解析の比較、土木学会論文集 NO.775/II-69, pp.11-27, 2004.
- 5) 西田修三・鈴木誠二・中辻啓二：外部擾乱に対する小川原湖の水質応答特性、水工学論文集第50巻、pp.1333-1338, 2006.
- 6) 信州大学山岳科学総合研究所・沖野外輝夫・花里孝幸：アオコの消えた諏訪湖、信濃毎日新聞社、319p, 2005.
- 7) 豊田政史・宮原一道・萩庭康光・寺沢和晃・疋田真・降矢利勝・宮原裕一・富所五郎：諏訪湖における湖上風の非一様性とそれが湖流形成に与える影響、水工学論文集第50巻、pp.1303-1308, 2006.
- 8) 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、水工学論文集第46巻、pp.1085-1090, 2002.
- 9) 矢島啓・石黒潤・Jorg IMBERGER：湖山池において海陸風が支配的な場で発生する内部波に関する研究、水工学論文集第48巻、pp.1399-1404, 2004.
- 10) 石塚瞳・北澤大輔・金野祥久：琵琶湖物理環境の数値計算における乱流モデルの比較検討、第19回数値流体力学シンポジウム、C2-4, 2005.
- 11) 奥宮英治・中村由行・中山恵介・井上徹教・石飛裕：湖沼の物質循環に及ぼす夜間の水面冷却の影響、水工学論文集第45巻、pp.1147-1152, 2001.
- 12) 富所五郎：FEMによる浅水域における三次元流動解析、第27回海岸工学講演会論文集、pp.453-457, 1980.
- 13) 中山恵介・芝口芳行・日向博文・石川忠晴：東京湾の湾奥における時計回りの循環と収束現象の解明、水工学論文集第49巻、pp.1297-1302, 2005.
- 14) 石川忠晴・笹島悠達・鶴田泰士・天野光歩・遠藤真一：小川原湖の環流特性について、水工学論文集第52巻、pp.1261-1266, 2008.

(2008. 9. 30受付)