

# 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

## NONUNIFORMITY OF WIND DISTRIBUTION OVER LAKE SUWA AND THEIR EFFECT ON LAKE CURRENT

豊田 政史<sup>1</sup>・宮原 一道<sup>2</sup>・萩庭 康光<sup>3</sup>・寺沢 和晃<sup>4</sup>・

足田 真<sup>5</sup>・降矢 利勝<sup>5</sup>・宮原 裕一<sup>6</sup>・富所 五郎<sup>7</sup>

Masashi TOYOTA, Kazumichi MIYAHARA, Yasumitsu HAGINIWA, Kazuaki TERAZAWA,  
Makoto HIKIDA, Toshikatsu FURIYA, Yuichi MIYABARA and Goro TOMIDOKORO

<sup>1</sup>正会員 工修 信州大学助手 工学部社会開発工学科 (〒380-8553 長野市若里4-17-1)

<sup>2</sup>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)

<sup>3</sup>日本道路株式会社 (〒105-0004 東京都港区新橋1-6-5)

<sup>4</sup>静岡市建設局土木部河川課 (〒420-8602 静岡市葵区追手町5-1)

<sup>5</sup>株式会社エス・イー・エイ 営業部 (〒272-0127 千葉県市川市塩浜2-23 IUビル4F)

<sup>6</sup>薬博 信州大学助教授 山地水環境教育研究センター (〒392-0027 諏訪市湖岸通り5-2-4)

<sup>7</sup>正会員 工博 信州大学教授 工学部社会開発工学科 (〒380-8553 長野市若里4-17-1)

Wind has an important role in the behavior of lake current. In this study, the field measurement of wind and current distribution was performed simultaneously in Lake Suwa. The results proved the spatially nonuniformity of wind distribution over the lake and counterclockwise horizontal water circulation in the lake when the strong north-west wind was observed. It was examined the effect of spatially non-uniform wind on the lake current using a quasi 3-D numerical model by comparing with the calculation result when the spatially uniform wind all over the lake was assumed. In result, the horizontal water circulation obtained by the field measurement was recognized by considering the measured wind distribution. This showed that spatially nonuniformity of wind distribution had a great influence on the movement of lake current.

**Key Words** : Lake Suwa, nonuniformity of wind, wind driven current, horizontal water circulation

### 1. はじめに

湖内における物質循環過程を把握するためには、湖流に関する研究が不可欠であり、これまで数多くの研究が行われてきている。それらの研究は、湖流形成要因(風、河川流量、水深、内部波、水温など)ごとに検討されている<sup>1), 2)</sup>が、本研究で対象とする諏訪湖のような浅い湖においては、風が湖流形成の大きな支配要因となる。風成流に関する研究は、1970年代後半から1980年代に盛んに行われ<sup>3), 4), 5), 6)</sup>、エクマンスパイラルやラングミュア循環および風応力の評価方法などに関する検討がなされてきた。その後は、湖上風の空間的な非一様性に着目した琵琶湖におけるEndoh et al.<sup>7)</sup>や小川原湖における鶴田・石川<sup>8)</sup>の研究がみられる程度になった。そのような研究は、内湾域においては灘岡<sup>9)</sup>らや梶原<sup>10)</sup>も行っている。Endoh et al.<sup>7)</sup>は、湖上で3隻の船による風の定

点観測を行い、その結果と線形二層モデルによる流れ場計算により、15年間の観測で得られた環流<sup>11)</sup>が湖上風の空間的な非一様性に起因する可能性を示した。鶴田・石川<sup>8)</sup>は、風向風速計を取り付けた船を走行させて湖上風の現地観測を行い、湖内の風の分布特性は、湖沼周辺の地形の影響を強く受けていることを明らかにした。さらに、現地観測で得られた風の分布を湖流の数値計算に入力し、様な代表風速を与えた場合と比べて、風によって誘起される湖流がかなり異なることを示した。

上述の2つの研究では、湖上風の空間的な非一様性が湖流形成に影響を及ぼすという結論を得ているが、検討に用いた風と湖流に関する観測データの同時性はない。そこで本研究では、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い、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、その結果を数値実験により確認する。

## 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，そして風速・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．諏訪湖に流入する河川は，全部で 31(一級河川 15，準用河川 2，普通河川等 14)河川存在する．流域面積で見ると上川が一番大きく 245.3km<sup>2</sup>，ついで宮川 94.1km<sup>2</sup>，砥川 60.1km<sup>2</sup>，横河川 24.5km<sup>2</sup>となっており，これら 4 河川で諏訪湖全流域面積の約 8 割を占めている<sup>12)</sup>．また，流出河川は天竜川のための 1 河川であり，流入した河川水は釜口水門より天竜川として流出している．図-2 に諏訪湖の周辺地形を示す．湖の東側および西側に山が迫っており，北西 - 南東方向に開けた地形となっている．

現地観測は，2004 年 10 月 26 日の 11:00～14:00 および 27 日の 7:00～10:00 に行った．測点については，諏訪湖全体を面的にとらえられるように，A，B，C 測線上の計 26 点とし，両日とも 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．A-B-C 測線の間隔は約 1000m，測線上の測点間の距離は，河口部や湖岸近くを除いて約 350m とした．観測項目は，風速・風向および流速である．風速・風向については，RM YOUNG 社製 ULTRASONIC ANEMOMETER をボートに固定し，各測点での観測時の方角調整は方位磁針を使用しながらボートの回転に合わせて手動で行った．サンプリング間隔は 0.25s とし，1s ごとにそれらの平均値を出力した．データの編集については，まず風向を各点で X(東向き正)と Y(北向き正)の二次元ベクトルから 16 方位で算出し，その中で最も多いものを主風向とした．風速については，二次元ベクトルの和の平均値をその測点での風速とした．なお，風向風速計の水面からの高さは約 2.5m である．流速については，RD-Instruments 社製 Work Horse ADCP 1200kHz - ZedHed を使用し，層厚 25cm，サンプリング間隔 11s，測定精度 0.28cm/s 以下に設定した．

## 3. 観測結果

### (1) 湖上風の観測結果

図-3に，10月26日および27日の諏訪特別地域気象観測所における風速・風向を示す．なお，点線で囲まれた範囲が観測時の風速・風向である．26日の観測時間中は南西の風から北西の風へ変化し，風速は1.4～3.2m/sと小さい．一方，27日は前夜から西北西の風速7m/s程度の風が連吹している．

図-4に，26日の湖上での風の観測結果を示す．A測線では比較的風は弱く，B，C測線も含め南東に行くほど風は強くなるという傾向がみられた．風向は，A測線で

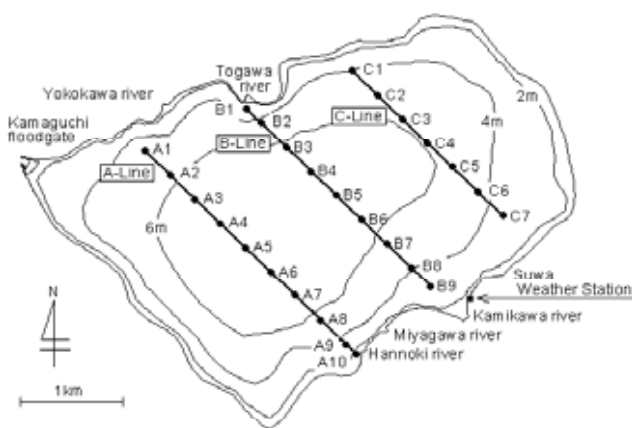


図-1 諏訪湖の概要と観測点の場所

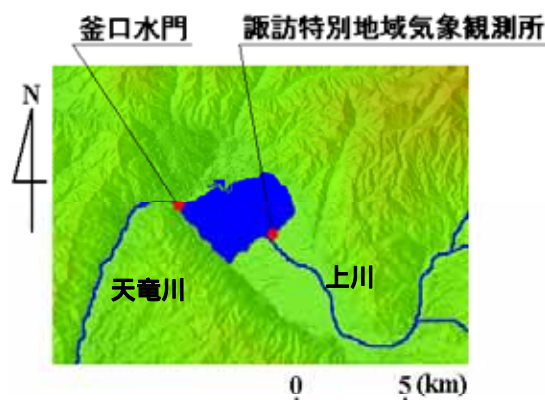


図-2 諏訪湖の周辺地形

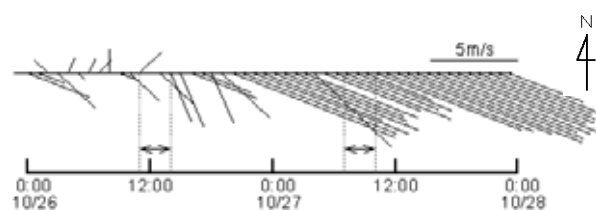


図-3 観測期間中の風速および風向  
(諏訪特別地域気象観測所)

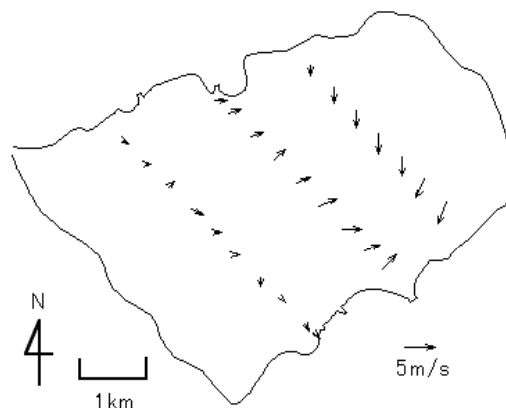


図-4 10月26日の湖上での風の観測結果

は西北西，B測線では西南西，C測線では北を示しており，特にB，C測線での傾向は明瞭である．しかし，**図-3**をみると，観測時間中に風向が変化しているため，これらの特徴が一時的な風の弱まりによる可能性があり，この観測結果を湖上風の分布とはいえない．

**図-5**に，27日の湖上での風の観測結果を示す．A，B測線の大半で，**図-3**に示した諏訪特別地域気象観測所の観測値と同様な5.0～8.0m/sの西北西から北西の風となっている．一方，C3～C5で約4.0m/sの北北東の風，C7で約4.0m/sの北北西の風となっており，C測線では北風が吹いている傾向にあるといえる．また，26日と同様にB1，B2，C1，C2の4測点での風速が他の測点に比べてかなり小さくなっており，その差は約3～5m/sである．B1，B2とC1，C2の観測時刻が1時間弱ずれていることから，この差を一時的な風の弱まりによるものとは考えにくい．これらの傾向は，26日の観測結果と同様であり，湖周辺の地形の影響を受けている可能性が大きい．この観測時間中においては，風向の変化はなく，観測結果は西北西の強風時における湖上風の特徴を表していると思われる．

## (2) 湖流の観測結果

湖流に影響を及ぼす要因として，風のほかに河川流量が考えられる．**表-1**に，観測日および1994年4月～2000年3月の平均流量<sup>13)</sup>を示す．宮川では平均流量に近いが，他の3河川では平均の3～5倍程度の流量である．

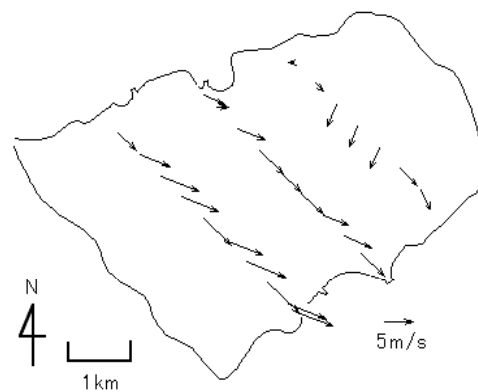
**図-6**および**図-7**に，10月26日および27日の水平方向流速観測結果を示す．ここで，(a)表層（水面下0.55m），(b)中層（水面下約2.05m），(c)底層（水面下4.05m）である．なお，**図中**の流速は各測点で計測したものの時間平均値を示している．

**図-6(a)**をみると，A測線では2.5cm/s以下の小さな流速になっていることがわかる．また，B測線の北側では，B1を除いて，西から南向きに4.0cm/s程度，南側では南東から東向きに10.0cm/s程度の大きな流れが生じている．さらに，C測線では主に南西から南向きに4.0cm/s程度の流れが生じている．**図-4**に示す風の観測結果とあわせて考えると，表層の流れは，B測線の北側を除いて，風向とほぼ同じ傾向にある．B測線の北側で風向と流向が一致しない理由としては，砥川からの河川水の影響あるいは，湖底地形に起因する流れの影響が考えられる．

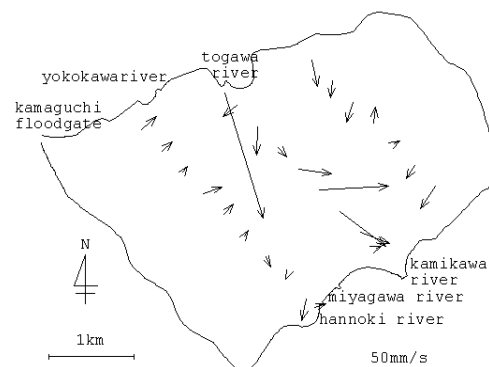
また，**図-6(a)～(c)**の全層を通して，明確ではないが，沖野<sup>14)</sup>がのべているように，湖の北東側で反時計回り，湖の南西側で時計回りの循環があるようにみえる．

**表-1** 観測日と1994年4月～2000年3月の平均河川流量(m<sup>3</sup>/s)

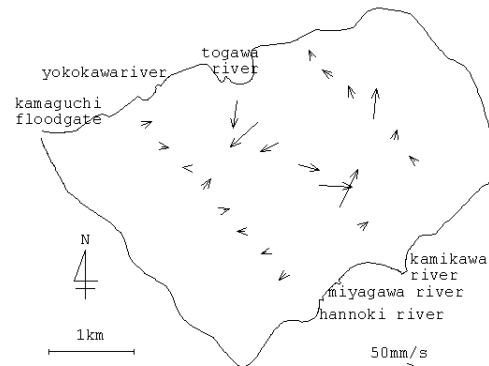
|        | 上川   | 宮川  | 砥川  | 横河川 |
|--------|------|-----|-----|-----|
| 10月26日 | 16.9 | 3.4 | 7.3 | 1.7 |
| 10月27日 | 15.6 | 2.8 | 6.5 | 1.4 |
| 平均値    | 5.6  | 3.0 | 2.4 | 0.3 |



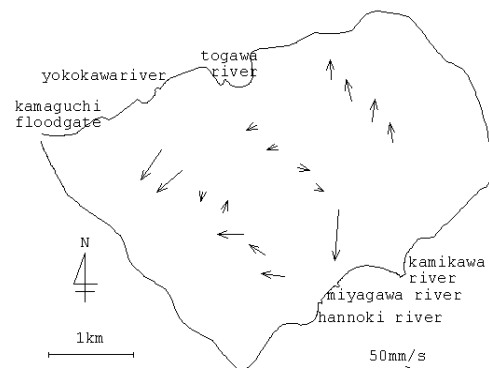
**図-5** 10月27日の湖上での風の観測結果



(a) 表層（水面下0.55m）

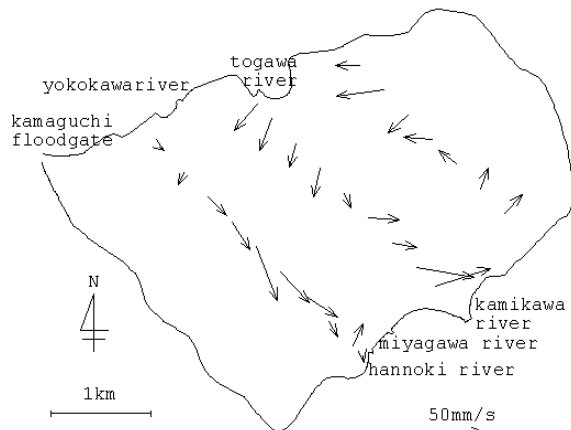


(b) 中層（水面下2.05m）

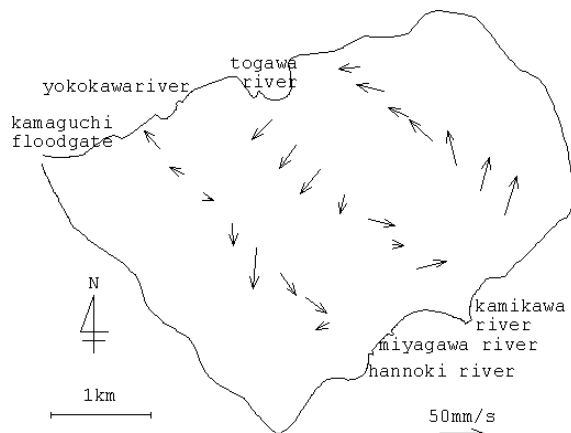


(c) 底層（水面下4.05m）

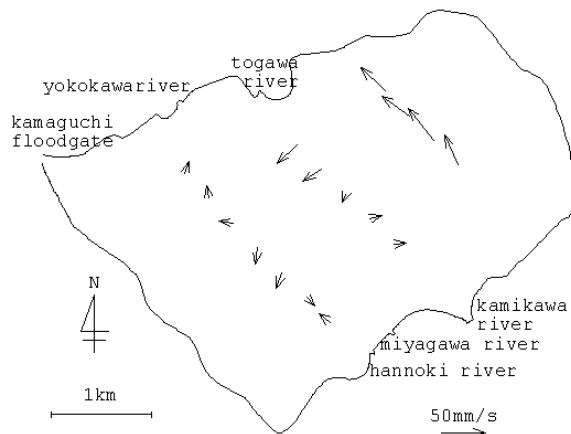
**図-6** 10月26日(11:00～14:00)の流速観測結果



(a) 表層 (水面下 0.55m)



(b) 中層 (水面下 2.05m)



(c) 底層 (水面下 4.05m)

図-7 10月27日(7:00~10:00)の流速観測結果

図-7(a)に示す表層の流速分布をみると、A1・A2・A9・A10を除く湖全体で反時計回りの水平循環流が形成されていることがわかる。この水平循環流は、図-5に示したA測線とB測線の西北西～北西の強風により、南東方向の吹送流が形成され、それを補うように相対的に風が弱い湖の北東側で北から西向きの流れが形成されたものと考えられる。図-7(b)、図-7(c)においても、流速は小さくなるが、表層と同じように反時計回りの水平循環流が形成されており、強風によるせん断応力の影響が水底まで及んでいることがわかる。また、すべての図において、A1・A2・A9・A10において他の地点と比べて流速が小さくなっている、あるいは流向の傾向が異なっており、流入河川あるいは湖岸形状の影響を受けていることが予想される。

また、図-6(a)・図-7(a)より、碓氷川河口付近に位置するB1での流れは、26日は南方向に20.0cm/s程度であったが、27日には南西方向に5.0cm/s程度へと変化していることがわかる。表-1に示す碓氷川の流量には、26日と27日で大きな差はみられない。したがって、26日は河川水により碓氷川河口部から沖方向への流れが形成されるが、27日は河川による流れが北西の強風に起因する水平循環流によって打ち消されたと考えられる。

#### 4. 湖上風の空間的な非一様性が湖流形成に与える影響

前章の10月27日における観測結果の考察では、湖上風の空間的な非一様性が湖流形成に与える影響が大きいと推測した。本章では、数値実験(解析)により、湖上風の空間的な非一様性が湖流形成にどの程度影響を及ぼすかを検討し、前章の仮説を検証する。

##### (1) 解析条件

本研究では、風速 7m/sの西北西の風を湖上に一様に吹かせた場合(case-1)と、前章(1)の現地観測結果の特徴に基づいて、図-8に示す領域で風速 2m/sの西北西の風、領域で風速 4m/sの北東の風、領域で風速 4m/sの北の風、領域で風速 7m/sの西北西の風を吹かせた場合(case-2)の比較を行う。本研究では、上述のような簡便な手法をとったが、鶴田・石川<sup>8)</sup>は、湖上風の空間的な非一様性を考慮した数値解析を行うにあたり、観測データを内外挿した風ベクトルを作成して湖流解析を行っており、今後はこのような方法による解析結果と比較する必要があると思われる。なお、湖流の解析には、富所<sup>15)</sup>の有限要素法による準三次元モデルを用い、本解析条件では、風の影響が支配的であると考え、密度変化は考慮しなかった。

まず、湖流解析に用いた解析メッシュを図-9に示す。

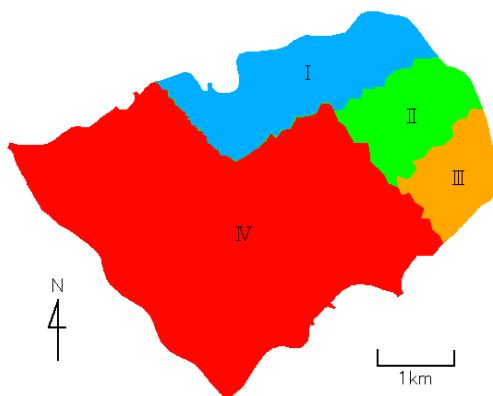


図-8 解析領域区分

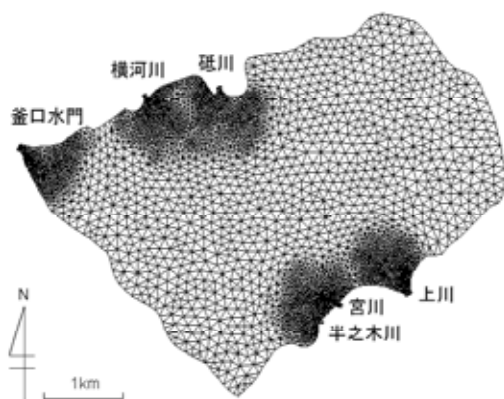
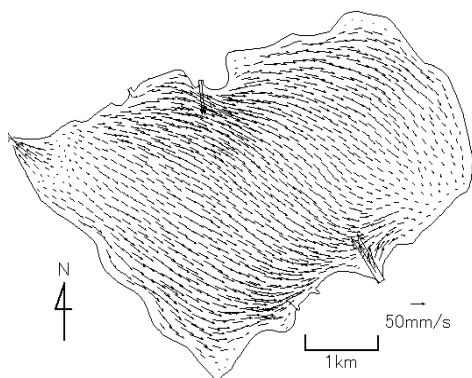
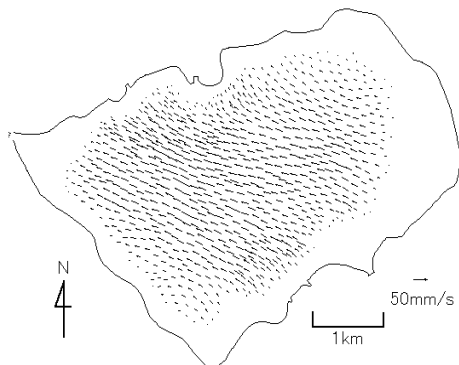


図-9 解析メッシュ（節点数 4000，要素数 7687）



(a) 表層（水面下 0.55m）



(b) 底層（水面下 4.05m）

図-10 湖流解析結果（一様風，case-1）

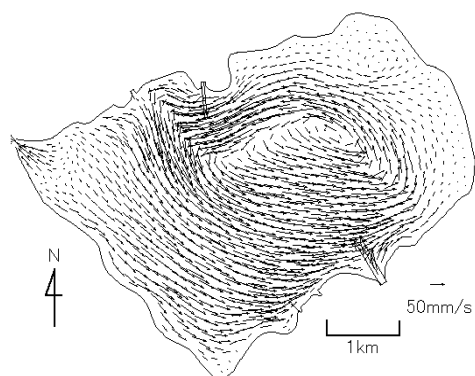
流量の変化が大きいと予測される流出・流入河川の河口付近は細かいメッシュを配置しており，節点数は 4000，要素数は 7687 である．

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）とした．ただし，宮川は諏訪湖に到達する直前で，宮川と半之木川の 2 本に分岐している．そこで本解析では，流量に関しては観測値を 2 で割ったものを宮川と半之木川にそれぞれ与えた．解析において，流入河川の境界条件として表-1 に示す 10 月 27 日の流量観測値を与え，解析対象領域全体の初期条件として流速 0m/s を与えて定常解を求めた．これは，流速観測前 15 時間に 3～10m/s の西北西～北西の風が連吹していたので，再現計算として適当と考えたためである．

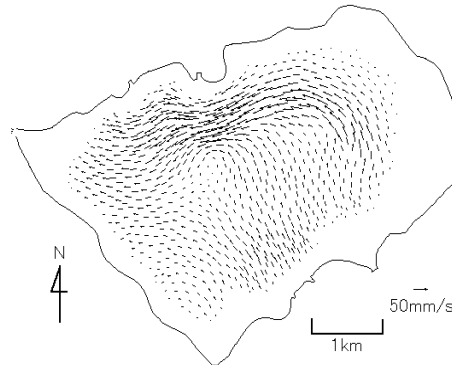
## (2)解析結果

図-10 に case-1，図-11 に case-2 の水平方向流速計算結果を示す．ここで，(a) 表層（水面下 0.55m），(b) 底層（水面下 4.05m）である．なお，流入河川の影響をみるために，河川流量を表-1 に示す平水時流量とした解析も行ったが，解析結果にはほとんど差がみられなかった．

図-10(a) では，湖の西部で一様風に呼応して南東方向，湖の東部では湖岸地形に沿った南～東方向の流れが形成されている．図-10(b) では，湖全域で表層とは逆向きの西方向の流れがみられる．これは，一様風によって生じ



(a) 表層（水面下 0.55m）



(b) 底層（水面下 4.05m）

図-11 湖流解析結果（風の分布を考慮，case-2）

た鉛直循環流と思われる。

図-11(a)では、図-10(a)とは異なり、湖の東部で大きな水平循環流がみられる。これは、図-7(a)の観測結果の傾向と一致している。また、図-11(b)においても、湖の北東部で強い反時計回りの循環流が形成されており、図-7(c)の観測結果と傾向と一致している。ただし、上川・宮川沖の流れにおいては、図-7(c)と異なり北向きとなっており、観測結果のような湖の東部における全層での水平循環はみられない。以上の結果から、湖上風の非一様性を考慮することにより、おおむね観測結果を再現できたといえる。

## 5. おわりに

諏訪湖において、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。本研究で得られた結論は以下の通りである。

諏訪湖において、湖上風は空間的な非一様性が強い。これは、周辺地形の影響であると推測される。特に、諏訪湖周辺で西北西の強風が吹くときには、湖の北東部における風速はかなり小さく、湖の東部においては北風となる。このとき、湖の東部で反時計回りの水平循環流が生じ、弱風時に現れる河川水あるいは湖底地形に起因すると思われる流れはみられなくなる。

上述の強風時における現地観測結果に基づいて、湖上風の空間的な非一様性を考慮した湖流解析を行った。その結果、湖流観測で得られた反時計回りの水平循環流を再現することができた。このことから、湖上風の空間的な非一様性が湖流形成に大きな影響を及ぼすといえる。

今後は、湖周辺における風の現地観測を行い、諏訪湖における風の分布特性を調べる予定である。また、それと並行して、地形の影響を表現できる風の解析モデルを現在構築中である。そして、最終的には風の時空間的な分布を考慮した湖流解析を行い、諏訪湖における物質循環過程を解明していきたい。

謝辞：現地観測では、信州大学山地水環境教育研究センターの池の中良徳氏、犬塚良平氏および本研究室修了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NIPPOコーポレーション）に多大なるご協力をいただきました。また、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) Emery, K. O. and Csanady, G. T. : Surface Circulation of Lakes and Nearly land-Locked Seas, Proc.Nat. Acad. Sci. Vol.70, No.1, pp.93-97, 1973.
- 2) 大本照憲, 矢北孝一, 福島博文: 湧水を伴う湖沼の水平対流と水質特性, 水工学論文集第 45 巻, pp.1183-1188, 2001.
- 3) 余越正一郎, 富所五郎: 風による諏訪湖の流動特性, 土木学会論文報告集, 第 276 号, pp.53-63, 1978.
- 4) 石川忠晴, 鶴谷広一, 富所五郎, 福島武彦: 湖面に作用する風応力の検討(中間報告), 第 30 回水理講演会論文集, pp.763-768, 1986.
- 5) 大久保賢治, 村本嘉雄: 琵琶湖南湖の湖流観測 - 流速・濁度の鉛直分布 -, 京都大学防災研究所年報, 第 29 号, B-2, pp.549-560, 1986.
- 6) 檜谷治, 道上正規, 鈴木幸一: 湖山池における吹送流観測, 第 32 回水理講演会論文集, pp.311-316, 1988.
- 7) Endoh, S., Watanabe, M., Nagata, H., Maruo, F., Kawae, T., Iguchi, C., and Okumura, Y. : Wind Fields over Lake Biwa and Their Effect on Water Circulation, Jpn. J. Limnol., 56-4, pp. 269-278, 1995.
- 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, 水工学論文集第 43 巻, pp.1043-1048, 1999.
- 9) 灘岡和夫, 二瓶泰雄・吉野忠和: 東京湾における風系の時空間変動特性の実態と湾内海水流動への影響について, 海岸工学論文集第 44 巻, pp.396-400, 1997.
- 10) 梶原義範ら: 3 次元数値モデルによる有明海の流況解析と気象条件等に対する応答特性について, 土木学会論文集 No.789/ -71, pp.83-92, 2005.
- 11) Endoh, S. and Okumura, Y. : Gyre System in Lake Biwa Derived from Recent Current Measurements, Jpn. J. Limnol., 54-3, pp.191-197, 1993.
- 12) 長野県諏訪建設事務所, (財)河川環境管理財団: 諏訪湖浚渫に関するモニタリング調査委員会 第 3 回委員会資料, pp.59-67, 1999.
- 13) 長野県: 水質測定結果(平成 6 年度~平成 11 年度).
- 14) 沖野外輝夫: 湖沼の生態学, pp.80-81, 共立出版, 2002.
- 15) 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.

(2005.9.30受付)