資料 [Limnological record]

ADCP を用いた諏訪湖における流動観測

豊田政史¹⁾・平良綾子²⁾・疋田 真³⁾・宮原裕一⁴⁾

Field measurements of lake currents in Lake Suwa by means of ADCP

Masashi TOYOTA¹⁾, Ayako TAIRA²⁾, Makoto HIKIDA³⁾ and Yuichi MIYABARA⁴⁾

Abstract

Numerous studies in biological and chemical processes have been conducted in Lake Suwa, only a few of which were concerned with physical processes that strongly affect a lake's biochemical dynamics. To gain a better understanding of the corresponding physical dynamics (e.g., current pattern and discharge), we deployed an updated current instrument (i.e., an Acoustic Doppler Current Profiler, ADCP), which is accepted world-wide for its accuracy and high resolution as well as for its ability to resolve the spatial and temporal variations of currents. Using the ADCP, we measured discharges of the dominant inflows and current patterns of a submerged macrophytic area near the shore together with an outflowing area (nearby Kamaguchi floodgate). Our results show that (1) the discharges observed in the dominant inflows (the Kami, Miya and To rivers) are different from those reported by Nagano Prefecture, whereas the outflowing discharge at Kamaguchi Floodgate is similar to that in the Nagano Prefecture report, and (2) the vertical distributions of velocity outside the submerged macrophytic area differ from those inside the area, whose horizontal velocities were reduced by macrophyte-induced turbulence, and (3) the current patterns near the outflow showed a strong velocity in the northeast, rather than in the southwest region.

Key words: Lake Suwa, ADCP, river discharge, macrophytic zone, floodgate

摘 要

諏訪湖では、現在までに水質・底質に関する化学・生物的研究は多くみられるが、物質循環を議論するうえで不可欠な「湖水の動き」に関する現地観測はあまりみられなかった。そこで本研究では、ADCP を用いて、「湖水の動き」を考える上で不可欠な因子である①主要流出入河川の流量、②沿岸に繁茂する水草帯内外の流れ場、③唯一の流出口である釜口水門付近の流れ場の現地観測を行った。得られた結果は以下の通りである。①主要流入河川の上川・宮川・砥川において、観測結果と長野県発表の流量データには大きい差があったが、流出河川の大淵川においては、観測結果と県データの差が小さかつ

¹⁾ 信州大学工学部土木工学科 〒380-8553 長野県長野市若里 4-17-1 Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Shinshu University, 4-17-1, Wakasato, Nagano-City, Nagano 380-8553, Japan

²⁾ 株式会社ライトオン 〒305-8503 茨城県つくば市吾妻 1-11-1 Right-on Co., Ltd., 1-11-1, Azuma, Tsukuba-city, Ibaraki 305-8503, Japan

³⁾ 株式会社ハイドロシステム開発 〒132-0015 東京都江戸川区西瑞江 3-19-10 Hydro Systems Development, Inc., 3-19-10, Nishi-Mizue, Edogawa-ward, Tokyo 132-0015, Japan

⁴⁾ 信州大学山岳科学研究所山地水域環境保全学部 〒392-0027 長野県諏訪市湖岸通り 5-2-4 Division of Science for Inland Water Environment, Institute of Mountain Science, Shinshu University, 5-2-4 Kogan-Dori, Suwa-city, Nagano 392-0027, Japan
(連絡先 豊田政史 ✉mtoyo@shinshu-u.ac.jp)

た。②水草帯内外で流れ場の構造は異なっていた。また、水草の存在が水平方向流速を小さくし、乱れ成分が支配的な流れ場特性を作り出していた。③諏訪湖唯一の流出口である釜口水門付近における流出傾向は、北東部からの方が南西部からに比べて卓越していた。

キーワード：諏訪湖，ADCP，河川流量，水草帯，水門

(2008 年 12 月 26 日受付；2009 年 10 月 26 日受理)

はじめに

諏訪湖では、田中阿歌麿 (1918) による「湖沼学上より見たる諏訪湖の研究」をはじめとして、現在までに水質・底質に関する化学・生物学的な研究は多くみられる (たとえば、花里 (2001)、福島ら (2005))。一方、物質循環を議論するうえで不可欠な「湖水の動き」に関する現地観測は、余越・富所 (1978) が浮子漂流観測を行って以来、長い間みられなかった。また、近年における流速・流向計測技術の進歩とともに、プロペラ流速計・電磁流速計から超音波流速計にいたるまで、大小さまざまなスケールでの現地観測が可能となってきた (たとえば、Endoh et.al. (1993)、大本ら (2001))。

このような背景のもとで、豊田ら (2006) が ADCP による湖流観測を行い、諏訪湖周辺の卓越風である北西の強風時には、湖上風は非一様性を持ち、それに起因する反時計回りの循環流が生じることを明らかにした。しかし、「湖水の動き」を考えるにあたっては、風以外にも河川流入や湖岸植生の影響を考慮する必要がある。そこで本研究では、①主要流入河川の流量、②沿岸に繁茂する水草帯内外の流れ場、③唯一の流出口である釜口水門付近の流れ場の現地観測を行った。

観測概要

主要流入河川の流量観測

Fig.1 に諏訪湖の平面図を示す。なお、図中には、等深線も示してある。湖の形は西方湖岸を底辺とみなせば、東方湖岸を頂点としてわずかに南方に傾斜した台形となっている。また、面積は 13.3 km^2 、最大水深は 7.2 m 、平均水深は 4.7 m である。流域面積は 531 km^2 であり、湖面積の約 40 倍である。諏訪湖に流入する河川の数、一級河川 15、準用河川 2、普通河川等 14 の合計 31 となっている。流域面積でみると、上川が一番大きく 261 km^2 、ついで宮川 120 km^2 、砥川 72 km^2 、横河川 45 km^2 となっており (沖野・細田, 1997)、これら 4 河

Fig. 1. View of Lake Suwa (Contour lines are drawn in this figure, unit: m).

図 1. 諏訪湖の概要 (図中に等高線を示す, 単位: m)。

川で諏訪湖全流域面積の約 9 割を占めている。また、流出河川は釜口水門より流出している天竜川のみとなっている。

Fig.2 に観測を行った主要流入河川である上川・宮川・砥川および流出河川である天竜川の測点と長野県の水位観測所の場所を示す。なお、上述したように、一般的には諏訪湖の主要流入河川に横河川が含まれるが、今回の観測時において流量が小さく測定不能であったため、横河川での観測は行っていない。測定には浅い河川 (水深 2 m 以下) の流量計測用に開発された RD Instruments 社製 Stream Pro ADCP を使用した。設定条件は、Table 1 のとおりである。この表には、後述する水草帯および釜口水門付近の流れ場観測の条件もあわせて示してある。観測は、9 月 20 日 8:00 ~ 12:45、9 月 21 日 7:30 ~ 13:00 に ADCP を装着したミニボートを一方の岸から対岸まで手で移動させることにより、河川の横断面を連続的にとらえる方法で複数 (4 ~ 7) 回行った。

流量算出にあたっては、ADCP で計測した流速と、同時に取得した河川の横断観測データより行った。Stream

Fig. 2. Positions of river discharge measurements.

図 2. 河川流量観測地点.

Pro ADCP は水面付近，河床付近，岸付近の流速計測を行うことができないため，以下のような仮定を設けて流量算出した．まず，水面付近の測定不可部分の流速は ADCP が計測した 1 層目の流速と仮定し，その部分の面積を乗じて流量を算出した．河床付近の測定不可部分の流速は ADCP が計測した最後の層の流速をもとに，対数則を用いて減衰させた流速と仮定し，その部分の面積を乗じて流量を算出した．岸付近の測定不可部分の流量は観測開始地点（観測終了地点）の平均流速に水深，水面幅，補正係数を乗じて流量を算出した．この場合の補

Fig. 3. Positions of macrophytic zone measurements (Bold line denotes mown down macrophytic zone).

図 3. 水草帯流動観測地点（太線は水草の刈り取り場所を示す）.

正係数は，岸付近の断面形状が三角形のときは 0.35，四角形のときは 0.91 とした．なお，これらの値は ADCP 付属ソフトウェア Win River の標準の係数である．

水草帯の流れ場観測

現地観測は，2007 年 9 月 20 日 14:43 ～ 15:46 に行った．観測地点は，Fig.3 に示す諏訪湖北東岸の浅場にある 6 地点（Fig.1 の ZoneA 内）とし，St.1 から St.6 の順に船を 3 ～ 5 分間停止させた（注：St.5 では繁茂しているヒシをかき分けた）状態で観測を行った．なお，図中の太線で囲んだ部分がヒシの一部刈り取りを行った場所である．観測には，RD-Instruments 社製 Work Horse ADCP

Table 1. Measurement environments of ADCP.

表 1. ADCP の設定条件.

	Stream Pro ADCP	Work Horse ADCP	
		Macrophyte Zone	Near Kamaguchi Floodgate
	WM12	WM11	WM12
Water Profiling Mode	High Rate Pinging Mode (Default setting)	High Resolution Water Mode	High Rate Pinging Mode
Depth Cell Size (m)	0.04 ～ 0.12	0.05	0.25
Pings Per Ensemble	6 (Default setting)	3	3
Sub-Pings Per Ping (Only WM12)	8 (Default setting)	none	20
Blanking Distance (m)	0.03	0.10	0.20
First Cell Range (m)	0.04 ～ 0.12	0.15	0.57
Sampling Interval (sec)	1.00	1.93	3.15

Fig. 4. Measurement points near Kamaguchi Floodgate.

図 4. 釜口水門付近の流動観測地点.

1200kHz を使用し (Table 1 参照), 各地点におけるサンプリング個数 120 とした. ただし, St.5 においては, 観測中に遊覧船による波の影響をうけていたため, それらのデータを除外し, 解析に用いるサンプリング数を 60 とした.

釜口水門付近の流れ場観測

現地観測は, 2007 年 9 月 20 日 16:20 ~ 16:45 に, Fig.4 に示す測線 (Fig.1 の ZoneB 内) を 2 往復曳航して行った. また, 使用機器は, 水草帯の観測と同様の RD-Instruments 社製 Work Horse ADCP 1200kHz であり, 設定条件は Table 1 のとおりである.

観測結果および考察

主要流出入河川の流量観測

ここでは, 観測結果と長野県が発表している流出入河川流量データと比較する. なお, 本研究で用いる長野県が発表している流入河川の流量データは, 水位と流量の相関関係を表す H-Q 式 (河川水位流量演算式) および水位の自動観測データより算出している. 流出河川である天竜川では, 模型実験から算出した放出量算出式および水位の自動観測データより流量を求めている.

Table2 に 9 月 20 日, 21 日それぞれの観測結果 (流量 (Ave.) および標準偏差 (S.D.)) と長野県の発表流量を示す. また, 観測前 4 日間に降水は観測されておらず,

Table 2. Inflow river discharges, (unit: $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$).

表 2. 流入河川流量 (単位: $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$).

2007/9/20	Kami	Miya	To	Tenryu
Nagano	10.92	0.50	2.45	11.92
Ave.	4.63	1.41	0.98	12.66
S.D.	0.21	0.04	0.05	0.30
2007/9/21	Kami	Miya	To	Tenryu
Nagano	10.92	0.40	2.18	10.62
Ave.	4.43	1.14	0.92	10.53
S.D.	0.27	0.05	0.05	0.09

これらの値は平水時の流量と考えてよい.

流入河川における観測結果は, 長野県の発表データと比較すると, 上川・砥川で約 2 分の 1, 宮川で約 3 倍となっている. これらのことから, 流入河川の 3 河川においては, 観測結果と長野県の発表データの間で大きな差があるといえる. この理由の一つとして, 流量算出における流速データ数の差が考えられる. ADCP による流量算出においては, 横断面内の流速を連続的にとらえているためデータ数が多いが, 長野県が H-Q 式を求めるために計測した流速の横断方向のデータ数は少ない. そのため, 横断方向の流速分布の変化を考慮できる ADCP の方が精度が高いと考えられる. また, H-Q 式は主に洪水時の流量推定に用いられるので, 小流量時の精度に問題があることも考えられる. 上川と宮川に関しては, 測点と観測所が離れていることも差の要因として挙げられるが, 観測時期において測点と観測所の間では農業取排水量は小さかったため, 差が生じることは考えにくい.

一方, 流出河川である天竜川においては, 観測結果と長野県の発表データに大きな差はみられない. これより, 長野県が用いている釜口水門からの放出量算出式の精度は高いことがわかる.

水草帯の流れ場観測

観測当日, 湖心の水温は上下層で 2°C 程度しか差がなく, また浅水域では水温はほぼ一定であった (豊田ら, 2009). このため, 本観測における水温成層の影響は, ほとんどないとみなした.

Table3 に古川樋門 (Fig.1 参照) における観測時間中の風速および風向を示す. この表から, 観測時間中は 5 m s^{-1} 前後の南東風が連吹していたことがわかる.

Fig.5 に, 水草刈り取り部分 (St.1 - 2 - 3 - 4) にお

Table 3. Wind speeds and directions at Furukawa Gate.

表 3. 古川樋門における風速・風向.

Time	Wind Speed (m s^{-1})	Wind Direction
14:40	4.90	SE
14:50	5.67	SE
15:00	5.78	SSE
15:10	5.72	SE
15:20	4.99	SE
15:30	5.04	SE
15:40	5.45	SE
15:50	4.92	SE
16:00	5.12	SSE
16:10	5.21	SE
16:20	4.79	SE
16:30	5.40	SE
16:40	5.21	SE
16:50	5.14	SE

ける水平方向流速ベクトルの鉛直分布を示す。この図から、岸に近づくほど流速が小さくなっていることがわかる。水草帯の外側の St.1 では、南東風によって表層で北西方向、底層で南東方向の典型的な風による鉛直循環流を示している。少し水草帯の中に入る (St.2) と、表

Fig. 6. Absolute values of horizontal velocities.

図 6. 水平方向流速の絶対値.

層の流速は小さくなるが、底層では St.1 と同様に南東から東向きの流れとなっている。St.3 では、流れの傾向は保ったままさらに流速が小さくなっているが、St.4 では流向の傾向は他の地点と異なっている。

Fig.6 は各地点における水平方向流速の絶対値である。水草帯の外である St.1 と St.6 において流速が大きく、Fig.5 で述べた鉛直循環流に起因する流向の反転部で水

Fig. 5. Vertical distributions of horizontal velocities (U = velocity along the cross section, V = velocity along the shoreline) at St.1 (outside the submerged macrophytic zone), St.2, St.3 and St.4 (inside the mown down macrophytic zone). Note that horizontal velocities at each depth are overlapped as the depth shifts from 0 m to 2.5 m.

図 5. 水草帯外 (St.1) と水草刈り取り帯 (St.2, St.3, St.4) における水平方向流速の鉛直分布。(ただし、0m から 2.5m まで水深を変化させているため、それぞれの水深の水平流速が重なり合っている箇所がある.)

Fig. 7. Horizontal turbulence kinetic energies.

図 7. 水平方向流速の乱れエネルギー.

平方方向流速は小さくなっている。一方、水草刈り取り帯である St.2 ~ St.4 においては、流向の変化が著しい水深で水平方向流速は最大となっている。また、水草帯内である St.5 においては、水深方向でみると水平方向流速の大きさに変化はあまりみられず、その大きさは全層で 2 cm s^{-1} 以下である。

Fig.7 に各地点における水平方向流速の乱れエネルギーを示す。表層部においては、地点間の差はあまりみられない。水草刈り取り帯内においては、St.2, St.3 で上述の流向の変化が著しい水深で乱れエネルギーの一時的な増大がみられる以外は、水深が大きくなるにしたがって単調に減少している傾向にある。また、水草帯内の St.5 では、St.2 ~ St.4 と同様の傾向がみられる。一方、水草帯の外である St.1 と St.6 においては、水表面から流向の反転部 (St.1 : 1.0 m, St.6 : 0.7 m) までは乱れエネルギーにあまり変化がみられない。しかし、流向の反転部より深くなると急激な乱れエネルギーの減少がみられる。

乱れと移流の効果を詳しくみるために、乱れエネルギーを水平方向の平均流速の二乗で割ったものを標準化乱れエネルギーと定義して、各地点におけるそれらの分布を Fig.8 に示す。表層と底層において、St.3, St.4, St.5 で値が大きく、St.1 および St.6 で値が小さくなっており、St.2 では、これらの中間の値になっている。このことは、表層と底層において、水草刈り取り帯および水草帯内の St.3, St.4, St.5 では流れ場が不安定で乱れているのに対して、水草帯外の St.1, St.6 では、流れ場が安定していて移流が卓越していることを示している。ま

Fig. 8. Standardized turbulence kinetic energies.

図 8. 標準化乱れエネルギー.

た、St.4 の底層部で標準化乱れエネルギーがきわめて大きくなっている。これは、平均流速は小さいが流れ場がきわめて不安定になっているためと考えられる。

以上をまとめると、水草の存在が、水平方向流速を小さくし、乱れ成分が支配的な流れ場特性を作り出していることが推測される。

釜口水門付近の流れ場観測

古川樋門および八重場樋門 (Fig.1 参照) における観測時間中の風速および風向については、古川樋門では、 5 m s^{-1} 前後の南東風が吹いていたが、八重場樋門ではほとんど風が吹いていなかった。

観測において、1 往復目は北東部の水深は 2 m 前後と浅くなっていたが、南西部の水深は 5 m 近くになっていたのに対し、2 往復目は水深の変化はあまりみられなかった。釜口水門直近は浚渫により深くなっており (長野県諏訪建設事務所, 2006), 船の操縦の関係上、1 往復目は水深急変部を横切ったと思われる。

Fig.9 は表層から 0.57 m, 1.57 m, 2.57 m, 3.57 m における水平方向流速の観測結果 (1 往復目, 往路) である。上層では、北東側からの流出がみられ、南西側からは流れがあまりみられない。下層では、南西側からの流出がみられる。この傾向は他の観測でも同様であった。Table4 に AB 間と BC 間 (Fig.4 参照) から流出する流量を示す。なお、流量算定は、主要流出河川の流量観測の項で用いた方法と同様とした。この表から、AB 間 (北東) からの流出が BC 間 (南西) からの流出に比べて大きいことがわかる。また、観測時間中の流出流量の平均

Fig. 9. Horizontal velocities at depths of 0.57 m, 1.57 m, 2.57 m, 3.57 m.

図 9. 水平方向流速（表層から 0.57 m, 1.57 m, 2.57 m, 3.57 m）.

Fig. 10. Horizontal velocities near Kamaguchi Floodgate at depths of 0.56m, 1.56m.

図 10. 釜口水門付近における水平方向流速（表層から 0.56m, 1.56m）.

値は、長野県が釜口水門で測定した流量（ $11.92 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ）とほぼ一致している。

Fig.10 に 2004 年 9 月に行った釜口水門付近における表層から 0.56 m, 1.56 m の水平方向流速観測結果（未発表）を示す。この図からも北東部からの流出が南西部からの流出より多いことがみてとれる。

Table 4. Outflow discharges from Kamaguchi Floodgate, (unit: $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$).

表 4 釜口水門からの流出流量（単位： $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$ ）.

Number \ Line (Part)	AB (NE)	BC (SW)	Total
1	6.94	4.05	10.99
2	7.01	4.78	11.79
3	6.51	2.73	9.24
4	9.55	3.09	12.64
Ave.	7.50	3.66	11.17

おわりに

諏訪湖において、ADCPを用いて、①主要流出入河川の流量、②沿岸に繁茂する水草帯内外の流れ場、③唯一の流出口である釜口水門付近の流れ場の現地観測を行った。得られた結果は以下の通りである。

① 主要流出入河川の流量観測

主要流入河川である上川・宮川・砥川の3河川において、観測結果と長野県が発表している流量データには大きい差があった。このことから、長野県がこの3河川の流量算出に使用しているH-Q式を見直す必要があると考えられる。また、流出河川である天竜川においては、観測結果と県データの差が小さかった。これより、釜口水門からの放流量を算定する放出量算出式の精度は高いといえる。

② 水草帯の流れ場観測

ヒシ群落が存在する諏訪湖において、試験的にヒシの一部刈り取りを行った部分で、強風時(5 m s⁻¹)における流動調査を行った結果、流れ場の構造は、水草帯の内外で異なるが、水草刈り取り帯と水草帯内部ではあまり差がみられなかった。また、水草の存在が、水平方向流速を小さくし、乱れ成分が支配的な流れ場特性を作り出していた。

③ 釜口水門付近の流れ場観測

諏訪湖の唯一の流出口である釜口水門付近の流れ場観測を行った結果、流出傾向は北東部からの方が南西部からに比べて卓越していた。

今後は、本観測結果の普遍性を確かめるために、さらなる観測が望まれる。

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御指導・御助言をいただきました。また、現地観測では、元信州大学工学部富所・豊田研究室の柳澤孔亮氏(現静岡市)、信州大学山地水環境教育研究センターの今井晶子女史をはじめ、たくさんの方々に多大なるご協力をいただきました。さらに、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)」の補助を受けた。ここに記して感謝の意を

表します。

文 献

- Endoh, S. and Okumura, Y. (1993): Gyre System in Lake Biwa Derived from Recent Current Measurements, *Jpn. J. Limnol.*, 54-3: 191-197.
- 福島武彦・川村修平・恩田裕一・今井章雄・松重一夫 (2005): 霞ヶ浦、諏訪湖における底質長期変化と栄養塩収支, *水環境学会誌*, 28: 313-319.
- 花里孝幸 (2001): 近年の諏訪湖における生物群集の動態研究の意義, *陸水学雑誌*, 62: 123-126.
- 長野県諏訪建設事務所 (2006): 平成17年度国補河川浄化に伴う業務委託(測量委託)(一) 諏訪湖 岡谷市・諏訪市・下諏訪町・諏訪湖P 報告書.
- 沖野外輝夫・細田耕司 (1997): 諏訪湖の集水域の概要, *信州大学理学部附属諏訪臨湖実験所報告*, 10: 1-6.
- 大本照憲・矢北孝一・福島博文 (2001): 湧水を伴う湖沼の水平対流と水質特性, *土木学会水工学論文集*, 45: 1183-1188.
- 田中阿歌麿 (1918): 「湖沼学上より見たる諏訪湖の研究(上・下)」, 岩波書店, 東京.
- 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 (2006): 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*, 50: 1303-1308.
- 豊田政史・宮原一道・寺沢和晃, 平良綾子・宮原裕一 (2009): 諏訪湖における水流動・水質観測 (2004, 2007年), *信州大学環境科学論文集*, 31: 157-166.
- 余越正一郎・富所五郎 (1978) 風による諏訪湖の流動特性, *土木学会論文報告集*, 276: 53-63.