

## 湧水を伴う湖沼の水平対流と水質特性

Horizontal Convection Currents and Water Quality Characteristics  
in Lake Ezu with Spring Water大本 照憲<sup>1</sup>, 矢北 孝一<sup>2</sup>, 福島博文<sup>3</sup>

Terunori OHMOTO, Kouichi YAKITA, Hirofumi Fukushima

<sup>1</sup>正会員 工博 熊本大学助教授 工学部環境システム工学科 (〒860-8555 熊本市黒髪2-39-1)<sup>2</sup>正会員 熊本大学技官 工学部環境システム工学科 (同上)<sup>3</sup>正会員 (株)建設技術研究所大阪支社 情報技術部 (〒540-0008 大阪市中央区大手町1-2-15)

Lake Ezu with rich spring water, which is located in the southeastern part of Kumamoto city, has been damaged by both urban development and groundwater contamination due to nitrogenous fertilizer for agricultural products in recent years, so that the native plants disappear and naturalized ones propagate. In this study, field observations were carried out in order to investigate the relationships between the currents and water qualities such as DO, SS, BOD and the water temperature in lake Ezu in November of 1997 and August of 1998. From the three-dimensional flow velocities by ADCP and water temperature data, it is recognized that density currents in the bottom layer of the lake took place and these currents determined water qualities in the daytime of the summer.

*Key words* : Spring Water, Horizontal Convection Currents, Water Quality, Lake Ezu, ADCP

## 1. はじめに

熊本市の南東部に位置する江津湖は、瓢箪型をした形状を持ち、周囲4.4km、湖面積 $12 \times 10^4 \text{ m}^2$ の上江津湖と周囲5.6km、湖面積 $35 \times 10^4 \text{ m}^2$ の下江津湖から成る。また、流れの大半が清冽な湧水で占められ、人口65万人を擁する市街地の中にあり、自然が豊富な景勝地であることからレクリエーションの場として市民に親しまれて来た。しかし、近年の江津湖周辺における都市化の進展や湧水量の低下傾向は、水質の悪化や水棲動植物に悪影響をもたらし、スヤンゾリ、ヒメイトモやキミツ等の固有植物は姿を消し、オカガモ、ホイアイやホタウキ等の帰化植物が繁茂する事態を招来させている<sup>1,2)</sup>。

また、ブラックバスやブルーギル等の外来魚の存在が確認にされ、生態系の劣化が危惧されている<sup>3)</sup>。本研究では絶滅が危惧される、スヤンゾリやヒメイトモ等の湧水地に固有な植生を江津湖に再生させるための基礎的調査として、超音波ドップラー流速分布計(ADCP)および電磁流速計を用いて流れ場を三次元的に捉え、水質については懸濁物質濃度、溶存酸素濃度、生物学的酸素要求量(BOD)、水温を計測しこれらの空間的変化を検討した。なお、調査は上江津湖と下江津湖の両者で実施したが、本論では年間を通じて水質が最も悪化する夏期の下江津湖に焦点を絞った。湖沼の水質過程を規定する流動現象の外的支配因子としては、吹送流、湖面熱フラックス、河川流量、濁質負荷量が挙げられる。さらに、安定成

層下で外力が湖面に一樣に作用しない場合には、鉛直混合に伴う躍層の低下と表層水温の低下が湖沼内部に水平方向の密度勾配をもたらす、傾圧成分の空間勾配により水平対流が生起する<sup>4)</sup>。しかし、湖沼の物質収支に重要な影響を与える水平対流は同じ水平対流である海陸風とは異なり、一般に流れが微弱なため、現地計測による検出は容易ではなく、既往の研究成果の中に現地の水平対流に関する報告は少ない<sup>5,6)</sup>。本研究では、安定な密度成層を形成した下江津湖において湖水より水温の低い河川水が流入したことにより水平温度勾配が生じ、その結果として水平対流が発生し、鉛直循環流を形成していることを、超音波ドップラー流速分布計(ADCP)を用いた計測によって捉えることに成功し、さらに水平対流が湖底近傍の水質に有意な影響を与えることを明らかにした。

## 2. 観測方法

図-1に、江津湖の概要を示す。現地観測は、下江津湖を対象に1997年11月11日および1998年8月4日の両日、午前7:00~午後5:00の間で行われた。使用したADCPは、流速と同時に水深および水温も計測可能な米国RDI社製BB-ADCP1200で超音波の周波数は2400KHz、計測誤差は0.5cm/sec以下に調整した。

計測は、図-2に示す様に横断方向にはL-1~L-5の計測線上および縦断方向には左岸より約30m離れた計

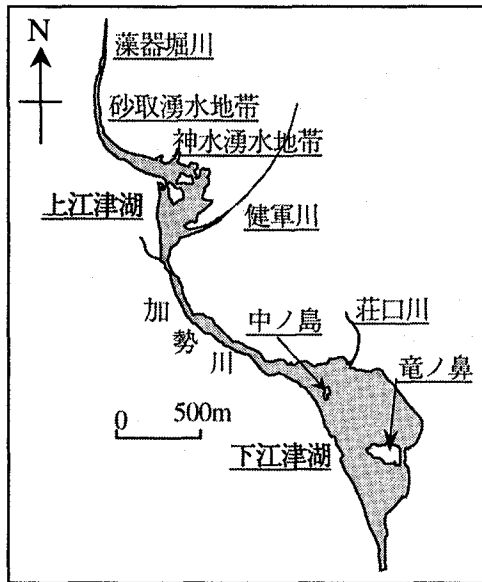


図-1 江津湖の概要

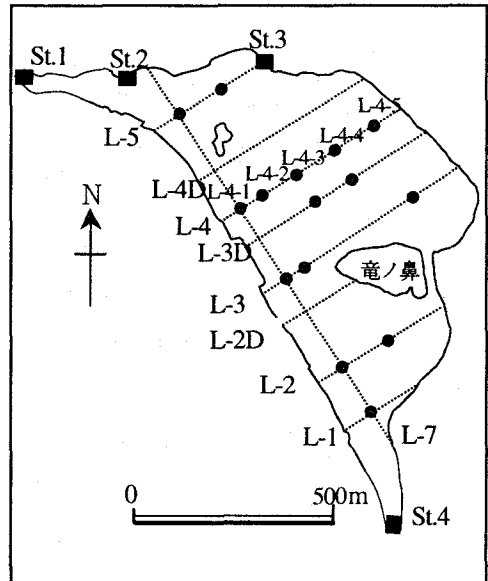


図-2 観測位置

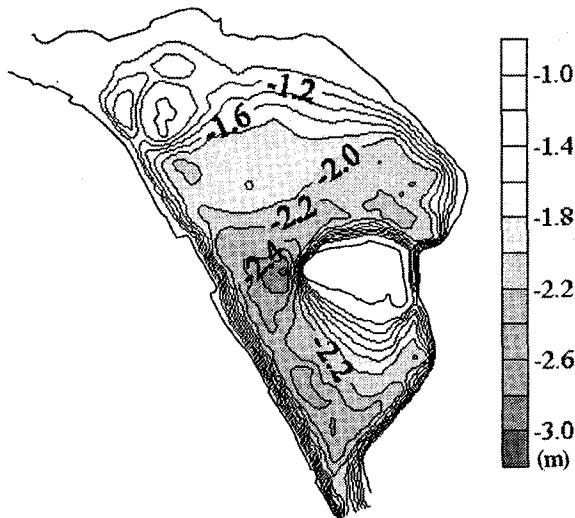


図-3 水深の等値線 (1997年秋期)

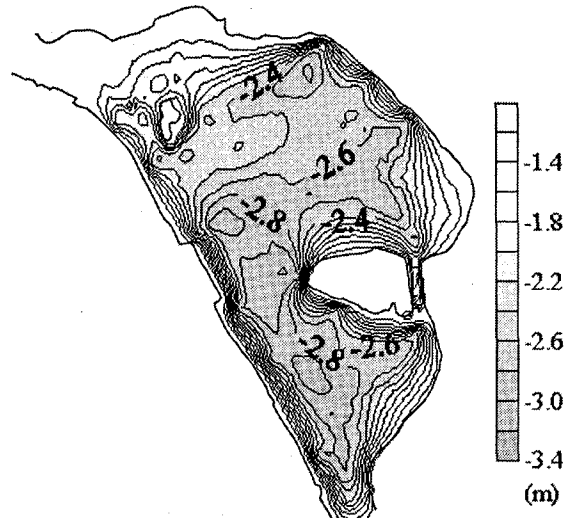


図-4 水深の等値線 (1998年夏期)

測線L-7上で、船の曳航速度を1.0~1.5ノットに設定して実施された。また、各測線上の基点に相当する計測点1において湖床から水面までの間を10cm間隔でSS、DO、水温および2成分電磁流速計による流速が計測された。さらに、全ての計測点で、SS、DO、BOD、水温が水面より2割水深および8割水深において計測された。なお、下江津湖への流入流量は、St.1~St.3において流出流量はSt.4においてプロパ流速計を用いて測定された。

### 3. 境界条件

下江津湖への流入量は、1997年11月11日においては加勢川 (St.1) から  $6.275\text{m}^3/\text{sec}$ 、動物園排水 (St.2) から  $0.040\text{m}^3/\text{sec}$ 、荘口川 (St.3) から  $0.131\text{m}^3/\text{sec}$  であり、全流入量は  $6.446\text{m}^3/\text{sec}$  であったのに対して、秋津橋の St.4 における流出量は  $5.777\text{m}^3/\text{sec}$  であることから、流入量が

流出量に較べて  $0.67\text{m}^3/\text{sec}$  程大きい。1998年8月4日においては加勢川 (St.1) から  $6.275\text{m}^3/\text{sec}$ 、動物園排水 (St.2) から  $0.029\text{m}^3/\text{sec}$ 、荘口川 (St.3) から  $0.093\text{m}^3/\text{sec}$  であり、全流入量は  $6.085\text{m}^3/\text{sec}$  であったのに対して、秋津橋の St.4 における流出量は  $6.432\text{m}^3/\text{sec}$  であることから、流出量が流入量に較べて  $0.347\text{m}^3/\text{sec}$  程大きい。熊本県・熊本市および市川等<sup>7)</sup>が実施した湧水量調査によれば、1986年から1994年までの18年間における上江津湖の平均湧水量は約  $4\text{m}^3/\text{sec}$  であり、下江津湖を流れる流量の約65%が湧水で占められている。ADCPによって得られた水深の等値線を図-3および図-4に示す。計測領域における平均水深は、秋期には2.05m、夏期には2.56mであり、湖底中央部は全般的に平坦で、最深部が右岸より約50m離れた位置に沿って現れているのが分かる。

ところで、熊本市は西北方を金峰山に遮られ、北方および東方は菊地台地、詫原平台地、阿蘇火山帯に連なり、

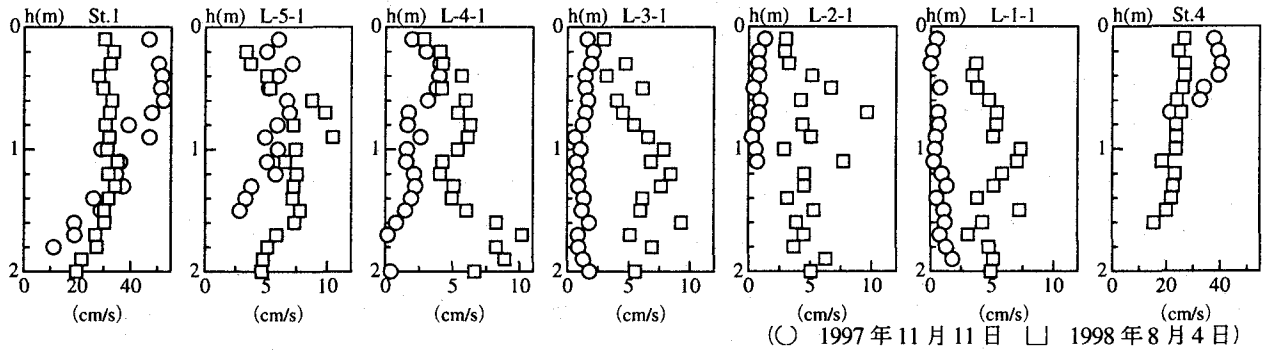


図-5 測線L-7における流速の鉛直分布

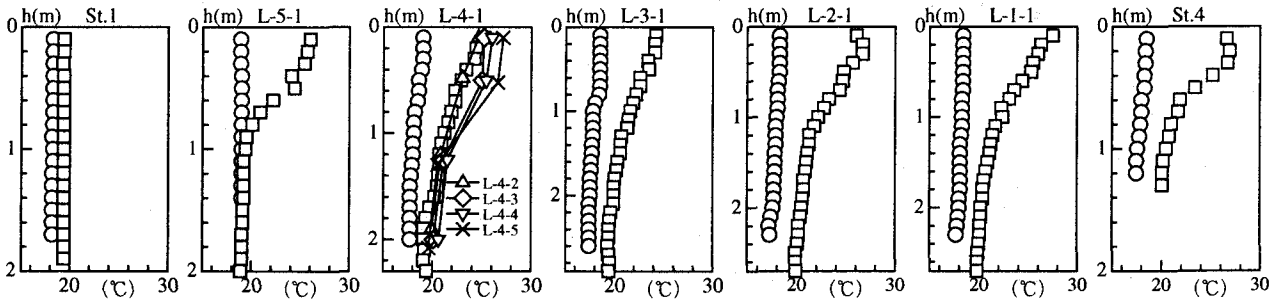


図-6 測線L-7における水温の鉛直分布

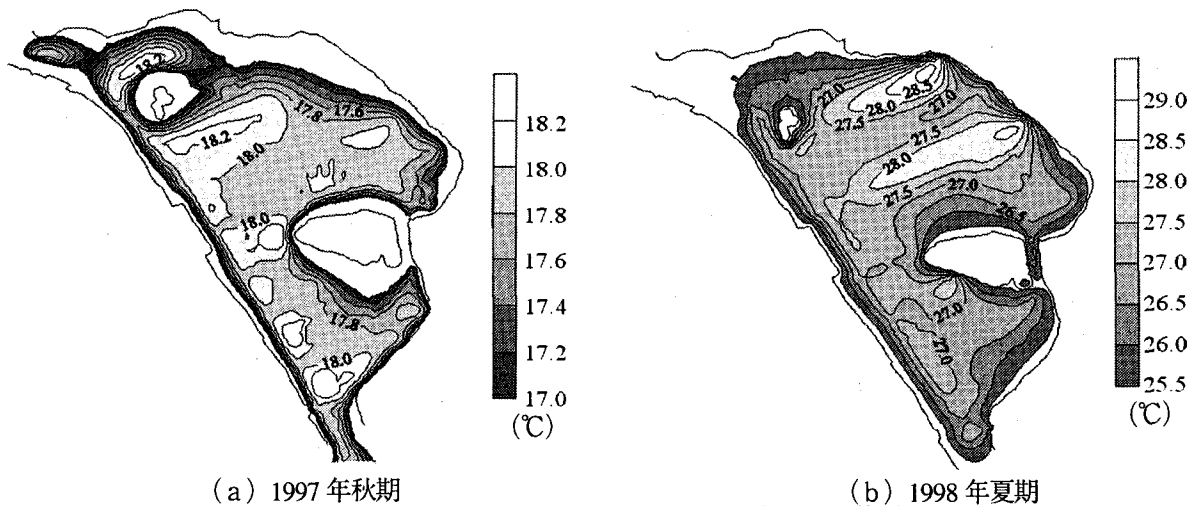


図-7 水温の等値線(水面下0.5m位置)

東南方には九州山地が広がるため、有明海に比較的近いにもかかわらず、一般に内陸性の気象条件下にある。そのため、寒暑の差が著しく、冬期には底冷えの日が続き、夏期には肥後の夕風と呼ばれる無風状態の蒸し暑い日の多いことで知られている。観測日の気象は晴天で、計測時には江津湖周辺は無風に近い状態であり、湖流への風の影響は無視できる。

#### 4. 観測結果および考察

##### (1) 鉛直方向の流速分布

平成9年11月11日および平成10年8月4日において電磁流速計を用いた計測線L-7に沿った流速および水温の鉛直分布をそれぞれ図-5および図-6に示す。11月

11日の秋期には、水温はいずれの場所でも18~19°Cの中で変化し、鉛直方向にはほぼ一様であることが分かる。一方、8月4日の夏期には、流入口直上のSt.1における流入水は鉛直方向に一様な分布を示すのに対して、下江津湖の湖水は安定な密度成層を成し、滯筋に沿った計測線L-7上において表層では24~28°Cの範囲にあり、下層は一律に20°Cである。また、計測点L-4-1の図には、横断方向の水温変化を見るために、計測点L-4-2~L-4-5における水温の計測結果も併示した。滯筋部に当たる計測線L-7の線上では鉛直方向の混合が大きく、表層水温は右岸側方向に低下していることが分かる。流速は、秋期では5cm/sec以下で、下層に較べて表層で大きな値を示す。一方、夏期における湖水は、流入部では表層で逆流、半水深付近で極大流速を示し、湖内の中央部では流速が下

層で大きな値を示し、表層ではゼロに近い。水温および流速の鉛直分布からも明らかな様に、澇筋部にあたる計測線 L-7 において安定な密度成層が主流速の鉛直分布に影響し、下層密度流に近い現象が生じていることが認められる。

## (2) 水平方向の流速分布

平成9年11月11日および平成10年8月4日の下江津湖において湖面から0.5m位置における水温の空間変化を図-7に示す。秋期の水温は、ほぼ18℃前後にあり、水温差は0.5℃以内にあることから空間的変化の小さいことが分かる。一方、夏期における水温は相対的に左岸側で大きく、右岸側で小さいことが分かり、横断方向の水温差は1~3℃の大きさを持つ。ADCPの計測結果から得られた秋期と夏期における平面流況をそれぞれ図-8および図-9に示す。図-8の流速ベクトルから11月11日の秋期において、流入水は中之島によって分岐され、竜の鼻前面の狭窄部および流出部では縮流され流速が増大し、極大流速は約4cm/secである。また、流速は鉛直方向には水面下0.5mの上層と水面下1.5mの下層で定性的に顕著な差が無く、水平面内では澇筋部に当たる右岸側で大きく、相対的に左岸側で小さいことが分かる。なお、流量観測から下江津湖を通過する流量を約6m<sup>3</sup>/secとし、湖中央部のL-3において幅を約500m、平均水深を約2mとすれば、この位置での断面平均流速は約0.6cm/sec程度となる。一方、夏期の8月4日の流速ベクトルから、右岸側の澇筋部では主流方向の流れが卓越し、上層の水面下0.7mに較べて下層の水面下1.7mでその傾向が明瞭であり、主流速の鉛直分布で考察した様に下層密度流の存在が示唆される。また、計測線L-3~L-4Dの領域では主流に直交する方向の流速成分が存在し、上層の水面下0.7mにおいては、日射によって暖められた流体塊は右岸側の澇筋部に流入する向きを持ち、水面下1.7mでは逆に相対的に冷たい流体塊が右岸側の澇筋部から離れ、左岸側方向に向きを持つ傾向を持ち、水平対流が生じているが示唆される。そこで、主流に直交する流速成分が顕著に現れた計測線L-4およびL-4Dにおける横断面内の流速ベクトルを図-10に示す。夏期における流れは、下層では澇筋部に当たる右岸側から左岸方向に向きを持ち、上層では逆に右岸方向に向きを持った鉛直循環流である。即ち、日射によって安定な密度成層を形成し表層では29℃近くに達した湖水に、上江津湖から水温19℃の冷たい流入水が右岸側の澇筋部を流下する際、高水温の左岸側と低水温の右岸側との間に水平温度傾度が生じ、そのために主流方向に軸を持つ鉛直循環流が形成されたことが考えられる。秋期においては、水温の空間的変化は小さく、顕著な水平対流は見出されていない。その故、夏期日中の水平対流は地形性貯熱効果に起因したもので、海陸風や都市のヒートアイランドに類似の現象であることが認められる。

## 5. スケールアナリシス

夏期日中の無風に近い状態において安定な密度成層が形成された下江津湖では、湧水が大半を占めるために湖水より冷たい河川水が流入したことによって、水平の温度勾配が形成され、水平対流が生じていることが認められた。本節では、水平対流の一種であるヒートアイランド現象に対して木村、小倉によって示されたスケールアナリシス<sup>8,10)</sup>を湖沼に生じた水平対流に適用する。湖水の流体運動を規定する支配方程式は、ブシネスク近似を用いれば、以下のようになる。

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = f_i - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p'}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\nu_M \frac{\partial u_i}{\partial x_j}) \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u_j \frac{\partial T}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} (\nu_H \frac{\partial T}{\partial x_j}) \quad (3)$$

ここに、 $u_i$ : 平均流速成分、 $f_i$ : 重力項、 $\rho_0$ : 基本場の密度、 $p'$ : 静圧からの偏差、 $\nu_M$ : 渦動粘性係数、 $T$ : 水温、 $\nu_H$ : 渦動熱拡散係数である。また、同じ下添字が繰り返される時には、アインシュタインの和の規約を利用した。上式の運動方程式に回転演算子を作用させ、渦動粘性係数が空間的に一様とし、主流方向の渦度成分を抜き出せば、以下のようになる。

$$\frac{\partial \omega_x}{\partial t} + u_j \frac{\partial \omega_x}{\partial x_j} = -\frac{g}{T_0} \frac{\partial T'}{\partial y} + \nu_M \frac{\partial^2 \omega_x}{\partial x_j^2} \quad (4)$$

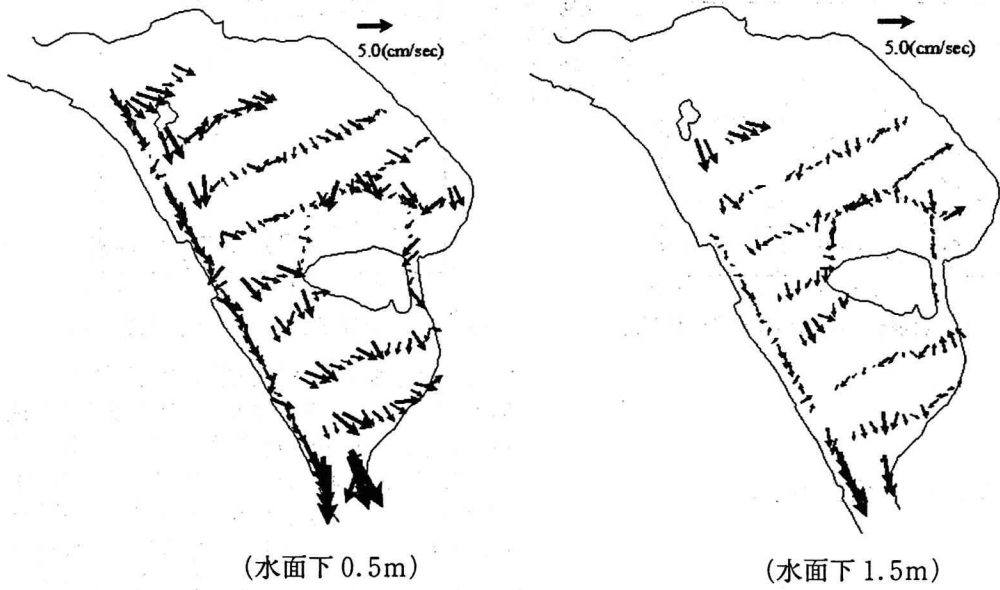
ここに、座標系は、 $x$ 軸を主流、 $y$ 軸を横断方向、 $z$ 軸を鉛直上方に取り、 $\omega_x$ は主流方向の平均渦度成分、 $g$ は重力加速度、 $T_0$ は基本場の水温、 $T'$ は水温 $T_0$ からの偏差である。上式より、主流方向に軸を有する渦が、水平の温度勾配によって駆動されていることが分かる。代表長さとして、水平距離を対流の水平規模 $L$ 、鉛直距離を水深 $H$ にとり、代表流速を対流速 $V$ 、代表温度を水平面内の温度差 $\Delta T$ とする。流れが定常かつ主流方向に一樣で、弱いものと仮定すれば、式(1)-(4)の非定常項および非線形項を無視することが可能である。また、 $L \gg H$ であることから鉛直方向の空間勾配項は水平方向のそれに比べて十分大きいことから水平方向に関する2階の空間微分項を無視することができる。以上の仮定を用いれば、上式のスケール間には以下の関係が得られる。

$$V/L = W/H \quad (5)$$

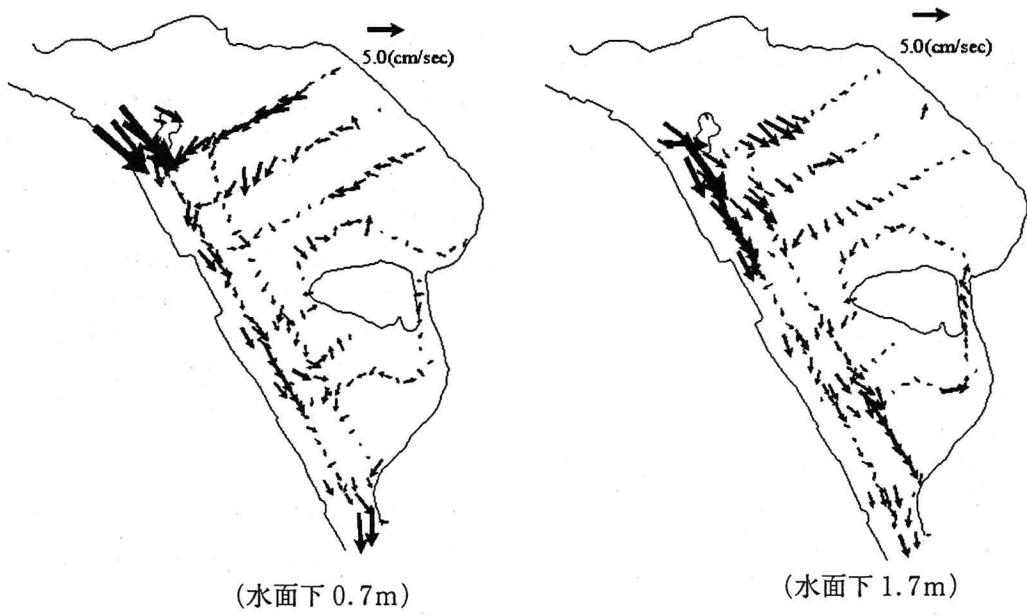
$$\frac{g\Delta T}{T_0 L} = \nu_M \frac{V}{H^3} \quad (6)$$

$$W\Gamma = \nu_M \frac{\Delta T}{H^2} \quad (7)$$

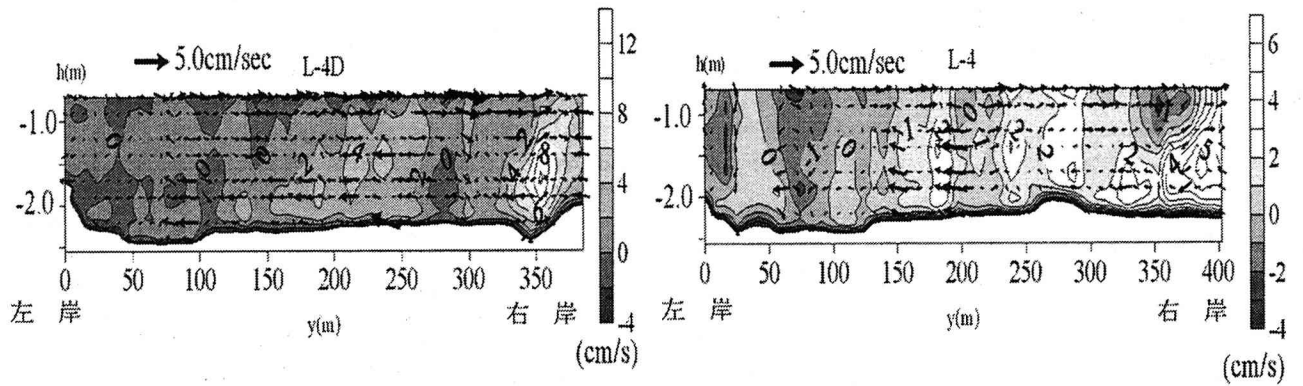
浮力振動数 $N$ は、



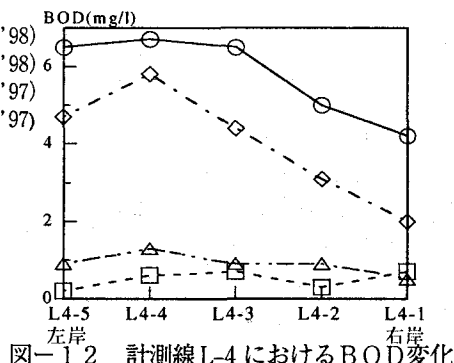
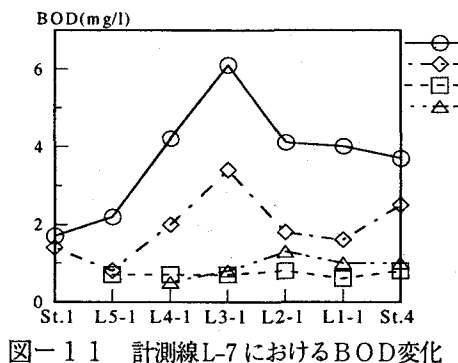
図一8 1997年秋期における平面流況



図一9 1998年夏期における平面流況



図一10 横断面内の流速ベクトル (1998年夏期)



$$N^2 = \frac{g}{T_0} \frac{dT}{dz} = \frac{g\Gamma}{T_0} \quad (8)$$

によって表されることから、代表流速は、

$$V = \frac{g\nu_H L(\Delta T/T_0)}{H^3 N^2} \quad (9)$$

$$W = \frac{g\nu_H(\Delta T/T_0)}{H^2 N^2} \quad (10)$$

となる。式(9)および(10)を式(5)に代入すれば、水平対流のアスペクト比  $H/L$  は、

$$\frac{H}{L} = \left( \frac{\nu_M \nu_H}{L^4 N^2} \right)^{1/6} \quad (11)$$

となる。上式を、式(9)および(10)に代入すると

$$V = \sqrt{\frac{\nu_H}{\nu_M}} \sqrt{\frac{g}{T_0 \Gamma}} \left( \frac{\Delta T}{T_0} \right) \quad (12)$$

$$W = \left( \frac{\nu_M \nu_H}{L^4 N^2} \right)^{1/6} \sqrt{\frac{\nu_H}{\nu_M}} \sqrt{\frac{g}{T_0 \Gamma}} \left( \frac{\Delta T}{T_0} \right) \quad (13)$$

となる。下江津湖の水平対流では、 $L=250\text{m}$ 、 $\Delta T=2^\circ\text{C}$ 、水の体積膨張係数  $\alpha=1/T_0=2.1 \times 10^{-4} \text{K}^{-1}$ 、重力加速度  $g=9.8\text{m/sec}^2$ 、 $\Gamma=8^\circ\text{C}/2(\text{m})$ であることから、浮力振動数  $N=0.1\text{Hz}$ 、代表流速  $V=5\text{cm/sec}$  となる。また、 $\nu_M \equiv \nu_H$  と仮定すれば、式(11)から  $\nu_H$  は  $30\text{cm}^2/\text{sec}$  となる。また、Prandtl の混合距離モデルを適用し  $\Delta U/\Delta z=5(\text{cm/sec})/200(\text{cm})$  とすれば、代表渦スケールは  $35\text{cm}$  となる。実測された水平対流の代表流速は  $3\text{cm/s}$ 、渦動拡散係数は Fischer の経験式<sup>11)</sup>  $\nu_H=0.15Hu$ 。(ここに、 $u$  は摩擦速度) および流速係数を 10 と仮定すれば、 $\nu_H$  は  $15\text{cm}^2/\text{sec}$  となり桁数としては大きな矛盾の無いことが分かる。

## 6. 流れと BOD との関係

滞筋の計測線 L-7 および水平対流が明瞭に現れた計測線 L-4 における BOD の空間変化を図-1 1 および 1 2 に示す。両図とも、11月11日の秋期に較べて8月4日の夏期に BOD の値が大きく、水質の悪化していることが分かる。また、秋期では全般的に上層に較べて下層で水質が悪く、流下方向および横断方向には大きな変化は無く、BOD が  $2\text{mg}/\ell$  以下であることから河川環境基準の A 類に属する。一方、夏期には BOD は下江津湖中央部で極大値  $6.5\text{mg}/\ell$  を示し、河川環境基準の D 類に当

たる。また、BOD は鉛直方向には下層に較べて上層で大きな値を示し、秋期とは大きく異なることが注目され、横断方向には滞筋部の右岸側に較べて左岸側で大きな値を示す。秋期とは異なり、夏期に下層の BOD が上層のそれに較べて小さな値を取ったのは、上江津湖から流入する  $\text{BOD } 1.5\text{mg}/\ell$  の比較的良質で冷たい水が、水平対流によって下江津湖の下層に移流し、そのために上層に較べて下層の水質が比較的良好に保たれたことが考えられる。

## 7. まとめ

本研究では江津湖において絶滅が危惧される、スズメバチ、ヒメバチやサシバ等の湧水地に固有な植生を再生させるための基礎的調査として、流速、水温、溶存酸素(DO)、懸濁物質濃度(SS)、BOD を計測した。下江津湖においては超音波ドップラー流速分布計 (ADCP) および電磁流速計の計測結果から、夏期の日中に水平対流の生じていることを明らかにした。さらに、スケール分析を湖沼の流動に適用し、代表流速および渦動粘性係数が概算できることを示し、この水平対流は下江津湖底層の水質を改善していることを指摘した。

謝辞：本研究を遂行する上で、熊本県土木部河川課、建設技術研究所 (株) 福岡支社から貴重な資料を提供して頂き、ここに、厚く感謝の意を表します。

## 参考文献

- 清水正元著：澄んだ湖をつくる—阿蘇山麓からの提言、朝日選書 No.268、1984
- 熊本市：熊本市公害白書、平成 6 年度版
- 熊本県：加勢川河川調査委託報告書、1999.3
- 岩佐義朗編著：湖沼工学、山海堂出版、1990
- 大久保賢治：琵琶湖の湖流、琵琶湖 (宗宮 功編著)、技報堂出版、2000.3
- 道奥康治：水温成層と熱循環が水質に及ぼす影響、貯水池の管理に向けた富栄養化現象に関する学術研究のとりまとめ (浅枝 隆代表)、土木学会水理委員会環境水理部会、2000.5
- 市川勉、石井修：江津湖の湧水について、江津湖第 8 号、江津湖研究会、pp.92-95、1997
- Kimura, R.: Dynamics of steady convections over heat and cool islands, J. Meteor. Soc. Japan, Vol.53, pp.440-457, 1975
- 木村竜治著：地球流体力学、東京堂出版、1983
- 小倉義光著：メソ気象の基礎理論、東京大学出版会、1997
- H.B.Fischer etc.: Mixing in Inland and Coastal Waters, p107, Academic Press, 1979

(2000. 10. 2 受付)