

湖山池における吹送流観測

Observation of Wind induced Current in Lake Koyamaike

鳥取大学工学部 正 員 檜谷 治
鳥取大学工学部 正 員 道上 正規
愛媛大学工学部 正 員 鈴木 幸一

1. はじめに

現在、湖沼などの閉鎖性水域における富栄養化が問題となっているが、そのような水域における水質特性に関係している底質土の浮上あるいは湖内物質の移動拡散といった問題は主に風によって引き起される吹送流によって大きく左右される。一般に、湖の流れはこの吹送流により上層部で吹送方向に、下層部で逆方向に流れるといわれているが、地形や島などの存在によって三次元的で複雑な流れとなる。近年、この吹送流など、湖における三次元流れの数値解析を試みた研究が数多くなされているが、実地観測資料の不足あるいは観測結果の精度の問題から、十分な検討を行なったものは少なく、十分な解明がなされているとはいえない。そこで、本研究は鳥取市西部に位置する湖山池において、電磁流速計による精度の高い吹送流の実地観測および水位観測を試み、湖山池における吹送流の三次元的特性あるいは水位変動特性などについて明らかにしようとするものである。また、吹送流観測においては従来から行なわれてきたフロートを用いた観測も併用しフロート観測の精度についても検討を行なう。

2. 湖山池の概要

図-1に湖山池付近の地形の概略を示す。湖山池の湖心は北緯 $35^{\circ}30'$ 、東経 $134^{\circ}09'$ に位置しており、水面標高 2.0m 、湖面積 6.9km^2 、湖岸線長 14.5km 、最大水深 7.0m 、平均水深約 3.0m の非常に浅い湖である。最大水深は湖の北岸付近にあり、南岸に向かって水深が浅くなってゆく。また、湖内には大小5つの島が存在している。湖山池に流入する主な河川は湖山川ただ一つであり、また、湖山池に流入した水はこの河川を通して日本海に流出する。しかしながら、この河川は流域面積が 11.62km^2 と小さく、豪雨時以外の流量は無視できるほどに小さい。

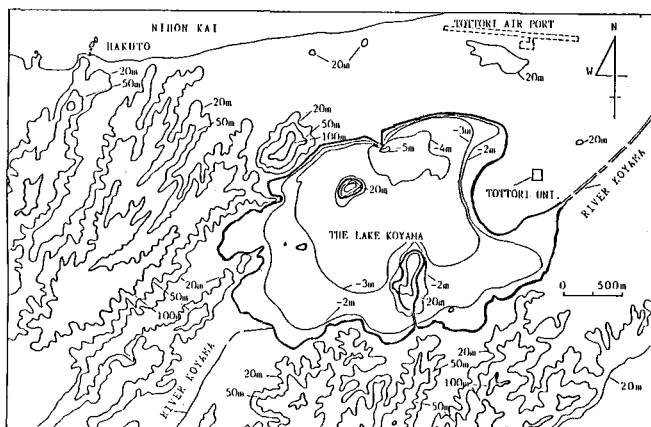


図-1 湖山池付近の地形概略図

つぎに、湖山池周辺での風の特徴について説明する。

鳥取気象台が観測した昭和52年の風向頻度図によると風速 5m/sec 以上の強風の頻度が多いのは11月から4月にかけてであり、その方向は北西から北北西の風が卓越している。平均風速としては上記の11月から4月が約 3m/sec でその他の月はほとんど 2m/sec 以下である。

3. 吹送流観測

3.1 電磁流速計による観測

観測に用いた流速計は VM-201 型電磁流速計で、流速の測定部分を図-2のように湖底に打ちつけた鉄パイプ

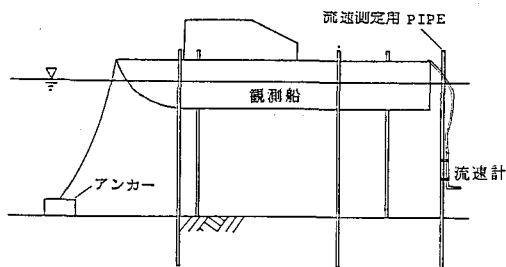


図-2 観測状況

に添って上下させることによって水平流速の鉛直分布を測定しようとするものである。観測は昭和60年12月18日、昭和61年11月14日および12月14日の合計3回である。

3.1.1 第1回目の観測結果 観測時間は10:00~14:15で、図-3に示すA、B、およびCの3点で合計8回の測定を行なった。図-4は観測日の風向風速ベクトル図を示している。図より0:00~6:00までは平均12m/secの北から北北西の強風がほぼ継続的に吹き、その後方向を南東に変化させており、風速も4m/sec程度の風になっている。図-5はその観測結果を示したものであり、流速 u および v は東西方向および南北方向の流速成分であり、東向きおよび北向きの流れを正としている。まず、A地点の観測結果を見ると、

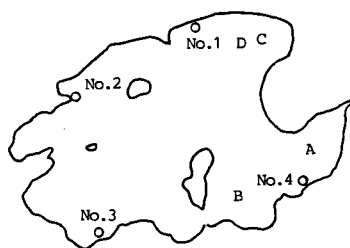


図-3 流速および水位観測地点

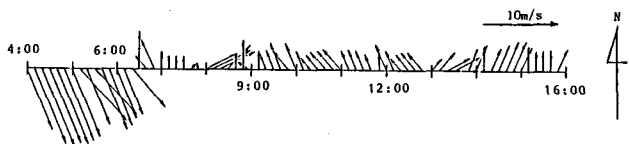


図-4 風向風速ベクトル図(昭和60年12月18日)

水面付近では北西方向に約6~4cm/secの流速で流れ、水深が深くなるにつれて時計方向に流向を変化させながら南東の方向の流れとなっており、上層部で吹送方向に下層部で逆方向に流れるという鉛直循環流の流況を示している。また、水深方向に時計回りに流向を変化させている流況は海域における吹送流の特徴であるエクマンズパイラルの流況と同様であり、湖山池のような浅い湖においてもコリオリ力による影響が認められる。水面での流速と風速の比は約1~2%で海域などにおける観測値(Wuによると、3~4%)¹⁾よりもやや小さな値といえる。この原因はフェッチの不足から生じているものと考え

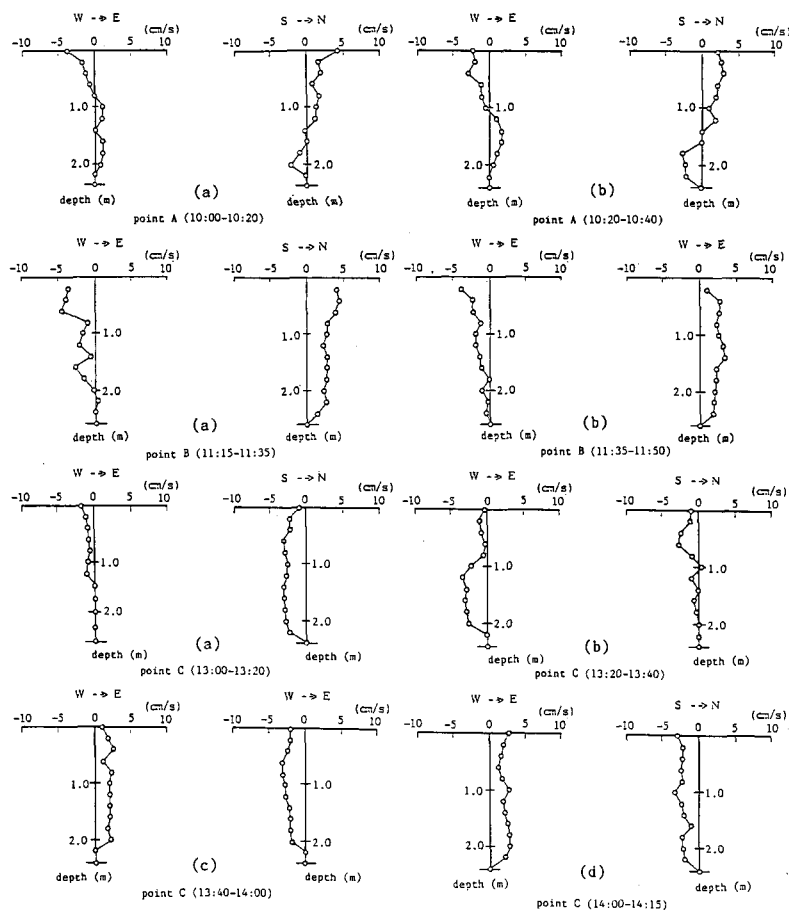


図-5 鉛直流速分布(昭和60年12月18日)

られる。

つぎに、B地点での観測結果を見るとA地点で見られた鉛直循環流は生じておらず、水面に近いほど流速はやや大きくなるものの、ほぼ北東方向の鉛直方向に一樣な流れが生じていることがわかる。A地点とB地点の観測時間における風況はほとんど同様なものであり、この流況の差異は地形の影響によるものと推定される。C地点における観測結果を見ると、風況が南東の風から南西に変化している時間であり、時間の経過と共に流況が大きく変化している。

3.1.2 第2回目の

観測結果

図-6は観測時の風況の風向風速ベクトル図を示している。図より、10:00までは南東の約3m/sec

の継続的な風が吹き、その後一時間ほどの無風状態のち、風向を北から西に変化させながら徐々に強風になっている。観測地点は図-3に示すD地点で10:50～15:00の間に合計4回の観測を行った。図-7が観測結果であるが、まず、図-(c)と(d)を見ると上層部で吹送方向、下層部で逆方向という鉛直循環流が生じていることがわかる。水面での流速9～7cm/secであり、風速との比は約2%程度である。ま

た、鉛直分布を詳細に見ると流向が水深が深くなるにつれて時計回りに変化しており、コリオリ力の影響が認められる。しかしながら、図-(a)と(b)は風況が変化している時間帯であるため、図-(c)と(d)に見られた鉛直循環流は認められず、水面付近にのみ西方向の流れが生じている。

3.1.3 第3回目の観測結果 図-8は観測時の風況の風向風速ベクトル図を示している。図より、10:30～11:30の間は西風が吹いているが、それ以外は風速は一定していないもののほぼ北風となっている。観測地点は第2回目の観測地点と同様に図-3に示すD地点で、10:00～13:50の間に合計3回の観測を行っている。図-9に観測結果を示しているが、風速が0～2m/sec程度と小さく不安定であるので鉛直方向に関して流速は複雑な分布形状を示している。3回の観測結果を連続的に見ると下層部に南西方向の流れが生じその流れが徐々に水面付近まで発達しているという流況が観察される。しかしながら、観測点が1点であるため、全体的にどのような流況であるかは不明である。

3.2 フロートによる吹送流観測

昭和61年12月14日、電磁流速計による吹送流観測と平行して、フロートによる観測も行っている。観測地

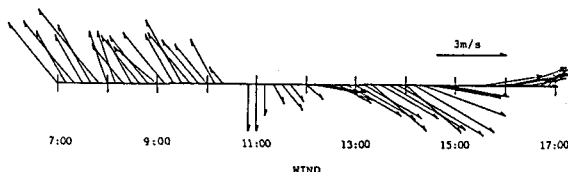


図-6 風向風速ベクトル図(昭和61年11月14日)

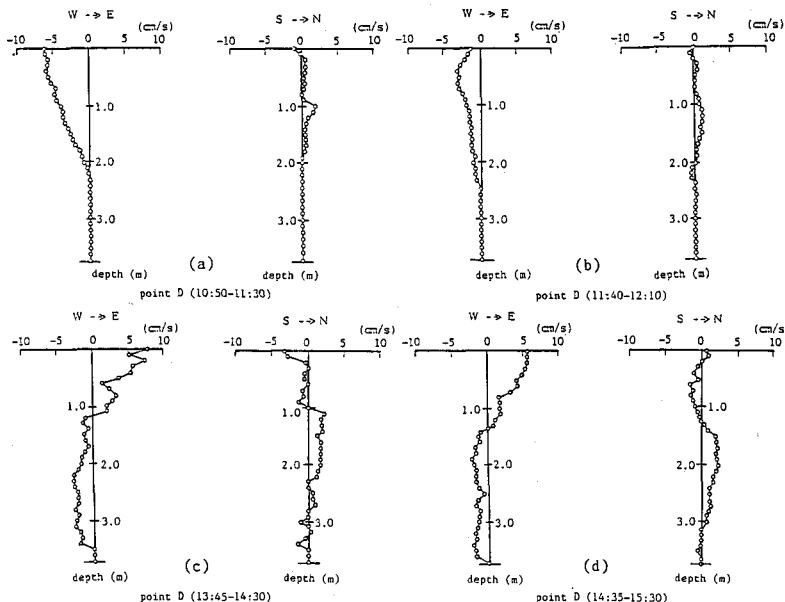
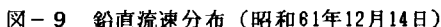
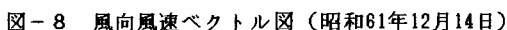
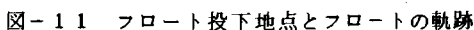
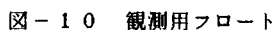


図-7 鉛直流速分布(昭和61年11月14日)

図-11は観測結果を示したものであり、各フロートの軌跡を図示したものである。図中実線で示しているのが水面用のもの、点線が水面下1m用のものでほぼ同一の方向に流るにつれて北向きに方に生じている南西方向に生じているのではないかと



が水面下 1 m 用のもの、破線が水面下 2 m 用のものに対応している。図より、流向に関しては各水深によってほぼ同一の方向に流れている様子が認められ、水面用のフロートはほぼ北西の方向に流れ、水深が深くなるにつれて北向きに方向を変えている。図-9 の電磁流速計による観測結果と比較すると、水面下 2 m 付近に生じている南西方向の流れをフロート観測結果からは見ることができず、全体的に北向きの風の影響を受けているのではないかとと思われる。



4. 水位観測結果

湖などの閉鎖性水域では、風が吹ことによって吹き寄せよる水位上昇やセイシュなどの水位変動が生じる。この水位変動を観測することによって、水面での風によるせん断応力と湖底の底面摩擦力との関係などを推定する上での参考資料となる。

図-12は昭和81年11月23日の水位変動結果および風向風速図を示している。観測地点は図-3に示しているNo.1からNo.4の4箇所で開催したものである。なお、水位変動結果については風による水位変動がほとんど生じなかったNo.2の水位を基準としたものも示している。観測日の風況は10:30までは南東の約2.5m/secの弱い風であったが、その後急激に風向を北東から東北東に変え、風速も10.0m/sec前後の強風となっている。この強風に伴って風下側であるNo.3の水位が急激に上昇し、風上側であるNo.1およびNo.4の水位が低下している様子が認められる。ほぼ風向と平行な位置にあるNo.1とNo.3の水位変動量は風速が9.0m/secの時に-0.3cmおよび+1.0cm、風速が12.0m/secの時-0.7cmおよび+1.8cmとなっている。したがって、No.1とNo.3の距離が約2300mであることから、それぞれの風速に対する水面勾配は 5.4×10^{-6} および 1.1×10^{-5} となる。

風によって生じる水面勾配 $d\xi/dx$ は、一次元の吹送流に関して、運動方程式の渦動粘性係数を鉛直方向に一定とし、湖底での底面摩擦力 τ_b と風によるせん断応力 τ_{wind} との関係を(1)式のように表せば、(2)式ようになる。

$$\tau_b = -n\tau_{wind} \quad (1)$$

$$\partial \xi / \partial x = \frac{\tau_{wind}}{\rho g h} (1 + n) \quad (2)$$

ここで、 n は水面せん断応力と底面摩擦力との比であり、流れが層流の場合は0.5、また、乱流の場合は0.1程度であるといわれている¹⁾。上式を用いて、それぞれの風速に対するNo.1とNo.3の水位差を計算すると、風速9.0m/secの場合は1.39cm(実測値は1.3cm)、風速12.0m/secの場合は2.79cm(実測値は2.5cm)となる。なお、計算の際に用いた風によるせん断応力はDeacon&Webbの式²⁾であり、 n の値は0.1として計算したものである。計算値は実測値よりもやや大きな値となっているもののほぼ同様な値となっている。計算値の方が過大の評価になる原因は(2)式誘導時の仮定や n の評価にも問題があると思われるが、吹送流の観測でも見られたように、フェッチの影響で風によるせん断応力が計算値よりも小さくなっているためと考えられる。

つぎに、図-13および図-14は昭和81年11月22日から11月25日に観測したNo.3およびNo.4の水位変動結果を用いて解析した水位変動のスペクトル図(FFT法、サンプリング間隔8.9分)である。セイシュの

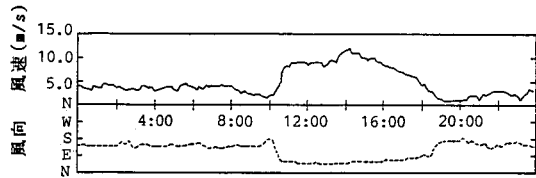


図-12(a) 風向風速図

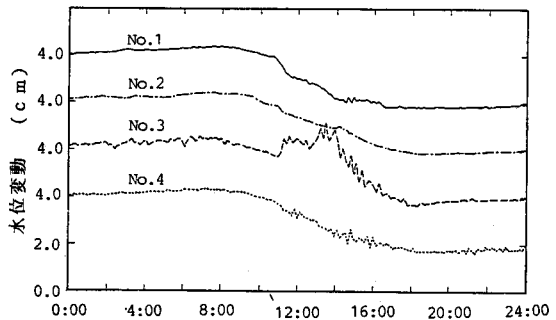


図-12(b) 水位変動

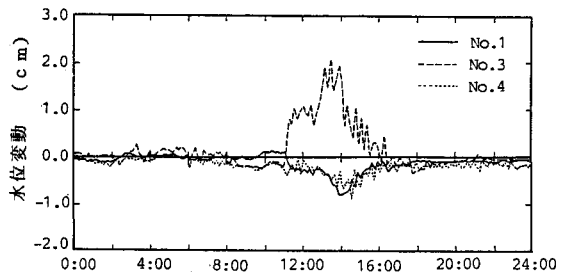


図-12(c) No.2の水位からの水位変動

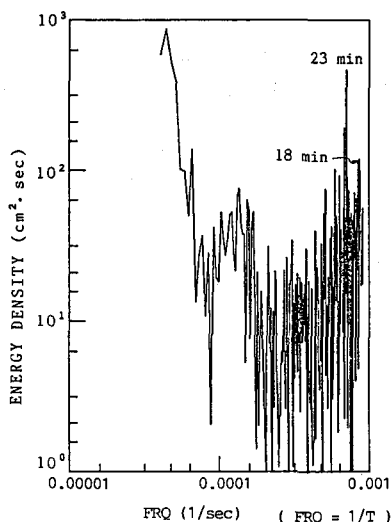


図-13 水位変動のスペクトル図 (No.3)

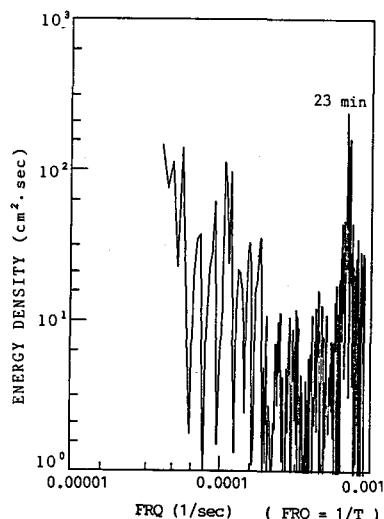


図-14 水位変動のスペクトル図 (No.4)

周期に関してはNeumannの方法があり、湖がN個の入江に分かれている場合 L_i , B_i , h_i を各入江の長さ、幅、および水深とすると、その周期は次式で与えられる。

$$\sum_{i=1}^N Z_i = 0, \quad Z_i = B_i \sqrt{g h_i} \tan(2\pi L_i / \sqrt{g h_i} T) \quad (3)$$

湖山池に上式を適用すると、 $N=1$ として考えると $T=22$ 分、 $N=2$ （南東の入江をもう1つの入江とする）とすると、 $T=2.5, 11, 17, 31$ 分となる。両図を見るとどちらも22~23分の周期が卓越していることがわかる。また、No.3の結果から18分周期のセイシュが生じていることが認められる。どちらの周期も計算値とほぼ一致しており、湖山池に関するセイシュの周期はこの2つの卓越周期を有していると考えられる。また、上記の観測期間中のセイシュの振幅の値に関しては、北風13.0m/secの場合にNo.4で最大5.0cm、No.3で3.5cmを記録している。

5. おわりに

本研究は湖山池における吹送流観測と水位変動観測を行ない、吹送時における湖山池の挙動について検討を行なった。まず、吹送流観測においては、電磁流速計による観測結果より比較的強い風が継続的に吹いた場合鉛直循環流が発生していることが認められ、鉛直方向の特性としてはコリオリ力によるエクマンスパイラルと同様な特性が見い出された。また、表面流速と風速との比に関しては従来Wuらによって観測されている値よりも小さな値となっており、この原因はフェチ不足によるものと推定された。フロートによる観測結果と電磁流速計による観測結果はあまり良い一致が見られず、フロート観測結果は風の影響がかなり含まれていることが明らかとなった。

つぎに、水位観測結果より、湖山池に発生するセイシュの周期は23分と18分のものが卓越しており、また、その振幅は風速が13.0m/secの場合最大5.0cm程度にまで発達することが認められた。また、吹送時の水面勾配に関しては(2)式によって十分評価できることが明らかとなった。

参考文献

- 1) 村岡ら：国立公害研究所報告第19号、昭和56年。
- 2) Deacon and Webb：Interscience, New York, 1962.
- 3) 堀川：海岸工学、東京大学出版社、昭和48年。