

# 小川原湖における風速分布の現地観測

## FIELD MEASUREMENT OF WIND DISTRIBUTION IN LAKE OGAWARA

鶴田泰士<sup>1</sup>・石川忠晴<sup>2</sup>  
Yasushi TSURUTA, Tadaharu ISHIKAWA

<sup>1</sup>学生会員 工修 東京工業大学大学院総合理工学研究科環境理工学創造専攻  
(〒226-8502 神奈川県横浜市長津田町4259)

<sup>2</sup>フェロー 工博 東京工業大学教授 大学院総合理工学研究科環境理工学創造専攻  
(〒226-8502 神奈川県横浜市長津田町4259)

A spatially uniform wind condition is often assumed in numerical calculation of wind driven current in a lake because the information about wind field over water is usually very limited. And, it is just as usual that the influence of this assumption is not fully checked. This paper presents a trial experiment for collecting spatial wind data over the surface of Lake Ogawara, and discusses the influence of the observed ununiformity on calculated currents: A portable anemometer was fixed on a fishing boat running across the lake. The wind field was obtained by vector addition of the measured wind velocity and the boat velocity measured by a portable GPS with the interval of one minute along the line of running. The estimated wind field was almost uniform but had some local distortion which seemed caused by the topography around the lake. Numerical flow calculation by using 3-D  $k-\epsilon$  model showed that the observed small distortion of wind field could result in a considerable difference of calculated currents from that for a uniform wind condition.

**Key Words :** field measurement, wind distribution, removal observation, wind driven current.

### 1. はじめに

湖沼に生起する諸現象の解明にあたっては、湖流による物質輸送の特性を把握することが重要である。最近の計算機の進歩に伴う湖流シミュレーション技術の発達、湖沼に関する学術研究に大きく貢献すると思われる。

ところで、湖流には種々の成因が考えられるが、最も一般的な外力は風である場合が多い。それゆえ、湖流計算においては、湖面上の風向風速分布を正しく入力する必要がある。しかし、湖面上で気象計測が行われている場合は希であるため、当該湖沼に近い測候所で計測されたと同じ風が湖面上に様に吹くと仮定して計算することが多い。

実際の風は、程度の差はあれ、湖面で一様ではない。したがって、非一様性の程度を把握しておくことが必要である。風の場の非一様性について検討する方法は二つ考えられる。一つは現地観測だが、平面分布を求められるほどの数の観測ステーションを湖上に常設することはあまり現実的ではなく、実際、そのような例は少ない。

今一つの方法は、大気流動の数値モデルを構築し、グローバルな気象データから湖上風を計算すること

である。しかしこの場合も、何らかの検証データは必要であり、多少の現地観測を行わざるを得ないと考えられる。

Endou ら<sup>1)</sup>は、3隻の船を使用した定点観測により、琵琶湖上の風分布を調べている。しかし、定点観測では、大きな湖沼における面的な風を計測するには長大な時間がかかるため、観測中に風場が大きく変化してしまう恐れがある。そこで筆者らは、青森県小川原湖において、風向風速計を取り付けた船を走行させて、湖上風の分布の計測を試みたので報告する。

### 2. 現地観測

#### (1) 小川原湖の概要

小川原湖の形状と周囲地形を図-1に示す。小川原湖は青森県東部に位置する汽水湖で、湖面積は65.6km<sup>2</sup>、最大水深は25m、平均水深は11mである。

小川原湖の近くには高い山岳はない。しかし湖の周囲は比高40m程度の丘陵と平野部からなっているため、「風の道」が形成されている可能性がある。筆者の一人は8年にわたって小川原湖の流れの観測を行っているが、漁師さんの話や筆者自身の経験で

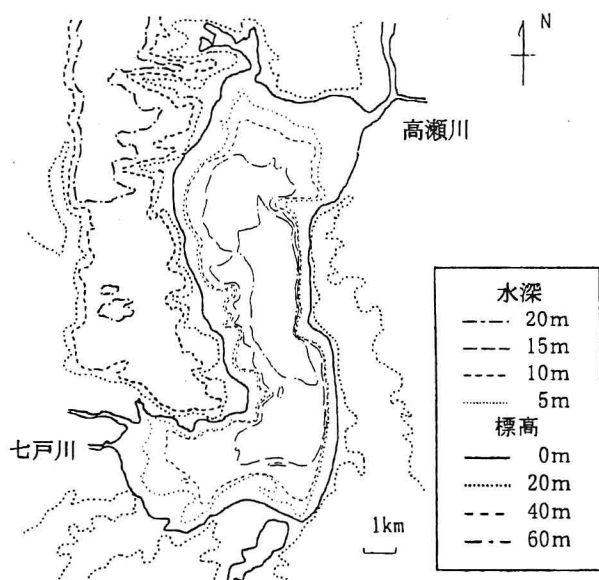


図-1 小川原湖の形状と周囲地形

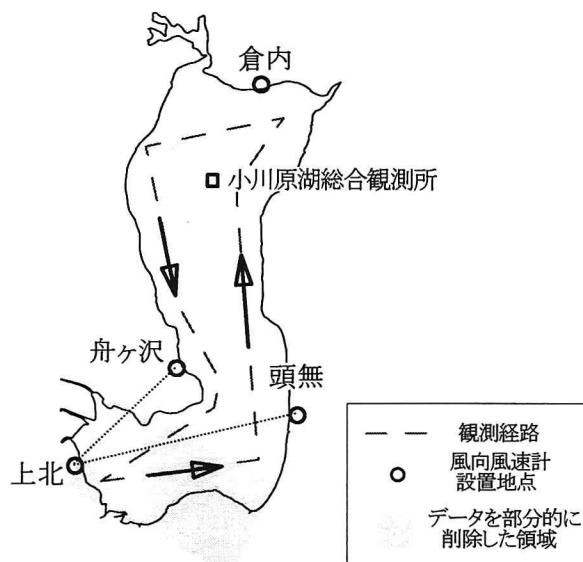


図-2 観測経路と風速計設置地点



写真-1 漁船に設置した風向風速計

も、湖上の風分布には地域性があるように思われる。

## (2) 観測方法

写真-1に示すように、風向風速計を小型漁船に固定し、湖内を走行して計測する。同時にGPSにより船の運動を計測し、計測された風ベクトルから船速ベクトルを差し引くことにより、実際の風向風速を求める。船の走行経路は、図-2に示す周回コースを基準とし、東西方向に若干変動させた。周回方向は反時計回りである。なお、同図のコースを一周するのに要する時間は約1時間20分である。

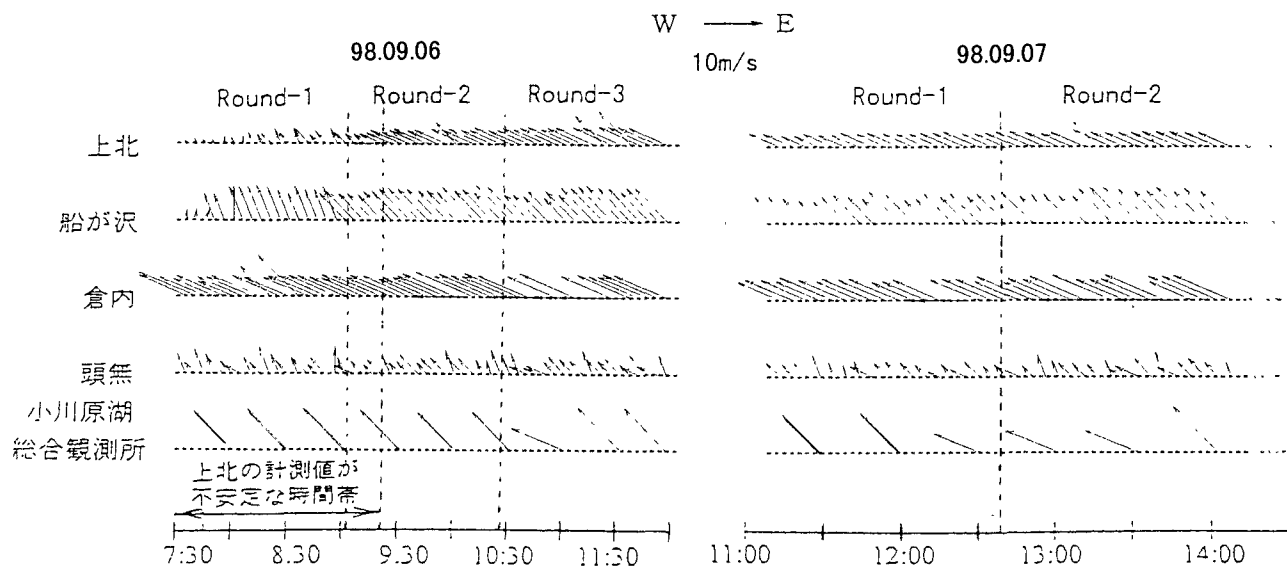
使用した風向風速計は、Davis社製のWeather WizardⅢである。本装置は5秒間隔で計測した風向風速を1分間平均してロガーに記録する。記録値の分解能は、風速が0.1m/s、風向が16方位である。

ただしモニター画面に表示される風向は360°表示で1°の分解能がある。本研究の目的からすると、16方位の風向では精度が悪いので、10秒ごとにモニター画面の360°方位値を記録し、観測終了後に1分平均の風向を求めた。なお風速についてはロガーに記録された1分ごとの値を用いた。各データの精度(マニュアル記載値)は風速が5%、風向が7mである。なお、測定点の高さは水面上3.1mである。

GPSはSPA社製のDGPS IPS-1000Dを使用した。ただし、計測中に、地上局と移動局のうちいずれかの局が衛星信号を受信できず、シングルモードの精度(最大誤差30m程度)に落ち込むことがあった。

船を移動しながら計測しているので、計測時刻は地点ごとに異なっている。したがって、計測値が変化した場合、それが空間的变化なのか時間的变化なのかは判断できない。そこで、湖岸の4地点に同型の風向風速計を設置して、全体的な風場の時間変化を観測した。その設置地点を、建設省の小川原湖総合観測所とともに図-2に示している。設置場所は、上北と船ヶ沢では棧橋先端、頭無では湖上の水位観測所、倉内では排水樋門上とし、できるだけ湖上風を捉えられるように配慮した。しかし、陸地に近いために周囲地形の影響は免れず、また設置高さは地点ごとに異なっている。したがって、これらの計測記録は、風場の時間変動を定性的に把握するための参考データとした。実際、本研究では、これらのデータから風場が定常になっていると判断される時間帯を選んで解析をしている。また部分的に定常でない場合には、その地点付近の水域を船が走行している場合の船上観測データを除いて解析している。

観測は1998年9月4日から7日までの4日間に行った。観測前半の2日間の風は弱く、不安定で



図－3 湖岸および小川原湖総合観測所で計測された風データ  
( 9月6日：左側、9月7日：右側 )

あったが、後半の2日間は、南東の強風が比較的安定して吹いていた。そこで、以下の解析では、9月6日と7日のデータを使用した。

### 3. データ解析

#### (1) 船上で観測された風ベクトル

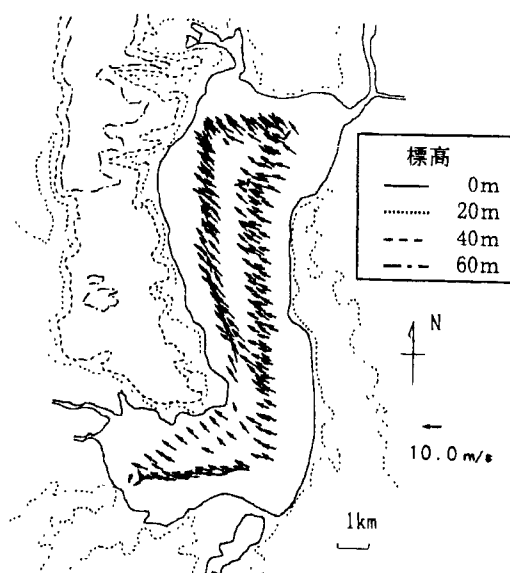
船上の風向風速計で観測されるベクトルは[風速ベクトル－船速ベクトル]である。そこで、風向風速計の記録から1分平均の観測ベクトルを算出し、GPSの記録から1分平均の船速ベクトルを求め、両者の和として湖上の風ベクトルを算出した。

#### (2) 解析に使用する風データの選択

9月6日と7日の観測時間帯における5地点の風ベクトルを図－3に示す。図中の“Round”は、船が湖を1周することに対応している。両日とも観測時間帯の後半は安定した風が吹いている。しかし前半では、上北における風が変動している。また船ヶ沢においても、6日のRound-1の開始後15分程度は安定していない。

そこでまず、6日のRound-1の最初15分のデータは使用しないこととした。また、上北の計測値が安定しない時間帯(図－3に矢印で示す)には、図－2に網掛けで示すように、上北と船ヶ沢及び頭無の中間点を結ぶ線の西側のデータは使用しないことにした。また、船が向きを大きく変える地点付近では、船速ベクトルが乱れる傾向があるので、これらも部分的に削除することにした。

以上のデータを除いた残りのデータを、各データが測定された位置(GPSで計測された船の位置)にプロットすると図－4を得る。この図によれば、Roundごとに若干の変動はあるものの、湖面上の風の分布に明確なパターンが見て取れる。すなわち、



図－4 観測で得られた風速分布

湖南部に吹き込んだ風は、南の湖岸に沿って西向きに進む成分と、北西に進む成分に分離する傾向がある。また西岸の鶴ヶ崎の岬付近では、岬の奥の台地に吹き上げる傾向が見られる。一方、鶴ヶ崎の北側では、湖心部から西岸に向かうにつれて、風向が北向きに変化する傾向がある。また、湖北部では風向をやや北寄りに変化し、西岸沿いに北上した風と合流して北西に吹き抜けている。

このような風の空間分布と周囲の丘陵配置の関係を見ると、風が丘陵の影響で偏向しているように思われる。先に述べた通り、小川原湖周囲の丘陵の比高は40m程度である。一方、小川原湖の水平スケールは短軸方向でも平均4km程度あるので、地形の

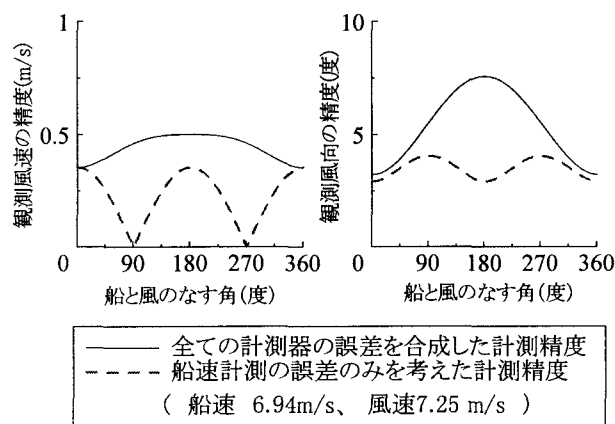


図-5 観測された風向風速の計測精度

縦横比は1/100程度である。このことから、周囲地形が風の場合に及ぼす影響はかなり大きいものと考えられる。

本観測手法による計測精度は、船速と風速、船の進行方向と風のなす角度により変化する。そこで、前に述べた計測装置（GPS、風向風速計）の精度を計測値の95%をカバーする値（標準偏差の2倍に相当）であると仮定し、誤差伝播の法則に基づいて、計測精度を計算した。船速及び風速は、本観測での代表値（各々25km/h、7.25m/s）とした。計算値の標準偏差を図-5に実線で示す。なお図中の破線は、風向風速計自体の計測誤差を考慮しない場合の計算結果である。

なお、実際には計測装置による誤差の他に、船体の揺れや一時的な走行経路のゆがみ等、様々な誤差が生じることが考えられるが、ここでは船が安定して走行した場合について計算した。

風速の計測精度は0.5m/s以下であり、観測時の風速が平均7m/s以上であることを考えると、ごく微小な誤差である。一方、風向の最大計測誤差は7度程度である。これは32方位（11.25度）よりも小さく、一般的な風計測に対する要求に耐え得る値といえる。また、後に図-8に示す湖南部と湖北部の風向差と比較しても、計測精度の方が明らかに小さい。従って、本観測手法には、湖内の風分布を論じるうえで、十分な精度があると考えられる。

なお、ここではGPSの精度を一様に30mとして計算しているが、ディファレンシャルモードで計測している間の精度はより向上する。

#### 4. 風場の非一様性が湖流に及ぼす影響の試算

現地観測された風場には非一様性が認められたが、その程度は比較的微小なものである。この程度の風場の非一様性が、湖流計算結果に有意な影響を及ぼすかどうかを検討するために、k-εモデルを用いた三次元数値シミュレーションを行った。

すなわち、次に述べる手法により、観測データを内外挿して湖面全体の風ベクトルを作成し、これを入力として湖流の計算を行った。次に、その風ベク

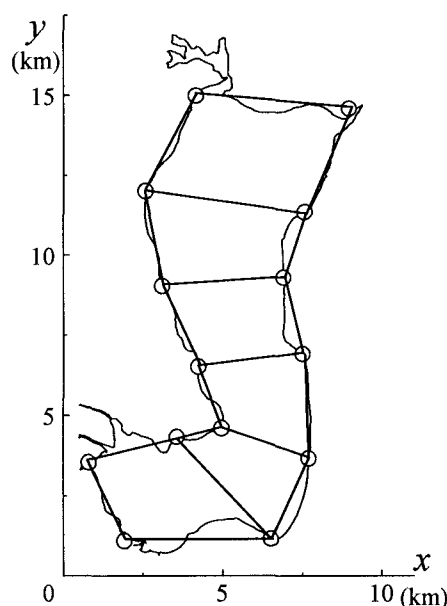


図-6 矩形要素

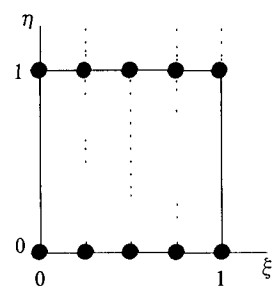


図-7  $\xi - \eta$  座標の節点配置

トルを湖面上で平均し、その平均風ベクトルを湖上で一様に与えた場合も計算して、両者の結果を比較した。

##### (1) 風ベクトルの内外挿

図-6に示すような実空間上の四辺形の集合形を、図-7に示す1x1の領域に写像する。写像関数を次のように置く。

$$X = \sum X1_i \cdot \Phi1_i(\xi, \eta) + \sum X2_i \cdot \Phi2_i(\xi, \eta) \quad (1)$$

$$\Phi1_i(\xi, \eta) = (1 - \eta) \cdot (a0_i + a1_i \xi + a2_i \xi^2 + \dots) \quad (2)$$

$$\Phi2_i(\xi, \eta) = \eta \cdot (a0_i + a1_i \xi + a2_i \xi^2 + \dots) \quad (3)$$

ここにXは実空間の位置ベクトル(x, y)、X1<sub>i</sub>、X2<sub>i</sub>は共に位置に関する係数ベクトル(x1<sub>i</sub>, y1<sub>i</sub>)、(x2<sub>i</sub>, y2<sub>i</sub>)である。

図-7のξ軸上に配置された節点の数がnの場合、式(2)または(3)の中のξの多項式を(n-1)次関数に置けば、ξ軸上のある1点で1、他の全ての点でゼロとなるような係数の組み合わせを定めることができる。その結果、ξ軸上の節点に写像される実空間内の点の座標はX1<sub>i</sub>、η=1上の節点に写像される実空間内の点の座標はX2<sub>i</sub>となる。これは有限要素法のアイソパラメトリック要素における節点座標と局所関数の関係の一般形である。

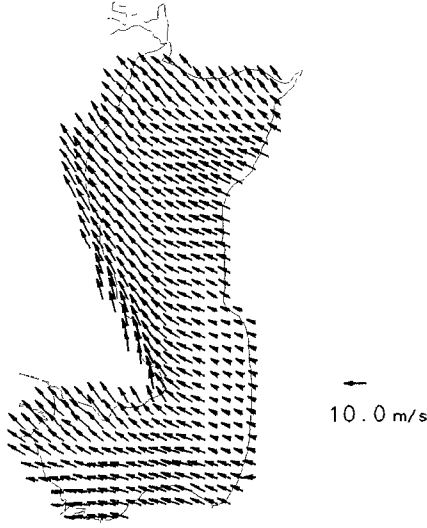


図-8 風ベクトルの内挿結果

次に、 $[\xi - \eta]$ 領域において風ベクトルを内挿する。

$$U(\xi, \eta) = \Pi A_{lm} \cdot F_l(\xi) \cdot F_m(\eta) \quad (4)$$

ここに、 $U(\xi, \eta)$ は $(\xi, \eta)$ における風ベクトル、 $\Pi$ は1、 $m$ の可能な組み合わせの総和、 $A_{lm}$ は係数ベクトルである。 $F_l(\xi)$ と $F_m(\eta)$ は、式(2)及び(3)の中に含まれる $\xi$ の多項式と同様の関数で、指定された節点で1、他の節点でゼロとなる多項式である。本研究では、 $F_l(\xi)$ の節点数は両端を含めて7、 $F_m(\eta)$ の節点数は3とした。式(4)で計算される風ベクトルと観測された風ベクトルの残差の絶対値の自乗和が最小になるように、係数ベクトル $A_{lm}$ を最小自乗法で決定した。最後に、式(1)により対応する位置に、式(4)で求まる結果を当てはめれば、実空間における風場が得られる。その結果を図-8に示す。

## (2) 湖流の試算

$k-\varepsilon$ 乱流モデルを用いて湖流を計算した。基礎方程式は、以下に示すとおりである。ただし、 $z$ 方向には、ブシネスク近似を施している。

$x$ 方向の運動方程式：

$$\frac{Du}{Dt} - \frac{\partial}{\partial x} \left( \nu_L \frac{\partial u}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( \nu_L \frac{\partial u}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left( \nu_T \frac{\partial u}{\partial z} \right) = f_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (5)$$

$y$ 方向の運動方程式：

$$\frac{Dv}{Dt} - \frac{\partial}{\partial x} \left( \nu_L \frac{\partial v}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( \nu_L \frac{\partial v}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left( \nu_T \frac{\partial v}{\partial z} \right) = f_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \quad (6)$$

$z$ 方向の運動方程式：

$$\frac{Dw}{Dt} - \frac{\partial}{\partial x} \left( \nu_L \frac{\partial w}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( \nu_L \frac{\partial w}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left( \nu_T \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \delta g \quad (7)$$

乱れエネルギー $k$ の保存式：

$$\frac{Dk}{Dt} - \frac{\partial}{\partial x} \left( \nu_{Lk} \frac{\partial k}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( \nu_{Lk} \frac{\partial k}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left( \nu_{Tk} \frac{\partial k}{\partial z} \right) = P_r + G - \varepsilon \quad (8)$$

散逸率 $\varepsilon$ の保存式：

$$\begin{aligned} \frac{D\varepsilon}{Dt} - \frac{\partial}{\partial x} \left( \nu_{L\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( \nu_{L\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left( \nu_{T\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) \\ = C_1 \frac{\varepsilon}{k} P_r + C_1 (1 - C_3) \frac{\varepsilon}{k} G - C_2 \frac{\varepsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (9)$$

相対浮力の保存式：

$$\frac{D\delta}{Dt} - \frac{\partial}{\partial x} \left( \nu_{L\delta} \frac{\partial \delta}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( \nu_{L\delta} \frac{\partial \delta}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left( \nu_{T\delta} \frac{\partial \delta}{\partial z} \right) = S \Rightarrow 0 \quad (10)$$

連続式：

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (11)$$

ただし

$$\begin{aligned} P_r = \nu_t \left[ 2 \left\{ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right\} + \right. \\ \left. \left\{ \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \right\} \right] \end{aligned}$$

$$G = -g \nu_\delta \frac{\partial \delta}{\partial z}, \nu_T = \nu + \nu_t = \nu + C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \nu_L = 0.01 L^{4/3}$$

$$\nu_{Lk} = \nu_L, \nu_{Tk} = \nu_T, \nu_{L\varepsilon} = 0.77 \nu_L, \nu_{T\varepsilon} = 0.77 \nu_T$$

$$\nu_{L\delta} = 1.2 \nu_L, \nu_{T\delta} = 1.2 \nu_T$$

$$C_1 = 1.44, C_2 = 1.92, C_3 = 1.0, C_\mu = 0.09$$

ここで、 $x, y$ は水平座標、 $z$ は鉛直上向き座標、 $u, v, w$ は、それぞれ $x, y, z$ 方向の流速、 $k$ は乱れエネルギー、 $\varepsilon$ は粘性散逸率、 $\delta$ は相対密度差である。また $p$ は圧力、 $\nu_t$ は鉛直方向の渦動粘性係数、 $\nu_T$ は鉛直方向の実効動粘性係数、 $\nu_L$ は水平方向の渦動粘性係数、 $\nu_{Ti}, \nu_{Li}$ は、それぞれ物理量 $i$ の鉛直、水平方向の拡散係数、 $L$ は計算メッシュサイズ、 $f$ はコリオリ係数( $8.6 \times 10^{-5} 1/s$ )、 $g$ は重力加速度である。

本モデルは銭ら<sup>2),4)</sup>と同じものであり、その成層流計算に対する妥当性は、実測データとの比較から、ある程度検証されている。

ここでの数値計算は、前節に示した程度の風場の非一様性が、吹成流の計算結果に有意な影響を及ぼすかどうかを検討するために行うものである。

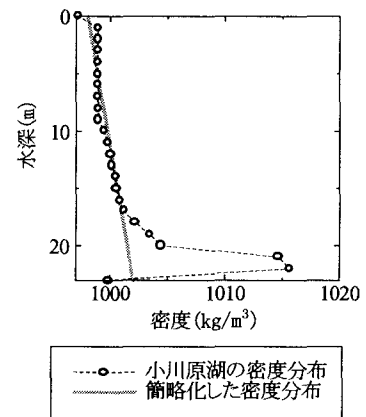


図-9 小川原湖の夏期の密度分布

風場以外の計算条件は、必ずしも実際通りの値を与えなくてもよいと考え、以下のように与えた。

図-9の破線は筆者らが夏期に観測した密度分布であるが、水深20m付近の塩分躍層は極めて安定であり、短時間の風ではほとんど動かない。そのため、吹成流は、主に密度差の少ない塩分躍層の上層で生じている。そこで、ここでは密度分布を、水深20m付近の塩分躍層より上部の分布を簡略化し、同図中実線のように与えた。流出入はないものとした。また、流速の初期条件は静止状態とした。

図-8に示した風ベクトルから、次式を用いて風応力を求め入力した。<sup>3)</sup>

$$\rho_w U_*^2 = 0.5 \times 10^{-3} \rho_a U_{10}^{2.5} \quad (12)$$

メッシュサイズは、水平方向は400m x 400m、水深方向は1mである。また、計算時間は、湖流がほぼ安定する72時間とした。計算結果を図-10-aに



図-10-a 風分布を考慮した湖流計算結果  
(水深5.0m)

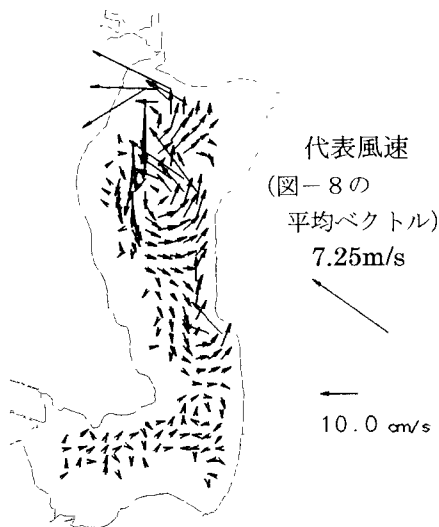


図-10-b 一様な風速を与えた場合の湖流計算結果  
(水深5.0m)

示す。次に、図-8の風ベクトルを湖面上で平均し、この平均風ベクトルを入力として同様の計算を行った。その結果を図-10-bに示す。どちらの計算においても、湖北岸、湖心部、中央部東岸に、特に大きな流速が見られるが、それらの地点は、水深の浅い水域に対応している。

一様な代表風速を与えた場合、湖北部と南東部に環流が生じている。これは、水深が浅い湖岸沿いで生じた浅水流的な流れに誘起されたと考えられる。一方、風分布を与えた場合、西の湖岸に沿って、北西方向の速い流れが生じている。これは、図-8に示す風ベクトルのうち、西の湖岸沿いを北西方向に吹く比較的強い風の影響によるものと考えられる。また、湖南部では東岸から北西に向かう風に引きずられるようにして、東向きの流れが生じている。これは、図-8に示す風ベクトルのうち、湖南部の風が西の湖岸沿いを北西方向に吹く風に比べて弱いためと考えられる。以上の結果から、観測された程度の風ベクトルの変化が、湖流に大きな影響を及ぼすことがうかがえる。

## 5. おわりに

本研究では、青森県小川原湖において、船舶を用いた風の現地計測を行い、湖面上の風場の非一様性を検討した。その結果、湖内の風の分布特性は、湖沼周囲の地形の影響を強く受けていることがわかった。

また、現地観測で得られた風分布を湖流の数値計算に入力した場合、一様な代表風速を与えた場合と比べ、風によって誘起される湖流がかなり異なることがわかった。

謝辞：本研究を行うにあたり、小川原湖漁協と建設省東北地方建設局高瀬川総合開発工事事務所に多大の御助力を頂いた。記して謝意を表する。

## 参考文献

- 1) S.Endou, M.Watanabe, H.Nagata, F.Maruo, T.Kawae, C.Iguchi, Y.Okumura: Wind Fields over Lake Biwa and Their Effect on Water Circulation., Jpn.J.Limnol., 56, 4, pp.269-278, 1995.
- 2) 銭新、石川忠晴、西部隆宏: 霞ヶ浦高浜入りにおける日成層形成時の湾水交換の数値シミュレーション、海岸工学論文集、第44巻、pp.1051-1055、1997.
- 3) 水理公式集、pp.578、1997.
- 4) 銭新、石川忠晴: k-εモデルによるDI型連行現象の再現性について、土木学会論文集、No.593/II-43, pp.177-182、1998.

(1998. 9. 30受付)