

小川原湖の内部流動と混合現象に関する現地観測

FIELD MEASUREMENT OF WIND-DRIVEN CURRENT AND MIXING IN LAKE OGAWARA

西田修三¹・佐野俊幸²

Shuzo NISHIDA and Toshiyuki SANO

¹ 正会員 工博 大阪大学大学院助教授 工学研究科土木工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘2-1)

² 学生会員 大阪大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘2-1)

Structures of wind-driven currents and water temperatures were measured to clarify the mixing process in a brackish lake with salinity interface at about 20m depth. Time series data were collected at every 1m depth by using an ADCP and a thermistor chain.

Current of about 20cm/s was generated by the wind speed of about 10m/s, and continued for long time after the wind stopped due to generation of internal waves. Vertical profiles of velocity gradient indicated high values not only in thermocline region but also in the vicinity of the salinity interface. Profiles of gradient Richardson number had small values less than 1.0 in these layers and surface layer. This means that there are possibilities of mixing in some layers, and in fact an increase in the potential energy was detected after wind blew.

Key Words: *Stratified lake, wind-driven current, Richardson number, mixing, ADCP*

1. はじめに

湖沼では熱的鉛直循環の他に風に起因した大きな流動や内部波の発生も見られ、湖沼水の混合に大きな役割を果たすことが知られている。しかし、計測の難しさと現象の複雑さから、現地スケールでの現象の把握と混合過程の定量化は未だ十分にはなされていない^{1), 2), 3)}。

これまで実施されてきた湖沼の現地観測は、時空間変動が緩やかで、かつデータの採取が比較的容易な水温構造をはじめとする水質観測が中心であった。一方、流動に関しては、微流速であるうえに時空間変動が大きいので、有意なデータの採取が難しく、観測例は少ない。

さらに、多様な生態系を有する汽水性湖沼では、水環境と生態系の保全からその実態把握が必要とされながらも、水温成層と塩分成層が混在し現象を複雑化しているとともに、現象の普遍性に増して個別性が強く、流動と水質を十分な精度で予測するには至っていない^{4), 5), 6)}。

そこで、本研究では汽水湖である小川原湖をフィールドに、風に起因した流動と混合現象に着目した現地観測を実施し、その実態の把握と成層破壊機構について解析を行った。流動の観測には、超音波ドップラー流速計(ADCP)を使用し、水温の多点観測とあわせて、流動と成層構造の同時計測を実施した。

2. 小川原湖の概要

観測を実施した小川原湖は、青森県東部に位置し、八甲田山系に源を発する一級河川高瀬川水系の一部をなしている。約6kmの高瀬川を介して太平洋に繋がる、湖面積63km²、平均水深11m、最大水深25mの湖である(図-1)。淡水供給は主要6河川の河川水と湖面への直接降雨によってなされ、年総流入量はほぼ湖容量に相当する。一方、湖内への塩分の供給は、湖水位と外海水位の逆転時に高瀬川河口より遡上流入する外海水によって間欠的になされている^{5), 7)}。この塩水流入と低塩分表層水の流出がほぼバランスし、

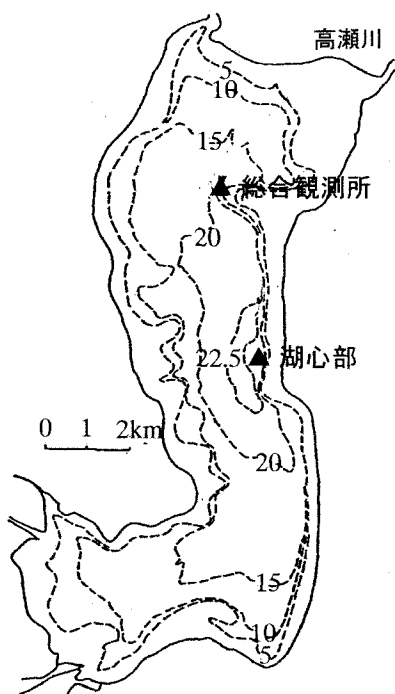


図-1 小川原湖

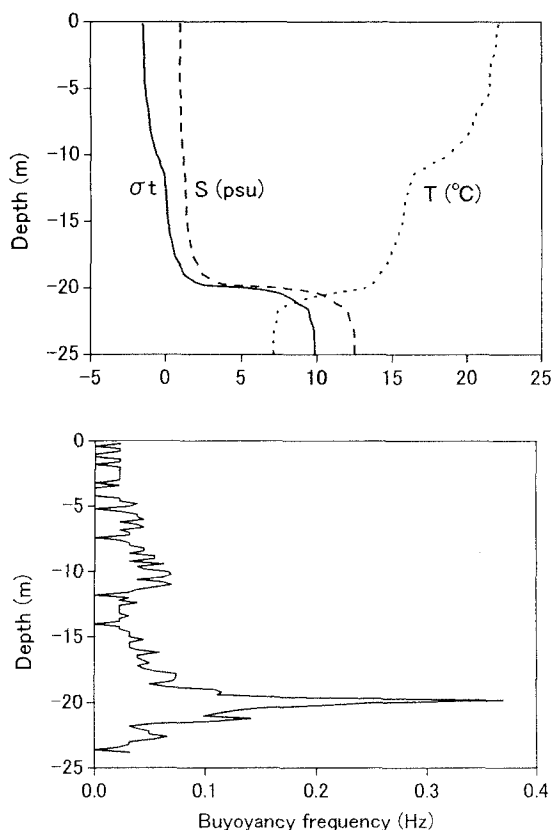


図-3 成層構造とバイサラ振動数の鉛直分布

近年、小川原湖では水深18～21m以深の底層部に一年を通して約12psu（海水の約1/3）の塩水が存在し、安定した塩分循環を保っている。水温の成層化は5

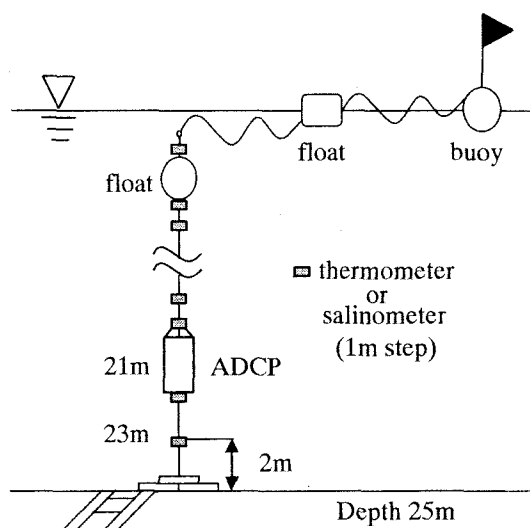


図-2 計測機器設置状況（最深部、全水深25m）

月に始まり、観測を実施した8月に最も発達する。気温が低下する9月から混合層厚が増し、10月には水温成層は破壊され、塩淡水二成層となり循環期を迎える。一年を通して、表層塩分濃度は1～2psuの値を示している⁶⁾。

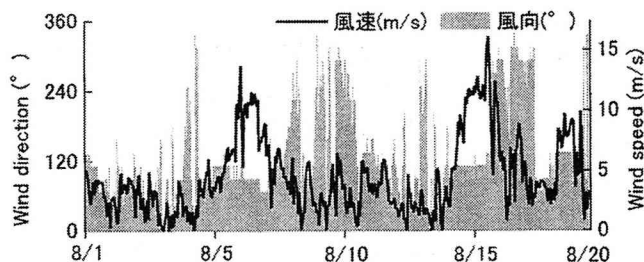
小川原湖には、多様な生物相が生息し、生物量も高い水準にある。これは、淡水域から高塩分域まで広範囲に及ぶ塩分環境によるところが大きい。この塩分環境は、水温成層状況と大きく関係し、その変動は生態系に大きな影響を及ぼしている。また、魚介類の生育に影響を及ぼす溶存酸素も、水温成層と大きく関わり、平成6年の猛暑渇水年には、小川原湖においてシジミ貝の大量死が報告されている。

これまで、小川原湖の巨視的な塩分循環過程に関する研究^{5), 6), 7)}はなされてきたものの、湖水流動と成層破壊機構の実態に関する十分な調査・解析は未だなされていないのが現状である。

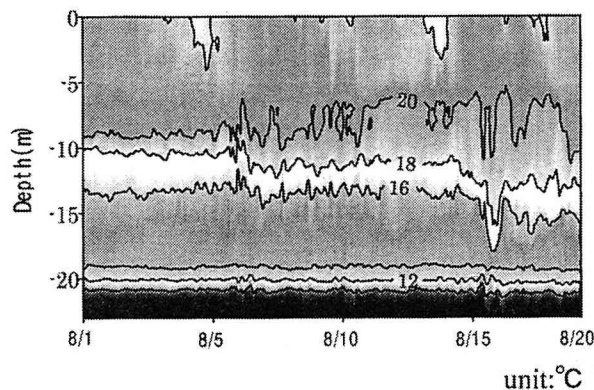
3. 現地観測

1998年7月28日～8月20日にわたり、図-1に示す小川原湖の湖心部（最深部、全水深25m）にADCP（1200kHz）を設置し、鉛直流速分布を10分間隔で計測した。使用したADCPの最大計測レンジが20m以下であることを考慮し、本体を水深約21mに設置し、表層から水深約20mまでの流速計測を行った。同時に、同地点において1m間隔に水温計もしくは塩分計を設置し、成層構造の変動も併せて10分間隔で計測した。機器の設置状況は、図-2に示すとおりである。また、観測期間にSTDを用いた水温・塩分の鉛直分布観測も実施した。解析に必要な気象データ等は、湖北に位置する湖内総合観測所で定時観測されているものを利用した。

a) 風速・風向



b) 水温



c) 流速

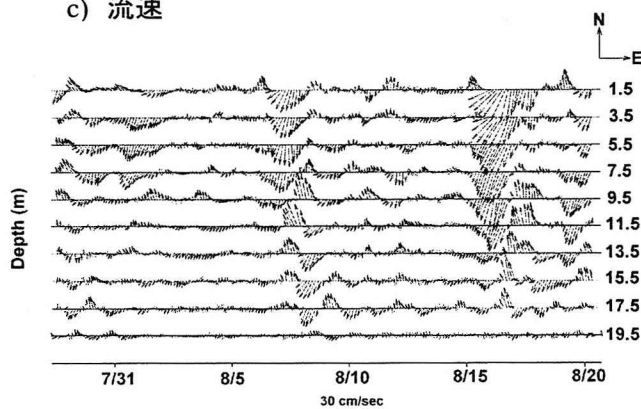


図-4 水温・流速変動

4. 観測結果および解析

(1) 密度の鉛直構造

観測開始時の7/28に最深部でSTDを用いて計測された水温塩分構造とバイサラ振動数 N

$$N^2 = -g/\rho \times d\rho/dz \quad (1)$$

の鉛直分布を図-3に示す。水深10m付近には水温躍層が存在し、さらに約20m以深の底層部には約12psuの塩水が貯留され強い塩淡水界面を形成していることがわかる。密度構造は、概ね上層の水温二成層と下層塩水層の三層構造をなしている。

(2) 水温変動と流速変動

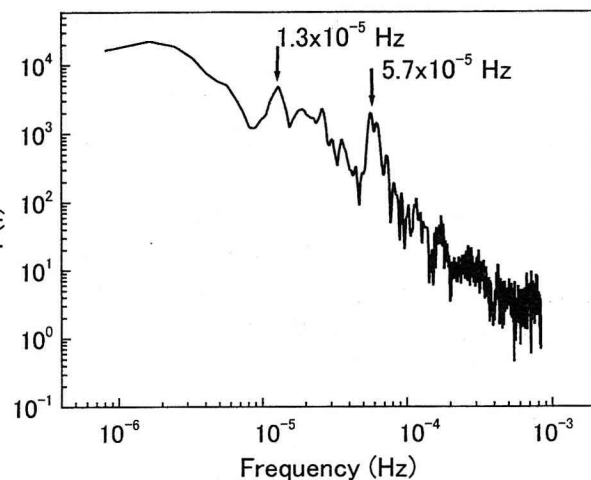


図-5 水温変動のパワースペクトル (水深10m)

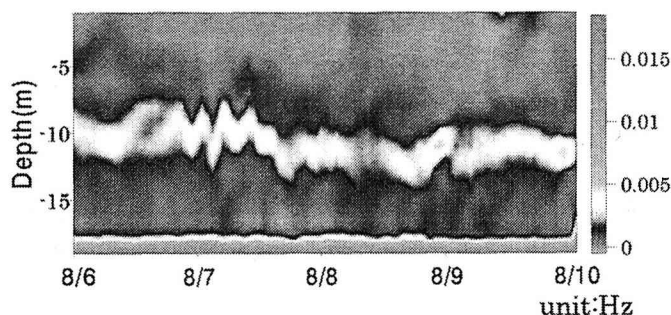


図-6 バイサラ振動数の時空間変化

図-4は、水深1m間隔で連続観測された水温と流速データを基に描いた水温等値線と水平流速（北流成分と東流成分の合成ベクトル）の変動を示したものである。ただし、データには1時間の移動平均を施している。また、図には湖内総合観測所で計測された風向・風速も併せて示している。

20m付近の強い水温躍層は塩淡水境界によるもので、成層強度には塩分濃度が支配的となっている。8/7前後と8/15前後の10m/sを超える強い南東風に連動して、水温等値線が大きく変動している。特に8/15には水深10m付近の水温躍層が急激に低下し、成層強度の差異により水温躍層の変動規模にも相違が見られる。風停止後も、躍層部では風によって誘起された内部静振や内部波が長期間継続して存在していることがわかる。水温躍層の急変現象後に躍層降下が回復しなかったことから、風による大きな混合が生じたこともわかる。

ちなみに、成層湖沼の界面変動と混合形態のパラメタであるWedderburn数⁸⁾

$$W = R_{i*} \times 2h_1 / L \quad (2)$$

(h_1 : 上層厚, L : 湖長, R_{i*} : 水面の摩擦速度と上層厚を代表スケールとしたRichardson数)を用いて、水温躍層（水深10m）の湧昇限界を $W=1$ の条件から求

めてみると、小川原湖の主軸である南北方向(12km)に対しては、風速約12m/sの値を得た。最大風速16m/sが観測された8/15の躍層の大きな変動は、風向を考慮すればほぼ湧昇限界にあったことが予想され、風速の減衰にともない大きな内部静振が生じたものと考えられる。

図-5は、水深10mで計測された水温変動のスペクトルである。1.3×10⁻⁵Hz(周期21時間)と5.7×10⁻⁵Hz(周期4.9時間)に卓越したスペクトルピークがみられる。小川原湖の形状と観測期間の密度構造より水温躍層の静振周期を算定したところ26時間と得られ、低周波側のスペクトルピークはこの1次の内部静振に対応するものと考えられる。一方、高周波側のピークの周期は4.9時間と短く、横静振または伝播性の内部ケルビン波に対応するものと考えられるが、1

地点の観測のためその特定には至っていない。

図-4c)に示した流速変動にもこの1次モードの静振の発生による卓越した変動が明瞭にとらえられており、流動構造は水温成層の影響を受けて水深方向に位相変化し、波動場の特性を有している。その結果、例えば8/8には水深約10mの躍層付近では上下で反転した流動がみられ、大きなシアーが生じていることがわかる。後述のように、このシアーの生成が混合現象に支配的な役割を果たしているものと考えられる。また、風速約10m/sに対し表層部混合層では20cm/s近くの流動が生じているとともに、塩淡水界面近くの深部においても大きな流動が発生していることがわかる。この強い流動は、塩淡水界面をも刺激し短周期の界面波を発生させていることもわかる。

(3) シアーの時空間構造

成層強度を表すパラメタとしてバイサラ振動数*N*の変動を示したのが図-6である。吹風による混合層厚の増加と躍層の低下がみられるとともに、内部波に応じ周期的変動も現れている。

ADCPによって得られた1m間隔の流速分布を基に、流速の鉛直方向勾配の時空間変動を求めたのが図-7である。吹送流発達段階では、水面における直接的なせん断により表層でシアーが生じ、時間の経過とともに下方にシアー域を拡げている。しかし、風速が減衰し始めると、大きな内部変動の発生により躍

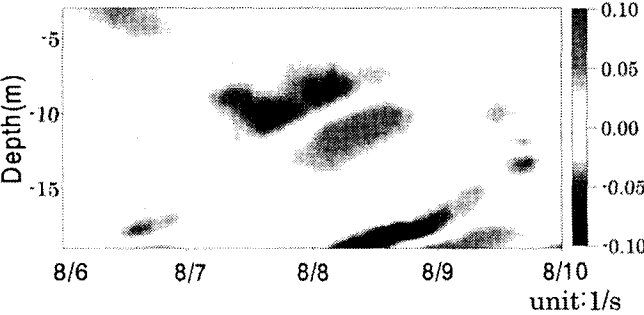


図-7 シアーの時空間変化

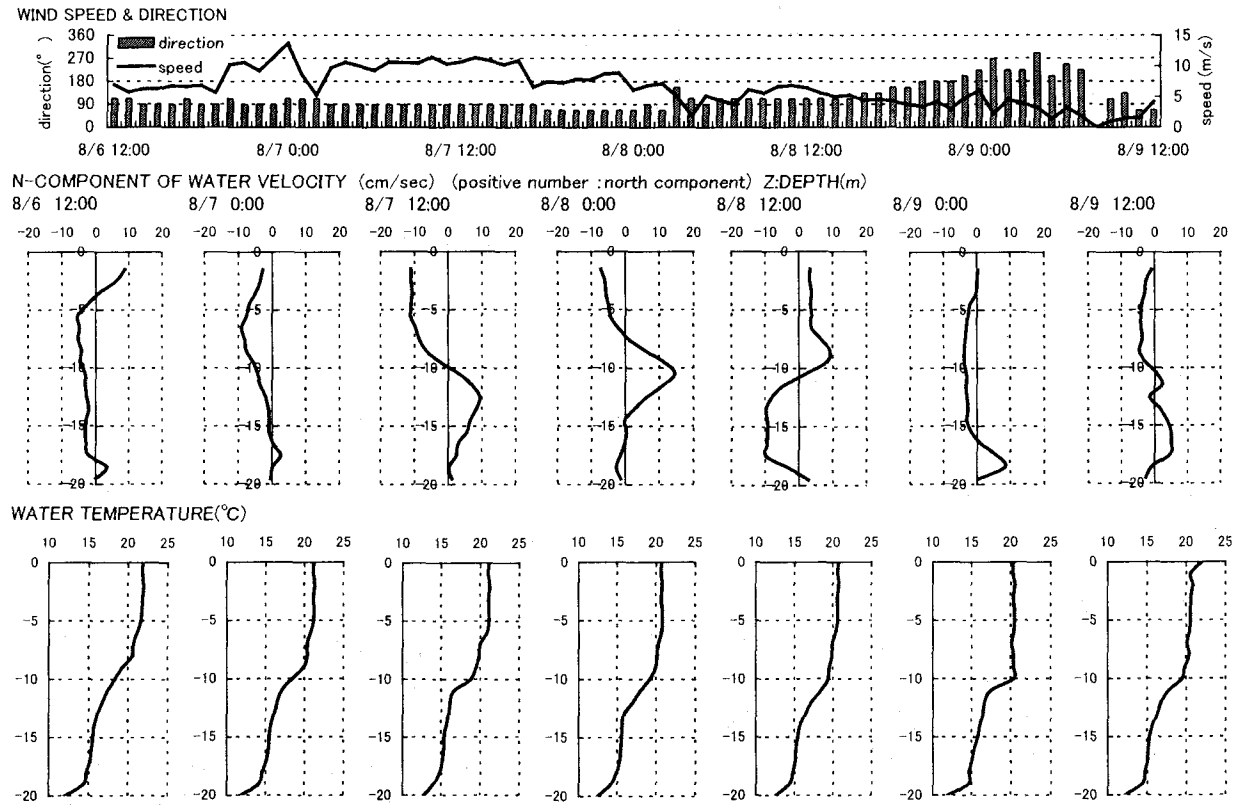


図-8 流速分布と密度分布の経時変化 (8/6~8/9)

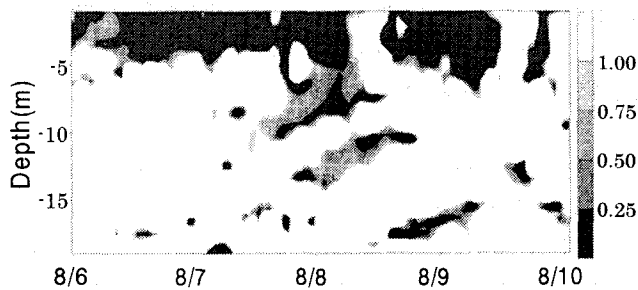


図-9 Richardson数の時空間分布 ($Ri < 1$)

層付近に表層よりも強いシア領域が現れ、表層からのシアの発達状況とは異なり、時間の経過とともに上方にシア領域を拡大している。その後、塩淡水境界上部にも強いシア領域が出現し、躍層部と同じく時間の経過に伴い上方にシア領域を拡大しているのがわかる。このシア領域の上方移動は、成層効果による内部波動の鉛直方向位相変化に起因するものと考えられるが、詳細は明らかでない。この期間における一連の流速と水温分布の変化を示したのが図-8である。強いシアの発生と内部波の発生に伴う大きな流速変動、その結果生じる混合層の発達、さらには塩淡水境界面での流動の発生等、その構造の変化がよくわかる。

(4) 不安定性と成層破壊

内部流動によって引き起こされるせん断不安定の可能性を定量的に評価するため、勾配型局所リチャードソン数 R_i

$$R_i = N^2 / (du/dz)^2 \quad (3)$$

の鉛直分布の経時変化を算定した。図-9には、 R_i の時空間変動を図示した。シアの時空間構造と同様に不安定の出現可能領域 ($R_i < 0.25$) は、時間の経過とともに3つに大別できる。第1は吹送流発達段階における不安定域の出現で、風の発達とともに表層から生じる。第2は内部静振の発生に伴う不安定域で、風の減衰にともない躍層付近で出現する。第3は上層内の内部静振に誘発されて出現する塩淡水境界面直上の領域である。以上のように、風による混合が水表面からの直接的な乱れの供給とシアの発生による他、風減衰時に発生した内部波動による強いシアが躍層付近の混合に大きく寄与していることが予想される。さらに、塩淡水境界面直上に形成される不安定域の出現は、3層構造をなす深大な汽水性の小川原湖の特性とも言え、塩分輸送に大きな役割を果たしていると考えられる。過去の観測結果をみると、成層期には水温躍層の下部から塩淡水境界面に至る水深に塩分の漸変層が発達し、表層への塩

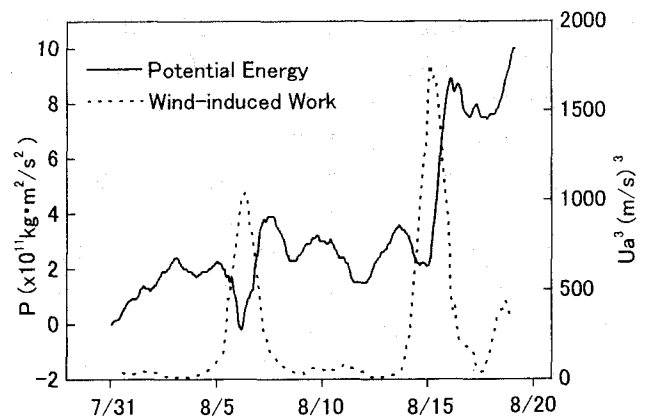


図-10 ポテンシャルエネルギーの変化

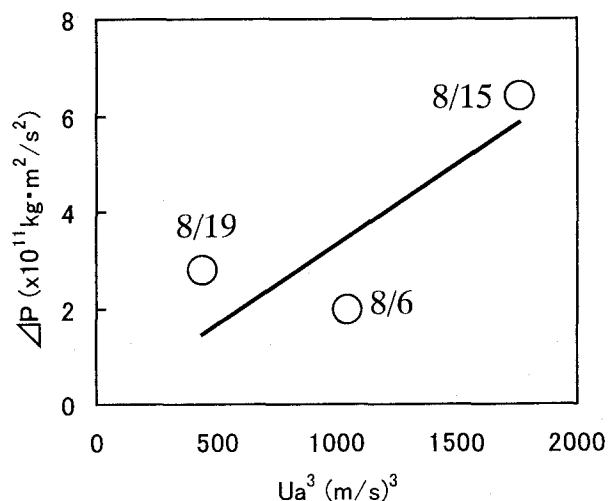


図-11 風速と混合エネルギーの関係

分供給の役割を果たしている。塩水層からの塩分連行と漸変層の発達に、上述の不安定領域の出現が大きく作用しているものと考えられる。さらに、この不安定域は時空間的な過程を経て形成されるもので、風との直接的相関関係は見いだせない。そのため、これまで行われてきたような風速または表層せん断力をパラメタとした、連行拡散の定量化と予測手法の下層塩淡水境界への適用は困難と考えられる。

成層破壊の過程をエネルギーの面から評価を行ってみる。成層化した湖沼の有するエネルギーは、ポテンシャルエネルギーや、流動(循環流)エネルギー、乱れエネルギー等のエネルギーの総和で与えられる¹⁰⁾。ここでは、混合現象に着目しポテンシャルエネルギーの増減、つまり混合の有無について解析を行うことにする。簡単のため熱輸送に関しては考慮しない。観測地点(湖心)を代表点として、1mごとの観測値を用いて上層内15mまでのポテンシャルエネルギー

$$P = \int \rho g z A(z) dz \quad (4)$$

を算定し、観測開始時の水面を基準としたエネルギーを基底として増減で表したのが図-10である。ただし、 $A(z)$ は各層の等深面積であり、得られたポテンシャルエネルギーには1日移動平均を施している。図には、風によるエネルギー供給量に関係する風速 Ua の3乗値も併せて図示している。ポテンシャルエネルギーは内部波動の影響を受け変動しているが、吹風の前後で増加しており、風によって確かに混合がなされたことが見てとれる。また、風の強さに応じてエネルギーの増加量も変化し、両者には相関関係が認められる。

図-11は、代表的な吹風時の Ua^3 とポテンシャルエネルギーの増加量 ΔP の関係を示したものである。 P の変動には波動成分も含まれるため、混合によるエネルギーの変化の分離抽出は困難である。そのため、ここでは巨視的な混合特性を捉えるために近似的に、吹風直前の P と吹風後の最大の P を用いて ΔP を算定した。また、風速についても各イベントの最大風速をもって代表させている。結果をみると得られたデータは少ないが、おおよそ両者には線形の関係が認められる。もしも線形関係が成立すれば、風速または水面の摩擦速度を速度スケールとして -1 乗の連行則が成り立っていることを示すもので、小川原湖においても表層に形成される混合層の発達予測に、この連行則の適用が可能であることを意味している。

5. おわりに

小川原湖での観測データを基に、夏季における湖水の流動現象の解析を行い、その実態把握と変動特性の解析を行った。成層化した湖では表層から供給される乱れに起因した混合と、循環流によって生じるシアに起因した混合が支配的とされている。しかし今回の観測により、風の減衰期や停止後にも内部で大きなシアが形成され、成層破壊に至るに十分な不安定性が生じることがわかった。さらに、小川原湖の塩分環境を決定する底層塩水の連行には、風停止後に塩淡水界面直上に形成される強いシアが大きく関わっていることも示唆され、この現象を

取り込んだ新たなモデル化が必要と考えられる。今後、数値実験による再現計算との比較検討を行い、現地観測では十分に把握できない空間構造の解明を行うとともに、混合現象の精度の高いモデル化を進めるつもりである。

謝辞：本研究を実施するにあたり、建設省高瀬川総合開発工事事務所から水理データの御提供を頂くとともに、現地観測において御高配を頂いた。記して感謝の意を表するとともに、本研究の一部は文部省科学研究助成の補助を受けて実施できたことを付記する。

参考文献

- 1) 道奥康治・神田徹・石川勝久：貯水池での水温計測に基づく内部波・自然対流の抽出，水工学論文集，vol.43，pp.1049-1054，1999.
- 2) 大久保賢治・長井重威・大林史典：湖の多重拡散対流場における正逆水温躍層の形成とその界面現象，水工学論文集，vol.41，pp.463-468，1997.
- 3) 石川忠晴・田中昌宏：DIM型連行現象に関する理論的考察，土木学会論文集，No.416/II-13，pp.99-108，1990.
- 4) 池永均 他：網走湖の塩水化の機構と塩淡水二成層の長期変動特性に関する研究，土木学会論文集，No.600/II-44，pp.85-104，1998.
- 5) 石川忠晴：小川原湖に侵入する塩分の計算モデルの検討，水工学論文集，vol.35，pp.191-196，1991.
- 6) 藤原広和 他：小川原湖の塩分鉛直分布と河口水位変動に関する現地観測，海岸工学論文集，vol.46，1999.
- 7) 長尾正之・石川忠晴・長島伸介：小川原湖に発生する傾斜ブルームの現地観測と連行係数の推算，土木学会論文集，No.579/II-41，pp.105-114，1997.
- 8) Spigel, R.H. and J. Imberger: The classification of mixed-layer dynamics in lakes of small to medium size, J. Phys. Oceanogr., Vol.10, pp.1104-1121, 1980.
- 9) Simpson, J.H. and J.R. Hunter (1974): Nature, Vol. 250, pp.404-406, August 2.
- 10) Stevens, C. and J. Imberger: Initial response of a stratified lake to a surface shear stress, J. Fluid Mech., Vol.79, pp.39-66, 1996.

(2000.10.2受付)