

琵琶湖における連続測流—III— 一年間を通じた流況変動—

奥村康昭・遠藤修一

摘 要

この論文では、長期連続観測の結果に基づいて、一年間を通してみた琵琶湖の流況の特徴を調べ、同じデータを使用してスペクトル解析を行った。

最初に、ベクトルダイヤグラムを描いて、成層期と非成層期、上層と下層の流れを比較した。その結果、成層期の上層には環流の存在を示す一定方向の流れがあり、非成層期には環流は存在しないことが分かった。

次に、上層の水温の変化と流れの関係を調べた。下層の水温は年間を通じて約7°Cと一定であり、上層の最高水温は約30°Cで、較差は20°C以上になる。そして、非成層期の流れの変動は小さいが、成層が進み上層の水温が約10°Cを越えると、流れの変動が激しくなり、流速の平均値が不規則に変化する。これは、成層する事によって、風の影響が上層にだけ閉じこめられ、下層までおよび難くなったために、非成層期に比べて、相対的に風速の弱い成層期の方が、風の影響のために流れが不規則に変動するものと思われる。風と流れの関係は複雑であり、簡単な相関分析では互いの関係は見いだせなかった。

最後に、長期連続観測のデータを使用して、FFTによってスペクトル解析を行った。風の強制振動である80~90時間と24時間周期の成分が見られ、日周変化を示す24時間の成分は非成層期に特に顕著である。40~50時間周期の内部波はあまり明瞭には見つからなかった。20時間周期の慣性振動と、11時間~17時間周期のポアンカレ波による周期成分も見られることがあった。

キーワード：琵琶湖，長期連続測流，オイラー的測流方法，流向流速計

はじめに

琵琶湖の主要な流れとして環流や吹送流，密度流などが知られている。これらの流れに内部静振（内部波）や慣性振動・静振などの周期的に変動する成分が加わって複雑な流況を呈する。これらの状況を解明するために筆者らは、流れに乗って移動する物体を追跡して測流するラグランジュ的方法（OKUMURA and ENDOH, 1995）や、一地点に流向流速計を固定して測るオイラー的方法（奥村, 1992）などの直接的な測流法や、水温分布の立体構造から力学計算や診断モデル（遠藤ら, 1995）によって推定する間接的な方法（ENDOH *et al.*, 1995）などを組み合わせて観測を行い、琵琶湖の流況の解明を進めてきた（奥村ら, 1993 ; ENDOH and OKUMURA, 1993）

ラグランジュ的手法は、水の動いていく様子を捉えるのに適しているが、琵琶湖位の大きさの湖では簡単に着岸したり、定置網に引っかかったりするので、長期間の観測には不適當である。また、力学計算や診断モデルによる方法は流れの面的なパターンを求めるのに適しているが、精度良く推定するためには多数点における同時性の高い観測が必要であ

り、連続的な観測は人的・資金的に困難である。オイラー的手法による観測は一地点における測流であり、面的な観測には多数台の測器を必要とするが、長期連続の観測に適している。

従来から行われてきた観測は、主として天候の安定する夏期、すなわち水温成層期に行われる事が多く、また、観測期間も、オイラー的方法で長くて一ヶ月間位であり、ラグランジュ的方法では3~4日間位であった。そして、力学計算や診断モデルによる推定を行うための水温分布の観測は、人的・資金的な制約から一ヶ月に一回位しか観測が行えない。このために年間を通しての湖流の変動や、荒天になることの多い冬期の観測データの蓄積が不足している。そこで筆者らは、オイラー的方法による同一地点における、一年間に渡る長期の観測を行い、これらのデータの不足を補うことにした。

この論文では、琵琶湖北湖の二地点で年間ずつ行った長期連続の観測から得られた結果について述べている。

測流の方法

長期連続観測を行うために、流向流速計を設置した位置を Figure 1 に示す。また、観測期間等の概要は Table 1 にまとめて示してある。A 点は北湖南部の近江舞子沖水深 75 m の所で、B 点は北湖中央部の多景島の北約 2 km 水深 45 m の地点である。両地点とも過去の観測データの蓄積があり、また、Figure 1 に模式的に示したように、各々第二、第一環流 (ENDO and OKUMURA, 1993) が存在する水域になる。測器の設定水深は両地点とも、表面から 5 m と湖底上 1 m である。係留には、従来はクレモナロープを用いた J 字型の係

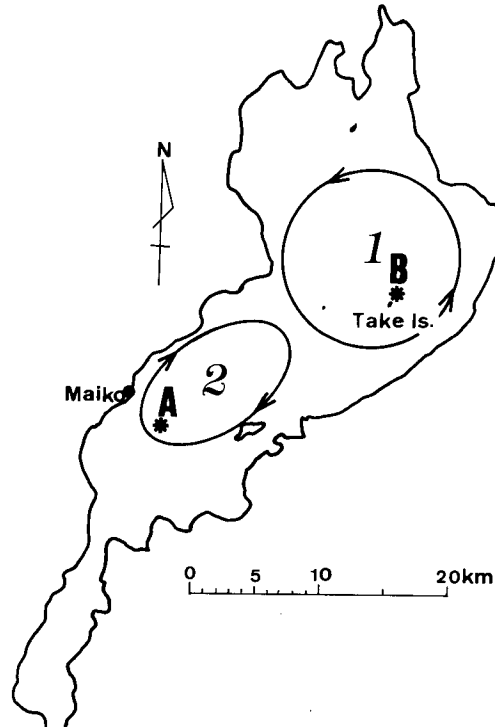


Fig. 1. Observation points of long-term measurement in the north basin of Lake Biwa, A; from 10 November 1993 to 19 October 1994, B; from 24 October 1994 to 30 October 1995, and schematic pattern of gyre system (1, 2) (after ENDO and OKUMURA, 1993).

Table 1. Summary of long-term observations for one year.

Station	Location		Depth m	Period	Duration days	Mean Velocity	
	Latitude	Longitude				cm s ⁻¹	cm s ⁻¹
A	35°12.03'N	135°57.90'E	75	10 Nov. '93~13 Apl. '94	154	up4.3	low4.5
				16 Apl. '94~19 Oct. '94	186	up6.9	low3.9
B	35°18.11'N	136°11.45'E	45	24 Oct. '94~19 Apl. '95	178	up5.0	low4.3
				26 Apl. '95~30 Oct. '95	187	up9.5	low3.7

留線を採用していた（奥村・遠藤，1985）が，長期間の観測の場合には底引き漁によって妨害されることがあるので，ステンレススチールのワイヤを用いたI字型の係留線に変更した。この場合，係留線を回収するために，水面上に目印になる物を出しておく必要があり，データが波の影響を受けることがある。しかし，本観測の場合は，観測データを詳細に検討した結果，ほとんど影響を受けていないことがわかった。

測流に使用した測器はアレック電子（株）製の電磁流向流速計であり，水平二方向の流速成分と共に，水温と濁度が測定できる。30分間隔で測った場合，電源容量の関係から約半年間の観測しか行えないので，一年間を成層期と，非成層期の二つに分けて観測を実施した。

結果と考察

一年間を通じての流況の変化

流れの状況をベクトルダイアグラムで表したものが Figure 2 と Figure 3 である。ベクトルダイアグラムは，流速のベクトル加算であり，一地点における水がどの方向に移動していくかを仮想的に表す図である。両図とも左側の a, c が成層期で，右側の b, d が非成層期であり，上の a, b が上層，下の c, d が下層のデータを表している。そして，Figure 2 が A 点であり，Figure 3 が B 点である。Figure 3 の a のスケールだけが他とは異なっているので注意を要する。各観測期間の上層と下層の平均流速を Table 1 の右端に示してある。平

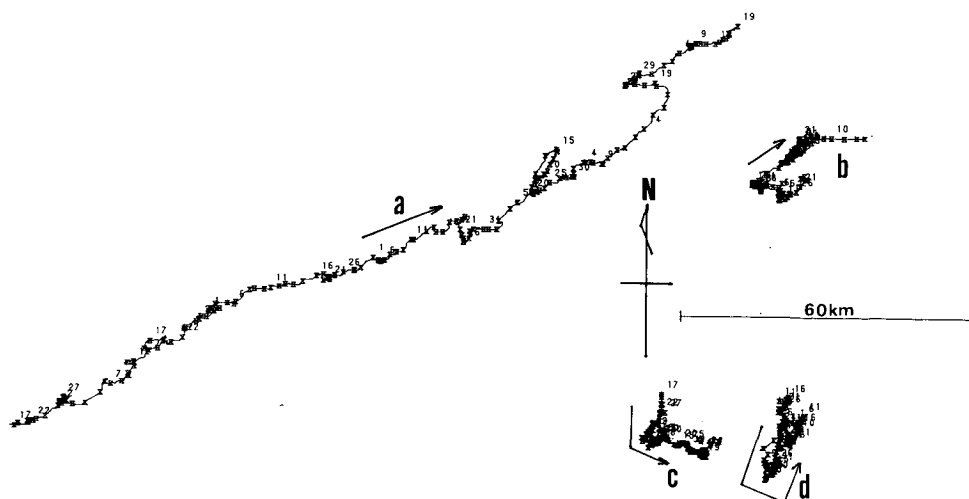


Fig. 2. Current data shown by progressive vector diagrams observed at Station A shown in Fig. 1. a, b: Upper layer; c, d: lower layer; a, c: stratification period; b, d: non-stratification period.

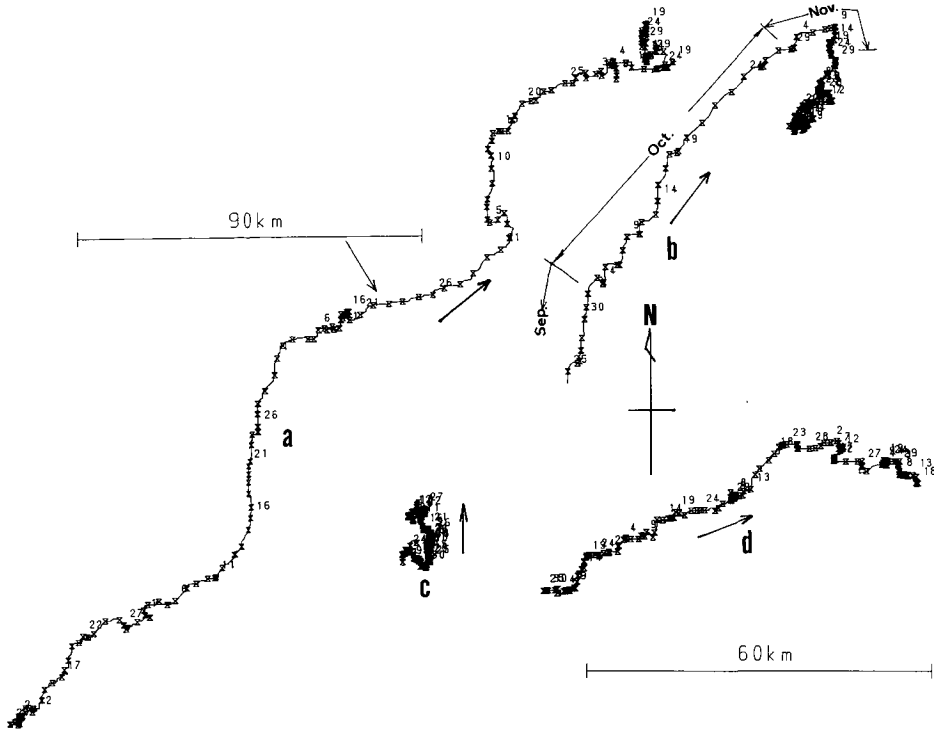


Fig. 3. Current data shown by progressive vector diagrams observed at Station B shown in Fig. 1. The notations are the same as in Fig. 2.

均流速の最大値はB点の成層期の 9.5 cm s^{-1} であり、最小値の約 4 cm s^{-1} と比べて2倍強の差しかない。しかし、ベクトルダイアグラムから見た水の動きの様子は、上層の成層期のデータだけが、他の場合と大きく異なっている。

A点のデータであるFigure 2を見ると、成層期の下層と非成層期の上下層のベクトルダイアグラムは、ほぼ一ヶ所に小さく固まっているのに対して、成層期の上層だけは、大きく北東方向への移動を示している。これは、この水域の成層期には一定方向への流れがあることを意味しており、第二環流が存在するとされている水域であるから、これは第二環流を捉えたものと思われる。B点のデータについてもほぼおなじことがいえて、B点の場合は、第一環流を捉えていることになる。しかし、B点の非成層期の場合は少し様子が異なっている。Figure 3の右上のbがB点の非成層期であるが、一点に固まらずに、北東方向への移動が見られ、環流がかなり遅い時期(11月中旬)まで存在していたことを示している。また、下層のdではA点と大きな差があり、東方向への一定の流れがあったことを示しているが、この原因については不明であり、今後の研究課題である。以上のことは、成層期のデータだけが一定方向の流向が卓越し、平均流速が大きく環流の存在を示している。そして、Figure 2, 3のデータを見る限りにおいては、非成層期には第一、第二環流は共に存在しないといえる。

水温と流れの関係

前節でも述べたように湖流の状況は成層期と非成層期では大きく異なる。つまり、湖の水温構造と流の様子は密接に結びついているので、湖水の温度の変化と流れの変化の関係を調べた。下層の水温は年間を通じてほとんど変化しないので、上層の日平均水温と日平

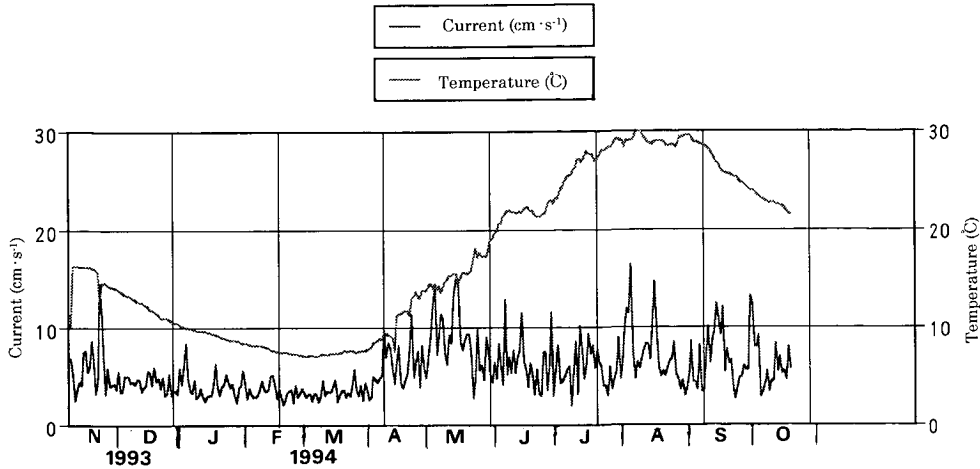


Fig. 4. Time variations in the daily mean water temperature and current velocity observed at Station A.

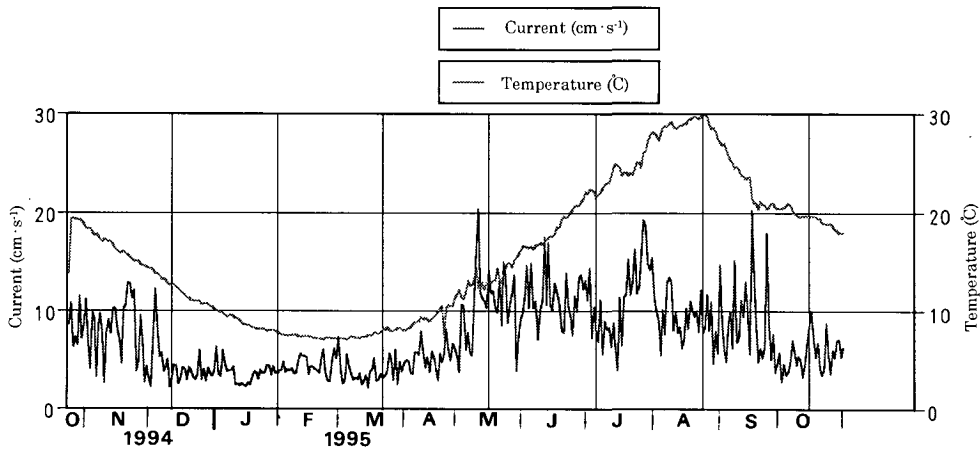


Fig. 5. Time variations in the daily mean water temperature and current velocity observed at Station B.

均流速の間係を求めるために、両者の値を同一の図上に描いたのが Figure 4 と Figure 5 であり、Figure 4 が A 点、Figure 5 が B 点である。正弦関数状の滑らかな変化をしているのが水温であり、不規則に変化しているのが流速である。水温は季節変化に密接に結びついていて、気温の変化に伴って変化するが、水温変化の年較差は約 23°C であり、最低水温は 7°C 位になっている。

流速は単純な不規則変動に見えるが、水温約 10°C を境にして変化の様子が異なる。上層の水温が 10°C より高い場合には流速の変動はかなり激しいが、湖水の冷却が進み 10°C 以下になると流速が小さくなり、変動の較差も小さくなる。また、Figure 5 のデータの水温を横軸に取り、縦軸に流速を取った散布図を描いてみると、Figure 6 のようになり、水温が 10°C 以下の場合には流速の値のバラツキが小さいことが分かる。

流速のデータを 10°C 以上と未満に分けて、平均値と標準偏差を求めると、Table 2 の様

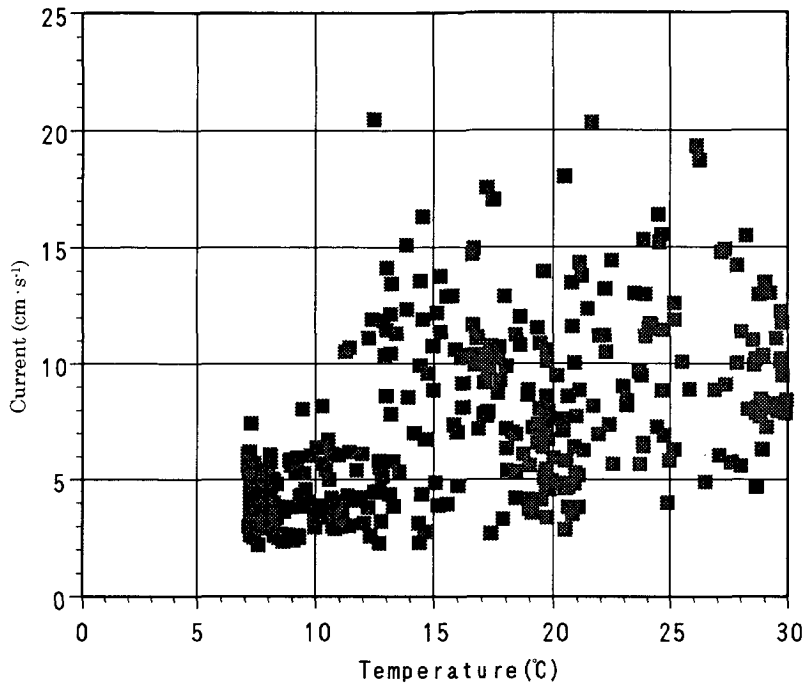


Fig. 6. Scatter diagram of water temperature and current velocity with the same data as in Fig. 4.

Table 2. Mean velocity and standard deviation of current shown for the two cases of above and below 10°C in water temperature.

Station	Above 10°C		Below than 10°C	
	Mean Vel. cm s ⁻¹	Deviation cm s ⁻¹	Mean Vel. cm s ⁻¹	Deviation cm s ⁻¹
A	6.4	2.8	3.8	1.3
B	8.5	3.8	4.1	1.1

になり、10°C未満の方が標準偏差が小さく、前述のことを証明している。下層の水温は一年間を通じてほぼ7°C位で一定しているので、成層の程度の差が流れの様子を支配していると考えられる。このような流れの不規則な変動は、湖上の風の影響を受けた結果であると思われるので、風と流れの関係を調べてみた。

風と流れ相互の関係を見るために、風速と流速の大きさを同一図上に描いたのが Figure 7 と Figure 8 である。風は AMeDAS の彦根のデータで、流れは B 点における上層のデータであり、両者とも日平均値である。Figure 7 と Figure 8 は、それぞれ 1995 年 2 月と 9 月のデータを示している。これらの図を見ると、Figure 8 の 9 月 17 日のように強い風が吹いた時には、流れと風はよい相関関係があることが分かるが、それ以外の部分では無関係に見えることが多い。このデータで水温と流速の間の相関係数を計算してみると、Figure 7 と Figure 8 はそれぞれ 0.24 と 0.39 となり、かなり小さい。これは風が流れに影響を与えていないということではなく、風の観測点が湖上にないことや、風速や風向、風の持続時間などが互いに関係していることが原因と考えられる。

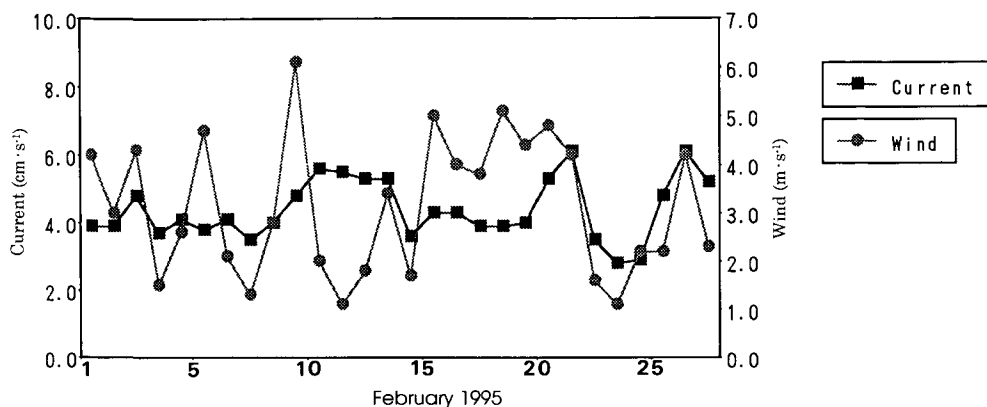


Fig. 7. Relationship between daily mean wind velocity (Hikone by AMeDAS) and daily mean current velocity (Station B) at February 1995.

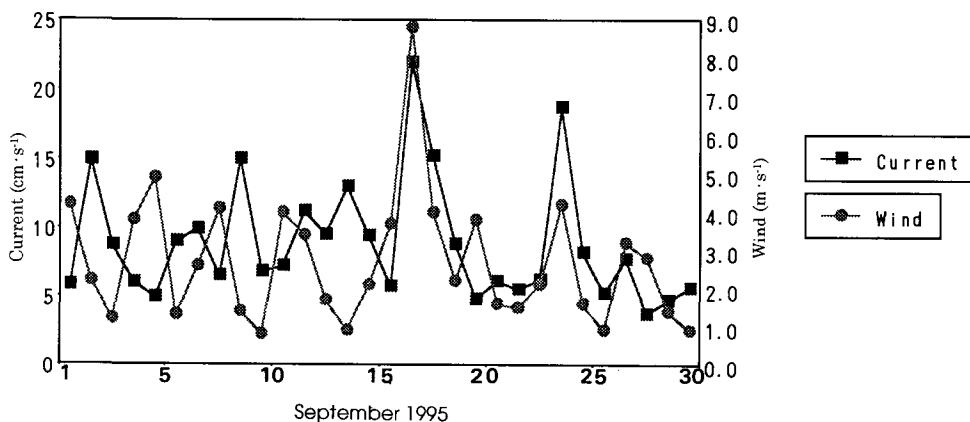


Fig. 8. Relationship between daily mean wind velocity (Hikone by AMeDAS) and daily mean current velocity (Station B) at September 1995.

以上のことをまとめると次のようなことがいえる。

湖水が少しでも成層すれば、上層の流れは風の影響を強く受けるが、風の影響は下層までおよびにくくなる。しかし、成層の程度が弱くなると、風の影響が下層にまでおよぶので、エネルギーが全層に分散し、風によって水が動かされ難くなり、風速が夏期に比べて相対的に強い冬期の方が流速が小さくなり、また、流速の較差も小さくなるものと思われる。ちなみに1995年の2月と9月の彦根の月平均風速は 3.2 m s^{-1} と 2.7 m s^{-1} であり、平年値(統計期間1975年~1996年)は 3.3 m s^{-1} と 2.3 m s^{-1} である。

流れの周期的変動

流れの周期的変動の特徴を調べるために、これらのデータを使用してスペクトル解析を

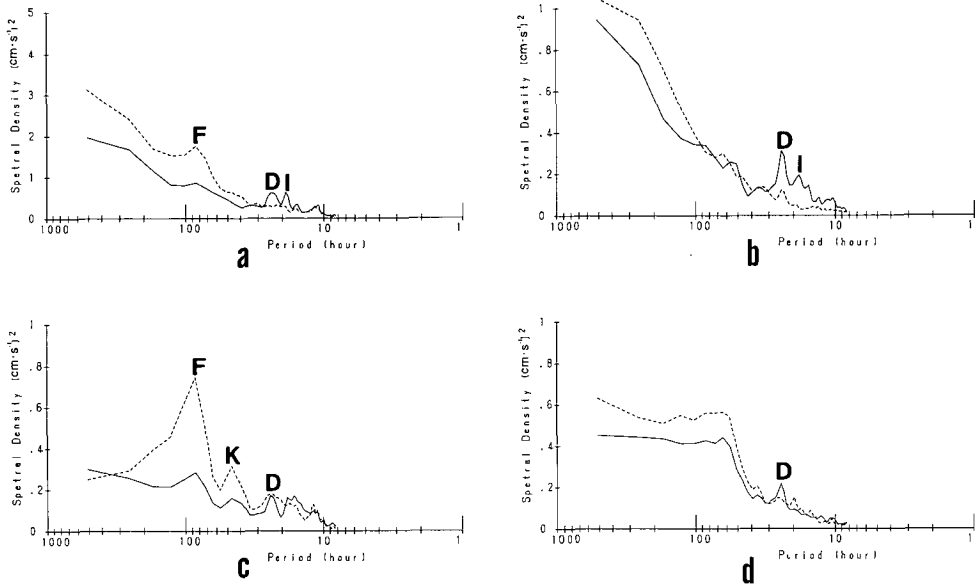


Fig. 9. Rotary spectra of lake current observed at Station A. a, b : Upper layer ; c, d : lower layer ; a, c : stratification period ; b, d : non-stratification period ; solid line : clockwise ; broken line : counterclockwise.

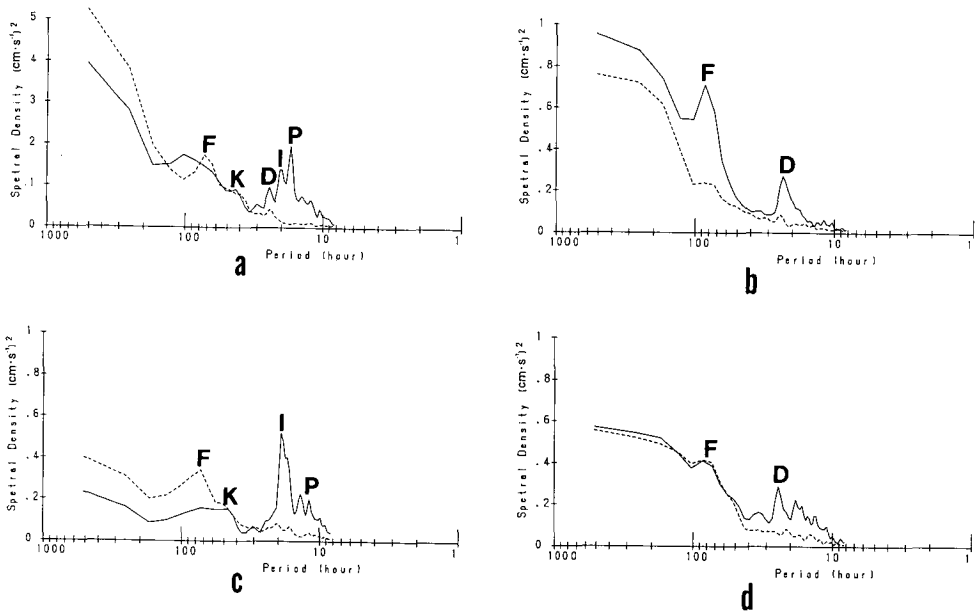


Fig. 10. Rotary spectra of lake current observed at Station B. The notations are the same as in Fig. 9.

実行した。

観測データを成層期と非成層期に分け、30分間隔で取得された、各データの先頭から約10日分のデータを、5日間ずつずらしながらFFTによって回転スペクトル(日野, 1977)を計算し、各期間毎の平均値を求めた。Figure 9がA点, Figure 10がB点のデータの計算結果であり、左側のa, cが成層期, 右側のb, dが非成層期, 各図の上のa, bが上層, 下のc, dが下層のデータで、実線が時計廻り, 破線が反時計廻りの回転スペクトルを表している。全ての図で横軸のスケールは同じであるが、成層期の上層の縦軸のスケールだけは、他の図の5分の一になっている。

これらの図を見るとF, K, D, I, Pの記号で示した5個の特徴的なスペクトルがあることが分かる。周期の長いスペクトルから順に検討を加える。

Figure 11は1995年4月~10月の風のスペクトルである。計算に使用したのはAMeDASによる彦根のデータであり、計算方法は流れの場合と同じであるが、平均は10日間ずつずらしながら求めた。この図を見るとFで示した80~90時間のブロードなピークと、Dで示した24時間の鋭いピークがある。これらのピークは流れのF, Dの周期と良い一致を示しているから、流れのF, Dで示した周期成分は風の影響を表しているといえる。Fの80~90時間の周期成分は低気圧の通過に伴う気象変化が原因であると思われ、Dの24時間の成分は湖陸風や気象の日変化によって生じる変動が原因である。日周変化(D)は、風、流れ共に時計廻りの成分の方が卓越している。いずれにしても、流れのFとDで示される成分は風による強制振動であるが、過去の研究では80~90時間(F)の周期成分についての報告はされていない。

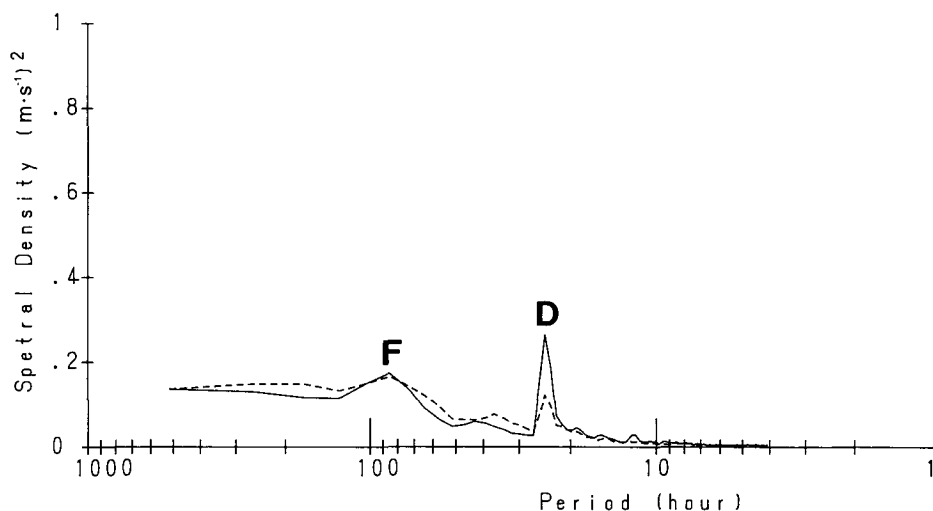


Fig. 11. Rotary spectra of wind measured by AMeDAS at Hikone, from April to October 1995. Solid line: clockwise; broken line; counterclockwise.

琵琶湖の周期的変動成分としては、KANARI (1975) によってその性質が明らかにされた内部波が良く知られている。その理論的な周期は約2日であるが、Figure 9, Figure 10を見てもあまり明確ではない。しかし、成層期の図を見るとKで示した40~50時間の部分に小さなピークが見られ、内部波が存在していることが分かる。内部波は強風が吹いた後

などで発達し、その後減衰していくので長期に渡る平均を求めると他の成分の中に埋もれてしまうため、鋭いピークにはならないのであろう。また、内部波は躍層の振動である(例えば KANARI, 1984, から水温変化には表れやすいが流速には表れにくいものと思われる。

B 点の成層期の下層では時計廻りの 20 時間周期の成分 (I) が卓越している。琵琶湖における半振子日は約 20 時間 (岡本, 1992) であり, I には時計廻りの成分だけしか見られないから, I は慣性振動によるものである。これより短い 17 時間~11 時間の周期成分 (P) は内部ポアンカレ波 (遠藤, 1989) によるものと思われる。内部ポアンカレ波は, 成層期にのみ存在し, その周期は季節によって変化し, 成層の強さが増加するにつれて短くなる特徴がある。P で示した部分には幾つかのピークが見られるのは, 内部ポアンカレ波が常時存在するのではなく, たまたま存在し, その時の成層の強さに応じた周期が検出されたためである。

おわりに

長期連続観測の結果に基づいて, 琵琶湖の湖流の年間を通じた流況変動について報告をした。

まず最初に, 成層期と非成層期の流れを比較した。それによると, 琵琶湖の成層期において一番重要な流れである環流は, 非成層期には存在しないことが分かった。また, 水温と流れの関係を調べた結果, 上層の水温が 10 °C 以上の場合と以下では流れの様子が異なることが判明した。これは, 湖上を吹く風の影響が, 水温成層の状態によって変化するためであると推測された。スペクトル解析の結果からは, 過去の研究で報告されている周期成分が検出された。新たに 80~90 時間の振動成分が卓越することが分かったが, これは風の強制振動によるものであろう。

文 献

- ENDOH S. and Y. OKUMURA (1993) : Gyre System in Lake Biwa Derived from Recent Current Measurements. *Jpn. J. Limnol.*, 54 : 191-197.
- ENDOH S., M. WATANABE, H. NAGATA, F. MARUO, T. KAWAE, C. IGUCHI and Y. OKUMURA (1995) : Wind fields over Lake Biwa and their effect on water circulation. *Jpn. J. Limnol.*, 56 : 269-278.
- 遠藤修一・奥村康昭 (1989) : 琵琶湖における連続測流(2)―北湖の流況変動―。陸水雑, 50 : 341-350.
- 遠藤修一・渡邊美和・奥村康昭 (1995) : 診断モデルによって推定されたびわ湖の湖流の季節変化。滋賀大学教育学部紀要「自然科学・教育科学」, 45 : 43-56.
- 日野幹雄 (1977) : スペクトラム解析, 254-264, 浅倉書店。
- KANARI, S. (1975) : The long-period internal waves in Lake Biwa. *Limnol. Oceanogr.*, 20 : 544-553.
- KANARI, S. (1984) : Internal waves and seiches. In *Lake Biwa*, Horie, S. (ed.) : 185-235. Dr W. Junk Publishers, Dordrecht.
- 岡本 巖 (1992) : 琵琶湖調査ノート, 112-133, 人文書院。
- OKUMURA, Y. and S. ENDOH (1995) : Telemetry Lagrangian Measurement of Water Movement in Lake Using GPS and MCA. *Trans. of the Society of Instrument and Control Engineers*, 31 : 1324-1328.
- 奥村康昭・遠藤修一 (1985) : 琵琶湖における連続測流(1)―測流の方法と流況の概要―。陸水雑,

46 : 135-142.

奥村康昭 (1992) : 湖流の連続観測用流向流速計. 計測自動制御学会論文集, 28 : 640-642.

奥村康昭・遠藤修一・角尾慶子・鷺見和也 (1993) : TCT プロファイラを用いた琵琶湖の水温・電気伝導度・濁度の観測. 陸水雑, 54 : 269-280.

奥村康昭 : 〒 575 四條畷市清滝 1130-70, 大阪電気通信大学工学部 (Yasuaki OKUMURA : Faculty of Engineering, Osaka Electro-Communication University, Kiyotaki, Shijonawate, Osaka 575)

遠藤修一 : 〒 520 大津市平津 2-5-1, 滋賀大学教育学部地学教室 (Shuichi ENDOH : Department of Earth Science, Faculty of Education, Shiga University, Hiratsu, Otsu, Shiga 520)

(受付 : 1997 年 2 月 3 日 ; 受理 : 1997 年 5 月 16 日)

Continuous Current Measurements in Lake Biwa —III— —Results of Long-Term Observation over One Year—

Yasuaki OKUMURA and Shuichi ENDOH

ABSTRACT

In this paper we report on lake currents in Lake Biwa based on the results of long-term observations of lake currents using the Eulerian method and the characteristics of periodical current variation.

Currents of fixed direction in a thermal stratification period were observed by current meters in the epilimnion, which reveal the existence of gyres but do not confirm their existence in non-stratification periods. The water temperature of the hypolimnion is about 7 °C throughout the year, while the maximum water temperature in the epilimnion rises to about 30 °C in the summer, a difference of more than 20 °C. There is not much fluctuation in the currents during the nonstratification period. During thermocline formation, when the water temperature of the epilimnion was more than 10 °C, the fluctuation in currents gained in intensity, while the average current velocity varied irregularly.

A spectrum analysis based on long-term observation data of lake currents was performed using FFT (fast Fourier transform). In periods of 80-90 hours and 24 hours, wind-forced oscillation was observed. The diurnal variations in the 24-hour-period during non-stratification were marked. In a 40-50-hour-period, an internal wave was observed, although not clearly. In a 20-hour-period, inertia oscillation was observed, and an internal Poincaré wave was occasionally observed in a 11-17-hour-period.