

中 禪 寺 湖 の 内 部 波 (2)

Internal waves in Lake Chuzenji

国立公害研究所 正員 村 岡 浩 爾

国立公害研究所 正員 ○平 田 健 正

1. はじめに

1年サイクルとして捉えた湖水温の基本的な特性は、自由表面での熱の授受で決定されている。¹⁾ しかしながら、1日あるいは1週間といった比較的短い時間スケールで現象を見た場合、平均的な水温構造に変動成分が重なり、この変動成分は短期間の湖内の流動や混合現象と深く係わっている。中でも、水温成層化した密度場では風起因の return current の重要性が指摘され、その水温躍層の侵食や移流効果について検討されている。^{2), 3)}

著者等も風外力の水温成層場に及ぼす影響を調べるため、夏季の中禅寺湖において湖水温の観測を行った。その結果、1) 表層の混合層厚が10 m程度に発達すると、7~8 m/sの風がかなり長時間連吹しても、極く表層付近の等温度線が破壊されるに留まること、2) 風外力に対して密度界面は傾くが、これは風の吹き寄せ効果による圧力上昇が密度界面位置の低下で調節される静水圧バランスで説明できること、等が明らかにされた。⁴⁾ この様に、風外力の水温躍層の侵食効果が小さいならば、風外力に対する水温成層場の応答特性を知る上で、水温成層場に生起する内部波の挙動把握は重要となる。そこで、昨年に引き続き1983年7月~10月にかけて中禅寺湖の水温躍層付近で湖水温の長期定点観測を実施した。本研究はこれらの現地観測資料を基に、風外力に対する水温の変動特性、並びに内部静振の挙動特性について報告する。

2. 現地観測

1982年の現地観測では短時間の内に、図1にある湖内7点での水温鉛直分布の観測に重点を置き、水温鉛直分布の時間変化を追跡することによって、先述した風による密度界面の傾きやモード構造を有する内部波、等空間的な水温構造をかなり明らかにできたと考えている。他方、日常的な風により生起する内部静振については、1周期程度の観測しかできておらず、この内部静振の振舞いをさらに詳しく調べるため、水温躍層付近での水温の長期定点観測を実施した。

水温の定点観測は全て西岸から1.08 kmに位置するSt-2で、ハイドロラブ・モデル-2001 2基を用いて行った。1基は表層と底層の中間密度で定義される平均界面位置に、他の1基は平均界面下5~8 mに設置した。この機器は、3704個のデータを収録することができ、測定時間間隔も1~60分まで任意の値に設定可能である。1回の最長測定時間は約6ヶ月であるが、本観測では測定間隔を5分としたため12.8日間水温の時間変化を追跡することになる。したがって、約2週間に1度の割合でデータの回収を行い、新たに所定の水深に設置する。この操作を1983年7月~10月にかけて繰り返した。

水温鉛直分布はSt-1~7までの7地点でBTを使用して観測している。ただ、水温鉛直分布として7地点の平均を取った場合、水温躍層厚さが過大に評価され、内部静振の解析に誤差を伴う。そこで、本研究ではほぼ内部静振の node 部に相当し、内部静振による水温変動の影響が比較的小さいと考えられるSt-4の水温鉛直分布で湖を代

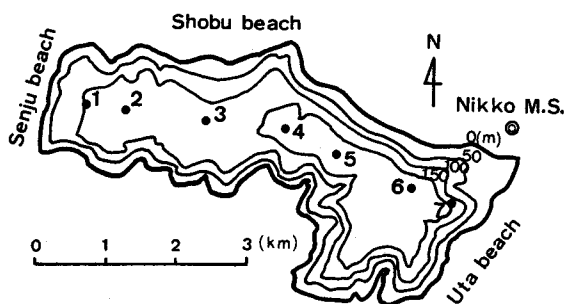


図1 水温の観測地点

表させることにする。また、湖の長さや水深についてはそれぞれ観測地点に沿った値 6,538 m と 131.2 m を用いることにする。各測定地点の水深や観測地点間距離は前報（参考文献 4）に詳しい。

3. 観測結果

3.1 水温変動特性

St-2 で得られた水温変動の観測例を図 2, 3 に示す。図 2, 3 はそれぞれ 7 月 8 日 12 時～7 月 20 日 12 時, 10 月 1 日 12 時～10 月 9 日 12 時の観測記録である。同図では、平均界面位置で検出された水温変動を時系列(a), 界面下のそれを(b)として区別している。また、日光測候所で観測された平均風速・風向も併せて載せている。中禅寺湖は北側に男体山, 南側にも斜面が連なり、したがって中禅寺湖の風向は湖長手方向に沿った東あるいは西向きが卓越する。そのため風向は東および西向きの 2 方向のみ記している。図 2, 3 の観測期間中を代表する St-4 の密度分布はそれぞれ図 4 (a), (b) の通りであり、図中にある矢印(a), (b) は先述した平均界面および界面下の水温の測定位置を表している（測定水深は図 2, 3 でそれぞれ 11.0 と 16.0 m, 17.5 と 25.5 m）。図 4 は鉛直方向の原点を平均界面位置に取って描かれており、図中にある曲線は

$$\rho_o = \hat{\rho} \exp \{ -\alpha \tanh (z/h) \} \quad (1)$$

で表現される Holmboe の密度分布 ρ_o ⁵⁾ を表す。ここに、 $\hat{\rho}$ は上・下層密度の相乗平均値、 α は上・下層間の密度差を示す無次元パラメータ、 h は密度分布形から決まる特性躍層厚である。式(1)中のパラメータは上・下層の水深 h_1 , h_2 とともに図中に記されている。図 4 から分かる様に、界面付近の密度分布形は直線近似が可能であり、界面付近での水温変動は水温勾配で除することにより鉛直方向の変位に換算することができる。図 2, 3 に対応する St-2 の水温躍層内の水温勾配を求めると、それぞれ 0.704, 0.793 °C/m となり、したがって、1 °C の変動はそれぞれ 1.42, 1.26 m となる。この換算スケールは各図中に記している。ただし、時系列(b) は図 2, 3 とも水温躍層の下部で測定されており、その付近では水温勾配が鉛直方向にかなり変化するため、水温変動を鉛直変位に換算することは難しい。

先述した様に、St-2 は西岸よりに位置し、そのため東風に対しては wind set-up による界面位置の低下を（水温躍層付近で定点観測をした場合は水温の上昇）、また西風に対しては界面位置の上昇を（水温の低下）を意味しており、この事を踏まえて風と St-2 で得られた水温変動の関係を調べてみよう。

最初に、図 2 の 7 月 12 日～16 日までの水温変動について説明する。7 月 12 日午前 0 時頃から 3 m/s 程度の西風が吹き始め、その後午前 6 時頃に反転し 3～4 m/s の東風が 22 時頃まで継続している。平均界面位置で検出された時系列(a)を見ると西風に対して水温が低下し、東向きに反転するとわずかに時間遅れはあるものの、かなり急激に水温は上昇を始める。そして、13 時～18 時にかけては 16.8 °C 程度の一定値を取っている。この結果は風による wind set-up 量が大きく、水温測定位置が水温がほぼ一定な表層混合層に入ったことを表している。一方、平均界面下 5 m の位置で測定された時系列(b)は、13 時 30 分頃に最大値を取る。この時刻を図中の矢印で示しているが、水温ピーク時刻は東風最強時とはほぼ合致していることが分かる。そして、風の弱まりとともに水温は低下し始め、その後数日間にわたって周期的な水温変動を観測することができる。Mortimer ⁶⁾ は既に同様な水温変動パターンをネス湖で観測している。彼の観測結果では、水温の急激な上昇と緩慢な低下を繰り返しており、この現象は内部段波の通過で説明されている。⁷⁾ これに対して、本観測結果では水温上昇部の水温変化率は水温低下部のそれより大きいものの、Mortimer の観測結果ほど顕著ではない。こうしたことから、中禅寺湖では風外力に対して水温成層場が湖全域にわたって傾き、風の弱まりとともに内部静振が生起すると考えられる。

また、図 3 の 10 月 5 日 12 時～6 日 24 時、あるいは 7 日 8 時～8 日 24 時の時系列(a)に見られる様に、平均的な水温の上昇に内部静振に起因する水温変動が重なった変動パターンも存在する。この様に、水温成層場は静止することなく常に変動している。加えて、一度内部静振が生起すると少なくともその後数日間はその振

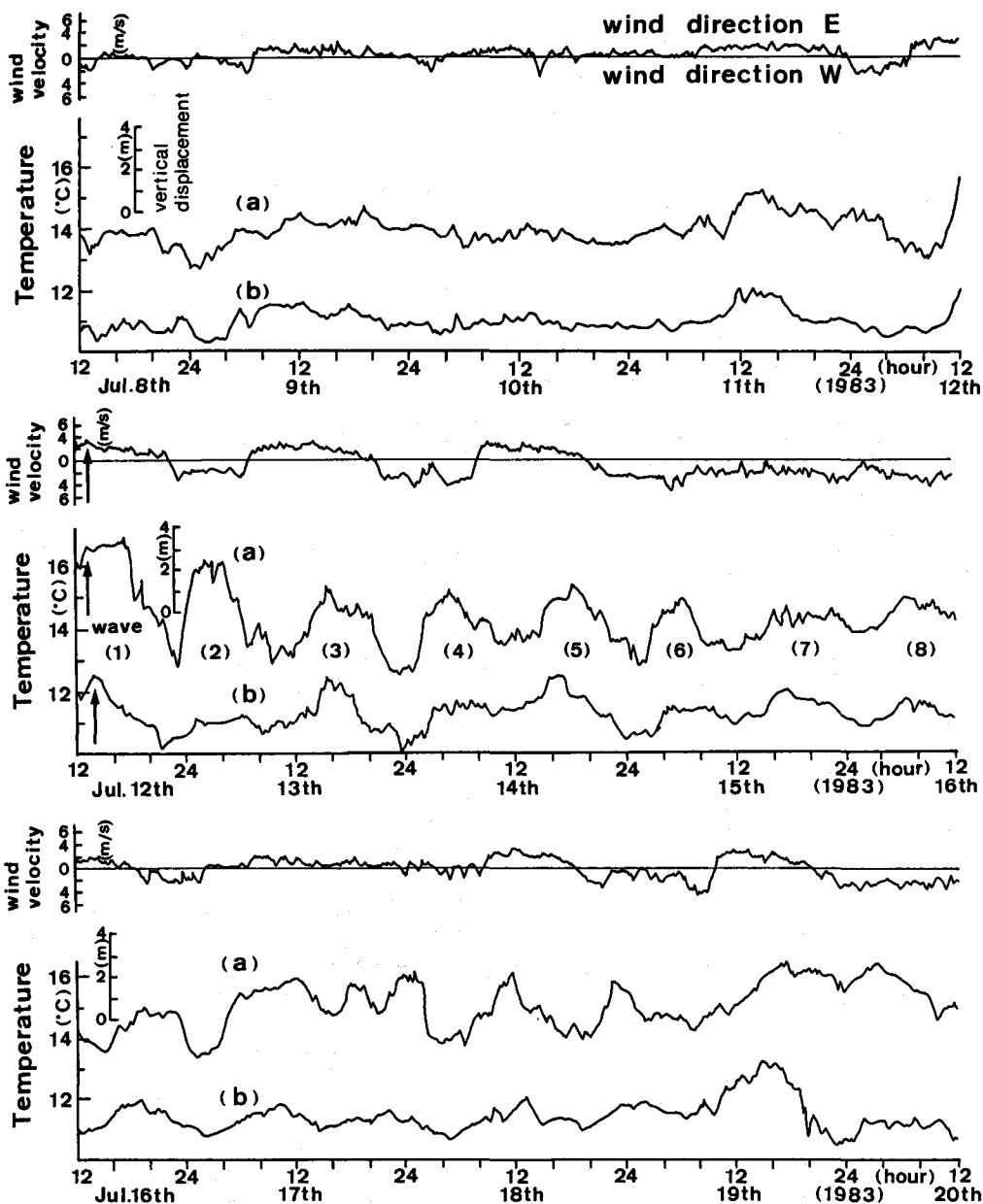


図2 St-2で観測された7月の水温変動時系列

表1 7月12日から16日に観測された内部静振の諸量

Wave	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	Average value
Wave period (h)	13.0	13.7	12.7	12.7	12.0	12.8	12.4	12.4	12.7
Temperature variation (°C)	4.0	3.5	3.0	2.5	2.3	2.0	1.3	1.4	2.5
Wave height (m)		4.9	4.2	3.5	3.3	2.8	1.8	1.9	3.2

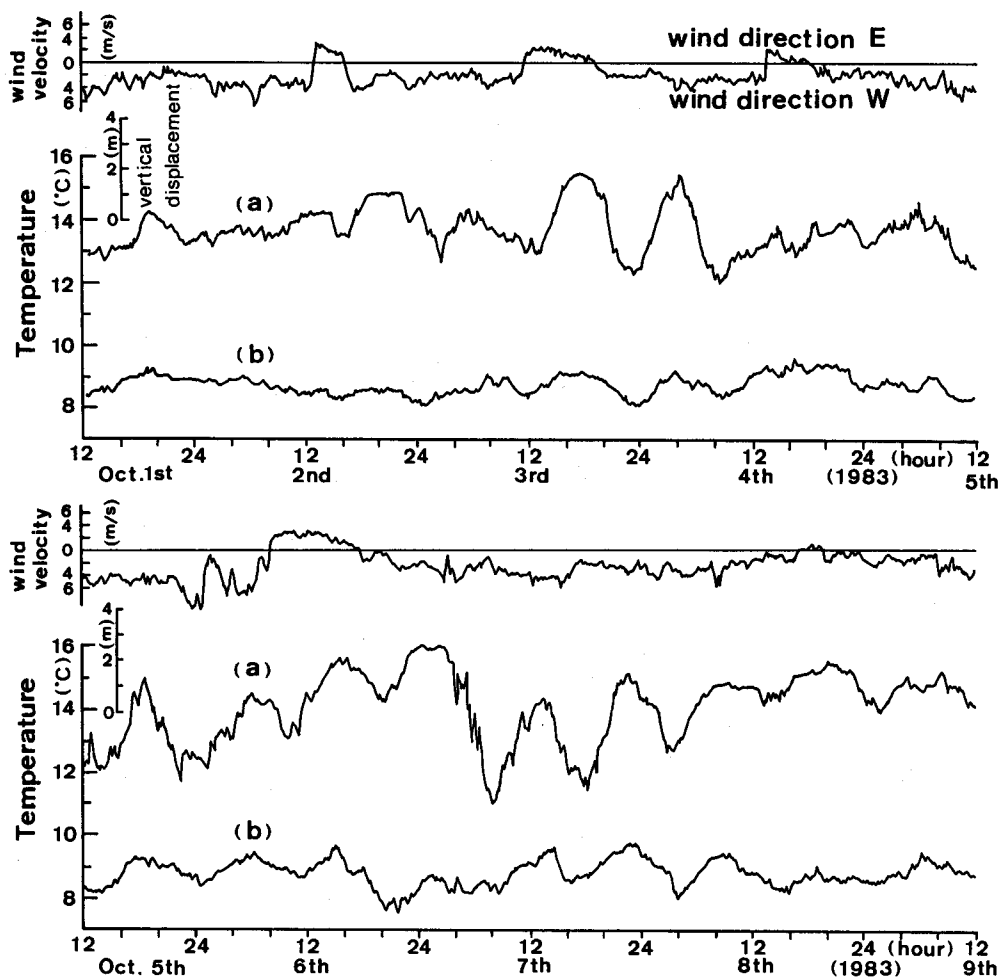


図3 St-2で観測された10月の水温変動時系列

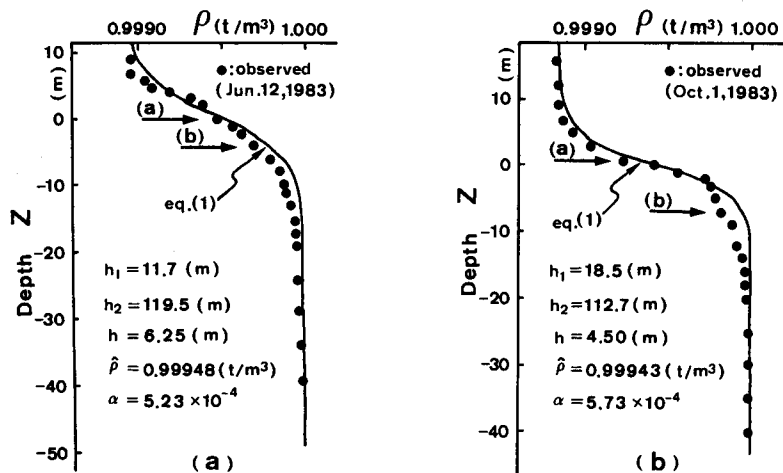


図4 観測期間中のSt-4の密度分布

動が残存することを考え合わせると、1日1回、あるいは湖内数点での水温鉛直分布資料から水温躍層の低下量や混合量を見積った場合、多大の誤差を伴うことを示唆している。

3.2 内部静振

図2に記した wave (1)～(8)について、水温時系列(a)から内部静振の周期、水温変動幅、内部静振の波高を求め、表1にまとめている。周期についてはゼロアップクロス法、水温変動幅は水温時系列における波峰と波峰を挟む2つの波谷との差の平均値、波高は水温変動幅を躍層付近の水温勾配 $0.704^{\circ}\text{C}/\text{m}$ で除して計算している。なお、表1中 wave (1) の波高は欠如しているが、これは時系列(a)の測定位置が表層混合層内に入り、ここで用いた手法では正確に波高を算出できないためである。

まず周期について、wave (1)～(8)までの平均値は12.7時間である。ただ、wave (1)から(8)に向って変動はあるものの、徐々に周期は短くなっている。これは観測期間が受熱期に相当するため、時間の経過とともに表層付近の水温が上昇し、極くわずかではあるが上・下層間の相対密度差が増加したためと考えられる。図4(a)にある諸量を用いて Holmboe モデルから基本モードの内部静振の周期を求めると12.5時間となり、上記の平均周期とはほぼ合致する。他方、二層界面波モデルから得られる周期は11.0時間となり、水温躍層部の密度分布形を無視している分だけ短く計算される。

つぎに内部静振の波高について、発生直後の wave (2)では5 mにもなるが、内部静振のエネルギー減衰のため順次波高は小さくなっていく。勿論、内部静振が生起した後も風が吹いており、これらの風の影響も受けている。7月12日から14日までの風の記録を見ると、ほぼ1日周期で東および西風が現われ、内部静振の周期が約12時間であることを考慮すると、部分的には風外力と水温変動の位相が合致し、Thorpe が指摘した風と密度場との相互干渉⁷⁾が生起する可能性もある。厳密にはこうした風外力の非定常性を考慮した上で、エネルギー減衰を算定する必要があるが、ここではオーダ比較に留めておく。表1中の資料から、波高の時間減衰率を求めると $3.7 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ となる。一方、内部静振のエネルギー減衰は内部粘性と界面、底面、両側壁、両端壁摩擦から構成されている。そして風の影響を無視し、密度場を2次元矩形水路内の二層系と考える。速度ポテンシャルを用いて、完全重複波としての上記のエネルギー減衰による波高の時間減衰率⁸⁾を求めると、界面摩擦が一等大きく $3.5 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ 、側壁および底面摩擦がそれぞれ 4.8×10^{-9} 、 $3.3 \times 10^{-9} \text{ s}^{-1}$ となり、内部粘性や両端壁摩擦は無視し得る程度に小さい。全減衰率にすると $3.6 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ となり、実測値と比較して1オーダ小さい値となる。この結果はある程度予想されたことではあるが、風の影響は勿論のこと、実水域での側岸の凹凸や水深の変化といった境界の非一様性に起因する混合⁹⁾も無視できないことを意味すると考えられる。

図5は wave (2)から(8)までの水温時系列を用いて、FFT法から計算された水温変動スペクトルの結果である。同図には時系列(a)と(b)の2種類プロットしているが、いずれの場合も内部静振の周期に相当する12.2時間に最大のピークが現れており、内部静振による水温変動が卓越していることが理解される。さらに図中の矢印で示される様に、周期にして6.10時

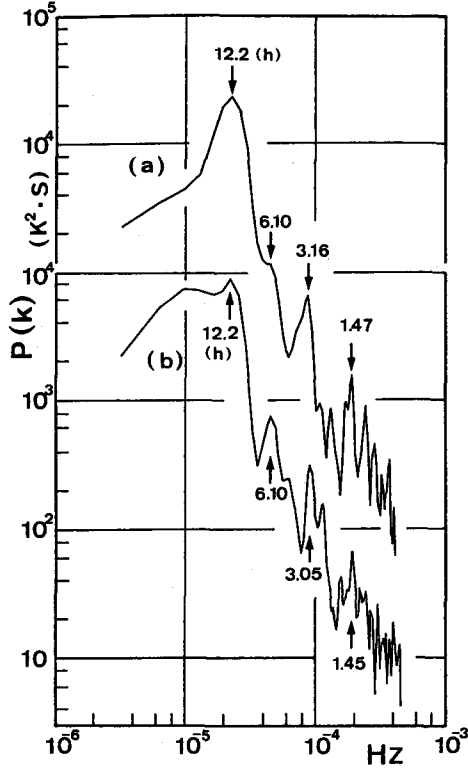


図5 水温変動スペクトル (7月12日～16日)

間や 3.16あるいは 3.05時間といった基本周波数成分の 2 倍および 4 倍周波数成分まで明瞭に認められる。

続いて、時系列(a)と(b)の位相関係を調べるため、図 5 と同じ水温時系列を用いて両者の相互相関係数 $C(\tau)$ を計算し、図 6 に描いている。同図は平均界面位置で検出された時系列(a)に lag time τ を与えて得られた結果であり、最初のピークは lag time 30分で現われていることから、時系列(b)は(a)に比較してわずかに位相が先行していると推察される。概して lag time の増加とともに、相互相関係数は周期的な挙動を呈し、第 2 および第 3 のピーク値も 0.6 程度と大きい。この結果は一度生じた内部静振はかなり長期間自己の性質を保存することを示しており、先述したスペクトルピークの卓越にも反映されている。そして相互相関係数のピークから次のピークまでの平均 lag time は 12.5時間であり、この値は内部静振の周期と合致する。

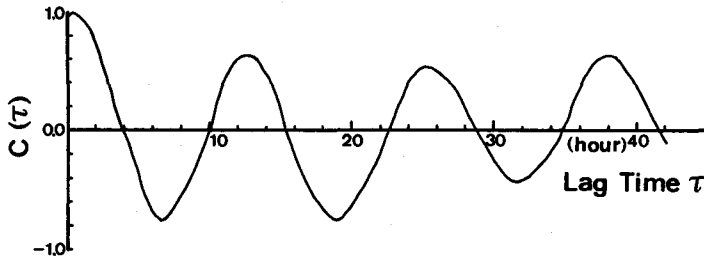


図 6 水温変動時系列の相互相関係数

4. 結 語

本研究は、水温成層化した夏季の中禅寺湖で湖水温の長期定点観測を行い、風外力に対する水温成層場の応答特性や内部静振の挙動特性について検討した。

その結果、発生直後の内部静振の波高は 5 m にもなること、一度内部静振が生起すると少なくとも数日間はその振動が継続すること等が明らかにされた。この性質はスペクトルピークの卓越にも現れている。また内部静振の周期は、Holmboe モデルから推算できる。ただ内部静振の波高減衰については定量評価に至らず、非定常な風外力の取り扱いが課題として残されている。

最後に、現地観測を行うに際して中禅寺湖漁業組合の方々から多大の協力を頂いた。日光測候所からは気象資料を提供して頂いた。記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Dake, J. M. K. and D. R. F. Harleman (1969): Thermal stratification in lakes, analytical and laboratory studies, Water Resour. Res., vol. 5, no. 2, pp. 484-495.
- 2) Mortimer, C. H. (1961): Motion in thermoclines, Verh. Int. Ver. Limnol., vol. 14, pp. 79-82.
- 3) 瀬岡和夫・日野幹雄・佐藤彰彦 (1983): 吹送流型成層密度流の流速場と界面での連行に関する実験的研究, 第 38 回土木学会年講, pp. 409-410.
- 4) 村岡浩爾・平田健正 (1983): 中禅寺湖の内部波, 第 27 回水理講演会論文集, pp. 179-184.
- 5) 富永政英 (1976): 海洋波動, 共立出版, pp. 536-543.
- 6) Mortimer, C. H. (1955): Some effects of the earth's rotation on water movements in stratified lakes, Verh. Int. Ver. Limnol., vol. 12, pp. 66-77.
- 7) Thorpe, S.A. (1974): Near-resonant forcing in a shallow two-layer fluid: a model for the internal surge in Loch Ness?, J. Fluid Mech., vol. 63, pp. 509-527.
- 8) 石原藤次郎編 (1972): 水工水理学, 丸善, pp. 500-506.
- 9) Ivey, G. N. and G.M. Corcos (1982): Boundary mixing in a stratified fluid, J. Fluid Mech., vol. 121, pp. 1-26.