

中 禅 寺 湖 の 内 部 波
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

周知のように深い湖の特徴は水温躍層の形成に代表され、水温躍層すなわち密度成層効果により流動や混合形態は均質な流体場と大きく異なる。また、温帯域の湖であれば1年を通じて受熱期、放熱期、循環期と大別されるが、各季節において特徴的な現象が存在するはずであって、それらの実態を把握し湖の規模に見合ったスケールで混合現象を論じる必要がある。例えば、水温躍層が自由表面下数mに位置する受熱期初期には風波による侵食効果も十分期待できよう¹⁾、受熱期末期から放熱期にかけては内部静振や躍層規模の内部波による界面の oscillation²⁾、循環期には表面冷却による対流混合³⁾等が挙げられよう。この内、内部波については碎波による大規模な混合は期待できないまでも、流体内部のエネルギー伝達機構あるいは消散機構としてエネルギー収支には重要な一端を担っている。その意味で、海洋では早くから注目され⁴⁾、観測資料が集積されているのに対し、陸水域ではその存在が指摘されているにもかかわらず、琵琶湖⁵⁾などに観測例を見るに留まっている。

以上のような背景から、中禅寺湖において月1回の観測の他に1982年6月と9月に湖水温の連続観測を実施した。特に、6月の観測資料から風外力に対する密度場の応答特性、並びに風停止にともなう内部静振を捉えることができた。本研究はこれらの観測結果から実水域における内部波の特性を抽出し報告する。

2. 中禅寺湖と現地調査の概要

(1) 中禅寺湖の特性

中禅寺湖は男体山の麓、標高1268mに位置し、東西6.54Km、南北1.85Km、湖表面積12.1Km²、平均水深94.7m、総貯水量11.4億m³の堰止湖である。主要な流入河川は図1にあるように、湯川、地獄川、外山沢川、柳沢川の4河川で、平均流入量は5.6m³/sec、降水量も含めると平均滞留時間は約6.5年である。他方流出河川は大谷川だけで、流出量は1.4m³/secと総流出量の25%を占めるにすぎず、地下水流出が約70%と大きい。

図2に1981年8月から1982年7月までの湖水温のインプレットを示す。水温躍層の形成は4月下旬～5月上旬頃から始まり、8月上旬に完成する。その後上層の混合層が徐々に増加し、1月には水温が全水深に亘り4℃の混合し易い状態となっていることが知れる。そして、2～3月に逆列成層（低層水温は表層水温より高いが、4℃より低いため密度分布は安定）を形成し、4月に再度4℃の等温度状態となる。すなわち、夏季に正列、冬季～春季に逆列の成層を作る深い

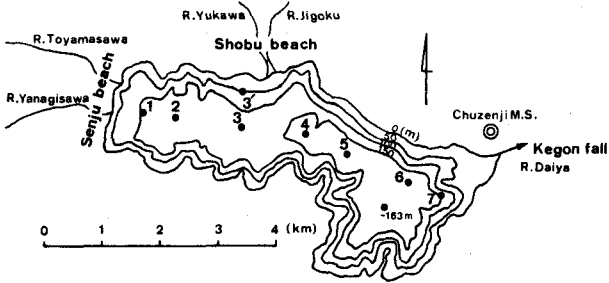


図1 中禅寺湖の湖地形と観測地点

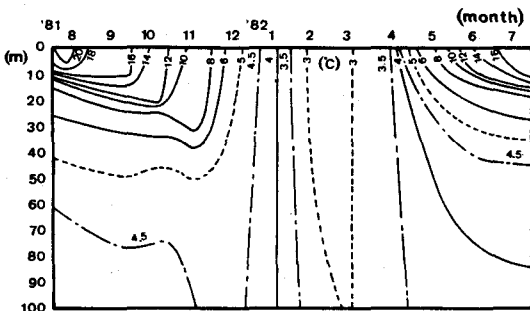


図2 湖水温の季節変化

温帯湖特有の性質を示している。

(2) 現地観測の概要

風外力に対する密度場の応答および内部静振や躍層規模の内部波を捉えるため、1982年6月下旬と9月中旬にそれぞれ1週間程度の湖水温の連続観測を行った。観測項目は水温の鉛直分布と変温層付近での水温の時間変化である。水温の鉛直分布については湖長手方向に沿った図1中の $S_t-1 \sim S_t-7$ までの7地点で、観測資料の精度向上と観測時間の短縮を図るためB.T. (Bathy Thermograph, 鶴見精機製マイコンBT-2型)を用いて船上から計測する。このB.T.は圧力センサーを内蔵しているため、ただ下ろすだけで鉛直方向に10 cm間隔の水温分布を記録することができ、全測点の1回の走査に要する時間は約60分である。また、観測期間中はほぼ2時間毎に24時間の水温鉛直分布も計測しており、 S_t-3' は夜間に行った観測地点を示している。他方、水温の時間変化は S_t-2 の位置で、時軸センサータイプの水時計(鶴見精機製マイコンBT)を用いて観測する。このセンサーは2048個のデータを収録することができ、測定時間間隔も0.1秒~99.9秒まで0.1秒きざみで任意の値に設定可能である。観測方法は湖底のコンクリートアンカーに係留されたパイロットブイにロープで吊り下げ所定の水深で水温の経時変化を検出する。

観測点の水深と観測点間距離は表1に整理している。先述したように湖全体の平均水深は94.7mであるが内部静振の解析には観測点に沿った平均水深131.2mを用いることにする。

表1 観測地点の水深と距離

Station	W.S.	1	2	3	4	5	6	7	E.S.	
Depth(m)	0	104	115	128	152	158	160	140	0	Mean depth
Length(m)		546	534	1246	1074	762	1292	534	550	131.2
										Total
										6538

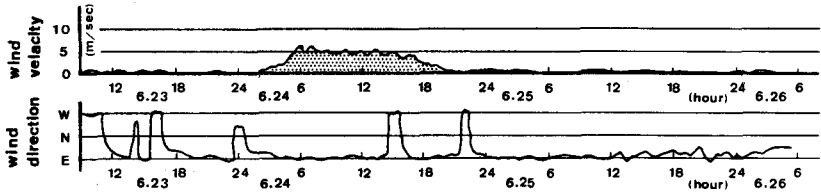


図3 平均風速と風向

3. 内部静振

(1) 風外力に対する密度場の応答特性

中禅寺湖における風向は湖長手方向に沿った東あるいは西風が卓越し、中でも東風が多い。図3は中禅寺湖候所で観測された6月23日から6月26日9時までの平均風速と風向を示している。23日は日中はほぼ無風状態に近い。そして24日5時頃からかなり強い東風が吹き始めている。実際に現地菖蒲ヶ浜から見る限り、湖面全域に白波が立ち船上からの水温観測は見合わせざるを得なかった。したがって、湖上では7~10 m/secの東風が吹き続けていたものと推定される。午後、風の弱まるのを待って水温の鉛直分布を測定し、この資料と23日日没直前の資料を図4に対比している。同図から23日の各測定地点での水温分布に大きな差異は認められないものの、24日の資料からは風下側に向かって著しく表層の混合層厚が増加しているようにも見受けられる。これらの資料を基に水温の等値線を描いた結果が図5である。両者を比較すると図5(a)では16°Cの等温度線

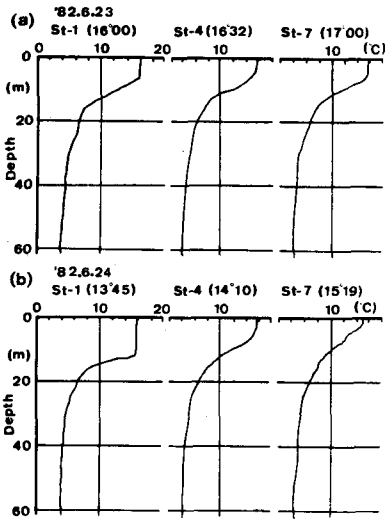


図4 水温の鉛直分布

が存在するのに対し、図 5(b)では混合拡散されて消えている。そこで、表層と底層の中間密度で定義される界面の位置を調べてみた。これらの資料を通して表層水温は 15.3°C 、底層水温は 4°C であり、その中間密度は 11.9°C に相当する。同図から、図 5(a)では界面は水深 10.2 m に位置し、図 5(b)では $St-1$ で 13.4 m、 $St-7$ で 7.3 m となりその差は 6.1 m、勾配にすると 1.12×10^{-3} 傾むいていることになる。ところが後にあるように、25 日早朝の資料では界面の位置は水深 10.1 m と計算され、風による混合が期待されたのに反し風による侵食効果は界面までに及んでいないことがうかがわれる。すなわち、表層の混合層が 10 m にも発達すると、長時間風が吹き続けても極く表層の等温度線が破壊されるに留まり、風によるシアエネルギーのかなりの部分が界面の傾きによるポテンシャルエネルギーに変換されていると言える。

一定の風が継続して吹いても、風の吹き寄せ効果に対して界面は緩慢に応答し、定常状態に到達するまでにかなりの時間を必要とする。その 1 つの目安として内部静振の周期の $1/4$ が考えられる。その意味では図 5(b) は東風が約 7 時間連吹した後の資料であり、後述する内部静振の周期が約 12 時間であることから、このケースではほぼ準定常状態に達していたと見なすことができる。そこで、界面の傾きを求めてみよう。

湖を 2 次元長方形断面と考え、計算条件として上層水深 10.2 m、上・下層の水温をそれぞれ 15.3 、 4.0°C と与える。また、風によるせん断力は抵抗係数 1.2×10^{-3} 、空気密度 $1.21 \times 10^{-3} \text{ gr/cm}^3$ 、風速 8 m/sec とすると、 0.94 dyne/cm^2 と計算される。これらの諸量を使い、梶浦の提案した手法⁶⁾ から $St-1$ および $St-7$ での自由表面の上昇量を求めると $\zeta_1 = 0.24$ 、 $\zeta_7 = -0.28 \text{ cm}$ となり、界面位置に換算するとそれぞれ水深 12.8、7.2 m となる。その結果、界面の傾きは 1.03×10^{-3} となり、先述の値とはほぼ合致することが分かる。このように、風速の値にあいまいさは残るものの、界面の傾きは風の吹き寄せ効果による圧力上昇が界面の低下と均衡する静水圧バランスで説明される。

(2) 内部静振

風停止とともに重力の復元力による界面の振動が生じる。図 6 は 6 月 25 日 16 時から 26 日 8 時まで $St-2$ で観測した水温の経時変化である。測定水深は 11.0 m、サンプリング間隔は 30.0 秒としている。同図から水温差にして 3°C (鉛直変位にすると 3.4 m)、周期にして 12 時間程度の長周期変動を読み取ることができる。さらに、この長周期成分に 20~60 分の短周期成分が重畳して

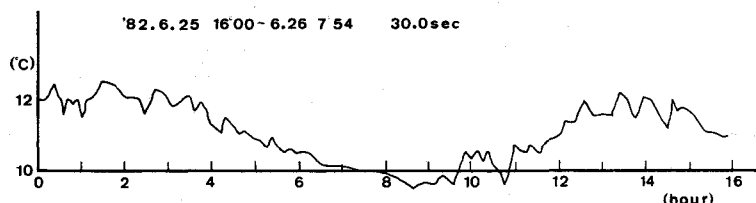


図 6 水温の経時変化

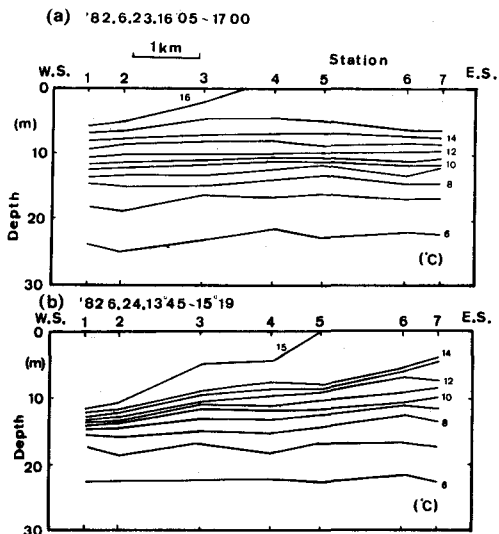


図 5 等温度線

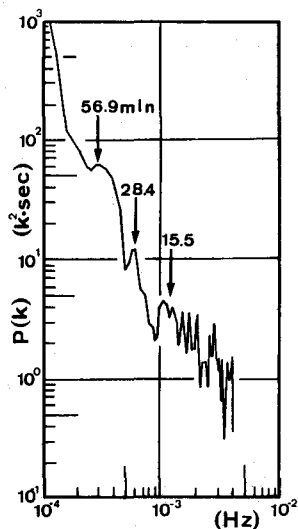


図 7 水温変動スペクトル

いることが分かる。図7はこの資料から得られたFFT法による水温変動スペクトルである。同図には卓越した短周期成分は認められるが、測定時間が16時間と短いこともあって先の長周期成分に対応する倍周波数成分は検出されていない。

図6にある約12時間の長周期変動は基本モードの内部静振に基因すると推察され、まず二層界面波モデルから周期を求めてみよう。長波近似を施すと二層界面波の波速Cは $C^2 = \epsilon g h_1 h_2 / (h_1 + h_2)$ で与えられる。ここに、 ϵ は相対密度差 $(\rho_2 - \rho_1) / \rho_1$ (ρ_1, ρ_2 はそれぞれ上・下層の密度), g は重力加速度, h_1, h_2 はそれぞれ上・下層水深である。全水深を131.2mとし、前節で述べた諸量を用いると波速Cは $C = 0.29 \text{ m/sec}$ と計算され、基本モードの内部静振(波長13.1Km)の周期は12.5時間となる。

つぎに、界面付近の密度分布形を考慮したHolmboeモデルから周期を見積る。Holmboeモデルでは密度 ρ は

$$\rho = \rho_0 \exp \left\{ -\alpha \tanh (Z/h) \right\} \quad (1)$$

と表わされる。ここに、 ρ_0 は上・下層密度の相乗平均値, α は密度差を代表するパラメタ, h は特性躍層厚さで Z は界面を原点に鉛直上向きを正としている。こうした密度場に生起する内部波の分散関係式は富永⁷⁾によると

$$\frac{\Gamma(1+m)}{\Gamma(1-m)} e^{2kh_1} = \frac{P_+ + Q_- e^{-2kh_2}}{Q_+ + P_- e^{-2kh_2}} \quad (2)$$

ここで、

$$P_{\pm} = \frac{\Gamma(\pm m)}{\Gamma(1+n)\Gamma(-n)}, \quad Q_{\pm} = \frac{\Gamma(\pm m)}{\Gamma(\pm m-n)\Gamma(1\pm m+n)}$$

波速 C_h は、

$$C_h^2 = \alpha g h / n(n+1)$$

と与えられる。ここに、 $m = kh$, k は波数, $\Gamma(x)$ はガンマ関数で、 P, Q は複号同順である。

湖のほぼ中央に位置し、湖の長手方向を代表すると考えられるSt-4(25日8時)の密度分布を図8に示す。図中式(1)の密度分布形も載せているが、実測値はこの関数形で十分に近似されていることが分かる。そして、図中に記した諸量を用いて式(2)から基本モードの内部波に対応する n 値を数値的に算出すると $n = 0.247$ となり、周期は13.8時間と決定される。このように、Holmboeモデルでは周期も若干長くなり、密度分布形を考慮した効果が現われている。

いずれにしても、図6に見られる12時間の水温変動は基本モードの内部静振に励起されていると考えて良さそう。

(3) モード構造を有する内部波

図9(a)は図5(b)から約2時間後の、図9(b)は翌25日早朝の等温度線を描いたものである。図5(b)と比較すると図9(a)の等温度線の傾きは小さくなり、さらに水平方向

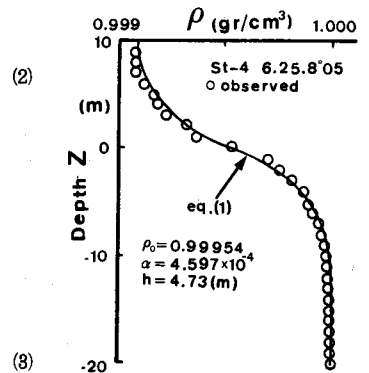


図8 密度分布

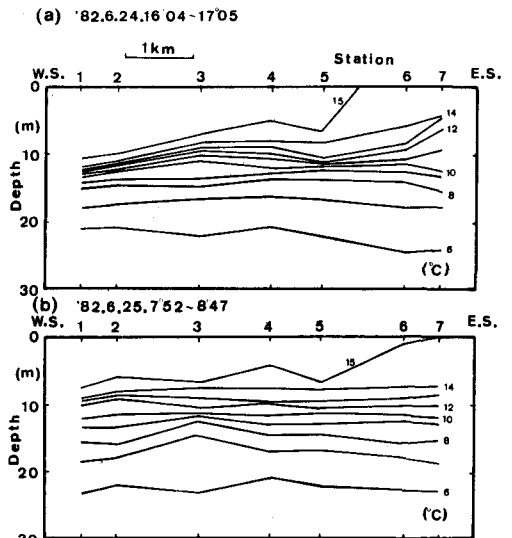


図9 等温度線

に等温度線が収束あるいは発散する極めて特徴的なパターンを呈している。勿論、 $St-1$ から $St-7$ まで約1時間の時間遅れはあるが、この時間遅れを別にすると同図は水平方向に3次、鉛直方向に2次のモード構造を有する内部波の存在を強く示唆している。図9(b)にもこの内部波の存在がうかがわれる。この内部波の特性をHolmboeモデルから調べてみよう。図8中の諸量と水平方向に3次モード、すなわち水平方向波長4359mを与え、式(2)から固有値 n を求めると $n=0.247, 1.346, 2.422, \dots$ と計算される。これらの n 値は順次鉛直方向の1, 2, 3……次モードに対応し、水平方向に3次、鉛直方向に2次モードを構成する内部波の周期は14.7時間と推定される。

この周期にして15時間にもなる内部波の存在を確認するため、25日8時から26日10時まで約26時間ほぼ2時間毎に測定した水温鉛直分布から各水深位置での水温の経時変化を連ねたのが図10である。先述したように25日18時～26日4時までは $St-3'$ の、それ以外は $St-3$ での観測資料を用いている。鉛直方向に2次モードを有する内部波の振幅は界面では理論上0となり、事実水深10mの水温変動には基本モードの内部静振による12時間の変動成分が顕著に現われている。そして、界面より深層側の12～15m層には14～16時間の変動を見ることができる。観測地点が昼間と夜間で湖北方向に異なっているものの、水平方向波長が湖の幅の2.5倍となっていることから図10にある14～16時間の変動成分は上記の内部波に基因すると判断して差し支えないようだ。ただ、どのような機構でモード構造を有する内部波が生起するのか不明な点が多く、今後の観測資料の集積が待たれる。

以上のように、空間的な内部波の波数構造を捉えることができたのは、風に煩わされることなく極く短時間に水温鉛直分布を観測できるB.T.によるところ大であった。特に現地観測では計測機器の整備・改善が直接的に観測結果に反映することを改めて実感した。

4. 躍層規模の内部波

これまで述べてきた長波性内部波以外にも躍層規模の内部波の存在も指摘されている。いったい躍層規模の内部波が生起するのかどうか、もし生起すればどの程度の波長・波高規模を有するのかを調べるため、放熱期の変温層内でも水温の定点観測を実施した。

図11はその結果の1部を例示したものである。観測は9月16日 $St-2$ の水深20.0mで行い、サンプリング間隔は4.0秒、観測時間は2.3時間である。

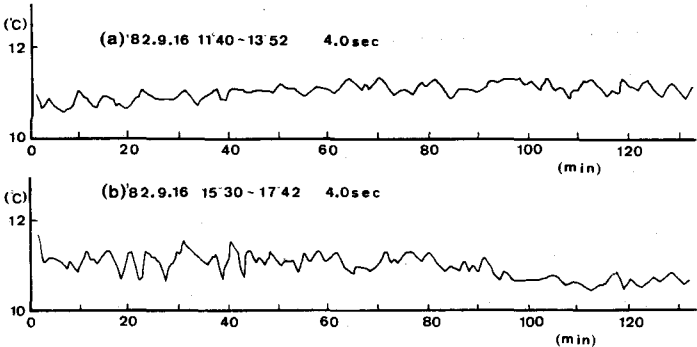


図11 水温の経時変化

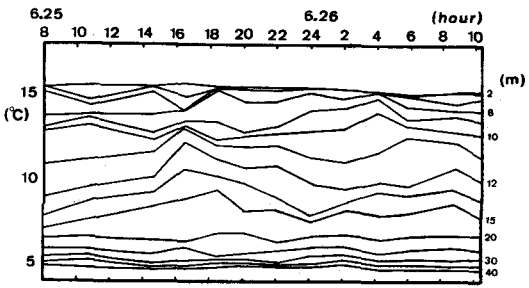


図10 水温の経時変化

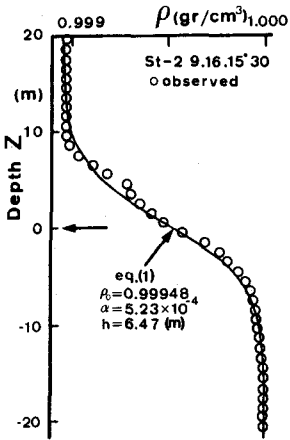


図12 密度分布

また、図12は観測中のSt-2の密度分布であり、縦軸の矢印は水温の観測位置を示している。図11から、内部静振によると思われる平均的な水温の上昇あるいは低下と言ったトレンドに、周期にして200～1000秒の、水温差にして約0.6～1.1℃の変動が重なっていることが知れる。図13はこれらの資料を基にFFT法による変動スペクトルを求めた結果である。図中横軸に記したN値は界面付近の密度分布を直線近似して得られたブルントバイサラ振動数（周期にして241秒）を示している。同図には303、455、481秒の卓越した周期成分が見られ、中でも303秒の成分はブルントバイサラ周期に見合った値となっている。

これらの変動成分についてモード構造に関する情報が欠如しているため鉛直方向には1次モードと考え、図12中の諸量を使って式(2)、(3)から波長を推算する。さらに振幅aについては概略値であるが水温変動振幅を界面付近の水温勾配で除して、波形勾配akの形で表2に整理している。Holmboeモデルでは躍層厚は特性躍層厚hの2倍で与えられることから、このケースでは約13mとなる。したがって、周期303秒の内部波波長は躍層厚のほぼ3倍となり、典型的な躍層規模の内部波であることが認識される。また、波形勾配は0.09と小さい。

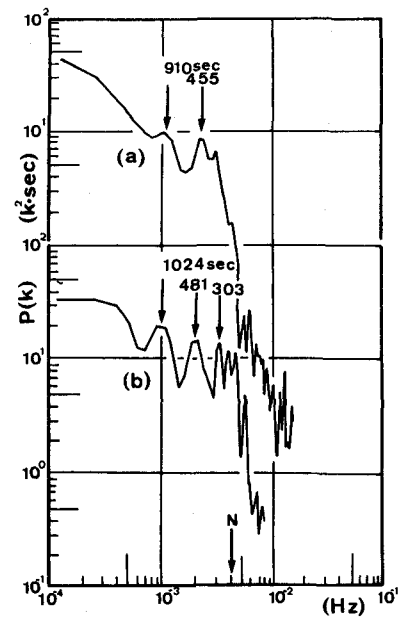


図13 水温変動スペクトル

表2 内部波諸量

Wave Period (sec)	Wave length (m)	Wave slope
303	40.0	0.091
455	105.0	0.021
481	116.0	0.031

5. 結語

本研究では中禅寺湖においてB.T.を用いた水温の鉛直分布と水温の点計測を併用して、実水域における内部波の実態把握に努めた。得られた結果は以下のようにまとめられる。

1)連吹する風により風下側に向って著しい界面の低下が観測されるが、これは風の吹き寄せ効果に基因する圧力上昇と界面の低下が均衡する静水圧バランスで説明される。

2)風停止とともに周期にして約12時間の水温変動が観測された。この周期は二層モデルやHolmboeモデルから計算される基本モードの内部静振の周期とほぼ合致する。

3)水平方向に3次、鉛直方向に2次のモードを構成する内部波も見い出され、Holmboeモデルを適用するとその周期は約15時間と推定される。

4)放熱期の変温層内で300～500秒の卓越した水温の変動成分が検出された。中でも303秒の内部波波長は躍層厚の約3倍となっており、典型的な躍層規模の内部波と考えられる。

最後に、中禅寺測候所からは気象資料、中禅寺ダム管理事務所からは湖水位とダム放流量の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)浦・椿・中村：第34回土木学会年講，pp.245～246，1979. 2)Thorpe, S.A.: J. Fluid Mech. vol. 61, pp. 731～751, 1974. 3)大谷・石岡：第37回土木学会年講，pp. 405～406, 1982. 4)Cains, J.L.: J. Geophys. Res., vol. 80, pp. 299～306, 1975. 5)Kanari, S.: Japanese J. Limnol. vol. 35, pp. 136～147, 1974. 6)Kajiura, K.: J. Oceanogr. Soc. Japan, vol. 8, pp. 67～71, 1952. 7)富永：海洋波動，共立出版，pp. 536～543, 1976.