

国立公害研究所 正員 平田 健正
同 上 正員 村岡 浩爾

1. はじめに

深い湖の水理現象の実態把握を目指して、筆者等は中禅寺湖において湖内の水温分布や流入河川の流量・水温等の連続観測(月1回)を実施している。混合現象一つにしても深い湖では、吹送流や内部波の碎波あるいはthermal convection等様々であるが、本研究は温度躍層の発達した放熱期を対象に、成層界面の破壊限界条件を知るため内部重複波の碎波形態を実験的に調べた。内部重複波の研究はHunt¹⁾, Thorpe²⁾, Orlanski³⁾, 沢本・加藤⁴⁾等によってかなり詳細に報告されているが、新たに内部重複波造波水槽を製作し⁵⁾, その基本特性ならびに碎波形態について既往の研究成果と比較・検討を行った。

2. 実験装置と方法

内部重複波の造波装置は種々考案されているが、本研究では側壁および上からの可視観測ができるよう図1に示す様な水槽底部から造波(フラップ・タイプ)する型式を採用した。水槽諸元は $1\text{m} \times 1\text{m} \times 1\text{m}$ で、水槽内に仕切り板を挿入することにより25cm 間隔で水槽幅を4種類に変えることが可能である。また、生起させる内部波の周期は1~20秒の範囲で、造波板の振幅も0~5cmの範囲で任意の値に設定できる。実験はいずれも水槽幅を25cm, 全水深を80cmと一定して行った。実験条件は上下層の相対密度差 ϵ ($\epsilon = (\rho_2 - \rho_1)/\rho_1$ で ρ_1, ρ_2 はそれぞれ上層と下層の密度)について0.0281, 0.0198, 0.0165の3ケース、また各ケースで上下層の水深比 h_1/h_2 (h_1, h_2 はそれぞれ上層と下層の水深)を変化させた。

3. 内部波の検証

内部重複波の碎波形態に先立って、本実験で得られた内部波の検証を行う。

図2は写真解析から求めた内部波の空間波形(相対密度差 $\epsilon = 0.0281$ の実験結果)であり、上・下層の水深比別に3種類示している。内部重複波の波形 $\eta = a \cos kx \cdot \cos \omega t$ (a : 振幅, k : 波数, ω : 角周波数, x : 位置, t : 時間)と表されるが、図中の曲線は $\omega t = 0$ の時の正弦曲線である。同図より、上下層の水深比による顕著な差異は認められず、波形勾配 ak についても、この程度の値では若干loop付近で平坦になるものの、実験値は正弦曲線と一致している。

つきに、本実験では波長 λ は全て100cmと一定であるが、上下層の水深および密度差を変えることにより周期 T は変化する。これらの結果について、実験値 T_e と理論値 T_t を比較したのが図3である。なお、理論値は二層界面波モデル(1次近似)の分散関係から算出したため、実験値は各実験において振幅の最小値に対応する周期を用いることにした。周期の範囲は6~9秒と狭く、ばらつきは見られるものの両者はほぼ合致すると言える。

他方、Thorpe²⁾は内部重複波の振幅と周波数の間に、振幅の増加とともに周波数の増加する領域と減少する領域を水深を用いて区別している。それによると、本実験のデータは全て周波数の減少する領域に収まる。無次元周波数と波形勾配の関係を示せば図4の通りであり、わずかではあるが、振幅の増加にともない周波数の減少が見られる。

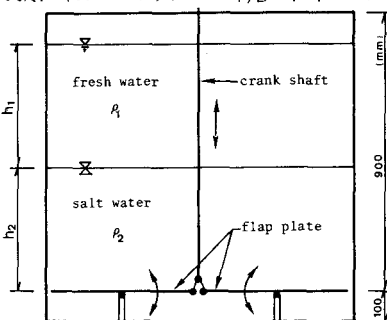


図1 内部波造波水槽

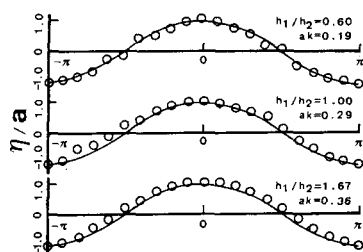


図2 内部波波形

以上の実験結果から、本実験で生じた波動は内部重複波と判断される。

4. 内部重複波の破波形態

内部重複波の振幅が小さい時は、図2のように波形がなめらかな正弦曲線に従っているが、振幅の増加とともに loop 状平坦に、node 付近に小規模な波動（小波と称する）が発生するようになる。さらに振幅が増すと、写真1の矢印で示される渦動が node 部に形成され、内部重複波は Thorpe が見出したと同様なぎのこ型の破波形態を呈する²⁾。（同写真の実験条件は $\varepsilon = 0.0280$, $T = 7.5$ 秒, $h_1/h_2 = 2.20$ であり、写真中のメッシュ間隔は 10cm である。）実験を観察する限り、小波と渦動とは識別し難く、写真中の渦動は小波が発達したものとも考えられる。この小波の発生限界と内部重複波の波形勾配と上下層の水深比で整理すれば図5のようである。

小波の発生する位相 $\sigma t = \pi/2$ では波形は水平となり、内部波動の水粒子速度は最大値をとる。加えて、node 部の水粒子速度成分は水平方向のみとなり、速度ポテンシャルの符号が上下層で逆転することを考え合わせれば、界面付近のせん断効果が小波の発生に大きく寄与していると推察される。

ここで、二層モデルを用いて概略値ではあるが、小波の発生限界を調べてみよう。今、小波の波数を m 、上層と下層の流速をそれぞれ U_1 , U_2 とすると、その不安定限界は

$$(U_1 - U_2)^2 > \frac{\varepsilon \cdot g}{m} (\tanh m h_1 + \tanh m h_2) \quad (1)$$

で与えられる。他方、実験で観測された小波の存在範囲は 2~5cm 程度であり、小波の波長は内部重複波の波長に比し、十分小さいことも考慮して、 U_1 と U_2 にはそれぞれ内部重複波に基づく上下層の最大水粒子速度を用いることにする。また、水粒子速度の計算には分散関係も使用するため、密度差の効果は(1)式の両辺で相殺される。したがって、小波の発生限界は小波の波長、内部重複波の波長および上下層の水深が関係することになる。この結果は入変数にして図5に併記されている。同図から、実験値は概ね理論値と合致することが分る。しかしながら二層モデルでは界面混合層内の情報全く欠如しており、不安定限界のより定量化を図るには界面付近の密度分布形を配慮した解析が要求される。さらに、水質混合という視点からすれば、小波よりはむしろ渦動が大きく貢献し、今後、これら相互の関係について検討して行きたい。

- 参考文献 1) Hunt, J. N. (1961): La Houille Branche, vol. 4.
 2) Thorpe, S. A. (1968): J. Fluid Mech., vol. 32.
 3) Orlandi, I. (1972): J. Fluid Mech., vol. 54.
 4) 沢本・加藤 (1974): 土木学会論文報告集, vol. 232.
 5) 村岡・平田 (1981): 国立公害研調査報告, vol. 19.

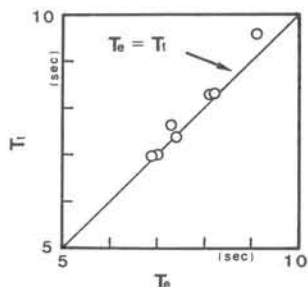


図3 内部波周期

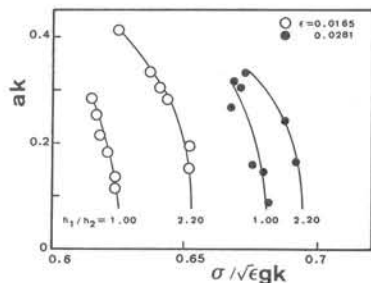


図4 振幅と周波数の関係

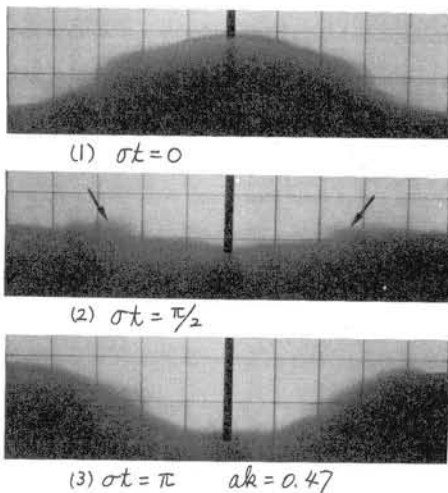


写真1 内部重複波の破波形態

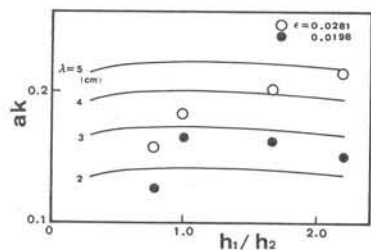


図5 小波の発生限界