

九州大学工学部 正員 橋 東一郎

九州大学工学部 正員 小松 利光

九州大学大学院 学生員 山下 五郎

九州大学工学部 学生員 米田 寛

1. まえがき

塩水楔や2層流の密度界面においては一般に内部波が発生・発達する。かつて著者の一人は塩水楔の界面に発生する内部波形を測定し、波速の小さい長周期の波(L.P波)の上に波速の大きい短周期の波(S.P波)が重畳した形を持つことに着目し、両卓越波の特性と統計的な性質について考察した。しかし、従来の実験的研究は定性的あるいは断片的で、内部波の特性を調べるには十分ではなかったが、今回、著者らは波高、濃度、流速の同時同一点測定を行ない、内部波と乱れの関連及び周波数スペクトルについて考察した。

2. 実験及び乱れについて

実験は長さ5.5 m、幅26 cm、高さ30 cmの両側面アクリル製の水平水路で行った。下層の塩水の上に淡水を流下させる二層流をつくり、ほぼ同一点でV型ホットフィルム流速計、濃度計、内部波高計を用いて、 U, U 2方向の流速、濃度、波高を水路中央で同時測定した。実験条件は表-1に示すとおりである。図-1は実験IIIで測定された平均流速 $\bar{U}$ 、乱れ強度 $\sqrt{u^2}$ 、 $\sqrt{v^2}$ 、Reynolds 応力 $-\overline{uv}$ の代表的な分布を示したものである。乱れの分布に関しては、開水路等流と同じように界面の近くに最大値をもち水表面に近づくにつれて減少している。Reynolds 応力も乱れの最大値付近に集中している。流速分布は水表面から下がるにつれて徐々に減少し、平均界面下で零に近づいていく。平均界面は濃度が塩水原液の50%となる水深と定義している。

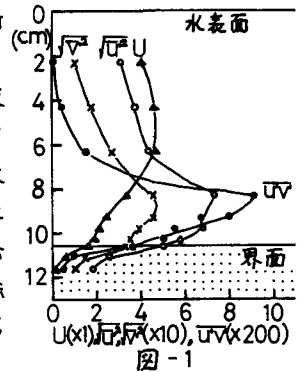


図-1

3. 内部波高と流速変動

図-2は、界面付近で同時に測定された流速変動 u, v 、Reynolds 応力 $-\overline{uv}$ 、および内部波高 H の一部を示したものである。内部波が平均界面より上がったときには、水平方向 u 、垂直方向 v の流速変動は平均流より減少する傾向が、波が下がったときには増加する傾向が見られる(ただし、 u は流下方向に正、 v は下向きに正である)。また、内部波が平均界面より下がったときに、水平方向の流速変動が増加、垂直方向の流速変動が減少になっているところは、L.P波が通過しているものと考えることができる。次に波高と流速変動との関係をより見やすくするために、実験IIの測定において波高の変位に対し、その変位が生ずる時の流速変動の平均値を計算し、波の変位とそのときのその断面の流速変動をプロットしたのが図-3である。便宜上、波高の最大値を波高変

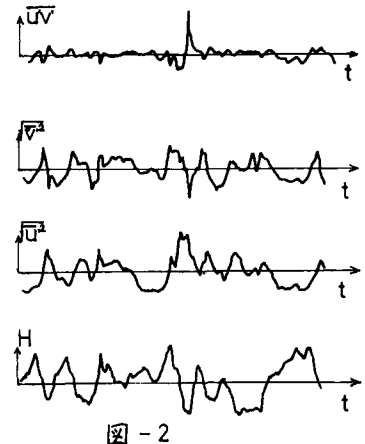


図-2

表 - 1

RUN	密度差 ϵ	上層平均流速 U_1 (cm/s)	上層平均水深 h_1 (cm)	水温 ($^{\circ}\text{C}$)
I	0.0065	5.05	10.38	12.4
II	0.0120	6.30	11.35	12.9
III	0.0120	4.71	9.77	12.9

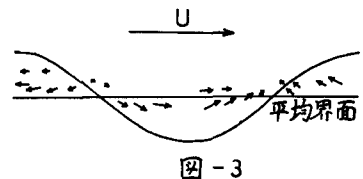


図-3

位を割って無次元化して波形を sine curve で表わし、流速変動の平均値はベクトルで示してある。波が平均界面より下にあるとき変動は波形にそうように平均流の方向に加速し、平均界面より上にあるときには逆に減速している。このことは波の谷の部分では上層の速い流速をもった淡水が入り込んで来るため平均流速よりも流速が速くなり、逆に山の部分では流速の遅い下層の塩水が突出する為、負の流速変動をもつようになる」と解釈できる。

4. 内部波と流速変動のスペクトル

図-4は、自由表面付近(界面上8.25cm)、界面付近(界面上1.25cm)および界面の流速変動 u' , v' の周波数スペクトルと、それぞれの変動測定と同時に測定した内部波の周波数スペクトルを示している。スペクトルの計算にはFFT法を用い、サンプリング間隔 $1/575$ sec, データ数4096個である。

流速変動のスペクトルに関しては、高周波側において開水路乱流や自由噴流で通常みられる慣性域の $-5/3$ 乗則、粘性域の $-13/3$ 乗則が成立しており、内部波の影響はみられない。むしろ、内部波スペクトルの方が流速変動スペクトルに非常に良く似た分布形を示しており、このことから高周波の内部波成分は上層流の乱れによって生じられた界面動揺とみることができよう。一方、低周波側は流速変動、特に v' の変動に対する内部波の影響が顕著にみられる。すなわち、 v' のスペクトルは界面付近で波高分布とはほぼ同じ分布を示し両者の間の強い相関を示しているが界面から離れるに従い本来の形へと近づいていく。このことは波の特性を有する低周波の内部波が流速変動を引き起こしていることを示しており、高周波の内部波変動とは大きく異なっている。また、当然ながら、 u' の変動に対しても内部波は同様に影響を与えているはずであるが、 u' の変動は平均流からの乱れエネルギーの変換や cascade down など独自のプロセスを有するため、顕著な形では表われにくいものと思われる。

以上の結果から次のようなことが言える。

- (1) 界面波には表面上S,P波とL,P波が存在するように見えるが、波としての特性を併ったものはL,P波だけであり、それは流速の遅いKH波である。
- (2) S,P波は上層の乱れによって生じた界面変動が界面近傍の平均流速によって流下するために検出されるもので、波としての特性は持たない。したがって高周波のスペクトルは流速変動スペクトルに強く依存し $-13/3$ 乗則が成立する。なお、今後の問題として波高スペクトルの散乱形を理論的に決定することが残された。

最後に本論文の作成にあたり、データ解析及び整理に協力して下さった柴田氏、米田氏、有用なデータを残してくださった今酒氏に感謝の意を表します。

参考文献：小松、今酒、椿：二層流界面における内部波の統計的性質、九大工学集報第52巻第1号、1979

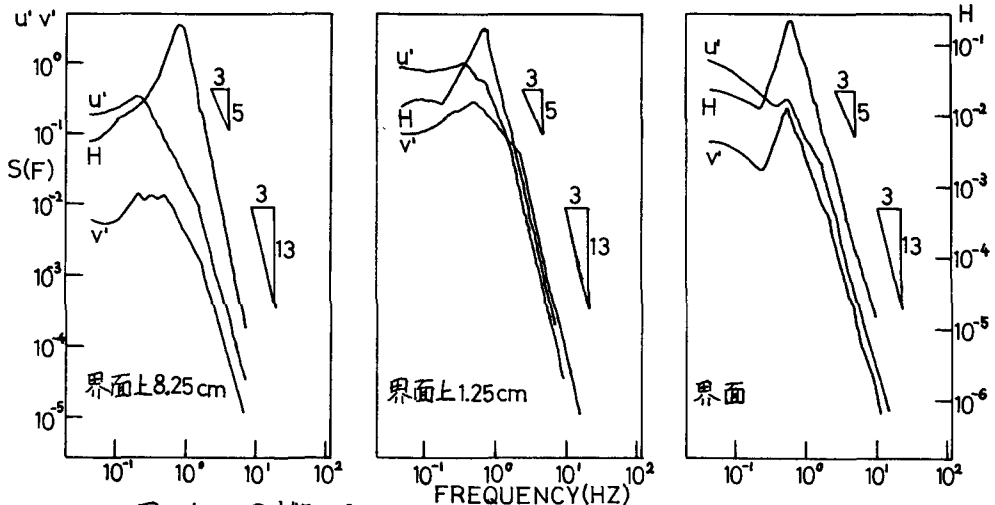


図-4 周波数スペクトル