

九州大学工学部 正員 椿 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 〇下田 五郎

1. ま え が き

前回の報告において著者らは2層境界面に発生・発達する内部波の波高及び上層流の濃度、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。その結果、界面波には波としての性質を持つL-P波及びS-P波と上層の乱れによって生じた界面動揺が平均流によって流されるためにあたかも波のように見える界面動揺があり、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 $-13/3$ 変則が成立していることがわかった。今回さらに内部波上の流速変動及び内部波の波速と波長について考察を加えてみた。

2. 界面変動と流速変動との関係

内部波の平均界面からのある変位に対する流速変動 u 、 v のアンサンブル平均とその変位の生じる断面の各点でとり、内部波の変位に対する流速変動の平均値をベクトルで示したのが図-1である。便宜上、測定時間内の最大変位で波高変位を割って無次元化し、波形はsine curveで示している。界面付近の流速変動 u に対しては、波が平均界面より下にあるときには平均流の方向に加速しているが波が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流速の大きい淡水が入り込み、波の山の部分では下層の遅い塩水が突出するためと思われる。また、界面付近の流速変動 v は内部波の進行に強く影響され、波の進行に従うように進行する。図は示していないが、流速変動 u 、 v と界面変動 η の相関係数 $\overline{u\eta}/(\sqrt{\overline{u^2}}\sqrt{\overline{\eta^2}})$ 、 $\overline{v\eta}/(\sqrt{\overline{v^2}}\sqrt{\overline{\eta^2}})$ を計算してみると、前者では界面付近で強い負の相関をもつ一方、上層の水面付近では弱い正の相関をもち界面付近とは逆の流速変動がある。また後者は界面付近及び上層の中間領域で負の相関をもっており、波の山で上昇流が波の谷で下降流が生じていることを示している。以上のことを総合すると、進行する内部波上の流速変動のflow patternは図-2のようになる。上層流はせん断流であること、波上境界上の制約された流れであること、内部波のorbital motionの影響を受けるなどの理由から下層で観測されるようなきれいな渦列とは異なり複雑な流れとなっている。

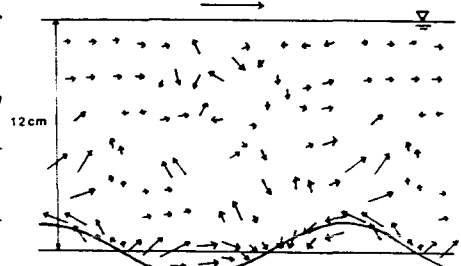


図-1 内部波上の流速変動

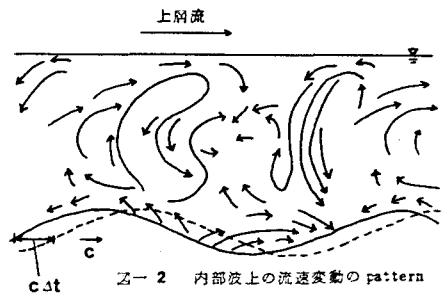


図-2 内部波上の流速変動のpattern

3. 内部波の波速と波長

流れ方向に $\Delta x = 1\text{cm}$ 離れた2本の内部波高計によって同時測定された内部波形 $\eta_1(t)$ 、 $\eta_2(t)$ からコ・スペクトル及びクオドラチャ・スペクトルを計算し、これらから位相差 $\theta_{\eta_1\eta_2}(f)$ を求め次式によって周波数ごとの波速 C を求めた。

$$C(f) = \frac{2\pi f \Delta x}{\theta_{\eta_1\eta_2}(f) + 2\pi n} \quad (n = 0, 1, \dots) \quad \dots (1)$$

図-3はその結果を無次元量 C/U_1 と $\epsilon g/fU_1$ (U_1 : 上層平均流速, ϵ : 密度差)を用いて表現したもので、図中の実線はK-H波(式(2))、破線は界面での流速のスリップを許さないときの淡水内部波(式(3))の計算結果であ

$$\frac{C_z}{U_i} = \frac{(4 + \frac{1}{\pi} \cdot \frac{\epsilon g}{f U_i}) \pm \sqrt{(4 + \frac{1}{\pi} \cdot \frac{\epsilon g}{f U_i})^2 - 32}}{8} \dots (2)$$

図-3の C/U_i を $C/U_i = \epsilon g L / U_i^2 \cdot U_i f / \epsilon g$ と書き替え波長の無次元表示 $\epsilon g L / U_i^2$ と $\epsilon g / U_i f$ の関係として表現したのが図-4である。以上の2つの図から内部波は波速や波長によって次の4つの周波数領域に分けられる。

(I) $\epsilon g / f U_i < 3.4$ の高周波の成分波は上層の乱れの影響を強く受ける界面波動で、波速は周波数に無関係に一定値をとるので自由波としての性質を持たない。図-5に見られるように流速変動スペクトルが粘性域の $-5/3$ 乗則から粘性域の $-13/3$ 乗則に変化するときには内部波のスペクトルも同様に変化している。

(II) $3.4 < \epsilon g / f U_i < 9.5$ の成分波はS・P波に相当し卓越したエネルギーをもつ。波の性質をもち流速変動に大きな影響を与える(前報図-4)。この領域で測定値が若干ばらつくのは、上層流のせん断効果や波の非線形効果のために卓越波形が正弦波から大きくずれるために生じる *harmonics* の影響と思われる。その波速が界面流速や上層平均流速よりも大きくなりうることや正のK・H波の曲線にはほぼ一致していることから、この領域は正のK・H波であるS・P波の卓越波とその *harmonics* であると思われる。

(III) $9.5 < \epsilon g / f U_i < 50$ の低周波の成分波はL・P波に相当しており、基本的には負のK・H波であり式(2)、式(3)ともほぼ一致している。

(IV) $50 < \epsilon g / f U_i$ の領域では周期も長く、波長も流速に大きくなっていることから実験装置の大きさ等に規定されるうねりまたはセイシュのようなものと思われる。

4. 内部波のスペクトル

内部波のスペクトルはサンプリング間隔 $\Delta t = 1/37.5 \text{ sec}$ 、データ個数 $N = 4096$ 個とし、低周波の成分波であるL・P波を詳細に検討するための $\Delta t = 1/3.75 \text{ sec}$ 、 $N = 8192$ 個の2種類についてFFT法を用いて計算した。図-5はその代表的な例である。L・P波、S・P波の卓越周波数に相当する周波数帯にそれぞれピークが見られる。低周波側のスペクトル形は実験条件や測定位置によって異なっているが、高周波側では $-13/3$ 乗則が成り立っている。図-5には前に述べた4つの領域の境界周波数をそれぞれ $f_2 = \epsilon g / 3.4 U_i$ 、 $f_1 = \epsilon g / 9.5 U_i$ 、 $f_0 = \epsilon g / 50 U_i$ とし計算したものを記入しておりスペクトル分布の谷間に良く対応している。

最後に本研究に熱心に協力された荒谷慶太氏に謝意を表します。

参考文献：諸 小哉・下田：2層境界面における内部波と乱れに関する実験的研究、第25回水理講演会論文集、1981

$$\frac{C_z}{U_i} = 1 \pm \sqrt{\frac{\epsilon g}{4\pi f U_i} \cdot \frac{U_i}{U_i} \cdot \frac{C}{U_i}} \dots (3)$$

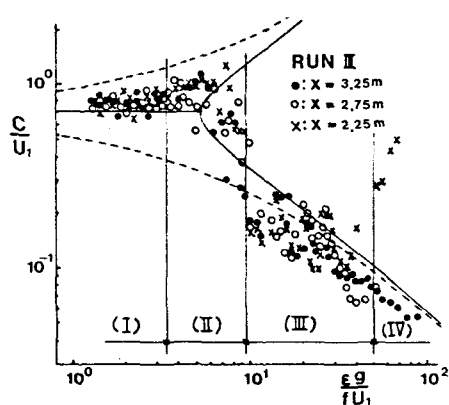


図-3 内部波の波速

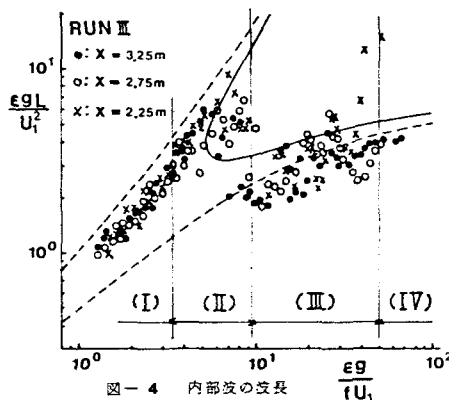


図-4 内部波の波長

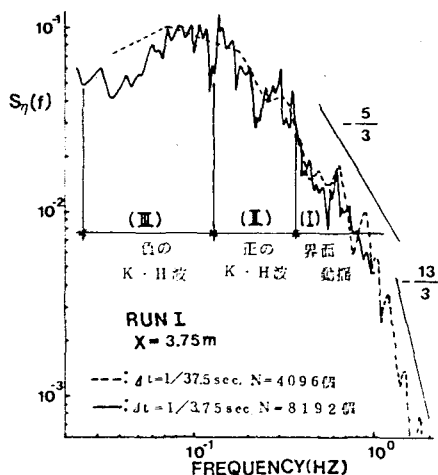


図-5 内部波スペクトル