

現地碎波帯における流れと波動の限界周波数について

中央大学 学生会員 ○関 克己
中央大学 正会員 水口 優

1. はじめに

現地海浜においては波動が主要な変動モードとして存在する。近年の計測器の高精度化・データ収録システムの進歩に伴い、長時間の現地観測が可能となり長周期（低周波数）の現象が観測可能となってきたが、周期が長い現象となるとそのモードが波動（水面勾配と局所加速度の釣り合い）から流れ（水面勾配と底面摩擦の釣り合い）へと変化する。海岸付近の水理現象を扱う際に、対象とする現象を明確にしておく必要がある。そこで本研究の目的は現地碎波帯において水面変動および水平流速を観測し、現象が波動から流れへと変化する際の限界周波数を捉え、その特性について明らかにすることである。

2. 現地観測

現地観測は茨城県波崎海岸にある（独法）港湾空港技術研究所観測用栈橋に超音波式波高計および電磁流速計を設置し、サンプリング周波数 5Hz でデータを収録した。表-1 に観測期間における計測地点での水深 h および静水汀線（潮位と地形データとの交点）からの距離 X を示す。また後述する流れと波動とを分ける限界周波数 f_c も併せて示す。

表-1 計測地点諸量

	h [m]	X [m]	f_c [Hz]
run1	1.67	46.4	0.0055
run2	0.88	40.0	0.0060
run3	0.28	14.0	0.0065
run4	0.68	28.7	0.0045
run5	1.51	71.4	0.0043

3. 水面変動と岸沖流速のクロススペクトル解析

図-1に水面変動と岸沖流速とのクロススペクトル解析の結果の例を示す。同時に多段斜面の線形長波理論から求まる無次元振幅（岸沖の重複波構造）を示す。ここでスペクトルの算定には 2^{15} 個（約 109 分）のデータを用い、平滑化は片側 2 点の三角ウィンドーを用いる。パワースペクトルを見ると低周波側で流速に大きなパワーが存在していることがわかる。また $f > 0.008\text{Hz}$ では重複波の腹節構造に対応して節（ $f = 0.01\text{Hz}$ ）では流速のみに、腹（ $f = 0.017\text{Hz}$ ）では水面変動のみにパワーが存在する。コヒーレンスおよび位相を見ると、重複波構造が見られる周波数帯においては位相が急激に変化する周波数以外ではコヒーレンスは 0.7 以上であり、位相も完全・部分重複波の状態を示している。しかし $f = 0.005\text{Hz}$ から低周波側ではコヒーレンスが小さく、位相も重複波からずれる。

波動モードでは局所加速度が有意なものと考え、流速データに数値ローパスフィルターをかけることより長周期成分（ここではカット周波数として風波と長周期波の境界として $f = 0.04\text{Hz}$ ）を抽出し、中心差分により局所加速度を計算する。図-2に水平流速と局所加速度のクロススペクトル解析結果を示す。図からわかるように低周波数域（流れ領域）では流速変動については

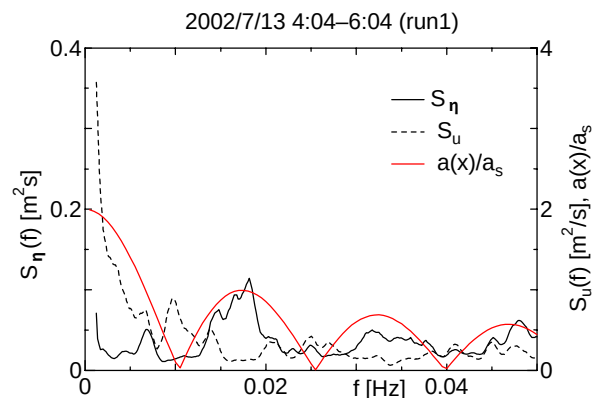


図-1(a)水面変動と流速のパワースペクトル

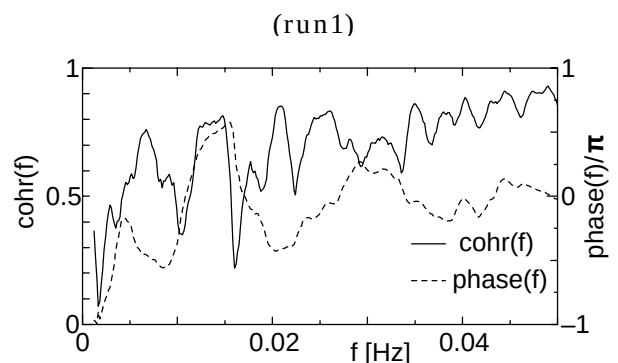


図-1(b)コヒーレンスと位相(run1)

キーワード 現地碎波帯, 長周期変動, 波動, 流れ, 限界周波数

連絡先 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 中央大学理工学部土木工学科 TEL03-3817-1818

パワーが大きいのにに対して局所加速度のパワーは小さく、高周波側（波動領域）に移行するにつれて加速度が大きくなることからわかる。水面変動と流速のクロススペクトル解析より求めた run1 の限界周波数 $f_c = 0.005\text{Hz}$ は、局所加速度の最低周波側に存在するパワーのピーク周波数であり、それより高周波域ではパワースペクトルの変動が対応することから、他のデータセットにおいても限界周波数を低周波側に存在するパワーのピーク周波数として決定した。なお、流速と局所加速度は、時間に関して微分するだけなので、コヒーレンスはほぼ 1 であり、位相は $\pi/2$ のずれを持つのみであった。

4. 限界周波数について理論的アプローチ

流れと波動の違いは運動方程式中の水面勾配項（圧力項）とどの項が釣り合うかで決まり、摩擦項ならば流れ、局所加速度項ならば波動である。そこで局所加速度項と摩擦項のオーダー比較を試みる（水口，1982）。

$$\left| h \frac{\partial u_l}{\partial t} \right| \left| \frac{\tau_x}{\rho} \right| \approx \left(\frac{h u_l}{T_R} \right) \left/ (c \hat{u}_w u_l) \right. = \frac{h}{c T_R \hat{u}_w} \equiv A \quad (1)$$

$$\frac{\tau_x}{\rho} = c \hat{u}_w u_l \quad (2)$$

ここで u_l ：流速の長周期成分， $\hat{u}_w$ ：波動に伴う流速変動の代表値， τ_x ：底面摩擦応力， ρ ：流体の密度， T_R ：代表時間， c ：摩擦係数である。 A は局所加速度項と摩擦項の比であり、大きければ波動に、小さければ流れになることを示す。式(1)を微小振幅長波の仮定のもと周波数に関して解くと以下の式となる。

$$f = \frac{\gamma}{2} \sqrt{\frac{g}{h}} c A \quad (3)$$

ここで γ は波高水深比であり、以下の計算では 0.6 とする。式(3)において未定定数は c および A であり、実測データより $c \times A$ の積の形で最小二乗法により求めると、 $c \times A = 0.0059$

となる。摩擦係数としては 0.01～0.02 が適当とされており（堀川，1991）， A の値としては 0.3～0.6 となる。これらを図-3 に示す。実測データにおいては水深に関して負の勾配を持つ一次関数に見えるが、 f_c を最大にする組み合わせ $(c, A) = (0.02, 0.6)$ と最小とする組み合わせ $(c, A) = (0.01, 0.3)$ の範囲内に収まっており、妥当な結果と言える。結局、今回観測したパラメータをもとに限界周波数を与える式を求めると以下の式になる。

$$f_c = 0.002 \sqrt{\frac{g}{h}} \quad (4)$$

式(4)においては $h \rightarrow 0$ において $f_c \rightarrow \infty$ となるが、 $h \rightarrow 0$ の極限は遡上域であり今回の議論の適用範囲外と考える。

5. おわりに

現地観測データにより、現地碎波帯内における流体運動のモードとして波動と流れの存在を明らかにし、またその限界周波数について検討した。運動方程式のオーダー比較より導かれる式をもとに、簡単にその限界周波数が評価できることを示した。

参考文献

堀川清司(1991)：海岸工学，東京大学出版会，pp43.

水口 優(1982)：碎波帯付近の長周期変動のダイナミックスについて，第 29 回海岸工学論文集，pp130-134.

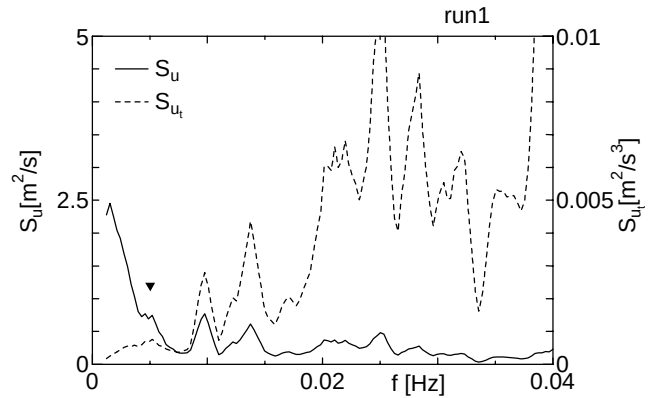


図-2 流速と局所加速度のパワースペクトル(run1)

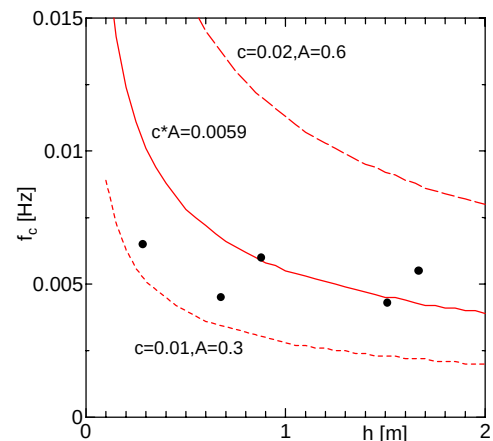


図-3 水深と限界周波数の関係