

自然海浜における長周期波の重複波構造と反射特性

関 克 己*・水 口 優**

近年の研究の進展により、遡上域に入射する波のうち、汀線で反射する長周期成分と砕波する風波成分で底質の移動に対する作用が異なることが指摘されてきている。本研究では、自然海浜における砕波帯内での現地観測データを解析し、汀線近傍における長周期波は汀線での反射による岸沖方向の重複波浪場となることを確認した。また周波数空間において反射率を算定し、完全反射となる限界周波数、およびそれより高周波側における反射率の低下について検討し、遡上域の勾配および入射波の情報と関係付けることにより長周期波の反射率算定モデルを提案する。

1. はじめに

近年の長周期波に対する研究の発展により、海岸構造物の安定性、および底質の移動に対して長周期波の重要性が明らかになってきている。特に短期の海岸侵食に直結する問題である高波浪時の底質の移動に対しては、非砕波で引き波を伴う長周期成分（反射成分）と砕波してエネルギーを失う短周期成分（砕波成分）とで、底質の移動に対する効果が異なることが指摘されている（島田ら, 2003）。

斜面での波の反射に関する研究は、斜面の限界勾配と反射率に着目して古くから行われてきているが、その多くが一樣勾配斜面に規則波を入射させた場合の物理実験に関するものである（例えば Battjes, 1974）。波の不規則性に起因して長周期波が存在することから、規則波の実験結果を不規則波に直接適用することは問題がある。また現地観測データを用いた研究として水口ら（1983）があるが、データ収録時間が短く長周期波の議論は十分には行われていない。

そこで、本研究では自然海浜における長期間連続の現地観測データを基にして周波数空間における反射率を算定し、完全反射を形成する限界周波数、およびそれより高周波数側における反射率の低下について検討する。特に遡上域の勾配および入射波の情報との関係を調べる。さらにデータ解析により得られた知見を基に反射率算定モデルを提案することを目的とする。

あわせて現地観測データを対象とした入反射分離手法および長周期波の波動モードに対する検討を行う。

2. 現地観測概要と入反射分離手法について

(1) 現地観測概要

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（以下、港空研）観測用棧橋において行った。図-1 に示すように、棧橋上に設置した波高計 20 台と電磁流速計 1 台により取得したデータを用いる。サンプリ

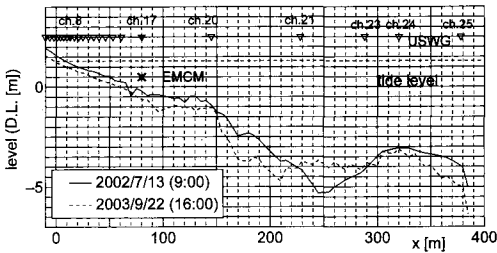


図-1 計器設置概要および断面地形

ング周波数は 5 Hz である。

ここで x は棧橋原点を基準とした沖向き正の岸沖座標である。また断面地形は港空研による定常観測の lead 測量データによるものである。

今回解析に使用するデータは電磁流速計を設置している期間のデータとして 2002 年 7 月 13 日 (case 1~3)・7 月 25 日 (case 4)、および高波浪で汀線近傍での顕著な地形変化（汀線後退）を含む期間として 2003 年 9 月 22 日 (case 5~12) を用いる。表-1 に解析データのケースと砕波点諸量を示す。表中の x_{sb} は砕波点から平均汀線までの水平距離、 d は水深、 $m_{0,s}$ および $m_{0,l}$ は 0.04 Hz を基準として分離した短周期成分、長周期成分の 0 次モーメント、 $\tan \beta$ は遡上域勾配である。下付添字 b は砕波点

表-1 解析ケースの砕波点諸量、遡上域勾配と限界周波数

case	x_{sb} [m]	d_s [m]	$m_{0,sb}$ [m ²]	$m_{0,ls}$ [m ²]	$\tan \beta$	f_{cr} [Hz]
1	76	1.65	0.0427	0.0013	0.033	0.020
2	51	0.81	0.0068	0.0007	0.018	0.009
3	42	0.74	0.0048	0.0009	0.017	0.008
4	82	1.76	0.0672	0.0171	0.038	0.017
5	213	4.81	0.5332	0.3483	0.058	0.030
6	131	2.73	0.6564	0.3260	0.057	0.014
7	135	2.94	0.6067	0.2071	0.046	0.015
8	226	4.88	0.9076	0.3996	0.052	0.016
9	234	4.98	0.9643	0.4212	0.036	0.013
10	243	5.09	0.7962	0.3527	0.016	0.010
11	251	4.91	1.0581	0.3014	0.016	0.005
12	253	5.06	1.1235	0.2896	0.019	0.004

* 学生会員 工修 中央大学大学院理工学研究科土木工学専攻
** 正 会 員 工博 中央大学教授 理工学部土木工学科

($m_{0,s}$ が最大となる地点)での値であることを示す。 f_{cr} は後述する完全反射となる限界周波数である。また遡上域勾配の求め方は内野ら (2004) に詳しい。

なお case 1~3 は潮位のみ異なるケース, case 1 と case 4 は含まれる長周期成分のパワーが異なるケース, case 5~12 は遡上域勾配の変化(緩勾配化)を伴う上げ潮時 8 時間 (2003 年 9 月 22 日, 6:20~14:20) のデータである。

(2) 入反射分離手法

ここでは汀線近傍の現象ということで, 波浪は汀線に直角に入射しているものとして扱う。

反射現象を取り扱う際, 厳密な議論を行うためには水面変動データを入射波と反射波に分離する必要がある。分離手法は大きく分けると, 同一地点において計測した水面変動および水平流速データを基に長波理論により分離するもの, 複数地点 (ここでは 3 地点) における水面変動データの関係から分離するものがある (水口, 1991)。

水面変動および水平流速データを用いる分離法の 1 つである QNL 法は非線形性を考慮することが可能であり, 浅海域においては有効な手法であるが, 流速計の設置, 海浜流などの水面変動と波動としての関係の無い流れ場の存在などが制約条件となる。

複数の波高計データを用いる方法 (以下 SLISM 法) は, フーリエ級数展開の手順を含むため線形理論での分離となり, さらに 3 地点間の波動現象の一意性を前提とするために, 浅海域での, 特に碎波 (風波) 成分の分離は不可能である。また同様の理由で十分密に波高計を設置する必要がある (本現地観測では 3~6 m)。

図-2, 3 に両手法による分離結果の典型的な例を示す。ここで入反射分離にあたり, QNL 法では 0.005 Hz 以下に存在する準定常的な流れによるものと思われる流速のパワーをカットした。また SLISM 法では長波の波速を用いて, 水深変化の影響を波高計間隔に反映させている。具体的には以下のように波高計間隔を補正する。ここで図中の x_s は算定地点から平均汀線までの距離である。

$$\frac{\Delta x'}{\sqrt{gd'}} = \int_0^{\Delta x} \frac{dx}{\sqrt{gd(x)}} \dots\dots\dots (1)$$

ここで $\Delta x'$ は補正後の波高計間隔, d' は代表水深 (3 地点の平均), Δx は実際の波高計間隔, g は重力加速度, $d(x)$ は水深である。ただし補正の効果は微小である。

SLISM 法では, このケースでは明らかに 0.1 Hz 以上の高周波成分での分離精度は著しく低下する。QNL 法は碎波点近傍での分離結果であるため 0.050 Hz 以上で反射波に誤差としてのパワーの増大が起こる。しかしながら 0.050 Hz 以下の成分では両手法の分離結果は良く

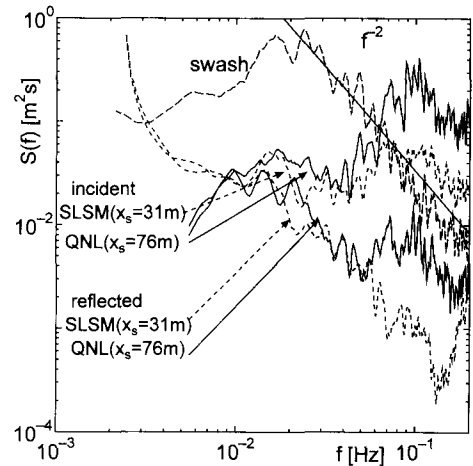


図-2 両手法による入・反射波, および遡上波のパワースペクトル (case 1)

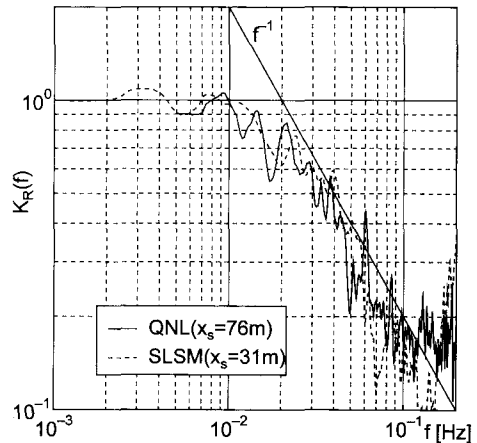


図-3 両手法による分離結果の比較 (case 1)

一致している。他の比較可能なケースの解析結果においても, 精度の低下する周波数は変化するものの, 今回対象とする長周期波 (0.04 Hz 以下の成分) に関しては両者の一致は満足すべきものであった。

また遡上波は飽和領域で f^{-2} の勾配を示している。水口ら (1983) では f^{-4} の勾配であったが, これは遡上域の勾配が 0.11 と今回の解析データ (最大で 0.058) に比べて大きいことによるものと考えられる。

図-3 には反射率を示す。反射率の低下する領域では f^{-1} の勾配を持つことが分かる。そこで限界周波数 f_{cr} は f^{-1} 勾配と $K_R=1$ との交点として読み取った。

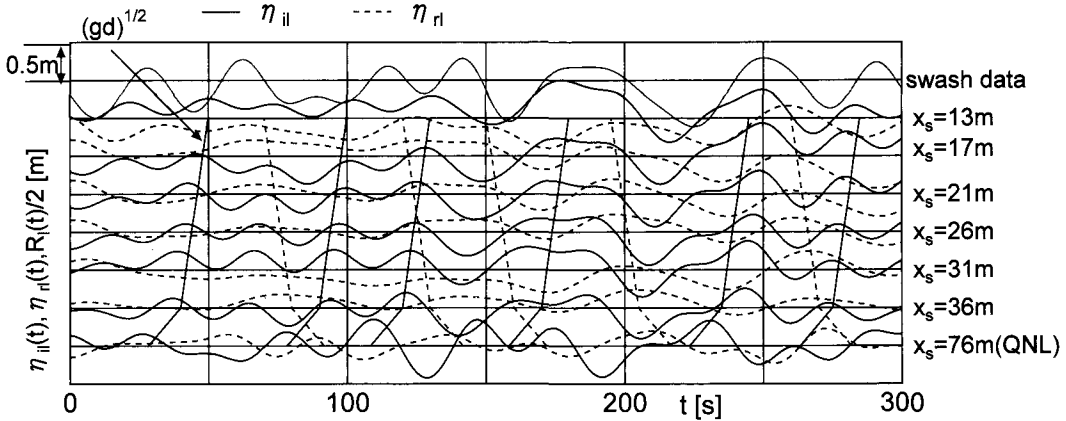


図-4 各地点における入反射長周期波と遡上波の長周期成分 (case 1)

3. 観測データに基づく長周期波の挙動と反射率

(1) 入・反射波と遡上波について

図-4 に case 1 での各地点における入・反射長周期波、および遡上波の長周期成分の時系列を示す。遡上波は、水面を感知している最も岸側の 2 地点の水面変動から水面直線を、lead 測量データから地形直線を算定し、両者の交点を瞬間遡上位置として算出した。遡上波に関しては入・反射成分と対応させるため 0.5 倍して図示している。また図中に長波の波速の伝播経路を併せて示すが、 $x_s=13\text{ m}$ から遡上して反射してくるまでの時間は図から 15 s とした。

図から分かるように、沖から入射する長周期波が汀線で反射し、沖に戻っていく様子が見て取れる。水口ら (1983) と同様に、多段斜面による線形重複波理論と比較を行ったが、今回の観測データも長周期波は岸沖方向の重複波構造により説明可能である。

図-5 には入・反射分離が可能な最も岸側の地点での入・反射波と遡上波のパワー比の平方根を示す。Case 1 では 0.010 Hz 以下の周波数帯では入射波と遡上波のパワー比の平方根は 2、反射波と遡上波では 0.5 となり、線形遡上であることが分かる。

しかしながら反射波の低下が顕著になる 0.020 Hz 以上の周波数帯では、遡上波は入射波の 4 倍以上となり、反射波は遡上波の 1/4 程度となる。つまり部分反射領域では入・反射波ともに遡上波に対して線形的な対応関係に無いことが分かる。これは高波浪で比較的急勾配である case 5 でも高周波側にシフトしているものの同様の傾向である。

(2) 反射率に対する算定地点の影響

次に、砕波帯内に密に設置した波高計群の水面変動

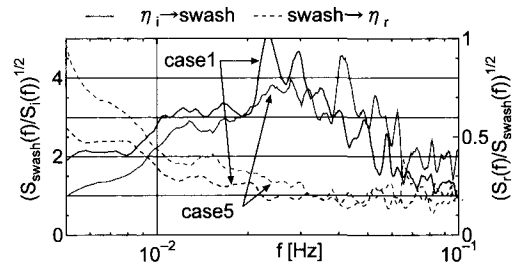


図-5 入・反射波と遡上波のパワー比

データを基に SLSM 法により反射率を算定し、反射率算定地点の影響について検討を行う。

図-6 に case 1 のデータを用いて異なる地点で算定した反射率を示す。図から完全反射となる限界周波数は変化しないことがわかる。ただし、 f^{-1} 勾配がみられる部分反射領域 ($1.0 > K_R > 0.5$) の形状および、それより高周波側では汀線に近いほど反射率が上昇する。これは砕波減衰が支配的な周波数領域となり、入射波が汀線に向かって減衰していることと対応している。

(3) 遡上域勾配と限界周波数の関係

ここでは、汀線近傍の地形変化を伴う時間帯のデータを用いて、遡上域勾配と限界周波数の関係を調べる。

図-7 に case 5, 7, 9, 11 における砕波帯内の反射率と限界周波数について示す。ここでは遡上域沖側境界付近での反射率を用いている。図から明かなように、遡上域の勾配が緩勾配化するにしたがって、完全反射の限界周波数は低下している。また、 $1.0 > K_R > 0.5$ となる領域 (部分反射領域) では、遡上域勾配が緩勾配化するに従って反射率の減衰勾配も緩くなる。しかし今回の観測の遡上域勾配 (0.016~0.058) ではその変化は小さく f^{-1} 勾配とみなせるものとした。

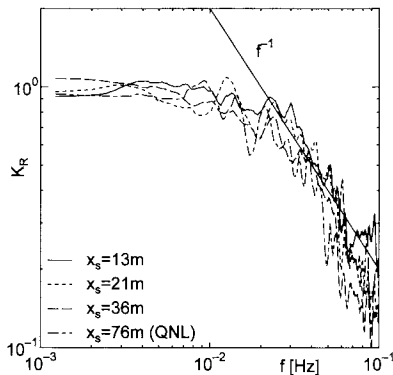


図-6 反射率に対する算定地点の影響

4. 反射率算定モデル

現地観測データの解析により、反射率をモデル化するには完全反射となる限界周波数の値と、部分反射領域における関数形が必要である。そこでそれぞれについて既往の経験式と現地観測データよりモデル化して反射率算定モデルを作成する。

(1) 限界周波数について

Battjes (1974) では反射率の経験式として以下の式を提案している。

$$K_R = \begin{cases} 1.0 & 0.1 \xi^2 \geq 1.0 \\ 0.1 \xi^2 & 0.1 \xi^2 \leq 1.0 \end{cases} \quad (2)$$

$$\xi = \frac{\tan \beta}{\sqrt{H/L}} \quad (3)$$

ここで H は波高、 L は波長であり斜面法先での値を用いる。つまり surf similarity parameter (ξ) は砕波帯外で定義している。

式 (2) の判別条件より ξ の値が完全反射の限界周波

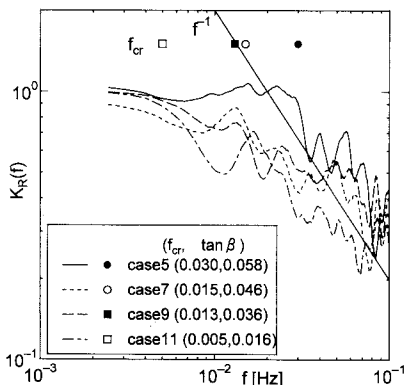


図-7 遡上域勾配が異なるときの反射率

数を与えることが予想される。ここで長波を仮定し、以下の関係式を用いて波長を周波数に変換する。

$$L = \sqrt{gd} f^{-1} \quad (4)$$

また、波高は 0 次モーメントで代表させる。水深および 0 次モーメントは、ここでは砕波点における値とする。

上記の仮定のもと判別式を書き換えると、限界周波数を与える式としては以下の式を得る。

$$f_{cr} = \alpha \frac{\sqrt{gd_b}}{\sqrt{m_{0b}}} \tan^2 \beta \quad (5)$$

ここでは無次元の比例定数である。

式 (5) を図にしたものが図-8 である。相関係数は 0.82 である。長周期波成分が重複波の影響を受けること、地形変化を伴うケースでは遡上域勾配の算定、および砕波点の定義に誤差が含まれることを考えれば式 (5) は妥当な結果を与えている。ここで $\alpha=1.13$ であった。

(2) 部分反射領域の反射率

現地観測結果から、部分反射領域では反射率は f^{-1} 勾配となることが明らかとなった。一方で式 (2) の下段の式が部分反射領域に対応すると考えると、反射率は ξ^2 に比例する。長波近似を用いると f^{-1} に比例する関係が得られる。

ここで限界周波数の存在を考慮すると、部分反射領域での反射率算定式は以下のようになる。

$$K_R = \left(\frac{f}{f_{cr}} \right)^{-1} \quad (6)$$

(3) モデルの検討

上記の結果を踏まえると自然海浜における反射率の算定式として以下の式が提案できる。

$$K_R(f) = \begin{cases} 1.0 & f \leq f_{cr} \\ \left(\frac{f}{f_{cr}} \right)^{-1} & f_{cr} < f < f' \end{cases} \quad (7)$$

ここで f' は $K_R(f')=0.5$ となる周波数である。限界周波数は $\alpha=1.13$ として式 (5) により計算する。

図-9 に case 5, 7, 9, 11 での実測の反射率とモデルの

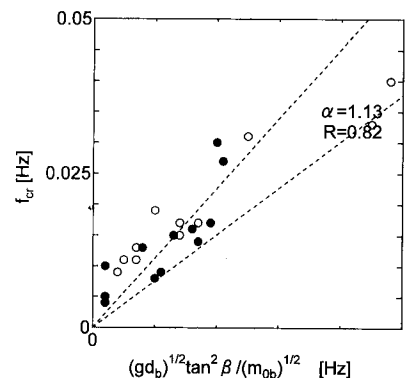


図-8 限界周波数算定式

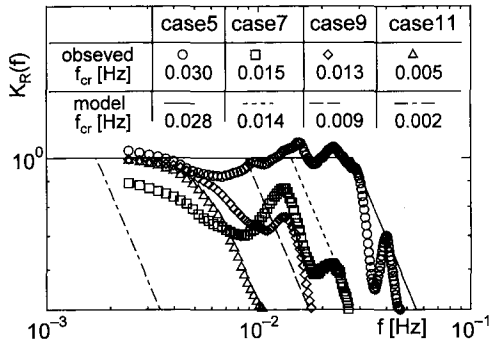


図-9 反射率の実測とモデルの比較

比較を示す。

図から分かるように、勾配が大きいケース (case 5, 7) では限界周波数の値、部分反射領域での反射率ともに実測値を再現している。しかし、勾配が小さくかつ高波浪時である case 11 では対数スケールでは限界周波数の算定式の誤差が大きく、その影響によりモデルの算定結果も大きく異なる。

5. おわりに

自然海浜における長周期波の反射現象に対して、現地観測データを解析することにより以下に示す結論を得た。またそれらの知見を基に反射率算定モデルを提案した。

i) 複数の波高計を用いる入反射分離手法を汀線付近の現地データに対して適用し、長周期成分（非碎波）で

は十分に精度があることを確認した。

ii) 汀線近傍の長周期波は汀線で反射しており、岸沖方向の重複波構造と説明されるが、遡上波は部分反射領域では入・反射波と線形的な対応関係は見られない。

iii) 汀線での長周期波の反射率は、完全反射となる限界周波数を持ち、その値は碎波水深、碎波点での 0 次モーメントおよび遡上域勾配により算定可能である。

iv) 部分反射領域では、反射率の減衰勾配は遡上域の勾配に依存し、今回の観測では f^{-1} の勾配を持つ。

今後の課題は、勾配の異なる場合のデータ収集とその検討、および時系列との関係を明らかにすることである。

謝辞：本現地観測は柳嶋慎一さんを始めとする(独法)港湾空港技術研究所漂砂研究室の関係者の皆様、(株)エコーの伊東啓勝さんに多大な協力を頂いた。またデータ解析において濱本寛君(前中央大学学生)の協力を得た。ここに記して感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 内野敬太・山口隼人・関 克己・水口 優 (2004): 大規模侵食時における汀線近傍の漂砂量・地形変化・波浪特性, 海岸工学論文集, 第 51 巻, pp. 446-450.
- 島田玄太・内野敬太・関 克己・水口 優 (2003): 高波浪時における汀線近傍の地形変化に及ぼす長周期波と短周期波の役割, 海岸工学論文集, 第 50 巻, pp. 531-535.
- 水口 優・苅部好伸・堀田新太郎 (1983): 現地海浜における遡上波について, 第 30 回海岸工学講演会論文集, pp. 109-113.
- 水口 優 (1991): 浅海域における入・反射波の分離手法について, 海岸工学論文集, 第 38 巻, pp. 31-35.
- Battjes, J. A. (1974): Surf similarity, Proc. 14 th Int. Conf. Coastal Eng., ASCE, pp. 466-480.