

緩勾配斜面上における不規則波の底面流速変動特性に関する研究

佐藤 慎司*・諫山 太郎**・柴山 知也*

1. 序 論

傾斜海岸上の不規則波の変形と内部流速場の特性を理解することは、漂砂や物質拡散等の現象を理解するうえで極めて重要である。近年流速計測技術の進歩とともに、電磁流速計を用いた現地観測やレーザ・ドップラ流速計を用いた室内実験が数多く行なわれるようになり、乱れや長周期成分の特性など碎波帯に特徴的な現象の解明が進んでいる(例えば, Horikawa¹⁾)。

不規則波の内部流速場を評価する方法としては、水位変動の実測記録に線形フィルターを作用させる方法や個々の波に対して流れ関数法を適用する方法がよく用いられている。小山ら²⁾は微小振幅波理論の伝達関数を修正することにより水位変動から流速を精度よく評価することができることを示した。磯部・大中³⁾は緩勾配海岸における現地観測結果をもとに、線形フィルター法の適用性を検討し、補正係数と部分反射の影響を考慮することにより流速が評価できることを示した。佐藤ら⁴⁾は、レーザ・ドップラ流速計を用いて現地条件に比べて比較的急勾配な斜面上の不規則波による底面流速変動を計測した。そして、底面流速の波動成分は碎波帯内で若干過大評価となるものの線形フィルター法で評価できること、碎波帯の底面付近にみられる沖向き定常流れは碎波による質量輸送をモデル化することにより評価できることを示した。

これらの研究成果をふまえて本研究では、緩勾配斜面上で碎波する波の浅水・碎波変形過程と底面近傍の流速変動を規則波および不規則波条件に対して詳細に測定し、それらの諸特性を明らかにすることを目的とした。そして特に不規則波条件で顕著となり、碎波帯内の諸現象を特徴づけていると考えられる長周期変動の発生・伝播機構を検討し、その合理的な評価法について考察した。

2. 不規則波の碎波変形と底面流速変動の測定

実験は無反射性不規則波造波機が装備された長さ

17 m、幅 0.5 m の二次元水槽に勾配 1/40 の固定床斜面を設置して行なった。一様水深部の水深を深くするために斜面の先端部 2 m の区間は勾配を 1/10 とした。水槽内に規則波および不規則波を発生させて、碎波帯外から汀線近傍までの斜面上の 16 点において水位変動と底面上 5 mm の水平流速変動を計測した。測定点は図-1 に

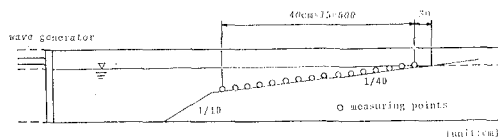


図-1 実験装置と測定点

示す様に静水汀線より 30 cm 沖側の点から 630 cm 沖側の点の間に等間隔で配置した。水位変動は容量式波高計で記録するとともに碎波状況をビデオカメラで記録し、さらに測点を通過する波が碎波している時にはパルス信号を発生させて同時に記録した。また流速はレーザ・ドップラ流速計(カノマックス社製, 15 mW He-Ne)を用いて前方散乱方式で計測した。水位および流速は水路中央部で計測した。これらの記録はサンプリング周波数 25 Hz で A/D 変換してディスクに格納した後 MT に移し替えて以後の処理に用いた。一点当りの測定時間は規則波では 60 秒、不規則波では 256 秒間である。各測点における測定条件をできるだけ同一にするために造波信号は同じものを繰り返して用い、さらに造波開始から測定開始までの時間を一定に揃えることにした。それでも測定記録には数分の 1 秒程度のずれが生じたため、一様水深部の波形記録を基準にして計算機でそのずれを補正してから以後の解析に用いることにした。

実験条件は Bretschneider・光易型のスペクトル特性を有する 2 種類の不規則波とこれらにほぼ対応する条件の規則波とした。一様水深部の水深は 36 cm とした。実験条件をまとめて表-1 に示す。ここで、 T は周期、 H_s は一様水深部の波高であり、不規則波条件に対しては有義波の諸元で示してある。

不規則波条件に対する記録はゼロダウンクロス法により波別解析して各種統計量の分布特性を求め、対応する

* 正会員 工博 横浜国立大学助教授 工学部建設学科

** 学生会員 横浜国立大学大学院工学研究科

表-1 実験条件

ケース	T (s)	H_1 (cm)	備考
1	0.863	4.5	不規則波
2	0.856	2.3	
3	0.985	5.0	規則波
4	0.984	2.7	

規則波条件のものと比較検討した。そしてスペクトル解析を行ない、砕波・浅水変形に伴う水位と流速のスペクトル形状の変形特性を確認したうえで、適切な遮断周波数を持つ数値フィルターを用いてその波動成分と長周期成分を分離し、両者の相互関係とその合理的な評価法について考察した。

3. 底面流速変動の特性

図-2 は不規則波条件のケース 1 における底面流速変動の有義全振幅値、定常流速ならびに長周期成分の根自乗平均値の分布を示したものである。横軸 x は静水汀線からの距離であり、矢印は有義波高が最大となる地点を示している。スペクトル解析の結果をもとに、波動成分は 0.25 Hz から 5 Hz までの周波数帯に含まれる成分、長周期成分は 0.25 Hz 以下の周波数領域に含まれる成分とした。規則波条件では汀線近傍では波高の減少とともに波動流速振幅も減少してゆくが、不規則波においては汀線近傍においてもかなり大きな波動流速成分が観測される。また、汀線付近で波動流速と同程度の長周期流速変動がみられることも不規則波の特徴である。

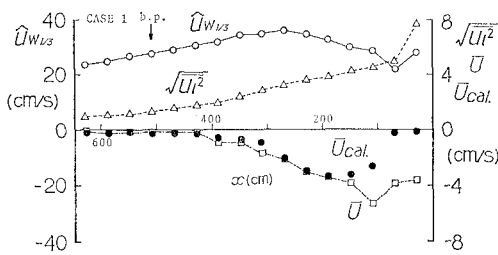


図-2 流速の波動成分、長周期成分と定常成分

佐藤ら⁴⁾は、底面近傍の流速の定常成分の評価法を検討した。そして、底面における定常流速は、境界層の外縁における質量輸送と波運動に伴う質量輸送と砕波に伴う質量輸送の3つの影響を加え合わせることで評価できることを示した。緩勾配条件である今回のデータを用いて計算を行なったところ、定常流速は汀線ごく近傍の領域を除いて同様の方法により精度良く評価できることが確認された(図-2中●印)。ただし、砕波による輸送量のモデル式中に含まれる係数 A が 6.8 となることがわかった。汀線ごく近傍で一致度が悪くなるのは、波

の再生現象によるためと考えられる。再生波は一般に波高が極めて小さく、砕波・非砕波の判定が困難であることが多かった。従って砕波に伴う質量輸送を評価するうえでこれらの再生波の影響をどの程度評価すべきか不明確であり、この点が不一致の一因となったと考えられる。また、砕波による質量輸送は砕波形式はもとより斜面勾配によってもその特性が変化すると考えられるため、さらに広範なデータをもとに係数を同定し計算方法の妥当性を検証する必要がある。

佐藤ら⁴⁾は、さらに 1/20 勾配斜面上における実測値をもとに、有義波高と平均水深の比 $H_1/3d$ と無次元化した流速全振幅 $u_{1/3}/\sqrt{gd}$ の分布特性が規則波と不規則波で大きく異なることを示した。今回の 1/40 勾配条件においても、不規則波条件では波高水深比と無次元流速振幅は汀線に向けて徐々に増大していくのに対し、規則波条件ではこれらはほぼ一定で、むしろ減少傾向にあることが確認された。

図-3 はケース 1 の実測値をもとに平均量に対する運動量方程式の各項を評価したものである。ここで X は岸向きを正とする水平座標である。また、平均流速は底面近傍における実測流速の平均値で置き換え、radiation stress は水位変動の波動成分 η_w の自乗平均値を用いて次式で評価した。

$$S_{xx} = \rho g \bar{\eta}_w^2 \left\{ \frac{1}{2} + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 ρ は水の密度、 g は重力加速度、 d は平均水深であり、 k は有義波周期を用いて微小振幅波理論により計算される波数である。底面摩擦応力は西村⁵⁾にならない、流速変形を矩形波に置き換えて波・流れ共存場に対する表示式により評価した。摩擦係数は 0.01 とし、波動流速の振幅は有義振幅値を代表値として用いて計算した。図-3 によると砕波帯全域において平均水位勾配と S_{xx} の勾配がほぼ釣りあっており、 S_{xx} の勾配から砕波帯内の平均水位を推定できることがわかる。ただし、汀線近傍では底面摩擦も無視し得ない量となっているうえ、今回検討しなかった乱れも重要な役割を果たしてい

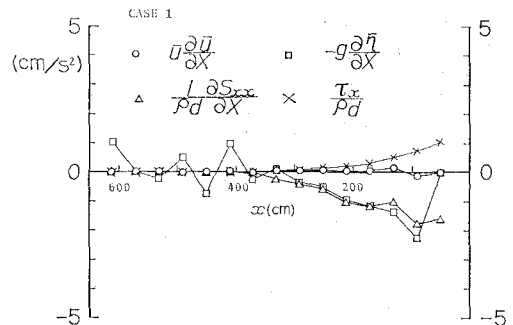


図-3 定常成分に対する運動量方程式の各項の評価

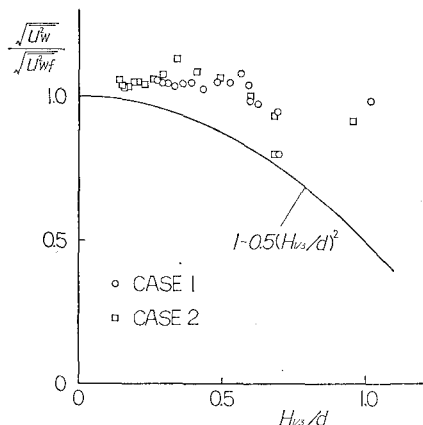


図-4 線形フィルターによる流速の計算値と実測値との比較

と考えられるため、底面摩擦項とレイルズ応力項を取り入れた計算が必要である。

図-4 は 0.25 Hz から 5 Hz までの周波数成分である波動成分に対して水位変動から線形フィルターを用いて底面流速変動を評価し、実測流速の rms 値と計算された流速の rms 値との比を示したものである。横軸はそれぞれの測点における有義波高と平均水深の比であり、図中の実線は磯部・大中³⁾ が用いた補正係数を表している。碎波帯内においても波高水深比が 0.5 以下の領域では線

形フィルターで高精度の評価が行なえている。しかし、さらに岸に近づき波高水深比が大きくなるにつれて線形フィルター法は過大評価となるため、これらの領域では何らかの補正をする必要があると考えられる。

図-5, 6 は水位と流速の歪み度および尖鋭度を示したものである。規則波条件では、碎波後一度減少した歪み度および尖鋭度が再び上昇していることがわかる。これは佐藤ら⁴⁾ の 1/20 勾配斜面に対するデータではみられなかったことであり、波の再生による特徴的な現象である。一方、不規則波条件では波の再生による第二のピークは顕著にはあらわれず、1/20 勾配条件のものと類似した分布特性を示している。

4. 長周期変動成分の評価

4.1 部分重複波としての評価

磯部・大中³⁾ は、緩勾配海岸における現地観測データをもとに不規則波の内部流速場の評価法について考察した。そして、流速変動の長周期成分は水面変動記録をもとに部分重複波の伝達関数を用いて精度良く評価できることを示した。

図-7 は汀線近傍における流速の長周期変動成分と、磯部・大中³⁾ が示した部分重複波の伝達関数を用いて評価した値とを比較したものである。ただし、伝達関数の評価に必要な重複波領域と進行波領域の境界となる周波

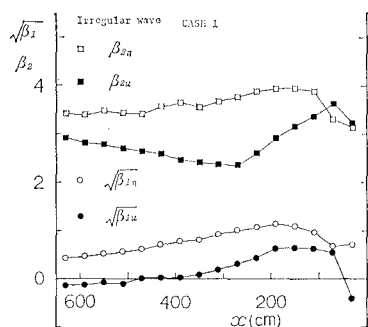


図-5 水位と流速の波形の歪み度と尖鋭度 (不規則波)

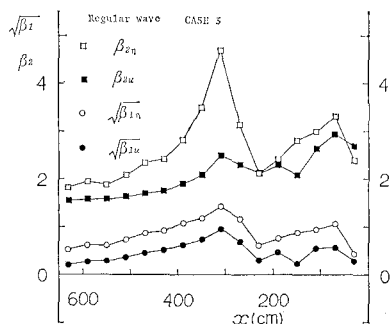


図-6 水位と流速の波形の歪み度と尖鋭度 (規則波)

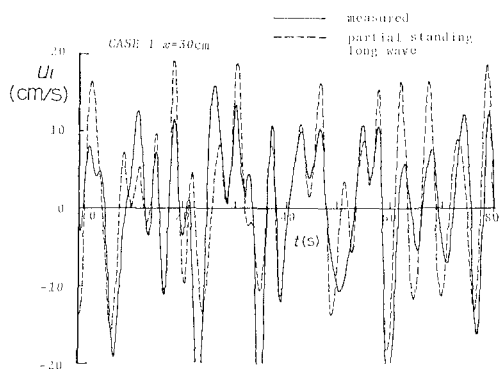


図-7 部分重複波としての流速の長周期成分の評価

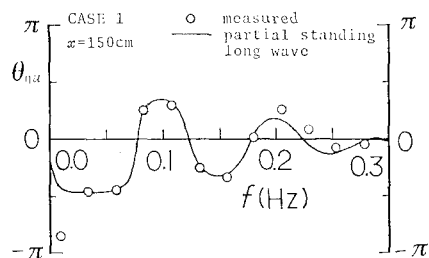


図-8 水位変動と流速変動の位相差

数は 0.3 Hz とし、反射率は磯部・大中⁹⁾と同様に周波数に対して線形的に変化するものとした。また図-8 は水位と流速の長周期成分のスペクトル解析を行ないその位相差を示したものであり、実線は用いた伝達関数モデルによる理論値である。これらから、定量的にはやや過小評価する傾向があるが、汀線近傍における長周期変動は汀線で反射されることによって形成される部分重複波とみなして計算できることがわかる。しかし、碎波点付近から碎波帯外にかけては一致度が悪くなるうえ、部分重複波として計算するためには水位の長周期成分の実測波形が必要であるため、適用可能な条件が限定される。

4.2 radiation stress による直接評価

Longuet-Higgins⁶⁾ は、一様水深部を進行する定常な波群に対して誘起される長周期変動の水位 η_l と流速 u_l が次式で与えられることを示した。

$$\eta_l = \frac{(S_{xx})_l}{\rho(gd - Cg^2)} + \text{const.} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$u_l = -\frac{Cg(S_{xx})_l}{\rho d(gd - Cg^2)} - \frac{(E)_l}{\rho dC} + \text{const.} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 C 、 Cg は波の位相速度と群速度、 E は単位面積当りのエネルギーであり、添字の l は長周期変動成分であることを示している。図-9 の実線は碎波帯外における水位と流速の同時記録から入射波を分離し、その入射波成分を示したものである。破線は波群の定常性を仮定して radiation stress S_{xx} から式 (2) により評価した計算値である。ここで E と S_{xx} の長周期成分は水位変動 η_w の自乗に遮断周波数 0.25 Hz の数値ローパスフィルターをかけることにより評価した。また C および Cg は有義波周期を用いて微小振幅波理論により計算し、式 (2) の定数は実測値と計算値の平均値が一致する様に決定した。碎波帯外における長周期変動の入射波成分は図-9 に示されている様に S_{xx} から精度良く評価できることがわかった。しかし、この方法では反射波成分は考慮できないうえ、水深が浅い領域では極めて過大評価となるため、碎波帯全域にわたって適用することはできない。

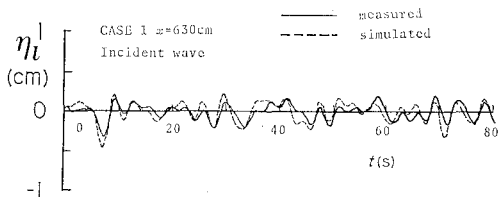


図-9 radiation stress による長周期水位変動の評価

4.3 平均量の方程式に基づく評価

Kamronrithisorn⁷⁾ は、非定常緩勾配方程式を用いて斜面上の不規則波浪場を数値計算した。そして、その結果を用いて radiation stress を評価し、平均量に対する連続

式と運動量方程式とを連立させて数値積分することにより水位と流速の長周期変動成分を評価している。しかし実測値との詳細な比較は十分には行なわれていないため、その適用性は検証されていない。

4.1, 4.2 に述べた様に、長周期変動成分は碎波帯外において radiation stress によりその入射成分を評価し、さらに汀線における反射を考慮することにより合理的に評価できると考えられる。そこで、本論文では実測された水位変動の波動成分の記録をもとに radiation stress を評価し、平均量の方程式を用いて長周期変動成分を計算することにより、実測値との比較、検討を行なうことにする。まず実測された長周期成分を用いて平均量に対する連続式と運動量方程式の各項を評価した。ただし、乱れ成分によるレイノルズ応力項に関しては信頼性の高い測定ができなかったため考慮していない。水位と流速の平均量はそれぞれの長周期変動成分でおきかえ、radiation stress は 4.2 と同様に水位変動の自乗に数値フィルターをかけたものを用いた。運動量方程式について検討したところ、碎波帯外では非定常項と radiation stress 項、平均水位勾配項の 3 項がほぼ同程度の量でつりあっているのに対し、汀線近傍では非定常項と平均水位勾配項が卓越するものの他の 2 項も無視し得ない大きさとなっており、それぞれの総和として運動量方程式がほぼ満たされることが確認された。

以上の結果をもとに、平均量の方程式を適切な境界条件のもとで数値積分することにより波動成分に関する情報のみから長周期成分を評価することを試みた。入力外力条件として用いたのは、各測点における水位の波動成分、定常成分と流速の定常成分である。まず水位変動の実測値から 4.2 で述べた方法で radiation stress を評価し、これを外力として連続式と運動量方程式を η_l と u_l を変数として数値積分した。ただし、水位と流速の定常成分はあらかじめ既知量として η_l と u_l に加えて計算した。汀線境界では完全反射とし、沖側境界における入射波成分は 4.2 で示した方法で水位の波動成分から評価し

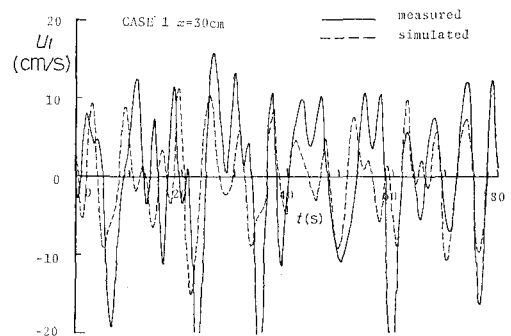


図-10 数値積分による流速の長周期成分の評価

て与え、反射波成分は自由透過となる様にした。図-10は実測値と計算値を比較したものである。砕波帯内外を通じて計算値はほぼ実測値と良好に対応しており、本法により不規則波浪場の長周期変動を波動成分に関する情報のみから精度良く評価できることがわかった。しかし同図にもみられる様に数秒間にわたって系統的なずれがみられる場合もあり、これは、数値計算においては汀線における反射波成分が精度良く再現されていないためと考えられる。

図-11は実測値から入射成分と反射波成分を分離し、両者の流速変動を比較したものである。入射波成分には短周期の変動が顕著であるのに対し、反射波成分には長

周期のものが卓越している。これに対し、計算では波の周期に関わらず汀線で完全反射条件としているため、反射波成分の評価に大きな誤差が生じていることになる。さらに予測値の精度を改善するためには境界条件の与え方に反射のスペクトル特性を取り込む必要がある。

図-12は本研究で取り上げた3つの方法で評価した長周期流速変動の rms 値を実測値と比較したものである。radiation stress から直接評価したものは汀線近傍でかなり過大評価となるのに対し、部分重複波および平均量の方程式に基づくものはほぼ良好な近似値を与えている。

5. 結 語

本研究では比較的緩勾配な斜面上における不規則波の水位と底面流速変動を詳細に測定し、その諸特性を解析した。そして、特に砕波帯内で顕著となる長周期変動成分の合理的な評価法について検討した。今後はこれらの長周期成分が汀線近傍の水理現象や不規則波の砕波現象に与える影響を明らかにしてゆきたいと考えている。最後に本研究は昭和63年度科学研究費総合研究(A)(No. 63302048, 代表者: 服部昌太郎中央大学教授)による補助を受けたことを付記する。

参 考 文 献

- 1) Horikawa, K.: Nearshore Dynamics and Coastal Processes, Univ. of Tokyo Press, 522p, 1988.
- 2) 小山裕文・岩田好一郎・布藤省三: 修正伝達関数法による水粒子速度の一算定法, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 59~63, 1984.
- 3) 磯部雅彦・大中 晋: 砕波帯付近における不規則波の水粒子速度の計算法, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 39~43, 1984.
- 4) 佐藤慎司・福浜方哉・堀川清司: 斜面上における不規則波の砕波変形と底面流速に関する実験的研究, 第34回海岸工学講演会論文集, pp. 336~340, 1987.
- 5) 西村仁嗣: 海浜循環流の数値シミュレーション, 第29回海岸工学講演会論文集, pp. 333~337, 1982.
- 6) Longuet-Higgins, M. S. and R. W. Stewart: Radiation stress and mass transport in gravity waves, with application to "surf beat", J. Fluid Mech., Vol. 13, pp. 481~504, 1962.
- 7) Kamronrithisorn, P.: Modeling of wave deformation and velocity field in the surf zone, 東京大学工学博士学位論文, 145p, 1986.

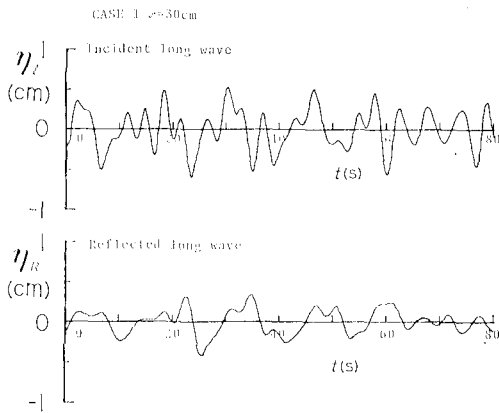


図-11 長周期変動の入射波成分と反射波成分

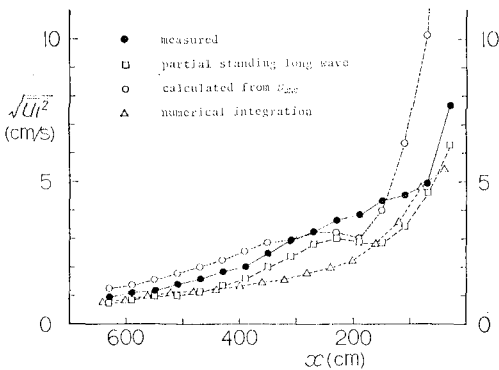


図-12 長周期変動成分の評価法の比較