

砕波帯内の流速の変動特性と漂砂量推算に及ぼす影響

岡 安 章 夫*・浅 利 洋 信**

1. はじめに

従来、規則波による流速変動は概ね規則的であるという理解があったように思われ、規則波浪下で行われた多くの研究において位相平均的な流速が流速の真値として用いられてきた。波動数値モデルによる流速推算も基本的には流速の反復性を暗に仮定しており、与えられた水位変動からは流速変動の一意的な解が定まると考えている。

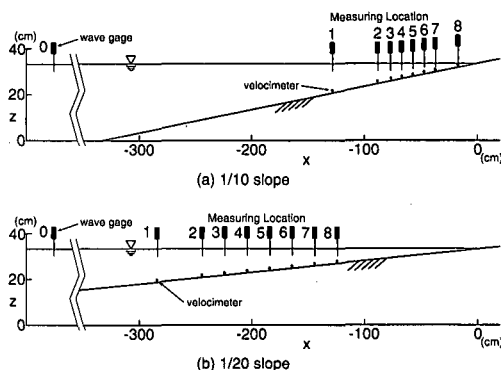
しかし、例えば日野ら (1986) が報告するように、砕波帯内においては入射水位変動がほぼ規則的と見なせる場合においても流速変動にかなりの不規則性や長周期の変動が見られ、現象によっては統計的な扱いをする必要があると考えられる。例えば、代表的な漂砂量算定式は流速の3～6乗に比例する形で表現されているが、変動が不規則である場合、流速の1乗の平均値が一致しても一般に高次の積分値は一致しない。従って、波動水槽内の規則入射波により得られた底質移動量を、局所流速の規則的な変動の結果によりもたらされたものと解釈して較正された局所漂砂量則の係数には再考の余地がある。

本研究では、まず実験室内において、多くの条件下で規則波による砕波帯内の流速を測定し、流速分布のばらつきの特性について検討を行った。さらに、得られた結論をもとに、不規則波浪場における長周期の流速変動の漂砂に対する重要性を検証するために、清水ら (1996) による大型実験水槽で行った不規則波浪場における流速測定の結果について考察する。

2. 実験方法

(1) 実験装置および実験条件

実験水槽内に種々の規則波を発生させ、水位変動及び底面付近での岸沖流速変動の測定を行った。実験には、長さ17m、幅0.5m、深さ0.55mの二次元波動水槽を用いた。この水槽の一端には反射波を吸収制御できる造波装置が備えられており、他端に1/10および1/20の2通



図一 実験装置の概略

りの一様勾配斜面を作成し設置した。1/20 勾配斜面は法先1mが1/10 勾配となっており、測定領域においてはステンレス製床の上に厚さ15mmの合板を敷き、底面の精度を向上させた。

それぞれの地形において5ケースの規則波を入射させ、砕波点付近から静水汀線付近までの8つの測線において水位変動と流速変動を記録した。水位変動の記録は、造波板より1波長程度離れた沖側一様水深部に1台、砕波点に1台、流速測定を行っている測線上に1台、計3台の抵抗線式波高計を使用して行った。本実験で使用した波高計は応答性が優れているため砕波帯内の水位変動にも十分追従できると考えられる。

流速変動は、造波板付近に設置してある波高計以外の波高計の直下において岸沖方向の流速を1成分の光ファイバー・レーザ流速計で測定した。本実験で使用した流速計は、最大出力4Wのアルゴン・レーザとハードウェアFFTを利用した信号処理装置を備えており、通常の計測でも毎秒1000個程度のドップラ・バーストを検出できる。今回は測定の信頼性を上げることも目的として、平均毎秒200個程度に抑えて流速測定を行った。測定点の高さは全ての測線で底面上5mmの位置で測定した。水槽及び測定点配置の概要をそれぞれの地形について図一に示す。図中 x は静水汀線から沖側にとった水平座標で、 z は沖側一様水深部の底面を基準にした鉛直座標である。また、それぞれの測線の座標を表一に示す。

* 正会員 工博 横浜国立大学助教授 大学院工学研究科人工環境システム学専攻

** 青森県 青森県

表-1 測線の位置

測線番号	x (cm)	
	series 1	series 2
1	-127.0	-284.0
2	-87.0	-244.0
3	-77.0	-224.0
4	-67.0	-204.0
5	-57.0	-184.0
6	-47.0	-164.0
7	-37.0	-144.0
8	-17.0	-124.0

表-2 実験条件

case	beach slope	H_i (cm)	T (s)	ξ_i	breaker type	x_b (cm)
1-1	1/10	8.0	1.46	0.66	plunging	-112.0
1-2		10.0	1.46	0.59	plunging	-149.7
1-3		12.0	1.17	0.43	spilling	-173.5
1-4		10.0	0.99	0.39	spilling	-141.3
1-5		11.0	0.88	0.34	spilling	-160.7
2-1	1/20	8.0	1.46	0.33	spilling	-268.3
2-2		10.0	1.46	0.29	spilling	-332.0
2-3		12.0	1.17	0.22	spilling	-349.9
2-4		10.0	1.99	0.19	spilling	-284.6
2-5		11.0	0.88	0.17	spilling	-382.0

実験はそれぞれの地形に対し5ケースづつ行い、1/10勾配におけるものを series 1、1/20 を series 2 とした。個々のケース名、実験条件および入射波の諸元を表-2に示す。表中 H_i は沖側一様水深部での平均波高、 T は同じく平均周期、 ξ_i は一様水深部波高を用いた surf similarity parameter である。また、 x_b はそれぞれのケースでの平均的な碎波位置を示す。沖側一様水深部での水深 h_i は全てのケースで 33.2 cm とした。

(2) 実験方法

測定に際しては、流速計と波高計の1台をペアで使用し、それぞれの測線に移動して測線の数だけ繰り返し測定を行った。水位変動はこの他一様水深部と碎波点で同時測定を行った。碎波点に固定してある波高計は、波高の変動特性が碎波帯内へ進入する以前でどの程度なのかを調べ、また、同条件での個々の測定における入射波の反復性を確認する目的で設置した。

波高計からの信号はサンプリング周波数 50 Hz でデジタルデータレコーダに記録し、流速計については前述の通り毎秒 200 個程度のデータが取得できるように調節した。流速計の時系列データは等間隔ではないので、リサンプリングにより 50 Hz 相当の等間隔データに変換した。このようにして得られた水位と流速のデータ 200 周期分を以後の解析に用いた。

3. 実験結果

(1) 碎波帯内での1波毎の波高・流速の変動性

図-2 は沖側と碎波点での水位変動と碎波帯内での水位変動および流速の同時測定記録を示す。図中、 η_i 、 η_b は入射波による沖と碎波点での水位変動の時系列データ、 η 、 u はそれぞれ碎波帯内の測定点での水位変動と流速変動の時系列を示す。沖でほぼ規則的とみなせる水位変動は碎波点でもほぼ規則的とみなすことができる。碎波帯内では水位変動が幾分長周期的な変動を示すが、同地点での流速の変動性は水位変動に比べかなり大きい。

また、図-3 は case 2-4 における各測線での1波毎の最大流速の出現確率を示した図である。波は水位変動をゼロダウncross法で1波毎に定義し直し、それぞれの波についての最大流速を 5 cm/s 毎に区分して、出現確率をプロットしてある。流速データにおける高周波の成分は、乱れによる瞬間的に大きな流速を除くために数値フィルターで除去してある。case 2-4 では測線 1 (図中 ML1) はほぼ碎波点に位置しており、ここでは最大流速の変動がかなり小さいことを表している。碎波帯の中に入るに従って分布は広がっており、碎波帯内では1波毎の最大流速にかなりのばらつきが見られることが分かる。このばらつきは碎波帯の中程から岸に向かっては特に大きくはならない。

日野ら (1986) は規則波による碎波帯内での水位・流速変動について、1) 規則波の入射によっても碎波帯内ではかなり大きな長周期的な水位・流速変動が起こる。2) この変動は、水位におけるより流速におけるものの方が顕著である。3) 碎波帯内における変動量の特性から、長周期の自由波や水槽内の定常波、その他波動性を持ったものであるとは考えにくい。4) この変動は大規模渦の生成プロセスの脈動によるものであると考えられる。と述べている。本実験における測定結果も少なくとも現象的には日野らを支持するものである。

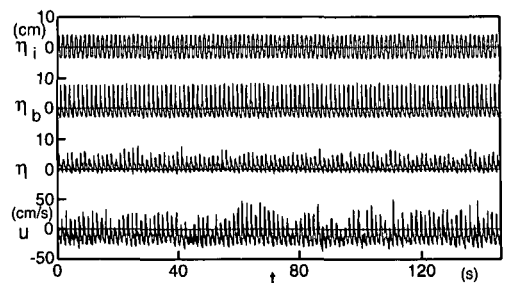


図-2 碎波帯内外の水位変動と碎波帯内の流速変動の同時記録

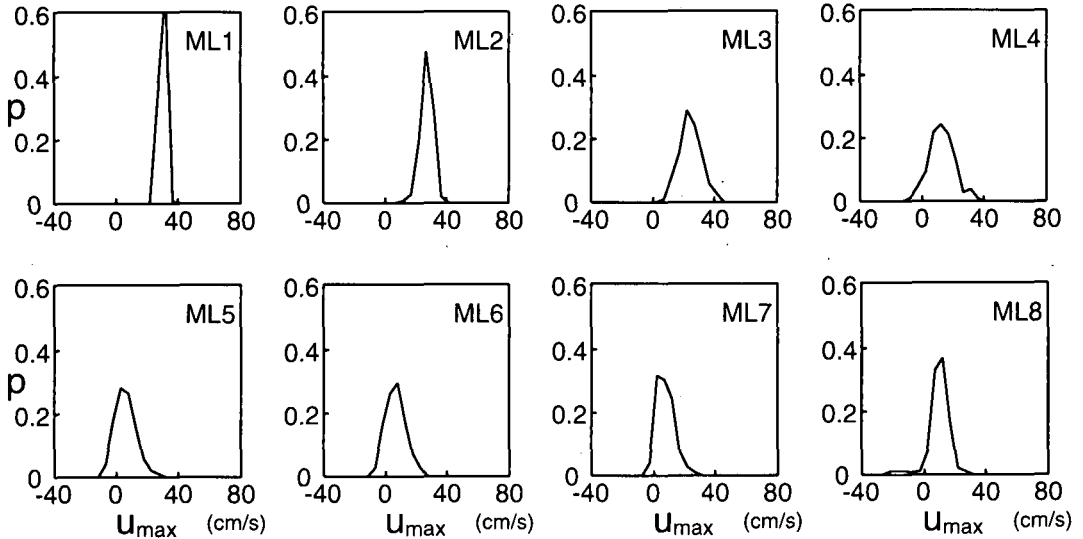


図-3 砕波帯における最大流速の流速別出現確率の岸沖変化 (case 2-4)

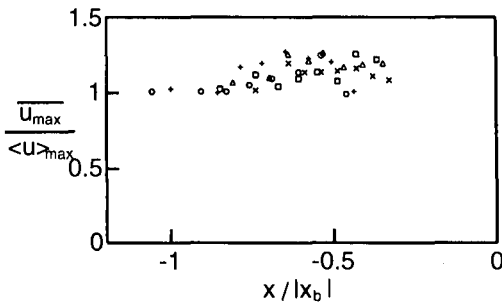


図-4 個々の波の最大流速の平均値と位相平均流速の最大値との比

(2) 最大流速の平均値と位相平均流速の最大値の比較

さて、このような長周期的な変動の原因が何かはともかくとして、規則的な入射波によって規則的でない（特に流速）変動が得られるとするなら、これまで規則的な応答を暗に仮定して議論されてきた様々な問題に対する影響は、果たしていないのであろうか？

図-4 は series 2 の全ての測定についてについて、1 波毎の流速最大値の平均 $\overline{U_{\max}}$ と位相平均流速の最大値 $\langle U \rangle_{\max}$ の比を示したものである。横軸は岸沖方向の座標を砕波帯幅 $|x_b|$ で無次元化したもので、図で左が砕波点付近である。砕波帯内では最大値の平均が相対的に大きくなっていることが分かる。1 波毎の最大流速値の平均と位相平均流速の最大値は、全ての波において、最大流速の現れる位相と位相平均流速値が最大をとる位相が一致した場合にのみその比が 1 となる。その他の場合には、一般に位相平均の最大値の方が小さくなる。このこ

とは、特に最大（最小）流速の大きさが顕著な影響を及ぼす現象においては、実際に起こる応答（の平均）を位相平均の流速最大値で評価した場合に過小評価となる可能性があることを示唆している。

砕波帯内の 1 波毎の流速変動性は、これまで砕波による乱れを議論する場合を除いてほとんど定量的に評価されることはなかった。換言すれば、上述の変動性はこれまで全て砕波帯内の「乱れ」として扱われてきた。しかし、日野らの述べるようにこの変動に無視できない長周期の成分が含まれるのなら、全てを「乱れ」成分に押し込めることは難しい。

現在の波動モデルにおいては、砕波による波浪変形・減衰を考慮しているモデルにおいても上述のような変動性は考慮されていない。従って、規則的な入力に対しては規則的な出力を与えるよう設計されており、言うなれば位相平均流速を求めることを目標としている。これらの波動モデルでは、例えば流速の最大値の平均においても図-4 の差を埋めることは出来ない。

(3) 流速の変動性が底質移動評価に及ぼす影響

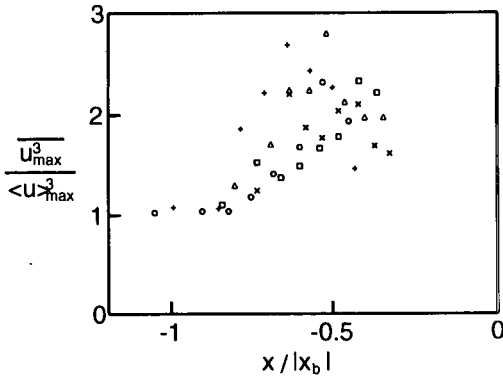
この最大流速における統計的な差異は、非線形的な応答が顕著になれば増大する。たとえば、代表的な漂砂量算定式

$$\frac{\bar{q}}{w_o d} = 12.5 \Psi_m^3, \quad (\text{Madsen} \cdot \text{Grant}, 1976) \quad \dots\dots\dots (1)$$

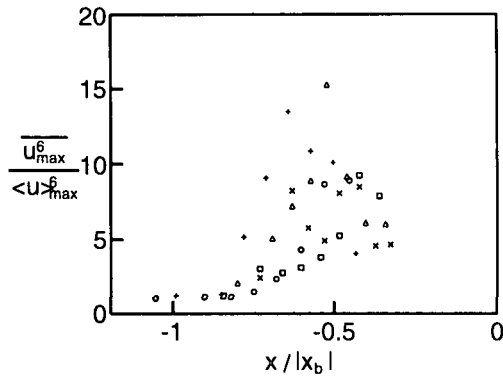
もしくは

$$\frac{\bar{q}}{o d^2} = 47 (\Psi_m - \Psi_c)^{1.5}, \quad (\text{Sleath}, 1978) \quad \dots\dots\dots (2)$$

を砕波帯内において適用する場合について考える。ここ



図—5 個々の波の最大流速の3乗値と位相平均流速の3乗値との比

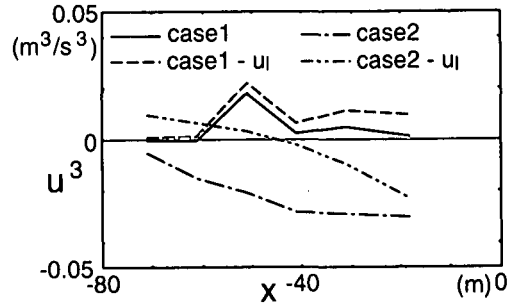


図—6 個々の波の最大流速の6乗値と位相平均流速の6乗値との比

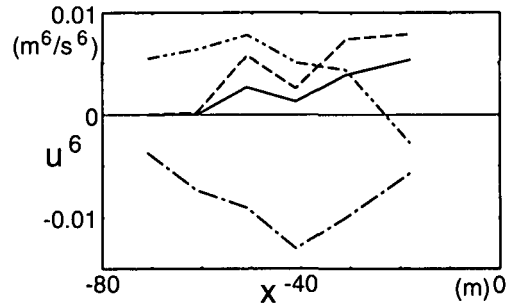
で、 $\bar{q}$ は 1/2 周期平均の漂砂量、 w_b および d は底質の沈降速度および粒径、 σ は角振動数、 Ψ_m はシーلز数の最大値、 Ψ_c は移動限界シーلز数である。シーلز数の最大値 Ψ_m は、ほぼ最大流速の 2 乗に比例すると考えて良いので、式 (1)、式 (2) はそれぞれ、流速の最大値の 6 乗、3 乗に比例することとなる。

図—5、図—6 は series 2 のケースについて、それぞれ 1 波毎の流速最大値の 3 乗および 6 乗値の平均と位相平均流速の最大値の 3 乗および 6 乗の比を示している。碎波点付近では図—4 同様 1 に近い値であるが、碎波帯内では 3 乗で 2 倍、6 乗では 10 倍近い値を示しており、漂砂については変動性の影響が顕著であることが分かる。

確かに、振動流装置を用いて底質移動を評価する際には、かなり規則的な流速振動を与えることが可能であり、移動量自体のばらつきも小さい。しかしこれを、実験室の波動水槽における規則波実験と比較することは、流速の積算に上述の誤差を生じる。また、そもそも局所漂砂量則の係数については、実験結果による較正時にこれら



(a) 3乗値の相違



(b) 6乗値の相違

図—7 不規則波浪場における長周期変動流速の有無による流速の 3 乗、6 乗の時間平均値の相違

の現象による影響も必然的に加味されて決定されているとも解釈できる。しかし、この場合でも、少なくとも規則波浪場に関して、碎波帯外と碎波帯内で同じ係数を用いて代表流速（位相平均流速）から漂砂量を評価するには無理があるといわざるを得ない。

4. 不規則波浪場における長周期変動流速の影響

日野ら (1986) によれば、規則波浪場におけるこれらの現象では 1 波 1 波の確率的な変動と共に、長周期的な変動が影響している。不規則波浪場では、1 波 1 波の確率的な変動については、これより個々の波の不規則性が卓越すると考えられるので問題はないように思われる。しかし、長周期の変動については、その形成のメカニズムは異なるものの、漂砂量の推算において同様の問題が生じていると考えられる。さらに、不規則波浪場の場合には、長周期の流速変動が短周期の流速変動と位相関係を持つことが指摘されている（例えば、合田、1995）ので、影響がより大きくなる可能性がある。

図—7 は清水ら (1996) により測定された、長さ 205 m、水深 4 m の大型水槽での不規則波浪による流速を、実測流速と長周期成分を除いた流速とで 3 乗もしくは 6 乗の

積分値の時間平均を比較したものである。図中、実線は case 1 で長周期成分も含んだ実流速によるもの、波線は同じく case 1 で実流速から長周期成分だけを除いて計算したもの、一点鎖線、二点鎖線はそれぞれ case 2 における同様の値を求めたものである。外力の小さい case 1 の堆積型のケースではそれほど差がないものの、波高の比較的大きい case 2 の中間型のケースでの差は著しい。従来、浮遊砂移動における長周期流速変動の重要性については研究があるが(たとえば柴山ら, 1992), この結果より、掃流砂を含めた底質移動全般について長周期流速変動の重要性が確認された。

また、今日、不規則波浪場における漂砂量の推算において波浪数値モデル等を用いて流速変動を評価する場合にも、数値モデルが短周期成分との位相関係も含めて長周期の変動を的確に再現できない場合には前述と同様な問題が起きる可能性に注意する必要がある。

5. おわりに

2 次元波動水槽を用いた室内実験において、規則波による砕波帯内の水位変動および流速変動を測定し、その変動特性について検討を行った。砕波点付近までは入射波はほぼ規則的な変動を示すが、砕波帯の中では、特にその流速において 1 波毎の変動性が大きい。個々の波の流速最大値の平均は位相平均流速の最大値よりも大きく、6 乗値の比較においてその比は最大 10 倍程度に達する。砕波帯内での現象を議論する際にはこの変動性を考

慮する必要がある、たとえば漂砂量の推算等においては有為な差を生むと考えられる。

この砕波帯内での変動を長周期変動ととらえた場合、不規則波による長周期変動についても同様な議論が可能である。大型造波水路における不規則波実験では、長周期変動を除いた流速の 3 乗、6 乗の時間積分値には、長周期成分を含んだ本来の流速変動の場合と大きな差異が生じた。このことから、漂砂量の算定にあたっては長周期変動をその位相情報も含めて考慮する必要があると結論された。

参考文献

- 合田良実(1995): 不規則波浪に伴う長周期波の諸研究について、第 31 回水工学に関する夏期研修会講義集, 土木学会水理委員会, B-6.
- 柴山知也・柏木幹雄・岡安章夫 (1992): 砕波帯内長周期波の漂砂量への効果, 海岸工学論文集, 第 39 巻, pp. 316-320.
- 清水隆夫・池野正明・岡安章夫・栗山善昭・佐藤慎司・島田広昭・清水琢三・武若 聡・西隆一郎 (1996): 不規則波による大型海浜断面変形実験と外力場の多点同期計測, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp. 491-495.
- 日野幹雄・灘岡和夫・上野成三 (1986): 砕波過程に着目したサーフ・ビートの発生に関する実験的研究, 第 33 回海岸工学講演会論文集, pp. 179-183.
- Madsen, O. S. and W. D. Grant (1976): Quantitative description of sediment transport, 15th Int. Conf. on Coastal Eng., ASCE, pp. 1093-1112.
- Sleath, J. F. A. (1978): Measurement of bed load in oscillatory flow, Proc. ASCE, Vol. 104, No. WW4, pp. 291-307.