

不等流沿岸流における流速分布の相似性について

土屋義人*・河田恵昭**・Hossam Refaat***

1. 緒 言

沿岸漂砂が卓越する海岸では、自然に存在するヘッドランドあるいは、防波堤や突堤などの海岸構造物が海浜過程の境界条件を与えている。この場合、一様海浜であれば、沿岸流はこれらを境にして下手側で発達し、ある距離を流下後、平衡つまり等流状態に達する。海岸では、一般に来襲波浪の特性や海底地形が沿岸方向に一様でないので、極論すれば、沿岸流は至るところで不等流状態であるといってもよいであろう。このような沿岸流の不等流性が沿岸漂砂が卓越する場合の海浜過程にどの程度影響するかは、海浜変形の1次元解析の有効性とも関係して、興味ある問題であろう。

すでに、等流状態の沿岸流については古くから研究され、radiation stress の概念が明らかにされて以来、それを外力として Bowen(1969)や Longuet-Higgins(1970)が水平拡散係数などに関する仮定に基づいて、微小振幅波理論による解を求め、実験あるいは現地データとの適合性を検討している。また有限振幅波理論を用いた James(1974)の取扱いもある。一方、不等流沿岸流に関しては、Eagleson(1965)が碇波帯を三角形断面の開水路と考え、海底の抵抗係数を Kármán-Prandtl の関係式で与えて、指数関数で断面平均沿岸流流速の距離の変化を表示している。堀川・佐々木(1968)は、抵抗係数に及ぼす Reynolds 数の影響を考慮すれば、Eagleson の結果は実験値により適合することや、移動床にも適用可能であることを示した。また、Gourlay(1976)は沿岸流の沖方向流速分布の沿岸方向変化に関する詳細な実験を行っているが、直線海浜を対象としていないので、不等流性は明かでない。

さて、沿岸流が汀線と、砕波帯の少し沖を境界とする浅海域において発生・発達する流れとすれば、沿岸流の不等流性がその狭い海域においてどのような特性となって現れるのかは、現象解明の興味とともに沿岸流の理論展開にとって非常に重要であると考えられる。そこで、

本論文では、沿岸流の不等流特性を実験的に検討したものである。

2. 不等流沿岸流の実験

(1) 実験項目

沿岸流の不等流性を明らかにするために、ここでは一様海浜で流速分布が沿岸方向にどのように変化するか、また wave set-up が沿岸方向に変わらないのかどうかについて検討することにした。これらの特性は、沿岸流理論の展開に際して、有用な近似条件となる可能性がある。たとえば沖方向に空間積分して得られる運動量方程式を解くための必要な条件を考えてみよう。沿岸流の基礎式は、いま水深方向に積分平均した沿岸流を取り扱うことにすれば、沿岸方向と岸沖方向の運動量方程式および連続式の3式で構成される。これらの式において、沿岸流流速の沖方向変化に比べて沿岸方向変化は小さいと仮定して変数変換し、かつ汀線から沖方向に空間積分して平均操作をすれば、1次元解析における沿岸流の一般式が誘導される。その解から沿岸流の不等流性を明らかにするために必要な仮定として、つぎの2つが挙げられる。

a) 流速分布の相似性：沿岸流の沖方向流速分布が、沿岸流が発生する原点からの沿岸方向距離に関係なく相似であること。いま、沿岸方向に一様な海浜に一様な波が入射する場合を対象とすれば、砕波水深、碇波帯幅および砕波角が沿岸方向に一定になるとともに、岸沖方向の沿岸流流速分布が沿岸方向の距離のみの関数として表示されなければならない。言い換えれば、沿岸流流速分布は、不等流から等流に漸近するにつれて沿岸方向にのみ発達するという事に相当しよう。

b) Wave set-up の一様性：実験的に明らかにするには、汀線近傍の平均水位の岸沖および沿岸方向変化を調べるとともに、波の最大上線が汀線と平行になることによって確認できよう。

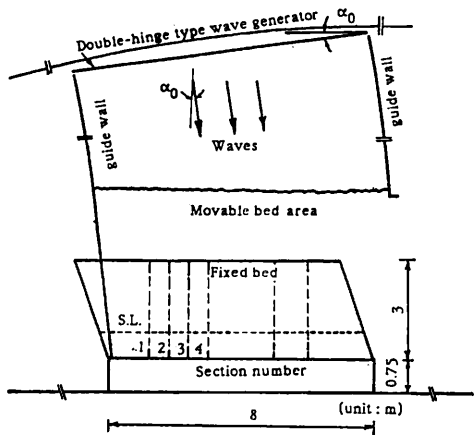
(2) 実験装置

実験は扇形波浪平面水槽を用いて行った。この水槽は、図一1に示すように、直径 35 m の半円部と、35 m × 10 m の長方形部からなっている。規則波造波機は半円

* 正会員 工博 京都大学防災研究所長

** 正会員 工博 京都大学助教授 防災研究所

*** 学生員 工修 京都大学大学院 工学研究科



図一 実験装置の概略図

形部の水槽外壁に取り付けたレールに沿って移動できるようになっており、造波板の長さは 12 m である。この造波板から模型海浜まで消波装置付きの導波板を設置し、反射波の発生を防ぎ所定の実験波を得られるようにしている。ただし、消波効果が大きすぎると、導波板の近傍で波高が小さくなりすぎて、必然的にこれに沿った沖に向かう強い流れが発生するので、沿岸流の上手側の汀線の近くでは、波高の減衰を極力押さえるため、薄い鉄板製の導波板を設置した。勾配が 1/10 のモルタル刷毛仕上げ製模型海浜は図一に示すように水槽端部に設けた。その沖側の一様水深部は、固定床海浜に滑らかに接続する最大厚さ 10 cm の移動床とし、波の峰線が固定床の沖側端部付近で直線となるように工夫した。固定床海浜上には一辺が 20 cm の格子が基準点として描かれており、パソコン制御の計測台車に取り付けた容量式波高計の位置を制御して、波高分布を求めた。

(3) 実験方法と条件

実験は固定床の沖側端部で沿岸方向の波高分布が一様であることを確認後、実施した。実験では 2 種類のトレーサーを用いた。すなわち一辺が 3 cm の厚手色紙および直径 2.5 cm の中立球形粒子である。これらを適当に散布し、上空約 4 m に位置するビデオカメラで撮影した。これらの作業を同一点で数回繰り返して、格子内で細かく分割した範囲に含まれる多数のトレーサーの移動速度を求めた。色紙のトレーサーは表面流速を示し、球形粒子のトレーサーは断面平均値に近い沿岸流速を与えるものの、底面に不規則に接触するのでその影響があると考えられる。しかし、計測された沿岸流速に両者の差がほとんど認められなかったため、実験値としては両者を一緒に扱うことにした。なお、過マンガン酸カリの着色溶液をトレーサーとして用いることも考慮したが、碎波によって容易に拡散してしまい、精度の高い流速計測が期待できなかったため採用しなかった。実験では水深を

表一 不等流沿岸流の実験条件および係数

Ex. No.	H'_0 (cm)	H_b (cm)	h_b (cm)	α_0 (°)	α_b (°)	y_b (cm)	P
1	3.80	5.68	6.05	17	7.3	80	0.20
2	5.10	6.73	7.87	17	8.4	100	0.09
3	8.50	11.61	11.72	17	10.2	150	0.10
4	4.50	7.98	8.80	35	17.6	90	0.05
5	5.20	7.21	8.03	45	20.8	100	0.10
6	7.75	9.63	11.80	45	25.5	130	0.10
7	5.50	7.74	9.48	55	26.6	100	0.10
8	6.65	8.60	10.03	55	27.4	120	0.08

30.6 cm, 周期 1.13 s と固定し、波高および波向を変化させた。wave set-down と set-up による平均水位の変化は波高計を岸沖方向に低速で動かし、かつ同時にローパスフィルターを用い、限界周波数を 0.3 Hz とし計測した。実験条件を表一にまとめて示した。

3. 不等流沿岸流の特性

(1) 流速分布の相似性

前述したように、沿岸流の流速分布の相似性が成立するという事は、等流状態の流速分布形と不等流状態のそれが沿岸方向に関して相似になるということである。これは、つぎのようにして確かめればよい。すなわち、沿岸流流速が等流状態に達していると確認できた実験値を基準として、これに一定の倍率を掛けた値がある断面での不等流の実験値と等しくなれば相似と言える。ところが問題が 1 つある。それは基準となる等流状態の実験値がバラつくので、そのまま計算に用いるわけにはいかないことである。そこで、ここでは等流状態の実験値と Longuet-Higgins (1970) の計算値をまず比較し、その適合性を検討後、後者を基準値として不等流沿岸流の実験値と比較することにした。このような比較が可能であるのは、Longuet-Higgins の沿岸流の等流解が沿岸流の基礎式の第 1 次近似解に一致するはずだからである。すなわち、その等流解は、次式で与えられる。

$$U/U_0 = f_1(\bar{y}), \quad \bar{y} = y/y_0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、

$$f_1 = A\bar{y} + B_1\bar{y}^{P_1} \quad (0 < \bar{y} < 1)$$

$$f_2 = B_2\bar{y}^{P_2} \quad (\bar{y} > 1)$$

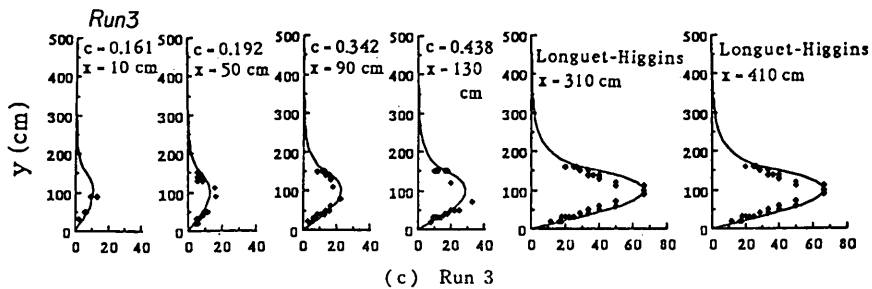
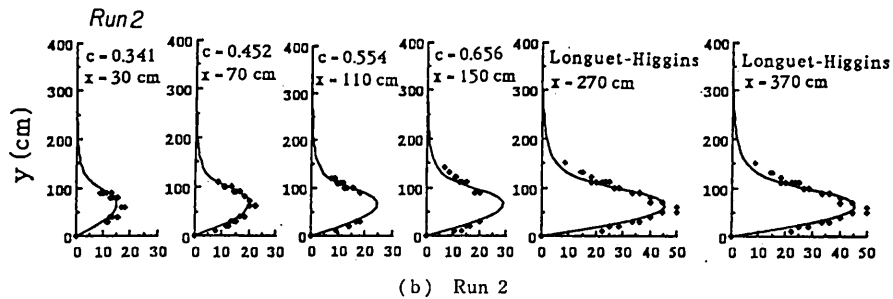
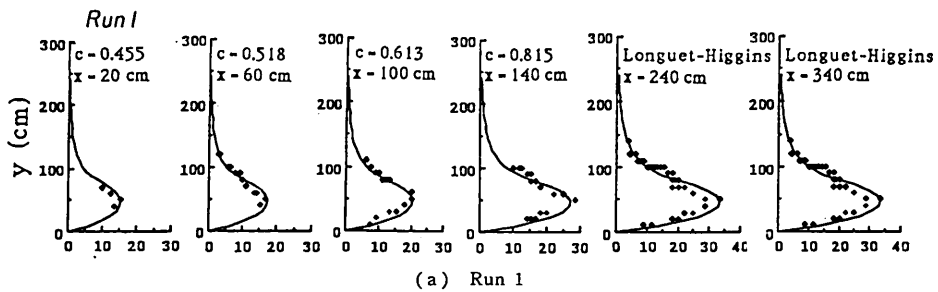
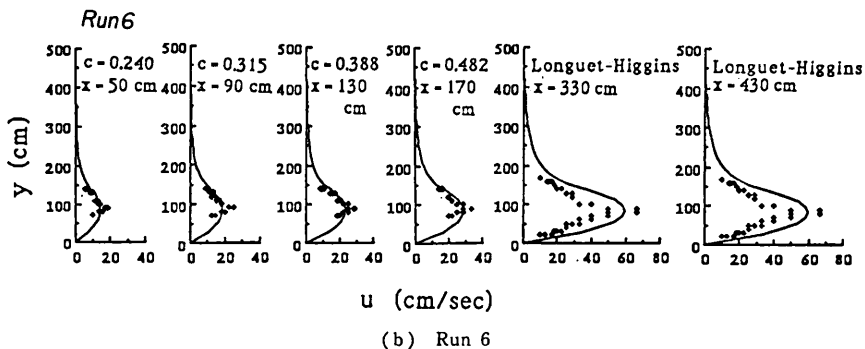
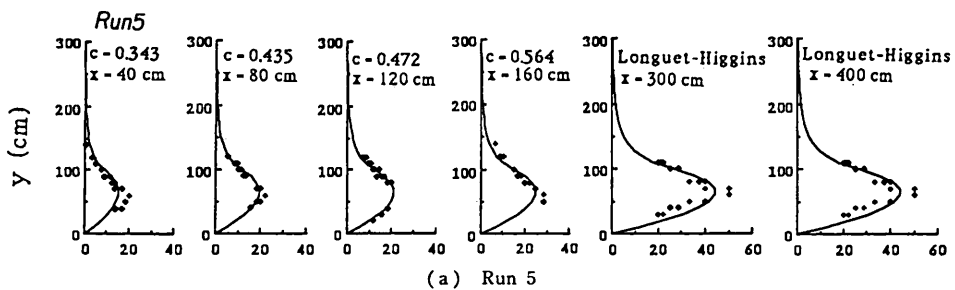
であり、 A , B_1 および B_2 は次式で定義される P のみの関数である。

$$P = N\pi \tan \beta / c_f \gamma \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 N : 水平方向の拡散係数、 β : 海浜勾配、 c_f : 摩擦係数および γ : 約 0.4 となる定数である。

式 (1) から、沖方向に積分すれば、その関数形に関係せず流速分布が相似に保たれることがわかる。

図二 および 3 は不等流沿岸流の流速分布に関する実

図—2 不等流沿岸流における流速分布の沿岸方向変化の測定例 (入射角 17°)図—3 不等流沿岸流における流速分布の沿岸方向変化の測定例 (入射角 45°)

実験結果のうち、沖波の入射角が 17° と 45° のものをまとめて示したものである。なお、等流状態のものとしては、断面における実験値を示しており、そのうち沿岸方向の距離の短いものが不等流沿岸流の区間長を表している。不等流状態の場合の各断面の係数 c は、等流の場合の沿岸流の計算値から最小自乗近似を用いて決めた倍率であり、Longuet-Higgins の理論値にこの係数を乗じた結果がそれぞれの計測断面中に実線で示してある。また、距離 x の原点は、沿岸流流速が零の位置である。この図から、まず実験で得られた等流状態の沿岸流流速の沖方向分布特性が Longuet-Higgins の理論解によるものとよく一致することがわかる。とくに、入射角と波高が小さくなると、その適合性は極めて高くなっている。また同じ入射角の場合、波高が小さいほど等流状態になるのに要する距離が増大することも認められる。その距離は磯波帯幅の 2~3 倍となっている。さらに、いずれの実験ケースにおいても、沿岸流流速が最大となる沖方向の位置は等流・不等流に関係なく一定となっていることも見いだされる。これらの結果を総合すれば、沿岸方向に一樣な海浜に一樣な波が入射する場合、沿岸流の流速分布の相似性の仮定が満足されているといえる。

(2) 代表沿岸流流速の不等流性

図-4 は横軸に沿岸方向の無次元流下距離をとり、縦軸に砕波点における無次元沿岸流流速をとったものであって、基準とした流速は等流状態の値である。これから、とくに波の入射角が大きい場合の無次元沿岸流流速の実験値はバラついているが、実験値は全体にわたって、波高や入射角にはほとんど依存せず 1 つの関係式で表すことが可能であることを示唆している。また、等流状態になるための無次元流下距離はおおよそ 1.3 であって、断面平均した沿岸流流速の沿岸方向変化をまとめた堀川・佐々木(1968)の結果とはほぼ一致している。

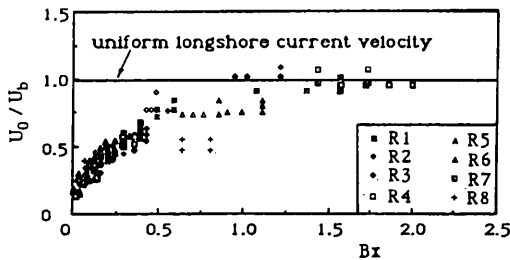
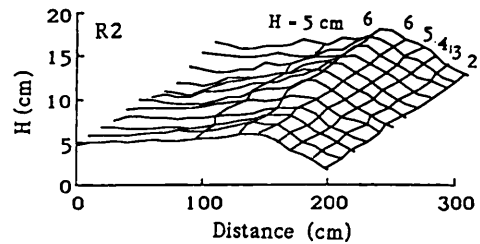


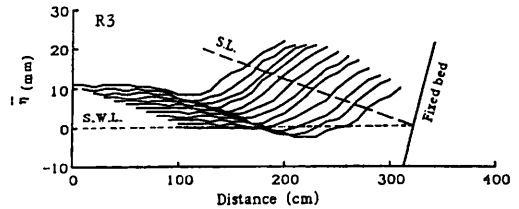
図-4 砕波点における無次元流速の沿岸方向変化

(3) Wave set-up の一様性

まず、平面的な波高分布と平均水位の計測結果の 1 例を図-5 に示す。この図において、縦軸の目盛りを横軸のそれより 7 倍以上に拡大してあることを考慮すれば、波高の沿岸方向分布はほぼ一様と見なすことができる。そこで、実験ケース Run 2 について、岸沖方向の波高分



(a) 波高の平面分布 (Run 2)



(b) 平均水位の平面分布 (Run 3)

図-5 波高と平均水位の平面分布の測定例

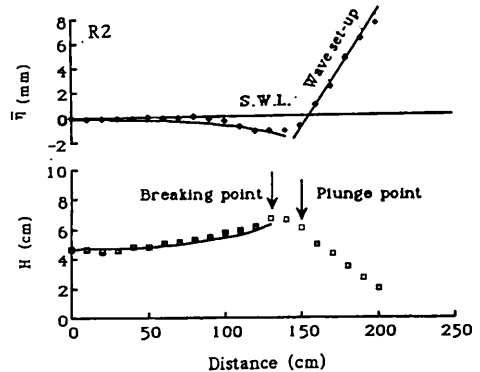


図-6 波高と平均水位の岸沖方向変化 (Run 2)

布と平均水位の変化の沿岸方向平均値を図-6 に示す。今回の実験では砕波形式はすべて巻き波砕波であった。まず、下図のように、波高は砕波点に向かって滑らかに増大しており、その値は水深の減少とともに有限振幅性の影響が出るため、図中に曲線で示した微小振幅波理論による浅水変形の計算結果より少し大きくなっているが、全般的な傾向はかなり一致している。上図には、Bowen ら(1968)による wave set-up と wave set-down の計算値を実線で示してあるが、いずれも実験結果とよく対応していることがわかる。とくに、wave set-up は汀線近傍で直線的に増加しており、その勾配から汀線における wave set-up を線形外挿で正確に評価できるといえる。したがって、これらの結果から、本実験においては沿岸方向の波の場の一様性が保証されていると考えられる。

そこで、wave set-up の沿岸方向変化を示したものが図-7 である。ただし、水深が浅くなると測定上の制約があるので、ここで wave set-up としたものは汀線から

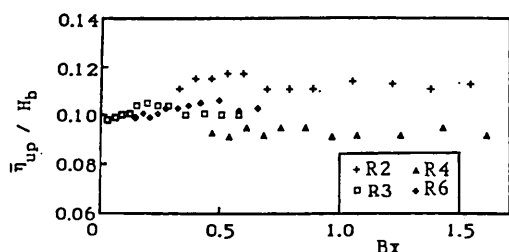


図-7 Wave set-up の沿岸方向変化

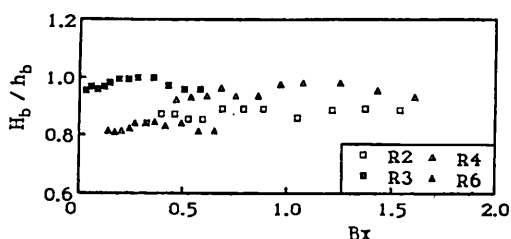


図-8 砕波波高の沿岸方向変化

20 cm 沖で測定された水位上昇量としている。もちろん、前述したことから、この値と汀線の位置における wave set-up は直線的な関係にあるので、前者について成立する関係は後者についても成立すると考えてよい。ここに、横軸の Bx は Eagleson の定義による、次式で与えられる無次元化パラメータである。

$$Bx = \frac{2}{5} \left(\frac{c'_f}{h_b \cos \beta \sin \alpha_b} \right) x \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 h_b : 砕波水深、 α_b : 砕波角である。これから、実験ケース Run 1 では無次元の wave set-up の最大値と最小値の差が約 7% となっているほかは、いずれのケースにおいてもその差は数パーセント以下になっており、wave set-up は沿岸方向に一様であるといえる。周知のように、wave set-up は理論的には砕波波高と砕波水深の比の関数で与えられているので、この比の沿岸方向変化を示したものが図-8 である。これから、無次元砕波波高は沿岸方向にはほぼ一様であることが見いだされる。したがって、この図と図-7 から、砕波水深で無次元化した wave set-up は、沿岸方向にはほぼ一様となるので、たとえば、Bakker(1971)の示した wave set-up の近

似式が成立することになる。この結果は、波の最大そ点を示す包絡線が汀線とほぼ平行となることから確認された。

以上のように、沿岸流の不等流性に関する実験結果から、沿岸流の流速分布の相似性と wave set-up の一様性が成立することが明らかにされた。

4. 結 語

ここでは、不等流沿岸流に関する系統的な実験を行い、その特性を検討した。得られた成果をまとめると、つぎのようになる。すなわち、一様海浜における不等流沿岸流の実験を行い、まず、流速分布の沿岸方向変化は沿岸方向の距離のみの関数で表されることを明らかにした。つぎに、砕波点における無次元沿岸流流速は、波高や入射角に依存せず、無次元流下距離のみの関数で表すことが可能なことを示唆した。さらに、wave set-up の沿岸方向変化を調べ、砕波水深で無次元化した wave set-up が一定になることを見いだした。これらは、不等流沿岸流のもっている基本的な特性であるといえる。

参 考 文 献

- 堀川清司・佐々木民雄 (1968): 沿岸流速に関する二, 三の考察, 第 15 回海岸工学講演会講演集, pp. 126~135.
- Bakker, W. T. (1971): The influence of longshore variation of the wave height on the littoral current, Study Report WWK 71-19, Rijkswaterstaat, 17 p.
- Bowen, A. J. et al. (1968): Wave set-down and set-up, J. Geophys. Res., Vol. 73, No. 8, pp. 2569~2577.
- Bowen, A. J. (1969): The generation of longshore currents on a plane beach, J. Marine Research, Vol. 27, pp. 206~215.
- Eagleson, P. S. (1965): Theoretical study of longshore currents on a plane beach, Hydrodynamics Lab. Report, No. 82, M.I.T.
- Gourlay, M. R. (1976): Non-uniform alongshore currents, Proc. 15th ICCE, pp. 701~719.
- James, I. D. (1974): A non-linear theory of longshore currents, Estuarine and Coastal Marine Science, Vol. 2, pp. 235~249.
- Longuet-Higgins, M. S. (1970): Longshore currents generated by obliquely incident sea waves, J. Geophys. Res., Vol. 75, No. 33, part 1, pp. 6778~6780, part 2, pp. 6790~6801.