

砂漣の発達・再形成過程における漂砂量の時空間分布特性

青 木 伸 一*・水 田 勝 也**

1. ま え が き

波による海底地形の変化は、波浪外力に対する砂面の応答現象と見なすことができる。2次元海浜断面での地形変化を考えた場合、応答の空間的なスケールには、沿岸砂州の形成や移動など波の波長程度の大きなスケールでの応答と、砂漣の発生など水粒子の移動距離程度の小さなスケールで反応する応答とに分けて考えることができよう。時間的なスケールは、これらを漂砂の輸送速度で除したものと考えれば、前者はゆっくりとした応答を、後者は短時間での応答を示すことになる。砂漣上の漂砂量を取り扱ったこれまでの研究の多くは、長時間あるいは空間的に広い範囲で平均化された漂砂量を対象とする場合が多く(例えば佐藤, 1984), これらは上述のスケールの大きな地形変化を対象とした研究といえよう。一方砂漣そのものの応答を詳細に見ると、規則波の作用の下でも3次的で不規則な砂漣を生じるなど、応答という面から見て興味深い現象を示すことがわかっていく(Lofquist, 1978; 金子, 1980)。しかし、これまでに行われた研究は成熟後の砂漣の幾何学的な形状を取り扱ったものが多く、その発達・再形成過程においてどのような漂砂移動が生じてそれらが形成されるのかについてはまだよくわかっていない(沢本ら, 1984; 金ら, 1992)。また、これらのスケールの異なる地形変動の相互作用についても明らかにされていない。

本研究は、波に対する砂漣の応答現象をより詳細に検討することを目的に行ったものである。応答現象を議論する場合、応答の定常解(成熟後の砂漣)よりは過渡応答を見る方が情報量が多いことに着目し、砂漣の発達・再形成過程における砂面の変動現象を詳細に調べて砂移動の特性を解明しようと試みている。本研究では、2次元的な砂漣が砂層端部や砂層の一部から比較的ゆっくり発達するケースに対して水理実験を行い、砂面変化の時空間分布を詳細に測定した。測定された砂漣波形から、砂漣形成過程での砂漣の波高や波長の変化を求めるとともに、漂砂の連続式から漂砂量の時空間分布を求め

てその特性を考察した。

2. 実験装置および方法

図-1に示すように、長さ20m、幅0.8mの水路内に、長さ5m、厚さ8cmの砂層(砂の中央粒径は0.4mm)を水路幅いっぱいに設置した。砂層上22cmの水深で規則波を作用させ、砂漣の発生から成熟までの発達過程における砂層表面形状の変化を細かく測定した。実験ケースは表-1に示す7ケースである。なお表中の砂層上平均波高とは、砂漣形成の初期と成熟後の2回に分けて砂層上の十数点で測定した波高の平均値である。波高の場所的・時間的変動は、周期の長い波ほど大きく、最大で1cm程度の差があった。Run No. 6は、砂層をほぼ3等分する2カ所に、深さ2cmほどの切り込みを水路横断方向にあらかじめ入れておいて実験を開始した。Run No. 7は、砂漣の再形成過程を見るために、Run No. 5の

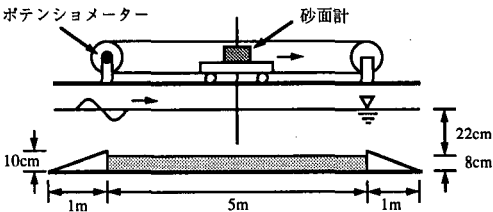


図-1 実験装置

表-1 実験ケースおよび実験条件

Run No.	波周期	砂層上平均波高	波の作用時間	砂面の初期状態
1	1.5 s	11 cm	25 分	平坦
2	1.8 s	11.5 cm	20 分	平坦
3	2.0 s	11 cm	30 分	平坦
4	2.2 s	9 cm	50 分	平坦
5	2.4 s	8 cm	50 分	平坦
6	2.4 s	Run No.5 と同じ造波信号	20 分	砂層の一部(2カ所)に深さ2cm程度の切り込み
7	1.5 s	Run No.1 と同じ造波信号	50 分	Run-5 の最終地形

* 正 会 員 工 博 豊橋技術科学大学建設工学系 助教授
** 学生会員 豊橋技術科学大学大学院建設工学専攻

実験が終わった後、Run No. 1と同じ波を作用させた。

砂面形状の測定は、光学式非接触型砂面計(正豊工学)を用いて行った。図-1に示すように、砂面計を載せた台車を回転ベルトに固定し、ベルトを動かして砂面上をスキャンする。そのとき、ベルトの回転軸に取り付けたポテンシオメーターの電圧出力をパソコンでA/D変換しながらモニターすることにより、砂面計からの出力値を自動的に等間隔で記録できる。なお今回の実験では、砂漣はほぼ2次元的に発生するので、水槽中央部の測線上のみを4.88 mm間隔でサンプリングしている。また砂漣上での流速分布は、ADV(アレック電子)を用いて計測した。

砂面形状の時間変化を細かく測定するために、波は1分間作用させた後停止し、砂面計をスキャンさせる。この操作を繰り返して砂漣波形の時空間分布を得た。Run No. 1および2については、1分おきに波を止めた場合と5分おきに波を止めた場合とでは砂漣の発達パターンにかなりの違いが見られた。ただしこの場合でも、最終的な砂漣の波高および波長にはほとんど変化がなく、またこれらのケースでは初期砂面のわずかな違いによっても発達のパターンがかなり変わるので、波停止の影響を特定することはできなかった。Run No. 3-5については、波停止の影響はほとんど見られなかった。

3. 実験結果および考察

(1) 砂漣波形の時間変化

図-2は、Run No. 1, 5および7について、砂面形状の時間変化を示したものである。図中の実線は、得られ

た砂面波形から、数値フィルターを用いて波長30 cm以上および2 cm以下(砂面計のノイズ除去のため)の変動成分を取り除いたものである。また破線は、波長30 cm以上の変動成分のみを示している。したがって、実際の砂面波形は実線と破線を重ねたものとなっている。

Run No. 1では、砂漣は砂層中央部および沖側端部から発生して広がっているのに対し、Run No. 5では、砂層沖側端部のみから発生してほぼ等速度で砂層全体に広がっている。このとき砂漣先端の進行速度は10 cm/min程度である。また、波長の長い地形変動成分はゆっくり変動し、特に砂層沖側端部で次第に大きくなっている。いずれのケースにおいても、砂漣は空間的に一様な規則的な砂漣へと成長していることがわかる。一方、Run No. 7の砂漣再形成過程での波形の変化を見ると、作用波の変化とともに砂漣の波の数が増大していくが、砂漣の大きさは空間的に大きく変動することなく遷移している。また、長波長の変動成分については、空間的な変動パターンを変えながら成長を続けている。

(2) 砂漣の波高および波長の時間変化

図-3は、図-2に示したケースについて、砂漣波高(δ)および砂漣波長(λ)の時間変化を示したものである。砂漣の一波一波は、図-2の実線で与えられる波形をもとにゼロアップクロス法で定義したが、その際波長20 cm以上、波高0.5 cm以下の波については砂漣とみなさないことにした。図中太い実線は平均値の変化を表し、各時間毎の最大値と最小値を縦バーで示している。これより、砂漣波高および砂漣波長とも、平均値としては砂漣発生後比較的に早くから一定の値を示すことがわかる。

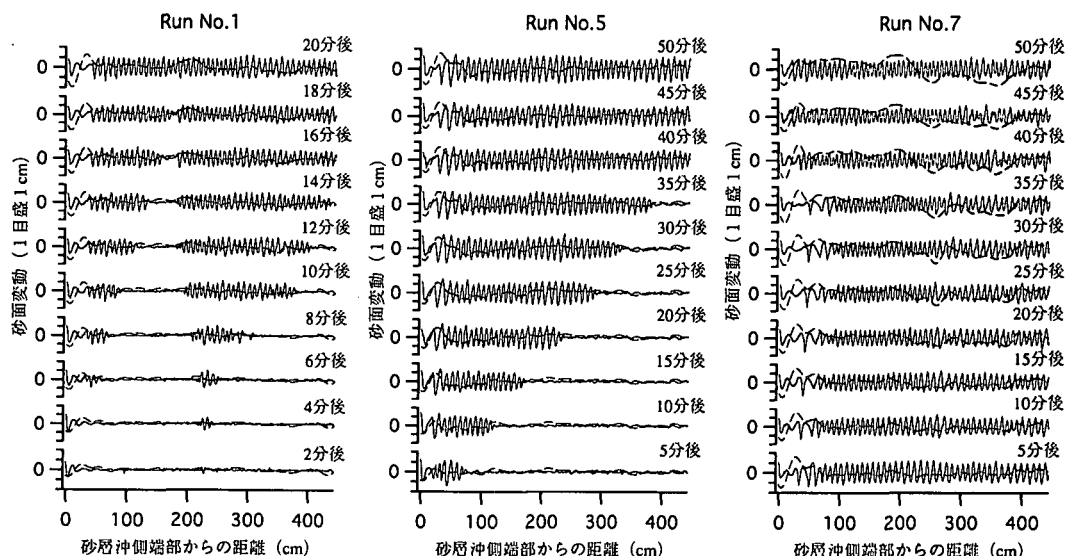
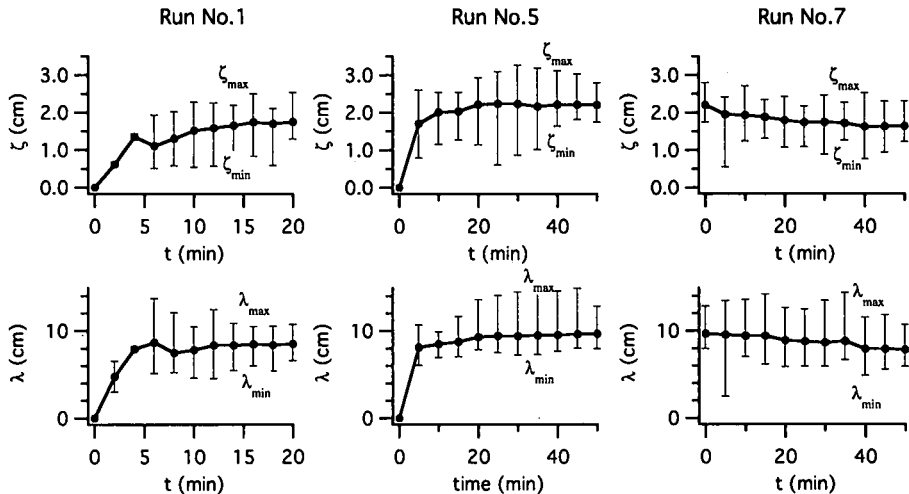


図-2 砂漣波形の時間変化

図-3 砂漣波高 (ζ) および砂漣波長 (λ) の時間変化

また、砂漣の再形成は緩やかに進行して、波浪条件に見合った値に落ち着いていることがわかる。

(3) 漂砂量の時空間分布

ここでは漂砂の連続式を用いて漂砂量を地形変動から推算し、その時空間分布特性について考察する。波の進行方向に x 座標をとると、漂砂の連続式より、漂砂量分布 $q(x, t)$ は砂面変動 $\eta(x, t)$ の時間微分を空間積分することによって求めることができる。すなわち、

$$q(x, t) = -(1-\lambda) \int_a^x \frac{\partial}{\partial t} \eta(x, t) dx + q(a, t) \cdots (1)$$

ここに λ は砂の空隙率で、ここでは 0.3 としている。また $x=a$ は砂層上の任意の点である。砂面波形について行なったのと同様に、漂砂量についても、波長の短い砂漣スケールの地形変動を引き起こす成分 $q_s(x, t)$ と、波長の長い地形変動を引き起こす成分 $q_L(x, t)$ に分けて取り扱う。 $q_s(x, t)$ については、 $x=a$ を砂漣が最も遅く生じる砂層岸側端部付近にとれば、砂漣がその位置に進行してくるまでは波長の短い変動を生じさせるような漂砂量成分はないとしてよいので、 $q_s(a, t)=0$ として取り扱うことができる。このようにして求めた $q_s(x, t)$ の砂層全体にわたっての空間平均値は、変動成分に比べて無視できる程度であった。したがって、砂漣が $x=a$ の位置まで達して (1) 式中の $q_s(a, t)$ が無視できなくなった場合でも、 $q_s(x, t)$ の空間平均値が 0 になるように $q_s(a, t)$ を決めてやることにより近似的に漂砂量の計算が可能である。なお計算に用いる砂漣波形 (図-2 の実線) は 1 分毎に測定しているので、 $\partial \eta / \partial t$ は 1 分間の差分値として与えられる。したがって、得られる漂砂量 $q_s(x, t)$ は 1 分間の平均的な漂砂量である。

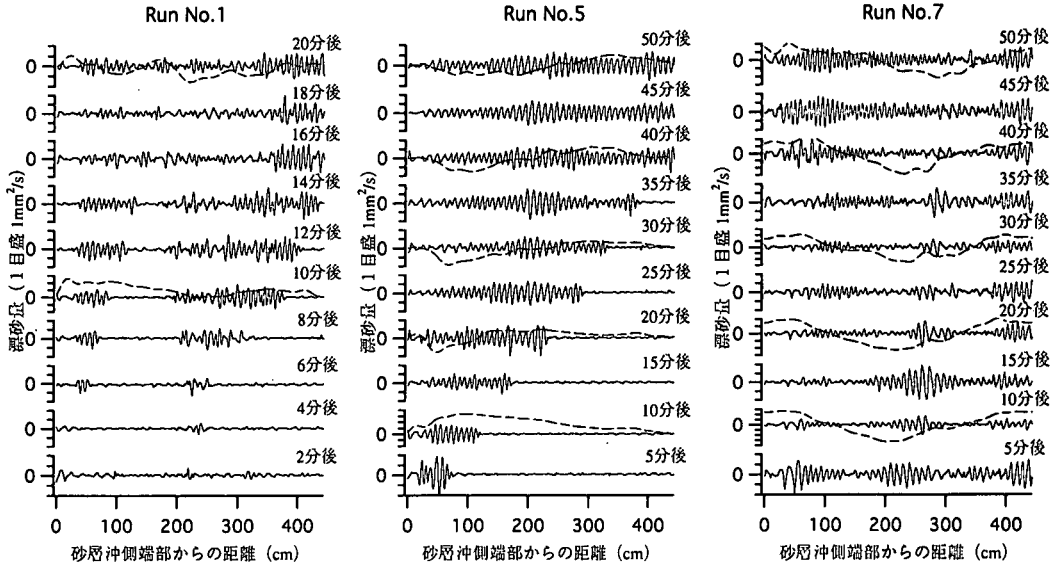
一方、波長の長い地形変動を引き起こす漂砂量 $q_L(x, t)$

については、砂層全体で緩やかな地形変動が生じているので、 $x=a$ を砂層岸側端部にとっても、厳密には $q_L(a, t)=0$ と仮定することはできない。ここでは便宜上 $q_s(x, t)$ と同様に、砂漣が到達するまでは $q_L(a, t)=0$ とし、到達後は平均値が 0 になるように求めたが、実際の漂砂量分布は、計算で求めた $q_L(x, t)$ を $q_L(a, t)$ だけ平行移動したものであるはずなので、その変動パターンのみしか議論できないことに注意しなければならない。なお $q_L(x, t)$ については、10 分毎の砂面波形の長波長成分 (図-2 の破線) を用いて計算したので、漂砂量は 10 分間の平均値として与えられている。

図-4 に上記のようにして求めた漂砂量の時空間分布を示す。なお、計算で求めた $q_s(x, t)$ を用いて逆に砂漣の発達をシミュレートしたところ、ほとんど誤差なく実測波形を再現できた。図中の Run No. 1 および 5 について図-2 と比較すると、空間的に一様な規則的な砂漣が生じている場合でも砂漣の発達段階の漂砂量 $q_s(x, t)$ は空間的に大きく変動していることがわかる。また Run No. 7 の再形成過程を示す図からは、砂漣は作用波の変化とともに局所的に大きな漂砂量を示しながら変形していく様子がうかがえる。

一方 $q_L(x, t)$ については、Run No. 5 と 7 では空間変動のパターンが大きく異なるが、同一のケースではある程度時間が経過したあとと変動パターンが固定化されるようにみえる。また $q_s(x, t)$ と $q_L(x, t)$ の関係については、漂砂量分布を見る限り特徴的な点を見出すことはできないが、Run No. 1 と 7 の $q_L(x, t)$ の違いを見ると、既存の砂漣が $q_L(x, t)$ に影響を及ぼしていることは明らかである。

図-5 は、表-1 の全ケースについて、砂漣が形成され



図一4 漂砂量の時空間分布

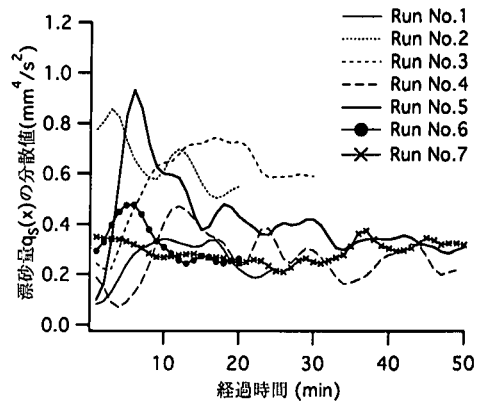
ている部分のみでの漂砂量 $q_s(x, t)$ の空間変動の分散値の時間変化を示したものである。ただし、ある程度平滑化してある。これより、漂砂量は砂漣の発達初期段階で比較的大きな値を示し、その後減少しながら落ち着いていく傾向にあることがわかる。

(4) 砂漣波形と漂砂量波形の比較

図一6は、Run No. 5 の場合について、砂漣の砂面高さと、それに対応する点での漂砂量 $q_s(x, t)$ を、個々波に分離した砂漣の一波長が0から1の間に入るように正規化して描いたものである。これより、20分後および50分後とも砂漣波形は相似形を示しているが、漂砂量の分布を見ると、まだ砂漣が発達途中にある20分後ではかなりばらつきが大きいのにに対し、50分後には砂漣波形とほぼ同位相で変化する形状を示すようになっていく。これは砂漣がほぼ一様に等速度で x の正方向に進行していることを意味しており (Nielsen, 1992), $c = q_s / (1 - \lambda) / \eta$ に砂漣頂部の平均的な諸量を代入して砂漣の波速 c を求めてみると、およそ0.7 cm/minとなり、観測結果とほぼ一致した。

(5) 砂漣上での流速分布

図一7は、砂層沖側端部から約2mの位置にある砂漣上で測定した水平流速の最大値 u_{max} の鉛直 (上段) および水平 (中段) 方向の分布を、砂漣発達初期 (約15分~30分での測定) および成熟後 (約45分~60分での測定) について比較して示したものである。鉛直分布は、砂漣のほぼ頂部に流速計のプロブがくるように流速計を毎回移動しながら測ったもので、1分間で位相平均した流速波形の最大値を示している。図中 y は砂漣頂部からの鉛



図一5 砂漣上の漂砂量の分散値の時間変化

直距離を表す。また水平分布は、砂漣頂部上0.5 cmの位置で水平方向にプロブを動かして測定したもので、これも位相平均した波形から読み取ったものである。また下段の図は、水平分布と対応させて測定の対象とした砂漣の波形を描いたものである。

発達段階と成熟後と比較すると、砂漣波形にはほとんど変化がないにもかかわらず、流速分布には大きな違いが見られる。この違いが漂砂量特性の違いをもたらしているといえよう。なお、砂漣頂部での最大流速を用いた場合のシールズ数は0.1程度である。

4. あとがき

本研究では、砂漣の発達・再形成過程における砂面変動を詳細に測定し、それから推算した漂砂量の時空間分

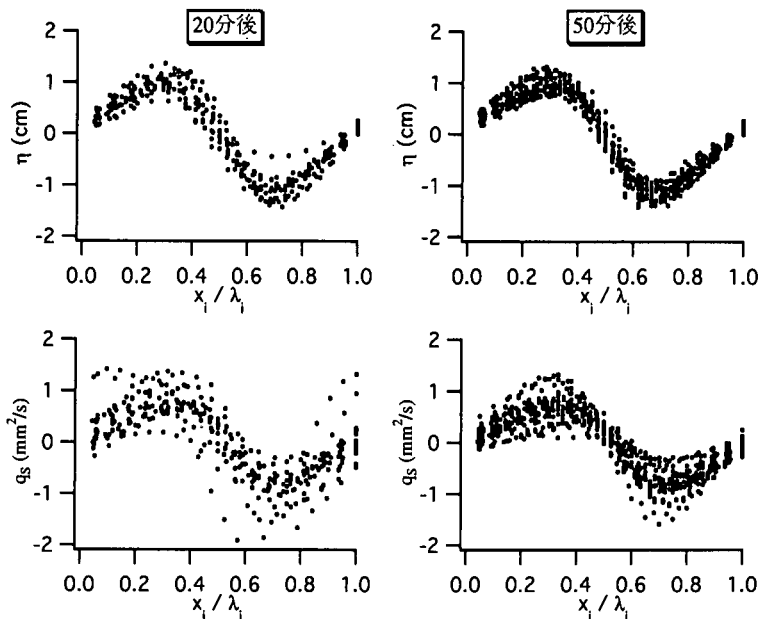


図-6 砂漣波形と漂砂量波形の比較

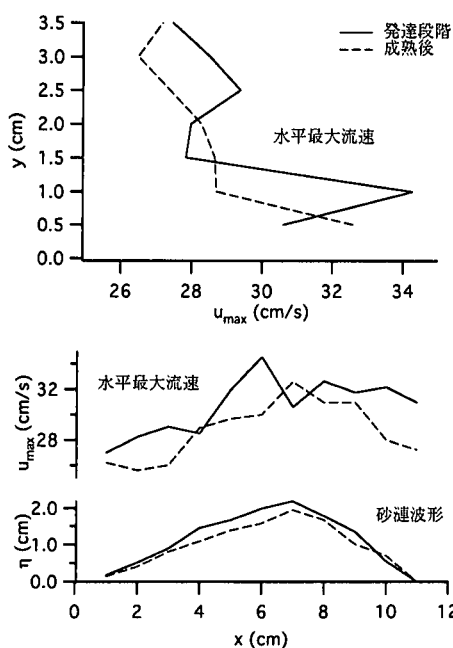


図-7 砂漣上の流速分布 (Run No. 5)

布を砂漣波形と比較することにより砂漣上の漂砂の特性について考察した。規則的な砂漣上でも漂砂量は空間的にかなり変動していること、砂漣上の漂砂量は発達の初

期に大きいこと、発達段階と成熟後では砂漣上での漂砂量のばらつきや流速分布に差異があることなどが明らかになった。ただし今回の実験は、砂層端部あるいは砂層上の一部の変形がトリガーとなって砂漣が2次元的にゆっくりと発達するケースに対する場合に限られたものであり、さらに実験ケースを増やす必要がある。

なお本研究を行うにあたり、大阪大学出口一郎助教授より貴重なアドバイスをいただいた。記して謝意を表する。

参考文献

- 佐藤慎司・堀川清司 (1984): 非対称振動流下における砂漣上の砂移動に関する実験的研究, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 286-290.
- 金子 新 (1980): 振動流中で形成されるサンドリップルの波長, 第27回海岸工学講演会論文集, pp. 207-210.
- 金 圭漢・榎木 亨・出口一郎 (1992): 波によって形成される砂漣の履歴効果と浮遊砂濃度分布について, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 271-275.
- 沢本正樹・山下俊彦・秋山義信 (1984): 流れおよび砂移動の物理機構を考慮した波による砂漣の安定解析, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 376-380.
- Lofquist K. E. B. (1978): Sand ripple growth in an oscillatory flow water tunnel, CERC tech. paper 78-5, 101 p.
- Nielsen, P. (1992): Coastal Bottom Boundary Layers and Sediment Transport, World Scientific, p. 133.