

十字型培養礁の洗掘機構に関する研究

水産工学研究所 漁場水理研究室 久保 敏

藤原正幸

1. 緒言

砂浜海岸は貝類の主とした生息場である。またヒラメなどの稚魚が発育段階の一時期を過ごす場所でもあり、水産生物の一部にとり重要な生活環境となっている。そして近年砕波帯内外での漁場開発の試みがなされつつある。

例えば、鳥取県気高沖では砂浜浅海域の水深15m程度の所に十字型培養礁を設置し、波、流れによる局所洗掘で生じる起伏を利用し、ヒラメ稚仔魚の育成および成魚の保護がなされている。さらに山形県では砕波帯を含む30m以浅での漁場形成を目指す試みが行われている。

こうした砂浜海岸は波、流れなどが急激に変化し、砂の移動および地盤変動の激しい場所であり、砂浜浅海域特有の様々な現象が存在する。砂浜海域に設置された十字礁は、埋没がもとで、機能の低下を生ずることがある。

昭和61~63年度に、十字礁の局所洗掘機構の研究を行ってきたが、事業実施に際して、もうすこし広域的な漂砂および埋没現象の把握が必要となった。そこで、十字礁の設置計画の基礎的資料に資するため、十字礁局所洗掘の問題に加え、海底変形および砂の移動現象を解明するため、水槽実験を行った。ここ数年の水槽実験により得られた結果をまとめ報告する。

2. 実験概要

実験概要を図1に示す。用いた水槽は長さ26m、幅60cm、高さ80cmで観測部分は長さ5mにわたり側面がガラス張りになっている。この水槽の一端に平行移動型の造波機があり、他端には比重2.65、粒径0.2mmの比較的粒径のそろった珪砂を概ね1/10の勾配で敷いた。これは一般的には実海域よりは急勾配であるが、水槽実験では採用されるケースも多い。水路水深は54cmとした。

波当て時間が経過するにつれ、砂面は侵食を受ける部分と堆積する部分を生じ、徐々に変形して行く。この砂面変形の過程と水理条件を一定時間ごとに計測した。実験条件は表1に示す様に4種類設定した。

3. 結果および考察

3. 1 堆積面積の経時変化

1/10の初期勾配の砂面に波を当てると砂は移動を初め場所により侵食、堆積を生じ、時間経過とともに変形してゆく。今回は堆積のほうに注目し、この量が時間とともに増加する過程を追った。堆積量を表す方法については、水槽の単位幅あたりの砂の体積とし、堆積面積と呼ぶ。これは水槽の観測窓から観察される砂面変化を考えれば理解しやすいと思われる。

概ね1000時間に及ぶ波当ての結果、堆積面積(S)は図2のように増加していった。今回の実験条件では1000時間の波当てにより砂面は徐々に安定化の様子を見せ始めるが、いずれも依然として増加傾向にある。従来、砂面は $10^4 \sim 10^5$ 個の波の数を当てると安定化に向かうとされているが、今回、特に実験条件K3に見られるように、安定化したとはいえない様子がうかがえた。

3. 2 沖波条件と砂面変形の関係

砂面を1/10にならした後、概ね100時間の波を当て、その間の砂面変化と沖合の波条件との関連を見た。

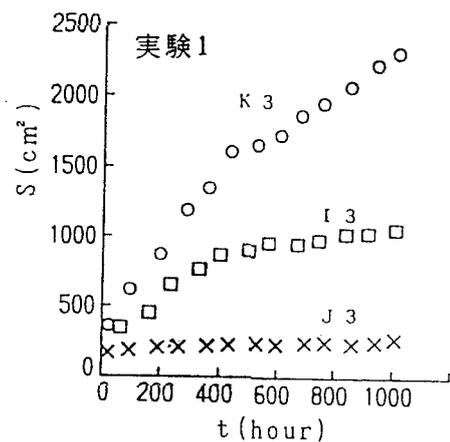


図 2 堆積量の時間変化

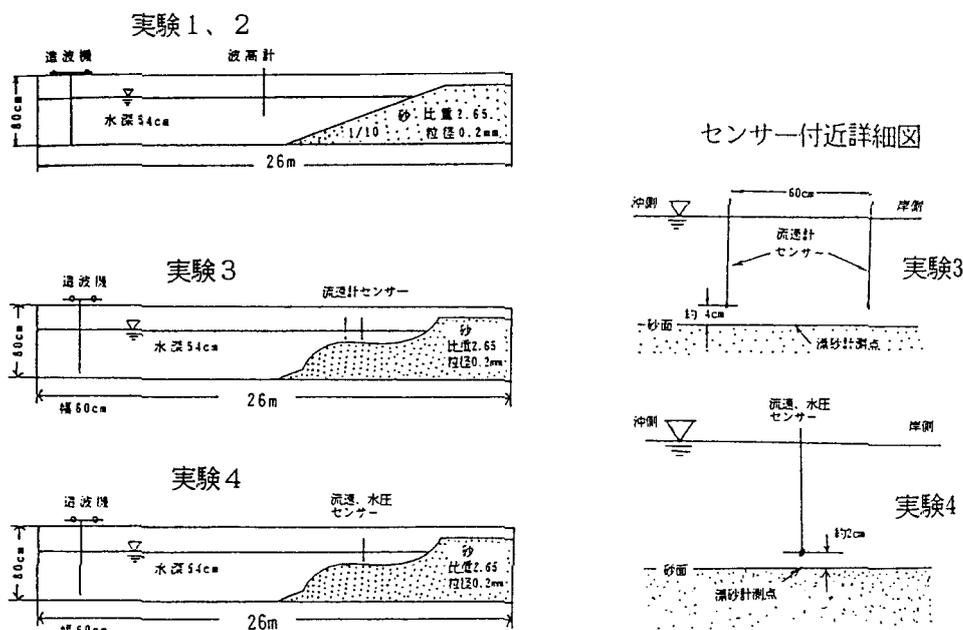


図 1 二次元水槽実験概略図

表 1 実験条件

実験 1

実験条件	周期 T(sec)	波高 H ₀ (cm)	計測時間 (hr:min)
I3	1.0	3.5	1006:14
J3	1.2	2.8	1005:37
K3	1.4	4.8	1008:15

実験 2

実験条件	周期 T(sec)	波高 H ₀ (cm)	計測時間 (hr:min)
D2	1.0	7.5	100:00
D3		6.4	100:00
D4		3.3	100:00
G1	1.2	5.5	98:15
G2		8.7	98:15
G3		7.6	100:00
H1	1.4	7.1	98:35
H2		4.6	100:00
H3		5.9	100:10

実験 3

実験条件	周期 T(sec)	造波機ストローク (cm)	予想波高 H ₀ (cm)	計測時間 (hr:min)
L1	1.03	1.5	4.8	76:35
L2	1.02	2.0	7.3	32:08
L3	0.97	2.5	9.7	32:07
L4	1.00	3.0	10.8	30:51
M1	1.21	2.0	5.4	78:44
M2	1.22	2.5	6.4	30:35
M3	1.18	3.0	8.8	31:06
N1	1.35	3.0	6.6	31:31
N2	1.33	2.5	6.4	31:38
N3	1.47	2.0	4.9	54:43
N4	1.31	2.25	6.0	31:58
O1	1.62	2.0	4.0	54:45

実験 4

実験条件	周期 T(sec)	造波機ストローク (cm)	予想波高 H ₀ (cm)	計測時間 (hr:min)
P1	1.02	1.5	3.9	54:23
P2	1.03	2.0	4.2	29:28
P3	0.98	2.5	5.3	30:06
P3D	1.02	2.5	6.4	30:19
P4	1.00	3.0	6.5	33:13
P4D	1.03	3.0	7.0	28:43
P5	1.02	1.5	4.5	30:04
Q1	1.20	2.0	5.3	30:25
Q1D	1.21	2.0	4.1	29:57
Q2	1.15	2.5	5.2	24:02
Q3	1.24	3.0	6.0	30:03
Q4	1.18	1.5	4.5	30:06
R1	1.36	3.0	6.1	28:38
R1D	1.36	3.0	5.2	30:05
R2	1.33	2.5	5.7	46:03
R2D	1.36	2.5	4.5	27:42
R3	1.38	2.0	4.2	53:31
R4	1.35	1.5	2.8	64:25
S1	1.50	2.0	2.5	77:26
S2	1.67	2.5	3.0	77:02
S3	1.68	1.5	1.3	46:29

砂面形状が時間の経過とともに変化する過程を一つの図に重ねて描いた例を図3に示す。この図に示されているように初期勾配1/10の砂面は時間の経過とともに侵食、堆積が進行し岸方向に相当する図の右側が侵食（一部計測範囲を超えている）され、それが沖方向に相当する図の左側に堆積している。100時間間の堆積面積の増加の様子を図4に示す。この図にも示されているように、砂面変形は波当て当初大きく、その後100時間程度はほぼ一定の変化をするを見なせる。この100時間間の堆積面積Sの増加率をQ (cm²/sec) とし、 $S = Qt + b$ と表すと、沖波条件との間に次のような関係が見られた（図5）。

$$Q \cdot T / L_0^2 \times 10^8 = -13.5 + 873 H_0 / L_0 \dots\dots\dots (1)$$

T:周期、H₀: 沖波波高、L₀: 沖波波長

この場合のQは、初期の砂面形状を基準にし、そこから堆積した部分の面積の増加率である。また、長期的にみた場合、波当て時間の経過とともに砂面は安定化してゆき、Qの値は漸次小さくなってゆくと考えられるので、上式は100時間程度の間で成り立つものである。

砂面上の各位置での漂砂量を計算し、それを砂面変形と対応づけた一例を図6に示す。上の図は100時間間の砂面変形を一つの図に重ねて描いたものである。上にも示したよ

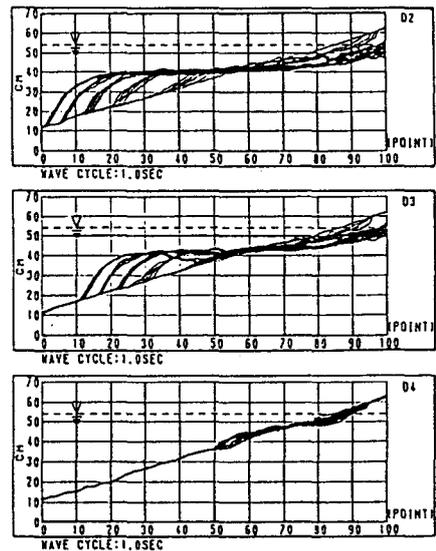


図 3 砂面変化の重ね合わせ図

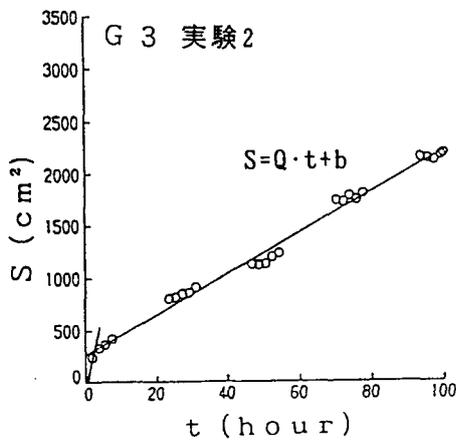


図 4 堆積量の時間変化

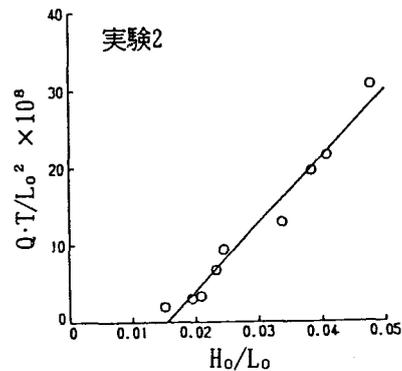


図 5 $Q \cdot T / L_0^2 \sim H_0 / L_0$ の関係

うに、100 時間程度の間では漂砂量 q は時間的に変化しないと見なせ、下の図はこの砂面変形を基に算出した漂砂量 q を示している。この図に示すように漂砂量は比較的地盤変動の小さいポイント番号60付近が最大で、この点から岸側、沖側に離れる程、少なくなっている。

参考までに示すと、この漂砂量の分布形状は1000時間程度の時間の経過とともに図7 に示す様に次第に扁平な形に移行してゆき、全体的に漂砂量は少なくなっていた。

岸側が侵食され、それが沖側に運ばれ堆積する、いわゆる侵食型の断面変形をする場合、上記の比較的地盤変動の小さい点はいずれの実験ケースにも見られた。この点での水深(h_0)は次式の関係がよく成り立っている(図8)。

$$h_0/L_0 = 0.00449 + 1.43H_0/L_0 \dots (2)$$

この傾向は侵食型の砂移動をする場合に言える事柄であり、波条件によっては漂砂量が最大になる点だけでなく、最小値を持つ場合があることがいわれている。

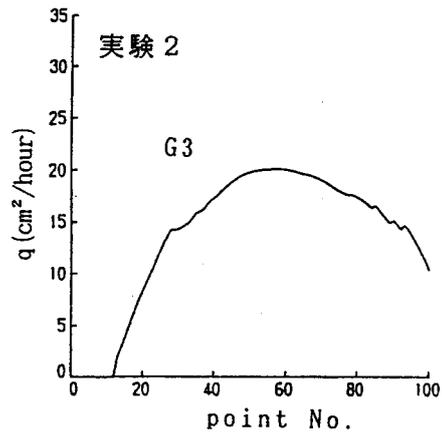
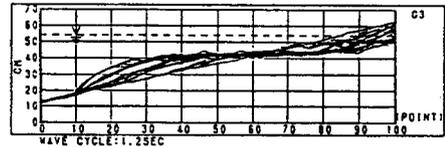


図 6 砂面変化と各ポイントでの漂砂量

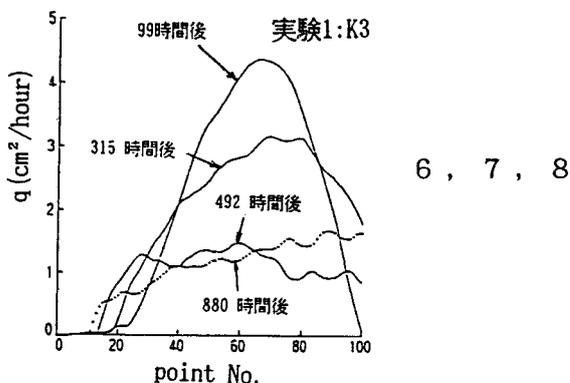


図 7 各ポイントでの漂砂量の時間変化

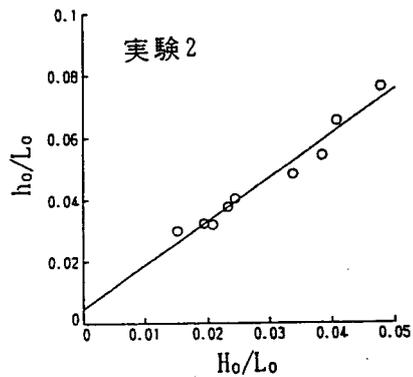
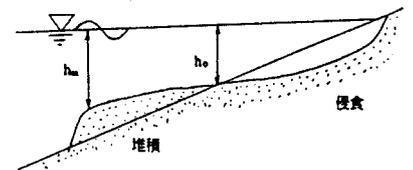


図 8 $h_0/L_0 \sim H_0/L_0$ の関係

連続の関係から次式が成り立つ。

$$\frac{\partial z}{\partial t} = \frac{\partial q}{\partial x} \dots\dots\dots (3)$$

ここで z:地盤高さ (cm)、t:時間 (sec)、
x:水平距離 (cm)

この式から、地盤変動の速さは漂砂量の多少によるのではなく、漂砂量の場所的な勾配によることが分かる。このため、地盤変動の 0 のところで漂砂量は極大・極小値を示す。今回の結果に示されるように、漂砂量が極大になる点があるのは、その点での水理条件が要件を満たしているためであるが、この水理条件についてはいまだ十分明らかではない。そして時間の経過とともに砂面変動が安定化に向かうことを考えれば、砂面上の水理条件も 1000 時間程度のオーダーで変化していると思われる。

上記の地盤変動の小さい点を中心として、岸側は侵食傾向を、また沖側は堆積傾向を示したが、地盤の時間変化の様子をいくつかのポイントを選び図 9 に示す。縦軸の正が堆積

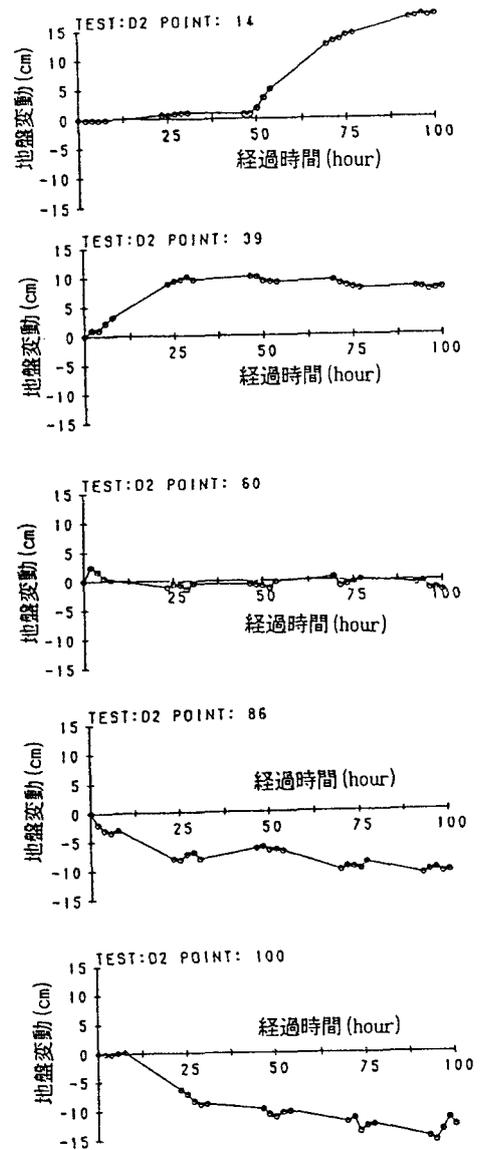


図 9 いくつかの点での砂面高さの経時変化

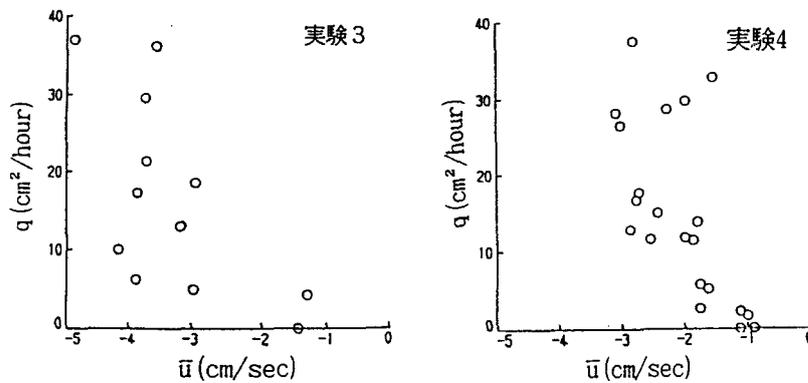


図 10 q ~ u-bar の関係

量、負が侵食量を示す。堆積、侵食の時間変化は波当て当初に大きく、その後は一定に落ち着く傾向が見られる。岸側、沖側に更にはなれると、当初は地盤の上下変動はなく、一定の時間が経過した後、侵食、堆積が始まっている。こうした変化の特長から次の事柄が指摘できると思われる。

(1) 汀線近くで侵食された砂は沖に運ばれるが、ある程度侵食されると、その点の侵食は止まり、更に陸側が侵食され汀線が後退してゆく。

(2) 侵食された砂は少し沖に運ばれ堆積する。時間の経過につれて、その点での堆積は終わり、その後堆積場所は沖へ移動する。

(3) これが繰り返され、汀線の後退と、沖側への堆積が続き、砂の移動距離は段々長くなる傾向を持つ。

この傾向は侵食型の砂面変形をする場合、概ね成り立つと考えられるが、その他の砂面変形をする場合においても、局部的には砂面変動の小さい点は存在し、その点の周囲ではこうした砂の動きが指摘できると考えられる。

3. 3 水理条件と漂砂量

3. 3. 1 底面付近での平均流速と漂砂量

一般に底面付近では波による往復流の他に、平均流が存在するが、これも漂砂量に影響を与えていることがいわれている。各実験条件で得られた平均流速 \bar{u} と漂砂量 q との関係を図10に示す。平均流は負の値を示し、沖向きの流れを生じている。これによると、平均流速と漂砂量の間には、明確な関係は得られなかった。

表2 漂砂量式と相関係数

式	相関係数
$q/\sqrt{gd^3} = -0.0727 + 0.0166 \cdot u_m c^2 / (sg^2 dT)$	0.96
$\ln q / \sqrt{gd^3} = -3.97 + 3.38 \cdot \ln p_m u_m / (\rho_s g^2 dT)$	0.98
$q = -49.4 + 2.95 \cdot u_m$	0.65
$qT/d^2 = -14.9 + 1.79 \cdot u_m^2 / (sdg)$	0.70

s:砂の水中比重、 ρ_s :砂の水中密度 (g/cm^3)、g:重力加速度 (cm/sec^2)
、d:砂の粒径 (cm)、 u_m :流速振幅 (cm/sec)、 p_m :圧力振幅 ($dyne/cm^2$)

3. 3. 2 漂砂量式と相関係数

漂砂量を波の水理量で表す式をいくつか提案し、表2に示す。またこの中で代表的なものをいくつか選び図11に示す。

これらの実験で得られた砂面変形は、岸側が侵食されるケースと堆積するケースのいずれをも含むが、碎波帯より沖側での漂砂量は1ケース（実験4: $q = -0.001 \text{ cm}^2/\text{hour}$ ）を除きすべて沖向きであった。岸向きの漂砂を生じると、今回の場合 q の値は負を示すことになり、正負を含む漂砂量を対数近似することは出来ない。このため漂砂量を対数近似することに対しては問題があることになるが、今回このことは特に考えず、上記の負の値を持つケースは近似式を作成する段階では外している。

今回の実験では同じ砂を用いているため、砂の粒径、密度が変化した場合の影響については不明である。また、岸向き、すなわち負の漂砂量を示すケース

がなかったといってよく、岸向き、沖向きの漂砂を生じる水理条件について明確な判断は下せない。しかし、ここに示した図のうち、いくつかは回帰直線を延長すれば、負の値を示すと期待できるものがあつた。

砂浜は大波浪時に侵食され

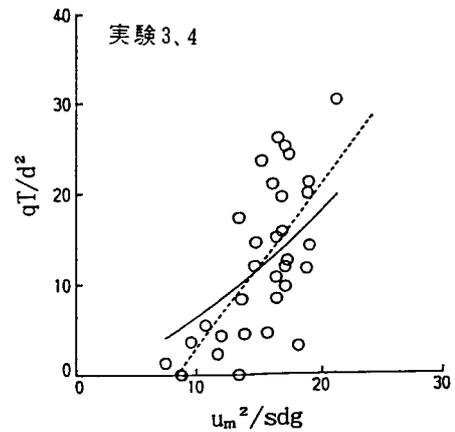
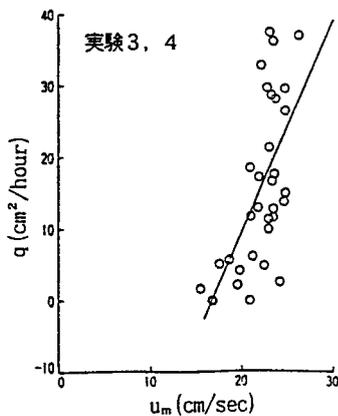
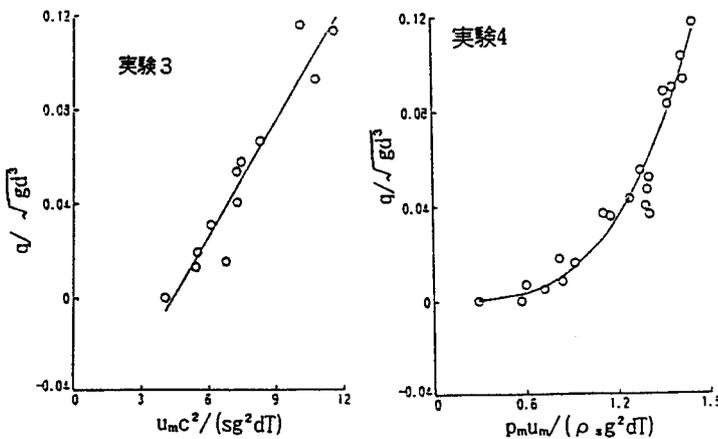


図11 $q/\sqrt{gd^3} \sim \rho_m u_m/(\rho_s g^2 dT)$, $u_m c^2/(sg^2 dT)$ および $q \sim u_m$ の関係

図12 Hallermeier の算定式との比較

、波が穏やかになると再び砂浜に砂の堆積が始まり、形状を回復すると指摘されている。すなわち、岸向きに砂が移動するのは穏やかな波の時である。しかし、波が止まれば砂は動かなくなることから、漂砂量は回帰直線の延長線上でいったん負になり、その後原点に近付くと思われる。

3. 3. 3 他の漂砂量算定式との比較

Hallermeier(1982)の漂砂量算定式は¹⁾、 $qT/d^2 \sim u_m^2 / (sdg)$ (s :砂の水中比重、 d :砂の粒径、 g :重力加速度)の無次元の関係で整理している。今回の実験結果と比較したものを図12に示す。図中の丸印は今回得られた結果であり、その回帰直線は破線で示している(表2)。Hallermeierの式で計算される値は実線で示した。両者は一部重なる部分を持つが、今回の計測範囲に関するかぎりでは、横軸の値に対する変化率はHallermeierの式によるほうが小さい。

3. 4 データのばらつき

上の結果は、実験目的により波当て時間は異なるにせよ、約30時間以上にわたる計測データの平均値を用いて整理したものであるが、実験中これらの値は必ずしも一定してはいない。この様子を流速および圧力について図13に示す。変動には細

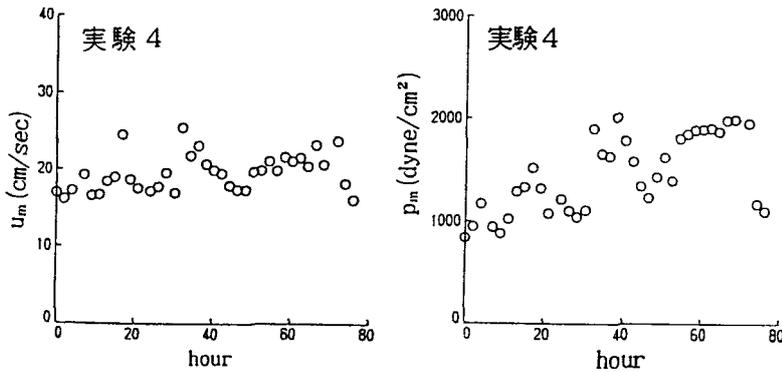


図13 流速および圧力振幅 u_m, p_m の時間変化

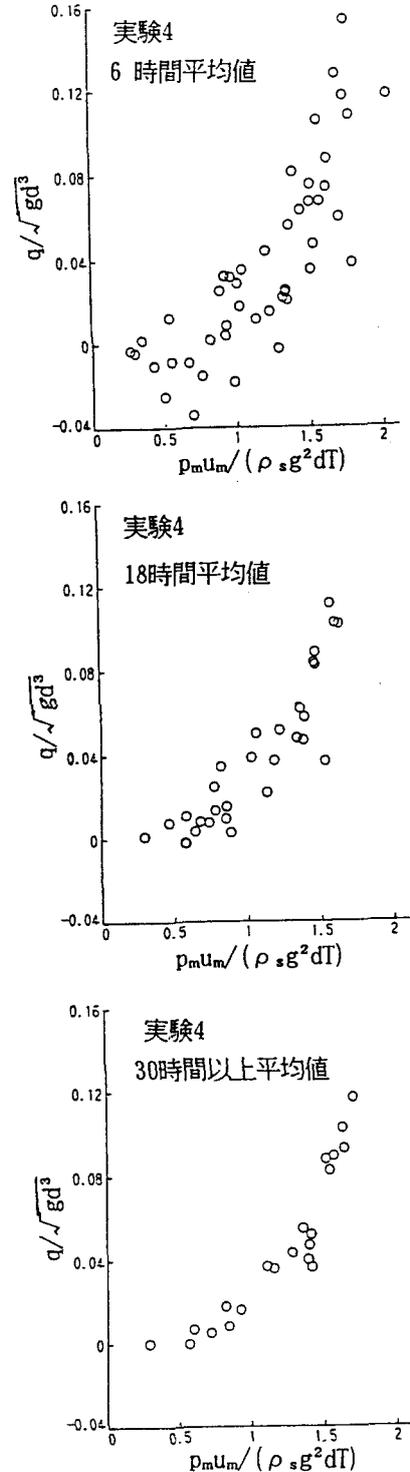


図14 平均時間の違いによるバラツキの変化

かいランダムなもの、砂面変形に伴うと思われる10時間程度のオーダーで変化するものが含まれている。

次に計測値の平均時間の多少による漂砂量のばらつきの変化の様子を、今回相関係数の高い関係が得られた $q/\sqrt{gd^3} \sim p_{um}/(\rho_s g^2 d T)$ を例に取り図14に示す。ここでは約6時間、約18時間、約30時間以上の3通りの平均を行った結果を示しており、平均時間を長くとる程、ばらつきは明らかに小さくなる。

4. 結言

十字礁を設置計画する際、洗掘の問題だけでなく、埋没の問題が重要になってくる。洗掘・埋没の問題は、水中における砂の動きの問題につきる。このためには広域的な砂の動きの解明が必要である。そこで十字礁の造成計画の基礎的資料とするため、砂床変形の実験を行ってきた。ここ数年にわたり行った砂床変形の実験をまとめると、次のように要約できる。

1) 砂床に波を当てると砂は移動を始め、単位時間あたりの砂の移動量は波当て当初特に大きく、その後数百時間はほぼ一様であった。1000時間程度経過すると比較的安定化の様子を示し始めるが、いまだ変形は進行する。

2) 侵食型の砂面変形をする場合、漂砂量が最大になる点が認められ、この点の水深は沖波の規模で整理出来た。

3) 非碎波帯での漂砂量をその点での水理条件で整理した結果、 $q/\sqrt{gd^3} \sim p_{um}/(\rho_s g^2 d T)$ の関係が特に高い相関係数を示し、曲線的関係にあった。

今回の実験から直接、十字礁の洗掘を論議することは難しいが、設置場所についてある程度の定性的予測は可能となった。今後は十字礁の局所洗掘機構を解明するため十字礁周辺の流れ、漂砂現象の解明を行う必要がある。

参考文献

1) Hallermeier, R. J.: Continental Shelf Research, 1(2), 159-190, 1982

対外発表

1) 平成3年度水産工学研究所技報

久保敏・片岡慶・藤原正幸：波による砂床断面変形に関する実験結果

2) 平成4年度水産工学研究所技報

久保敏：波による岸沖漂砂に関する一試案

3) 平成2年度日本水産学会秋期大会講演要旨集

久保敏・藤原正幸・片岡慶：波による砂床断面変形に関する実験結果

4) 平成3年度日本水産学会秋期大会講演要旨集

久保敏：砂浜海岸での漂砂移動に関する水槽実験結果