

サンドウェーブの変形と底質の浮遊機構

島田 米夫*・林田 輝久**・吉高 益男***

1. はじめに

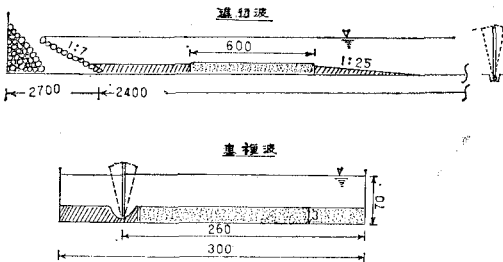
底質の浮遊砂濃度に関する研究は、理論的、実験的に数多くの報告があり、また、現地実測も、いろいろとその結果が報告されている。しかし、浮遊底質の移動速度と、水粒子速度との遅れ効果や、底面に発達するサンドウェーブの浮遊砂濃度に対する影響など、濃度の時間的変動に関しては、まだ不明の点も多い。

今回、著者らは、進行波および重複波の波動中におけるサンドウェーブの時間的変形過程について考察するとともに、波動、水粒子速度、および浮遊砂濃度の時間的相関について実験的検討を行なったので報告する。なおこれらの関係が底質材料のちがいによってどのようなかわりをもつかをみるため、底質材料として砂と石炭粉の2種類を用いた。

また、今回は、宮崎県の川南漁港付近での浮遊砂濃度も測定したので報告する。

2. 実験装置および実験方法

実験水槽を、図—1 に示す。進行波の実験では、コン



図—1 実験水槽

クリート製水槽（観測区間は片面タキロン張り）に、底質として、砂（比重 2.78, 中央粒径 0.024 cm）または、石炭粉（比重 1.42, 中央粒径 0.055 cm）を水平床に一樣に敷きつめた。水槽端には消波用栗石を積み、天端からの越波とあわせて反射波の軽減をはかった。

実験の一部では、この栗石を直立壁に替えて反射率の変化による底質への影響をみたものもある。

重複波の実験は、図—1 のような鋼製（片面タキロン張り）の水槽に、進行波で用いたと同じ石炭粉を用いた。

底面の時間的地形変化は、数分間隔で写真に記録し、最終地形は直接測定した。また、底質の1周期内の挙動をとらえるため、カメラによる連続撮影も行なった。

浮遊砂濃度の測定は、光学式濃度計（正豊工業製）と手製のフォトトランジスターを使った濃度計を用いた。

濃度測定と同時に、同じ地点の水粒子速度、およびその直上の波動をデーターコーダーに同時記録した。水粒子速度の測定には、試作したサーミスター流速計を、波動の測定には、容量式波高計（計測技研製）を用いた。

試作した濃度計および流速計については、それぞれの検定槽で慎重な検定を行なった。

表—1 は、実験に用いた波の特性である。

表—1 実験波の特性

実験 No.	波 高 H (cm)	周 期 T (s)	水 深 h (cm)	波 長 L (cm)	d_0 $H/\sinh \frac{2\pi h}{L}$	R_e $u_0 \delta / \nu$	
1	9.27	1.10	25	140	6.75	85.3	進行波 (砂)
2	9.45	1.09	25	150	7.57	97.2	
3	12.26	1.04	30	140	6.84	89.6	
4	10.01	1.12	30	170	7.40	93.5	
5	11.94	0.95	30	140	6.70	91.6	
6	10.25	1.10	30	160	7.00	89.7	
7	8.43	1.35	30	223	8.90	103.3	
8	6.87	1.54	20	224	11.60	127.0	
9	6.48	1.26	20	175	8.30	100.1	
10	6.79	1.48	30	253	8.30	90.2	進行波 (石炭粉)
11	10.61	1.10	30	172	8.00	100.4	
12	7.86	1.31	30	215	7.90	92.7	
13	8.10	1.43	30	233	9.00	100.8	
14	7.46	1.34	25	220	9.60	108.6	
15	6.70	1.63	30	260	8.48	76.6	
16	10.30	1.38	20	173	13.02	127.8	
17	4.20	1.05	20	130	3.70	42.4	
18	4.50	1.93	20	260	8.96	52.4	
19	12.20	1.18	30	173	9.28	97.5	重複波 (石炭粉)
20	6.00	0.97	30	130	2.98	35.1	

* 正会員 宮崎大学助教授 工学部土木工学科

** 正会員 玉野測量設計株式会社

*** 正会員 宮崎大学助教授 工学部土木工学科

なお、前記した浮遊砂の現地採取は、昭和52年8月および、53年2月に竹竿式補砂器によって行った。

3. サンドウェーブの時間的変形

サンドウェーブの時間的変形過程を写真記録から一定時間ごとに読み取り、スペクトル計算を行なった結果の一例を示したのが、図-2、図-3である。

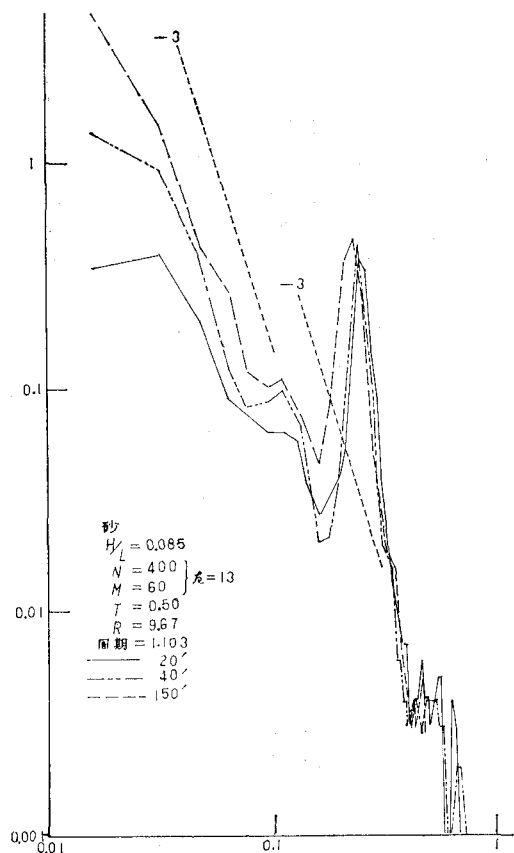


図-2 砂漣のスペクトル (進行波)

横軸は、波数 $k=2\pi/L$ (cm^{-1}), で縦軸はスペクトル (cm^3) である。

日野ら¹⁾による砂漣の平衡領域での波数スペクトルに関する次元解析,あるいは、田中ら²⁾の現地実測の報告によると、いずれも一定の波数域内で「-3乗則」が成立している。図-2の砂の場合、最も卓越したピーク値の波数(主卓越波数)を境にして、やはり「-3乗則」が成立しており、時間が経過してもあまり変らない。

一方、図-3の石炭粉の場合は、完全重複波であり、節の部分での砂堆の成長がいちじるしい。このため砂堆のパワーに埋もれて目立ったピークは見られないが、時間の経過とともに全体として「-3乗則」に近づく傾向がみられる。観察によると砂の場合、渦の発達は顕著であるのに砂粒の動きはごく表面に限られている。一方石

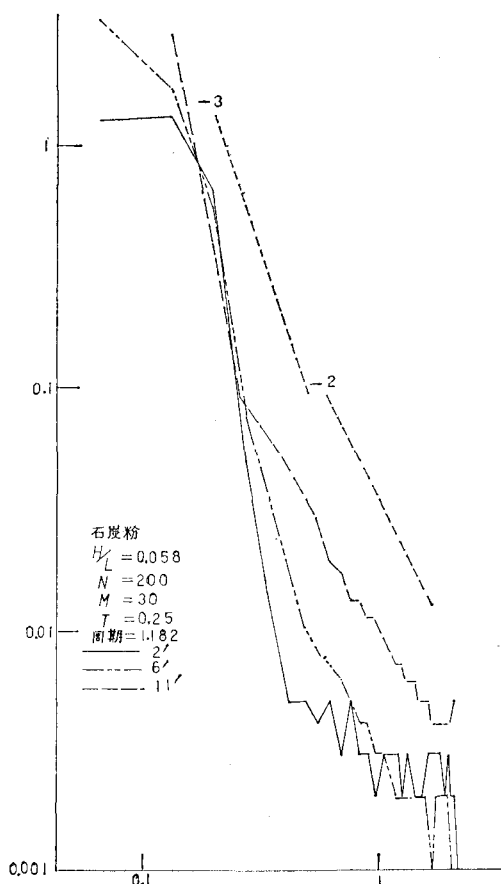


図-3 砂漣のスペクトル (重複波)

炭粉の場合は、砂漣全体が水粒子の動きに追従した動きをする。波をかけてまず節の部分に形成された砂漣は、砂堆の発達と並行しながら底面全体に成長する。このとき、相対的には、高波数域のパワーのレベルがアップして、最終的には、一定の波に対しての平衡状態に達する。

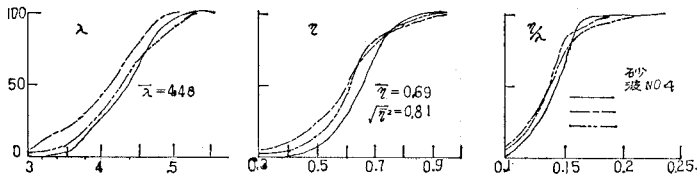
また、一定の波の作用後、時間が経過しても殆んど変化しない主卓越波数に近い波数が存在する。進行波で石炭粉の場合は、資料が十分でなく、傾向がつかめなかった。

重複波による石炭粉の場合は、進行波の砂の場合といちじるしい違いがあり、進行波にみられた主卓越波数がなく、その他のピーク値も殆んどみられなかった。

各実験とも、3~4時間でサンドウェーブの変形がほとんどない平衡状態に達した。このときの砂漣の分布状態を累積度数曲線に整理した一例が図-4であり、そのスペクトルが図-5である。

図のように、低波数域ではやはり「-3乗則」に近いパワーの逓減がみられる。しかし高波数域では、これよりややはずれてくる傾向にある。

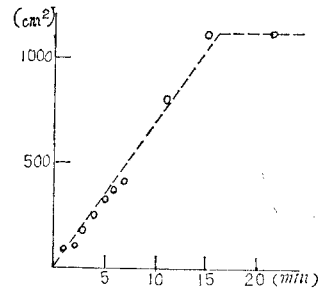
以上から、砂の場合は日野ら、田中らの結果と大きな違いはないが、石炭粉の場合は-3乗則は成立しない。



図—4 平衡した砂漣の累積度数曲線

波をかけ始めるとすぐ節を中心短い波長の砂漣が発生するが、時間が経つにつれ波長は長くなり、高さも増してゆく。この図から、波をかける前の地形を基準に、これより高い部分に堆積された石炭粉の断面積を求めてプロットすると、

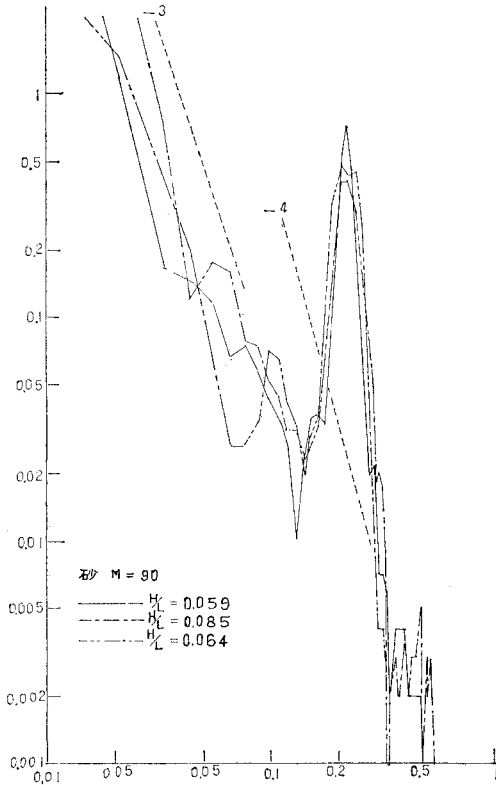
図—7 のようになり、節の部分に堆積される量は、ほぼ直線的に発達限界まで増加している。



図—7 砂堆の断面変化

このことは、重複波での質量輸送が時間的な地形変化の影響をうけることなくほぼ一定しているものと言える。

図—8 は、砂漣の波長と計算で求めた水粒子の移動全

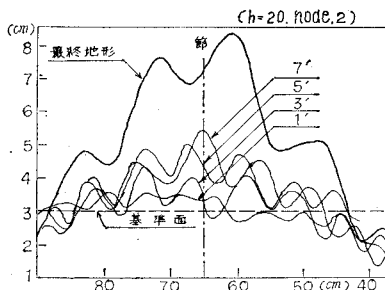


図—5 平衡した砂漣のスペクトル

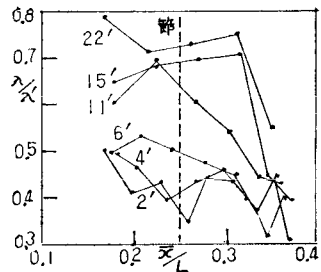
底質の特性によって—3乗則の成立範囲があるように思われる。

4. 砂堆の発達

重複波水槽で行なった実験の連続写真から、石炭粉の時間的変動を図化した一例が 図—6 である。



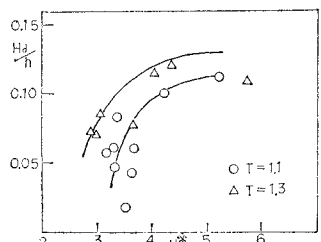
図—6 砂堆の発達



図—8 砂漣の波長と水粒子速度

振幅の比を場所ごとに求めたもので、時間の経過とともに、砂漣の波長が水粒子の移動振幅に近づいて行く様子を示しており、最終の波長は振幅の約 75% ぐらいである。

砂堆の発達限界については、すでに杉江ら³⁾による実験の報告があるが、その整理法にしたがってプロットすると 図—9 となる。砂堆の平均波高 H_a は、底面水粒子



図—9 砂堆の発達限界 (a)

の最大速度が大きくなると高くなるが、 u_* が 4~5 ぐらいになると増加が緩慢になり、逆に高さが減少する傾向もみられる。また、底面速度が同じであれば、周期が長い程砂堆高が高くなる傾向にある。これらは杉江らの結果とも一致している。

図-10 は、実験方法および水深のちがいが砂堆高を

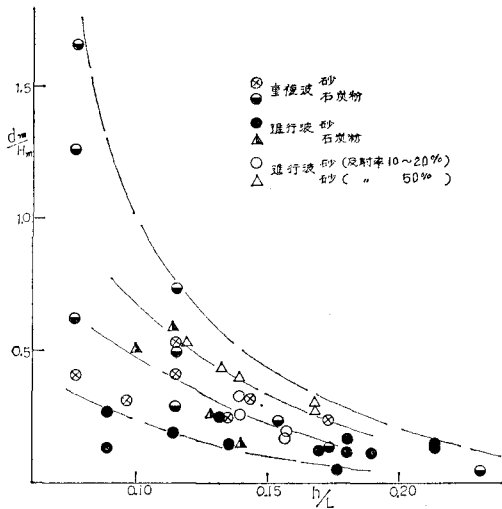


図-10 砂堆の発達限界 (a)

どのように関係するかをみたもので、実線は 53 年度の砂の実験値に大体の砂堆の発達限界線を引いたものである。

5. 水位変化、水粒子速度および浮遊砂濃度の相関

データーレコーダーに同時記録されたデーターから、2 要素ずつを取り出して X-Y レコーダーに画かせた一例が 図-11 である。底質が石炭粉の場合、全般的に浮遊砂濃度 c は、水位変化 η や、水粒子速度 u_0 の変化にスムーズに追従し、 η と u_0 については一定の周期的な運動が保たれている。

c と η では、波の峰の通過直前と谷の通過直前か、通過時と同時に c のピークがみられる。 c のピーク値が低くなると立ちあがりが速くなるようである。 c と u_0 の関係では、 u_0 が最大のときの c のピークと、 u_0 最大の直後にみられる c のピークがあり、後者でのピーク値が大きい。

また、速度逆転時の c の立ちあがりは殆んどない。

u_0 と η の関係では、 u_0 のピーク値は波の峰と谷の通過時より少し前に 2 つのピーク値が現れる。

図-11 の $c-\eta$ と $u_0-\eta$ の相関図において 2 つのピーク値のおこる時間をみると、 u_0 のピーク後に c のピークがある。これは石炭粉が水粒子の動きに追従できず若

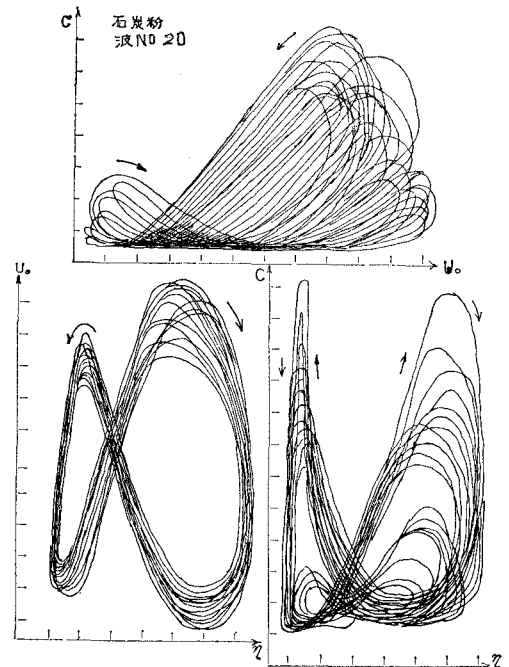


図-11 $c-u_0$, $u_0-\eta$, $c-\eta$ の相関

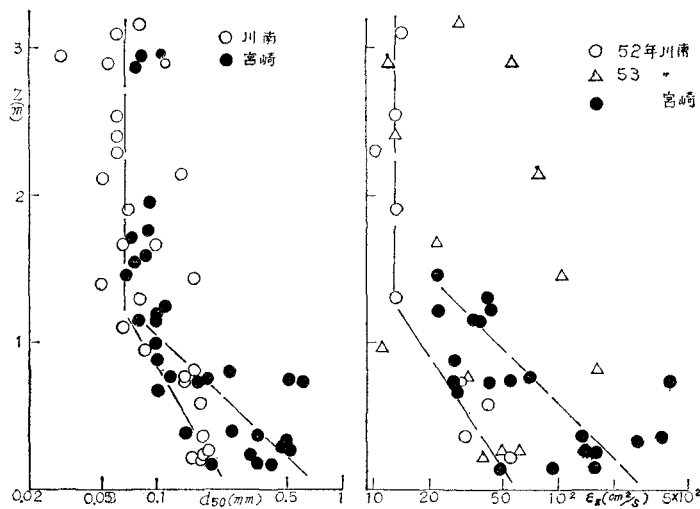
干の遅れのあることを示している。図から遅れ時間を推算すると、石炭粉が岸方向に動くときは 0.1 秒ぐらいで、沖方向の場合はその 1/3 程度となる。このちがいは、波の谷の通過とほぼ同時に峰の場合より急激な速度の逆転が起るからであろう。

底質が砂になると石炭粉にくらべ全般的にランダム性が顕著になる。しかし全体としていえることは、峰と谷近くのピークの途中にも濃度のピークがみられ、これは石炭粉にはなかった現象である。これは Nakato⁴⁾ らの示した水粒子の 1 周期の間に互に大小 2 つずつのピークが現れるという実験結果を裏付けている。同じように石炭粉と異なる現象として、 u_0 の逆転の直前に c のピークがみられる。これは水粒子の底面での最大移動振幅が砂漣波長の 1.6~1.8 倍ぐらいになるため水粒子の動きが沖向きのとき浮遊砂はすぐ近くの山を通り越して、次の山に一部の浮遊砂が到達するためと考えられる。

6. 浮遊砂の現地調査

著者らは、宮崎海岸の調査から竹竿式補砂器を使った補砂量 q (g/day) と、浮遊砂濃度 $\bar{c}$ (ppm) との間に $\bar{c} \approx 5q$ なる関係があることを推定した⁵⁾。そこで、 q を $\bar{c}$ と同じ物理量として取扱い、推定底面境界値 q_0 を与えれば、拡散係数 ϵ_z を推算できる。

川南港付近で採取した補砂の粒径分布をみると図-12 のようになり、宮崎海岸の分布⁵⁾ とほとんど一致している。



図—12 宮崎海岸の底質粒径と拡散係数

この補砂量から濃度分布を求め拡散係数を計算してみると同図のようになり、宮崎海岸の採水して得られた濃度分布からの計算値とほぼ一致している。

7. おわりに

以上、サンドウェーブの変形と、これに伴う底質の浮遊との関連について考察してみたが、全体として水底付近における浮遊機構が、底質材料のちがいによって、かなり左右されるようであり、現地との適合性の上で、今後さらに明確にしていく必要がある。

参 考 文 献

- 1) 日野幹雄・福岡捷二・古沢 恵：波による砂鏈のスペクトルについての実験，第 15 回海講演集，1968.
- 2) 田中則男・小笹博昭・柴山煒彦：備讃瀬戸におけるサンドウェーブの特性について，第 20 回海講演集，1973.
- 3) 杉江正文・川口 毅：部分重複波による sand wave に関する研究 (1)，第 18 回海講演集，1971.
- 4) Natato Tatsuaki and Frederick, A. Locher: Waterway Port Coastal and Ocean Division, ASCE, Vol. 103, 1977.
- 5) 島田米夫・吉高益男：波による浮遊砂の濃度測定について，第 21 回海講演集，1974.