

進行波による底質の浮遊機構 (II)

野田 英明*・岩佐 敏博**

1. ま え が き

漂砂現象の一形態である波による浮遊砂の現象を明らかにするためには、波浪や底質の特性との定量的関係を見出す必要がある。従来、これらの関係を明らかにするため現地観測や実験室における実験的研究が数多く行なわれてきた。たとえば、現地では福島^らが竹竿式捕砂器を用いて、その捕砂量から海中に浮遊する底質の濃度やその鉛直分布を明らかにしているし、また土屋^らは、竹竿式サンプラーおよび水中ポンプによるサイフォン式サンプラーを用いて、大湊海岸における海浜断面内での浮遊砂濃度分布を測定している。一方、実験室では、ポンプ・サイフォン式サンプラー³⁾や光電管式濃度計^{4),5),6),7),8),9)}が、波による浮遊砂濃度の測定に用いられてきた。サイフォン式サンプラーでは、波の1周期に対する浮遊砂の平均濃度を知ることができるのみであるが、波動現象のような非定常運動のもとにおける底質の浮遊機構を解明するためには、どうしても浮遊砂濃度の時間的変動を明らかにする必要がある。近年こうした考え方から本間・堀川^ら4)および服部^{5),6)}は、光電管式濃度計を試作して、波による浮遊砂濃度の時間的変動を測定する試みを行なっている。また、道上^ら7)は、河川における浮遊砂濃度の変動を Kennedy ^ら8)が試作したと同様のサンプラーで測定している。

著者^ら9)もこれまでサイフォン式濃度計を用いて、波の一周期平均浮遊砂濃度を測定し、その鉛直分布、拡散係数および基準点濃度について検討を行なってきた。今回は浮遊砂濃度の時間的変動に注目して実験を行ない、光電管式濃度計を用いてその変動を測定し、若干の考察を加えた結果について報告する。

2. 実験装置および方法

実験は図-1に示すように、長さ25m、幅60cm、深さ140cmの片面ガラス張鋼製水槽で行なった。水槽の一端には1/10勾配の斜面を設置し、斜面上に碎石、樹脂片を置いて消波装置とした。浮遊砂濃度の測定は、この水槽の中央部4mの区間で行ない、この区間には豊浦標準砂（中央粒径0.18mm、比重2.65）を5cmの

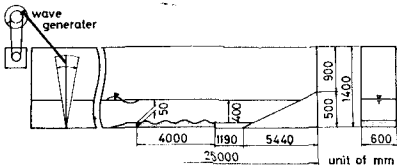


図-1 波動水槽

厚さに敷きならして水平床とした。浮遊砂濃度の測定は、波をおこして後砂れん形状が安定してから、この区間で行なった。

表-1 実験条件

No.	波高 $H(\text{cm})$	周期 $T(\text{sec})$	水深 $h(\text{cm})$	最大速度 $u_0(\text{cm/sec})$	$\delta(\text{cm})$	$u_0\delta/\nu$
1	15.0	1.36	40	20.9	0.050	90
2	14.4	1.48	40	26.7	0.049	128
3	12.3	1.50	40	17.7	0.052	82
4	11.4	1.72	40	23.0	0.055	114
5	14.5	2.07	40	31.2	0.060	172

実験に使用した波の特性は表-1に示すようである。波高は、電気抵抗式波高計を光電管式濃度計と同一断面に設置して、浮遊砂濃度と同時に、電磁オシログラフに自記させるようにした。濃度計は図-2に示すように、一端にシャープガリウム砒素発光ダイオードを取り付け、これと約2cm離れた他端に、発光ダイオードからの光量を受けるのに適した、シャープシリコンフォト・トランジスタ（受光面の直径3mm）を取り付けた。なお、装置の関係上この濃度計で濃度が測定できる間隔

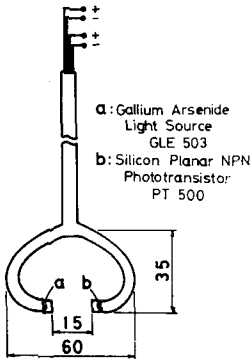


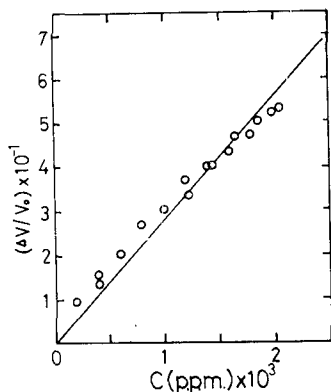
図-2 光電管式濃度計

* 正会員 工博 鳥取大学教授 工学部
** 正会員 鳥取大学助手 工学部

は 15 mm である。この濃度計は、安定化電源装置ならびに直流増幅器を経て、電磁オシログラフに自記できるようにした。なお濃度は、砂れん峯および谷上の鉛直上方に底面から 1 cm の間隔で測定した。

3. 濃度計の校正

光電管式濃度計の校正は、円筒形の攪拌水槽を用いて行なった。この攪拌水槽には回転式の攪拌器を設け、円筒の中の水を攪拌することによって浮遊砂濃度を定常な状態で測定できるようにした。浮遊砂はサイフォン方式により採集すると同時に、光電管式濃度計の電圧変化を読み取り、これらの関係を求めた。図—3 はその校正曲

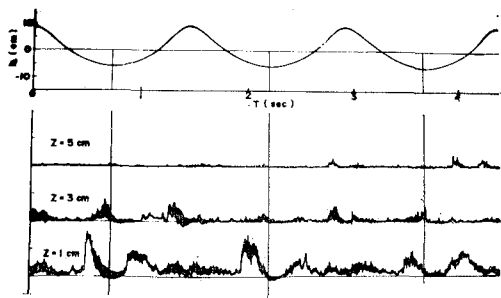


図—3 濃度計の校正

線である。この図の縦軸は光電管式濃度計の電圧変化 ΔV と濃度 0 のときの電圧 V_0 との比をとり、横軸にはこれに対応するサイフォン方式で測定した浮遊砂濃度をとって示してある。図から明らかなように、 $\Delta V/V_0$ と浮遊砂濃度 C (ppm) との間には比例関係のあることがわかる。なお校正に使用した底質は、塩化ビニール粒 (比重 1.15) および豊浦標準砂 (比重 2.65) である。

4. 濃度変動と水面変化との関係

図—4 は、砂れん谷上において測定した記録の一例である。この記録は、波高 $H=14.4$ cm, 周期 $T=1.48$ sec,

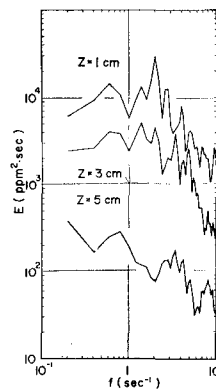


図—4 水面と濃度の時間的变化

$u_0\delta/\nu=128$ の波による浮遊砂濃度の時間的变化を示すものであり、 z は海底砂面上の高さを示している。なお図中の $h-t$ 曲線は水面の時間的变化を示している。この図からわかるように最大濃度は、 $z=1$ cm の場合、波谷の通過直前あるいは、直後に現われ、 $z=3$ cm の場合、波谷および波峯の通過直前に、また $z=5$ cm の場合、波峯通過直前に現われている。さらに、いずれの高さにおいても、波峯および波谷の通過時には濃度が著しく減少する。ここには示していないが、砂れん峯上と谷上とでは濃度の変動特性はかなり異なり、かつ底面からの高さによっても相違するようである。現在のところ、これらの現象については定性的に説明できるのみであるが、今後、水面変化および砂れんとの関連性についてさらに詳しく検討する必要があると考えている。

5. スペクトル解析の結果および考察

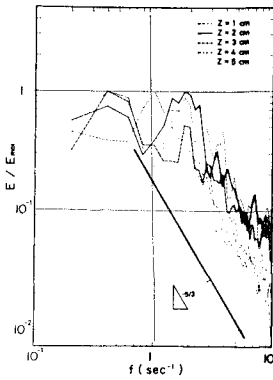
図—4 から明らかなように、波による浮遊底質の濃度は、時間的に変化するばかりでなく、一般に不規則な変動を示している。したがって、ここではスペクトル解析を行なってその変動特性を検討する。濃度変動スペクトルの解析は Tukey の方法によった。一つの浮遊砂濃度変動の記録から 0.05 sec 間隔で 1000 個の数値を読み取った。この場合分解能は 50 であり、自由度は約 40 となる。



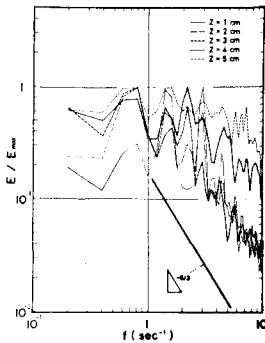
図—5 濃度スペクトル

図—5 は実験 No. 2 における底面からの高さの変化に伴うスペクトル特性の変化を示したものであって、実験波の周波数 $f_w=0.68$ sec⁻¹ に対して、底面近くにおけるスペクトルのピーク値は、波の 2 倍周波数となっていること、さらに 2 倍周波数および 3 倍周波数にピークのあらわれる変動を示していることがわかる。しかし、底面から離れた $z=5$ cm の上層領域においては、ピークが波の周波数とほぼ同じであって、底面近くとは異なった傾向を示している。

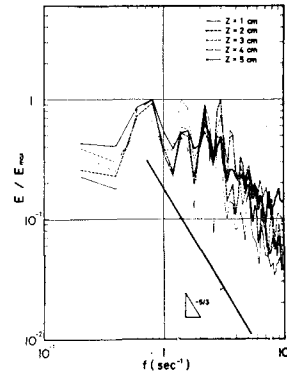
図—6.1 (a) および (b) は、それぞれ実験 No. 5 に



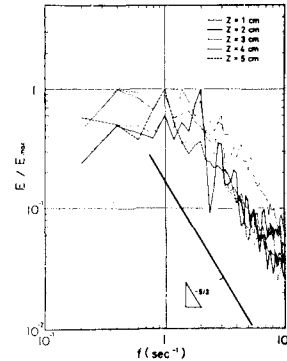
(a) 砂れん谷上



(b) 砂れん峯上

図—6.1 $E/E_{\max}$ と f の関係 (No. 5)

(a) 砂れん谷上

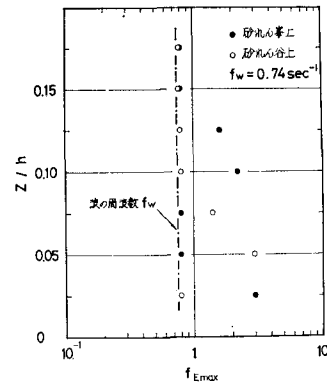


(b) 砂れん峯上

図—6.2 $E/E_{\max}$ と f の関係 (No. 1)

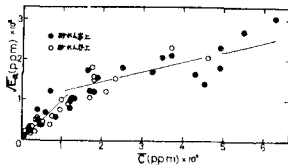
における砂れん谷および峯上における $E/E_{\max}$ と f との関係を示したものであって、また 図—6.2 (a) および (b) は、実験 No. 1 における同様の結果を示したものである。図—6.1 (a) からわかるように、砂れん谷上におけるスペクトルの変化は、高周波領域においても底面からの高さにかかわらず $E/E_{\max}$ は $f^{-5/3}$ にほぼ比例しているが、図—6.1 (b) にみられるように、砂れん峯上におけるそれは高周波領域において、ホワイトノイズ的なスペクトル構造があらわれる。こうした傾向は、図—6.2 (a) および (b) のようにレイノルズ数 $u_0 \delta / \nu$ が小さくなると、低周波領域にもみられようになる。一般にこの傾向は、砂れん谷上よりも砂れん峯上において著しく、また底面から離れるに従って顕著になる。以上の結果から、濃度変動に関するスペクトル構造は、レイノルズ数および底面形状によって大きな影響を受けることがわかる。

図—7 は、スペクトルのピーク値 $E_{\max}$ が現われる周波数 $f_{E_{\max}}$ の鉛直方向の変化の代表的な一例を示したものであって、図中の一点鎖線は波の周波数 f_w を表わしている。底面に近い領域においては、波の 2~4 倍周波数でスペクトルのピークとなるが、底面より遠ざかった領域においては、スペクトルのピーク値を示す周波数

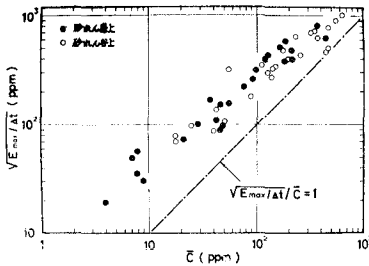
図—7 $f_{E_{\max}}$ の鉛直分布

は、波のそれとほぼ一致することがわかる。同様の傾向は他の実験結果についてもいえる。

図—8 はすべての実験結果に対するスペクトル図より、スペクトルの下側の面積 E_a を求めその平方根 $\sqrt{E_a}$ と、これに対応する濃度の時間的変化から計算した平均濃度 $\bar{c}$ との関係を示したものであって、低濃度の場合 $\sqrt{E_a} = \bar{c}$ となって、底面からの高さに関係なく $\sqrt{E_a}$ が平均

図-8 $\sqrt{E_a}$ と $\bar{c}$ の関係

濃度 $\bar{c}$ を表わすが、平均濃度 $\bar{c}$ が 100 ppm 以上になると、 $\bar{c}$ の値は $\sqrt{E_a}$ の値よりもかなり大きくなり、 $\sqrt{E_a}$ が $\bar{c}$ そのものを表わさなくなることがわかる。これは上述したように高濃度になると波の 2~4 倍周波数においてスペクトルのピークがあらわれることと関係すると考えられるが、現状ではこれ以上の検討ができなかった。

図-9 $\sqrt{E_{\max}/\Delta t}$ と $\bar{c}$ の関係

一方、図-9 はスペクトルのピーク値 $E_{\max}$ を用いて濃度に換算した $\sqrt{E_{\max}/\Delta t}$ を縦軸に、平均濃度 $\bar{c}$ を横軸にとって $\sqrt{E_{\max}/\Delta t}$ と $\bar{c}$ との関係を図示したものである。この図から、高濃度になるに従い、 $\sqrt{E_{\max}/\Delta t}$ の値は、平均濃度 $\bar{c}$ にほぼ一致する傾向がみられるが、逆に低濃度になると $\sqrt{E_{\max}/\Delta t}$ の値が $\bar{c}$ の値に比べて大きくなる。図-8 と 図-9 から明らかなように、平均濃度 $\bar{c}$ は低濃度の場合と高濃度の場合、スペクトル特性の相違に大きく影響を受けることを表わしている。特に高濃度の場合には、スペクトルのピーク値が平均的な浮遊砂の濃度を決定しているようである。実験条件がかなり限定されているため、さらに高濃度の場合でもこうした現象がみられるかどうか明かでないが、今後現地における観測も含めて検討していくつもりである。

6. 一周期平均濃度分布および拡散係数

一般に、時間的平均濃度 $\bar{c}$ は、拡散係数 ε_z を一定と仮定すると、前報式(3)のように表わされる。すなわち、

$$\frac{\bar{c}}{\bar{c}_a} = \exp \left[- \left(\frac{w_0 h}{\nu} \right) \left(\frac{\nu}{\varepsilon_z} \right) \left(\frac{z-a}{h} \right) \right] \dots \dots \dots (1)$$

である。さて、今回光電管式濃度計で測定した浮遊砂濃度の一周期平均濃度を求め、その鉛直分布について検討してみよう。

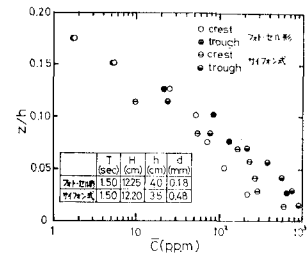


図-10 一周期平均濃度の鉛直分布の比較

図-10 は、前報において報告したサイフォン方式による浮遊砂濃度と今回の光電管式濃度計による浮遊砂の一周期平均濃度の鉛直分布を比較したものである。図中に示されるように両者の実験条件はほぼ同一であるが、底面水粒子の最大速度は、今回の実験が、17.7 cm/sec、前回のそれが 25.4 cm/sec とかなり大きく、それに反し粒径は今回が 0.18 mm、前回は 0.48 mm とこれもかなり相違するため厳密な比較はできないが、鉛直分布にそれほど顕著な相違はみられないようである。また、その鉛直分布もほぼ式(1)で示される指数関数的に減少することがわかる。

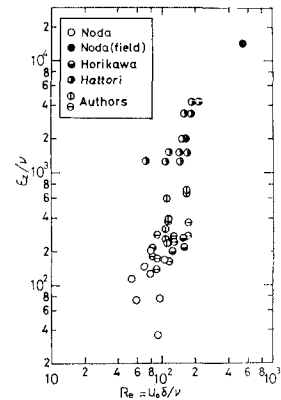
図-11 ε_z/ν と $Re = u_0 \delta/\nu$ の関係

図-11 は前報 図-8 に示したと同様に拡散係数 ε_z が一定として成立する式(1)を用いて、測定された濃度の鉛直分布図から ε_z の値を逆算して求め、これと波の特性との関係を今回の測定結果を加えて示したものである。実験範囲が前回とほぼ同様な範囲にあるため、今回の測定結果(○印)に対して特に示すべき特徴はみられないが、 ε_z/ν の値は、レイノルズ数が大きくなると増大する傾向がみられる。

7. 結 語

進行波による浮遊砂濃度の時間的変動を測定し、このスペクトル解析を行なって、若干の考察を加えた。その結果、(1) 底面近くにおける濃度スペクトルのピー

クは波の2～3倍周波数となる、(2)砂れんの谷と峯上ではスペクトル特性が異なる、(3)波のレイノルズ数が小さくなるとホワイト・ノイズがみられる、などが明らかとなった。資料が十分でないこと、解析が進んでいないことのため、スペクトル特性の変化を検討するにとどめたが、今後水面変化との関連性、濃度変動のアンサンブル平均などについても、検討していくつもりである。

この研究は文部省総合研究費による研究の一部であることを記して謝意を表するとともに、この研究を行なうにあたり、実験ならびに資料整理に協力いただいた当時学生(現在久保田鉄工勤務)の芝田道夫君と万代巧君に感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 福島久雄・柏村正和: 漂砂とその測定(第5報), 第7回海岸工学講演会講演集, 昭 35. 11, pp. 41—45.
- 2) 土屋義人・白井亨・中村重久・山口正隆・芝野照夫・河田恵昭・吉岡茂: 大潟海岸における海岸変形に関する観測(1), 京都大学防災研究所年報, 昭 46.4, pp. 465—485.
- 3) Fairchild, J. C.: Suspended sediment sampling in laboratory wave action, B. E. B. Tech. Memo., No. 115, 1959.
- 4) 本間仁・堀川清司・鹿島遼一: 波による浮遊砂に関する研究, 第11回海岸工学講演会講演集, 昭 39.11, pp. 159—168.
- 5) 服部昌太郎: 重複波による底質の浮遊機構, 第16回海岸工学講演会講演集, 昭 44. 12, pp. 147—152.
- 6) 服部昌太郎: 重複波による底質の浮遊濃度分布, 第17回海岸工学講演会論文集, 昭 45.11, pp. 225—228.
- 7) 道上正規・白川清: 浮遊砂濃度の測定方法について, 第25回年次学術講演会講演集, 第2部, 昭 45.11, pp. 255—258.
- 8) Bhattacharya, P. K., J. R. Glover and J. F. Kennedy: An electro-optical probe for measurement of suspended sediment concentration., 13th Congress of IAHR, Vol. 2, 1969, pp. B25—1—10.
- 9) 野田英明・岩佐敏博: 波による底質の浮遊機構(1), 第18回海岸工学講演会論文集, 昭 46.10, pp. 349—353.