

波による底質の浮遊機構 (1)

野 田 英 明*・岩 佐 敏 博**

1. 緒 言

波による浮遊漂砂量の推定は、漂砂現象を取扱う場合欠くことのできない基本事項の一つである。

しかしながら、波の特性と浮遊砂濃度との関係や濃度の場所的・時間的分布など、波による底質の浮遊機構に関しては、海底近くにおける流体運動の複雑さのため、十分に解明されているとはいえない。

また、浮遊砂の問題は、漂砂に関連する工学的諸問題の解決ということ以外にも、波による底質の浮遊現象が波動による乱れ現象に内在する諸問題と密接な関係をもっているため、こうした問題を究明するという一面をもっている。

従来、波動運動による底質の浮遊については、理論的あるいは実験的に多くの研究がなされてきた。特に、福島・柏村¹⁾は北海道沿岸における観測から、竹竿捕砂器による捕砂量の鉛直分布が「く」の字形になることを示した。一方、本間・堀川²⁾は、実験水槽における測定から、浮遊砂の鉛直濃度分布が指数形になることを、さらに、また岸³⁾は梶浦⁴⁾の理論を適用して、対数形分布によっても表現できることを示した。その後、服部^{5),6)}は、重複波による実験から、実験水槽においても「く」の字形分布を示す場合のあることを示すとともに濃度分布勾配の急変点より上層では指数形分布になることを明らかにした。しかしながら、つねに問題にされてきた、鉛直方向の拡散係数、基準点の高さやその点の濃度ならびにそれらと波の特性との関連についてはまだ満足すべき結果がえられているわけではなく、古くて新しい問題として提起されている。

この研究は、著者らが進行波による底質の浮遊について若干の実験を行なうとともに、濃度の時間的変動についても一・二の測定を試み、濃度の鉛直分布形、上に指摘した諸問題について若干の考察を加えたものである。

2. 実験装置および実験方法

実験は長さ 18 m, 幅 50 cm, 深さ 60 cm の片面ガラス張鋼製水槽で行なった。水槽の一端は 1/10 勾配の斜

面とし、この斜面上に碎石、樹脂片を置いて消波装置とした。浮遊砂濃度は、この水槽端から 5.3~9.3 m の 4 m 区間に砂または塩化ビニール粒子を 5 cm の厚さに置き水平床とし、測定した。なお、濃度の測定は波をおこして後、砂れんの形状が安定してから行なった。

実験に使用した底質の特性は、比重 2.65, 中央粒径 0.48 mm のほぼ均一な砂である。なお、濃度の時間的変動に関する実験では、比重 1.15, 粒径 0.13 mm の塩化ビニール粒を用いた。

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	15.1	1.31	35	28.8	0.055	110
2	12.2	1.50	35	25.4	0.056	109
3	11.4	1.72	35	25.3	0.061	114
4	14.6	2.04	35	34.2	0.067	167

実験に用いた波の特性は表-1に示すようである。

浮遊した砂の時間的平均濃度は Fairchild⁷⁾ が用いたものとはほぼ同様の採水装置で、また浮遊底質濃度の時間的変動はフォト・セル形濃度計を用いて測定した。この濃度計の光源としては安定でかつ波長 0.94μ の狭い周波数帯のスペクトル特性をもつシャープガリウム砒素ダイオードを用い、これと 5 mm はなれた位置にこの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ー PT 500(受光面の直径 3mm)を使用した。なお、この発光ダイオードおよびフォトトランジスターの特徴は発光光線がレンズを通して平行光線となるように製作されていること、および光出力電流が大きくかつ暗電流がきわめて小さく安定していること

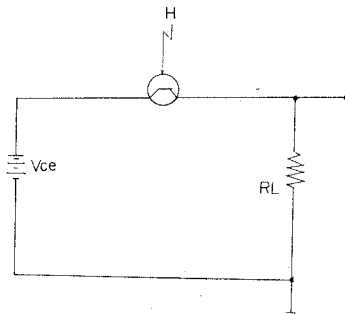


図-1 回路図

* 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

である。濃度は図-1に示すような回路によって、受光面における光量の増減を電流変換して測定し、電磁オシログラフに自記させた。この装置を濃度計として使用しうるのはすでに道上ら⁸⁾によって確かめられておりまた室内であれば、自然光の影響はほとんど問題にならないようである。

3. 浮遊砂平均濃度について

(1) 鉛直分布

図-2は著者らが進行波について行なった実験結果の一例であって、砂れんの山上および谷上における平均濃度の鉛直分布が示されている。この図から明らかなように、底面のごく近くの濃度分布とその上層のそれとは傾向がことなることおよび逆「く」の字形の分布形を示すことがわかる。この理由については明確でないが、本実験における底質の沈降速度 w_0 はほぼ 6 cm/sec と従来の実験に比べてかなり大きいことが原因の一つではないかと考えられる。しかし、服部が示したように、鉛直濃度分布勾配の変化点より上層では、分布形は半対数紙上でほぼ直線になることから、いわゆる指数形の分布であるといえよう。図-3は本間・堀川ら²⁾が行なった浮遊

砂濃度分布に関する実験結果の一例を示すものであってこの場合には鉛直濃度分布勾配がほぼ一定であって、その急激な変化は見い出せない。なお、本間・堀川らの実験に使用された底質の沈降速度 w_0 はほぼ 2 cm/sec である。図-4は、著者らの一人が底質として塩化ビニル粒(比重 1.15, 粒径 0.13 mm)を用い、波として重複波を用いて、節の部分で測定した鉛直濃度分布の一例を示したものである。この結果によると、底面から $2 \sim 3 \text{ cm}$ までの層では浮遊底質濃度が急激に増大する、いわゆる「く」の字形の分布となっている。さらに、図-5は大潟海岸における観測からえられた同様の分布を示すものであるが、この観測結果によると、ややばらつきはあるが、やはり「く」の字形分布になっていることがわかる。なお、この場合の浮遊粒子の沈降速度はほぼ 2 cm/sec であった。

さて、以上の数例から見る限り、鉛直濃度分布形は3種に大別されるようである。こうした分布形の相違が何に原因するかを明確にすることは容易でないが、ここでは、実験結果に対しては砂れんの山上の測定値のみに限って、その支配的要素について検討を加えよう。

一般に、時間的平均濃度 C は、底面から鉛直上向きに

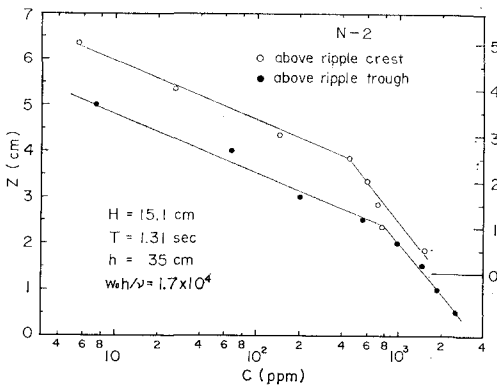


図-2 鉛直分布の一例 (I)

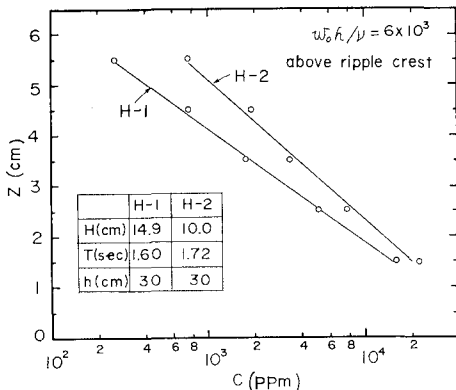


図-3 鉛直分布の一例 (II) (本間・堀川による)

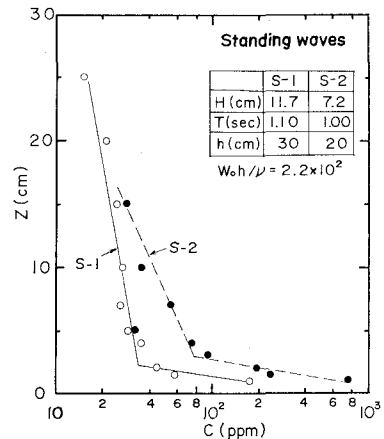


図-4 鉛直分布の一例 (III)

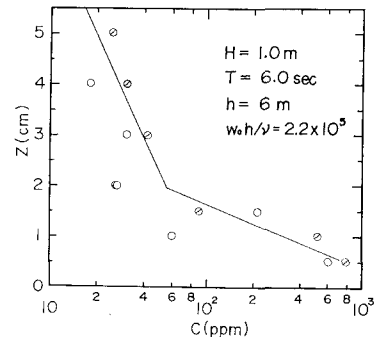


図-5 鉛直分布の一例 (IV)

z 軸をとると,

$$\frac{d}{dz} \left(\epsilon_z \frac{dC}{dz} \right) + w_0 \frac{dC}{dz} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

によって表わされる。ここに、 ϵ_z は鉛直方向の拡散係数であり、 w_0 は浮遊底質の沈降速度である。式(1)に水面条件および $z=a$ において $C=C_a$ という条件を与えて積分すると、その解はよく知られているように、

$$\log \frac{C}{C_a} = - \int_0^z \left(\frac{w_0}{\epsilon_z} \right) dz \quad \dots\dots\dots (2)$$

となる。式(2)のもっとも単純な形の解は ϵ_z を一定とおくことであって、この場合には、

$$\frac{C}{C_a} = \exp \left[- \left(\frac{w_0 h}{\nu} \right) \left(\frac{\nu}{\epsilon_z} \right) \left(\frac{z-a}{h} \right) \right] \quad \dots\dots\dots (3)$$

と表わされる。式(3)右辺の $w_0 h / \nu$ は底質の浮きやすさを表わす指標と考えられ、また ϵ_z / ν は波動運動の乱れに関係する量と考えるならば、Reynolds 数 $u_0 \delta / \nu$ ($\delta = \sqrt{\nu T / 2\pi}$, ν : 水の動粘性係数) や底面粗度に密接な関係をもつであろう。したがって、これらの量は、鉛直濃度分布形状の相違を支配する要素になることが推測される。図-6は、上述した鉛直濃度分布形の相違を $w_0 h / \nu$ および $u_0 \delta / \nu$ によって分類したものである。この図で使った資料は、著者らの実験および観測結果のほかに、本間・堀川³⁾ および服部⁹⁾ の実験結果も参照した。図から明らかなように、 $w_0 h / \nu$ の値が小さい場合には $u_0 \delta / \nu$ の値がかなり小さくても「く」の字形の分布形になること、また $w_0 h / \nu$ の値が大きい場合には $u_0 \delta / \nu$ の値が相当大きくならなければ、「く」の字形分布が現われないことがわかる。一方、 $w_0 h / \nu$ の値がかなり大きく $u_0 \delta / \nu$ の値が小さい場合には逆「く」の字形分布が現われること、その中間に直線形の分布形がみられることがわかる。図中には、これら3種の限界線を一応示しておいたが、これらのパラメータで十分明確に分類されているわ

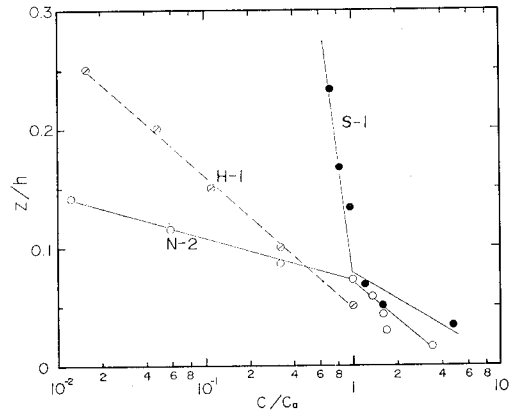


図-7 浮遊濃度比の分布

けでなく、それぞれの分布形が別の領域に交互に入り混んでいるところもあり、さらに資料を増して再検討する必要がある。しかしながら、入手し得た資料から考えると、 $w_0 h / \nu$ および $u_0 \delta / \nu$ は分布形を決定する重要な要素であるといえよう。

(2) 拡散係数

図-7は浮遊底質濃度比 C/C_a に関する鉛直分布の典型的な形状を示したものであって、「く」の字形および逆「く」の字形の場合には勾配の変化点の高さを基準点とし、本間・堀川³⁾が求めた直線形分布では測定点の最下点を基準として示したものである。この図からわかるように、「く」および逆「く」の字形いずれも勾配の変化点より上層では、半対数紙上でほぼ直線的に変化し、直線形分布も同様であることがわかる。これは、浮遊底質の一周平均濃度を取扱う場合、鉛直方向の拡散係数がほぼ一定になることを示している。したがって、ここではまず、この領域における拡散係数について検討する。拡散係数 ϵ_z が一定の場合には、式(3)が成立つから、測定された鉛直濃度分布と式(3)を用いて ϵ_z の値を逆算することができる。こうして逆算された ϵ_z の値と波の特性との関連を示したのが図-8である。この図は、上述の方法によって求めた ϵ_z / ν の値を縦軸に、 $Re = u_0 \delta / \nu$ の値を横軸にとって、著者ら、本間・堀川³⁾らおよび服部の実験結果ならびに現地観測の結果を用いて、その関係を明らかにしたものである。図からわかるように、 ϵ_z / ν の値は Reynolds 数の増加とともに増大する傾向がみられる。しかしながら、Reynolds 数の範囲は 60~200 であり、Collins⁹⁾の滑面に対する遷移限界 Reynolds 数 113 を考慮するならば、実験は遷移領域で行なわれていると推定され、底面における砂れんの発達が無乱れや渦の発生すなわち浮遊形態に大きく影響していると考えられこれが実験値のばらつきを大きくしたものと推測される。

(3) 基準点の高さ

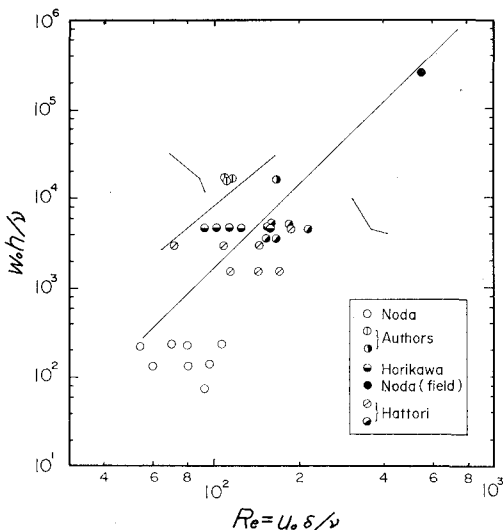
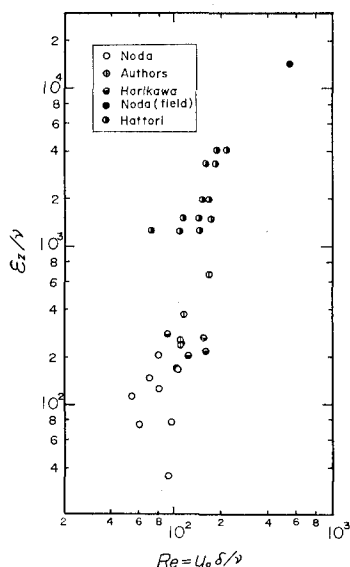


図-6 $w_0 h / \nu$ と $u_0 \delta / \nu$ による分布形の分類

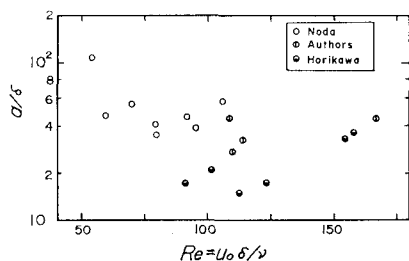
図-8 $c_z/\bar{c}$ と $u_0 \delta / \nu$ の関係

濃度勾配の急変点を基準点に選び、その高さが波の特性とどのような関係にあるかを検討する。図-9は基準点の高さ a を δ で割って無次元化した高さ a/δ と $u_0 \delta / \nu$ との関係を示したものである。なお、この図には、参考のため、本間・堀川らの実験結果についても、浮遊砂濃度を測定した最下点を一応基準点の高さとして示しておいた。「く」および逆「く」の字形分布形に対する a/δ と $u_0 \delta / \nu$ との間には $u_0 \delta / \nu$ の値が大きくなると a/δ の値が小さくなる傾向がみられるが、Reynolds 数の範囲が狭いので明確な結論をくだすことはできない。ただ、この高さは砂れんの大きさや発生する渦の径とも密接な関係があると考えられるので、砂れん周辺の流れの挙動についても詳しく検討する必要がある。

なお、基準点における濃度と波の特性との間の関係については資料不足のため十分に考察することができなかった。

4. 浮遊砂濃度の時間的変動

図-10は、波高 $H=10$ cm, 周期 $T=1.3$ sec, 水深 $h=35$ cm の進行波による浮遊底質濃度の時間的変動を底面

図-9 a/δ と $u_0 \delta / \nu$ の関係

から種々の高さごとに示したものである。なお、図中には測定点における水面の時間的変化（水槽を二分して一方で浮遊砂濃度を他方で波高を測定した）も示されている。測定結果から明らかなように、底面付近の濃度変化はかなり大きいこと、波峯通過直後に高濃度になるという傾向がみえる。しかし、底面からの高さによっては波峯通過直前に高濃度になる場合もある。図-11は、底面から 1 cm および 2 cm の高さにおける濃度の時間的変動、とくに周波数特性を明らかにするために、スペクトル解析を行なった結果である。自由度は約 9 であるため解析結果の信頼性には若干問題もあるが、この図に示されたスペクトル変化の傾向をあげると、(1) $z=1$ cm の場合、スペクトル密度が最大になる周波数はほぼ 0.8 c/sec であり、これは波の周期とほぼ一致する、(2) $z=2$ cm の場合、スペクトル密度が最大になる周波数は 1.5 c/sec であり、これは波の周期の 2 倍周波数成分に相当する。また、これについて大きい周波数は 0.8 c/sec であって、やはり波の周期とほぼ一致する、(3) $z=1$ cm

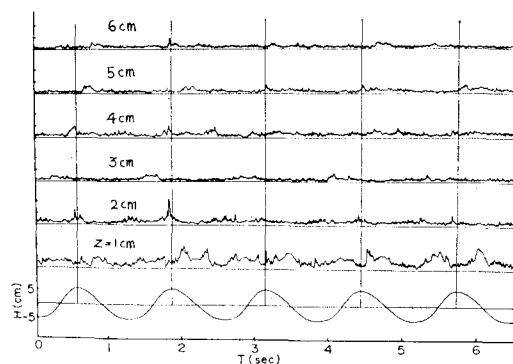


図-10 濃度の時間的変動

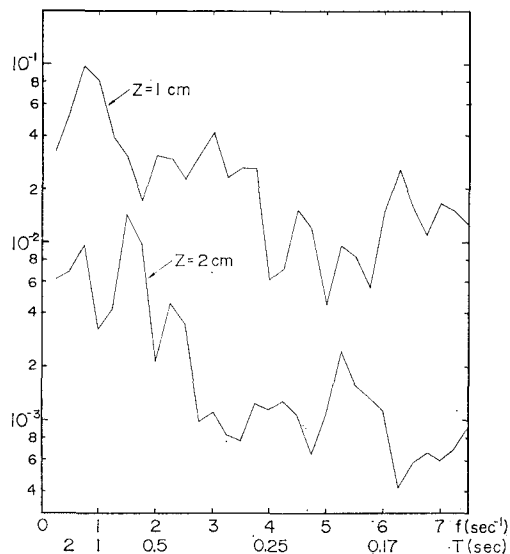


図-11 スペクトル解析の結果

から 2 cm に移る間に波の周期に一致する変動から 2 倍周波数成分の卓越する変動へ移行する、ことなどである。

以上の結果から明らかなように、底面近くでは波峯通過後に濃度のピークが現われるということは、興味ある事実である。従来の実験によって観測されているように波峯が到達すると砂れんの岸側斜面近くに渦が発生し、波峯が通過する間、その形を維持し、砂れんの頂部および岸側斜面の底質がこの渦によって浮遊するが、波峯が通過すると、渦はその径を増大しながら上昇し、これにともなって浮遊砂も拡散され、渦もその勢力を弱める。このような過程によって、濃度ピークの出現を定性的に説明することができる。しかし、底面からはなれると、波の周期の 2 倍周波数成分の濃度変動が卓越するようになる機構については渦の発生・発達との関連するので、今後さらに観察を重ねて明確にしたい。

5. 結 言

実験ならびに現地観測からえられた浮遊砂濃度分布から、波による底質の浮遊機構について考察を加えた。特に、服部が明らかにした濃度分布形すなわち指数形にもとづいて、拡散係数、基準点の高さと波の特性との関連について検討してきた。現段階ではまだ十分満足すべき結論はえられていないが、二、三の興味ある結果を示す

ことができた。さらに、浮遊砂濃度の時間的変動についても一、二の事実を指摘するにとどまったが、今後さらに詳細な研究をつづけていくつもりである。

最後にこの研究は文部省科学研究費による研究の一部であることを付記し、図面の作成に協力していただいた鳥取大学工学部岩成敬介技官に謝意を表する。

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) 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.
- 3) 岸 力・榎国夫・山崎貞元：波動による底質の浮遊，第 21 回年次学術講演会講演概要集，昭 41. 5 pp. II-85.
- 4) Kajiura, K.: On the Bottom Friction in an Oscillatory Current, Bull. Earthq. Res. Inst., Vol. 42, 1964, pp. 147-174.
- 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) Fairchild, J.C.: Suspended Sediment Sampling in Laboratory Wave Action, B.E.B. Tech. Memo., No. 115, 1959.
- 8) 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.
- 9) Collins, J.I.: Inception of Turbulence at the Bed under Periodic Gravity Waves, J.G.R., Vol. 68, No. 21, 1963, pp. 6007-6014.