

り、沖側に最大に引いた位置から中立までの時間を半周期とする $\cos$ 波形を制御信号にして駆動させた。なお、造波後は造波板を中立位置で静止させた。実験では周期をパラメータとし、波高はそれぞれの周期で発生できる最大波高とした。周期は造波板制御信号の $\cos$ 波形の周期で定義し、これを実験波の呼称として用いた。入射波は実津波と同様に分裂前の波が長波条件を満足し、底質がシートフローになり、かつ、巻き波砕波が起きないことを条件とし、実験装置がこの条件を満たす周期として 10 秒、20 秒、30 秒を選定した。ただし、水深は周期 10 秒に対しては 20 cm とし、周期 20、30 秒に対しては 10 cm とした。計測項目は水面変位および流速であり、図示の各計測点で計測した。流速の詳細計測は計測点③および⑧(周期 10 秒のみ)で実施し、底面からの距離は 1, 3, 5, 10, 20 mm とした。移動床実験では、波による流速が遅いために底質にはアクリル粒子(中央粒径 $d=0.285$ mm, 比重=1.19)を用いてシールズ数を高めた。トラップによる捕砂は図-2 の計測点⑧において行った。トラップは非定常流実験と同じものを用いたが、砂移動量が少ないため流下方向には 2 箱のみを連ねて設置した。蓋の開放時間は、水槽岸側の鉛直壁からの反射波がトラップ付近に作用しない間とし、造波開始から、周期 10 秒では 25 秒間、周期 20 秒では 30 秒間、周期 30 秒では 40 秒間とした。

3. 流れ場の特徴

3.1 非定常流実験

水面および流速の空間変化の例を図-3 に示す。流速は計測点の底面から 10 cm の位置における計測値である。水面波形をみると流量増加とともに吹き出し口側から吸い込み口側に向って水面勾配が生じ ($t=30$ 秒付近で最大)、流量減少時に水平に戻っている ($t=48$ 秒) ことが判る。水面及び流速の波形にはこの影響が現れ、流量減少時には流速は $\sin$ 波形とは異なっている。また、流量停止による擾乱は、例えば計測点⑩では約 45 秒後に現れている。

流速の鉛直分布は計測点②では図-4 に示したような

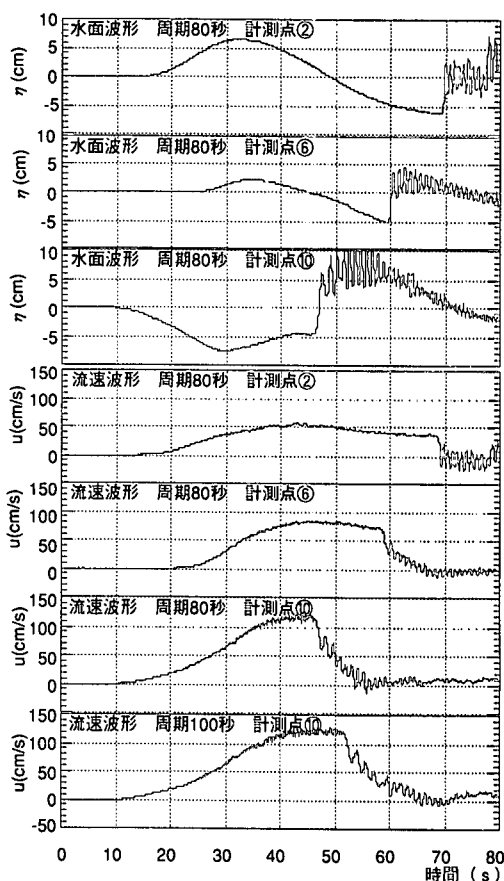


図-3 非定常流の水面および流速波形

形状である。この実験結果と非定常層流解との比較を図-5 に示す。図中の実線は各時刻における非定常層流解の解析結果である。実験開始から 24 秒までは両者が良く一定しており、この時刻付近から乱流に遷移していることが判る。摩擦速度 u^* の経時変化を非定常層流解および定常乱流解で計算した結果は図-6 の通りである。この立上り部の流況の変化が砂移動にどの程度影響を及ぼすかが課題になるが、これについては漂砂量と共に考察することにする。なお、図において非定常層流の摩擦速度は、主流の加速度を境界条件にして運動方程式を鉛

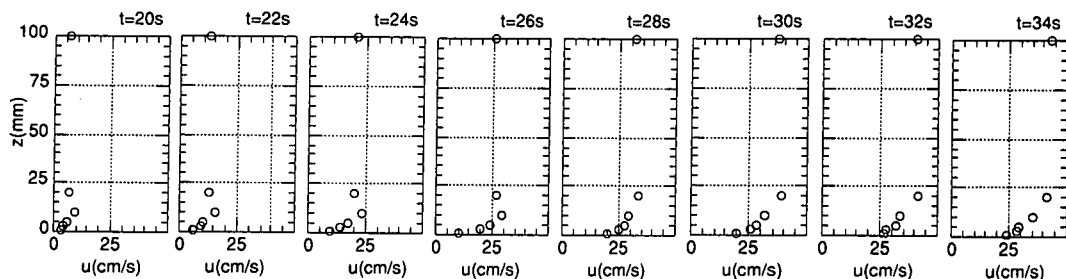


図-4 非定常流の流速分布 (周期 80 秒, 計測点②)

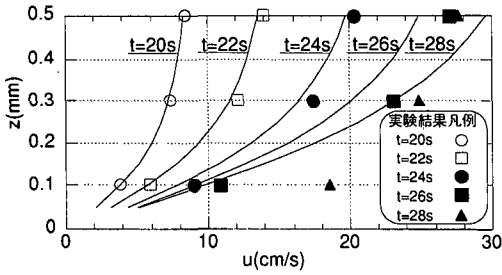


図-5 非定常層流解と実験結果の比較

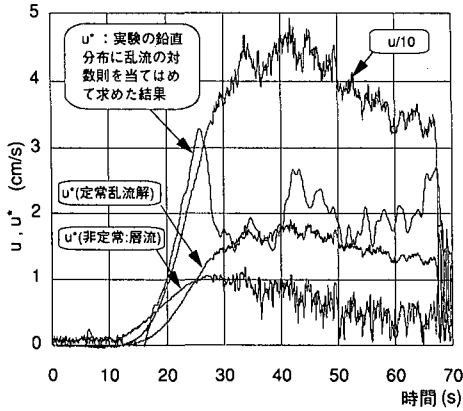
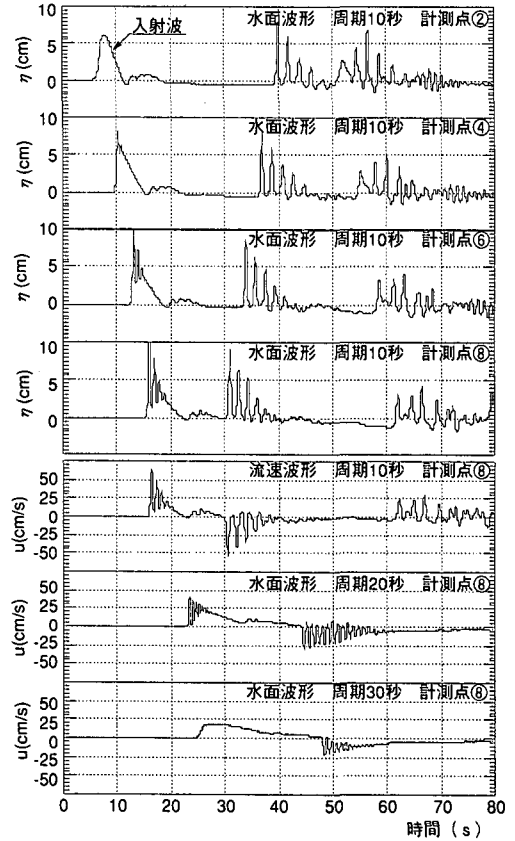
図-6 非定常流の摩擦速度の経時変化
(周期 80 秒, 計測点②)

図-7 孤立波の水面および流速波形

直方向に1次元解析して求めた。また、定常様乱流の摩擦速度は、平均流速を用いて式(1)の粗面乱流に対する抵抗則(田中, 1993)により求めた。

$$\frac{u^*}{\bar{u}} = \frac{\kappa}{\ln(h/z_0) - 1} \quad (1)$$

ここに、 u^* :摩擦速度、 κ :カルマン定数($=0.4$)、 $\bar{u}$:鉛直平均流速、 h :水深、 z_0 :粗度高さ($=k_s/30$)、 k_s :相当粗度($=d$)である。

3.2 造波実験

水面および流速波形の空間変化を図-7に示す。流速は周期10秒のときは計測点の底面から10cmの位置で、周期20, 30秒のときは底面から5cmの位置で計測

した。入射波は伝播に伴って分裂し、特に周期10秒の場合は分裂後の第1波は波峰が崩れて計測点⑤付近で段波状を呈した。全体の流況を流速波形から概説すると、分裂後の特徴は造波周期を半周期とする流速に分裂波による変動が重なっているような形状である。なお、入射波に後続した小さな波は、傾斜路で反射した波が造波板で再反射した波である。

今回の実験のような分裂波でしかも段波状の波に対してどのような抵抗則を用いるかが課題になる。そこで図-8に示した鉛直方向の流速分布に対して乱流の対数則を当てはめたところ良く一致した。ただし、図示の造波

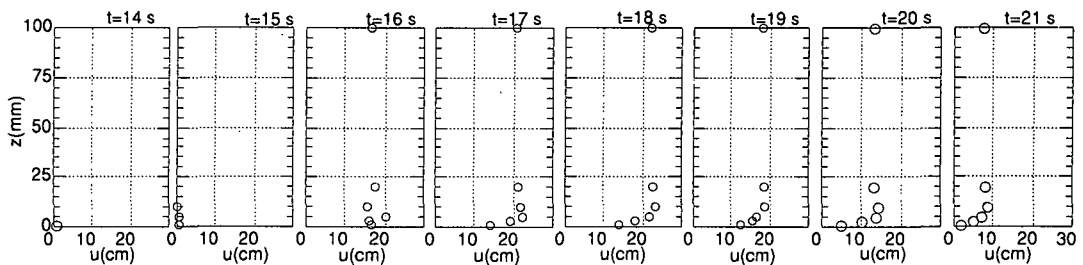


図-8 造波実験における流速分布 (周期 10 秒, 計測点⑧)

16 秒後の結果のように、第 1 波が計測点を通過する瞬間には、流速は大きい境界層が非常に薄いと考えられる流況が存在するため、このときは対数則には一致しない。抵抗則の適用については移動床実験の結果とともに考察することにする。

4. 津波による漂砂量

4.1 非定常流実験

移動床実験では全面に砂を敷き詰めトラップを設置して計測点⑩を岸向きに通過する漂砂量を測定した。実験は 1 つの周期に対して 3 回繰り返して再現性を確認した。発生させた最大のシールズ数は 2 程度であり、砂の移動形態はシートフローであった。また、トラップ位置と水槽中央部で計測した濁度計による濃度計測の結果では、水底から高さ 4 cm のセンサーには殆ど反応がなかったが、高さ 2 cm の位置では 20 kg/m³ 程度の濃度が計測された。実験に用いた砂の沈降速度は 1 cm/s 程度であり、トラップ長が 2 m であることからほとんどの浮遊砂をトラップしていることになる。実験結果の平均値は表-1 に示す通りであり、これに基づいて既往の漂砂量式の適応性を考察する。なお、表中の値は捕砂した全量の乾燥質量である。

表-1 非定常流実験における漂砂量 (g)

周期 (秒)	実験結果	(2) 式の結果		(4) 式の結果
		$k_s=d$	$k_s=5\psi d$	$k_s=5\psi d$ $\alpha=30$
80	305	70	200	309
100	655	200	620	664

漂砂量の算出に際して流れの非定常性から流況に応じた抵抗則を使い分ける必要がある。前述の通り本実験の流れは、流速の立上り部は非定常性を考慮した層流解で、流れが最大になった後は定常乱流解で表すことができた。これに応じた抵抗則でトラップ位置における摩擦速度を計算した結果が図-9 である。シールズ数 ψ の計算においては乱流の抵抗則に式 (1) を用い、相当粗度 k_s を平坦固定床の仮定に基づいて $k_s=d$ とした場合と移動床の効果を考慮した $k_s=5\psi d$ (Wilson・Nnadi, 1992) の場合を示した。

漂砂量則として局所漂砂量則を考え、まずはじめに Brown の式、即ち、

$$q=10\psi^{2.5}(sgd^3)^{0.5} \dots\dots\dots (2)$$

を適用したときの漂砂量フラックスを求めた。式中で、 q : 漂砂量フラックス (cm²/s)、 s : 底質の水中比重 (= 1.65)、 g : 重力加速度 (980 cm/s²)、 d : 底質の粒径 (0.0075 cm) である。漂砂量フラックス q の結果は図-9 に併記した。この結果から本実験の範囲では非定常性の

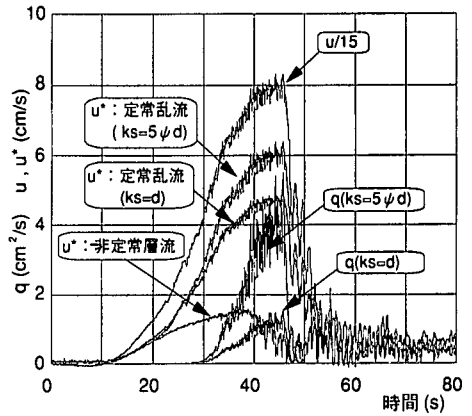


図-9 非定常流の摩擦速度と漂砂量フラックス (周期 80 秒, トラップ位置)

顕著な範囲では層流あるいは乱流のどちらと考えるも砂移動は生じないことが判る。ただし、限界シールズ数は $\psi=0.05$ として計算している。

トラップの開放時間に計測点⑩を通過する漂砂量フラックスの積分値 V (cm³/cm) に基づき次式によりトラップ捕砂量 M (g) を算出した結果は、表-1 の実験値に併記した通りである。

$$M=VB(1-\lambda)\rho_s \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 B : トラップ幅 (=9.5 cm)、 λ : 底質の空隙率 (= 0.4)、 ρ_s : 底質の比重 (=2.65) である。

計算結果のうち移動床の効果を見込んだ $k_s=5\psi d$ の結果が実験値と同程度の量になっている。

一方、シールズ数が大きくシートフローになる場合の漂砂量はシールズ数の 1.5 乗に比例することが指摘されている (沢本・山下, 1985; 高瀬ら, 1996)。そこで本実験の結果に対して、

$$q=\alpha\psi^{1.5}(sgd^3)^{0.5} \dots\dots\dots (4)$$

で漂砂量を算出すると、表-1 に示した通り周期 80 秒と 100 秒とでは若干異なるものの $\alpha=30$ 程度で実験値と一致することが判った。この結果は高瀬ら (1996) と良く一致している。

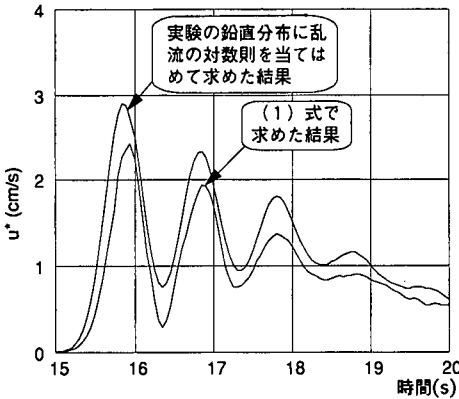
非定常流れによる漂砂量の算定に関する以上の考察から、本実験の範囲では抵抗則には定常乱流解を用いることができること、相当粗度には移動床の効果を見込むことが重要であること、 ψ の累乗の局所漂砂量則で漂砂量がほぼ表せることが示された。ただし、実津波で生じる 10 以上のシールズ数では式 (2) と式 (4) の漂砂量は大きく異なるため、津波に対するこれらの式の適用には更なる研究が必要であると考えらる。

4.2 造波実験

造波実験による漂砂量の計測結果は表-2 に示す通りである。表中の値は捕捉したアクリル粒子全量の乾燥質

表-2 造波実験における漂砂量 (g)

周期 (秒)	実験結果	(2) 式の結果	(4) 式の結果 ($\alpha=30$)
		$k_s=5\psi d$	$k_s=5\psi d$
10	10	8.5	13.5
20	8	2	12
30	2	0.25	6

図-10 造波実験の摩擦速度の経時変化
(周期 10 秒, トラップ位置)

量である。周期 10 秒および 20 秒の場合は最大流速は 50 cm/s 程度であり、このときにアクリル粒子の巻き上げが生じ、この浮遊砂 (アクリル) を伴うシートフロー状態であった。3.2 の流速の鉛直分布で示した通り、急激な境界層の発達があることが判っており、これにより底質が瞬時に巻き上げられていると考えられる。トラップ位置で計測したアクリル粒子の濃度は水底面から 2 cm の範囲が卓越していた。アクリル粒子の沈降速度は 1 cm/s 程度であり、トラップの長が 1 m であるから、ほとんどの浮遊砂 (アクリル) が捕捉されていると考えられる。この計測した漂砂量を基に既往の抵抗則、漂砂量則の適応を考察する。

波による流況は図-7 および図-8 に示した通り非定常状態であるが、流速の鉛直分布は 3.2 で述べたように流速の急変時を除けば乱流の対数則と良く一致した。そこで乱流の抵抗則で漂砂量を考察する。図-10 は粗面乱流の対数則を鉛直分布に当てはめて求めた摩擦速度の時系列である。ただし、相当粗度は $k_s=d$ として求めている。同図には平均流速を基にした式 (1) による結果も合わせて示している。本実験では平均流速を用いた式 (1) は小さなせん断力を与えるが傾向は同様である。トラップ位置での流速の鉛直分布の計測は周期 10 秒の場合のみで実施したため、この双方の違いを念頭において、式 (1) による摩擦速度で各周期の漂砂量の傾向を考察

する。表-2 には非定常流実験と同様に式 (2) と式 (4) で算出した漂砂量を比較して示している。ただし、式 (4) の係数 α は非定常実験の結果を踏まえて 30 としており、相当粗度も $k_s=5\psi d$ の場合のみを示した。

同表によれば式 (4) の結果が周期による漂砂量の変化の傾向を良く表している。ただし、抵抗則が厳密ではないので係数 α の値に関しては今回の研究では言及できない。周期 30 秒の場合には式 (2) あるいは式 (4) のどちらを用いても実験値とは異なる結果を示している。これはアクリル粒子の移動形態が必ずしもシートフローではないにも関わらず移動床の効果を考慮した相当粗度を用いていることに原因があると考えられる。

以上の結果から、移動形態がシートフローになる実験条件では、漂砂量は $\psi^{1.5}$ に比例する傾向が示された。

5. おわりに

本研究では、津波を想定した非定常な流況として非定常流と造波による半周期の波を対象に、固定床および移動床水理模型実験を実施して底面近傍流況を詳細に調べ、さらに漂砂量の計測結果に対する既往の漂砂量則の適応を検討した。その結果、漂砂量は局所漂砂量則で概ね表すことができることが判った。特に、漂砂量則については $\psi^{1.5}$ 則を支持する結果が得られていることもあり、実津波で生じるような高いシールズ数での適用について研究する必要があると考えられる。今後はこれらを踏まえ実津波による地形変化計算に対して適用し得る漂砂量則の検討を行いたい。

謝辞：本研究を行うに際し東北大学工学部の首藤伸夫教授、田中仁教授、今村文彦助教授、高橋智幸助手から貴重なご指導を頂いたことを記して謝意を表する。

参考文献

- 佐藤慎司 (1995): 波の分裂と碎波を考慮した津波の数値計算, 海岸工学論文集, 第 42 巻, pp. 376-380.
- 沢本正樹・山下俊彦 (1985): 波による半周期漂砂量, 土木学会論文集, 第 363 号/II-4, pp. 195-204.
- 首藤伸夫 (1989): 津波による土砂の輸送, 東北大学工学部津波防災実験所研究報告, 第 6 号, pp. 1-56.
- 高瀬智壮・高橋智幸・首藤伸夫 (1996): 津波による土砂移動の実験, 東北支部技術研究発表会講演概要, pp. 176-177.
- 高橋智幸・今村文彦・首藤伸夫 (1991): 土砂移動を伴う津波計算法の開発, 海岸工学論文集, 第 39 巻, pp. 231-235.
- 高橋智幸・今村文彦・首藤伸夫 (1993): 津波移動モデルの適用性と再現性の検討, 海岸工学論文集, 第 40 巻, pp. 171-175.
- 田中仁・Thu, A (1993): 全ての flow regime に適用可能な波・流れ共存場抵抗則, 土木学会論文集, No. 467/II-23, pp. 93-102.
- Wilson, K. C., F. N. Nnadi (1992): Motion of mobile beds at high shear stress, Proc. 23rd Int. Conf. on Coastal Eng., pp. 2917-2925.