

底質の移動限界と浮遊砂フラックスにおける吹送流の影響

鵜崎賢一*・田畑敦圭**・戸谷昭浩***・松永信博****

本研究の目的は、暴浪時の碎波帯における底質移動機構を対象として、風によって直接駆動される吹送流の影響を評価することである。本研究では、造波した波に風応力を作用させることで碎波帯における風波と吹送流の共存場を再現し、浮遊砂濃度と流速の測定を行った。そして、共存場における底質の初期移動限界を調べ、シールズ数に平均流速を考慮することで初期移動限界の新たな評価方法を提案した。また、浮遊砂濃度の鉛直分布と流速分布を計測して浮遊砂フラックスを算定し、底質の巻き上げは波に依存するが、その輸送は吹送流によるものが大部分であることを示すとともに、浮遊砂フラックスの算定方法を提案した。

1. はじめに

海浜変形を精度よく予測するためには、底質の移動機構を精確に把握することが必要である。底質の移動機構については古くから数多くの研究がなされてきたが、その多くは波のパラメーターによってまとめられてきた。近年、山下ら (1998) は現地観測ならびに数値計算結果をもとに、風によって直接駆動される吹送流が底質輸送に及ぼす影響を指摘している。また馬場ら (1999) は、現地観測結果をもとに、とくに暴浪時にはその影響が大きくなることを示している。

底質移動でひとつの問題となるのはいつ、どこで底質が動きを始めるかである。つまり、底質の初期移動限界を調べることは重要である。底質の移動形態、その遷移条件、初期移動限界については土屋・坂野 (1987) が有用な知見を与えているが、いずれも波のパラメーターによってまとめられている。田中・Thu (1993), Tanaka・Dang (1995) は、波と流れの共存場における底面の摩擦係数の算定式を導出し初期移動限界を評価している。しかしながら一方向流を対象としており、岸沖方向の吹送流のように補償流を伴うようなせん断乱流には適用できない。そこで本研究では、共存場において底質の初期移動を調べ、シールズ数に底面近傍における平均流速を考慮することで初期移動限界を評価した。

また暴浪時の沿岸域では、高波浪と碎波によって底質が巻き上げられ、浮遊砂が卓越しているものと考えられる。柴山・Winyu (1993), Winyu・Shibayama (1994) は造波水槽を用いて浮遊砂濃度分布の鉛直プロファイルの詳細に計測し、その定量化を行っているが、流れの影響については考慮していない。そこで本研究では、風波

と吹送流の共存場において浮遊砂濃度の鉛直分布と流速分布を調べ、浮遊砂フラックスを算定した。そして、その波動成分と平均流成分を調べ、浮遊砂濃度は波に依存するが、その輸送は主に吹送流に起因することを示すとともに、浮遊砂フラックスの算定方法を提案した。

2. 実験方法ならびに実験条件

(1) 移動限界実験

図-1 に実験装置の概要図を示す。実験には、長さ 32.0 m, 幅 0.60 m, 高さ 0.94 m の風洞付造波水槽を用いた。水深 h は 20.0 cm に設定された。風の取り込み口から風下方向に x 軸を、横断面中央から水平方向に y 軸を、静水面から鉛直上向きに z 軸を設定した。 $x=17.0$ m から幅 15.0 m の区間に厚さ 10.0 cm で中央粒径 $d_{50}=0.359$ mm の砂 (熊本硅砂鉱業, K6 砂) を敷き、 $x=26.5$ m から 1.0 m の幅で実験砂を敷いた。また、容量式波高計を用いて水面変動を、ベーン式風速計を用いて風速を測定し、 $x=27.0$ m, $z=-18.0$ cm の位置において、電磁流速計を用いて流速の x 方向成分と y 方向成分を測定した。表-1 に実験条件を示す。実験は、実験砂の粒径 d_{50} を 3 通り、断面平均風速 U_m を 4 通り、造波周期 T を 5 通り変えて合計 60 通り行われた。表中の S_* は無次元粒径であり、式 (1) によって定義される。

g は重力加速度、 ν は水の動粘性係数である。表中の $T_{1/3}$, $H_{1/3}$, L は、それぞれ有義波周期, 有義波高, 波長を表す。

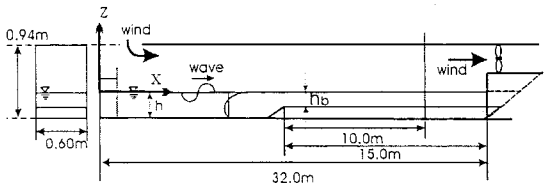


図-1 実験装置概要

* 正会員 博(工) (独)港湾空港技術研究所 海洋水工部 沿岸環境領域 日本学術振興会特別研究員
** 修(工) 日本ミクニヤ(株)
*** 学生会員 九州大学大学院総合理工学府
**** フェロー 工博 九州大学教授 大学院総合理工学研究院

表-1 実験条件

Run	d_{50} (mm)	S_*	U_{*b} (m/s)	T (s)	$\bar{u}_s$ (m/s)	$\bar{u}$ (m/s)	ϕ	移動形態	Run	d_{50} (mm)	S_*	U_{*b} (m/s)	T (s)	$\bar{u}_s$ (m/s)	$\bar{u}$ (m/s)	ϕ	移動形態
1			0.4	2.6	-0.879	1.71E-02	×	21				0.4	2.61	1.19	1.22E-02	×	21
2			1.0	10.4	-1.17	9.63E-02	○	22				1.0	21.3	0.924	1.28E-01	○	22
3			1.5	27.2	-3.22	3.73E-01	○	23				1.5	23.6	0.0153	1.18E-01	○	23
4			2.0	28.2	-3.87	3.86E-01	○	24				2.0	29.1	-0.218	1.57E-01	○	24
5			3.0	26.7	-5.88	3.10E-01	○	25				3.0	24.9	-2.94	1.00E-01	○	25
6			0.4	11.6	-2.16	8.35E-02	×	26				0.4	6.25	1.25	1.25E-02	×	26
7			1.0	19.7	-2.46	1.66E-01	○	27				1.0	18.4	0.819	8.59E-02	○	27
8			1.5	23.5	-2.2	1.79E-01	○	28				1.5	18.4	-0.00783	1.08E-01	○	28
9			2.0	29.0	-3.18	2.78E-01	○	29				2.0	27.8	-0.67	9.58E-02	○	29
10			3.0	25.7	-6.47	2.32E-01	○	30				3.0	25.4	-4.1	6.71E-02	○	30
11			0.4	15.2	-4.62	1.74E-01	○	31				0.4	16.3	-1.1	4.82E-02	○	31
12			1.0	24.6	-5.76	3.32E-01	○	32				1.0	29.3	-1.47	1.36E-01	○	32
13			1.5	28.4	-5.87	3.19E-01	○	33				1.5	29.5	-1.43	1.12E-01	○	33
14			2.0	28.1	-5.2	2.75E-01	○	34				2.0	27.8	-1.56	8.07E-02	○	34
15			3.0	25.9	-7.04	2.22E-01	○	35				3.0	23.0	-6.53	7.24E-02	○	35
16			0.4	19.4	-5.73	3.36E-01	○	36				0.4	21.5	-3.29	9.24E-02	○	36
17			1.0	24.4	-6.05	3.42E-01	○	37				1.0	27.1	-3.39	1.16E-01	○	37
18			1.5	27.5	-6.58	3.05E-01	○	38				1.5	28.1	-3.17	1.04E-01	○	38
19			2.0	27.3	-7.98	2.55E-01	○	39				2.0	25.0	-5.12	7.51E-02	○	39
20			3.0	23.3	-9.53	2.32E-01	○	40				3.0	22.3	-7.76	9.05E-02	○	40

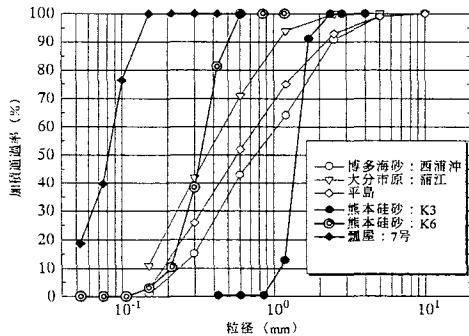


図-2 粒径加積曲線

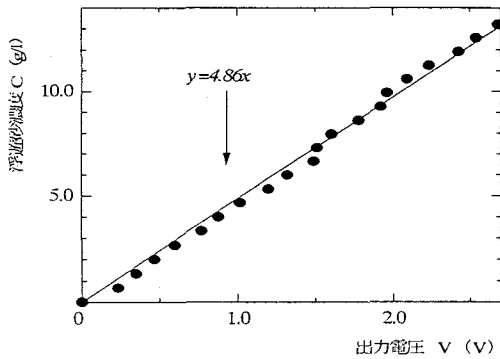


図-3 濁度計の検定

$$S_* = \frac{d_{50} \sqrt{sgd_{50}}}{4\nu} \quad (1)$$

L は, h と $T_{1/3}$ を用い, 微小振幅波理論による分散関係式から求められた. $\bar{u}_s$ は, ゼロ・アップ・クロス法を用い, 有義波高の算定と同様にして算定された流速振幅を示す.

$\bar{u}_b$ は, 微小振幅波理論で算定された流速振幅であり, 式(2)で与えられる.

$$\bar{u}_b = a\sigma \frac{\cosh k(h+z)}{\sinh kh} \quad (2)$$

ここで, k は波数, σ は角振動数を示す. $\bar{u}$ は平均流速を示す. ϕ はシールズ数であり, 式(3)で定義される.

$$\Phi = \frac{1}{2} f \bar{u}_b^2 / sgd_{50} \quad (3)$$

ここで, $\bar{u}_b$ は底面近傍の流速振幅, s は土粒子の水中比重 ($=\rho_s/\rho_w-1$), f は底面の摩擦係数であり, Swart (1974) による算定式(4)から求められた.

$$f = 5.21 \exp \left\{ \left(\frac{\bar{u}_b}{\sigma k_s} \right)^{0.194} - 5.98 \right\} \quad (4)$$

ここで, k_s は粗度であり, 65%粒径の2倍とした. 各実験において目視によって底質の移動形態を判断し, ○: 移動, ◎: 移動(浮遊移動), ×: 移動なしに分類した. 図-2に実験砂の粒径分布を示す. 図中には比較のために海砂の粒径分布も示してある. 図から, いずれの実験砂も海砂と比べてほぼ単一砂とみなせることがわかる.

(2) 浮遊砂移動実験

実験には, 移動限界実験において用いた風洞付造波水槽を使用した. $x=27$ m の位置において ADV を用いて流速を, 透過光測定方式の濁度計を用いて濁度を, 鉛直方向に 2 cm 間隔で 6 ~ 8 点において測定した. 測定された濁度から浮遊砂濃度を求めるため, ビーカーに水と定量の実験砂を入れ, スターラーで攪拌しながら濁度を計測し, その出力と投入量から濁度計の検定を行った. 図-3に検定結果を示す. 濁度と浮遊砂濃度は非常に相関が高く, 最小自乗法によれば $C(g/l)=4.86V(V)$ という関係となることがわかった. 表-2に実験条件を示す. 実験は, 造波周期を 0.4, 1.5, 3.0 s と 3 通り, 風速を 4 通り変化させ, 合計 12 通り行われた. h/L , H/L はそ

れぞれ相対水深、波形勾配を表している。 Ur はアーセル数であり、式(5)で定義される。

$$Ur = \frac{(H/h)^3}{(H/L)^2} = \frac{HL^2}{h^3} \dots \dots \dots (5)$$

表中の $\langle \rangle$ は補償流の範囲で鉛直方向に平均された量を、 $-$ は時間平均量を、 $\sim$ は波動成分を表す。

3. 実験結果ならびに考察

(1) 底質の移動限界における吹送流の影響

図-4に、シールズ数と無次元粒径の関係を示す。図中には、比較のためにシールズ曲線と従来の研究結果を併せて示している。図中のシールズ曲線はTanaka・Dang (1995) による式(6)から求められた。

$$\tau_c^* = 0.055 \{1 - \exp(0.09 S_*^{0.58})\} + 0.09 S_*^{-0.72} \quad (6)$$

図中の $\square$, $+$ はTanaka・Dang (1995) による実験結果、破線はKommar・Miler (1975) によるシートフロー発生条件、一点鎖線は土屋・坂野 (1987) による領域区分を示す。本実験のデータは、造波のみの場合の実験結果で、 $\bar{u}_s$ を用いて算定された値であり、 $\circ$ と $\times$ で示されている。図から、本実験結果は他の実験結果とはほぼ一致し、その初期移動限界はシールズ曲線によってよく表されることがわかる。しかしながら、 $S_* = 56.5$ の場合は若干一致しない場合がある。

図-5に、有義流速振幅 $\bar{u}_s$ と微小振幅波理論によって求められた $\bar{u}_b$ との関係を、移動形態と使用した測器ごとに示す。実験データは、 $\bar{u}_b < 25$ cm/sでは $\bar{u}_b = \bar{u}_s$ となるものの、 $\bar{u}_b > 25$ cm/sでは $\bar{u}_s \approx 30.0$ cm/sとなることがわかる。この傾向は測器にも移動形態にもよらないことから、 $\bar{u}_s$ の値がある程度以上大きくならない理由は、碎波あるいは底面摩擦によるエネルギー・ロスによるためであると考えられる。

流速 u を、吹送流成分を表す時間平均量 $\bar{u}$ と波動成分 $\tilde{u}$ に分割し、 $\tilde{u}$ の1次の項の時間平均が0になると仮定すると、 u のr.m.s.値は式(7)で表される。

$$\sqrt{u^2} = \sqrt{\bar{u}^2 + 2\bar{u}\tilde{u} + \tilde{u}^2} = \sqrt{\bar{u}^2} \sqrt{1 + \frac{\tilde{u}^2}{\bar{u}^2}} \dots \dots (7)$$

式(3)において $\hat{u}_b = \alpha \sqrt{\bar{u}^2}$ (α は任意定数)とし、初期移動限界がシールズ曲線で記述できるように α を算定したところ、本実験結果では $\alpha = 1.4$ であった。図-6に、新たに評価された ϕ と S_* の関係を示す。図から、風波と吹送流の共存場における底質の移動形態は、新たに評価された ϕ によってよくまとめられることがわかる。

(2) 浮遊砂フラックスにおける吹送流の影響

図-7に、Run 1～12における浮遊砂濃度の鉛直分布を示す。Run 1～4においては、波高が小さく周期も短いために底質の巻き上がりが少なく、全体的に濃度が

低いことがわかる。条件によっては、表層に近づくにしたがって濃度が若干高くなる場合もあるが、これは碎波による空気の気泡の影響と考えられる。Run 5～8においては、底面近傍において巻き上げによる濃度の増加が認められるが、全体的にはRun 1～4と同様、鉛直方向に一様性が高いことがわかる。風速の増加とともに波高も大きくなり浮遊砂濃度も増加するが、Run 8では逆に濃度低下が認められる。Run 9～12においても底面近傍での濃度の増加が認められるが、全体的には一様性が高いことがわかる。また、風速の増加とともに濃

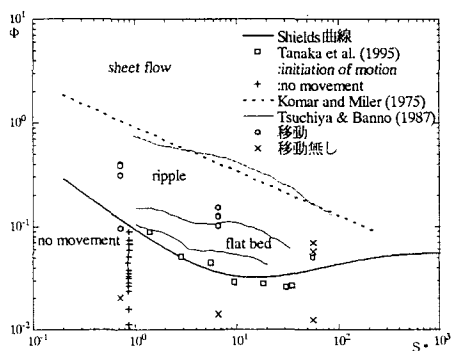


図-4 波のみの場合における初期移動限界

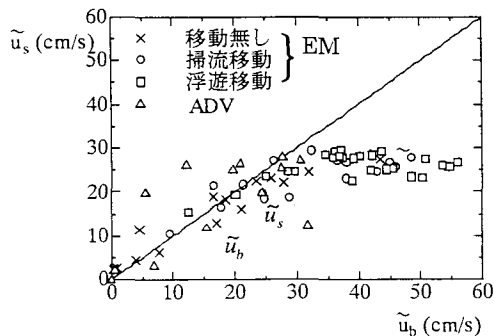


図-5 実測流速 $\bar{u}_s$ と微小振幅波理論による流速 $\bar{u}_b$ の関係

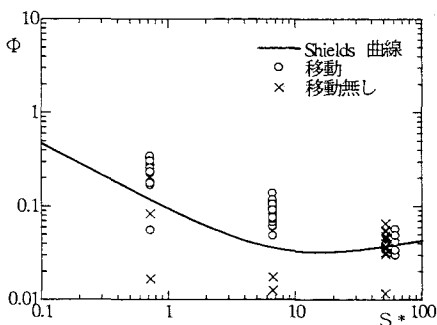


図-6 風波と吹送流の共存場における初期移動限界

表-2 実験条件

Run	h (m)	d_{50} (mm)	U_m (m/s)	T (s)	$\bar{T}_{1/3}$ (s)	$\bar{H}_{1/3}$ (s)	$\bar{L}_{1/3}$ (m)	h/L	H/L	C_b (g/l)	Ur	$\langle \bar{C} \rangle$ (g/l)	$\langle \bar{u} \rangle$ (m/s)	$\langle \bar{u} \rangle \times \langle \bar{C} \rangle$ (m/s * g/l)	$\langle \bar{u} \bar{C} \rangle$ (m/s * g/l)	$\langle \bar{u} \bar{C} \rangle$ (m/s * g/l)	
1	0.20	0.359	0	0.4	0.527	0.842	0.431	0.464	1.95E-02	0.544	1.95E-01	0.559	0.175	9.81E-02	9.27E-02	3.96E-04	9.73E-02
2			4.87		0.69	4.35	0.702	0.285	6.19E-02	0.269	2.68E+00	0.273	-1.4	-3.81E-01	-2.54E-01	1.54E-03	-2.58E-01
3			10.2		0.752	8.26	0.805	0.248	1.03E-01	0.924	6.69E+00	0.995	-3.61	-3.59E+00	-3.60E+00	-1.78E-02	-3.58E+00
4			17.6		0.467	15.7	0.34	0.589	4.61E-01	0.62	2.26E+00	3.13	-8.29	-2.60E+01	-2.76E+01	3.88E-02	-2.76E+01
5			0	1.5	1.55	7.88	2.05	0.098	3.85E-02	0.57	4.13E+01	2.6	-0.58	-1.50E+00	-4.01E+00	9.70E-02	-5.71E+00
6			4.87		1.62	10.1	2.15	0.093	4.70E-02	0.35	5.86E+01	3.22	-2.95	-9.51E+00	-9.49E+00	3.61E-02	-9.51E+00
7			10.2		1.63	6.6	2.17	0.092	3.06E-02	5.27	3.88E+01	5.07	-5.45	-2.76E+01	-2.55E+01	5.00E-01	-2.60E+01
8			17.6		1.55	6.3	2.05	0.098	3.08E-02	2.3	3.31E+01	2.25	-7.17	-1.61E+01	-1.82E+01	5.04E-02	-1.83E+01
9			0	3.0	3.29	3.6	4.55	0.044	7.84E-03	2.92	9.23E+01	4.47	-1.82	-8.13E+00	-1.05E+01	-8.07E-02	-1.06E+01
10			4.87		3.96	8	5.5	0.0364	1.46E-02	4.76	3.03E+02	4.3	-1.65	-7.10E+00	-7.92E+00	6.38E-02	-7.90E+00
11			10.2		3.78	8.9	5.23	0.0383	1.71E-02	3.69	3.05E+02	3.64	-5.62	-2.05E+01	-1.99E+01	4.35E-01	-2.04E+01
12			17.6		3.12	8.2	4.31	0.0464	1.90E-02	3.37	1.90E+02	3.34	-11.1	-3.72E+01	-3.35E+01	4.05E-02	-3.35E+01

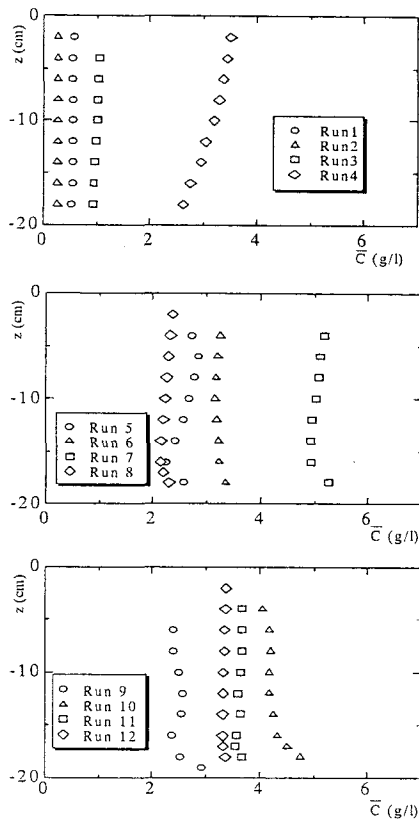


図-7 浮遊砂濃度の鉛直分布

度も増加する傾向にはあるが、Run 11,12では若干の濃度低下が認められる。こうした濃度低下の原因については今後詳細な研究を行っていく必要がある。

図-8(a)に、Run 10における底面近傍の浮遊砂濃度のスペクトルを、(b)に水面変動のスペクトルを示す。図から、浮遊砂濃度も水面変動の卓越周波数に応じた周期変動を繰り返していることがわかる。図-9(a)に、Run 10における位相平均された水面変動を、(b)に浮遊砂濃度を示す。図から、底質は主に波によって巻き上げられることがわかる。また、水面波の波頂が到達した少し後に底質が巻き上げることがわかる。

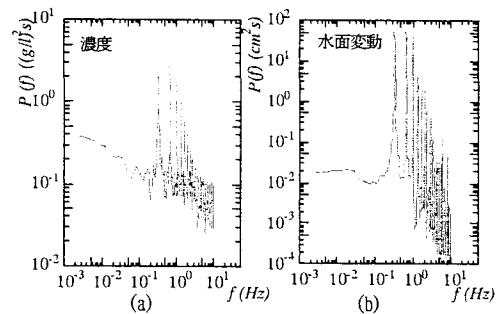
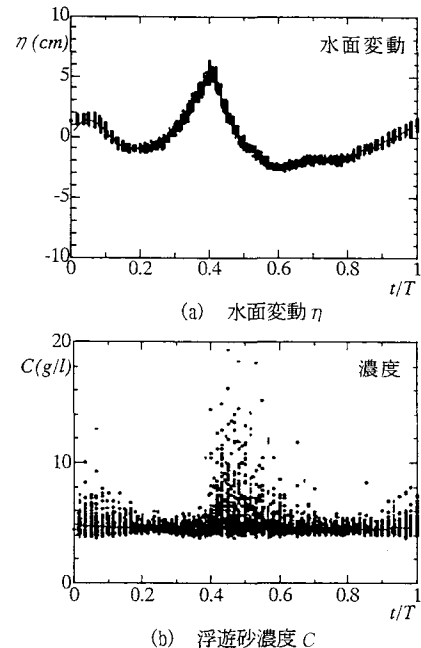
図-8 浮遊砂濃度 C と水面変動 η のパワースペクトル図-9 位相平均された水面変動 η と浮遊砂濃度 C

図-10に、補償流の範囲で鉛直方向に平均された浮遊砂濃度 $\langle \bar{C} \rangle$ とアーセル数 Ur との関係を示す。図から、 $\langle \bar{C} \rangle$ は Ur によく依存し、最小自乗法によれば両者の間には式(8)の関係が成り立つ。

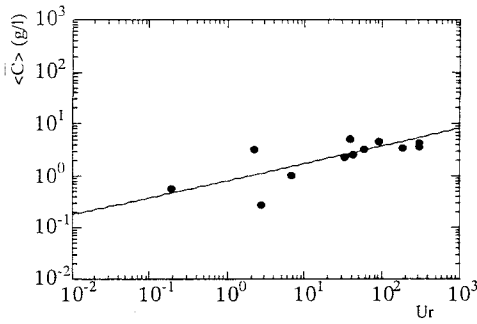


図-10 鉛直方向に平均された浮遊砂濃度 $\langle C \rangle$ とアーセル数 U_r の関係

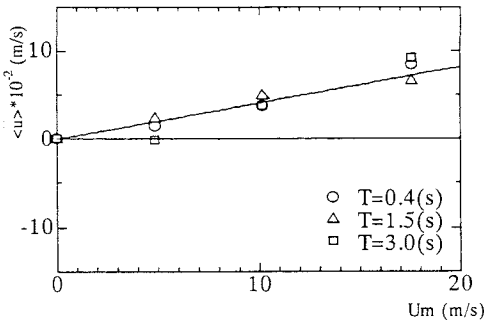


図-11 鉛直方向に平均された浮遊砂濃度 $\langle u \rangle$ と断面平均風速 U_m の関係

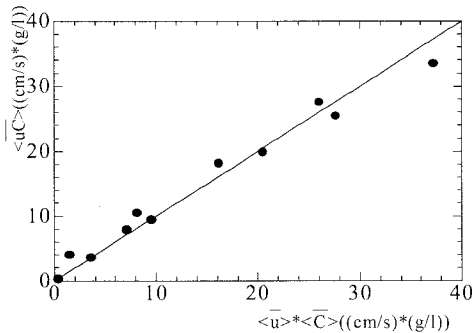


図-12 鉛直方向に平均された浮遊砂フラックス $\langle uC \rangle$ と平均流によるフラックス $\langle u \rangle \times \langle C \rangle$ の関係

$$\langle C \rangle = 0.82 U_r^{1.3} \dots \dots \dots (8)$$

このことから、波高 H 、波長 L 、水深 h が決定されれば $\langle C \rangle$ を概略算定することが可能となった。図-11に補償流の範囲で鉛直方向に平均された平均流速 $\langle u \rangle$ と断面平均風速 U_m との関係を示す。平均流速は沖向きを正に取り直してある。図から、 $\langle u \rangle$ は U_m によく依存し、最小自乗法によれば両者の間には式 (9) の関係が成り立つ。

$$\langle u \rangle = 4.74 \times 10^{-2} U_m \dots \dots \dots (9)$$

このことから、 U_m が決定されれば $\langle u \rangle$ が算定できる。図-12に、 $\langle uC \rangle$ と $\langle u \rangle \times \langle C \rangle$ の関係を示す。図から、両者はほぼ勾配 1 の線形関係にあり、 $\langle uC \rangle \approx \langle u \rangle \times \langle C \rangle$ となることがわかる。このことから、 $\langle uC \rangle$ の成分として波動成分は小さく、その大部分が平均流成分であることがわかる。また、 $\langle u \rangle$ ならびに $\langle C \rangle$ が決定されると $\langle uC \rangle$ が算定できる。以上のことから、波高 H 、波長 L 、水深 h ならびに風速 U_m が決定されれば、 $\langle uC \rangle$ が算定できることになる。

4. 結 論

風波と吹送流の共存場において底質の初期移動を調べ、シールズ数に平均流速を考慮することで新たな評価方法を提案した。また、浮遊砂濃度分布と流速分布を調べ、浮遊砂の輸送は平均流に依存することを示し、波と風速から浮遊砂フラックスを算定する方法を提案した。

最後に、本研究の遂行に際しては、日本文理大学工学部建設都市工学科 植田教授ならびに植田研究室の4年生諸氏に多大な援助を頂いた。ここに、心から感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 柴山知也・R. Winyu (1993)：砕波帯を含む浮遊砂濃度の鉛直分布の評価，海岸工学論文集，第40巻，pp. 306-310.
- 田中仁・A. Thu (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.
- 土屋義人・坂野雅人 (1987)：漂砂形態とその発生領域，第34回海岸工学講演会論文集，pp. 222-226.
- 馬場康之・今本博健・山下隆男・吉岡洋 (1999)：砕波帯近傍における平均流の発生要因の分離，海岸工学論文集，第46巻，pp. 196-200.
- 山下隆男・加藤茂・路明・安田孝志・飯野智彦 (1998)：ADCPにより長期連続観測した海浜流の鉛直分布とその強風，波浪応答特性，海岸工学論文集，第45巻，pp. 201-205.
- Komar, P.D. and M.C. Miller (1975)：The initiation of oscillatory ripple marks and the development of plane-bed at high shear stress under waves, J.Sed. Pet., Vol.45, pp. 697-703.
- Swart, D.H. (1974)：Offshore sediment transport and equilibrium beach profiles, Delft Univ. Tech. Diss., Delft Hydr. Lab. Publ. 131, 244p.
- Tanaka, H. and V. T. Dang (1995)：Initial Motion of Sediment under Waves and Wave-current Combined Motions, Coastal Engineering, 25, pp. 153-163.
- Winyu, R. and T. Shibayama (1994)：Suspended sediment concentration profiles under non-breaking and breaking waves, Coastal Engineering, pp. 2813-2827.