

不規則波による二次元海浜変形と岸沖漂砂

大塚行則*・三村信男**・渡辺 晃***

1. 緒 言

二次元海浜変形に関する研究は古くから数多く行なわれてきたが、その大部分は規則波を用いた移動床実験に基づいている。しかし、それらの結果と現地海岸での現象の間には、例えば海浜変形パターンの分類や砂漣の特性などのように、単純な相似則では解釈できない差異が多々あることがわかってきた。このような差異は、いわゆる縮尺効果の他に波の不規則性、現地での現象の三次元性等によるものと考えられるが、各効果の寄与については明らかにされていない。波の不規則性の効果に対しては、風波を用いて沿岸砂洲の発生限界を検討した土屋・稻田の研究¹⁾、不規則波による漂砂量を論じた Wang・Liang²⁾の研究等があるが、われわれの知識は部分的なものに限られている。

本研究では、特に波の不規則性に着目し、不規則波による二次元海浜変形実験を行ない、その下での海浜過程の特性を明らかにする。とりわけ、実用上もっとも基本

的な課題の一つと考えられる「海浜過程を支配する代表波」に対する検討に焦点を合せて議論を進める。

2. 実験条件および方法

実験には長さ 19m、深さ 1m、幅 0.8m の二次元不規則波水路を用い、豊浦砂（中央粒径 $d_{50}=0.18\text{mm}$ 、実験シリーズ A）と粗砂（ $d_{50}=0.75\text{mm}$ 、実験シリーズ B）の 2 種類の底質に対する二次元海浜変形実験を行なった。沖側平坦部の水深は 45cm に統一し、初期底面勾配は 1/10 と 1/20 の 2 種類とした。入射波としては Bretschneider・光易型スペクトルをもつ不規則波を用い、3 種類の代表周期（有義波周期 $T_{1/3}$ にして 0.9～1.9s）に対してそれぞれ代表波高を 2 段階（有義波高 $H_{1/3}$ にして 3.4～11.9cm）に変化させ、合計 24 ケースの実験を行なった。その実験条件を表-1 に示す。Bretschneider・光易型スペクトルは本来風波に対して提案されたものであるが、うねり性の波浪においても観測される例が少なくないという指摘がある³⁾ことから、代

表-1 実験条件

シリーズ A 豊浦砂 ($d_{50}=0.18\text{mm}$)						シリーズ B 粗砂 ($d_{50}=0.75\text{mm}$)					
ケース	初期勾配	有義波		平均波		ケース	初期勾配	有義波		平均波	
		$(H_{1/3})_0$ (cm)	$T_{1/3}$ (s)	$(H_m)_0$ (cm)	T_m (s)			$(H_{1/3})_0$ (cm)	$T_{1/3}$ (s)	$(H_m)_0$ (cm)	T_m (s)
A-1	1/20	5.3	1.9	3.5	1.5	B-1	1/20	5.4	1.8	3.5	1.6
2	"	6.2	1.3	4.0	1.1	2	"	6.1	1.4	4.0	1.2
3	"	3.4	0.9	2.2	0.8	3	"	3.4	0.9	2.2	0.8
4	"	8.7	1.3	5.3	1.1	4	"	8.7	1.3	5.3	1.1
5	"	11.9	1.4	7.7	1.2	5	"	11.9	1.4	7.8	1.2
6	"	9.5	1.8	6.5	1.7	6	"	9.5	1.8	6.5	1.7
7	1/10	6.0	1.9	4.1	1.6	7	1/10	5.9	1.9	4.0	1.6
8	"	6.2	1.4	4.0	1.2	8	"	6.2	1.4	4.0	1.2
9	"	3.5	0.9	2.3	0.8	9	"	3.5	0.9	2.3	0.8
10	"	9.7	1.3	6.0	1.2	10	"	9.7	1.3	5.9	1.2
11	"	9.3	1.8	6.3	1.6	11	"	9.2	1.9	6.3	1.6
12	"	11.0	1.4	7.3	1.3	12	"	10.9	1.4	7.2	1.2

(添字 0 は、沖波に換算した値であることを示す。)

* 正会員 工修 鹿児島県 志布志港湾事務所
** 正会員 工博 茨城大学助教授 工学部建設工学科
*** 正会員 工博 東京大学教授 工学部土木工学科

表的な入射波スペクトルとして採用した。

実験における測定項目は、① 縦断地形の時間変化、② 入射波の諸量と反射率の時間変化、③ 斜面上各点での水面波形と底面近傍の流速、④ 砕波点の分布 等である。

海浜の縦断地形は、初期砂面に波を作用させて3時間および9時間経過した時点で、電気抵抗式砂面計により測定した。縦断地形のデータを用いて、渡辺らと同様な方法⁴⁾で漂砂量の岸沖分布を算定した。入射波の諸量と反射率は、沖側一様水深部において得られたデータから合田らの方法⁵⁾を用いて入射波を分離した上で算定した。その他、今回の実験では、超音波流速計を用いて底面近傍の流速場を測定したり、VTRを用いて砕波点や底質の移動状況を記録するなど、なるべく多角的で精度のよいデータを取得するべく努めた。

3. 波浪・流速場の特徴

実験結果の最初に、海浜変形をひき起す外力である波浪・流速場の特徴について述べる。

(1) 入射波スペクトルと反射率

図-1に、ケース A-11における入射波のスペクトルの時間変化を示す。図からわかる通り、入射波はほぼ Bretschneider・光易型の目標スペクトルと一致しており、かつ、時間的な変化も小さい。代表波高の大きいケースでは、造波機の性能上代表周期を小さくできなかったが、全体としてはほぼ目標通りの入射波条件が実現されていた。一方、波の反射率は概ね時間の経過とともに増大する傾向を示した。不規則波においても波の反射特性と地形変化とは関連が強いといえる。

(2) 沖浜帯と砕波帯の区分

砕波の形態や発生位置が地形変化を支配する重要な要因であることは、規則波の実験結果を通じて多々指摘されてきた。しかし、不規則波では種々の波が混在するため砕波点は固定しない。図-2は、VTRの記録を解析して得た砕波点の分布の一例であるが、事実砕波点は相当広範囲に広がっており、特定の砕波点をきめにくい。一方、図-3はケース A-11における砕波帯付近の波浪・流速場の特性量の分布を示している。図中で、 $\hat{U}_{1/3}$ 、 U 、 $\bar{\eta}$ は各々底面近傍の有義流速振幅、定常流成分そして平

均水位である。

これをみると、最大の waveset-down が生じる地点と沖向き定常流が流速を増す地点とはほぼ一致しており、さらに、波高や軌道流速が最大になる地点も比較的近くに位置している。これを砕波点の分布と比べると砕波している波の割合が 10~20% 程度の地点に対応している。波浪・流速場の特

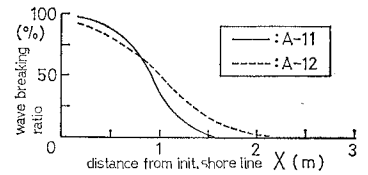


図-2 砕波点の分布

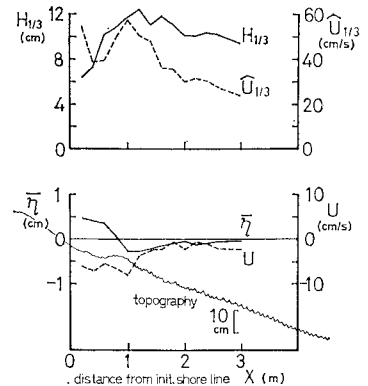


図-3 砕波帯付近の波浪・流速場 (ケース A-11)

微でみる限り、不規則波の下での砕波帯は、上の地点に浅の領域であると考えることができる。

(3) 水面波形と底面流速

不規則波の水面波形と底面流速との関係を、底面付近の水粒子の軌道全振幅を指標にして調べた。ゼロアップクロス法で定義した水面波の代表量(有義波、平均波)を用いて、利穂ら⁶⁾と同様に次式で有限振幅性を考慮した底面軌道全振幅 d'_0 を求めた。

$$\left. \begin{aligned} d'_0 &= 4\alpha_H(1-\alpha_H)d_0 \\ \alpha_H &= \eta_c/H \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3.1)$$

ここで、 d_0 は微小振幅理論で求められる底面軌道全振幅、 η_c は平均水面からの波頂高である。

一方、実測した底面付近の流速波形から、次の式によって底面軌道全振幅 d'_0 を算定した。

$$d'_0 = \hat{U} T / \pi \dots\dots\dots (3.2)$$

ここで、 $\hat{U}$ は水面波形と同様に流速波形データをゼロアップクロス法によって処理して算定される流速振幅の代表量であり、 T はその代表波の周期である。

このようにして求まる d'_0 と d'_0 とを比較したところ、ほとんどのケースで実測流速に基づく d'_0 の方が水面波形による d'_0 より大きくなっており、平均的にみるとほぼ 1.1~1.4 倍の範囲にあった。また、岸沖方向の場所的な変動も大きく、式(3.1)だけで波の有限振幅性や不規則性の影響を考慮することには問題があるといえる。

4. 海浜変形過程に関する考察

不規則波の取り扱いには、スペクトルによるものや波

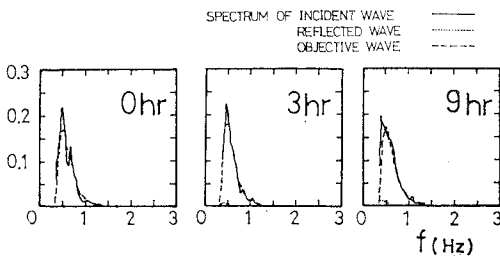


図-1 スペクトルの時間変化 (ケース A-11)

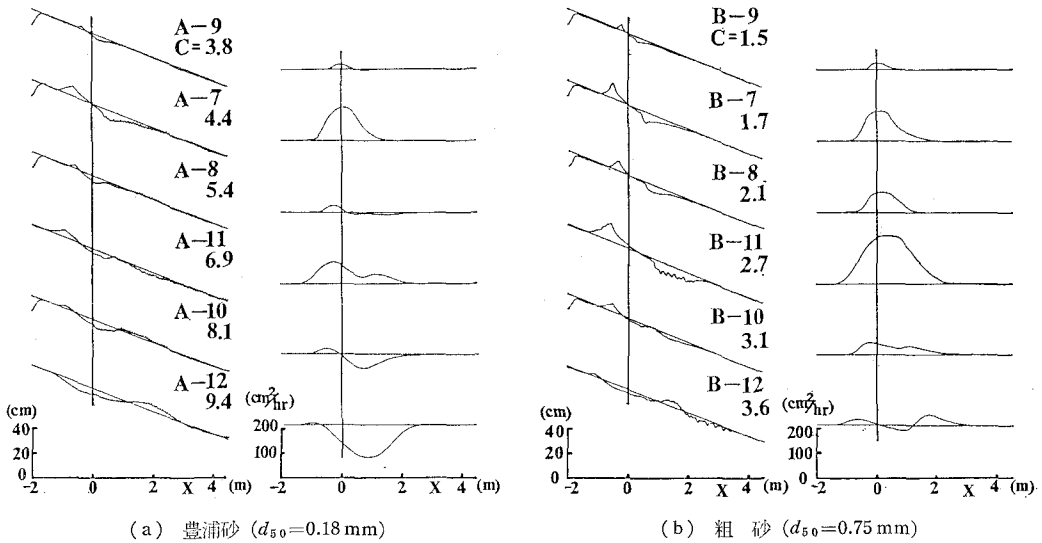


図-4 縦断地形（造波9時間後）と漂砂量分布（0～3時間）

別解析法等いくつかのアプローチが考えられるが、本論文では既に述べたように「海浜過程を支配する代表波」を明らかにするという視点から検討を加える。具体的には、代表波として有義波と平均波を取り上げ、以下に示す諸点について規則波による実験結果と比較検討した。ここで、砂澁の特性や漂砂量に関連の深い底面軌道全振幅やシールズ数は、今回の研究では底面付近の流速の実測値を用いて評価し、その方が現実の物理過程をより忠実に示すともいえる。しかし、従来の規則波実験との対応を考え、ここではこれらの諸量も代表水面波の諸元を用いて算定することにした。

(1) 海浜の縦断地形変化

まず最初に海浜の縦断地形に検討を加える。図-4は初期底面勾配が1/10の実験シリーズに対する縦断形状と漂砂量分布とを示したものである。実験ケースは、堀川・砂村らの海浜変形パターン分類指標 C^{D} の順に並べられている（代表波としては平均波を用いた）。 C の値が大きくなるにつれて、地形は規則波の場合と同様、タイプⅠ（堆積型）からタイプⅡ（中間型）、タイプⅢ（侵食型）の特徴を示すように推移している。ただ、規則波の実験結果⁹⁾と比べて、 C の値が大きくなっても岸側にバームが形成され完全な侵食型とはなりにくい。これは入射波群の中に含まれる小さい波の効果によると考えられる。

こうした実験結果を、改めて堀川・砂村らの海浜変形パターン分類指標

$$C = (H_0/L_0) \cdot (\tan \beta)^{0.27} (d_{50}/L_0)^{-0.67} \dots\dots\dots (4.1)$$

を用いて分類・整理した。式中で、 H_0 、 L_0 は各々換算沖波の波高および波長、 $\tan \beta$ は初期砂面勾配であり、 d_{50} は底質の中央粒径である。図-5にその結果を示す。

破線が規則波実験の結果に基づいて提案された境界、実線が代表波として平均波を用いた場合の本実験の結果である。今回の実験では、完全な侵食型の地形が形成されたのはケース A-12 だけであったため、タイプⅡとタイプⅢの境界を確定するにはデータが不足している。しかし、不規則波の作用下ではタイプⅡの変形が生じる範囲が広がる傾向にあることはいえる。これは、入射波が大小様々な波よりなるため、先に述べたように波形勾配の小さい波の影響が汀線付近でのバームの形成に現われること、あるいは、砕波点が一一定せずバームが形成されにくいこと等によると考えられる。

代表波として有義波を用いて同様な整理を行なったところ、タイプⅡの範囲は $5 < C < 13$ となり、規則波実験の結果との対応は悪くなる。こうした傾向は、風波の作用下での沿岸砂洲の発生限界に対して、有義波よりも平均波を用いた方が規則波による実験結果に近くなるという土屋・稲田の結論¹⁾に一致している。以上のことから、海浜変形パターンの分類に対する代表波としては、

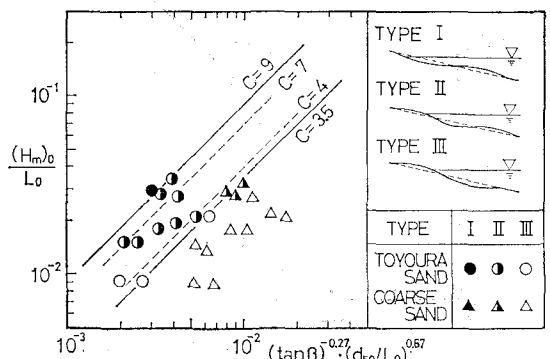


図-5 海浜変形パターンの分類

平均波を用いることが規則波実験との対応上妥当であるといえる。

ただし、海浜地形の特徴、例えばバーのできる位置等是有義波を代表波とした方が規則波実験の結果とよく一致するケースもあった。また、地形変化の進行速度は規則波実験に比して遅いことが観察された。したがって、上の結論は、堀川・砂村らの指標による全体的な海浜変形パターンの分類に対するものであって、平均波を代表波とすれば、規則波実験と同じ時間内に相似な地形変化が生じるという意味ではない。

(2) 底質の移動限界水深

つぎに、底質の移動限界水深に対する検討結果を示す。移動限界としては全面移動限界をとり上げ、実験によって得られた縦断地形と漂砂量分布から各ケースで有意な地形変動が生じている地点を求めた。一方、規則波実験の結果とよく一致する堀川・渡辺の算定方法⁹⁾を用いて各代表波の下での移動限界水深を計算し、実験結果と比較した。代表波として有義波をとった場合の結果を、図-6に示す。入射波の有義波高が小さく移動限界水深も小さいケースは、実測値と計算値はよく一致している。移動限界水深が大きくなるにつれて豊浦砂の実測値が頭打ちになる傾向が見られるが、この理由は明らかではない。

代表波として平均波をとって移動限界水深を計算すると、有義波によるものの60%程度の値となり、底質の移動限界に対する代表波としては有義波の方が妥当である。

(3) 砂漣の特性

今回の実験においても、特に豊浦砂のシリーズでは全ケースで砂漣が発生した。しかも、外力である波浪が一波毎に異なるにもかかわらず、砂漣の形状はそれに追従せず各地点で安定した形状とスケールを保っているよう

に観察された。また、入射波浪の条件に応じて強い浮遊砂雲が形成される場合も多く、不規則波の下でも砂漣は海浜変形にかかわる重要な現象であることが確認された。こうした背景に基づいて、ここでは砂漣の発生限界と砂漣の波長について検討を加える。

砂漣の特性については従来数多くの研究があるが、ここでは規則波実験に基づく利穂らの研究成果⁶⁾との比較を行なった。利穂らは、砂漣の発生限界に関する物理量として、底面軌道全振幅 d'_0 と中央粒径 d_{50} との比とシールズ数 Ψ とをとり上げた。利穂らと同様に今回の実験結果を整理したものが図-7である。図中の破線は規則波の砂漣の発生限界、実線は代表波として有義波を用いた場合の不規則波実験における発生限界である。

一方、利穂らと同様に、砂漣の波長 λ と底面軌道全振幅 d'_0 との関係を示したのが図-8である。図中の点線が規則波の結果、実線が代表波として有義波を用いたときの不規則波の結果である。若干の数値上の差異はあるものの両者の傾向はよく一致している。さらに、実測流速による底面軌道全振幅 d'_0 を用いると、3.(3)で述べたところから、規則波と不規則波の結果の一致はさらによくなる傾向にある。

砂漣の特性に対する代表波として平均波を用いた場合発生限界、波長いずれも規則波実験の結果との対応は悪

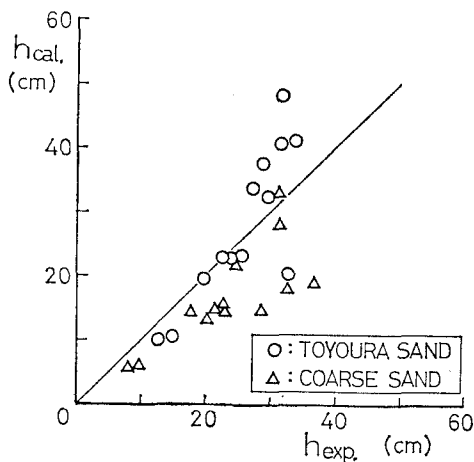


図-6 移動限界水深

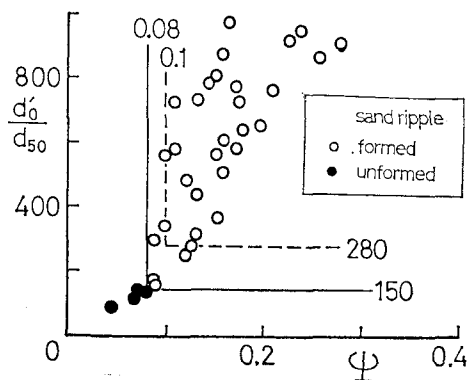


図-7 砂漣の発生限界

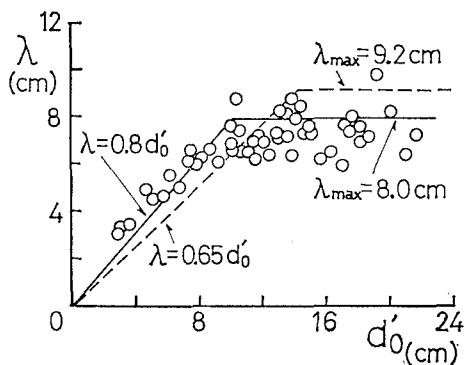


図-8 砂漣波長と底面軌道全振幅の関係

くなる。したがって、不規則波の作用下では砂澁は有義波に代表されるような比較的大きな波の作用に対応して形成されるといえる。

(4) 岸沖漂砂量

渡辺⁹⁾は、パワーモデルの概念を用いて、無次元漂砂量 Φ を次のようにシールズ数 Ψ の関数として表わした。

$$\Phi = A(\Psi - \Psi_0)\Psi^{1/2} \dots\dots\dots (4.2)$$

ここで、 A は定数、 Ψ_0 は全面移動限界に対するシールズ数であり、豊浦砂を用いた規則波実験に対しては、 $A=7$ 、 $\Psi_0=0.11$ という値が得られている⁹⁾。

有義波と平均波の諸量を用いて今回の実験結果をシールズ数によって整理したのが図-9である。紙面の都合上、豊浦砂では沖向き漂砂量、粗砂では岸向き漂砂量のみが示されているが、各々逆向きの漂砂量もほぼ同程度の傾向を示す。図中の一点鎖線は Madsen・Grant¹⁰⁾ が求めた漂砂量式であり破線は規則波実験による渡辺の式である。

図をみると、渡辺の提案した関係式は無次元漂砂量をよく表現しており、また、代表波の違いによって適合度に大きな差異はない。ただし、いずれの場合も規則波に

比して定数 A の値が小さくなっており、このことは底質の移動をひき起す上で波のパワーの効率が悪くなっていると解釈できる。

5. 結 言

海浜変形に対する代表波を検討したところ、代表波として平均波が妥当な現象と有義波が妥当なものがあることがわかった。海浜の縦断地形変化は、入射する不規則波群のエネルギーを代表するものに近い平均波で整理された。この結果は、地形のマクロな変化が、入射する波の効果の累積した結果生じるものであることを示している。一方、移動限界や砂澁の特性に対する代表波としては有義波の方が妥当であるということは、これらの現象が、入射波の総和ではなくあるレンジの波の寄与を選択的に強く受けるものであることを示している。

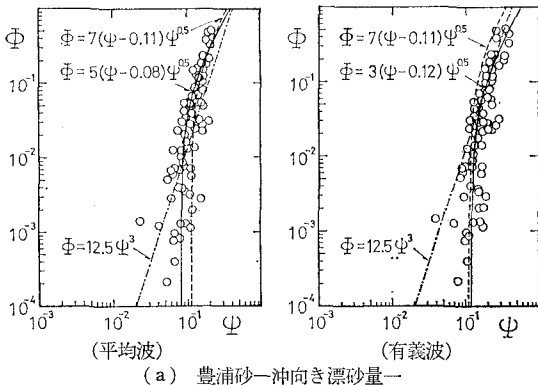
種々の現象に対して代表波が異なるということは、一見統一に欠けると見えるかもしれない。しかし、これは不規則波の影響を代表波というマクロな形で表現するために生じるものであり、個々の現象や生起する場所に対応して代表波が異なるという事の方が自然な結果である。

さらに、波の不規則性の影響として実験から受けた全般的な感想は、規則波に比して地形変化が遅く波の力が弱いということである。このことは、規則波ではいわば全ての波が同一の地形変化をもたらす方向に寄与するのに対して不規則波では、大小様々な波の作用が異なるためと考えられる。

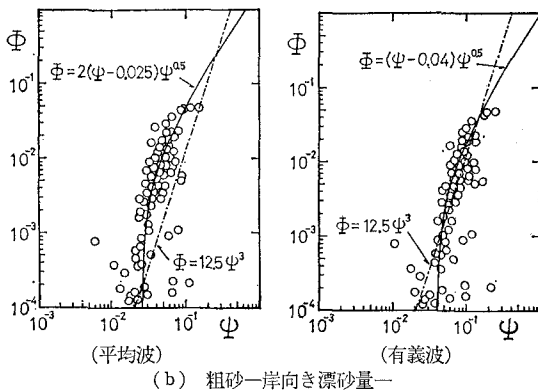
本研究を行なうにあたり、御指導下さった東京大学堀川清司教授、実験に協力していただいた同大学院生入江靖君に心から感謝する次第である。なお、本研究は文部省科学研究費から補助を受けたことを付記する。

参 考 文 献

- 1) 土屋義人・稲田和則：第21回海講，pp. 219~224, 1974.
- 2) Wang, H. and S. S. Liang: JGR, Vol. 80, No. 24, pp. 3488~3494, 1975.
- 3) 合田良実：港湾構造物の耐波設計，鹿島出版会，1977.
- 4) 渡辺 晃・利穂吉彦・堀川清司：第26回海講，pp. 172~176, 1979.
- 5) 合田良実・鈴木康正・岸良安治・菊池 治：港湾技研資料，No. 248, 24 p., 1976.
- 6) 利穂吉彦・渡辺 晃・堀川清司：第28回海講，pp. 217~221, 1981.
- 7) 堀川清司・砂村継夫・鬼頭平三：第20回海講，pp. 357~363, 1973.
- 8) 堀川清司・渡辺 晃：第13回海講，pp. 126~134, 1966.
- 9) 渡辺 晃：第28回海講，pp. 285~289, 1981.
- 10) Madsen, O. S. and W. D. Grant: 15th ICCE, pp. 1093~1112, 1976.



(a) 豊浦砂—沖向き漂砂量—



(b) 粗砂—岸向き漂砂量—

図-9 無次元漂砂量とシールズ数の関係