

沿岸流速に関する二、三の考察

堀 川 清 司*・佐々木 民 雄**

1. 概 説

河川改修、ダム建設等による河川の流送土砂の減少、海岸地域の土地利用の高度化により各地で海岸欠漬が顕在化している^{1),2),3)}。海岸欠漬の原因は根本的には供給土砂量の不足にあると考えられるが、欠漬の機構についてみれば波および波による流れによって運ばれる砂の移動が支配的である。

海岸に斜めに波が入射するときにひきおこされる碎波による沿岸流の流速については、Putnam-Munk-Traylor (1949)⁴⁾ がはじめて予測の式を提案した。Inman-Quinn (1951)⁵⁾ はこの式に改良を加え、式に含まれている海底の摩擦係数を流速の関数として与え、今日に至っているが、現地においても、模型においても必ずしも良好な値を示しているわけではない^{6),7)}。すなわち現地においてはオーダーをみる程度であれば使用にたえるが⁸⁾、流速の計算値は過大な値を示し⁹⁾、模型では過小な値を示す¹⁰⁾ので、とくに沿岸流に関する模型実験を行なって、現地流速を推定しようとするときには、全く使用に耐えない。この原因の一つは摩擦係数のとり方にあると考えられる。

Eagleson (1965)¹¹⁾ は碎波帯を三角形断面の開水路と考え、粗面乱流の管の流れにおける Kármán-Prandtl の抵抗式を用いて抵抗係数を与え、比較的良好な結果を得ている。著者らは Eagleson の式は現地に対しては良好な一致をみせているが、実験値との比較においては必ずしも良好とはいえない点に注目し、その原因は Eagleson は Reynolds 数の影響を実験の場合にも無視しているからであろうと考えた。また移動床実験を行ない Eagleson の式が移動床の条件に対しても使用可能であることを確認した。以下にその検討の概要を述べる。

2. 沿岸流速に関する既往の研究

Sonu (鮮干) (1966)⁹⁾ は沿岸流速式として提案された既往の式をとりまとめているが、表-1 にはその後に発表された式を加え、かつ海底地形を一樣こう配のなめらかな浜と仮定したグループ (A) と bar または rip current を考慮したグループ (B) とに分けて示した。

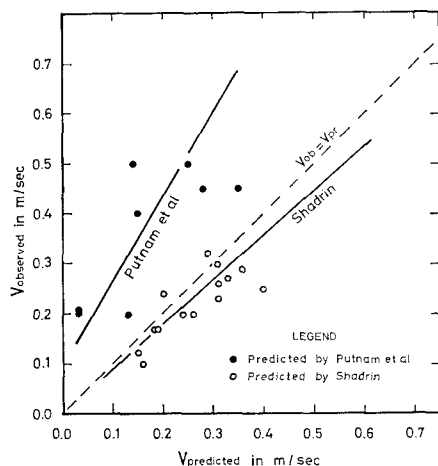
このほかにも A として Brebner-Kamphuis (1963), Sitarz (1963), B として Inman-Bagnold (1962) の式を Sonu は示しているが、いずれも予測値が観測値を上まわるようである。

沿岸流速の研究には海底地形の取り扱い方から大別して2つの系列がある。一つは Putnam et al の式を改良した Inman-Quinn の式の系列であり、他は Shadrin (1961), Bruun (1963) の系列である。

前者は碎波帯の地形を平均前浜こう配 $\tan \alpha$ で代表して処理しているので、等深線が汀線に平行で真直と考えられる海岸に適している。Putnam et al が観測した California の Oceanside の海岸にも小さな bar が存在し、それが実験と現地観測の抵抗係数の相違の原因であろうと Putnam et al も指摘している。Putnam et al は沿岸流を解析するに際してエネルギー保存則と運動量保存則との二つの手法を用いたが、現地観測および実験結果の解析から、運動量保存則の方が斉合性の良いことを示した。Bruun も bar のない海岸では運動量保存則が理論的に妥当であると述べている。以後の研究は二、三の例外を除き運動量保存則に基いている (Inman-Quinn (1951), 永井 (1954), Galvin-Eagleson (1964), Eagleson (1965), 佐藤-田中 (1966))。

また解析に用いている波には孤立波 (Putnam et al., Inman-Quinn, Shadrin, 佐藤-田中) と、微小振幅波 (永井, Galvin-Eagleson, Eagleson) とがある。Sonu

図-1 Putnam et al の式と Shadrin の式との比較



* 正会員 工博 東京大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 東京大学研究員 (株) I.N.A. 新土木研究所

表-1 沿岸流速公式の沿革

A. STRAIGHT PARALLEL CONTOUR

NO.	AUTHORS	FORMULA	BASIC SCHEME OF ANALYSIS	THEORETICAL	FIELD	LABORATORY
1)	Putnam Munk-Traylor ⁴⁾ (1949)	$\frac{a}{2} \left[\left(1 + \frac{4C_b}{a} \sin \theta_b \right)^{1/2} - 1 \right]$ $a = Q_b \cdot \tan \alpha \cdot \cos \theta_b / f h_b \cdot T$	Momentum Balance Solitary Wave	☐	☐ Oceanside, California.	☐ Fixed Bed
2)	Inman - Quinn ⁵⁾ (1951)	$\left[\left(\frac{1}{4X^2} \cdot Y \right)^{1/2} - \frac{1}{2X} \right]^2$ $X = 64.6 \cdot H_b \cdot \tan \alpha \cdot \cos \theta_b / T$ $Y = C_b \cdot \sin \theta_b$	Momentum Balance Solitary Wave	☐	☐ ☐ Torrey Pines Beach, Pacific Beach, Calif.	☐
3)	Nagai ¹²⁾ (1954)	$\frac{1}{8} H_b C_b \left(\sqrt{1 + \frac{16 \sin \theta_b}{K H_b}} - 1 \right) \cdot \tan \alpha / K h_b$	Momentum Balance Oscillatory Wave	☐		
4)	Galvin - Eagleson ¹³⁾ (1964)	$K_g T \cdot \tan \alpha \cdot \sin 2\theta_b$ $K = 1$	Momentum Balance	☐	☐ ☐	☐ ☐ Fixed Bed
5)	Eagleson ¹¹⁾ (1965)	$\left[\left(1 - \left(1 - \frac{V_{g0}^2}{g} \right) \cdot e^{-Bx} \right) A \right]^{1/2}$ $A = \frac{3}{8} \left[\frac{g H_b^2 n_b}{h_b} \right] \frac{\sin \alpha \sin \theta_b \sin 2\theta_b}{f}$ $B = \frac{2}{5} \left[\frac{f}{h \cos \alpha \sin \theta_b} \right]$	Momentum Balance Oscillatory Wave Developing Current	☐	☐ ☐	☐ ☐ Fixed Bed
6)	Sato-Tanaka ^{14),15)} (1966)	$K_d \left[\frac{\tan \alpha \cdot H_b^{5/3}}{f^{1/3}} \cdot \sin 2\theta_b \right]^{1/3}$ $K_d = 1.6$ (Kashima coast)	Momentum Balance Solitary Wave	☐	☐ ☐ Kashima.	

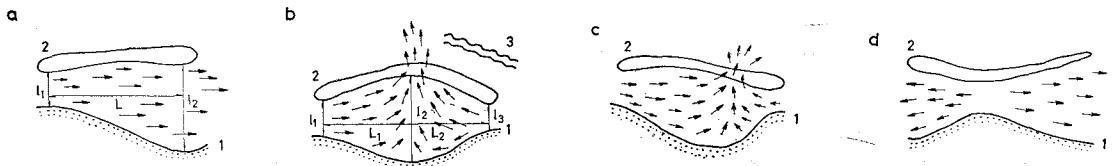
B. CURVED DIVERSIFIED CONTOUR OR PRESENCE OF BAR

NO.	AUTHORS	FORMULA	BASIC SCHEME OF ANALYSIS	THEORETICAL	FIELD	LABORATORY
7)	Shadrin ^{16),17),18)} (1961)	$\pm \sqrt{1.11 \frac{H_b}{T} \sqrt{g H_b} \left(1 - \frac{1}{L_1} \right)}$ L_1, L_2 : Distances between bar and shoreline	Surface Gradient Lunate Bar Rip outflow Solitary Wave	☐	☐ Anapa, Black Sea.	
8)	Bruun ¹⁹⁾ (1963)	$\frac{Q_b X \cos \theta_b}{A_b T}$ A_b : Cross-sectional area of surf-zone	Continuity Regular rip Outflow Spectral Wave	☐	☐ Bovljaerg on the Danish North Sea coast.	
9)	Bruun ¹⁹⁾ (1963)	$\left[\frac{2g Q_b \tan \alpha \sin 2\theta_b}{L_b f} \right]^{1/2}$ L : Wave length at breaking	Continuity Straight Single Bar	☐	☐ Bovljaerg	

H_b : breaker height, H_0 : wave height in deep water, h_b : breaker depth, C_b : wave celerity at breaking, $\tan \alpha$: mean bed slope in surf-zone, θ_b : angle between wave front and shoreline at breaking, T : wave period, g : gravity const., n_b : ratio of wave group to wave phase velocity at breaking, Q_b : volume of fluid inflow to surf-zone across breaker line per unit of crest length per wave f : Darcy-Weisbach friction factor, X : horizontal coordinate distance measured positively along beach parallel to shoreline, origin at intersection of barrier and shoreline (Eagleson, 1965) or alongshore distance from root of rip current (Bruun, 1963).
☐: indicating discussed or observed, ☐: using data or theory of Putnam et al (1949), ☐: using data of Inman - Quinn (1951).

図-2 海底地形が複雑で波がほぼ直角に入射する場合の沿岸流 (Shadrin, 1961)

1-汀線, 2-bar, 3-波峯線



は Shadrin が Housely-Traylor (1957)²⁰⁾ を引用して孤立波を砕波特性に適用することに対する疑問を提出しているのにヒントを得て, North Carolina の Outer Banks の資料に永井の式を用いた結果, 斉合性の良好でないことを報告している。しかしながら Galvin-Eagleson, Eagleson は比較的良好な一致をみている。

以上の諸式は海底地形を非常に単純化しているために実際に現地に適用する場合, かなりの制約を受けざるを得ない(Putnam et al (1949), Shepard (1950), Shepard-Inman (1951), Shadrin (1961), Sonu (1966)) と考えられる。現地海岸にはしばしば bar や rip current がみ

られ、これらを考慮した式が二、三提案されている。

Shadrin は lunate bar^{21), 22)} のある黒海の Anapa 近くの海岸の現地観測結果を Putnam et al の式で計算したところ、碎波角 (θ_b) が小さいときは計算値が観測値より小さい値を示し (図-1)、ほとんどゼロに近くなることから、式 (7) を提案した。

図-2 に示すような lunate bar が存在する海岸において、波が汀線に直角に近い角度で入射するときには、汀線に沿って不均一な水面上昇がおこる。すなわち bar と汀線との距離の最も近いところでは水面上昇は最大となり、最も遠いところでは最小になる。その結果一種の“傾斜流れ”が生ずる。式 (7) はその平均流速を bar と汀線との距離によって与える式である。波高の小さいときは汀線から最も離れた地点から rip outflow として沖へ流れ出る。波高の増大につれて、この rip outflow は沿岸方向成分を増加して、ついには消失する。波高の増大によって海底地形が変化を開始し、lunate bar が汀線に平行に配列するようになると式 (7) で示される流れは消滅し、式 (9) (Bruun) に示されるような流れになると考えられる。Shadrin の資料からはこの境界は波高約 1 m 弱と推定される。

Shadrin はさらに波高が高くなると Putnam et al 流の“エネルギー流れ*”が卓越するので、結局沿岸流速 V としては式 (10) を提案している。

$$V = \frac{a}{2} \left[\sqrt{1 + \frac{4C_b \sin \theta_b}{a}} - 1 \right] \pm \sqrt{1.11 \frac{H_b}{T} \sqrt{gH_b} \left(1 - \frac{l_1}{l_2} \right)} \dots \dots \dots (10)**$$

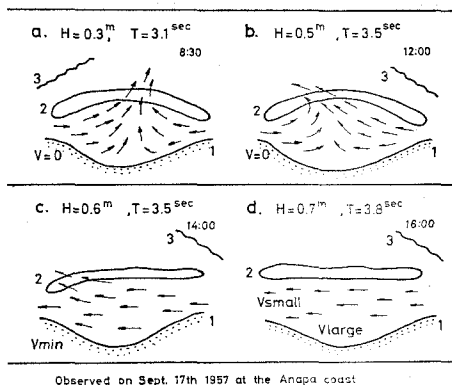
Bruun の示した式 (8) も汀線と bar との間の沿岸方向に沿った不均一な水面上昇を考慮し、Shadrin と同様に θ_b の小さいときに対応する式である。相互に隣接した rip と rip との距離をここで L とすれば、式 (7)、(8) は沿岸方向の区間 L 内における流速を示す式といえることができる。両者における海底地形の扱いをみると、前者は l_1, l_2 で代表し、後者は X と A_s で代表している。これらに対し式 (9) は θ_b が大きくなった場合に相当し、傾斜流れは消失し、エネルギー流れが支配的になるものと考えられる。式 (9) では海底地形を A のグループと同様に $\tan \alpha$ で代表している。傾斜流れからエネルギー流れに移行する模様を図-3 に示した。

この他に佐藤一田中の式 (6) は沖波の諸元から沿岸流速を予知しようとする試みであるが、海岸ごとに係数 K_0 を観測によって定めねばならない。鹿児島海岸については $K_0=1.6$ と定めている。

図-3 “勾配流れ”から“エネルギー流れ”への転移 (Shadrin, 1961)

a は純粋な勾配流れ、b は転移状態、c, d はほとんどエネルギー流れとなっている

1—汀線、2—bar、3—波峯線



Observed on Sept. 17th 1957 at the Anapa coast

表-1 の右欄には式の源を示したが、実験的研究は A のグループにおいては固定床でなされているのみであり、B のグループでは見当らない。現地海岸には bar や rip current がしばしば見られることを考えると海底地形の複雑な場合についての実験、とくに移動床の実験を行なうことによって、より正確な沿岸流速公式を確立することが必要であると考えられる。

3. 成長する沿岸流に対する Eagleson の取り扱い

表-1 において式 (5), (7), (8) を除くすべての式は沿岸流を定常流または等流として扱っているが、現地海岸ではむしろそのような流れがみられるのは少ないのではないかと考えられる⁹⁾。Eagleson は実験室で沿岸流の上流側に位置する導波板のつけ根からの距離 x の関数として沿岸方向に発達する流速を与える式を提案した。

実験は M.I.T. の 14m×7m の水槽で行なわれ、模型海浜は長さ 9m、一様こう配 1/10 のコンクリート固定床である。流速はフロートとプロベラ式流速計により測定された。

Putnam et al と同様に運動量保存則より、海底面で摩擦力を考慮に入れて、汀線と碎波線との間の平均流速は、つぎのように与えられるとした。

(1) 過渡状態の流速

導波板のつけ根からの距離 x における沿岸流速を $V(x)$ とすれば

$$\frac{V(x)^2}{A} = 1 - \left[1 - \frac{V(0)^2}{A} \right] \cdot e^{-B \cdot x}$$

ここに

$$A = \frac{3}{8} \left[\frac{gH_b^2 n_b}{h_b} \right] \frac{\sin \alpha \cdot \sin \theta_b \cdot \sin 2\theta_b}{f} \dots \dots \dots (5)***$$

$$B = \frac{2}{5} \left[\frac{f}{h_b \cos \alpha \cdot \sin \theta_b} \right]$$

* Shadrin は式 (10) の右辺第 1 項を“エネルギー流れ”，第 2 項を“傾斜流れ”と名づけているが、著者自らも認めているように必ずしも適切な表現ではなからう。

** 式 (1)～(9) は表-1 中に示した。

*** 表-1 の式 (5) を再記した。

それぞれの記号は表-1の下に示す通りである。 $V(0)$ は $x=0$ における $V(x)$ の境界条件であり、現地では導波板に対応するものは突堤や防波堤となるので、その性質（たとえば透過性など）によって異なる。 f はDarcy-Weisbachの係数でEaglesonは粗面乱流管のKármán-Prandtlの抵抗式

$$1/f^{1/2} = 2 \log_{10} \frac{2R}{k} + 1.74 \quad \dots\dots\dots(11)$$

によって与えている。 k は粗度長さである。ここで碎波帯を三角形断面水路と考えれば、径深 R は碎波帯の幅を b として

$$R \approx \frac{1}{2} b \sin \alpha \approx \frac{1}{2} b \tan \alpha = \frac{h_b}{2} \quad \dots\dots\dots(12)$$

したがって f は式(13)で与えられる。

$$f = \left[2 \log_{10} \frac{h_b}{k} + 1.74 \right]^{-2} \quad \dots\dots\dots(13)$$

Eaglesonは k の値としてV.T. Chow (1959)²³⁾より、滑らかなコンクリートでは0.0010 ft (0.03 cm)として実験値を整理し、現地の資料は天然砂0.0033 ft (0.10 cm)として整理している。

(2) 定常状態の流速

x が十分大きな領域では $V(x)$ は一定値に収束する。式(5)において $x \rightarrow \infty$ とし、定常状態の流速を V とすれば V は式(14)で与えられる。

$$V = A^{1/2} \quad \dots\dots\dots(14)$$

以上の諸式により、a) 過渡状態はGalvin-Eagleson (1964), Eagleson (1965)の実験データを整理し、b) 定常状態についてはPutnam et al (1949), Inman-Quinn (1951), Galvin-Savage (1965)の現地観測データを整理している。その結果はb) 定常状態では現地データは理論曲線のまわりに平均してばらついているが、実験値は理論値より小さい値を示している。

Eaglesonは式(5)の用途として、沿岸流の実験計画に際して完全に発達した沿岸流を得るに必要な水槽の規模を与えるのに有用であると述べている。たとえば定常状態の流速値の95%に発達するに要する距離は式(5)より $Bx=2.32$ であるからつぎようになる。

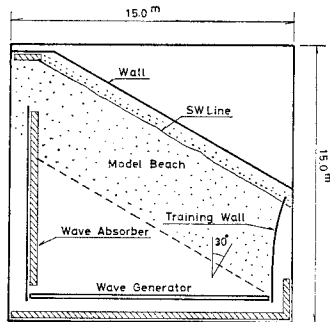
$$x=2.32/B \quad \dots\dots\dots(15)$$

(3) Eaglesonの式の移動床実験への適用

2.にも述べた通り沿岸流速に関する移動床実験については、直接漂砂量に結びつけた実験はいくつかなされているが、いまだ解明されていない。複雑な海底地形の海岸における沿岸流速を解明する手がかりとしてrip currentが十分に発達しない場合について、著者らはEaglesonの式の適用を試みた。

実験に使用した水槽は15m×15m、水深は30cmで図-4に示す通りである。移動床の模型海浜には中央粒径160 μ の天然砂を碎波帯において約1/10にならして

図-4 実験水槽平面図 (移動床)



用いた。波はフラップ式造波機を用いて起こし、周期 T は1.13 secとし、 H_b を4.8 cmより6.8 cmまでのケースで行なった。沖波波向は30°とした。

沿岸流速は過マンガン酸カリを同時にとかし込んだ

直径約4 cm厚さ1 cmのパラフィン製フロートにより、沿岸流の上流側よりの距離 x における流速 $V(x)$ を $x \pm 0.5$ mの間の平均流速として測定した。

また東京大学生産技術研究所千葉実験所の40m×25mの水槽(図-5)で固定床(irregular contour)を用いて行なった岩船港水理模型実験¹⁰⁾の際に沿岸流をストロボとフロートを用いて観測したのでその結果もあわせ表-2、図-6に実験結果の一例を示した。図-6をみると、6.1は沿岸流の成長する部分の観測値がないが、図-6.2においては成長する過渡状態の流れを観測することができる。しかし観測値は理論値の1/2~2/3の値を示している。このような傾向はGalvin-Eagleson (1964)¹³⁾も指摘している。流れが十分発達するとrip currentとして沖へ出るので周期的に沿岸方向成分流速 $V(x)$ が低下する様子が観察される(とくに図-6.2)が、定常状態の流速は平均値としてはEaglesonの式とほぼ一致しているとみることができる。なおここで k としてはEaglesonと等しくとった。

以上の実験結果を図-7、図-8に無次元表示した。図-7は過渡状態の流速を示し、図-8は定常状態の流速を示している。図-7にはGalvin-Eagleson, Eaglesonのplane beachの実験結果も示してあるが、著者

図-5 岩船港模型平面図 (固定床)

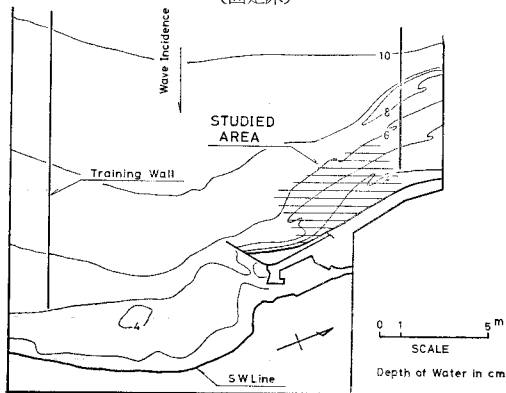


表-2.1 移動床実験データ

Experiment on Mov. Bed (Horikawa & Sasaki)
 $\tan \alpha = 0.10$ Surface = Natural Sand,
 $T = 1.13 \text{ sec}$ Presence of Bar,
Irregular Contour.

Run	x (m)	θ_b (deg)	H_b (cm)	$V(x)$ (cm/sec)
51	0.3	13.2	4.8	6.7
51	1.1	13.2	4.8	10.3
51	2.1	13.2	4.8	12.6
51	3.1	13.2	4.8	19.6
51	4.1	13.2	4.8	20.9
51	5.1	13.2	4.8	15.4
51	6.1	13.2	4.8	24.4
51	7.1	13.2	4.8	20.4
51	8.1	13.2	4.8	23.2
51	9.1	13.2	4.8	16.2
51	10.1	13.2	4.8	15.9
52	0.2	14.5	6.2	7.2
52	0.9	14.5	6.2	12.7
52	1.9	14.5	6.2	21.6
52	2.9	14.5	6.2	23.8
52	3.9	14.5	6.3	24.2
52	4.9	14.5	6.2	28.0
52	5.9	14.5	6.2	27.2
52	6.9	14.5	6.2	22.4
52	7.9	14.5	6.2	19.8
52	8.9	14.5	6.2	22.4
52	9.9	14.5	6.2	21.7
53	0.3	15.1	6.5	6.1
53	1.1	15.1	6.5	15.8
53	2.1	15.1	6.5	24.0
53	3.1	15.1	6.5	25.0
53	4.1	15.1	6.5	25.5
53	5.1	15.1	6.5	30.2
53	6.1	15.1	6.5	30.2
53	7.1	15.1	6.5	25.6
53	8.1	15.1	6.5	27.0
53	9.1	15.1	6.5	33.4
53	10.1	15.1	6.5	25.6
54	0.3	20.2	6.8	14.3
54	1.1	20.2	6.8	14.5
54	2.1	20.2	6.8	15.4
54	3.1	20.2	6.8	19.2
54	4.1	20.2	6.8	31.2
54	5.1	20.2	6.8	33.4
54	6.1	20.2	6.8	33.6
54	7.1	20.2	6.8	36.5
54	8.1	20.2	6.8	34.5
54	9.1	20.2	6.8	23.3
54	10.1	20.2	6.8	34.5

図-6.1 固定床実験結果
(irregular contour)

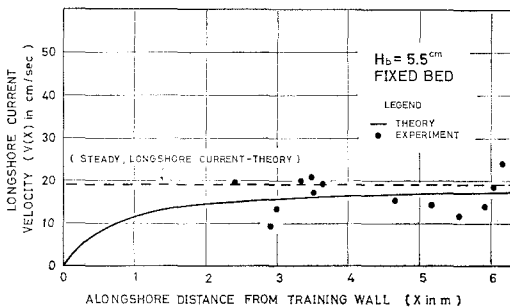


表-2.2 固定床実験データ (irregular contour)

Experiment on Fixed Bed (Horikawa & Sasaki)
 $\tan \alpha = 0.0152$ Surface = Smooth Cement,
 $T = 1.0 \text{ sec}$ Presence of Bar,
 $\theta_b = 28.5 \text{ deg}$ Irregular Contour.
 $H_0 = 5.0 \text{ cm}$

Run	x (m)	$V(x)$ (cm/sec)
21	2.38	20.0
21	2.88	10.0
21	2.94	13.5
21	3.45	21.0
21	3.50	18.0
21	3.60	19.0
21	4.62	15.5
21	5.13	14.0
21	5.54	11.5
21	5.98	14.0
21	6.00	18.5
21	6.14	24.5

図-6.2 移動床実験結果

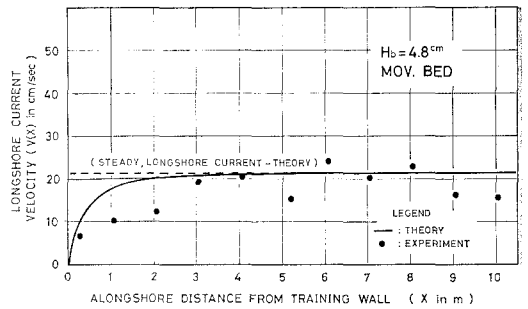


図-7 過度状態の沿岸流 (実験)

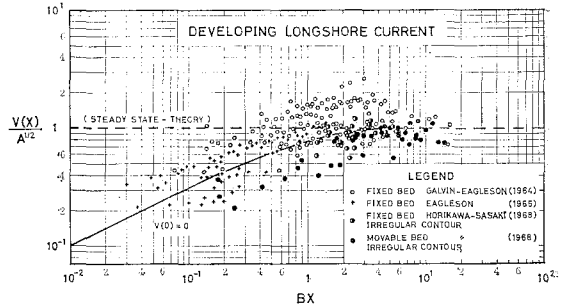


図-8 定常状態の沿岸流

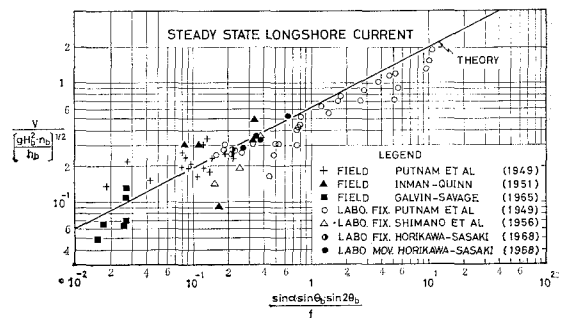


表-3 嶋野・本間・堀川の実験と鮮干の

現地観測結果(荒天時)

Experiment on Fixed Bed (Shimano, Hom-ma & Horikawa)

$\tan \alpha = 0.067$ (1/15)

Surface=Smooth Cement,
Plane Beach,
Parallel Contour.

Run	T (sec)	θ_b (deg)	H_b (cm)	$V(x)^*$ (cm/sec)
61	1.18	11.0	1.64	20.5
62	0.81	14.0	2.56	26.1
63	0.73	17.0	3.72	24.6

* $V(x)$ was measured by $x=0 \sim 9$ m.

Field Observation at Tokai Coast (C.J. Sonu)

Surface=Natural Sand,
Presence of Bar,
Irregular Contour.

Run	$\tan \alpha$	θ_b (deg)	H_b (m)	V_{max} (m/sec)	V_{mean} (m/sec)
101	0.022	40.0	3.0	3.05	1.538
102	0.022	40.0	0.7		0.3~0.5

らの irregular contour の値は彼等の値が理論値より大きく目であるのに対し、いくぶん小さ目である。しかし図-8 にも見られるように定常状態に近づくと著者らの実験値の一致性はよい。なお 図-7 においては $V(0)=0$ とした。これは $V(0)$ はフロートでは測定が困難なためである。図-8 には 表-3 に示した嶋野ら²⁴⁾の実験結果を加えた。

図-7, 図-8 から Eagleson の式は H_b が 2 cm 程度から 3 m 程度の広い範囲にわたりほぼ妥当な値を与えたと考えられる。ただし適用限界については慎重を要する。たとえば plane beach であっても H_b が 3 m 程度になれば θ_b によっては定常状態に達するのに約 1 km の距離を要する。このような状態の時には定常状態に達する前に rip current として沖へ流出するであろう。このような観点からも現地における定常状態はまれな現象ではないかと推測される。図-8 における現地観測値が果して定常状態であったかは検討を要する点であろう。また 図-7 には現地観測値がない点、および 図-6 における成長過程の理論値と実験値との相違も現地適用にあたっては慎重を要する点であろう。

4. 海底の摩擦係数に関する考察

以上検討した相違の原因の一つは摩擦係数のとり方にあることは十分考えられる。前述のように Eagleson は砕波帯を三角形断面の開水路と仮定し、 f の算定にあたっては粗面乱流の管における Kármán-Prandtl の抵抗式を採用した。

摩擦係数は管路からの類推によって、一般的につぎのようにあらわすことが可能であろう。

$$f = \alpha \left(\frac{kV}{\nu} \right)^p \left(\frac{2h_b V}{\nu} \right)^q = 2^q \alpha \nu^{-(p+q)} V^{(p+q)} k^p h_b^{-q} \quad \dots\dots\dots (16)$$

図-9 Moody 図表上に示した沿岸流速データ

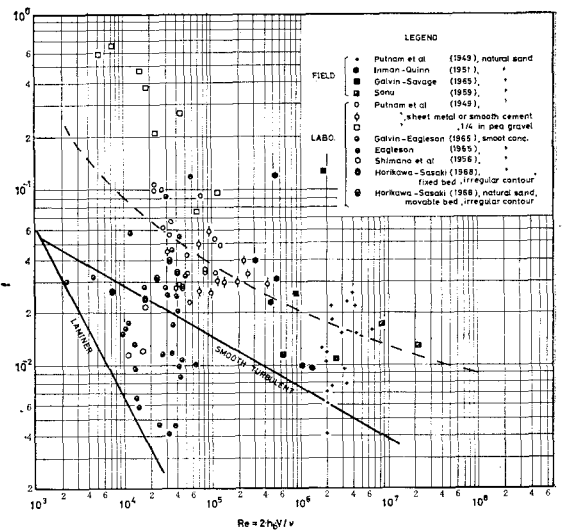
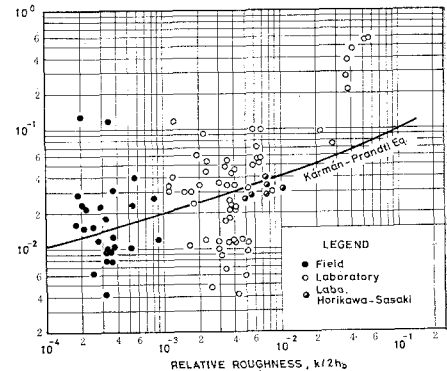


図-10 抵抗係数と相対粗度



ここで α, p, q は係数であり、 $2h_b V / \nu$ はレイノルズ数 Re である。したがって流れの状態、底面の粗滑によってつぎのように p, q を定めることができる。

- 層流領域 $p=0, q=-1 \dots\dots\dots (17)$
- 層流-乱流遷移領域 $p=0, q \simeq 1 \dots\dots\dots (18)$
- 乱流滑面領域 $p=0, q \simeq -1/4 \dots\dots\dots (19)$
- 乱流粗面領域 $p+q=0, \therefore q=-p \dots\dots\dots (20)$

式 (20) を式 (16) に代入すると

$$f = \alpha \left(\frac{k}{h_b} \right)^p \quad \dots\dots\dots (21)$$

となり、円管の場合 Kármán-Prandtl の式に相当する。いま 図-7, 図-8 に用いたデータを Moody 図表上にプロットすれば 図-9 のようになる。図中の破線は遷移領域と粗面乱流領域との境界を示す。これを見ると Galvin-Eagleson, Putnam et al (1/4" per gravel) を除くほとんどの点は遷移領域にあると考えられる。

ここで f を $k/(2h_b)$ との関係として先のデータを示すと (図-10), 式 (13) はほぼ点の中心を通るが、約 1

けたのパラツキがある。また単純化した模型の方が現地よりもパラツキが大きいことは、測定精度を考えても流れが先に示したように遷移領域にあり、 R_e の効果を無視しえないことを示していると考えられる。

k を仮定して式(13)を用いることは取り扱いの便利さから有用であり、とくに R_e の大きい現地の荒天時にはこの式を用いてもかなり妥当な結果を期待しうる。しかし、模型においては問題がある。先に示した著者らの実験値と理論値とが妥当な一致を得たのは、たまたまかなりよく一致した条件にあったともみられ、いつでもこれほど良好な一致を期待しうるかは疑問と思われる。

また Inman-Quinn (1951) は現地観測と Putnam et al のデータを f と V で整理し、 f を式(22)のように

一義的に V のみの関数として k には無関係と考え、式(1)から f を消去した式(2)をえた。

$$f = 0.00404 V^{-1.5} \quad (V: \text{m/sec}) \quad (22)$$

これはとりもなおさず R_e の影響を示唆している式と考えることができる。いま式(22)の係数を K とおいて形式的に書き直せば

$$f = KV^{-1.5} \\ = K \left(\frac{2Vh_b}{\nu} \right)^{-1.5} \left(\frac{2h_b}{\nu} \right)^{1.5} \quad (23)$$

$\nu = 1.01 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{sec}$ として、式(22)は h_b をパラメーターとして表示することができる。すなわち

$$f = 1.14(h_b/R_e)^{1.5} \times 10^4 \quad (h_b: \text{cm}) \quad (24)$$

樫木 (1957)⁶⁾ は宮津海岸および泉南海岸における観測値を Putnam et al の式(1)を用いて整理し係数 K を修正してつぎのように表示している。

$$f = 0.0249 V^{-1.5} \quad (V: \text{m/sec}) \quad (25)$$

これを式(23)と同様に h_b と R_e の関数表示とすれば

$$f = 7.04(h_b/R_e)^{1.5} \times 10^4 \quad (h_b: \text{cm}) \quad (26)$$

式(22)および(25)は共に Putnam et al の式をもとに逆算した f の値から求められたものであり、本論文に示した f の値は Eagleson の式をもとにしている。したがって直接両者を比較することには若干問題があるが、図-11に式(22)、(26)と著者らの求めた f の値の比較を示している。点のパラツキは大きく、また式(22)および(26)は必ずしも妥当な関係式とはいえないようである。つぎにこの相違をさらに明確にするために、式(24)および(26)の形に変換したものと f の値の関係を示したのが図-12である。図中のパラメーターは h_b であり、また記号は h_b の大きさによって分類して見やすくしてある。これによると両式の適用範囲が明らかとなる。まず式(24)は h_b が 5 cm から 100 cm の中間的な領域ではほぼ妥当な結果を示すが、先に述べたように h_b の大きい、あるいは小さい範囲ではそれぞれ過大、過小な f の値を示すことになる。一方式(26)は h_b の大きい現地に合うように K を修正したので h_b が 200 cm 前後の間では妥当な値を示すが、それ以外の場合には誤差が大きい。そこで一応同じ考え方になつて全領域 ($2 \text{ cm} < h_b < 300 \text{ cm}$) にほぼあてはまるような関係を図中に示しておいた。

以上のような取り扱いはいかにも便宜的である。とくに $f \propto R_e^{-3/2}$ に対しては、われわれの既知の事実から判断して首肯しかねる。そこで式(16)において $q=0$, $p=-3/2$ とおき

$$f = \alpha \left(\frac{kV}{\nu} \right)^{-1.5} \quad (27)$$

と考えてみよう。図示のデータについてみれば

図-11 摩擦係数と沿岸流速との関係

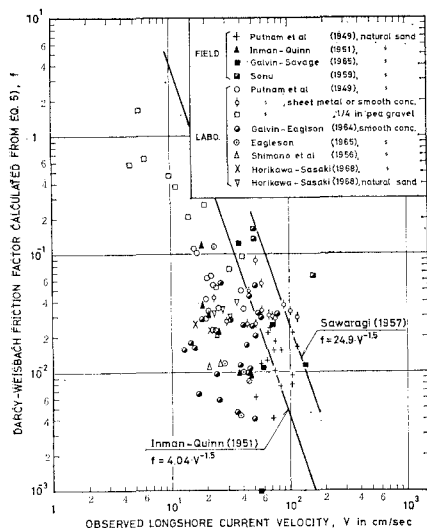
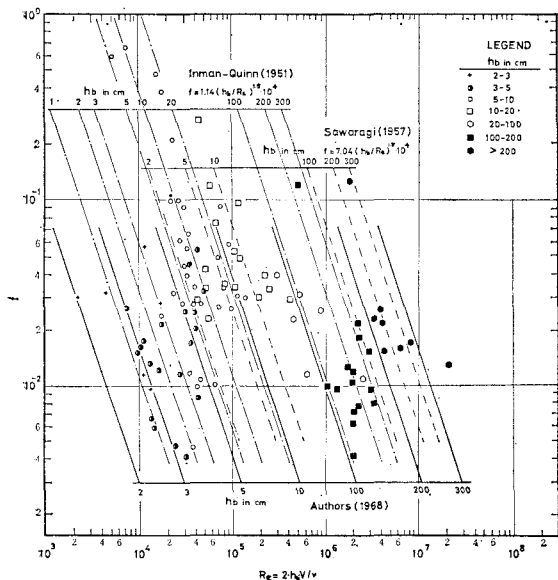
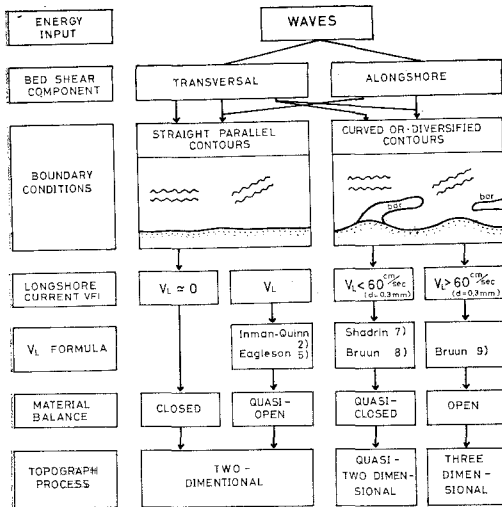


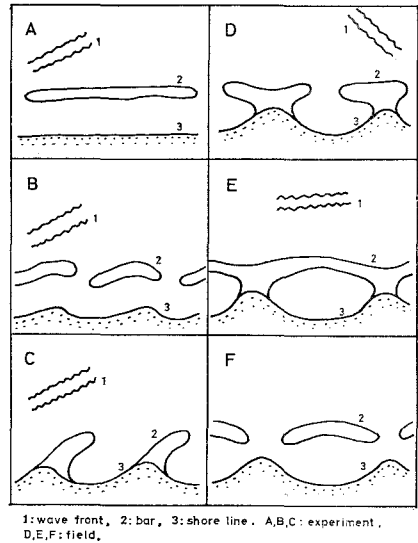
図-12 Inman-Quinn の式の h_b をパラメーターとした表示



図—15 波流れ地形の相互作用の4つの基本的モデル



図—16 波向と bar の配置



ルを示している。ここで蛍光砂の移動速度と沿岸流速の図を比較すると沿岸流速が約 50 cm/sec 以上となると砂移動が激しくなっているようである。前述の Ingle の沿岸流速より多少小さいようであるが、これは底質粒径の相違によるのであろう。

Sonu はこれらの関係を統一的に説明する仮説を試みている。沿岸流には言及していないが、海底地形が plane な場合と bar のある場合とのそれぞれについて波が汀線に直角に入射する場合と斜めに入射する場合について 4 つのモデルを示し、底質収支を説明している。先に述べた Ingle らの沿岸流速の境界を考慮して、著者らは図—15 に 4 つのモデルを示した。沿岸流の関係するのは右の 3 つのモデルであり、それぞれのモデルに対応すると考えられる沿岸流速公式を示した。欄の中の番号は表—1 の No. と対応している。右から 2 番目のモデルは Shadrin の式 (7) で示される“傾斜流れ”であり、“エネルギー流れ”が卓越すれば右端のモデルのようになると考えられ、Shadrin の資料と Ingle の境界値とから、その境界値は 60 cm/sec 前後と考えるべきであろう。右端のモデルでは Sonu は bar を左隣のモデルとほぼ等しい形で表示しているが、図—3 を考慮して Bruun の式 (9) とも対応できるように修正した。

さて以上のモデルのうちいまだになされてきた実験的研究のほとんどは左の 3 つのモデルである。左端のモデルは波形こう配の小さいときの二次元実験、つぎのモデルは固定床の平面実験、右から 2 番目のモデルは二次元として取り扱われ波形こう配の大きい場合にそれぞれ対応していると考えられる。このモデルを三次元的に扱った実験は groin に関連した実験他にはなされていないようである。右端のモデルは移動床の三次元実験に対応し、漂砂量に関連した Saville (1950)²⁸⁾ の実験、R.I. を用いた Taney (1962)²⁹⁾ の実験等があるが、

bar の平面的配置、沿岸流ベクトルの分布等にはふれていない。著者らは 図—4 の水槽で 1/15 にならした模型海浜に 15 時間斜めに波を作用させ、海底地形の変化過程を観察した³⁰⁾。その結果を模式的に示したのが 図—16 の A, B および C である。A は波作用直後の状態で、bar が汀線に平行に配列する。30 分から 1 時間程度で B のように bar はち切れて汀線のカस्पに対応して配列し、5 時間以上経過すると C のように rip current によって沖へ出てきた浅瀬と bar と区別がなくなってくる。

果たしてこのような地形が現地にもできているのだろうか。恐らく時化で一方向から長時間波が作用すれば C のような地形は形成されるであろう。しかし Sonu が示している新潟海岸等での航空写真でよくみられる lunate bar (E) や Shadrin の示している黒海の bar 等 (F) は少しく趣きを異にしている。この問題については King は C のような地形が波向が変われば、D, E となるのではないかと述べており、著者らは機会をみて実験的に確認しようと考えている。なお D のような地形はしばしば現地でみられる。

6. 結 論

本論文においては従来の沿岸流速公式を海底地形の単純な場合と複雑な場合とに分類し、それぞれの式の適用範囲、とくに Inman-Quinn の式を検討した。単純な浜においては固定床実験による Eagleson の式が移動床にも適用できることを示し、複雑な場合については Shadrin の式を紹介した。

Eagleson の式から計算した f を用いて沿岸流が遷移領域にあることが、とくに実験室では多く、相対粗度 $k/(2h_b)$ のみでなく $Re=2Vh_b/\nu$ を考慮すべきである

ことを示した。 R_e の大きい現地の時化のような場合には $k/(2h_b)$ のみで f の妥当な値をうることができる。

さらに沿岸流と密接な関連をもつ碎波帯の地形と波の入射角とから Sonu の示した4つのモデルに対して, Ingle, Shadrin, Medvedev-Aibulatov らの研究成果から著者らは Sonu のモデルと沿岸流速およびその公式を対応させた。なお, 本論文の計算には東京大学データ処理センターの OKITAC 5090 を使用した。

本論文は文部省科学研究費による研究成果の一部である。底面の摩擦係数の取り扱いについては東京大学名誉教授 本間 仁博士の助言をいただいた。本研究を推進するにあたっては, 東京大学工学部土木工学科港湾研究室員の熱心な協力を受けた。また新潟県土木部港湾課および(株) I.N.A. 新土木研究所代表取締役 高居富一氏には数々の配慮をいただいた。ここに記して謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 新潟県土木部：新潟海岸の欠損について, 1960.
- 2) 新潟県土木部：新潟海岸の欠損について(第二輯), 1964.
- 3) The Organizing Committee, The 10 th Conf. on Coastal Engineering: Outline of Coastal Engineering in Japan, 1966.
- 4) Putnam, J.A., Munk, W.H. and Traylor, M.A.: The Prediction of Longshore Currents, Trans. A.G.U., Vol. 30, No. 3, June 1949.
- 5) Inman, D.L. and Quinn, W.H.: Currents in the surf Zone, Proc. of 2nd Conf. on Coastal Engineering, 1951.
- 6) 榎木 亨：沿岸漂砂におよぼす構造物の影響, 第4回海岸工学講演会講演集, 1957.
- 7) 榎木 亨・村上 正：沿岸漂砂量の推定について, 第4回海岸工学講演会講演集, 1957.
- 8) 日本原子力発電株式会社：東海村海岸調査報告, 原電資料, 第一号, 1962.
- 9) Sonu, C.J., McCloy, J.M.: Longshore Currents and Nearshore Topographies, Proc. 10 th Conf. on Coastal Engineering, 1966.
- 10) 東京大学工学部土木工学科港湾研究室・(株) I.N.A. 新土木研究所：岩船港水理模型実験報告書, 1968.
- 11) Eagleson, P.S.: Theoretical Study of Longshore Currents on a Plane Beach, Hydrodynamics Lab. Report, No. 82, M.I.T., 1965.
- 12) 永井荘七郎：海岸防砂堤について, 第1回海岸工学講演会講演集, 1954.
- 13) Galvin Jr., C.J., Eagleson, P.S.: Experimental Study of Longshore Currents on a Plane Beach, Hydrodynamics Lab. Report, No. 63, M.I.T., 1964.
- 14) 佐藤昭二：漂砂, 1966 年度水工学に関する夏期研修会講義集, 1966.
- 15) 運輸省港湾技術研究所, 同 第二港湾建設局: 鹿島港防波堤配置の漂砂に関する模型実験, 1966.
- 16) И.Ф. Шадрин: Вдольбереговые и Компенсационные Течения у Отмелого Аккумулятивного Берега, Морские Берега, Академия Наук СССР, 1961.
- 17) И.Ф. Шадрин: О Возможности Прогноза Вдольбереговых Течений на Бесприливных Морях, Динамика и Морфология Морских Берегов, Труды Института Океанологии, Том XLVIII, Академия Наук СССР, 1961.
- 18) Zenkovich, V.P.: Processes of Coastal Development, Oliver & Boyd, 1967.
- 19) Bruun, P.M.: Longshore Currents and Longshore Troughs, Jour. Geophys. Res., Vol. 68, No.4, 1963.
- 20) Houseley, J.G., Traylor, D.C.: Application of the Solitary Wave Theory to Shoaling Oscillatory Waves, Trans. A.G.U., Vol. 38, 1957.
- 21) Homma, M., Sonu, C.J.: Rhythmic Pattern of Longshore Bars Related to Sediment Characteristics, Proc. 8 th Conf. on Coastal Engineering, 1962.
- 22) Sonu, C.J.: A Treatise on Shore Processes and Their Engineering Significances, Univ. of Tokyo Ph. D. Dissertation, 1961.
- 23) Chow, V.T.: Open Channel Hydraulics, Mc-Graw Hill, 1959.
- 24) 嶋野貞三・本間 仁・堀川清司：海岸水制の効果に関する実験, 第3回海岸工学講演会講演集, 1956.
- 25) Heinrich Press, Ralph Schröder: Hydromechanik im Wasserbau, Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin-München, 1966.
- 26) Ingle, J.C., Jr.: Movement of Beach Sand, Elsevier Publishing Co. Amsterdam-London-New York, 1966.
- 27) Sonu, C.J. Russel, R.J.: Topographic Changes in The Surf Zone Profile, Proc. 10 th Conf. on Coastal Engineering, 1966.
- 28) Saville, T., Jr.: Model Study of Sand Transport along an Infinitely Long, Straight Beach, Trans. A.G.U., Vol. 34, No. 4, 1950.
- 29) Taney, N.B.: Laboratory Applications of Radioisotopic Tracers to Follow Beach Sediments, Proc. 8 th Conf. on Coastal Engineering, 1962.
- 30) 東京大学工学部土木工学科港湾研究室・(株) I.N.A. 新土木研究所：新潟海岸養浜模型実験報告書, 1968.