

碎波帯内戻り流れ (undertow) の推定方法

柴 山 知 也*・Winyu Rattanapitikon**

1. 緒 論

本研究では、碎波帯内の岸沖方向時間平均流速である戻り流れ (undertow) に着目し、その鉛直および岸沖方向分布の算定方法を提案する。戻り流れは底引き流れと呼ばれることもあるが、その推定は、碎波帯内の水理現象を解明し、さらに浮遊砂の移流過程を推定し海浜変形モデルを構成するために必要な手続きである。

しかし、従来の検討はそれぞれの研究者が条件の限られたそれぞれの研究者による主に室内実験での測定結果に基づいて提案しているものばかりで、広範な条件についてデータを総合して検討し、大規模水路の実験から小規模水路の実験まで広範囲の条件について汎用性を有する評価式は無かった。本研究は既往の実験データをデータベースとして集積し、統一した基準を用いて解析することにより、この問題に一つの結論を与えることを目的としている。

2. 推定方法の提案

(1) データベースの構成

文献調査により、表-1 に示す 6 つの論文から、小規模室内実験 (灘岡ら, 1982, Hansen and Svendsen, 1984, Okayasu et al., 1988, Cox et al., 1994), 実規模実験 (鹿島ら, 1983, Kraus and Smith, 1994) を含む 379 ケースに対する碎波帯内定常流の分布計測結果を抽出し、これを対象として解析を行った。データベースの中には 1475 の計測点のデータが整理してある。

(2) 推定の手順

本研究では以下の推定手順を設定した。戻り流れを推定するために、1) 鉛直方向に平均した時間平均流速 (断面平均流速) が与えられた場合に鉛直分布を推定する、2) 碎波帯内断面平均流速の岸沖分布を推定する、3) 上記 1), 2) を組み合わせて碎波帯内戻り流れの岸沖、鉛直分布を推定する、の 3 つの段階を踏む。

表-1 解析に用いたデータの集計

文 献	ケース	断面数	観測点数	底面条件	実験規模
灘岡ら (1982)	1	7	76	plane, smooth	small-scale
〃	5	7	73	〃	〃
Hansen and Svendsen (1984)	1	4	22	plane, smooth	small-scale
Okayasu et al. (1988)	1	6	62	plane, smooth	small-scale
〃	2	6	53	〃	〃
〃	3	6	62	〃	〃
〃	4	6	54	〃	〃
〃	6	7	51	〃	〃
〃	7	6	40	〃	〃
〃	8	7	54	〃	〃
〃	9	6	46	〃	〃
〃	10	6	43	〃	〃
Cox et al. (1994)	1	6	53	plane, rough	small-scale
鹿島ら (1983)	2.1	13	36	sandy beach	large-scale
〃	2.3	10	20	〃	〃
〃	3.3	16	40	〃	〃
〃	3.4	13	37	〃	〃
〃	4.1	10	18	〃	〃
〃	4.2	22	58	〃	〃
〃	4.3	48	194	〃	〃
〃	5.2	57	142	〃	〃
〃	6.1	21	63	〃	〃
〃	6.2	19	59	〃	〃
Kraus and Smith (1994)	STEO	8	11	sandy beach	large-scale
〃	STFO	4	9	〃	〃
〃	STGO	10	16	〃	〃
〃	STHO	10	16	〃	〃
〃	STIO	38	67	〃	〃
計		379	1475	〃	〃

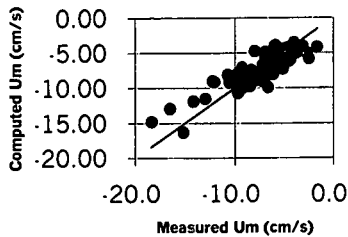
(3) 流速の鉛直分布の算定

まず、1) 流速鉛直分布の評価について説明する。鉛直分布の算定には渦動粘性モデルを用いる。すなわち

$$\tau = \rho \nu_t \frac{\partial U}{\partial z} \dots \dots \dots (1)$$

ここで τ は時間平均した摩擦応力, ρ は密度, ν_t は時間平

* フェロー 工 博 横浜国立大学教授 大学院工学研究院システムの創生部門
** 博(工) タマサート大学助教授 国際工学部土木工学科



図一 断面平均流速の算定値と実測値

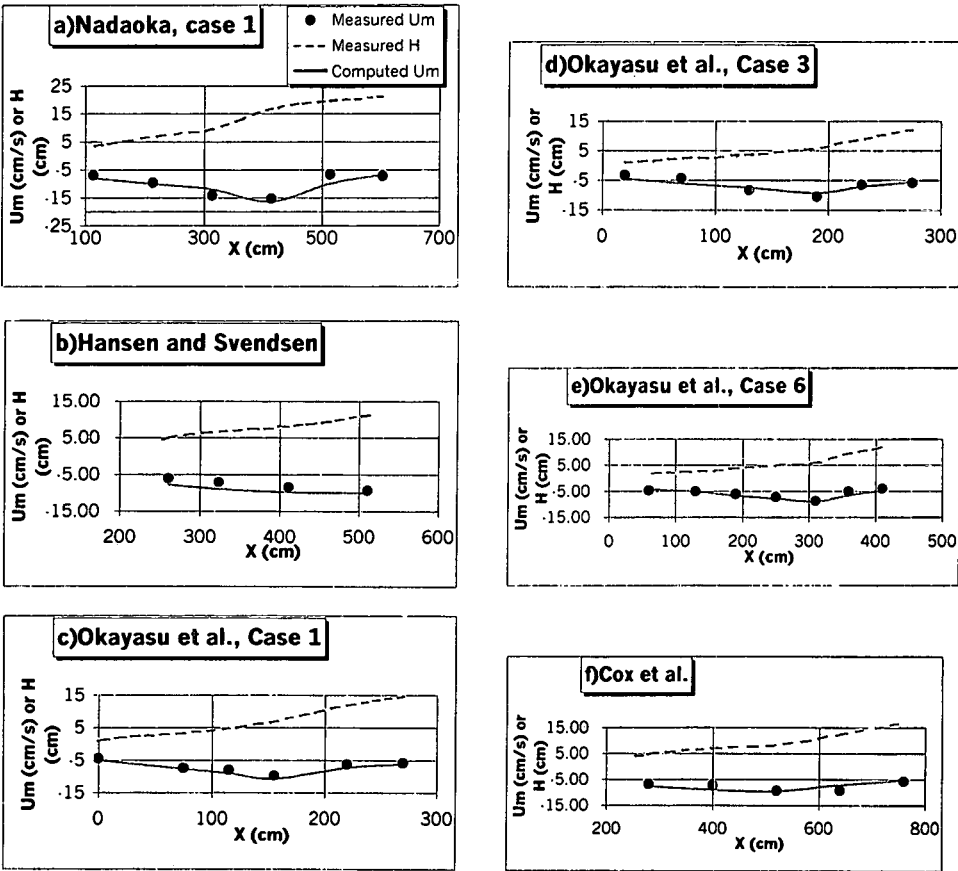
$$U = b_1 \left(\frac{gH^3}{4Th} \right)^{1/3} \left[b_2 \left(\frac{z}{d} - \frac{1}{2} \right) - 0.21 \left(\ln \frac{z}{d} + 1 \right) \right] + U_m \quad (2)$$

の様に与える。ここで、 H は局所的な波高、 T は周期、 h は局所的な平均水深であり、波谷の水深 d 、底面からの高さ z の比、 z/d を用いて鉛直方向の分布を表している。また、 U_m は断面平均流速である。ここで、係数 b_1 、 b_2 については、以下のように与える。すなわち段波形成領域ではいずれの値にも1を与え、遷移域には集積した実験データを用いて最小自乗法により定め、以下のように係数を与える。

$$b_1 = \begin{cases} 0.3 + 0.7 \frac{x_b - x}{x_b - x_t} & ; \text{ transition zone, } \dots (3) \\ 1 & ; \text{ inner zone} \end{cases}$$

$$b_2 = \begin{cases} \frac{x_b - x}{x_b - x_t} & ; \text{ transition zone, } \dots (4) \\ 1 & ; \text{ inner zone} \end{cases}$$

ここで、 x_b 、 x_t はそれぞれ砕波点、段波形成点の座標である。最小自乗法による係数の決定方法の詳細については Rattanapitikon and Shibayama (2000) を参照された



図二 断面平均流の岸沖分布の比較例

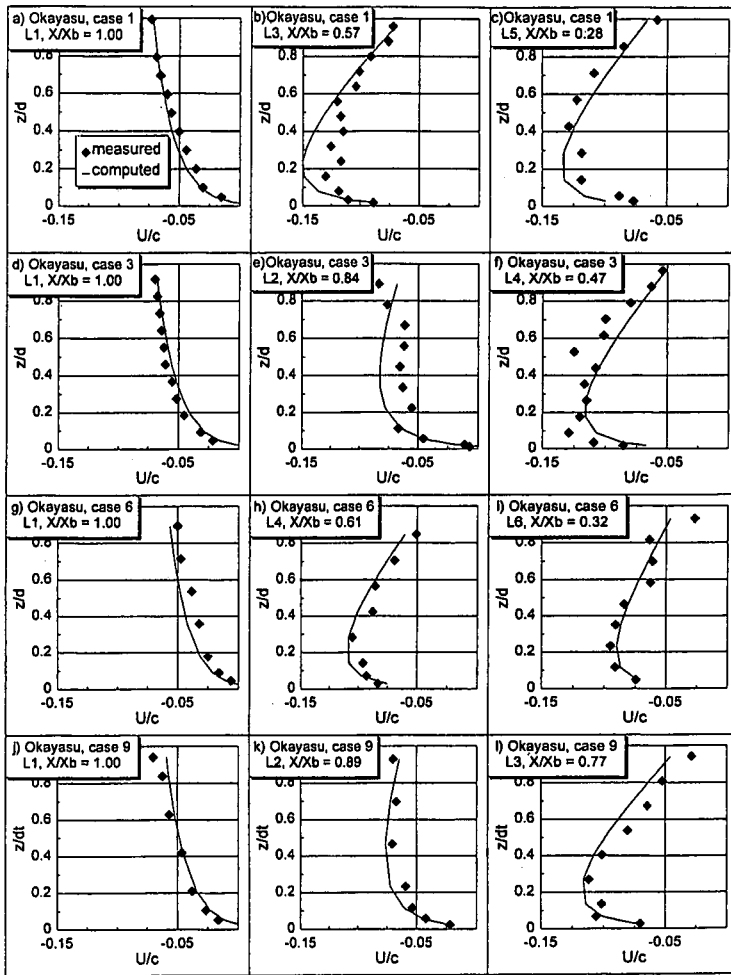


図-3 小規模実験データとの比較 (実験データは Okayasu et al, 1988)

い。

(4) 断面平均流速の評価

次に 2) 断面平均流速については, Svendsen (1984) 流の surface roller の効果の導入から出発する。断面平均流速 U_m は二つの成分に分解可能である。すなわち

$$U_m = U_w + U_r \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで U_w は波動による定常流成分, U_r は surface roller の存在による定常流成分である。

係数決定の途中では, 係数の値を広範な実験結果に対して相対誤差が最小になるように定め, 最終的には次式で評価している (Rattanapitikon and Shibayama, 2000)。ここで右辺第一項は波動による成分 U_w , 第二項は surface roller による成分 U_r である。

$$U_m = -0.76 \frac{B_0 g H^2}{c h} - 1.12 b_3 \frac{B_0 c H}{h} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで c は波の位相速度, B_0 は

$$B_0 = 0.125 + 0.6 m_b - 0.089 \frac{H}{h} \quad \dots\dots\dots (7)$$

で与える。 m_b は平均勾配である。また, 係数 b_3 については

$$b_3 = \begin{cases} 0 & \text{offshore zone} \\ \frac{1/\sqrt{H_i} - 1/\sqrt{H_b}}{1/\sqrt{H_i} - 1/\sqrt{H_b}} & \text{transition zone} \quad \dots (8) \\ 1 & \text{inner zone} \end{cases}$$

すなわち沖浜帯で 0, 段波形成領域では 1 を与えている。また, H_i , H_b はそれぞれ段波形成点, 砕波点での波高である。

3. 提案式の評価

まず, 断面平均流速の評価について述べる。図-1 に断面平均流速の実測値と算定値の比較を各測点ごとの行ったものを示す。図は小規模水路の実験結果 (表-1 に示し

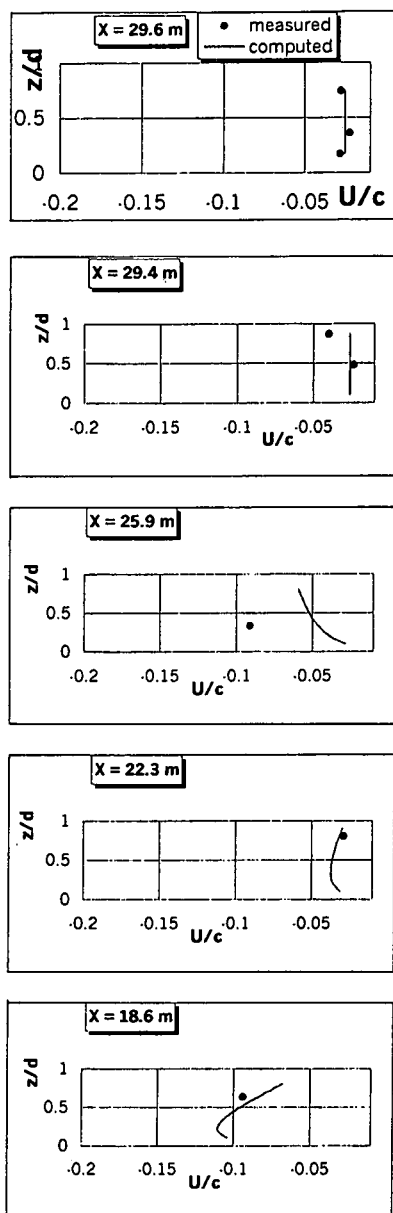


図-4 大規模実験データとの比較

たもののうち、灘岡ら (1982), Hansen and Svendsen (1984), Okayasu et al. (1988), Cox et al. (1994)) について、その結果を纏めて示したものである。図より全体的な傾向としては算定値はよい精度で実測値を推定していることがわかる。

より詳細な比較をするために、図-2 に断面平均流速の岸沖分布の比較例を示す。図には様々な実験者の計測結果が含まれているが、断面平均流速が極小値をとる岸沖位置の推定、断面平均流速の絶対値の推定いずれにおいても、広範囲の条件に対して本算定法は成功を収めて

いる。全体的には実験値の方が変動が大きく出ており、算定値は変動が平均化されているようである。また、Hansen and Svendsen (1984) のケースについては算定値がすべての測定値で負の値の絶対値を過大評価しており、本算定法の限界を示している。

上記の方法を組み合わせ、戻り流れ分布を推定した結果について述べる。まず小規模実験の結果との比較を例示したのが、図-3 (Okayasu et al., 1988 との比較) である。ここで提案した算定法は断面平均流速の推定、鉛直分布の推定の二つのステップを持っているがいずれの推定においても成功していることがわかる。

次に実規模実験 (Kraus and Smith, 1994) の結果と比較したのが図-4 である。実規模の移動床実験の場合、測定された波高のばらつきが大きく、式 (8) の b_3 の推定が負となる場合が出てくる。そこでこの場合のみ式 (4) の b_2 で代用している。実規模の場合には、波高のばらつきにより、いくつかの点 ($x=25.9$ m) で過小評価している傾向が見られるが、これらを除いては推定結果は実験結果をある程度予測している。

4. 結 論

本論では、碎波帯内の戻り流れの簡便な評価方法を提案した。評価式はパラメータの数が少なく、広い範囲の実験条件に対応しており、陽的な形式で表現されているため、計算がしやすく、しかも精度が高いため、十分な実用性を有する。最終的な定常流分布の予測値と実測値の差の自乗平均の平方根を取って求めた相対誤差は、最大のもの (Kraus and Smith, 1994) の場合 39.6%, 最小のもの (Cox et al., 1994) の場合 22.6% であり、この程度の誤差での推定が可能である。

本研究は文部省科学研究費補助金基盤研究 B (No. 11450187 代表者柴山知也) および五洋建設株式会社よりの研究費を用いて行った事を付記する。

参 考 文 献

- 鹿島遼一・斉藤昭三・清水隆夫・丸山康樹・長谷川寛・榊山 勉 (1983): 大型造波水路による岸沖漂砂の実験, 電力中央研究所資料。
- 灘岡和夫・近藤隆道・田中則男 (1982): レーザードップラー流速計による碎波帯内の流速場の構造の解明, 港湾技術研究所報告, Vol. 21, No. 2, pp. 50-102.
- 丸山康樹・榊山 勉・鹿島遼一・斉藤昭三・清水隆夫 (1983): 実規模波浪を用いた碎波帯近傍の波高, 水粒子速度に関する実験的検討, 電力中央研究所, No. 382034.
- Cox, D. T., Kobayashi, N. and Okayasu, A. (1994): Vertical variations of fluid velocities and shear stress in surf zones, Proc. 24th Coastal Engineering Conf., ASCE, pp. 98-112.
- Cox, D. T. and Kobayashi, N. (1997): Kinematic undertow model with logarithmic boundary layer, J. of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Eng., Vol. 123, No. 6, pp. 354-360.

- Deigaard, R. and Fredsoe, J. (1991): Modelling of undertow by a one-equation turbulence model, Coastal Engineering, No. 15, pp. 431-458.
 - Hansen, J. B. and Svendsen, I.A. (1984): A theoretical and experimental study of undertow, Proc. 19th Coastal Engineering Conf., ASCE, pp. 2246-2262.
 - Hansen, J. B. and Svendsen, I.A. (1987): Surf zone breakers with current, Nonlinear Water Waves, IUTAM Symposium, Tokyo/Japan, pp. 169-177.
 - Kraus, N. C. and Smith, J.M. (1994): SUPERTANK Laboratory Data Collection Project, Tech. Report CERC-94-3, U. S. Army Corps of Eng., Waterways Exp. Station, Vol. 1-2.
 - Okayasu, A., Shibayama, T. and Mimura, N. (1986): Velocity field under plunging waves, Proc. 20th Coastal Engineering Conf., ASCE, pp. 660-674.
 - Okayasu, A., Shibayama, T. and Horikawa, K. (1988): Vertical variation of undertow in the surf zone, Proc. 21st Coastal Engineering Conf., ASCE, pp. 478-491.
 - Okayasu, A. (1989): Characteristics of Turbulence Structure and Undertow in Surf Zone, Dr. Eng. Dissertation, Civil Eng., Univ. of Tokyo, Japan.
 - Rattanapitikon, W. and Shibayama, T. (1993): Vertical distribution of suspended sediment concentration in and outside surf zone, Coastal Eng. in Japan, Vol. 36, No. 1, pp. 49-65.
 - Rattanapitikon, W. and Shibayama, T. (2000): Simple model for undertow profile, Coastal Eng. Journal, JSCE, Vol. 42, No. 1, pp. 1-30.
 - Svendsen I.A. (1984): Mass flux and undertow in a surf zone, Coastal Engineering, No. 8, pp. 347-365.
-