

離岸流の発生間隔の予測式

PREDICTION OF INTERVALS OF RIP CURRENTS

柴崎 誠¹・宇多高明²・芹沢真澄³

Makoto SHIBASAKI, Takaaki UDA and Masumi SERIZAWA

¹正会員 (株) 三洋コンサルタント 技術部 (〒750-0067 山口県下関市大和町1-5-7)²正会員 工博 (財) 土木研究センター理事なごさ総合研究室長 (〒110-0016 東京都台東区台東1-6-4 タカラビル)³正会員 海岸研究室 (有) (〒160-0011 東京都新宿区若葉1-22 ローヤル若葉208)

On the basis of conservation equations of mass and momentum fluxes of waves, a predictive equation of intervals of rip currents was proposed. The equation was compared with the field data and the effectiveness was confirmed. The interval of rip currents is given by $Y_r = 0.197 \cdot T \cdot \sqrt{gH_b} (\tan\beta)^{-1}$ using the parameters of wave characteristics and seabed slope. Also the ratio of the interval of rip currents relative to the breaker width is given by $Y_r/B = 0.79 \cdot (H_o/L_o)^{-0.535} (\tan\beta)^{0.27}$.

Key Words : Rip current, theoretical analysis, intervals, prediction

1. はじめに

離岸流による海水浴中の水難事故は数多く起きており, 水難事故の防止上離岸流の特性把握は重要なことである^{1) 2)}. 直線状海岸における離岸流の発生間隔に関する研究については長い歴史がある. Bowen³⁾ およびBowen and Inman⁴⁾ は, 入射波とエッジ波の干渉により離岸流間隔が定まることを指摘した. しかし, 佐々木⁵⁾ は, 緩勾配海岸ではこの考えが必ずしも当てはまらないとした. また日野⁶⁾ は海浜流系を海底地形変動に伴う不安定現象として理論的検討を行ったが, 理論的検討の結果は現地の現象と適合しない面も多いとされている⁵⁾. 一方, 佐々木⁵⁾ および堀川⁷⁾ は, 現地観測データに基づいて離岸流の発生間隔を与える式を示したが, その理論的な妥当性は明らかでない. このように離岸流の発生間隔についていまだ十分明らかにされておらず, 離岸流の発生間隔について, その物理的根拠を持ちつつ入射波諸元, 海底勾配などと直接結び付けた実用に耐える算定式は提案されてないのが現状である. そこで本研究では, 質量および運動量の保存則から離岸流の発生間隔の予測式を導き, 現地データとの比較を行い, その適用性を調べた.

2. 離岸流の発生間隔の予測式

沿岸流流速が無限に加速しないためには, ある距離ごとに碎波帯内へと運び込まれた海水が沖へ流出しなければならないと考えるInman and Bagnold⁸⁾ および水村⁹⁾ にならい, 質量・運動量保存則より離岸流の発生間隔の予測式を導く. この場合, 一様勾配海岸の碎波帯で, 入射波が微小な斜め入射角 (碎波角) α_b を有する条件を考える. 碎波点からの質量フラックスのうち, 岸向き成分は戻り流れによりキャンセルするとして, 質量・運動量保存は碎波線からの流入フラックスの沿岸成分のみを考える. 図-1にInman and Bagnold⁸⁾ および水村⁹⁾ にならった質量保存の関係を示す.

図-1のように沿岸方向に離岸流の発生間隔一個分の区間を切り出し, 碎波帯内の区域abcdでの質量保存を考える. まずadを通して波により岸側へと運び込まれる質量輸送量の沿岸方向成分 M_w と, cdに近接するc'd'を通して沿岸流によって運び去られる水量 M_r は等しくなければならないから式 (1) が成立する. 両者が等しくなければこの区域内の水量は増加し続けるか, 逆に減少し続けることになるからである. M_w および M_r は式 (2), (3) で与えられる. 式 (1) ~ (3) より, 離岸流の発生間隔 Y_r を与える式 (4) が得られる.

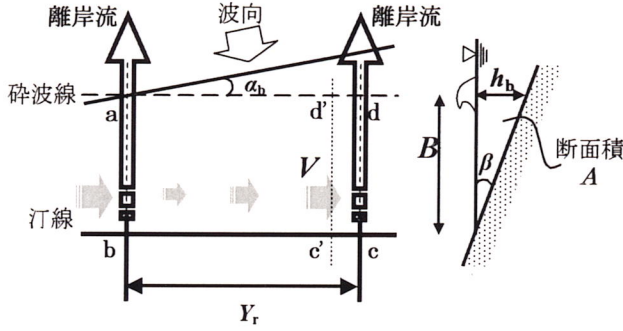


図-1 概念図

$$M_w = M_v \quad (1)$$

$$M_w = Q_w Y_r \cos \alpha_b \sin \alpha_b \quad (2)$$

$$M_v = AV \quad (3)$$

$$Y_r = \frac{AV}{Q_w \sin \alpha_b \cos \alpha_b} \quad (4)$$

ここに Q_w は単位時間における単位波峰線長あたりの波による質量輸送量、 V は沿岸流流速である。一方、孤立波理論より得られる砕波点における Q_w を与える式(5)、砕波波高と砕波水深の関係式(6)、および海浜断面形を三角形と仮定した断面積 A を与える式(7)を式(4)に代入すると、 Y_r は式(8)のように表される。

$$Q_w = 4h_b^2 \sqrt{H_b/3h_b} / T \quad (5)$$

$$H_b = 0.78 h_b \quad (6)$$

$$A = (h_b^2/2) \cot \beta \quad (7)$$

$$Y_r = 0.245V \frac{T}{\sin \alpha_b \cos \alpha_b \tan \beta} \quad (8)$$

ここに、 H_b は砕波波高、 h_b は砕波水深、 T は周期、 $\tan \beta$ は海底勾配である。式(8)は、Inman and Bagnold⁸⁾ および水村⁹⁾ が求めたものと同じであるが、彼らは沿岸流速 V を求めるために V を Y_r で記述したのに対して、本研究では逆に、 Y_r を求めるために Y_r を V で記述した点が大きな違いである。式(8)によれば沿岸流流速 V を与えれば離岸流の発生間隔 Y_r が算定できるので、本研究では、この式に運動量保存則に基づく沿岸流流速式を代入した。

沿岸流流速 V にはLonguet-Higgins¹⁰⁾やCERCの式¹¹⁾など種々の式があるが、以下の理由より、本研究で

は次のKomar and Inman¹²⁾の式を用いる。

$$V = 1.0 \sqrt{gH_b} \sin \alpha_b \cos \alpha_b \quad (9)$$

ここに g は重力加速度 (9.8m/s^2)、また H_b には有義波高を用いるものとしている¹³⁾。この式は、Longuet-Higgins¹⁰⁾ によって運動量保存則に基づいて理論的に導かれた式をベースに、底面摩擦係数と海底勾配の比率が一定に保たれると仮定した上で、現地海岸での観測データ、および水理模型実験データより係数を同定して得られたものであり、式中に海底勾配を含まない点に特徴がある¹³⁾。Komar and Inman¹²⁾は上記の仮定に関して、現地海岸では底面摩擦係数と海底勾配は独立でなく、急勾配海岸の底質は大粒径であるため底面摩擦係数が大きく、緩勾配海岸ではこの逆であるという事実から見て合理的な仮定であるとしている。一方、CERCの式¹¹⁾も、同じくLonguet-Higgins¹⁰⁾の式を現地および実験データへの当てはめにより係数を定めているが、上述の仮定を設けずに当てはめを行っている点が異なり、得られた式に海底勾配が含まれている。Komar¹⁴⁾は多数の現地・実験データに対して、この2つの式の適合性を比較検討し、CERCの式¹¹⁾に比べてKomar and Inman¹²⁾の式の方が現地データへの適合性が高いことを明らかにした¹³⁾。これらの理由より、本研究では沿岸流速の式として現地適合性の高い式(9)を用いた。

式(8)に式(9)を代入すると、離岸流の発生間隔 Y_r を与える式(10)が導かれる。

$$Y_r = 0.245T \sqrt{gH_b} (\tan \beta)^{-1} \quad (10)$$

結局、質量・運動量保存則をもとに離岸流の発生間隔が砕波波高、周期、海底勾配の3パラメータで記述された。さらに、この式に関し堀川らの現地観測データを用いて現地海岸との適合性を調べた。また離岸流の発生間隔と砕波帯幅の関係についても検討した。

3. 離岸流の発生間隔の予測式の比較

式(10)の現地海岸への適用性を調べる前に、比較のため佐々木⁵⁾の経験式について検討する。佐々木⁵⁾は現地観測で得られた周期 T 、砕波波高 H_b 、および海底勾配 $\tan \beta$ を説明変数として回帰分析より離岸流の発生間隔を経験的に与える式(11)を示した。

$$Y_{r2} = 1.08T^{1.41}H_b^{0.54}(\tan \beta)^{-0.64} \quad (11)$$

ただし、 Y_r 、 H_b の単位はm、 T の単位はsである。この式は現地観測で得られた周期 T 、砕波波高 H_b 、および海底勾配 $\tan \beta$ による回帰式であり、実測値との相関は $r=0.947$ とされている⁵⁾。しかし、式(11)に

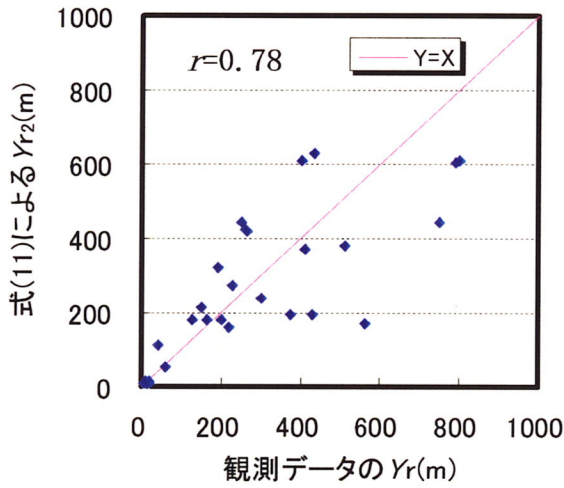


図-2 回帰式より求めた実測値との比較

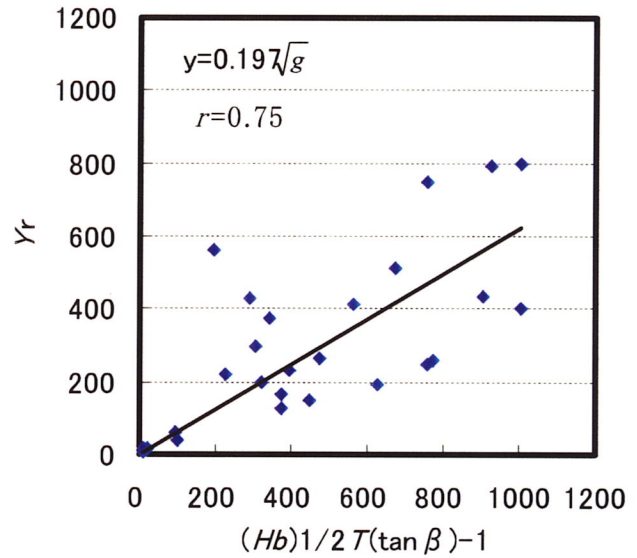


図-4 係数 K の関係

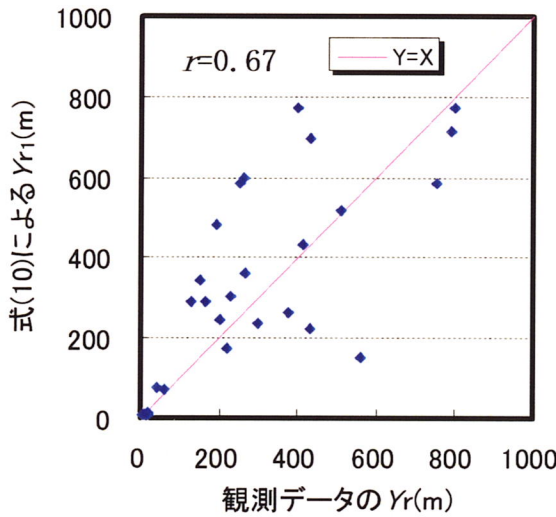


図-3 実測値と Y_{r1} の比較

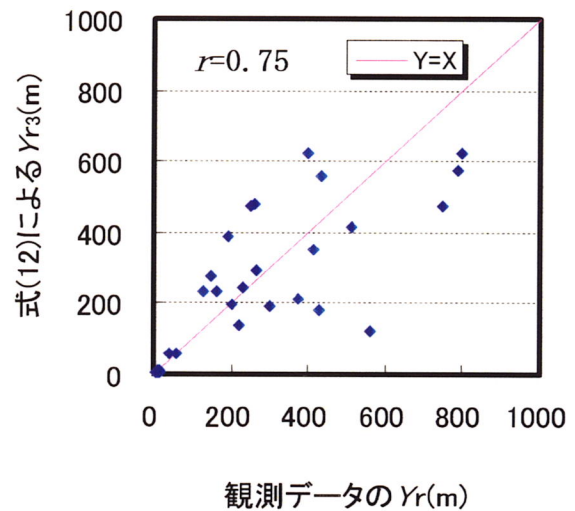


図-5 実測値と Y_{r3} の比較

佐々木の実測値である周期 T 、砕波波高 H_b 、及び海底勾配 $\tan \beta$ を代入した場合の離岸流の発生間隔 Y_{r2} と実測 Y_r を比較すると、図-2に示すように実測値と計算値 Y_{r2} との相関係数は $r=0.78$ となった。

一方、図-3は Y_r の実測値と本研究によって得られた式(10)より計算された Y_{r1} の相関を示す。実測値と Y_{r1} の相関係数は $r=0.67$ であり、これでも現地データとかなり良い対応が見られる。これにより式(10)の定式化の妥当性が示される。さらに、式(10)に関して現地海岸との適合性を高めるために、その係数 $0.245\sqrt{g}=0.77$ を係数 K と置き、現地データより回帰分析により K を求めると、離岸流の発生間隔式 Y_{r3} として式(12)を得る(図-4)。

$$Y_{r3} = 0.197T\sqrt{gH_b}(\tan \beta)^{-1} \quad (12)$$

いま実測 Y_r と計算値 Y_{r3} を比較すると相関係数は

$r=0.75$ と高まった(図-5)。この式は経験的關係を表す佐々木⁵⁾の式(11)と相関係数が同等であり、かつ物理的根拠が明確である。

次に、式(12)について沖波諸元による記述に書き改めて離岸流の発生間隔 Y_r と砕波帯幅 B との関係を調べる。Komar and Gaughan¹⁵⁾による砕波波高と沖波の關係を表す式(13)、Kaminsky and Kraus¹⁶⁾の砕波条件式(14)、および沖波波長 L_o と周期の關係式(15)を用いて式(12)による離岸流の発生間隔 Y_{r3} と砕波帯幅 B の比を求めると、最終的に Y_{r3} と B の關係は式(17)となった。

$$H_b = 0.39g^{1/5}(TH_o^2)^{2/5} \quad (13)$$

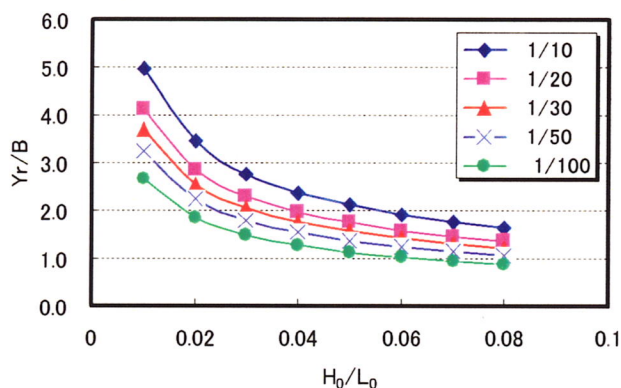


図-6 波形勾配と離岸流間隔/碎波帯幅の関係

$$H_b/h_b = 1.20 \left\{ \frac{\tan \beta}{\sqrt{H_o/L_o}} \right\}^{0.27} \quad (14)$$

$$L_o = \frac{g}{2\pi} T^2 \quad (15)$$

$$B = h_b \cot \beta \quad (16)$$

$$Y_r/B = 0.79(H_o/L_o)^{-0.535} (\tan \beta)^{0.27} \quad (17)$$

図-6には様々な海底勾配に対する波形勾配と Y_r/B の関係を示す。離岸流の発生間隔を碎波帯幅に対する比として求めると、波形勾配、海底勾配に依存するものの、この比は1～5倍となる。また通常の波形勾配では3程度となる。これらは既往研究^{5) 17)}で指摘されたとおりの結果である。

4. 結論

本研究により、離岸流がある間隔を持って発生するという現象の物理的根拠が明確となり、現地海岸における離岸流の発生間隔が、波浪諸元および海底勾配で記述された式(12)で与えられることが結論された。また離岸流の発生間隔と碎波帯幅に対する比は式(17)で与えられることが結論された。実務での予測には図-6を利用できる。離岸流の発生間隔を予測することで、安全な海浜利用や構造物を含めた海浜空間の計画に役立つと考えられる。

参考文献

- 1) 高橋重雄・常数浩二・鈴木高次郎・西田仁志・土棚毅・小林雅彦・小沢保臣：離岸流に伴う海水浴中の事故発生に関する一考察，海洋開発論文集，第15巻，pp. 743-748，1999。
- 2) 宇多高明・三波俊郎・石川仁憲・大西敏郎・芹沢真澄・古池 鋼：プーケット島のパンシービーチにおける水難事故調査報告，海洋開発論文集，第22巻，2006。(印刷中)
- 3) Bowen, A. J.: Rip Currents, 1: Theoretical Investigations, Journal of Geophysical Research, Vol. 74, pp. 5467-5478, 1969.
- 4) Bowen, A. J. and D. L. Inman: Rip Currents, 2: Laboratory and Field Observations, Journal of Geophysical Research, Vol. 74, pp. 5479-5490, 1969.
- 5) 佐々木民雄：海浜流系の構造に関する野外的研究，東京大学学位論文，pp. 320，1975。
- 6) 日野幹雄：海浜流系の発生理論-単純化された理論，第20回海岸工学講演会講演集，pp. 339-343，1973。
- 7) 堀川清司・佐々木民雄・堀田新太郎・桜本 弘：海浜流に関する研究，第15回海岸工学講演会講演集，pp. 347-354，1974。
- 8) Inman, D. L. and Bagnold, R. A.: 'Littoral Processes', in The Sea, M. N. Hill, (editor), Vol. 3, pp. 529-533, New York, Wiley, 1963.
- 9) 水村和正：海岸海洋工学，共立出版，pp. 125-140，1992。
- 10) Longuet-Higgins, M. S.: Longshore Currents Generated by Obliquely Incident Waves, 1-2, Journal of Geophysical Research, Vol. 75, pp. 6778-6801, 1970.
- 11) Coastal Engineering Research Center: Shore Protection Manual, U.S. Army Corps of Engrs, CERC, U.S. Govt. Printing Office, 2Vols., 1984.
- 12) Komar, P. D. and D. L. Inman: Longshore Sand Transport on Beaches, Journal of Geophysical Research, Vol. 75, pp. 5914-5927, 1970.
- 13) Komar, P. D.: Beach Processes and Sedimentation, Second Edition, New Jersey, Prentice-Hall, pp. 544, 1998.
- 14) Komar, P. D.: Beach-Slope Dependence of Longshore Currents, J. Waterway, Port, Coastal, and Ocean Eng., Vol. 105 (WW4), pp. 460-464, 1979.
- 15) Komar, P. D. and M. K. Gaughan: Airly Wave Theory and Breaker Height Prediction, Proc. 13th ICCE, pp. 405-418, 1972.
- 16) Kaminsky, G. and N. C. Kraus: Evaluation of Depth-Limited Wave Breaking Criteria, Waves '93, Amer. Soc. Civil Engrs., pp. 180-193, 1993.
- 17) Huntley D. A. and A. D. Short: On the Spacing Between Observed Rip Currents, Coastal Engineering, pp. 211-225, 1992.