

楕円形島周りの海浜流の実験*

羽島正紘**

An experimental study of the nearshore circulation around an elliptical island*

Masahiro HASHIMA**

Abstract: The equations of the nearshore circulation caused by waves breaking around an elliptical island are solved for a model, and the numerical results are compared with the experimental results that are carried out on models. The theoretical distribution of the mean flow along the island shore agrees well with the experimental values. Furthermore, close agreement is obtained between the experimental results and the flow patterns of Iwo-Jima that is approximated an ellipse.

1. はじめに

海浜流を求める数値計算法は非定常計算法（たとえば、泉宮・堀川，1984）と定常計算法（たとえば，NODA，1974）に大別される。著者は前に定常計算法により，楕円形島周りの循環流を求める基礎方程式を導き，数値計算により海浜循環流を求め，現地海岸との比較検討を行った（羽島，1987）。そこでは移流項および水平拡散項は省略し，時間平均化された量を用いている。また，砕波帯内での底面摩擦速度は水深に比例するとの近似を行っているため，実際の現象と比較する目的で，模型実験を行い，数値計算の結果および現地海岸との比較検討を行う。

2. 実験装置および実験の方法

実験に用いた水槽は長さ 6.15m，幅 1.05m，深さ 0.25m のアクリル製で，模型島の長半径は，105cm，短半径は 90cm，高さ 6cm である。模型島は水槽の上流側から 3.75m の位置に設置し，下流側には消波装置を置いてある。

模型島の大きさおよび静水深は水槽の水深を変えるこ

とにより変化させているので，水深が変わると島の汀線が異なることになる。入射波（周期波）の波高はポイントゲージにより，また周期および波長は抵抗線式波高計により測定している。

流速の測定は水深が極端に浅いこともあって，熱膜流速計，水素気泡法共に困難であることから，上流側にコンデンスミルクを投入し，一定時間間隔で固定カメラにより撮影することで砕波帯内の平均流速を求めている。

実験に用いた条件を Table 1 に示す。

Table 1. Conditions in the experiments.

	Water depth (h cm)	Wave period (T s)	Wave height (H mm)	Wave length (L cm)
Case 1	4.38	0.49	3.5	28.4
Case 2	4.38	0.64	3.0	38.5
Case 3	4.38	0.64	3.5	38.5
Case 4	5.00	0.43	3.5	25.0
Case 5	5.00	0.54	3.0	33.6
Case 6	5.00	0.75	4.0	49.4

3. 数値計算

楕円形島周りの海浜循環流を求める方程式は著者が前に求めた式（羽島，1987）を用いるが，ここに基礎方程式を簡単に記す。

楕円座標 ξ, η において楕円の 2 焦点間の距離を $2C$

*1989年8月17日受理 Received August 17, 1989

**防衛医科大学校物理学教室，〒359 埼玉県所沢市並木 3-2

Department of Physics, National Defense Medical College, Namiki 3-2, Tokorozawa, Saitama, 359 Japan

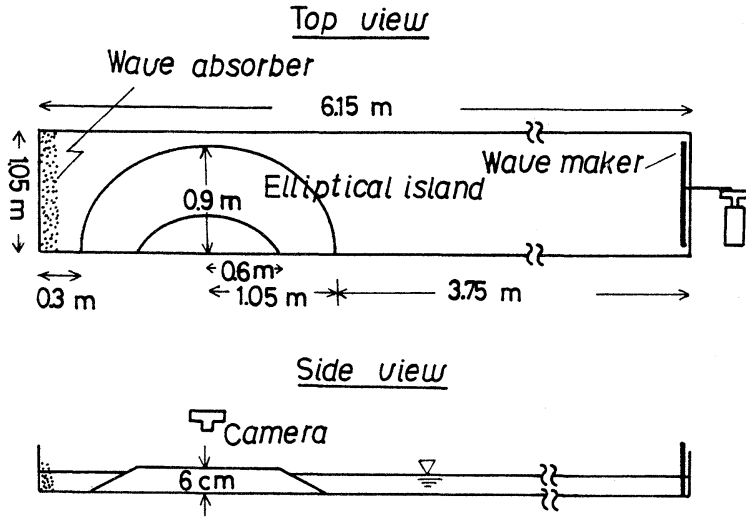


Fig. 1. Experimental instruments.

とし, J を

$$J^2 = C^2(\sinh^2 \xi \cos^2 \eta + \cosh^2 \xi \sin^2 \eta) \quad (3.1)$$

としたとき, 連続の式および運動方程式は移流項及び水平拡散項を無視すると, それぞれ次式で与えられる。

$$0 = \frac{1}{J} \left[\frac{\partial}{\partial \xi} (J d \bar{U}_\xi) + \frac{\partial}{\partial \eta} (J d \bar{U}_\eta) \right] \quad (3.2)$$

$$0 \approx -\rho g d \frac{\partial \bar{\zeta}}{\partial \xi} - T_\xi - J \rho C_f \bar{U}_0 \bar{U}_\xi \quad (3.3)$$

$$0 \approx -\rho g d \frac{\partial \bar{\zeta}}{\partial \eta} - T_\eta - J \rho C_f \bar{U}_0 \bar{U}_\eta \quad (3.4)$$

ここで, h は波のないときの水深, ζ は水面変動量で $d = \zeta + h$ である。 \bar{U}_ξ , \bar{U}_η は水深平均化された流速成分, \bar{U}_0 は水底での水粒子の軌道速度, C_f は海底での摩擦係数, ρ は流体密度である。なお添え字 $-$ は時間平均を意味する。 T_ξ , T_η は radiation stress 項であり, それぞれ次式で与えられる。

$$T_\xi = \frac{\partial S_{\xi\xi}}{\partial \xi} + \frac{\partial S_{\xi\eta}}{\partial \eta} + \frac{1}{J} \left[\frac{\partial J}{\partial \xi} (S_{\xi\xi} - S_{\eta\eta}) + 2 \frac{\partial J}{\partial \eta} S_{\xi\eta} \right] \quad (3.5)$$

$$T_\eta = \frac{\partial S_{\xi\eta}}{\partial \xi} + \frac{\partial S_{\eta\eta}}{\partial \eta} + \frac{1}{J} \left[\frac{\partial J}{\partial \eta} (S_{\eta\eta} - S_{\xi\xi}) + 2 \frac{\partial J}{\partial \xi} S_{\xi\eta} \right] \quad (3.6)$$

ここに S_{ij} は

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} S_{\xi\xi} & S_{\xi\eta} \\ S_{\xi\eta} & S_{\eta\eta} \end{bmatrix} = \frac{1}{4} \rho g A^2 \begin{bmatrix} 3 - 2 \sin^2 \beta & \sin 2\beta \\ \sin 2\beta & 3 - 2 \cos^2 \beta \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

であり, A は波の振幅, β は波向角である。砕波帯より沖側の領域では radiation stress による水面変動量を $\bar{\zeta}$, 循環流による水面変動量を $\bar{\zeta}_c$ とし

$$\bar{\zeta} = \bar{\zeta}_r + \bar{\zeta}_c$$

とおくとき, $\bar{\zeta}_r$ は radiation stress とつり合っているとす (LIU and MEI, 1976)。また $\bar{\zeta}_c$ は水深に比して小さいので, $\bar{\zeta}_c + h \approx h$ とおくと, 砕波帯外での連続および運動の式は

$$0 = \frac{1}{J} \left[\frac{\partial}{\partial \xi} (J h \bar{U}_\xi) + \frac{\partial}{\partial \eta} (J h \bar{U}_\eta) \right] \quad (3.9)$$

$$0 \approx -\rho g h \frac{\partial \bar{\zeta}_c}{\partial \xi} - J \rho C_f \bar{U}_0 \bar{U}_\xi \quad (3.10)$$

$$0 \approx -\rho g h \frac{\partial \bar{\zeta}_c}{\partial \eta} - J \rho C_f \bar{U}_0 \bar{U}_\eta \quad (3.11)$$

で与えられる。なお $\bar{\zeta}_r$ は radiation stress 項を積分しても得られるが, 近似的に

$$\bar{\zeta}_r = -\frac{k A^2}{2 \sin h k h} \quad (3.12)$$

によって与える。また砕波帯外での \bar{U}_0 は

$$\bar{U}_0 = \frac{g k A}{\omega \cosh k h} \quad (3.13)$$

である。ここで, 流れ函数 ϕ を

$$\bar{U}_\xi = -\frac{1}{J} \frac{1}{d} \frac{\partial \phi}{\partial \eta}, \quad \bar{U}_\eta = \frac{1}{J} \frac{1}{d} \frac{\partial \phi}{\partial \xi} \quad (3.14)$$

によって定義する (砕波帯外では $d \approx h$ とする)。このとき連続の式 (3.2), (3.9) は自動的に満足される。なお砕波帯内での波の振幅は水深に比例するものとし, 比例定数 γ とおき, $A = \gamma d$ で与えると, (3.3), (3.4) 式および (3.10), (3.11) 式より ϕ に関する Poisson 方程式が得られる。波動場はスネルの法則を楕円形島に適用した次の波向線方程式 (羽島, 1987) を用いる。

$$\frac{d\eta}{d\xi} = \frac{\pm J_0 k_0 \sin \alpha_0}{\sqrt{J^2 k^2 - J_0^2 k_0^2 \sin^2 \alpha_0}} \quad (3.15)$$

ここに、 α_0 は波が楕円の長軸に平行に入射するときの初期入射角、 k は波数、添え字0は波の入射位置 $\xi = \xi_0$ 、 $\eta = \eta_0$ に対する値を示す。得られた波向線から波向線間隔を求め、波高分布を求める。碎波位置の決定は $A/h = \gamma$ を用いている。

数値計算は Table 1 の条件を用い、 $C_f = 0.01$ 、 $\gamma = 0.4$ とし、 ϕ に関する Poisson 方程式を差分法し SOR 法により ϕ を求める。境界条件は $\xi = \xi_0$ 、 $\eta = 0$ 、 π および平均汀線上で $\phi = 0$ とする。

4. 数値計算と実験結果の比較検討

島の上流側にミルクを投入後の碎波帯内の流れの様子が、Case 4 について、Fig. 2 に示されている。波は写真の右側から入射し、(A) はミルクを投入してから 4 秒後、(B) は 10.5 秒後である。流れは碎波帯内において下流に向い、速度が減るとともに沖合にゆっくりと流れている。数値計算の結果 (Fig. 3) では、碎波帯内で汀線に沿って下流に向かう沿岸流が認められ、実験結果と良く一致している。ただし実験では岸沖方向の碎波帯内での流速分布は求められていないので、計算結果との比較は明らかではない。また、下流側において流速が

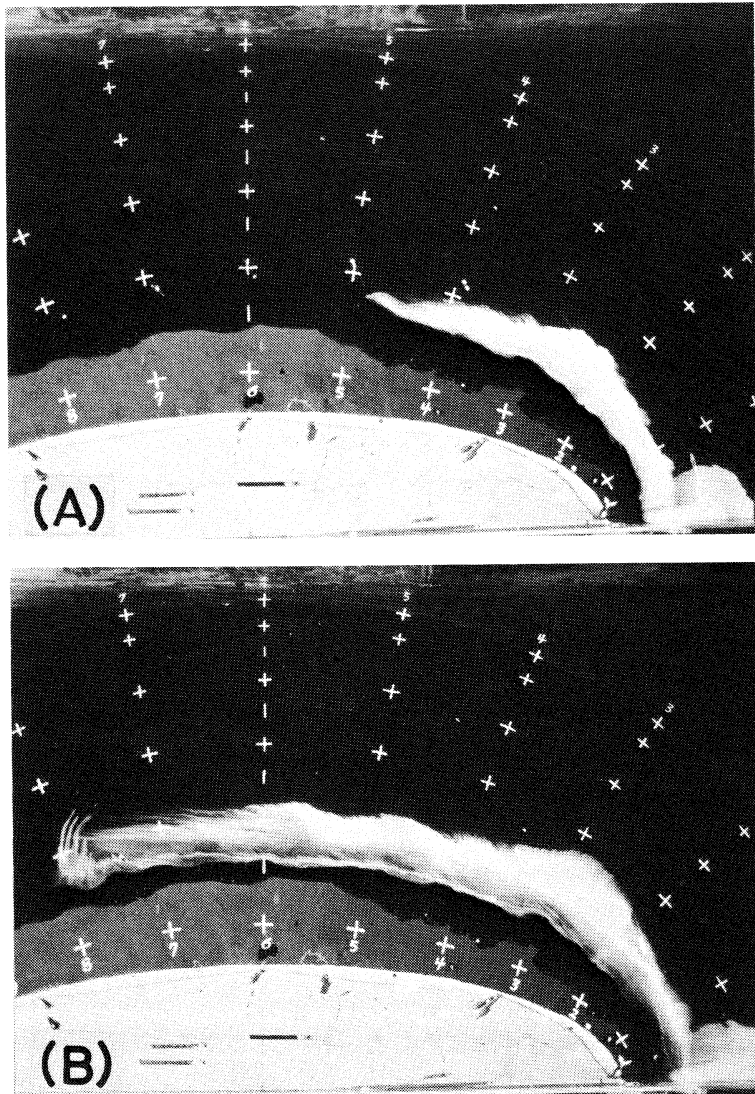


Fig. 2. Time sequence of the flow structure (Case 4). The incident wave arrives from the right.

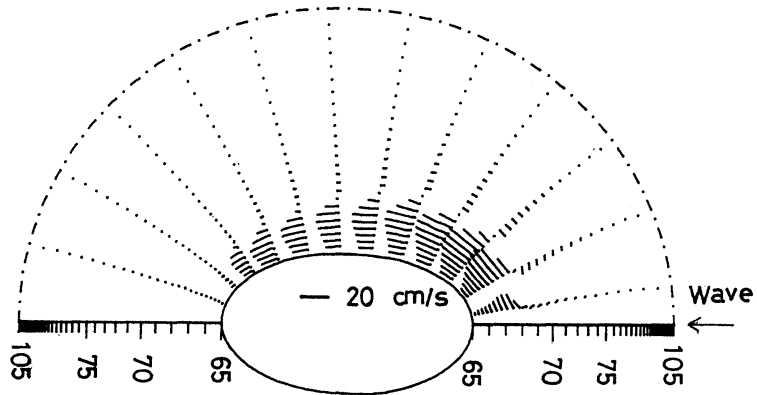


Fig. 3. Velocity vectors that are computed numerically around an elliptical island for Cass 4. Axis unit in cm.

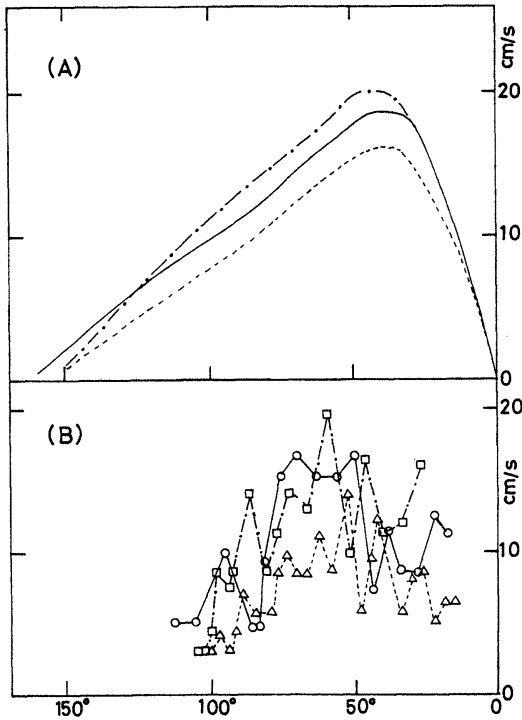


Fig. 4. Velocity distribution along the shore. (A) Theoretical; (B) experimental. Solid line, Case 1; broken line, Case 2; chain line, Case 3.

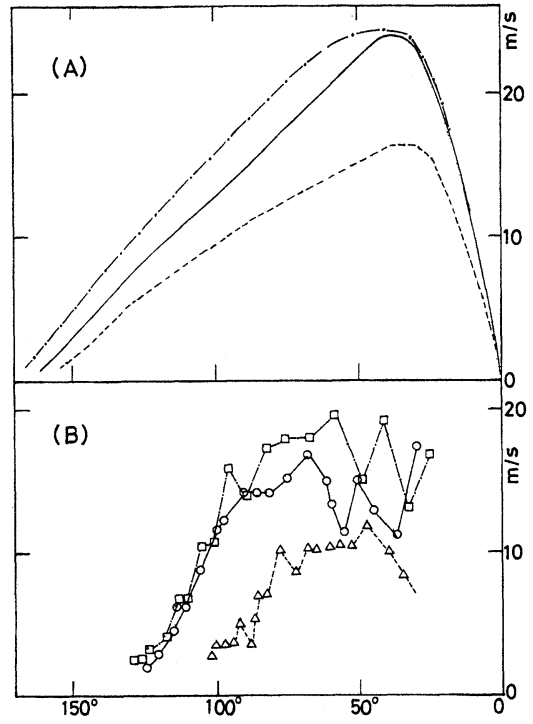


Fig. 5. Velocity distribution (A) Theoretical; (B) experimental. Solid line, Case 4; broken line, Case 5; chain line, Case 6.

ほぼゼロとなるような位置は実験と計算結果とは一致していないが、この実験においては実験装置が小さく、碎波帯の水深も mm のオーダーであり表面張力の影響および粘性抵抗も無視出来ないで、それらの影響と考えら

れる。

碎波帯での岸沖方面の平均流速の汀線方向に対する分布が Case 1-3 については Fig. 4 に、また、Case 4-6 については Fig. 5 に示されている。(A) は計算結果、

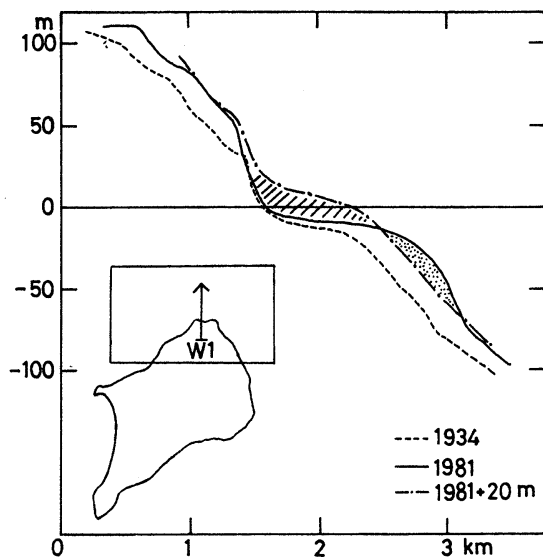


Fig. 6. Topographic change across the line W1, 1934 and 1981. Chain line, estimated uplift value of 20 m; hatched area, erosion; dotted area, accumulation.

(B) は実験結果である。いずれの場合も流速値は計算による方が大きい値を示しており、特に下流側において実験による値の方が小さく、また減衰もはなはだしい。これは碎波帯幅の差にもよるが、前に述べた表面張力および粘性の影響によるものである。また、流速が最大を示す位置は実験結果のほうがやや下流側となっているが、これは模型の長軸を水槽の壁面に接触させて設置したため、水槽壁面の影響が現れたものと考えられる。

Fig. 4において、Case 1は $T=0.49s$, $H=3.5\text{ mm}$, Case 2は $T=0.64s$, $H=3.0\text{ mm}$, Case 3は $T=0.64s$, $H=3.5\text{ mm}$ であるが、Case 1の、より周期の小さい時の方が流れは下流側にまで達している。また、同じ周期のときは当然波高の大きい方がより大きい流速値を示しており、これは Fig. 5の Case 4-6でも全く同じ傾向を示し、計算値と実験値との良好な一致が得られている。また、Fig. 4と Fig. 5とでは水深が異なっており、島の大きさが異なる。即ち、Fig. 4の Case 1-3の方が Fig. 5の Case 4-6より島は大きい。Fig. 4および Fig. 5から分かるように、島が小さい方が沿岸流は下流の方向により達しており、計算結果と実験結果は一致している。また、波向線方程式において $Jk > J_0 k_0 \sin \alpha_0$ が成立しなければならないが、これは島の大きさおよび波の初

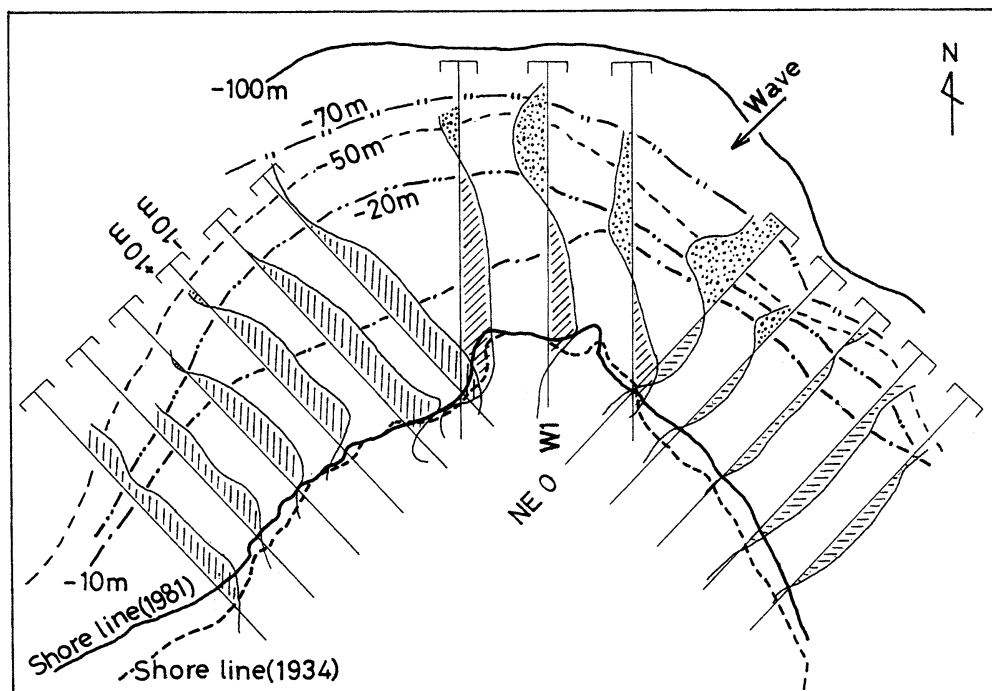


Fig. 7. Distribution of the eroded and accumulated value at the north coast region between 1934 and 1981.

期入射角に依存するので、島が小さい方が波は島の背後に周り込むことになる。

5. 現地海岸との比較検討

上記実験結果を硫黄島海岸に適用する。島は隆起現象が顕著で、大きい所で年間約 30cm 隆起する。島の北海岸の測線 W1 について 1934 年と 1979 年の標高および水深 (1981) を比較したのが Fig. 6 である。陸上部においては 30m 以上隆起しているのに対し水深 20m 以浅ではほとんど変化していないが、それ以上の水深では 20m 程度の変化がある。これは島が隆起しても水深の浅いところでは波によって侵食されることを意味する。海底での隆起量が陸上部と同じであるかどうかは不明であるが、20m の等隆起量を仮定 (一点鎖線) すると、図において斜線部が侵食され、点で示された領域に堆積したことになる。島の北海岸について、各々の測線に対し侵食量と堆積量の分布を求めた結果が Fig. 7 である。加藤・池田 (1984) は、水深変化の分布を求め同様な結果を得ている。硫黄島の年間を通じての波の卓越方向は北東である。島を楕円近似したときの楕円の長軸を図の測線 NE 0 方向とすると楕円の長軸付近に堆積領域が認められるのに対し、他の領域ではほとんどが侵食域となっている。即ち、楕円の長軸方向では侵食された土砂は沖に堆積している。このことは Fig. 2 の実験による写真の結果でも、投入した染料は一部は下流に流されるが

他は沖に拡散している。また、東南および西南方向にいくにしたがって侵食された土砂は沿岸流によって下流に流され、沖には輸送されていない。これらのことから実験結果と現地海岸とは良く一致している。

6. おわりに

楕円形島周りの波による海浜流を求める基礎方程式において、水平拡散項および移流項は省略して時間平均化された量を用い、底面摩擦速度の近似を行い、数値計算した結果、模型実験および現地海岸と良く一致することが確認され、楕円形島周りの海浜流を求める基礎方程式の妥当性が明らかになった。

文 献

- 加藤 茂, 池田 勉 (1984): 硫黄島周辺の海底地形。海上保安庁水路部研究報告, **19**, 59-73.
- 羽島正紘 (1987): 楕円形島における海浜循環流。ながれ, **6**, 351-358.
- LIU, P.L.F and C.C. MEI (1976): Water motion on a beach in the presence of a breakwater. *J. Geophys. Res.*, **81**, 3085-3094.
- NODA, E.K (1974): Wave-induced nearshore circulation. *J. Geophys. Res.*, **79**, 4097-4106.
- 泉宮尊司, 堀川清司 (1984): 沿岸砂州のある海浜における波動場および海浜流予測。第 31 回海岸工学講演会論文集, p.401-405.