

航走波を利用したサーフスポットの形成

鹿児島大学大学院理工学研究科 学生会員 木村晃彦
鹿児島大学大学院理工学研究科 正会員 柿沼太郎
鹿児島大学大学院理工学研究科 学生会員 山下 啓

1. 序 論: サーフィンには、波高の比較的大きな外海で行なわれることが多い。しかしながら、そのようなサーフスポットは、交通の便が悪い場所にあることが多く、また、サーフスポットに到着した際に、サーフィンに適した波が発生しているとも限らない。そこで、本研究では、人工的にサーフスポットを形成することを考える。より多くの人々が親しむことのできるサーフスポットを形成し、その数を増加させることは、サーフィン人口の増加、延いては、新たなレジャースポットの創出に結びつくであろう。ところで、サーフスポット形成に関する既往の研究では、波高が比較的大きな水域を対象とし、サーフィンに適した碎波形態を実現する手法を考察している (eg. 中野ら, 1994)。ここでは、内湾といった元来静穏な水域に、新たなサーフスポットを形成することを目的とする。すなわち、桜島フェリーの航走波に着目し、この伝播波を制御して、錦江湾内にサーフスポットを形成する方法を数値シミュレーションに基づき検討する。

2. サーフィンに適した波の検討: サーフィンに適した波を特定するために、鹿児島県内各地のサーフスポットに定期的に通うサーファに対して、アンケート調査を実施した。アンケートは、72 人に対して、口頭、あるいは、電子メールで行なった。質問事項は、性別、サーフボードの種類、サーフィン経験年数、よく訪れるサーフスポット、そして、サーフィン可能最小波高である。なお、日本人サーファは、図-1 に示すように、波高を体の部位を用いて表わす。これは、フィートを用いる海外と異なる。アンケートの結果、ショートボードのサーフィン可能最小波高は、ヒザ～モモ、ロングボードとボディーボードは、スネ～ヒザであり、初級者の方が上級者よりサーフィン可能最小波高が大きいことがわかった。これより、幅広いサーファに適した波は、初心者のショートボードのサーフィン可能最小波高である 50 cm 以上の波高を有する波と特定される。

3. 基礎方程式系と数値解析法: 非粘性かつ非圧縮性である流体の非回転運動を対象とする。速度ポテンシャルを $\phi(\mathbf{x}, z, t) = \sum_{\alpha=0}^{N-1} \{f_{\alpha}(\mathbf{x}, t) \cdot z^{\alpha}\}$ のように N 個のべき関数の重み付き級数に展開する。変分法を適用すると、次式のような非線形方程式系 (柿沼, 2001) が得られる。

$$\eta^{\alpha} \frac{\partial \eta}{\partial t} + \nabla \cdot \{ (\eta^{\alpha+\beta+1} - b^{\alpha+\beta+1}) \nabla f_{\beta} \} - \frac{\alpha\beta}{\alpha+\beta-1} (\eta^{\alpha+\beta-1} - b^{\alpha+\beta-1}) f_{\beta} = 0 \quad (1), \quad \eta^{\beta} \frac{\partial f_{i,\beta}}{\partial t} + \frac{1}{2} \eta^{\beta+\gamma} \nabla f_{\beta} \nabla f_{\gamma} + \frac{1}{2} \beta \gamma \eta^{\beta+\gamma-2} f_{\beta} f_{\gamma} + g \eta = 0 \quad (2)$$

ここで、 $\eta(\mathbf{x}, t)$ 及び $b(\mathbf{x})$ は、それぞれ、水面変動及び底面形であり、 $\nabla = (\partial/\partial x, \partial/\partial y)$ は、水平方向の微分演算子である。重力加速度 g は、 9.8 m/s^2 とする。時間発展には、Nakayama・Kakinuma (2010) に類似した差分法を用いる。速度ポテンシャルの展開項数 N は、波の分散性が考慮される 2、または、3 とする。

桜島フェリーは、全長 56.1 m、幅 13.5 m、喫水 2.8 m 及び平均航行速度 $V_s = 4.94 \text{ m/s}$ であるから、その航走波は、森田ら (1995) より、初期波長 $L_0 = 2\pi V_s^2/g \approx 15.6 \text{ m}$ 、初期周期 $T_0 = 2\pi V_s/g \approx 3.2 \text{ s}$ である。これより、航走波の初期波形を $\eta = a\{1 + \cos(2\pi x/15)\}$ ($0 \text{ m} \leq x \leq 7.5 \text{ m}$) とし、また、初期波高を $a = 1.0 \text{ m}$ とする。

4. 集波構造物とリーフ: 航走波を制御して、上述のサーフィンに適した波とするため、図-2 のような集波効果のある構造物と、図-3 に示すようなリーフを併用する。まず、静水深が 10 m で一様である水域を仮定し、波高増幅率が大きくなる集波構造物の収縮角 θ_a 及びリーフの前面勾配 θ_b を検討する。なお、 $N = 2$ とする。

4.1 集波構造物による集波効果の検討: 集波構造物の収縮角 θ_a の値を 30° 、 45° 及び 60° とした場合、図-2 の点 A における水面変動の計算結果を図-4 に示す。ここで「曲線」と示した計算結果は、図-2 の破線のような曲線を集波構造物の収縮部の壁面に取り入れた場合の結果である。表-1 に示すように、 $\theta_a = 60^\circ$ の場合に、波高増幅率が最大となった。ただし、 θ_a が 45° と 60° の場合には、最大波高にあまり大きな違いがなかった。また、収縮部が曲線の場合、波高増幅率があまり大きくなかった。

4.2 リーフによる波高増幅の検討: リーフ天端上静水深を 1 m として θ_b の値を 30° 、 45° 、または、 60° とする。集波構造物のみの場合、4.1 で述べたように、 θ_a が 45° と 60° で最大波高に大きな違いがなかったが、これにリーフを組み合わせると、図-5 に示すように、両者の最大波高の差が大きくなった。表-2 より、 $\theta_a = 60^\circ$ 、かつ、 $\theta_b = 45^\circ$ のとき、波高増幅率が最大値の約 3.1 であった。

5. 実地形を対象とした数値シミュレーション: 次に、錦江湾の実地形を対象として構造物設置位置を選定し、

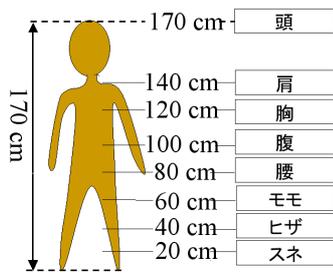


図-1 日本人サーファの波高表記

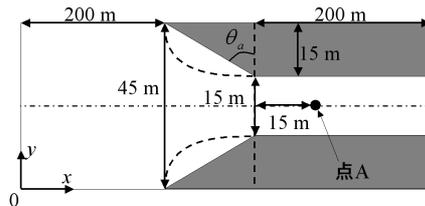


図-2 集波構造物 (plan view)

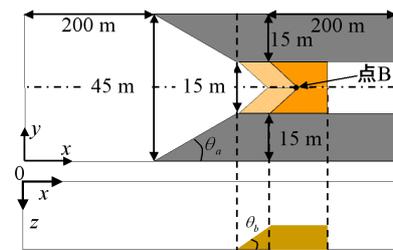


図-3 リーフ (上: plan view, 下: side view)

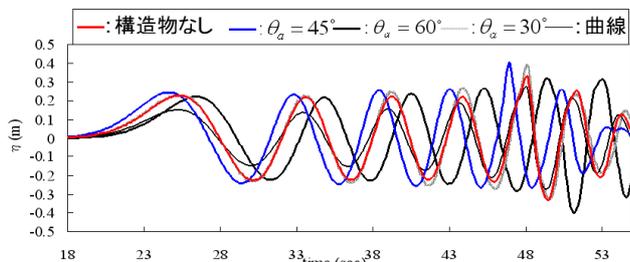


図-4 図-2 の点 A における水面変動 η

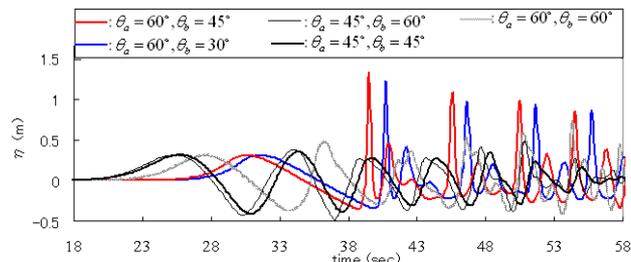


図-5 図-3 の点 B における水面変動 η

表-1 図-2 の点 A における波高増幅率

	最大値	最小値	最大波高	増幅率
構造物無し	0.28	-0.27	0.55	1.00
$\theta_a=60^\circ$	0.32	-0.40	0.72	1.31
$\theta_a=45^\circ$	0.39	-0.32	0.71	1.30
$\theta_a=30^\circ$	0.41	-0.26	0.67	1.22
曲線	0.33	-0.33	0.66	1.20

表-2 図-3 の点 B における波高増幅率

	$\theta_a=60^\circ$			$\theta_a=45^\circ$	
	30.00	45.00	60.00	45.00	60.00
最大値	1.22	1.33	0.73	0.35	0.48
最小値	-0.40	-0.35	-0.41	-0.41	-0.48
最大波高	1.61	1.68	1.14	0.77	0.96
増幅率	2.93	3.06	2.07	1.39	1.73



図-6 構造物設置位置

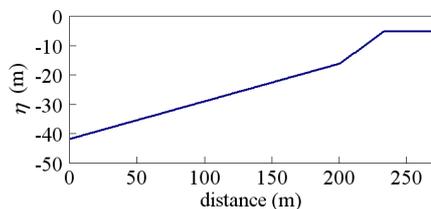


図-7 構造物～航路間の水深分布

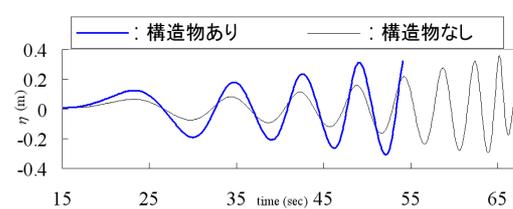


図-8 図-6 の点 C における水面変動

航走波を利用したサーフスポット形成の可能性を検討する。図-6に、桜島フェリーの航路及び構造物設置位置を示す。すなわち、航路から240m離れた地点を集波構造物の開始点とした。この地点と航路の再接点との間の水深分布を図-7に示す。集波構造物の収縮角を $\theta_a = 60^\circ$ 、リーフの前面勾配を $\theta_b = 45^\circ$ 、 $N = 3$ としたときの、図-3の点Bにおける水面変動の数値解析結果を図-8の青色のグラフで示す。この「構造物あり」の場合、 $t = 54$ sにおいて、水面における境界条件が満たされず、計算が発散した。これが砕波点であると考えると、点Cにおける砕波波高が約0.6mとなり、前述のサーフィンに適した波の波高条件が満たされている。

6. 結論: アンケートを実施し、幅広いサーファに適した波の波高が50cm以上であることを特定した。これを踏まえ、集波構造物とリーフを併用して、桜島フェリーの航走波の伝播波を制御することにより、錦江湾内にサーフスポットを形成する手法を数値シミュレーションに基づき検討した。まず、静水深が一樣な水域を仮定し、波高増幅率が最大となる集波構造物の収縮角及びリーフの前面勾配を決定した。次に、錦江湾の実地形を対象とし、本手法により、サーフィンに適した波の生成が計算上可能であることを示した。

参考文献

柿沼太郎: 透水性海浜における内部波の挙動の数値計算, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 146-150, 2001.
 中野 晋・三島豊秋・中野孝二・三井 宏: サーフィンに適するデルタ型リーフ周辺の波浪特性, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 721-725, 1994.
 森田修二・榎木 享・出口一郎・奥田晋史: 港内における航走波の簡易解析手法, 海洋開発論文集, Vol. 11, pp. 13-18, 1995.
 Nakayama, K. and Kakinuma, T.: Internal waves in a two-layer system using fully nonlinear internal-wave equations, Int. J. Numer. Meth. Fluids, Vol. 62, pp. 574-590, 2010.