

航走波を利用したサーフポイントの形成

Surf Points Using Ship Generated Waves

木村晃彦¹・山下 啓¹・柿沼太郎²

Akihiko KIMURA, Kei YAMASHITA and Taro KAKINUMA

The method of amplifying ship generated waves with both wave concentration structures and a reef to obtain sufficiently high waves for surfing is discussed to build surf points also in a calm area of coastal zone. The most appropriate condition of waves for surfing is defined according to the questionnaire to local surfers in Kagoshima, Japan. The most effective shape of the structures is determined through numerical calculation of amplification factors of wave height. Numerical computations, as well as hydraulic experiments, of ship generated waves amplified using the structures are performed, resulting that it is feasible to build a surf point in Kagoshima Bay by amplifying waves generated by the ferries through the presented method with the most effective structures consisted of the wave concentration structures and the reef.

1. 序 論

サーフィンは、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、そのようなサーフポイントは、交通の便が悪い場所にあることが多く、また、サーフポイントに到着した際に、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、人工的にサーフポイントを形成する手法を考える。より多くの人々が親しめるサーフポイントを形成し、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、新たなレジャーポイントの創出に結び付くであろう。

ところで、サーフポイント形成に関する既往の研究の主たる目的は、波高が比較的大きな水域において、サーフィンに適した碎波形態を実現する手法を考察することであった (e.g. 中野ら, 1994)。これに対し、ここでは、内湾といった元来静穏な水域に新たなサーフポイントを形成することを目的とする。すなわち、フェリー等の航走波として生成され伝播して来た波を制御し、サーフィンに適した波となるよう増幅させてサーフポイントを形成する手法を数値解析と水理実験に基づき検討する。

まず、アンケートを実施し、サーフィンに適した波の波高を特定する。ここでは、鹿児島県におけるサーフィン可能最小波高を明らかにする。

次に、波の増幅手法に関して検討する。本研究では、集波構造物とリーフを組み合わせた構造物を用いて、入射波の増幅を行なう。集波構造物及びリーフのそれぞれの形状や諸元に関して、波の増幅効果が大きくなる最適値を数値解析によって見出す。

そして、この構造物を適用した場合の、鹿児島湾内におけるサーフポイント形成の可能性を検討する。すなわ

ち、鹿児島湾の実地形を対象として構造物設置位置を選定し、桜島フェリーの航走波を入射波とした数値シミュレーション、並びに、フェリー模型を走行させた水理実験を行ない、上記の構造物を用いて、サーフィンに適した波が得られるかを調べる。

2. サーフィンに適した波の波高

サーフィンに適した波を特定するために、鹿児島県内の7箇所のサーフポイン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、100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、よく訪れるサーフポイント、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、フィート単位で表わす海外と異なっている。アンケートの結果、鹿児島県におけるサーフィン可能最小波高は、ショートボードがヒザ〜モモ、ロングボード及びボディボードがスネ〜ヒザであり、また、上級者よりも初級者の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た。

なお、宮崎県でも同様のアンケート調査を行なったところ、初級者のサーフィン可能最小波高は、鹿児島県と同程度であったが、上級者は、波高が小さいときにサーフィンをしないという、鹿児島県と異なる結果となった。これは、宮崎県では、ほぼ一年中サーフィン可能な波が発生しており、波高が小さいときには、技術的に可能であっても、無理にサーフィンをする必要がないからである。サーフポイントを形成する際には、各地域の特色を踏まえてサーフィン可能最小波高を特定する必要がある。

1	学生会員	修(工)	鹿児島大学大学院 理工学研究科 生命環境科学専攻
2	正会員	博(工)	鹿児島大学大学院 准教授 理工学研究科 生命環境科学専攻

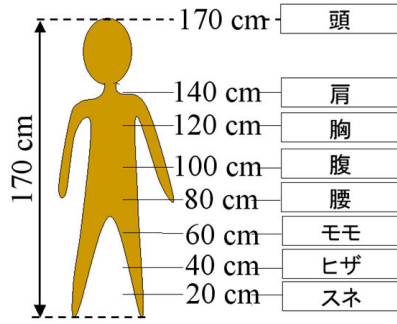


図-1 日本人サーファの波高表記及び波高の大まかな値

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。次式のように、速度ポテンシャル ϕ を N 個のべき関数の重み付き級数に展開する。

$$\phi(\mathbf{x}, z, t) = \sum_{\alpha=0}^{N-1} \{f_{\alpha}(\mathbf{x}, t) \cdot z^{\alpha}\} \quad (1)$$

変分法を適用すると、次式のような非線形波動方程式系（柿沼，2001）が得られる。

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

$$\eta^{\beta} \frac{\partial f_{\beta}}{\partial t} + \frac{1}{2} \eta^{\beta+\gamma} \nabla f_{\beta} \nabla f_{\gamma} + \frac{1}{2} \beta \gamma \eta^{\beta+\gamma-2} f_{\beta} f_{\gamma} + g \eta = 0 \quad (3)$$

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。

数値解析において、式(2) 及び (3) を Nakayama・Kakinuma (2010) に類似した差分法を用いて解く。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最低次数である 2 とする。

また、数値解析では、伝播して来た航走波を入射波として与える。桜島フェリー（第十五及び第十八櫻島丸）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。従って、その航走波は、森田ら（1995）より、初期波長が $L_0 = 2\pi V_s^2/g \doteq 15.6 \text{ m}$ 、初期周期が $T_0 = 2\pi V_s/g \doteq 3.2 \text{ s}$ となる。これより、航走波の初期波形を $\eta = a\{1 + \cos(2\pi x/15)\}$ ($0 \text{ m} \leq x \leq 7.5 \text{ m}$) とする。ここで、航走波の初期波高は、 $a = 1.0 \text{ m}$ とする。

4. 集波構造物とリーフ

(1) 集波構造物の波高増幅効果に関する検討

航走波を制御して、サーフィンに適した波高の波とするため、図-2 に示すような集波効果のある構造物と、図-3 に示すような前面に勾配を有する潜堤を併用する。こ

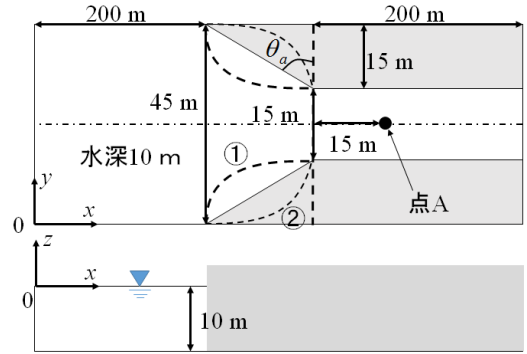
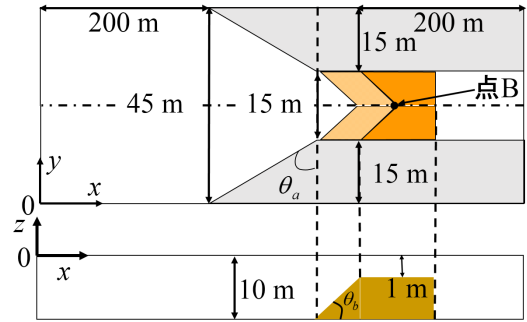
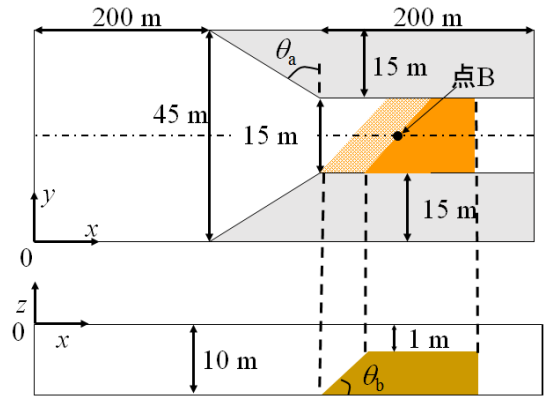


図-2 集波構造物（上図が plan view で、下図が side view を示している。）



(a) リーフ A



(b) リーフ B

図-3 リーフ（それぞれ、上図が plan view で、下図が side view を示している。）

こでは、前者を「集波構造物」、後者を「リーフ」と呼ぶ。これらの構造物は、図-3 に示すように、集波構造物の左右の構造物がリーフを挟むように設置する。水域の静水深が 10 m で一様であると仮定し、2 種類のリーフ A、または、B のいずれかを集波構造物と組み合わせたときの、波高増幅率が大きくなる集波構造物の収縮角 θ_a と、リーフの前面勾配 θ_b を数値解析により求める。

まず、集波構造物の収縮角 θ_a に関して検討する。収縮角 θ_a の値を 30° 、 45° 、 60° 及び 70° とした場合の、図-2 に示す集波構造物の左右の構造物間の点 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①」、または、「曲線②」で示した計算結果は、集波構造物の収縮部の壁面を図-2 に示す破線のような、それぞれ、凸、または、

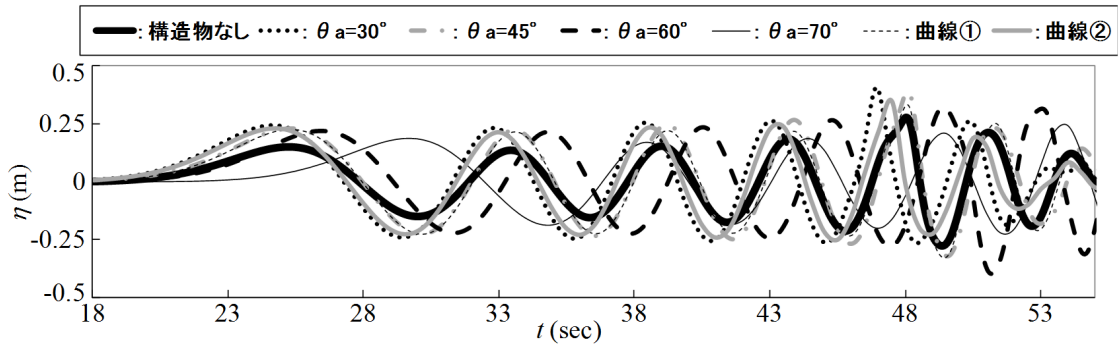


図-4 集波構造物を用いたときの図-2 の点 A における水面変動 η の計算結果

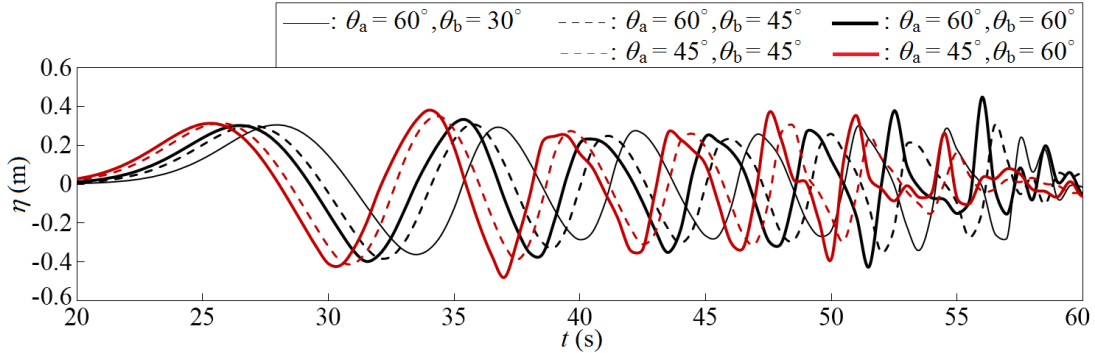


図-5 集波構造物とリーフ A を併用したときの図-3 (a) の点 B における水面変動 η の計算結果

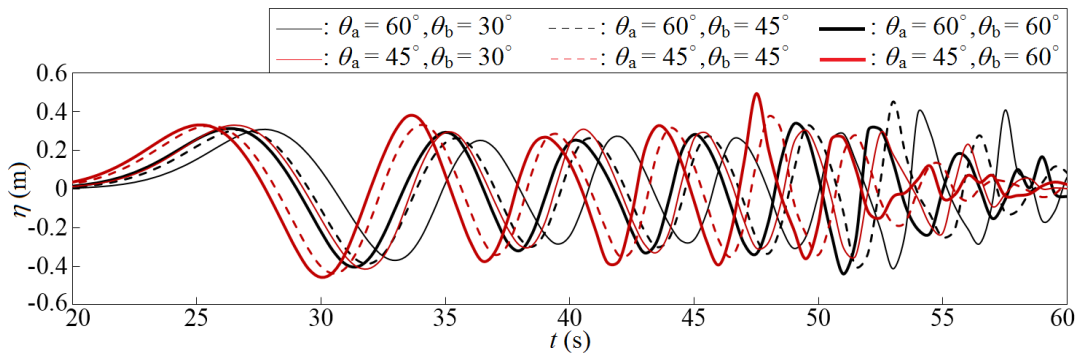


図-6 集波構造物とリーフ B を併用したときの図-3 (b) の点 B における水面変動 η の計算結果

凹の曲面とした場合の結果である。後続波において、第 1 波よりも周期が短くなり、最大波高が現れることに注意する必要がある。

表-1 に、点 A における、各場合の波高の増幅率を示す。ここで、構造物を設置しない場合に得られる最大波高 0.55 m を波高の増幅率の基準値とする。これより、 $\theta_a = 60^\circ$ の場合に、波高増幅率が最大となることがわかる。ただし、 $\theta_a = 45^\circ$ と $\theta_a = 60^\circ$ の場合には、波高増幅率にあまり大きな違いがない。

(2) リーフの波高増幅効果に関する検討

次に、集波構造物と、2 種類のリーフ A、または、B の、いずれかを併用したときの、リーフの前面勾配 θ_b に関して検討する。リーフ天端上静水深を 1 m とし、 θ_b の値を 30° 、 45° 、または、 60° とする。集波構造物に、リーフ A または、B を組み合わせた場合の、図-3 (a)、または、(b) に示す点 B における水面変動及び波高増幅率をそれぞれ

表-1 集波構造物を用いたときの図-2 の点 A における諸量

	最高水位 (m)	最低水位 (m)	最大波高 (m)	波高の 増幅率
なし	0.28	-0.27	0.55	1.00
$\theta_a = 30^\circ$	0.41	-0.26	0.67	1.22
$\theta_a = 45^\circ$	0.39	-0.32	0.71	1.30
$\theta_a = 60^\circ$	0.32	-0.40	0.72	1.31
$\theta_a = 70^\circ$	0.33	-0.33	0.67	1.22
曲線①	0.33	-0.33	0.66	1.20
曲線②	0.35	-0.25	0.59	1.07

図-5 及び表-2、そして、図-6 及び表-3 に示す。ここで、表中の最大波高は、ゼロアップクロス法により算出した。集波構造物のみの場合、4. (1) で述べたように、収縮角 θ_a が 45° と 60° の場合の、最大波高の差異が小さく、両者による波高増幅率は、約 1.3 であった。ところが、集波構造物とリーフ A を組み合わせた場合、表-2 より、 $\theta_a = 45^\circ$ 、かつ、 $\theta_b = 60^\circ$ の場合に、顕著な波高増幅の効果が得ら

表-2 集波構造物とリーフ A を併用したときの図-3 (a) の点 B における諸量

	$\theta_a = 60^\circ$			$\theta_a = 45^\circ$	
θ_b	30°	45°	60°	45°	60°
最高水位 (m)	0.31	0.30	0.30	0.35	0.38
最低水位 (m)	-0.36	-0.38	-0.40	-0.39	-0.48
最大波高 (m)	0.67	0.68	0.70	0.74	0.86
波高の増幅率	1.23	1.24	1.27	1.35	1.56

表-3 集波構造物とリーフ B を併用したときの図-3 (b) の点 B における諸量

	$\theta_a = 60^\circ$			$\theta_a = 45^\circ$		
θ_b	30°	45°	60°	30°	45°	60°
最高水位 (m)	0.39	0.32	0.34	0.33	0.33	0.49
最低水位 (m)	-0.41	-0.40	-0.44	-0.41	-0.44	-0.36
最大波高 (m)	0.80	0.72	0.78	0.74	0.77	0.86
波高の増幅率	1.45	1.31	1.42	1.35	1.40	1.56

れ、その際の波高増幅率は、約 1.56 である。なお、リーフ A は、リーフの両端から同時にサーフィンを行なうことが可能であるという利点を有する。しかしながら、一方向からの延長が短く、小規模な構造物では、1 回のサーフィン可能時間が比較的短くなってしまうことや、サーフィン最終位置でサーファが交錯してしまう危険性があるといった短所も有する。

他方、リーフ B では、表-3 より、 $\theta_a = 45^\circ$ 及び $\theta_b = 60^\circ$ の場合、波高増幅率が約 1.56 であり、リーフ A の場合と同様であるが、これ以外の組み合わせの場合には、リーフ A よりも大きな波高増幅率が得られている。これは、リーフ A の斜面上を伝播する波が、側壁に向かって屈折し、2 方向にエネルギーが分散して、点 B における波高増幅率が小さくなるからである。

以上より、リーフ B の方が、リーフ A よりも、サーフポイント形成に適したリーフ形状であり、 $\theta_a = 45^\circ$ 及び $\theta_b = 60^\circ$ が最適値であると言える。

5. 桜島フェリーの航走波を利用した鹿児島湾におけるサーフポイントの形成

(1) 航走波の増幅に関する数値解析

鹿児島湾の実地形を対象として構造物設置位置を選定し、航走波を利用したサーフポイント形成の、湾内における可能性を検討する。桜島フェリーは、鹿児島港と桜島港を結ぶカーフェリーであり、約 15 分間隔で 24 時間運航されている。図-7 に、桜島フェリーの航路を示す。

ここでは、構造物設置位置として、航路から 240 m 離れた点 C を選定した。この地点と航路の最接近点との間の水深分布を図-8 に示す。まず、航走波を仮定し、集波構造物とリーフ A を組み合わせた場合の数値シミュレーションを行なった。集波構造物の収縮角を $\theta_a = 60^\circ$ とし、リーフの前面勾配を $\theta_b = 45^\circ$ とし、集波構造物の開口

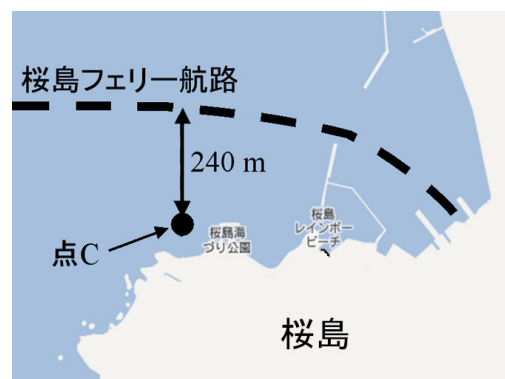


図-7 鹿児島湾における構造物設置の選定地点

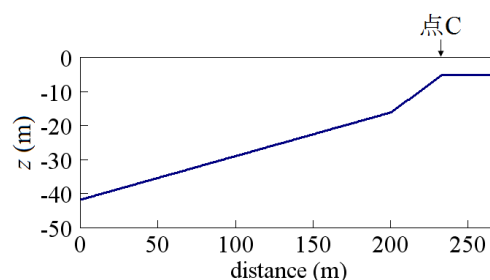


図-8 図-7 の点C～航路間の水深分布

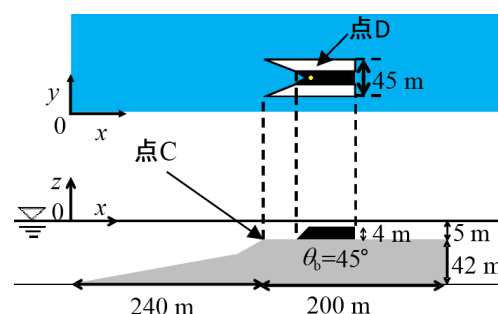


図-9 構造物模型のplan viewとside view

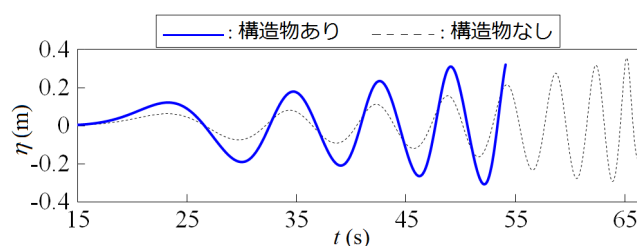


図-10 図-9 の点Dにおける水面変動の計算結果

幅を 45 m、リーフの天端水深を 1 m 及び集波後の水路幅を 15 m としたときの、図-9 の点 D における水面変動の数値解析結果を図-10 に示す。この図において、「構造物あり」の場合、 $t \approx 54$ s までしか結果が示されていないが、これは、この時刻において水面における境界条件が満たされず、計算が発散したためである。このとき、砕波が開始したと考えると、点 C における波は、砕波波高が約 0.6 m であり、前述のサーフィンに適した波の波高条件を満たしている。このときの波高増幅率は、約 1.53 である。

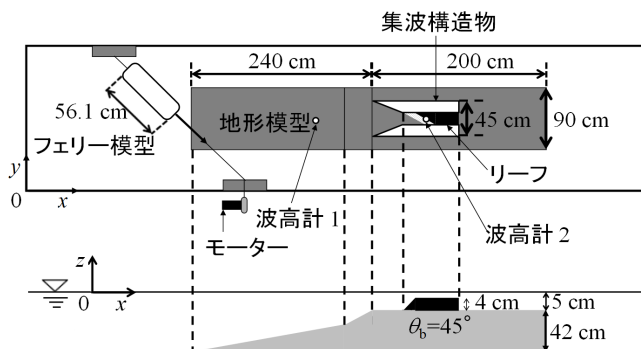


図-11 水理実験装置 (長さの縮尺: 1/100)

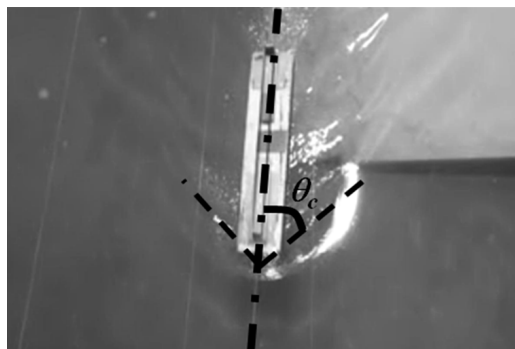


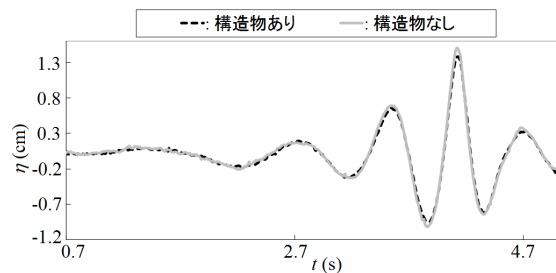
図-12 フェリー模型と航走波

(2) フェリー模型を用いた航走波の増幅の水理実験

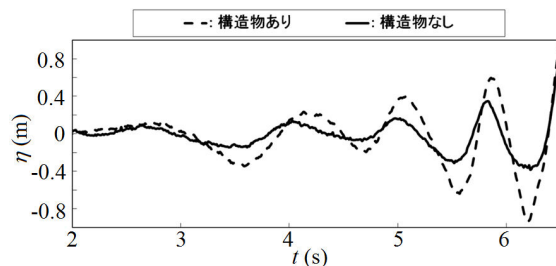
次に、フェリー模型を走行させ、生成・伝播した航走波を集波構造物とリーフ B を組み合わせた構造物により増幅させる水理実験を行なった。図-7 の点 C ～ 航路間の地形を図-11 に示すような長さの縮尺 1/100 の模型地形にスケールダウンした。喫水 2.8 cm の桜島フェリー模型にワイヤを繋ぎ、地上に設置したモータにより牽引してフェリー模型を走行させた。走行速度を 0.49 ～ 1.0 m/s とすると、図-12 に示す航走波の発生角度 θ_c が約 $45^\circ \sim 42^\circ$ であった。すなわち、図-3 に示す x 軸をこうした波峰線に垂直となるように構造物を設置すると、造波効率を高めることができる。ここでは、フェリー模型に繋がれたワイヤと図-11 の x 軸が挟む角度を 45° で固定した。

本実験では、天端上静水深が 1 cm であるリーフ上の水面変動を計測する必要があるため、その測定には、レーザ式波高計を用いた。通常、赤外線レーザは、水面で反射せずに突き抜けるため、反射材としてアルミパウダを水面に散布した。レーザ式波高計は、図-11 の波高計 1 及び 2 の位置に設置した。

フェリー模型の走行速度を 1.0 m/s としたときの、集波構造物とリーフ B を組み合わせた構造物がある場合とない場合の、波高計 1 及び 2 における水面変動の実験結果を図-13 に示す。航走波の発生角度は、 $\theta_c \approx 42^\circ$ であった。図-13 より、航走波は、集波構造物及びリーフ B からなる構造物により、両者の地点間で波高が約 1.73 倍に増幅されており、最大波高が現地スケールで約 1.9 m とな



(a) 図-11 の波高計 1 の設置点における水面変動



(b) 図-11 の波高計 2 の設置点における水面変動

図-13 水面変動の実験結果

った。これは、前述のサーフィンに適した波の波高条件を十分に満たしており、提案した構造物を適用した場合、鹿児島湾内にサーフポイントを形成することが可能であると考えられる。

6. 結 論

アンケートを実施し、鹿児島県における幅広いサーファに対するサーフィン可能最小波高が 50 cm であることを特定した。なお、これは、鹿児島県での値であり、地域毎に調査する必要がある。このサーフィン可能最小波高を踏まえ、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、鹿児島湾内にサーフポイントを形成する手法を検討した。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勾配を数値シミュレーションに基づき決定した。次に、鹿児島湾の実地形を対象とした数値シミュレーション及び水理実験を実施した。そして、集波構造物とリーフを組み合わせた構造物を適用する本手法により、鹿児島湾内において、サーフィンに適した波の生成が実現可能であることを示した。

参 考 文 献

- 柿沼太郎 (2001): 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.
- 中野 晋・三島豊秋・中野孝二・三井 宏 (1994): 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.
- 森田修二・榎木 享・出口一郎・奥田晋史 (1995): 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.
- Nakayama, K. and T. Kakinuma (2010): Internal waves in a two-layer system using fully nonlinear internal-wave equations, Int. J. Numer. Meth. Fluids, Vol. 62, pp. 574-590.