

潜堤による大規模砂泥域開発のための基礎的研究

東江隆夫*・勝井秀博*・金子文夫*
野口雄二**・道正典**

1. はじめに

近年、チョウセンハマグリやホッキ貝を対象とした漁場造成のために、沿岸に大規模な砂泥域を造成する土木工法の開発が行われている。この工法に求められる機能としては 1) 沖合に発生する浮遊幼生を海岸近くに導く(集積機能) 2) 集めた幼生を留めておく(拡散抑止機能) 3) 稚貝が育成できる静穏な海域と砂泥域を保つなどが考えられる。この工法として、現状では離岸堤やポケットビーチ工法等の適用が試みられているが、構造安定上あるいは経済上の難点がある。また、通常の離岸堤工法の場合海浜に与える影響が大で、トンボロの形成によって漁場が消失することもあり好ましくない。これらの問題点を解決する工法として、離岸堤を潜堤とした離岸潜堤が提案されている。離岸潜堤は経済性および景観の面でも優れており有効な工法と考えられる。

水産工学の分野では、元来潜堤は循環流発生工として位置づけられている¹⁾。離岸堤によって発生する循環流は上述の機能のうち拡散抑止機能に大きく関連する。しかしながら、潜堤を設置した場合に必ずしも循環流が発生するとは限らない。糸刈等は²⁾潜堤一基を設置した場合の循環流の安定性が潜堤の天端高 (h_s) と設置水深 (h_0) との比や潜堤の汀線からの距離 (l) と碎波帯幅 (l_b) の比で規定されることを実験により調べ、その安定条件を示している。しかしながら、循環流安定条件に対する物理的説明は十分とは言えず、また、潜堤を複数設置した場合についての適用も明確ではない。

本研究は、複数の離岸潜堤を設置した場合、その開口幅や天端高が堤内の流れのパターンや循環流の安定性にどのように影響を与えるかについて水理実験と数値シミュレーションを行い、大規模砂泥域造成のための離岸潜堤の技術的成立性を検討したものである。

2. 実験方法

水理実験では図-1に示すような平面水槽 ($L=35\text{m}$, $B=17\text{m}$) 内に、勾配 1/50 の斜面を製作し、縮尺 1/50

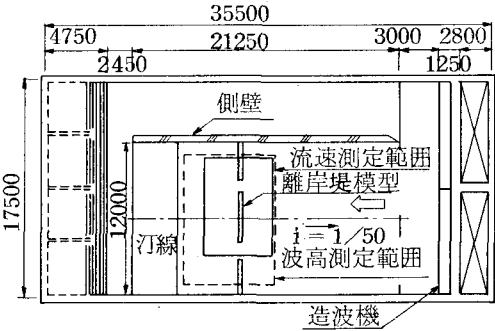


図-1 実験装置

の離岸潜堤の模型を設置、規則波を当てた。潜堤周辺の約 400 点で波高と流速を測定し、合わせて浮子と染料を用いた流況の観察をした。流速は電磁流速計を用い、底層(底面から 3cm の地点)と中層(水深の 1/2 の高さ)の 2 断面で測定した。実験は、入射波高 $H=2\sim 10\text{cm}$, 周期 $T=0.8\sim 1.4\text{s}$, 波向き 0° (汀線直角方向), 離岸潜堤(または離岸堤)設置水深 $h_0=6, 12\text{cm}$, 天端高 $h_s=4, 5, 8, 12, 16\text{cm}$, 開口幅 $B=100, 200\text{cm}$ を組合わせて 13 ケース実施した。実験ケースを表-1 に示す。

3. 実験結果および考察

1) 循環流のパターン; 今回の実験から得られた循環流

表-1 実験ケースおよび循環流パターン

case No.	波高 (cm)	周期 (s)	水深 (cm)	潜堤長 (m)	天端高 (cm)	間隔 (m)	循環流 パターン
1	6.0	1.13	12.0	4	9.0	1.0	パターンⅠ
2	2.0	0.85	12.0	4	9.0	1.0	不安定
3	10.0	1.41	12.0	4	9.0	1.0	パターンⅢ
4	6.0	1.13	12.0	4	12.0	1.0	不安定
5	6.0	1.13	12.0	4	16.0	1.0	パターンⅡ
6	6.0	1.13	6.0	4	4.5	1.0	不安定
7	6.0	1.13	12.0	4	9.0	2.0	パターンⅠ
8	2.0	0.85	12.0	4	9.0	2.0	不安定
9	10.0	1.41	12.0	4	9.0	2.0	不安定
10	3.0	1.41	12.0	4	9.0	1.0	不安定
11	6.0	1.13		模型なし			不安定
12	2.0	0.85		模型なし			不安定
13	10.0	1.41		模型なし			不安定

* 正会員 大成建設(株) 技術研究所
** 正会員 日本テトラポット(株) 応用水理研究所

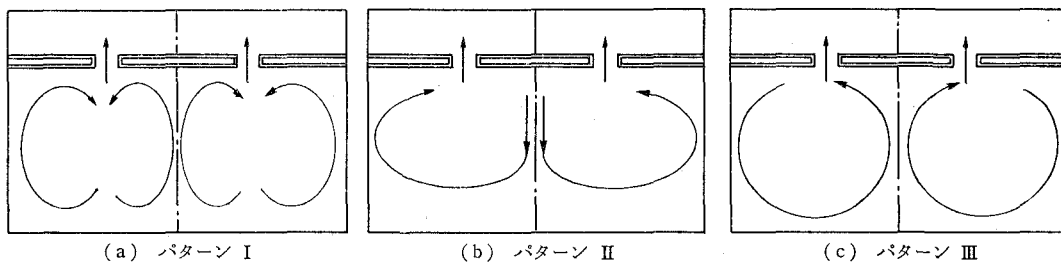
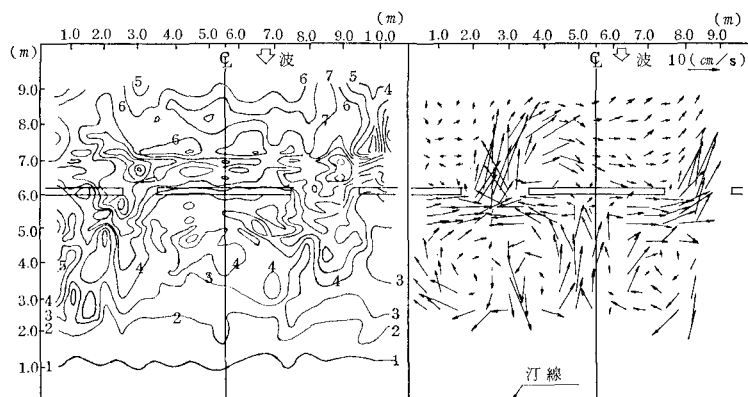
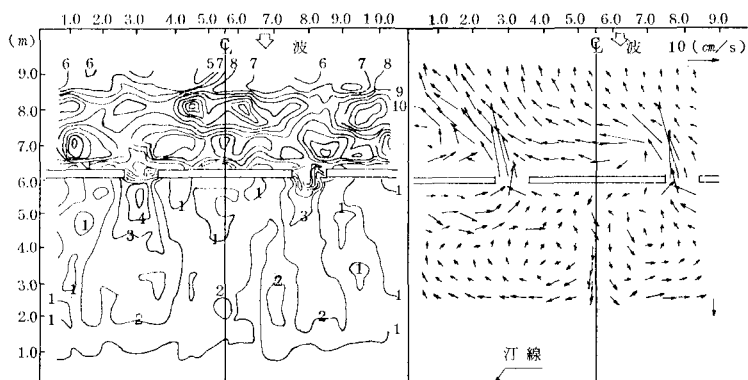


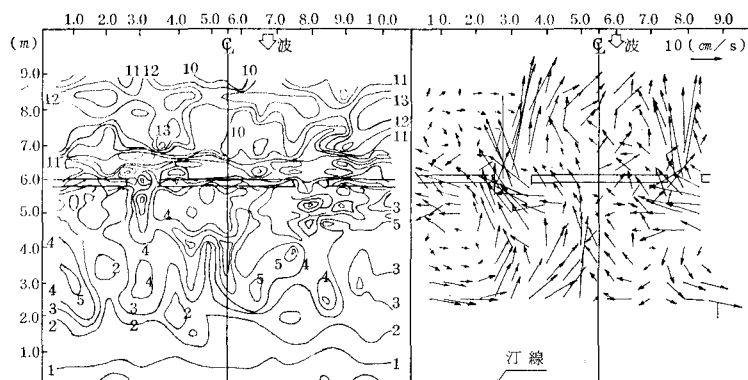
図-2 循環流パターン



(a) パターン I (ケース 7)



(b) パターン II (ケース 5)



(c) パターン III (ケース 3)

図-3 各パターンにおける波高分布および流速ベクトル

の主なパターンは、図-2 に示すようである。パターン I は、潜堤中央で沖向きの流れを持つ循環流である。パターン II は、天端が水面上に出ている離岸堤の場合であり、真中の離岸堤中央で岸向きに流れる。パターン III は、水槽全体で2つの循環流が発生し離岸潜堤中央では流れは沖向きである。しかしながらケースによっては明瞭な循環流が発生しない場合もある。表-1 右欄に循環流のパターンをまとめて示す。

図-3 (a)~(c) は安定した流れが発生したときの波高分布および平均流速分布 (中層) の実測値である。各パターンについて考察する。汀線に直角方向に波が入射する場合の流れの1次元の運動方程式は非線形項、水平拡散を省略し摩擦項を平均流速に比例するものと考えると式 (1) の様な形となる³⁾。

$$U = -\rho g(h+\zeta) \frac{d\zeta}{dx} - \frac{dS_{xx}}{dx} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、

U : 岸沖方向の平均流速
(沖向き正)

ζ : 平均水位

S_{xx} : ラディエーションストレス

h : 水深 である。

式から流れの方向を決定するのは平均水位の勾配 ($\partial\zeta/\partial x$) とラディエーションストレスの勾配 ($\partial S_{xx}/\partial x$) の大きさであることが解る。このことを実験から得られた波高分布及び水位分布から定量的に評価することを試みる。図-4 (a)~(e) はパターン I に対応する離岸潜堤中央 (測線

a) 及び開口部 (測線 b) における式 (1) の右辺の項, $\partial \zeta / \partial x$, $\partial S_{xx} / \partial x$, 平均水位 ζ および波高を示したものである。 S_{xx} の計算は, 潜堤の場合回折効果が小さいことから, 波向きは汀線直角方向として行った。パターン I が発生した場合 (ケース 7), 測線 a では潜堤の少し沖側から碎波が始まり, 潜堤上で碎波は終了する。更に堤内で 1 回碎波を起こしながら減衰していく。一方測線 b では開口部の沖側で開口部からの速い流れの為に碎波を起こしその後堤内で 2 回の碎波を起こす。そのときの ζ は両測線とも碎波直前までは減少し (wave set-down), 碎波後増加していく (wave set-up)。測線 a と b では $\partial S_{xx} / \partial x$ は場所によって正負が異なる。測線 a において, 潜堤背後 (潜堤より岸側 1.5m の範囲) では式 (1) の右辺の項は正となっているため流れは沖向きとなり, 流速の測定結果と合致する。しかしながらそれより岸側

では部分的に同項が負, したがって岸向きの流れを予測させるが, 実験ではそのような傾向は見られない。汀線付近では $\partial S_{xx} / \partial x$ と $\partial \zeta / \partial x$ の値が小さくなっているため実験から求めようとすると精度上の限界があると考えられる。また, 測線 a の潜堤上で流れが岸向きを示しているのは, 右辺の項の計算においてその点の水深として天端上の水深をとったためである。次に, 測線 b についても見る。開口部付近では流れは正すなわち沖向きとなり, それより岸側で負すなわち岸向きとなり測定結果と一致する。パターン II の場合, 図-3 によると開口部からの回折波は小さく, 今回の場合水深が浅く, 海底勾配が緩やかで底面摩擦が大きいので, 堤内では波は碎波する事なく汀線に近づくにつれて自然に消滅してしまう。したがって, 堤内での波高の差は小さい。また, 水位は質量輸送により上昇するが碎波が無いことから堤内

での水位の差も小さい。したがってここで発生した循環流は開口部における外海と堤内との水位差による沖向きの比較的速い流れによって引き起こされたと考えるのが妥当であろう。次に, パターン III であるがこのケースでは, 碎波が離岸堤設置位置よりも沖側で発生する。この場合, 回折効果はほとんどなく, 離岸堤が波の場に与える影響は小さいため, 流れの発生要因としての潜堤の意義は小さいと考えられる。その結果, 一樣斜面上に汀線に直角に波が入射する場合に発生するものと同様のパターンとなった。すなわち, 水口⁴⁾によれば沿岸方向の碎波高の違い, 流れによる屈折 (波峰線の曲がり) の他に水槽実験固有の問題 (特に沿岸方向の cross wave の発生や側壁の影響) 等によって流れの発生パターンは影響を受ける。パターン III もそれらの影響を受けて生じた結果と考えられる。

2) 安定した循環流の発生要因; 潜堤によって発生した安定な循環流としてパターン I を考える。① 開口幅の影響: 図-5 はケース 1 における流速の測定結果である。ケース 1 はケース 7 とは開口幅が異なるが, ケース 7 程明確な循環流を形成していない。開口幅の違いは堤内の波高分布に影響を与える。大まかには,

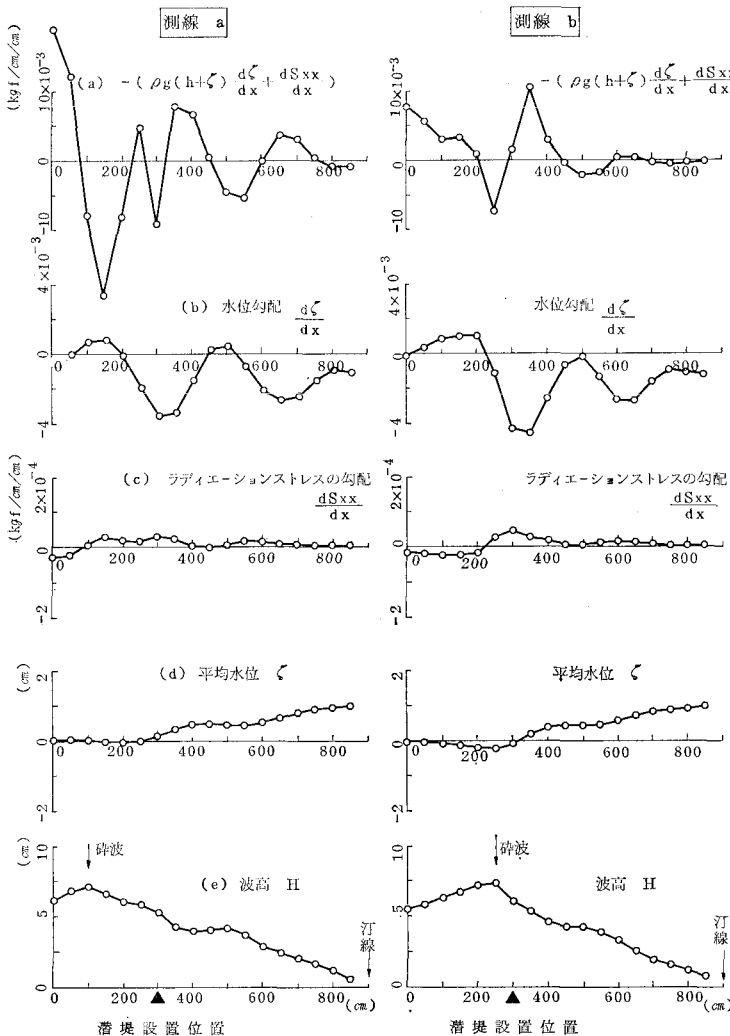


図-4 ケース 7 における岸沖方向の諸量の分布

開口幅が広い場合(ケース7: $B/L=1.8$), 沖側の波高が開口部を通してそのまま持込まれるため, 堤内で大きな波高差をもつ波高分布が形成される. このような波高分布は強制的であり, かつ安定なため, より安定した循環流が発生することになる. また, 潜堤の存在によって碎波点が潜堤上に固定されることも定常的な質量輸送の面から, 安定性の要因となる. しかしながら, 碎波が潜堤の設置位置よりも沖で発生する場合は, 前述したように潜堤そのものの影響が小さいことから開口幅の影響もほとんど見られない. ② 天端高の影響: ケース1, 4, 5では天端高が異なる. 天端高(h_s)と設置水深(h_0)の比 h_s/h_0 はそれぞれ 0.75, 1.0, 1.25 である. 図-6はケース4の流れの測定結果である. h_s が静水面と同じ場合には全く循環流が発生している様子はない. また, 図-3(b) および 図-5 からわかるようにケース1と5は流れのパターンが全く異なっている. 天端高の影響は堤内の静穏度に関係するが, ケース1から4そして5と h_s が大きくなるにつれて堤内の静穏度は増加する. ケース4の場合ケース1に比べて堤内での碎波の状況はかなり小さくなるが2次碎波は発生する. ケース4では潜堤堤内への質量輸送が盛んなため堤内の水位は上昇し, 開口部では速い流れが発生し, 堤内での流れが開口部の流れに支配されているようである. しかしながら2次碎波による不安定な離岸流のため堤内全体での流れは不安定なものとなったのであろう.

このように潜堤によって安定した流れを発生させるにはかなり条件が限られたものとなる. 今回の実験で最も安定した循環流が発生したケース7に見られるように潜堤天端上で碎波を起こし, かつ堤内に定常的で大きな波高差を形成させることが必要であると考えられる.

3) 流れの鉛直分布: 今回は流速計により中層と底層の流速を測定し, また浮子そして染料を使用して流況も観察した. 図-7, 図-8 および 図-9 は, ケース7における底層の流速の測定結果, および浮子と染料による流れの状況である. 浮子は表面の流況を示し, 染料は中層

から底層(流速測定位置よりも下)までの流れを示している. 流速計や染料による測定結果を見ると中層, 底層とも差異は無い. 浮子の動きを観察すると時折碎波によって岸側に流される事がある. そのため図-8の浮子の動きの軌跡は必ずしも流況を示しているとは言えない. しかし, この中で沖に向かう流れはその方向については, 正しい結果を与えていると判断し図を見ると潜堤の場合堤背後を除けばほぼ流速計の記録と一致する. このように, 堤内の流れの方向は概略鉛直方向で同一と見ても良さそうである.

図-10 は開口部の流速の鉛直分布であるが流れは測定部分に関して全て沖向きである. したがってこれに釣り合う堤内への水の供給の大半は潜堤上部からの碎波によって為されていると考えられる. 潜堤の場合, 波が潜堤上で碎波するような今回の条件では, 堤内への強い質量輸送によって, 堤内外での水位差が大きくなり, また実質的に堤外への水の出口は開口部だけであるため, 流速は離岸堤よりも速くなる.

3. 数値シミュレーションについて

実験と同様な条件で数値シミュレーションを行った. 図-11 は, ケース7におけるシミュレーションによる流れの状況である. シミュレーションの方法は波高分布の計算にはエネルギー平衡方程式を用い, また流れの計算には潮流型を用いた. 潜堤の取り扱い方は, 波の計算では予備実験で得られた通過率にしたがって潜堤設置地点で強制的に波高を落とした. また, 流れの計算では単なる透過離岸堤として取り扱った. エネルギー平衡方程式では構造物が有る場合の回折効果を表す事ができないという問題があるが, 潜堤の場合もともと回折効果は小さくかつ碎波が発生していることもあって堤内での波高分布の傾向は概略一致し, 流れの形成パターンは実験において得られた安定したパターンとほぼ同じとなった. 本シミュレーションでは確定した理想的な波高分布によって定常流れが形成される. したがって, 循環流の安定

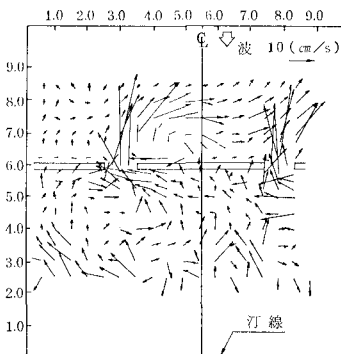


図-5 ケース1における流速ベクトル

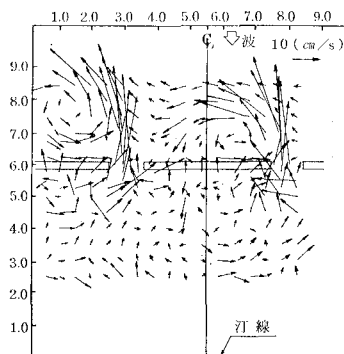


図-6 ケース4における流速ベクトル

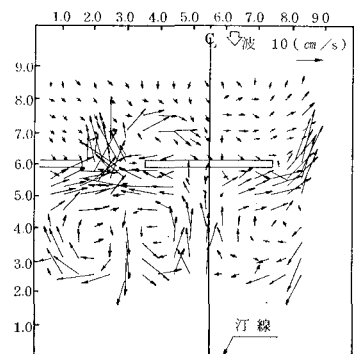


図-7 ケース7における流速ベクトル(底層)

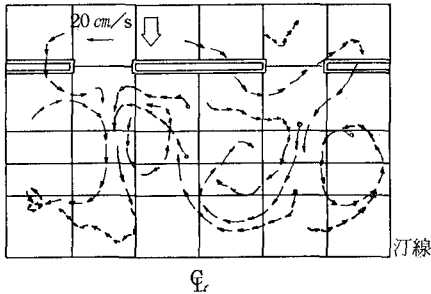


図-8 ケース7における浮子による流況

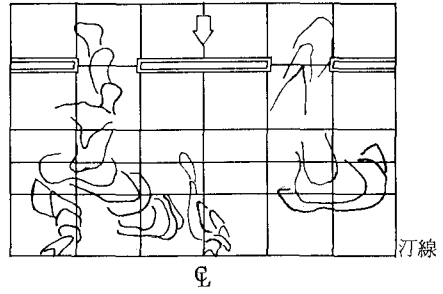


図-9 ケース7における染料による流況

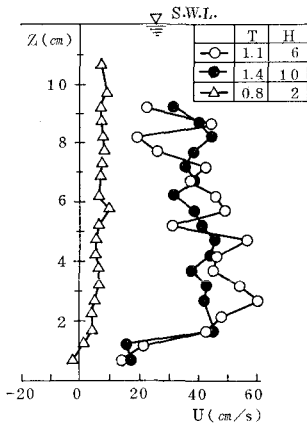


図-10 ケース1,2,3における開口部の流速鉛直分布

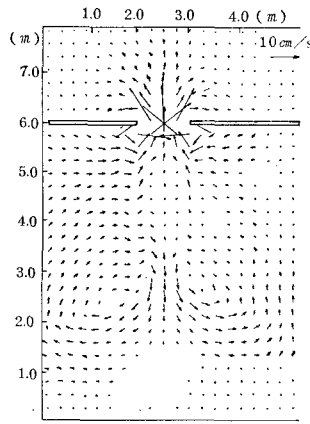


図-11 数値シミュレーション結果(ケース7)

性について議論することはできない。

4. 結 論

大規模砂泥域造成工法として、離岸潜堤を設置した場合の堤内循環流の安定性について検討した結果、以下の事が明らかとなった。

- 1) 本実験の範囲では安定した循環流は $H=6.0\text{ m}$, $T=1.1\text{ s}$ の直角入射の波に対して $h_s/h_0=0.75$, $B=2.0\text{ m}$ の条件で得られた。
- 2) しかし、 h_s/h_0 , B 等の条件が揃わないと必ずしも循環流の安定は得られないことが判った。
- 3) 離岸潜堤内で安定した循環流が発生するためには、堤内に安定した大きな波高差の分布を形成することである。
- 4) 潜堤上で碎波する場合、堤上での岸向質量輸送が

盛んとなり堤内での水位が上昇しやすいため、開口部の冲向流れは速くなる。

5) 数値シミュレーションにおける流れのパターンは実験結果と概略一致した。しかし、循環流の安定性を考慮するには沿岸方向の碎波の不均一性と非定常性を取り込んだモデルが必要となる。

謝辞：本研究を遂行するにあたり水産庁水産工学研究所の荻野静也室長、東京水産大学糸洸助手および中央大学水口助教授には貴重な助言を載いた。ここに謝意を表します。また、水理実験を遂行してくれた大成サービス杉山勝治氏、安西真樹氏に感謝します。

尚、本研究は社団法人「マリノフォーラム21」の「大規模砂泥域開発研究会」砂泥域に適した制砂・制流のための水産土木工法の開発研究の一環として行われたことを付記する。

参 考 文 献

- 1) 杜多 哲・中村 充：波による循環流工に関する実験的研究，水工研報告2号，pp. 1~11, 1981.
- 2) 糸洸長敬・三木 誠：フクトコブシ漁場における波浪循環流——循環流発生機構の検討およびその発生実験——，水産土木，Vol. 22, No. 1, pp. 47~54, 1985.
- 3) C. C. Mei: The applied dynamics of ocean surface waves, A Wiley-Interscience Publication, pp. 451~496, 1983.
- 4) 水口 優：海浜流発生メカニズムについて，第21回水工学に関する夏期講習会講義集，B-3-1~B-3-31, 土木学会，1985.