

II—9 岬の陰の波高分布と波による流れについて

開発局小樽開建	(正)	数土 勉
北大工	〇(学)	渋谷 学
北大工	(学)	川崎 清
北大工		小野 敏行
北大工	(正)	佐伯 浩
北大工	(正)	尾崎 晃

1. 諸言 北海道の海岸には小さな岬の陰に漁港が建設される事が多い。これは当然、岬の遮へい効果を期待するからである。しかし、建設後、港の拡張の必要がある場合、港口部がしばしば岬の遮へい域から出てしまう事もしばしば起こり、岬の遮へい効果も期待できなくなる事もある。本研究は、筆者等が過去2年間実験を行ってきた約60ケースの実験結果の中で、比較的単純な模型での数値シミュレーションと模型実験結果の適合性と問題点を明らかにする事と、岬の近傍における流れによる流れを調べたものである。

2. 岬の陰の波高分布

(1) 実験条件 水理模型実験は長さ10.93m、幅7.36m、深さ44cm

のコンクリート製平面水槽で行なった。この平面水槽の大きさの関係で、実規模の1/100の模型で実験を行なった。図-1に示すように、岬の長さが3.66m(実規模で366m)とした。また港内の水深は漁港を対称として、7cm(実規模で7m)とし、海底勾配は1/30である。

本研究の結果は周期 $T = 0.8 \text{ sec}$ で、沖波波形勾配 $H_0/L_0 = 0.0275$,

$T = 1.0 \text{ sec}$ で $H_0/L_0 = 0.0177$, $T = 1.2 \text{ sec}$ で $H_0/L_0 = 0.0127$ の3種類の波を図-1の矢印方向からあてた場合の結果について報告する。また実験における波高測定は30cm間隔とし、港内部では、10cm×vシュで測定した。

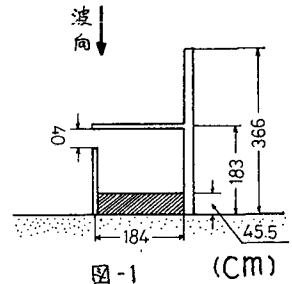


図-1 (CM)

(2) 数値計算の方法 波高分布の計算は伊藤、谷本らが開発した数値波動解析法により行った。また今回の計算においては、任意反射率境界での計算手法と、沖側境界における反射を無くする手法を採用した。微小振幅波の条件より、次の(1)式が誘導される。

$$\frac{\partial Q_x}{\partial t} = -C^2 \frac{\partial \eta}{\partial x} \dots (1-1), \quad \frac{\partial Q_x}{\partial t} = -C^2 \frac{\partial \eta}{\partial x} \dots (1-2), \quad \frac{\partial \eta}{\partial t} = -\frac{\partial Q_x}{\partial x} - \frac{\partial Q_y}{\partial y} \dots (1-3)$$

ここで $Q_x = \int_{-h}^0 u dz$, $Q_y = \int_{-h}^0 v dz$, $C^2 = \frac{g}{k} \tanh kh$ である。座標は図-2の如くとし、 h は水深、 k は波数で波長を L とすると、 $k = 2\pi/L$ であり、 C は波速である。実際の計算では、間隔 ΔS の格子網上の計算点の配列に対して、(2)式のように差分方程式に変換して、時間間隔 Δt 毎に逐次計算を行なった。

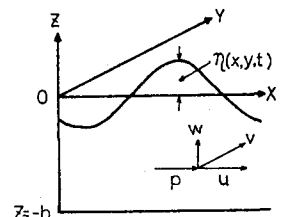


図-2

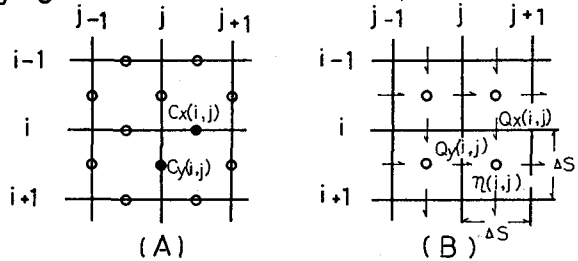
$$\begin{aligned} \eta(i, j)^{(N-\frac{1}{2})\Delta t} &= \eta(i, j)^{(N-\frac{3}{2})\Delta t} - \frac{\Delta t}{\Delta S} \left\{ Q_x(i+1, j)^{(N-1)\Delta t} - Q_x(i, j)^{(N-1)\Delta t} \right. \\ &\quad \left. + Q_y(i, j+1)^{(N-1)\Delta t} - Q_y(i, j)^{(N-1)\Delta t} \right\} \dots (2-1) \end{aligned}$$

$$Q_x(i, j)^{Nat} = Q_x(i, j)^{(N-1)\Delta t} - C_x^2(i, j) \frac{\Delta t}{\Delta S} \{ \eta(i, j)^{(N-1)\Delta t} - \eta(i-1, j)^{(N-1)\Delta t} \} \dots\dots (2-2)$$

$$Q_y(i, j)^{Nat} = Q_y(i, j)^{(N-1)\Delta t} - C_y^2(i, j) \frac{\Delta t}{\Delta S} \{ \eta(i, j)^{(N-1)\Delta t} - \eta(i, j-1)^{(N-1)\Delta t} \} \dots\dots (2-3)$$

ここに N は時間ステップを表わし、
 $N=0$ を初期状態とした。逐次計算は
 $N=1$ から始める。ただし時間間隔 Δt
 は計算を安定に進めるために、次の関
 係を満たすよう設定しなければなら
 ない。

図-3



$$\Delta t \leq \frac{1}{C_{max}} \frac{\Delta S}{\sqrt{2}} \dots\dots (3-1)$$

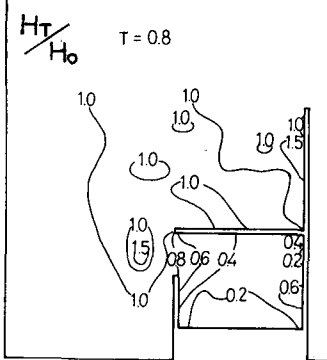
$$\frac{\Delta x}{L_i} = \frac{\Delta t}{T_i} = \frac{\Delta S}{L_i} = \text{const.} \dots\dots (3-2), \quad \frac{\Delta t}{T_i} = \text{const.} \dots\dots (3-3)$$

ここで、 C_{max} は計算領域の最大水深の波速、 L_i は入射波長、 T_i は入射波周期である。また本実験では水深が
 変化しているので、波高に浅水修正係数 f_s を乗じるものとする。

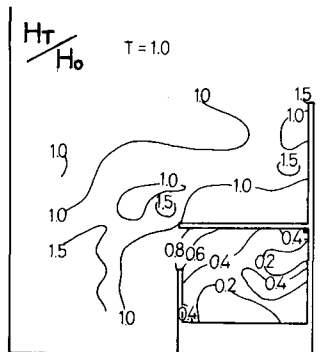
$$f_s = (n_2/n_1)^{-1/2} \dots\dots (4-1) \quad n = \frac{1}{2} (1 + 2kh \frac{1}{\sinh 2kh}) \dots\dots (4-2)$$

ここで n_1 は沖側境界における n の値である。また、壁面での任意反射率境界の計算法、及び、沖側での両反射
 防止のための計算法(仮想境界における計算法)も谷本等の手法によった。

図-4 (A)



(B)



(C)

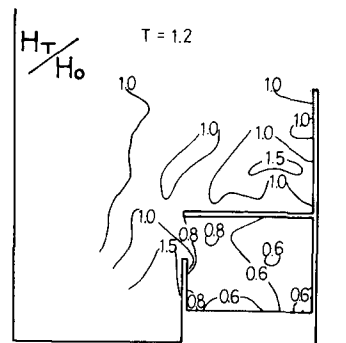
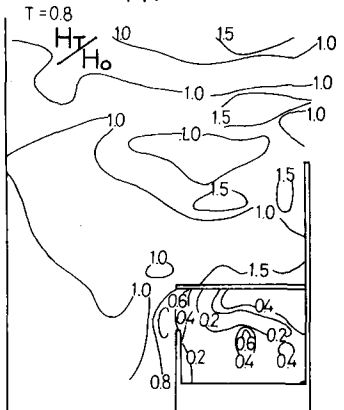
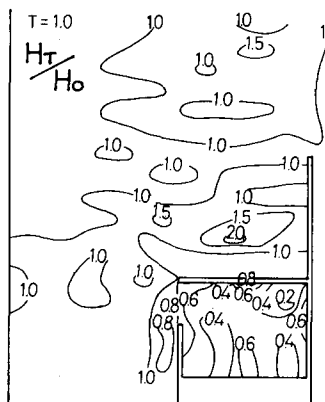


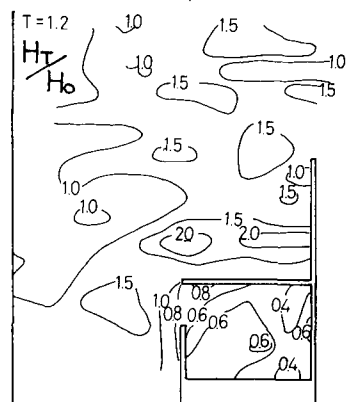
図-5 (A)



(B)



(C)



(1) で述べた3つの波浪条件で計算した結果が、図-4である。これに対して同一の波浪条件で模型実験を行った結果が図-5である。港内における波高分布に着目してみると、周期1.2秒で $H_0/L_0 = 0.0/27$ の場合が、計算値と実験が最もよく適合している。沖波波形勾配の最も急な $T = 0.8$ 秒の場合が最も適合度が悪い。また、港口部に着目してみても、沖波波形勾配が小さい程、実験値との適合度が良い事になる。Iversen は、傾斜面上での波高変化の実験より、微小振幅波理論の適用範囲として、次の(5)式を得ている。

$$(h/L) \geq 0.50 (H/L)^{1/2.38} \dots\dots\dots (5)$$

この(5)式を計算してみると、近似的に波のアーセル数で表わすと、微小振幅波の適用範囲は $U(HL^2/h^3) \leq 14$ となる。これに対して、本実験での斜面に入射する時の波のアーセル数は $T = 0.8$ 秒で $U = 2.0$, $T = 1.0$ 秒で $U = 4.3$, $T = 1.2$ 秒で $U = 5.8$ と充分に微小振幅波が適用できる範囲ではあるが、港口部立岸では、 $T = 0.8$ 秒で $U = 30$, $T = 1.0$ 秒で $U = 50$, $T = 1.2$ 秒で $U = 75$ とより微小振幅波の適用範囲をはるかに越えている。アーセル数最も大きい $T = 1.2$ 秒の波が実験値に最も近い理由は明確ではない。また、港外部の領域では、岬による回折効果のため、波高分布は様々ではないが、防波堤前面を除いては、ほぼ両者は一致している。また、本計算の過程で、数値計算を長く続けていくと、壁面での反射により、港内波はかきなり大きくなり、実験値の倍近くなった。本計算の範囲では7波目位で整理すると模型実験と数値実験の結果が比較的良い一致をする事が明らかとなった。図-4も、7波目での結果を示したものである。

3. 岬の陰の近傍における波による流れ

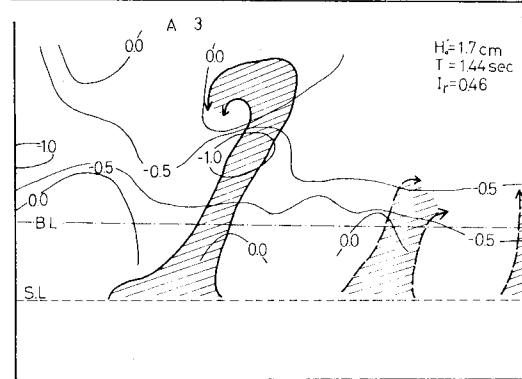
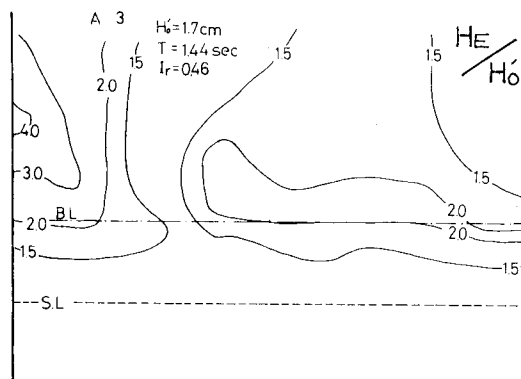
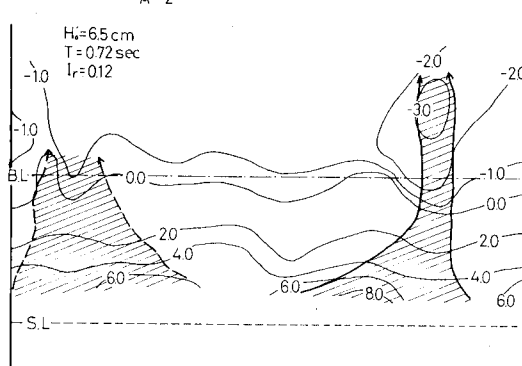
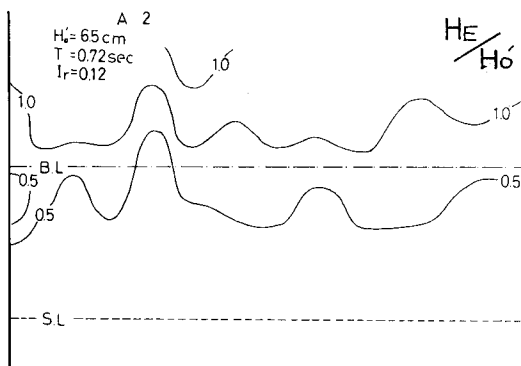
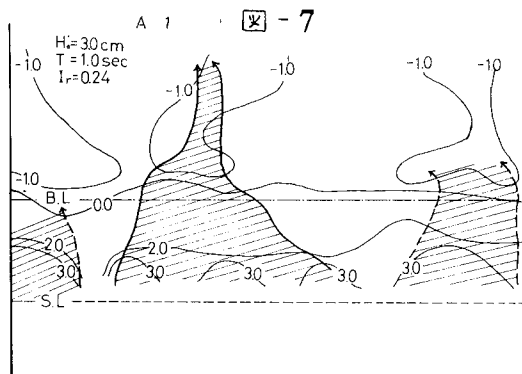
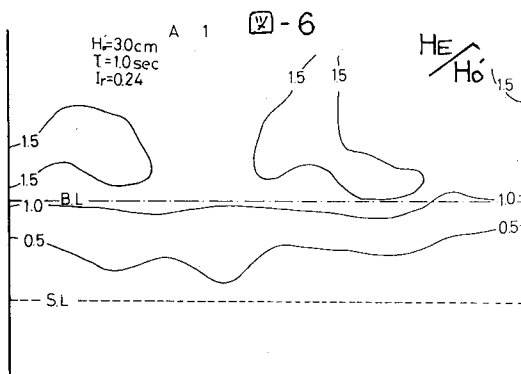
(1) 実験方法 本実験の目的は、小さな岬の近傍の波による流れの機構を明らかにしようとしたものである。

3種類の波向に対して5種類の波形勾配の波で実験を行ったが、本報告では、海岸に直角に波が入射する場合のみを取り扱う。また、実験では岬を設置した場合としない場合の2種類に分けて実験を行った。本実験で岬を置いたのは、実験的には水路幅を縮めた事になっている。一般に、波による流れの発生は、波による Radiation Stress によるものと云われていて、これが離岸流等海浜流系統の大きな因子となっている。よって、本実験では、水域内の波高分布、平均水位分布、それに流況と、離岸流内の流速を測定した。波高分布は、6本の抵抗線式波高計を用いて測定した。平均水位の分布は、得られた水位変動をデータレコーダに記録し、シグナルプロセッサで数値を積分して求めた。また、流況の測定は汀線部に通マンガン酸カリウムを置き、その拡散状態をカメラで撮影して求める方法と、水面に紙のパンチくずを流して調べた。また、離岸流内の流速分布は、波による流速と流れの流速が重なった状態になっているので、比重1.0の粒子を作製し、モータードライブカメラで波の周期にコマ数を同期させて、波の1周期、あるいは2周期分の粒子の移動距離をその間の時間を除して、平均の流速を求めた。実験の諸元を表-1に示す。表中、Aは岬のない場合、Bは岬のある場合で、その時の水路をBとしている。H₀は沖波波高、X₀は汀線と破波線の距離、L₀は沖波波長、tan βは水面勾配、tan β/√(H₀/L₀)は Surf similarity parameter, h₀は破

波水深、Y_rは離岸流間隔、suffixのtは理論値を意味し、Eは実験値を意味している。

表 - 1

Run	H ₀ (cm)	T(sec)	X _B (cm)	H ₀ /L ₀	tan β/√(H ₀ /L ₀)	B(cm)	h ₀	(Y _r /X _B) _t	(Y _r) _t (cm)	(Y _r /X _B) _E	(B/Y _r) _t
A1	3.0	1.0	96	.0192	0.2406	730	3.2	4.0	384	3.3, 2.2	1.9
B1	3.0	1.0	114	.0192	0.2406	550	3.8	4.0	456	2.5	1.2
A2	6.5	0.72	225	.0804	0.1176	730	7.5	2.2	495	2.0,	1.5
B2	6.5	0.72	225	.0804	0.1176	550	7.5	2.2	495	1.5	1.1
A3	1.7	1.44	75	.0053	0.4597	730	2.5	4.0	300	2.6, 3.6	2.4
B3	1.7	1.44	84	.0053	0.4597	550	2.3	4.0	336		1.6
A4	5.0	0.31	156	.0489	0.1508	730	5.2	3.0	468	1.9, 3.1	1.6
B4	5.0	0.31	156	.0489	0.1508	550	5.2	3.0	468	2.4, 2.1	1.2
A5	3.1	1.35	96	.0109	0.3192	730	3.2	4.0	384	2.1, 2.1	1.9
B5	3.1	1.35	96	.0109	0.3192	550	3.2	4.0	394		1.4



(2) 実験の結果 図-6に岬のない場合の波高分布、図-7に岬のない場合の平均水位の分布と離岸流の流況を示す。水底は鋼板にビニル系塗料を塗ったもので、一様な $1/30$ 勾配になっているにも拘らず、図-6より、波高の分布は複雑な形をしている。図-6、7を較べてみると、砕波点近傍より汀線側では、離岸流の発生位置では、廻りより若干波高が小さくなっている傾向がみられる。また、図-7より、離岸流は平均水位の低い所に向って流れている様子がわかる。図-8には、岬のある場合の波高分布、図-9には、その平均水位の分布と離岸流の流況を示す。二の図-9においても平均水位の低い部分に向かって離岸流が流れている事が判る。一般に、Radiation stress は波高の変化に起因するもので、波高の変化率の大きい所程、平均水位の変化率も大きい事を示している。さて、本実験においては、この離岸流の発生位置の再現性についても実験を行ったが、同一の水底勾配で、同一の砕波波高、周期であれば、水槽幅が同じであれば毎回、ほぼ同一の場所に離岸が発生することが確かめられた。図-10に、今回の実験から得られた離岸流間隔 (Y_r/B) と砕波パラメーター $\tan\theta/\sqrt{H_0/L}$ の関係を示す。図中の太い実線は佐々木、堀川等の実験値から求めたもの、線い実線は日野の理論によるものを示

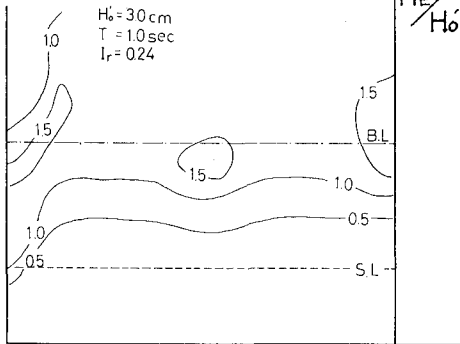
す。今回、我々の得たデータは、 0.2 より小さい範囲では、佐々木等の値に近く、 0.2 より大きい範囲では、日野の理論値に近い値を示している。しかし、

全体的にみて、我々の離岸流間隔は他の研究者の値に比べて小さな値を示している。この理由を調べるために表-1を見てみると、 $(B/Y_r)_c$ は、

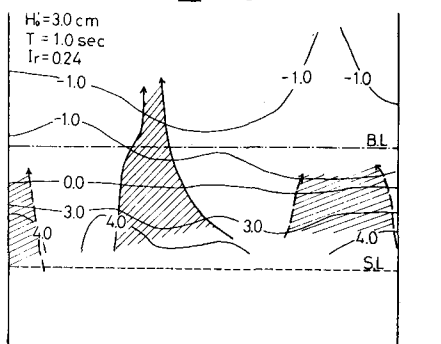
$\tan \beta / \sqrt{H_b/L} < 0.2$ の範囲では、実海岸（水路幅は無限）から得られた、佐々木等の式から求められる Y_r と今回の水路幅 B をとったもので、

$\tan \beta / \sqrt{H_b/L} > 0.2$ では、日野の理論から計算した Y_r をとって計算したものである。この $(B/Y_r)_c$ の値から判断すると、今回の我々が用いた水路幅は、最大で Run A3 の $(B/Y_r)_c = 2.4$ で、離岸流間隔に較べて水槽が狭いことになる。また、Run A1 と A3 は $(B/Y_r)_c$ が約 2.0 に近いので、多分、実際の海岸にも当てはめる事が出来ると思われるが、Run A2, B3, A4, B5 等は $(B/Y_r)_c \approx 1.5$ となっているため、本来の無限海岸の場合と違って、水槽幅で流れが強く規制されたとは、図-9 に示す B3 の場合のように、たゞ1本だけ離岸流が発生するという流況パターンになるものと思われる。

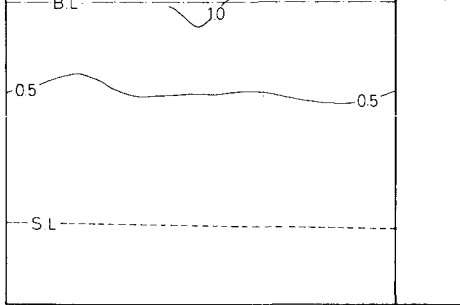
B 1 図-8



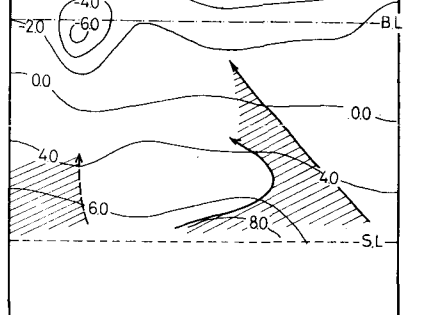
B 1 図-9



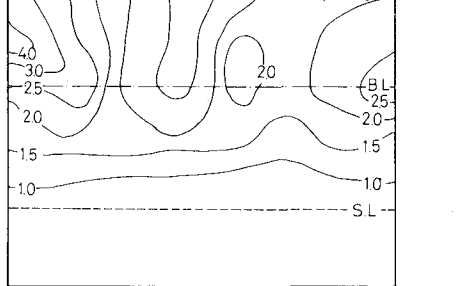
B 2 H_b = 65 cm, T = 0.72 sec, I_r = 0.12



B 2 H_b = 65 cm, T = 0.72 sec, I_r = 0.12



B 3 H_b = 17 cm, T = 0.81 sec, I_r = 0.46



B 3 H_b = 17 cm, T = 1.44 sec, I_r = 0.46

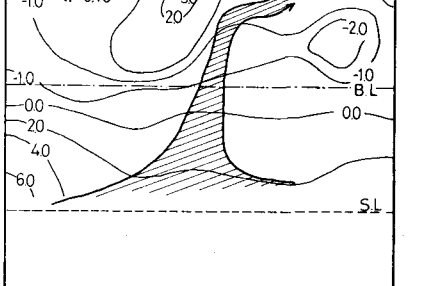
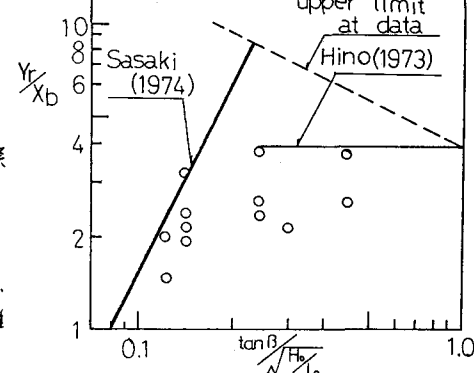


図-10



この事は、例えば、三次元海変形問題や、砕波帯直傍の温排水等の拡散問題を取り扱う実験においては、予想される離岸流間隔に較べて5倍以上広い幅の水槽を行わなければならないことを示している。

次に、主たる離岸流流心部の流速の測定結果を図-11に示す。離岸流の流速測定結果は、現地観測結果を Sonu

佐々木・堀川が報告しているし、実験結果については、佐々木・尾崎が発表している。それらの結果によると、離岸流の最大流速は、砕波点直傍に存在する。図-11において、横軸が $h/h_b = 1.0$

の点で砕波点であるが、我々の実験結果では、A1, A2, B2 では、最大流速の発生地点は汀線と砕波点の間地点で発生している。また、A3, B3の

砕波パラメータ

$\tan \beta / \sqrt{H_b/L_0} = 0.4597$ の場合には、最大流速の発生地点は汀線直傍と砕波点より沖側で発生していることと判る。これを

海変流の発生領域区分にあてはめてみると、 $\tan \beta / \sqrt{H_b/L_0} < 0.23$ の外重力波領域の場合には、A1, A2, B1, B2 のように砕波帯中央部近くに最大流速の発生点があり、 $0.23 \leq \tan \beta / \sqrt{H_b/L_0} \leq 1$ の不安定領域では、砕波点沖側と汀線直傍に最大流速の発生地点が存在すると考えられる。以上、岬直傍の波による流れについて、波高分布、平均水位分布、離岸流の流況、流岸流の流速分布から調べてみたが、今後、この種の実験では水路幅Bを離岸流間隔に較べて大きい範囲の実験をしなければならない事が明らかとなった。

[参考文献]

- 伊藤喜行, 谷本勝利: 新しい方法による波動の数値計算, 港湾技術報告, vol.10, No.2, pp97~120
 伊藤喜行, 谷本勝利, 山本圭一: 波向線交叉領域における波高分布, 港湾技術報告, vol.11, No.3, pp87~109
 谷本勝利, 小舟浩治, 小松和彦: 数値波動解析法による港内波高分布の計算, 港湾技術報告, vol.14, No.3 pp35~58
 T.R. マッカー: 計算機のための数値計算法概論, サイエンス社
 堀川清司, 佐々木民雄他: 海変流に関する研究(第2報) 第21回海岸工学講演会論文集, 1974
 堀川清司, 佐々木民雄他: 海変流に関する研究(第4報) 第23回海岸工学講演会論文集, 1976
 Sonu, C. J.: Field observation of near shore circulation and mean clering currents, Jour. Geophys. Res., vol.77, No.18, 1972
 尾崎晃, 佐々木幹夫: 離岸流に関する研究, 第23回海岸工学講演会論文集, 1976
 玉井佐一: 海変流と海変地形, 1977年度水工学に関する夏期研修会テキスト, Bコース, 土木学会