

多方向不規則波を用いた実験による人工島背後の循環流に関する研究

清水 隆 夫*・平 口 博 丸*

1. はじめに

人工島背後、即ち人工島と本土に挟まれた静穏な海域はリゾート、水産などの面で利用価値が高い。同時に、人工島背後は入射波の回折領域にあたり、循環流が発達する海域でもある。また、人工島背後は離岸堤背後などと比べて空間スケールが大きく、水深も大きいので、波の多方向性を無視することができない。したがって、この海域を利用する場合は多方向不規則波による循環流の特性を十分把握しておく必要がある。

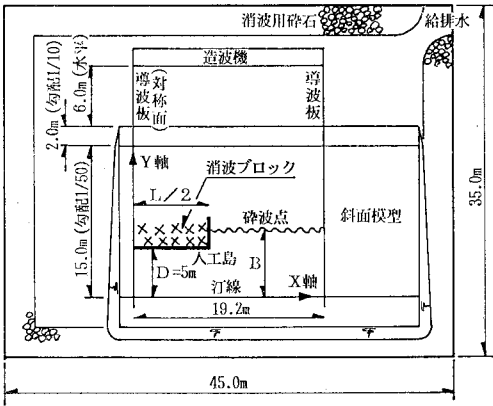
本研究の目的は、多方向不規則波を用いた実験によって、人工島背後の循環流の特性を把握することにある。また、規則波や一方不規則波を用いて実験する場合の留意点についても合わせて検討した。

2. 実験方法

実験には 図—1 に示す幅 40 cm の低反射制御式ピストン型造波機 48 台を備えた 35 m×45 m の平面造波水槽(平口ら;1990)を用いた。水槽内に勾配 1/50 の斜面を設け、波が汀線に直角に入射するように造波機と導波板を並べた。人工島の模型は片方の導波板を対称面として半面だけ配置した。人工島の護岸はブロック塀用のコンクリートブロックを並べてつくった。多重反射を防ぐため沖側護岸には消波工を設けた。導波板、岸側護岸ならびに側方護岸は直立壁とした。人工島の離岸距離 D 、即ち汀線から岸側護岸までの距離は 5 m とした。造波水深は 50 cm、人工島岸側護岸の前面水深は 10 cm である。

実験座標軸は人工島の対称面と汀線の交点を原点として沿岸方向に X 軸、沖方向に Y 軸、鉛直上方に Z 軸をとった。流速は X 軸方向を U 、 Y 軸方向を V と定義した。

実験条件と実験ケースを表—1 に示した。人工島の沿岸長 L 、即ち Y 軸から側方護岸までの距離の 2 倍は 5 m、10 m、15 m とした。これらは人工島の離岸距離 D の 1 倍、2 倍、3 倍にあたる。入射波は、A1; 周期 0.88 s



図—1 多方向不規則波造波水槽と模型の配置

表—1 実験条件と実験ケース
(表中の太字がケース番号)

波の種類	波の番号	波の周期 T, T (s)	沖波波高 H, H_{rms} (cm)	砕波帯幅 B (m)	方向集中度 S_{max}	人工島の沿岸長 L		
						5m	10m	15m
規則波	A1	0.88	3.1	2.5	∞	A11	A12	A13
	A2	1.25	6.3	5.0		A21	A22	A23
	A3	1.53	9.4	7.5		A31	A32	A33
	A4	2.00	5.3	5.0		A41	A42	A43
多方向 不規則波	B1	0.88	3.1	2.5	75	B11	B12	B13
	B2	1.25	6.3	5.0		B21	B22	B23
	B3	1.53	9.4	7.5		B31	B32	B33
	B4	2.00	5.3	5.0		B41	B42	B43
	C1	0.88	3.1	2.5	10	C11	C12	C13
	C2	1.25	6.3	5.0		C21	C22	C23
	C3	1.53	9.4	7.5		C31	C32	C33
	C4	2.00	5.3	5.0		C41	C42	C43
一方方向 不規則波	D2	1.25	6.3	5.0	∞			D23

* 正会員 工修 電力中央研究所 水理部

沖波波高 3.1 cm, A2; 1.25 s 6.3 cm, A3; 1.53 s 9.4 cm, A4; 2.00 s 5.3 cm の規則波, 平均周期と沖波の自乗平均波高が規則波と同じ多方向不規則波(表中の B1~B4 と C1~C4) ならびに平均周期 1.25 s 沖波の自乗平均波高 6.3 cm の一方不規則波 D2 である. 各実験ケース A11, A12, … は以上の人工島沿岸長と波の組合わせであるが, 一方不規則波については D23 の 1 ケースのみを行った.

波の回折領域外での碎波帯幅 B は A1, B1, C1 が 2.5 m, A2, B2, C2, D2, A4, B4, C4 が 5.0 m, A3, B3, C3 が 7.5 m である. これらの碎波帯幅 B は人工島の離岸距離の 0.5 倍, 1 倍, 1.5 倍にあたる. また, A4, B4, C4 の波の沖波波形勾配は 1% で, これ以外の波の沖波波形勾配はすべて 3% である. 以上の実験スケールは現地海岸の 1/100 程度の縮尺にあたる.

不規則波の周波数スペクトルは Bretschneider-光易型, 多方向不規則波の方向関数は光易型, 造波信号の作成はシングルサンメーション法(平口ら; 1990)とした. 造波水深における多方向不規則波の方向集中度 $S_{\max}$ は 75 (B1~B4) と 10 (C1~C4) の 2 種類を設定した.

波高の測定には容量式波高計を用い, 測定信号を計算機に取り込んで解析した. ただし, 水深 3 cm 以下, 即ち汀線からの距離 1.5 m 以内は浅すぎて測定できなかった.

水深 4 cm 以上, 即ち汀線から 2 m 以上沖での流速測定には水平 2 成分の電磁流速計を用いた. 規則波については, 流速計の平滑化時間幅を 10 s として平均流速を直続した. 不規則波については, 計算機に測定信号を取り込んで約 100 波の平均流速を解析した.

流速の測定高さについては循環流の沿岸流速成分 U の鉛直断面分布を予備的に測定して決めた. 表-2 に測定結果を示した. 実験ケースは A22, 測定断面は $X=5$ m である. 流速の鉛直分布はほぼ一様であった. そこで, 底面から 2 cm の高さで測定した流速をその地点の

表-2 循環流の沿岸流速成分の鉛直断面分布

(流速の単位は cm/s, CASE-A22, $X=5$ m)

Y(m) Z(cm)	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5
-2	-27	-29	-13	0	4	11	
-3	底面	-29	-17	-2	6	15	24
-4		底面	-19	-2	4	15	22
-5			底面	-5	4	14	23
-6				底面	5	16	24
-7					底面	15	26
-8						底面	26
-9							底面

代表流速とした.

水深 4 cm 未満, 即ち汀線からの距離 2 m 未満の岸近くにおける流速測定には染料を用いた. 測定格子点上にウォーターブルーの溶液を一滴滴下して染料雲の移動方向を目視し, 間隔 50 cm の格子間の移動時間をストップウォッチで計測した.

3. 入射波の方向特性

造波された多方向不規則波の方向特性を表-3 に示した. 表には $S_{\max}$ の設定値 75 の多方向不規則波 B2 と $S_{\max}$ の設定値 10 の多方向不規則波 C2 の周波数別の方向集中度 S がまとめられている. 表中, f/f_p は周波数スペクトルのピーク周波数 f_p で無次元化した周波数 f である. 同じく設定値とあるのは光易型の方向関数の方向集中度, BDM と EMLM は波高計 4 本のアレイによる測定データからそれぞれベイズ型モデル(橋本; 1987)と拡張最尤法(磯部ら; 1984)を使って推定した方向関数のピーク値を方向集中度に換算したものである. 波高計アレイは B2 については最小波高計間隔 29 cm の直線アレイ, C2 については最小波高計間隔 50 cm の星型アレイで測定した.

造波された多方向不規則波の方向集中度は低周波側で設定値よりも低く, 高周波側で設定値より高い傾向が特

表-3 造波された多方向不規則波の方向特性
(方向集中度 S)

f	B 2 $S_{\max}=75$			C 2 $S_{\max}=10$		
	設定値	BDM	EMLM	設定値	BDM	EMLM
f_p						
0.8	24	20	17	3	2	1
0.9	44	30	17	5	5	3
0.95	58	28	20	7	7	5
1.0	75	33	24	10	9	6
1.05	66	75	51	8	9	7
1.1	59	98	66	7	11	7
1.2	47	71	61	6	8	5
1.3	38	77	59	5	2	2
1.4	32	35	29	4	3	2

f は周波数, f_p は周波数スペクトルのピーク周波数.

表-4 屈折変形による多方向不規則波の方向特性
(S) の変化

	B2 $S_{\max}=75$			C2 $S_{\max}=10$		
	S 1	S 2	S2/S1	S 1	S 2	S2/S1
理論値	65	165	2.5	8	29	3.6
BDM	59	99	1.7	9	34	3.8
EMLM	40	65	1.6	6	24	4.0

S1, S2 は $f/f_p=0.95, 1.0, 1.05, 1.1$ の S の平均.
S1 は造波水深 50 cm での値. S2 は水深 16 cm での値.

に B2 に顕著に認められるものの、全体としてほぼ所定の方向集中度になっていると言えよう。

つぎに、多方向不規則波が浅海域に達するまでの間に屈折によって方向特性がどのように変化するかを調べた。多方向不規則波 B2 と C2 の結果を表-4 に示した。表中、S1 と S2 は $f/f_p=0.95, 1.0, 1.05, 1.1$ に対応した4つの方向集中度を平均したものである。S1 は造波

水深 50 cm での値、S2 は水深 16 cm 即ち $Y=8$ m での値である。方向集中度の測定値 (BDM, EMLM) は B2 ではば 1.7 倍、C2 ではば 4 倍に変化している。表中の理論値は合田・鈴木 (1975) にならって計算した値である。多方向性の強い C2 についてはほぼ理論値の変化と一致している。多方向性の弱い B2 については屈折による変化が理論値より小さくなっている。

4. 人工島背後の循環流と波高の分布

図-2 に規則波のケース A23、一方向不規則波のケース D23、多方向不規則波のケース B23 と C23 の流速ベクトル分布、図-3 に同じく波高分布を示した。

まず、両図全体を見て人工島背後が波静かながら流れの速い海域であることがわかる。

何れのケースでもきれいな循環流が形成されているが、ケース A23、D23、B23 と見ていくと、人工島対称面付近にできる死水域の大きさがこの順序で小さくなっていくのがわかる。また、ケース B23 と C23 の流況はほぼ同じである。

波高分布は規則波のケースと不規則波のケースで大きく異なる。ケース A23 では碎波によって急激に波高が減衰した後人工島の背後に回折している。ケース D23、B23、C23 では碎波減衰がなだらかで、人工島背後にも比較的大きな波が回折している。人工島背後の波高は規則波の場合が不規則波の場合の約半分になっている。

5. 循環流の断面構造

図-4 と 図-5 に循環流の断面構造を示した。

図-4 は循環流の沿岸流速成分 U の岸沖分布で、循環のほぼ中心を通る断面、即ち (a) $L=5$ m のケースは $X=2$ m、(b) $L=10$ m のケースは $X=3.5$ m、(c) $L=15$ m のケースは $X=6$ m の分布である。 $Y=0$ m が汀線、 $Y=5$ m が人工島岸側護岸にあたる。 $Y=0\sim3$ m では $U<0$ で人工島の対称面に向かって流れている。 $Y=3.5\sim5$ m では $U>0$ で人工島の遮蔽域外に向かって流れている。どのケースも循環流が人工島の離岸距離い

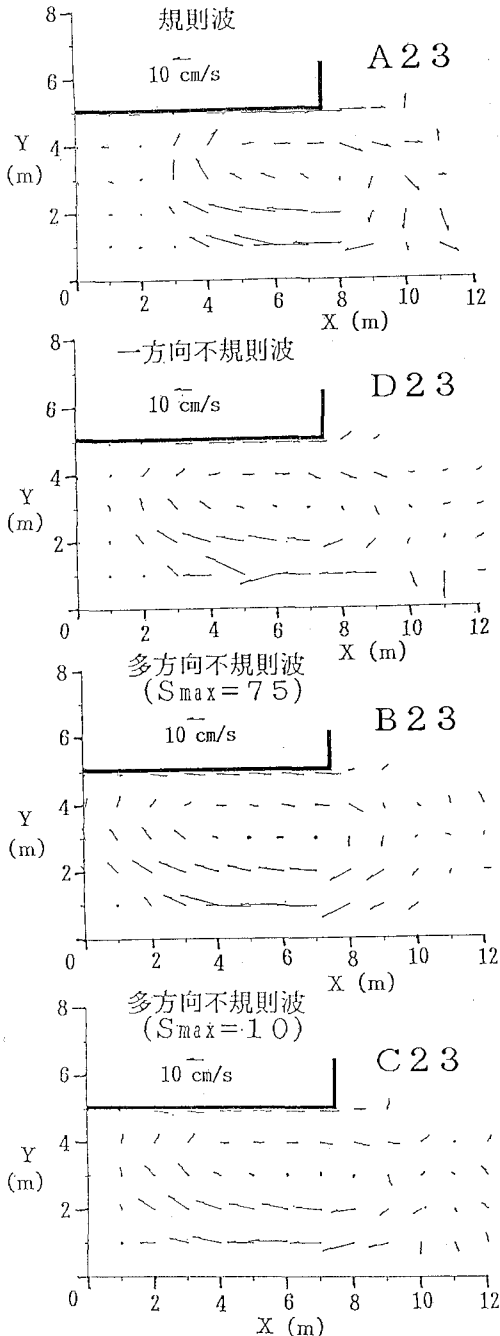


図-2 人工島背後の循環流の流速ベクトル分布

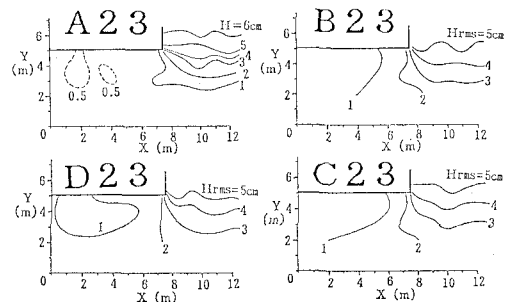


図-3 人工島背後の波高分布

っぱいに広がって循環している。岸沖断面で見た循環の中心はほぼ $Y=3.3$ m, 即ち汀線から人工島離岸距離 D の $2/3$ となっている。流速の絶対値は規則波のケース (図の上段) が多方向不規則波のケース (図の中段, 下段) より大きい。波の大きさや波形勾配で見ると, 波高の小さいケース A11, B11 などが $Y=1.5$ m ~ 3 m のあたりで他のケースより沿岸流速成分が小さくなっている。ただし, 汀線近くは波高が小さくても沿岸流速が速い。

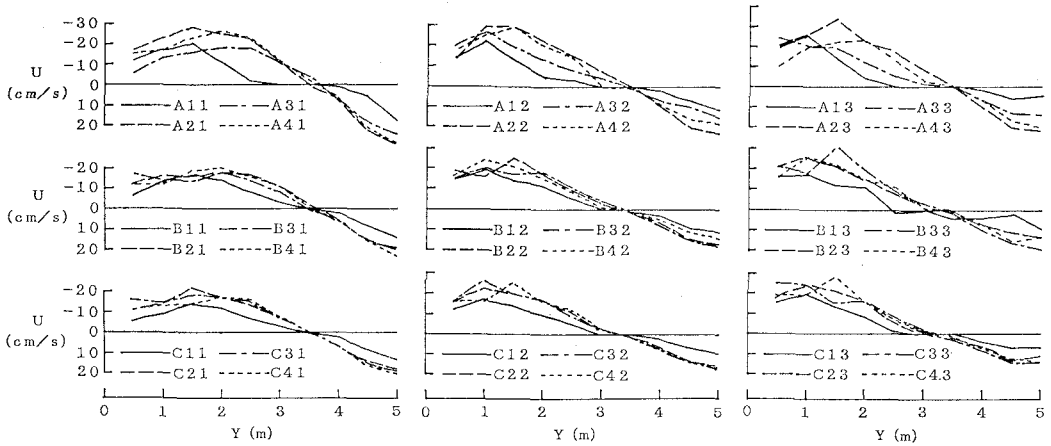
図-5 は循環流の岸沖流速成分 V の沿岸分布で, 循環のほぼ中心を通る断面, 即ち $Y=3$ m の分布である。 $X=0$ m が人工島の対称面である。 $X=0$ m 付近では $V>0$ で沖向きに流れている。人工島の端部側では $V<0$ では岸向きに流れている。岸沖流速成分の向きが逆転する沿岸断面で見た循環の中心は人工島の丁端部にあつ

ている。 $X=0$ m の沖向き流速は人工島の沿岸長 L が長くなるほど小さくなり, $L=3D$ にあたる図中 (c) ではほぼ $V=0$ となっている。人工島沿岸長の長い図中 (b), (c) では循環の中心から人工島対称面に向かって沖向き流速の小さい領域がある。岸向きの流れの端は人工島端部からほぼ 2.5 m, 即ち人工島離岸距離 B の $1/2$ となっている。

上で述べた循環流の沿岸構造を図-6 にまとめて示した。図の縦軸, 横軸はそれぞれ人工島の離岸距離 D で無次元化した沿岸長 L ならびに沿岸座標 X である。 V は循環流の中心を通る沿岸測線上の岸沖流速成分である。

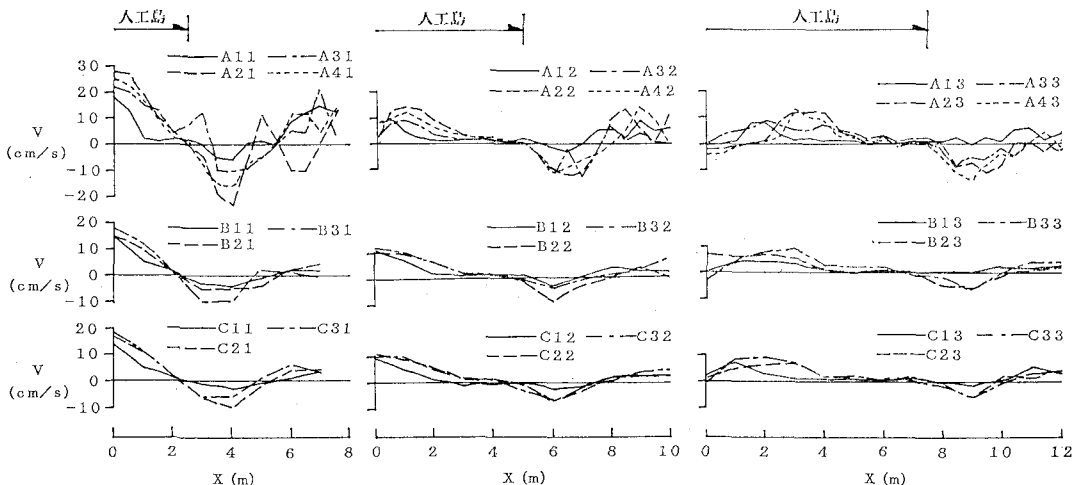
6. 循環流の流量

循環流の強さを循環流の流量 Q で評価した。 Q は循



(a) $L=5$ m ($X=2$ m) (b) $L=10$ m ($X=3.5$ m) (c) $L=15$ m ($X=6$ m)

図-4 循環流の沿岸流速成分の岸沖分布 (循環流のほぼ中心を通る断面)



(a) $L=5$ m ($Y=3$ m) (b) $L=10$ m ($Y=3$ m) (c) $L=15$ m ($Y=3$ m)

図-5 循環流の岸沖流速成分の沿岸分布 (循環のほぼ中心を通る断面)

環の中心を通る岸沖測線上で計った沿岸流速成分の絶対値 $|U|$ に水深を乗じ、汀線から中心まで積分した値と中心から人工島岸側護岸まで積分した値を平均して求めた。その結果を図-7 に示した。

多方向不規則波の結果を見ると碎波帯幅 B が人工島離岸距離 D の 0.5 倍から 1 倍になると、つまり波高がほぼ 2 倍になると Q も 2 倍になっている。ただし、 B が D を越えると Q は増加しなくなる。また、方向集中度、波形勾配の効果は小さいようである。

規則波の場合は $B=D$ で多方向不規則波の 3~5 割り増しとなっている。

7. 結 論

汀線に直角に入射する多方向不規則波を用いた実験を行い人工島背後の循環流の特性を明らかにした。また、規則波、一方向不規則波を用いる場合の留意点について検討した。その主な結論は以下のようにまとめられる。

1) 多方向不規則波による循環流の特性

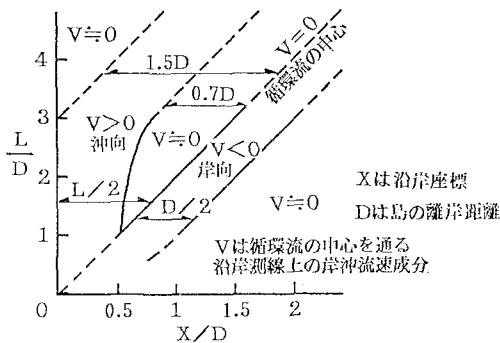


図-6 人工島の沿岸長 L と循環流の沿岸構造の関係

- 方向集中度 $S_{max}=10\sim75$ の範囲では流況にほとんど差がない。
- 循環流は人工島の対称面の両側に 1 個ずつ発生し、島の沿岸長が大きくなると循環流も沿岸方向に引き伸ばされた形となる。ただし、島の沿岸長が離岸距離の 3 倍以上になると島の背後に死水域ができるが、循環流が分裂するようなことは起らない。
- 循環流量は波高にはほぼ比例するが、島の岸側護岸より沖で碎波するようになると流量はそれ以上大きくならない。

2) 規則波を用いる場合の留意点

- 島の沿岸長が離岸距離の 2 倍以上では多方向不規則波より大きな死水域ができる。
- 循環流量は島の岸側護岸付近で碎波するとき多方向不規則波の場合より 3 割~5 割増しとなる。

3) 一方向不規則波を用いる場合の留意点

規則波と多方向不規則波の中間的な循環流となる。

最後に、実験を担当した(株)土木技術開発の下田隆男氏と(株)CRSの下村 一氏に謝意を表する。

参 考 文 献

- 磯部雅彦・近藤浩石・堀川清司 (1984): 方向スペクトルの推定における MLM の拡張, 第 31 回海岸工学講演会論文集, pp. 173-177.
- 合田良実・鈴木康正 (1975): 光易型方向スペクトルによる不規則波の屈折・回折計算, 港研資料, No. 230, 45 p.
- 橋本典明 (1987): ベイズ型モデルを用いた方向スペクトルの推定, 第 34 回海岸工学講演会論文集, pp. 126-130.
- 平口博丸・清水隆夫・池野正明・田中寛好 (1990): 多方向造波システムの効率化とその造波特性, 海岸工学論文集, 第 37 巻, pp. 140-144.

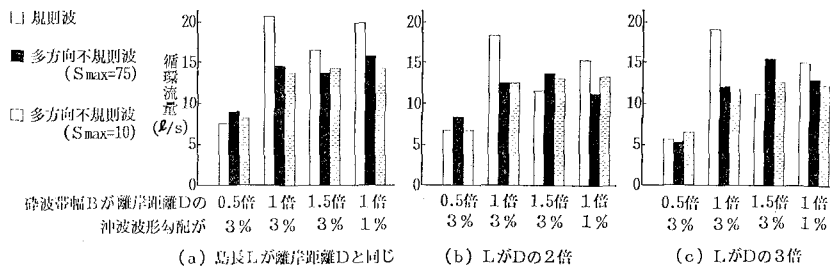


図-7 人工島背後の循環流の流量