

拡散に影響を及ぼす海浜流の特性

田中寛好*・和田 明**・小森修蔵*・竹内 出***

1. はじめに

本邦の如き四方を海で囲まれた島国では、発電所は今後も外海に面した地点に建設されるものと推察され、遠浅海岸に直接放流された温排水は、砕波やそれに伴う海浜流の影響を受けることも考えられる。拡散現象に及ぼす海浜流の影響を検討するための第一歩として、本研究では、具体的な発電所地先海底地形と現地の波浪スペクトルおよび流況条件を考慮した水理模型上での温排水拡散範囲に関する原型との相似性の検討、また拡散機構についての基礎的な知見を得るため、砕波帯幅、温排水拡散範囲ならびに海浜流影響下の拡散係数の間の関連性、さらに不規則波や規則波の作用を受けた場合および規則波に恒流が加わった際の海浜流の変動特性とそれぞれの条件下での拡散パターンの特徴との関連性の検討を行った。さらに、大流量温排水の拡散を取り扱う場合には、数値シミュレーションにたよらざるを得ず、その手法を開発する際、拡散に影響を及ぼすと考えられる海浜流の発生メカニズムとその特性を把握しておくことが重要と考え、本研究では、既述の検討に加えて、海浜流の発生メカニズムについて実験結果に関する考察を行った。

2. 水理模型による拡散実験結果の現地への適合性¹⁾

2.1 実験条件ならびに実験方法

長さ 50m, 幅 22.6m, 高さ 1.5m の平面水槽内に図-1 に示すような福島地点発電所地先海域の海底地形を製作した。砕波特性、海浜流系統の特性あるいは砕波帯内のシア-拡散現象を模型上で原型と相似にするためには、無歪模型であってフルードの力学的相似則を満足する必要がある。本実験は表層放流を対象とし、しかも波の作用が卓越するため浮力効果による混合稀釈は少く、内部フルード数にはさほど影響されないと思われる。従って、フルードの相似則に基いた無歪模型で可能な限り大きな縮尺 1/150 を採用した。なお、海底地形については、移動床実験が現地に忠実であるが、相似則が

未だ確立していないこと、温排水拡散の時間スケールが地形変化のそれと比べてかなり小さいこと等の理由により底面モルタル仕上げの固定床で実験を行った。

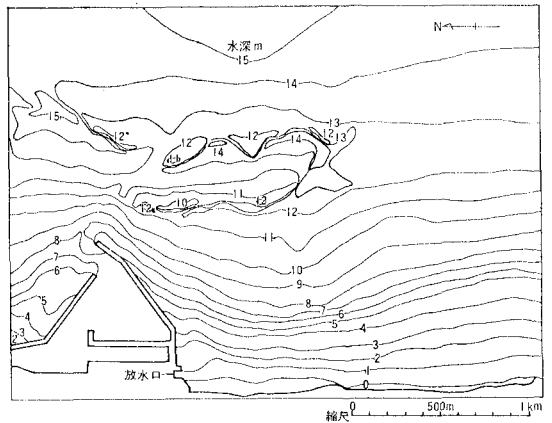


図-1 模型に採用した海域の等深線図

温排水放出流量は $25.3 \text{ m}^3/\text{s}$ 、放水温と環境水温との差は 8.8°C とし、現地の1号機分のみ運転時を対象とした。

波浪の条件は、図-2 に示すスペクトルを有する不規則波(波向は E)で現地において頻度高く出現する代表的ものを採用した。この海域での沖合の流れの特性は、周期成分を持たない不規則な過程が卓越している乱れの場合であって沿岸方向流速の時間的変化の様相は矩形に近い形で変化しており、南流時、北流時のそれぞれの平均流速は汀線より 500~1500m の沖合で流速 15~22

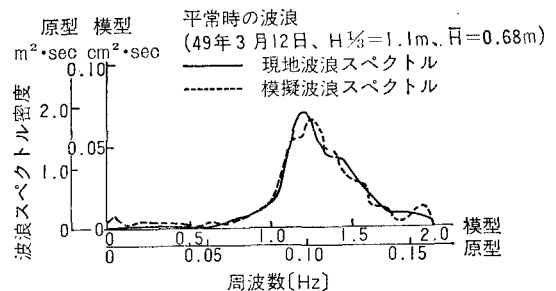


図-2 模型上での現地波浪スペクトルの再現性

* 正会員 工修 (財)電力中央研究所土木技術研究所

** 正会員 工博 (財)電力中央研究所土木技術研究所環境水理部長

*** 正会員 電力技術整備(株)

cm/s である。従って、実験においては、恒流なし、南向恒流、北向恒流の3種類を採用し、恒流流速は現地値を模擬した。

表層の水温測定は、約 90 本のサーミスタ水温計と自動記録処理装置を用いて同時に実施し、各測定点における水温上昇値より水温の平面分布を求めた。また、海底には、海浜流の卓越する場所では 17 cm 間隔（原型で 25 m 間隔）、沖合では 67 cm 間隔（原型で 100 m 間隔）のメッシュを描き、浮子の追跡により流況を求めた。特に、砕波帯内での波乗り作用を防止するため浮子の比重を 1 とし、水面から頭部を出すことなく流れにうまく追従させた。

2.2 実験結果および考察

前項で述べた方法に従って実験を行い、得られた結果を図-3 と 図-4 に示す。

図-3 は、温排水拡散分布に関して実験結果と実測結果数例を比較したものである。実測結果は、実施日より、拡散範囲が汀線に沿う場合、沖合方向に扇状に広がる場合、防波堤にはりつく場合等様々に異なり、複雑な変化をしている。これは、この海域では恒流の存在が明白でなく、その向きも一定していないためであるが、海浜流によっても大きな影響を受けていると考えられる。また、いかなるケースにおいても拡散分布形は汀線に接触しており、波が存在する場合の特徴的な形を呈している。現地での気象・海象条件は時々刻々非常に複雑に変化しており、代表的な条件のみを採用し単純化して行った実験結果とは差違が生ずるのは当然であるが、現地で頻度の高い波浪スペクトルを有する不規則波を波の場として与えた実験における拡散分布に関しては、実測拡散分布結果の中に似た形のものが存在し、面積的にもかなり近い状態にある。現地で頻度高く起り得る波浪、流況条件を数種類変化させて行った実験より得られた拡散範囲の包絡をとれば、実測結果の包絡とかなり良く一致する。したがって、今回実験で取り扱った程度の流量条件下では、現地の波浪、流れの条件を充分考慮してフルード相似則をもとにした無歪模型に取り入れれば、波浪の卓越する海岸での温排水に関しては、その拡散包絡範囲

をかなり正確に予測することができよう。

図-4 は、温排水を放流した場合の前面海域の流況の実験結果代表例であり、不規則波に南向恒流が加わった際のものである。模型上でも海浜流の存在が明らかであり、図-3 の拡散分布形と見比べると、放水口の南 800 m~1 km のところに存在する離岸流が拡散のパターンに影響を与えていることがわかる。したがって、本実験で扱った程度の温排水流量では、砕波帯内およびその近傍における温排水拡散に対し海浜流はかなりの影響を及ぼすものと判断された。

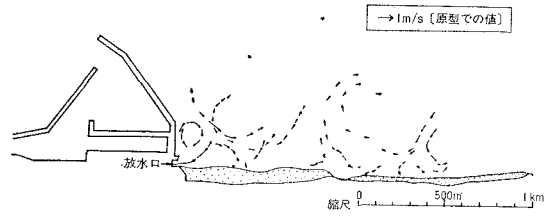


図-4 流況に関する実験結果 1 例（不規則波+南向恒流）

3. 温排水の拡散に及ぼす海浜流の影響

前節に述べた実験結果より、砕波や砕波後の段波、乱れおよび海浜流が温排水拡散に少なからぬ影響を及ぼしていることが推測されるため、本節では、それらの特性をある程度定量的に把握し、温排水拡散範囲との関連づけを行う。具体的には、図-1 に示す海底地形を有する模型実験によって、各種の波浪および恒流が作用した場合の海浜流の変動特性ならびに海浜流影響下の拡散係数と温排水拡散範囲との関連性の検討を行うことを目的とする。本実験は、各波浪ならびに恒流条件下での海浜流変動特性および拡散係数の相違を明確に抽出して把握するための基礎実験であり、波浪条件と沖合恒流の条件は現地換算の平常時のものよりかなり大きなものを用いている。

3.1 実験方法

砕波波高計測には抵抗線式波高計、海浜流流速の定点連続観測には超音波式流速計を用いた。従来、比較的小スケールの拡散係数は染料可視範囲の時間的変化率あるいはいくつかの固定点での濃度の時間的変化から求める場合が多かったが、砕波帯内のように複雑な流れが存在したり、拡散範囲の水深が一様でないような場所では、染料濃度がガウス分布を示さないことや水粒子の分布確率と採水中の染料濃度とが対応しにくいこともあって、従来の方法では精度があまり期待できない。そこで、本実験では、水粒子の運動にほぼ完全に追従しうる浮子を製作し、それを砕波帯内に 1 個ずつ計 100 個投入してそれぞれの時間的な位置の変化をとらえ、その位置の統計的分散の時間変化率から拡散係数を求めた。

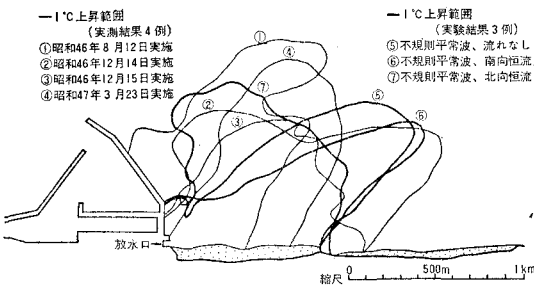


図-3 図-2 の不規則波を作用させた場合の温排水拡散分布実験結果と実測例との比較

3.2 実験結果および考察

図-5 は、不規則波作用下、不規則波と同等のエネルギーを有する規則波作用下、左記規則波に強い沖合恒流が加わった際のそれぞれの沿岸流、離岸流卓越地点における流速変動のパワースペクトルを示したものである。なお、これらのスペクトルは、波の周期の10倍以上の低周波数帯を対象としており、温排水の移流拡散パターンに影響を及ぼすと考えられる変動成分に着目して解析した。

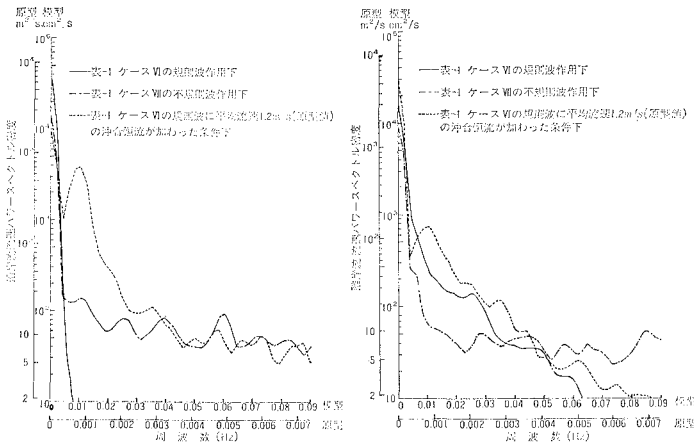
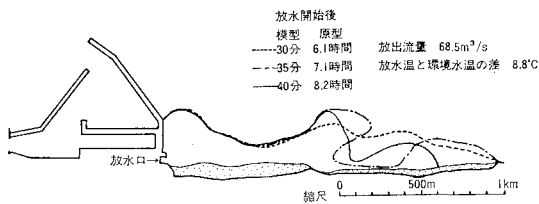
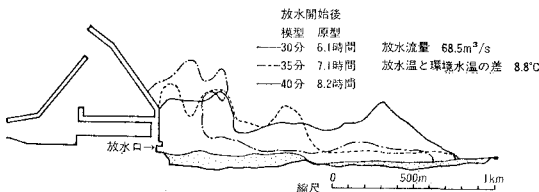


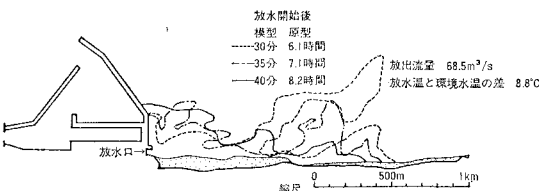
図-5 海浜流流速変動のパワースペクトル



(a) 表-1 ケースVIの規則波作用下



(b) 表-1 ケースVIIの不規則波作用下



(c) 表-1 ケースVIの規則波+平均流速 1.2 m/s (原型値)の沖合恒流条件下

図-6 は、図-5 の場合と同じ不規則波、規則波、規則波+沖合恒流作用下における温排水移流拡散パターンであり、放出流量原型換算 $68.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 、放水温と環境水温との差 8.8°C の条件下での拡散面積が定常に達した後の 1°C 上昇範囲例である。さらに、波浪条件、温排水拡散面積、砕波帯内拡散係数 3 者の相互関係を示したのが表-1 であり、値はすべて原型換算値である。

図-5 および図-6 より以下のような知見が得られた。不規則波作用下と規則波作用下の沿岸流流速パワース

ペクトルを比較すると、原型で数時間以上の長周期成分すなわち定常流成分は規則波作用下の方が大きい。不規則波作用下では沿岸流がより高周波の流速変動成分まで有することがわかる。離岸流は規則波作用下でも完全な定常状態ではなく時間的な強弱と発生位置の多少の変化が認められ、沿岸流流速に比べ規則波作用下ではより高周波の変動成分まで存在するが、不規則波作用下では沿岸流変動特性とほぼ同じ傾向を有する。強い沖合恒流が規則波に重なると、規則波のみが作用する場合に比して沿岸流、離岸流ともに原型で数十分以下の短周期変動成分が大きくなり、本実験条件下では特に周

期 20 分 (原型値) 近辺の変動成分が卓越している。これは、砕波帯外の流れと波との相互作用に起因しており、砕波帯内の海浜流がその相互作用の影響を受けていることが理解される。図-6 の温排水拡散パターンに着目すると、規則波作用下では放水口より 1 km 以内の範囲つまり離岸流発生位置の上流側では拡散パターンは時間的にほとんど変化しないことが認められ、離岸流発生位置およびその下流部で若干変化している。このことは、図-5 に示す結果一定常的な沿岸流特性と高周波の変動成分をも多少有する離岸流特性と強い関連性を有している。不規則波作用下の拡散パターンは規則波作用下に比して時間的変動が大きいことが認められるが、これは、不規則波作用下の方が海浜流はより高周波の流速成分まで有することと関連する。規則波+沖合恒流の場合は時間的変動が最も著しく、波と流れの相互干渉の影響を受けて海浜流が複雑に変化し、不規則波と同じように規則波のみ作用する場合より高周波の流速変動成分が存在することと関連する。不規則波作用下や恒流が加わった場合は、時間的変動パターンを包絡すれば規則波作用下の包絡範囲より大きくなり、このことは、拡散包絡範囲の予測に際しては波の不規則性や沖合の流れを考慮して評価することが重要であることを示唆している。

表-1 に示す拡散係数は、海浜流系統全体を含む規模のものではなく主に砕波による段波と沿岸流の作用する

図-6 温排水移流拡散パターン (1°C 上昇範囲) の変動例

砕波帯内に限ったもので、定常に達した後の平均値である。拡散係数は点源投入によって求めており、投入直後は岸沖方向、沿岸方向とも乱れによる拡散が支配的であるが、沿岸方向は時間とともに沿岸流によるシア効果加わって拡散係数は大きくなる。沿岸方向移流拡散係数 K_x はせいぜい離岸流間隔程度、岸沖方向拡散係数は砕波帯幅程度の拡散スケールを対象としており、 K_y は原型換算値で1~2分、 K_x は10分程度定常に達するのに要する。

表一 からは次のような知見が得られた。

(1) 1°C 上昇範囲は、波の周期よりも砕波波高ないし砕波帯幅と強い相関を有すること、また、 K_x とも深い関連があることが明確になった。砕波帯幅が増大すると段波や海浜流の規模が大きくなりシア拡散や乱れ拡散が促進されて K_x つまり稀釈率が増加するため温度上昇範囲は小さくなる。高温温度上昇範囲に関しては、拡散面積との相関は K_x よりも K_y の方が強いようであり、波の周期によってもかなり影響を受ける。

(2) 規則波作用下と不規則波作用下の拡散面積を比較検討したところほとんど差は認められなかったが、 K_x に関しては規則波作用下の方が若干大きく、 K_y に関しては逆に不規則波作用下の方が大きめの傾向がみられた。規則波作用下では不規則波作用下に比べて沿岸流が定常的で平均流速が大きくシア効果が明確であるため K_x が大きく、不規則波では砕波後の段波が強くと海浜流がより高周波の流速変動成分を有し渦動拡散が大きいいため K_y が大きくなるものと思われ、図一5の結果とも関連性を有する。

(3) 本実験結果の K_y を Inman et al.²⁾ および Harris et al.³⁾ の実測や実験に基づく算定式と比較すると、Inman et al. の値より1オーダー小さく、Harris et al. の実測値と割合近い値を示した。

4. 海浜流の発生メカニズム

比較的放出量が小さい場合は、模型実験によって外海に面した海岸付近での温排水拡散予測は可能であろうが、放出流量が増大すると拡散予測は数値シミュレーションにたよらざるを得ず、その手法を開発する際、拡散に影響を及ぼすと考えられる海浜流の発生機構を把握し、流れの場を計算によって再現することが重要となる。海浜流に関する数値シミュレーションは過去にも幾人かの研究者^{4),5)} によって実施されてきたが、実測や実

表一 砕波帯内における拡散係数 (原型換算値)

ケース	波浪条件	温排水拡散面積 $Q = 68.5 \text{ m}^3/\text{s} (10^{-6} \text{ m}^3/\text{s})$ $\Delta T = 8.8^\circ\text{C}$	砕波帯内拡散係数 ($10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$)		
			Inman et al. $K_y = Hb \times b/T$	Harris et al. $K_y = Hb^2/T$	本実験結果
I	Hb=5.7m T=30.6sec Xb=450m	1°C Cup	33.5		$K_x = 67.6$
		2°C Cup	14.2		
		3°C Cup	6.4	$K_y \approx 83.8$	$K_y = 1.06 \times \begin{matrix} 1.3 \text{ 実験} \\ 2 \sim 3 \text{ 実測} \end{matrix}$ $K_y = 7.2$
II	Hb=5.1m T=12.2sec Xb=430m	1°C Cup	27.9		$K_x = 73.8$
		2°C Cup	8.7		
		3°C Cup	4.2	$K_y \approx 179.8$	$K_y = 2.10 \times \begin{matrix} 1.3 \text{ 実験} \\ 2 \sim 3 \text{ 実測} \end{matrix}$ $K_y = 20.2$
III	Hb=2.7m T=30.6sec Xb=200m	1°C Cup	72.6		$K_x = 33.7$
		2°C Cup	28.1		
		3°C Cup	16.6	$K_y \approx 17.6$	$K_y = 0.24 \times \begin{matrix} 1.3 \text{ 実験} \\ 2 \sim 3 \text{ 実測} \end{matrix}$ $K_y = 0.8$
IV	Hb=2.2m T=12.2sec Xb=200m	1°C Cup	65.1		$K_x = 32.2$
		2°C Cup	18.0		
		3°C Cup	12.2	$K_y \approx 36.1$	$K_y = 0.40 \times \begin{matrix} 1.3 \text{ 実験} \\ 2 \sim 3 \text{ 実測} \end{matrix}$ $K_y = 2.9$
V	Hb=2.3m T=7.2sec Xb=220m	1°C Cup	55.5		$K_x = 15.4$
		2°C Cup	14.6		
		3°C Cup	9.8	$K_y \approx 70.3$	$K_y = 0.67 \times \begin{matrix} 1.3 \text{ 実験} \\ 2 \sim 3 \text{ 実測} \end{matrix}$ $K_y = 3.4$
VI	Hb=3.7m T=13.0sec Xb=330m	1°C Cup	39.7		$K_x = 52.7$
		2°C Cup	14.2		
		3°C Cup	7.3	$K_y \approx 93.9$	$K_y = 1.05 \times \begin{matrix} 1.3 \text{ 実験} \\ 2 \sim 3 \text{ 実測} \end{matrix}$ $K_y = 4.6$
VII	不規則波 (平均値は VIと同じ)	1°C Cup	44.4		$K_x = 41.1$
		2°C Cup	12.3		
		3°C Cup	6.0	$K_y \approx 93.9$	$K_y = 1.05 \times \begin{matrix} 1.3 \text{ 実験} \\ 2 \sim 3 \text{ 実測} \end{matrix}$ $K_y = 6.6$

Hb; 砕波波高 T; 砕波周期 Xb; 砕波帯幅
 K_x ; 沿岸方向移流拡散係数 K_y ; 岸沖方向拡散係数
 Q ; 温排水放出流量 ΔT ; 放水温度と環境水温度との差

験による検証もあまり明確でなく、また波が斜めに入射する際の防波堤付近での沿岸流のはく離現象⁶⁾ 等従来の理論では説明のつかない点もうかがえ、海浜流発生物理的メカニズムや計算手法をここでもう一度見直す必要があると考える。本研究は、図一1に示す地形模型を用いた実験によって、set up の沿岸方向の大小と沿岸流の方向との関連づけを波が種々の角度で入射する場合について行い、その結果から海浜流の発生メカニズム解明のヒントを得ようとするものである。

4.1 実験方法

図一1に示す模型地形で砕波帯内がほぼ一様勾配とみなせる区間を用いて実験を行った。水面波形の同時測定には相互干渉が無く零点移動のほとんど見られない容量式波高計、沿岸流速の測定には超音波式流速計を用いた。set up の測定は非常に厳密な精度を必要とするため、記録の前後で零点移動が無いことを確認した上で、ペン書き用紙上に収録した1周期あるいは数周期のアナログ水面波形を1mm方眼用紙にトレースし、静水面上と静水面下の面積を方眼により数え上げ、静水位からの水面偏位分を求めた。紙面の都合上結果の図面を省略せざるを得ないが、砕波点での岸方向1周期平均水粒子輸送流量を求めるために、静水面上の水粒子速度は円筒形ホットフィルム流速計を用い、設定抵抗と冷抵抗の比を1.01に下げて測定を行った。

4.2 実験結果および考察

不規則波と規則波、あるいは種々の入射角に対して、沿岸流の上流側と下流側におけるset upの大小関係の実験結果を表一2に示す。また、波が作用し始めてから沿岸流の上、下流側で平均水位差が形成される過程の1例

を図-7に, 図-7と同時に記録の沿岸流形成過程を図-8に示す。なお, 実験結果はすべて模型における値で示してある。

これらの結果から得られる知見は以下の如くである。

(1) 波が汀線に対していかなる角度で入射する際も, 定常状態では沿岸流の上流側の方が下流側よりも平均水位が高いことが明らかになった。波が作用し始めてから沿岸方向に定常的な水位勾配が形成されるのに図-7の例では約15波要するが, 定常に達する以前も上流側の方が平均水位が高いため圧力差によって沿岸方向に加速度が生じて沿岸流が発生し始める。流速の増加とともに底面摩擦等による抵抗力も増加し, 圧力勾配と抵抗力がつり合い加速度が零になった時点つまり図-8の例では約20波目で流速が定常に達している。波高自体は作用開始後2~3波で定常に達してしまうことから

波の沿岸方向運動量成分が砕波帯内で直接沿岸流に変換されたとは考え難い。以上のことから, 沿岸流発生の直接の原因は set up の沿岸方向勾配つまり圧力勾配であると考えられる。すなわち, 波のエネルギーの何割かが砕波帯内で set up という位置エネルギーに一度変換され, その set up が沿岸方向に一樣でないため沿岸流が発生するものと思われる。砕波帯内で平均水位の低い場所に流入した沿岸流は向きを変え離岸流となって砕波帯外へ流出し海浜流を形成するものと理解できる。

(2) 平均水位差は非常に小さい値であるため実験誤

表-2 沿岸流の上流側と下流側における set up の大小関係

波の種類	測点と汀線との距離(cm)	上流側測点		下流側測点		平均水面勾配	上下流測点間平均流速(cm/s)
		波高(cm)	set up(mm)	波高(cm)	set up(mm)		
周期1.06秒の規則波 汀線に直角入射($\theta_b=0^\circ$) 上流側測点での砕波帯幅173cm 下流側測点での砕波帯幅160cm	147	1.76	2.0	3.18	0.6	10.5/10000	8.5
	113	1.16	3.0	1.13	2.0	7.5/10000	
	80	0.56	3.1	0.88	2.8	2.3/10000	
	47	0.70	3.9	0.55	3.3	4.5/10000	
上記と同等の砕波エネルギーを有する不規則波 汀線に直角入射($\theta_b=0^\circ$)	130	1.44	1.2	1.42	0.9	2.3/10000	2.5
	113	1.28	1.6	1.25	1.5	0.75/10000	
	80	1.17	2.6	1.12	2.5	0.75/10000	
周期1.25秒の規則波 平均砕波帯幅152cm, 砕波位置での入射角 $\theta_b=60^\circ$	88	0.88	0.8	1.07	0.4	3.0/10000	6.8
	21	0.42	1.7	0.33	0.8	6.7/10000	
周期1.33秒の規則波 平均砕波帯幅146cm, 砕波位置での入射角 $\theta_b=37^\circ$	88	1.01	0.8	1.11	0.6	1.5/10000	9.7
	21	0.44	2.5	0.30	1.6	6.7/10000	
周期1.66秒の規則波 平均砕波帯幅165cm, 砕波位置での入射角 $\theta_b=0^\circ$	88	0.94	0.7	0.92	0.6	0.75/10000	0.7
	21	0.38	1.3	0.26	1.2	0.75/10000	
周期1.78秒の規則波 平均砕波帯幅173cm, 砕波位置での入射角 $\theta_b=-24^\circ$	88	1.09	1.4	1.03	0.6	6.0/10000	10.4
	21	0.26	1.5	0.29	1.2	2.3/10000	
周期1.87秒の規則波 平均砕波帯幅187cm, 砕波位置での入射角 $\theta_b=-36^\circ$	88	1.22	1.7	1.17	1.2	3.8/10000	7.2
	21	0.32	1.8	0.51	1.3	3.8/10000	
周期1.62秒の規則波 平均砕波帯幅153cm, 砕波位置での入射角 $\theta_b=-60^\circ$	88	1.25	0.3	1.38	0.3	0/10000	1.8
	55	0.84	0.5	0.90	0.4	0.75/10000	

差を少なからず含んでいると思われるが, 平均水位勾配の大小と沿岸流速の大小とがほぼ対応しており両者の相関が強いことはこのことから明らかである。

(3) 不規則波作用下の沿岸流は規則波作用下のものに比べて定常流成分が小さいのは, set up 自体およびその沿岸方向勾配が規則波作用下よりも小さいことが原因であることも明らかになった。砕波帯内の波高減衰は不規則波よりも規則波の方が著しく, 砕波エネルギーのうち沿岸流のエネルギーに変換される割合が不規則波の場合より大きいことを物語っている。これら機構特性の相違は, 3.2 で述べた不規則波作用下と規則波作用下の拡散に与える影響の相違と深い関連性を有している。

参考文献

- 1) 小森修蔵・田中寛好・和田 明: 砕波帯近傍における温排水の移流拡散に関する実験的検討, 電力中央研究所報告, 研究報告 377018, 72 p. 1978.
- 2) Inman, D. L., R. J. Tait and C. E. Nordstrom: Mixing in the surf zone, Jour. Geophys. Res., Vol. 76, pp. 3493~3514, 1971.
- 3) Harris, T. F. W., J. M. Jordaan, W. R. McMurray, C. J. Verwey and F. P. Anderson: Mixing in the surf zone, E. A. Pearson ed., Advances in Water Pollution Research, Pergamon Press, London, pp. 177~195, 1964.
- 4) Noda, E. K.: Wave-induced nearshore circulation, Jour. Geophys. Res., Vol. 79, pp. 4097~4106, 1974.
- 5) 橋本 宏・宇多高明: 海浜流の数値計算法とその応用, 第21回海講論文集, pp. 355~360, 1974.
- 6) 丸山康樹・鹿島遼一: 防波堤周囲の流れの実験と数値Simulation, 第25回海講論文集, pp. 470~474, 1978.

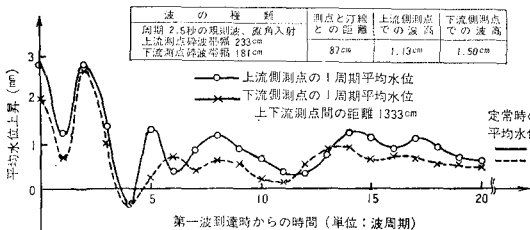


図-7 平均水位差の形成過程1例

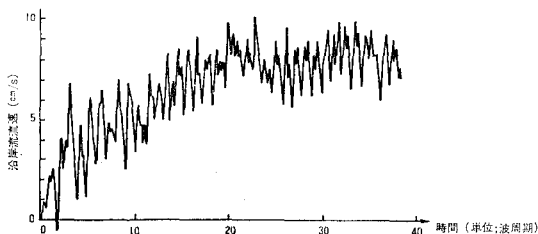


図-8 図-7と同時に記録の沿岸流形成過程