

## 白良浜の海浜過程とその保全 (2)

土屋 義人・河田 恵昭・Richard Silvester

### BEACH PROCESSES OF SHIRARAHAMA AND ITS PRESERVATION (2)

By *Yoshito* TSUCHIYA, *Yoshiaki* KAWATA and *Richard* SILVESTER

#### Synopsis

The objective of this paper is to verify the beach processes of Shirarahama by hydraulic model experiments and to clarify the applicability of the proposed beach erosion control work including beach nourishment. The experiments confirm that the nearshore currents off Yuzaki headland carry out the beach sediment from the Shirarahama beach to the offshore region, and therefore gradual beach erosion continuously occurs under high waves. This process partly depends on the geographical features of the northern part of Yuzaki headland which slightly protrudes seaward. The proposed T-type groin at Yuzaki and the artificial headland at Gongenzaki can control the waves and the currents inside the Kanayama bay and maintain a stable pocket beach after beach nourishment. With the headland defense control work, shorelines of two statically stable beaches intersect smoothly at the almost central part of the beach and form a continuous one.

#### 1. 緒 言

白良浜は白砂青松の美しいピケットビーチであり、浜に立てば太平洋を望む気宇壮大な景観を提供するばかりでなく、夏には遠浅の海水浴場として多くの人びとに利用されてきた。しかし、この浜の漂砂源である後背地が温泉郷として発展し、都市化するのに比例して、供給土砂が必然的に減少し、近年は皆無に近い状態になっている。浜の侵食がこの過程で徐々に進行してきたことは、疑いの余地のないところである。このような美しい自然の白良浜を保全し、この貴重な社会の財産をわれわれの子孫へ引き継ぐことはいまや義務といっても過言ではあるまい。

このため、一昨年度、白良浜の保全対策に必要な海浜過程について調査し、この浜の侵食原因とそのプロセスを明らかにして、長期的な視点から最も適切な保全対策の方法を検討する基礎資料を作成し、これに基づいて白良浜の保全工法を具体的に考察した<sup>1)</sup>。その結果、この浜の海浜変形の特性をかなり理解でき、とくにこの浜が比較的安定な浜であることが解明されたが、海浜流の数値シミュレーションにおいては、種々の原因のため精度においてなお検討すべき問題点を残した。白良浜はこのように本来、比較的安定な浜であり、その変形予測と保全対策はこの特性を十分反映したものでなければならぬだろう。

そこで、本研究では主として水理模型実験によって、この浜の海浜過程を検証するとともに、養浜計画を伴う対象とする保全工法の適用性を明らかにする。すなわち、とくに安定海浜の形成条件とその存在の確認、養浜砂の流失経路と砂止め溜堤の効果の解明、ヘッドランドや離岸堤あるいは突堤の配置と規模の決定に主眼を置いて検討する。

## 2. 白良浜の保全工法と養浜計画

### 2.1 保全工法の必要条件

すでに明らかにされているように、一般に災害として取り扱われている海岸侵食とは異なり、白良浜の海岸侵食は非常に緩慢なものである。しかも、近畿圏では残り少ない自然海浜であり、かつ非常に風光明媚である。これらの特徴をもつ白良浜の保全に際して、次のような必要となろう。(i) 白良浜のもつ眺望の美しさを海岸構造物が損わないこと。できれば、海岸構造物は海面下に隠れたほうがよい。(ii) 白良浜の白砂は量的に多くないので、一時的にせよ海岸構造物の施工によって沖へ流失があってはならない。(iii) ポケットビーチのため、海水交流があまり活発でないことから、養浜後の海水浴客の増加による水質悪化に対して、これをむしろ緩和する工法であること。すなわち、いたずらに湾内を静穏にすることだけではない。(iv) 冬期の北西の季節風によって飛砂が発生するので、とくに遮へい物のない湯崎側の養浜はこれを考慮して行わなければならない。(v) 自然海浜のすぐれた消波機能を生かした保全工法であること。および、(vi) 長期的な維持管理の観点から、maintenance free に近いものにすべきである。以上が必要条件であり、できるだけこれらを満足する保全工法を選定する必要がある。

### 2.2 対象とする保全工法

すでに、白良浜の保全工法に関して、種々の具体案<sup>1)</sup>が提案されている。各案の基本的な問題点は、つぎのように簡単にまとめることができよう。

まず、潜堤による方法は、構造物が見えないという長所はあるが、とくに周期の長い台風時のうねりに対しては、天端を海面近くまで取らねば消波機能はあまり期待できない。その場合、構造物の規模が大きくなって、工費が大きくなるとともに、潜堤の天端から沖に一度運ばれた砂は、再び岸側に戻ってこない可能性が大きい。つぎに、突堤による方法は、権現側に設置した場合は、景観上かつ海水交流上問題となろう。一方、湯崎側を用いる場合には、表のり勾配をできるだけ緩勾配にして反射波を防ぐ必要のあるほか、魚釣りに対する管理上のトラブルの発生を防止する工夫がある。つづいて、離岸堤は、景観上問題があるほか、背後の海域に回折波が侵入するので、泳ぎにくいという点が挙げられる。ただし、従来問題とされてきた不等沈下等については、岩礁がかなり利用できるのほとんど解決される。

一方、新しい工法として安定海浜工法が挙げられる。これはヘッドランドで波浪を制御し、養浜等で碎波角を変えて、沿岸漂砂量を任意にコントロールしようとする工法である<sup>2)</sup>。すでに、シンガポールで施工さ

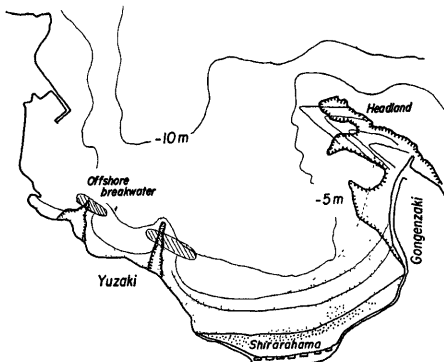


Fig. 1 Propose of headland defense work at Shirarahama beach

れ成功しているが<sup>3)</sup>、わが国では施工例がない。一番の疑問点は、白良浜のように、台風時と冬季節風時で約 $90^\circ$ も卓越波向が相違する場合、果して安定海浜に再帰性が有るかどうか、かつ最大湾入部では初期汀線より後退することもありうるので、これがごく自然のこととして地元の住民に容認されるか、ということである。これらの点については、水理模型実験によって適用性を明らかにすることや、本工法の特徴を十分に説明することによって、いずれも問題とならないであろう。

以上の諸点を踏まえ、対象とする保全工法として、著者ら<sup>1)</sup>の提案によって、Fig. 1に示すように、権現崎にヘッドランドを、

湯崎に波浪制御を兼ねた離岸堤を設置し、その間に養浜を施工して、これら三者を基本構成とする安定海浜工法が原案として提案された。ただし、湯崎側の海岸構造物によって、背後にトンボロを形成して白良浜に接続させる必要があるので、形式、位置、構造および規模は水理模型実験の結果から、最終案を決定することになる。基本案は、具体的につぎのような特長をもっている。

まず、湯崎側の離岸堤によって期待される効果はつぎのようである。すなわち、現在の白良浜南端から湯崎漁港までは、前面に消波ブロックを有する護岸構造の海岸線が凸状に鉛山湾に突出している。もちろん、この沿岸には砂浜は皆無であり、水深 5m 程度より浅い海域は岩礁になっている。すでに、鉛山湾の屈折特性で述べたように、この海域は SW, WSW 方向と NW 方向からの波浪が集中するところであり、当然のことながら、海岸構造物による波浪制御を行う必要がある。また、背後を養浜して海水浴場として利用に供する目的がある以上、経年的に養浜砂が流失しないことも必須条件である。しかも、台風期には周期の長い波浪が侵入してくるので、これを制御する能力を備える必要がある。これらのことから、海岸構造物としては、かなり剛なものと考えざるを得なくなる。これにはいわゆるヘッドランドとして突堤と離岸堤のいずれかが考えられるが、いずれも自然景観上問題がある。前者では、突堤先端の部分が丁度移動床部分と一致するので、これによる反射や局所洗掘の問題のほか、Z型あるいはT字型にしない限り、W~NW 方向からの波浪に対して制御機能があまり期待できそうにないといえる。一方、後者では、岩礁上に離岸堤を作ることになるので、不等沈下等の維持上の問題が解決されるほか、背後にトンボロが形成されて、養浜砂が流失しないことが期待される。ただし、離岸堤前面で反射波が発生すれば、浮遊砂が発生し、これが海浜流によって湯崎方向へ流失する危険性があるので、離岸堤の、とくに沖側の法面勾配を緩くする必要がある。

以上のことから離岸堤とT型突堤を考えることにし、その規模はできるだけ小さいものとするが、少くとも越波によってトンボロを形成する砂の流出がないように天端高を決定する必要がある。

一方、権現崎のヘッドランドによって期待される結果はつぎのようであろう。すなわち、権現崎付近は、飛砂が問題となる NW 方向からの季節風の速へい域に入っている。したがって、特別な飛砂対策を講ずる必要はないといえる。ここに養浜を施工した時、とくに NW 方向からの高波浪によって砂浜が侵食されることが一番問題となる。しかし、突堤や離岸堤で波の進入を完全に遮断すると、景観上の問題はもとより、夏期の低波浪時に背後域の水質が悪化し、海水浴に適さなくなる可能性がある。このように、相反する条件を満足させるためには、ある程度の波高をもつ波は通過させる構造のものが望ましく、かつ、白良浜からの眺望をさげらないことが肝要である。そこで、天端高を平均干潮位に一致させたヘッドランドを築造することを考える。このヘッドランドによって、養浜後、権現崎側に安定海浜が得られるように工夫する必要がある。構造としては、透過性でかつ沖側の法面を緩勾配にするとともに、先端部は移動床に連するので、局所洗掘が発生しないように、法面勾配がごく緩い円形マウンドのような形状にすべきであろう。

以上が基本構造であって、水理模型実験の結果を待つて、さらに細部の修正を行う必要があることはいうまでもない。

### 2.3 白良浜の養浜計画

Fig. 2 は権現崎のヘッドランドと湯崎の離岸堤によって作られる安定海浜の模式図を示したものである。この造成原理を鉛山湾の屈折図を用いて説明すると、つぎのようである。まず、権現崎には台風時と季節風時の高波浪が集中するが、波高・周期ともに大きい前者の波が卓越するとして、Silvester<sup>ら</sup>の成果を適用すれば、静的な安定海浜 A が造成されよう。一方、白良浜の湯崎側で

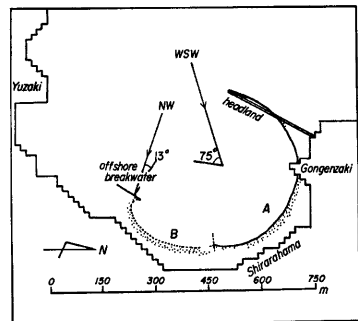


Fig. 2 Expected two statically stable beaches at Shirarahama beach by headland defense work

は、侵入可能ないずれの波向の波浪に対しても屈折後、ほぼよく似た方向から来襲することがわかっている。したがって、これらの波浪によって、離岸堤をヘッドランドとする静的な安定海浜Bの造成が同様に期待される。これら両者の汀線は白良浜中央部で滑らかに接続するであろうし、波向線が汀線にできるだけ直角に入射するようにするので、浜からの砂の流失はほぼ完全に防止できることが期待される。

### 3. 相似則と実験波

水理模型実験によって、海浜過程を明らかにしようとする場合、用いる模型で果して実際に現象を再現できるのかという問題が生ずる。その際、判定の基準として、現象を支配している相似則がどの程度満足されているかを示すことが重要であろう。しかし、漂砂現象における外力は、一般に風浪のような重力波を対象とするので Froude の相似則に支配されているが、漂砂の移動過程は摩擦過程であって、1つの Froude 数の表現である無次元掃流力のほかに、波動境界層を支配する Reynolds 数や浮遊砂が卓越すれば、密度流的な挙動も発生するので Richardson 数の影響も無視できなくなってくる。したがって、現時点では満足すべき力学条件を定式化することは困難であって、必然的に経験的な知識に頼らざるを得ないといえよう。ここでは、白良浜の海浜過程の水理模型実験に際して用いた相似則の取り扱いを示すとともに、実験波の選定方法について述べる。

#### 3.1 白良浜の水理模型実験の相似条件

すでに、海浜過程における外力となる波、海浜流と漂砂量および2次元海浜変形の相似則について幾つかの成果が示されている<sup>4),5),6)</sup>。それらの成果に基づいて本水理模型実験の相似条件は、つぎのように取り扱うことにする。

(i) 漂砂、海浜変形を対象とするこの模型実験では、それらは波の変形過程に依存していることは明らかである。したがって、鉛山湾に来襲する波の変形過程が十分模型海域で再現できるように、可能な限り広域を対象として模型を作ることにする。なお、SW から NW までの波向の変化に対して、鉛山湾で屈折特性が同一になるよう沖合の等深線は計算機を用いて修正することにする。

(ii) 波の条件に対しては、Froude の相似則を適用するので、設計波高が模型で極端に小さいと表面張力や粘性の影響を受けるだけでなく、現実的には、底質が動かないという事態に陥る。そこで一応  $1/100$  以下であることを条件として、(i)との関係で検討し、最終的に鉛直・水平縮尺  $1/64$  の無歪の模型とする。

(iii) 漂砂・海浜変形の相似則としては、土屋ら<sup>6)</sup>の成果を適用して、相似条件が満足される底質粒径を選定することにする。その結果、粒径の標準偏差が1に近い豊浦標準砂(中央粒径 $0.210\text{mm}$ 、比重 $\sigma/\rho=2.65$ )を用いることにした。現地の粒径が  $0.3\sim 0.5\text{mm}$  程度であるので、粒径を  $d$  とし、原型と模型の特性量の比を添字  $r$  で表わせば、 $d_r \approx 1.5\sim 2.5$  となり、土屋らが示した図から判断して、縮尺比は擬似相似と相似の境界付近に位置するので、相似条件をかなり満足することがわかる。ただし、沈降速度を  $w_0$  とし、代表長を  $L$  とすれば、漂砂の移動機構の相似則である  $w_{0r} = L_r^{1/2}$  については、右辺が8であるのに対し左辺が4程度であり、若干問題があるが、養浜砂を少し粗くすれば相似性はよくなると考えられる。

次に、海浜変形の相似則においては、実質的に底質特性にのみ歪みを与えたことに対応するので、その時間に対する相似則は必ずしも明確ではない。そこで、ここでは沿岸漂砂が波のエネルギーフラックスの関数とすれば、海浜変形の時間縮尺は実際上 Froude の相似則に従うので、ここではこの観点に立ち、かつ必ず Froude の相似則から得られる実験時間以上にわたって造波して、結果が危険側にならないようにする。

以上のように、本研究の移動床水理模型実験における模型の相似性が保たれていることを明らかにしたが、通常の方法として海浜変形が実験と現地で一致していることを確認する再現性の実験をまず行わねばならない。そこで、本研究においても次章で述べるように、権現崎の傾斜護岸による汀線の前進傾向と台風時の高波浪による白良浜北部への砂の移動の両者について、再現性の実験を行い、本実験の相似性が良好なことを

確認することにする。

### 3.2 実験波

すでに、鉛山湾に襲撃する波浪特性については詳しく検討してきた<sup>1)</sup>。すなわち、夏期から秋期の高波浪として、台風によるうねりや風浪が考えられ、これは SW ないし WSW 方向から侵入し、海底地形の影響をうけてかなり屈折し、W 方向寄りから鉛山湾に到達することがわかっている。一方、冬期季節風時には N ないし NNW の風によって波浪が発達し、やはり地形の影響をうけて鉛山湾口では NW ないし WNW の方向から侵入することが示された。そこで、実験で対象とする沖波波向は、つぎのものをを用いる。すなわち、台風時の場合、屈折特性から明らかのように SW 方向からの波浪は、WSW 方向からのものに比べて湯崎の岩礁地帯で大きく屈折し、結局、白良浜沖では波高が小さくなることがわかっているので、WSW 方向を代表波向とする。また、冬期季節風時については、NW および WNW 方向の波浪とも鉛山湾内で同様の屈折特性を有するが、前者の方が来襲頻度が多いことから、NW 方向を用いる。

つぎに、波高および周期はつぎのものをとりあげる。まず、台風期については、白良の南、約 17km の御坊地点で超音波波高計設置後、最大波が計測された台風8013号を対象とし、白良浜の海浜変形にとって最も危険な波浪を採用する。すなわち、実験の開始時には、相当沖波波高  $H_0=2.3\text{m}$ 、周期  $T_p=10.4\text{sec}$  とし、波高についてはさらに、4.48m および 6.40m を加えるとともに、周期も 12 sec を対象とする。つぎに、冬期季節風時については、京大防災研究所附属白良浜海象観測所の海洋観測塔で、過去に計測された最大波高  $H_0=2.3\text{m}$  および周期  $T_p=6\text{sec}$  の波浪を用いる。

## 4. 白良浜の海浜過程に関する水理模型実験

### 4.1 実験装置

本実験は、京大防災研究所附属宇治川水理実験所構内に設置されている扇形波浪平面水槽を用いて行った。この水槽の概要は Fig. 3 に示すように、直径 35m の半円形部と 35m×10m の長方形部から成り立っている。この半円形部には、水槽外壁上を自由に移動できる規則波発生用造波機が設置されており、任意の波向を持つ規則波を発生させることができる。造波機の長さは 12m で、それぞれ 4m ごとに 3 分割されており、波の位相を変えて発生させることも可能である。また、水槽の長方形部には、白良浜の1982年3月の海底地形および浜周辺の地図を基にした縮尺1/64の模型海浜が設けてある。さらに、造波機の両端から横

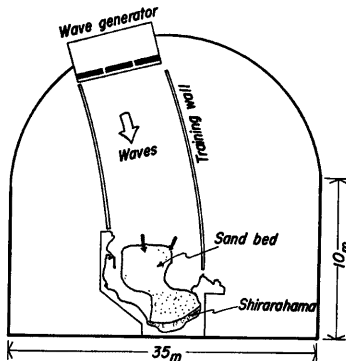


Fig. 3 Fan shaped basin and layout of experimental apparatuses

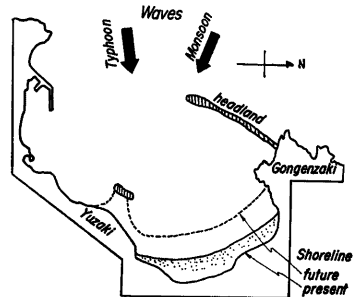


Fig. 4 Plane view of hydraulic model of Shirarahama beach

型海浜までは Fig. 3 に示すような消波機能を提供した導波板を設け、反射波の発生を防ぎながら所定の実験波が得られるように配置した。

模型海浜は Fig. 4 で示すように、水平および鉛直縮尺1/64の無歪の模型である。移動床の厚さは、現地水深 8m を境に岸側を 10cm、底質の動きが緩慢と思われる沖側を 5cm になるようにした。したがって、モルタル仕上げによる模型海浜は、それぞれの移動床厚に応じて凹部になるように製作した。さらに、模型海浜には、ヘッドランドや離岸堤を設置したが、それらはいずれも現地への適用性を考慮して、ほぼ1/64の寸法に近い消波ブロックと砂利で作ることとし、離岸堤の間隙には粒径 5~10mm 程度の砂利を埋めて不透過構造にした。なお、移動床として用いた実験砂は、中央粒径 0.210mm で、ほぼ均一な豊浦標準砂である。海浜断面測定には、超音波式砂面測定器と 1cm 間隔に目盛りを刻んだ真鍮棒を併用し、水深約 3cm を境に、それより沖を超音波式波測深器で、それより岸側と陸上部を真鍮棒で測定した。また、超音波式測深器の移動には、架台と台車を用い、隣接の実験棟からマイクロコンピュータによる制御を行い、正確に測点である格子点上を移動・停止するようにした。さらに、海浜流の流速測定には 2成分電磁流速計を使用し、台車に取りつけて測定した。波高分布の測定には、容量式波高計を 3台使って測定格子ごとの波高を測定した。

#### 4.2 実験方法と実験条件

本実験は、白良浜の海浜過程を明らかにし、養浜を伴う保全工法の適用性を検討するとともに、望ましい養浜計画を提案することが目的である。従って、まず、本模型実験の再現性を確認し、つづいて養浜に伴う各種工法の海浜変形に対する影響を調べ、望ましい安定海浜をいかにして施工するかについて考察する。さらに、鉛山湾中央部に設置した砂止め工の効果、湯崎側の突堤の法線形状の変更に伴う海浜変形や T型突堤にした場合の海浜流や海浜変形の特性について検討する。実験に際し、沖波波高の調節は、波の位相のずれや非定形波の発生に注意しながら造波機の振幅を変化させることにより行い、また、トレーサーによる海浜流況、汀線および着色トレーサーの移動状況の撮影は高さ 8m のアーチ型観測塔を利用して行った。

以下は、実験ケースごとの主目的を示し、本実験条件を Table 1 にまとめて示した。なお、高潮位 (T. P.+0.9m) 以外の実験条件は \*印で示し、その潮位を表末に示してある。

Table 1 Experimental conditions

Run No.	Wave direction	Wave height $H_0$	Wave period $T$	Duration time $t$	Run No.	Wave direction	Wave height $H_0$	Wave period $T$	Duration time $t$			
1	NW	3.6 cm	0.75sec	0hr	4	NW	3.6 cm	0.75sec	E	10.5	1.7	30min*
				1					F	7.9	1.5	45min*
				2					G	4.1	1.1	1hr*
				7					H	2.6	1.0	2hr30min*
				10								
20												
2	NW	1.8 cm	0.6 sec	3hr 15min*	1	NW	3.6 cm	0.75sec	3hr			
		2.3	0.75	45min*	2		〃	〃	〃			
		1.8	0.6	2hr 15min*	3		〃	〃	〃			
3	WSW	2.1 cm	1.5sec	1hr 15min*	4	〃	〃	〃	〃			
					5					〃	〃	〃
					6					〃	〃	42
					7					〃	1.3	40
A	3.6	1.3	1hr 15min*									
B	5.0	1.4	1hr*									
C	8.0	1.6	1hr*									

Table 1 (continued)

Run No.	Wave direction	Wave height $H$	Wave period $T$	Duration time $t$	Run No.	Wave direction	Wave height $H$	Wave period $T$	Duration time $t$		
5	NW	3.6cm	0.75sec	3hr 20					10hr		
6	1 A	NW	3.6cm	0.75sec	3hr 10 26	B	WSW	5.0	1.3	3 6 10	
						C	WSW	7.0	1.3	3 21	
	1 B	WSW	3.6	1.3	1 3 26	D	NW	3.6	0.75	3 6 10	
	2	〃	〃	〃	1 3 10	8-1	A	WSW	3.6cm	1.3sec	3 6 21
	3	〃	〃	〃	1 3 21		B	WSW	7.0	1.3	3 6 10
	4	〃	〃	〃	3 10		C	NW	3.6	0.75	3 6 23
	5	〃	〃	〃	18		8-2	A	WSW	3.6cm	1.3sec
	6	〃	〃	〃	1 15	B		WSW	7.0	1.3	3 6
	7-1	A	WSW	3.6cm	1.3sec	1hr 2 3 21 24 27 30		C	NW	3.6	0.75
							B	〃	5.0	〃	3 6 10 12 14
C		〃	7.0	〃	3 6 10	B					
D		NW	3.6	0.75	3 6 16	C	WSW	10.0	1.3	3 6 9	
D	NW	3.6	0.75	3 6 23	D	NW	3.6	0.75	3 6 23		
7-2	A	WSW	3.6cm	1.3sec	3hr 6	9	1	NW	3.6cm	0.75sec	3hr 23

Table 1 (continued)

Run No.	Wave direction	Wave height $H$	Wave period $T$	Duration time $t$	Run No.	Wave direction	Wave height $H_0$	Wave period $T$	Duration time $t$		
2	NW	3.6 cm	0.75sec	3hr 13	13	1	WSW	7.0cm	1.5sec	5hr**	
	3	NW	3.6	0.75		2				5	
						3	NW	3.6	0.75	12	
	4	WSW	7.0	1.75		1hr 6hr 20min	4				5
5							WSW	7.0	1.5	5	
10	1	WSW	7.0 cm	1.75sec		5hr 19	6				5
							7	NW	3.6	0.75	12
11	A	WSW	7.0 cm	1.5 sec		5hr	8	WSW	7.0	1.53	0
	B			5							
12	A	WSW	7.0 cm	1.5 sec	10hr	14	SW	7.0 cm	1.4sec	14hr 30	
	B			4	15	SW	7.0	1.4	7hr 30min** 30hr		
	C			5							

\*: M. S. L. (T. P.+0m)

\*\*: L. W. L. (T. P.-0.9m)

1) Run 1: 権現崎の傾斜護岸の効果と模型の再現性, 2) Run 2: 模型の再現性, 3) Run 3: 台風時の危険波浪の選定と再現性, 4) Run 4: ヘッドランド延長の海浜変形に及ぼす影響, 5) Run 5: ヘッドランドと離岸堤の海浜変形に及ぼす影響, 6) Run 6: 離岸堤の規模と位置, 7) Run 7: 養浜を伴う安定海浜の造成, 8) Run 8: 保全工法の施工順序, 9) Run 9: 湯崎ヘッドランドの効果, 10) Run 10: 砂止め潜堤の効果, 11) Run 11: 突堤の法線形状の変化の影響, 12) Run 12: T型突堤にした場合の海浜変形, 13) Run 13: 最終保全案による海浜変形, 14) Run 14: 波向 SW の場合の海浜変形および 15) Run 15: 海底地形を修正した場合の海浜変形である。なお, 本水理実験における造波機の実稼働時間は約 800 hr であり, 各実験ケースにおける波諸元や潮位等の実験条件の変化は約50にも及んでいる。したがって, 紙数の都合上各実験ケースごとの詳細な結果については別の報告<sup>7)</sup>に譲ることにして, ここでは再現性の確認された水理模型による実験結果の考察をすすめることにする。

#### 4.3 実験結果の考察

##### (1) 汀線変動と波高変化

##### (a) 現況の海浜における汀線変動

現況の白良浜に台風時および冬期季節風時の波浪が来襲したときの汀線の定性的な傾向を **Figs. 5** および **6** を用いて説明する。冬期季節風時の波が来襲した場合には, (a)のように汀線の著しい変動はないものの, 白良浜の南端では, 現地換算で 20 m 近い汀線の後退が観測された。また, 台風時の波が来襲したときには, (b)および(c)のように激しく汀線が変動し, とくに湯崎側汀線の後退および権現崎側汀線の前進が顕著である。さらに, 冬期季節風時には, ほとんど変動しなかった白良浜中央部の汀線が, 沖波最大波高を示す実験条件 E ( $H_p=10.5m$ ,  $T_p=13.6$  sec, 添字  $p$  は現地を表わす) のあと後退から前進に変化している。この結果は白良浜の浜幅の季節変化と定性的に一致することがわかる。**Fig. 6** は平均的な汀線変化量を示したものである。実験条件によって変化量に違いはあるけれども, 時間の経過とともに, 汀線変化は平衡に近い状態に達しており, とりわけ, 冬期季節風時の約3ヶ月間の波浪を再現した Run 2 と台風時の波浪の発達から減衰



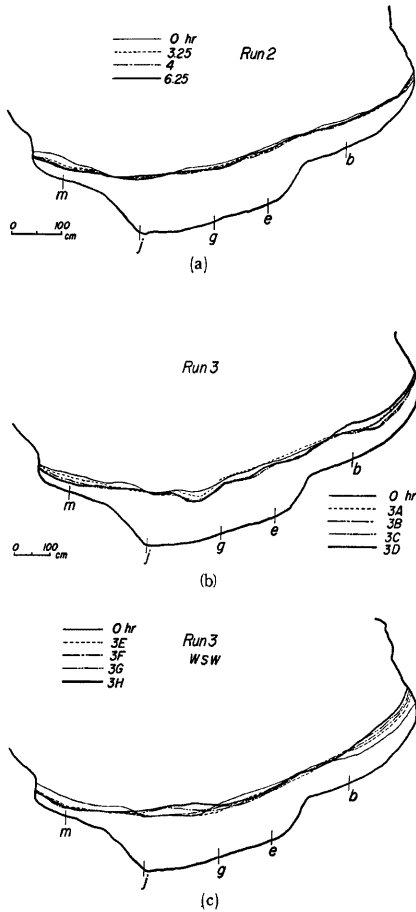


Fig. 5 Changes of shorelines with time

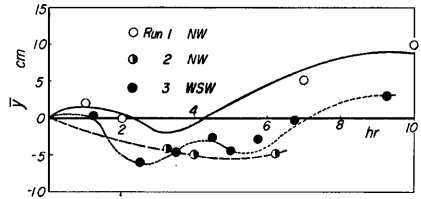


Fig. 6 Mean rate of shoreline changes without any defense work

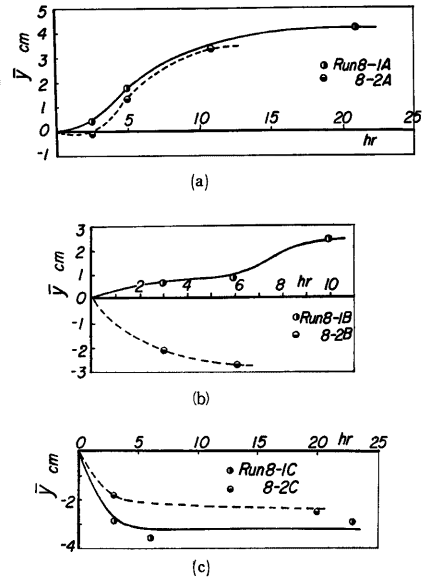


Fig. 7 Mean rate of shoreline changes in Run 8

を再現した Run 3 では、経時的に変化する汀線が初期の汀線的位置に戻ろうとする再帰性が見出せる。

(b) 現況の海浜に離岸堤とヘッドランドを設置した場合の汀線変動

離岸堤の設置による効果は、入射波の軽減と回折波によるトンボロの形成という波浪制御と漂砂制御に現れるが、現況の白良浜に、この工法を適用した場合には、湯崎側の汀線後退が鈍化する傾向が現れた。ヘッドランドの設置および延長による効果は、権現側から浜中央部、さらに、湯崎に近い海浜の汀線後退を軽減することであるが、波向の違いによって、当然その効果は変化した。

Fig. 7 は、実験ケース Runs 8-1 と 8-2 における白良浜全域の平均的な汀線変化を比較したものである。海岸構造物の設置は、Run 8-1 が離岸堤のみ、Run 8-2 が離岸堤と権現崎のヘッドランドを併設する形とした。波向が台風時の場合には、ヘッドランドの効果はあまり現れず、(b)のように波高が 5cm から 7cm へ

増加すると汀線の後退が進行した。この原因は、最初に離岸堤のみで行った海浜地形が大きく変形したために、ヘッドランドの併設によって、これが元に戻る方向に作用したのではないと思われる。一方、波向が冬期季節風時の場合には、ヘッドランドは、とくに湯崎付近の汀線の後退を阻止する効果を発揮していることがわかる。また、離岸堤の効果については比較できる台風時のデータが不足しているので詳しく検討はできないが、Run 2の平均汀線変化と比べて、その変動量と時間的変化の差違から、離岸堤が湯崎付近の汀線後退の防止にかなり役立っているものと思われる。

(c) 養浜に伴う汀線変動

ここでは、養浜を行って、安定海浜を得た Run 7-1 と Runs 9-3 および 9-4 の結果に基づいて考察を行う。Fig. 8 は、(a) 湯崎側の離岸堤をヘッドランドの機能をもつものとして造成された安定海浜と(b) 離岸堤の一端を護岸に接続して突堤とする安定海浜を示したものである。両工法の相違点は、(a)がどちらかといえば波浪制御を目的としたものであるのに対し、(b)は、海浜流の変化と漂砂制御を主眼としたことである。従って、(a)の養浜では、回折効果によって入射波浪の波向や波高の変化をもたらし、離岸堤背後の漂砂の動態が変化し、汀線の前進・後退を引き起こすが、(b)の養浜では、湯崎側への入射波浪をほとんどこのヘッドランドで阻止して、片トンボロの発達を期待し、さらに時計回りの海浜流セルが発達して汀線の著しい前進を促す可能性をもつといえる。Fig. 9 は、白良浜の権現崎側と中央部および湯崎側における汀線変動をそれ

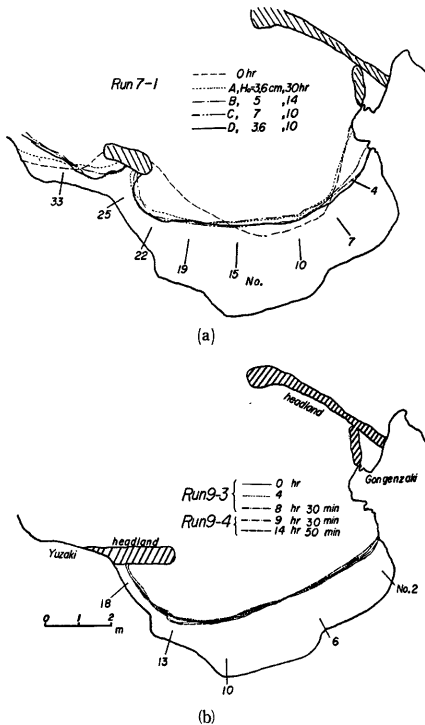


Fig. 8 Changes of shorelines after beach nourishment

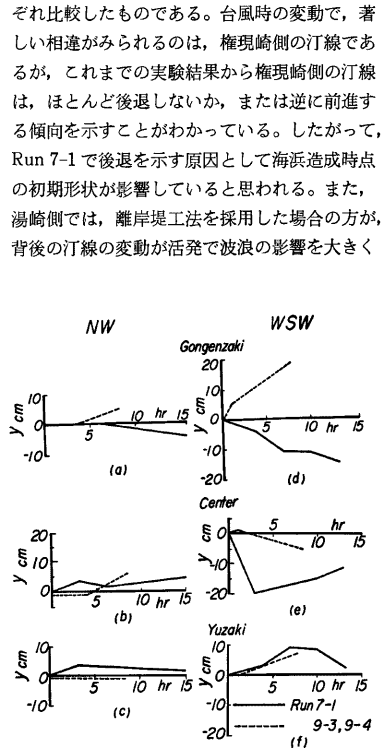


Fig. 9 Rate of shoreline changes at typical points

受けているので、必ずしも離岸堤によって波浪制御を行うまでには至っていないと推察される。

(d) 砕波帯の変化と汀線変動

漂砂移動を論じる上で、最も重要なことの1つは、海浜流の流況を知り、それが発生する原因を究明することであろう。ここでは、最も基本的な砕波帯と汀線後退の関係を明らかにして、のちに述べる海浜流と漂砂の関係の考察に資するものである。Fig. 10 は、現況海浜と養浜を実施した海浜について台風時の砕波点の移動を示したもので、同時に汀線形状も示してある。来襲波浪の波高が増大すると浅水変形をうけて波高が増加し、波形勾配が大きくなり、砕波しやすくなるので砕波点は当然沖へ移動する。砕波によって波のもつエネルギーが一度に放出され、その一部は再生波の形成に、また沿岸流の発生に寄与する。(a)の湯崎沖では護岸からの反射波の影響もあって、その傾向が強く現れている。また、沿岸流流速の距離的变化が大きくなれば、それだけ汀線付近の砂も移動することになり、その結果、汀線の後退を引き起こすことになる。その現象は、(a)、(b)ともに砕波点が沖方向へ離れ、沿岸方向に増加する領域にみられる。さらに、波が直接そ上するような領域や漂砂の移動によって岸近くに深掘れを生じ、海浜勾配が急になった領域では、沿岸方向の水位変化が発生し、これに伴って局所的に離岸流が発生すると考えられる。このような状況下では、その付近の汀線の後退が一層進行することになる。

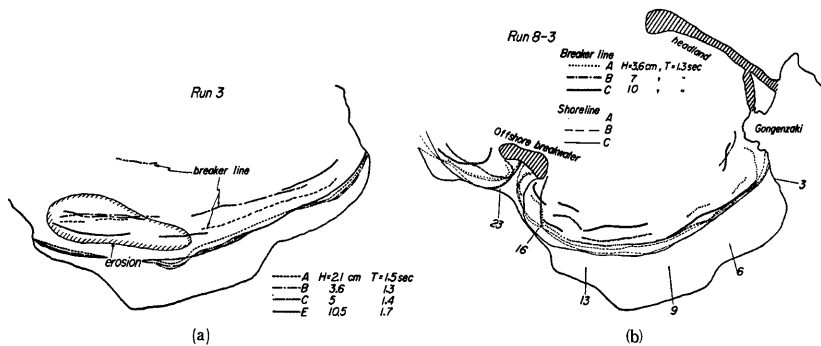


Fig. 10 Displacement of breaker line in Runs 3 and 8

以上の説明では、単に砕波点の沖方向の距離の変化によって汀線後退を論じたが、汀線付近の侵食状態や海浜流などの関係をふまえて、後節ではさらに詳しく検討することにした。

(e) 権現崎に設置したヘッドランドの長さが変化した場合に生じる汀線変動と波高変化

ここでは、Run 4の実験結果をもとに、権現崎のヘッドランドが海浜変形に及ぼす影響について検討する。なお、波向は冬期季節風時のNWである。まず、ヘッドランドの設置に伴う波高の変化を検討するに当たって、Fig. 11の計測点で得られた波高の測定結果から、つぎのことがわかる。(i) 測点 $\alpha$ の波高変化をみると、ヘッドランドの長さが増加するとともに、構造物からの反射波が発生し、次第に波高が大きくなる。(ii) 測点 $\beta$ の波高変化は、 $\alpha$ の変化とは反対に、ヘッドランドの長さが増加するにつれて減少する。これは、ヘッドランドによって来襲波浪の侵入が制御されるためであり、ヘッドランド背後には砕波に伴う質量補給があり、この結果水位が上昇して、ごく微小な流れが発生していると観察された。(iii) 測点 $\gamma$ の波高は、構造物を設置した時点から、急激に増加し、ヘッドランドの長さには、ほとんど影響を受けずに一定に近い値を示す。このことは、ヘッドランドの設置によって岩礁での反射率が高くなり、入射波がかなり反射していることを示しており、沖合への漂砂流失の危険性ははらんでいるといえる。(iv) 測点 $\delta$ の波高変化について検討すると、ヘッドランドが長くなるにつれて、一般的に波高が大きくなる傾向を示している。これは、ヘッドランドの構造が、一種の防波堤の役割を果していることから、その回折波の影響が出ているのではない

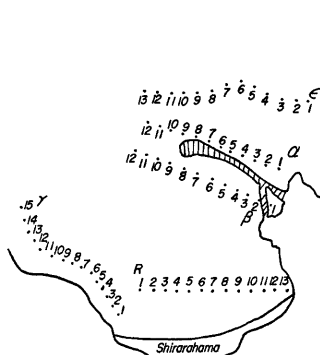


Fig. 11 Measuring points of wave height

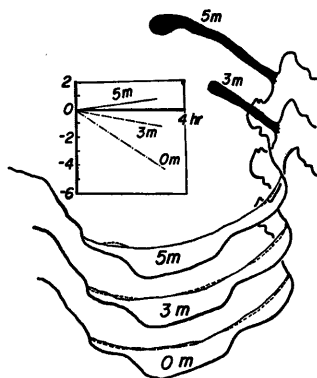


Fig. 12 Changes of shoreline accompanied with extension of headland at Gongenzaki

かと思われる。(v) 測点Rではほとんど計測点で波高の減衰がおり、ヘッドランドの効果が現れていると思われるが、計測点1,2,3で一時、波高の増加がみられるのは、前述した回折波の影響が出ているためと考えられよう。なお、 $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  および  $\epsilon$  の測線上において、波高分布が波状を呈する原因としては、屈折による波の集中や回折、反射波が重複していることによると思われる。

さて、次にヘッドランドの長さの変化による汀線変動と汀線付近の漂砂の動態について検討を加えよう。Fig. 12 は、汀線の変化を示したものであるが、ヘッドランドが長くなるにつれて、白良浜の汀線変動が小さくなり、全体的に汀線の前進を促す効果があることがわかる。さらに、湯崎側汀線の前進を引き起こすことも示されており、このヘッドランド工法が、白良浜の保全に有効な工法であることを実証しているといえる。

以上で述べた項目は、すべて、波向がNWの冬期季節風時の波浪に対してのものであるが、台風時の高波浪に対しては、砕波点がさらに沖方向に移動し、ヘッドランド背後の権現崎側の海域へは、やはり回折波しか侵入してこないで、NWと同様の結果が得られたことを追記する。

#### (f) 波高変化

ここでは、ヘッドランドの設置・延長や養浜に伴う沿岸方向の波高の変化を調べ、それぞれの工法が海浜変形に及ぼす影響を考察する。Fig. 13 は、離岸堤設置後 (Run 8-1 A) と権現崎ヘッドランド設置後 (Run 8-2A) および養浜完了後 (Run 8-3A) のそれぞれにおける測点  $\beta$  における波高変化を比較したものである。これから、ヘッドランドを設置しても、ほとんど波高は変化せず、全く消波機能が消滅しているかのようにみえる。しかし実際には、入射波がヘッドランド前面から先端にかけて砕波し、波高は減少しているが、ヘッドランド先端から回り込んできた回折波が重なるため、結果的に変化していないようにみえるのであろう。したがって、回折の影響が小さくなる岸近くでは、当然、波高は小さくなり、実際それが観測されている。また、養浜後の波高変化は、局所的な屈折特性の変化のほか、前浜における反射率が微妙に変化したことによるものであろう。

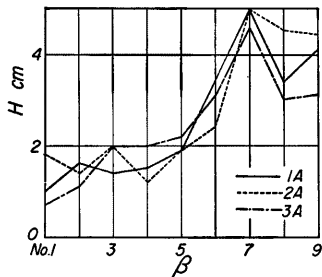


Fig. 13 Variation of wave height before and after construction of headland

Figs. 14 は、波向を変えた場合の波高変化を示したものと

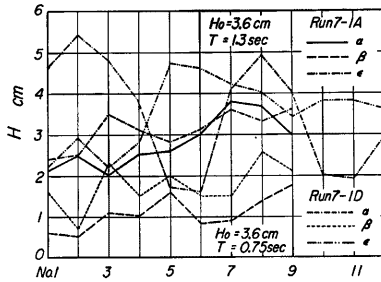


Fig. 14 Variation of wave height at measuring points in typhoon and in monsoon

である。入射波高は NW および WSW の波向とも等しいため、ヘッドランド前面の測点  $\alpha$  では、ほとんど波高の変化はみられないが、背後の測点  $\beta$  では、周期の長い波がよく回折するという特徴から、台風時の波高が大きくなっていることがわかる。また、測点  $\epsilon$  の波高変化が、全く逆転した位相で現れているのは、周期や波向の変化によって斜め重複波の位相が変わったためであると思われる。すなわち、波高分布における最大波高の発生位置と最低のそれとの差が、どちらも同じくらいであることや前節の測点  $\epsilon$  の波高分布において、ヘッドランドの長さが 0m のときの位相がヘッドランド設置後全く逆転することから、このような原因を推定できる。

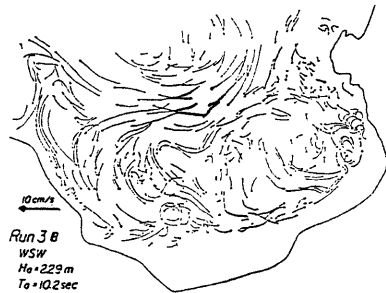
(2) 波浪・海浜流と海浜変形

本節では、海浜流、波高および保全工の設置条件の変化に伴う白良浜の海浜変形の特徴を検討し、白良浜からの浜砂の流失機構について考察する。

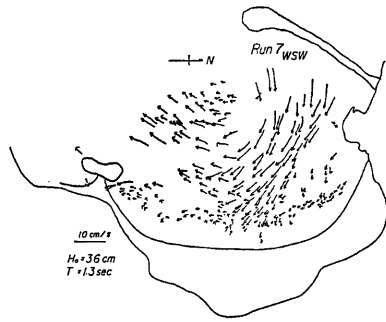
(a) 海浜流の流況

海浜流の測定は、蛍光塗料を塗った  $2 \times 2$  cm の厚手の紙片をトレーサーとし、ブラックライト点灯下の夜間に波浪条件に応じて 5~15 sec のシャッター開放による写真撮影をすることによって行った。Figs. 15 および 16 に台風時および冬期季節風時の海浜流の流況図をそれぞれ示した。Fig. 15 から次のような流況特性を見出すことができる。

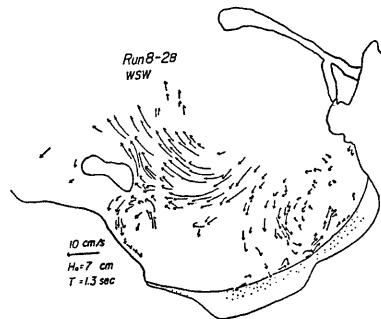
(i) 保全工法を施していない(a)をみると、権現沖から湯崎沖へ時計回りに流速の大きな流れが生じており、湯崎沖から、その流れは二つに分れて、一方は、さらに沖方向へ流出し、他の一方は護岸沿いに反時計回りのセルを形成し、浜の中央部から離岸流を発生させている。しかしながら、権現崎の浅瀬の背後では、波形勾配の違いによって全く異なった流れを示している。すなわち、波形勾配が小さいときには、時計回りのセルが発生し、逆に大きいときには、反時計回りの



(a)



(b)



(c)

Fig. 15 Flow patterns of nearshore currents analyzed by fluorescent tracer in typhoon

セルが生じている。

(ii) (b)に示した保全工法完了時の流れをみると、権現崎ヘッドランドの背後には時計回りのセルが形成されており、その一部は、離岸堤沿いに沖へ流出する流れまたは離岸堤を巻き込むような流れへと接続している。また、離岸堤背後では、護岸沿いに権現崎へ向かう流れが生じ、浜の南端付近から発生する離岸流によって沖へ流出している。さらに、浜の北側の汀線近くに反時計回りのセルが形成されているが、波形勾配の大きな波が来襲した場合に、そのセルの半径が大きくなる傾向を示している。

(iii) (c)にみられるような養浜工を施工したときの流況から、(b)と顕著に異なる流れをあげるとすれば、権現崎背後より浜の中央部へ向かう流れと中央付近で反時計回りに発生する流れであろう。後者の流れは、保全工法を施工しない現況の海浜でみられたものである。また、離岸堤背後にも反時計回りのセルが観測されており、トンボロの発生を促す流向とは逆の流れであるため、底質の流失が懸念される。

一方、Fig. 16 に示した季節風時の波浪を対象とした流況図においては、次のような特性が見出せる。

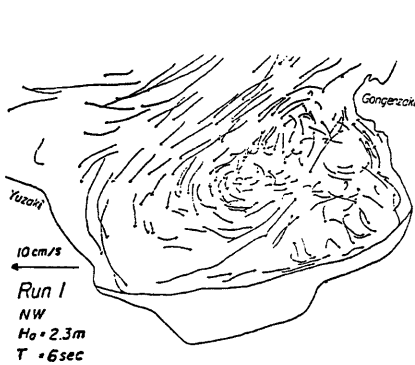


Fig. 16 Flow patterns of nearshore currents analyzed by fluorescent tracer in monsoon

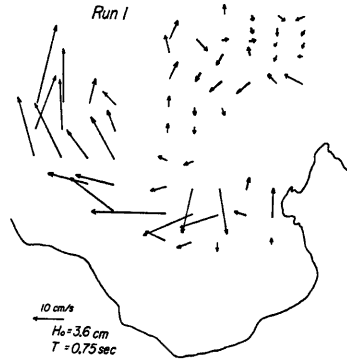


Fig. 17 Mean current vectors measured by electro-magnetic current meter

(iv) 湯崎沖の流れは台風時のそれと類似しており、沖へ向かう流れと岸へ向かう流れに分れ、後者は、さらに湯崎の護岸沿いに北上する流れとなり、浜の中央部付近から離岸流として沖へ出ている。また、権現崎の背後では、反時計回りの流れが生じており、台風時の(b)の流れと似ている。しかし、浜の沖合に発生した反時計回りのセルは、台風時には見られず、汀線付近から発生した離岸流と合流して複雑な流況を呈している。

これらはすべて、トレーサーによる海浜流の表面流況の特性であるが、Runs 1 および 2 では、海底地形の測定と並行して電磁流速計による流速の計測を行っており、その結果の 1 例が Fig. 17 である。電磁流速計のプローブの長さが約 3 cm あり、浅海域での計測が困難であったため、白良浜の汀線付近の測定結果がないけれども、沖の流速ベクトルの方向が、さきに述べた海浜流の向きとよく一致していることがわかる。しかし、権現崎の岩礁の南端付近では、かなり強い離岸流が発生している点は、トレーサーによる海浜流のパターンと相違している。この原因としては、電磁流速計のセンサーを水深中央部付近に設置したために、表面の流れと異なった流れが観測されたことによると思われる。すなわち、鉛山湾の入口にあたる中央部では、表面で岸向きの、水深の中央部から底面寄りでは沖向きの流れが発生していることを示しているよう。

#### (b) 海浜流と海浜変形の関係

(a)で示した海浜流の特性に基づいて底質の移動や汀線の変動機構をまとめると、つぎのようになる。(i) 汀線付近で流れが集中してくるころでは、砂が堆積する傾向を示す。逆に、汀線付近の海浜流セルで、離岸流が存在するところは侵食されている。(ii) 2つの流れが衝突し、結果的に流れの向きを変えるところで

は、砂は堆積する。(iii) とくに台風時には、湯崎沖から出ていく離岸流の影響で、沖合の底質が移動し、波高の大きなうねりが来襲すると、前浜の前面から侵食された底質が湯崎沖に大量に堆積する。(iv) 海浜流の流速が大きいところでは、砂の移動量が多く、海底地形の著しい起伏を生じやすい。(v) 汀線付近で海浜流セルが発達しているところでは、砂のセル外への移動が少なく、このセルに向かう流れに輸送されてきた砂

が、このセルと衝突する付近で堆積するため、汀線は前進あるいは全く変動しない状態となる。(vi) 離岸流が発生しているところや強い沿岸流が存在するところでは、汀線は後退するおよび(vii) 権現崎の背後の反時計セルにより汀線は前進する傾向にある。

(c) 波高および波向と海浜変形の関係

**Figs. 18** および **19** にそれぞれ波高分布および波向線変化を示す。これらの海浜変形の特性との関係を考察すると、つぎのようにまとめることができる。(i) 沖合で波高の高い所では、一般に侵食が激しく、等高線の勾配が急なところも侵食は著しくなっている。(ii) 沿岸方向に波高の分布がみられると、その方向に海底地形の不規則な起伏を生じやすい。(iii) 岸沖方向に波高分布が小さい所では、底質の侵食が起こりやすく、また、比較的波高の高い分布が広が

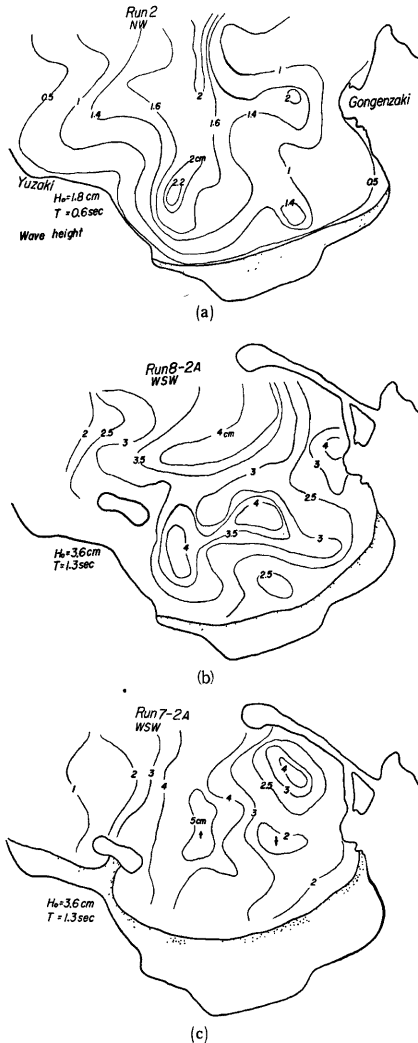


Fig. 18 Spatial distribution of wave height in Kanayama bay

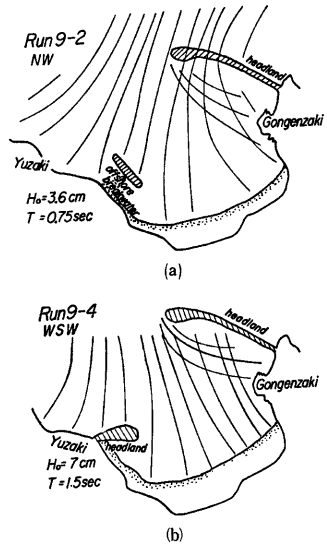


Fig. 19 Changes of wave direction in monsoon and in typhoon

っている海域では、侵食域が広範囲に広がっていることが多い。(iv) 沿岸方向に波高のバラつきが少ない所は堆積域になりやすい。(v) 白良浜に到達する波向線が汀線に対して傾いているため、波高の大きい波が碎波すると強い沿岸流が発生する。したがって、波高の大きい波が来襲した場合、沿岸流の発生・発達する地点では侵食がすすみ、その下手では、それらの漂砂が堆積するため、それに伴って汀線の後退と前進が生ずる。現に、波高の大きい地点から近い汀線の左右では、汀線の前進・後退が観測される。

(d) 海浜流の特性

これまで、種々の海浜変形に関する数値シミュレーション結果<sup>8)・12)</sup>があるが、水理模型実験との詳細な比較から、その妥当性を明らかにしようとしたものは極めて少ないといえる。そこで、ここではすでに前報<sup>11)</sup>で報告した海浜流の数値モデルを用いて、冬期季節風時および台風時の代表的な波浪による鉛山湾の海浜流の流況特性を示し、実験結果との比較から、適用性を検討するとともに、白良浜の浜砂流失の過程を確認する。

1) 波浪の屈折特性：Fig. 20 は鉛山湾における本実験に用いた代表波浪の屈折図である。まず、図(a)に示した季節風時の NW 方向からの波浪の場合には、白良浜に侵入する波向線間隔が急激に広がって屈折による波高の減少が推察される。また、白良浜の汀線付近では、波向は汀線にほとんど直角となっていることが見出される。そして、権現崎に囲まれた白良浜の北端には波浪が侵入し難い傾向になっているが、これに対して南端の現在消波護岸ができていない範囲には直接波浪が侵入することがわかる。そして、権現崎では侵入波が碎波し、ヘッドランドとしての機能を十分果している。また、湯崎も同様な傾向を見出すことができるが、ここでは、直接波浪が湯崎のヘッドランドに衝突し、白良浜への波浪の進路を変えているようにさえみえる。これらの傾向は、台風時の波浪を示した図(b)の場合と比較しても、驚くほど類似しており、周期の相違する屈折図とは思えないほどである。すなわち、白良浜は季節風および台風時の波浪に対しては、波浪の屈折特性が同じになるように、鉛山湾沖の四双島付近の海底地形と権現崎および湯崎の2つのヘッドランドによって自然に波浪を制御するように配置されているものといつてよいであろう。このことが大局的に考えた白良浜の存在理由でもあり、また、その安定性を支配しているように考えられる。

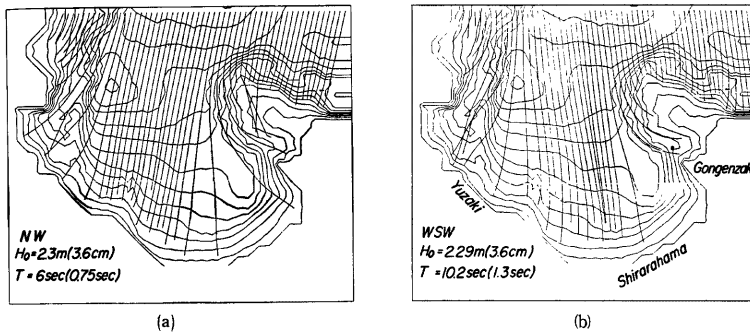


Fig. 20 Typical examples of wave refraction diagram in Kanayama bay

2) 波浪ベクトル：Fig. 21 (a)および(b)はそれぞれ周期 6 sec および 10.2 sec で沖波波高 2.3 m の場合の波浪ベクトル図を示す。これらの図のうち、権現崎による遮へい領域では、波向線間隔が広くなるので内挿してあり、当然回折効果や浅瀬を通過する波の影響は考慮していない。

波浪の屈折特性においても述べたように、波向による大きな変化は存在せず、鉛山湾内の波浪ベクトル分布、とくに白良浜へ侵入する波浪ベクトルが大局的には波向にあまり依存しないという特殊性を再び知ることができる。同時に、これらの場合には、いずれも白良浜の南端から湯崎に向けて消波護岸が施行されてい



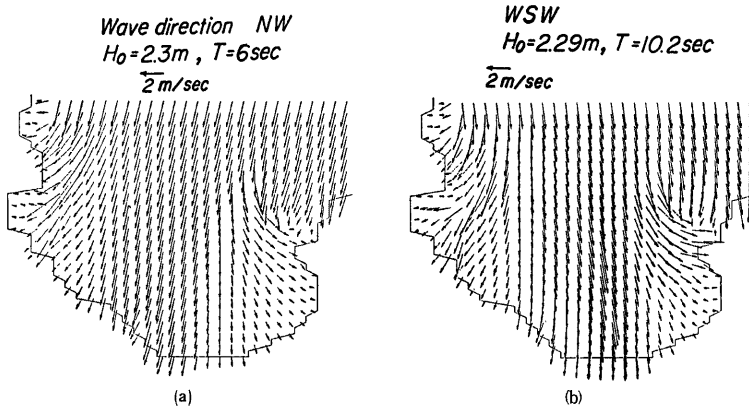


Fig. 21 Wave vectors in Kanayama bay in stormy conditions

る区間にかなり波浪が集中することがよく理解される。一方、周期 10.2 sec の場合には、つぎのように考察される。まず、波浪ベクトルの分布が前述した周期 6 sec の場合と同様な傾向を示している。すなわち、権現崎および湯崎に波浪が集中し、また白良浜の南端の消波護岸の設置個所にも集中する傾向を示すが、白良浜に侵入する波浪はほとんど類似した経路をとり、汀線にはほぼ垂直に侵入しようになっている。ただし、細部においては、鉛山湾内でかなりの波浪ベクトルの変動があることも確認しなければならない。これらの計算結果と対応するものとしてすでに Fig. 19 に Fig. 21 と同一の波の条件による実験結果を示している。ただし、実験では権現崎には天端を L. W. L. に一致させたヘッドランドが 4.4m (現地換算値: 280m) 延長されているが、これによる背後の回折域での波の特性が、ヘッドランドのない場合と若干異なることに注意する必要がある。計算結果と比較すれば、つぎのことがわかる。まず、波向が NW 方向の場合、全体のパターンがかかなりよく一致していることが見出せる。とくに、湯崎側の護岸前面や白良浜中央部での波向線のパターンは非常に一致を示している。一方、WSW 方向の場合、権現崎の回折領域を除いて、やはり両者のパターンが類似しているといえる。

3) 波高分布: Fig. 22 は、波向が NW と WSW の場合の等波高線図であって、曲線は計算値については波高 20cm ごとに、実験値については 5mm (現地換算値: 32cm) ごとに描いてある。まず、NW 方向からの場合、湯崎沖の波高の極大値の出現や鉛山湾全域の等波高線のパターンが両者で一致していることが見出される。つぎに、WSW 方向からの場合、計算では白良浜中央部の沖に波高の極大値があり、実験ではそれ程顕著な傾向を示していないが、そのパターンはある程度似ているといえる。計算値にこのような波高の凹凸が発生するのは、1 つには波のエネルギーフラックスが波向線間で保存すると仮定して計算しているからであって、実際には波の進行方向と直角方向へのエネルギーの逸散があり、波高が低下することが期待される。なお、湯崎漁港付近では、計算結果の波高は集中しているが、実験では造波板長が 12m と制約されており、導波板の境がこの付近に一致していることもあって、両者の比較は困難である。

以上のことから、今回示した波向線法によって、模型海浜で測定された波浪の特性がよく再現されていることが確認できる。

4) 海浜流の特性: すでに、鉛山湾の海浜流の特性として、定常かつ線形の場合の計算を SOR 法 (successive over-relaxation 法) で得られた結果を前報<sup>1)</sup> で示した。この計算では、海底摩擦係数とこれによる項の表示や水平拡散係数の値などに問題があるほか、回折の効果を含んでいないので改良の余地があるといえる。ただし、いずれにしても鉛山湾のような海底地形の凹凸が激しいところでは、これによって海浜流の

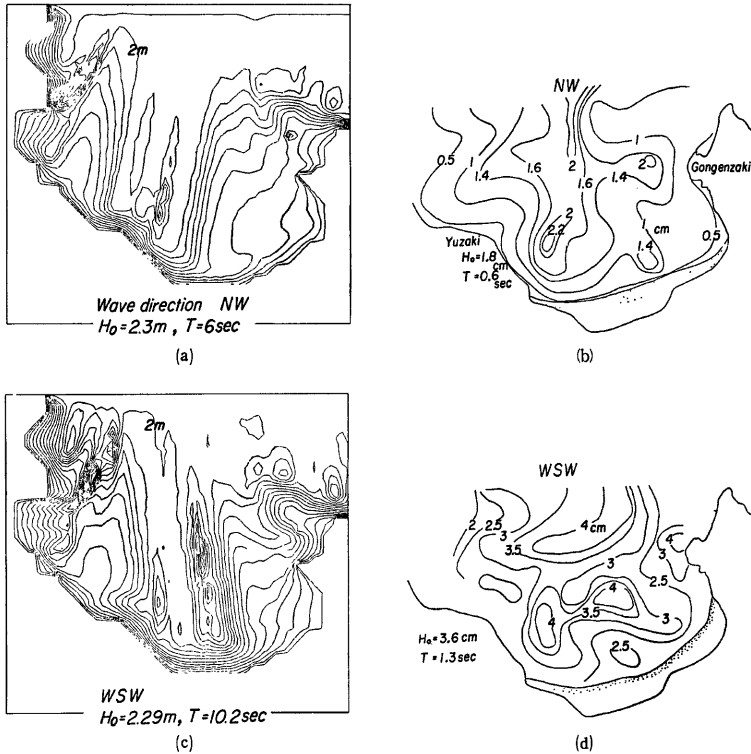


Fig. 22 Comparison between spatial distribution of wave height in experiment and in numerical calculation

流況がかなり規定されると考えられるので、ここでは同様の方法で計算することにする。

Fig. 23 は同一の波浪条件に基づく、海浜流の計算値と実験値との比較をしたものであり、つぎのことがわかる。まず、NW 方向からの波浪の場合については、白良浜沖合の全般的な海浜流の流況特性は、数値計算および水理模型実験結果のいずれについても同様のパターンをもっているといえる。しかしながら、権現崎の浅瀬の先端の SE 方向に向う流れについては、前者の方が若干沖に分布しているようである。また、湯崎沖では、水理模型実験において、セルは観測されず S 方向に向っているが、計算では微弱なセルが存在している。電磁流速計による海浜流の流況とトレーサー法によるその表面流流況とを比較すると、とくに権現崎の浅瀬先端付近と湯崎沖で顕著な相違がみられる。すなわち、前者については表面流が SE 方向に向かうのに対し、水深中央付近ではむしろ、W 方向に向かう流れが生じている。

つぎに、WSW 方向からの波浪の場合については、湯崎沖で SW 方向に向かう海浜流が数値計算および水理模型実験のいずれについても見出せるが、白良浜の南端付近では、前者がその沖側と流向が変わらないのに対し、後者には北上する流れが観察されている。このような流況特性は離岸堤がある場合でも、ほとんど変化していないことが、水理実験結果から明らかになっている。

以上のことから、数値計算と水理模型実験の結果において、相違した部分もみられたが、白良浜の浜砂の

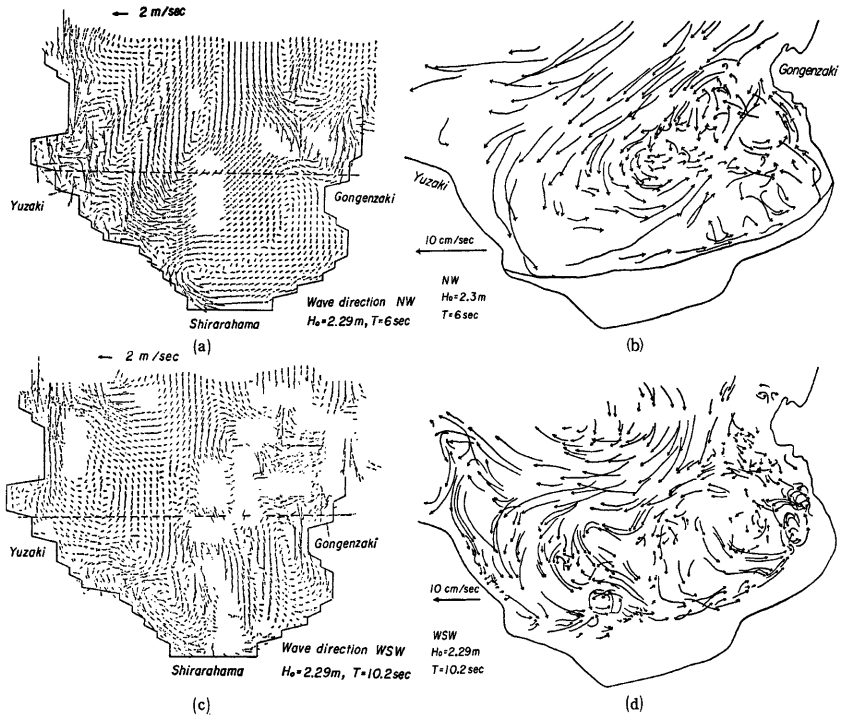


Fig. 23 Comparison between nearshore currents in experiment and in numerical calculation

流失がやはり湯崎沖の離岸流によるものであるという可能性をさらに確認できたといえる。なお、ここで適用した数値計算法の適用性については、すでに水理模型実験で格子点上の波高と波向を計測しているので、この値を用いて海浜流計算を行うなどの方法より明らかにすることが可能であろう。その他、前述したこと以外に、数値計算上の各種平滑化の取り扱いや境界条件の取り入れ方および海底の抵抗則の表示や単層モデルの制約、さらに浅海域における波浪計算法などの改良および検討を加えて、より信頼性のある数値モデルを確立することが必要であろう。

(3) 砂止め潜堤と人工海底地形の効果

すでに前報で示したように、白良浜の保全工法として養浜工を考える場合、養浜砂の流出について検討しなければならない。これについては、つぎの2つの考え方があろう。その1つは、砂止め工として潜堤を設置する方法である。ただし、この方法では高波浪によって潜堤を越えて沖側に流出した漂砂は再び浜に戻らない危険性がある。いま1つの方法は、白良浜の安定性に立脚するものであり、養浜後の波向線が計画汀線に対して直角になるような海底地形で、かつ波向線間隔の沿岸方向分布が現状と極端に変わらないようにし、さらに碎波帯内の海底勾配をできるだけ現状に近くなるように海底地形を人為的に変える方法である。そこで、それぞれについて実験を行った結果に基づいて、それらの効果を検討する。

(a) 砂止め潜堤の効果

ここでは、白良浜の中央部に設置した砂止め潜堤（天端高；T. P. +2.5m）の効果について潜堤付近の底

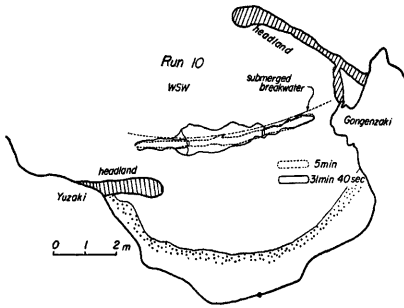


Fig. 24 Distribution of fluorescent sand around submerged breakwater

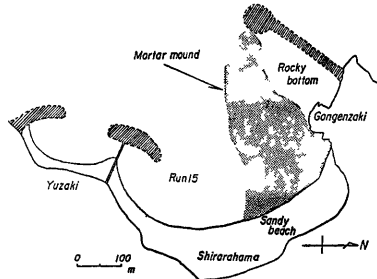


Fig. 25 Construction of man-made sea bottom at Shirarahama beach

質の挙動から、その効果を検討する。Fig. 24 は赤および緑色の着色砂（標準砂に漂砂用シンロイヒで着色し、粒径を底質と同じにしたもの）を潜堤の岸側に帯状に設置して、移動状況を調べた結果である。まず、実験開始 5 min 後には、すでに権現崎の近くと浜中央部で潜堤を越え沖側へ流出することが認められる。さらに、26 min 40 sec 後には、前者が量的にあまり多くないのに対し、後者では、全面的に潜堤を乗り越え、元の位置に留まった着色砂がきわめて少なくなっていることがわかる。しかも、潜堤の南端付近では、潜堤に沿って南下する緑色の着色砂が赤色の着色砂に混合する現象が見出された。

以上の結果を総合して判断すれば、潜堤の築造によって、波高は減衰するけれども、この付近の海浜流の流速はむしろ大きくなる傾向があり、これによって、白砂の流出は助長されることがわかる。なお、ここで示した結果から、この程度の規模の潜堤によっても、台風時のうねりに近い波浪の波高制御が可能であることがわかったので、潜堤の位置や天端高を変化させれば、今回の実験結果よりも砂の流出を抑制できることが期待される。しかし、波向をはじめとする波浪条件が季節的に変化するのので、これらすべてに適應する潜堤を見出すことは現状では不可能に近いといえよう。

(b) 人工海底地形の効果

Fig. 25 は前述した理由から権現崎の背後の海底地形を人為的に変化させた領域を示す。この領域は、具体的には高潮位から水深を 1m（模型では 1.6 cm）ずつ下げて、等深線が汀線と平行になるようにならして、

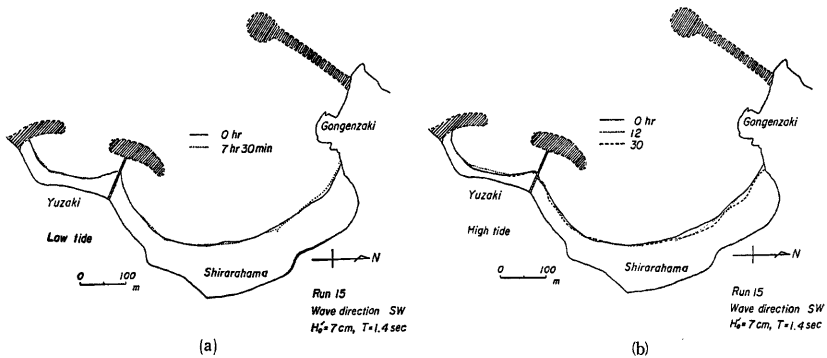


Fig. 26 Changes of shoreline in low tide and in high tide

表面をモルタルで固めてある。一方、それ以外の領域は、次章で述べるような安定海浜と相違するように人為的に造成しなおしている。したがって、この浜が長時間の波の作用後に Run 12 あるいは Run 13 の最終海浜に近づくば、安定海浜の存在がさらに確認されることになる。

Fig. 26 (a)および(b)は低潮位および高潮位の条件で、波向 SW, 波高 7cm, 周期 1.4 sec の波を 7hr 30 min, さらに引き続いて 30 hr 実験を行った後の汀線の変化を示す。まず、前者については、白良浜北部で汀線の前進がみられるが、これは前浜の海浜断面変化によるものであって、沿岸漂砂はほとんど認められない。つぎに、後者では、白良浜の中央部から北部の汀線の後退が認められるが、中央部付近の後退は SW 方向からの波による北への沿岸漂砂によるものであり、また北部のそれは主としてバームの発達によるものであって、離岸漂砂に起因していない。一方、湯崎の離岸堤の背後では浜はまったく安定している。したがって、人工的な海底地形の造成によって白良浜全域がよく安定していることがわかる。

## 5. 養浜計画に関する考察

Run 1 から 15 までの水理模型実験によって、現況の浜の海浜過程と安定海浜工法を施工した場合の浜の長期的な安定性についての知見を得ることができた。そこで、このような結果に基づいて、望ましい安定海浜の造成と安定海浜工法の施工順序について考察する。

### 5.1 計画安定海浜

Runs 7, 8, 9, 11, 12 および 13 の実験結果から、権現崎にヘッドランドを、湯崎に離岸堤あるいは突堤を施工すれば、白良浜の養浜によって安定海浜が形成できることがわかっている。これらの成果を生かして、白良浜に理想とする安定海浜を得るにはどうすればよいかを考えることにする。

まず、安定海浜の造成原理を Fig. 27 に示す。その内容はつぎのとうりである。権現崎については、すでに岩礁地帯が浅瀬となって鉛山湾の中央部に向かって延びており、ある程度ヘッドランドの役割をすでに果たしているといえる。この付近には冬季季節風時の NW 方向からの波浪と台風時の SW~W 方向の波浪が集中するが、波高、周期ともに大きい後者の波浪が、この背後の海浜過程にとってより重要になる。Fig. 27 に示す権現側の汀線は、権現側に作る海岸構造物がヘッドランドとしての役割を十分果たす場合に得られる静的な安定海浜である。したがって、景観上の問題や湾内の水質浄化の観点から、ここに作るヘッドランドの天端高を L. W. L. とする場合には、満潮時に波高 1m 程度の波浪と、このヘッドランド前面で碎波して発生した流れが湾内に侵入してくることになる。このような条件下では、ヘッドランドの基部に円弧状の海浜を造成することが困難であって、水理実験からもこの事実が確認されている。しかし幸いなことにこの付近の岩礁浅瀬は海水浴客にとっての格好の磯遊びを提供することができ、かつこれは地元の要望と一致する。

一方、湯崎側については、波浪の屈折図からわかるように、台風時および季節風時の波浪はいずれもほぼ同じ方向から侵入してくる。これら、両者に対して、海岸構造物をヘッドランドとして築造し、その背後に静的な安定海浜を作ることは原理的にも可能であり、水理模型実験もこれ

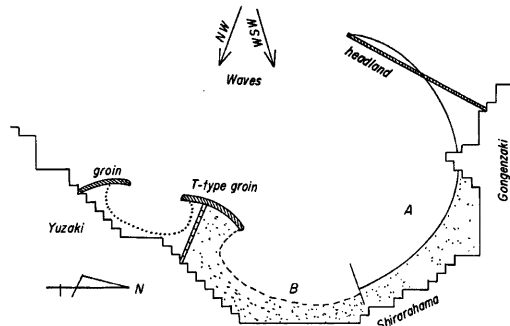


Fig. 27 Shorelines of statically stable beaches after beach nourishment by headland defense control work

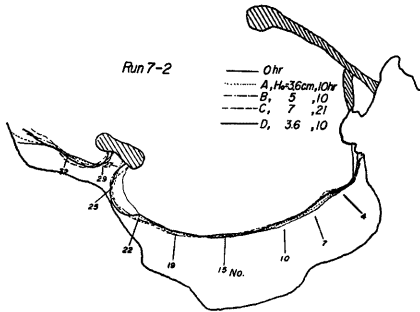


Fig. 28 Changes of shorelines of statically stable beach after impractical beach nourishment

を裏付けている。卓越する来襲波浪の波向が深海域ではほぼ $90^\circ$ 近く相違する場合でも、白良浜はポケットビーチということもあって、とくに湯崎側では屈折後の波向の差がほとんどない。あたかも卓越波向が1つであるかのような屈折特性に示すことが安定海浜を造成するうえで非常に有利な理由になろう。

## 5.2 安定海浜の造成

さて、模型実験で得られた安定海浜の造成過程をいま一度振り返ってみることにする。まず、Fig. 8で示す Run 7-1 では、最大可能な範囲で養浜した場合（所要養浜砂量の観点からはもちろん非現実的であるが）、確かに Run 7-1 D のような安定海浜が得られている。そこで、Run 7-2 では Run 7-1 の最終海浜から約 40cm（現地換算でおよそ 25m）汀線を人為的に後退させるために、養浜砂を減らして、安定海浜が造成できるかどうかを調べている。Fig. 28 は汀線の時間的変化であり、波向を含めた波浪特性が変化しているにもかかわらず、白良浜の全域で汀線の変動が非常に安定していることがわかる。なお、離岸堤背後の汀線の後退は、そ上波が護岸で反射することによって発生したものであって、護岸の前面をたとえば緩傾斜にするなどの工夫をすれば、これが防げると考えられる。Fig. 29 は海浜断面の経時変化であり、実験初期を除き、海浜断面は急激に変化せず、おおむね安定しているように判断される。

Run 8-3 では Run 7-2 の再現実験を行っている。初期の海浜断面を Run 7-2 の初期のものにはほぼ一致するようにして、実験した結果が Fig. 30 である。これから、白良浜の湯崎側で汀線の後退が目立つが、この原因の1つは前述した護岸における波の反射であり、ほかの1つは離岸堤の設置位置が若干湯崎に寄りすぎていることが考えられる。そこで、Run 9 で離岸堤（設置水深 T. P. - 3m）を移動させたところ、汀線の後退は止まることが確認できたので、Fig. 8(b) ではさらに、離岸堤の代わりにヘッドランドを築造した場合を示し、波向を含めた波浪特性の変化にもかかわらず汀線の位置はほとんど不動であることが認められる。なお、海浜断面の経時変化から白良浜の北側ではやはり安定した海浜になっていることが見出された。

これらの実験結果から、つぎのことがわかる。すなわち、白良浜の権現寄りの汀線はその海浜断面を含めて、波浪特性の変化に対して非常に安定しているといえる。一方、湯崎側については、水理実験で示した離岸堤や突堤の位置あるいは平面形状では、いずれもそれらの背後の汀線が後退して安定することである。これは安定海浜の最大湾入部に対応するものであり、汀線の後退は何ら問題ないと考えられるが、この付近の浜幅が養浜後でもあまり広くないこともあって、やはり改善の余地があるといえる。

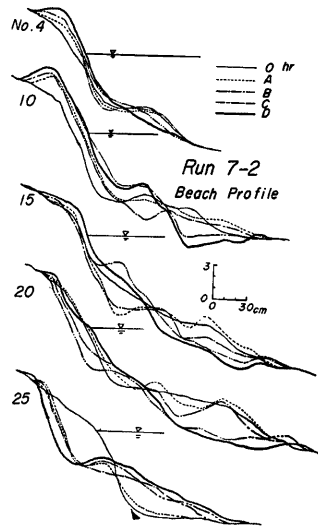


Fig. 29 Changes of beach profiles with time

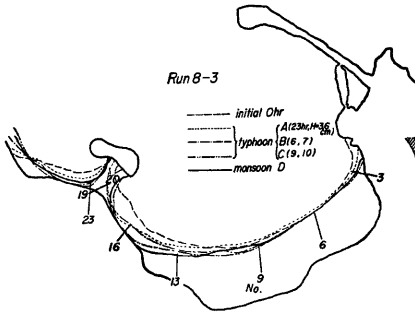


Fig. 30 Changes of shorelines of statically stable beach after adequate beach nourishment

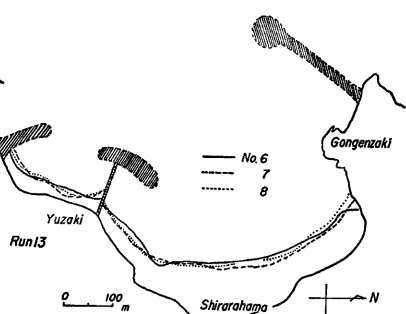


Fig. 31 Statically stable beach with T-type groin at Yuzaki and headland at Gangenzaki with beach nourishment

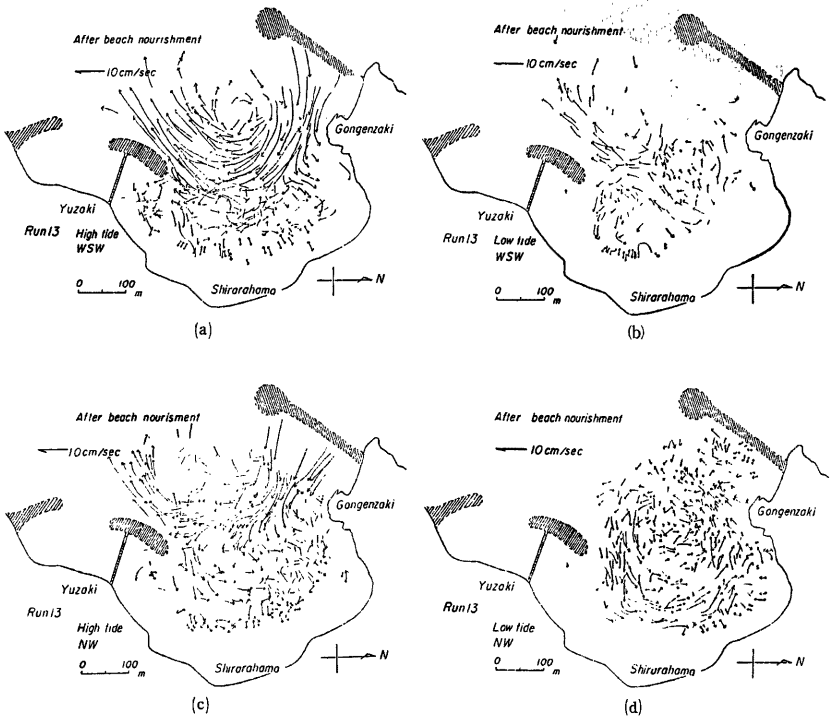


Fig. 32 Patterns of nearshore currents cotrolled by proposed beach erosion control work

そこで、Runs 11, 12 および 13 では湯崎側の浜の安定と浜幅の確保を目的として、ここに設置する海岸構造物の設置位置や平面形状を工夫して実験を行っている。安定海浜工法の原理はすでに述べたように、碎波角を変えることによって沿岸方向のエネルギーフラックスの値を制御することであるから、ここでは海底地形を人為的に変えて屈折特性の変化をもたらす方法によってではなく、波浪制御を行う海岸構造物の位置と平面形状を変化させて、積極的に構造物周辺の流れを制御する方法を用いることにしている。Fig. 31 は養浜後の NW および WSW 方向からの波浪による汀線形状であるがほとんど変化せず、安定していることが見出される。この原因を海浜流の流況から検討しよう。Fig. 32 は湯崎側に T 型突堤を設置した場合の、高潮位および低潮位での条件下における WSW および NW 方向からの波による海浜流の流況を示す。これから、いずれの波向に対しても、T 型突堤より東側では、流速の絶対値が小さくなり、かつ反時計回りの弱い循環流が発生している。一方、その西側では、権現崎のヘッドランドで囲まれる海域で時計方向の流れが存在するが、(a)からわかるようにこの流れも循環流に近く、湯崎方向へ向かう一方方向流にはなっていない。これらの結果と Runs 7 および 8 における海浜流の流況と大きく相違する点は、湯崎側の海岸構造物付近の流況であって、Run 11 より以前では、白良浜の南端付近で白良浜に向かう強い流れは存在しなかったといえる。

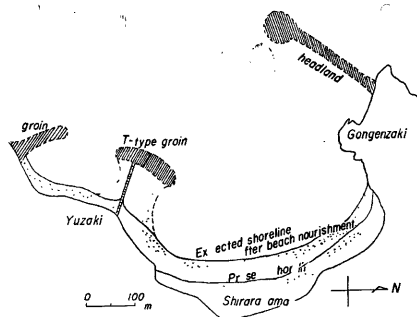


Fig. 33 Expected shoreline of Shirarahama beach accompanied with headland defense control work

このように、湯崎側の海岸構造物を T 型突堤とすることにより、Runs 7 および 8 で問題となった湯崎側の汀線後退が改善されることがわかる。安定海浜の造成過程では、湯崎側の海岸構造物をどのように築造するかがもっともむづかしい問題であり、その位置や平面形状もさることながら、基本的には不透過かつ非越波の構造とするほか、構造物前面の底質が砂であることを考慮して、反射による沖方向漂砂を発生させないように、できるだけ緩勾配にする配慮が必要であろう。Fig. 33 には実験結果に基づく現在の汀線より約 50m 前進させた養浜計画を示す。

最後に湯崎に近い第 2 の浜の造成について述べることにする。今回の水理実験の結果からわかるように、現況の浜のままでは何ら保全対策を実施しない場合には、湯崎沖に向かう海浜流によってかなりの砂が移動することが認められる。この結果は、海浜流の数値シミュレーションの結果とも一致する。ただし、Run 13 の T 型突堤を設置すれば、Fig. 33 に示したようにこの海域に向かう流れが軽減され、非常に遅くなるが見出されている。また、それに伴って、湯崎沖に流失する砂の存在もほとんど認められない。すでに、Run 13 で示したように、T 型突堤と第 2 の浜の突堤間に造成された海浜からは砂の流失もなく、汀線は安定している。したがって、この浜を白良浜と独立に造成することは可能であって、造成後かなり安定していることが期待できよう。

## 6. 結 語

約 800 時間を及ぶ造波機の実稼働時間が示すように、白良浜の養浜計画についての水理模型実験を慎重に行ってきた。その中で、とくに湯崎側の護岸が海側に凸状に張り出しているために、この付近の漂砂制御が非常に困難であった。この法線はいずれの波向に対しても護岸付近で鋭角に交わるため、護岸に沿う強い流れが浜の安定をむづかしくしているといえる。最終保全案で示した T 型突堤は権現崎のヘッドランドと一体となって、これらに囲まれるポケットビーチを新たな白良浜に造成することになろう。

いずれにしても、現状の白良浜は非常に安定な浜であるので、海岸構造物の築造や養浜によって一時的に



せよこれを乱さない工夫を必要としよう。白砂の全量が10万 $\text{m}^3$ 程度の規模であるので、ほかの侵食海岸と違った細心の配慮が要求される。

ここで示した安定海浜工法によれば、養浜後の白良浜に美しい弧状の浜が形成されることが実験的に確認されている。海岸構造物の配置等は工事実施段階で若干変更される場合も出てくると考えられるが、海浜流の流況変化が確実に起るので、極力基本案に沿った施工が望ましいといえる。

最後に、本研究に際し御便宜をいただいた和歌山県土木部河川課、田辺工事事務所および白浜町役場の関係諸氏に謝意を表明するとともに、とくに水理実験の実施にあたり熱心に御協力いただいた大学院学生西島照毅君に感謝する。

#### 参 考 文 献

- 1) 土屋義人・河田恵昭・芝野照夫・山下隆男：白良浜の海浜過程とその保全(1), 京大防災研年報, 第27号B-2, 1984, pp. 513-555.
- 2) 土屋義人・R. Silvester・芝野照夫：安定海浜工法による海岸侵食制御について, 第26回海岸工学講演会論文集, 1979, pp. 191-195.
- 3) Silvester, R. and S. K. Ho: Use of Crenulate Shaped Bays to Stabilize Coasts, Proc. 13th Conf. Coastal Eng., 1972, pp. 1347-1366.
- 4) 岩垣雄一：海岸および港湾の模型実験について, 海岸工学の最近の進歩, 土木学会関西支部講習テキスト, 1961, pp. 21-42.
- 5) 野田英明：海岸の模型実験, 水理学・水文学における最近の進歩, 土木学会関西支部・中部支部, 1967, pp. 197-209.
- 6) 土屋義人・伊藤政博：海浜変形の相似則に関する実験的研究, 第28回海岸工学講演会論文集, 1981, pp. 315-319.
- 7) 防災研究協会：白良浜の養浜計画に関する実験的研究, 1984, 167 p.
- 8) 渡辺 晃：海浜流と海浜変形の数値シミュレーション, 第28回海岸工学講演会論文集, 1981, pp. 255-259.
- 9) 山口正隆・大津正司・西岡洋一：非定常波浪による2次元海浜変形の数値計算, 第28回海岸工学講演会論文集, 1981, pp. 290-294.
- 10) 土屋義人・安田孝志：海浜変形の簡単なモデル, 第25回海岸工学講演会論文集, 1978, pp. 189-193.
- 11) 柴山知也・堀川清司・矢吹信喜・半田真一：二次元海浜変形予測手法の実験による検討, 第29回海岸工学講演会論文集, 1982, pp. 249-253.
- 12) 清水塚三・三村信男・渡辺 晃：波浪・海浜流共存場における海浜変形と漂砂量モデル, 第30回海岸工学講演会論文集, 1983, pp. 229-233.