

# 放水口前面の洗掘対策工 SPAC の設計法

清水隆夫\*・池野正明\*\*・氏家久芳\*\*\*・山内一晃\*\*\*

## 1. はじめに

大型石炭火力発電所などの建設にともなう、外洋に面した埋立護岸から温排水を水中放流するケースが増えてきている。しかし、海底が砂質地盤である場合、放水構造物などの安定性に問題が生じる恐れがあるので、放水口前面の海底を堅固なコンクリート版などで被覆するのが最も確実と考えられる。ところが、水中放流では放水流速が大きい場合海底面の洗掘範囲が広く、洗掘防止のための被覆に多くのコストを必要とする。また、被覆工を途中で打ち切ると、その先端部分が洗掘され、そこに下から波力を受けてつぎつぎに被災してしまう。こうしたことから清水ら（1991）は自然河川において形成されるアーマコートを模倣したフレキシブルな洗掘対策 SPAC (Spreading Armor Coat) を提案している。SPAC は図-1 に示すように放水口前面の砂質海底を浚渫して捨石層で置換する工法であり、波と放水流の作用によって捨石が洗掘斜面に広がり、その結果としてアーマコートを形成させるものである。SPAC の断面設計法については、図-1 中の展開部の長さ  $R$  を与える次式が提案されている。

$$S \leq \delta D^2(2\lambda d)^{-1} + D \quad \text{ならば}$$

$$R = (\lambda^2 d^2 + 2\delta \lambda S d)^{1/2} - \lambda d \quad \text{..... (1)}$$

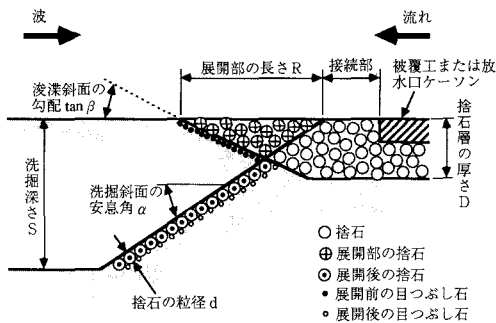


図-1 SPAC の断面展開モデル

$$S > \delta D^2(2\lambda d)^{-1} + D \quad \text{ならば}$$

$$R = 2^{-1} \delta D + \lambda d D^{-1} (S - D) \quad \text{..... (2)}$$

ここで、 $S$  は洗掘深さ、 $\delta = \cot \alpha + \cot \beta$ 、 $\lambda = \text{cosec } \alpha$ 、 $\alpha$  は洗掘斜面の安息角、 $\beta$  は浚渫斜面の傾斜角、 $d$  は捨石の粒径、 $D$  は捨石層の厚さである。特に洗掘斜面の安息角については  $\alpha = 20^\circ$  であることを実験で示している。

本研究の目的は SPAC の幅をどのように決めるかという平面設計法を実験に基づいて確立することにある。また、展開した後の捨石の隙間からの長期にわたる砂の吸い出しを防止するために目つぶし石を SPAC に入れる方法についても検討した。

## 2. 実験方法と実験ケース

本研究では、図-2 に示すように波と放水流によって、SPAC を構成するどの範囲の捨石が展開し、さらに波が斜めに入射した場合に放水流がドリフトする分をどれだけみておけばよいかを検討した。

実験では図-3 に示した長さ 35 m、幅 45 m、深さ 1.1 m の平面造波水槽に実際の発電所放水口の 1/25 縮尺の模型を設置し、SPAC の展開実験を行った。埋立地を模倣した消波護岸に口径 10.7 cm の放水口 3 管を設置した。放水口中心高さは水面下 27 cm、放水口前面水深は 35 cm とした。ポンプで汲み上げた水を流量測定堰、整流水槽、放水路、連絡水路、放水管を通して放水口から放水した。放水口前面には中央粒径 0.2 mm の砂で厚さ 30 cm の海底模型をつくり、粒径 30 mm の碎石で SPAC の

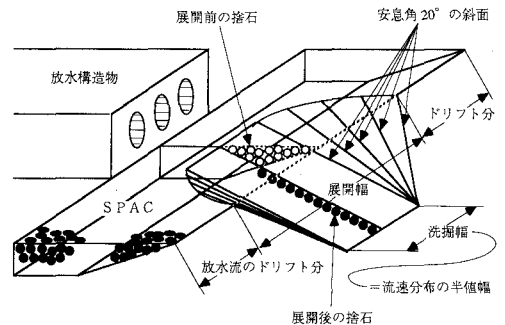


図-2 SPAC の 3 次元展開モデル

\* 正会員 工修 (財)電力中央研究所 我孫子研究所  
 \*\* 正会員 工博 (財)電力中央研究所 我孫子研究所  
 \*\*\* 正会員 東北電力(株) 電力技術研究所

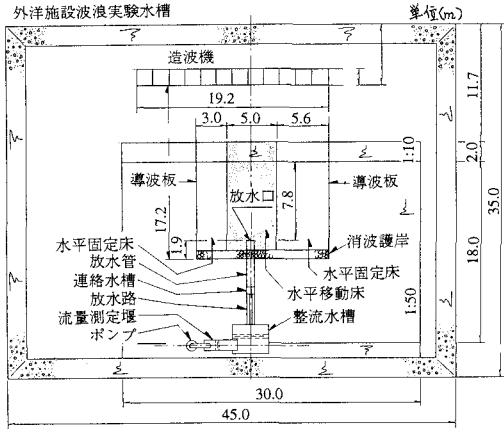


図-3 水槽と模型配置

表-1 実験ケースと実験条件

ケース	SPAC長	沖波波高	周期	沖波入射角	放水流速	放水流量
A 1	60 cm	21.0 cm	2.4 s	0°	100 cm/s	26.7 l/s
A 2	150 cm					
B 1	1/50 勾配の固定床	22.1 cm	2.0 s	30°		
B 2		28.4 cm				
ケース	捨石径	目つぶし石径	目つぶし石混入率			
C 0		捨石のみ	0 %			
C 11~15	30 mm	15 mm	5, 10, 15, 20, 25 %			
C 21~23		10 mm	5, 10, 15 %			
ケース	目つぶし石の配置	沖波波高	周期	放水流速	断面平均流速	
D 1	展開部下層	21.0 cm	2.4 s	100 cm/s	20 cm/s	
D 2	展開部浚渫斜面					
D 3	展開部混合					

ケース A と B は平面実験, C は捨石のまき出し実験, D は岸沖断面実験

模型を製作した。造波機は幅 40 cm のピストン型造波板 48 枚を連ねた多方向不規則造波機である。海底模型の両側には導波板を設置した。本実験では海底洗掘の対策を対象とするので浮上しやすい温水ではなく常温水を用いた。波については規則波を用いた。

実験ケースと実験条件を表-1 に示した。

ケース A 1 と A 2 では SPAC の長さを変えて捨石の展開幅を調べた。SPAC の先端はそれぞれ放水口から 60 cm と 150 cm である。SPAC には 10 cm 間隔で番号を付けた捨石を配置し、その動きを追跡した。

ケース B 1 と B 2 では水平移動床を 1/50 勾配の固定床に変えて、波の斜め入射による放水流のドリフトを調べた。両ケースは波高だけを変えて、それぞれ放水口から 1 m と 5 m のところで碎波する条件とした。

ケース C 0~C 23 では図-3 の水槽の外で目つぶし石の大きさと混入量について検討した。捨石と目つぶし石

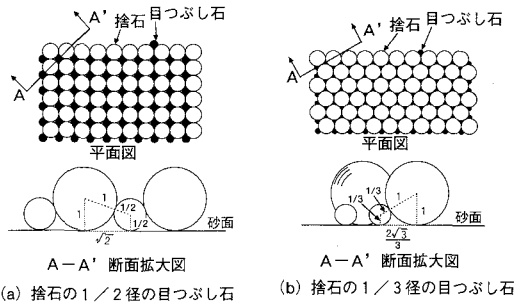


図-4 目つぶし石の球形モデル

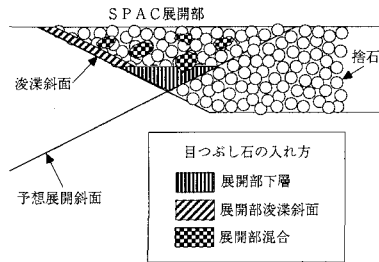


図-5 ケース D 1~D 3 の目つぶし石の入れ方

を球形と仮定すると、図-4 のように、捨石の 1/2 径と 1/3 径の目つぶし石のモデルを考えることができる。このモデルでは目つぶし石の混入率は、1/2 径の場合は捨石の 1/8、即ち 12.5%、1/3 径の場合は捨石の 2/27、即ち 7.4% となるが、実験では 25% まで混入した。50 cm × 50 cm の正方形のトレーの底に紙を敷き、これに捨石と目つぶし石を一層にまき出して、その上からインクを散布し、紙上に石の被覆パターンをとって解析した。

ケース D 1~D 3 では、図-3 の水槽とは別の造波水路における岸沖断面実験で目つぶし石の入れ方を検討した。実験では図-5 に示したように 3 種類の入れ方を比較した。即ち、SPAC 展開部の下層、展開部の浚渫斜面上に設置、ならびに展開部に分散・混合した。

### 3. 実験結果と考察

#### 3.1 捨石の展開幅

捨石の展開幅は洗掘幅に依存して展開し、洗掘幅は放水流の幅に依存する。そこで、まず図-6 にケース A 1 の初期段階における沖向き平均流速の沿岸分布を示した。測定点は放水口の中心高さである。砂の移動量は一般に流速のおおむね 3 乗に比例するので、放水流の幅を流速分布の半値幅  $B_r$  で代表させると、中心での砂移動量の 1/8 に減衰する範囲をカバーすることになり、工学的には十分と考えられる。図-6 では放水口からの距離  $X = 0.5, 1.5, 2.5, 3.5$  m の各断面での半値幅  $B_r = 190, 140,$

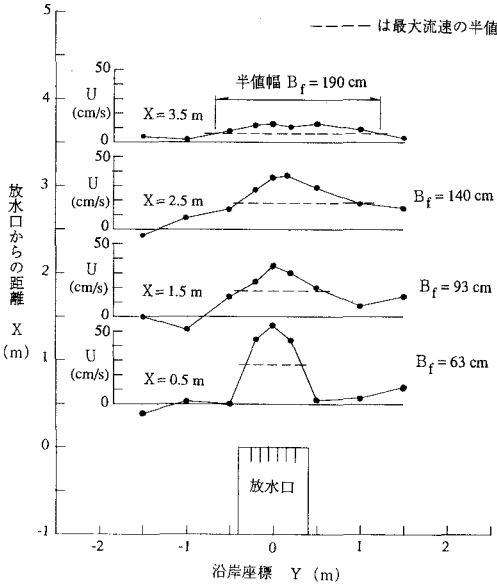


図-6 沖向き平均流速の沿岸分布 (ケース A1 の初期)

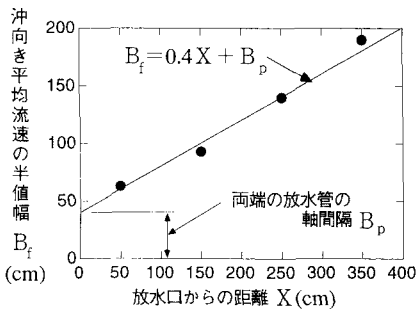


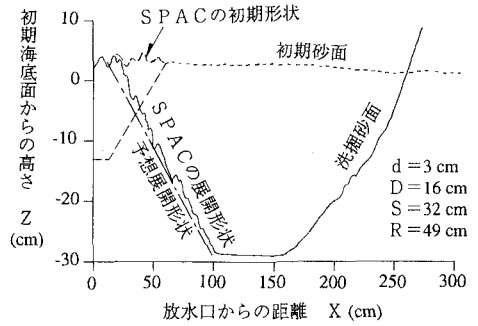
図-7 沖向き平均流速の半値幅

93, 63 cm となる。これらの  $X$  と  $B_f$  の関係を見ると、図-7 のようになる。 $X$  と  $B_f$  は直線によく乗っており、次式の関係にあることがわかる。

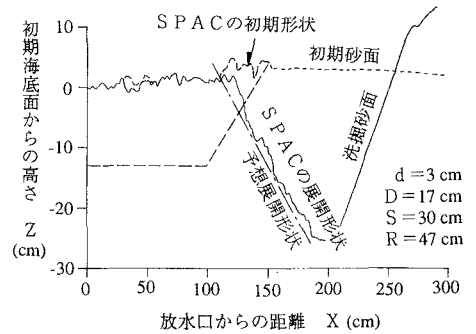
$$B_f = 0.4X + B_p \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 $B_p$  は両端の放流管の管軸間隔である。

つぎに、捨石の展開状況のみをみる。図-8 にはケース A1 と A2 の放流中心での断面展開形状を示した。図中の一点鎖線は洗掘深さから式 (1) (2) で求められる展開形状で、実験での展開形状よりも少し放水口寄りではあるが良く一致している。図-9 には平面展開形状を示した。図中には洗掘深さをコンターラインで、捨石の動きを丸と棒で示した。黒丸が移動後の捨石、棒の先が移動前の捨石の位置、白丸が移動しなかった捨石の位置を示している。また、SPAC 展開の先端における放水流の半値幅  $B_f$  を式 (3) に基づいて計算し図中に示した。さらに、安息角  $20^\circ$  の斜面上で洗掘孔と現海底が接続されると



(a) ケース A1 4 hr



(b) ケース A2 8 hr

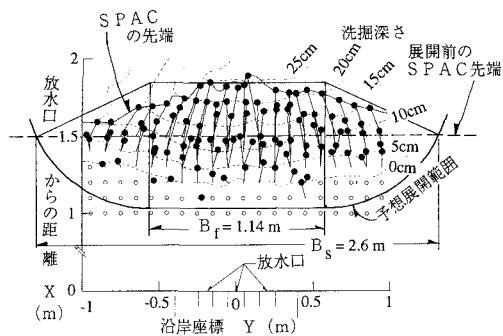
図-8 SPAC の断面展開形状

して、図中に扇形の範囲を示した。捨石の展開はこの範囲の中で起こっており、捨石の展開幅  $B_s$  は扇形の円弧と展開前の SPAC の先端が交わる幅をとればよいことがわかる。

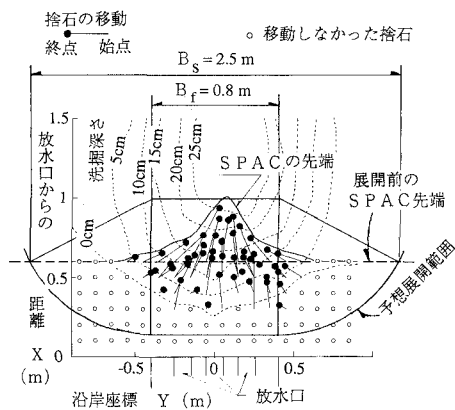
### 3.2 斜め入射波による放水流のドリフト

高波が斜めに入射して護岸の前で碎波する場合は、沿岸流が生じて放水流がドリフトする。その分を考慮して SPAC の幅に余裕をとる必要がある。まず、ケース B1 と B2 で放水なしの斜め入射波だけで実験したときの沿岸流の岸沖分布を図-10 に示した。図中の横軸は埋立地がないと仮定した場合の仮想汀線からの距離、縦軸は水平拡散項を無視したときの碎波点における理論流速で無次元化した沿岸流速である。▲が実験結果である。多方向不規則波による沿岸流の流速は合田ら (1990) の式で求められるが、ここでは規則波で実験しているのでクラウスら (1978) の曲線を図中に示した。曲線は一樣勾配海岸の沿岸流、▲は埋立護岸前面の沿岸流であるが、護岸に近いところでは両者が良く一致している。ただし、埋立護岸前面の場合、碎波点に近づくとき沿岸流速が急激に減少している。

つぎに、こうした沿岸流による放水流のドリフトをケース B2 について図-11 に示した。図中のベクトルは時

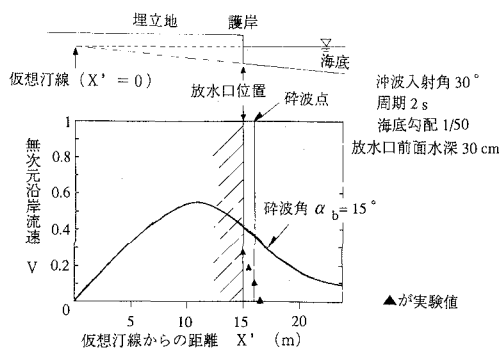


(a) ケース A1

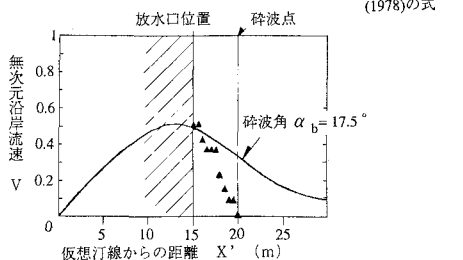


(b) ケース A2

図-9 SPACの平面展開形状



(a) ケース B1 沖波波高 22.1 cm



(b) ケース B2 沖波波高 28.4 cm

図-10 波の斜め入射による沿岸流速 (放水なし)

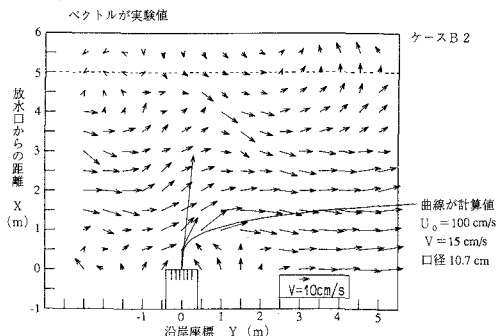


図-11 沿岸流による放水流のドリフト (ケース B2)

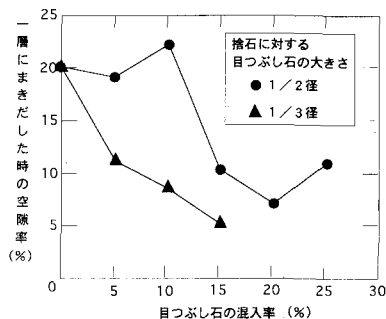
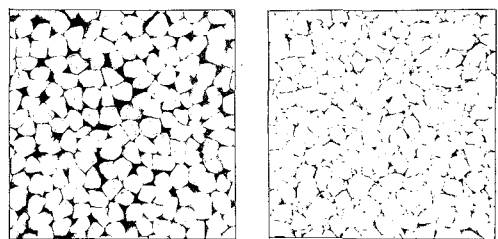


図-12 目つぶし石の混入率と空隙率の関係



(a) ケース C0 混入率 0% 空隙率 20% (b) ケース C23 混入率 15% 空隙率 5%

図-13 捨石と目つぶし石の被覆パターン

間平均流速の実験値、曲線は片野ら (1976) の流れを横切って水平流出する密度噴流の噴流軸の軌跡を与える次式で求めた放水流の軌跡である。

$$(B_d/\phi_p) = 0.26 (V/U_0)^3 (X/\phi_p)^4 \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 $X$ は放水口から沖向きにとった座標軸、 $\phi_p$ は放水口の直径、 $U_0$ は放出流速、 $V$ は沿岸流の流速、 $B_d$ は放水口から沿岸方向に測った流軸のドリフトである。図中の流速ベクトルと流軸曲線は良く一致している。

### 3.3 目つぶし石の大きさと混入率

ケース C0~C23 における目つぶし石の混入率と空隙率の関係を図-12 に示した。1/2 径の目つぶし石と 1/3 径の目つぶし石を比較すると、図-4 のモデルのとおり 1/3 径の方が 1/2 径よりも小さい混入率で空隙率を下げ

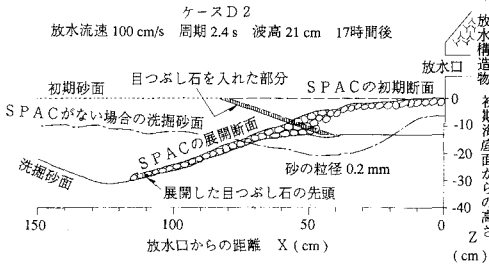


図-14 目つぶし石がうまく展開したケースD2の結果

ることができる。また、1/2径の目つぶし石では空隙率のばらつきが大きいようである。波や流れに対する安定性からいえば、径の大きい方が望ましいが、1/3径を15%程度混入することで、捨石だけの場合の空隙率20%を5%に低減でき、図-13のように捨石の隙間をほとんど塞ぐことができる。

### 3.4 目つぶし石の入れ方

図-5に示した3種類の入れ方でSPACの展開部に捨石の1/3径の目つぶし石を入れて波と放水流を同時にあてて展開状況を比較した。目つぶし石の量は展開部の捨石の15%である。ケースD1では捨石の展開に目つぶし石が追従せず、展開した捨石に隙間が生じた。ケースD3では捨石の展開に目つぶし石が追従はしたものの、捨石同士が大きく離れて、目つぶし石が露出してしまった。ケースD2では図-14に示したように展開した捨石の先端まで目つぶし石が追従し、捨石の隙間をうまく塞ぐことができた。また、図中のようにSPACがない場合と比べると、SPACが放水構造物の足元を安定化するのに効果的であることがわかる。

## 4. おわりに

以下に結論をまとめた。

① SPACの所要幅は、捨石の展開幅に波が斜めに入射し

た場合の沿岸流による放水流のドリフトを加味して決めることができる。

② 捨石の展開幅は洗掘幅に安息角 $20^\circ$ の接続斜面の範囲を考慮して決めることができる。

③ 洗掘幅は放水流の流軸に直交する流速分布の半値幅で評価することができる。

④ 波の斜め入射による埋立護岸前面の沿岸流速は、一様勾配海岸の沿岸流速分布を算定する既存の式を用いて評価できる。

⑤ 沿岸流による放水流のドリフトは流れに直角に放出される温水噴流の径路を与える既存の実験式で評価できる。

⑥ 捨石の粒径の1/3の粒径の目つぶし石を捨石の展開量の15%程度SPACに入れることによって、展開後の捨石の空隙率を20%から5%に低減できる。

⑦ 目つぶし石をSPAC展開部の浸漉斜面上に入れることで、捨石の展開にともなって目つぶし石が均等に捨石の隙間をふさぐことができる。

最後に、東北電力株式会社の佐々木明氏、株式会社土木技術開発の下田隆男氏、株式会社八重洲土木技術センターの田中良弘氏、株式会社CRSの下村一氏、森谷一広氏、田山英樹氏に厚く謝意を表します。

## 参考文献

- 清水隆夫・佐々木明・氏家久芳 (1991): 水中放流と高波浪による海底洗掘の新しい対策工SPACの提案, 海洋開発論文集, Vol. 7, pp. 301-306.
- 片野尚明・和田明・角湯正剛・河村博美 (1976): 水域中における温水噴流の拡散過程, 第20回水講論文集, pp. 185-190.
- クラウス・佐々木民雄 (1978): 沿岸流速分布に及ぼす入射角の影響について, 第25回海講論文集, pp. 430-434.
- 合田良実・渡辺則行 (1990): 沿岸流速公式への不規則波モデルの導入について, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 210-214.