

波と水中放水流による海底洗掘特性

清水隆夫*・池野正明**・氏家久芳***・山内一晃***

1. はじめに

発電所の温排水を効率的に希釈する方法の一つとして水中放流がある。しかし、放水口前面が砂質海底である場合は海底洗掘が問題となる。さらに、放水海域が外洋に面している場合には、波浪によって洗掘が加速され、放水構造物の安定性に影響を及ぼす可能性もある。水中放水流のみによる海底洗掘については、牛島ら(1990)が乱流モデルを用いた洗掘シミュレーションモデルを開発している。本研究の目的は、波と水中放水流の相互干渉と洗掘特性を実験的に解明し、もって洗掘シミュレーションモデルの開発に資することにある。

2. 実験方法と実験ケース

まず、岸沖二次元実験で波と水中放水流の相互干渉ならびに洗掘断面形状を検討し、つづいて平面実験で波と水中放水流による洗掘特性を検討した。模型縮尺は両実験とも実際の発電所放水口の約1/25とした。岸沖二次元実験では、図-1に示した幅90cm、深さ120cm、長さ51mの不規則造波水路に循環流装置を増設して用いた。放水口は図-2に示したように幅90cm、高さ8cmの長方形とし、放水口中心高さを水面下28cmとした。放水口の上は消波ブロックを積んだ消波構造とした。放水口前面水深は40cmとし、海底模型は固定床および粒径0.2mmの砂を用いた移動床とした。平面実験では、長さ35m、幅45m、深さ1.1mの多方向不規則造波水槽に循環流装置、ならびに埋立護岸、放水口、放水口前面海底の模型を設置した。放水口は口径10.7cm、3管とした。放水口中心高さは水面下27cm、放水口前面水深は35cmとした。放水口前面海底は粒径0.2mmの砂を用いた水平移動床とした。両実験とも放水流速は1m/sとした。また、海底洗掘を対象としていることから浮力効果のない常温水を用いた。

実験ケースと実験条件を表-1に示した。

ケースA1~A4は放水口前面の流況を見るための固

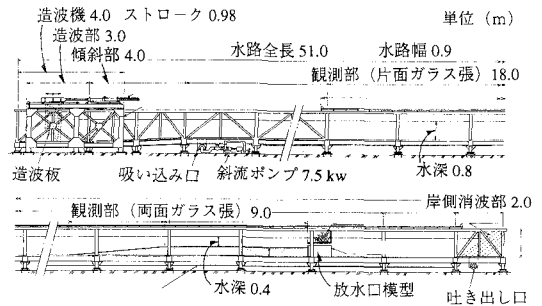


図-1 造波水路と模型配置

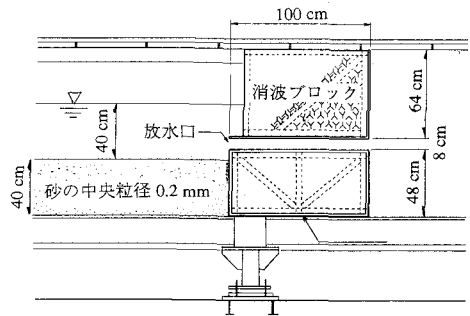


図-2 放水口模型

表-1 実験ケースと実験条件

ケース	底質条件	波の種類	沖波波高	周期	放水流速	放水口
A1	水平固定床	流れだけ	—	—	100 cm/s	長方形 水路幅 ×8cm
A2		規則波	21 cm	2.4 s		
A3	洗掘形状を模擬した固定床	流れだけ	—	—		
A4		規則波	21 cm	2.4 s		
B1	水平移動床	流れだけ	—	—		
B2		規則波	21 cm	2.4 s		
B3		規則波	16 cm	1.8 s		
B4		不規則波	二乗平均波 16 cm			
C1	砂の直径 0.2 mm	流れだけ	—	—	2.4 s	3管 口径 10.7cm
C2		多方向不規則波	1/10 最大波 21 cm			
C3		規則波	21 cm			

ケースA1~B4は岸沖断面実験、ケースC1~C3は平面実験

* 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

定床の流動実験, ケース B1~B4 は移動床の洗掘実験, ケース C1~C3 は洗掘の平面形状を調べるための平面実験である.

ケース A1 は放水流だけの水平固定床のケースで, これに規則波を加えたのがケース A2 である. ケース A3

と A4 はケース A1 と A2 の水平固定床を洗掘を模擬した固定床にしたケースである.

ケース B1 と B2 はケース A1 と A2 の固定床を中央粒径 0.2 mm の砂層にしたケースである. ケース B3 はケース B2 の波高と周期を小さくしたケースである. ケース B4 はケース B3 の規則波をエネルギー (二乗平均波高) を変えずに不規則波にしたケースである.

ケース C1 は放水流だけの水平移動床のケースで, これに多方向不規則波を加えたのがケース C2 である. ケース C3 はケース C2 の多方向不規則波の 1/10 最大波高に相当する規則波にしたケースである.

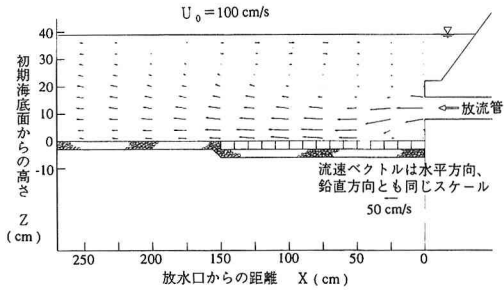
3. 実験結果と考察

3.1 放水口前面の流況

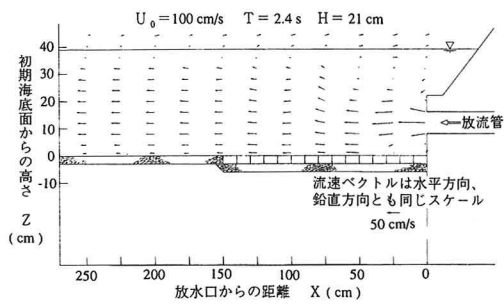
図-3 にケース A1~A4 の平均流速ベクトルの岸沖鉛直断面分布を示した. 平均流速ベクトルは約 1 分間の時間平均である. 図中, 水平軸 X と, 鉛直軸 Z は別々のスケールで表されているが, 流速ベクトルについては水平方向, 鉛直方向とも同じスケールで描かれている.

水平床に流れだけのケース A1 では流れが海底に張り付いた形で, 放水口から 225 cm でようやく海面まで広がっている. これに波が加わったケース A2 では放水口から出た流れがまず底面に広がり, ついで放水口から 100 cm あたりで海面へ達している. 洗掘モデル形状のケース A3, A4 では放水口から出た流れが海面に向かい, その後は流れだけのケース A3 では海面に張り付いたままなのに対して, 波と流れのケース A4 では海面から海底まで広がって流れている. また, 洗掘部分では循環流が起きている.

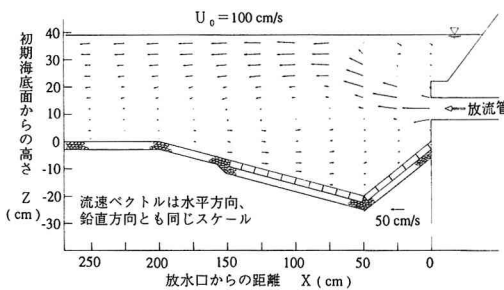
このように, 水平床で流れが海底に張り付いたり, 洗掘が進むと流れが海底から剝離して循環流ができるのは放水口中心高さと同前面水深の関係で, 上からの連行が強



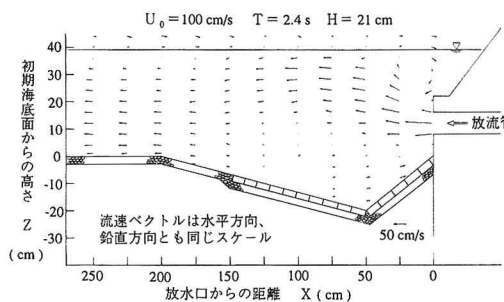
(a) ケース A1



(b) ケース A2

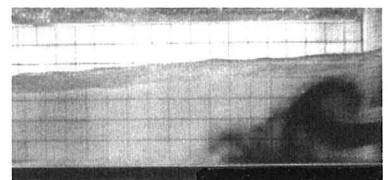


(c) ケース A3

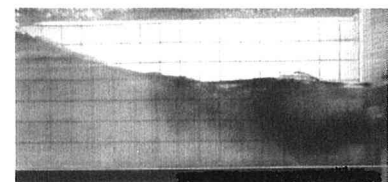


(d) ケース A4

図-3 時間平均流速ベクトルの分布

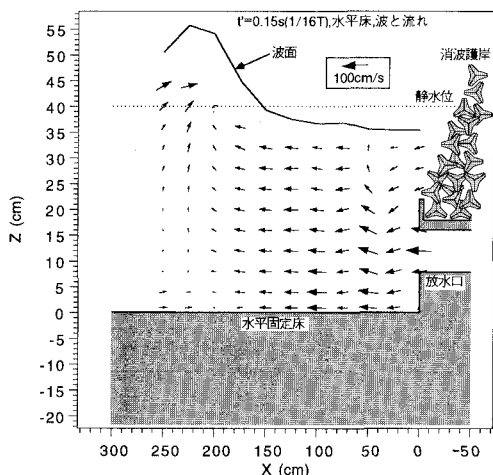


(a) 上下に分岐した放水流

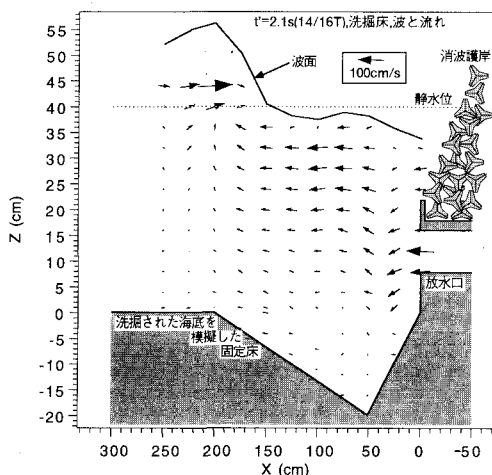


(b) 上下に煽られた放水流

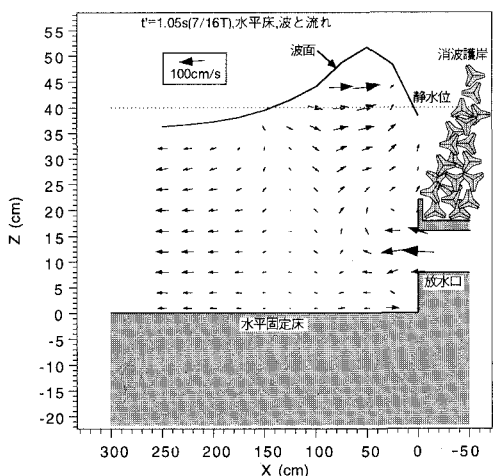
写真-1 可視化された放水流 (放水口を出たところ)



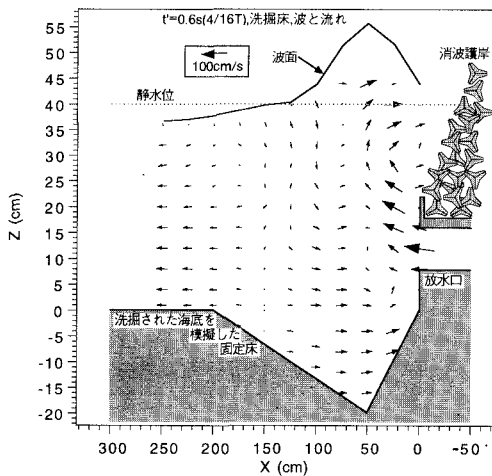
(a) ケース A2 (放水口前面で谷の位相)



(c) ケース A4 (放水口前面で谷の位相)



(b) ケース A2 (放水口前面で山の位相)



(d) ケース A4 (放水口前面で山の位相)

図-4 位相平均流速ベクトルの分布

かったり、下からの連行が強くなったりするために起きるコアンダー効果と考えられる。

これに対して、波と水中放流の流れが共存する場合、コアンダー効果が緩和され、流れが上下にすばやく広がる。放水流に染料を加えて可視化すると、写真-1 に示したように波の峰が放水口に近づくとき放水流が何かにつかかったように上下に分岐し、また、消波護岸への遡上と流下にもなると流れの方向が上下に煽られる様子が観察された。このような現象を仮に波による鉛直混合効果と呼ぶことにする。

図-4には規則波を用いたケース A2 と A4 の位相平均した流速ベクトルの岸沖断面分布を示した。これらの図でも水平軸と鉛直軸は別々のスケールで表されているが、流速ベクトルについては水平方向、鉛直方向とも同

じスケールで描かれている。位相平均は 30 波の平均をとっている。各図中に描かれた波面も 30 波の位相平均である。

水平床のケース A2 では、放水口前面で波の谷の位相のとき放水流は高速で流下しているが、波の峰が放水口に達すると放水流は放水口を出てから急激に減速している。洗掘形状をモデル化したケース A4 では、放水口前面で波の谷の位相のとき放水流は水面近くを高速で流下しているが、波の峰が放水口に達すると洗掘部分に強い戻り流れが生じ、放水流が上方へ強く曲げられている。

つぎに、洗掘に対する寄与が大きい底面付近 (底面上 1 cm) の流速の岸沖分布を図-5 に示した。図にはケース A1 と A2 の時間平均流速をそれぞれ●と○で示し、ケース A2 の位相平均流速の最大流速と最小流速をそ

それぞれ△と▽で示した。流速の符号は沖向きが正、岸向きが負である。また、参考のために波だけによる振動流速の流速振幅を併記した。ケースA2の平均流速は波の鉛直混合効果によってケースA1よりも小さくなっている。また、放水口のごく近くでは波による振動流速（最大流速と最小流速）が平均流速に比べて非常に大きいことがわかる。

3.2 放水口前面の洗掘

図-6にケースB1~B4の洗掘形状を時間の経過を追って示した。

波と流れによるケースB2の最大洗掘深さは流れだけによるケースB1とほとんど同じであるが、放水口直下はケースB1ではほとんど洗掘されていないのに対して7cmほど洗掘されている。逆に放水口から離れたところではケースB2よりケースB1の方が洗掘されている。波を小さくしたケースB3では流れだけのケースB1よりも最大洗掘深さは小さくなっている。ただし、放水口直下ではやはりケースB1よりも深く洗掘されている。これは、波高が小さくても波による流れの鉛直混合効果が比較的大きく、底面の平均流速が小さくなるのに加えて、振動流速も波高とともに小さくなるためと考えられる。ケースB3と同じエネルギーの不規則波のケースB4を比較すると、最大洗掘深さ、放水口直下の洗掘、ともにケースB4の方が大きくなっている。

図-7にはケースC1~C3の平面洗掘形状を示した。図中のコンターラインは実験開始後16時間の水深変化で、符号は洗掘が正、堆積が負である。

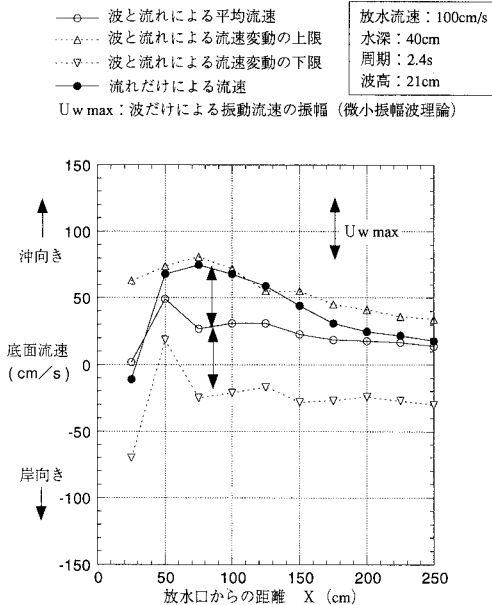
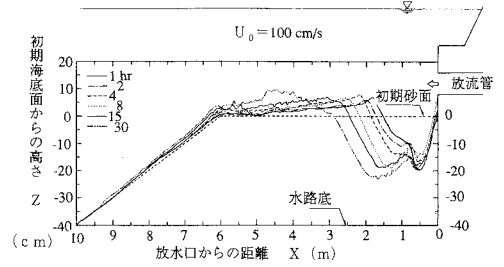
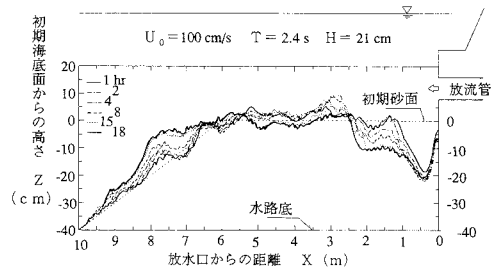


図-5 底面流速の分布 (ケースA1とA2)

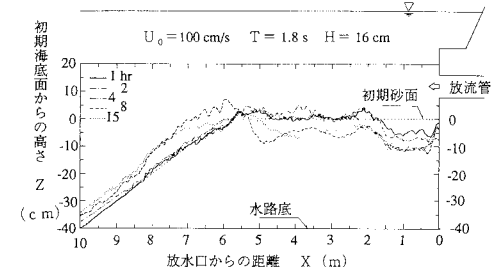
これらを比較すると、平面実験でも流れだけの場合よりもこれに波が加わった方が放水口の近くが洗掘されることがわかる。また、ケースC2とC3を比較すると、不規則波を1/10最大波で代表させた場合には不規則波よりも規則波の方が深く、広く洗掘されることがわかる。



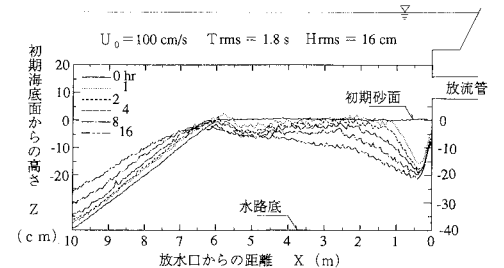
(a) ケース B1



(b) ケース B2



(c) ケース B3



(d) ケース B4

図-6 断面洗掘形状の時間変化

4. おわりに

以下に結論をまとめる。

- ①水中放水流のみの場合には、コアンダー効果によって流れが底面に押し付けられるが、これに波が加わると、水中放水流が波動運動によって上下に煽られたり、波の峰の岸向き振動流と放水流が衝突して放水流が上下に分岐することによって、放水流の時間平均流速が水深方向に一様化される。そのため、底面付近の時間平均流速は波がある場合の方が水中放水流のみの場合よりもむしろ小さくなる。そのため、
- ②放水流のみの場合よりも波が加わった場合の方がむしろ洗掘深さが小さくなる場合がある。しかし、
- ③波の各位相での瞬間流速を見ると、波の谷の位相では放水流に沖向きの振動流が加わって大きな底面流速を生じる。しかも、放水構造物の足元を洗掘する放水口直下の流速が大きい。また、
- ④洗掘が進行した状態では逆のコアンダー効果が働いて放水流が水面に押し付けられ、その下に循環流が発生するが、波の峰の位相でこの循環流に岸向きの振動流が加わり、放水口直下の砂を巻き上げることとなる。以上のような流況であるため、
- ⑤流れのみの場合よりも波が加わった場合の方が放水口の近くで激しく洗掘される。また、
- ⑥二乗平均波高の規則波を用いた場合は不規則波による場合よりも洗掘深さが小さく、1/10 最大波高の規則波

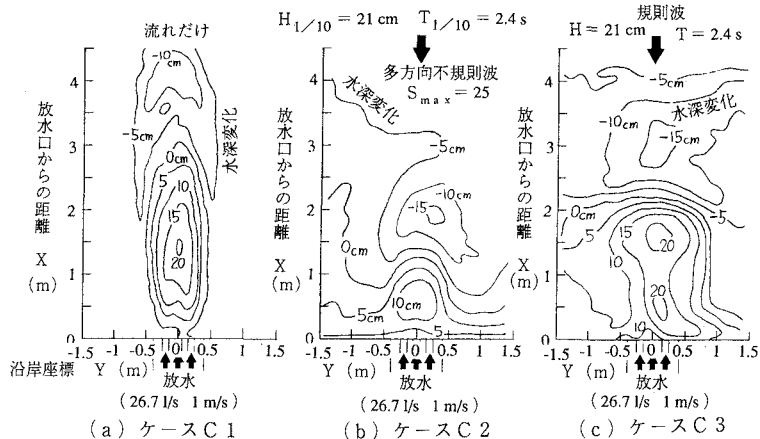


図-7 平面洗掘形状 (16 hr)

を用いた場合は不規則波による場合よりも洗掘深さが大きくなる。

以上の結果、

- ⑦波と水中放水流による洗掘シミュレーションモデルを考える場合には不規則波を 1/10 最大波程度の規則波で代表させ、放水口近くの波と放水流の相互干渉を再現すれば十分であると判断された。

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

牛島 省・清水隆夫 (1990): 乱流モデルを用いた温排水水中放水による海底洗掘の予測, 海岸工学論文集, 第 37 巻, pp. 389-393.