

# SPACの海底洗掘抑止効果と局所洗掘予測解析手法の高精度化

保 坂 稔\*  
清 水 隆夫\*\*  
牛 島 省\*\*\*

**概要** 東北電力㈱と㈱電力中央研究所と共同で開発した海底洗掘抑止工法「SPAC」の効果を確かめるため、実際に施工した東北電力㈱能代火力発電所において現地追跡調査を行ってきた。これまでの調査結果から、SPACによる海底洗掘抑止効果が十分発揮されていることを確認できた。また、調査結果との比較により、SPACの設計上重要となる局所洗掘予測解析手法の高精度化を図ったので、これらの概要を報告する。

## 1. はじめに

火力・原子力など臨海発電所からの温排水を高速で水中放流する際に、放水口前面海底が砂質地盤の場合、放水流と高波浪により海底が洗掘され、放水口構造物の安定性に影響を与える恐れがある。このような洗掘現象に対処するため、水理模型実験を行い捨石を利用した新たな対策工としてSPAC（スパック：Spreading Armor Coatの略）を考案し、断面設計法を確立し実際の現場に採用した<sup>1)</sup>。さらに、捨石の展開幅に沿岸流による放水流のドリフトを加味してSPACの所要幅を決定する平面設計法や展開後の捨石の隙間から長期にわたる砂の吸い出しを防止するための効果的な目つぶし石の投入方法など、合理的な設計法を水理模型実験により確立した<sup>2)</sup>。SPACの断面および3次元展開モデルを図-1、2に示す。

このようにSPACは、外洋に面した砂浜海岸における水中放水口前面の海底洗掘対策工として、東北電力㈱と㈱電力中央研究所と共同で開発したもので、放水口前面の砂質海底を浚渫して捨石層で置換し、洗掘とともに置換した捨石が洗掘孔の放水口側斜面に拡がり、アーマコートを形成して洗掘の進行を効果的に抑止するものである。

本稿では、実際にSPACを施工した東北電力㈱能代火力発電所放水口前面海域において、SPACによる海底洗掘抑止効果を確かめるための現地追跡調査を行ってきた。また、SPACの断面形状を決定するうえで最大洗掘深さを予測することが重要となるが、これまでの調査結果との比較により、局所洗掘予測解析手法の高精度化を図ったので、これらの概要について報告する。

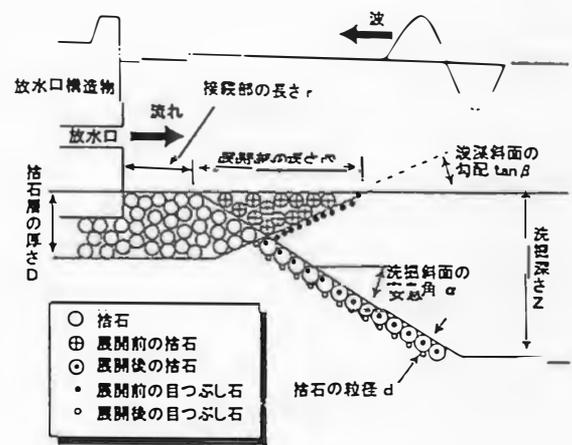


図-1 SPACの断面展開モデル

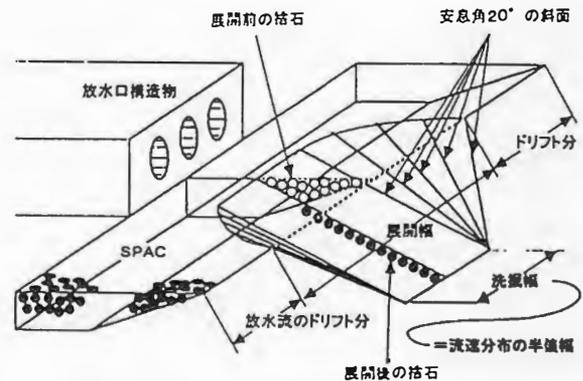


図-2 SPACの3次元展開モデル

## 2. SPACの施工状況と最終展開予想形状

能代火力発電所におけるSPACの施工状況を図-3に示す。SPACは、放水口先端から沖合40mまでの海底に幅52mに亘る範囲に敷設したコンクリートブロック（1個当たり4m角、厚さ1mの大きさ）の先端から延長約30m、幅約70mの範囲で、厚さ約3.2mの捨石層（捨石1個の重量は約1トン）としてコンクリートブロックの周囲を保護するように施工し、平成4年に工事が完了している。ここで、コンクリートブロックはSPACを考案する以前に、放水口からの放流を開始する前の波浪に対する暫定的な洗掘対策工として施



保坂 稔                      清水 隆夫                      牛島 省

\*東北電力㈱ 研究開発センター 土木研究グループ 会員  
\*\*㈱電力中央研究所 我孫子研究所 水理部 上席研究員 会員  
\*\*\*㈱電力中央研究所 我孫子研究所 水理部 主任研究員

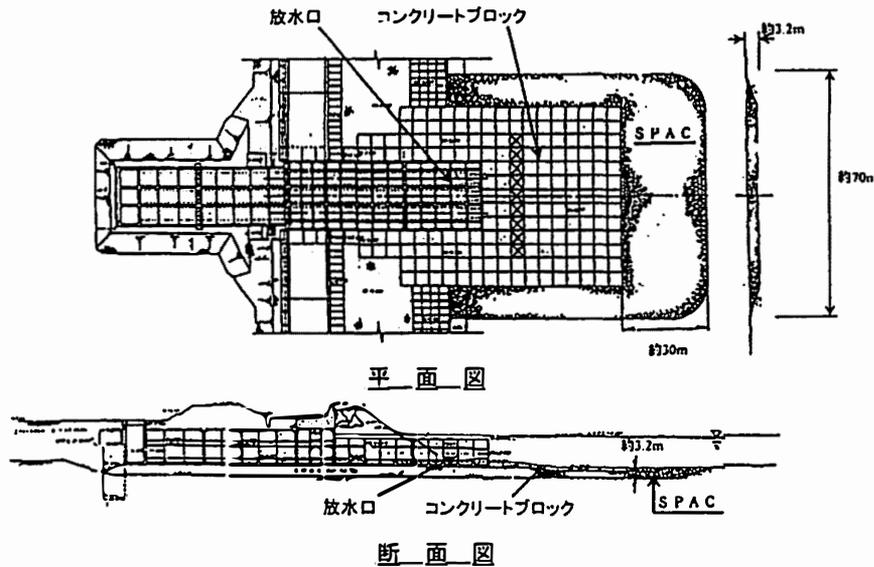


図-3 SPACの施工状況

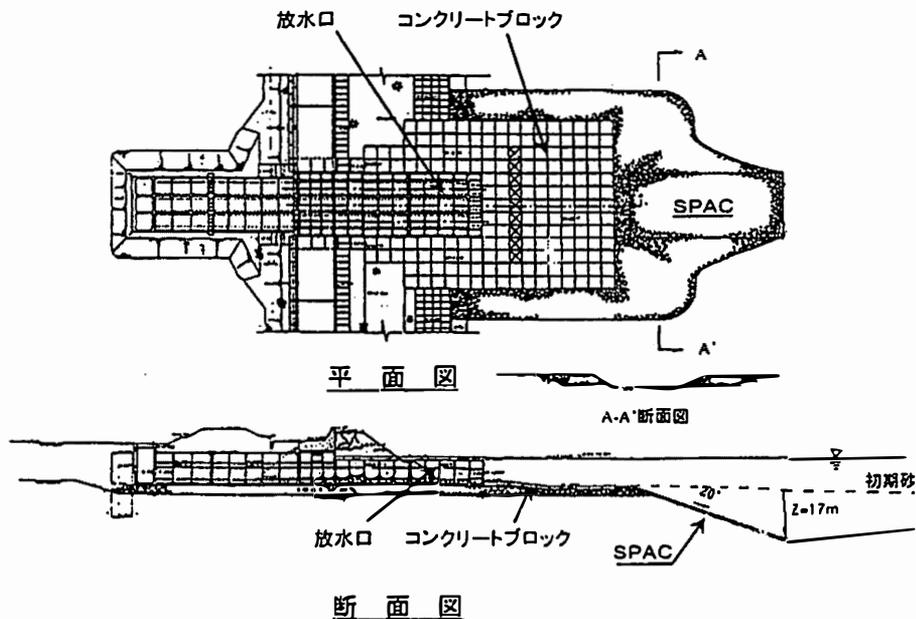


図-4 SPACの最終展開予想形状

工したものである。

SPACの断面形状を設計するうえで、放水流と高波浪により放水口前面の海底がどのように洗掘されるかを予測することが最も重要となる。能代火力発電所の場合、3号機までの放流量を想定して予測した結果、最大洗掘深さが約17m、洗掘斜面の傾斜角が約20°となることが明らかとなり、すり鉢状に洗掘されるものと想定して設計した<sup>3)</sup>。SPACの最終的な展開予想形状を図-4に示す。

### 3. 現地追跡調査

#### (1) 調査概要

現地追跡調査は、SPACによる海底洗掘抑止効果の確認と今後他地点への適用を考慮した設計手法の合理化・高精度化を目的として行った。

調査方法は、音響測深器(PDR-120型(千本電気社製)、SEABAT(RESON社製)等)を使用した深淺測量を行い、放水口前面海域の海底地形の変化状況を確認した。調査時期は、能代火力発電所1号機が運転開始する直前の平成5年5月、その後約1年周期で発電所の定期点検等に合わせて平成6年6月、平成7年5月、平成8年7月

および平成9年5月に実施した。なお、測定結果の比較は、平成4年7月、即ちSPACの施工完了後に行ったものを基準とした。ここで、能代火力発電所1号機および2号機の運転開始日は、それぞれ平成5年5月28日、平成6年12月1日である。調査範囲は、図-5に示すように放水口の中心軸を基準として汀線方向に400m、発

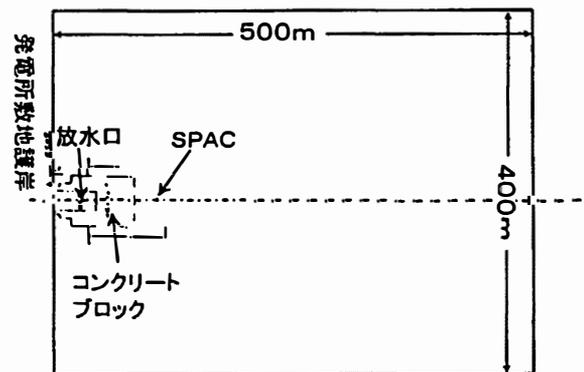


図-5 調査対象範囲

電所敷地護岸から沖合方向に約500mの海域を対象とした。

## (2) 調査結果と考察

これまでの調査結果(放水口前面海域における海底面までの水深の経年変化)を図-6-図-11に示す。これらの図は調査対象範囲内において、水深変化の著しいと思われるSPAC先端付近を中心とした約200m四方の範囲内の測定結果を示したものである。

図-6は、平成4年7月調査時、即ちSPAC施工直後の測定結果で、水深約8.5mの平坦な海底面にSPACが施工されている状態である。

図-7は、平成5年5月調査時の測定結果で、施工したSPACの沖合20-30m付近の水深が約10mとなり、1-2m程度の洗掘領域が確認された。これは1号機の運転開始直前の測定であるが、SPAC施工完了後からの試運転に伴う放水流の影響を受けたものと考えられる。

図-8は、平成6年6月調査時の測定結果で、水深10mの範囲が広がっているほか、SPAC先端付近の水深が約12mで洗掘深さも前年より深くなっており、洗掘の進行が確認された。なお、この時点では、1号機からの本格的な放流と2号機からの試運転に伴う放流が行われている状態である。

図-9は、平成7年5月調査時の測定結果で、SPAC先端付近の水深は約12mで前年と同じであるが、洗掘がSPACの施工領域まで及んでいる状態が確認された。なお、この時点では、1・2号機とも運転開始されており2基分の放流が本格的に行われている状態である。

図-10は、平成8年7月調査時の測定結果で、SPAC先端付近の水深は約14mで、しかも洗掘範囲が沖合方向にも広がっており、これまでと比較してかなり洗掘が進行している状態が確認された。

図-11は、平成9年5月調査時の測定結果で、SPAC先端付近の水深は約14mで、洗掘形状も前年とほぼ同じ状態であることが確認された。ここで、前年に比べて沖合方向に広がっていた水深10m以浅の範囲が放水口側に近づいており、堆積傾向を示していることが明らかである。これは、調査時期の違いによるものと考えられる。即ち、平成8年7月調査時は、春先から夏場にかけて比較的穏やかな波浪を受けた後の測定結果であるのに対し、平成9年5月調査時は、冬季の高波浪を受けた後の測定結果であることから、水深10m以浅の比較的浅い洗掘領域の変化は、波浪による影響を受けているものと推測できる。

以上が放水口前面海域の水深の経年変化を平面的に見たものであるが、当初予測したSPACの最終展開予想形状と比較するため、放水口中心軸上の断面的な水深の経年変化を図-12に示す。図の縦軸は海底面までの水深、横軸は発電所敷地護岸からの距離を示したもので、SPAC先端付近に生じている局所的な洗掘領域の測定結果を示した。

この図からも、前述したとおり発電所の運転開始に伴う放流量の増加とともに、局所的な洗掘が徐々に進行していることが明らかである。しかし、洗掘の進行とともに予め置換した捨石も徐々に展開し始め、1・2号機の放水口からの放流しかない現状においては、SPACによる海底洗掘抑止効果により、平成8年7月調査時点の洗掘形状でほぼ定常状態に達したものと推測できる。なお、この時点での最大洗掘深さは約6m、洗掘斜面の傾斜角は15°程度で、3号機までの放流量を想定して予測した範囲内にあり、SPACを構成する展開部の捨石層にかなり余裕を残した状態にあるといえる。

## 4. 局所洗掘予測解析手法の高精度化

### (1) 従来の局所洗掘予測解析手法とその問題点

前述した能代火力発電所放水口前面海底の局所洗掘予測結果は、牛島ら<sup>4)</sup>が開発した予測手法を用いたものである。この手法は、局所洗掘により時間とともに海底が変形する計算領域内で、温排水の移流拡散過程を2方程式乱流モデルにより計算し、計算された温排水の掃流力等から掃流砂量(海底面上を転がりながら移動する砂の量)と浮遊砂量(海水中を浮遊しながら移動する砂の量)を算出して海底の砂面の高さを求め、局所洗掘の進行過程を計算するもので、数値解析において、これら2つの過程の計算が並行して進められるので、両者は互いに影響を及ぼし合いながら進行していくことになる。

しかし、この手法では、時間的・空間的に変化する砂面形状を空間内に固定された計算格子点を用いて表現していたことから、砂面近傍の解析精度が低かった。また、温排水の移流現象が1次精度の解法で解かれていることなど、流動解析の精度に関しても改善の余地があった。そこで、このような問題に対処するため、3次元移動境界座標系を用いたより高精度の局所洗掘予測解析手法を開発した<sup>5)</sup>。

### (2) 高精度局所洗掘予測解析結果と現地追跡調査結果の比較

この高精度局所洗掘予測解析手法の適応性を検証するため、砂粒子の輸送モデルの改良、波浪による砂粒子の移動のモデル化およびSPAC領域のモデル化など解析手法の一部改良および高度化を図り、現地追跡調査結果との比較を行った<sup>6)</sup>。ここで、SPACは次のような特性を有する底面領域としてモデル化した。

- ① 捨石上に砂の堆積は生じうるものとする。
- ② 捨石上の砂の巻き上げは、砂が堆積している場合にのみ生ずる。
- ③ SPAC領域の低下(洗掘)は、沖側の底面低下量が砂面の安息角を超えた場合にのみ生ずる。
- ④ 捨石の展開に伴うSPAC領域の長さの変化は無視する。

従って、SPACの沖側の砂面が安息角を超えて低下した場合には、SPAC領域は沖側から次々と低下していくこととなる。なお、SPAC領域と砂面の安息角は、実験結果等を考慮して、それぞれ20°および30°とした。

計算では、これまでの現地追跡調査結果と比較するため、1管放流時の定常流況解析を行い、これを基に砂面形状が定常となるまでの局所洗掘解析を行った。さらに、1管放流時の洗掘計算で得られた砂面形状を固定床として、2管放流時の定常流況解析を行い、これを基に局所洗掘解析を行った。計算フローの概略を図-13、計算領域および放水口前面の底面条件を図-14に示す。なお、計算の手順を示すと以下のとおりである(図-13参照)。

- ① 初期条件あるいは非定常計算の過程で与えられた砂面形状に対して、3次元の境界適合座標系を生成する。
- ② この座標系に対応する写像空間中で流動計算を行う。流動計算は図中のループAで行われるが、このループ内では砂面形状は一定と仮定し、流動場がほぼ定常状態となるまで流体計算のみを進める。
- ③ 次に、図中ループBにおいて、②で計算した流動場は変化しないものと仮定して、砂面変形の計算のみを行い、砂面の変形量あるいは砂面変形計算の経過時間が所定の値を超えた場合に、この

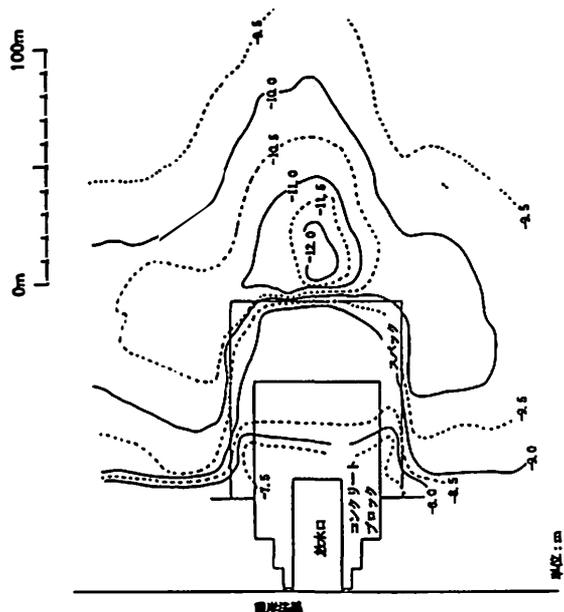


図-6 測定結果(平成4年7月調査時)

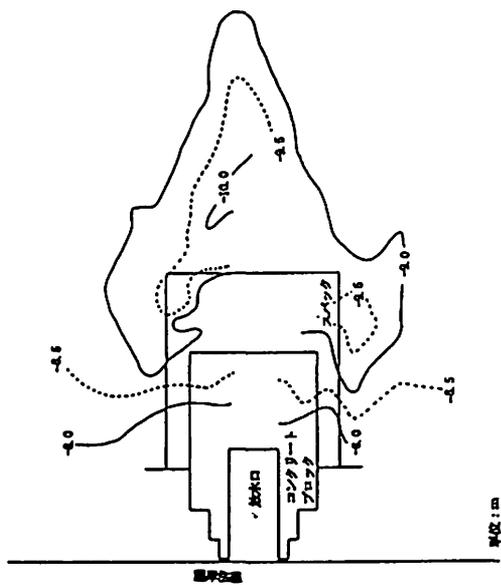


図-7 測定結果(平成5年5月調査時)

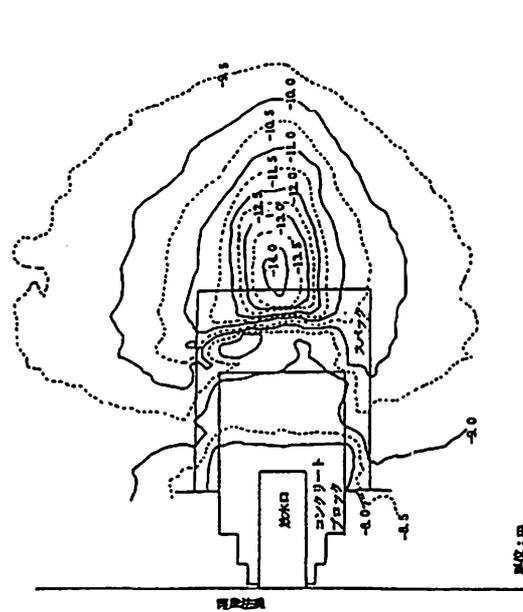


図-8 測定結果(平成6年6月調査時)

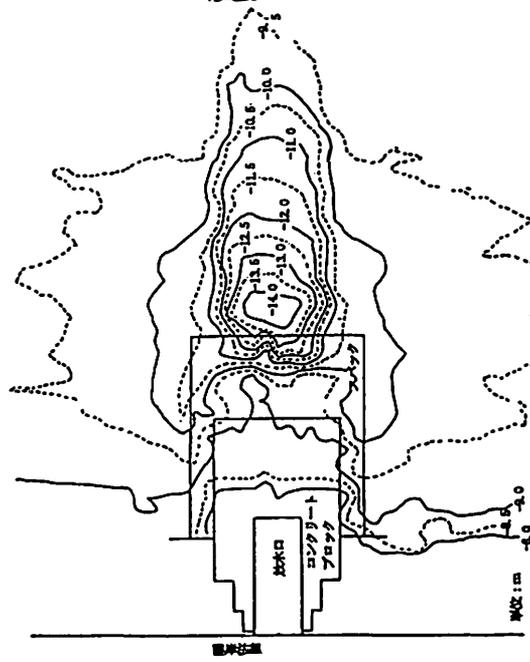


図-9 測定結果(平成7年5月調査時)

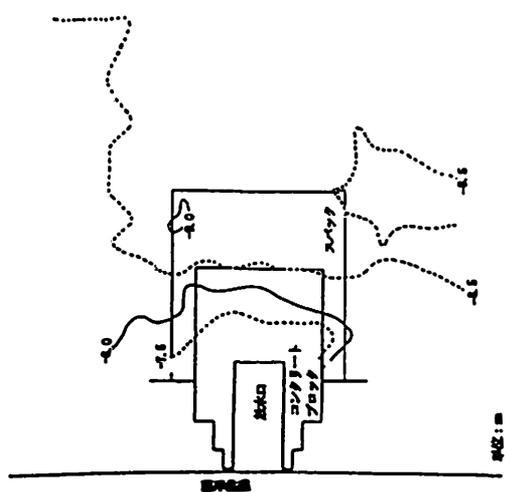


図-10 測定結果(平成8年7月調査時)

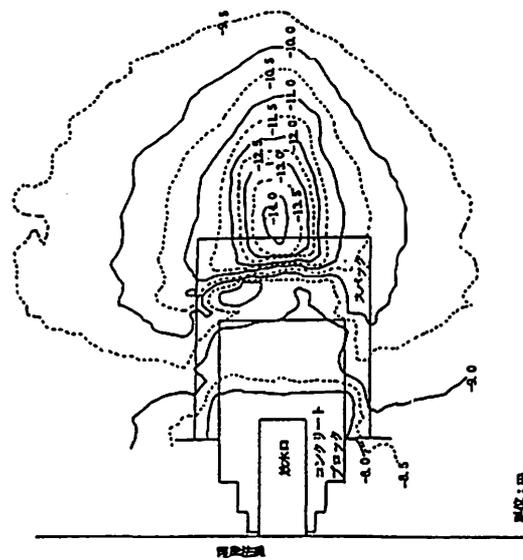


図-11 測定結果(平成9年5月調査時)

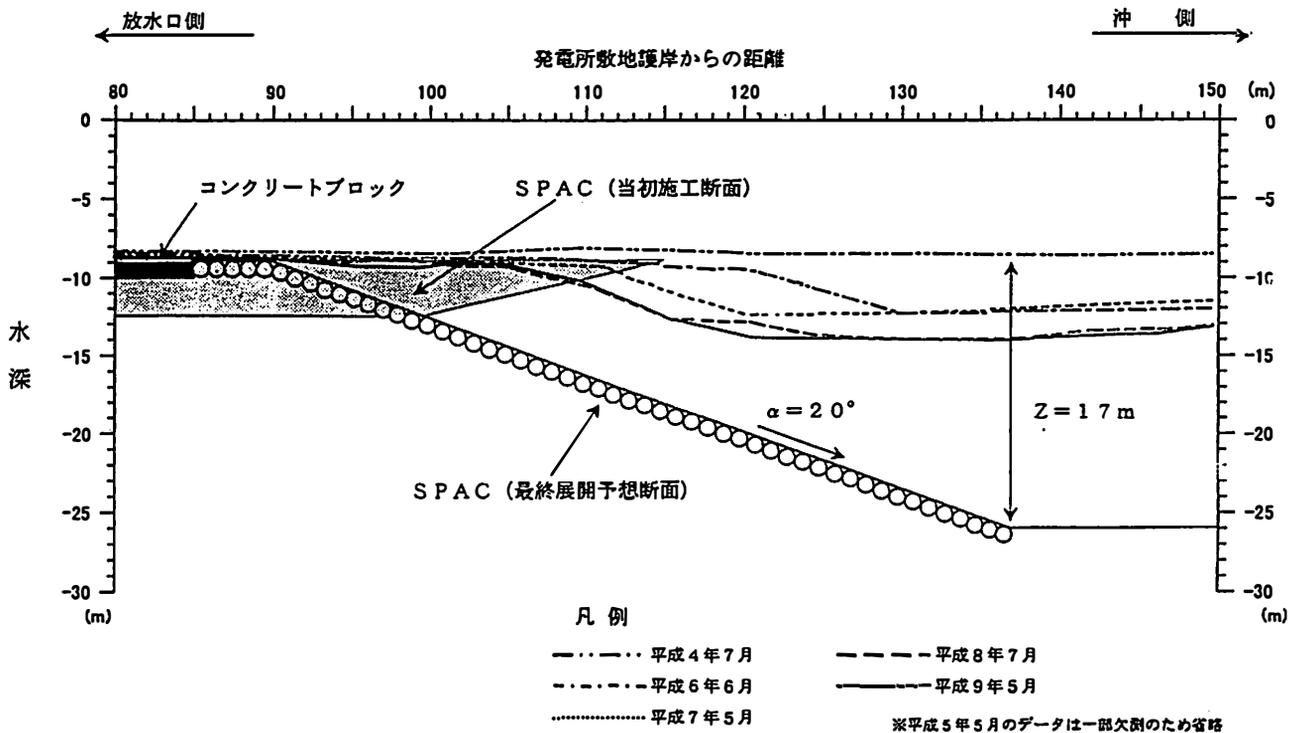


図-12 放水口中心軸上における水深の経年変化

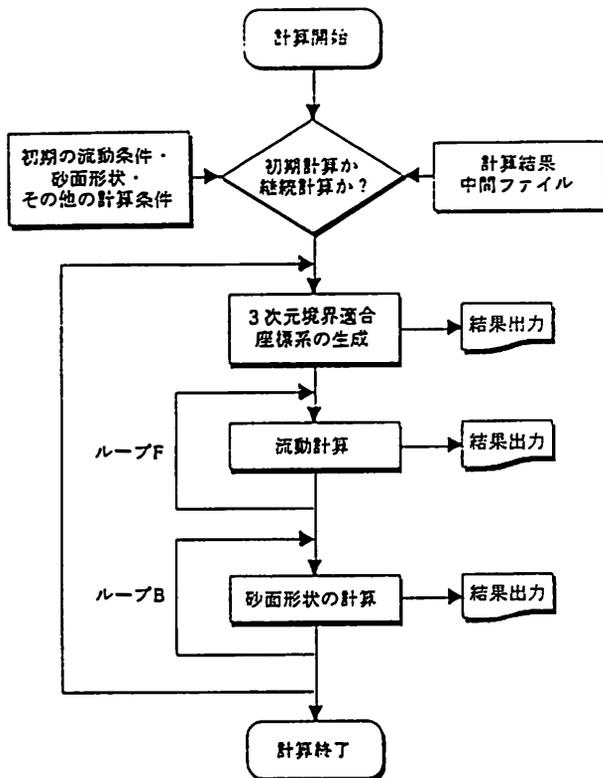


図-13 計算フローの概略

ループの計算を終了する。

④ このように新たに得られた砂面形状に対して、再び3次元の境界適合座標系が生成され、予め設定した回数の繰り返し計算(ループT)を行う。

1管放流時および2管放流時の計算で得られた解析結果と現地追跡調査で得られた実測結果を比較したものを図-15~図-18に示す。ここで、1管放流時の実測結果は、平成5年5月調査時のみで

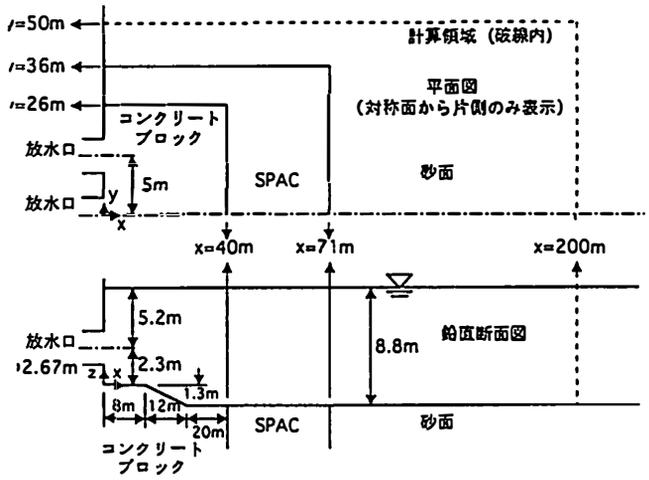


図-14 計算領域および放水口前面の底面条件

あるが、この時点ではまだ1号機の運転開始直前であることや測定データの一部に欠測が生じていたことから、解析結果との比較には、2号機の試運転に伴う放水流の影響を若干含んでいるものの、平成6年6月調査時の実測結果を用いた。

図-15、16は、放水口の中心軸上の鉛直断面で両者の結果を比較したもので、縦軸を初期の砂面高さが0となるように $z + 1.3(m)$ として表示した。

図-15は、1管放流時の砂面形状を比較したもので、両者は良好に一致している。同様に、図-16は、2管放流時の砂面形状を比較したもので、SPACが低下している領域を除いて良好に一致している。このSPACが低下している領域で、実測結果より解析結果の方が低下量が小さくなった原因として、流下方向(x軸方向)の解析格子間隔が4mと大きいため、安息角と比較する際の底面勾配の評価が十分精度よく行えなかったことが考えられる。このことに関して、特にSPAC領域に着目するのであれば、流下方向の解析格

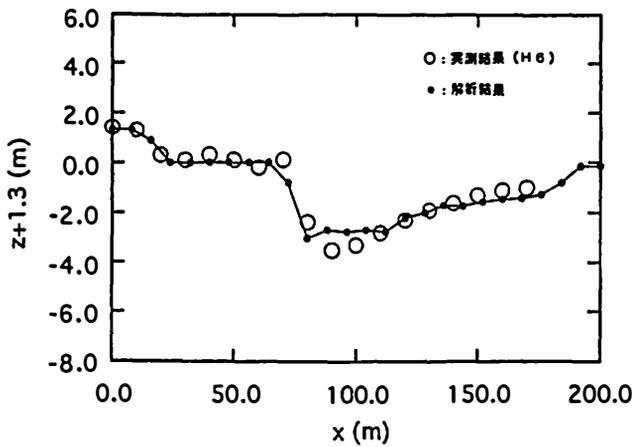


図-15 解析結果と実測結果の比較(1管放流時：鉛直断面)

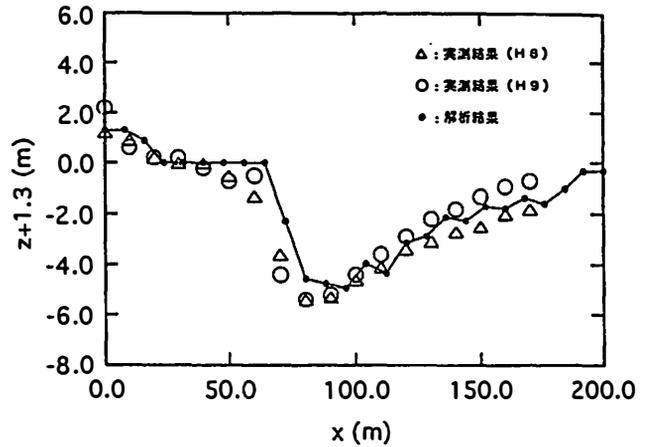


図-16 解析結果と実測結果の比較(2管放流時：鉛直断面)

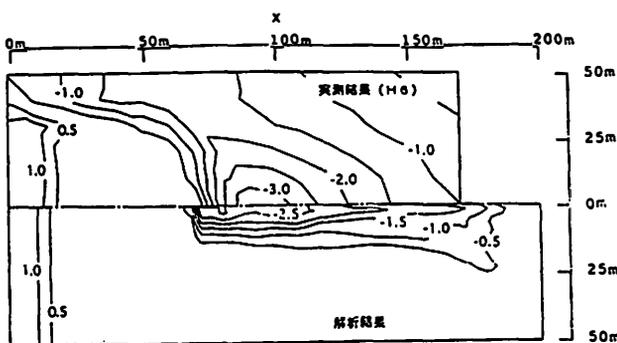


図-17 解析結果と実測結果の比較(1管放流時：等高線表示)

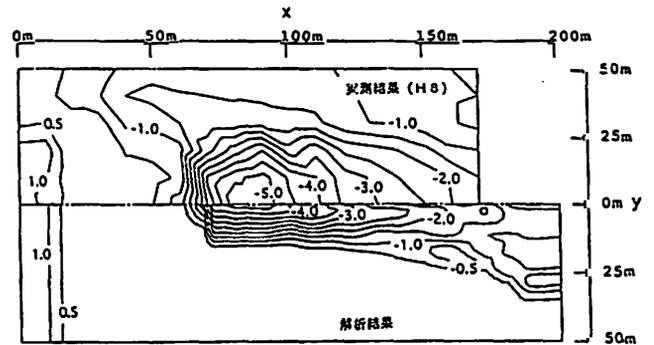


図-18 解析結果と実測結果の比較(2管放流時：等高線表示)

子間隔を狭くすることで、ある程度の精度向上は期待できるものと考えられる。

図-17, 18は、1管放流時および2管放流時の両者の結果を等高線表示で比較したもので、上に実測結果、下に解析結果を示した。

これらの図において、実測結果と解析結果を比較すると、1管放流時および2管放流時とも実測結果の方が洗掘された領域のY軸方向の幅が解析結果より広がっている。この原因として、もし実際の放水流がY軸方向に大きく拡散していると考えた場合、洗掘される範囲は確かに広がるが、掃流力が低減するため洗掘深さが浅くなるものと考えられ、このような放水流の拡散効果が両者の相違をもたらした原因とは考え難い。むしろ、実際の拡散効果は解析結果と同程度で、冬季や荒天時の高波浪の影響により砂面が大きく変形したか、あるいは放水流の流軸がY軸方向に変動しているものと考えられる。この流軸の変動の原因としては、本解析計算では考慮していないY軸方向に作用する波浪や恒流成分等が影響している可能性がある。なお、洗掘幅の両者の相違については、今後検討していく必要があるが、前述した平面設計法によりSPACの所要幅を求めることで、洗掘防止対策として十分対応可能であると考えられる。

### 5. おわりに

以上のように、SPACによる海底洗掘抑止効果を確認するため、実際に施工した能代火力発電所において、現地追跡調査を行ってきた。これまでの調査結果から、現時点では最終的な放流状態ではないものの、その効果が十分発揮されていることを確認できた。

また、調査結果との比較により、SPACの構造設計を行う上で重要となる局所洗掘予測解析手法の高精度化を図ることができた。

今後、能代火力発電所3号機の放水口から放流が開始される時点で現地追跡調査を再開し、最終的な効果の確認を行う計画である。

最後に、現地調査および解析業務に携わられた関係各位に深く感謝の意を表します。

### 参考文献

- 1) 氏家久芳；佐々木明；清水隆夫. 放水流と高波浪における海底洗掘対策工. 電力土木. No.235, 1991, p.9-17.
- 2) 清水隆夫；池野正明；氏家久芳；山内一見. 波と放水流による洗掘対策工SPACの合理的設計. 電力土木. No.256, 1995, p.49-54.
- 3) 牛島 省；清水隆夫. 能代火力発電所放水口の放流に伴う洗掘予測. 電力中央研究所依頼報告. No.U90507, 1990
- 4) 牛島 省；清水隆夫；佐々木明；瀧澤靖彦. 温排水の水中放流による局所洗掘現象の予測手法の開発. 電力中央研究所研究報告. No.U89047, 1990
- 5) 牛島 省. 移動境界座標系を用いた局所洗掘現象の高精度数値解析手法の開発. 電力中央研究所研究報告. No.U95015, 1995
- 6) 牛島 省；清水隆夫；藤野隆司；保坂 稔. 3次元局所洗掘数値解析手法の高精度化と発電所放水口前面への適用性の検証. 電力中央研究所研究報告. No.U97038, 1997