

発電所港湾における港内堆砂量の予測モデル

丸山 康樹*・鹿島 遼一*・成廣 明雄**・近藤 浩右***

1. はじめに

多量の冷却水を港口から取水する火力・原子力発電所港湾では、港内堆砂の低減化は港湾施設の設計上重要な課題の一つである。しかし、港内堆砂現象が複雑であることもあって、港内堆砂量を予測するための基礎資料はほとんどない現状である。このため、著者らは既設の福島第一原子力発電所を対象に、港口部の波浪・流況に関する定点観測をはじめとして種々の現地調査を行ない、その成果の一部を既に報告した¹⁾。今回、これらの調査に加え、高波浪時の漂砂現象を把握することを目的として、波浪・流況および浮遊砂の調査を行った。

本稿では、以上の調査に基づいて粒径別の堆積特性、掃流砂および浮遊砂量と波・流れ共存場の底面剪断力との関係について検討した結果を述べるとともに、実用的な堆砂量予測モデルについて報告する。

2. 現地調査

1979年7月より約2年間、福島第一原子力発電所港湾において実施された現地調査の内容は以下の項目である。

- 1) 港口部に建設したモニタリングポストにおける波・流れの定時観測 (1日4回)。
 - 2) 掃流砂トラップと浮遊砂トラップを用いた漂砂量の測定 (週1回)。水中ポンプ採水による浮遊砂濃度の測定 (港口部と港奥部; 1日2回)。採取試料の粒度分析 (月1回)。
 - 3) 港口部周辺の深浅測量 (700m×700m; 月1回)。
 - 4) 底質の採取および粒度分析 (港口部周辺50地点; 月1回)。
- これらの調査に加え、有義波高2.0m以上の海象条件を目標として以下の調査を行った。
- 5) 波浪・流況と浮遊砂濃度の測定 (港外; 計4回)。
 - 6) 入射波方向スペクトルと港内波高分布の測定 (計4回)。

* 正会員 工修 (財)電力中央研究所 土木技術研究所 環境水理部
海岸水理研究室

** 正会員 東京電力株式会社 原子力建設部

*** 正会員 工修 五洋建設株式会社 土木設計部

高波浪時の浮遊砂濃度測定用に開発した採水器はバッテリーおよびタイマー内蔵型で、電源投入後あらかじめ設定した時間後に採水する方式とした。採水量は約2lで、平均濃度を得るために1~2分間で採水するように工夫した (写真-1)。5)、6)の波浪・流況測定には、バ

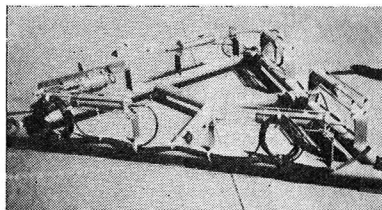


写真-1 自動採水器

ッテリー、時計およびデジタル式カセットデータレコーダーを内蔵した水圧式波高計および電磁流速計を用いた。これら波高計および流速計はケーブルで結線し、完全に同期させることが可能である (写真-2)。港内波高

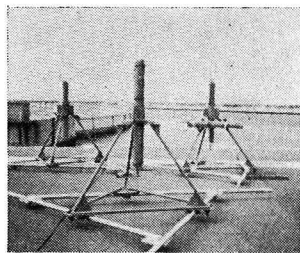


写真-2 水圧式波高計と電磁流速計

分布測定には水圧式波高計および移動の容易な加速度2回積分方式のブイ式波高計を用いた。

高波浪時の調査にあたっては、静穏時にあらかじめ架台に取付けた計器を起重機船で所定の位置に設置し、高波浪来襲直前にダイバーにより電源を入れて自動計測を行った後、再び静穏時に回収する方式を採用した。しかしながら、計器の故障、予想以上の高波浪による架台の埋没、転倒あるいは流失等の原因により、データの取得率は必ずしも満足すべきものではなかった。特に採水器の場合には、有義波高2m以上で得られたデータはわずかに1ケースのみであった。

3. 調査結果の検討

年平均的な港内堆砂量と冷却水取水量および波浪エネ

ルギーとの関係は、前報で既に述べた。ここでは、粒径別に見た場合の土砂の流入・堆積特性と、掃流砂および浮遊砂と外力の関係について、検討を進めた結果について述べる。

3.1 砂の流入形態と堆積特性

堆積特性の検討範囲は図-1に破線で示す港内測深領域である。

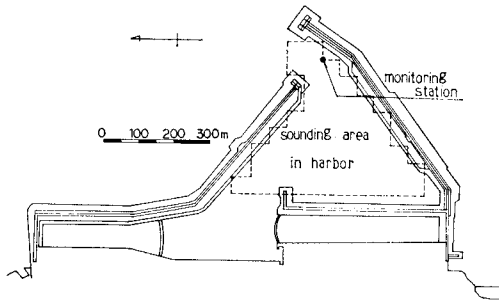


図-1 港内の測深領域

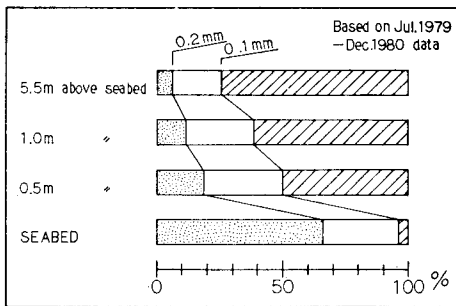


図-2 港口部における底質・浮遊砂の粒度組成

港口部の底質および浮遊砂の粒度組成を図-2に、また粒径別の堆積分布を図-3に示した。港口部の浮遊砂には、底質にほとんど含まれない粒径0.1mm未満の成分が50%以上も含まれ、その割合は上層部ほど大きい。この成分は冷却水の取水流に伴ない港外から流入したものであり、港口部を通過し、一部が港奥部の静穏域に堆積する。一方、粒径0.2mm以上の成分は、波高および流速の減衰に応じて港口部周辺に大半が堆積する。

領域内への堆積量を掃流砂によるものと浮遊砂によるものに分離し、さらに浮遊砂については粒径別に港内への流入量とnetの堆積量を求め、図-4に示した。ここで、netの堆積量とは港内側深領域に実質的に堆積する量を意味する。浮遊砂による流入量は濃度と取水量の積から推定し、掃流砂による流入量は(深浅図より求めた堆積量)-(浮遊砂によるnetの堆積量)として求めた。港口部周辺の堆積には粒径0.1mm未満の成分はほとんど見られず、この成分を除いて考えると、堆積量に占める掃流砂と浮遊砂の割合いはほぼ同程度と推察される。

1979.12.4 - 1980.5.29

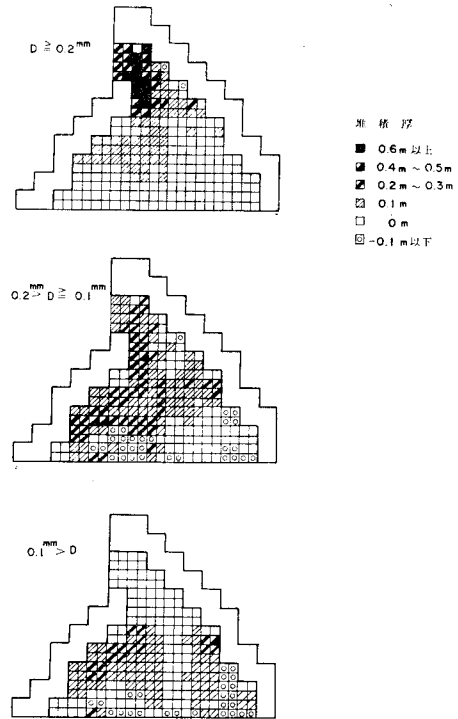


図-3 粒径別の堆積層厚分布

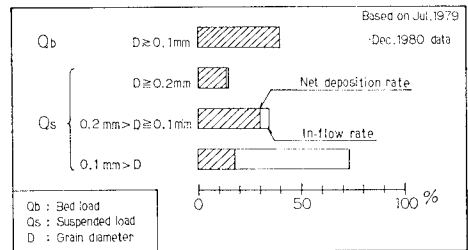


図-4 堆積量に占める掃流砂と浮遊砂の割合

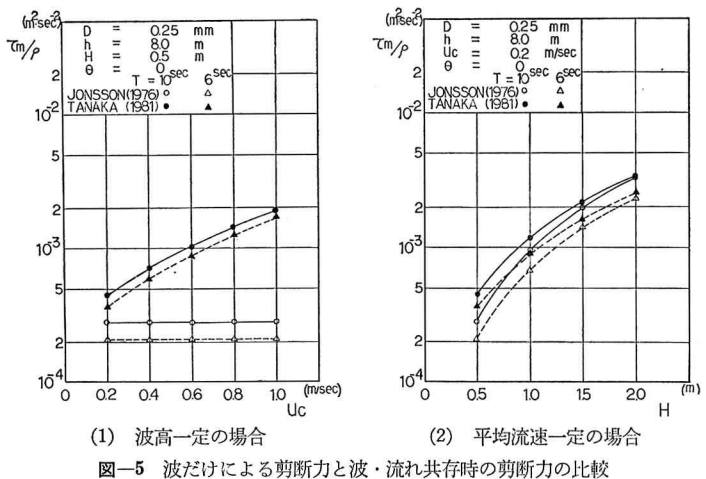
3.2 掃流砂および浮遊砂

(1) 波・流れ共存場の底面剪断力の特性

発電所港湾では、港口および港内に波と冷却水取水に伴なう平均流が共存する例が多い。このような条件での底面剪断力の特性を把握するために、波だけによる剪断力 τ_1 [Jonsson (1976)²⁾] と波・流れ共存時の剪断力 τ_2 [Tanaka and Shuto (1981)³⁾] とを比較検討した。

図-5は τ_1 , τ_2 の最大剪断力について τ_m/ρ (ρ : 海水密度) を比較したもので、平均流速 u_0 を変化させた例(波高 H は一定で 0.5m)と波高 H を変化させた例(u_0 は一定で 0.2m/sec)である。計算条件は調査地点港口部を想定し、粒径 $D=0.25$ mm, 水深 $h=8$ m, 波と流れのなす角 $\theta=0^\circ$ とし、周期 T は 10 sec, 6 sec の2ケースとした。

調査地点の港口部における通常の外力条件 [$H=0.5$ m,



(1) 波高一定の場合
(2) 平均流速一定の場合

図-5 波だけによる剪断力と波・流れ共存時の剪断力の比較

$u_0=0.2\sim0.4$ m/sec (港口部断面上で異なる⁴⁾) では、 τ_2 の最大剪断力は τ_1 のそれに比べ 1.5~3 倍程度大きくなる事が図から読み取れる。また、 $u_0=0.2$ m/sec の条件では、 $H=2.0$ m 程度になると、 τ_1 と τ_2 の最大剪断力は一致するようになるが、このような条件の発生頻度は当港湾では非常に少ない。以上の特性から、以下では総て底面剪断力の評価に波・流れ共存場の式を用いることにした。

(2) 掃流砂と底面剪断力の関係

掃流砂の測定に用いたトラップを写真-3に示す。た

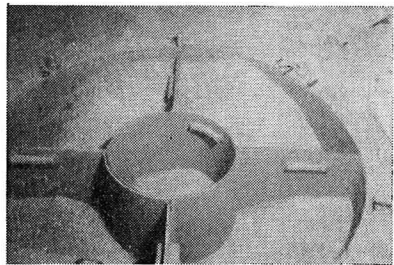


写真-3 掃流砂トラップによる捕砂状況 (水中写真)

だし、捕砂量は底面近傍で前後運動する砂の移動量に対応し、必ずしも net の移動量には対応しない。図-6 に捕砂量 Q (kg/day) と最大シールズ数 ϕ_m との関係を示した。 $\phi_m>0.1$ の傾向に着目すると、 $Q\propto\phi_m^{3/2}$ の関係が認められる。ただし、比例定数にはトラップの捕砂効率の影響が含まれる。 $\phi_m<0.1$ では、ばらつきは大きいものの Q は急激に減少する傾向を示し、限界シールズ数 ϕ_{mc} は約 0.04 と推定できる。

(3) 浮遊砂と底面剪断力の関係

表-1 は港口部モニタリングポストにおける浮遊砂濃度の測定結果 (約 600 ケ

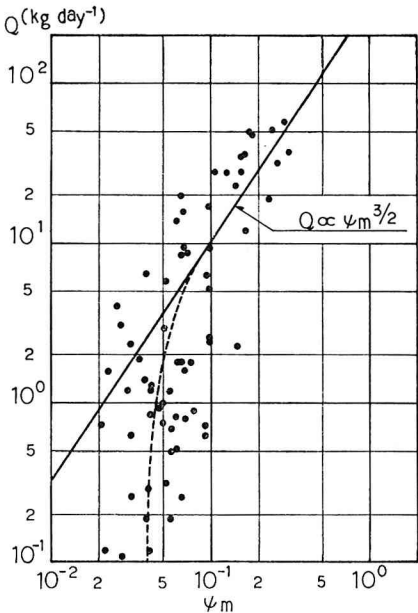


図-6 掃流砂トラップ捕砂量と最大シールズ数の関係

表-1 港口部浮遊砂濃度測定結果

No.	日 時	中央粒径 D (mm)	水 深 h (m)	平均流速 u_c (m/sec)	有義波高 $H_{1/3}$ (m)	有義波周期 $T_{1/3}$ (sec)	浮 遊 砂 濃 度 (ppm)		
							底面 +0.5 m	底面 +1.0 m	底面 +5.5 m
1	1980 3/ 8 9:00	0.20	7.1	0.18	1.16	6.7	456	103	89
2	4/18 9:00	0.24	6.8	0.44	1.00	7.6	261	77	56
3	15:00	0.24	6.8	0.53	1.10	8.7	213	87	39
4	5/ 1 15:00	0.23	7.3	0.16	0.88	6.6	163	48	32
5	5/ 2 15:00	0.23	7.1	0.07	1.11	8.6	332	126	43
6	11/26 15:00	0.20	7.2	0.17	1.22	8.0	101	44	22
7	11/27 9:00	0.20	6.9	0.16	1.12	9.4	110	47	17
8	15:00	0.20	6.9	0.14	0.94	9.8	109	55	7
9	12/ 1 9:00	0.20	6.7	0.16	1.12	9.4	160	101	52
10	15:00	0.20	6.6	0.17	1.00	9.2	93	50	33

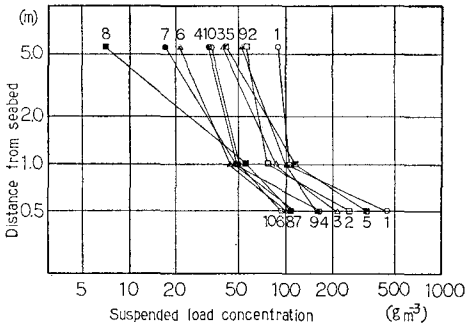


図-7 浮遊砂濃度の鉛直分布

ース)のうち、比較的高波浪時のもの 10 ケースを外力の測定結果とともに示したもので、その鉛直分布を図-7 に示した。浮遊砂濃度は底層ほど高く、濃度分布は両対数紙上で「く」の字型である。しかし、波高が小さくなると上層と底層の濃度差は小さくなり、海底面から 0.5m と 5.5m 上方における濃度の比は全ケース (ほぼ 1 年間) の平均値で約 3:1 程度であった。この理由は、浮遊砂の大半を占める細粒子成分が水深方向にほぼ一様な濃度分布で流入するためである。

図-8 は海底面から 0.5m 上方の平均浮遊砂濃度 $\bar{C}$ と ϕ_m の関係を外力段階別の代表 40 ケース (高波浪時の採水器データも含む) について整理したものである。全体的に $\bar{C} \propto \phi_m$ の関係が認められる。海底面から 0.5m 上方における浮遊砂にも、その地点で巻上げられた底質だけでなく、細粒子成分がかなり含まれるため、限界シールズ数は掃流砂の場合ほど明確ではない。

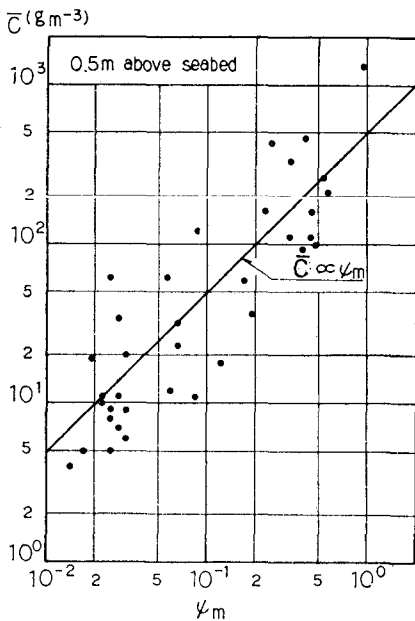


図-8 浮遊砂濃度と最大シールズ数の関係

4. 港内堆砂量予測モデル

予測モデルの構成に当たり、次の 2 点を前提とした。

- ① 港外側には供給源となる砂が十分に存在すると仮定する。
- ② 粒径 0.1mm 未満の土砂に代表される細粒子成分は波・流れ等の外力条件と直接結びつけることが難しく、いわゆる wash load と考えられ、モデルの対象外とする。

この 2 つの条件が成立すれば、港内堆砂量の計算は港口部を通過する wash load 以外の成分を求めることに等しい。

掃流砂および浮遊砂の検討結果より、各々の移動量は以下のように推定される。

$$\text{掃流砂の移動量} \sim \phi_m \cdot \phi_m^{1/2} \sim \phi \cdot u$$

$$\text{浮遊砂の移動量} \sim \text{浮遊砂濃度} \times u \sim \phi \cdot u$$

すなわち、ともにパワー [Bagnold (1963)⁵⁾] に比例すると考えられる。そこで、両者を合わせた net の砂輸送量 q (見かけの体積) の表示式として次式を仮定した。限界シールズ数は浮遊砂に関しては認められず、また掃流砂と浮遊砂の比率がほぼ等しいことから無視しても妥当であると考えた。

$$\frac{q}{\sigma D^2} = \frac{\alpha}{1-\varepsilon} \cdot \frac{1}{\sigma D} \cdot |\phi| \cdot u \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに

$$\phi = \tau / \rho g (s-1) D \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$u = u_0 + u_w \cos \sigma t \quad \dots\dots\dots (3)$$

σ は角周波数、 ε は砂の空隙率、 S は底質と海水の密度比、 τ は底面剪断力、 u_w は波による底面流速振幅であり、 — は波一周期間の時間平均を表す。漂砂量がパワーに比例するとした同種の表示は、沿岸漂砂量を取扱った Komar (1977)⁶⁾ も用いている。また (1) 式の右辺を $\phi^{3/2}$ と近似するならば、Sleath (1978)⁷⁾、渡辺 (1981)⁸⁾ と同様な表示となる。港内堆砂量は (1) 式を港口断面上で積分して求めることができる。

港口部における毎日の波と流れのデータを用いて約 1 年半の累積堆砂量を計算し、wash load による影響の小さい港口部周辺の実測した堆砂量と比較して、(1) 式中の係数 α ($=0.92$) を定めた。ただし、粒径は港口部中央粒径の年間平均値 0.22mm の一定値として計算した。推定値に $\pm 20\%$ の誤差を考慮し、1979 年 7 月～1980 年 11 月の各月ごとに累積堆砂量の推定範囲を実測値と比べたものが図-9 である。実測値と推定値は良好に一致する。

比較のため、Madsen and Grant (1976)⁹⁾ の漂砂量算定式中の底面剪断力に波・流れ共存場の式を適用した場合についても計算を行なった。先と同じ期間中の累積堆砂量の計算結果は実測値の約 1/8 であった。また、この差

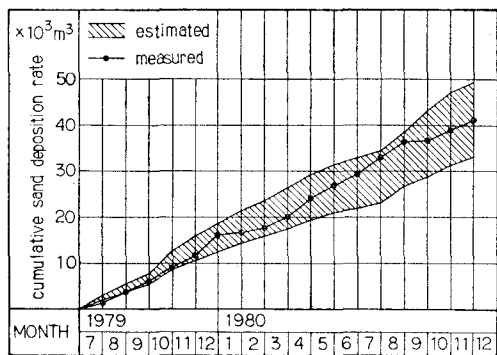


図-9 堆砂量推定値と実測値の比較

を算定式の比例定数で調整したとしても、月別堆砂量の最大値は最小値の約 50 倍にも達しており、実際の現象とはかけ離れるようである。

5. おわりに

種々の現地調査データを解析し、冷却水取水港湾の港内堆砂量に関して実用的な予測モデルを開発した。本モデルにより港口部周辺への堆砂量は良好な精度で再現され、維持浚渫土量を最小にする港湾設計に応用することも可能である。今後の課題としては、港外側の砂の堆積現象の把握、細粒子成分の定量的評価等が挙げられよう。また、今回高波浪時調査で得た経験を踏まえ、さらに調

査手法を改良していく予定である。

本研究の実施にあたり、東京大学堀川清司教授に貴重な御意見を賜った。ここに記し、感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 丸山康樹・鹿島遼一・近藤浩右：発電所港湾における港内堆砂に関する現地調査，第 28 回海岸工学講演会論文集，pp. 280~284, 1981.
- 2) Jonsson, I. G. and N. A. Carlsen: Experimental and theoretical investigations in an oscillatory turbulent boundary layer, Jour. of Hydraulic Research, Vol. 14, No. 1, pp. 45~60, 1976.
- 3) Tanaka, H. and N. Shuto: Friction coefficient for a wave-current coexistent system, Coastal Eng. in Japan, pp. 105~128, 1981.
- 4) 前出 1).
- 5) Bagnold, R. A.: Mechanics of Marine Sedimentation, in "The Sea", Vol. 3, ed. M. N. Hill, Interscience, pp. 507~553, 1963.
- 6) Komar, P. D.: Beach sand transport, distribution and total drit, Jour. of the Waterway Port Coastal and Ocean Division, ASCE, Vol. 103, No. WW2, pp. 225~239, 1977.
- 7) Sleath, J. F. A.: Measurements of bed load in oscillatory flow, Jour. of the Waterway Port Coastal and Ocean Division, ASCE, Vol. 104, No. WW4, pp. 291~307, 1978.
- 8) 渡辺 晃：海浜流と海岸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，pp. 285~289, 1981.
- 9) Madsen, O. S. and W. D. Grant: Quantitative description of sediment transport by waves, Proc. 15th Conf. on Coastal Eng., pp. 1093~1112, 1976.