

取水港湾におけるシルテーションについて

近藤浩右*・清水琢三**・金山進**
鈴木義和***・丸山康樹****・鹿島遼一*****

1. ま え が き

多量の冷却水を港口より取水している発電所港湾におけるシルテーションは、外かく施設によって確保された静穏域内に港外の浮遊細粒土砂が流入・沈降するという形で進行し、微細粒子を多く含む底質を有する海域においては無視しえない問題となる。

取水港湾における堆砂現象については、これまで福島第一原子力地点を対象として、総合的な現地調査に基づく広汎なデータの収集・解析が行われ、港内堆砂の実態が明らかにされるとともに、港口からの流入砂量を予測する手法が開発されている〔丸山ら^{1),2)}〕。しかしながら、砂粒子成分と全く異った性質を有する細粒子成分の挙動については、実験室においても現地においても、未だ定量的な解明が十分になされていないのが現状である。福島第一原子力地点では、港奥部におけるシルト・粘土の堆積量が全堆積量の20%以上を占めるため、長期的な復旧計画を立てる上で無視することはできない。そこで本研究では、福島第一原子力地点で得られた細粒子成分に関する種々の現地データを再整理し、取水港湾におけるシルテーションの定量的な評価を試みた。

2. 福島第一地点におけるシルテーションの現状

2.1 シルテーションに関する現地調査の概要

昭和57年7月より約2年間にわたり福島第一原子力地点で実施された現地調査の内容については既に報告されているが^{1),2)}、ここではシルテーションの解析に用いた現地調査の概要について述べる。

図-1に示す港口部および港奥部モニタリングポイントにおいて、水中ポンプ採水による港内流入・流出浮遊土砂濃度調査を実施した。底面からの採水高さは、港口部が0.5, 1.0, 5.5m、港奥部が0.5, 1.0, 3.5mの各3点であり、9時と15時の1日2回行った。さらに、採

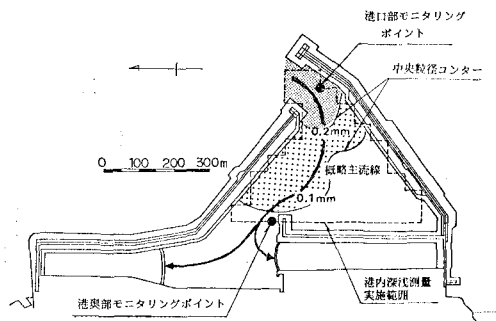


図-1 福島第一原子力地点の概要

水された試料を約1ヶ月毎に集めて採水高さ別に粒度試験を行った。港口部と港奥部の同時観測データとしては、昭和55年2月から12月までの約1年間得られており、今回の検討では後述するシミュレーションモデルの検証データとして用いている。

2.2 細粒子成分の港内堆積特性

図-1に示した底質の中央粒径コンターによれば、港口部では0.2mm以上の砂粒子成分の堆積が、港奥部では0.1mm未満の細粒子成分の堆積が主体であることがわかる。図中には概略の主流線も描かれているが、中央粒径のコンターも主流線に沿って舌状に港内に引き込まれている。これは、港口では波・流れの外力が大きいのにに対し、港内では波高減衰が大きいいため、粒径の大きいものから順に移動限界掃流力以下になって堆積するからである。また、浮遊細粒子成分も静穏でしかも取水流速が小さくなった港奥では沈降しやすくなるからである。図-1に示す港内深浅測量実施範囲では0.1mm未満の細粒子成分の堆積量が全体の約20%を占める。

2.3 港口流入浮遊土砂濃度と気・海象条件との相関

細粒子成分の港内堆積を予測するためには、港口から港内へ流入する細粒子成分濃度を境界条件として与える必要がある。そこで、粒径0.1mm未満の細粒子成分が約74%を占める港口部海底面上5.5mにおける浮遊土砂濃度について気・海象条件との相関を調べた。気・海象条件としては、①降雨量、②気温、③水温、④冷却水取水量、⑤入射波の有義波高、⑥入射波の有義波周期を選び、昭和55年1月から12月までの1年間につ

* 正会員 工修 五洋建建(株) 技術部技術企画課

** 正会員 工修 五洋建建(株) 土木設計部

*** 正会員 工修 東京電力(株) 柏崎刈羽原子力建設所

**** 正会員 工博 (財)電力中央研究所 我孫子研究所 水理部

***** 正会員 工修 (財)電力中央研究所 我孫子研究所 水理部

いて検討した。

相関解析の結果、①～④と浮遊土砂濃度の間には明瞭な関係はみられず、⑤の有義波高との相関が最も顕著であった。しかも、当日の波高のみならず前日の波高も影響しており、底面上 5.5m における浮遊土砂濃度 C の推定式として次式が得られた。

$$C = 5.04 + 3.47H_1^2 + 1.95H_2^2 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 H_1 : 当日の入射波の有義波高、 H_2 : 前日の有義波高である。図-2 は実測値と式 (1) の推定値を比較したものであるが、推定値は実測値の変化傾向を比較的良く再現している。海域における細粒子成分濃度は波による底面剪断応力と関係が深いものと考えられ、また波による底面剪断応力はほぼ波高の 2 乗に比例するので、上記の結果はかなり妥当性が高いものと考えられる。

一方、港口流入濃度調査結果によれば、底面上 5.5m における濃度 C と 0.1mm 未満の細粒子成分の鉛直方向平均濃度 C_0 はほぼ同一であることがわかっている。以下、検討では港口流入細粒子成分濃度 C_0 も式 (1) で推定できるものと仮定した。

3. 取水港湾におけるシルテーションのモデル化

3.1 細粒子成分の港内堆積予測モデル

(1) 仮想水路による 1 次元モデル

港内の堆積現象は取水流が支配的となるため、図-3 に示すように港内を仮想水路にみたてた簡便な取り扱いが可能である。そこで、港内を主流線方向と等間隔な幅 25m の台形要素に分割し、各要素内では波、流れ、濃度などの諸量が一定値をとるものとして細粒子成分の輸送、堆積を表現した。なお、仮想水路の幅は現地調査ならびに平面的な流況シミュレーションの結果を参考に設定した。また、港内の流れは定常とみなせるので、取水流量から容易に算定できる。

港内の波高分布は、あらかじめ Green 関数を用いた方法により各要素ごとに波高比を求めておき、入射波高を乗じることにより評価した。港内の波向はほぼ流れの方向と同一とみなせるため、波・流れ共存場の底面剪断応

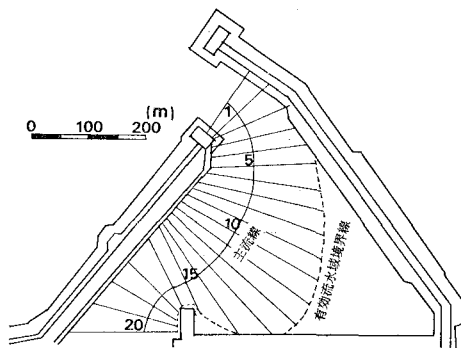


図-3 港湾形状のモデル化と領域分割

力は波と流れの交差角を 0 として田中・首藤³⁾の評価法を用いた。

(2) 細粒子成分の挙動の定式化

細粒子成分の挙動は、鉛直方向に一樣な流れを仮定すれば、次式の 1 次元の移流拡散方程式で表される。

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} - E_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} = (q - w_f c_{bed})/h \quad \dots\dots (2)$$

ここに、 c : 平均濃度、 u : 平均流速、 E_x : 流下方向の渦動拡散係数、 q : 底面からの巻き上げフラックス、 w_f : 沈降速度、 c_{bed} : 底面濃度、 h : 水深である。

本モデルでは、取水に伴う流れが卓越する場でのシルテーションを扱っているため、移流項が拡散項に比べて支配的となるので、拡散項は無視した。また、長期的な堆積予測を目的としているため、港口からの流入濃度を 1 日間一定と仮定している。これに対して、平均流速は 0.3m/s、格子間隔は 25m であるから、局所項は移流項に比べて無視できる。したがって、式 (2) は

$$u \frac{\partial c}{\partial x} = (q - w_f c_{bed})/h \quad \dots\dots\dots (3)$$

で表され、本モデルでは 1 日という時間ステップ毎に流下方向の濃度分布が平衡状態に達している、いわば擬定常の現象を扱うことになる。また、式 (3) の右辺第 1 項は底面からの巻き上げフラックスを、第 2 項は沈降フラックスを表しており、そのバランスにより濃度の空間分布が求められる。

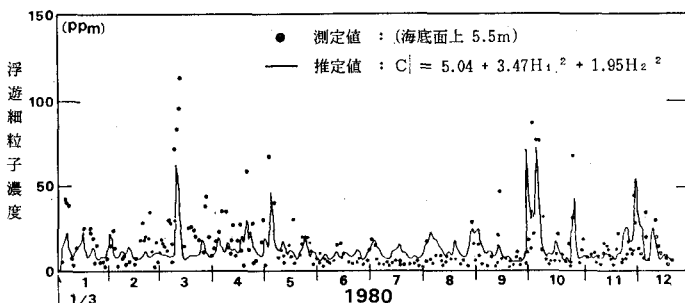


図-2 港口流入浮遊土砂濃度の実測値と推定値の比較

今、取水港湾におけるシルテーションを考えると、基本的に移流・沈降現象が支配的であると考えられるが、高波浪時には再浮遊現象が生じていることも考えられる。そこで、巻き上げのない場合(モデル A)と巻き上げのある場合(モデル B)の両者についてモデル化を行った。

また、混合粒径の概念を導入するため、以下においては、系内の細粒子成分のうち流水中に浮遊しているものに対する平均沈降速度を w_f 、全成分に対する

平均沈降速度を w_0 と定義する。

a) モデル A

Mehta ら⁴⁾によれば、一般にシルトの堆積過程では、流水中の濃度は初期濃度 c_0 から急激に低下し、時間とともに指数関数的にある一定濃度 c_{eq} に収束することが示されている。すなわち、濃度の時間変化は次式で与えられる。

$$dc/dt = \gamma(c_{eq} - c) \dots\dots\dots (4)$$

一方、McLaughlin の関係式より

$$w_f \cdot c_{bed} = -h dc/dt \dots\dots\dots (5)$$

であるから、次式の関係が得られる。

$$\gamma(c_{eq} - c) = -w_f \cdot c / \beta h \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 β は底面濃度 c_{bed} に対する平均濃度 c の比である。初期状態においては全ての成分が浮遊しているのて $w_f = w_0$ であり、式 (6) は静水状態 ($c_{eq} = 0$) においても成立するから γ は次式で表わされる。

$$\gamma = w_0 / \beta h \dots\dots\dots (7)$$

式 (6) と式 (7) より w_f は次式で与えられる。

$$w_f = (1 - c_{eq}/c) w_0 \dots\dots\dots (8)$$

モデル A では堆積過程を考えているので、式 (3) の巻き上げフラックス q は 0 となる。したがって、式 (8) を式 (3) に代入すると堆積過程を表す基礎式として、

$$u \frac{\partial c}{\partial x} = -\frac{w_f c_{bed}}{h} = \gamma(c_{eq} - c) \dots\dots\dots (9)$$

が得られる。

定常流中の堆積過程における濃度の平衡状態は、流れの強さに応じて定まる一定粒径以下の成分が沈降し得ない状態として把えることができるので、外海からの流入シルトの粒度構成比が不変とすれば、その量は外海からの流入濃度に比例して変化するものと考えられる。すなわち、Mehta ら⁴⁾、楠田⁵⁾と同様に、 c_{eq}/c_0 は底面剪断応力 τ の関数として表すことができる。本モデルでは c_{eq}/c_0 を式 (10) で与え、定数 α_1 、指数 n_1 は実測結果に適合するように定めた。

$$\frac{c_{eq}}{c_0} = \alpha_1 \cdot \tau^{n_1} \dots\dots\dots (10)$$

b) モデル B

巻き上げと沈降が同時に存在する場合には Sheng ら⁶⁾と同様に、式 (3) を次式で表した。

$$u \frac{\partial c}{\partial x} = \frac{w_0}{\beta h} (c'_{eq} - c) = \gamma(c'_{eq} - c) \dots\dots\dots (11)$$

ここに、 $c'_{eq} (= \beta q / w_0)$ は巻き上げフラックスに等価な濃度で、 c と c'_{eq} が等しいとき平衡状態となる。 c'_{eq} は初期濃度に依存せず、底面剪断応力 τ での関数として評価するのが妥当であるので、式 (12) で表した。

$$c'_{eq} = \alpha_2 \cdot \tau^{n_2} \dots\dots\dots (12)$$

なお、巻き上げが生じる場合には、系内の全ての粒径成分が沈降フラックスに寄与する可能性があるので w_f

として w_0 を用いた。

以上のように、堆積過程のみの場合と再浮遊過程を含む場合に分けてモデル化を行ったが、式 (9) と式 (11) を比較すると、平衡濃度が初期濃度に依存するかどうかを除けば全く、同一の形で記述されていることがわかる。

(3) 底質の保存則

細粒子成分の主流線方向の濃度変化と底面地形の釣り合いは次式で表される。

$$\rho_s g (1 - \lambda) \frac{1}{h} \frac{\partial h}{\partial t} = u \frac{\partial c}{\partial x} \dots\dots\dots (13)$$

ここに、 ρ_s : 土粒子密度、 g : 重力加速度、 λ : 空隙率である。

3.2 モデルの現地への適用

現地への適用に際しては、巻き上げが生じているか否かは考慮せず、港内全域でモデル A および B が適用できるものと仮定した。

(1) 計算入力条件

細粒子成分の代表粒径としては港口部底面上 5.5m の浮遊土砂に含まれる 0.1mm 未満の成分の中央粒径 0.03mm を用いて Rubey 式により沈降速度 w_0 を評価した。一方、底面剪断応力を算定する際には、底質の中央粒径分布を考慮し、港口部の 0.25mm から 0.05mm まで段階的に変化する値を用いた。

平均濃度と底面濃度の比 β は、約 1 年間に及ぶ流入・流出濃度調査で得られた全ての鉛直濃度分布についての平均値である 0.8 を用いた。ただし、底面濃度としては海底面上 0.5m における値を用いた。

調査期間中の平均的な値に基づき、港口部における 0.1mm 未満の成分の平均濃度 c_0 を 13.8ppm、冷却水取水 220m³/s、入射波高 1m、周期 10s とし、式 (10) および (12) 中の指数 n_1 、 n_2 が 0.5 と 1 の場合について流出比率が約 75% となるように α_1 、 α_2 を定めた。ただし、 τ の単位は N/m² である。

(2) モデルによる計算値と実測値の比較

港口部と港奥部の流入・流出濃度の同時観測データが得られている昭和 55 年 3 月 1 日から 11 月 30 日までの 9 ヶ月間を検討対象期間とし、流入濃度は式 (1) ではなく実測値をそのまま与えた。

港内主流線方向の水深変化量の分布を図-4 に示す。横軸は主流線上の港口部からの距離である。 n_1 および n_2 が 1 の場合、港口付近には堆積を生じないで、やや港内奥寄りに堆積最大値が発生するのに対し、 n_1 および n_2 が 0.5 の場合は港内全域でほぼ様な堆積が生じている。実際には港口付近では 0.1mm 未満の細粒子成分の堆積がほとんど生じておらず、実状に合わないのて、 n_1 および n_2 が 0.5 のケースはこれ以降の検討対象から除外することにした。

図-5 は細粒子成分の港内堆積土量について計算値と実測値を比較したものである。実測値は、各月毎に流入・流出濃度の平均値を求め、その差に月間平均取水量と年間累積値から求めた 0.1mm 未満の含有率 20% を乗じて評価した。また、計算値は流入濃度と計算による流出濃度の差に取水量を乗じて日々の堆積量を求めた。

モデル A および B のいずれも実測値の再現性は良好であるが、モデル B ($c_{eq}/c_0=30\tau$) の計算結果には、7~8 月に港内堆積土量が減少していること、10 月初旬の高波浪時に急激な堆積を示していることなど、実測値と定性的に符合しない点が目立つ。モデル A ($c_{eq}/c_0=1.5\tau$) の場合、10 月の高波浪時には逆にやや侵食を示す点を除けば全期間を通して堆積傾向にあり、実測値の再現性はモデル B より優れていると判断される。

波浪条件の比較的穏やかな 7~8 月にモデル B で侵食を示すのは、流入濃度よりも巻き上げ濃度が大きいため、実際にはモデル A で表されるように初期濃度に依存して平衡状態に近づく沈降過程が支配的であったことを示していると解釈できる。一方、10 月の高波浪時には港内のかかなり奥まで巻き上げが生じていると考えられ、この間は逆にモデル A の適用外であったと思われる。しかしながら、基本的には堆積過程が支配的であるので、モデル A の適用性は高いと判断される。

図-6 は、モデル A ($c_{eq}/c_0=1.5\tau$) を用いた場合の流出境界における細粒子成分濃度の計算値と実測値を比較したものである。高波浪時に若干過大評価する傾向がみられるものの、計算値は実測値と良い対応を示している。高波浪時の過大評価は再浮遊過程も便宜的に取り扱ったため、流入濃度 c_0 が大きい分だけ再浮遊が存在する場での平衡濃度を過大評価したためであろう。

(3) モデル A の適用範囲

モデルによる計算値と実測値を比較検討した結果、堆積過程を表現したモデル A の妥当性が明らかになり、平衡濃度 c_{eq} は次式で与えられることがわかった。

$$c_{eq}/c_0=1.5\tau \quad \dots\dots\dots (14)$$

ところで、式 (14) の関係は $c_{eq}/c_0 < 1$ の範囲で本来の意味を持つので、底面剪断応力 τ が

$$\tau < 0.67 \text{ (N/m}^2\text{)} \quad \dots\dots\dots (15)$$

を満たす外力条件下にのみモデル A は適用可能となる。

そこで、式 (15) で表される条件がどの程度満足されているかについて検討した。取水量を $220 \text{ m}^3/\text{s}$ 、有義波周期を 10s として、有義波高を 1, 2, 3m の 3 通りに変化させて港内の底面剪断応力分布を計算した。その結果を図-7 に示

す。また、図中には表層堆積土に含まれる粒径 0.1mm 未満の含有率の分布も併せて示されている。

福島地点の年間平均有義波高である 1m に対しては、全領域で $c_{eq} < c_0$ となるが、2m, 3m と波高が増大するにつれて $c_{eq} > c_0$ となる領域が港内へと拡大する様子がわかる。しかしながら、細粒子成分の含有率の分布と比較すると、シルト・粘土の堆積が顕著となる港奥部において、 c_{eq}/c_0 が 1 を超えることは極めて希であることがわかる。また、Mehta らによれば、それ以下では全ての底質が浮遊状態を維持できないような限界剪断応力が存在し、その値は 0.18 N/m^2 と報告されている。福島第一原子力地点では、有義波高 1m の場合の剪断応力が 0.18 N/m^2 以下になる地点がちょうど細粒子成分の含有率が増加しはじめる地点と一致しており、興味深い結果となっている。

以上のように、2m 以上の高波浪時を除けばモデル A

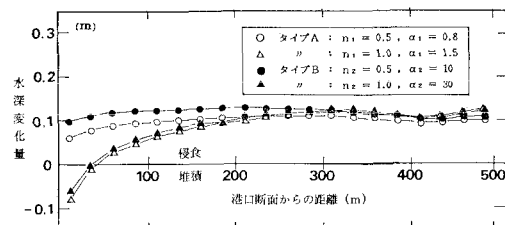


図-4 港内堆積厚分布

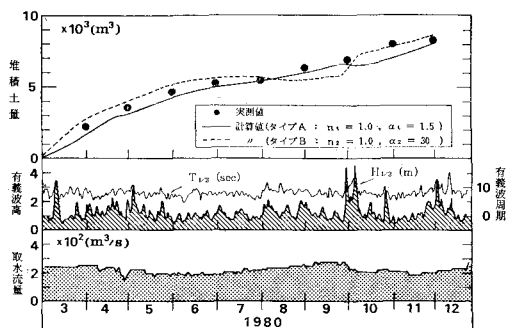


図-5 累積堆積量の経時変化

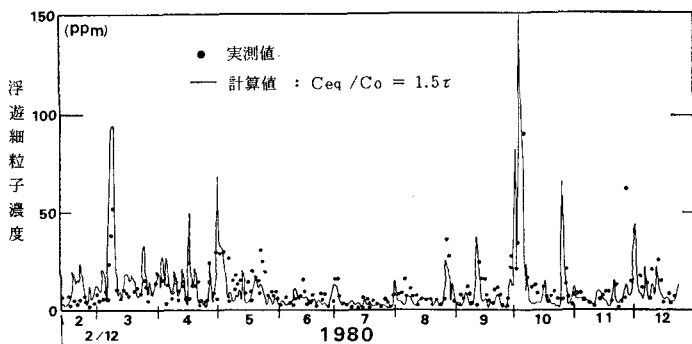


図-6 流出境界における浮遊土砂濃度の実測値と計算値の比較

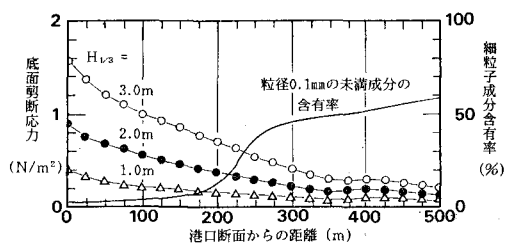


図-7 底面剪断応力分布

の適用性は高い。高波浪時に際し、巻き上げの生じる領域に対してはモデル B を、沈降のみ生じる領域に対してはモデル A を使い分けて用いれば、さらに推定精度が高くなるものと考えられる。

3.3 港内堆積予測モデルとしての適用性

福島第一原子力地点における細粒子成分の港内堆積量予測モデルとしての適用性を検討するため、浚渫期間を含まないように設定した期間のシミュレーションを行い、深浅測量結果との比較を試みた。港口流入浮遊細粒子濃度は日々の平均有義波高をもとに式(1)により評価した。また、平衡濃度が式(14)で表されるモデル A を用いた。図-8 は実測値と計算値の比較例を示したものである。図中の実測値は、深浅測量に基づく変化土量に 0.1mm 未満の細粒子成分の平均含有率 22% を乗じて求めたものであり、斜線部は $\pm 20\%$ の推定誤差を考慮

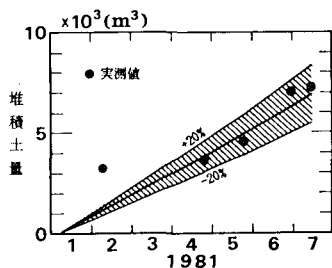
したものである。本モデルにより当港湾のシルテーションはかなりの精度で予測可能であることがわかる。

4. あとがき

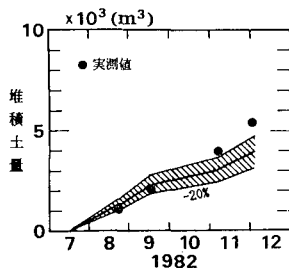
福島第一原子力地点を対象として、取水港湾におけるシルテーションの現状を明らかにするとともに、簡便でしかも精度の高い実用的な数値モデルを提案した。本モデルは冷却水の取水に伴い港内に比較的大きな流れが発生する港湾を念頭において構成されており、移流・沈降現象が支配的な場に適用することができる。今回対象とした港内の底泥は、有機物の含有量が比較的少なく、凝集性の低いものである。少なくともこのような底泥に対しては本モデルの適用性は高いと判断される。しかしながら、平衡濃度および沈降速度などの評価については、さらに現地データあるいは基礎実験データを積み重ねることにより現象の本質を把握した上で検討する必要がある。

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) 丸山康樹・鹿島遼一・成廣明雄・近藤浩右：発電所港湾における港内堆砂量の予測モデル，第29回海岸工学講演会論文集，pp. 294～298，1982。
- 3) 田中 仁・首藤伸夫：波・流れ共存時の底面摩擦に関する実験，第27回海岸工学講演会論文集，pp. 136～167，1980。
- 4) Mehta, A. J. and E. Partheniades: An investigation of the depositional properties of flocculated fine sediments, Jour. of Hydraulic Res., Vol. 12, No. 4, pp. 361～381, 1975.
- 5) 楠田哲也：底質の輸送現象と水質に及ぼす影響，第19回水工学に関する夏期研修会講義集，A コース，pp. A-7-1～A-7-22，1983。
- 6) Sheng, Y. P. and W. Lick: The transport and resuspension of sediments in a shallow lake, Jour. of Geophys. Res., Vol. 84, No. C4, pp. 1809～1826，1979。



(a) 昭和56年1月～7月



(b) 昭和57年7月～12月

図-8 細粒子成分の港内堆積量の予測値と実測値の比較