

## 沿岸海域における底質輸送量に関する 現地調査と予測モデル

(財)電力中央研究所 正会員 榊 山 勉  
(財)電力中央研究所 長谷川 寛

### 1. はじめに

近年、航路、港湾埋没対策のために、シルテーション、すなわちシルトなど微細な粒子の輸送現象に関する研究がわが国においても活発に行われるようになってきた。これまでのところ、発電所取水港湾内のシルトによる堆積問題（丸山・鹿島ら、1982、近藤ら、1988）に始まり、集泥トレンチ内の堆積問題（細川ら、1986）や有明海に建設中の熊本港の航路、泊地の埋没問題（鶴谷ら、1989）に関する研究が行われている。シルトなどが海底に広範囲にわたって存在する場合には、底泥の質量輸送が生じる。この様な問題については、Shibayama et al.(1986)、Sakakiyama・Bijker(1989)、柴山ら(1989)によって基礎的な研究がなされている。さらに、移流、拡散による細粒子の輸送形態がある。これに関連して、波や流れによる底泥の巻上げ・沈降現象に関する室内実験が楠田ら(1988)、三村ら(1989)によって行われている。後者の細粒子の移流拡散の問題は海底がシルトなどの微細な粒子から構成される場合だけの問題ではなく、砂質海底の混合粒径粒子中の細粒子成分の巻上げに関する問題としても考える必要がある。例えば、沖合人工島建設とその周辺海域空間の利用に当たって、水質、底質環境に関わる問題として、一般の沿岸海域においても細粒子の挙動の予測は重要な課題である。

本研究では、沿岸海域における細粒子の移流拡散問題を捉えるために、現地調査を実施し細粒子の挙動を把握すると共に、移流拡散による底質輸送量の評価モデルを構築し、現地観測結果との比較によりモデルの妥当性を検証する。

### 2. 調査方法と結果

#### 2.1 現地調査の概要

現地調査は図-1に示す福島県いわき市久之浜港から北へ約3kmの沿岸海域で最大水深20mまでの領域を対象として行った。調査項目を表-1に示す。図-1に示す観測点に波高計、流速計、濁度計、砂面計を設置し定点観測を行うとともに、捕集ビンを設置し浮遊底質を採取した。さらに、観測期間中に塩分、水温等の調査や対象海域の拡散係数を推定するための細粒子放流実験を行った。観測は1988年10月と12月にそれぞれ約2週間わたって行い、以下ではこれらを「10月観測」、「12月観測」と呼ぶことにする。

#### 2.2 調査結果

(a) 海域波浪・流動調査 底質の巻上げ・沈降、ならびに移流拡散の外力となる波、流れを超音波式波高計と電磁流速計を同期して観測した。観測仕様は両者ともバースト2時間、サンプリング間隔0.5s、サンプリング個数1022個である。図-2に観測結果の1例のとして、ST9(水深20m)における10日間について、それぞれ(a)10月観測、(b)12月観測の結果を示したものである。今回の2回の観測期間中にはそれほど大きな波高は発生しなかったが、両観測結果の主たる特徴は以下の通りである。(a)10月観測では18日と19日の2日間の有義波高が1mを越えたのみで、この時の周期も7秒前後と小さいのに対して、(b)12月観測では10日と14日に有義波高約1.5mの2回のピークがあり、周期も観測期間中全体にわたって10秒近かった。平均流速は波高、周期の小さかった10月観測の方が大きく絶対値で約0.1m/sを示し、流向は海岸線に沿う北の流れが卓越するが、12月観測では流速はおおよそ0.05m/sと約半分であり、南流と北流の絶対値は同程度であった。

(b) 底質浮遊調査 本調査では①濁度計による定点観測と②捕集ビンによる浮遊底質のサンプリングの2つの調査を実施した。①の濁度計の設置高さは、ST1(h=10m)とST3(h=20m)で海底面上0.5m、ST2(h=15m)では海底面上0.5m、1.0m、1.5mの3カ所とした。図-3にST2における底質濃度の観測結果を示す。10月、12月観測それぞれ1台が欠測したため、設置高さの異なる2カ所の結果を示した。(a)10月観測では全般的に濃度

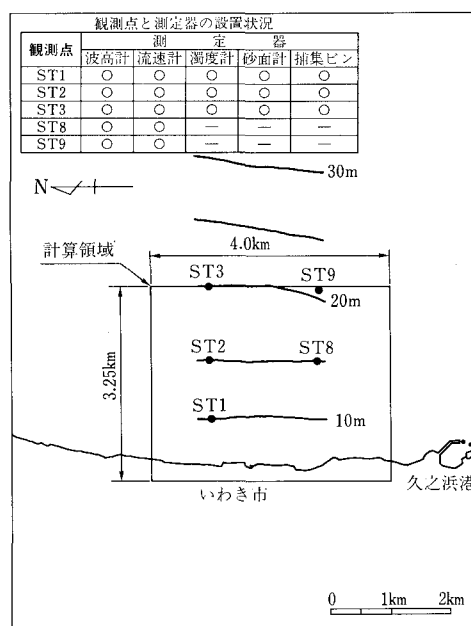


図-1 現地調査位置と計算領域

表-1 調査項目と測定機器

| 調査項目       | 測定機器             |
|------------|------------------|
| 塩分・水温・水深調査 | 塩分、水温、測深計        |
| 海域波浪・流動調査  | 超音波式波高計<br>電磁流速計 |
| 底質巻き上げ調査   | 濁度計<br>捕集ビン      |
| 細粒子放流実験    | 濁度計              |
| 底面変動調査     | 砂面計              |

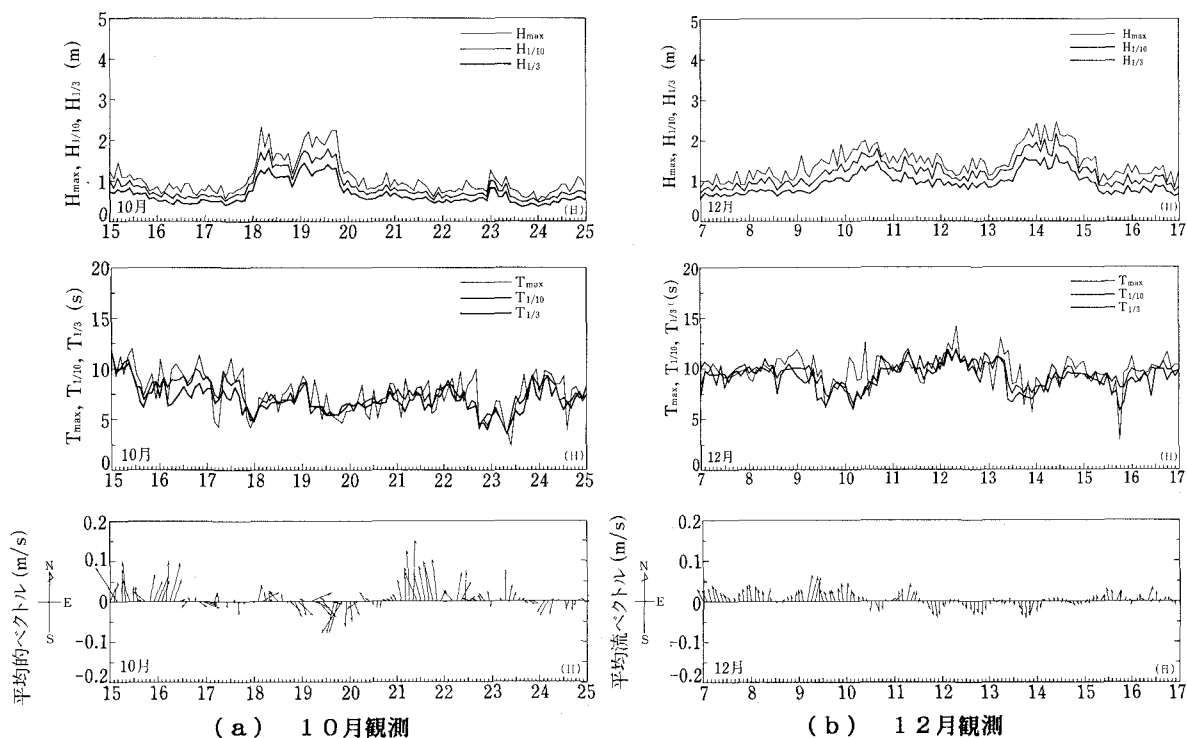


図-2 観測結果 (上段: 波高、中段: 周期、下段: 底面近傍の平均流速): ST 9、水深 20 m

が低く、海底面上0.5mと1.0mでは濃度は約1/3程度に減少している。(b) 12月観測では10月観測より全体的に濃度が高い。また、海底面上0.5mと1.0mの濃度差は濃度が高いときには顕著であるが、低いときには差が小さくなっている。その他の結果については4. 計算結果との比較と重複するためここでは省略する。②捕集ビンによる浮遊底質サンプリングは、容量約500ccのポリビン10本ずつをST1、ST2、ST3の海底面上0.5m、1.0m、1.5mの高さに設置し、観測期間中に一部を回収・再設置するものと、全期間通してサンプリングする2種類の方法を取った。表-2に図-3の観測期間とほぼ対応する期間中に採取された底質の中央粒径 $D_{50}$ を示した。10月観測では採取された底質の中央粒径は、海底面上0.5mで0.050mm(水深10m)から0.016mm(水深20m)と水深が大きくなるにしたがって中央粒径も小さくなっている。これに対して、12月観測では0.081mm(水深10m、15m)から0.090mm(水深20m)と全体的に大きく、また水深による中央粒径の差が小さい。これは、10月観測では波高が小さく周期が約7秒と短かったのに対し、12月観測では10月観測に比べて波高が若干大きかったこと、さらに周期が10秒前後と比較的周期の長い波が継続したことが底質の巻き上げに相違をもたらしたものと考えられる。即ち、現地では混合粒径であるため、波高が小さい場合でも底質の細かな成分が浮遊し、外力が大きい場合には底質の混合粒径の中から大きい成分まで巻き上げられるためと考えられる。一方、水深の小さい岸側では波高が大きく粒径の大きな成分まで巻き上げられるが、水深が大きくなるにしたがって細かな成分のみ巻き上げられることになる。海底面上から離れるにしたがって浮遊する中央粒径が小さくなることも確認された。この観測結果は、シルト成分が砂質性の沿岸海域にかなり浮遊していることを示唆している。

(c) 細粒子放流現地実験 細粒子放流実験では係留した小型船舶上において、ジェットポンプを用いてカオリナイトを海水と混合、希釈させて表層放流し、その濃度分布を3次元的に測定した。放出時のカオリナイトの濃度と放出時

表-2 浮遊底質の中央粒径

| 観測点<br>(水深)    | $z'$ *<br>(m) | 10月           | 12月   |
|----------------|---------------|---------------|-------|
|                |               | $D_{50}$ (mm) |       |
| ST 1<br>(-10m) | 1.5           | 0.016         | 0.030 |
|                | 1.0           | 0.020         | 0.042 |
|                | 0.5           | 0.050         | 0.081 |
| ST 2<br>(-15m) | 1.5           | 0.0047        | 0.026 |
|                | 1.0           | 0.0032        | 0.042 |
|                | 0.5           | 0.046         | 0.081 |
| ST 3<br>(-20m) | 1.5           | 0.0048        | 0.042 |
|                | 1.0           | 0.0042        | 0.070 |
|                | 0.5           | 0.016         | 0.090 |

\* 海底面からの高さ

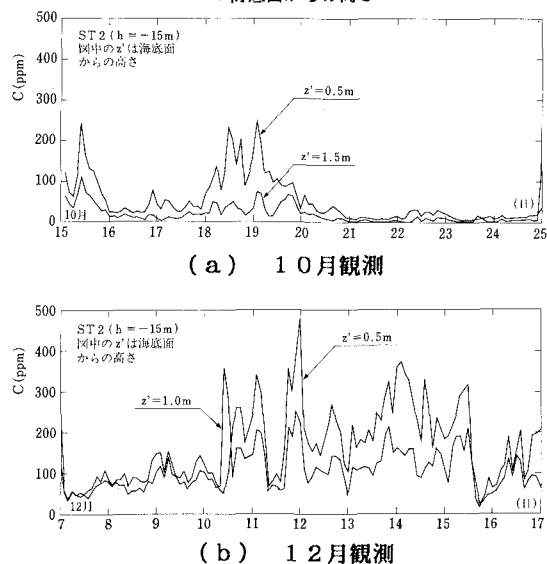


図-3 底質浮遊濃度の観測結果: ST 2、水深 15 m

間は10月観測では約7000ppm、2時間20分、12月観測では約11000ppm、1時間30分であった。放出されたカオリナイトの濃度は、別の小型船舶に濁度計を異なる高さに3台固定し、蛇行走船することによって測定した。また、濁度測定時の船の位置は電波測位機により測定し、投入点を原点とした座標系に換算した。放流実験の測定結果の1例を図-3に示す。10月観測では北流、表面から水深10mまでの平均流速は0.3~0.4m/sであり、12月観測では北北東流、表層平均流速は約0.2m/sであった。図-4のように濃度分布は細長い帯状を示し、拡散の効果は小さく移流が支配的であった。

ここでは、上記の放流実験結果の濃度分布を用いて、次式のブリュームモデルでベストフィットする拡散係数を算出した。

$$C(y, z) = \frac{q/u}{2\pi t \sqrt{K_y K_z}} \exp \left\{ -\frac{y^2}{2K_y t} - \frac{(z - wt)^2}{2K_z t} \right\} \quad (1)$$

ここに、 $C(y, z)$ : 拡散濃度、 $q$ : 単位時間当りのカオリナイトの放出量、 $K_y, K_z$ : 水平、鉛直拡散係数、 $t$ : 時間、 $u$ : 場の平均流速、 $w$ : 粒子の沈降速度である。カオリナイトの中央粒径は約5 $\mu$ mであるが、この値からストークスの式で求めた沈降速度を用いてブリュームモデルで計算した拡散形状パターンは観測結果を再現できなかった。試行錯誤の結果、中央粒径30 $\mu$ mの沈降速度を与えた結果、ほぼ妥当な拡散係数を得ることができた。その結果を表-3に示す。この理由として、カオリナイトの放出濃度が高かったため海水との混合により凝集して見かけの粒径が大きくなったことが考えられる。

### 3. 底質輸送量予測モデル

本研究の対象は、海底に堆積している細粒子が波や流れによって巻上げられたり、逆に静穏時に浮遊している細粒子が沈降し海底に堆積するといった挙動である。巻上げられた細粒子は流れによる移流、乱れによる拡散により海洋中を輸送される。このような細粒子の挙動を比較的広範囲な海域について予測するための計算モデルを構築する。計算モデルの構成を図-5に示す。本モデルの前提条件は以下の通りである。

- ① 波は底質を巻き上げる外力としてのみ考慮する。
- ② 巻き上げられた底質は流れによってのみ運ばれる。
- ③ 流れと波との相互干渉は考慮しない。
- ④ 浮遊底質濃度の流体への影響は無視する。このため波、流れ場を計算し、得られた流動場における底質の拡散計算を実施する。

(a) 波高計算サブモデル 波高計算は広い沿岸域を経済的かつ簡便に計算できる放物型方程式によるモデル(平口・丸山、1986)を用いた。本モデルの前提条件は次の通りである。

- ① 対象は規則波で微小振幅波理論が適用できるものとする。

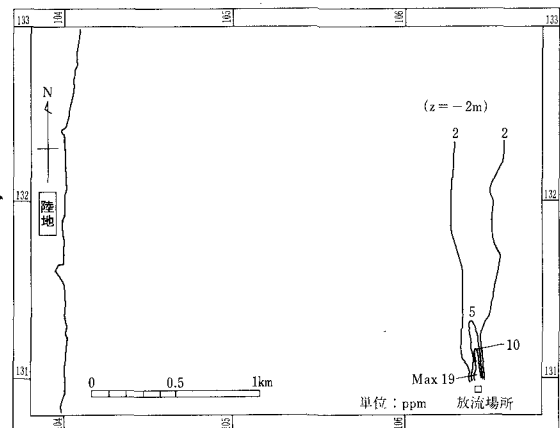
- ② 構造物による反射波は考慮しない。

(b) 流れ場計算サブプログラム 海浜流計算は丸山(1987)を参考に作成した。このモデルの前提条件は以下の通りである。

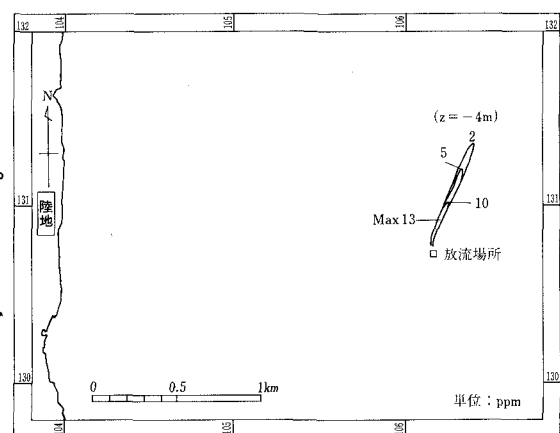
- ① 流速分布は鉛直方向に一様とする。
- ② 流れは定常とする。

但し、波高計算サブモデルでは構造物による反射波は考慮しないため、海浜流の起因力であるradiation stressは進行波で与えた。さらに、波以外に起因して生じる流れである海岸流を与えた。このモデルの前提条件は海浜流モデルと同じであるが、基礎方程式中の起因力のradiation stressの項がない点が海浜流の基礎方程式と異なる。海岸流の計算に当たっては現地観測結果の流況を再現するように境界上で水位差を与え、流れ場の計算を行う。

(c) 底質輸送量計算モデル 底質の輸送量計算は式(2)の2次元移流拡散方程式に基づくものであり、前提条件は以下の通りである。



(a) 10月観測



(b) 12月観測

図-4 放流実験観測結果

表-3 拡散係数の算定

| 観 測   | 放出量 $q$<br>(g/s) | 流速 $u$<br>(m/s) | $K_y$<br>( $m^2/s$ ) | $K_z$<br>( $m^2/s$ ) | 沈降速度<br>$w$ (m/s) |
|-------|------------------|-----------------|----------------------|----------------------|-------------------|
| 10月観測 | 59.5             | 0.4             | 0.15                 | 0.0015               | 0.15              |
| 12月観測 | 91.6             | 0.2             | 0.10                 | 0.0010               | 0.15              |

- ①濃度は鉛直一様分布を対象とする。  
 ②移流、拡散は流れによる影響のみを考慮する。  
 ③巻上げ項中のせん断応力評価には波、流れの両者を考慮する。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} + V \frac{\partial C}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} (Kx \frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (Ky \frac{\partial C}{\partial y}) + (P - D) / h \quad (2)$$

ここに、Pは底面からの巻上げ量、Dは沈降量を表す。Sheng・Lick(1979)は細粒子を対象とし、巻上げ量P、沈降量Dに関して実験式を提案している。本調査結果によると現地の底質は中央粒径0.14mmの細砂であり、底質の種類が異なるが、Sheng・Lick(1979)を参考にし次式で表すことにする。

$$P = \begin{cases} 0 & \tau < \tau_e \\ M (\tau / \tau_e - 1)^n & \tau \geq \tau_e \end{cases} \quad (3)$$

$$D = -w \beta C \quad (4)$$

ここに、 $\tau_e$ は巻上げ限界せん断応力、M、nは実験より定める経験定数、wは沈降速度である。また、底面濃度Cbと平均濃度Cとの比 $\beta$ を沈降項Pに導入した。

せん断応力は、計算された波、流れ場を用いて、田中・首藤(1980)の波・流れ共存場における摩擦係数で評価し、巻き上げ量を式(3)で算出する。

(d) 地形計算モデル 海底地形の変化は底質の巻上げと沈降から生じるものとし、次式で示される底質の連続式より算定した。

$$\frac{\partial}{\partial t} \{ \eta \rho_b (1 - \lambda) \} = D - P \quad (5)$$

ここに、 $\eta$ は海底面の高さ、 $\lambda$ は底質の空隙率、 $\rho_b$ は底質密度である。したがって、ここでは、掃流による地形変化は考慮しないものとする。

#### 4. 計算モデルの検証

##### 4.1 計算条件

丸山(1987)は掃流砂による地形変化を対象にした海浜変形予測モデルを現地データにより検証するために、日平均量を入力条件として波高、海浜流の経時変化を計算した。今回の現地観測結果より細粒子の輸送には移流の効果が強く影響することが明らかになった。そこで計算モデルの検証にあたっては、流向を精度良く再現させるために、丸山の計算よりも、さらに細かく半日平均で波および流れの条件を変えて計算を行うことにした。計算領域は図-1に示した岸沖方向3.25km×汀線方向4kmの範囲を対象とした。表-4に底質の移流拡散の計算条件を示す。巻上げ項PはSheng・Lick(1979)の実験式で表したため、限界せん断応力 $\tau_e$ を用いたが、これをShields曲線と対応させると、パラメータ $S^* = D_{50} \sqrt{(s-1)gD_{50}} / 4\nu = 1.67$ 、限界Shields数 $\phi_m = 0.088$ となり、妥当な限界せん断応力 $\tau_e$ を与えたことになる。底面濃度Cbと平均濃度Cとの比 $\beta$ は、現地観測結果からも濃度の鉛直分布は認めれたが、情報が充分でないため、ここでは1とした。海岸流についてはその発生起因力が明確でないため、ここでは便宜的に以下のようにして与えた。実測データの統計処理結果から北流、南流、流れなし(半日平均流速0.02m/s未満)に分け、海岸流の支配方程式から北流、南流の2つのパターンを計算し、半日毎の流速分布をST3における実測値/計算値の比を全域に乗じて求めた。計算対象期間は10月観測では10月19日の波高ピークを含む5日間、12月観測では2回の波高ピークを含む10日間とし、水深20mのST3における有義波高、周期、波向を入射波条件として与えた。

4.2 観測結果との比較

図-6にST1(h=10m)における波高の計算結果と実測結果との比較を示した。(a)10月観測、(b)12月観測ともわずかに計算値が大きめの値を示すところがあるが、ST2,ST8(h=15m)の比較結果を含め全体的には良好な波浪場を再現できているものと判断される。

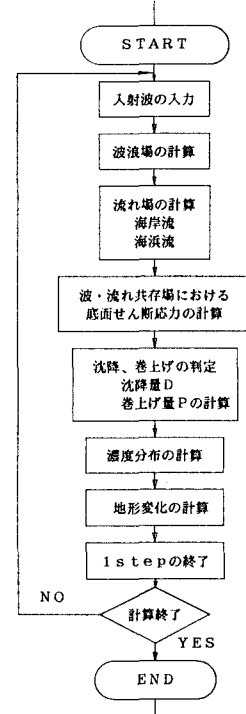
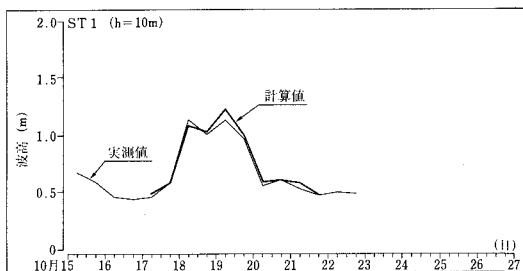


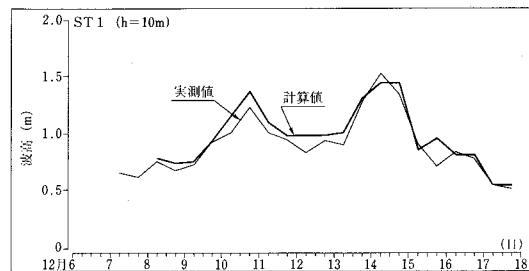
図-5 計算モデルのフロー図

表-4 移流拡散計算条件

| 項目              | 内容                                                                     |
|-----------------|------------------------------------------------------------------------|
| 空間差分間隔          | $\Delta x = \Delta y = 2.5 \text{ m}$ または $12.5 \text{ m}$             |
| 時間差分間隔          | $\Delta t = 60 \text{ s}$                                              |
| 反復回数            | 720回(12h)                                                              |
| 底質中央粒径          | $D_{50} = 0.14 \text{ mm}$                                             |
| 底質沈降速度          | $1.65 \text{ cm/s}$ (Rubeyの式より算出)                                      |
| 底質比重            | $s = 2.65$                                                             |
| 拡散係数            | $Kx = Ky = 0.10 \text{ m}^2/\text{s}$                                  |
| Shengのモデルのパラメータ | $M = 0.001 \text{ kg/m/s}$ , $n = 1.0$<br>$\tau_e = 0.2 \text{ N/m}^2$ |
| 底面濃度と初期濃度との比    | $\beta = 1.0$                                                          |

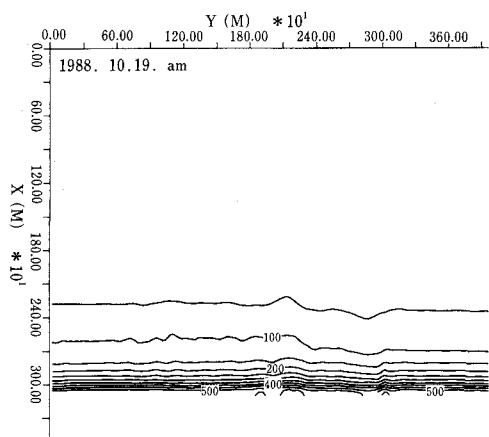


(a) 10月観測 (ST1、h=10m)

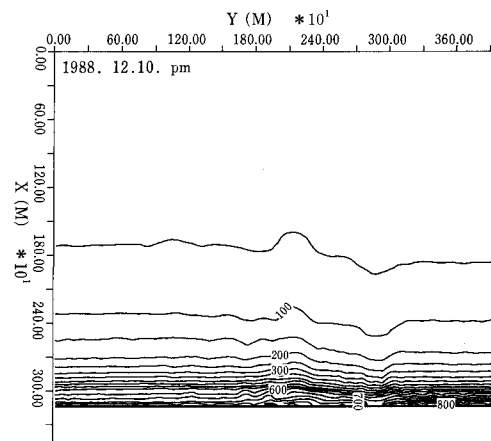


(b) 12月観測 (ST1、h=10m)

図-6 波高経時変化の観測値と計算値との比較

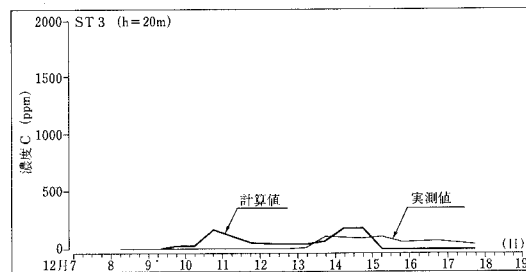
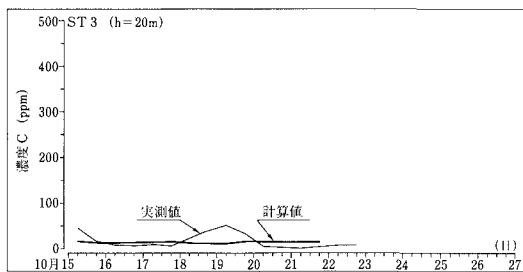
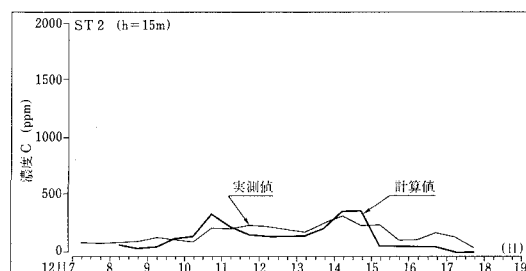
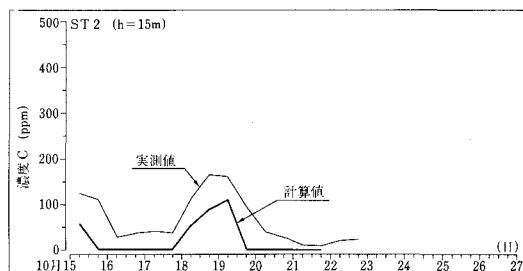
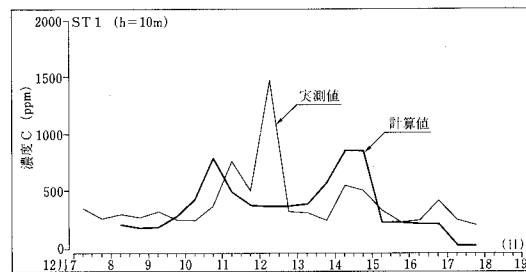
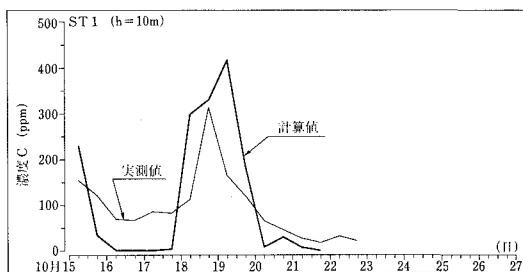


(a) 10月観測



(b) 12月観測

図-7 濃度平面分布の計算結果 (単位: ppm)



(a) 10月観測

(b) 12月観測

図-8 濃度経時変化の観測値と計算値との比較

浮遊底質の濃度平面分布の計算結果の1例を図-7に示す。水深20mにおける波高、流れの条件は、(a)10月観測では有義波高 $H_{1/3}=1.26\text{m}$ 、平均流速は $0.03\text{m/s}$ の北流、(b)12月観測では有義波高 $H_{1/3}=1.30\text{m}$ 、平均流速は $0\text{m/s}$ とほぼ同じ条件にあるが、周期の長い12月観測の方が沖合いまで濃度が高くなっている。汀線方向には地形の影響を受けた一部で変化している。岸沖方向では岸側近傍で数 $100\text{ppm}$ 、水深10mの場所で数 $10\text{ppm}$ 程度の濃度となっている。

図-8に濃度の経時変化を示した。(a)10月観測の濃度変化は波高変化とかなり一致した対応を示している。ST1においては観測値に比べ、計算値は変化が大きいものの、全体的な傾向は表しているといえる。ST2では計算値は全体的に小さい。ST3では計算結果にピークが存在しなく観測結果の傾向を表しきれていない。(b)12月観測ではST1,2とも計算結果は実測結果に比べ位相が進んでいる。また、ST1では12月12日の高濃度のピークが再現されない。この高濃度の出現は波高の変化では説明され得ないもので、河川からの濁水の影響とも考えられ、調べてみたが降雨は観測されておらず明確な理由は不明である。

浮遊底質の濃度計算結果は主として波高変化に追従する。一方、濃度の実測結果は波高変化より位相が遅れている。これは、一旦巻上げられた底質の内、細かい成分が沈降せず残るためと考えられる。これに対して、計算モデルでは単一粒径としているため様な沈降速度で堆積する。さらに、式(3)の巻上げ項P中の限界せん断応力 $\tau_e$ 、経験定数M、nを空間的に一定値を与えたが、実際には現地観測結果にみられたように、外力が小さい場合は巻上がる粒径は小さくなり、この場合には限界せん断応力も小さく設定する必要がある。計算では、これらを一定値として与えているために、波高が小さい期間や水深の大きいST2,ST3での再現性が悪くなるものと考えられる。

地形変化計算では、掃流砂量の効果を考慮しなかったため水深の浅いST1( $h=10\text{m}$ )で著しく異なる結果となった。水深20mにおいても巻上げ・沈降のみでは地形変化が十分に説明できなく、精度良く再現させるためには掃流による影響を考慮する必要がある。

## 5. 結 論

本研究では、沿岸海域における底質の挙動について現地調査を行うと共に、輸送量予測計算モデルを構築した。現地においては底質は混合粒径であるため、2回の現地観測結果は巻上げ現象に明瞭な相違がみられた。波高、周期ともに小さい10月観測では浮遊底質の中央粒径は小さいが、12月観測では波高、周期とも10月観測に比べ大きくその結果、浮遊底質の中央粒径も大きくなっていた。底質濃度の経時変化は、主として波高の変化と対応したが、一部、波高変化と対応しない濃度分布変化が観測された。これは河川からの濁水、船舶による巻上げ等、他の原因でと考えられる。巻上げ量をSheng・Lickのモデルで与えることにより濃度の経時変化が再現可能であることが確認された。混合粒径の場合は、外力の大きさによって巻上げられる粒径が異なるため、時間的にも、空間的にも巻上げ、沈降項中の経験定数、限界せん断応力の値を変化させること必要がある。今後の課題としては、巻上げ・沈降項のモデル化における経験定数に関するデータの蓄積と混合粒径の概念の導入が必要である。

## 謝 辞

(財)電力中央研究所 鹿島遠一主席専門役、田中寛好室長には、本研究をまとめるにあたって貴重な助言をいただいた。また、現地調査では、三洋水路株式会社の佐藤峰男氏、計算モデルの作成ではアーク情報システム株式会社の海野純一氏の多大な協力を得た。ここに記して謝意を表する。

## 参考文献

- 楠田哲也・山西博幸・川添正寿・二渡 了(1988):波による底泥の浮遊及び挙動に関する研究,第35回海講論文集,pp.271~275.  
近藤浩右・清水琢三・金山 進・村山恒雄(1988):取水港湾における砂およびシルトの港内堆積予測,第35回海講論文集,pp.367~371.  
柴山友也・青木 徹・佐藤慎司(1989):粘弾塑性体モデルによる底泥移動量の評価法,海岸工学論文集,第36巻,pp.334~338.  
田中 仁・首藤伸夫(1980):波と流れ共存時の底面摩擦係数に関する実験,第27回海講論文集,pp.163~167.  
鶴谷広一・村上和男・入江 功(1989):多層レベルモデルによる航路埋没の予測計算,海岸工学論文集,第36巻,pp.379~383.  
平口博丸・丸山康樹(1987):斜め入射波に対する波浪変形計算法-新しい放物型方程式の提案,電力中央研究所,研究報告,U86045,23p..  
細川恭史・田中則男・久高将信・佐藤勝弘(1986):トレンチ内に堆積する浮泥量の予測手法と現地への適用例,第33回海講論文集,pp.312~316.  
丸山康樹・鹿島遠一・成廣明雄・近藤浩右(1982):発電所港湾における港内堆砂量の予測モデル,第29回海講論文集,pp.294~298.  
丸山康樹(1987):海底地形変化予測モデルの現地適用性,電力中央研究所,研究報告,U87012,35p..  
三村信男・田口 智・加藤 始(1989):波による底泥の巻き上げ・沈降フラックス,海岸工学論文集,第36巻,pp.309~313.  
Odd N.V.M. and M.W.Owen(1972):A two-layer model of mud transport in Thames estuary, Proc. of the Institute of Civil Engineering.  
Sakakiyama, T. and E.W.Bijker(1989):Mass transport velocity in mud layer due to progressive waves, J. Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, Vol.115, No.5, September, pp.614-633.  
Sheng, Y.P. and W.Lick(1979): The transport and resuspension of sediments in a shallow lake, J. Geophysical Research, Vol.84, No.C4.  
Shibayama, T., H.Takikawa, and K.Horikawa(1986):Mud mass transport due to waves, Coastal Engrg. in Japan, Vol.29, pp.151~161.