

独立行政法人港湾空港技術研究所

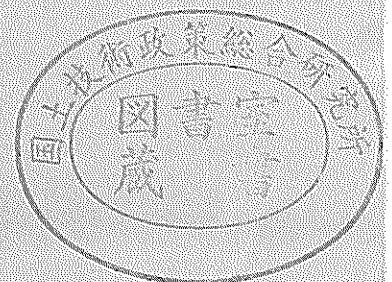
港湾空港技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH
INSTITUTE

VOL.40 NO.3 September 2001

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN

INDEPENDENT ADMINISTRATIVE INSTITUTION,
PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE



港湾空港技術研究所報告 (REPORT OF PARI)

第 40 卷 第 3 号 (Vol.40, No.3), 2001 年 9 月 (September 2001)

目 次 (CONTENTS)

1. 内湾域における泥質物の堆積と波浪による底面せん断応力との関係
..... 中川康之 3
(Relationship between Muddy Sediment Distribution and Bottom Shear Stress Induced by Wind Waves in a Bay
.....Yasuyuki NAKAGAWA)
2. せん断補強のない高性能軽量コンクリートはりのせん断耐荷機構
..... 横田 弘・舟橋政司・山田昌郎・原 夏生・二羽淳一郎 17
(Shear Resisting Behavior of Super Lightweight Concrete Beams Without Web Reinforcement
.....Hiroshi YOKOTA, Masashi FUNAHASHI, Masao YAMADA, Natsuo HARA and Junichiro NIWA)
3. 海洋環境下における R C 構造物中の鉄筋腐食に関する長期暴露試験
..... Tarek U.M.・濱田秀則・山路 徹 37
(Corrosion of Steel Bars in RC Structures Under Marine Environment Based on the Long-Term Exposure Tests
..... Tarek Uddin MOHAMMED, Hidenori HAMADA and Toru YAMAJI)

内湾域における泥質物の堆積と波浪による底面せん断応力との関係

中川康之*

要 旨

内湾域における泥質物堆積に及ぼす作用外力の影響について解明するため、米国東海岸に位置するBaltimore湾内の堆積物分布の現地データを利用し、堆積物分布と波浪外力との関係について調べた。波浪場を波浪推算法の一種であるHISWAを用いて計算し、波浪による底面せん断応力の分布を求めた。比較の際には現地データに基づく風向や風速の頻度分布を考慮して、平均化された底面せん断応力と底質中の含泥率との関係について調べた。その結果、含泥率が低くなるほど底面せん断応力平均値は大きくなり、両者の間にはおおむね負の相関が見られることがわかった。さらに、懸濁物質の堆積条件を数値化するため、底面せん断応力を変数とした堆積確率を考慮した”堆積確率指標”を新たに導入したところ、異なる含泥率の領域が堆積確率指標により明瞭に区分され、同指標が泥の堆積環境の違いを適切に表現することが示された。

キーワード：底質環境，内湾域，泥質堆積物，底面せん断応力，堆積確率指標

*海洋・水工部主任研究官

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1

電話(0468)44-5051, FAX(0468)44-1274, E-mail: nakagawa@pari.go.jp

Relationship between Muddy Sediment Distribution and Bottom Shear Stress Induced by Wind Waves in a Bay

Yasuyuki NAKAGAWA*

Synopsis

The relationship between hydrodynamic forces and sediment characteristics in Baltimore Harbor, USA, was examined by comparing estimated wave-induced bottom shear stresses with sediment mud content distributions. Wave fields in the bay area were simulated for arbitrary wind fields using HISWA, a numerical wave hindcasting model, which provided spatial distributions of wave-induced bottom shear stresses. By considering the wind statistics from a long-term data set collected near the harbor, a probability distribution of the stress value at each point was obtained. Results indicate that a relatively high negative correlation exists between the average shear stress, i.e., the mean value of the probability distribution, and sediment mud content for the sampling locations. It was also found that a newly introduced index called the "deposition probability index," which is a modified probability of depositional condition by considering the so-called probability of deposition defined as a function of bottom shear stress, can clearly indicate the mud content characteristics of the sediments in the harbor.

Key Words: Sedimentary environment, bay area, muddy sediment, bottom shear stress, deposition probability index

* Senior Researcher, Marine Environment and Engineering Department
3-1-1Nagase, Yokosuka 239-0826
Tel:+81-468-445051, Fax:+81-468-441274, E-mail:y_nakagawa@ipc.phri.go.jp

目 次

1. はじめに	7
2. 対象海域と泥質物の分布	7
2. 1 Baltimore 湾	7
2. 2 湾内の泥質物の分布	8
3. 湾内の泥質物堆積と波浪の影響について.....	8
3. 1 泥質堆積物と作用外力の関係	8
3. 2 湾内の波浪場の推算と底面せん断応力の分布	8
3. 3 平均底面せん断応力と含泥率の関係	10
4. 堆積確率指標と泥質物分布	13
4. 1 底面せん断応力と堆積確率指標	13
4. 2 堆積確率指標と含泥率の関係	14
5. 結論	15
6. おわりに.....	15
謝辞	16
参考文献	16

1. はじめに

底質環境の変化は、底生生物の生息条件に影響を与えたり、堆積物からの栄養塩溶出等により水質環境に影響を与えるなど、沿岸域環境を支配する重要な要素である。特に、海水中に放出される有害物質や有機物等の汚染負荷物質はシルト・粘土等の細粒懸濁物に吸着されやすいため、泥質物の堆積域において底質汚染が進行する傾向にある（例えば、松本ら・1977, 谷本ら・1984, 石渡・1988）。したがって、今後の沿岸域環境の保全にとって、泥質物の輸送・堆積やそれに起因する底質環境の変化について調査・研究をすすめることが重要である。

沿岸浅海域の泥質物の輸送・堆積に関するこれまでの研究は、主に航路・泊地の埋没等の局所的な地形変形の問題が対象とされ、底質粒径をはじめとする堆積物特性の質的変化の予測を目的としたものではない。一方、沿岸域における汚染負荷物質の堆積特性の把握を目的とした研究として、湾内底泥への汚染物質の蓄積と潮流・波浪等の外力との関係についての検討（Ravensら・1998）や、海水流動に伴う負荷物質の輸送・堆積過程を考慮した数値シミュレーションが近年になり試みられるようになった（例えば、橋本ら・1998, 中川・1998, Sanfordら・2000）。しかし、堆積物特性の変動予測においては、懸濁物等の湾域への負荷量や外力による堆積物の移動量等に関する定量的な把握が必ずしも十分ではなく、信頼性の高い堆積物の変動予測モデルの確立には多くの課題が残されている。例えば、泥質物の内湾域での堆積領域の形成についてみても、流れや波浪との関係から定性的に論じられることはあるものの（例えば星野・1971）、その形成機構は必ずしも明らかではない。

本研究では、内湾域の泥質物堆積条件の解明を目的として、米国東海岸に位置するBaltimore湾における泥質物の堆積分布と作用外力との関係について調べた。一般的には、沿岸域の底質輸送現象には潮汐流や波浪等の外力が複合的に関与するものと考えられる。しかし、ここで対象とする海域周辺では、底質輸送に及ぼす潮汐流の影響が比較的小さく、堆積物の巻き上げに波浪の影響が深く関与していることが現地観測により確かめられている（Sanford・1994）。そこで、波浪場の数値シミュレーション結果に基づく底面せん断応力の分布と、現地データに基づく湾内の底質分布との比較を通じて泥質物の堆積と波浪作用の関係について検討した。

2. 対象海域と泥質物の分布

2. 1 Baltimore 湾

米国内で最大規模の河口内湾域であるChesapeake湾内の北西部に位置し（図-1）、全長約20 km、幅約5 kmであり、平均水深は約7 mと非常に浅い内湾域である（図-2）。沿岸部は米国北東部有数の工業地域ならびに貿易港として利用され、湾内には湾軸に沿って平均水深15 mの航路が人工的に整備されている。沿岸陸域の工業化が古くから進んだBaltimore湾では、有機物や重金属等の人工的な負荷物質による底質の汚染が深刻化している。

当海域で卓越する半日周潮の平均潮位差は約30 cmと小さく、また湾内に直接流入する河川の規模も小さい。このため、海水交換や懸濁物の供給に関しては、Chesapeake湾奥部に流入するSusquehanna川からの淡水流入量に強く影響を受ける。一方、波浪条件に関しては、Baltimore湾口付近で行われた過去の観測結果によると、周期2~4秒の波浪が卓越している（Linら・1997）。湾幅が狭く吹送距離が短いことや、大西洋に通じるChesapeake湾の湾口からBaltimore湾までの距離が200 km以上あり、外洋からのうねりが到達することもほとんど無いことから、上記のような比較的短周期の風波が卓越するものと考えられ

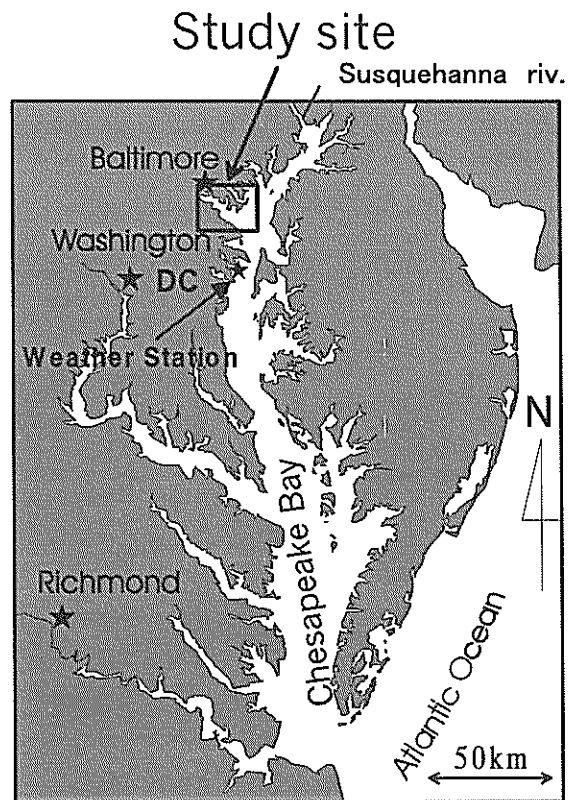


図-1 Chesapeake湾内におけるBaltimore湾の位置
（図中の□で囲われた部分）

る。

2. 2 湾内の泥質物の分布

Baltimore 湾内の堆積物の分布を把握するため、ここではメリーランド州資源保護局により実施された底質調査の結果を利用した。粒度分析の結果から得られるシルト分と粘土分各含有量の合計である含泥率に関する湾内の分布を図-3に示す。(同図中の黒丸は調査地点を示す。)湾内には底質中の含泥率が80%以上となる泥質域(図中濃灰色部)が広範囲に分布する一方で、湾口部両岸や湾中央部では含泥率20%以下の低含泥率域(礫または砂質域)もみられる。なお、このような泥質物の堆積に寄与する懸濁物の供給については、Chesapeake 湾上流の河川を主な起源として湾口より流入していると考えられている(Sinex and Heiz, 1982)。

3. 湾内の泥質物堆積と波浪の影響について

3. 1 泥質物堆積と作用外力の関係

沿岸域の底質輸送に関与する主要な外力として、潮汐流、河川流入に伴う流れおよび波浪等をあげることができる。これらの外力の下で懸濁物が輸送され、最終的には底面への沈降水量と侵食(巻き上げ)量の収支により底泥の堆積量が決まる。ところが、ここでは懸濁物の湾内への供給量や外力に対する侵食速度等の情報は十分ではないことから、堆積量を含めた懸濁物の輸送量に関する議論はできない。ただし、懸濁物の沈降や堆積泥の巻き上げを支配する

外力の作用特性によって、泥質物の堆積傾向をある程度説明できるものと考えられる。

Baltimore 湾では、潮位差も小さく水深も浅いため、風波による底面せん断応力が、底泥の堆積に大きく関係することは容易に推察される。潮汐振幅や水深条件が Baltimore 湾に類似した湾口部北側の Chesapeake 湾内で実施された現地観測の結果でも、波浪による擾乱が底泥巻き上げの主な原因であることが確かめられている(Sanford・1994)。また、図-4は Baltimore 湾内の底質中含泥率と底質採取地点の水深との関係を示したものであり、同図を見ると採取地点の水深が深くなるほど高含泥率のサンプルが多くなることわかる。すなわち、浅い海域ほど波浪の作用により泥の堆積が妨げられ、それとは逆に深い地点ほど底面付近では波の影響を受けにくく、泥の堆積が生じやすくなっている。

一方、潮汐流の影響については先にも述べたように、平均潮位差が約30cmと小さく、湾口部で大潮時(潮位差約50cm)に実施された海底近傍の濁度の計測結果(Sanfordら,1997)からも、潮汐流が底泥を巻き上げることはない。したがって、潮汐流が懸濁物の沈降あるいは巻き上げの支配要因とはなっていないものと考えられる。

したがって本研究では、湾内に発生する風波による底面せん断応力と底泥堆積の関係について検討することとした。

3. 2 湾内の波浪場の推算と底面せん断応力の分布

(1) 波浪推算モデル

湾内の波浪場を推定するため、波浪推算法の一つである HISWA (Holthuijsenら,1989)を用いた数値シミュレー

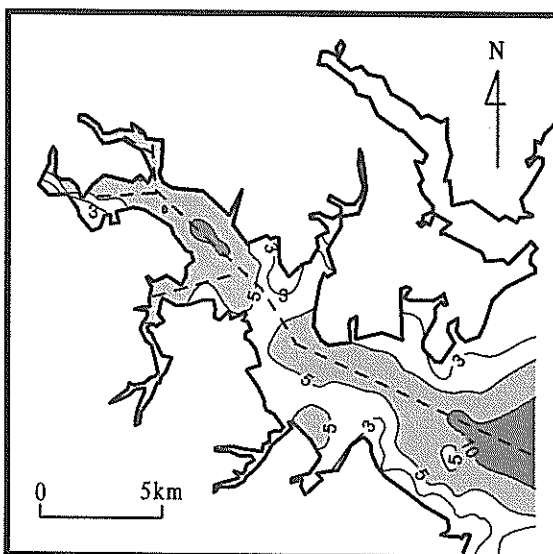


図-2 Baltimore 湾内の水深分布
(コンター単位: m, 破線は航路を示す。)

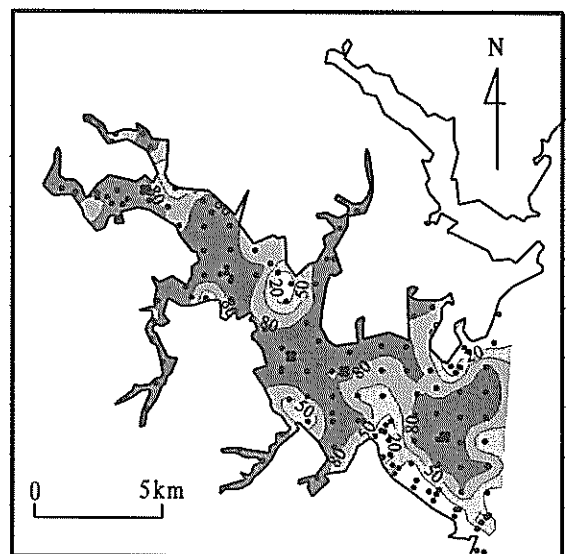


図-3 Baltimore 湾内の底質中含泥率
の分布(黒丸は観測点を示す。)

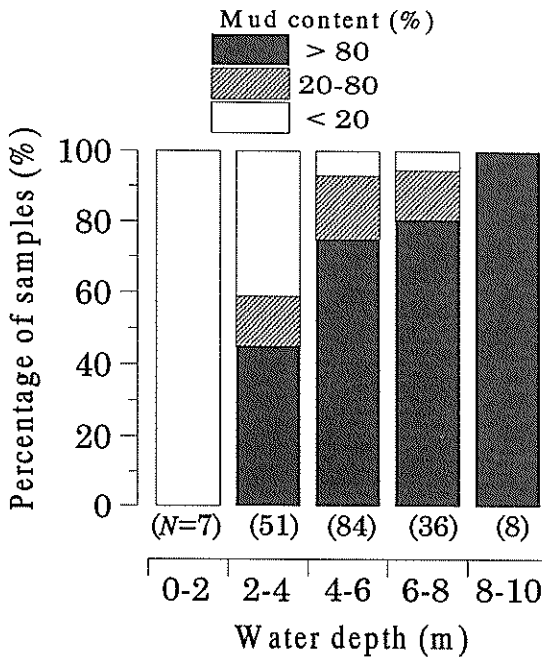


図-4 水深帯別にみた泥質物堆積地点数の割合
(カッコ内の数字は各水深帯におけるサンプル総数)

シオンを行った。同モデルでは時空間的に一様な風場を仮定し、十分発達した定常状態でのWave action保存式を基礎式として、任意地形に対する波浪の伝播計算を行うものである。具体的には、Wave action ($A=E/\sigma$,ここにE:エネルギースペクトル, σ :周波数)の0次モーメント(m_0)ならびに1次モーメント(m_1)を未知数とした連立微分方程式(式(1a)および(1b))を解くことにより、任意の風向・風速条件に対して、対象海域内の全計算格子点毎のWave action および平均周波数が求められる。さらに、これらを基に有義波高、平均波向き等の波浪諸元が算定される。

$$\frac{\partial}{\partial x}(c_x m_0) + \frac{\partial}{\partial y}(c_y m_0) + \frac{\partial}{\partial \theta}(c_\theta m_0) = T_0 \quad (1.a)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(c_x m_1) + \frac{\partial}{\partial y}(c_y m_1) + \frac{\partial}{\partial \theta}(c_\theta m_1) = T_1 \quad (1.b)$$

ここに、 c_x, c_y は平均周波数に対する群速度のx方向、y方向成分である。また、左辺第3項中の c_θ は角度方向のエネルギー伝播速度を表し、同項は屈折の効果を表すものである。また右辺は、風による波浪の発達、および砕波、底面摩擦等による波浪エネルギーの損失の効果を考慮したエ

ネルギー・ソース項(T_0, T_1)である。波の発達項に対してはJONSWAP型のスペクトル形を仮定し、同スペクトル形状を規定するパラメトリック・モデルとなっている。

本モデルの主な制約条件としては、波浪回折の効果は考慮されていないことと、時空間的に一様な風場に対して十分発達した波の場を対象としていることである。しかし、ここで対象とする海域は、防波堤背後等の局所領域ではなく回折の影響は重要ではないと考えられる。また、対岸距離が短いため、ある風場に対して波浪は短時間のうちに十分発達し、その程度は吹送距離に規定される。したがって、同モデルにおける飽和状態での波の定常性の仮定も、ここでは大きな問題とはならないものと考えられる。また、当海域と地形条件が類似するChesapeake湾北部を対象とした波浪推算の結果によると、本モデルが現地波浪データを精度良く再現できることが確認されている(Linら,1997)。

(2) 波浪による底面せん断応力

波浪による底面せん断応力の算定には、底面直上での波動運動に伴う流速振幅(U_b)により定義される次式を用いた。

$$\tau_b = \frac{1}{2} \rho f_w U_b^2 \quad (2)$$

ここに、 ρ は海水密度、 f_w は摩擦係数である。摩擦係数については、底質粒径と波浪周期の代表的な値を考慮し、ここでは0.03として一定値を与えた。また、底面直上での波浪運動による水粒子速度の流速振幅(U_b)に対しては、波浪推算の結果から得られる波浪のエネルギースペクトル $E(\theta)$ と平均周波数 $\sigma(\theta)$ により最大流速振幅(Booijら,1995)として次式により与えるものとする。

$$U_b = \sqrt{2 \int \frac{E(\theta) \sigma^2(\theta)}{\sinh^2(kh)} d\theta} \quad (3)$$

ここに、 k :波数、および h :水深である。

(3) 波高分布と底面せん断応力の計算例

波浪推算における風の条件設定に際しては、Baltimore湾南部に位置する気象観測局(図-1中Weather Stationと示された地点)で得られた風向・風速の実測データ(図-5)を参考とした。同図中に分類された4段階の風速レベルに対して5,10,15および20m/sの風速をそれぞれ対応させ、これらの風速条件ごとに16方位の風向きによる波浪場を計算した。なお、水平方向の空間解像度としては $\Delta x = \Delta y = 360$ mである。

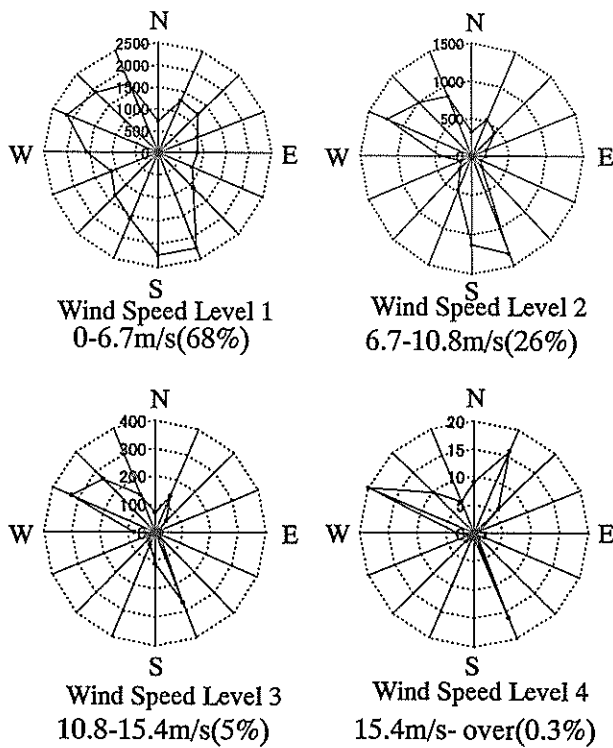


図-5 気象観測局(Tohmas Point)における各風速レベル毎の風向頻度分布 (1995～1999)

図-6は、計算結果の例であり、低風速時に高い頻度で発生する風向き条件を想定した、風速：5m/s、風向き：西北西の場合の有義波高分布である。湾奥から湾口に向かう風向きとなり、湾口部に向かって波高が増大するが、風速が小さいため湾口部においても波高は高々20cmとなっている。また、同図に対応する底面せん断応力の分布を図-7に示す。湾口部両岸の極岸付近を除き、湾内の広い範囲に渡って0.01Pa以下の小さな底面せん断応力しか作用しておらず、ここでの風速条件で生じる波浪場が堆積泥に及ぼす影響は小さいことがわかる。さらに、同じ低風速であるものの異なる風向き条件を想定した風速：5m/s、風向：南南東、の条件に対する波高分布と底面せん断応力を図-8および図-9に示す。この場合には、Chesapeake湾内で発達した波浪の影響により、図-6に比べ湾口部での波高がわずかに高くなっている。また、底面せん断応力の結果についても図-7と比較すると差異が見られ、南南東からの風向きのケースでは、湾口部両岸の岸付近では0.1Pa以上の大きなせん断応力が作用している。

一方、図-10および図-11は、より高風速の条件となる風速：20m/s、風向き：西北西、のケースに対する有義波高および底面せん断応力の分布である。湾口部での波高が80cmに達し、湾口付近の広い範囲で0.1Pa以上の大きな底面せん断応力が作用している。ただし、湾奥部

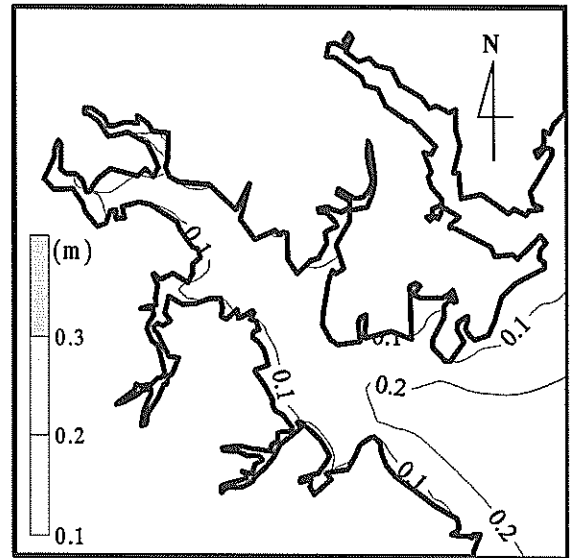


図-6 有義波高分布の計算例
(風速：5m/s、風向き：西北西)

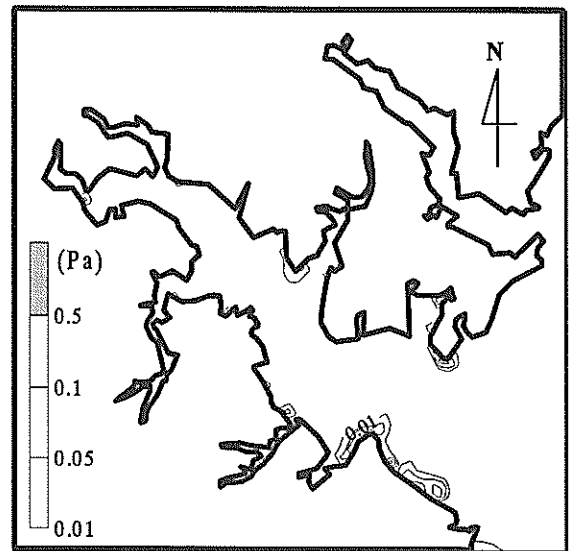


図-7 底面せん断応力分布の計算例
(風速：5m/s、風向き：西北西)

や航路内では依然として、比較的小さなせん断応力しか作用していないことがわかる。このように、泥質物の堆積分布の形成に大きな影響を及ぼすと考えられる波による底面せん断応力の分布は、波浪の発生要因である風向・風速条件により著しく異なったものになる。

3. 3 平均底面せん断応力と含泥率の関係

(1) 風速レベル毎の平均せん断応力との関係

前項で示したように、波浪による底面せん断応力の湾内の分布は、風向および風速に応じて大きく変化する。そこ

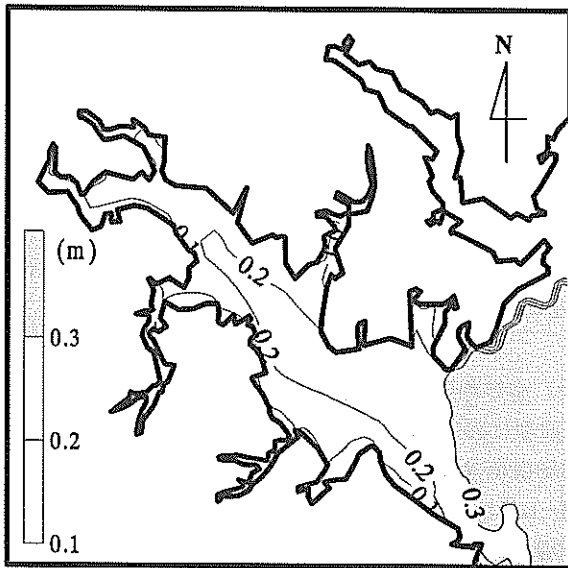


図-8 有義波高分布
(風速: 5 m/s, 風向: 南南東)

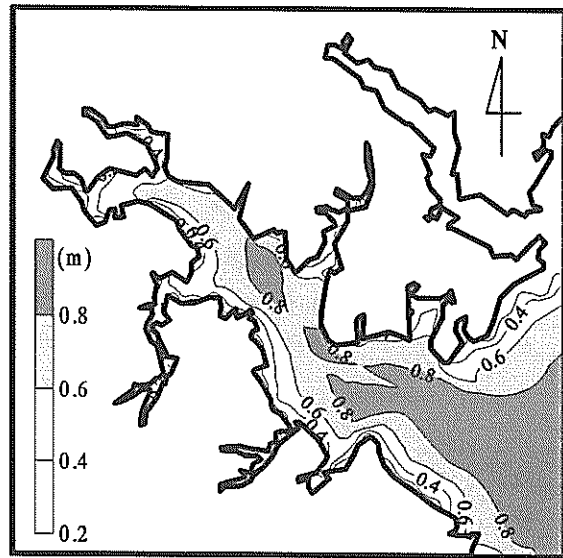


図-10 有義波高分布
(風速: 20 m/s, 風向: 西北西)

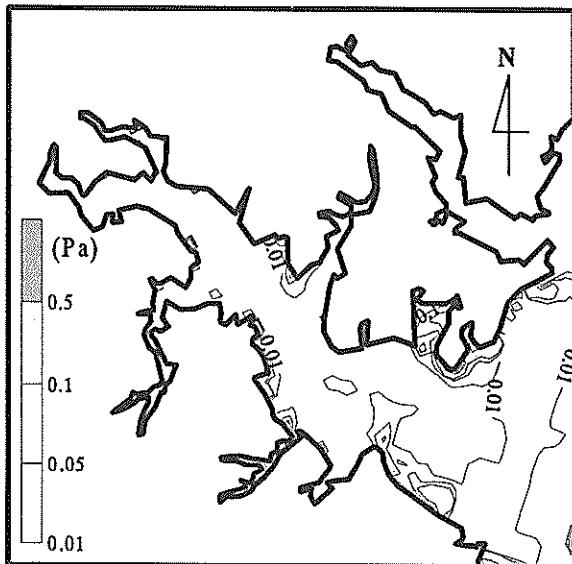


図-9 底面せん断応力分布
(風速: 5 m/s, 風向: 南南東)

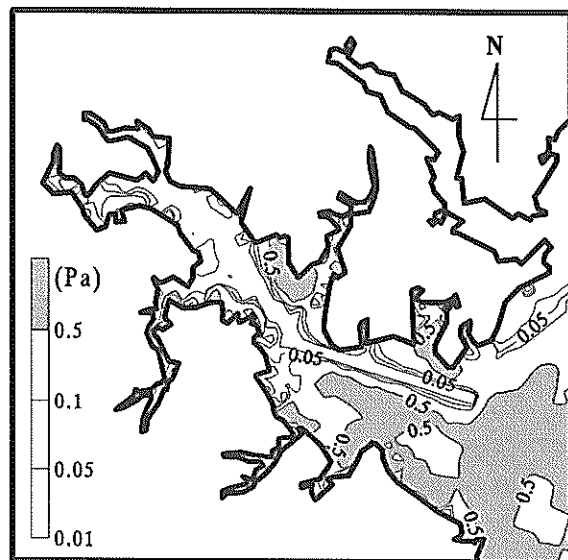


図-11 底面せん断応力分布
(風速: 20 m/s, 風向: 西北西)

で、図-5に示された風の発生頻度を考慮することにより、湾内各地点での平均的な底面せん断応力の値を求めた。まず、図-12は先に述べた4段階の代表風速(5, 10, 15, 20 m/s)による波浪場の計算を基に、各風速レベルごとの風向分布を考慮して求めた平均底面せん断応力と含泥率を比較したものである。ところで、当湾内で実施された底泥の侵食実験(Maaら, 1998)によると、巻き上げに関する限界せん断応力が0.05~0.11 Paと得られてい

る。これらの値の下限値以下では、底泥の巻き上げが生じることはなく、底面直上を浮遊する懸濁粒子の堆積だけが生じる。そこで、上記の下限値を堆積に関する限界せん断応力と仮定して図-12を見ると、まず静穏時(Wind speed level 1)の場合には、ほとんどの地点における底面せん断応力の値は堆積限界値未満となっている。

一方、より高風速の条件になるほど、含泥率の低い地点での底面せん断応力値の上昇が顕著に見られる。特に、

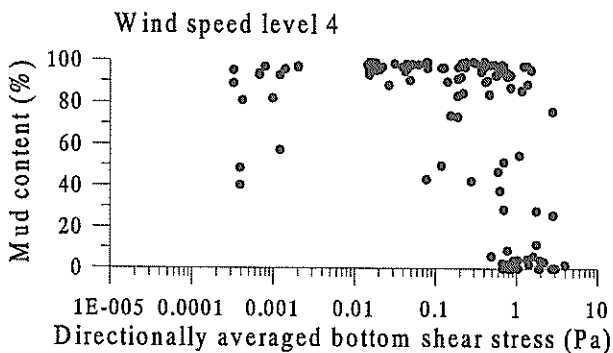
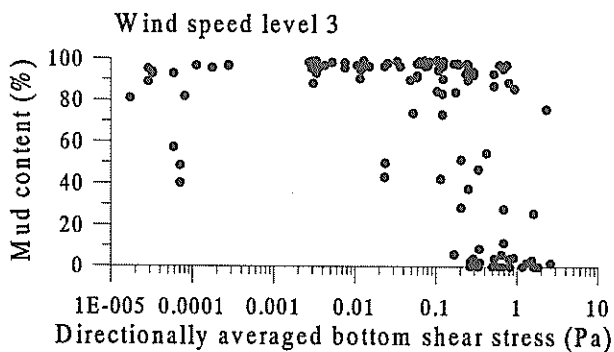
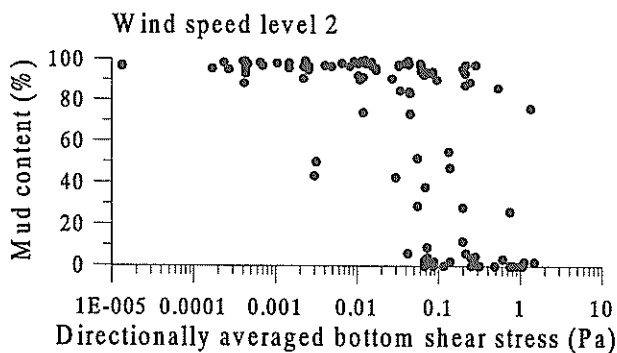
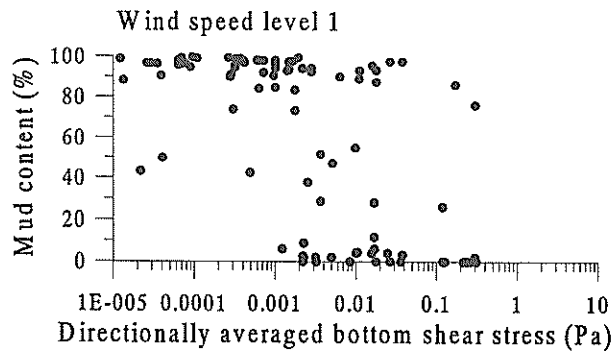


図-12 含泥率と風速レベル毎の風向分布に基づく平均的
底面せん断応力の関係

Wind speed level 2 以降では、含泥率20%以下の全ての地点において、平均せん断応力は堆積限界値以上の底面せん断応力が作用している。また、含泥率80%以上の地点においては、より高風速の条件になるほど、底面せん断応力の値は全般的に上昇するものの、依然として堆積限界値を下回る地点も多い。このため、含泥率が低い地点ほど平均底面せん断応力が大きいという関係が、その発生頻度は低くなるものの、高風速の条件ほど明瞭になることがわかる。

(2) 全平均底面せん断応力との関係

前項においては、風速レベル毎の風向頻度を考慮した平均底面せん断応力と含泥率の関係について検討した。図-13は、さらに各風速条件の発生頻度も考慮して、全平均底面せん断応力 ($\bar{\tau}$) を求め、含泥率との関係を示したものである。同図によると、含泥率20%以下の地点に作用する全平均底面せん断応力は、0.01~0.9Paの比較的大きな値の領域にのみ分布するのに対し、含泥率80%以上の地点に対しては、それよりも小さな全平均底面せん断応力が作用している地点が多いことがわかる。ただし、含泥率が高いにもかかわらず、0.1Pa以上の比較的大きな全平均底面せん断応力が作用する地点がいくつか見られる。

図-13では、湾内に流入する小河川の河道内に位置する採取地点を白丸により示し、湾内の地点(黒丸)と区別している。上で述べた高含泥率でありながら、全平均底面せん断応力が大きな地点には、河道内の地点が多く含まれていることがわかる。これらの地点では、波浪の数値計算の際に川幅が1格子点のみで表現されていることから、底面せん断応力を評価するのに、十分な精度を有する波浪の計算結果が得られていない可能性がある。また、河道内部での泥の供給や外力の特性は湾域とは異なることが考えられ、河道内でのデータを湾域のデータと同様に扱うことは難しいものと思われる。

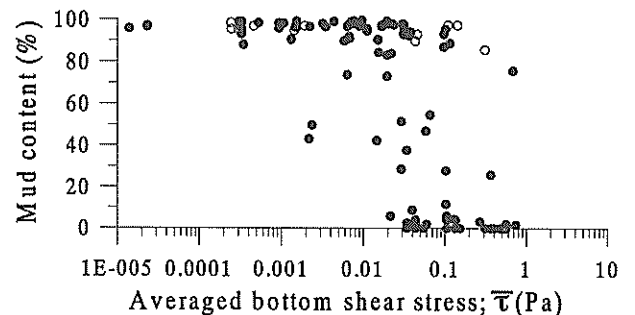


図-13 含泥率と全平均的底面せん断応力の関係
(黒丸：湾内、白丸：河道内)

図-13において、湾域のデータ(黒丸)のみに注目すると、含泥率が低いほど全平均底面せん断応力が大きくなる傾向がより顕著となり、両者の間での負の相関関係が見られる。しかしながら、作用外力の単なる時間平均に相当する全平均底面せん断応力では、堆積条件を表す指標として不十分と思われる。次章では、堆積に関する限界底面せん断応力を考慮した、新たな堆積指標について検討する。

4. 堆積確率指標と泥質物分布

4. 1 底面せん断応力と堆積確率指標

(1) 底面せん断応力の確率分布

図-14は、波浪による底面せん断応力の作用頻度に関する未超過確率の分布を、異なる含泥率の代表的な3地点について示したものである。これらの地点での全平均底面せん断応力の値は、それぞれSt.A:0.0022 Pa, St.B:0.029 Pa, さらにSt.C:0.56 Paとなっている。含泥率の違いに応じて底面せん断応力の分布が明らかに異なり、含泥率が高い地点(St.A)ほど含泥率が低い地点(St.C)に比べて、より小さな底面せん断応力の作用頻度が高くなっていることがわかる。

このような外力の分布特性を考慮すれば、前節において含泥率との関係性が示された全平均せん断応力よりも、より合理的に堆積条件を表す指標を得ることが可能と考えられる。例えば、海水中の懸濁物の海底面への堆積は、堆積に関する限界せん断応力以下の外力が作用する条件においてのみ生じるものとされる。したがって、上記の限界せん断応力の値が得られれば、図-14に示されたような未超過確率の分布を用いることにより、各地点での堆積が生じる時

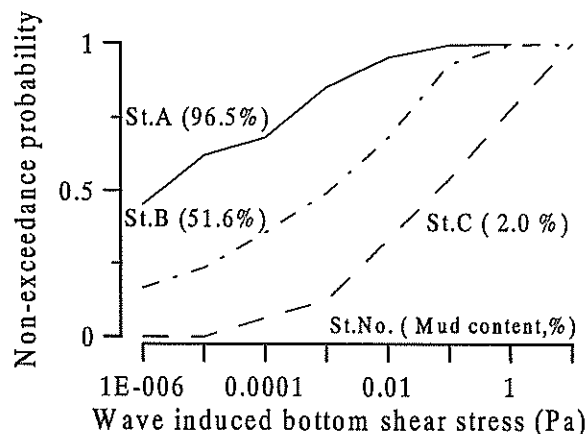


図-14 異なる含泥率地点に作用する波浪による底面せん断応力の未超過確率

間確率が求められる。一方、巻き上げに関する底面せん断応力以上の外力が作用すると、底泥の侵食が生じる。この場合には、巻き上げに関する限界せん断応力値に対する超過確率を図-14から求めることにより、各地点での巻き上げが生じる時間確率を求めることもできる。

このように、図-14で示したせん断応力の分布図を考慮することにより、各地点での泥の堆積や巻き上げに関連する外力特性について、作用確率に基づいた指標化が可能になる。

(2) 底面せん断応力と堆積確率の関係

泥の堆積と底面せん断応力との関係をさらに検討するため、ここでは堆積確率(probability of deposition)を考えるものとする。堆積確率は式(4)により表され、浮遊懸濁物の底面への堆積フラックスの算定時に用いられる(例えばMehta,1988)。同式は、作用する底面せん断応力が大きくなるほど底面付近の乱れが強くなり、自重沈降する懸濁物の堆積を阻害することを表したものであり、堆積に関する限界せん断応力値で堆積確率は0としたものである。

$$p(\tau) = 1 - \tau / \tau_{cd} \quad (\text{ただし } \tau > \tau_{cd} \text{ のとき } p(\tau) = 0) \quad (4)$$

ここに、 τ : 底面せん断応力, τ_{cd} : 堆積に関する限界せん断応力である。

(3) 堆積確率指標の導入

図-15は、底面せん断応力の確率密度関数($f(\tau)$)と堆積確率($p(\tau)$)との関係を模式的に表したものである。ここで式(5)に示したように、底面せん断応力の確率密度関数($f(\tau)$)に、堆積確率($p(\tau)$)を乗じて積分し

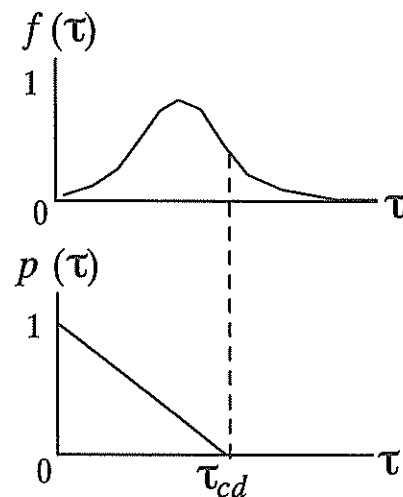


図-15 底面せん断応力の確率密度関数; $f(\tau)$ (模式図)と堆積確率; $p(\tau)$ の分布

たものを、堆積確率指標 (P_d) と定義する。この堆積確率指標は観測期間の平均的な堆積確率を意味している。

$$P_d = \int p(\tau) f(\tau) d\tau \quad (5)$$

ただし、図-5に示された風向・風速に関する確率密度関数 (F_{ij}) が、各風の条件で生じる底面せん断応力の確率密度関数に相当するため、実際には式(6)により直接堆積確率指標を求めている。

$$P_d = \sum_i \sum_j p_{ij}(\tau) F_{ij} \quad (6)$$

ここに i, j は風速(4段階)および風向(16方位)の分割指標である。

4. 2 堆積確率指標と含泥率の関係

(1) 堆積確率指標の湾内の分布

堆積確率指標を求める際に、式(4)中の限界せん断応力値 (τ_{cd}) を与える必要がある。ところが、沈降堆積物の粒径や密度等の粒子特性に依存する当パラメータについて、具体的な数値は得られていない。したがって、先にも述べた Baltimore 湾内における底泥の侵食実験 (Maaら・1998) の結果を、ここでは参考とすることとした。彼らの観測によると、底泥の堆積状態に応じて巻き上げ限界せん断応力の値は異なり、特に沈降粒子の圧密が進行する以前の懸濁物層 (fluff layer) が存在する場合に、湾内での巻き上げ限界せん断応力の下限值 (0.05 Pa) が観測されている。このような浮遊状態に近い懸濁物層の海底への沈着

を阻害する作用外力が、堆積に関する限界せん断応力の値に近いものと考え、ここでは 0.05 Pa を式(4)中の限界せん断応力値 (τ_{cd}) とした。

図-16は、式(6)により得られる堆積確率指標の湾内分布を示したものである。堆積確率指標が 0.8 以上となる領域 (同図中濃い灰色領域) が湾奥部にかけて広く分布し、一方堆積確率指標が小さい (波浪の影響を受けやすい) 領域が湾口部分に見られる。これらは、図-3の湾内含泥率分布における高含泥率および底含泥率の分布それぞれに極めて類似した傾向を示していることがわかる。

さらに同図に対応する、各底質採取地点ごとの堆積確率指標と含泥率の関係を図-17に示す。含泥率が大きな地点ほど堆積確率指標が大きくなる傾向がみられ、含泥率と作用外力の関係を示した図-13の結果とは逆に、両軸のパラメータの間に正の相関関係が見られる。なお、ここでは、湾域における底質採取地点のみを対象としている。

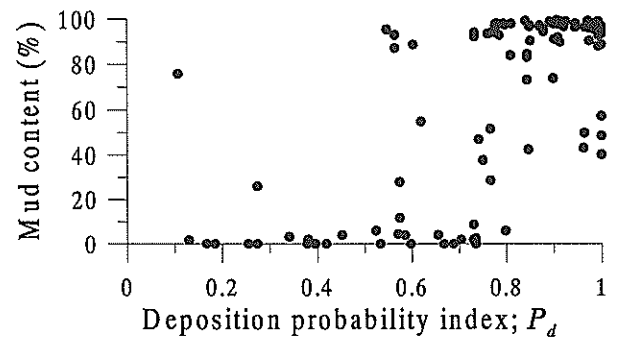


図-17 含泥率と堆積確率指標の関係

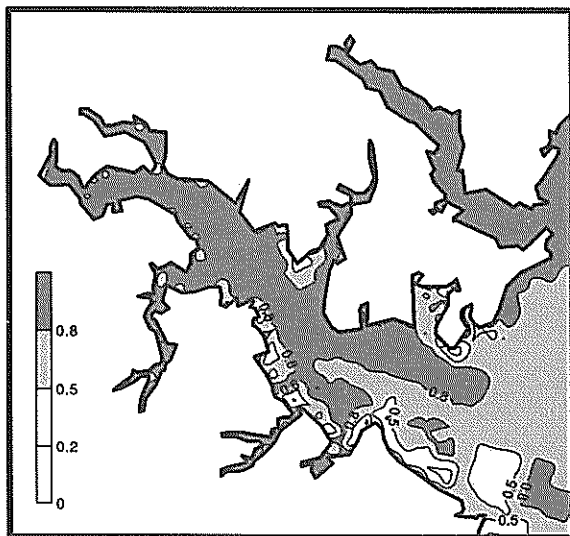


図-16 堆積確率指標の分布

(2) 堆積確率指標と泥質物堆積域の関係

図-17における、含泥率 80% 以上の泥質地点 (全 65 地点) を対象として、堆積確率指標 (P_d) に対するサンプル地点数の累加曲線を求めた結果を図-18中の黒丸にて示す。比較のため、含泥率 20% 未満の砂質地点 (全 28 地点) に対する結果も同図中 (白丸) に示す。同図をみると、泥質地点の 8 割近くは堆積確率指標が 0.8 以上となり、泥質物の堆積が進行しやすい外力条件の下にあることがわかる。これに対し、砂質地点においてはその全ての地点で堆積確率指標が 0.8 以下となり、波浪による底面への沈降物の堆積を阻止する状況の程度が大きくなること示されている。このように、高含泥率地点 (黒丸) の 8 割近くの地点での堆積確率指標は、低含泥率地点 (白丸) の堆積確率指標の上限值 (0.8) よりも大きな値となり、泥質物の堆積条件が堆積確率指標により、適切に表現され

ていることがわかる。

(3) 限界せん断応力の設定条件による計算結果への影響

上記の計算では、現地での侵食試験結果を基に仮定した、堆積に関する限界せん断応力を設定した。しかし、当パラメータの設定に依存して、結果は異なるものと考えられる。また、上記現地試験の結果は、円形流路内の海水の流れに伴う堆積物の巻き上げを観測したものであり、必ずしも波動運動のような振動流による巻き上げを対象としたものではない。さらに、巻き上げに関する底面せん断応力の値は、波動運動による振動流の場合には、一方向流の場合に比べて1/10~1/5程度の小さな値になるとの実験結果も見られる(楠田ら・1989)。

図-19は、限界せん断応力値(τ_{cd})を0.01とした場合の堆積確率指標の計算結果であり、式(4)における限界せん断応力値を変化させた場合に、どれほど結果に影響がみられるかを調べたものである。図-18との比較からわかるように、限界せん断応力値が小さくなったことにより、堆積確率指標は全般的に小さな値となっている。しかし、図-19では低含泥率域の堆積確率指標上限が約0.6となる一方で、高含泥率域に対しては約8割の地点はそれ以上の値となっている。すなわち、限界せん断応力値の設定に応じて堆積確率指標の値は変化するものの、図-18の結果同様、異なる含泥率の領域が堆積確率指標により明瞭に区分されていることが、図-19の結果により示されている。

5. 結論

以下に本研究で得られた主要な結論を記す。

(1) 風向・風速の頻度分布を考慮し、波浪推算の結果から算定した波による底面せん断応力の全平均値を求め、含泥率との比較を行った。その結果、低含泥率の領域ほど全平均底面せん断応力の値は大きくなり、両者の間には負の相関が見られることが示された。また、風速レベルごとに平均化された底面せん断応力と含泥率の比較からは、発生頻度が低いに関わらずより高風速の条件において、負の相関関係が強まることがわかった。

(2) 波による底面せん断応力の確率分布と堆積確率を考慮した堆積確率指標を新たに導入し、泥質物の堆積と底面せん断応力の作用条件との関係について検討した。本指標により、含泥率の異なる領域が明瞭に区分されることがわかり、波による底面せん断応力の作用条件が泥質物の堆積環境を強く支配していることが示された。

6. おわりに

本研究では、内湾域の泥質堆積物の分布形成と作用外力との関係を調べることを目的として、波浪による底面せん断応力の作用と底質中含泥率との関係について検討した。その結果、波浪運動の底面への作用の程度を反映した堆積確率指標が、泥質物の堆積状況を示す指標とし

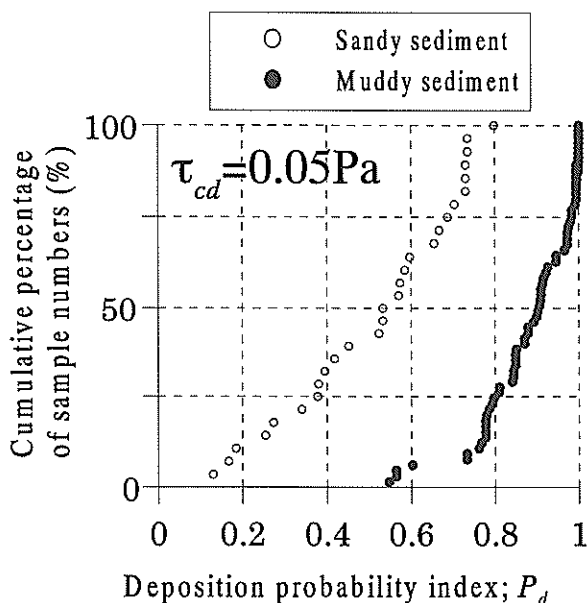


図-18 泥質および砂質地点を対象とした堆積確率指標に関するサンプル数累加曲線 ($\tau_c=0.05\text{Pa}$ の場合)

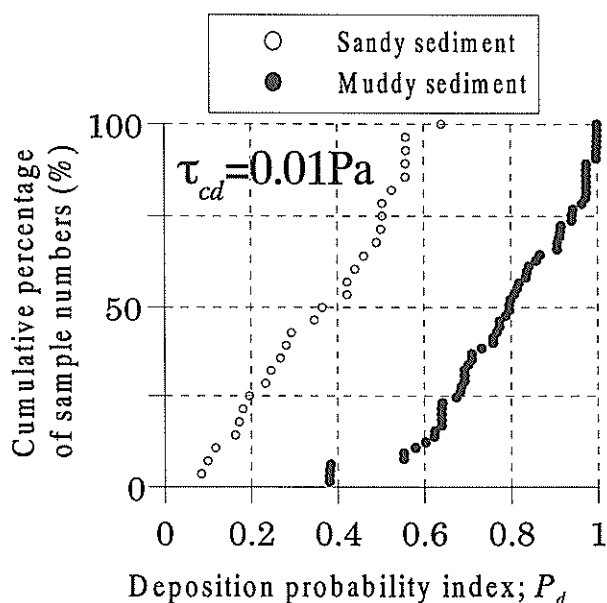


図-19 泥質および砂質地点を対象とした堆積確率指標に関するサンプル数累加曲線 ($\tau_c=0.01\text{Pa}$ の場合)

て活用できることが示された。本指標の活用方法としては、例えば埋め立て等の海岸地形の改変による波浪場の変化が生じた場合、そこでの堆積確率指標の変化から将来的な堆積状況の変化をある程度予測することが可能と考えられる。

また、上記の結果は潮汐流の影響が小さく、波浪の影響が抽出しやすい条件の海域を対象として検討されたものである。しかし、波浪場だけが卓越する海域のみならず、同時に潮汐流等の流れ場も考慮する必要がある場合にも、両者の寄与を考慮した底面せん断応力に基づく堆積確率指標の導入により泥質物の堆積条件を表すことが可能と考えられる。

一方、泥質物の堆積量や組成の変化の予測については、供給量の変動や粒径等の質的情報も考慮した泥質物の輸送に関するモデルの開発を今後行っていく必要がある。ただし、泥質物の堆積に基づく底質環境の変化は、物理過程にとどまらず、生化学的な要素も複雑に関与することから、現地観測あるいは室内実験を通じて、対象とする海域における泥質物の輸送・堆積特性を十分把握し、より合理的な予測手法を開発していくことが必要である。

謝辞

本研究の一部は、著者が平成11年度科学技術庁(当時)長期在外研究員派遣制度により、米国メリーランド大学環境科学センターに一年間在外研究員として滞在した際に行ったものである。本研究の遂行にあたり、ホーンポイント研究所のLarry Sanford助教授に適切な助言を頂き、また波浪数値プログラムを利用させていただいた。底質データについてはメリーランド州資源環境保護局のDr.Jeff Halkaより提供していただいた。最後に、本稿の執筆にあたり、高橋重雄海洋・水工部長から大変有益な助言と指導を頂いたこと、また同部の研究員諸氏からも貴重な助言を頂いたことを記し、謝意を表する次第である。

参考文献

- 石渡良志(1988), 東京湾への陸源有機物の流入と堆積, 沿岸海洋研究ノート, 第25巻, 第2号, pp.127-133.
- 楠田哲也・山西博幸・吉見博之・二渡了(1989), 攪乱・不攪乱底泥の巻き上げ特性に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第36巻, pp.314-318.
- 谷本照巳・川名吉一郎・山岡到保(1984), 瀬戸内海における底質の粒度組成と有機物, 中国工業技術試験所報告, No.21, pp.1-11.
- 中川康之(1998), 内湾域における泥質物の堆積過程に関する研究, 港湾技術研究所報告, 第37巻, 第4号, pp.113-133.

- 橋本俊也・柳哲雄・武岡英隆・高田秀重(1998), 東京湾のPCB分布・堆積モデル, 沿岸海洋研究, 第36巻, 第1号, pp.77-82.
- 星野通平編(1971), 浅海地質学, 東海大学出版会, 海洋科学基礎講座7, 445p.
- 松本英二・横田節哉(1977), 底泥からみた東京湾の汚染の歴史, 地球化学, 11, pp.51-57.
- Booij, N., and Holthuijsen, L. H. (1995), HISWA user manual, TU Delft, 87p.
- Holthuijsen, L. H., Booij, N., and Grant, W. D. (1989), A prediction model for stationary, short-crested waves in shallow water with ambient currents, Coastal Engineering. 13, pp.23-54.
- Lin, W., Sanford, L.P., Allewa, B.J., and Schwab, D.J. (1997), Surface wind wave modelling in Chesapeake Bay, Proc. of Ocean Wave Measurement and Analysis, ASCE, pp.1048-1062.
- Maa, P.Y. J., Sanford, L., and Halka, J.P. (1998), Sediment resuspension characteristics in Baltimore Harbor, Maryland. Marine Geology. Elsevier. 146. pp.137-145.
- Mehta, A.J.(1988), Laboratory studies on cohesive sediment deposition and erosion, Physical processes in estuaries, Springer-Verlag. pp.427-445.
- Sanford, L. P. (1994), Wave-forced resuspension of upper Chesapeake bay muds, Estuaries, Vol.17, No.1B, pp.148-165.
- Sanford, L. P. (1997), Sediment transport in Baltimore Harbor, UMCES, HPL, Cambridge, MD, 130 pp.
- Sanford, L.P., Chao, S.Y., Chang, M.L., Baker, J.E., Cornwell, J.C., Halka, J.P., and Nakagawa, Y. (2000), A modeling contamination sediment transport in Baltimore harbor, MD, USA, Proc. of 6th International Conference on Nearshore and Estuarine Cohesive Sediment Transport Processes (in press).
- Sinex, S.A., and Helz, G.R. (1982), Entrapment of zinc and other trace elements in a rapidly flushed industrialized harbor, Environmental Science Technology, 16, pp.820-825.