

# 閉鎖性水域における新生堆積物の挙動に関する実態調査

宮岡 修二 山本 縁  
辻 博和

## Characterization of sinking particles in semi-enclosed water

Shuji Miyaoka Yukari Yamamoto  
Hirokazu Tsuji

### Abstract

Dredging and sand-capping are common methods for improving semi-enclosed water environments. However, it is doubtful if the improvement effect is long-term. This is because sinking particles are deposited on the bed, thus polluting the bottom sediment. Thus, a sediment trap experiment was carried out at Kishiwada port to clarify the characterization of settling particles. It was found that undecomposed phytoplankton comprised the major organic component of the sinking particles. The flux of the sinking particles in summer was higher than that in winter. Samples of settling particles were decomposed in our laboratory. Their organic components were rapidly revolved in the water. It was thus shown that it is necessary to moderately treat sinking particles in order to conserve the water environment, especially in summer.

### 概要

富栄養化した閉鎖性水域の多くでは、これまで浚渫や覆砂による底質改善が図られてきた。しかし、施工後、新たな堆積物、すなわち、新生堆積物によって底質表面の有機汚染が再び進み、改善効果が長続きしないという懸念がある。そこで、長期的に適正な水域環境の保全手法を開発するためには新生堆積物の実態解明が必要と考え、調査を実施した。対象としたのは大阪湾内の岸和田旧港である。水域内に新生堆積物捕集容器を係留して試料を採取し、その諸性状を分析した。その結果、新生堆積物の有機成分は主に比較的未分解な植物プランクトンに由来し、堆積フラックスは夏場に多いことがわかった。また、室内での分解実験から、新生堆積物中の有機成分の多くが比較的短期間に分解し、水中に回帰していることがわかった。これらの知見を総合すると、特に夏場の水域環境を保全するうえで新生堆積物を考慮した対策の実施が重要であると結論された。

### 1. はじめに

富栄養化した閉鎖性水域の多くでは、これまで浚渫や覆砂による底質改善が図られてきた。閉鎖性水域における環境悪化の因果関係を整理すると、Fig.1の通りである。この図からわかるように、底質改善は、底質から溶出する栄養塩類を削減して富栄養化を抑制することと、底質による酸素消費を軽減して貧酸素化を抑制することが目的となっている。その一方で、底質表面には、水中の粒子状物質が沈降堆積しており、底質は常に新しい堆積物、すなわち、「新生堆積物」によって更新されている。流入負荷が十分に低減されていない停滞水域では、直接流入する有機性汚染物質や水域内部で増殖する植物プランクトンなどが堆積し、底質表面の有機汚染が再び進行して底質改善効果は長続きしないという懸念がある。ところが、こうした新生堆積物に着目した調査研究は乏しい<sup>1),2),3)</sup>。

そこで、新生堆積物の堆積を考慮しつつ、長期的に水域環境を保全する技術の開発を目指して、新生堆積物に

関する基礎的な知見を得るための調査研究を実施した。調査は典型的な閉鎖性水域である岸和田旧港を対象とし、実態把握を目的とした現場調査と、水底に堆積したあとの動態把握を目的とした室内実験を行った。

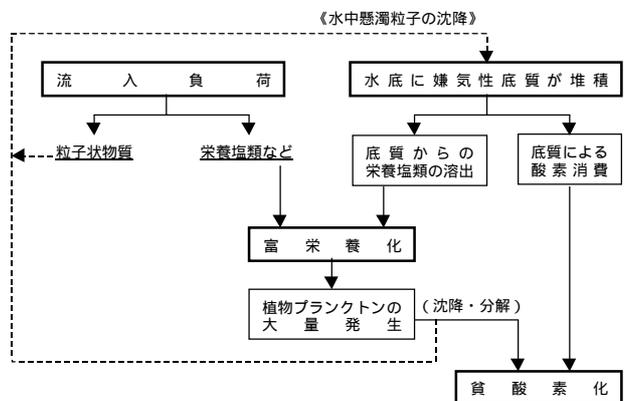


Fig.1 閉鎖性水域における環境悪化の因果関係  
Characteristics in Semi-enclosed Water Environment

Table 1 現地調査の実施状況  
Summary of On-site Investigation

|        | 第1回                           | 第2回                  | 第3回                               | 第4回                             | 第5回                           |
|--------|-------------------------------|----------------------|-----------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|
| 調査期間   | 1995年<br>9月11日～21日            | 1998年<br>5月18日～7月16日 | 1999年<br>7月22日～23日                | 1999年<br>8月24日～25日              | 2000年<br>2月22日～23日            |
|        | 10日間                          | 60.75日間              | 19.25時間                           | 23.50時間                         | 22.00時間                       |
| 調査地点水深 | 12～13m                        | 12～13m               | 12～13m                            | 12～13m                          | 12～13m                        |
| 捕集深度   | 3層                            | 1層                   | 3層                                | 3層                              | 3層                            |
|        | 中：底面+8m<br>中：底面+4m<br>下：底面+1m | 下：底面+1m              | 上：水面-1m<br>中：底面+7.5m<br>下：底面+1.5m | 上：水面-1m<br>中：底面+6m<br>下：底面+1.5m | 上：水面-1m<br>中：底面+5m<br>下：底面+1m |
| 天候     | 9/11 晴                        | 5/18 雨               | 7/22 晴                            | 8/24 晴                          | 2/22 晴                        |
|        | 9/21 晴                        | 7/16 雨               | 7/23 晴                            | 8/25 晴                          | 2/23 晴                        |
| 透明度    | 9/11 1.8m                     | 5/18 1.1m            | 7/22 2m                           | 8/24 0.7m                       | 2/22 5m                       |
|        |                               | 7/16 1.6m            |                                   | 8/25 1m                         |                               |

Table 2 新生堆積物に関する分析項目  
Items of Sinking Particles' Analysis

| 分析項目                 | 略称    | 分析方法      |
|----------------------|-------|-----------|
| 堆積物乾燥重量              | 乾燥重量  | 105 乾燥重量  |
| 堆積厚                  | 堆積厚   | 堆積物容積の測定  |
| 懸濁態有機炭素              | POC   | CHNコーダ    |
| 懸濁態窒素                | PN    | CHNコーダ    |
| 懸濁態リン                | PP    | 過硫酸カリウム分解 |
| クロロフィルaと<br>フェオ色素の含量 | Chl.a | Lorenzen法 |

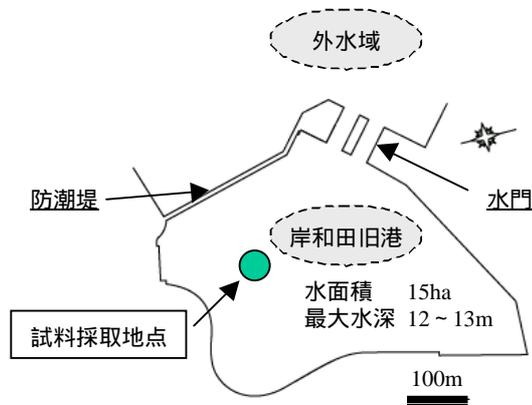


Fig.2 調査水域および調査地点  
Location of the Sampling Station in Kishiwada Port

## 2. 調査・実験方法

### 2.1 調査水域

調査は、Fig.2に示す岸和田旧港内の水深が約12mの地点で実施した。当該水域は防潮堤で囲まれており、外海とは水門部分でしか外海と接していない。定常的に流入する河川はないが、排水管があり、降雨が続くと雨水等が流入することはある。

### 2.2 新生堆積物の試料採取及び分析方法

新生堆積物の現地調査はTable 1に示す通り、計5回実施した。その内訳は、夏場の試料採取が3回、冬場の試料採取が1回、そして新生堆積物の堆積厚測定を目的とした長期間での試料採取が1回である。調査には、Photo 1に示す内径7cmの円筒形の新生堆積物捕集器<sup>2)</sup>を用いた。この新生堆積物捕集器を架台に固定して、上層、中層、下層で試料を採取した。上層は水面のブイからチェーンを垂下し、水面-1mの位置に架台を設置した。中層、下層については、水底に投入したシンカーから水中ブイを使ってチェーンを直立させ、これに架台を固定した。中層は水底面から4～8m上方に、下層は水底面から1～1.5m上方に架台を設置した。

Fig.3には、現地における試料採取と試料運搬及び分析の作業フローを示す。現地では、まず新生堆積物捕集器の係留架台を所定に深度に設置した。捕集容器には、あらかじめ係留深度の海水(以後、初期海水)をバンドーン採水器で採取し充填した。容器は筒の口に栓をした状態



Photo 1 新生堆積物捕集器  
Vessels to Collect Sinking Particles

- (1) 新生堆積物捕集容器係留用架台を設置
- (2) 捕集容器に係留水深の海水(初期海水)を満し密栓
- (3) 潜水作業で捕集容器を水中に設置
- (4) 設置後に栓をはずし、捕集を開始
- (5) 基本的に、24時間係留して捕集作業を終了
- (6) 潜水作業で再び栓をし、回収
- (7) 10 以下に保冷して実験室に運搬
- (8) 初期海水と係留後の容器内試料の懸濁態成分を分析
- (9) 両者の差から、新生堆積物の性状と堆積速度を算出

Fig.3 現地調査・分析フロー  
Procedures of On-site Investigation and Analysis

で、潜水作業により架台に固定した。その後、容器の栓を外し新生堆積物の捕集を開始した。調査終了時には再度潜水し、捕集容器に栓をした後、船上に引き上げた。実験室に持ち帰り、初期海水と水域設置後の容器内試料のそれぞれについて、懸濁態成分をろ紙に捕集し、その分析を行った。新生堆積物は、両者の差から求めた。分析項目はTable 2に示した通りである。なお、表中には各分析項目の略称を併記した。以降では、分析項目は表中の略称を用いて記載する。また、比較のために、新生堆積物の試料採取終了後に、エクマンバージ採泥器を用いて同地点の表層底質を採取し、併せて分析した。

### 2.3 新生堆積物の分解実験

新生堆積物は徐々に分解して、栄養塩類は水中に回帰する。この新生堆積物の分解挙動を把握する目的で、室内で分解実験を行った。実験の概要はTable 3に示した。実験には1999年8月に採取した新生堆積物試料溶液を用い、これを約100mlのガラス容器4本に満たして密閉し、水封後に20℃、暗条件にて静置培養した。0、20、42、76日経過後に、1本ずつ開封して、分析に供した。分析項目は、溶存酸素濃度、無機態窒素、リン酸態リンとした。

### 2.4 不攪乱底質試料を用いた溶出実験

底質から上面の水への物質移動の実態を把握するため、底質表面からの栄養塩類の溶出速度を測定した。実験の概要はTable 4に示した。実験には、新生堆積物捕集地点において2000年7月に採取した不攪乱底質試料を用いた。内径9cmのアクリル管を用い、潜水作業で厚さ約25cmの試料を採取し、底質表面を乱さないようにして実験室に持ち帰った。試料底質の上面には、現地海水を孔径1μmのろ紙でろ過した海水を約8リットル充填し（以後、直上水）、密閉状態で培養した。なお、直上水は攪拌子を用いて底泥を巻き上げない程度に攪拌した。直上水を0、1、2、5、8、12、20日経過後に、100mlずつ採水し、POC、PN、無機態窒素(IN)、リン酸態リンの分析を行った。

## 3. 結果

### 3.1 新生堆積物の堆積厚

1998年に、5月から7月までの約60日間をかけて新生堆積物を捕集した。この間に容器に貯まった泥分を自然沈降させて、固液界面が安定したところで、その容積を測定した。この容積を新生堆積物捕集器開口部の断面積で除して、堆積厚を求めた。Table 5にその結果を示した。1年間での堆積厚に換算すると、7.8mm/年となった。後述するが、新生堆積物の堆積速度は冬場には減少する。また、堆積後の分解、減容化も進む。これらのことを考慮すると、堆積厚は年間で数mm～1cm程度になると予想される。なお、Table 5には、流入河川の影響が強いと考えられる東京湾運河部における調査結果を併記した。文献によると、14～19mm/年と報告されている。土砂の直接的な

Table 3 分解実験の概要  
Conditions of Decomposition Experiment

|      |          |
|------|----------|
| 供試試料 | 1999/8採取 |
| 温度条件 | 20       |
| 光条件  | 暗        |
| 酸素供給 | なし       |
| 実験期間 | 76日間     |

Table 4 底質溶出実験の概要  
Conditions of Elution Experiment

|      |                           |
|------|---------------------------|
| 供試試料 | 2000/7採取<br>港内最深部の不攪乱柱状試料 |
| 温度条件 | 24                        |
| 光条件  | 暗                         |
| 酸素供給 | なし                        |
| 実験期間 | 21日間                      |

Table 5 新生堆積物の堆積厚  
Thickness of Newly Sediment

| 水域                   | 堆積厚       | 備考                    |
|----------------------|-----------|-----------------------|
| 岸和田旧港                | 7.8 mm/年  | 61日間(98/5/18～7/16)で調査 |
| 東京湾運河域 <sup>1)</sup> | 14～19mm/年 | 年間3回の計測で、計3ヶ年調査       |

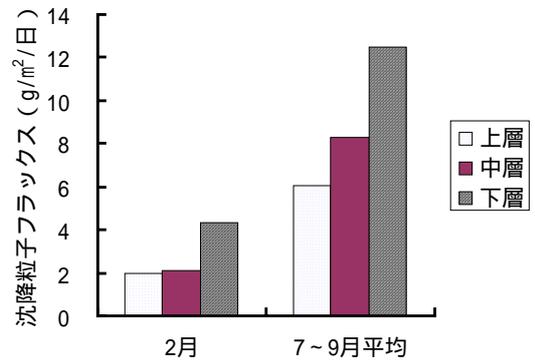


Fig.4 沈降粒子の堆積速度の季節変動  
Seasonal Changes of Mass Fluxes in Sinking Particles

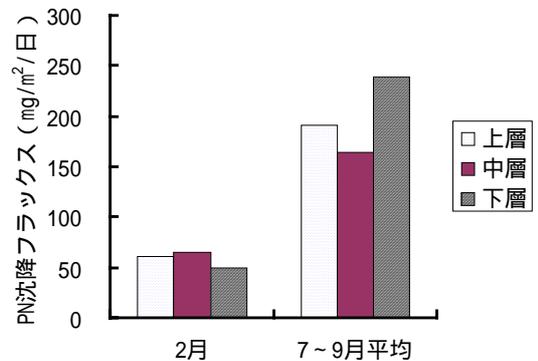


Fig.5 PN堆積速度の季節変動  
Seasonal Changes of PN Fluxes in Sinking Particles

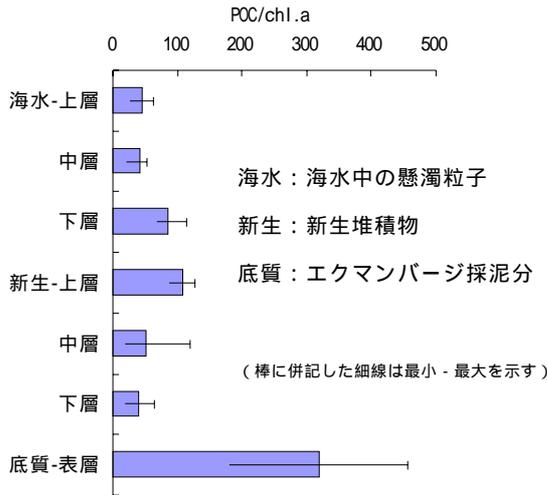


Fig.6 POC/chl.aの比較  
Comparizon of POC/Chl.a

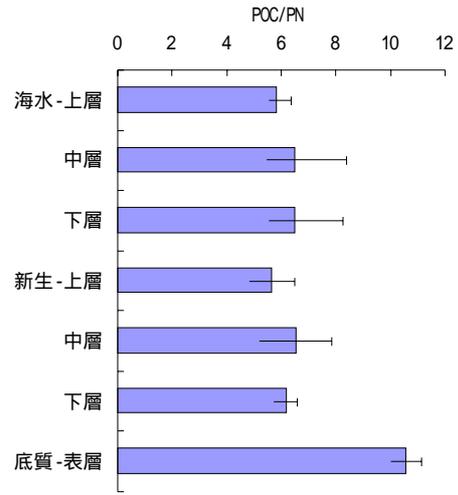


Fig.7 POC/PNの比較  
Comparizon of POC/PN

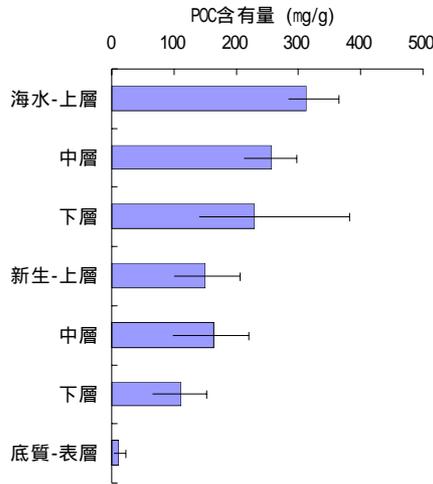


Fig.8 POC含有量の比較  
Comparizon of POC Contents

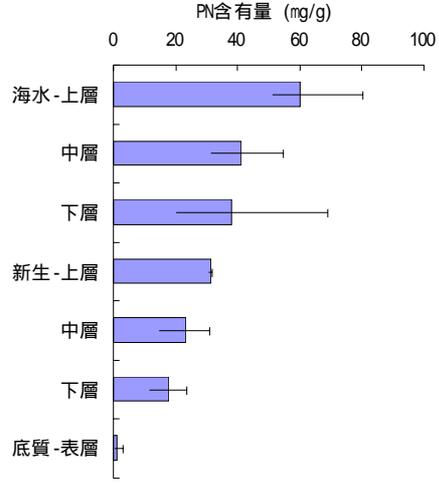


Fig.9 PN含有量の比較  
Comparizon of PN Contents

流入があまりない岸和田旧港における調査結果はこの文献値よりもやや低かったわけであるが、流入河川などの現場環境の違いを考慮すると、岸和田旧港の調査結果は妥当な数値と判断される。

### 3.2 新生堆積物の堆積速度

Fig.4, Fig.5はそれぞれ、新生堆積物の乾燥重量とPNの堆積速度を図示したものである。時期による違いをみるため、冬季2月の結果と、夏季7~9月の平均値にわけて示している。新生堆積物の乾燥重量、PNのどちらの堆積速度も、冬季に比べて夏季のほうが堆積速度が大きかった。夏季に堆積速度が大きい理由としては、有光層における植物プランクトンの生産量が大きいことに因ると考えられる。さて、大阪湾淀川河口沖の埋立地地先の水深10m強の地点において、85、86年の6月に同様の方法で調査された結果では、17~80mg-N/m<sup>2</sup>/日と報告されている<sup>2)</sup>。文献値と比較すると、夏場の岸和田旧港のほうが2~3倍も大きい。同じ大阪湾の湾奥水域ではあるが、岸和田旧港のように陸地に囲まれた水域最奥部の停滞水

域では、底質に対する堆積負荷がより大きいことが伺える。なお、今回の調査方法では、新生堆積物の堆積速度を大きめに見積もる可能性のあることを付記しておく。実際には、水中の粒子状物質は下方へ沈降するだけでなく、流れによっては上昇することもある。しかし、この方法では、捕集容器の口を下方に通過した粒子状物質は、大部分がそのまま容器内に拘留され、新生堆積物として回収される。そのため、水域内の鉛直方向の循環が強い場合には、堆積速度が大きめに見積もられる可能性がある。その影響については別の機会に検討したい。

### 3.3 新生堆積物の化学性状

新生堆積物を底質への汚濁負荷としてとらえ、その有機成分の特徴を述べる。Fig.6には、新生堆積物、海水懸濁物質、底質表層部のそれぞれについて、POCとChl.aの比(POC/Chl.a)を示した。新生堆積物と海水懸濁物質の値はよく似ており、50~100であった。一方、底質表層部のそれは約300と大きかった。海水懸濁物質中の植物プランクトンのPOC/Chl.aは、東京湾では夏が86、冬が68と報

告されいる<sup>3)</sup>。岸和田旧港で測定された新生堆積物と海水懸濁物質の値はこの文献値と近いことから、有機成分は主に植物プランクトンに由来していると考えられる。

次にFig.7に、POCとPNの比（POC/PN）を示す。新生堆積物、海水懸濁物質のC/N比はともに6前後であり、植物プランクトンに関する文献値と同程度であった。一般に、窒素は易分解性有機物質に多く存在し、それが分解されるとC/N比が大きくなることが知られている。よって、この結果から、新生堆積物中の有機成分はあまり分解が進んでいないと考えられる。一方、底質表層部のPOC/PNは10～11であり、窒素の比率は小さくなっていた。底質表層の有機成分のうち、易分解性有機物の分解が進んでいるものと考えられる。

Fig.8, Fig.9にはそれぞれ、新生堆積物、海水懸濁物質、底質表層部の有機炭素含有量と、窒素含有量を示した。新生堆積物の有機炭素、窒素含有量は同じ深度の海水懸濁物質に比べると約1/2であった。前述したように、新生堆積物と海水懸濁物質の有機成分の内容はよく似ている。したがって、含有量の違いは各々の粒子中に占める無機成分の割合の違いによると考えられる。例えば、新生堆積物となる粒子状物質が沈降する過程では土粒子などの無機成分と集合体を形成しているのではないかと考えられる。

### 3.4 新生堆積物の分解特性

環境が悪化する夏場の物質循環過程の実態把握を目的として、20日間の無酸素状態における新生堆積物の分解実験を行った。分解実験開始後、試料溶液中の溶存酸素濃度は速やかに消費され、2日後には0.1mg/l未満となった。Fig.10には、新生堆積物の分解実験の結果を初期PNの分解率として示した。ここでまず、PN分解率について説明する。実験では、初期水のPNと各経過日数ごとの試料海水中的無機態窒素濃度を測定した。まず、初期水の無機態窒素濃度を元にして、無機態窒素濃度の増加分を求めた。次に、この無機態窒素増加分を初期PNで除してPN分解率を求めた。

$$\text{PN分解率} = (\text{無機態窒素増加分} \div \text{初期PN}) \times 100$$

図より、0～20日まで期間でのPNの分解が速く、大きいことがわかる。そして、その後の変化は緩やかになっている。分解実験をおこなった76日間でのPN分解率は、50～70%となった。Fig.11には、PPについての結果を示した。PNと同様の傾向がみられ、初期の分解率は窒素よりもやや大きかった。

これらの結果から、新生堆積物の分解は主として、初期の20～40日の期間に進行すること、そして、2～3ヶ月後には新生堆積物中のN、Pの50～80%が水中に回帰することがわかった。

### 3.5 底質からの栄養塩類溶出速度

前節の分解試験を補完するため、夏場の現地不攪乱底質表面からの栄養塩類の溶出速度を測定した。底質直上水中の溶存酸素濃度が0.1mg/l未満の無酸素状態にお

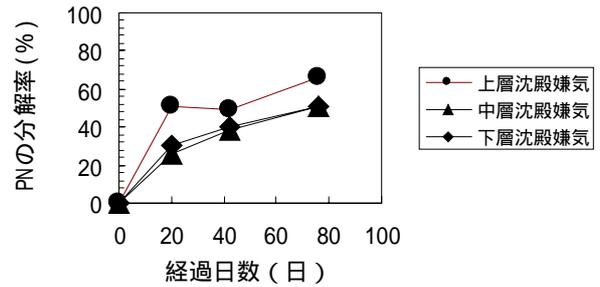


Fig.10 PN分解（無機化）率の経日変化  
Time Course of PN Decomposition Ratio

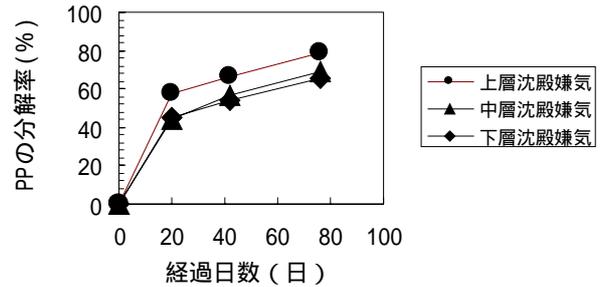


Fig.11 PP分解（無機化）率の経日変化  
Time Course of PP Decomposition Ratio

Table 6 底質からの栄養塩類の溶出速度  
Nutrient Salts Elusion Rate of Bottom Sediment

| 項目     | 溶出速度                    |
|--------|-------------------------|
| 無機態窒素  | 173mg/m <sup>2</sup> /日 |
| リン酸態リン | 20mg/m <sup>2</sup> /日  |

る無機態窒素、リン酸態リンの溶出速度の計算結果は、Table 6に示したように、それぞれ173、20mg/m<sup>2</sup>/日であった。一方、夏場のPN堆積速度はFig.5に示したように、150～250mg/m<sup>2</sup>/日であり、PPについては図示していないが、20～60mg/m<sup>2</sup>/日であった。窒素の溶出速度は、堆積速度に比べて70%以上の値であり、リンは30%以上であった。堆積速度に対する溶出速度の比率は、先の新生堆積物の分解率と近い値が得られたことは興味深い。

## 4. 考察

### 4.1 新生堆積物の特徴

閉鎖性水域において、新生堆積物の実態調査および室内実験を実施した。その結果から、新生堆積物の特徴は、以下のように整理される。

- 1) 堆積厚は年間数mm～1cm程度である。
- 2) 夏場に、堆積速度は高くなる。
- 3) 沈降粒子は有機成分と無機成分の集合体をなす。
- 4) 有機成分は主に、植物プランクトンに由来している。
- 5) 有機成分は水中では未分解のまま堆積していく。
- 6) 堆積後は嫌気分解が進み、1～3ヶ月の間に、堆積した窒素、リンの40～80%が水中に回帰する。

なお、調査対象とした岸和田旧港は陸域に面した典型的な閉鎖性水域であることと、陸域からの土砂等の直接流入は比較的少ないことを付記しておく。

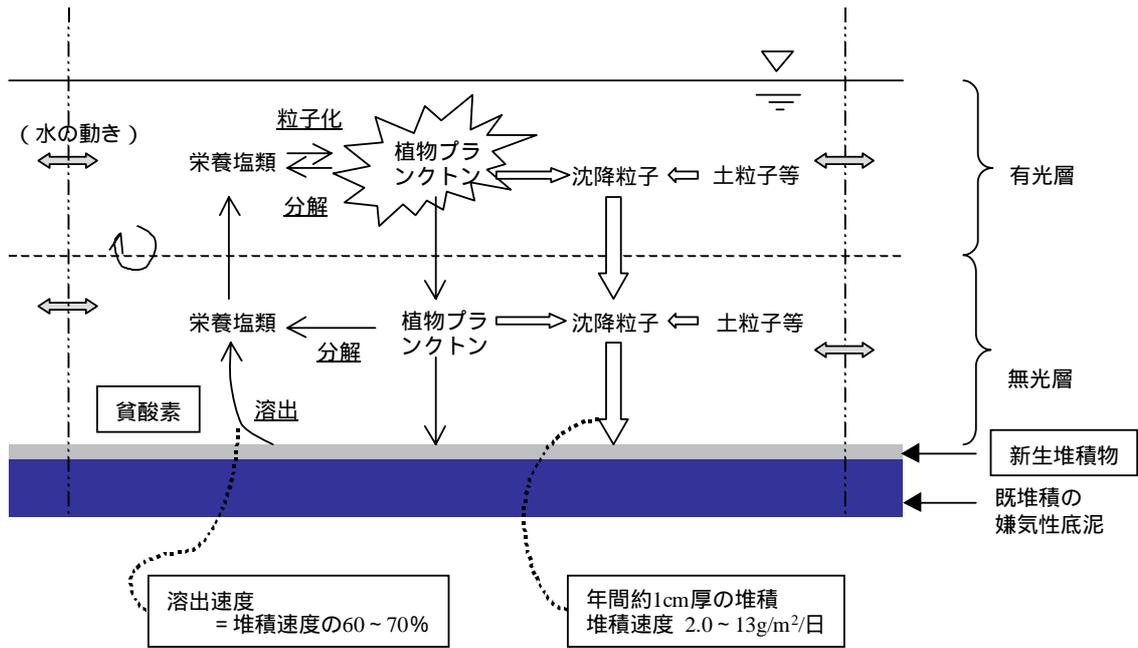


Fig.12 岸和田旧港における物質循環過程  
Scheme of Material Flow in Kishiwada Port

#### 4.2 閉鎖性水域における物質循環過程

環境悪化の著しい夏場を想定して、岸和田旧港における物質循環過程をFig.12の模式図に整理した。

まず、水域上層の有光層では、植物プランクトン等が流入負荷や底質からの溶出負荷を吸収して増殖する。閉鎖性水域では、これら光合成生物の現存量が多く、生産量も大きい。そして、これらの有機物質は水中の土粒子などと集合体を形成し沈降する。この集合体は、物理化学的に凝集するものもあるが、動物プランクトンに摂餌された後の糞粒としても沈降する。直接流入する河川がなく土砂の供給が少ない水域の場合、新生堆積物の堆積厚は年間数mm~1cm程度である。これら新生堆積物中の窒素、リンは、1~3ヶ月の間に40~80%が水中に回帰する。新生堆積物の堆積速度と底質からの溶出速度の関係をみると、新生堆積物からの栄養塩類の回帰は底質からの溶出負荷の主要な部分を占めていると考えられる。

#### 4.3 閉鎖性水域の環境改善に向けた提言

前節で述べたように、新生堆積物からの栄養塩類の回帰が、底質からの溶出負荷の主要な部分を占めるケースもある。このような物質循環をもつ閉鎖性水域において、富栄養化を抑制するためには、底質の浚渫だけではなく、流入負荷対策や水の直接浄化対策との併用を図ることが必要となろう。対象とする閉鎖性水域の環境改善対策の策定に向けては、まず、流入負荷量、内部生産量、水底への堆積負荷量、底質からの溶出負荷量、水理特性、そして生物構造など、水域の環境特性を総合的に

解析することが重要である。

#### 5. おわりに

沿岸の閉鎖性水域では、下水道の整備が進んでも、N,Pなどの栄養塩類の流入は避けられない状況にあり、植物プランクトンが窒素やリンを吸収して内部生産し、新生堆積物として水底に堆積する。したがって、新生堆積物が堆積することを考慮に入れた、水域環境の保全技術が今後は重要となろう。

#### 謝辞

本調査は、岸和田港湾都市株式会社のご協力のもとに実施した。ここに記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 和野信市：東京港の運河における汚泥堆積，ヘド口，No. 30，pp. 30~37，(1984)
- 2) Shigeru Montani, Yasufumi Mishima and Tomotoshi Okaichi: Scavenging Processes of Marine Particles in Osaka Bay, Marine Pollution Bulletin, Vol.23, pp.107~111, (1991)
- 3) 門谷茂：物質輸送過程における粒子状物質の役割，月刊海洋，Vol.23，No.4，pp.178~186，(1991)