

水質改善とバイオマス利用を目的とした 波浪ポンプによる植物プランクトン捕捉法 の開発研究

PRELIMINARY STUDY FOR DEVELOPING A MARINE PHYTOPLANKTON
TRAPPING SYSTEM BY MEANS OF THE WAVE PUMP AIMING FOR
IMPROVING SEAWATER QUALITY AND THEIR UTILIZATION AS BIOMASS

小田一紀¹・影地良昭²・梶原美里³

Kazuki ODA, Yoshiaki KAGEJI and Misato KAJIHARA

¹正会員 工博 大阪市立大学名誉教授 (〒558-8585 大阪市住吉区杉本3-3-138)

²大阪市立大学大学院 工学研究科 (〒558-8585 大阪市住吉区杉本3-3-138)

³大阪市立大学大学院 工学研究科 (〒558-8585 大阪市住吉区杉本3-3-138)

In this paper, a marine phytoplankton trapping system, which is composed of a seawall-like structure with a function of the wave pump(wave-current conversion device), a deposition tank and an open channel, is proposed with an aim of improving seawater quality and utilization of phytoplankton as biomass. Time-averaged flow fields induced in this system by wave action are analyzed by means of a 2-D numerical wave tank taking the $k-\epsilon$ turbulence model together with the VOF method developed by Hirts and Nichols. A series of laboratory tests on flocculation of marine phytoplankton by using PAC and γ -PGA are made and the sizes of flocks as well as their terminal velocities are measured. Based on the result of these analyses and tests, quantities of trapped phytoplankton are estimated.

Key Words : wave pump, numerical wave tank, phytoplankton, flocculation, biomass, γ -PGA, PAC

1. 緒言

大阪湾は東京湾や伊勢湾、瀬戸内海等とともに1960年代の高度経済成長期に深刻な水質汚染にみまわれた。その後、各種の水質規制等によって海域への負荷量の増大に一定の歯止めがかけられたものの、沿岸海域の富栄養化に起因する赤潮や貧酸素水塊の発生を軽減するまでに至っていない。近年、このような閉鎖性内湾における沿岸環境を修復するため、海水交換促進、人工ラグーン、干潟造成、藻場造成、底質改善など様々な技術が開発され、実施もなされている。

筆者らも、海水交換促進技術の一つとしてパイプ式透過堤を研究開発した^{1)・2)}。この技術は既に日本各地の、主として漁港で使用されている。その後、筆者らはこの技術の原理を「波浪ポンプ」と称し、貧酸素水塊の発生を軽減するための鉛直循環流誘起型堤体の開発³⁾にも応用した。

本研究では、この「波浪ポンプ」の原理の3番目の応用として、海水浄化とバイオマスへの利用を目

的とした、汚濁海水中の植物プランクトンの効率的な捕捉技術の開発を試みる。本論文では、次章で述べる植物プランクトン捕捉用複合水路系水理構造物における波浪誘起時間平均流場の構造特性を、2次元数値波浪実験によって解明するとともに、室内実験で植物プランクトンの凝集・沈降過程を調べ、それらの結果から沈降槽内で捕捉できる植物プランクトンの量を推定する。

2. 植物プランクトン捕捉法の概要

ここで提案する植物プランクトン捕捉法は、図-1に示すような、水面近傍に横開口部を有する護岸状堤体（いわば広頂堰状護岸で、この部分が「波浪ポンプ機能」を有する）とその背後に隣接するプランクトンフロク沈殿槽、および沈殿槽下流端に繋がる開水路で構成される複合水路系水理構造物を用いる。

護岸状堤体（波浪ポンプ堤）に入射した波は横開口部底面で段波状碎波となり、流れに変換され、植物プランクトンとともに沈殿槽に流入する。通常、

植物プランクトンの粒径は数～数十 μm と小さく、その沈降速度は数～数十 cm/hr と極めて遅く、そのままでは効率的な捕捉は困難である。このため、この海水に凝集剤溶液を添加し、大きなプランクトンブロックを作り、沈降速度を飛躍的に増大させ、速やかに沈殿槽の底面に着底させ、ポンプで吸い取るなどして回収を図る。しかし、ここでは着底したプランクトンブロックの回収法については取り扱わないこととする。

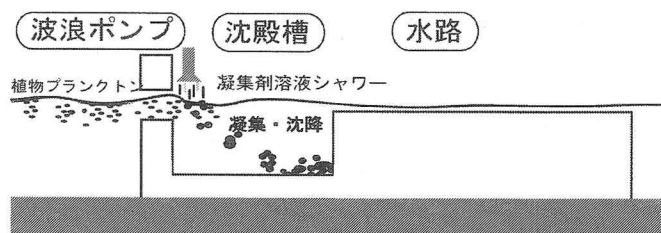


図-1 植物プランクトン捕捉用複合水路系概念図

3. 植物プランクトン凝集・沈降実験

(1) 植物プランクトンと凝集剤溶液

大阪港周辺の表層海水を採水し、それから珪藻類と渦鞭毛藻類の植物プランクトンを別々に分離し、ASP-2補強海水培地を用いて定温室内培養し実験に供した。

一方、凝集剤として γ 線を照射したポリグルタミン酸架橋体(γ -PGA)とポリ塩化アルミニウム(PAC)を併用して使用した。 γ -PGAは微生物の生産する天然物質であるため、凝集、沈殿後も微生物によって分解される。一方、PACは浄水施設で一般的に利用されている無機系凝集剤であり、低濃度で使用すれば環境への悪影響はほとんど無視できる。

(2) 凝集機構

まずPAC溶液がプランクトンを含む海水に投入されると負に帯電しているプランクトンの表面に正電荷のアルミニウムイオンが吸着し電氣的に中和され、ファンデー・ワールス力によって互いにプランクトン同士がブロックを形成する。この段階ではブロック粒径は十分に大きくないが、次に γ -PGA溶液を投入するとこのブロックがPGAの架橋体によって絡め取られ、さらに大きく成長すると考えられる。

(3) 凝集実験

直径8.5cmのビーカに500mlの濾過海水と植物プランクトンを入れ、2枚の平板攪拌翼(2.4×2.5cm)で攪拌しながら、まずPAC溶液を入れ、その直後に γ -PGA溶液を投入した。PAC溶液投入後、0、3、5、10、15、20、25、30分後にサンプリングし、暗視野顕微鏡に取り付けたデジタルカメラで図-2のようにブロックを撮影し、画像解析ソフトを用いて各ブ

ロックの画像面積を測定した。求めた面積より円相当径を算出し、これを球相当径とみなして粒径加積曲線を描き、中央粒径 d_{50} を求めてサンプリング時間毎の代表粒径とし、その成長過程を調べた。

実験条件として、PACの最終濃度は20、100、200ppmの3種類に変え、 γ -PGAの最終濃度は5 mg/lと一定に保った。攪拌強度 G は9.4、16.3、24.1 s^{-1} の3種類に変化させた。

攪拌強度 G は式(1)のように定義される。

$$G = \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu}} \quad (1)$$

ここに、 ε_0 ：流体の単位時間、単位体積当たりのエネルギー消費量($\text{N/m}^2/\text{s}$)、 μ ：流体の分子粘性係数($\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$)。

ビーカ実験での ε_0 は、流体の攪拌に要したトルクを計測することにより空間平均値として次式で求められる。

$$\varepsilon_0 = \frac{2\pi f T_r}{V} \quad (2)$$

ここに、 T_r ：流体の攪拌に要したトルク($\text{N} \cdot \text{m}$)、 f ：攪拌翼の回転速度 (rps)、 V ：流体の体積(m^3)。

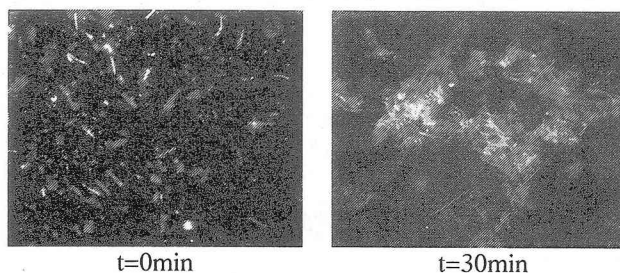


図-2 珪藻類プランクトンブロック画像の一例 (PAC 100ppm, γ -PGA 5 mg/l, 攪拌強度 9.4 s^{-1})

(4) 沈降実験

PAC最終濃度100ppm、 γ -PGA最終濃度5 mg/l、攪拌強度9.4 s^{-1} の条件で前述のビーカ内で作成した植物プランクトンブロックをサンプリングし、これを250mlのメスシリンダー内の濾過海水に静かに注入し、ブロックの沈降過程を先のデジタルカメラで一定時間間隔で連続撮影し、その画像解析から球相当径と沈降速度を求めた。

4. 実験結果

図-3は、沈降実験より求めた珪藻類プランクトンブロックの粒径と沈降速度との関係を示したもの

である。この図より、粒径が4.0mm程度までは、粒径が大きくなるほど沈降速度が大きくなる傾向が見られる。フロックの沈降速度は、粒径が1.0mmで0.5 mm/s程度、粒径4.0mmで1.4mm/s程度の値をとることが分かる。この値は、渦鞭毛藻類プランクトンフロックの場合でも大きな相違はみられなかった。

なお、沈降過程がストークス則に従うと仮定して、測定した沈降速度からフロック粒子の見掛け密度も求めた。

凝集過程の実験結果については紙数の関係上、ここでは記述を省略する。

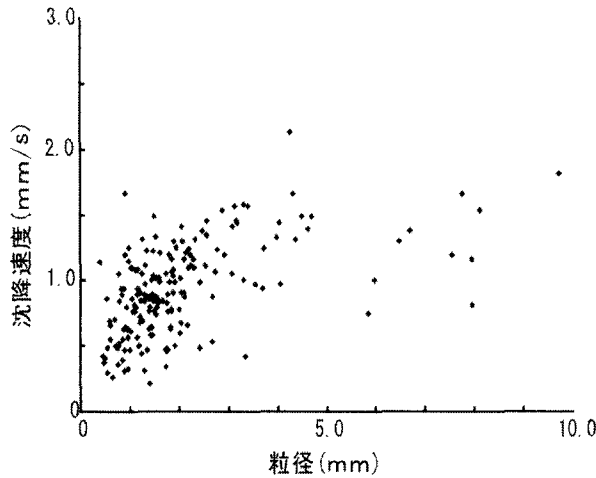


図-3 沈降速度とフロック粒径との関係
(PAC濃度100ppm, γ -PGA濃度5 mg/l, 攪拌強度9.4s⁻¹)

2. 数値波浪実験の方法

(1) 数値モデルの概要

流体運動の数値モデルとして、 k - ϵ 乱流モデルおよびHirts & Nicholsの水面決定法(VOF法)を併用したLin & Liuの2次元数値波動解析法⁴⁾を用いる。基礎方程式は、次のアンサンブル平均操作を施した連続の式とNavier - Stokesの方程式である。

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + g_i + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial \bar{u}_i' u_j'}{\partial x_j} \quad (4)$$

ただし、

$$\bar{\tau}_{ij} = \nu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (5)$$

ここに、 u_i : x_i 方向の流速成分の瞬間値、 p : 圧力の瞬間値、 t : 時間、 ρ : 流体の密度、 ν : 動粘性係数、 g_i : x_i 方向の重力加速度成分である。また、 $-\rho \bar{u}_i' u_j'$ はレイノルズ応力を表しており、ここでは式(6)で表

される高次の乱流モデルを適用する。

$$\begin{aligned} \overline{u_i' u_j'} &= \frac{2}{3} k \delta_{ij} - \nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \\ &- \frac{k^3}{\epsilon^2} \left[C_1 \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_l} \frac{\partial \bar{u}_l}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_l} \frac{\partial \bar{u}_l}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial \bar{u}_l}{\partial x_k} \frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_l} \delta_{ij} \right) \right. \\ &\left. + C_2 \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_k} \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_k} - \frac{1}{3} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_k} \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) + C_3 \left(\frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_l} \frac{\partial \bar{u}_l}{\partial x_j} - \frac{1}{3} \frac{\partial \bar{u}_l}{\partial x_k} \frac{\partial \bar{u}_l}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) \right] \quad (6) \end{aligned}$$

$$\nu_t = C_d \frac{k^2}{\epsilon} \quad (7)$$

ここに、 ν_t : 渦動粘性係数、 k : 乱れの運動エネルギー、 ϵ : k の逸散率、 δ_{ij} : クロネッカーのデルタである。この渦動粘性係数を求めるために、次式の k および ϵ に関する輸送方程式を解いている。

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} + \nu \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] - \bar{u}_i' u_j' \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \epsilon \quad (8)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} + \nu \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} \nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - C_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k} \quad (9)$$

式(6)～式(9)中に現れる諸モデル定数は以下の式で求められる。

$$\begin{aligned} C_d &= \frac{1}{3} \left(\frac{1}{3.7 + S_{\max}} \right) \quad C_1 = \frac{1}{185.2 + \gamma D_{\max}^2} \\ C_2 &= -\frac{1}{58.5 + \gamma D_{\max}^2} \quad C_3 = \frac{1}{370.4 + \gamma D_{\max}^2} \quad (10) \end{aligned}$$

$$C_{1\epsilon} = 1.44, C_{2\epsilon} = 1.92, \sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.3, \gamma = 3.0 \quad (11)$$

ただし、

$$S_{\max} = \frac{k}{\epsilon} \max \left| \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} \right|, D_{\max} = \frac{k}{\epsilon} \max \left| \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right| \quad (12)$$

これらの基礎方程式を解いた後、VOF法を用いて水面の追跡を行う。

(2) 計算条件

a) 計算領域

長さ400m～550m、高さ11mの鉛直2次元の計算領域を設定し、図-4に示すような位置に前述の複合水路系水理構造物、造波源、波浪観測位置などを設定した。

b) 境界条件

k および ϵ に関して、水表面で次の境界条件を課す。

$$\frac{\partial k}{\partial n} = \frac{\partial \epsilon}{\partial n} = 0 \quad (13)$$

ここに、 n は水面の外向法線を表す。

また、構造物表面に隣接するセルでは壁関数法に基づいて境界値を設定する。水底および構造物表面にはno-slip条件を課す。さらに、計算領域の両端に式(14)で表されるSommerfeldの放射境界条件を課す。

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + C \frac{\partial \Phi}{\partial x} = 0 \tag{14}$$

ただし、この概念では対象とする物理量 Φ が単一波の位相速度で伝播することを前提としており、高周波成分をもつ非線形波に対しては放射効率が低下する難点がある。

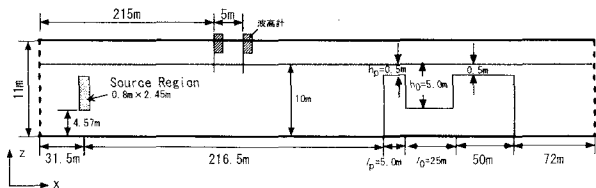


図-4 計算領域と複合水路系水利構造物の寸法

c) 波浪条件

波浪条件は、大阪港周辺における平常時の代表的な波浪条件を対象として表-1のように設定した。計算では、造波関数を用いて表-1の諸元を有するストークス波の5次近似解を与えた。

波浪観測位置を計算領域左端開境界からの距離 $x=215\text{m}$ および $x=220\text{m}$ の2箇所に設定し、得られた波形記録から合田の入反射分離推定法によって入射波高を決定した。なお、沖側水深は 10m と一定にした。

表-1 波浪条件

沖側水深(m)		10	
波 浪	周期(s)	3.0	4.0
	波高(m)	0.1, 0.2, 0.3	0.2, 0.3, 0.4

d) 複合水路系水利構造物の縦断形状

予備的計算結果に基づいて、計算領域左端開境界からの波浪ポンプ堤の沖側端位置 x_p 、波浪ポンプ堤長さ l_p 、波浪ポンプ堤天端上水深 h_p 、および開水路長さ l_1 を、それぞれ $x_p=248\text{m}$ （造波源から 216.5m ）、 $l_p=5.0\text{m}$ 、 $h_p=0.50\text{m}$ 、および $l_1=50\text{m}$ と固定し、沈殿槽の大きさが沈殿槽内の時間平均流の構造と強さにどのような影響を及ぼすかを調べることに重点を置いた。このため、沈殿槽長さを $l_0=10, 20, 25, 50\text{m}$ に変化させ、それぞれに対して深さを $h_0=2.5, 5.0, 7.5\text{m}$ に変え、合計12ケースの沈殿槽形状を設定した。

なお、開水路右端から計算領域右端開境界までの水域長さ l_3 については、前述のSommerfeldの放射境界条件の難点が原因と思われる、右端開境界前方に反時計回りの循環流が発生する場合があります、これが

発生しないように各ケースに応じて $l_3=72\sim 177\text{m}$ の範囲で変化させた。

3. 計算結果

(1) 沈殿槽内の時間平均流の流量と構造

図-5は、波浪周期 $T=3.0\text{s}$ と 4.0s の場合について、定常状態における単位幅当りの時間平均流量 $\bar{q}(\text{m}^3/\text{s}/\text{m})$ と入射波高 $H(\text{m})$ との関係を表したものである。両周期波とも波高の増大とともに流量が増加する傾向を示しているが、沖方向への戻り流れも増大するため、次第に増加率は減少している。また、同一波高では周期の短い方が流量が大きくなることが見出せる。

なお、反射率は、表-1の波浪条件の範囲内では、およそ $0.2\sim 0.4$ であることが得られた。

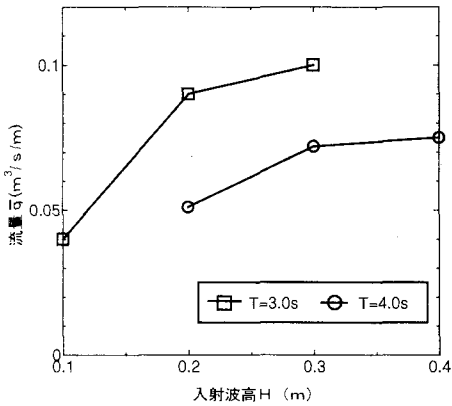


図-5 時間平均流量と入射波高との関係

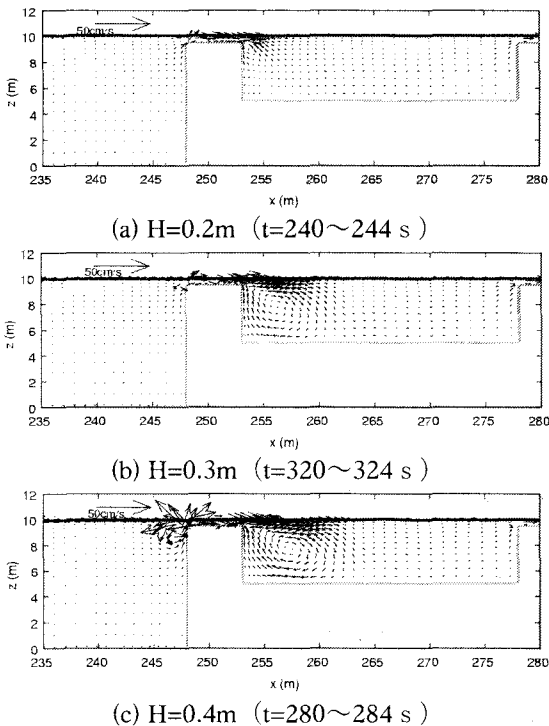


図-6 沈殿槽内の時間平均流速場 (T=4.0s)

沈殿槽内の流れの一般的な構造として、図-6(a), (b), (c)に、周期 $T=4.0$ sのときの、波高別の時間平均流れ場の流速ベクトル分布を示す。これらの図より、波浪ポンプ堤天端上で発生した流れが沈殿槽内の左端水域に時計回りの循環流を発生させ、その強さが波高とともに増大する様子が確認できる。また、この循環流より岸側（右側）の水域では、岸向きへのほぼ様な弱い流れが発生しており、この水域で植物プランクトンブロックが着底することが期待される。

(2) 沈殿槽の大きさの影響

図-7は、周期 $T=4.0$ s、波高 $H=0.3$ mのときの定常状態における単位幅当りの時間平均流量 q ($m^3/s/m$)と沈殿槽長さ l_0 (m)との関係を表したものである。なお、沈殿槽深さは $h_0=5.0$ mである。この図より、沈殿槽深さ h_0 が同一の場合は、全体的に沈殿槽長さ l_0 が長くなるにつれて流量が減少する傾向が見られる。

一方、沈殿槽深さ h_0 (m)との関係を表したものが図-8である。この図より、沈殿槽長さ l_0 が同一であれば、沈殿槽深さが大きくなるにつれて流量が減少する傾向が見出せる。

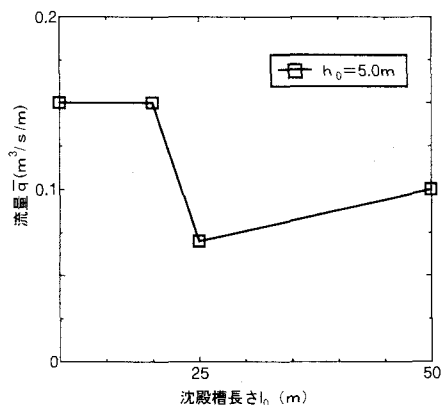


図-7 時間平均流量と沈殿槽長さとの関係

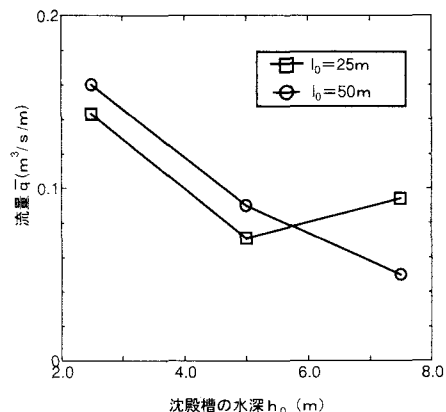


図-8 時間平均流量と沈殿槽深さとの関係

(3) 植物プランクトンブロック着底率の計算

計算では、流れ場に植物プランクトンブロック粒

子と同じ密度と沈降速度を有する仮想粒子を波浪ポンプ堤端部に2.0mm間隔で1092個初期配置して、既に計算によって得られた定常状態における時間平均流速場を繰り返し与え、その運動を追跡し、流跡線と粒子の着底率を調べた。ここで着底率とは、初期配置した1092個の粒子のうち沈殿槽底面にたどりついた粒子の割合を表す。

なお、上述の植物プランクトンブロックの沈降実験より、その沈降速度は $0.5 \sim 1.4$ mm/sの値になることが見出されている。その結果を踏まえて、粒子の沈降速度として $w=0.5, 1.0, 1.5$ mm/sを与えた。

図-9は、 $T=4.0$ s、 $H=0.2$ mの入射波に対する植物プランクトンブロック粒子($w=1.0$ mm/sの場合)の流跡線の計算結果の一例を示す。初期配置した1092個の粒子のうち、 x 方向に0.25 m間隔で、 z 方向に0.10 m間隔に位置する粒子25個を代表粒子として選び、それらの流跡線を表したものである。この図から、波浪ポンプ堤によって誘起された沈殿槽内の時計回りの循環流によって、粒子が沈降槽の中層以下まで運ばれることが確認される。中層まで運ばれた粒子のうち、循環流の下向きの成分に乗って下層に運ばれた粒子はそのまま沈殿している。

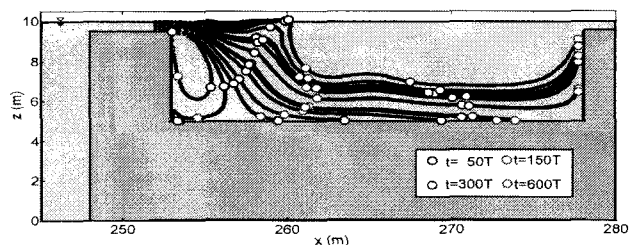


図-9 流跡線と粒子移動状況の一例
($T=4.0$ s, $H=0.2$ m ; $w=1.0$ mm/s)

図-10は、周期 $T=4.0$ s、波高別に粒子の着底率と沈降速度との関係を示した図である。この図より、一般的に沈降速度が大きくなるにつれて着底率が大きくなることが明瞭に確認できる。

ここで、考慮すべきこととして、ブロック粒子が沈殿槽底面に到達後、流れによって掃流されてしまうことが考えられる。そこで、ごく近似的にブロック粒子の掃流限界に河床砂礫の限界掃流力を表すShieldsの式を適用すると、Shields式から導いた式(15)よりブロック粒子の移動限界流速 u_{mc} を算出することができる。ここで、移動限界流速とは、沈殿槽内の鉛直平均流速が移動限界流速より大きい場合、ブロック粒子が一旦着底しても、再び動きだすと考えられる平均流速のことである。

$$u_{mc} = \frac{R^{1/6}}{n} \sqrt{\alpha \rho_e d / \rho} \quad (15)$$

ここに、 u_{mc} : 移動限界流速、 R : 径深($\equiv h$)、 n : マニングの粗度係数、 α ($= \tau_{*c}$: 無次元限界掃流

力), $\rho_e = \rho_f - \rho$: 有効密度, ρ_f : 粒子の密度, ρ : 流体密度, d : 粒径.

例えば, 先の凝集実験の結果に基づき, 植物プランクトン凝集の粒径 $d = 2000 \mu m$, $\rho_e = 0.7(kg/m^3)$ とすると, 沈降槽水深 $h_0 = 5.0m$, マニングの粗度係数 $n = 0.015$, $\alpha = 0.034$ の場合, 式(15)より $u_{mc} = 1.9cm/s$ と求まる.

図-11に, 計算から得られた沈殿槽内の鉛直平均流速と入射波高との関係を表したが, この図から沈殿槽内の鉛直平均流速が鎖線で示す移動限界流速を上回することはほとんどなく, 植物プランクトンブロックが一旦着底しても, 再び動きだす可能性は小さいと考えられる. ただし, 軟らかく, 壊れやすい植物プランクトンブロック粒子と河床砂礫とは掃流特性がかなり異なると予想されるので, 今後さらに検討を要するものと思われる.

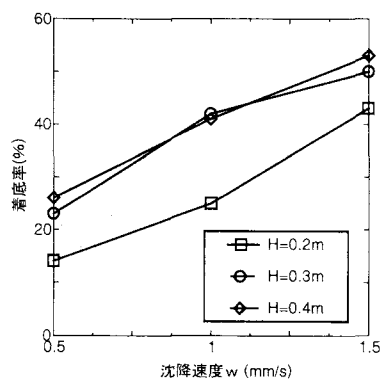


図-10 着底率と沈降速度との関係 (T = 4.0 s)

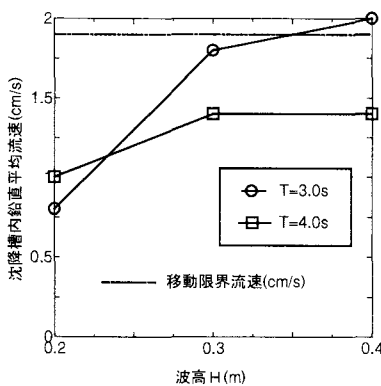


図-11 沈降槽内の鉛直平均流速と入射波高の関係

(4) 植物プランクトン捕捉量と窒素除去量の推定

波浪ポンプ堤によって誘起される流れの中に含まれる単位時間, 単位幅当りの植物プランクトン量 $M(kg/day/m)$ は, 海水中の植物プランクトンの濃度を $SS_p(kg/m^3)$ とすると式 (16) で求められる.

$$M = \bar{q} \times SS_p (kg/day/m) \tag{16}$$

この式から得られる値と先に計算した図-12に示される植物プランクトンブロック粒子の着底率との積により, 沈殿槽に捕捉される単位幅当りの植物プ

ランクトンの量 $M_t(kg/day/m)$ が算出できる. なお, ここでは, 実測値より得られたSS濃度全てを植物プランクトンとして, SS_p は $SS_p = SS = 30(mg/l)$ とした.

表-2は, 図-4に示した寸法の複合水路系水理構造物, すなわち, $l_p = 5.0m$, $h_p = 0.50m$, $l_0 = 25m$, $h_0 = 5.0m$, $l_1 = 50m$ の場合における一日当たり, 単位幅当りの植物プランクトンの捕捉量 $M_t(kg/day/m)$ をこのようにして積算した結果である. この表から, 例えば平常時の大阪港周辺では, ここで提案した植物プランクトン捕捉用複合水路系水理構造物を設置すると, 一日当たり, 単位幅当り20~80kg の植物プランクトンが捕捉でき, 幅10m当たりでは, 一日200~800kgの捕捉量が得られることになる.

なお, 波浪ポンプ堤天端上水深を変えた場合の計算を別途行ったが, $h_p = 0.50m$ より浅くなると流量は増大し, 深くなると減少する傾向を示したので, 天端上水深をできる限り浅くするとさらに多くの捕捉量が得られる可能性がある.

表-2 プランクton捕捉量 $M_t(kg/day/m)$ の算定

周期T (s)	3.0			4.0		
波高H (m)	0.1	0.2	0.3	0.2	0.3	0.4
$\bar{q} (l/s/m)$	40	90	100	50	70	70
$m = \bar{q} \times SS$	103	230	256	126	180	180
M_t	w=0.5	4.6	30	12.6	17.6	40
	w=1.0	18.6	46	21	31	76
	w=1.5	40	80	30	53	90

5. 結び

本研究では, 波浪ポンプを応用した植物プランクトン捕捉用複合水路系水理構造物を提案し, 波浪誘起時間平均流場の構造特性を解明した. また, 植物プランクトンブロックの着底率を計算し, 沈殿槽におけるその捕捉量を推定した. 今後は, より効果的な植物プランクトンの凝集法, 着底した植物プランクトンブロックの回収法を検討する必要がある.

参考文献

- 1) 小田一紀・真栄原宣之・中西昭人・田中彬夫: 波浪によるパイプ式透過堤の海水導入特性, 海岸工学論文集, 第42巻, pp.1116-1120, 1995.
- 2) 小田一紀・真栄原宣之・山上雅美・田中彬夫: 水面にパイプ孔を有する透過堤の波浪誘起導水量に関する理論的解析, 海岸工学論文集, 第43巻, pp.1231-1235, 1996.
- 3) 小田一紀・重松孝昌・池田憲造・松永英郎・清水治生・藤田 孝: 鉛直循環流誘起型護岸前面における鉛直循環流の発生機構と構造特性に関する研究, 海岸工学論文集, 第48巻, pp.1296-1300, 2002.
- 4) Lin, P. and P. L.-F. Liu: A numerical study of breaking waves in the surf zone, J. Fluid Mech., 359, pp.239-264, 1998.