

太陽光発電による表層水供給装置を用いた 夢洲沈殿池の環境改善に関する研究

A Study on environmental improvement of sedimentation reservoir in Yumeshima by an environmental restoration device using solar energy power for supplying surface water

環境水域工学分野 木津竜一郎

大阪市港湾海域の夢洲に造成されている沈殿池では、冬季でも底層水が貧酸素状態となっており、大阪湾へ放水する際の水質改善が望まれている。本研究では、太陽光発電を用いた表層水供給装置による沈殿池放水部の効果的な貧酸素化の改善方法について検討した。現地調査で貧酸素化の改善に必要な海水混合量について明らかにしたのち、数値計算を実施して、海水混合に効果的な表層水の供給方法について検討した。また改善に必要な電力量を試算し、夢洲沈殿池の環境改善のための装置の能力に関する知見を得た。

The serious hypoxic water occurs at the bottom of the sedimentation reservoir developed in Yumeshima. It is necessary to improve water quality when the water is discharged from the sedimentation reservoir to the sea. In this study, I examined how to improve hypoxic water of the effective discharge in sedimentation reservoir using surface water supply device by solar energy power. Field investigations were carried out in order to clarify the amount of mixing seawater required to improve hypoxic water. Next, the numerical calculation was carried out to examine how to effective supply of surface water for seawater mixing. In addition, as a result of the amount of power required was estimated, I made inference about the capability of the device for environmental improvement of sedimentation reservoir in Yumeshima.

1. 研究背景・目的

都市の発展とともに港湾部では、津波などの災害から都市を守るため防波堤の築造等の港湾整備が行われてきた。一方で、港湾整備によって海水交換機能が低下し、水質悪化を引き起こしており、中でも水域における底層の貧酸素化が深刻な問題となっている。貧酸素化とは、水中に含まれる溶存酸素濃度(以下DOと呼ぶ)が著しく低下する現象で、柳¹⁾は、DOが3.6mg/L以下の水塊を貧酸素水塊と定義している。この値は、生物に悪影響を与え始める水準で決定されており、本研究ではDOが3.0mg/L以下の場合を貧酸素水塊とする。

実際に貧酸素化によって三河湾の港湾海域の底層では生物的な被害が報告されている²⁾。また大阪湾奥部において硫化水素を含んだ水塊が風等によって湧昇する青潮と呼ばれる現象によって、生物の大量斃死を引き起こしていることに関する報告もある³⁾。これらのことから、貧酸素化は水環境の保全や改善を図る上で早急に解決されるべき問題である。

大阪市此花区夢洲に位置する北港処分地(図-1)には、

浚渫土砂の埋め立て時に発生する排水を外海に放水する前に濁度を低下させるための沈殿池が設けられている。この場所は、矢板で四方を囲まれているため閉鎖度が強く、冬季の一時期を除いて底層では、慢性的に貧酸素化している状態である。また冬期には表層付近で青潮も確認されている。したがって沈殿池の流出部から、水質汚濁が進行している水が大阪湾に流出していると考えられる。夢洲沈殿池の排水時における水質改善は、大阪湾の水環境を保全する上で重要かつ急務な課題となっている。遠藤ら⁴⁾は、太陽光発電による自然エネルギーを電力源として用いた表層水供給装置(図-2)を開発し、夢洲沈殿池で貧酸素化改善のための現地実験を行なった。しかし、夢洲沈殿池の密度成層強度が強く、浮力の影響で表層水を底層に供給しても放水口のごく近傍で湧昇し、貧酸素化の改善効果はほとんど確認できなかった。本装置を夢洲沈殿池に適用するためには、あらかじめ貧酸素化改善に必要な表層水の供給流量と水中ポンプの稼働に必要な電力量を検討しておく必要がある。

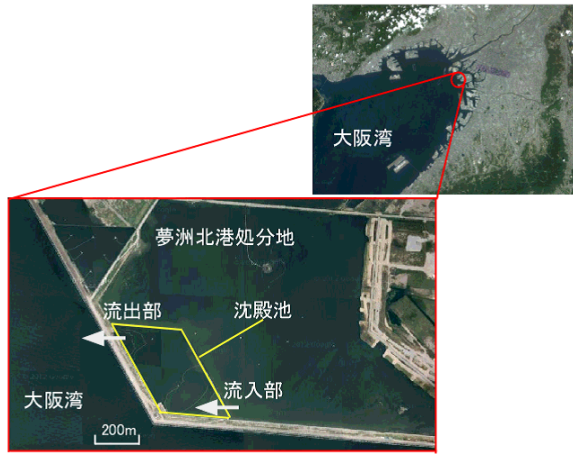


図-1 夢洲沈殿池位置図

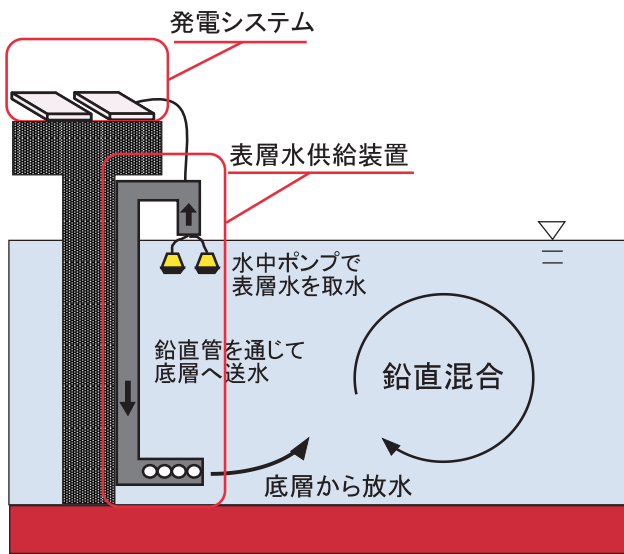
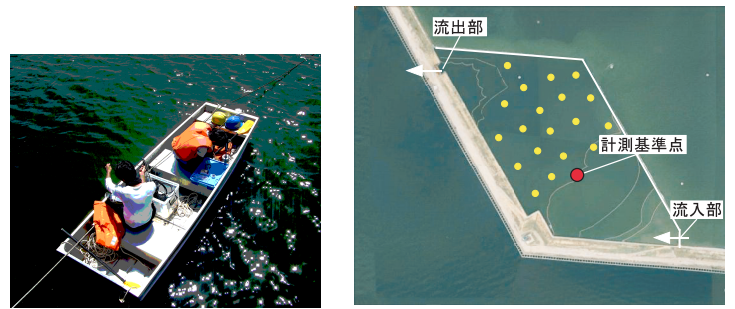


図-2 表層水供給装置の概要図

そこで本研究では、夢洲沈殿池の貧酸素化の改善に必要な海水混合量について明らかにするために現地で水質調査を行った。また海水混合に効果的な表層水の供給方法について検討するために、流動モデルを構築して数値計算を実施した。さらに環境改善に必要な装置の電力量を試算し、太陽光発電を用いた表層水供給装置による沈殿池放水部の効果的な貧酸素化の改善方法について検討した。

2. 夢洲沈殿池における水質環境調査

夢洲沈殿池は、東西方向200m、南北方向300m、平均水深約5mである。南東の方向に幅約10m程度の流入部(図-1参照)があり、北港処分地の第2区から、浚渫土砂の埋め立てに伴って発生する濁水が水位差によって流入してくる。また沈殿池の北西には流出部(図-1参照)があり、一定の水位を超えると表層水が排水される仕組みになっている。ただし、現在では流出部の老朽化によって、流出部の隙間から水が漏れている。また沈殿池内の底泥は濁水に含まれる懸濁物質の沈降によっ



(a)水質調査の様子

(b)水質計測地点

図-3 水質環境調査の概要

てへドロ化している状態である。

2.1 調査内容

調査は、2010年8月から2011年11月の期間と、2011年8月から2012年5月の期間で午前10時から午後2時の時間帯に実施した。調査方法は、大阪市港湾局の協力のもと、沈殿池内にアルミボートを下ろし、船上から調査を実施した。水質調査の概要を図-3に示す。

沈殿池内の水質の空間分布を把握するために、図-3(b)に示す20地点で、compact-CTD(アドバンテック社製)と多項目水質計Hydrorab MS-5(環境システム社製)を用いて、水温、塩分、密度、DO、蛍光値、濁度、pHおよびORPの鉛直プロファイルを計測した。本研究では、底層の貧酸素化の主要な原因である密度成層の発達度合いに着目して、夢洲沈殿池の貧酸素化に及ぼす影響を検討した。

2.2 調査結果および考察

図-3の(b)で示されている計測基準点で計測した底層DOの季節変化を図-4に示す。なお、ここで底層DOとは水底から1mまでのDOの平均値とする。図-4によると、5月から11月中旬までは底層DOが3mg/L以下となり貧酸素化していることが分かる。12月になると貧酸素化が回復し始め、1月、2月は過飽和状態となり、底層DOが10mg/L以上となっている。このことから、夢洲沈殿池の底層では、春から初冬にかけて貧酸素状態になっていることが考えられた。

次に、夢洲沈殿池の計測基準点で計測した密度成層強度の季節変化について述べる。多田ら⁵⁾は、密度成層強度の指標として、水柱ポテンシャルエネルギー $P[\text{kg}/\text{m}^2]$ を次式を用いて定義している。

$$P = \frac{1}{H} \int_{-H}^0 (\rho - \bar{\rho}) g z \cdot dz \quad (1)$$

ここで、 H は水深[m]、 ρ は密度 $[\text{kg}/\text{m}^3]$ 、 $\bar{\rho}$ は密度の鉛直平均値 $[\text{kg}/\text{m}^3]$ 、 g は重力加速度 $[\text{m}/\text{s}^2]$ 、 z は水表面から鉛直上向きに取った座標である。一般的に P の値が大き

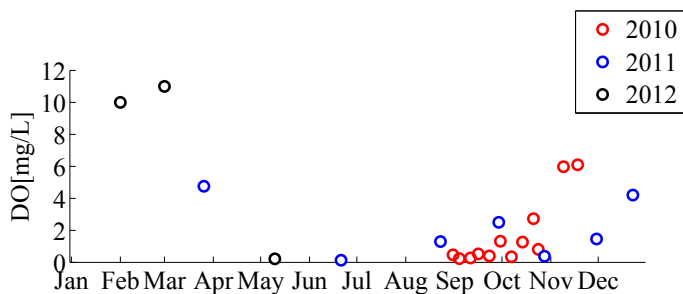


図-4 底層DOの季節変化

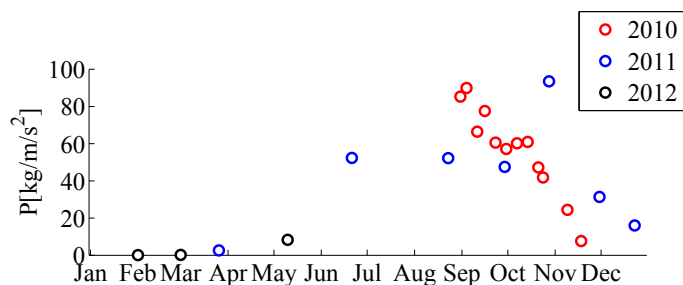


図-5 水柱ポテンシャルエネルギーPの季節変化

いほど密度成層が発達して、水柱が有するポテンシャルエネルギーは大きいといえる。このPを用いて夢洲沈殿池の密度成層強度の季節変化を表したものを図-5に示す。図-5によると、Pは9月に最も大きな値を示し、以降は小さくなっていることがわかる。9月にPが最も大きくなっているのは、夏季に表層と底層の水温差が一番顕著になることが原因であると考えられる。

次にこの水柱ポテンシャルエネルギーPと底層DOの関係性について検討する。図-6は、水底から1mまでのDOの平均値と水柱ポテンシャルエネルギーPの関係を示したものである。図-6を見ると、Pが30以上の時は底層DOが3mg/L未満となり貧酸素化が起きているが、Pが30以下になると底層DOは3mg/L以上を示し、貧酸素化が回復していることが確認できる。また相関係数は $r = -0.71$ と高い負の相関を示しており、夢洲沈殿池の底層の貧酸素化の原因は、密度成層の発達による底層への酸素供給の阻害の影響が大きいと考えられた。したがって、夢洲沈殿池の貧酸素化を改善するためには、水柱ポテンシャルエネルギーPを30以下に維持すれば良いことが考えられた。

3. 流動モデルの概要

本研究で用いる数値モデルは、流体密度が水温と塩分によって時空間的に変化する流体運動を対象としている。本モデルで用いる基礎方程式を以下に示す。密度変化を考慮した連続の式(式(2))、Navier-Stokes運動方程式(式(3))及び塩分・水温の移流拡散方程式(式(4))、式(5)である。扱う流体は非圧縮性と仮定し、その密度は

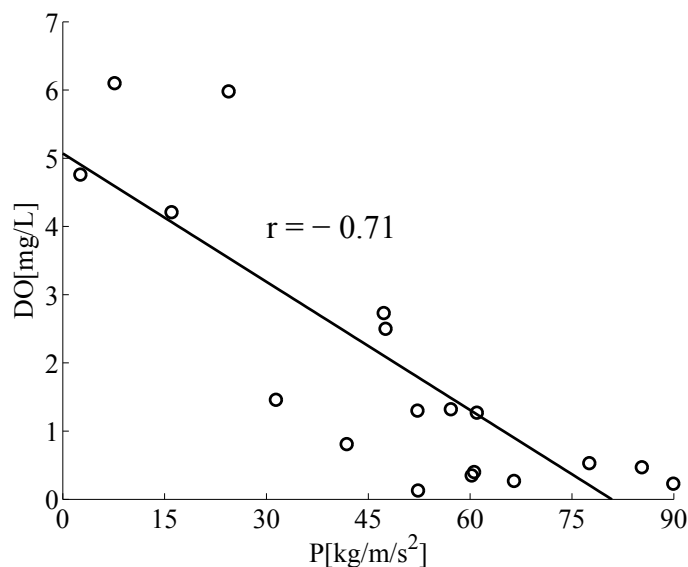


図-6 底層DOと水柱ポテンシャルエネルギーPの関係

塩分と水温を関数とするKnudsen⁶⁾の式(式(6))により求めた。 ρ は流体密度[kg/m^3]、 μ は粘性係数[$\text{Pa}\cdot\text{s}$]、 u は速度ベクトル(u,v)[m/s]、 p は圧力[Pa]、 T は水温[$^\circ\text{C}$]、 S は塩分[psu]、 g は重力加速度[m/s^2]、 D_t と D_s は水温及び塩分の拡散係数[m^2/s]である。本モデルにおいて、 $\mu=1.002 \times 10^{-3}$ 、 $g=9.81$ 、 $D_t, D_s=1.24 \times 10^{-5}$ を与えた。本モデルでは、乱流項を考慮に入れていないため、拡散係数を大きめに設定している。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u = -g - \frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 u + \frac{1}{3} \frac{\mu}{\rho} \nabla (\nabla \cdot u) \quad (3)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \nabla \cdot (Su) = \nabla \cdot (D_s \nabla S) \quad (4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (Tu) = \nabla \cdot (D_t \nabla T) \quad (5)$$

$$\rho = f(S, T) \quad (6)$$

本数値モデルの計算フローを図-7に示す。計算手法として、川崎ら⁷⁾の開発した計算手法を参考にして、基礎方程式を移流項と非移流項に分離して解く部分段階法を用いた。また本研究では、密度差の大きく異なる流体が存在する水域を対象にしているため、物理量の分布を精度よく計算することが重要になる。そこで本数値モデルでは、移流項にYabe⁸⁾の開発したCIP(Cubic Interpolated Propagation)法を用いることとした。CIP法の特徴として格子間の物理プロファイルを同時に移流させるため数値誤差が少なく、濃度勾配が大きくなる密度成層場の計算に適している。非移流項についてはSMAC(Simplified Marker and Cell)法の手順で計算を行った。

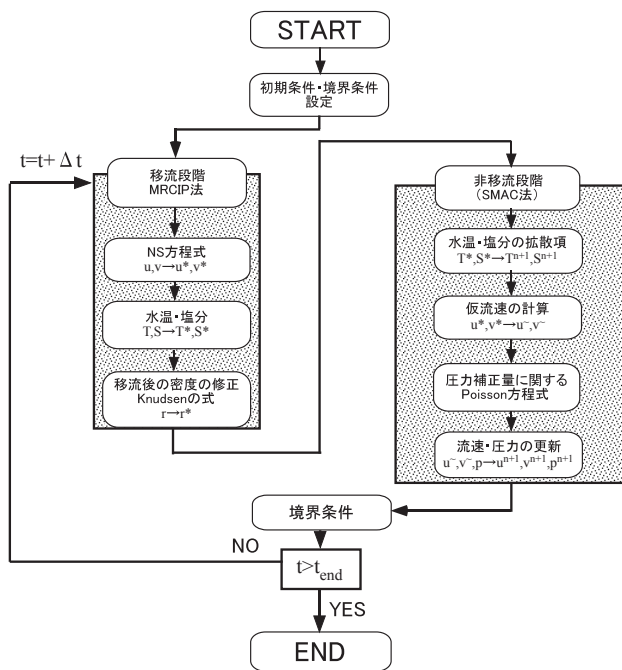


図-7 計算フロー

4. 流動モデルによる表層水の供給条件の検討

4.1 計算条件

本研究では、夢洲沈殿池の密度成層場を対象として、表層水の供給による海水混合効果を検討するための数値計算を行った。表層水供給装置による供給流量と供給方法を変化させた場合の密度成層場の海水混合の違いについて検討した。なお海水の混合効果の評価については、現地調査で述べた密度成層強度の指標である水柱ポテンシャルエネルギー P を用いて行った。

図-8に計算条件の概要を示す。数値計算の検討領域は、夢洲沈殿池の流出部付近の局所的な地点の貧酸素化改善を想定して水平方向10m、鉛直方向5mとした。検討する水平方向の領域は10mであるが、右端の開境界条件の問題を考慮して計算領域は水平方向に100mとした。格子数は、水平方向に192セル、鉛直方向に27セルとした。水平方向の格子幅は不等間隔格子を適応し、セルの格子幅は $\Delta x = 0.2 \sim 0.5\text{m}$ としている。鉛直方向の格子幅は等間隔とし、 $\Delta y = 0.2\text{m}$ としている。計算時間は、表層水供給による流動が定常状態になると考えられる $t_{\text{end}} = 300\text{sec}$ とし、刻み時間は $\Delta t = 0.01\text{sec}$ とした。水温、塩分の初期条件は、夢洲沈殿池で行った水質調査の10月の計測結果を参考にした。ここで、表層とは水面から水深3mまで、底層とは水深3mから水底までとする。塩分は、表層で18psu、底層で22psuを与えている。水温は、15℃を表層と底層で一定に与えている。海水密度は表層で $\rho_1 = 1013.4\text{kg/m}^3$ 、底層で $\rho_2 = 1017.2\text{kg/m}^3$ となり、 $\Delta\rho = 3.8\text{kg/m}^3$ である。なお、水柱ポテンシャルエネルギー P の初期値は、水平方向に一定で $P = 50$ としている。本装置による表層水供給を仮

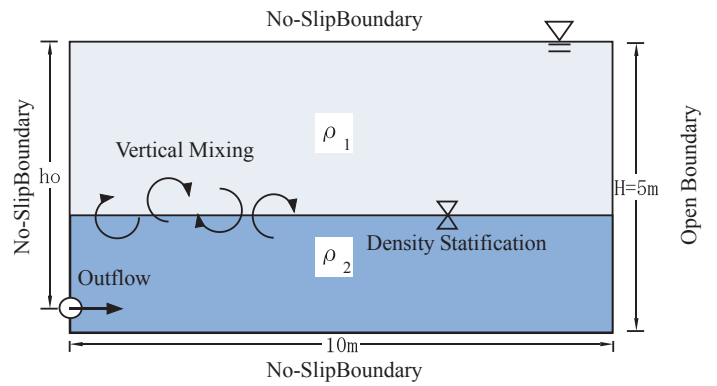


図-8 計算条件

表-1 放水条件のケース

	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	Case6	Case7
$Q[\text{m}^3/\text{s}/\text{m}]$	0.04	0.08	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12
$u[\text{m}/\text{s}]$	0.2	0.4	0.6	0.6	0.6	0.3	0.2
$ho/H[-]$	0.94	0.94	0.94	0.52	0.14	0.94	0.94
$N[-]$	1	1	1	1	1	2	3

定して、図-8のOutflowで放水条件を与えた。放水条件のケースの概要を表-1に示す。表-1の Q は単位幅流量 $[\text{m}^3/\text{s}/\text{m}]$ 、 u は水平方向の速度 $[\text{m}/\text{s}]$ 、 ho/H は水深を放水点位置で無次元化した値、 N は放水点の個数である。Case1からCase3は供給流量の変化させた場合、Case4からCase5は放水点の鉛直方向の位置を変化させた場合、Case6からCase7は供給流量は一定で、放水点の数を変化させた場合についてそれぞれ検討した。なお、Case6とCase7の放水点間の水平方向距離はそれぞれ3mとした。

4.2 計算結果

Case1からCase3の供給流量を変化させた場合による密度の空間分布を図-9、水柱ポテンシャルエネルギーを図-10(a)に示す。図-9を見ると、供給流量の違いによって密度の空間分布が大きく変化していることが確認できる。図-10(a)によると、Case1では、放水点から0.5m以内でしか P の低下が確認できなかった。またCase2では、放水点から1m以内でしか P の低下が確認できなかった。一方、Case3では、計算領域の水平方向10m以内でほぼ P が30以下になった。このことから、計算領域内の貧酸素化改善のためには、供給流量 $0.12\text{m}^3/\text{s}$ 以上供給しなければならないと考えられた。

次にCase3からCase5の放水点の鉛直方向の位置を変化させた場合による混合効果の違いを図-10(b)に示す。密度界面付近から放水しているCase4では、計算領域全体で、若干の P の低下が確認できるが、貧酸素化を

改善出来る程度には至っていない．表層付近から放水しているCase5では，放水が密度界面に影響することなくほとんど P の低下が確認できず，放水点近傍では逆に P の上昇が見られた．これらの結果から，底層の高密度水塊と表層の低密度水塊を混合させるためには，表層水を底層付近から放水する必要があることがわかった．

続いてCase3,Case6,Case7の表層水の供給流量は一定で，放水点を変化させ，流量を分配させた場合による混合効果の違いを図-10(c)に示す．Case6は，左端から水平方向5mまでは， P が30以下を示している．Case7は，左端から水平方向7mまで P が30以下を示している．Case3が左端から水平方向8mまで， P が30以下を示していることから，放水点の数は1点で放水するケースが，2点，3点に分配させて放水するケースと比較して，最も海水混合の効果があったと考えられた．

以上により，供給流量，放水点の位置，放水点の数を変化させた場合の計算結果から，計算領域の貧酸素化を改善するために最も効果的な表層水の供給条件は，供給流量 $0.12\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ で，底層から放水点を1点で放出するCase3であることが示唆された．

5. 貧酸素化改善に必要な本装置の能力

本装置で用いた水中ポンプ1台あたりの取水能力は $0.001\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ で，消費電力は約100Wである．したがって，数値計算の結果で得られた表層水の供給流量 $0.12\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ を満足するには，水中ポンプが約120台分必要であることがわかった．またこの供給流量をもった装置を1時間稼働するには，12000Whの電力量が必要であることが明らかになった．

本装置で用いた太陽光モジュールの1日あたりの発電量を試算するにあたって，本装置の実験時に得られた全天日射量と水中ポンプ1台の稼働時間の関係について図-11に示す．図-11によると，1日あたりの全天日射量と水中ポンプ1台あたりの稼働時間は非常に高い相関を示していることがわかる．したがって，水中ポンプ1台あたりの消費電力と稼働時間を考慮すると，太陽光モジュール1枚あたりの1日に得られる発電量を推算することが可能である．

推算後の全天日射量と太陽光モジュール1枚あたりの発電量との関係を図-12に示す．秋季である10月ごろの晴天時の全天日射量を約 $15\text{MJ}/\text{m}^2$ とすると，太陽光モジュール1枚で1日あたり約480Wの電力を発電できることがわかる．したがって，計算結果の夢洲沈殿池の貧酸素化を改善するのに必要な供給流量 $0.12\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ をまかなうためには，太陽光モジュール約25枚分の発電量が必要であることが示唆された．

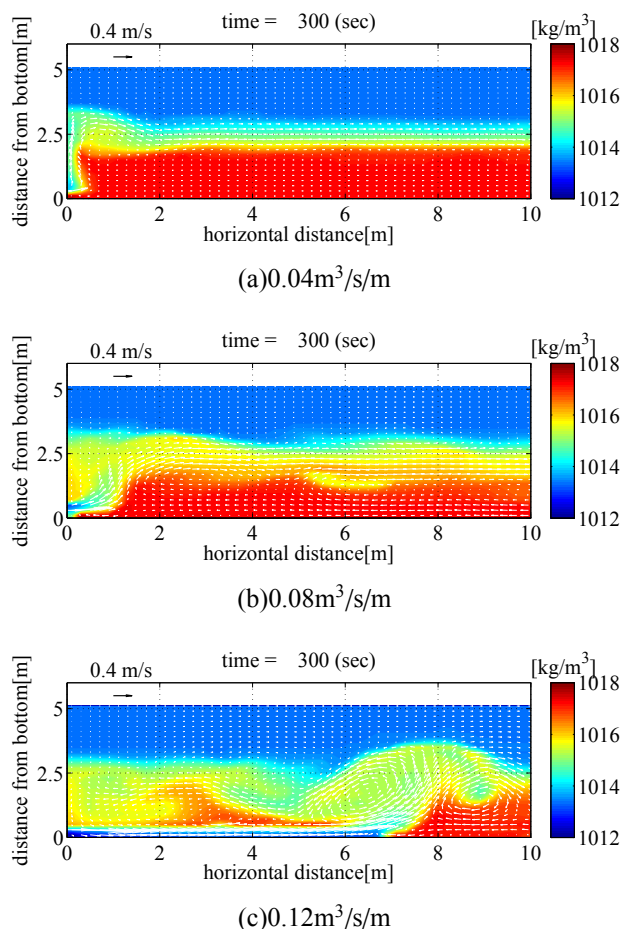


図-9 供給流量の違いによる密度の空間分布

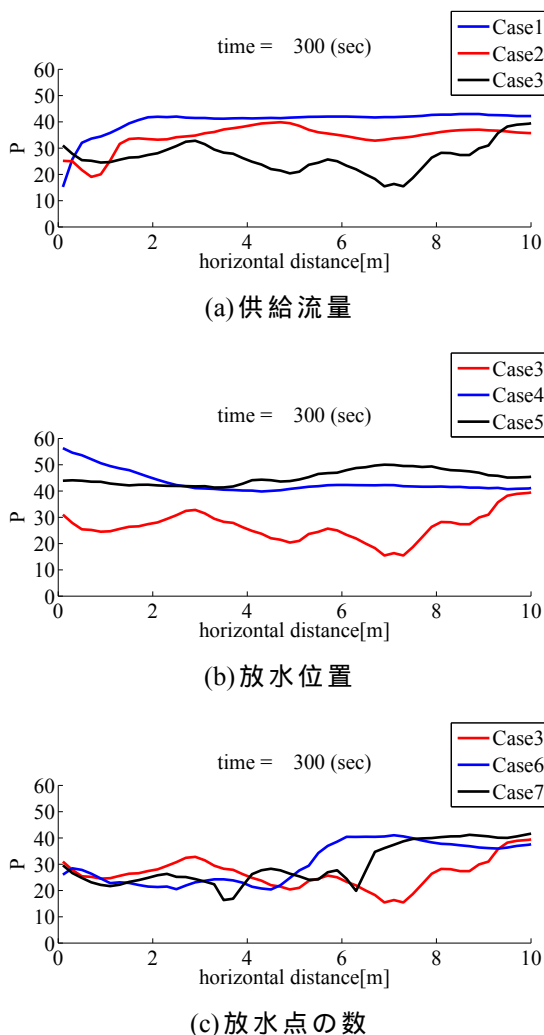


図-10 放水条件の違いによる水柱ポテンシャルエネルギー P

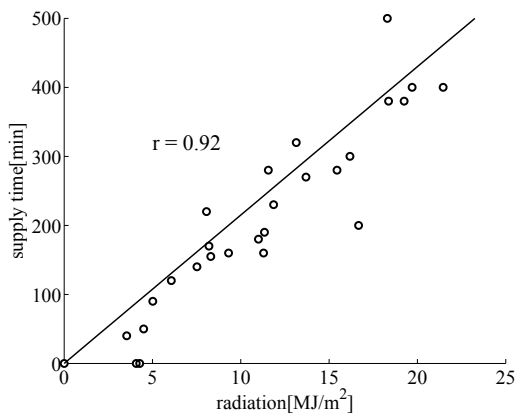


図-11 1日あたりの全天日射量と水中ポンプ1台あたりの稼働時間の関係

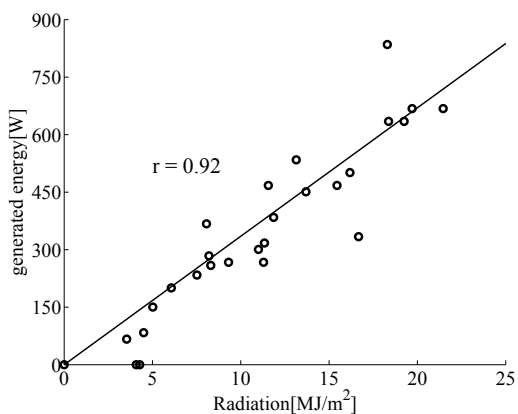


図-12 1日あたりの全天日射量と太陽光モジュール1枚あたりの発電量の関係

6. 結論

本研究で得られた結果を要約したものを、以下にまとめる。

1) 夢洲沈殿池を対象とした現地調査を行い、底層DOと密度成層強度の季節変化をそれぞれ明らかにした。また底層DOと密度成層強度の関係から、水柱ポテンシャルエネルギー P を30以下に維持することで、夢洲沈殿池の底層の貧酸素化を解消できる可能性があることが示唆された。

2) 表層水を密度成層場に放水した場合の数値計算を行うために、密度変化に対応した鉛直2次元流動モデルを構築した。また本モデルを用いて、夢洲沈殿池の貧酸素化改善に必要な表層水供給装置の供給流量と放水方法の検討を行った。その結果、表層水の流量 $0.12\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ を底層で放水口一点から、水平方向に供給するケースが最も海水混合効果が得られることが明らかになった。

3) 夢洲沈殿池の放水部の貧酸素化改善に必要な装置の能力は、供給流量 $0.12\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ 、電力量 12000Wh と考えられる。これを本装置でまかなうことを考えると、水中ポンプを約120台、太陽光モジュールを約25枚程度

必要になることが示唆された。

参考文献

- 1) 柳哲雄(1989): 貧酸素水塊のまとめ, 沿岸海洋研究ノート.
- 2) 鈴木輝明・青山裕晃・甲斐正信・今尾和正(1998): 底層の貧酸素化が内湾浅海底生生物群集の変化に及ぼす影響, 海の研究, Vol.7, No.4, pp.223-236.
- 3) 上月康則, 大谷壮介, 山中亮一(2009): 大阪湾奥に造成された人工海浜の底生生物に及ぼす貧酸素化・青潮の影響, 土木学会論文集, 第65巻, pp.1211-1215.
- 4) 遠藤徹・水田圭亮・臼井諒(2010): 表層水供給装置による港湾海域底層の環境改善に関する現地実験, 海洋開発論文集, 第26巻, pp.117-122.
- 5) 多田彰秀, 中村康裕, 阿部和也(2010): 淡水流入が諫早湾の水質動態に及ぼす影響について, 土木学会論文集, 第66巻, pp.366-370.
- 6) 有田正光, 池田裕一, 中井正則(1998): 水圏の環境, 東京電機大学出版局, pp.112-113.
- 7) 川崎浩司, 大谷知樹, 中辻啓二(2001): 固気液多相共存場に対する統一数値解法の構築と複雑水理現象への応用, 海岸工学論文集, 第48巻, pp.1026-1030.
- 8) Yabe, T.and T.Aoki(1991): Universal solver for hyperbolic equations by cubic-polynomial interpolation, Computer Physics Communications, Vol.66, pp.219-232.

討議

討議[中尾正喜教授]

夢洲沈殿池の底層DOと水柱ポテンシャルエネルギー P の関係性におけるプロットのばらつきは、どのような原因が考えられるか。

回答

底層DOと水柱ポテンシャルエネルギー P の季節ごとの関係を(図-1)に示す。図-1の直線は丸プロット、三角プロットを合わせた近似直線である。貧酸素化が解消されていく8月から12月は、丸プロットで示しており、近似直線に近く分布していることが分かる。一方で、貧酸素化が発達し始める1月から7月は三角プロットで示しており、比較的近似直線から離れていることが分かる。この原因として、貧酸素水塊形成時期の酸素消費は、密度成層による物理的な要因よりも有機物分解による生物学的な要因が支配的であることが可能性として考えられる。

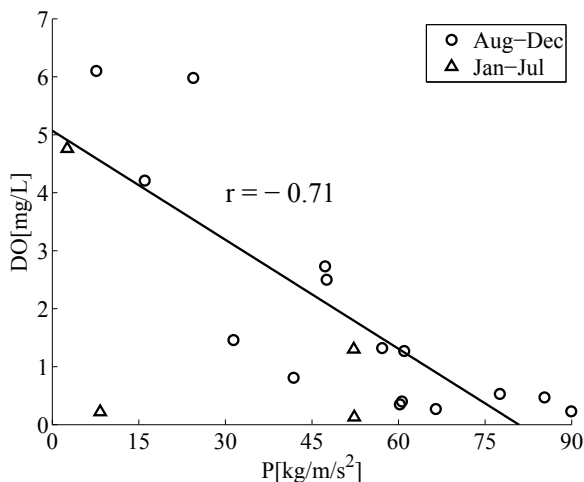


図-1 底層DOと水柱ポテンシャルエネルギー P の関係

討議[貫上佳則教授]

夢洲沈殿池の本来の目的は、濁水に含まれる懸濁物質を沈殿させることである。それにも関わらず、沈殿池内で表層水供給装置によって鉛直混合を起こすことは適切であるのか。また沈殿池の流出部から表層水のみを大阪湾へ排水しているのであれば、底層の貧酸素水塊は問題ないのではないか。

回答

ご指摘の通り、夢洲沈殿池の本来の目的は濁水の濁度を低下させることである。しかし、沈殿池放水部から水質汚濁した水が大阪湾へ流出することが問題となっている。本研究では沈殿池放水部の局所的な環境改善を目的としているため、装置によって局所的に海水混合を起こしても沈殿池全体の濁度を低下させることに支障はないと考えられる。

常に底層に留まっているのであれば底層の貧酸素水塊は問題ではない。しかし、強風によって底層水が湧昇して、表層から貧酸素状態の水が大阪湾に流出する恐れがある。したがって、底泥の巻き上げを考慮しつつ、排水部付近のみで部分的に海水混合を行い、環境改善する必要があると考えられる。

討議[重松孝昌教授]

水柱ポテンシャルエネルギー P の単位はあるのか。また P は他の海域においても、貧酸素化改善の指標として汎用性のあるパラメータであるのか。数値計算で左端の境界で放水点を設定し、流速を与えているが、放水点を計算領域の中央で与えた場合も同じ計算結果になるのか。また放水点を左端の境界で与えることは、実際に夢洲沈殿池で表層水を供給する条件として適切なのか。

回答

水柱ポテンシャルエネルギー P の単位は、 $[kg/m/s^2]$ である。水柱ポテンシャルエネルギー P を30以下に維持すれば貧酸素化が改善できるという検討は、夢洲沈殿池の密度構造に特化したものである。 P は表層と底層の密度の異なる層厚の度合いを考慮していない。例えば、底層が表層の層厚よりも大きい海域の貧酸素化改善には、 P を更に低下させる必要があると考えられる。したがって、密度構造の異なる他の海域において P の貧酸素化改善の指標としての汎用性はないと考えられる。

数値計算において、左端の境界条件は、固定壁面条件を与えている。したがって、今回の計算のような左端から放水した場合は、壁面条件の影響を受けるので、計算領域の中央で放水した場合と比較すると、周辺の流動に違いが出ると考えられる。夢洲沈殿池での流出部付近の岸壁に表層水供給装置を設置した場合を想定しているので、左端の固定壁面条件は妥当であると考えられる。

討議[鍋島美奈子准教授]

結論で、表層水供給装置の能力を水中ポンプや太陽光モジュールの台数にするのではなく、必要な流量と電力量で表示しなければわからない。(コメント)

回答

ご指摘の通り、発表資料と本論中に装置に必要な流量と電力量の表記も追加した。