

[特 集]

貧酸素化の抑制を目的とした 鉛直循環流誘起堤体の開発

重松孝昌¹・池田憲造²・小田一紀³

¹正会員 博(工) 大阪市立大学大学院講師 工学研究科都市系専攻 (〒558-8585 大阪市住吉区杉本 3-3-138)
E-mail:shige@urban.eng.osaka-cu.ac.jp

²正会員 工修 関西国際空港(株) 施設整備本部 工務部 (〒549-8501 大阪府泉佐野市泉州空港北一番地)

³正会員 工博 大阪市立大学大学院教授 工学研究科都市系専攻 (〒558-8585 大阪市住吉区杉本 3-3-138)

本論文は、高度に利用されている閉鎖性海域において、貧酸素水塊の発生を抑制することを目的とした鉛直循環流誘起堤体の開発を目的としたものである。堤体の開発に当たっては、数値計算モデルを用いて堤体断面を検討した後、水理模型実験によってその結果の妥当性を検証するという手順を踏んだ。さらに、水理模型実験では難しい温度成層場におけるその効果を数値計算モデルを用いて予測し、温度成層場においても提案堤体の有効性を示している。

Key Words : vertical circulation flow, numerical simulation, anoxic water, stratification

1. 緒言

いにしえから、人間は海と密接な関係を保ちながら生活を営んできた。たとえば、埋立の歴史などを紐解けば、それが少なくとも江戸時代にまで遡ることがわかるが、この頃の埋立は、「川の床さらえ」等のように陸域でのよりよい生活のためのものであって、積極的な沿岸域の利用によるものではなかった。このような小規模な埋立は沿岸域の環境に大きな影響を及ぼすものではなく、海岸が本来有する形状・性状とそれほど大きくは異なるものであったと推測できる。しかし、過去数十年間の背後に大都市を抱える閉鎖性内湾の変遷を見ると、防災の観点からの海岸整備や経済・産業活動のための積極的な沿岸水域の埋め立てなどによって、その形状・性状はともに人工的なものへと急速に変化していったことは周知のとおりである(たとえば、文献1)。

人間が沿岸域に及ぼしてきた影響を、簡単に整理すれば次のようになる(大塚ら²⁾。

- (1) 埋立や護岸の人工化による流況の変化
 - (2) 閉鎖性水域の創出
 - (3) 密度成層の安定化
 - (4) 栄養塩負荷の増加
- (1)~(3)は人間活動が物理場に及ぼしてきた影響として理解されよう。これらは、沿岸域における物質の循環を抑制し、その結果として水底への酸素供給機能を低下させる方向へと作用している場合が多い。また、(4)は生物活動に及ぼしてきた影響として理解されよう。こ

れは、海域の一次生産の活性を高めることとなり、これが枯死して水底に沈着したものをベントス・バクテリアが分解する際に、より多くの酸素を消費することにつながる。すなわち、沿岸域における人間活動は、水底における酸素供給機能の低下と酸素消費量の増加をもたらす。その結果として、海域の貧酸素化の助長へと結びついていると捉えることができる。

貧酸素水塊が底生生物に及ぼす影響は、城³⁾によってその重大性が、また、矢持ら⁴⁾によってその重大性が定量的に報告されている。大阪湾奥の現地調査結果に基づく矢持ら⁴⁾の報告によれば、底層水の溶存酸素の低下に伴って大型底生生物の平均種類数および個体数が激減し、湾奥域の約8割強がほぼ無生物化した海域となることが示されている。また、中西ら⁵⁾は、浅海定線調査のデータを用いて、1972年~1997年における大阪湾底層(海底+1m)の溶存酸素の分布の変遷を示している。これによれば、毎年のように、大阪湾奥部では0~1ml/lのほぼ無酸素状態の海域が、また、湾奥から沖合いにかけて3ml/l以下の低酸素状態の海域が大阪湾の面積のほぼ半分を占めるような状態になることを示している。このような貧酸素水塊の発生と干潟や砂浜などの浅場の消失が相俟って、大阪湾における貝類の漁獲が激減したものと考えられる(矢持⁶⁾)。

このような状況に対して、海域環境を積極的に改善しようとする気運が次第に高まってきている。1993年に施行された環境基本法をはじめ、1997年の河川法改正、1999年の海岸法改正などは水域環境に配慮することを明確にしたものであると位置づけられる。2002年

に制定された自然再生推進法は、より積極的に自然再生を謳った法律である。しかし、これらのいずれの法律においても、具体的に改善・修復すべき環境要因やその改善・修復目標、あるいはそれらの設定方法は明らかにされていない。もちろん、水域環境は地域性を有するので、水域ごとの問題点を十分に調査・抽出したうえで、それらを設定しなければならない。前述の大阪湾の環境を見るとき、「一年を通して、底生生物が生息できなくなる貧酸素水塊の発生を抑制する」ことは、修復すべき環境要因とその修復目標のひとつとして掲げることができよう⁷⁾。近年では、干潟や藻場などの浅場を再生する試みが各地でなされているが、このような浅場の造成には比較的広い空間を必要とし、湾奥のように高度に人工化した沿岸域で再び浅場を造成することは困難ではないかと思われる。

高度に人工化した沿岸水域の環境を改善しようとする研究例のひとつとして、岡本・森下⁸⁾は、波浪や潮汐エネルギーを利用して港外の海水を港内に導入する弁式有孔堤を提案している。また、道下⁹⁾は、鉛直管の水面振動を利用した海水交換防波堤の提案を行っている。猿川¹⁰⁾は、有孔堤の前面に消波ブロックを設置し、ブロック層内の水位上昇を利用して海水交換機能を高める消波ブロック被覆型有孔堤の研究をしている。さらに、山本¹¹⁾は現地で潜堤付き孔あき防波堤の海水導入機能を、八尋¹²⁾は前面に消波工のある有孔堤の海水交換機能について研究している。小田¹³⁾は、波浪エネルギーを効率よく利用するために、水面近傍に鉛管を水平に配したパイプ式透過堤を提案している。これらの研究は、閉鎖性海域の海水交換の促進を目的として開発されたものと位置づけることができる。鉛直混合を促進する構造物としては湧昇流堤¹⁴⁾が挙げられるが、高度に人工化した沿岸域では利用しづらい。バブルを利用した水質の改善に関する研究¹⁵⁾や動力を用いた鉛直混合効果に関する研究¹⁶⁾もあるが、できれば自然エネルギーを利用したものの方が好ましい。小松¹⁷⁾は、波浪エネルギーを利用して表層の水塊を底層へと輸送する斜面構造を有する浮体構造物を提案している。

ここでは、自然エネルギーを利用し、高度利用された水域の鉛直循環を促進し、底層域への酸素供給を促進することによって貧酸素水塊の発生を抑制することができる構造物の開発を目的とする。

2. 数値造波水槽による構造物の提案

(1) 鉛直循環流誘起堤体が具備すべき条件

小田¹⁸⁾は、鉛直循環流誘起機能を有する堤体として、水面近傍と底面近傍に通水用の円形パイプを水平

に埋め込んだ堤体を提案している。彼らが提案した堤体では、水底近傍の水塊が堤体前面で誘起される上向き循環流によって水表面へと輸送される「底層水揚水型鉛直循環流誘起堤体」と位置づけることができる。このような堤体では、貧酸素化した底層水を表層へと輸送した後に酸素が供給されることになり、底層部における貧酸素化現象を解消することはできない。すなわち、底層部の水環境を直接改善する効果は期待できない。

水底における貧酸素化を抑制するためには、バクテリアなどの底生生物が有機物を分解する際に消費される酸素と同等以上の酸素が供給されればよい。すなわち、溶存酸素濃度が豊富な表層水を底層部へと輸送する「表層水供給型鉛直循環流誘起堤体」の開発が望ましいと考えられる。

そこで、本研究では、水域が高度に有効利用されている閉鎖性水域の底層水環境の改善を目的として、低反射・直立型の表層水供給型鉛直循環流誘起堤体の開発を目指すものである。堤体の開発に当たっては、クリーンエネルギーである波浪エネルギーを利用することを前提とし、夏期の比較的静穏な波浪条件で表層水供給型の鉛直循環流が誘起できる堤体の開発を試みることにする。

(2) 開発手順

従来、構造物の開発は、水理模型実験を行って所期の目的が達成できるような構造諸元を模索し、その結果を基に構造諸元と波浪諸元を関係づけることができる数理・数値モデルを開発するという手順で進められてきた。堤体断面を試行錯誤的に模索する場合には、模型製作にかかる時間的、経済的負担は大きなものとなる。一方、最近、水面変動や乱流量を高精度で予測できる数値モデルがいくつか開発され^{19),20),21),22)}、また、計算環境の向上によって比較的短時間で計算できるようになってきた。そこで、構造物の開発に関わる時間的・経済的コストを考慮して、本研究では、数値モデルで構造諸元を模索して模型実験で検証するという手順を踏んだ。数値モデルは、Lin & Liu²³⁾が開発した高次乱流モデルとVOF法を併用したモデルを用い、代表的な波浪諸元において堤体前面で鉛直循環流が誘起されるような構造諸元を模索した。

(3) 数値モデルの概要

基礎方程式は、アンサンブルレイノルズ平均操作を施した連続の式とNavier-Stokesの方程式である。

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + g_i + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_j} \quad (2)$$

ただし、

$$\bar{\tau}_{ij} = \nu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

ここに、 \bar{u}_i : x_i 方向の流速のアンサンブル平均値、 \bar{p} : 圧力のアンサンブル平均値、 t : 時間、 ρ : 流体の密度、 ν : 動粘性係数、 g_i : x_i 方向の重力加速度である。また、式(2)中の $-u'_i u'_j$ はレイノルズ応力を表しており、ここでは、次式で表される高次の乱流モデルを適用している。

$$\begin{aligned} \overline{u'_i u'_j} = & \frac{2}{3} k \delta_{ij} - \nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \\ & - \frac{k^3}{\epsilon^2} \left[C_1 \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_l} \frac{\partial \bar{u}_l}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_l} \frac{\partial \bar{u}_l}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_k} \frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_l} \delta_{ij} \right) \right. \\ & + C_2 \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_k} \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_k} - \frac{1}{3} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_k} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) \\ & \left. + C_3 \left(\frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_i} \frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_j} - \frac{1}{3} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_k} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) \right] \quad (4) \end{aligned}$$

ここに、 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。また、 ν_t は渦動粘性係数で、

$$\nu_t = C_d \frac{k^2}{\epsilon} \quad (5)$$

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。

$$\begin{aligned} \frac{\partial k}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} + \nu \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] - \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \epsilon \quad (6) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} + \nu \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] \\ + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} \nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - C_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k} \quad (7) \end{aligned}$$

式(4)～式(7)中に現れる諸モデル定数は以下のとおりである。

$$\begin{aligned} C_d = \frac{1}{3} \left(\frac{1}{3.7 + S_{\max}} \right), \quad C_1 = \frac{1}{185.2 + \gamma D_{\max}^2} \\ C_2 = -\frac{1}{58.5 + \gamma D_{\max}^2}, \quad C_3 = \frac{1}{370.4 + \gamma D_{\max}^2} \quad (8) \end{aligned}$$

$$C_{1\epsilon} = 1.44, \quad C_{2\epsilon} = 1.92. \quad (9)$$

$$\sigma_k = 1.0, \quad \sigma_\epsilon = 1.3, \quad \gamma = 3.0 \quad (10)$$

ただし、

$$S_{\max} = \frac{k}{\epsilon} \max \left| \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right|, \quad D_{\max} = \frac{k}{\epsilon} \max \left| \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right| \quad (11)$$

これらの基礎方程式を解いた後、VOF法を用いて水表面の追跡を行っている。このモデルは、複雑な流体運動を示す砕波帯における流体運動^{23),24)}や構造物と波の干渉問題²⁵⁾など、様々な現象に適用してその妥当性が検証されたモデルである。

(4) 構造物形状の提案

数値計算によって検討した堤体形状は、図-1に示す6通りである。いずれも水面および水底直上に通水部(以後、それぞれを上部通水部および下部通水部と称す)を有する堤体と背後の不透過壁とで構成される消波工タイプの堤体である。ここで提案する堤体は、来襲する波浪が上部通水部を通過して遊水室内に流入し、これによって生じる遊水室内と堤体前面の水位差を利用して、下部通水部を介して遊水室から堤体前面底層部へと表層水を供給することを期待している。Type-Aは、小田らの提案するパイプ堤に倣って上部通水部が水平スリット構造を有している。これに対して、Type-B～Type-Fは上部通水部が斜面構造を有している。上部通水部が斜面構造を有することによって、効率的に堤体前面の表層水を遊水室内に取り込むことを期待している。Type-Bは上部通水部の形状が異なる以外はType-Aと同じ構造諸元を有している。Type-Cは、下部通水部高さが $D_b = 30\text{cm}$ と他の提案堤体よりも大きくなっている。Type-Dは遊水室幅が $\ell = 40\text{cm}$ と他の提案堤体の $\ell = 20\text{cm}$ よりも大きくなっている。Type-Eは、沖側の上部通水部高さ $D_{s1} = 15\text{cm}$ と他の提案堤体の $D_{s1} = 10\text{cm}$ よりも大きくなっている。Type-Fは、堤体厚 B が $B = 60\text{cm}$ と他の提案堤体の $B = 30\text{cm}$ よりも大きくなっている点が異なる。

前項で述べた数値モデルは二次元モデルであるので、ここで提案している堤体はすべて二次元構造を有する堤体であることを付記しておく。

(5) 計算条件

計算領域は、水平方向10m、鉛直方向1.2mとし、計算領域の左端水底部を座標原点とした。計算に用いたグリッドサイズは、 $0 \leq x \leq 8\text{m}$ では $\Delta x = 2\text{cm}$ 、 $8 \leq x \leq 10\text{m}$ では $\Delta x = 1\text{cm}$ 、また、 $0 \leq z \leq 0.7\text{m}$ では $\Delta z = 2\text{cm}$ 、 $0.7 \leq z \leq 1.2$ では $\Delta z = 1\text{cm}$ とした。水深 h は $h = 1.0\text{m}$ とし、水底および構造物表面には no-slip 条件を課した。 k および ϵ の境界条件として、水表面では次の境界条件を課した。

$$\frac{\partial k}{\partial n} = \frac{\partial \epsilon}{\partial n} = 0 \quad (12)$$

ここに、 n は水表面に垂直な方向を表す。また、構造物に隣接するセルでは壁関数法に基づいて境界値を設定している。

波浪条件は、夏期の平穏時を想定して周期 $T = 1.25$ 秒、波高 $H = 5.0\text{cm}$ とした。計算では、造波関数を用いて上記の諸元を有するストークス波の5次近似解を与えている。 $x = 6.01\text{m}$ および $x = 6.35\text{m}$ における波形の時系列計算結果から入射波分離推定法を適用することによって入射波高を検証するとともに、提案堤体の反射率を求めた。また、堤体からの反射波が計算領域の

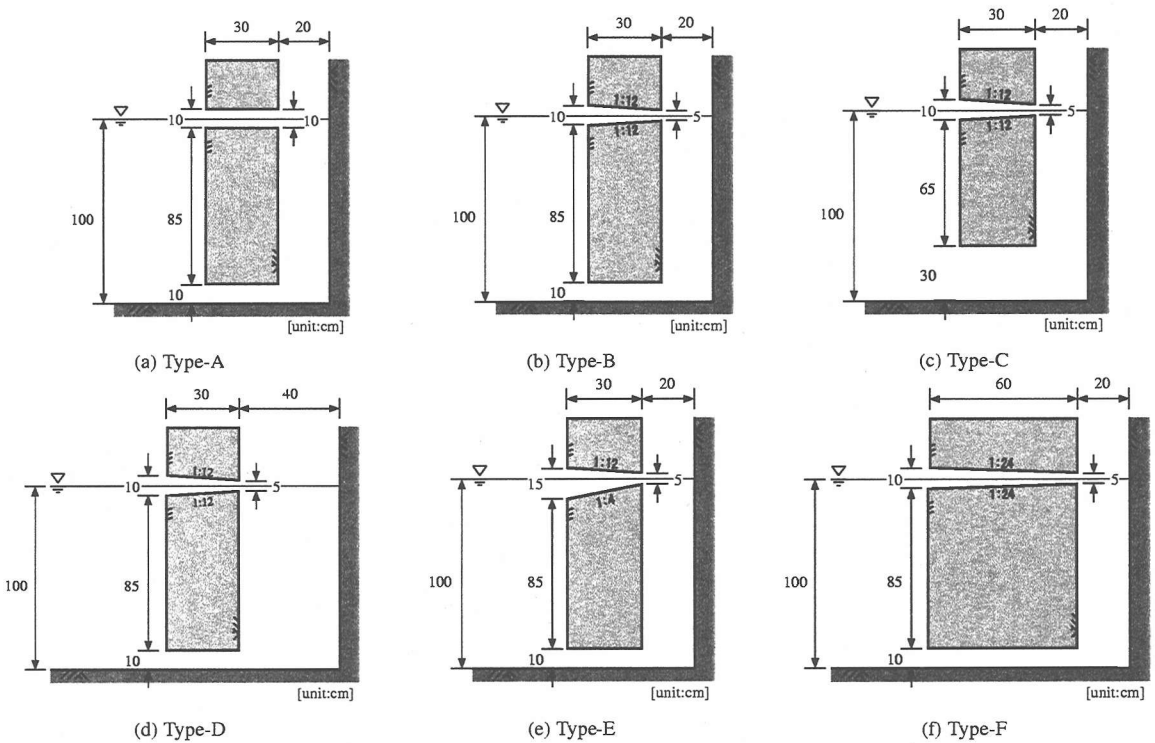


図-1 計算に用いた堤体形状

他端境界から再反射することを極力避けるため、計算領域の左端には Sommerfeld の放射境界条件を課した。

(6) 計算結果

a) 反射率

反射率 K_r の計算結果を表-1 に示す。上部通水部が水平な Type-A の堤体の K_r は 0.66 とやや反射率が高いが、上部通水部が斜面構造を有する Type-B～Type-F の堤体は $K_r = 0.31 \sim 0.45$ と低反射機能を有することがわかる。すなわち、上部通水部の斜面構造は反射率の低減に効果があること、また、数値実験によって得られた Type-B～Type-F の堤体の消波機能は実用に耐えうるものであると推察されることがわかった。なお、表-1 中の \bar{q} については後述する。

b) 流速の時系列変化

図-2 は、計算開始後 30 周期目の一周期間における Type-B の堤体近傍の流速ベクトルを示したものである。

表-1 反射率の計算結果

Type	A	B	C	D	E	F
K_r	0.66	0.36	0.40	0.31	0.41	0.45
\bar{q} [cm ³ /s/cm]	26.0	50.0	48.2	50.4	47.1	40.5

同図 (a) は、上部通水部を波浪が通過して遊水室に流入し、遊水室内の水位が相対的に上昇するために上部通水部から流体塊が沖側に引いていく直前の位相であり、同図 (b) はその引きはじめの位相である。図-2(c) は、堤体前面に次の波峰が到達しており、このとき、上部通水部における沖向き流速は比較的大きな値を有していることがわかる。さらに、同図 (d) では、波が上部通水部に侵入し、沖向き流速を有する流体塊と衝突して複雑な流速場を形成していることがわかる。小田ら¹⁸⁾ は、パイプ式透過堤のパイプ内の水塊の運動を段波現象と解しているが、本計算結果から見られる水面形状は、むしろ、砕波に近いものと判断される。このような砕波形態を示した後、上部通水部を大きな速度で遊水室側へと流入し、これとともに遊水室側の水位が上昇していく様子が同図 (e) および (f) より見て取ることができる。

遊水室内の流況に着目すれば、いずれの位相の時にも、堤体の直背後では上向きの上昇流が、不透過壁の直前面では下向きの上昇流が発生しており、遊水室内では激しい鉛直混合作用が期待できることがわかる。一方、下部通水部の流況に着目すれば、図-2(e) から (a) にかけての位相においてはその流速がやや小さいもの

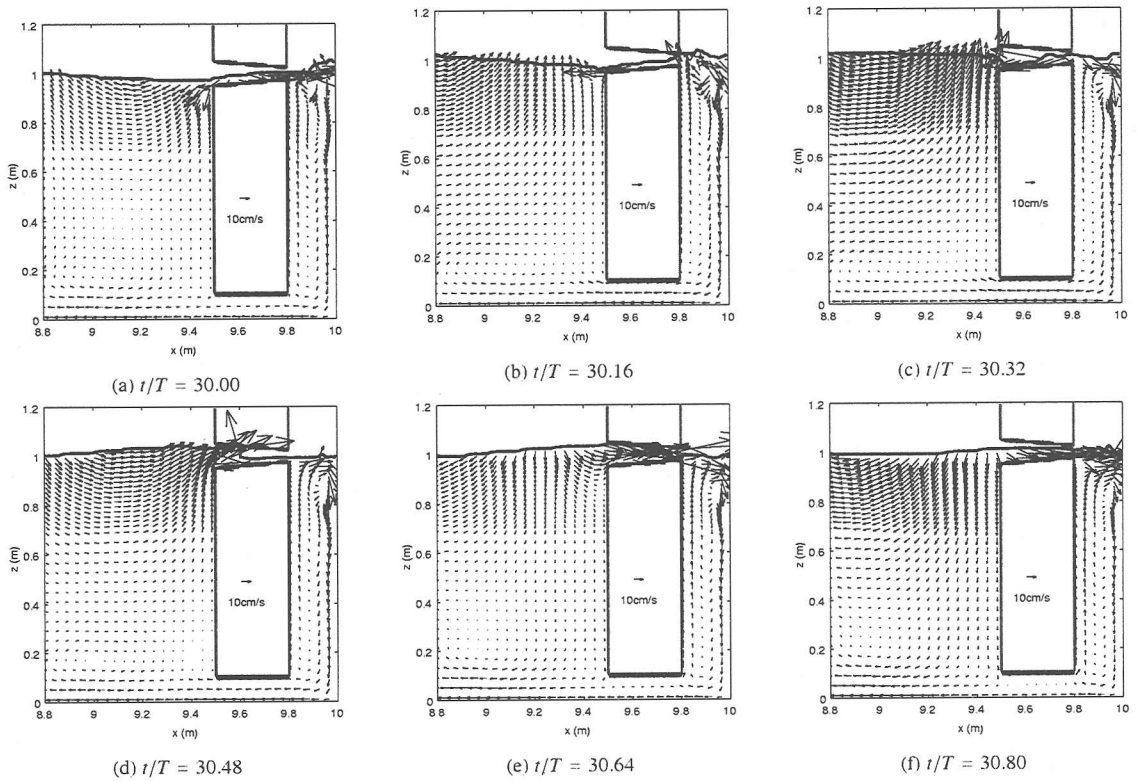


図-2 流速ベクトル図 (Type-B の場合)

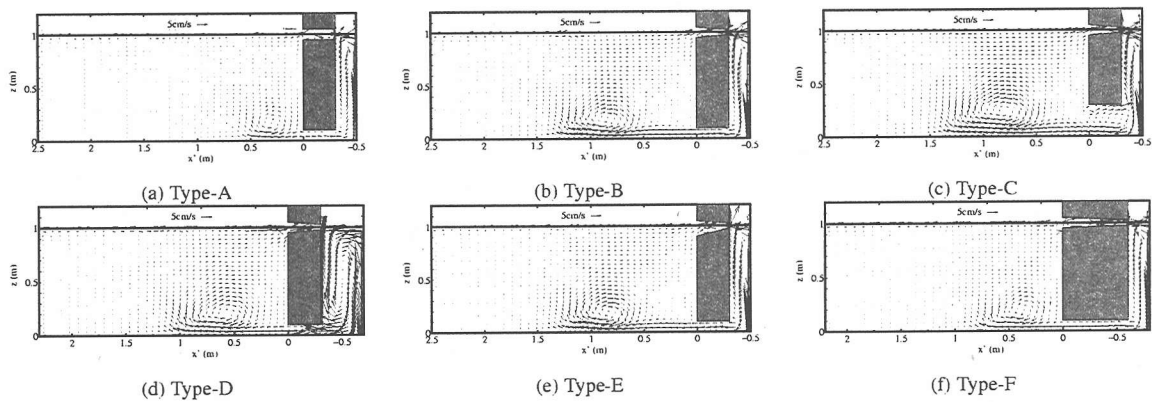


図-3 一周期平均流速ベクトル図 ($t/T = 40$)

の、その他の位相においては比較的早い冲向きの流れが生じていることがわかる。さらに、沖側底層部の流れに着目すれば、いずれの位相においても冲向きの流れが発生している。これらを総合的に判断すれば、少なくとも Type-B の堤体は、上部通水部を通じて沖側表層水を遊水室内に取り込み、下部通水部を介して遊水

室内で鉛直混合した水塊を堤体の沖側底層部に輸送する機能を有することが確認されたと言える。

c) 一周期平均流速場

図-3 は、計算開始後 40 周期目におけるそれぞれの堤体近傍の一周期平均流速ベクトル場を示したものである。尚、横軸の x' は堤体前面を原点として冲向きを

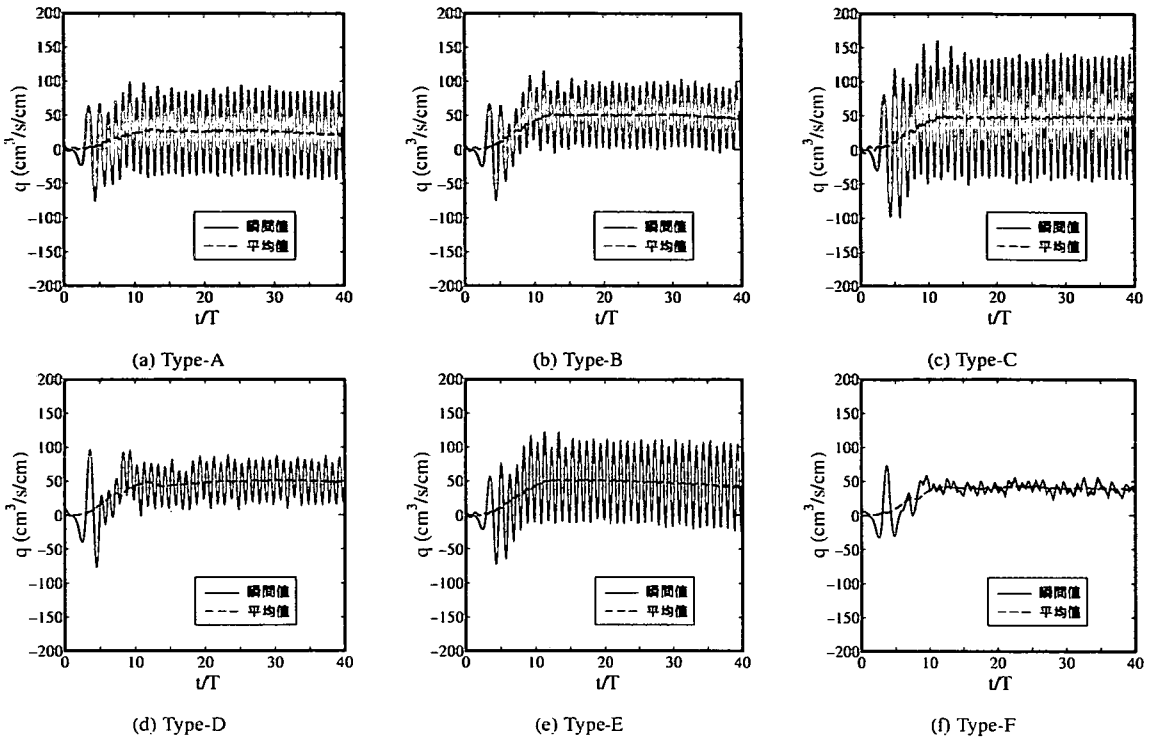


図-4 下部通水部流量

正方向にとって表している。いずれの堤体の場合にも、堤体の沖側表層では岸向きの平均流が、また沖側底層部では時計回りの循環流が形成されていることがわかる。この循環流は、堤体の下部通水部を介して遊水室から輸送されてくる沖向きの平均流によって形成されるものと推察される。また、遊水室内でも時計回りの循環流が形成されていることから、ここで提案した堤体はいずれも、沖側表層水を底層へと輸送する「表層水供給型鉛直循環流誘起堤体」としての機能を有していると判断することができる。

図-3をより詳細に見ると、上部通水部が水平構造を有する Type-A は、他の堤体と比較すると、下部通水部の平均流速および沖側底層部に生じる循環流の規模が小さいことがわかる。また、下部通水部高さ $D_b = 30\text{cm}$ と他の堤体よりも大きな Type-C では、下部通水部内でも時計回りの循環流が発生していることがわかる。堤体幅が $B = 60\text{cm}$ と大きな Type-F は、下部通水部内の平均流速が比較的小さく、沖側底層部に発生する循環流の規模も小さいことがわかる。上部通水部の斜面勾配が異なる Type-B と Type-E を比較すると、Type-E の方が沖側底層部に発生する循環流の規模がやや小さいようにも見て取れるが、ほぼ同じような平均流速場が形成されている。すなわち、ここで検討した程度の斜

面勾配の差異は、計算結果に大きな影響は及ぼさないと考えられる。遊水室幅が異なる Type-B と Type-D を比較すると、遊水室内の循環流の規模は Type-D の方が大きいと見て取れる。両者の沖側底層部に見られる循環流の発生位置は、不透過壁(図の右端)からの距離としてはほぼ等しいが、堤体前面からの距離としてみた場合には Type-B の方がより遠方に発生していることがわかる。水域の有効利用という観点で見た場合には、Type-B の方が好ましいと考えられる。

d) 下部通水部流量

図-4は、下部通水部流量の経時変化を示したものである。下部通水部流量は、下部通水部内の沖側端における流速の計算結果を基に算出した。 q が正の値を有することは下部通水部を通過して遊水室から沖側へと流体塊が輸送されていることを、また、 q が負の値を有することは沖側底層部の流体塊が遊水室内に流入していることを示している。図中の実線は下部通水部流量の瞬間値 q を、破線はその一周平均値 \bar{q} を示している。尚、計算開始から40周期後の下部通水部一周平均流量 \bar{q} の値を、表-1中に示している。図-4によれば、いずれの堤体についても計算開始後12周期程度で \bar{q} はほぼ一定値をとるようになることがわかる。上部通水部が水

平構造を有する Type-A では、 $\bar{q} = 26.0\text{cm}^3/\text{s}/\text{cm}$ であるのに対し、上部通水部が斜面構造を有する Type-B～Type-F の堤体は $\bar{q} = 40.5\sim 50.4\text{cm}^3/\text{s}/\text{cm}$ と Type-A の堤体よりも大きな値を有することがわかる。すなわち、上部通水部を斜面構造とすることによって、遊水室内に堤体前面の表層水を効率的に取り込むことが期待できることが分かる。

一方、下部通水部流量 q は波の周期で変動していることがわかる。Type-A, C の堤体では、一周間に q が負の値を有する時間が他の堤体に比べて長く、したがって、下部通水部では遊水室内の流体塊と沖側底層部の流体塊が往来していることがわかる。これに対して、Type-B, D, F は常に q が正の値をとっており、遊水室内の流体が堤体の沖側底層部に常に輸送されていることがわかる。

提案堤体の鉛直混合機能を、一周期平均下部通水流量 \bar{q} を指標として評価すれば、流量の大きい Type-B, C, D, E が有効であると判断される。また、下部通水部流量 q の時系列変化をその指標としてみれば、常にその値が正である Type-B, D, E, F が有効であると判断される。以上を総合的に判断すると、Type-B の構造を有する堤体が高度利用された閉鎖性水域における「表層水供給型鉛直循環流誘起堤体」としては最適ではないかと判断される。

3. 検証実験

(1) 実験概要

前節で得られた計算結果の妥当性を検証するため、水理模型実験を行った。実験は長さ 50m, 幅 1m, 高さ 1.5m の二次元造波水槽を用いて行った。水深は 1.0m で一定とし、造波機から約 35m 離れた地点に、アクリルで製作された Type-B の模型を設置した。実験では、反射率 K_r 、堤体沖側における一周期平均流速場、一周期平均下部通水部流量 \bar{q} を求めた。反射率の測定には、2 台の容量式波高計を用いて入・反射分離推定法により求めた。流速の測定には、電磁流速計（アレック電子製）を用い、50 周期分の時系列データより一周期平均流速を求めた。下部通水部流量は堤体の沖側面の下部通水部出口において、鉛直方向に 1cm 間隔で流速を測定して算出した。波浪条件は、前節と同じである。

(2) 実験結果

a) 反射率

実験で得られた反射率 K_r は、0.44 で、数値計算による予測値 $K_r = 0.36$ (表-1 参照) と比較するとやや大きな値であった。

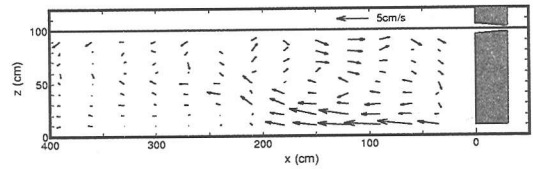


図-5 実験結果

b) 一周期平均流速

実験で得られた堤体の沖側における一周期平均流速を 図-5 に示す。遊水室内の流況については後述する。図-5 の一周期平均流速ベクトルの実験結果によれば、堤体前面域では底層部で沖向きの平均流が、また、表層部では岸向きの平均流が形成されており、図-3(b) の数値計算による予測と定性的に一致していることがわかる。循環流の形成される位置は、実験結果の方が数値予測よりも大きくなっている。これは、数値計算では計算開始後 40 周期目の一周期間のデータを用いて予測しており、数値造波水槽内の流体運動が十分に定常状態に達していなかったと推察される。表層水は水底に沿って少なくとも循環流形成位置まで輸送されるであろうことを考えると、数値計算で定量的に鉛直循環流誘起堤体の効果を予測するためには、より長時間の計算をする必要があると考えられる。

c) 下部通水部流量

数値波動水槽による一周期平均下部通水部流量 \bar{q} は $\bar{q} = 50.0\text{cm}^3/\text{s}/\text{cm}$ であったが、実験では $\bar{q} = 62.9\text{cm}^3/\text{s}/\text{cm}$ と予測値と比較して 20% 程度、大きな値であった。この理由として、数値計算では下部通水部内の流速の計算値から \bar{q} を求めているのに対して、実験では下部通水部内の流速を直接測定することができず、下部通水部から沖側の領域に出たできるだけ堤体に近い地点（約 5cm 離れた地点）で計測された流速値から \bar{q} を算定していることから、実験値には下部通水部からの流出流量だけでなく堤体前面における連行流の影響が表れているために、計算値よりも大きな値が得られたものと推察される。

d) 遊水室内の流況

数値計算による予測によれば、上部通水部から遊水室内に流入する表層外海水は、遊水室内で激しい鉛直混合を受けた後に、下部通水部から沖側底層部へと流出していく。実験では、上部通水部を通過する際に碎波が生じ、これによって遊水室内の水表面近傍（水表面から 30cm 程度にまで及ぶ）に比較的大きな気泡が供給され、さらに、これが微小気泡へと分裂しながら底層部へと輸送される様子が観察された（図-6 参照）。底層部へと輸送された気泡の一部は堤体背後を沿うよう

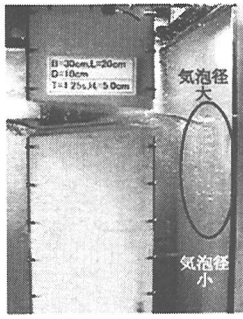


図-6 遊水室内の様子

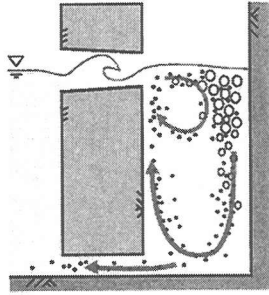
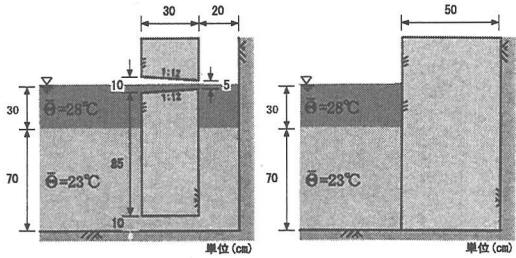


図-7 気泡の生成, 移動の概要図



(a) 鉛直循環流促進堤の場合 (b) 垂直護岸の場合

図-8 温度に関する初期条件

に遊水室内を上昇するが、残りの気泡は下部通水部を通して沖側底層部へと輸送される(図-7参照)。このように、提案堤体は表層水を底層へと輸送する機能だけでなく、遊水室内に多数の気泡を混入することにより、曝気機能も有することが期待できることがわかった。

4. 温度成層場における効果の予測

夏期の天候が安定した期間における閉鎖性水域では、日射による表層水の温度が上昇し、これによって安定密度成層が形成されることが少なくない。そこで、ここでは、水温に起因する密度成層が前述の提案堤体の鉛直循環流誘起効果に及ぼす影響を、数値モデルによって検討する。

(1) 基礎方程式

ここでは、温度による密度変化の影響は、それによって生じる浮力の効果としてのみ取り扱うとするブシネスクの近似を用いた。すなわち、基礎方程式は、式(1)で表される質量の保存則と、下記のアンサンブル平均化操作を施した Navier-Stokes の方程式(13)、および温度の輸送方程式(14)である。

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + g_i + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial \bar{u}'_i \bar{u}'_j}{\partial x_j} - g_i \beta (\bar{\Theta} - \Theta_0) \quad (13)$$

$$\frac{\partial \bar{\Theta}}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{\Theta}}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu}{Pr} + \frac{\nu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial \bar{\Theta}}{\partial x_j} \quad (14)$$

ここに、 $\bar{\Theta}$ は水温、 Θ_0 は参照水温、 $\beta = 2.5 \times 10^{-4}$ は体積膨張係数、 $Pr = 7.0$ はプラントル数、 $Pr_t = 0.9$ は乱流プラントル数である。式(13)中のレイノルズ応力は、式(4)を用いるが、このとき、渦動粘性係数 ν_t には次式を用いた。

$$\nu_t = C_\mu f_\mu \frac{k^2}{\epsilon}, \quad f_\mu = 1.0 \quad (15)$$

また、上式を用いて ν_t を計算する際に必要な k および ϵ は、それぞれの次の輸送方程式を解いて求めた。

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} + \nu \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] - \bar{u}'_i \bar{u}'_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \epsilon + G_k \quad (16)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} + \nu \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] - C_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k} + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + C_{3\epsilon} f_2 \frac{\epsilon}{k} G_k \quad (17)$$

$$G_k = -g_i \beta \bar{u}_i \bar{\Theta} \quad (18)$$

$$C_{3\epsilon} = C_{1\epsilon} = 1.44, \quad f_1 = f_2 = 1.0 \quad (19)$$

(2) 計算条件

計算領域および境界条件は、前述の均一密度場におけるそれらと同じである。水温に関する初期条件は、夏期の大阪湾沿岸域において水深がおおよそ $h = 10\text{m}$ の地点の温度差が大きい場合の実測データを参考にして、図-8(a)のように与えた。すなわち、表層 30cm の部分の水温を $\Theta = 28^\circ\text{C}$ と一定とし、それ以下では $\Theta = 23^\circ\text{C}$ と一定とした。尚、ここでは、提案堤体の鉛直混合効果を垂直護岸と比較するため、図-8(b)に示すような垂直護岸がある場合についても計算を行った。

(2) 計算結果

a) 水温の分布

図-9は、成層波浪場における垂直護岸前面海域の計算結果を示したものである。初期条件としての温度の鉛直分布は水深 30cm で急激に変化させて与えたが、計算時間の経過とともにやや鈍った温度分布となっているものの温度躍層は形成されたままの状態が続いている。このように、垂直護岸の前面域では表層で水温が高く、底層部で水温が低い安定成層化状態となり、鉛直混合が期待できない状況になることがわかる。

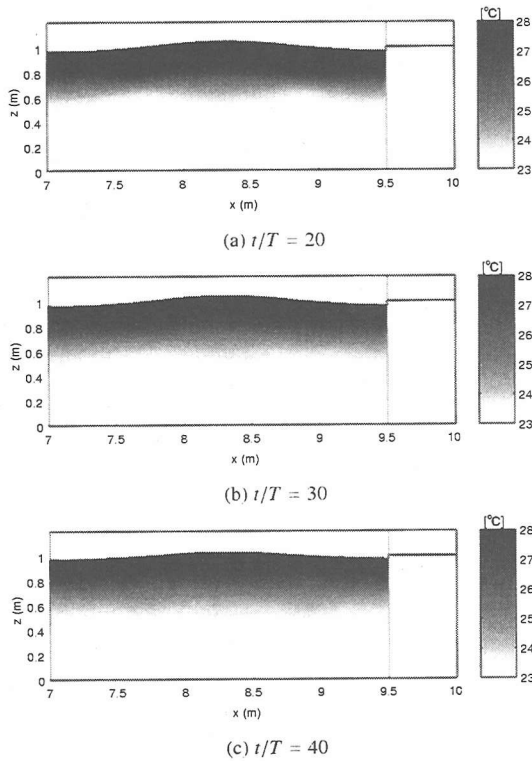


図-9 温度分布の計算結果 (垂直護岸の場合)

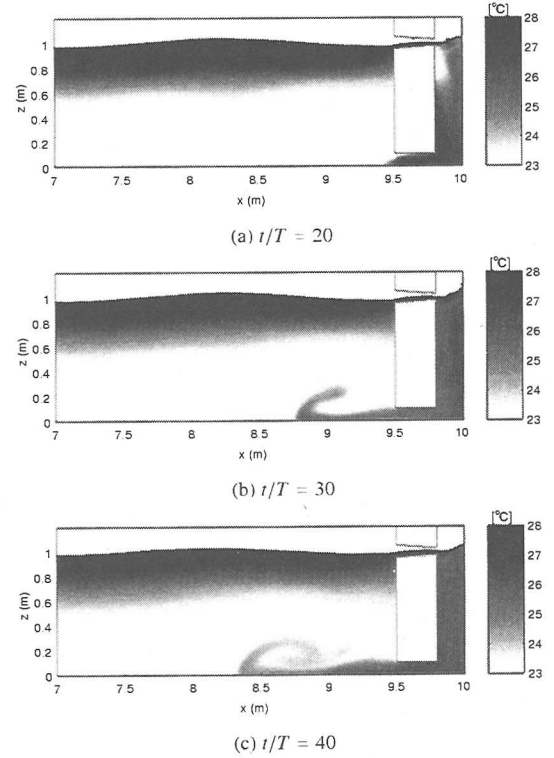


図-10 温度分布の計算結果 (鉛直循環流誘起堤体の場合)

これに対して、鉛直循環流誘起堤体前面域における温度分布の計算結果を示した図-10によれば、遊水室内における鉛直混合によって上部通水部から流入した水塊が混合され、下部通水部から沖側海域底層部へと輸送されていることがわかる。すなわち、ここで検討した温度成層程度であれば、提案堤体によって鉛直循環流の形成が妨げられることがなく、したがって、堤体前面底層部における貧酸素化現象の抑制が期待できると考えられる。

b) 一周期平均流場

水温の高い流体塊が下部通水部から水温の低い沖側底層部に輸送されたとき、密度差に起因して、すぐに上昇してしまい、水温分布を考慮しなかったときのような期待通りの鉛直混合効果が得られないことが危惧される。図-11は、温度分布を考慮した場合としない場合の一周期平均流速場の計算結果を示したものである。両者を比較すると、温度分布を考慮した場合には、堤体沖側底層部に見られる循環流の規模が、温度分布を考慮しない場合のそれと比較するとやや小さくなってはいるが、同様の流速場が得られていることがわかる。すなわち、ここで提案する鉛直循環流誘起堤体は、温度成層化した場合には沖側底層部の水質改善期待領域

がやや小さくなるものの、温度成層化していない場合とほぼ同様の効果が期待できることがわかる。

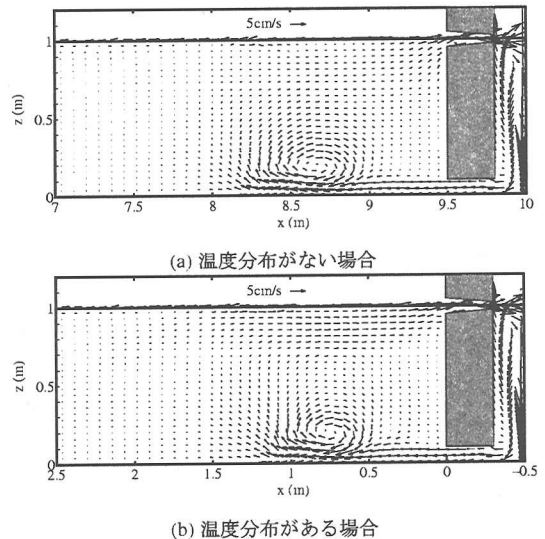


図-11 一周期平均流速場 ($t/T = 40$)

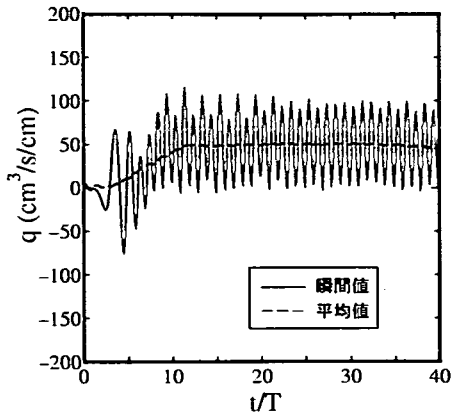


図-12 下部通水部流量

c) 下部通水部流量

図-12は、温度分布を考慮した場合の下部通水部流量の時間変化を示したものである。図-4(b)と比較すると、下部通水部流量の時間変化には温度分布の影響はほとんど見られない。また、40周期経過したときの一周平均下部通水部流量 \bar{q} は、温度分布を考慮しなかった場合の $\bar{q} = 50.0 \text{ cm}^3/\text{s/cm}$ に対して、 $\bar{q} = 49.7 \text{ cm}^3/\text{s/cm}$ とほぼ同じであった。このことから、ここで検討した程度の温度躍層であれば、提案堤体に及ぼす温度成層の影響はほとんどないといえることができる。

5. 結言

本論文では、高度に人工化された内湾の閉鎖性水域において、波浪エネルギーを用いて鉛直循環流を誘起し、表層の比較的酸素が豊富な水塊を底層部へと輸送することができる鉛直循環流誘起堤体の開発を目指したものである。主要な結論を要約すると以下のとおりである。

- 1) 数値モデルを用いて目的とする機能を有する構造物の形状を提案し、計算結果の妥当性を検討するための検証実験を行うことによって堤体の構造を決定するという手順を踏んで構造物を提案した。このような手法は、今後、新たな構造物を開発するには有力な手法であると考えられる。
- 2) ここで提案した堤体は、上部通水部と下部通水部を有する直立式の堤体である。本堤体は、波浪が上部通水部を砕波して通過し、遊水室に取り込まれた表層水塊は激しい鉛直混合作用を受けた後に、下部通水部から堤体沖側底層部へと輸送されることが、数値計算によっても、また、水理模型実験によっても検証された。また、反射率も40%程度の低反射機能を有すること、さ

らに、直立式の堤体であることから、高度に人工化した海域でも適用できると考えられる。

- 3) 上部通水部を波浪が砕波しながら通過する際に大量の気泡が発生し、この気泡が遊水室内の全水深にわたって常時分布すること、また、その一部が下部通水部を介して堤体沖側底層部へと輸送されることから、ここで提案した堤体は単に鉛直混合機能を有するだけでなく、曝気機能も有することが期待できることがわかった。
- 4) 数値計算によって温度成層場における提案堤体の鉛直混合機能を検討した結果、夏期の現地で見られる温度成層程度であれば、均一密度場における鉛直混合機能とほぼ同程度の効果が得られるであろうと期待できる。

以上のように、本研究は表層水供給型の鉛直循環流誘起堤体の提案・開発に取り組んだものであり、室内実験スケールで検討した結果、数値モデルによる提案堤体の効果は水理模型実験によって検証され、定性的な効果については確認できたと言える。今後は、塩分成層場における鉛直循環流誘起堤体の効果の検討、および底層に表層水を供給することによる貧酸素化抑止効果の影響範囲の定量的検討、さらには、実スケールにおける底質環境の改善効果について検討を行う予定である。

参考文献

- 1) 環境庁水質保全局監修：平成10年度瀬戸内海の環境保全資料集，1998。
- 2) 大塚耕司，中西 敬，重松孝昌，上嶋英機，中辻啓二，環境修復の目標と対策技術，環境技術，Vol. 30, No. 7, pp.537-543, 2001。
- 3) 城 久：大阪湾の貧酸素水塊，沿岸海洋研究ノート，第26巻，第2号，pp.87-98。
- 4) 矢持 進，小田一紀，柳川竜一，山根和夫，田代孝行，新瀬幾恵：大阪湾湾の区域の環境特性と大型底生動物群集の時系列変化，海岸工学論文集，第48巻，pp.1191-1195, 2001。
- 5) 中西 敬，上嶋英機，上月康則，平田元美，宮城佳世：海生生物の生息空間に及ぼす貧酸素水塊の定量的影響評価，海岸工学論文集，第48巻，pp.1064-1065, 2001。
- 6) 矢持 進，大阪湾の環境と生物，環境技術，Vol. 30, No. 7, pp.524-530, 2001。
- 7) 例えば，環境修復技術の実用化に向けて，Ecosystem Engineering，第6号，pp.90-105, 2001。
- 8) 岡本 博，森下敏夫：海水交換機能を持つ弁式有孔堤について，第32回海岸工学講演会論文集，pp.540-544, 1985。
- 9) 道下 勲，国栖広志，葛原 徹：鉛直管の水面固有振動を利用した海水交換防波堤の水理特性，第35回海岸工学講演会論文集，pp.577-581, 1988。
- 10) 猿川 弦，水野雄三，笹島隆彦，木村克俊，高橋哲美：消波ブロック被覆型有孔堤の海水交換特性に関する研究，海岸工学論文集，第40巻，pp.971-975, 1993。
- 11) 山本 潤，武内智行，中山哲殿，田畑信一，池田正信：志賀島外港の導水工による環境改善効果に関する現地調査，海岸工学論文集，第41巻，pp.1096-1100, 1994。
- 12) 八尋順司，石崎崇志，倉田克彦：有孔堤の海水交換機能に関する実験，関西支部年講，pp.11-99, 1994。
- 13) 小田一紀，真茶平宜之，中西昭人，田中彬夫：波浪によるパイプ式透堤の海水導入特性，海岸工学論文集，第

- 42 卷, pp.1116-1120. 1995.
- 14) 例えば, 上北征男, 浅岡邦一, 森井伸正, 大竹臣哉: 湧昇流発生構造物の開発に係わる実験的研究: 第 33 回海岸工学講演会論文集, pp.342-346,
 - 15) 中村 充, 大西亮一, 萩野静也, 井上謙一: エアバブルカーテンによる水質改善に関する研究: 第 20 回海岸工学講演会論文集, pp. 239-246, 1973.
 - 16) 矢持進, 岡本庄市, 山下貴幸, 久保佳洋, 小田一紀: 噴流式水流発生装置による港湾域での生物生息環境の改善, 海岸工学論文集, 第 46 卷, vol.46. pp.1086-1090. 1999.
 - 17) 小松利光, 岡田知也, 松永信博, 榎田 操, 藤田和夫: 波浪エネルギーから位置エネルギーへの効率的な変換に関する実験的研究, 土木学会論文集, No. 551/II-37, pp. 89-99, 1996.
 - 18) 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 卷, pp. 1296-1300, 2001.
 - 19) Kawasaki. K.: Numerical Simulation of Breaking and Post-Breaking Wave Deformation Process Around a Submerged Breakwater, *Coastal Engineering Journal*, pp. 201-224. 1999.
 - 20) 滝川清, 山田文彦, 松本健作: 潜堤上砕波変形の内部特性とその数値解析, 海岸工学論文集, 第 42 卷, pp. 66-70, 1995.
 - 21) 加藤雅也, 渡部靖憲, 佐伯浩: 越波を伴う直立堤堤頭部周辺の 3 次元流速変動特性, 海岸工学論文集, 第 48 卷, pp. 786-790, 2001.
 - 22) 細山田得三, 吉田 茂, 早川典生, 犬飼直之, 中田芳貴: SOLA-SURF 法による潜堤周辺波動場の三次元数値計算, 海岸工学論文集, 第 45 卷, pp. 157-160, 1998.
 - 23) Lin. P. and Liu. L.-F. P.: A Numerical Study of Breaking Waves in the Surf Zone. *Journal of Fluid Mechanics* Vol. 359. pp. 239-264. 1998.
 - 24) Lin. P. and Liu. L.-F. P.: Turbulence Transport. Vorticity Dynamics. and Solute Mixing Under Plunging Breaking Waves in Surf Zone. *Journal of Geophysical Research*. Vol. 103. pp. 15677-15694. 1998.
 - 25) Liu. L.-F. P. Lin. P. Chang. K.-A.. and Sakakiyama T.: Wave Interaction with Porous Structures, *Journal of Waterways, Port, Coastal and Ocean Engineering*. ASCE, Vol. 125. No. (6). pp. 322-330. 1999.

(2003. 1. 22 受付)

DEVELOPMENT OF SEAWALLS GENERATING VERTICAL CIRCULATION FLOW FOR RESTRAINT OF ANOXIC WATER

Takaaki SHIGEMATSU. Kenzou IKEDA and Kazuki ODA

The purpose of this study is to develop seawalls for restraint of anoxic water generation over the sea bottom at an enclosed sea area strongly impacted by human activities. A numerical model is used for proposing the shapes of the seawalls with expected functions and the calculated result for the most effective seawall shape is validated by a hydraulic model test. Furthermore effectiveness of the seawall under the temperature stratification field is estimated by the numerical model.