

鉛直循環流誘起堤体の曝気能に関する実験的評価

遠藤 徹¹・重松孝昌²・建部祐哉³

港湾機能を維持したまま底層の貧酸素化を改善する技術として開発した鉛直循環流誘起堤体の酸素供給機能について検討するため、水理模型実験を行って本堤体の曝気能の定量的な評価を試みた。得られた結果と既往の研究結果を基に、本提案堤体による酸素の物質移動係数 K_L と他の構造物の K_L を比較し、本堤体の曝気能に関する有効性を明らかにした。さらに、大規模模型実験を実施して、本堤体の曝気能に及ぼすスケールの影響についても検討した。

1. 緒 言

沿岸域の環境問題を考える上で、底生生態系に深刻な影響を及ぼす底層の貧酸素化は無視することができない。都市型塩性湿地研究会（矢持，2004）が実施した大阪湾夏季水質一斉調査の報告によれば、閉鎖性内湾、特に、港湾海域における底層の溶存酸素環境は、台風が通過した直後でさえ貧酸素状態であり、極めて劣悪な状況であった。環境共生型港湾を実現するためには、港湾機能を維持したまま底層の貧酸素化を改善することができる技術が必要不可欠といえる。このような背景の下、重松ら（2003）は鉛直循環流を発生させて底層への酸素供給を促進することができる鉛直循環流誘起堤体（図-1 参照、以後“VCF 堤体”と称す）を開発し、水理実験および数値解析によって、その有効性について検証した。また、Endo ら（2005）は大規模模型実験を実施し、VCF 堤体の有効性に及ぼす潮位の影響について検討した。その結果、水面が VCF 堤体の上部ユニットに達する高潮位時には、堤体前面の底層水が遊水室および上部通水部を介して表層へと輸送され、所期の目的とは相反する循環流が発生することが確認された。すなわち、高潮位時には上部ユニットがないほうが効果的であることが明らかになった。これらの研究は流体力学的な有効性に関するものであり、貧酸素化の改善効果を検証するためには VCF 堤体による海域への酸素供給機能、すなわち、曝気能について検討しておく必要がある。

海岸構造物の曝気能に関する先駆的な研究として、水中の溶存酸素の回復程度を表す再曝気係数 k_2 によって評価している堀江ら（1987）の研究を挙げることができる。また、角野ら（1994）は、海岸構造物固有の曝気能をより正確に評価するために、堀江らの実験手法を改善するとともに物質移動係数 K_L によって評価するべきであると提案している。本研究では、まず、VCF 堤体の

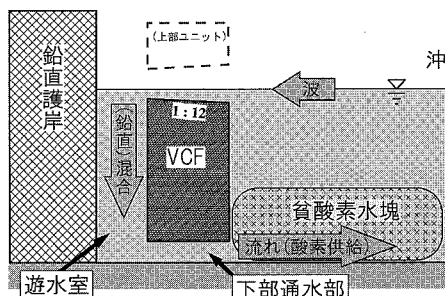


図-1 VCF 堤体によって誘起される循環流の概念図（本研究では上部ユニットを付属しない）

曝気能を検討するために、角野らと同スケールの水理実験を行って VCF 堤体の物質移動係数 K_L を求めて本堤体の曝気能について検討するとともに、角野らによって求められた縦スリット堤および捨石堤の曝気能と比較した。一方、既往の研究によって VCF 堤体は、斜面上部における碎波や遊水室内での気泡混入など、実験スケールによって異なる現象が確認されている。気液界面でのガス交換は、曝気面積が重要であるので本堤体のように気泡混入が生じる構造物に関しては、気泡の影響についても検討しておく必要がある。そこで、大規模模型を用いて同様の実験を行い、気泡混入が VCF 堤体の曝気能に及ぼす影響について検討した。

2. 構造物による曝気能を評価するための基礎式

流水中における酸素の収支に関する研究は古くから行われており、なかでも理論的な取り扱いとしては Streeter・Phelps（1925）によるものが代表的である。Streeter・Phelps によると、流水中での酸素収支は以下のよう表される。

$$\frac{dC}{dt} = -k_1 L + k_2 (C_s - C) \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 C (mg/l)：溶存酸素濃度、 k_1 ：脱酸素係数 (1/s)、 L ：BOD 濃度 (mg/l)、 k_2 ：再曝気係数 (1/s)、 C_s ：飽和溶存酸素濃度 (mg/l) である。式（1）の右辺第一項は、生物等による酸素消費に関する項であり、本

1 学生会員 修(工) 大阪市立大学大学院 工学研究科都市系専攻
2 正 会 員 博(工) 大阪市立大学助教授 工学部環境都市工学科
3 学生会員 大阪市立大学大学院 工学研究科都市系専攻

研究では無視することができる。また、右辺第二項は再曝気に関する項で、任意体積中の水中における溶存酸素の回復程度を表しており、 C_s と C との差に比例して大気から水中へと酸素が供給されることを意味する。式(1)中の C を初期溶存酸素濃度 C_0 と C_s で無次元化した $C^*=(C-C_0)/(C_s-C_0)$ を用いて k_2 について書き直すと

$$k_2 = \frac{-\ln(1-C^*)}{t} \dots\dots\dots (2)$$

となり、 C の時間変化を求めることによって再曝気係数 k_2 の値を決定することができる。 k_2 は温度の影響を受けるため、水温 20°C での値に補正して示される。補正式は次式で表される。

$$k_{2(20)} = \frac{k_2}{\theta^{t-20}} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 k_2 : 水温 $t^\circ\text{C}$ での再曝気係数、 $k_{2(20)}$: 水温 20°C での再曝気係数、 θ : 温度補正係数であり、ここでは一般的に用いられている値である $\theta=1.024$ を用いた。

海岸構造物の曝気能を評価する際、その曝気面積は構造物近傍のある特定の部分に限定されていて、そこから取り込まれた酸素は沖合の無限の水域に拡散していくため、一定の曝気能を有する構造物であっても水槽の規模が異なれば k_2 の値も異なるという問題が生じる。そのため、角野らは、構造物の曝気能を評価するためには曝気容積を限定することで求められる物質移動係数 K_L によって評価するべきであると提案している。また、曝気容積を限定せずに求められた k_2 には、造波機などの主要曝気源以外の曝気量も含まれるなどの問題も指摘している。そこで、本研究では水理実験により物質移動係数 K_L を求めてVCF堤体の曝気能を評価することとした。物質移動係数 K_L と再曝気係数 k_2 には以下の関係がある。

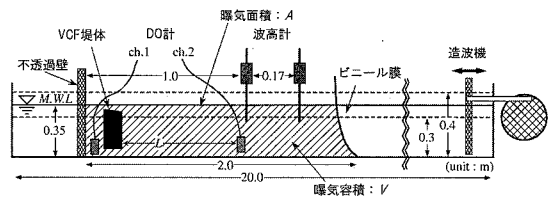
$$K_L = k_2 \frac{V}{A} \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 A : 曝気面積(m^2)、 V : 曝気容積(m^3)である。

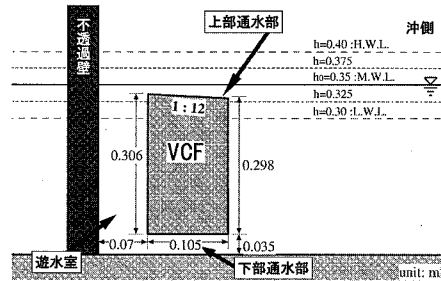
3. 小規模実験によるVCF堤体の曝気能の評価

(1) 実験概要

実験は、長さ 20.0 m 、幅 0.5 m 、高さ 0.5 m の二次元造波水路内に不透過壁を設置し、その沖側にVCF堤体の模型を設置して行った(図-2参照)。角野らに倣って、堤体模型から約2波長(2.0 m)沖の地点にビニール膜を設けて、曝気面積 A および曝気容積 V を限定した。この際、ビニール膜によって造波機からの進行波が減衰することなくVCF堤体に作用するように注意を払った。実験開始前に、亜硫酸ナトリウムと塩化コバルトを用いて曝気容積内を無酸素状態にした後に、規則波を



(a) 実験装置の全体像



(b) 実験模型の構造諸元

図-2 小規模模型実験の実験装置の概略図

作用させて、溶存酸素の時間変化を測定した。溶存酸素の時間変化は、溶存酸素計(YSI製)を遊水室の水底と、堤体から1波長離れた地点の水底に設置して測定した。溶存酸素計のサンプリング周波数は 1.0 Hz とし、曝気容積内の酸素が回復し始めてから K_L を求めるのに十分な時間測定した。また、各実験ケース毎に3回繰り返し実験を行い、それらの値を平均したものを実験値とした。溶存酸素の計測と同時に、反射率 K_r を測定するために2台の容量式波高計(KENEK製)を堤体の沖側 1.0 m と 1.17 m の地点に設置して水面変動量を測定した。波高計のサンプリング周波数は 50.0 Hz とし、得られた波形データから入射波分離推定法(合田ら, 1991)を用いて、入射波高 H と反射率 K_r を求めた。

波浪条件は、貧酸素化が発生しやすい夏季の静穏時の波浪条件を想定して、大阪湾における実測波浪データを基に、周期 $T=0.75\text{ s}$ 、波形勾配 $H/L=0.02$ と決定した。また、VCF堤体は水面近傍に通水部を有した構造であるため、その水理特性は水深に強く依存する。したがって、曝気能も水深に依存すると考えられる。そこで、実験水深は、既往の研究で鉛直循環流が最も効果的に発生する水深である $h_0=0.35\text{ m}$ を基準にして h を $0.30\sim 0.40\text{ m}$ で 0.025 m ごとに变化させて実験を行った。実験条件の詳細に関しては、実験結果とともに表-1に示す。

(2) 実験結果

遊水室内およびVCF堤体模型から1波長沖の水底で測定した溶存酸素濃度の時間変化は、両者にほとんど差が見られなかったため、本研究では堤体から1波長沖で測

表-1 小規模実験の実験条件および実験結果

CASE	水深 h (m)	h/h_0	周期 T (s)	波高 H (m)	波長 L (m)	波形勾配 H/L	反射率 K_r	物質移動係数 $K_L \times 10^{-5}$ (m/s)
1	0.403	1.150	0.75	0.016	0.874	0.019	0.90	1.11
2	0.376	1.075	0.75	0.018	0.871	0.021	0.73	2.49
3	0.350	1.000	0.75	0.020	0.867	0.023	0.49	2.66
4	0.324	0.925	0.75	0.016	0.863	0.019	0.93	1.41
5	0.298	0.850	0.75	0.018	0.856	0.021	0.86	1.11

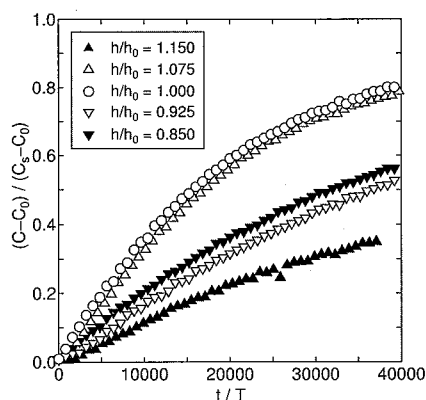
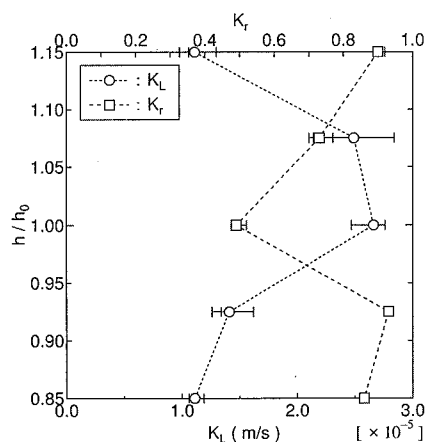


図-3 無次元用存酸素濃度の時間変化

図-4 潮位にともなう物質移動係数 K_L と反射率 K_r の変化

定したデータを用いて結果を示すことにする

無次元溶存酸素濃度の時間変化の一例を図-3に示す。図-3より、水深によって曝気容積内の溶存酸素の回復具合が異なっていることがわかる。

図-4は、水深 h と物質移動係数 K_L および反射率 K_r の関係を示す。図-4によれば、VCF堤体の物質移動係数 K_L は水深が $h/h_0=1.0$ および 1.075 の時に大きな値を示しており、それ以外では K_L の値は小さくなっていることが確認できる。一方、反射率 K_r と水深 h との関係を見ると、 $h/h_0=1.0$ で K_r は最小値をとり、水深が

$h/h_0=1.0$ よりも大きくなっても小さくなくても反射率は高くなることがわかる。目視観察によれば、水面が堤体上部の近傍に位置する $h/h_0=1.0, 1.075$ の場合は、堤体の斜面上で激しい攪乱が生じ、遊水室内でも乱れが大きかった。ただし、気泡はほとんど発生していなかった。これに対して、 $h/h_0=1.15$ の場合には、斜面上においても乱れがほとんど発生していなかった。また、 $h/h_0=0.85$ の場合には波が VCF 堤体を越えることがなかったために堤体前面では重複波が形成されていた。このことから、堤体の上部やその極近傍の流体運動（乱れ）は潮位変動の影響を強く受け、その結果、物質移動係数 K_L も潮位の影響を受けると考えられる。

(3) 他の構造物の物質移動係数との比較

角野ら (1994) は、縦スリット堤や捨石堤を対象として K_L を求め、それらの物質移動係数と損失エネルギーとの関係を示している。角野らは、このような実験手法で求められた K_L には構造物による曝気の外に波面での曝気の影響も含まれているので、構造物が存在することによる曝気能を評価するために波面による影響を除いた物質移動係数 $K'_L (=K_L - K_{Lw})$ と無次元損失エネルギー E_l/E_s との関係について検討している。ただし、縦スリット堤に関しては K'_L と E_l/E_s との間に、また、捨石堤に関しては波面の影響を除いた再曝気係数 k'_2 と $\sqrt{E_l/E_s}$ との間に線形関係があるとしている。ここで、 K_{Lw} : 波面での物質移動係数、 E_l : 波の損失エネルギー ($=\rho g H^2 (1-K_r^2)/8$, ρ : 流体密度, g : 重力加速度), E_s : 静水時のエネルギー ($=\rho g h^2/2$) である。また、角野らは進行波および重複波による物質移動係数の測定を行っており、その結果によると、 K_{Lw} に関する以下の関係式を導くことができる。

$$\frac{K_{Lw}}{K_{Ls}} = 75.69 \sqrt{\frac{E_l}{E_s}} + 1 \quad (5)$$

ここで、 E_l : 入射波の持つ単位表面積あたりのエネルギー ($=\rho g H^2/8$), K_{Ls} : 静水面での K_L であり、角野らは $K_{Ls} = 0.12 \times 10^{-5} \text{ (m/s)}$ と求めている。式 (5) を用いて VCF 堤体および縦スリット堤、捨石堤の K'_L と無次元損失エネルギーの関係を示したものが、図-5である。VCF 堤体の物質移動係数と損失エネルギーの相関を見るために両者の相関を求めたところ、VCF 堤体の

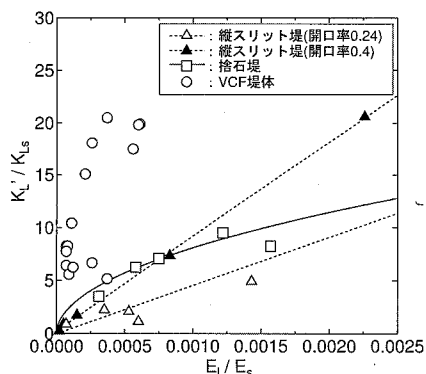


図-5 波面の影響を除いた物質移動係数 K'_L と無次元損失エネルギーの関係

K'_L/K_{Ls} と E_l/E_s との相関係数が 0.75, また $\sqrt{E_l/E_s}$ との相関係数が 0.76 であり, 本実験でのデータ数では E_l/E_s と $\sqrt{E_l/E_s}$ のどちらに相関が強いのかは明確にできなかった。しかし, 図-5 より, 同一の損失エネルギーに対して VCF 堤体の K'_L/K_{Ls} が最も大きな値を示しており曝気能は他の構造物よりも優れていると言える。

4. 大規模実験による気泡混入による影響の評価

VCF 堤体は, $h_0=0.35$ m の小規模実験では遊水室内で碎波に伴う気泡がほとんど発生していたが, Endo ら (2005) が行った $h_0=2.0$ m での大規模実験では図-6 に示すように大量の気泡が遊水室内で発生することが確認されている。そこで, 大規模模型を用いて同様の実験を行い, 気泡混入が VCF 堤体の曝気能におよぼす影響について検討した。

(1) 大規模実験の実験概要

実験は, 長さ 100 m, 幅 3.0 m, 高さ 3.0 m の大型二次元造波水路を用いて行った。堤体模型の構造諸元および波浪条件は, 実験水深を $h_0=2.0$ m としてフルードの相似則により決定した。予め曝気容積内の溶存酸素を低下させるための薬品量とその作業を軽減するために, 水路幅の片側から 0.8 m の地点に仕切り板を設置し (図-7 参照), その一方の水路内の堤体から約 2 波長沖にビニール膜を設置して曝気槽を限定した。溶存酸素計は堤体から 1 波長離れた地点に設置して, サンプルング周波数 1.0 Hz で溶存酸素濃度の時間変化を収集した。



図-6 前面壁上部および遊水室内における流況 (大規模実験)

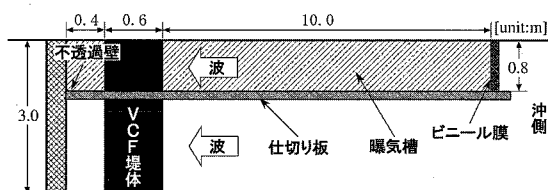


図-7 大規模実験の実験概略図 (上面図)

また, 反射率を求めるために, 容量式波高計を堤体から 5.0 および 5.8 m 離れた地点に設置して, 水面変動量をサンプリング周波数 50.0 Hz で測定した。実験水深は, 小規模実験と同じ 5 ケースを実施したが, $h/h_0=0.925$ の場合は安定した多重反射波場が形成されなかったのが本実験結果では除外した。また, 小規模実験では, 同一の実験を 3 回繰り返して得られた結果を平均した値を実験結果としたが, 大規模実験では実験は 1 回のみとした。実験条件の詳細は, 実験結果とともに表-2 に示す。

(2) 実験結果

大規模実験で求められた物質移動係数 K_L を表-2 に示す。大規模実験においても, K_L は $h/h_0=1.0$ の場合に最大値を示し, 反射率 K_r は最小値を示しており, 小規模実験と同様の傾向が確認できる。また, いずれの実験水深においても大規模実験の K_L のほうが小規模実験での K_L よりも大きいことがわかる。

大規模実験で得られた K_L に関しても, 式 (5) を用いて波面の影響を除いた K'_L/K_{Ls} を推算し, 無次元損失エネルギーとの関係を示したものが図-8 である。 E_l/E_s 。

表-2 大規模模型実験における実験条件および実験結果

CASE	水深 h (m)	h/h_0	周期 T (s)	波高 H (m)	波長 L (m)	波形勾配 H/L	反射率 K_r	物質移動係数 $K_L \times 10^{-5}$ (m/s)
1	2.30	1.150	1.79	0.093	4.974	0.02	0.76	4.93
2	2.15	1.075	1.79	0.095	4.960	0.02	0.72	9.17
3	2.00	1.000	1.79	0.106	4.941	0.02	0.43	11.09
4	1.70	0.850	1.79	0.090	4.879	0.02	0.94	3.99

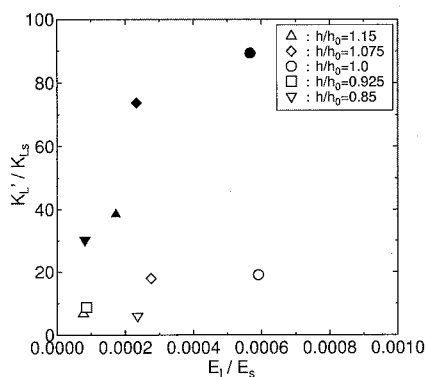


図-8 大規模および小規模実験における物質移動係数と損失エネルギーの関係の比較（黒塗り：大規模実験，白抜き：小規模実験）

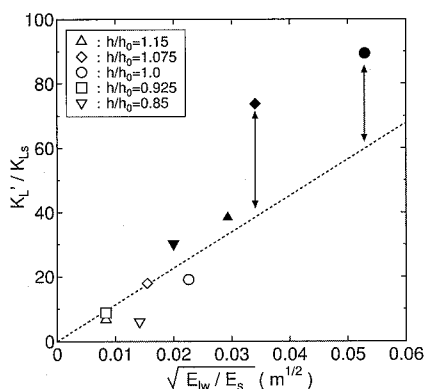


図-9 1波あたりの損失エネルギーと物質移動係数の関係（黒塗り：大規模実験，白抜き：小規模実験）

と K'_L/K_{Ls} の関係においても、大規模実験の K'_L/K_{Ls} のほうが小規模実験よりも大きい傾向がある。これは、 E_L は単位面積あたりの波の損失エネルギー率を表しているため、大規模実験と小規模実験の波の空間スケールが考慮されていないためであると考えられる。

そこで、1波あたりの損失エネルギー $E_{Lw} (= \rho g H^2 (1 - K_L^2) L / 8)$ と K'_L の関係について検討してみた。図-9は、 K'_L/K_{Ls} と E_s を用いて正規化された1波あたりの損失エネルギーとの関係を図示したものである。図-9によれば、大規模実験の $h/h_0 = 1.0$ および 1.075 のデータを除けば $\sqrt{E_{Lw}/E_s}$ と K'_L の間にはスケールにかかわらず線形関係があると言える。目視観測によれば、大規

模実験の $h/h_0 = 1.0$ および 1.075 の場合には、前述したように遊水室内で大量の気泡が発生することが確認されている。したがって、図-9のような整理方法が正しいとすれば、 $\sqrt{E_{Lw}/E_s}$ と K'_L/K_{Ls} の線形関係に対する大規模実験の $h/h_0 = 1.0$ および 1.075 の場合のデータの差異が気泡の影響によるものと推定できる。同図を用いて、気泡による曝気能を評価したところ、 K'_L のうち気泡混入による寄与率は約 30～40 %程度であると考えられる。

5. 結 言

本研究では、VCF 堤体の酸素供給機能を定量的に評価するため、小規模および大規模模型実験を行って物質移動係数 K_L を求めた。その結果、本堤体の曝気能として以下のことが明らかとなった。

- 1) VCF 堤体の曝気能は、反射率と同様に水深に強く依存し、水深が VCF 堤体の上部斜面の近傍に位置する時に最も効果が期待できる。
- 2) VCF 堤体の曝気能を評価するために、縦スリット堤および捨石堤を対象として既往の研究によって求められている物質移動係数と比較したところ、VCF 堤体の曝気能が最も優れていることがわかった。
- 3) 気泡混入が VCF 堤体の曝気能に及ぼす影響を検討するために異なるスケールの曝気実験を行い、その結果を比較したところ、気泡の影響によると考えられる曝気能の増加分は約 30～40 %程度と推定された。

参 考 文 献

- 角野昇八・仲田義弘・斉藤満・中谷成智・芳田利春・小田一紀 (1994)：海岸構造物の曝気能に関する実験的再考察，海岸工学論文集，第 41 巻，pp. 1036-1040。
- 合田良実・鈴木康正・岸良安治・菊池治 (1976)：不規則波実験における入・反射波の分離推定法，港湾技術研究所資料，No. 248，24 p。
- 重松孝昌・池田憲造 (2003)：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，土木学会論文集，VII-378，pp. 57-68。
- 堀江毅・細川恭史・三好英一・関根好幸 (1987)：構造物によるエアレーション効果比較模型実験，第 34 回海岸工学講演会論文集，pp. 651-655。
- 矢持進 (2004)：港湾海域の貧酸素水塊—大阪湾沿岸一 水質調査結果一，瀬戸内海，No. 42，pp. 31-36。
- Endo, T., Shigematsu, T. and Oda, K. (2005)：Large-scale Experiments on Effectiveness of a Breakwater Promoting Vertical Circulation Flow, Asian and Pacific Coasts 2005, pp. 531-542。
- Streeter, N. W. and Phelps, E. B. (1925)：A study of the pollution and natural purification of the Ohio river, Public Health Bulletin 146, U. S. Public Health Service Washington, D. C.