

縦スリット式構造物の曝気機能の一予測式

角野昇八*・鍾 一明**・藤原隆一***

1. 緒 言

海環境浄化への社会の熱いまなざしがそそがれる昨今の情勢のなかで、海岸構造物の曝気（エアレーション）機能に着目した研究がいくつかみられる（堀江ほか，1980，1987；細井ほか，1988；角野ほか，1989）。なかでも、細井ほかによる研究は、実験のみならずその理論的解析をめざした先駆的なものであり、しかもかなりの成果を挙げた研究として特記されよう。一方、目を開水路流れの曝気効果に転ずれば、その理論予測式に関する研究は比較的早くよりみられ、なかでも O'Connor・Dobbins (1958) は再曝気係数の理論的誘導を行うとともにその妥当性を模型実験結果と現地実験データによって証明している。ところで、細井ほかの研究の理論展開過程を詳細にみると、乱流構造に関する考察には乱流理論の見地から若干修正が必要と思われる点がみられ、また開水路流れとは異なる海岸構造物に固有の状況も考慮されていない点なども指摘できる。このようなことより彼らの予測式による値と実験データの間には若干のパラツキがみられ、それゆえ完璧な予測式がまだ得られたとはいえない状況にあると思われる。本研究は O'Connor ほかや細井ほかの理論展開過程と同じく Danckwerts (1951) の表面更新理論を出発点にして、基本的には細井ほかと同様の考察方法によるけれども、海岸構造物の実態により則した理論的および実験的検討をくわえ、海岸構造物の曝気機能のさらに踏み込んだ理解とともにそれにもとづく一予測式の作成を目的とするものである。

2. O'Connor ほかによる開水路流れに対する予測式

O'Connor・Dobbins (1958) は、開水路流れの曝気機能の予測式を構築するにあたり、Streeter・Phelps (1925) によって提案された酸素供給（再曝気）現象に対する古典的な基礎方程式

$$dD/dt = -k_2 D \quad \dots\dots\dots (1)$$

より理論展開を始めている。ただし上式は水中で溶存酸素の消費がない場合の式であり、 D は溶存酸素の飽和値からの負荷量、 k_2 は再曝気係数とよばれる係数である。ここで Lewis・Whitman (1924) の 2 境膜理論による希薄溶液に対する式

$$N = \frac{1}{A} \frac{dm}{dt} = \frac{V}{A} \frac{dc}{dt} = K_L(C_s - c) \quad \dots\dots\dots (2)$$

を考慮すれば、

$$k_2 = K_L A / V \quad \dots\dots\dots (3)$$

の関係が得られる。ただし、 N は単位時間、単位面積当りの物質輸送率を表し、 A は曝気が生じている面積、 V は混合容積、 K_L は総括物質移動係数であり、 C_s は飽和溶存酸素濃度、 c は溶存酸素濃度である。式中の K_L は気液界面を通過する物質の輸送を特徴づける基本量であり、上式を通して k_2 と関係づけられている。いまここで、等水深 h の開水路等流を対象とする場合には、 A 、 V としてそれぞれ水面全体とその下の水域容積全体をとることができ、 $A/V = h$ であるので、

$$k_2 = K_L / h \quad \dots\dots\dots (4)$$

の関係を得ることができる。ここでさらに流れが乱流状態にある場合は、気体に曝されている流れの表面の液体要素は、主流部の乱流運動によってある一定の割合 r で表面下の要素でもって連続的に置き換えられるとする、いわゆる Danckwerts (1951) の表面更新理論の考え方を導入して、

$$K_L = (D_L r)^{1/2} \coth(r Y_L^2 / D_L)^{1/2} \quad \dots\dots\dots (5)$$

を彼らは得た。ここに D_L は液層の分子拡散係数であり、 Y_L は境膜層の厚さ。ただし実際のほとんどの条件下では、上式は Danckwerts の得た

$$K_L = (D_L r)^{1/2} \quad \dots\dots\dots (6)$$

で近似できるとしている。したがって k_2 は、

$$k_2 = (D_L r)^{1/2} / h \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここに、濃度は水深全体にわたって一定であることと時間的にも変化しない（少なくとも更新の時間内では）ことが仮定されている。

以上より、 k_2 は結局のところ表面更新率 r によって決定されることになり、時間の逆数の次元をもつこの量

* 正会員 工博 大阪市立大学助教授 工学部土木学科

** 学生員 大阪市立大学 大学院 工学研究科

*** 正会員 工修 東洋建設(株)

を彼らは流れの乱れの特性量と関連づけて求め、最終的に k_2 の評価式を得ることに成功している。

3. 細井ほかによる海岸構造物に対する予測式

細井ほか (1988) は、海岸構造物の再曝気機能を考察するにあたり、上記の Danckwerts の表面更新理論より出発して、式 (7) と同じ形を平均水深 h の曝気海域に対して得た。また、時間の逆数の次元をもつ r は、単位質量、単位時間あたりの消波にともなう逸散エネルギー ϵ と動粘性係数 ν によって

$$r \sim (\epsilon/\nu)^{1/2} \quad \dots\dots\dots (8)$$

と評価している。このあと、 ϵ は、消波によって逸散するエネルギーの入射波のエネルギー E_i に対する割合 γ 、逸散にかかわる水の容積 V_d 、密度 ρ によって

$$\epsilon \sim \gamma E_i / \rho V_d \quad \dots\dots\dots (9)$$

と表現した。そして深海波のエネルギーが失われることなく構造物に達すると考えて、以上の式 (7)～式 (9) より、 k_2 を表現する式

$$k_2 \sim (D_L H_0)^{1/2} (\gamma T B / \nu V_d)^{1/4} / h \quad \dots\dots\dots (10)$$

を最終的に得ている。ここに、 B は波進行方向に直角な幅、 T は波の周期、 H_0 は深海波波高である。

4. 新しい予測式の構築

O'Connor らや細井らのいずれの研究も表面更新理論に理論展開の基盤をおいている。現在のところこの理論の信頼性は高く、またそれにかかわる理論もみあたらないため、本研究もこの理論より出発し、現象をオーダー的に評価しつつ理論展開をすすめることにする。対象とするのは海岸構造物のなかでも縦スリット構造物のみであるが、その背後の不透過壁の有無は問わない。ただし、縦スリット壁の枚数が1枚のもののみを対象とする。また、構造物から離れた点での自由表面からの曝気は無視できるものとして理論には考慮しない。

(1) 実験と検討対象の模型

a) 堀江ら (1987) の実験

堀江らによる実験結果のうち、背面に不透過壁を有する曲面スリットケーソン堤のデータを対象とする。実験における水深は 60 cm と対象の実験のなかで際だって深い。

b) 細井ら (1988) の実験

細井らによる実験結果のうち、背面に不透過壁のない縦スリット式透過防波堤のデータを検討対象とする。実験水深は 15 cm である。模型柱体部1本の寸法は、20 cm の水槽幅に対して波向き直角方向の幅 15.0 cm～18.8 cm、波向き方向長さ 9.4 cm、18.8 cm の比較的大きな模型を使用している。実験模型のケースは計28種あるが、水理特性の面からは大きな差異はないと考えら

れ、事実、実験結果はほぼ同じ値をもつことから、波浪条件が同じデータにつき特異値をもつ漸拡のものを除いたデータを平均した値を採用した。

c) 著者らの実験

背面に不透過壁をもつ縦スリット直立消波工のこれまでの著者らの実験 (1989) にくわえ、今回条件を変えた実験を行ってデータを追加した。実験の手法は前回とほぼ同様である。なお、今回はそれと並行して混合領域の規模を確認するための実験も行った。この実験は波浪が定常状態になったのを確認してから模型縦スリット部に染料を瞬間的に投入し、その時間的、空間的な拡散、分散状況を計測するものである。実験は、水深を $h=30$ cm に一定にして、開口率が 0.10, 0.24, 0.40 の3種の模型を用いて、周期を $T=0.70 \text{ sec} \sim 1.40 \text{ sec}$ まで、波高を $H=0.6 \text{ cm} \sim 3.0 \text{ cm}$ まで変化させておこなった。

以上の各種模型の構造諸元と波浪条件、反射率 K_R を含む実験結果をまとめて表-1に示す。これらの再曝気係数の結果によれば、細井ほかによる値が一段と大きいのが注目される。

(2) 混合容積と曝気面積

式 (2) 中の混合容積 V と曝気面積 A は、開水路流れの場と波動場とにおいては異なっているはずであり、特に波動場にある構造物による曝気を考える場合には大いに異なるはずである。波面での曝気を無視して構造物近傍のみを考察対象とし、さらに柱体列による大規模な碎波を考えない場合には、柱体列によって直接的に乱されている部分の表面を通じて大気中の酸素は供給されているはずである。それゆえ、曝気面積は水槽幅 $B \times$ 乱れの特性長さで評価できることになるとと思われる。ここに乱れの特性長さは、通常、乱れの渦動の大きさととれるが、柱体列による乱れを考える場合にはこの渦の大きさは柱体の寸法 s 程度と考えられよう (図-1 参照)。したがって、

$$A \sim BS \quad \dots\dots\dots (11)$$

ここで、あるいは以下での“ $\sim$ ”は、オーダー的に評価できることあるいは比例関係にあることを表すものとする。

つぎに混合容積 V については、その評価法が現在の

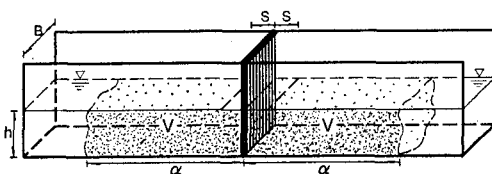


図-1 混合容積と曝気面積の概念図

表—1 検討対象の実験条件と実験結果

	ケース	開口率 (2a/D)	消波室幅 (cm)	S (cm)	水深 h (cm)	周期 T (s)	波高 H (cm)	波形勾配 H/L	反射率 K_R	k_2 (CAL) (sec^{-1}) $\times 10^{-3}$	k_2 (EXP) (sec^{-1}) $\times 10^{-3}$
大 阪 市 大 デ ー タ	C-6	0.10	17.5	1.4	30	1.40	4.3	0.020	0.55	1.2	4.6
						0.96	2.7	0.021	0.36	1.0	2.6
						0.87	2.2	0.020	0.33	0.93	2.1
	C-7	0.24	18.0	2.5	30	1.40	5.1	0.024	0.64	1.7	3.5
						0.96	2.2	0.017	0.32	1.3	1.6
						0.87	2.2	0.020	0.24	1.3	1.4
	C-8	0.10	19.5	1.4	25	1.42	1.4	0.007	0.46	1.0	1.6
						0.96	1.8	0.015	0.44	1.1	3.7
	C-9	0.24	20.0	2.5	25	1.42	1.8	0.009	0.68	1.4	2.9
						0.94	0.9	0.008	0.36	1.1	2.6
港 研 デ ー タ (曲 面 ス リ ッ ト ケ ー ズ ン)	C-10	0.24	20.0	2.5	40	0.85	1.2	0.012	0.28	1.3	2.8
						1.51	1.4	0.005	0.88	0.68	1.2
						0.70	0.7	0.009	0.49	0.56	1.1
						1.03	3.3	0.020	0.38	1.1	1.9
						1.03	4.6	0.028	0.27	1.3	8.7
	港研データ (曲面スリットケースン)	—	—	7.5*1	60	1.03	6.6	0.040	0.23	1.4	9.7
						1.55	3.3	0.011	0.29	1.2	3.2
						1.55	6.6	0.021	0.18	1.6	8.4
	徳島大データ (縦スリット透過堤)	0.06 ~0.25	—	8.6*2	15	0.70	1.78	0.026	0.77*3	4.1	9.6
						0.70	2.45	0.040	0.75*3	4.5	13.4

*1: 前面板の波向き直角方向幅の3倍と見なす。

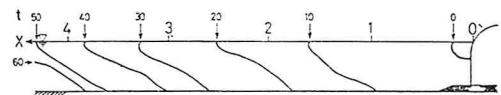
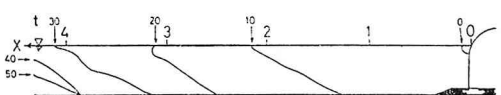
*2: 3種類の模型の平均値の1/2, (9.4+8.8+7.5)/3.

*3: $K_R = \sqrt{1-\alpha}$ として換算。

ところ不明であるため染料を用いた実験で確認した。造波板から約 15m の位置に設置された消波工模型の消波室内に染料（市販の固形ブルーレットを溶かしたもの）を瞬間投入してその拡がりを調べた結果によれば、投入直後、染料は水面を薄層状になって速い速度で沖方向に移流され、その後、水深方向全体に拡散した染料が沖方向に移流されるのが観察された。しかしこの染料の移流は沖合いはほぼ一定の領域内に留まり、投入後約30分間、分子拡散によるゆっくりとした拡散が始まるまでこの状態は不変であった。写真—1 は、約30分後のその状況を示すものである。この領域の大きさは開口率が 24%, 40% の前面板の消波工では波の特性によらずほぼ一定であり、その長さはほぼ 3~4m であった。図—2 は、堀江ほかによる実験（1987）での染料の拡がりぐあいを表わすが、投入直後速い速度で拡散した染料は一定時間後は急速に速度が衰え、染色域はほぼ一定の領域に留まる様子がここにも示されている。そこで、この図の染料の先端下部の動きと時間の関係を表したものが図—3 である。この図からも染料先端下部はほぼ 4m の点で停止するように見え、その大きさは実験スケールが異なる著者らの実験におけるのとはほぼ同じである。以上より、常に空気が補給されている曝気現象では、混合状態にある一定容積の領域が消波工の沖合いに存在すると考える



写真—1 染料拡散状況

a) $T=1.03 \text{ sec}$, $H=6.6 \text{ cm}$ b) $T=1.55 \text{ sec}$, $H=6.6 \text{ cm}$

図—2 堀江らの実験における染料拡散状況

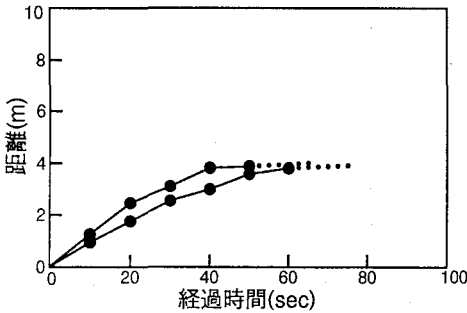


図-3 堀江らの実験の染料拡散域の評価

のが妥当のようである。その大きさは細井ほかの実験においては不明であるが、スケールと模型の異なる2つの実験でそれがほぼ一致したことより、ここではとりあえず実験に関わりなく一定の領域を占めるものと考えことにする。

(3) 表面更新率

細井ほかによって与えられた表面更新率は、単位質量、単位時間あたりの消波にともなう逸散エネルギー ε と動粘性係数 ν によって表現されている (ε は単位質量、単位時間あたり平均流から大きな渦動が運動エネルギーを取り込む率でもあり、また大きなスケールの乱れから小さなスケールの乱れに運動エネルギーがカスケードする率でもある)。乱流理論によれば、この表現の背景にはスリットによる水塊の乱れが小さなスケールの運動によって決定されていて、乱れの構造がいわゆる「エネルギー散逸領域」にあると仮定していることになる。しかるにスリット近傍の乱れは、外力によって直接励起された大規模な渦運動によるいわゆる「エネルギー保有領域」にあると考えられるべきであるので、乱流理論より $r \sim (\varepsilon k_0^2)^{1/3}$ とすべきであろうと考えられる (図-4 参照)。

ここに k_0 は(大きな)渦動の代表的な波数であるので、上式は渦動の代表的な大きさ、すなわち s を用いれば

$$r \sim (\varepsilon/s^2)^{1/3} \quad \dots\dots\dots (12)$$

となる。

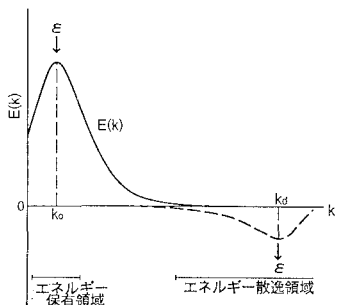


図-4 乱れのエネルギースペクトル (木田, 1988)

(4) 逸散エネルギー率

逸散エネルギー ε (L^2/T^3 の次元をもつ) は、

$$\begin{aligned} \varepsilon &\sim d[C_G E]/dx \\ &\sim C_G \gamma E_i/s \quad \dots\dots\dots (13) \end{aligned}$$

で評価する。ここに C_G は波の群速度であり、エネルギー逸散率 γ は、直立消波工形式に対しては $\gamma = 1 - K_R^2$ となる。 E は単位質量あたりの波のエネルギー、 E_i は同じく入射波のエネルギーで、通常の形の入射波のエネルギーより

$$E_i \sim gH^2/h \quad \dots\dots\dots (14)$$

で評価することができる。

(5) 予測式の構築

式 (13) と式 (14)、群速度を表す次式

$$C_G \sim [1 + 2kh/\sinh 2kh]L/T$$

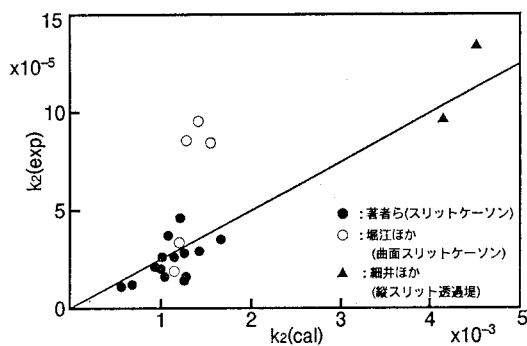
を式 (12) に代入すれば r が求められ、さらにそれを式 (6) および式 (3) に代入することにより k_2 を表す次式が最終的に求められることになる (L は波長、 T は周期)。

$$\begin{aligned} k_2 &\sim \frac{A}{V}(D/r)^{1/2} \\ &\sim \frac{1}{\alpha h} \left[\frac{gD_L^3 s^3 LH^2}{hT} \gamma \left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) \right]^{1/6} \quad \dots\dots (15) \end{aligned}$$

ここに α は混合領域の岸沖方向の長さを表す。細井ほかによる式と比べて異なっている主要な点は、上式では混合領域の長さが入っていることのほか、渦動の大きさに相当する s が入っていることであり、柱体断面のスケールがこの量を通じて予測値に反映されることになり、より合理的な形になっていると思われる。

5. 結果と考察

混合領域の長さは実験によらず一定とし、また渦動の代表的な大きさ s は、正方形断面角柱列のスリット壁に対してはその一辺長をとり、曲面スリットケーソンに対しては角柱列の波向き直角方向の一辺長を、また縦スリット透過堤の実験値に対しては3種の異なる同様の値の平均値の1/2とした。1/2とした理由は模型が水槽幅全体に設置されていて渦の発生が抑制されているとみたためである。ただし、曲面スリットケーソンの柱体部の波向き直角方向幅は、谷本ほか (1984) を参考にして波向き方向長さの3倍と見積った。図-5 は、式中の $\alpha=1$ として算定した予測値と実験値の比較を示したものである。図中の実線は曲面スリットケーソンの3点の特異データを除く全データに対して、原点を通る直線式を最小自乗法を用いてあてはめた直線である。図によれば、細井ほかによる大きな値も含めた実験値と予測値はほぼ比例関係にあり、本予測式の妥当性が示されているといえよう、ただし、曲面スリットケーソンに対する3個のデ



図—5 再曝気係数の計算値と実験値の比較

ータについては説明できていないが、その理由については不明である。

6. 結 言

スリット構造物による曝気現象には、柱体列によって直接的に励起される渦が大きく関わっているとの前提のもとに、表面更新理論より出発する理論を展開して予測式を得た。今後は、ここでは十分には明らかにされていない混合領域の大きさを正確に評価する必要がある。また、本研究での考え方に立てば、緩斜面上の碎波による曝気はスリット近傍におけるのとは異なるメカニズムで生じているはずであり、予測式も異なった形となるもの

と思われる。

鳥取大学・細井由彦教授には貴重な実験データを提供していただいた。ここに記して深甚の謝意を表する。

参 考 文 献

- 角野昇八・小田一紀・藤田 孝・天野健次・貴上佳則 (1989): 縦スリット壁式直立消波工のエアレーション機能, 海岸工学論文集, 第36巻, pp.812-816.
- 木田重雄 (1988): 乱流の不思議なふるまい, 丸善, 90 p.
- 谷本勝利・吉本靖俊 (1984): 斜め入射波に対する曲面スリットケーソンの反射および部材波力特性に関する実験的研究, 港研資料, No. 493, pp. 1-49.
- 細井由彦・村上仁士・三井 宏 (1988): 各種海岸構造物の曝気効果と再曝気係数の予測式, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 812-816.
- 堀江 毅・細川恭史・三好英一 (1980): 護岸の曝気能比較に関する実験, 第27回海岸工学講演会論文集, pp.527-531.
- 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, 港研資料, No. 57, pp. 1-18.
- Danckwerts, P.V. (1951): Significance of liquid film coefficients in gas absorption, Industrial and Engrg. Chemistry, Vol. 43.
- Lewis, W. K. and Whitman, W. C. (1924): Principles of gas absorption, Industrial and Engrg. Chemistry, Vol. 16.
- O'connor, D. J. and Dobbins, W. E. (1958): Mechanism of reaeration in natural streams, Trans. ASCE, Vol. 123, pp. 641-648.
- Streeter, H. 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.