

溶存酸素量に及ぼす波浪の影響について

細 井 正 延*・石 田 昭**・井 本 久 仁 吉***

1. ま え が き

海域・河川域の水質汚濁の研究対象としては種々の問題が存在するが、それらの中で波浪によって水中の溶存酸素量がどのような影響を受けるかを知ることは重要な問題の一つである。

著者らは、これまでに風を伴わない規則的な進行波・重複波と溶存酸素量との関係^{1),2)}、ならびに風波と再曝気係数との関係³⁾について実験的に研究を行ったが、ここでは風を伴わない規則波と再曝気係数との関係をスペクトル構造から検討し、風波については実験個数を増やし再曝気係数と波面近くの摩擦速度との関係について、風波のスペクトル構造を考慮して検討した。

2. 実験方法

本実験に使用した水槽の概略を図-1に示す。長さ 33 m, 幅 0.6 m, 深さ 1.2 m の両面ガラス張りの風洞付き

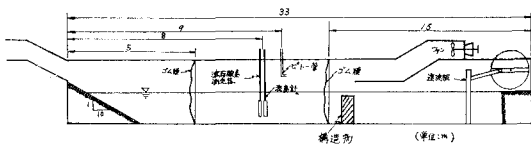


図-1 実験水槽

造波水槽で、風下側に約 1/10 勾配に碎石を敷き反射波を消すようにした。造波装置によって起こす波の場合には、水槽中央部の 2 箇所に厚さ 0.5 mm のゴム膜をゆるく張ることによって、水槽両端での碎波によって生じる水中への多量の酸素移動の影響が測定場所に及ばないようにした。水槽中の溶存酸素量を亜硫酸ナトリウムにより減少させ、造波板によって波を起こし、あるいは所定の風速を起こし、空気中から水中への酸素移動を測定したが、この場合触媒として塩化コバルトを少量用い、脱酸素反応を促進させた。溶存酸素量の測定は、汀線より沖側に 7 m 離れた位置で行い、Model 15A 型溶存酸素計をペン書きオッシログラフに接続して記録させた。また水位変動は抵抗線式波高計を溶存酸素計とほぼ同じ位

置に設置してデータレコーダーにより記録し、水面上の風速分布はピトー管によって測定した。水深はすべて 35 cm で、風を伴わない規則波は周期 1.4 秒, 1.6 秒, 1.8 秒の 3 種類、波高 3.8 cm から 14.4 cm の間で実験を行った。

3. 実験結果

記録された溶存酸素量・時間曲線から 20°C に換算した再曝気係数を求めた。一方水位記録は $\Delta t = 1/30 \text{ sec}$ で 1 500 個サンプリングして自己相関関数を求め、風波については最大ラグ数 120, 自由度約 25 でパワースペクトル密度を求めた。また規則波については一周期分の自己相関関数を調和解析して、パワー線スペクトルを求めた。

(1) 風を伴わない規則波による再曝気

著者らが以前に行った解析^{1),2)}では、進行波については卓越周波数 f_p を持つ単弦波と考え、その波高、波長周期および水深と再曝気係数の関係を表わしたにすぎない。しかしながら実験水槽で造波板によって起こした波は単弦波ではなく、周波数 $f_p, 2f_p, 3f_p \dots$ の成分波からなる合成波であり、このことはスペクトル解析もしくは調和解析によって明らかである。さらに、水中の溶存酸素の増加率に対して、高周波成分が大きな影響を与えられと考えられるから、再曝気係数をスペクトル形状から評価する方が適切であるといえることができる。造波板による進行波の場合には高周波成分に大きなエネルギーを持つ波を発生させることができないので、造波板による進行波に加えて、図-1 に示すように造波板側のゴム膜近くに構造物を水中に入れ波運動を乱した。それによって高周波数成分を多く含む波を発生させ、その波の持つ周波数エネルギースペクトルの形状から再曝気係数を検討した。

(i) 図-2 に再曝気係数と波の持つ全エネルギーとの関係を描いた。図中の△印は構造物を入れない場合の規則波であり、○印は構造物を入れた場合の波で、それぞれの印で黒は周期 $T = 1.4 \text{ sec}$, 半黒は $T = 1.6 \text{ sec}$, 白は $T = 1.8 \text{ sec}$ の場合である。この図から全エネルギーが大きくなれば再曝気係数も大きくなる傾向はあるが、

* 正会員 工博 名古屋工業大学教授 土木工学科

** 正会員 工博 名古屋工業大学助教授 土木工学科

*** 正会員 工修 名古屋工業大学助手 土木工学科

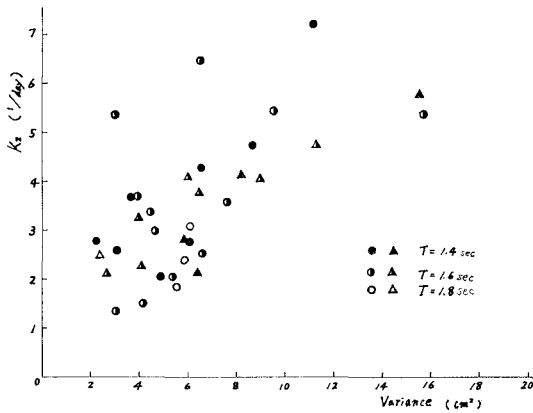


図-2 規則波の全エネルギーと再曝気係数との関係

点のばらつきがかなりあり、全エネルギーで再曝気係数を見積もることは適切ではないようである。

(ii) 図-3 に周波数エネルギー線スペクトルの一例を示した。図-3 の (a) には基本成分波の周期 $T=1.39$ sec を持つ 2 つの波, (b) には $T=1.81$ sec を持つ 2 つ

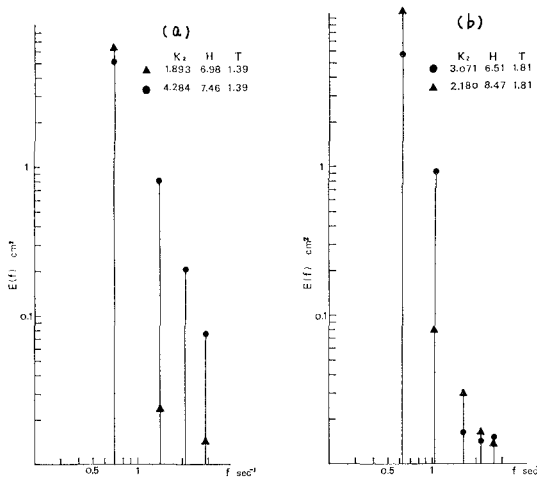


図-3 規則波の周波数パワースペクトル

の波をそれぞれ描いたものである。印▲は構造物を入れない場合、印●は構造物を入れた場合の周波数エネルギー線スペクトルである。(a) の 2 つの波はほぼ同じ波高を持つが (卓越周波数成分のエネルギーはほぼ同じである), 2 倍周波数成分, 3 倍周波数成分のエネルギーにはかなりの大きな差があり, 水中に構造物を入れた場合の再曝気係数の方が構造物を入れない場合の再曝気係数に比べて 2.3 倍の大きな値を持っている。また (b) の場合には構造物を入れない方が, 構造物を入れたものに比べてかなり大きな波高を持つにもかかわらず再曝気係数は逆に小さい。このことから酸素移動に対して, 高周波成分が大きく影響することがわかる。高周波成分が大きいほど, 気相と液相とが接する界面近くでの表面再生速度,

すなわち空気中から水中への酸素移動量が大きくなり, したがって大きな再曝気係数を持つものと考えられる。

以上 (i), (ii) の考察から再曝気係数 K_2 (1/day) に影響を及ぼす要素として波の持つエネルギー E (cm²), 周波数 f (1/sec), 水深 h (cm) をとり, 次式を仮定した。

$$K_2 \propto \frac{1}{h^2} \sum E(f) \cdot f \quad (1)$$

ただし, ここでは再曝気係数は水深のほぼ 2 乗に反比例するという実験結果^{2), 3)}を用いている。式 (1) から再曝気係数はスペクトル分布の $E(f)$ 軸に関する一次モーメントに比例することになる。図-4 は, 図-2 の実験資料

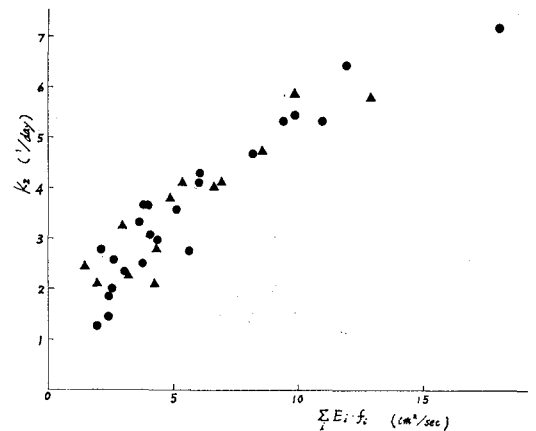


図-4 規則波のスペクトル形状と再曝気係数の関係

を用いて横軸に線スペクトルの一次モーメント $\sum E_i \cdot f_i$ をとり (水深は全ての実験において 35 cm で一定である) 縦軸に再曝気係数をとって描いたものである。図-4 は 図-2 に比べて点のばらつきが小さく, この方法によって再曝気係数をかなり正確に見積もることができると思われる。

(2) 風波による再曝気

風洞水槽内に種々の風量を送り, 風波の曝気効果について実験的に調べた。この場合, 再曝気係数, 平均波高, 平均周期および水面上の風速分布, 水位変動を測定した。実験の種類と測定結果は表-1 のとおりである。表中の u_{25} は静水面上 25 cm の位置での風速である。

風波の持つ再曝気係数が (1) で述べた風を伴わない規則波の再曝気係数に比べて, かなり大きな値を示すという実験結果に対して, 著者らは風波の場合の曝気機構について次のように考えた。すなわち, 風波の場合には風によって水面に乱れが発生し, 界面近くでの更新率が大きくなるだけでなく, 水粒子の飛び出しによる酸素の水中への取り込みなどによって大きな再曝気係数を持つものと考えられる。また, この乱れは界面でのせん断力に関係するので, 水面上の風速分布からせん断力を求めた。すなわち, 波立った水面上の風速分布を固定壁面近

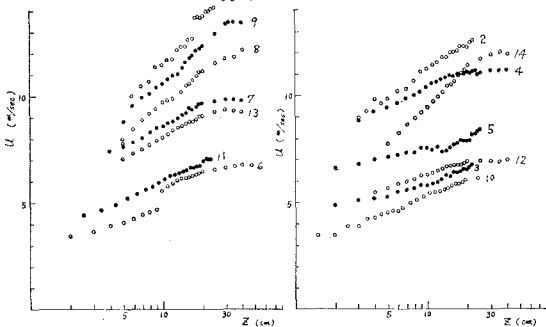
表—1 実験の種類と測定結果 (風波)

No.	k_2 (1/day)	$\bar{H}$ (cm)	$\bar{T}$ (sec)	u_{25} (m/s)	u_*^2 (cm ² /sec ²)	Variance (cm ²)	$\Sigma E \cdot df \cdot f$
1	23.01	4.59	0.56	14.18	10 572	—	—
2	21.36	2.69	0.48	12.33	3 888	—	—
3	6.36	1.49	0.39	7.70	518	—	—
4	16.73	2.68	0.56	10.05	2 365	—	—
5	20.92	3.17	0.55	12.70	4 973	—	—
6	8.72	1.08	0.44	6.55	836	0.280	3.04
7	16.50	2.23	0.57	9.80	2 159	0.843	7.33
8	22.94	3.08	0.57	11.58	8 743	2.375	18.60
9	28.47	4.50	0.62	12.95	8 271	3.315	23.80
10	7.88	1.19	0.40	6.12	771	0.347	3.11
11	12.43	1.78	0.50	7.01	1 892	0.510	4.92
12	10.59	1.22	0.46	6.96	1 244	—	—
13	18.67	2.25	0.57	9.30	3 519	1.294	10.10
14	24.47	2.49	0.67	11.76	8 757	2.637	19.40

くの対数分布と同じように次式のように仮定した⁴⁾。

$$u = \frac{u_*}{\kappa} \log_e \frac{z}{z_0} \dots\dots\dots (2)$$

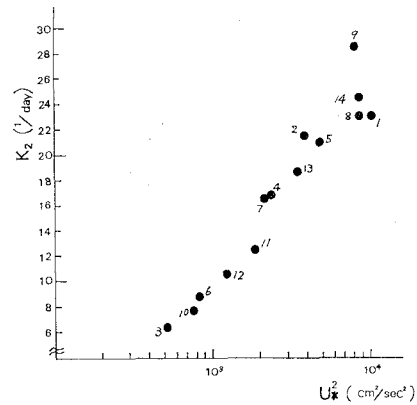
ここに u は風速, $u = \sqrt{\tau_0/\rho}$ で τ_0 は水面に働く風のせん断力である。図—5 は水面上の風速分布を示し、横軸に静水面からの高さ z (cm), 縦軸に風速 u (m/sec) をとり描いたものである。この図をみると z の値が大きくなる点是对数分布からはずれるが、平均水面上とほぼ 10 cm までは式 (2) が成り立つことがわかる。



図—5 水面上の風速分布

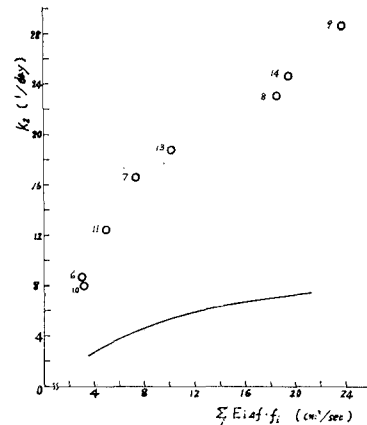
風速分布の傾きから, $\kappa=0.4$ として u_* を求め, u_*^2 と再曝気係数との関係を描くと 図—6 のようになり, 再曝気係数と u_*^2 はかなり密接な関係を持っていることがわかる。

なお, 風波の場合には, ゴム膜を張ることができなかったので砕石斜面上での砕波による溶存酸素への影響があると思われるが波高が小さいのでほとんど無視できると考えられる。



図—6 風波の摩擦速度と再曝気係数の関係

また, (1) で述べたように風を伴わない規則波と再曝気係数との関係を解析した方法を風波の場合にも適用してみる。図—7 に風波についての再曝気係数とスペクトルの一次モーメントとの関係を示す。図中の実線は図—



図—7 風波のスペクトル形状と再曝気係数の関係

4 に示した風を伴わない規則波の場合の一次モーメントと再曝気係数との関係を平均的に描いたものである。図—7 から同じ一次モーメントを持つ風波と風を伴わない規則波では, 風波の方がかなり大きな再曝気係数を持つことがわかるが, この差については, 風波の場合には水粒子の飛び出しによる酸素の水中への取り込みによって大きな再曝気係数を持つものと考えられる。

4. 結 論

(i) 風を伴わない規則波の場合, エネルギースペクトル分布の $E(f)$ 軸に関する一次モーメントで, ある程度再曝気係数を見積ることができ, 高周波成分が再曝気係数に大きく影響することがわかる。

(ii) 風波の再曝気係数は, 風を伴わない規則波の再曝気係数に比較してかなり大きな値を持ち, 波面における風の摩擦速度 u_* と密接な関係を持っている。そして

風波においては、界面直下での再生更新率よりも、水粒子の飛び出しによる空気中からの酸素の取り込みの影響の方が大きいようにも思われる。

最後に実験にあたって本学卒業生木村秀男、村田健俊両君に御助力いただき、ここに厚く感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 細井正延・井本久仁吉： 溶存酸素量に及ぼす波浪の影響について、第28回年講概要集，pp. 436～437, 1973.
 - 2) 細井正延・井本久仁吉・桑原英世： 溶存酸素量に及ぼす波浪の影響について (Ⅱ)，第29回年講概要集，pp. 611～612, 1974.
 - 3) 細井正延・井本久仁吉： 溶存酸素量に及ぼす波浪の影響について (Ⅲ)，第30回年講概要集，pp. 582～583, 1975.
 - 4) 光易 恒： 水面に作用する風のせん断力と水面粗度について，第11回海講講演集，pp. 42～48, 1964.
-