

非砕波面における酸素取り込み速度の現地スケールでの値の推定

角 野 昇 八*・重 松 孝 昌**

1. 緒 言

波面での酸素取り込み機構の解明とその機能の評価は、取り込まれた酸素が海域中の生態系の育成や水質環境保全に有用であるとの観点から重要であることのみならず、波面での気体取り込みの機構は気体の種類によらず同様であることから、現在未解明の点が多い地球温暖化に関わる二酸化炭素ガスの海水への取り込み機構の解明の観点からも重要である。さらに、同様の理由から、大気と海洋の間の有害物質などの物質循環過程評価のモデルの精度を高める意味でもその寄与するところは大きい。現在のところ、実海面での酸素取り込み機能は、たとえば堀江 (1987) によって再曝気係数 (k_2) の値として $k_2=0.5$ (1/day) が提案されているにすぎず、波浪特性と関連させた正確な値は明らかになっていないのが現状である。本研究では、著者らによってすでに得られているデータにくわえ、新たに行ったスケールの比較的大きな波浪によるデータ、さらに過去に細井・井本 (1973) によって得られているデータの全体についてその波浪特性との関連について再検討を加えるとともに、その結果より、現地における酸素取り込み機能の評価法を提案し、あわせて、推算された値を堀江の値と比較してその妥当性を検討することを目的とする。

2. 細井・井本の実験と著者らの実験

(1) 細井・井本の実験

造波水槽内非砕波波面での酸素取り込み機能解明のための実験は、細井・井本 (1973) によってすでに先駆的になされている。彼らは、長さ 33 m、幅 0.6 m の造波水槽を用い、その中で造波した種々の特性の波面による酸素取り込み機能を実験的に求めた。水域内の脱酸素の方法は、亜硫酸ナトリウムと塩化コバルト (触媒) によっている。実験波の波高は 4.2~12.6 cm、周期は 1.17, 1.36, 1.63 sec とし、水深を 29, 36, 43 cm に変化させて全 82 ケースの実験をおこなった。注目すべきは、造波板や消波装置で取り込まれた酸素の影響が実験値に影響

を及ぼすことをすでに彼らは予想し、それを除外するために、水槽内に厚さ 0.5 mm のゴム膜を緩く張って長さ 17 m の一定水深領域を隔離し、その水域内での溶存酸素の回復状況を調べる方法をとったことである。なお、水槽端部に消波装置として 1:5.8 の斜面を用いているが、設置された波高計は 1 本であることから、得られた波高にどの程度の反射波の影響が含まれているかは不明である。

(2) 著者らの実験

細井・井本と同様の手法により、著者らも造波水槽内の進行波および部分重複波波面での酸素取り込み機能解明のための実験をおこなった (角野ほか, 1994)。長さ 20 m、幅 0.5 m の造波水槽中の長さ 3 m の一定水深領域を、細井・井本と同様の目的で、厚み 0.04 mm のビニル膜で隔離した。実験波の周期は、0.88, 1.25, 1.35, 1.50, 1.75 sec とし、波高は 1.1~6.0 cm とした。水深は 30 cm で一定とし、全 13 ケースの実験をおこなっている。領域内に 2 本の波高計を設置し、入反射分離法で入射波と反射波を分離したことと、領域外に部分反射を生じさせる構造物を設置して、部分重複波の状態でも実験をおこなっている点が細井・井本の実験と異なっている。

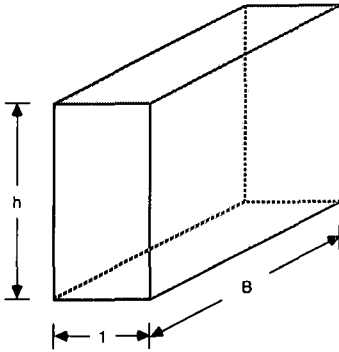
この実験に引き続き、さらにスケールの大きな特性の波浪を用いた同様の実験を今回おこなった。今回は長さ 50 m、幅 1 m の造波水槽中の水槽床を一部嵩上げた部分で、水深を 40 cm とした長さ 2 m の領域内で溶存酸素の回復状況を測定した。波の周期は 1.7, 1.9, 2.1 sec とし、波高を 10.9~16.9 cm まで変化させた全 7 ケースである。表-1 に今回の実験結果を示す。両実験における脱酸素の方法は細井・井本と同様である。

表-1 実験結果 (著者ら)

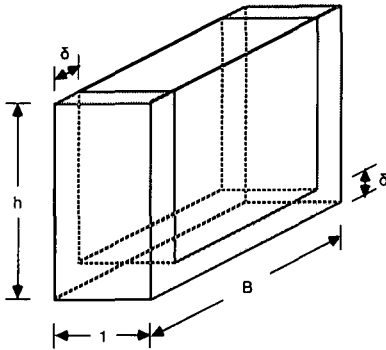
RUN	h (cm)	T (s)	H (cm)	K_L (cm/s)
1	45	1.7	13.1	0.00347
2	45	1.7	16.9	0.00356
3	45	1.9	13.1	0.00319
4	45	1.9	16.0	0.00280
5	45	2.1	10.9	0.00185
6	45	2.1	15.5	0.00337
7	45	2.1	16.4	0.00365

* 正会員 工博 大阪市立大学助教授 工学部土木工学科

** 正会員 工修 大阪市立大学助手 工学部土木工学科



(a) 内部粘性によるエネルギー逸散



(b) 底面摩擦および側壁摩擦によるエネルギー逸散

図一 造波水槽内のエネルギー逸散

3. 非砕波波面での酸素取り込みのメカニズムに関する考察

自由表面での気体の輸送は、表面付近の非常に薄い濃度境界層によって律則されている。分子拡散によって気体濃度が飽和になったこの濃度境界層には、その下部の乱流運動に伴う渦動が突入し、濃度が高くなった層を濃度が低い水塊で「更新」と考えられている。このような仮説は「表面更新理論」とよばれ、現在、多くの研究者によって支持されるものとなっている。Danckwerts (1951)は、この考えに基づき、水面での酸素取り込み速度 (物質移動係数 K_L) を

$$K_L = \sqrt{D_m r} \quad \dots \quad (1)$$

によって表現されるとした。ここに、 D_m は拡散係数であり、 r は表面更新率とよばれる表面更新の平均頻度 (1/s) を表す係数である。問題は、結局、この r をいかに正確に評価できるかということになり、それに対するモデルもいくつか提案されている。主要なモデルの一つは、乱流運動の最大スケールによって r が決定されるとするいわゆる「大渦モデル」であり、いま一つは、最小渦が決定しているとする「小渦モデル」とよばれるものであ

る。後者のモデルでは、乱流構造の理論より、乱流運動における単位質量当たりのエネルギー減衰率 (ϵ) によって r は決定されると考える。Moog・Jirka (1995) は、この小渦モデルを開水路流れの表面による酸素取り込み (再曝気) 現象の解析に適用して成功を収めた。

本研究で対象とする非砕波波面でも、開水路流れの場合と同様に、乱流運動のエネルギー減衰率が酸素取り込み現象に大きくかかわっているものと考えた。波動運動の場合、考えられるエネルギー減衰は、造波水槽中では内部粘性および水槽底面摩擦によるものと水槽側壁摩擦によるものが考えられる。

考察にあたっては、波面はなめらかであって砕波は生じていないものとし、また風による酸素の取り込みの影響も無視して、純粹に波動のみによる酸素取り込みを考える。

4. 非砕波波浪におけるエネルギー逸散率

岩垣 (1967) は、波動運動中での内部粘性による単位面積当たり単位時間に消散する平均のエネルギーを

$$\overline{E}_i = \frac{\mu}{2} \beta \left(\frac{\pi H}{T} \right)^2 \operatorname{cosech}^2 kh \cdot \frac{2k}{\beta} \sinh 2kh \quad \dots (2)$$

のように求めた。ここに、 μ は粘性係数、 $\beta = \sqrt{\sigma/2\nu}$ 、 σ は角振動数、 ν は動粘性係数、 H は波高、 T は周期、 k は波数、 h は水深である。

また、底面摩擦による消散エネルギー率を

$$\overline{E}_b = \frac{\mu}{2} \beta \left(\frac{\pi H}{T} \right)^2 \operatorname{cosech}^2 kh \quad \dots \quad (3)$$

のように与えた。

さらに、造波水槽両側の側壁摩擦による消散エネルギー率を

$$2\overline{E}_{fw} = \frac{\mu}{2} \beta \left(\frac{\pi H}{T} \right)^2 \operatorname{cosech}^2 kh \cdot \frac{\sinh 2kh}{kh} \quad \dots (4)$$

のように与えた。岩垣はこれらの式に基づき、水槽内の波高減衰を

$$d(C_c EB)/dx = (\overline{E}_i B + \overline{E}_b B + 2\overline{E}_{fw} h) \quad \dots (5)$$

によって評価している。ここに C_c は波の群速度であり、 B は水槽幅である。すなわち、波向き方向の単位長さを考えた場合、幅が B で高さが h の水域内部の内部粘性によるエネルギー逸散と、幅が B で高さが境界層厚 ($\delta = 2\pi/\beta$) の水域に対して算定される底面摩擦によるエネルギー逸散、さらに幅が δ で高さが h の水柱 (2本) に対して算定される側壁摩擦によるエネルギー逸散の総和が $B \times h$ の水域内の波高減衰に係わっているとしている (図一参照)。

5. 実験値の再整理

再曝気に関する実験より溶存酸素濃度の時間回復曲線

表-2 実験結果 (細井・井本)

RUN	h (cm)	T (s)	H (cm)	K_L (cm/s)	RUN	h (cm)	T (s)	H (cm)	K_L (cm/s)
1	43	1.17	4.2	0.000398	40	36	1.36	6.8	0.000671
2	43	1.17	4.8	0.000398	41	36	1.36	7.0	0.000817
3	43	1.17	5.1	0.000373	42	36	1.36	7.1	0.000567
4	43	1.17	5.7	0.000547	43	36	1.36	7.9	0.000983
5	43	1.17	6.3	0.000647	44	36	1.36	8.2	0.000954
6	43	1.17	6.8	0.000727	45	36	1.36	9.6	0.001230
7	43	1.17	6.9	0.000677	46	36	1.36	10.1	0.001300
8	43	1.17	8.2	0.000781	47	36	1.36	10.8	0.001490
9	43	1.17	7.9	0.001020	48	36	1.36	10.8	0.001430
10	43	1.17	9.3	0.001260	49	36	1.36	11.1	0.001430
11	43	1.17	10.2	0.001420	50	36	1.36	11.8	0.001370
12	43	1.36	4.8	0.000408	51	36	1.63	4.8	0.000388
13	43	1.36	5.0	0.000319	52	36	1.63	5.6	0.000388
14	43	1.36	5.7	0.000408	53	36	1.63	6.4	0.000504
15	43	1.36	6.6	0.000533	54	36	1.63	6.8	0.000492
16	43	1.36	7.2	0.000692	55	36	1.63	7.2	0.000579
17	43	1.36	8.2	0.000836	56	36	1.63	7.9	0.000700
18	43	1.36	8.6	0.000727	57	36	1.63	7.7	0.000921
19	43	1.36	8.8	0.000677	58	36	1.63	9.3	0.001410
20	43	1.36	9.9	0.000941	59	29	1.17	3.9	0.000275
21	43	1.36	10.2	0.001390	60	29	1.17	4.9	0.000480
22	43	1.36	10.7	0.001260	61	29	1.17	6.0	0.000624
23	36	1.17	5.1	0.000371	62	29	1.17	7.5	0.000708
24	36	1.17	6.5	0.000608	63	29	1.17	7.5	0.000876
25	36	1.17	7.3	0.000804	64	29	1.17	8.0	0.000685
26	36	1.17	8.0	0.000683	65	29	1.17	8.2	0.000732
27	36	1.17	8.3	0.000729	66	29	1.17	8.7	0.000769
28	36	1.17	9.8	0.000983	67	29	1.17	9.5	0.001100
29	36	1.17	10.1	0.001220	68	29	1.17	9.5	0.001450
30	36	1.17	10.6	0.001460	69	29	1.17	10.0	0.001100
31	36	1.17	11.0	0.001740	70	29	1.36	4.4	0.000433
32	36	1.17	11.5	0.001160	71	29	1.36	4.9	0.000396
33	36	1.17	12.3	0.001580	72	29	1.36	5.6	0.000564
34	36	1.17	12.4	0.001670	73	29	1.36	6.2	0.000587
35	36	1.36	4.9	0.000713	74	29	1.36	7.5	0.000779
36	36	1.36	5.0	0.000329	75	29	1.36	7.9	0.000839
37	36	1.36	6.0	0.000475	76	29	1.36	8.2	0.000900
38	36	1.36	6.2	0.000521	77	29	1.36	9.0	0.001080
39	36	1.36	6.8	0.000504					

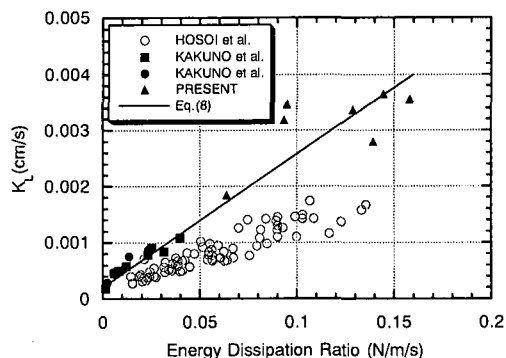


図-2 エネルギー逸散率と物質移動係数の関係

るいは波の周期や波高などの波の特性にかかわらず、式(7)で算定される単位面積当たりのエネルギー逸散率との間に強い線形的な相関関係をもっているのが認められる。それゆえ、本考察の基本的な妥当性が示されているものと思われる。ただし、細井らによるデータの線形関係の勾配は著者らのデータよりもかなり低い。その理由は、前述のように、彼らの実験においては、波高測定の際に入射波と反射波が分離できていないためか、あるいはビニールよりも柔軟性に劣ると考えられるゴム膜を用いたためではないかと考えられる。

図-2において、以上の理由から彼らの実験値を除外して回帰直線を引けば、それは

$$K_L(\text{cm/s}) = 0.0238 \times \overline{E}_T(\text{N/m/s}) + 0.0002 \quad \dots\dots\dots (8)$$

のように与えられる。ここに、 $\overline{E}_T = 0$ ($H = 0$) のときの値 ($K_L = 0.0002 \text{ cm/s}$) は、Kakuno ら (1995) による静水時相当の値とした。

6. 現地での値の推定

ここで現地の非砕波波浪を考えた場合、エネルギー逸散率の源泉としては、以上のうちの海底摩擦および内部粘性によるもののみが存在する。その一方で、エネルギー逸散率に応じた酸素取り込みの機構とその程度は造波水槽内と同様のはずであり、現地スケールでも図-2の関係をそのまま適用できるはずである。そこで、種々の水深、周期、波高の現地スケールでの値を与えて現地でのエネルギー逸散率を求め、式(8)の関係を用いて物質移動係数と波の特性との関係をグラフ化した。ただし、内部粘性によるエネルギー逸散は、一般に、海底摩擦によるものに比べてオーダー的に無視できる量であるので、現地では海底摩擦のみが酸素取り込みを決定づけているといえる。なお、粘性係数および動粘性係数の値は真水に対する値を用いた。

図-3(a)～図-3(d)に、水深別に、また周期をパラメ

が得られれば、その勾配より再曝気係数(k_2)を決定することができ、またそれより、関係式

$$K_L = (V/A)k_2 \quad \dots\dots\dots (6)$$

を介して物質移動係数を求めることができる。ここに V は曝気容積であり、本研究ではビニール膜で隔離された水域の容積となる。また、 A は曝気面積であり、水域の面積である。細井・井本 (1973) の研究では、再曝気係数のみが波の特性量の関数として図示されていたので、その図中の値および彼らの実験における V および A の値より K_L を新たに求めた。その値を表-2に示す。

ところで、上記のように、 $1 \times B \times h$ の水域内の波高減衰に係わっているエネルギー減衰率は式(5)で表される量である。水槽幅の単位幅当たりでは、

$$\overline{E}_T = \overline{E}_H + \overline{E}_B + 2\overline{E}_{fw}(h/B) \quad \dots\dots\dots (7)$$

となる。波高減衰も酸素取り込みも基本的に同じメカニズムによって生じているものと考え、先に求められた K_L の全データを式(7)で示される各種のエネルギー逸散率の和の関数として整理した。その結果を図-2に示す。図中、著者らのデータで■は進行波によるもの、●は部分重複波によるものを表している。また、▲は今回のデータを示す。図-2に示すように、細井・井本のデータおよび著者らのデータの両者とも、進行波か部分重複波、あ

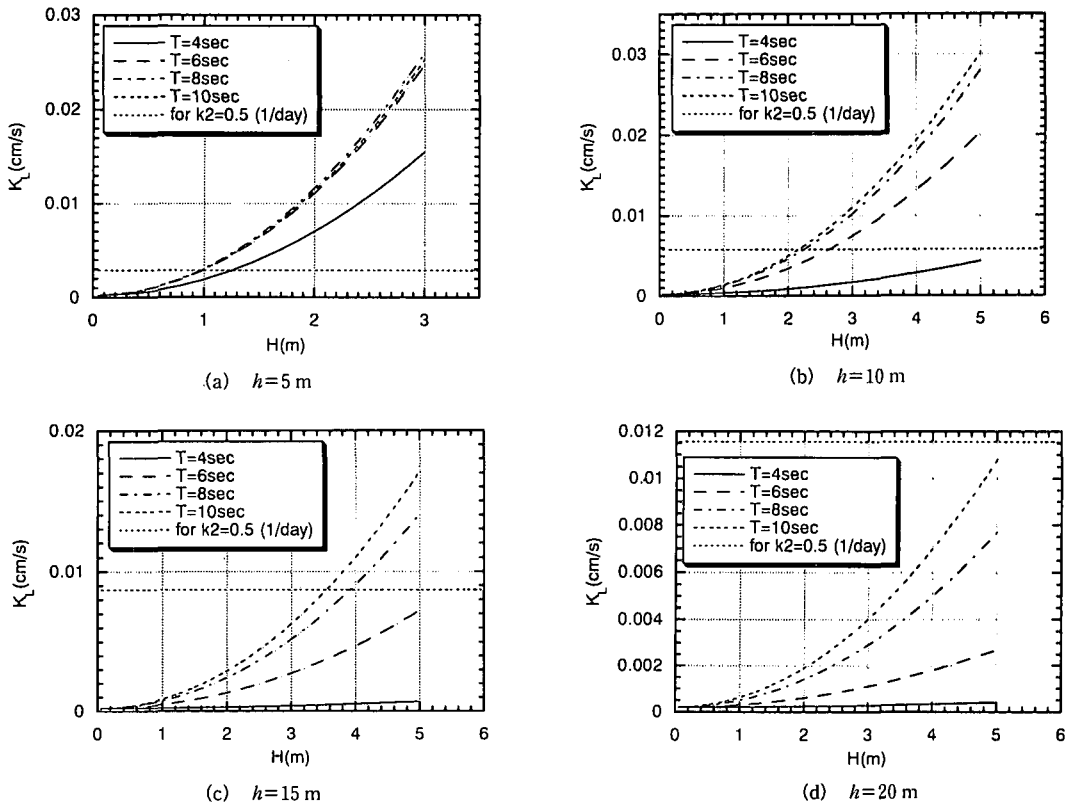


図-3 現地スケールでの物質移動係数と波の特性の関係

ターにとって算定される現地における物質移動係数の値を波高の関数として示した。これらの図に示されるように、ここで算定された物質移動係数の値は、当然のことながら、波高の増大とともに増大し、また、周期の増大とともに増大する。さらに、水深が増すと減少する傾向をもつ。なお、これらの図に示される値の推算には、図-2に示される実験値の範囲の最大約8倍までの値を用いて外挿をおこなっている。

ところで、堀江 (1987) は、海域の物質循環過程をモデル化する際に、物質移動係数と式 (6) で関係づけられる再曝気係数 (k_2) 値を、 $k_2=0.5$ (1/day) といくつかの試算の結果より与え、それをやや大きめの値とコメントしている。ただし、試算内容は明らかにされていない。そこで、式 (6) において $V/A=h$ (水深) として、上記の再曝気係数値に相当する物質移動係数の値を図中に直線で示した。図示のように、その値は、水深 $h=5$ m では、 $T=4\sim 10$ 秒、 $H=1\sim 1.5$ m の波に対して、また $h=10$ m では、 $T=6\sim 10$ 秒、 $H=2\sim 3$ m、 $h=15$ m で、 $T=8\sim 10$ 秒、 $H=3.5\sim 4$ m、さらに $h=20$ m では、 $T=10$ 秒、 $H=5$ m 以上の波の条件の下で満足される。このように、堀江によって与えられた再曝気係数に相当する値は、幾分大きくと思われる特性を持つ波の条件の下で得られること

になる。このようになる理由として、本研究においては波の砕けや風の影響を考慮していないことをまずあげることができる。また、実際の海域では、曝気容積が海底までの全水深領域となっていないために、同じ物質移動係数値であっても式 (6) で関連づけられる再曝気係数が大きく現れることも別の理由として考えられる。いずれにしても、風および砕波の効果を考慮に入れた解析などをすすめて、さらに詳細な検討をくわえる必要がある。

7. 結 言

以上のことをまとめれば以下になる。

1) 造波水槽内実験で求められた物質移動係数は、著者らや細井・井本によるデータともエネルギー逸散率の和と強い線形関係を有する。ただし、著者らのデータに基づく勾配は細井・井本によるものよりも大きい。

2) 著者らの実験データをエネルギー逸散率の和の関数として表した結果に基づき、現地での物質移動係数値を水深、周期、波高の関数として表した。

3) その結果によれば、物質移動係数値は波の周期、波高の増大とともに増すが、水深の増加とともに減少する特性をもつ。

4) この結果によれば、たとえば、水深 10 m の場合、周期が 6 秒～10 秒で、波高が 2 m～3 m 程度となると、堀江の提案した $k_2=0.5$ (1/day) 相当の物質移動係数値となる。

本研究にかかわる研究費の一部は文部省科研費補助金(基盤研究(C)(2))によった。また、実験には当時大阪市立大学大学院生の杉田智行君に多大の協力を得た。ここに記して感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 岩垣雄一(1967): 波の変形論, 1967 年度水工学に関する夏期研修会講義集(B, 海岸・港湾コース), pp. 09-1-09-24.
- 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.
- 細井正延・井本久仁吉(1973): 溶存酸素量に及ぼす波浪の影響について, 第 27 回土木学会年次学術講演会講演概要, pp. 436-467.
- 堀江 毅(1987): 海域の物質循環過程のモデル化と浄化対策効果の予測手法について, 運輸省港湾技術研究所報告, 第 26 巻, 第 4 号, pp. 57-123.
- Danckwerts, P. V. (1951): Significance of liquid-film coefficients in gas absorption, *Indust. & Eng. Chem.*, 43, pp. 1460-1467.
- Kakuno, S., Saitoh, M., Nakata, Y., and Oda K. (1995): The air-water oxygen transfer coefficients with waves determined by using a modified method, *Air-Water Gas Transfer*, Jahne, B. and Monahan, E. C. Edts., AEON Verlag, pp. 577-587.
- Moog, D. B and Jirka, G. H. (1995): Macroroughness effects on stream reaeration, *Air-Water Gas Transfer*, Jahne, B. and Monahan, E. C. Edts., AEON Verlag, pp. 89-100.