

砕波帯における溶存酸素濃度の挙動に関する実験的研究

細井 由彦*・村上 仁士**

1. 緒 言

水中へ排出された有機性汚濁物質は好気性微生物の作用により酸分解されて安定化するが、そのとき酸素が利用されるため、水中の溶存酸素濃度は低下する。溶存酸素濃度の低下が進むと、魚類等の生息が困難になるばかりではなく、ついには嫌気状態となり水質の悪化を招く。とくに沿岸部は水遊びや観光等のレクリエーションの場として、あるいは臨海工業や水産業等活動の場として人間とのつながりが深く、その水環境の保全には、十分な注意がはらわれる必要がある。

本研究は、沿岸部における酸素の溶解について、とりわけ曝気効率が高いと思われる砕波帯付近の溶存酸素の挙動をとりあげて、実験を中心に考察を加えたものである。

気液界面におけるガスの移動には乱れ等の液相の運動が密接に関わっているので、本研究の進行には砕波帯における水の運動に関する研究成果を利用することが必要となる。逆に曝気特性は、その場における水の運動特性を示しているものと考えられることもできる。したがって本課題は上記海洋環境保全の立場からみて重要であることは言うまでもないが、さらに、現象の複雑さゆえにいままで十分に明らかにされていない砕波の内部機構に関しても、何らかの知見を提供しうる側面を有しているものと考えている。

2. 実験方法

(1) 実験装置

実験には図-1に示すような、幅 0.5 m、長さ 14.0 m、深さ 0.75 m の片面ガラス張りの水槽を用いた。水

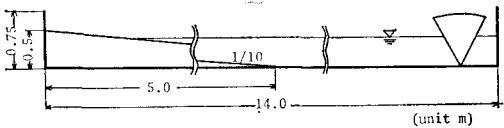


図-1 実験水槽

槽の一端にはフラップ型造波機が設けられ、他端には 1/10 の一様勾配が設けられている。

(2) 実験方法

亜硫酸ナトリウムと塩化コバルトを用いて水槽内の水の溶存酸素濃度を低下させた後、造波機を作動させて実験を行った。全実験とも水深は 40.0 cm で行った。

波の計測には二台の容量式波高計を使用し、一台は一様水深部に固定して沖波を計測し、他の一台は移動式として斜面部の波高測定に用いた。

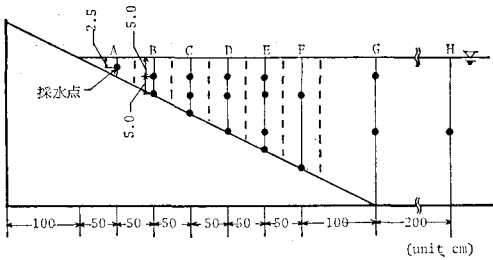


図-2 採水点

溶存酸素濃度は図-2に示すような 18 点において、内径 3 mm の採水管を設置し、サイホンにより採水後、溶存酸素計（ベックマン 0260 形）を用いて測定した。採水時間間隔は 15 分とし、一つの実験は 30～45 分間行った。それぞれの実験条件は表-1に示す。

表-1 実験条件

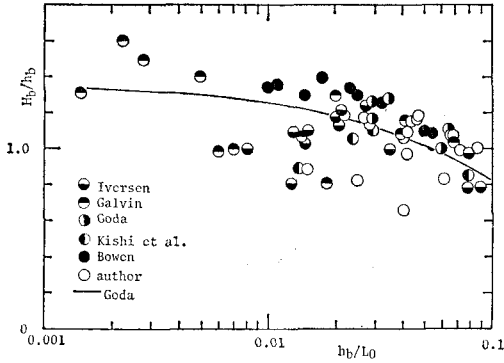
	周期 T (sec)	換算沖波波高 H_0' (cm)	H_0'/L_0	砕波形式
I-1	0.81	2.9	0.028	P
2	0.81	3.9	0.038	P
3	0.81	4.2	0.040	P
4	0.81	4.8	0.047	P
5	0.81	5.2	0.050	P
6	0.81	5.9	0.057	P
7	0.81	7.1	0.069	SP
8	0.81	7.7	0.075	S
9	0.81	8.5	0.083	S
II-1	1.01	2.0	0.014	P
2	1.01	3.6	0.023	P
3	1.01	4.9	0.031	P
4	1.01	9.6	0.060	SP
5	1.01	11.1	0.069	SP
III-1	1.17	1.8	0.0084	P
2	1.17	9.2	0.043	P
3	1.17	12.4	0.058	P
4	1.17	14.4	0.067	SP

* 正会員 工博 徳島大学工業短期大学部講師 土木工学科
** 正会員 工博 徳島大学工業短期大学部助教授 土木工学科

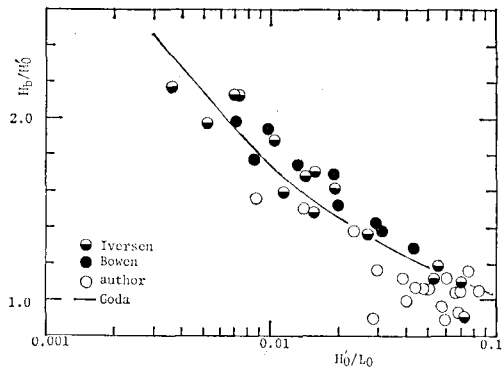
3. 実験結果および考察

(1) 碎波指標間の関係

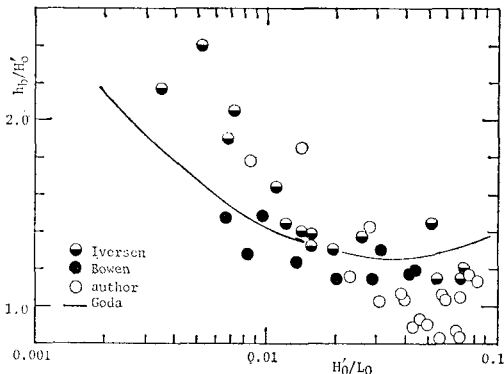
実験より得られた碎波指標を従来の結果^{1)~5)}とともに図—3~5に示す。図—5の碎波水深と深水波高との関係においてやや従来のものより散らばりがみられるが、全般的にはほぼ従来のものと似た傾向を示している。



図—3 限界波高比



図—4 碎波高と深水波高との関係



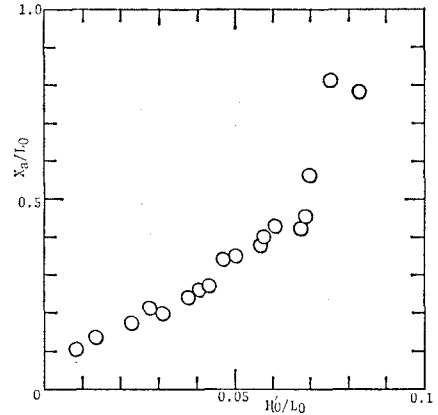
図—5 碎波水深と深水波高との関係

(2) 溶存酸素濃度の挙動

1) 気泡連行距離

水中に気泡が存在すると気液の接触面積が増加するた

め、曝気も促進されると考えられる。そこで、碎波後の気泡をともなった領域の長さを気泡連行距離 X_a として、無次元気泡連行距離 X_a/L_0 と沖波波形勾配との関係を調べたものが図—6である。(ただし H_0' は換算沖波波高である。) 榎木ら⁹⁾の報告している水平床の実験結果と比較すると、1/2 程度の値になっているが、 H_0'/L_0 の増加にともない X_a/L_0 の増加をみており、ほぼ同一の傾向であると言える。



図—6 気泡連行距離

2) 溶存酸素濃度の分布

各採水断面における溶存酸素濃度の鉛直方向の分布とその時間的な変化の一例を示すと図—7となる。実験 I-1 では、B断面より沖側においては水面付近で濃度が高く、底になるほど低くなるという分布形状が見られ、それが時間の経過とともに発達していく傾向が見られる。D断面より沖側では底の濃度はほとんど変化していない。実験 I-3 においても鉛直方向の濃度勾配が見られるが、断面Fぐらいまで底の濃度の変化が見られる。実験 I-6 ではF断面においても底の濃度は水面と同様に増加し、濃度の鉛直分布はあまり見られない。実験 I-8 は他の3ケースとは異なり spilling 型碎波であるが、やはりF断面においても濃度の鉛直分布は見られず、各断面とも鉛直方向によく混合されている。

実験 I-1, 3, 6 では碎波点がA断面付近かそれより岸側にあり、実験 I-8 では碎波点はB断面からやや岸側にある。濃度の岸沖方向の分布をみると、各ケースともA断面において最大であり沖に向かうにつれて低くなっている。したがって曝気はおもに碎波帯内でおこっていると考えられる。さらに鉛直濃度分布形状の岸沖方向の変化(たとえば I-1 のB断面より順次F断面への変化)の様子をみると、碎波により酸素を吸収した水は、まず上層部付近を沖へ向かって移動し、その後各断面内において鉛直方向に混合を受けるものと考えられる。このことは堀川ら⁷⁾による、碎波点より沖側において上層

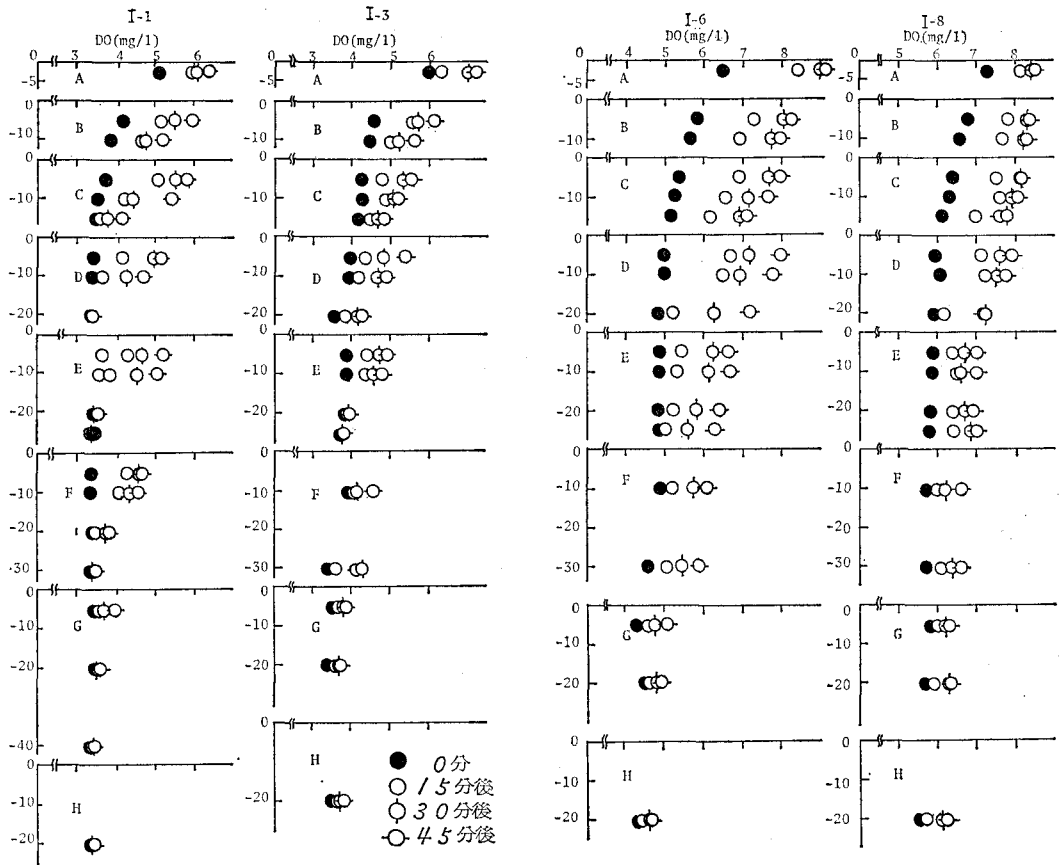


図-7 溶存酸素濃度の分布

は沖向き、下層部では岸向きの定常的な循環流が存在するという報告とも一致する。一方、各断面内における鉛直混合の強さは砕波波形勾配が大きくなるほど増加し、かつその範囲も広がるものと考えられる。

以上述べた砕波点より沖側における溶存酸素濃度の挙動については、砕波形式による差異はみられなかった。

3) 再曝気係数に関する検討

気液界面におけるガス移動は、普通の場合液相側のガス不足量に支配され、液相中のガス濃度は次式のように表わすのが一般的である。

$$\frac{dC}{dt} = K_L \cdot \frac{A}{V} (C_s - C) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし C は溶存酸素濃度、 C_s は水の飽和溶存酸素濃度、 V は水の体積、 A は気液接触面積、 t は時間である。 K_L は酸素移動容量係数とよばれ、河川を中心に研究が進められ、乱れ特性量等と結びつけた表現が行われている^{8)~11)}。河川を対象にする場合は気液接触面積は水表面面積に等しく、したがって式 (1) の右辺の A/V は水深の逆数をとればよいが、本研究のように気泡をともなう場合には A は明確ではないため、つぎに示すような再曝気係数 k_2 を用いて総括的に扱う。

$$\frac{dC}{dt} = k_2 (C_s - C) \quad \dots\dots\dots (2)$$

以下 k_2 を用いて考察を進めるが、上述の議論より明らかなように、 k_2 に影響をおよぼす要因としては、気泡の存在による気液接触面積の増加と液相の乱れの双方が考えられる。

いま 図-8 に示すように勾配部を分割して溶存酸素濃度に関する物質収支式をたてるとつぎのようになる。

$$\begin{aligned} \frac{dC_i V_i}{dt} = & V_i k_{2,i} (C_s - C_i) + (q_{i-1} C_{i-1} \\ & - q_{i-1} C_i) h_{i-1} b - (q_i C_i - q_i C_{i+1}) h_i b \\ & \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

q_i は断面 $i+1$ を通しての交換水量、 h_i は断面 i の水深、 b は水路幅である。式 (3) を $i=1$ から n まで加えると次式を得る。

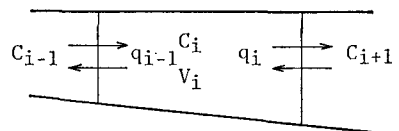


図-8

$$\frac{d \sum^n C_i V_i}{dt} = \sum^n V_i k_{2,i} (C_s - C_i) + (q_n C_{n+1} - q_n C_n) h_n b \dots\dots\dots (4)$$

水平方向の濃度差が存在しなくなる断面を n とすると上式の右辺第二項は省略できる．前節ですでに述べたように、曝気はほとんど碎波帯でおこると考えられるから、 $k_{2,b} \gg k_{2,j}$ ($k_{2,b}$ は碎波帯を含む領域における再曝気係数、 $k_{2,j}$ はそれ以外の領域におけるもの) と仮定すると、式 (4) は次式となる．

$$\frac{d \sum^n C_i V_i}{dt} = V_b k_{2,b} (C_s - C_b) \dots\dots\dots (5)$$

C_b 、 V_b はそれぞれ碎波帯を含む領域における溶存酸素濃度および水の体積である．

本論文では濃度分布を予備実験で詳細に検討した結果、図-2 中に破線で示したようにA点からF点を含む領域までの6分割領域を対象として、式 (5) より再曝気係数を計算した．

再曝気係数と沖波波形勾配との関係を図-9 に示す．plunging 型碎波では沖波波形勾配が増加すると再曝気係数も増加する傾向にある．データが少なく断定はできないが、沖波波形勾配がさらに増加して spilling 型碎波領域に入ると再曝気係数は減少する傾向にある．その理由として気泡の影響が考えられる．すでに図-6 でみたように気泡連行距離には碎波形式による異った傾向はみられなかった．したがって気泡の存在形態とその乱れによるものの影響が大きいと思われる．

図-10 には光学式濃度計を用いて気泡の分布を調べ

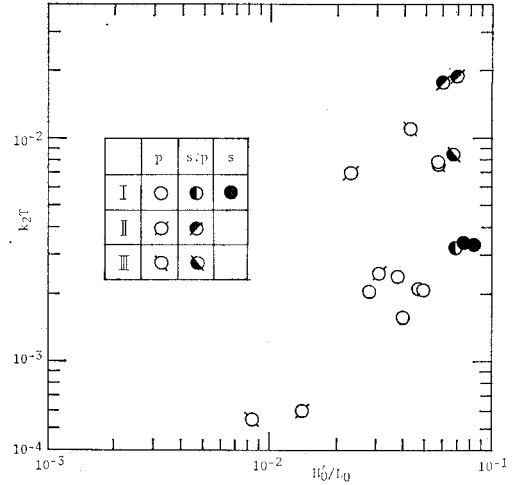
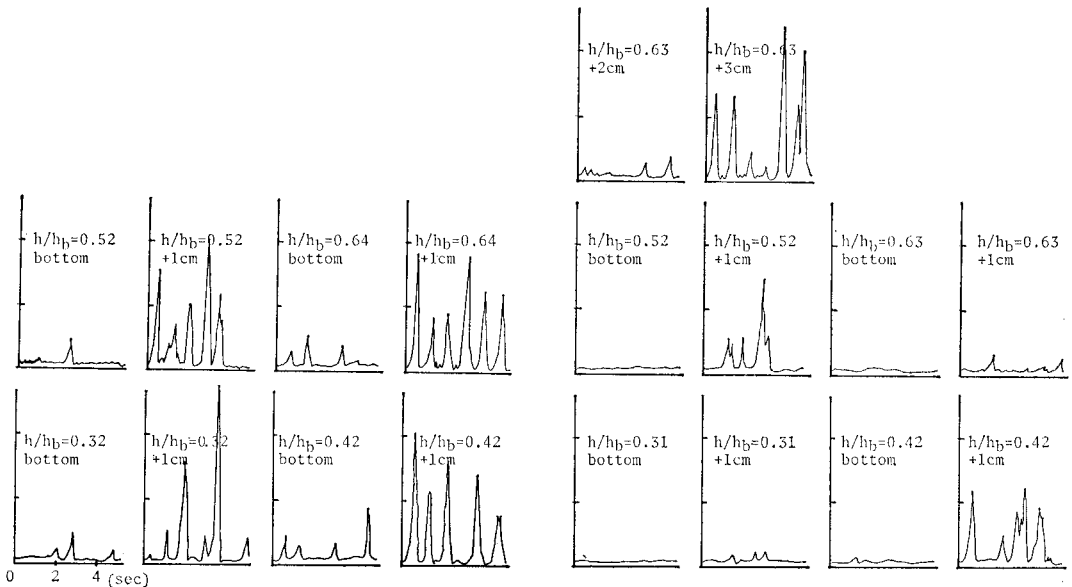


図-9 再曝気係数

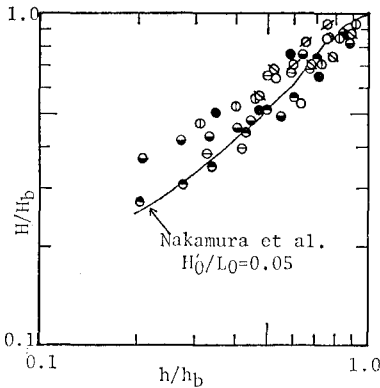
た結果の一例を、plunging 型碎波と spilling 型碎波について示す．これは水中と空中では光の透過率が異なることを利用したものである．図のたて軸には電圧の出力値をとっており、図中に見られるピークは直径 1 mm、間隔 1 cm の濃度計センサの発光部と受光部の間を気泡が通過したことを示している．この計測はおもに気泡の存在する一様傾斜部の底と、1 cm 上について行ない、場合によって 1 cm 区切りで上にあげていった．気泡径や乱れによる乱反射等のキャリブレーションを行なっていないので、定性的な議論しか行なえないが、plunging 型碎波では気泡が底面付近まで達しているのに対し、spilling 型碎波では水面付近にしか存在せず、しかも進行するに



実験 I-5

実験 I-9

図-10 濃度計の出力による気泡の分布



図—11 波高変化

つれ早く減衰することがよくわかる。このように spilling 型砕波より plunging 型砕波の方が気泡が深く入り込むため、その浮上の間の液体との接触量が多いことが、再曝気係数も大きくなる原因の一つであると思われる。

図—9 をみると、目視観測では spilling, plunging のいずれとも判断しがたかった実験のうち、再曝気係数に関して言えば、実験 I-7 (図中の ○) は spilling 型の傾向を示し、実験 II-4, 5 (図中の ●) は plunging 型の傾向を示している。したがって曝気に関与する水の運動機構に関しては、I-7 は spilling 型、II-4, 5 は plunging 型と言えそうである。

4) 波高減衰との関係

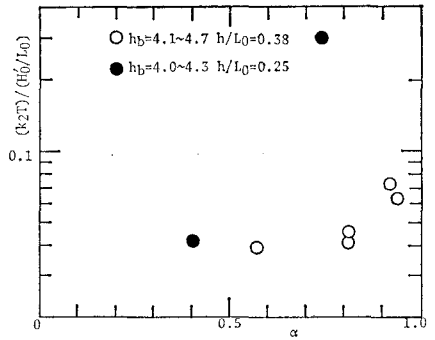
砕波後の波高変化の一例として実験 I に関するものを図—11 に示す。図中には、勾配 1/10, $H_0'/L_0=0.05$ の場合の中村ら¹²⁾による曲線を示しているが、本実験結果もほぼこれと同一傾向にある。砕波後の波高減衰は底面摩擦と気泡をともなう乱れの双方によるエネルギー逸散に起因するが、とくに気泡連行乱れの作用による寄与が大きいと考えられている。したがって波高減衰と再曝気係数との間の関係は深いものと考えられる。そこで波高の減衰を定量化するために、やや大ざっぱではあるが、各実験の波高減衰曲線を次式で近似することにより、波高減衰係数 α を定義した。

$$\log \left(\frac{H}{H_b} \right) = -1 + \exp \left\{ \alpha \log \left(\frac{h}{h_b} \right) \right\} \quad \dots\dots\dots (6)$$

α の計算結果を表—2 に示したが、再曝気係数との間には必ずしも一意的な関係は認められない。しかし砕波点位置が異なると、沖波波高の違いにより本来有していたエネルギーが異なることなどを考えれば、むしろ当然の結果であると言える。図—6 や 図—9 より、plunging 型砕波では気泡連行距離や再曝気係数が沖波波形勾配と一意的関係にあることから、砕波水深の似たもの (実験 I では 1~5, 実験 II では 1, 2) を選んで $k_2 \cdot T / (H_0' / L_0)$ と α の関係を求めると 図—12 のようになる。本図より沖波波長の等しいものを比べれば、波高減衰の影響が

表—2 α の計算結果

	α		α
I-1	0.92	II-1	0.40
2	0.94	2	0.74
3	0.57	3	0.65
4	0.81	4	1.49
5	0.81	5	1.07
6	0.81	III-1	0.90
7	1.05	2	1.04
8	0.92	3	0.28
9	1.18	4	1.24



図—12 波高減衰と再曝気係数の関係

みられるようである。

4. 結 言

本研究では砕波帯における溶存酸素の挙動について、実験結果をもとに考察を行なった。その結果、溶存酸素濃度の分布特性、再曝気係数と波特性量との関係などについて、定性的ではあるが、若干の知見を得た。さらに再曝気係数の面からも砕波の内部機構に迫りうる可能性を指摘した。さらに精度の高い実験を行なって定量化を進めていくことが、今後の課題として残されている。

実験、解析に御協力いただいた元学部学生、平松孝一君(八代市役所)、徳永庸輔君(三井建設)に謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) Iversen, H. W.: Laboratory study of breakers, Proc. Symposium on Gravity Waves, U.S. National Bureau of Standard, Circular 521, pp. 9~32, 1951.
- 2) 岸 力・庵原照太郎: 海岸堤防に関する研究 (7), 土木研究所報告, 第 95 号, pp. 185~197, 1958.
- 3) Bowen, A. J., D. L. Inman, and V. P. Simons: Wave set-down and set-up, Jour. Geophysical Res., Vol. 73, No. 8, pp. 2569~2576, 1968.
- 4) Galvin, C. J. Jr.: Breaker travel and choice of design wave height, Jour. Waterways and Harbors Div., ASCE, Vol. 95, No. WW2, pp. 175~200, 1969.
- 5) 合田良実: 砕波指標の整理について, 土木学会論文報告集, 第 180 号, pp. 39~49, 1970.
- 6) 樫木 享・岩田好一郎: 砕波後の波高変化に及ぼす乱れの効果について, 土木学会第 27 回年次講演会講演集, pp. 33~34, 1972.
- 7) 堀川清司・砂村継夫・鬼頭平三・品川正典: 海浜変形に関する実験的研究 (第一報), 土木学会第 27 回年次講演会講演集, pp. 95~98, 1972.
- 8) O'Connor, J. D. and W. E. Dobbins: The mechanics of reaeration in natural streams, Proc. ASCE, Vol. 82, No. SA. 6, pp. 1115-1~1115-30, 1956.
- 9) Dobbins, W. E.: BOD and oxygen relationships in streams, Proc. ASCE, Vol. 90, No. SA. 3, pp. 53~78, 1964.
- 10) Fortescue, G. E. and J. R. A. Pearson: On gas absorption into a turbulent liquid, Chemical Engineering Science, Vol. 22, pp. 1163~1176, 1967.
- 11) Lamont, J. C. and D. S. Scott: An eddy cell models of mass transfer into the surface of a turbulent liquid, A. I. Ch. E. Jour., Vol. 16, No. 4, pp. 513~519, 1970.
- 12) 中村 充・白石英彦・佐々木泰雄: 砕波による波の変形に関する研究, 土木学会第 13 回海岸工学講演会講演集, pp. 71~75, 1966.