

浦の内湾の物質負荷量と負荷量変化に伴う物質濃度の予測

木村晴保*・宗景志浩**・渡辺久芳***

1. ま え が き

健全なまち養殖業を営むためには、少なくとも海水 1 l につき 4 ml (5.7 ppm) 以上の溶存酸素が必要であると言われている。因に、1985 年夏季成層期の高知県浦の内湾の酸素量¹⁾を見てみると、表層近くでは 8 ml/l 以上と十分過ぎる酸素が存在するけれども、下層に向うにつれて少なくなっていて、水面下 4 m では 4 ml/l、10 m 以下では 0.7 ml/l (1 ppm) 以下と極めて少ない貧酸素の状態である。このような貧酸素水塊は底棲生物を死滅させるばかりでなく、何んらかの原因で表層近くにまで持ち上げられると、養魚に壊滅的被害を及ぼすことになる。

貧酸素水塊の形成は、酸素消費量が供給量を上まわることによるため、酸素消費に係る諸要因を押えると共に供給量を促進することによって阻止できる。例えば、養殖規模の縮小、投餌法の改善、覆砂や石灰散布による底質の改善などは酸素消費量を抑止するためのものであり、湾口改良、密度作れい、エアーレーションなどは酸素供給量を促進するためのものである。

浦の内湾においても、上記改善策が検討され、一部のものについては実施されたこともあるが、抜本的な漁場の環境改善までには至っていない。その原因は養魚を含めた湾への物質負荷量、負荷物質の生物化学的動態、海水の流動とそれに伴う物質の輸送といった湾の物質収支に係る基本的基礎的課題の解明が十分でないため、湾の適正な利用が為されていないからである。

ここでは内湾の水質環境の改良・保全を行なう上で重要な湾の海水交換量、湾への物質負荷量及び負荷量変化に伴う物質濃度の予測等に関する算定法を提示し、これに基づき、高知県浦の内湾の海水交換量、酸素及び全窒素の負荷量、負荷量変化に伴う溶存酸素濃度を、水産庁の委託研究「赤潮対策技術開発試験」の一環として高知県が昭和 60 年度に実施した調査結果を用い、推算する。

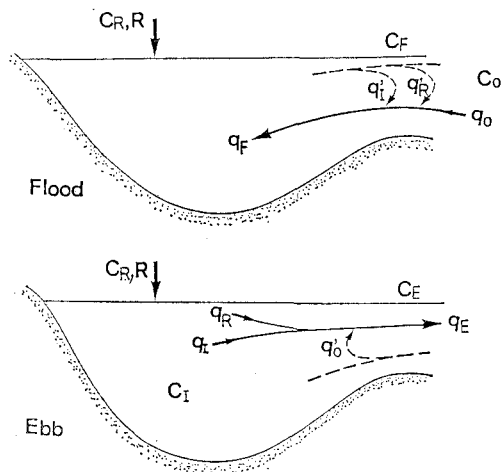


図-1 海水交換モデル模式図

2. 推 算 法

(1) 潮汐交換率と淡水残留量

図-1 のようにある時点を超時として、この時点での湾内水、湾外水及び淡水のそれぞれの物質濃度を C_I , C_0 , C_R とする。その後 ΔT 期間に湾口を流出入した海水量のうち、流入量を q_F 、流出量を q_E とし、それぞれの物質の平均濃度を C_F , C_E とすると、 q_F は湾外水 q_0 、湾外へ流出したのち湾内に流入する湾内水 q_I' と淡水 q_R' から成り、次式が成り立つ。

$$\left. \begin{aligned} q_F &= q_0 + q_I' + q_R' \\ C_F q_F &= C_0 q_0 + C_I q_I' + C_R q_R' \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

一方、 q_E は湾内水 q_I と淡水 q_R 及び湾内に流入したのち湾外へ流出する湾外水 q_0' から成り、次式が成り立つ。

$$\left. \begin{aligned} q_E &= q_I + q_0' + q_R \\ C_E q_E &= C_I q_I + C_0 q_0' + C_R q_R \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

また、陸域から湾に流入した淡水量を R 、湾口を流出入した海水の平均量を q_T として、次式で表わす。

$$q_T = q_E - R/2 = q_F + R/2 \dots\dots\dots (3)$$

q_T に対する湾に流入した正味の湾外水量 $q_0 - q_0'$ の比を潮交換率 r と呼ぶことにする。 r は式 (1)~(3) より

* 正会員 農博 高知大学教授 農学部栽培漁業学科

** 正会員 農修 高知大学講師 農学部栽培漁業学科

*** 農修 三洋水路測量株式会社

次式で与えられる。ただし $R \ll q_T$ とした。

$$r = \frac{q_0 - q_0'}{q_T} = \frac{C_F - C_F'}{C_0 - C_I} - \frac{C_I - C_R}{C_0 - C_I} \frac{q_R - q_R'}{q_T} \quad (4)$$

塩分、水温を指標として、式(4)の各項のオーダーを見てみると、右辺第1項は 10^0 、 $(q_R - q_R')/q_T$ は高々 10^{-2} 、 $(C_I - C_R)/(C_0 - C_I)$ は塩分の場合 $C_R = 0$ より 10^2 、水温の場合 10^0 である。よって、右辺第2項は指標が塩分の場合には 10^0 となり、第1項に比べて省略することはできないが水温であれば 10^{-2} となり省略でき、式(4)は次式で近似できる。

$$r = \frac{C_F - C_F'}{C_0 - C_I} = \frac{(C_F - C_E)q_T}{(C_0 - C_I)q_T} \quad (5)$$

陸域から流入した淡水量 R は、一部は湾外に流出し、一部は湾内に留まる。この湾内に留まった淡水量(淡水残留量) ΔR は $\Delta R = R - (q_R - q_R')$ で、湾内の塩分収支より次式が成り立つ。

$$V\Delta C_I = (C_0 - C_I)r q_T - C_I \Delta R \quad (6)$$

ここに、 V は湾の容積、 ΔC_I は湾内塩分の ΔT 期間後の増加量である。

(2) 海水交換量と湾内海水残留率

湾内水は時間の経過につれて湾外水及び淡水によって置き換えられて行く。ある期間内に置き換えられた湾内水量をその期間での海水交換量と呼ぶことにすると、海水交換量 ΔE は先に述べた潮汐交換率 r と淡水残留量 ΔR を用い次式で与えられる。

$$\Delta E = r q_T + \Delta R \quad (7)$$

1潮時の海水交換量は、湾の水面積 S 、容積 V 、潮差 $\Delta \eta$ 、 $r' = \Delta E/q_T$ を用い $r'S\Delta \eta$ で近似できる。よって、ある時点を超時として、その時点の湾内水は、1潮汐後には $V - r'S\Delta \eta$ となる。2潮時後には更に $r'S\Delta \eta$ の海水が交換されるが、これには先の潮時に流入した淡水をも含む湾外水と初期の時点の湾内水とが含まれる。これら両者の $r'S\Delta \eta$ に占める割合が1潮時前にそれぞれが湾内に占める割合に等しいとすると、2潮時後には湾内水は $V(1 - r'S\Delta \eta/V)^2$ となる。これら湾内水の湾容積に占める割合が湾内海水残留率で、一般に n 潮時後のそれは $(1 - r'S\Delta \eta/V)^n$ となる。

(3) 物質負荷量

湾内、湾外及び淡水の負荷物質濃度をそれぞれ C_I 、 C_0 、 C_R とし、 ΔT 期間後の湾の負荷物質の収支式を次式で与える。

$$V\Delta C_I = (C_0 - C_I)r q_T + (C_R - C_I)\Delta R + P' \quad (8)$$

つまり、左辺は海水に溶存および懸濁態としての湾内負荷物質の増加量、右辺第1項は潮汐により湾内外水の交換による湾内負荷物質の増加量、第2項は淡水と湾内水の交換による増加量であり、第3項はこれら以外によ

る湾内負荷物質の増加量で、例えば溶存酸素の場合には、海水中のプランクトンによる生産・消費、養魚による消費、底泥での消費などがこれに含まれる。

いま、陸域から負荷される負荷物質質量 $C_R \Delta R$ と P' の和を物質負荷量 P と呼ぶことにすると、式(9)は次式で表わされる。

$$V\Delta C_I = (C_0 - C_I)r q_T - C_I \Delta R + P \quad (9)$$

(4) 負荷量変化に伴う物質濃度の予測

式(9)を次式で表わす。

$$\Delta C_I = -K C_I + L C_0 + M \quad (10)$$

ここに、 $K = (r q_T + \Delta R)/V$ 、 $L = r q_T/V$ 、 $M = P/V$ である。

湾内の負荷物質濃度の初期値を $C_I(0)$ 、 ΔT 後の濃度を $C_I(\Delta T)$ で表わす。 $C_I(0)$ が $C_I'(0)$ に、 M が M' になったことにより $C_I(\Delta T)$ が $C_I'(\Delta T)$ になったとすると、式(11)より次式が成り立つ。

$$\begin{aligned} C_I(\Delta T) - C_I(0) &= -K \frac{C_I(\Delta T) + C_I(0)}{2} \\ &\quad + L C_0 + M \\ C_I'(\Delta T) - C_I'(0) &= -K \frac{C_I'(\Delta T) + C_I'(0)}{2} \\ &\quad + L C_0 + M' \end{aligned}$$

両者の差を取り次式を得る。

$$\Delta C_I(\Delta T) = \frac{2-K}{2+K} \Delta C_I(0) + \frac{2}{2+K} \Delta M \quad (11)$$

ここに、

$$\begin{aligned} \Delta C_I(\Delta T) &= C_I'(\Delta T) - C_I(\Delta T) \\ \Delta C_I(0) &= C_I'(0) - C_I(0) \\ \Delta M &= M' - M \end{aligned}$$

である。

つまり、負荷物質の初期濃度と負荷量がそれぞれ $\Delta C_I(0)$ と ΔM 変化したことによる ΔT 後の物質濃度 $C_I'(\Delta T)$ は式(12)より次式で与えられる。

$$C_I'(\Delta T) = C_I(\Delta T) + \Delta C_I(\Delta T) \quad (12)$$

3. 結果と考察

以後の解析には、高知県水産試験場が1985年に実施した浦の内湾の観測結果²⁾を用いた。

(1) 潮汐交換率と淡水残留量

潮汐交換率 r は式(5)で、淡水残留量 ΔR は式(6)で求めた。ただし、式(5)の C_0 、 C_I はそれぞれ湾外、湾内の ΔT 期間の平均水温とし、定期観測より与えた。 C_F 、 C_E はそれぞれ湾口海水の漲潮時と落潮時の平均水温で、浦の内湾の場合、湾口海水は十分に混合されていて一様水塊とみなすことができるため、湾口での1測点での水温の連続観測と湾内水位の連続観測とから次式で与えた³⁾。

$$(C_F - C_E)q_T = S \int_0^{\Delta T} \left(C' \frac{d\eta}{dt} \right) dt \quad \dots\dots\dots (13)$$

ここに、 S は湾の水面積、 C' は湾口での ΔT 期間の連続観測から求まる水温の平均値からの偏差、 η は湾内水位である。

表-1から分るように、潮汐交換率 r は、期間I、III、IVでは0.12~0.15とほぼ等しく、期間IIでは0.27と前者のものに比べて2倍程度大きい。これは各期間の日平均降水量(mm/day)が、期間I、III、IVではそれぞれ2.73、1.32、2.79と少なかったのに対し、期間IIでは38.50と非常に多かったことに起因すると考えられる。つまり、淡水の流入は潮汐交換量の促進に寄与することが示唆される。

表-2からは、降水量の多かった期間IIでは、湾内水の $7.06 \times 10^6 \text{ m}^3$ が淡水によって置換されたことになる。これは湾容積 $V = 85.2 \times 10^6 \text{ m}^3$ の約8%に相当する。その他の3期間では ΔR は負値で、蒸発量が供給量を上まわったことになる。これらに相当する日蒸発量(mm/day)はIで7.8、IIIで12.3、IVで7.3となり、一般に知られている湖面からの蒸発量3~5mm/day⁴⁾に比べて2~3倍大きく、すべてを蒸発量とみなすにはやや問題である。その原因の一つとして、湾内の水温、塩分の成層化による誤差が含まれているものと考えられる。

(2) 海水交換量と湾内水残留率

式(7)で定義した浦の内湾の各期間ごとの海水交換量 ΔE は表-2から求まる。これによると、降水量の多かった期間IIでは淡水による交換量 ΔR は潮汐交換量 rqr の約1割、降水量の少なかった3期間では、いずれも負値で、その大きさは rqr の0.3~0.4割である。

図-2は浦の内湾について、前述の湾内水残留率 $r_I = (1 - r' S \Delta \eta / V)^n$ を図化したものである。

これらより、降水量の少なかった期間I、III、IVでは r' は0.15程度、降水量の多かった期間IIでは0.3程度

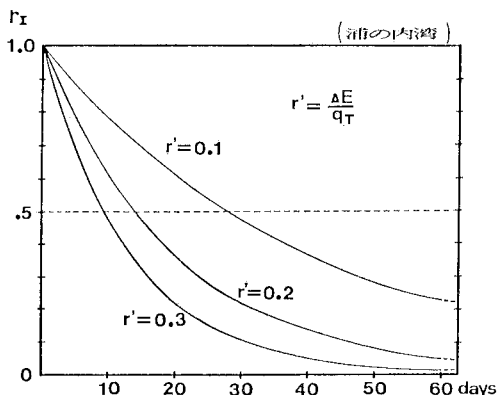


図-2 海水交換率(r')を用いた湾内の海水残留率(r_I)と海水交換日数

表-1 潮汐交換率 r (浦の内湾 1985)

期 間 (時 間) (月 / 日)	I (312) (7/25 ~8/7)	II (360) (8/7 ~8/22)	III (336) (8/22 ~9/15)	IV (336) (9/5 ~9/19)
湾外水温 C_0 ($^{\circ}\text{C}$)	27.478	28.198	28.223	27.705
湾内水温 C_I ($^{\circ}\text{C}$)	27.996	28.926	29.220	28.761
平均潮差 $\Delta \eta$ (m)	1.09	1.00	1.09	1.07
qr ($\times 10^7 \text{ m}^3$)	27.92	29.55	30.04	29.48
$(C_F - C_E)qr$ ($\times 10^7 \text{ }^{\circ}\text{Cm}^3$)	-1.69	-5.76	-4.61	-4.15
$(C_0 - C_I)qr$ ($\times 10^7 \text{ }^{\circ}\text{Cm}^3$)	-14.48	-21.53	-29.95	-31.12
r	0.12	0.27	0.15	0.13

表-2 淡水残留率 ΔR (浦の内湾 1985)

期 間 (時 間)	I (312)	II (360)	III (336)	IV (336)
湾外塩分 C_0 (‰)	32.255	31.495	31.305	32.445
湾内塩分 C_I (‰)	31.431	30.821	30.439	31.451
rqr ($\times 10^7 \text{ m}^3$)	3.266	7.919	4.626	3.921
$(C_0 - C_I)rqr$ ($\times 10^7 \text{ kg}$)	2.691	5.337	4.006	3.899
$V \Delta C_I$ ($\times 10^7 \text{ kg}$)	6.047	-16.438	9.929	7.298
$C_I \Delta R$ ($\times 10^7 \text{ kg}$)	-3.356	21.775	-5.923	-3.399
ΔR ($\times 10^7 \text{ m}^3$)	-0.104	0.706	-0.189	-0.105

表-3 溶存酸素(DO)負荷量 P (浦の内湾 1985)

期 間 (時 間)	I (312)	II (390)	III (336)	IV (336)
湾外 DO C_0 (ppm)	7.0565	6.6885	6.6980	6.5910
湾内 DO C_I (ppm)	5.0850	4.8410	5.0785	4.7935
ΔC_I (ppm)	-0.840	0.352	0.123	-0.693
$V \Delta C_I$ ($\times 10^3 \text{ kg}$)	-71.536	29.977	10.475	-59.017
$(C_0 - C_I)rqr$ ($\times 10^3 \text{ kg}$)	64.389	146.304	74.918	70.480
$-C_I \Delta R^*$ ($\times 10^3 \text{ kg}$)	7.339	-34.179	12.659	6.921
DO 負荷量 P ($\times 10^3 \text{ kg}$)	-134.264	-82.149	-77.103	-136.418
$P/V/\Delta T$ ($\text{mg/m}^3/\text{h}$)	-5.392	-2.679	-2.695	-4.767

* $\Delta R < 0$ のとき C_I は C_0 とした。

表-4 全窒素(T-N)負荷量 P (浦の内湾 1985)

期 間 (時 間)	I (312)	II (360)	III (336)	IV (336)
湾外 T-N C_0 ($\mu\text{g-at/L}$)	9.6590	11.2115	12.2580	11.3085
湾内 T-N C_I ($\mu\text{g-at/L}$)	18.0310	20.9085	22.6125	21.6975
ΔC_I ($\mu\text{g-at/L}$)	1.9980	3.7570	-0.1890	-1.9010
$V \Delta C_I$ (kg-at)	170.154	319.955	-16.096	-161.894
$(C_0 - C_I)rqr$ (kg-at)	-273.430	-769.905	-482.700	-407.353
$-C_I \Delta R^*$ (kg-at)	10.045	-147.614	23.168	11.874
T-N 負荷量 P (kg-at)	433.439	1,237.5	443.436	233.585
$P/V/\Delta T$ ($\mu\text{g-at/m}^3/\text{h}$)	16.316	40.634	15.497	8.163

* $\Delta R < 0$ のとき C_I は C_0 とした。

であることから、期間Ⅰ、Ⅲ、Ⅳでは20日間程度で、期間Ⅱでは10日間程度で湾内水の1/2が置換されたことになる。

(3) 溶存酸素と全窒素の負荷量

式(10)に基づき、浦の内湾の溶存酸素(DO)と全窒素(T-N)の負荷量 P を求めた。結果は表-3と表-4に示す。

表-3を見ると、DO負荷量 $P(\times 10^3 \text{ O}_2\text{-kg})$ は期間Ⅰ、Ⅳで-140、期間Ⅱ、Ⅲで-80で、単位容積、単位時間あたり($\text{O}_2\text{-mg/m}^3/\text{h}$)それぞれ-5.0と-2.5である。これらの値の妥当性とか、期間Ⅱ、Ⅲが期間Ⅰ、Ⅳに比べて何故小さいかについては、湾の環境特性を知る上で極めて重要なことである。しかし、これには、プランクトンによる生産・消費、海面からの溶出入、養魚による消費、底泥による消費など、DO負荷量 P に係わる主要項目の精細な調査・観測が不可欠である。

T-N負荷量 P についてみると(表-4)、期間Ⅱが期間Ⅰ、Ⅲに比べて3倍程度大きく、期間Ⅳは1/2程度と小さい。期間Ⅱが大きかった理由としては降水量の増大に伴う陸域からの流入負荷の増大によるためと考えられる。しかし、これらの値の精度、増減の理由等については、T-N負荷量 P の主要項目である、魚類養殖に伴う負荷、陸域からの流入負荷、底泥からの溶出負荷、懸濁窒素の沈殿や脱窒細菌による消費などについての詳細な調査、観測が必要である。

(4) 負荷量変化に伴う物質濃度の予測

7/25を起時として、各期間とも溶存酸素負荷量 P を $\Delta P=50,000 \text{ O}_2\text{-kg}/\Delta T$ 増減したとき、湾内水の溶存酸素(DO)濃度を、式(12)に基づき推算した。式(12)の諸係数は表-5に、推算値は表-6に示す。図-3はこれらの結果を図示したもので、負荷量を ΔP 減としたとき、湾内水のDO濃度は $P-\Delta P$ で推移し、 ΔP 増としたとき $P+\Delta P$ で推移することを示す。図に $\Delta P=50,000 \text{ O}_2\text{-kg}/\Delta T$ は同年の浦の内湾の養殖ハマチが呼吸によって消費する酸素量の約1/2に相当する酸素量である。

表-5から分るように、海水交換量 $qr+AR$ が小さくなると、係数 K は小さくなり、式(12)の諸係数は大きくなって、負荷量変化に伴う湾内物質濃度の変化量は大きくなる。つまり、負荷削減による湾内水質改善は海水交換の悪い時期ほど、あるいはまた海換水交の悪い湾ほどより効果的であることがこれから分る。

4. む す び

ある時点の湾内水は、時間の経過につれて湾外水と淡水とで置き換えられて行く。この置き換えられた湾内水量を海水交換量と定義づけると、湾外水との交換量は水温を指標に取り式(5)で評価でき、淡水との交換量は

表-5 式(12)の係数

期 間 (時 間) (月 / 日)	I (312) (7/25 ~8/7)	II (360) (8/7 ~8/22)	III (336) (8/22 ~9/5)	IV (336) (9/5 ~9/19)
$K=(qr+AR)/V$	0.3835	1.0128	0.5432	0.4604
$(2-K)/(2+K)$	0.6782	0.3277	0.5728	0.6257
$2/(2+K)$	0.8391	0.6638	0.7864	0.8129

* $AR < 0$ のとき $AR=0$ とした。

表-6 負荷量変化に伴う溶存酸素濃度の予測

月 / 日	7/25	8/7	8/22	9/5	9/19
$\Delta M \times 2/(2+K)$ (g/m^3)	—	0.492	0.390	0.461	0.477
$\Delta C_I(0) \times (2-K)/(2+K)$ (ppm)	—	0	0.161	0.316	0.488
$\Delta C_I(\Delta T)$ (式(12)) (ppm)	0	0.492	0.551	0.777	0.965
$C_I(\Delta T)$ (ppm)	5.505	4.665	5.017	5.140	4.447
$C_I'(\Delta T) - C_I + \Delta C_I$ (ppm)	5.505	5.157	5.568	5.917	5.412
$C_I'(\Delta T) = C_I - \Delta C_I$ (ppm)	5.505	4.173	4.566	4.363	3.482

* いずれの期間とも $\Delta P=50,000 \text{ O}_2\text{-kg}$, $\Delta M=\Delta P/V=0.587 \text{ O}_2\text{-g/m}^3$ とした。

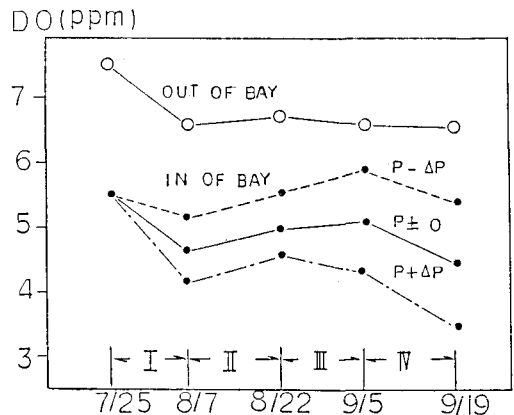


図-3 負荷量変化 Δp に伴う溶存酸素濃度の予測
 $\Delta p=\pm 59,000 \text{ kg-O}_2$ (浦の内湾 1985)

塩分を指標に取り式(6)で評価できる。そして期間ごとの海水交換量は式(7)で与えられる。

また、湾口以外から湾内水に負荷される物質負荷量 P は、湾内外水の負荷物質濃度を用いて式(10)より求める。そしてまた、物質負荷量変化に伴う湾内水の負荷物質濃度の予測が式(12)、(13)より可能となり、湾の水質環境容量評価ができる。

以上の算定法を浦の内湾に適用した。主な結果は次の通りである。

1) 潮汐交換率 r は、期間平均日降水量が 3 mm/day 以下と少なかった期間Ⅰ(7/25~8/7)、Ⅲ(8/22~9/5)、Ⅳ(9/5~9/19)では $0.12 \sim 0.15$ 、降水量が 40 mm/day と多かった期間Ⅱ(8/7~8/22)では 0.27 と大きく、淡水

の流入は潮汐交換量を促進することが示唆された。

2) 降水量の少なかった期間Ⅰ, Ⅲ, Ⅳでは淡水残量 ΔR は負値となり、海面からの蒸発量が流入水量を上回ったものと思われる。

3) 湾内水の1/2が交換するに要する日数は、降水量の少なかった期間Ⅰ, Ⅲ, Ⅳでは20日程度、降水量の多かった期間Ⅱでは10日程度である。

4) 溶存酸素負荷量は、湾内水単位体積当り、単位時間当り $-2.5 \sim -5.0 \text{ O}_2\text{-mmg/m}^3/\text{g}$ で、高知県古満日湾の同時期のものにほぼ等しい。また、湾内での酸素は生産よりも消費が上回わり、不足分の1/2ないしはほとんどが湾口を通して湾外から補給される。

5) 全窒素負荷量は期間Ⅱが他の3期間に比べて非常に大きく、淡水流入による陸域からの負荷によるものと考えられる。

6) 負荷量変化に伴う湾内物質濃度の変化量は海水交換量が小さいほど大きく、負荷削減による湾内水質改善

は海水交換の悪い時期ほど、あるいはまた、海水交換の悪い湾ほどより効果的である。

本研究は高知県水産試験場のご協力の下、文部省科学研究費(一般研究B, 研究代表者: 畑幸彦高知大学教授)および鉄鋼業環境保全技術開発研究助成金により行なったものである。記して感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 高知県水産試験場: 昭和60年度赤潮対策技術開発試験報告書 4-(1) 内湾における漁場環境の総合的保全技術の開発, pp. 9~10, 1986.
- 2) 1) と同じ, pp. 73~88.
- 3) 木村晴保・宗景志浩・渡辺久芳: 塩分・水温を指標としたボックスモデルによる浦之内湾の DO 負荷量の推算, 海岸工学講演会論文集, 第33回, p. 623, 1986.
- 4) 土木学会編: 土木工学ハンドブック下巻, 技報堂, p. 2590, 1954.