

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

木村晴保*・宗景志浩**・渡辺久芳***

1. ま え が き

塩分を指標としたボックスモデルを適用し、湾の漁場容量評価指標物質である溶存酸素 (DO)、窒素、リンなどの湾への負荷量を推算するには、湾への淡水供給量が必要となる¹⁾。浦之内湾の場合、図-1 にみられるように5つの河川が流入しているが、これらはいずれも小河川であるため、流量の計測はなされていない。また、周囲は傾斜地となっていて、降雨時には斜面から直接湾へ流入する雨水も相当量あるものと考えられる。このような淡水供給量を湾内の塩分、水温、DO 等と同程度の精度でもって観測することは非常に困難なことである。

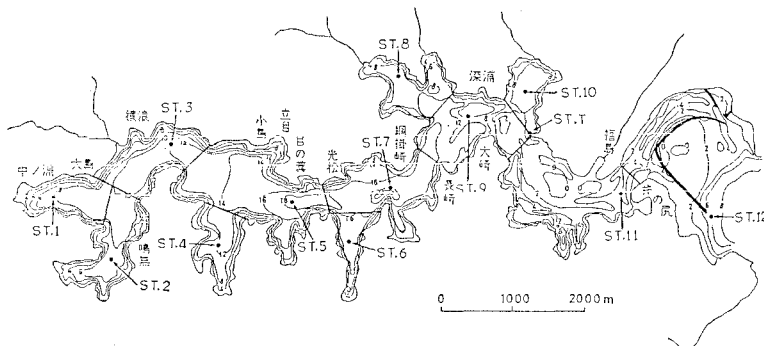


図-1 浦之内湾の深浅図と測点配置、直線は測点の支配領域を示す

幸いにして浦之内湾の場合、湾口は浅くて狭いため、潮汐に伴う湾口での流況は、流速は速くかつ乱れが強く、湾口での海水は均質とみなし得る。このために湾口を流入する塩分と熱量は、湾口での1点での塩分と水温の連続観測と湾内水位 (潮位) の連続観測とから推算することができ、湾への淡水供給量と熱供給量は比較的容易に推算できる。その結果、塩分のみならず水温をも指標としたボックスモデルの適用が可能となり、より精度の高い負荷量の推算が可能となる。

ここではまず、湾口での塩分と湾内水位の連続観測および湾内での塩分の定期観測から湾内への淡水供給量の

推算法について述べ、ついで、湾口での水温の連続観測と湾内での水温の定期観測から海面を通じて湾に供給される熱量の推算法について述べる。そして、これらの結果を踏えて、塩分・水温を指標としたボックスモデルを浦之内湾に適用し、漁場環境評価に重要な湾への DO 負荷量を推算する。

2. 方 法

(1) 湾への淡水供給量と熱供給量の推算法

湾内塩分の時間的変化量は湾口を通じて湾内に流入する塩分量に等しい。よって、湾の容積を V_1 、湾内水の塩分平均濃度を c_1 、湾口断面を A_{12} 、断面 A_{12} 上での塩分を c_{12} 、その点での断面 A_{12} に垂直で湾外へ向う流速成分を v_{12} としたとき次式が成り立つ。

$$\frac{d}{dt}(V_1 c_1) = - \int_{A_{12}} c_{12} v_{12} dA \quad \dots\dots\dots (1)$$

湾口での海水が均質とみなせれば、式 (1) の右辺 c_{12} は定数となり、 $\int_{A_{12}} v_{12} dA$ は湾内の

水位 η_1 と湾の水面積 S_1 、湾への単位時間あたりの淡水供給量 R を用い次式で与えられる。

$$\int_{A_{12}} v_{12} dA = -S_1 \frac{d\eta_1}{dt} + R \quad \dots\dots\dots (2)$$

Δt 期間の R の平均値を $\bar{R}$ 、 $\bar{R}$ からの偏差を R' 、 c_{12} の平均値を $\bar{c}_{12}$ 、 $\bar{c}_{12}$ からの偏差を c'_{12} で表わし、式 (2) を式 (1) に代入し、 Δt 期間にわたって積分することにより、 $\bar{R}$ の第1近似として次式を得る²⁾。

$$\bar{R} = \left[S_1 \int_0^{\Delta t} \left(c'_{12} \frac{d\eta_1}{dt} \right) dt - V_1 \Delta c_1 \right] / (\bar{c}_{12} \Delta t) \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 Δc_1 は Δt 期間後の湾内塩分の増加量である。

湾への熱供給量は、海面、海底および湾口断面を通じて行なわれる。海底からの供給は他のものに比べて小さ

* 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

*** 修士学生 農学部栽培漁業学科

いとみなして考えないことにする。湾内水温の平均値を T_1 、断面 A_{12} 上の水温を T_{12} 、単位時間単位海面あたり供給される熱量を q 、海水の比熱を c_p としたとき、湾内熱量の収支式は次式で与えられる。

$$c_p \frac{d}{dt} (V_1 T_1) = -c_p \int_{A_{12}} T_{12} v_{12} dA + S_1 q \dots (4)$$

水温についても、塩分と同様に断面 A_{12} 内で一様とみなせば、 dt 期間の T_{12} の平均値を $\bar{T}_{12}$ 、 $\bar{T}_{12}$ からの偏差を T'_{12} で表わし、式(4)を dt 期間にわたって積分することにより、 q の第1近似は次式で与えられる。

$$q = c_p \left[V_1 \Delta T_1 - S_1 \int_0^{\Delta t} \left(T'_{12} \frac{d\eta_1}{dt} \right) dt + \bar{R} \bar{T}_{12} \Delta t \right] / (S_1 \Delta t) \dots \dots \dots (5)$$

ここに、 ΔT_1 は dt 期間後の湾内水温の上昇量である。すなわち、湾口での海水が均質とみなし得る場合には、湾口での1点での塩分と水温の連続観測、湾内水位の連続観測および湾内の塩分と水温の定期観測から、湾への淡水供給量と熱供給量はそれぞれ式(3)と式(5)を用い推算可能である。

(2) 塩分・水温を指標としたボックスモデル

湾内を①、湾外を②とする。①から②に向う輸送係数を Q_{12} 、②から①に向う輸送係数を Q_{21} 、①の塩分と水温をそれぞれ c_1 、 T_1 、②の塩分と水温を c_2 、 T_2 とすると、これらの間には次式が成り立つ。

$$\left. \begin{aligned} V_1 \frac{dc_1}{dt} &= -c_1 Q_{12} + c_2 Q_{21} \\ V_1 \frac{dT_1}{dt} &= -T_1 Q_{12} + T_2 Q_{21} + \frac{S_1}{c_p} q \end{aligned} \right\} \dots \dots (6)$$

上式が塩分・水温を指標としたボックスモデルの基礎式で、湾の内外での塩分、水温の定期観測と式(5)で q が与えられると、塩分収支と熱収支を満たす輸送係数 Q_{12} 、 Q_{21} が求まる。

(3) DO 負荷量の推算法

湾内の DO 濃度は、海水の流動(輸送係数)によって変化するばかりでなく、海水中のプランクトン等による生産ないし消費、養魚による消費、底泥での消費などによっても変動する。これらのうち輸送係数以外による湾内の DO 増加量を湾への DO 負荷量と定義すると、DO 収支式として次式を得る。

$$V_1 \frac{dO_1}{dt} = -O_1 Q_{12} + O_2 Q_{21} + P \dots \dots \dots (7)$$

ただし、 O_1 、 O_2 は湾内、湾外の DO 濃度、 P は単位時間あたりの DO 負荷量である。

式(7)より、輸送係数と定期観測による DO 濃度から DO 負荷量 P が求まる。

(4) 観 測

定期観測では観測日での湾内の塩分、水温、DO を出

来るだけ精度よく求めることが重要である。そのため、観測日は湾内水質の日変化の少ない小潮日とし、7月25日、8月7日、8月22日、9月5日および9月19日とした。測点は図-1に示す ST. 1~12 で、海面下 0.5 m、1.0 m、2.0 m 以下 2 m ごとに底上 1 m に至る各点での塩分、水温、DO を上げ潮時と下げ潮時に実測した。

連続観測は平均水深 4 m の ST. 11 において、底上 1.5 m での塩分と水温を 10 分間隔で実測した。塩分センサーの掃除は当初は2週間ごとに実施していたが、汚れの影響が見られたので、その後1週間ごとに実施するようにした。

湾内水位は ST. T で、水圧式ペン書き潮位計を用い実測した。

降水量は湾に隣接する高知大学海洋生物教育研究センター内で、転倒式雨量計を用い実測した。

3. 観 測 結 果

(1) 湾口での塩分、水温、DO の鉛直偏差

定期観測で得られた ST. 11 での塩分、水温、DO の鉛直分布によると、塩分、水温、DO の鉛直偏差は、成層化のもっとも発達した時期においても、それぞれ 0.1‰、0.3°C、0.35 ppm ときわめて小さい。これらは小潮時(潮差 0.6 m)の結果であり、大潮時(潮差 2 m)には湾口での流速は最大 2 m/s 程度にもなることから、上記偏差値はさらに小さいものと思われる。これらのことから、湾口での海水を均質とみなす先の仮定は適切である。

(2) 湾内外での塩分、水温、DO

表-1 は定期観測より求めた湾内(ST. 1~11)と湾外(ST. 12)の塩分、水温、DO の観測日ごとの平均値である。これらは、図-1の直線で区分した支配領域を考慮のうえ求めた時間的体積の平均値である。

図-2、図-3 は上記結果のうち塩分と水温を図示したものであり、図-4 は日平均降水量である。これから分るように、全期間を通じ、塩分は湾内よりも湾外で高く、水温は湾外で低い。また、降水量の多い期間Ⅱでは、塩分は湾内、湾外ともに急激に低下している。一

表-1 塩分、水温、DO の平均値

月/日		7/25	8/7	8/22	9/5	9/19
塩分 (‰)	湾内	31.076	31.786	29.856	31.022	31.879
	湾外	31.900	32.610	30.380	32.230	32.660
水温 (°C)	湾内	27.438	28.554	29.298	29.141	28.380
	湾外	26.975	27.980	28.415	28.030	27.380
DO (ppm)	湾内	5.505	4.665	5.017	5.140	4.447
	湾外	7.508	6.605	6.772	6.624	6.558

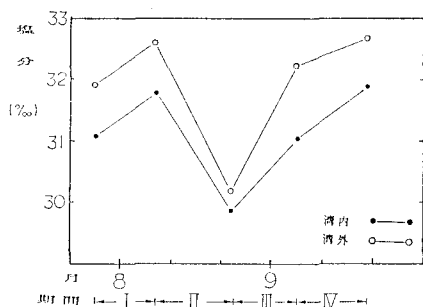


図-2 観測期間の塩分の経時変化

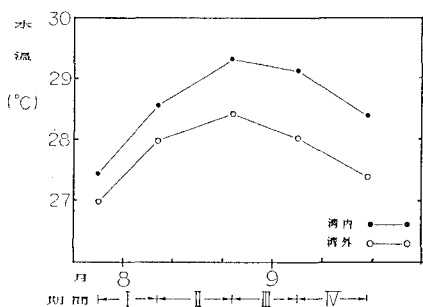


図-3 観測期間の水温の経時変化

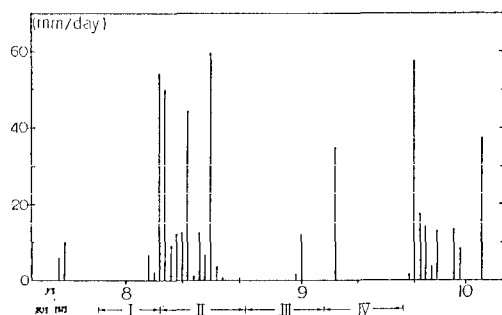


図-4 観測期間の日平均降水量

方、水温は湾内、湾外ともに上昇している。このことは湾への熱供給量は日射によるよりも淡水の流入によるものと考えられる。

(3) 水温、塩分、潮位の連続観測

図-5は湾口 (ST. 11) での水温、塩分の連続観測と湾内 (ST. T) での潮位観測の一部である。水温と塩分

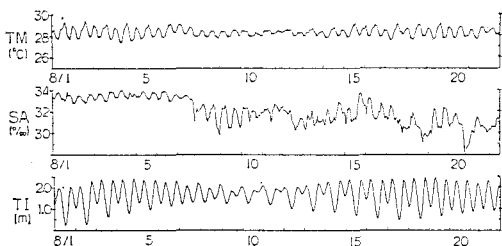


図-5 水温 (TM)、塩分 (SA)、潮位 (TI) の連続観測

については10分ごとの観測値から求めた1時間ごとの平均値であり、潮位は1時間ごとの読み取り値である。

8月7日以降、塩分は異常な変化をしている。これは図-4から分るように、台風8号の接近に伴う50 mm/day以上の大雨で、湾口近くに流出する仁淀川 (一級河川) の河川水によって湾外の塩分が大きく影響されたためと考えられる。

4. 淡水供給量と熱供給量の推算

表-2に式(3)と式(5)に基づき推算した湾への淡水供給量と熱供給量を示す。

表の①は式(3)の右辺第1項で、これは潮汐流を乱れとみなしてこれに伴う湾口での拡散による塩分の輸送量である。図-2で示したように、湾内の塩分が湾外に比べて常に低かったとすると、期間IIでこの値が負となったことは、塩分が拡散によって濃度の低い方から高い方に輸送されたこととなり不合理である。この期間には図-4からも分るように雨の日が続き、仁淀川の河川水によって湾外での塩分が湾内よりも低くなったものと考えられる。

②は式(3)の右辺第2項で、湾内の塩分量の増加量である。期間IIには雨水の流入により多量の塩分が湾外へ流出されたことが分る。

③は連続観測値から求めた湾口での塩分の期間平均値である。

④は式(3)に基づく湾への淡水供給量で、期間IIを除く他の3期間はいつも負値である。負値は供給量よりも蒸発量が上回ったことを意味する。因に、負値となった3期間の値に相当する海面からの蒸発量 (mm/day) を求めると、期間Iで8.01、IIIで13.54、VIで7.49となり、⑨に示す平均日降水量の小さな期間ほど大きいことが分る。しかし、これらの値は、水面からの通常の蒸発量 3~4 mm/day³⁾ の3~4倍で、上記の値す

表-2 湾への淡水供給量と熱供給量

期 間	I (7/25~ 8/7)	II (8/7~ 8/22)	III (8/22~ 9/5)	IV (9/5~ 9/25)
① $S_1 \int (c_{12} \cdot d\eta_1 / dt) dt$ (10^7 kg)	1.594	-2.492	3.562	2.589
② $V_1 d c_1$ (10^7 kg)	6.047	-16.436	9.930	7.298
③ $\bar{c}_{12}$ (‰)	33.34	31.40	32.40	33.16
④ $\bar{R}$ (10^8 m ³ /h)	-4.280	12.337	-5.850	-5.372
⑤ $c_p S_1 \int (T_{12} \cdot d\eta_1 / dt) dt$ (10^{10} Kcal)	-1.688	-5.760	-4.608	-4.151
⑥ $c_p V_1 d T_1$ (10^{10} Kcal)	9.504	6.336	-1.337	-6.481
⑦ $\bar{T}_{12}$ (°C)	28.15	28.32	28.52	28.27
⑧ q (Kcal/m ² /h)	23.183	66.700	-6.766	-16.868
⑨ 平均日降水量 (mm/day)	2.73	38.50	1.32	2.79

注: $S_1=10.275 \times 10^6$ m³, $V_1=85.162 \times 10^6$ m³
 $c_p=1000$ Kcal/°C/m³

べてを海面からの蒸発量とみなすには大き過ぎる。一方、期間Ⅱの淡水供給量 $12.337 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{h}$ は合理式の流出係数 0.33 に相当し、やや小さい。

⑤は式(5)の第2項で、湾口を通じ潮流によって輸送された熱量である。全期間とも負値で、熱量は潮流によって湾内から湾外に持ち出されたことを意味する。このことは図-3の湾内の水温が湾外よりも常に高かったことと符合する。

⑥は湾口での連続観測による水温の期間平均値である。

⑦は式(5)に基づく湾への熱供給量である。期間Ⅲ、Ⅳの負値は気温の低下に伴い海水が冷却されたことになる。降水量の多い期間Ⅱが、少ない期間Ⅰよりも熱供給量が多いのは雨水による熱供給が大きく、かつ気化による冷却が少なかったと考えられる。

5. ボックスモデルによる輸送係数と淡水供給量

表-1の塩分と水温が期間内で直線的に変化したと仮定して、表-2の熱供給量 q を式(6)に代入し、輸送係数 Q_{12} 、 Q_{21} と淡水供給量 $\bar{R}_1 (=Q_{12}-Q_{21})$ を求めた。結果は表-3の(a)である。 $\bar{R}$ は表-2の $\bar{R}$ である。 $\bar{R}_1$ と $\bar{R}$ は一致するのが望ましい。両者の差を見ると、期間ⅠとⅢではきわめて小さいが、Ⅱでは2割程度、Ⅳでは4割程度でやや大きい。差の生じる原因の一つは表-2の熱供給量の推算誤差が考えられる。そして q は塩分と水温の連続観測から求めたもので、両者の差はこれらの観測誤差とも関係する。一般にこの種の観測では水温の方が塩分よりも精度は高い。よって精度の高い水温のみの観測値を用い熱供給量 q の推算を試みた。

Δt 期間に湾口を通じ湾内に流入する熱量は、湾口での水温の連続観測から求めたものと、一層1ボックスモ

デルから求めたものとは等しく、次式が成り立つ。

$$S_1 \int_0^{\Delta t} \left(T_{12} \frac{d\eta_1}{dt} \right) dt / \Delta T - \bar{R} \bar{T}_{12} = -T_1 Q_{12} + T_2 Q_{21} \quad \dots\dots\dots (8)$$

式(8)に $Q_{12}=Q_{21}+\bar{R}$ と式(6)の第1式を代入し、 $\bar{R}$ が Q_{21} に比べて微小であることを考慮し、次式が得られる。

$$Q_{21}=S_1 \int_0^{\Delta t} \left(T_{12} \frac{d\eta_1}{dt} \right) dt / (T_2-T_1) \Delta t \quad \dots\dots\dots (9)$$

すなわち、式(9)より Q_{21} を求め、式(6)の第1式と $Q_{12}=Q_{21}+\bar{R}$ より $\bar{R}$ を求めることにより、湾口での塩分の連続観測を用いることなく、式(5)より q が求まる。

表-3の(b)に示す q と $\bar{R}$ は上記手法により得た結果である。輸送係数と淡水供給量 $\bar{R}_1$ は式(6)より求めた結果である。期間Ⅱを除く他の3期間では、輸送係数は(a)に比べてやや増大し、蒸発量(淡水供給量)はやや減少しているものの、期間Ⅱでは輸送係数は3倍程度、淡水供給量は1.6倍程度と増大している。淡水供給量 $19.617 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{h}$ は合理式の流出係数 0.53 に相当する。これは起伏のある土地および樹林での流出係数 0.5~0.75⁵⁾の範囲で、妥当な結果である。よって、DO 負荷量の推算には(b)の輸送係数を用いることにする。

6. DO 負荷量の推算

表-1のDO濃度、表-3(b)の輸送係数を用い、式(7)に基づきDO負荷量 P を推算した。結果は表-4に示す。DO負荷量の主なものはプランクトン等による生産・消費、底泥での消費、養魚によるDO消費で、負値は生産よりも消費が上まわっていることを意味する。

表-1から分るように、全期間ともDO濃度は湾内よりも湾外の方が高い。また、湾内のDO濃度は観測日によって増減しているものの、表-4の負荷量ほどの減少はしていないことから、観測期間での浦之内湾のDOは、生産量よりも消費量が上まわっていて、不足分は海水流動に伴って湾口を通じ湾外からDOのが補給されていることが分る。これは夏季における内湾養殖漁場の一般的特性である⁶⁾。

7. むすび

得られた主な結果は次の通りである。

湾口での海水が均質とみなし得る場合には

① 湾への淡水供給量 $\bar{R}$ と熱供給量は、湾口での1点での塩分と水温の連続

表-3 ボックスモデルによる輸送係数 Q と淡水供給量 $\bar{R}_1$

期 間 (時 間)	(a)			(b)	
	q (Kcal/m ³ /h)	Q_{12} (10 ³ m ³ /h) Q_{21} (") $\bar{R}_1$ (")	$\bar{R}$ (10 ³ m ³ /h)	q (Kcal/m ² /h)	Q_{12} (10 ³ m ³ /h) Q_{21} (") $\bar{R}_1$ (")
Ⅰ (7/25~8/7) (312)	23.183 -4.280	80.430 84.383 -3.954	25.512	99.891 103.348 -3.456	
Ⅱ (8/7~8/22) (360)	66.700 12.337	75.528 59.415 16.113	86.768	230.343 210.916 19.426	
Ⅲ (8/22~9/5) (336)	-6.766 -5.850	133.150 138.907 -5.757	-6.613	134.031 139.764 -5.733	
Ⅳ (9/5~9/19) (336)	-16.868 -5.372	107.649 111.044 -3.395	-14.293	121.540 124.509 -2.969	

表-4 期間別 DO 負荷量

単位時間 あたり DO 負荷量	期 間	I	II	III	IV
		(7/25~ 8/7)	(8/7~ 8/22)	(8/22~ 9/5)	(9/5~ 9/19)
湾全体 (O_2 kg/h)		-426	-343	-186	-394
単位体積 (O_2 mmg/m ³ /h)		-5.00	-4.02	-2.18	-4.63

観測, 湾内水位の連続観測および湾内の塩分と水温の定期観測より, $\bar{R}$ については式 (3) で, q については式 (5) で推算でき, 必要条件ではあるがその精度を検定することができる。

② ①で塩分の連続観測が不可能な場合には, 式 (9) によれば, $\bar{R}$ と q を推算することができる。しかし, この場合には推算精度は検定することはできない。

③ q が与えられると, 式 (6) より塩分, 水温を指標として輸送係数が算定でき, 式 (7) より湾への DO 負荷量が推算できる。

浦之内湾については

④ 夏季, 成層の発達する小潮時においても, 湾口での塩分, 水温, DO の鉛直偏差はそれぞれ 0.1%, 0.3°C, 0.35 ppm と小さく, 湾口での海水はほぼ均質とみなし得る。

⑤ 降水量の少ない夏季においては, 淡水供給は流入量よりも流出量が上まわる。一方, 降水量が多いと, 仁淀川の河川水によって湾外の塩分は湾内よりも低くなることが示唆された。

⑥ 夏季においては, 湾内での DO は生産量よりも消費量が上まわっていて, 海水の流動により湾口を通じ, 湾外より DO が補給される。

本研究は高知県水産試験場のご協力の下, 科研費一般研究 B (代表者 畑幸彦教授) および鉄鋼業環境保全技術開発基金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。

参 考 文 献

- 1) 西条八束編: 内湾の環境科学上巻, 培風館, p. 153, 1984.
- 2) 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, 印刷中, 1986.
- 3) 土木学会編: 土木工学ハンドブック下巻, 技報堂, p. 2590, 1954.
- 4) 木村晴保・宗景志浩・渡辺久芳: ボックスモデル [II], 水産土木 Vol. 22, No. 2, pp. 66~67, 1986.
- 5) 土木学会編: 水理公式集, p. 155, 1985.
- 6) 高知水産試験場: 昭和 59 年度赤潮対策技術開発試験報告書, pp. 56~59, 1985.