

二層ボックスモデルによる浦の内湾の 海水交換と DO 負荷量について

宗 景 志 浩*・木 村 晴 保**

1. ま え が き

夏季の内湾は、密度成層の発達によって上下混合が阻止され、下層への溶存酸素 (DO) の補給がたたれる。しかも、水温上昇に伴って有機物の分解が活発化するため DO 消費はますます加速し、下層部では貧酸素水塊が大量に形成される¹⁾。一方、表層は Plankton の増殖と日射量の増大により、DO は過飽和となって海面を通じて大気へ溶出する。ボックスモデルによって漁場の環境容量評価に必要な DO 負荷量を推算し、さらに下層部の貧酸素層の動態をつかむためには、この不明瞭な大気への溶出の影響を除かねばならない。ここでは、まず拡散方程式に基づく二層 Box-Model を示し、湾口部での潮汐交換率、海水交換量および DO 輸送量を求めた。次に下層部の DO 負荷量の季節的変動を推算し、あわせて貧酸素水塊の形成機構について考察した。

浦の内湾の場合、ボックスモデルから有意で精度よい解を得るためには、湾内の塩分、水温、DO 以外に多く淡水供給量を正確に与えることが重要である^{2),3)}。図-1 にみられるように浦の内湾には5つの河川が流入しているものの、流量の計測はなされていない。淡水供給量は、流域面積と降水量とから推算することもできるが、適切な流出係数を与えることが難しい。そのため、前報²⁾では湾口部での塩分および湾内水位 (潮位) の連続

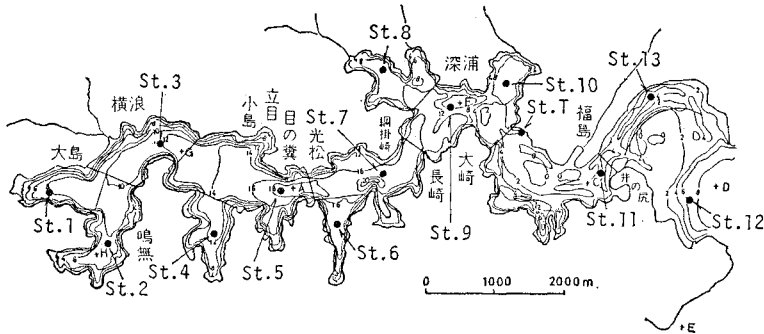


図-1 浦の内湾の深浅図と観測点、直線は測点の支配領域を示す

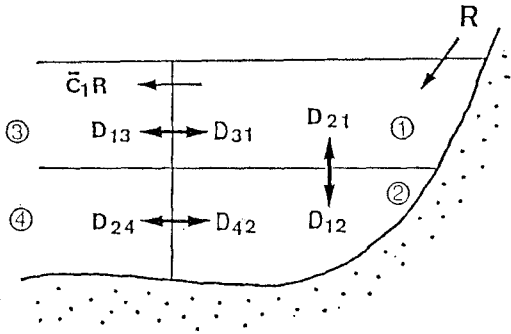


図-2 二層ボックスモデル模式図

観測と湾内の塩分の定期観測とから推算した。今回はこの手法による結果と高知市の降水量から求めた淡水供給量とを比較して流出係数を決めた。

2. 方 法

(1) 二層ボックスモデル基礎式

図-2 に示すように湾内を上下二層に分け、各ボックスを①、②、③、④と表示する、 Δt 期間に潮汐によって湾に流入した海水量を q_t 、上層①に流出入した量を $D_{13} = D_{31}$ 、下層②のそれを $D_{24} = D_{42}$ で表わし、それらの割合が①、②の体積 V_1, V_2 の比に等しく、

$$\left. \begin{aligned} D_{13} &= \frac{V_1}{(V_1 + V_2)} q_t \\ D_{24} &= \frac{V_2}{(V_1 + V_2)} q_t \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

で与えられるものとする。潮汐交換率 γ は上下で一様とし、海水交換量を $\gamma D_{13}, \gamma D_{24}$ で与える。また、①と②の物質輸送は拡散のみとし輸送量を $D_{12} = D_{21}$ で表わすと、①と②の物質収支式として次式を得る。

$$\left. \begin{aligned} V_1 \frac{dC_1}{dt} &= \gamma D_{13}(C_3 - C_1) \\ &\quad + D_{12}(C_2 - C_1) - C_1 R + P_1 \end{aligned} \right\}$$

* 正会員 農修 高知大学助教授 農学部栽培漁業学科
** 正会員 農博 高知大学教授 農学部栽培漁業学科

$$V_2 \frac{dC_2}{dt} = \gamma D_{24}(C_4 - C_2) + D_{12}(C_1 - C_2) + P_2 \quad (2)$$

ここに、 P_1 , P_2 を負荷量といい、それぞれのボックスの中で生成または消滅する量で海水の輸送以外による物質増加量を指す。また、 $C_1 \sim C_4$ は各ボックスの平均濃度を、 R は淡水供給量を表わす。 q_t は潮位差 η と湾内水面積 S とから与える。

(2) 淡水供給量の推算

浦の内湾は湾口が浅く(平均水深 4 m) 狭いため、潮汐による流速は速くかつ乱れが強い。そこで、湾口での海水は通常均質とみなすことができ、湾口を流出入する塩分は湾口部の一測点での塩分と湾内水位(潮位)の連続観測から推算できる。さらに定期観測から湾内の塩分変化量がわかれば、次式によって淡水供給量を推算することができる²⁾。

$$\bar{R} = \left[S \int_0^{dt} \left(C' \frac{d\eta}{dt} \right) dt - V \Delta C_I \right] / (\bar{C} dt) \quad (3)$$

ここに、 S , V はそれぞれ湾の水面積と容積、 $\bar{C}$ は湾口で dt 期間の平均塩分値、 C' は塩分の平均値からの偏差、 ΔC_I は湾内の dt 期間の塩分増加量、 η は湾内水位、 t は時間である。

また、湾に流入する河川の流域面積を A (km²)、平均日降水量を r (mm/day)、流出係数を f とすれば、湾への淡水供給量 R (m³/hr) は次式で求めることができる⁴⁾。

$$R = 0.0157 f r A \quad (4)$$

(3) 観 測

水温、塩分、DO、透明度などの定期観測は、'87 年 4 月から '88 年 2 月にかけて計 18 回実施した。10 月末まではほぼ 2 週間おきに、11 月以降は 1 ヶ月おきに、さらに 9~10 月は台風の前後も観測した。水質の日変化による誤差をできるだけ抑えるため、観測日は小潮日に設定した。観測点は図-1 に示す St. 1~13 で、多項目水質測定器 (Speedy-Seven) を用いて 0.5 m 間隔で海底まで測定した。

連続観測では、湾口部 St. 11 の底上 1 m に水温、塩分センサーを固定し、St. T には水圧式潮位計を設置して、それぞれ 10 分および 5 分間隔で記録した。これらの観測に用いた記録装置は、それぞれの電圧出力を A/D 変換しデジタル記録するもので、水晶式タイマーを内蔵するため記録時間のずれは無視できる。

3. 観 測 結 果

(1) 淡水供給量

高知市の日降水量から、定期観測した期間 dt ごとの平均日降水量 r を求め、式 (4) により淡水供給量 R を推算した。ただし、流域面積 A は 45×10^6 m²、流出係数 f は 0.5 とした。

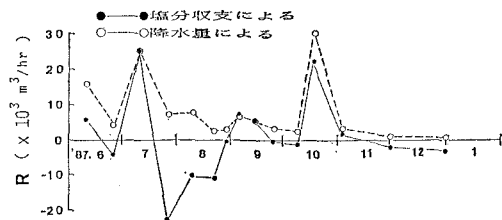


図-3 淡水供給量の推算値

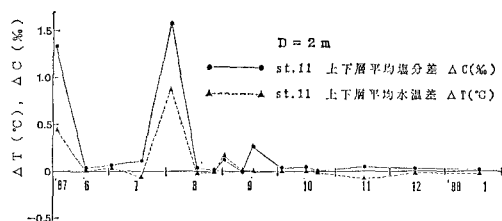


図-4 St. 11 の上下層の塩分、水温差

一方、式 (3) に基づく淡水供給量は、 $S \int (C' d\eta/dt) dt$ を St. 11 での塩分と St. T での湾内水位の連続観測から、 ΔC_I を湾内塩分の定期観測からそれぞれ求めて推算した。これらの結果を図-3 に示した。

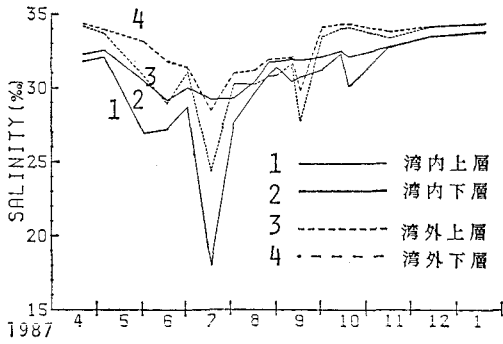
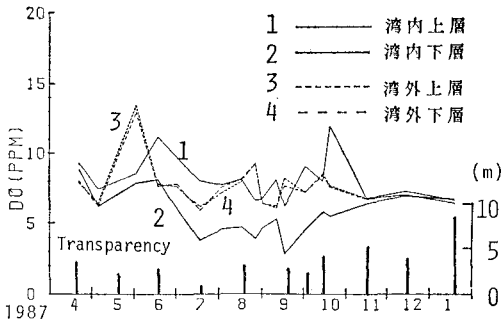
塩分収支から推算した値は、7 月から 8 月にかけて、蒸発量のみでは説明できない大きな負値となっている。この原因として、図-4 に示すように上下層の塩分、水温差が大きく、湾口での海水が均質とみなし得なかったことによるものと考えられる。逆に上下層での差が少なく海水が均質とみなされるような期間では両者の淡水供給量はきわめてよく一致した。つまり浦の内湾への淡水供給量 R は、降水量には高知市の資料を用い、流域面積 A を 45×10^6 m²、流出係数 f を 0.5 とし式 (5) でもって相当の精度で推算できるものと思われる。当然、降水量の少ない期間では蒸発量が流入量を上回ることも十分考えられる。ちなみに、流出係数 0.5 は起伏のある土地および樹林での流出係数 0.5~0.75⁴⁾ の範囲に近く、妥当な結果と言える。

(2) 湾内外の塩分、DO

湾内を St. 1~11、湾外を St. 12 とし、上層厚を 2 m とし求めた塩分および DO の体積平均値の季節変化を図-5, 6 に示した。

湾内上層部の塩分は、7 月および 10 月の中旬に見られるように、集中的な降雨の影響を受けて短期間に低下するものの、10 日間程度ですみやかに回復する。一方、下層部は 5 月から 6 月にかけての長雨に追従し、湾外とはほぼ同ような勾配で塩分低下が起こるが、集中的な降雨にはほとんど影響を受けない。

DO 濃度は 5 月頃まで上昇するが、6 月から 7 月にかけて急激に低下する。下層部は 7 月から 9 月にかけて他

図-5 湾内外の平均塩分 ($D=2\text{ m}$)図-6 湾内外の平均 DO ($D=2\text{ m}$) と透明度

のボックスに比較して特に低く、4 ppm 程度で推移する。さらに、10 m 以深では 2 ppm 以下となり、海底は生物の息できる状態ではない。しかし、湾外および湾内上層は常時 7~10 ppm で、5~6 月には晴天が続けば容易に 10 ppm 以上となる。11 月以後は鉛直循環が活発となるため、混合を受け上下層とも一様に 6 ppm 程度となる。

(3) 透明度

St. 5 における透明度を図-6 に示した。湾内の透明度は 1~2 月には 8 m と最も高く、3 月頃から低下し始め 5~9 月には 2~3 m となる。これらの季節変化は下層部の DO 濃度のそれとよく対応していた。

4. 計算結果と考察

二層モデルでは、上層厚 D を 2 m とし計算を行った。観測を行なった 17 期間のうち、5 期間は γ , D_{12} , P_1 および P_2 のいずれかで明らかに不自然と思われる解となった。それらは 8 月中旬から 10 月中旬にかけて複雑な塩分変化を示し、湾内外で変化の傾向が異なるような期間に集中した。これらを除いた残る 12 期間についての潮汐交換率、海水交換量、DO 輸送量および DO 負荷量の季節変化をそれぞれ図-8, 9, 10 に示した。

(1) 潮汐交換率 (図-8)

潮汐交換率 γ は、7 月下旬~8 月上旬頃 0.3~0.25 と

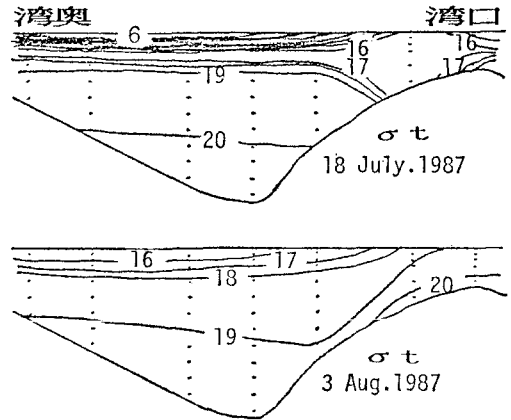


図-7 降雨期と降雨後の密度縦断分布

大きく、10 月~12 月は 0.1~0.05 と小さかった。つまり、潮汐による湾内外の海水交換量は秋冬季的鉛直混合期よりも夏季の成層期が 2 倍以上大きい。この特徴は宇野木ら⁵⁾による三河湾、東京湾 (いずれも一層モデルで、交換の強さを輸送係数 ($\text{km}^2/\text{月}$) で表現したもの) の場合と類似した。

潮汐交換率 γ は降雨期には小さく、降雨後の塩分回復期 (7 月 18 日~8 月 3 日) に大きくなった。この原因を図-7 に示す 7 月 18 日 (降雨期) と 8 月 3 日 (降雨後) の密度縦断分布から探る。すなわち、降雨期の上層は湾内外とも低密度で、等密度線は水平的である。潮位変化に伴って湾口部で海水の混合がみられるものの、湾内の下層水との交換には結びついていない。一方、降雨後は湾外水は湾内下層水より高密度で、等密度線には強い傾斜がみられる。この海水は湾内下層部へ密度流となって侵入し、その結果、鉛直循環が形成され海水交換が促進されたと考えられる。

(2) 海水交換量と DO の輸送量 (図-9)

湾口での海水交換量 (水平交換量 $= \gamma D_{12}$) は、潮汐交換率 γ の変化に対応するため夏季に大きく秋冬季に小さい。これによって下層へ輸送される DO 量は、下層部の単位体積当たり夏季 15 $\text{mg}/\text{m}^3/\text{hr}$ と多く、秋冬季には 4 $\text{mg}/\text{m}^3/\text{hr}$ と少なくなる。一方、海水の鉛直交換量 D_{12} は、秋冬季に大きくなり鉛直混合が活発となることを示しているものの、上層から下層へ運ばれる DO 量は 4~6 $\text{mg}/\text{m}^3/\text{hr}$ で、他の季節に比較して若干多い程度であった。

(3) DO 負荷量の季節変化 (図-10)

植物 Plankton による DO 生産量を A 、海水および底泥の中の微生物や Plankton による DO 消費量を B 、魚介の呼吸による消費を C とすると、下層部の DO 負荷量 P は

$$P = A - B - C \quad \dots\dots\dots (5)$$

である。

DO 負荷量は上下層とも夏季(下層で $-20 \text{ mg/m}^3/\text{hr}$)に増大し, 秋冬季(下層で $-5 \text{ mg/m}^3/\text{hr}$)に減少する。また, 周年を通して上層では消費よりも生産が上回り, 下層では生産よりも消費が上回っている。夏季の下層での DO 負荷量は三河湾の場合 ($-1.4 \sim -4.3 \text{ g/m}^2/\text{day}$ で, 平均下層厚を 7.5 m とすれば $-7.8 \sim -23.9 \text{ mg/m}^3/\text{hr}$ に当る)¹⁾ とほぼ等しい。

(4) 貧酸素水塊の形成機構

木村ら⁹⁾は, 海水および底泥の酸素消費速度を水温と海水の DO 濃度との関数で表わした, その関係式を用いて現場水温に対応する DO 消費量を求め, 季節変化を図-10 の ■ 印で示した。これは式(5)の B に相当するものである。8~9 月は水温が高いにもかかわらず海水水中の DO 濃度が低い。そのため DO 消費量は最小で, むしろ DO 濃度が高い5~6 月および10~11 月頃大きくなる。

図-6 に示したように, 透明度は3 月から6 月にかけて低下し, 表層では Plankton の増殖と DO の増加がみられる。一方, 下層では7 月中旬ごろまで湾外からも表層からも補給されず, 加えて透明度の低下により生産も弱まるため, DO は減少し続け貧酸素水塊が形成される。

しかし, 8 月になると海水交換がよくなり, 湾外からの DO 補給が始まるため DO の一方的な減少傾向は停止し, 9 月末頃までは低濃度でありながらほぼ一定で推移する。つまり, この場合は海水交換による DO 補給量 D_{DO} と負荷量 P とはバランスしており,

$$D_{DO} + A - B - C = 0 \dots\dots(6)$$

で表わされる。また, 図-10 によれば, DO 消費量 B は負荷量 P と一致しており, さらに下層では魚介の呼吸による消費 C は無視できるから, 式(5)より $A=0$ となる。従って, 式(6)より $D_{DO}=B$ となる。これより, 8~9 月の成層期には, DO の補給が周年を通じ最も盛んでありながら, また, 微生物による消費が弱まっているにもかかわらずそれらは消費され尽くし, さらに Plankton による生産もないため DO 濃度は上昇しないと考えられる。

一方, 10 月以後は水温が低下するにもかかわらず DO 消費量は増加し, しかも海水交換による DO 補給は減少する。しかし, DO 負荷量はかえって減少し, 最寒期になると消費と生産がバランスしてくる。これは, 成層期の強い海水交換により, 表層では Plankton, 懸濁物などが湾外へ運び出され, 下層では DO 補給により有機物の分解が進むようになるため, 透明度が急速に高くなって植物 Plankton による DO 生産が再び増大したためと考

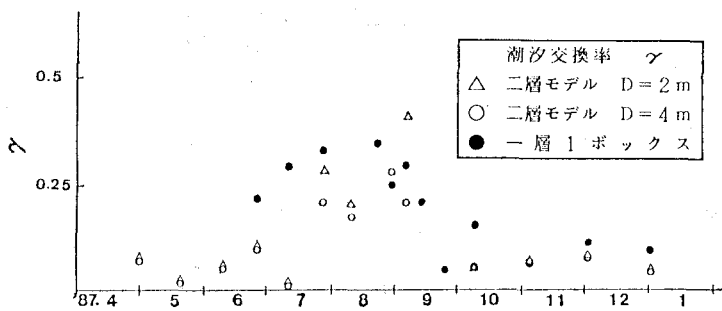


図-8 一層および二層モデルの潮汐交換率 γ

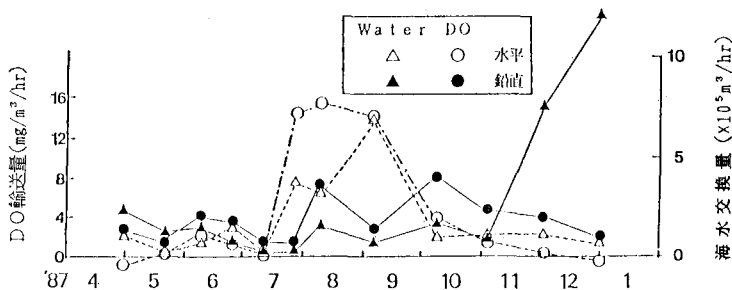


図-9 海水交換量と DO 輸送量の水平および鉛直成分

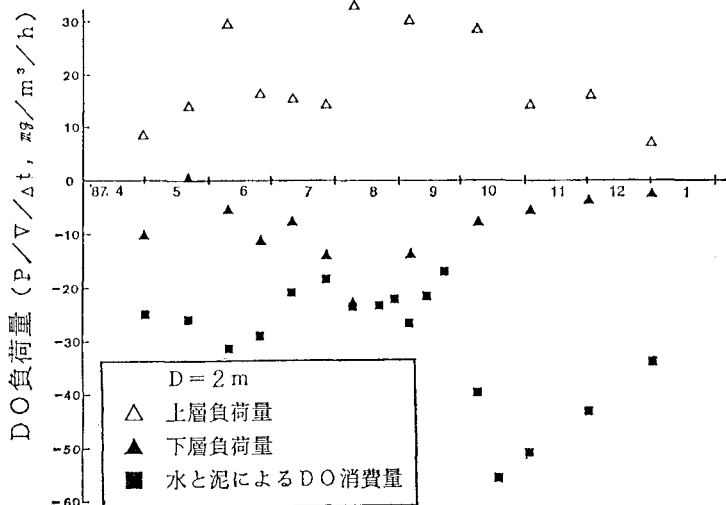


図-10 上下層の DO 負荷量と下層の DO 消費速度

えられる。

5. ま と め

'87年4月～'88年2月にわたる水温、塩分、DOなどの観測資料を用いて式(2)で示す二層ボックスモデルにより浦の内湾の潮汐交換率、海水交換量、DO輸送量、DO負荷量を算出した。浦の内湾にボックスモデルを適用する場合は、特に淡水供給量の与え方が難しい。そこで、湾口部での水温、塩分と潮位の連続観測から求めた淡水供給量と高知市の降水量から推算した値とを比較して流出係数を決めた。

得られた主な結果は以下の通りである。

① 湾口部での塩分が上下で同様とみなされる場合には、塩分収支と降水量から推算した淡水供給量はきわめてよく一致した。

② 成層期の潮汐交換率 γ は0.25～0.3程度で、秋冬の鉛直混合期の2倍以上であった。これは、夏季の湾外の海水密度が湾内より高いため、密度流となって流入し鉛直循環が形成されることによる。一方、秋冬季と降雨期には表層密度は湾内外で同様であるため、密度流が発達せず交換が進まない。

③ 湾口での海水交換量(水平交換量 $=\gamma D_{42}$)は、潮汐交換率 γ の変化に対応するため、夏季に大きく秋冬季に小さい。一方、鉛直交換量 D_{12} は鉛直混合が活発となる秋冬季に大きくなる。

④ 海水交換によって湾内下層へ輸送されるDO量は、夏季の成層期に多く秋冬季にはむしろ少ない。

⑤ DO負荷量は上下層とも夏季に増大し、秋冬季に減少する。また、周年を通して上層では消費よりも生産が上回り、下層では生産よりも消費が上回っている。

⑥ 5月から7月にかけて、表層では植物Planktonの著しい増殖により透明度が低下する。そのため下層では光合成が衰え、さらに水温上昇に伴う有機物の分解が活発化するため急激に貧酸素化が進む。

⑦ 8～9月の成層期は海水交換が盛んで、DOの補給が増大するにもかかわらず貧酸素化が容易に改善されない。この原因として微生物による消費以外に、透明度低下によるDO生産の減少が挙げられる。一方、秋冬季には、透明度の上昇に伴ってDO生産が再び増加し貧酸素化が解消される。

最後に、貴重な観測資料を提供して頂いた高知県水産試験場に対し、深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 佐々木克之・松村卓月・松川康夫・鈴木輝明：三河湾の夏季の海水交換と窒素の循環，沿岸海洋研究ノート，第17巻第2号，pp. 89～98，1980。
- 2) 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の内湾のDO負荷量の推算，第33回海岸工学講演会論文集，pp. 621～625，1986。
- 3) 宇野木早苗：海水交換とその素過程について，沿岸海洋研究ノート，第17巻第2号，pp. 89～98，1980。
- 4) 土木学会編：水理公式集，p. 155，1985。
- 5) 宇野木早苗・岸野元彰：大局的に見た内湾の海水交換，第24回海岸工学講演会論文集，pp. 486～490，1977。
- 6) 高知県水産試験場：昭和62年度赤潮対策技術開発試験報告書（印刷中），1988。