

浦の内湾の窒素収支と富栄養化機構に関する研究

宗景志浩*・安岡卓治**・木村晴保***

1. 緒 言

浦の内湾は、昭和40年頃から始まったハマチ養殖により富栄養化が急速に進行した。ハマチ養殖は昭和50年代をピークに、その後生産調整が行われ、現在は最盛期の1/2程度まで縮小されている。また、餌料の改良や底質改善なども試みられてはいるが、なお夏季になると貧酸素化や赤潮が頻発し、時にはこれらが原因で養殖ハマチやアサリの大量斃死が発生している（宗景ら、1991）。

そこで、ここでは総窒素（T-N）を指標とし、湾外水の差し込みの影響も考慮した物質収支を解析し、浦の内湾の富栄養化のメカニズムを調べた。

2. 方 法

（1）窒素負荷の算定法

a) 陸上からの負荷

浦の内湾に流入する陸上の窒素発生源は、沿岸集落の生活雑排水、果樹園、若干の畜産・養鶏、および山林である。これら発生源を基に原単位法（中西・浮田、1979）によって年間窒素発生量を求め、結果を表-1に示した。このうち生活排水は周年を通じて同じ負荷があるものとし、これ以外の陸上負荷は、降水量に比例するものとして月毎に算出した。

b) 養殖に伴う負荷

浦の内湾での養殖漁業は、魚類養殖、真珠養殖およびヒトエグサ養殖がある。このうち魚類養殖はハマチ養殖が主体で、昭和62年度は49経営体で650tの生産があった（高知県水産試験場、1988）。ハマチ養殖は他種養殖に比べて規模が最も大きく、負荷量は圧倒的に多い。ここでは、ハマチ養殖に伴う負荷量の算定法について述べる。

養殖による窒素負荷は、飼料として投与した窒素量に対し、魚体に蓄積された窒素以外はすべて海水中に負荷されるものとする。投与窒素量は、モデル生簀における飼育記録を基に期間投餌量に飼料魚種毎の窒素含量を考

慮して算出し、蓄積窒素量は増重量と成長期別の魚体窒素含量から求めた。海水中への窒素負荷量はこれらの差で求め、月毎の窒素負荷量を算出した。

養殖全期間の業者平均負荷量は4430 kg、湾内全体（45経営体）では199350 kgの窒素が負荷されたことになる。

c) 底泥からの溶出

貧酸素化が進むと底泥表面から栄養塩が溶出する。溶出量は富栄養化の強度や水温（季節）によってかなり変動があると言われている。ここでは、昭和60年8月、62年9月、10月、12月（高知県水産試験場、1986～1988）、および平成4年4月、5月、6月の実測結果を利用した。これらの結果を図-1にまとめて示した。これらの測定は湾内数カ所でドーム法、コア法を用いて行ったもので、実測点の支配面積を考慮して湾全体の溶出量を算出した。

d) 沈降による消失

水中に負荷された有機物は、分解を受けながら湾外に輸送されたり、生物に取り込まれ、また1部は沈降によって湾内水から除去される。沈降量を算出するために、昭和60年8月29日、9月27日および11月19日に、養殖区を含め湾内数点で観測を行った（高知県水産試験場、1988）。口径75 mm、深さ23 cmの沈降物捕集器を海底上2 mに設置し、24時間後に捕集器を回収して容器内の上澄みを捨て、乾燥秤量後T-Nを分析した。観測から求めた沈降速度と底上1～2 mのT-N濃度との関係を調べたところ、沈降量は濃度にほぼ比例した。この関係を用いて、各月、各栄養塩観測点毎に沈降量を推算した。

e) 巻き上げによる負荷

底泥表面に蓄積された物質は、湾外水の差し込み（密

表-1 陸上からの窒素負荷

発生起源	規模(単位)	窒素負荷 T-N (kg/年)
人口 (生活用水)	4248(人)	7984
水田	171 (ha)	4309
畑	22 (ha)	273
果樹	87 (ha)	5812
家畜	15(頭)	2070
山林	33 (km ²)	28970
合計		49418

* 正会員 農博 高知大学助教授 農学部生産環境工学科

** 新日本気象海洋株式会社

*** 正会員 農博 高知大学教授 農学部生産環境工学科

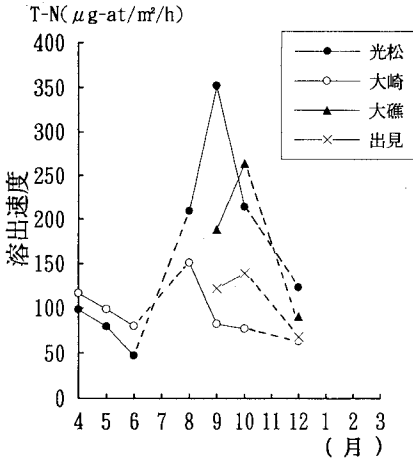


図-1 T-N 溶出速度

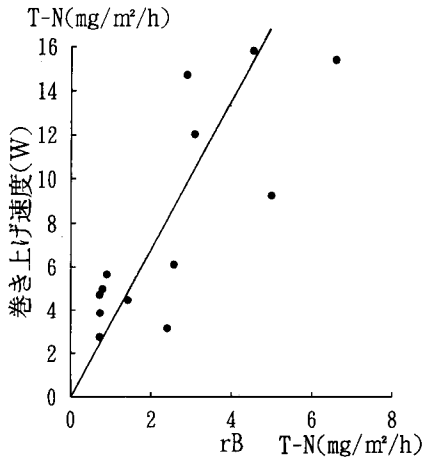


図-2 T-N 巻き上げ速度

度流)や鉛直混合によって巻き上げられ、再び海水中に回帰する。大規模な差し込み現象が起こった場合は、沈降を上まわる巻き上げが生じ、逆に底部からの負荷となる。

巻き上げ量は、底泥が任意の泥深まで堆積する期間を求め、その間に沈降した窒素量と堆積物中の現存窒素量の差として求める。これらの測定は沈降速度の観測点で同時期に行った(高知県水産試験場, 1986)。巻き上げ量は、差し込みや沈降量(堆積量)に影響される。差し込みの効果を海水交換率 r で与え、巻き上げ量とこれらの関係を図-2 に示した。パラツキはあるが、巻き上げ速度 W を次式で表す。

$$W = arB \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 B は捕集器で得られた沈降速度、 a は比例常数と

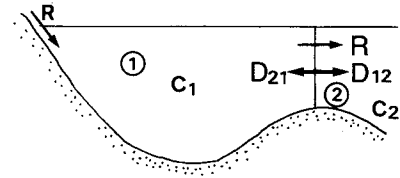


図-3 一層モデル (1-Box)

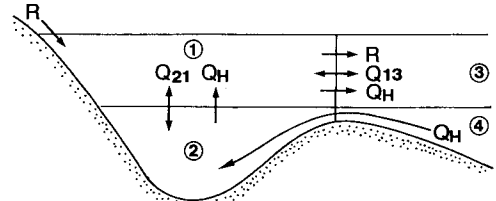


図-4 差し込みモデル

する。この関係を用いて各月、各観測点毎の巻き上げ量を推算した。

f) あさりなどに取り込まれる窒素量

湾口部の浅瀬では、あさり漁が周年にわたって行われている。漁獲高は昭和 60 年代の初頭まで伸び続け(高知県水産試験場, 1983), 2300 t (業者取扱高) 程度を維持している。そのほかにも、真珠 (90 万個)、カキ (4 t)、ヒトエグサ (生のり 30 t) などが生産されている(高知県水産試験場, 1987)。アサリは、殻付きあさりの 20~30% が可食部で、その 2% が全窒素である(須山・鴻巣, 1991)。これらの漁獲物に含まれる窒素量を推算すると、アサリによるものが 96% を占め、全窒素にして年間約 12 t の消失が見込まれる。

(2) 物質収支モデル

a) 一層モデル (1-Box)

図-3 のように湾口部の井尻・福島で外海と区切り、湾内を①、湾外を②と表示とする。つぎに湾内の容積を V 、 Δt 時間に湾内に流出した海水量を q_t ($=D_{12}=D_{21}$)、海水交換率を r とすると、湾内における物質収支式は、次式となる。

$$V \frac{dC_1}{dt} = r q_t (C_2 - C_1) - C_1 R + P \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで C_1 、 C_2 は各ボックスの物質濃度、 R は Δt 時間の淡水供給量である。それぞれ観測値より与え、 q_t は潮位差 η と湾内面積より与える。また、 P は湾内①における総 T-N 負荷量 (供給 + 消失) である。

b) 差し込みモデル

浦の内湾の海水交換率は対流期には 0.06~0.1 にすぎないが、成層期には 0.2~0.3 に上昇する。これは、大潮期にしばしば発達する湾外水の差し込み (密度流) に起

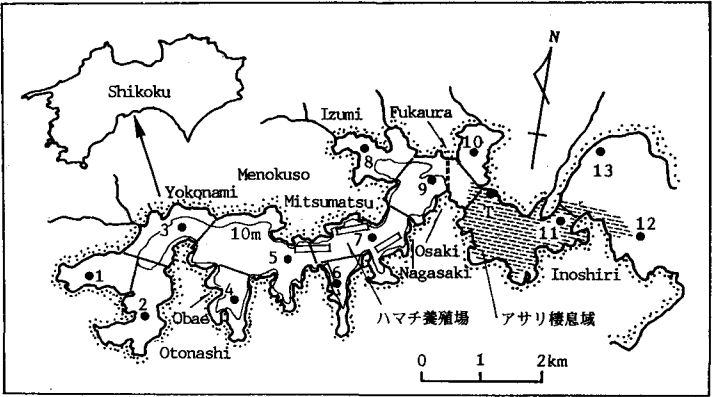


図-5 浦の内湾の地形と観測点および支配領域

3. 結果と考察

(1) T-Nの沈降、巻き上げおよび沈出

実測によって求めた沈降速度と巻き上げ速度を用いて湾全体の沈降量および巻き上げ量を推算し、結果を図-6に示した。沈降物質は、流れなどによって再び巻き上げられるが、今回の測定で用いた補集器は口径に比較して深さが大きいため、一旦採捕されたものは散逸することはない。従って、実測値はいわば見かけの沈降量で、巻き上げの効果は考慮されていない。そこで、

因するもので、夏季の浦の内湾の物質輸送を支配する(宗景・木村, 1990)。

図-4に示すように、湾内外の上層を①③、下層を②④とする。差し込みによる海水の流れは、④から②に流入し、同量の海水が②から①へ上昇し、さらに①から③へ流出する移流として扱う。差し込みの流量を Q_H 、潮汐による海水交換率を r 、海水交換量を $q_t (= Q_{13} = Q_{31})$ 、鉛直混合量を $Q_{12} (= Q_{21})$ とすると、上下層における物質収支は次式となる。

$$V_1 \frac{dC_1}{dt} = r q_t (C_3 - C_1) + Q_{12} (C_2 - C_1) + Q_H (C_2 - C_1) - C_1 R + P_1 \dots\dots\dots (3)$$

$$V_2 \frac{dC_2}{dt} = Q_{12} (C_1 - C_2) + Q_H (C_4 - C_2) + P_2 \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 R は淡水供給量、 V は容積、 C は物質濃度、 P は負荷量である。添え字1, 2および3, 4は、それぞれ湾内と湾外の上下層を示す。潮汐のみによる海水交換率 r を0.06~0.1とし、各観測期の塩分濃度および淡水供給量を与えると、 Q_{12} 、 Q_H を得る。さらにこれらの値とT-N濃度を用いて負荷量 P_1 、 P_2 を求める。また、湾口を通して輸送される物質量は次式となる。

$$T_{NH} = r q_t (C_3 - C_1) + Q_H (C_4 - C_1) - C_1 R \dots\dots (5)$$

c) 基礎資料

ボックスモデルの計算に必要な塩分、栄養塩は1988年4月から翌3月にかけて行った観測データを用いた(高知県水産試験場, 1988)。図-5に観測点と支配領域を示した。塩分は水面から0.5 m間隔、栄養塩は2 m間隔で実測し、その支配面積ごとに体積平均を算出した。淡水供給量は、高知市の降水量を、潮位差は桂浜の潮位データを用いた(宗景・木村, 1990)。

沈降と巻き上げの差として求めた実質の沈降量 B' を同図に示した。

見かけの沈降量は6月ごろから増大し始め9~11月に最大値(6~8 kg-at/h)をとる。12月ごろから再び減少し、冬から春には2~3 kg-at/hとなる。これらの変化は、湾内のT-N総量の季節変化の傾向と類似した。

一方、巻き上げ量も6月ごろから増加し始め、9月に最大となる。これは、海水交換率に比例するとしたことによる。実質の沈降量 B' は、T-N濃度が比較的高く差し込みも発達しない10~12月に最大(4 kg-at/h)となり、差し込みのある7~8月には、むしろ巻き上げが沈降を上回る。

以上のことから、差し込み期には巻き上げにより底泥から湾内水に回帰されるが、それ以外の時期には沈降に

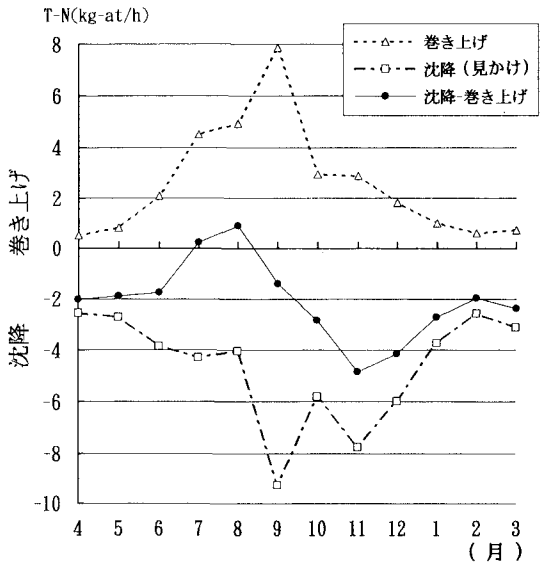


図-6 T-Nの巻き上げ量および沈降量

より2~4 kg-at/h の値で失われ、一年間に252 t の窒素が失われる。実質の沈降量 B' を単位面積当りに換算すると4.8~7.2 mg/m²/h となり、大阪湾(門谷ら, 1991) の1.6~2.5 mg/m²/h, 三河湾(佐々木ら, 1980) の2.9~5.9 mg/m²/h よりやや大きい。

底泥から溶出する T-N 負荷は、8~10 月にかけて大きく、12~1 月にかけて小さかった。これは、夏季には水温が高く、かつ底泥直上水の貧酸素化が進み T-N が溶出しやすくなるためで、冬季には鉛直混合により酸素が底層まで補給され酸化層が形成され溶出しにくくなるためである。年間平均すると溶出による負荷は0.61 kg-at/h, 総計では75 t であった。平均溶出量を単位面積当りに換算すると1.4~4.2 mg/m²/h であり、三河湾(佐々木ら, 1980) における底泥からの溶出量2 mg/m²/h と同程度であった。

(2) 総 T-N 負荷量とその内訳

陸上、養殖、沈降、巻き上げ、溶出、あさり漁を起源とする T-N 負荷をそれぞれ L, F, W, B, U, A とすると、負荷量の総和 P' は次式となる。

$$P' = L + F - W + B + U - A \dots\dots\dots (6)$$

ここに、正は供給、負は消失を意味する。総負荷量 P' は、一層(1-Box)および差し込みモデルによる物質収支式から求めた負荷量 P に一致しなければならない。これらを月毎に求めて図-7 に示した。

2つの物質収支モデルから推算した負荷量は周年にわたってかなり近似したものの、積算法による対流期の値は、これらに比較してやや小さい。しかし、総 T-N 負荷量の季節変化の傾向は類似し、いずれの場合も夏に増加し、冬に減少する傾向となった。

積算法による T-N 負荷量の内訳を図-8 に示した。①春は海水交換や沈降による消失が活発でない。しかし、養殖開始前であり投餌に伴う負荷も少なく、かつ底泥からの溶出も少ないため、供給と消失とがほぼつりあっている。②養殖や底泥からの溶出による供給は初夏から増加し始め、秋にそれぞれ最大(4.6, 1.15 kg-at/h)となる。しかしながら、③総 T-N 負荷は夏に最大(5.5~7 kg-at/h)となった。これは、夏に差し込みに伴う底層水の巻き上げにより底泥からの供給が増えるためと、秋に沈降が活発化し供給の約半分が失われるためである。④この沈降による消失は晩秋にピーク(-4~-5 kg-at/h)を迎える。その後、⑤消失量は供給量を上回るようになり、冬には総 T-N 負荷が最小(-1~-2.5 kg-at/h)となって、湾内は浄化の方向に向かう。

(3) 海水交換による T-N の輸送

湾口を通して輸送される T-N 量を図-9 に示した。いずれのモデルでも湾内の T-N 濃度の増加する4月から10月までは湾外への輸送が増大し、対流期には減少す

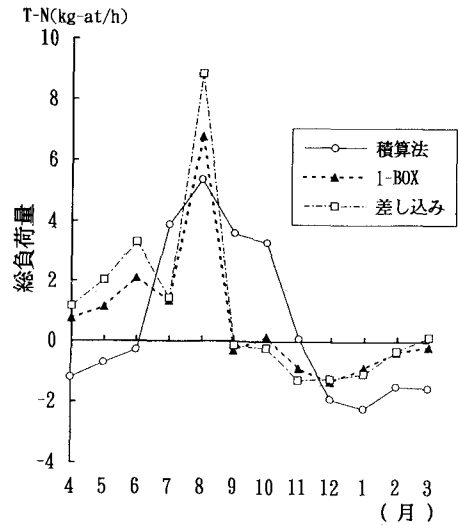


図-7 T-N 総負荷量の季節変化

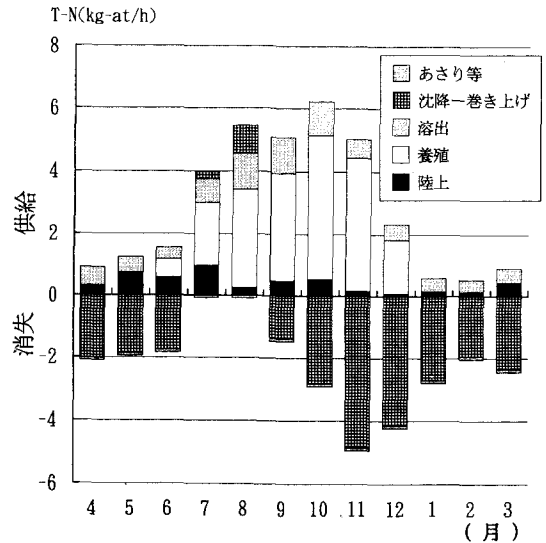


図-8 T-N 収支の季節変化

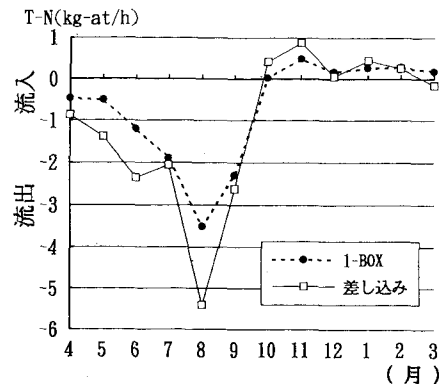


図-9 T-N 輸送量の季節変化

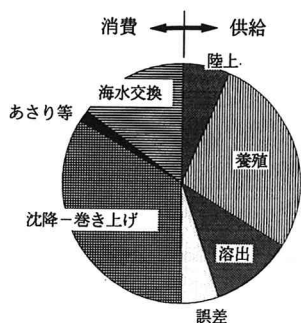


図-10 浦の内湾の T-N 収支

る。成層期の増大は湾外水の差し込みに起因するもので、8～9月には最大(3～6 kg-at/h)となる。これにより、湾内 T-N 総量は一時的にそれ以前の 60～80 %に減少する。また差し込みは、底層から巻き上げを起こし、底泥表面の T-N を海水中に回帰させるので、結果的には湾内底泥部を浄化することにもなる。

(4) T-N 収支

海水交換による輸送も含めて、供給および消失の年間総和を図-10 に示した。これによると、①供給の最大の要因は養殖であり、年間総供給負荷量の 54 % (200 t) を占めていた。また、消失の最大要因は沈降によるものであり、消失全体の 68 % (250 t) を占めていた。②底泥からの溶出や陸上からの供給(相当)は海水交換とアサリによってほぼ消費(浄化)されるが、養殖による負荷(相当)は沈降し、海水中からは失われる。しかし、その多くは海底に堆積するものと思われる。

4. 結 言

浦の内湾における T-N 収支解析を原単位ごとの積算

法と物質収支モデルを併用して行った。浦の内湾の T-N の供給の最大要因は養殖によるもので、全供給の 54 % を占め、それとほぼ等量が沈降によって失われる。養殖以外による供給分は海水交換やアサリ等によって失われるが、沈降の大部分は海底に堆積され、夏の差し込みによって再び巻き上げられ、水質の悪化を招く。4～9月の成層期には T-N は、湾内から湾外へ輸送される。とくに 8～9月の流出は、主として湾外水の差し込みに起因するもので、年間輸送(流出)量の 57 % を占める。

最後に、本研究の一部は文部省科学研究費(一般(C), No. 04650465)の補助を受けたことを付記する。

参 考 文 献

- 高知県水産試験場(1983): 浦の内湾のアサリ生態調査, 昭和 57 年度事業報告書, 第 80 巻, No. 18, pp. 19-23.
- 高知県水産試験場(1986): 昭和 60 年度赤潮対策技術開発試験報告書, 92 p.
- 高知県水産試験場(1987): 昭和 61 年度赤潮対策技術開発試験報告書, 105 p.
- 高知県水産試験場(1988): 昭和 62 年度赤潮対策技術開発試験報告書, 146 p.
- 佐々木克之, 松村皐月, 松川康夫, 鈴木輝明(1980): 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, 2 号, pp. 99-107.
- 須山三千三・鴻巣章二(1991): 水産食品学, 恒星社厚生閣, pp. 49.
- 中西弘・浮田正夫(1979): 内湾における汚濁負荷と物質収支, 水域の自浄作用と浄化, 日本水産学会編, pp. 54-69.
- 宗景志浩・木村晴保(1990): 差し込み現象が浦の内湾の海洋環境に及ぼす影響, 海岸工学論文集, 第 37 巻, pp. 779-783.
- 宗景志浩・木村晴保・村田宏・森山貴光・田島健司(1991): 浦の内湾における湾外水の差し込み現象と貧酸素水塊の消長について, 日本水産学会誌, 第 57 巻, 9 号, pp. 1635-1643.
- 門谷茂, 三島康史, 岡市友利(1991): 大阪湾の富栄養化の現状と生物による N と P の循環, 沿岸海洋研究ノート, 第 29 巻, 1 号, pp. 13-27.