

# 伊勢湾の生態系の回復に関する研究（抄録）

山田浩且・広瀬和久・水野知巳・坂口研一・宮本敦史・西村昭史

工業研究部・農業研究部・京都大学・三重大学・東海大学

## 目 的

伊勢湾の物質循環（汚濁負荷および干潟、藻場、河口湿地の自然浄化量等）の現状や生態系に大きな影響を及ぼす貧酸素水塊の形成機構等、伊勢湾生態系の現状に関する知見を収集し、汚濁負荷の削減策を具体化する際の基礎資料とする。また、伊勢湾の自然浄化能力を回復させるための新たな技術を開発する。

平成13年度には、科学技術振興センター水産研究部、工業研究部、農業研究部、京都大学、三重大学、東海大学がプロジェクトチームを結成し、計11の研究課題に取り組んだ。具体的な研究成果については、三重県科学技術振興センター共同研究事業「伊勢湾の生態系の回復に関する研究」成果報告書で別途報告されるので、ここではその概要のみ報告する。また、科学技術振興センター工業研究部、農業研究部の成果については、各研究部から発行される事業報告書に掲載されるため、ここでは省略した。

## 方法および結果

### 1. 物質循環に関する人為的要因

#### 1) 負荷の発生量及び漁業・養殖業による回収量の整理（鈴鹿水産研究室）

前年度に引き続き、伊勢湾の流入負荷量および漁獲に伴う負荷の回収量を整理するため、関係機関から伊勢湾周辺の発生負荷や漁獲に関する資料を収集し、解析した。

伊勢湾周辺の発生負荷量は、窒素118トン/日、リン12.8トン/日と推定され、その約40%が名古屋港周辺、約30%が木曾三川に由来した。主要河川の水質は1960～80年代に悪化し、その後も改善されていないと考えられた。漁業およびノリ養殖業によって伊勢湾から回収される負荷は、窒素1,000～3,000トン/年、リン100～300トン/年と推定された。割合では魚類、特にイワシ類、イカナゴの比率が高かった。人間1人当たりの原単位を12g/日（窒素）とすると、漁業は毎日45万人分の負荷を回収し、伊勢湾の浄化に貢献していることが示唆された。

### 2. 物質循環に関する自然浄化量

#### 1) 干潟及び浅海域（鈴鹿水産研究室）

三重県明和町下御系沿岸における水深2～3mの浅海域（BOX 1, 2）、水深4～5mの浅海域（BOX 3, 4）および松阪市沿岸における底質が還元的な干潟（BOX 5）、底質が酸化的な干潟（BOX 6）の計6BOXと境界条件用測点2点を対象に調査を行った。各BOXの調査構成要素は生物系として植物プランクトン、附着藻類、マクロベントス、ろ過性食者、堆積物食者、メイオベントス、バクテリア、非生物系として海水中デトリタス、NH<sub>4</sub>-N、NO<sub>3</sub>-N、底質中デトリタス、間隙水中NH<sub>4</sub>-N、間隙水中NO<sub>3</sub>-Nとし、それぞれの現存量および濃度を海水中2層、底質中2層に分けて算出した。また、貝類漁獲による窒素の取り上げは、漁場の聞き取りと漁協の漁獲資料および貝類の含有窒素割合から計算した。ノリ養殖による窒素の取り上げはBOX内の柵数の計数、1柵当たりの乾ノリ生産枚数、乾ノリの含有窒素割合から計算した。脱窒素量の測定はスラリー法で行い、100ppbの濃度にNO<sub>3</sub>-Nを添加し、培養温度20℃、培養時間30分の条件で測定した。

各BOXにおける生態系モデルに昨年度組み入れていなかった脱窒量、貝類漁獲、ノリ養殖および海中2層、底質2層を構成要素に加え、定常状態におけるモデルを表すことができた。各BOXの浄化量を濾過食性底生生物による海水中の懸濁態有機物の直接除去、底生生物の現存量、系外への除去の種類別に定量した。海水中懸濁物の直接除去量はBOX 2およびBOX 4の10月で特に多かった。干潟ではBOX 5で安定的に除去量が多かった。底生生物の現存量はBOX 4の8月やBOX 5の12月で多かったが、それ以外は顕著な差は認められなかった。貝類漁獲、ノリ養殖、脱窒素の3次的処理については、脱窒素による浄化量が大部分を占めた。

#### 2) 底泥による脱窒量（三重大学生物資源学部、菅原庸）

昨年度同様、伊勢湾の底泥における脱窒量を推定するため、各季節に1回、湾内の18測点で底泥を採取し、脱窒細菌数、硝酸還元細菌数、従属栄養細菌数、硫酸還元細菌数、底泥の強熱減量およびCOD、脱窒ポテンシャル

ルを測定した。

伊勢湾全域の底泥中において、脱窒細菌 ( $2.4 \times 10^3 \sim 2.4 \times 10^5$  cells/g) が検出され、特に津、松阪沖から湾中央にかけての海域で多かった ( $10^4$  cells/g 以上)。また、伊勢湾底泥中の従属栄養細菌は  $4.5 \times 10^5 \sim 1.1 \times 10^8$  cells/g 程度、硝酸塩還元細菌は  $4.9 \times 10^4 \sim 1.1 \times 10^8$  cells/g 程度、アンモニア酸化細菌は  $4.0 \times 10^2 \sim 1.2 \times 10^6$  cells/g 程度、硫酸塩還元細菌は  $1.3 \times 10^2 \sim 3.4 \times 10^4$  cells/g 程度で出現し、いずれも湾内全域でみられた。脱窒過程に関わる細菌群が伊勢湾底泥に十分存在しており、細菌数が脱窒の大きな制限要因とはならないと考えられた。

一方、伊勢湾底泥表層における有機物量は、いずれの海域においても多量に蓄積しており、脱窒細菌の脱窒のためのエネルギー源は十分に存在していると考えられた。伊勢湾底泥表層において、 $3.361 \sim 72.650$  mgN/m<sup>2</sup>、平均  $10.8$  mgN/m<sup>2</sup> の亜硝酸塩・硝酸塩が存在しているが、脱窒ポテンシャルは  $0 \sim 14$  mgN/m<sup>2</sup>/day、平均値は  $5.3$  mgN/m<sup>2</sup>/day であり、脱窒のための電子受容体量として十分であるとはいえない。しかしながら、海底直上  $10$  cm 水柱中に  $1.68 \sim 20.68$  mgN/m<sup>2</sup>、平均  $8.3$  mgN/m<sup>2</sup> の亜硝酸塩・硝酸塩の供給が可能であると思われる。

### 3. 貧酸素水塊の形成変動機構

#### 1) 貧酸素水塊の発生機構の解明

(京都大学、藤原建紀)

伊勢湾の貧酸素水塊の形成変動機構を明らかにするため、湾内の所定の定点において、月に 1 ~ 2 回の頻度で調査船「あさま丸」および漁船による海洋観測を行い、水温、塩分、溶存酸素、流向流速データを収集、解析した。

従来、貧酸素水塊は底層に形成されるとされてきたが、中層に形成される場合もある。その違いは、エスチュアリー循環に伴う外洋系水の進入深度によって起きる。外洋系水は伊良湖水道で混合されているので、酸素を豊富に含んでいる。この外洋水の湾内への進入には中層進入と底層進入の 2 つのモードがある。中層に進入する時は底層に貧酸素水塊ができ、底層に進入する場合は貧酸素水塊が中層に浮き上がる。進入深度は湾口部と湾内の海水密度の差異によって決まる。そのため、その差異が変化すれば、進入進度も変化する。冬季の伊勢湾では、伊良湖水道の海水の密度が湾内底層の密度よりも大きいので底層進入となる。一方、夏季にはその逆の密度分布となることが多く、外洋系水は中層に進入することが多い。また、伊良湖水道の海水の密度は湾外の海水の影響を受けているため、黒潮の離接岸などによる年毎の変動も大きい。さらに小潮時には伊良湖水道での鉛直混合が若干

弱くなるため、下層の密度が湾内底層の密度よりも大きくなり、夏季でも底層進入となる。このような進入進度の変化に伴って、貧酸素水塊も湾奥に押しやられたり中層に浮上したりするなど、短期間のうちに水平・鉛直的な位置が変化する。伊勢湾の幅は約  $30$  km とロスビーの内部変形半径よりも大きいので、湾内の流れには地球自転の効果が影響を及ぼす。そのため、中層に進入する外洋系水は、愛知県側にそって流入する。その結果、三重県側の下層が海水交換から取り残される形になり、低温のドームができ、貧酸素化する。この海水が取り残され、低温ドームができる様子は、数値実験によっても確かめられた。貧酸素水塊の空間形状、時間変動の  $80\%$  が流動によって説明されることが分かった。

#### 2) 水質の長期スケールでの変遷解析

(京都大学、藤原建紀)

鉛直 1 次元モデルを用いて、1989 ~ 1992 年の貧酸素水塊について Hind cast (事後予測) を行った。この数値モデルにより、湾中央における酸素濃度をほぼ再現することができた。貧酸素水塊の形成には、酸素消費 (生物化学過程) と流れによる酸素供給 (物理過程) が寄与しているとされている。そこで酸素消費速度は一定 (すなわち生物化学過程は一定) とし、進入深度のみを変化させるモデルを作成し、1989 ~ 1992 年の貧酸素水塊について Hind cast (事後予測) を行った。その結果、湾内下層における酸素濃度の変動の約  $80\%$  が説明できた。これは貧酸素水塊の形成には生物化学過程よりも物理過程のほうが大きく関わっていることを示唆している。そしてこのモデルを用いて酸素消費速度を変えた実験を行った結果、水中、海底の酸素消費速度をそれぞれ  $50\%$  程度減少させれば、貧酸素水塊は形成されなくなるという結果が得られた。また、診断モデルを用いて湾内の密度構造や流れを 3 次元的に再現するとともに、粒子追跡を行い外洋系水の進入状況を調べた。1986 年のように貧酸素化が激しかった年には外洋系水の湾内底層への流入が弱かったため、低温・高密度の海水が湾内下層に広く分布していた。一方、比較的酸素濃度が高かった 1988 年にはエスチュアリー循環によって外洋水が湾内下層に進入し、海水交換が促進される傾向にあった。これはこの年、伊良湖水道と湾内下層の密度が同程度であったためと考えられた。

#### 3) 貧酸素水塊形成シミュレーションモデルの開発

(東海大学、中田喜三郎)

昨年度に引き続き、伊勢湾における貧酸素水塊の発生、変動様式を再現しうるシミュレーションモデルの開発に

取り組んだ。

本年度は1996年を想定した外力を与え、流体力学モデルによる物理場の数値シミュレーションを行った。物理場の再現性を塩分、水温で見ると、計算結果は観測値と良く一致しており、1995年度に続いて本モデルは伊勢湾の物理場を精度良く再現可能であることが明らかとなった。さらにこの結果を用いて生態系モデルのシミュレーションを行った。溶存酸素の計算結果と観測結果の比較から、昨年度と同様にモデルの再現性が非常に良いことが示された。水温や塩分の季節的な変化をモデルは精度良く再現することができた。また、貧酸素水塊の挙動の季節的な変化をモデルで再現することができ、1995年度との違いも明確に示すことができた。さらに、貧酸素水塊の発生場所（7月上旬）と最大に発達したときの底層での溶存酸素濃度の水平分布についても、観測結果を再現できた。一方、貧酸素水塊発生時での流動パターンと塩分分布から、松阪沖には相対的に塩分の低い孤立水塊が存在し、そこでは流速は非常に遅く、周りから移流による酸素の補給ができない条件になっていることが明らかにされた。

#### 4. 貧酸素による生物への影響

##### 1) 底生生物調査（三重大学、関口秀夫）

底生生物群集に及ぼす貧酸素水塊の影響を具体的に評価するため、伊勢湾内の21定点において、三重大学練習船勢水丸により各季節に1回の頻度で底生生物の分布調査を行った。

採集されたメガベントスの分類群は多岐にわたり、優占する分類群は棘皮動物、甲殻類および魚類であったが、これらの分類群の優占度には季節、年変動が顕著であり、これには貧酸素水塊の発達の季節、年変動と密接な関係が示唆された。個体数においても生物量においても、棘皮動物の90%以上はヒトデ類であり、特に3種（スナヒトデ、キヒトデ、モミジガイ）が優占し、その優占度には季節、年変動が顕著であった。

前述の3種のヒトデ類の空間分布は一部重複するものの、ほぼ相互に分離した分布を示した。スナヒトデは湾中央域から湾奥の全域にかけて、キヒトデは湾南部およびその西部域にかけて、モミジガイは湾口域において主に分布していた。この傾向は底質の分布とも対応しており、スナヒトデは泥質（シルト・クレイ）域に、モミジガイは粗砂および岩盤域に出現した。つまり、発達する貧酸素水塊の影響を最も受けるのはスナヒトデであり、逆にモミジガイは影響が少ないと考えられた。スナヒトデの生殖腺の成熟期は春季であり、加入はおもに秋季に

認められた。毎年の新規加入群の出現域は一定しておらず、年によっては秋季まで継続的に出現した貧酸素水塊によって壊滅的な打撃を受けていた。スナヒトデの主たる餌はクモヒトデであり、一方、モミジガイの主たる餌は小型の腹足類であり、これらのヒトデ類の空間的住み分けと対応して、餌生物にも明らかな相違が認められた。

#### 5. 干潟・藻場・河口域の実態

##### 1) 干潟・藻場の現況と変遷（鈴鹿水産研究室）

航空機MSS観測結果および現地調査結果を解析し、現時点での伊勢湾（三重県側）の干潟および藻場の面積を算出した。また、現存する1890年以降の海図、地形図、藻場保護水面調査報告書および航空写真から、伊勢湾奥部（三重県桶町 - 愛知県常滑市より北部）の干潟面積、浅海域の面積、埋立面積、ヨシ場および藻場をスキャンし整理した。

現時点において、三重県側に残存している砂浜域は1,100ha、アマモ場は38haと推定された。1945年頃までは湾奥一帯に巨大な浅海域と干潟が存在したが、1970年頃までに愛知県側が消失し、1985年頃には三重県側（主に木曾三川河口域）が消失した。1890～2000年の110年間に伊勢湾奥部では約7,000haの埋立が行われ、約5,000haの干潟が消失した。一方、アマモ場は1955年までは湾奥一帯に見られたが、1965年頃にはほぼ消失した。

##### 2) 河口域における生態調査（鈴鹿水産研究室）

干潟、藻場、河口域のもつ幼稚仔保育機能を評価するため、松阪市櫛田川の河口域、その周辺に形成される干潟上の浅場、藻場（アマモ場）の3測点において幼稚仔採集調査を行い、幼稚仔の組成、季節変化、発育段階に応じた浅海域の利用形態などを調べた。

調査期間中に採集された魚類は3測点で14目40科76種以上、計23,704個体であった。各測点ともアユが最も多く採集され、全測点の総採集個体数に占める割合は55.1%に達した。次いでニクハゼ（7.5%）、スズキ（6.1%）、ギンポ（1.4%）、ギマ（0.9%）、トウゴロウイワシ（0.9%）、マコガレイ（0.8%）、シラウオ（0.8%）、ヒメハゼ（0.6%）、ヨウジウオ（0.6%）が多かった。上位優占種の内、河口域でも主に干潟を優先して利用している種としてシラウオ、トウゴロウイワシなど4種、主にアマモ場を利用している種としてヨウジウオ、メバルなど8種、干潟、アマモ場両海域を利用している種としてアユ、スズキなど12種が上げられ、両海域を複合的に利用している種が多いことが示唆された。

本多ほか（1997）にならい、海域の利用形態を周年出現種、季節的出現種、偶来種に区分し、採集個体数の季

節変化、体長組成の解析によって上位出現種をこれら3タイプに当てはめた。周年出現種は3種、季節的出現種は18種、偶来種は3種となり、当海域を特定の季節や発育段階で利用している魚種が大半を占めることが明らかとなった。また、これら季節的出現種の多くが当海域を夏季中心に利用し、しかもその大半が稚魚期、特に仔魚期から稚魚期への変態期に利用していることがわかった。

## 6. 干潟・藻場造成新技術

### 1) アマモ場造成技術開発

(水産研究部水圏環境グループ)

松名瀬海岸で採取したアマモ花穂を水槽内で3週間曝気し、種子を追熟沈下させた後、洗浄・選別して試験用種子を得た。アマモ種子は3.3mm×2.0mmの俵状であり、乾燥状態での重量は5.1mg/粒、比重は0.41 (g/ml)、湿潤状態での重量は9.7mg/粒であった。種子をトライブロックに播種した結果、約2週間で胚軸が出芽し、その後間もなく葉が出て2ヶ月で約10cm、3ヶ月で約

15cmに成長した。育苗中の水流の有無について検討した結果、水流の無い嫌気条件でアマモ苗の生育が優っていた。ガラスビーズの混入割合を変えた各ブロックからのアマモ苗の発芽率にはやや差がみられたが、生育については外観上の差は認められなかった。

水槽で育苗したアマモ苗を2回(2002年1月16日および2月15日)に分けて、二見町の現場海域に移植(沖出)した。移植後の生育状況については平成14年度にも継続して観察する予定である。一方、種子の越夏保存方法を検討するため、冷蔵、冷凍、常温、乾燥、曝気等の条件を組合せた8通りの保存方法で試験を行った結果、発芽率が最も高かったのは低温・曝気保存した場合であった。

## 関連報文

三重県科学技術振興センター共同研究事業「伊勢湾の生態系の回復に関する研究」平成13年度成果報告書