

33

助成番号 0033

養殖海域における有機物負荷に関する研究

助成研究者：福代 康夫 (東京大学 アジア生物資源環境研究センター)
 共同研究者：古谷 研 (東京大学大学院農学生命科学研究科)
 関口 勝司 (岩手県水産技術センター)
 乙部 弘隆 (東京大学 海洋研究所)

貝類養殖は糞の生産速度が速い貝類を高密度で集約的に養殖するため、養殖筏下の底質では有機物負荷が高くなり夏季に貧酸素水塊が出来やすい。本研究は、活発な貝類養殖生産が行われているにもかかわらず、貧酸素水塊の形成が起こらない三陸リアス式湾において、なぜ貧酸素水が発生しないのかを明らかにするために底層付近の酸素の消費と供給の様態を把握することを目的とした。観測は岩手県大槌湾において、春季および夏季に一次生産の連続モニタリング、セディメントトラップによる養殖筏下部の沈降粒子フラックス測定、溶存酸素および流速の連続観測を行った。

養殖筏下部の沈降粒子フラックスは貝類の種によって異なった。即ち、カキはホタテガイよりも有意に高い沈降粒子を生成し、4月 8月にかけての平均沈降粒子フラックスは $21.6 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ であった。同じくホタテガイでは $7.75 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 、筏のない場所(コントロール)では $5.75 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ であった。ホタテガイ筏域の5m層の海水中の溶存酸素の消費速度を瓶培養によって求めたところ $0.064 \sim 0.10 \text{ mg L}^{-1} \text{ d}^{-1}$ であったのに対して、直上水では $0.26 \sim 3.07 \text{ mg L}^{-1} \text{ d}^{-1}$ (平均 $1.49 \text{ mg L}^{-1} \text{ d}^{-1}$) と活発な酸素消費が認められた。これは約5日で溶存酸素が枯渇する速度に相当した。一方、現場設置の溶存酸素計で観測した溶存酸素は夏季の底泥直上で直線的な減少傾向を示し、見かけの減少速度は $0.0409 \text{ mg L}^{-1} \text{ d}^{-1}$ 、飽和度では $0.56\% \text{ d}^{-1}$ であった。この減少速度は溶存酸素が枯渇するのに160日を要するのに相当した。この見かけの酸素の消費速度は瓶培養で得られた酸素消費速度に比べて1/2桁小さかった。

溶存酸素の連続記録にはパルス状の酸素の増加が頻発した。これは水温の減少と塩分の増加と対応しており湾外水の流入によるものであった。頻繁に起こる湾外水の流入が酸素を補給し、結果的に見かけの酸素消費が瓶培養に比べて低くなっていると解釈された。大槌湾では地勢的、海洋学的特性により湾内外の海水交換が良く、貝類養殖による底質への有機物負荷および陸上からの人間活動由来の負荷を緩衝・希釈していたと考えられる。この海水交換は風成循環、密度流、内部潮汐による海水流入などが主要因である。物理過程を解析する上で流速の時空間変動の知見が必須であるが、研究期間中流速計の落失事故があり現在鋭意回収の機会を調整している。今後、流速計を回収して酸素消費と海水交換について定量的解析を進める。

33

助成番号 0033

養殖海域における有機物負荷に関する研究

助成研究者：福代 康夫（東京大学 アジア生物資源環境研究センター）

共同研究者：古谷 研（東京大学大学院農学生命科学研究科）

関口 勝司（岩手県水産技術センター）

乙部 弘隆（東京大学 海洋研究所）

1. 研究目的

富栄養化の進んだ海域では、夏季成層期に表層では赤潮が、底層付近に貧酸素水塊が形成される。この赤潮と貧酸素水塊の形成は都市部の人口集中により加速されているが、これに加えて様々な経済活動の影響がおよんでいる。水産活動もその一つであり、特に給餌型養殖に伴う環境負荷が重要である（伊藤、1994）。給餌型養殖は飼料を人為的に系外から持ち込み生物を集約的に飼育するものであり、糞や残餌、溶存態排泄物の分解・希釈を天然の物質循環過程に委ねている。長期間飼養を続けると糞や残餌は底質上に堆積し、貧酸素化やそれに伴う還元的環境での硫化物など有害物質の生成によって漁場の劣化が進み、結果的に生産能力が低下し、いわゆる自家汚染が起こる。マダイを例にとるとタンパク質ベースで投餌量の20%が魚類重量になるのに対して20%が残餌、10%が糞、50%が溶存排泄物として環境中に放出される（山口、1978）。一般に魚類の給餌型養殖では投餌量の80%程度の有機物が環境負荷になると考えられている。

貝類養殖では餌をプランクトンなど天然生態系の構成要素に依存するため系外からの有機物の投入が無い。養殖貝類に留まらず、天然のプランクトンを餌とする貝類は、陸上から海洋に負荷された栄養塩類を、餌としての植物プランクトンを介して摂取するので、結果的に水産物として陸上に栄養塩類を回収する重要な機能を持っているが、一方で高い濾過速度のために糞の生産速度が高い。天然の貝類は海底に広くに分布するため排出された糞に由来する有機物の分布も水平的に広汎になるが、筏を使う貝類養殖では、貝を鉛直的に密集して海面下に垂下するので、筏直下に糞や擬糞が集中的に沈降、堆積する（図1）。貝類を局所的に集約飼育することから、非養殖域に比べると養殖筏下部の底質の有機物含量は高くなり、結果的に給餌型養殖ほどではないが底質が悪化することが知られている。

ホタテガイ、カキ、真珠などの貝類養殖は我が国で広く行われている。ホタテガイは年間約25万トン、カキ類は20万トン（殻つき）程度の生産量で推移しており（農林水産省、2000）、両者で我が国の海面養殖生産量の40%弱を占めている。三陸地方においてもホタテガイとカキは主要な養殖対象貝類になっている。内湾域での養殖の歴史は古く、現在でも活発に生産されているが三陸リアス式湾のほとんどでは貧酸素水塊の形成は認められない。唯一、貧酸素水塊が発生するのは大船渡湾である。この湾では他の湾と同程度の

規模の貝類養殖が行われており、湾周辺の人口や湾への河川水からの流入負荷も他の湾と同程度であるにも関わらず、なぜ他の湾との違いが生じているのだろうか。大船渡湾では閉鎖性の強い局所と湾口部に貧酸素水ができる。これは湾口部にシルが存在するため湾内外の海水交換が悪くなっているためと考えられている。すなわち貝類養殖による底質への負荷は同じであっても湾内外の海水交換に違いがあるため、貧酸素水塊の形成の有無が違っている可能性が高い。大船渡湾以外の三陸リアス式湾では、いわゆる潮通しが良く、湾内外の海水交換が活発である（四竈、1980；Furuya ら、1993；Kawamiya ら、1996）。風成の表層水の輸送、あるいは密度流により湾内外の海水交換が起こる（図1）。さらに近年、内部潮汐により湾外水が湾内亜表層に流入する過程が重要であることが明らかになってきた（乙部ら、投稿中）。本研究の目的は、活発な貝類養殖のために底質に堆積した有機物量が多いにもかかわらず、なぜ三陸リアス式湾では貧酸素水ができないのか、を説明するために湾内外の海水交換の重要性を評価することである。

研究海域として岩手県大槌湾を選んだ。この湾では定期的に湾内29測点で底質の全硫化物、COD、粒度組成、強熱減量、全炭素・窒素が岩手県水産技術センターにより調査されていること、植物プランクトン群集動態および一次生産の知見があること（Furuya ら、1993；Kawamiya ら、1996）、流速計、気象海象連続モニターが設置されていること（乙部、1997）などのため海洋学的バックグラウンドデータが多いことが理由である。底質のCODは湾内の70%で水産用水基準を超え、特に水深20~40m付近の湾央部で40mg/dry g以上で、経時的に増加傾向にある（岩手県、1993）。全炭素・全窒素もCODと同様に湾央部で高い。

2. 方法

野外観測は2000年4~5月（春季）と、同年7~8月（夏季）に行った。湾中央の測点F（図2）で自然蛍光光度計（7.5m）を係留し、クロロフィルa量および自然蛍光の経時変化を連続的にモニターした。自然蛍光光度計（INF300, Biospherical）の設置深度は、大槌湾のブルームが水深5~7mから発生すること（Furuya ら、1993）と湾内を航行する船舶とセンサーが衝突するのを防ぐことを考慮して決定した。1週間に2回の頻度で各層採水を行い、クロロフィルa、植物プランクトン光吸収係数、および光合成—光曲線測定用の試水を得た。湾内の植物プランクトンによる一次生産の経時的変動は測点Fで代表しうることがすでに分かっている（Furuya ら、1993；Kawamiya ら、1996）。植物プランクトン光吸収係数はQFT法（平譚ら、2001）で、光合成—光曲線は ^{14}C -重炭酸ナトリウムの取り込みから測定した。培養は試水採取後30分以内に開始し、フォトシנתロンを用いて $0\sim 2300\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ の範囲で21段階の光量勾配をかけ、現場水温で30分間行った。光源には写真用ヨウ素電球を用いた。得られた光合成速度Pを式

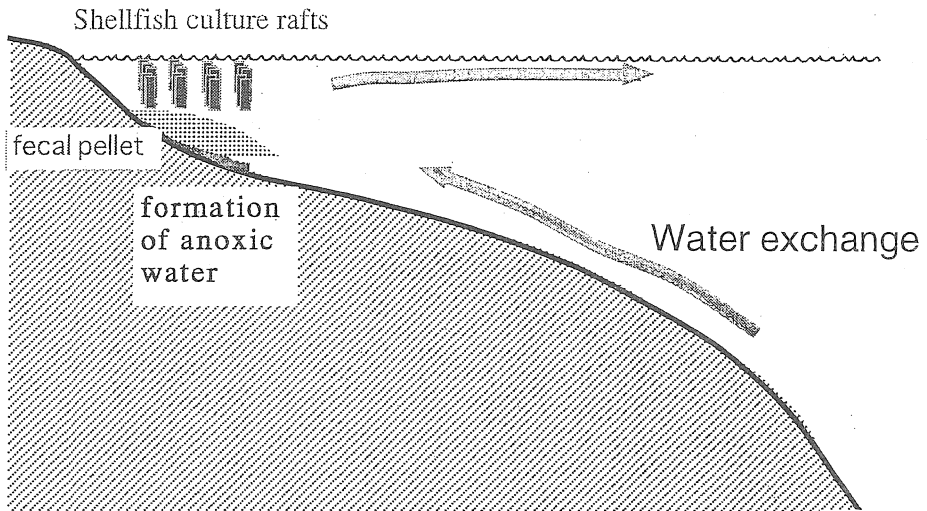


Fig. 1. Schematic view of shellfish culture area.

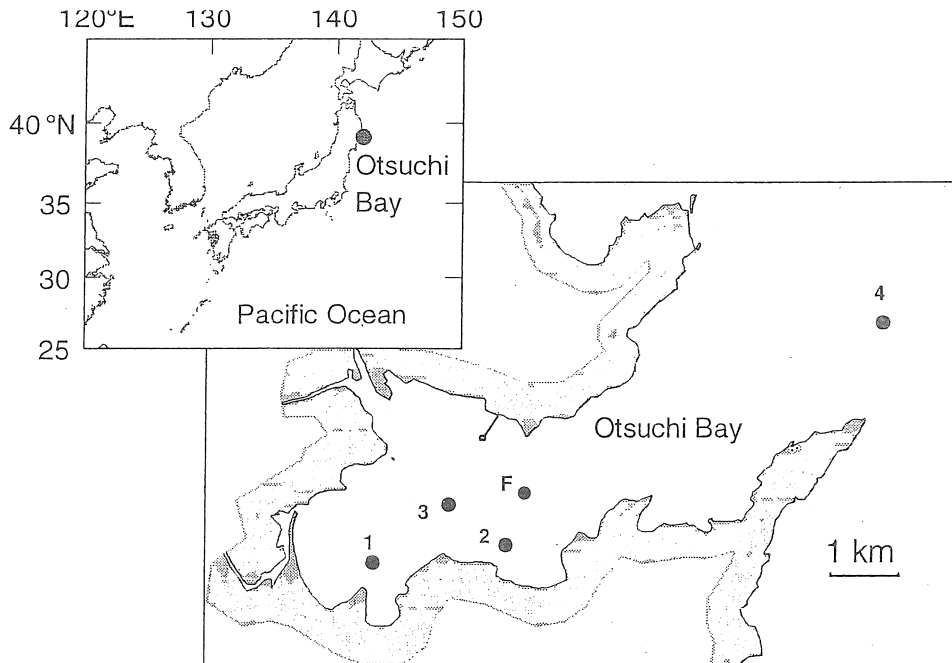


Fig. 2. Station location in Otsuchi Bay.

$$P = P_s \cdot \left(1 - e^{-\frac{\alpha I}{P_s}} \right) \cdot e^{-\frac{\beta I}{P_s}}$$

にあてはめて、最大光合成速度 P_{max} および立ち上がり勾配 α 、強光阻害係数 β を得た (Platt ら、1980)。ここで P_s は強光阻害がないと仮定した場合の光飽和下での潜在的な光合成速度、 β は強光阻害定数である。これらの測定値をあてはめたアルゴリズムを用いて自然蛍光からクロロフィル *a* および一次生産力を算出した (Chamberlin ら、1990)。

ホタテガイ養殖筏中に位置する測点 2 (水深 3.2 m) の海底上 2 m に溶存酸素計 (AD08M、アレック電子) を吊下し、2000 年 8 月 10 日～9 月 7 日および同 10 月 6 日～11 月 9 日に溶存酸素、水温、塩分の連続測定を行った。溶存酸素計の校正は採水試料からウィンクラー-アジ化ナトリウム変法で求めた濃度を用いた。夏季、秋季とも連続測定値は実測値とよい一致を示した。

セディメントトラップを用いて有機炭素および窒素の沈降フラックスをカキ筏下 (測点 1)、ホタテガイ筏下 (測点 2)、筏のない近傍 (測点 3) において測定した。トラップは水深 5 m および 20 m に設置した。測点 1 は水深が浅いため 20 m 層の採集を行わなかった。春および夏の観測期間中 1 回 2 日間で各 4 回ずつ異なる時期に採集した。また、測点 3 においてカキおよびホタテガイの餌粒子として懸濁態粒子を、春季、夏季とも 8 回ずつの各層採水試料 (0, 5, 10, 13m) を得て、グラスファイバー濾紙 (GF75、Toyo) に捕集し、有機炭素および窒素を測定した (EA1108、Fisons)。

水中の酸素消費速度を実験的に求めた。測点 2 の水深 5 m 層より採水し、直ちに酸素瓶に分取し暗条件で溶存酸素濃度の経時変化をウィンクラー-アジ化ナトリウム変法で求めた。また、柱状採泥器 (直径 11 cm、HR、離合社) で得た海底直上水から同様に溶存酸素の経時変化を求めた。

湾内外の海水交換を測定するために湾口部の測点 4 に流速計を水深 10 m および海底上 10 m に設置した。観測中に係留計が漁船の漁網に懸かったため係留装置が現場に放棄された。係留計の切り離し装置からの信号が海底上に確認されること、および漁船の証言から流速計は海底にあるものと考えられる。ROV に搭載したビデオカメラによる探査および回収を繰り返し試みているが、本報告の執筆時にはまだ回収されていない。

3. 結果と考察

3. 1 クロロフィル *a* および一次生産

春季および夏季とも自然蛍光から求めたクロロフィル *a* および植物プランクトン一次生産は実測値と良い相関を示し ($p < 0.01$)、自然蛍光法の有効性が確認された (図 3)。春季のクロロフィル *a* 濃度は激しい変動を示したが平均濃度 $1.42 \mu\text{g L}^{-1}$ で、夏季の平均濃度 $0.70 \mu\text{g L}^{-1}$ よりも有意に高かった。日間一次生産量にも大きな経時変化が認められた。

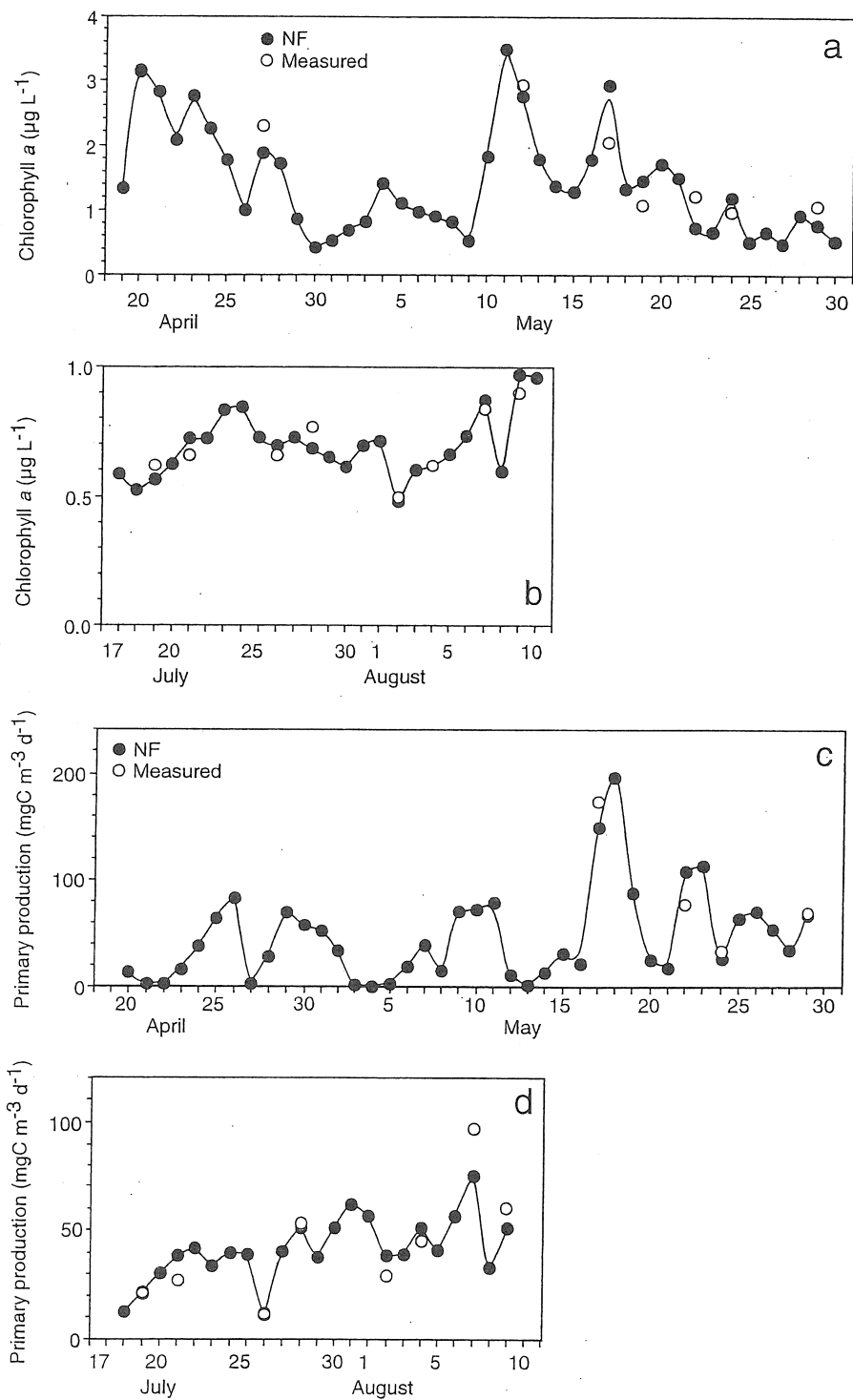


Fig. 3. Temporal variations in chlorophyll *a* (a, b) and primary production (c, d) at Stn. F in the periods between April and May 2000 (a, c) and between July and August 2000 (b, d) as measured by natural fluorescence (●) and direct measurement (○).

これは日射量の変化が主な要因で、低気圧の通過に伴う曇天・降雨と晴天との繰り返しによる変動であった。しかしながら7月下旬から8月上旬の増加傾向は同化数の増加によるものであり、8月7日には測点Fの近傍において $24 \text{ mgC (mgChla)}^{-1} \text{ h}^{-1}$ の著しく高い活性が炭素の取り込みから実測された。日間生産量では春季の平均値 $46.1 \text{ } \mu\text{gC L}^{-1} \text{ d}^{-1}$ と夏季の $41.5 \text{ } \mu\text{gC L}^{-1} \text{ d}^{-1}$ に有意差はなかった。

3. 2 沈降粒子フラックス

有機態炭素フラックスは養殖貝類直下の5m層では、春季、夏季とも測点1が最も高く、測点2、測点3がこれに次いだ。カキによる沈降粒子生成（測点1）は各時期においてホタテガイ（測点2）よりも有意に高かった ($p>0.01$)。春季と夏季を比べると5m層ではいずれの測点においても有意差が無く、一次生産力が両季節で同程度であったことを考え合わせると、4月～8月にかけての沈降粒子フラックスは、全データの平均としてカキ筏下で $21.6 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 、ホタテガイ筏下で $7.75 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 、筏のない場所（測点3）で $5.75 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ とみなせる。

測点3の20mのフラックスは春季、夏季とも5mのそれと有意差がなかったのに対して、測点2では水深20mの沈降フラックスが水深5mよりも春、夏合わせて常に高かった。この測点の水深が32mであることから底泥の巻き上げの影響とは考えられず、周辺のホタテガイ筏からの寄与が大きかったものと考えられる。これは沈降粒子の検鏡からも支持され、いずれの試料でも鉱物性粒子はほとんど認められず5m層と同様の糞粒、擬糞粒、珪藻を中心とする植物プランクトンから成っていた。このため筏の下部では直上の貝ばかりでなく周辺の貝の影響の受けると予想される。このような周辺の筏の影響はトラップの設置位置によっても変わり、流れの局所的な不均一性を反映したものと考えられ、場所によっては5m層のフラックスよりも20m層が小さい場合もある可能性がある。20m層でより高いフラックスがあった原因として5m層と20m層の間の動物プランクトンによる糞粒の寄与も考えられるが、沈降試料の定性的な観察ではカイアシ類やサルパ類などの糞粒はいずれのサンプルにおいても貝類の糞に比べて著しく少なかった。このためトラップ試料の有機物量は貝類からの糞および擬糞を反映したものと考えられる。貝類以外の生物による寄与については固定標本を基にさらに精査を進める。

懸濁態有機物のC:N比（モル比）は、春季に5.8～8.0（平均7.0）、夏季には5.9～7.7（平均6.58）と変動した。沈降粒子のC:N比は測点1では春季に8.9～11.0（平均9.96）、夏季に8.4～10.2（平均9.58）と両季節間で有意差がなかった。一方、測点2では春季に7.3～7.8（平均7.76）、夏季に7.4～9.5（平均8.28）と測点1と同じく有意差はなかった。しかしながら、両測点間では春季 ($p>0.01$)、夏季 ($p>0.05$) とともにC:N比は有意に異なり、ホタテガイに由来する沈降物質が、より懸濁態有機物に近いことを示した。この違いの原因として、餌生物の違い、擬糞生産の違い、消化の違いが考えられるが、今後、沈降

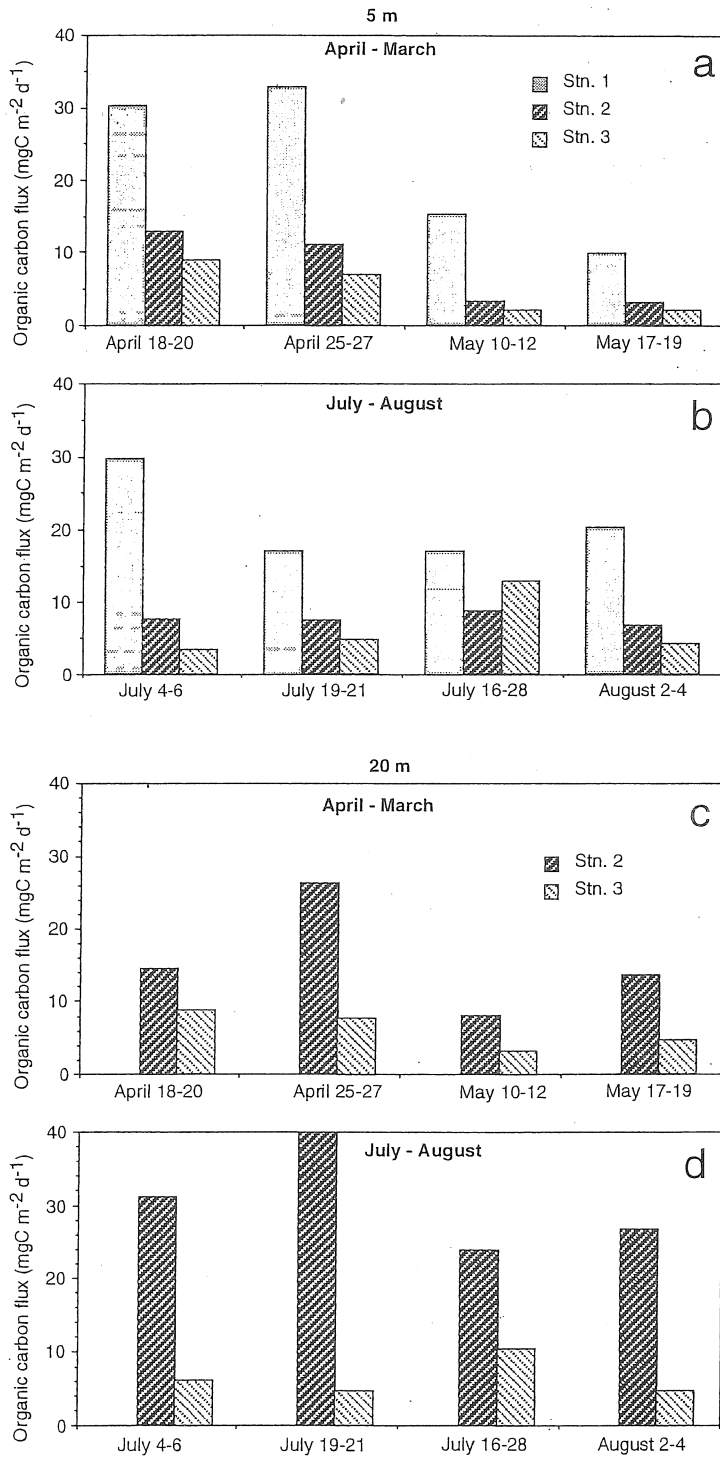


Fig. 4. Sinking flux of organic carbon at 5 m depth of Stns. 1, 2 and 3 (a, b) and at 20 m depth of Stns. 2 and 3 (c, d) in the periods between April and May 2000 (a, c) and between July and August 2000 (b, d).

粒子の植物色素組成を行う予定なので、その結果を得たのち検討したい。測点3の沈降粒子は他の測点に比べて貝類の影響は小さく動物プランクトンの糞粒を反映していると考えられるが、春季に7.2~8.1（平均7.61）、夏季に7.1~9.5（平均8.21）と測点2に近い比を示した。さらに色素解析と検鏡によって沈降フラックスの主体について同定を進めたい。

3. 3 溶存酸素

5 m層の試水中の溶存酸素の消費速度は $0.064\sim 0.10\text{ mg L}^{-1}\text{ d}^{-1}$ であったのに対して、直上水では $0.26\sim 3.07\text{ mg L}^{-1}\text{ d}^{-1}$ （平均 $1.49\text{ mg L}^{-1}\text{ d}^{-1}$ ）と活発な酸素消費が認められた。これは約5日で溶存酸素が枯渇する速度に相当した。

溶存酸素計の連続記録を図5に示す。夏季の測点2の底泥直上では、昇温傾向が認められ、その勾配は $0.030\text{ }^{\circ}\text{C d}^{-1}$ であった。一方、溶存酸素は徐々に減少し、見かけの減少速度は $0.0409\text{ mg L}^{-1}\text{ d}^{-1}$ であった。昇温とともに酸素の溶解度が低下することを考慮して飽和度に換算すると $0.56\%\text{ d}^{-1}$ であった。この勾配が持続すると仮定した場合溶存酸素が枯渇するのは観測開始時から160日後になり夏季には酸素が枯渇しないことになる。この見かけの酸素の消費速度は上記の培養で求めた酸素消費速度に比べると1~2桁小さい。秋季には溶存酸素濃度の減少傾向は認められなかった。

図5を詳細に見ると夏季には水温のパルス状の減少に対応して溶存酸素が増加していることが分かる。このようなパルス状の水温低下は高塩分と対応しており湾外水の流入が起こっていることを示した。水温および溶存酸素の上昇および減少の線形トレンドを最小自乗法で取り除いて両者のダイアグラムをプロットすると（図6）、水温の低下に対応して溶存酸素が高い傾向が明瞭に認められる。湾外水の流入は頻繁に起こっており、これが見かけの酸素消費を低くしている可能性が強い。培養実験からは大槌湾の養殖筏下部の底層では活発な酸素消費があるものの溶存酸素濃度の高い湾外水が流入することにより絶えず底層付近に酸素の補給があると考えられる。

4. 今後の課題

本研究では、流速計が事故により回収されていないため酸素の消費速度と海水交換による酸素の補給の関係について定量的な解析が未了である。大槌湾にはすでに物理—生態系モデルが構築されているため（Kawamiyaら、1996）、以上の観測結果をあてはめて海水交換の物理的機構を明らかにする予定である。三陸域では大船渡湾を除くと貧酸素水の形成は見られていない。これは地勢的、海洋学的特性により湾内外の海水交換が良く、貝類養殖による底質への有機物負荷および陸上からの人間活動由来の負荷を緩衝・希釈していたといえる。しかし、その能力がどの程度であるのか、どれほど余力があるのかについては、これからの定量的解析に待たねばならない。

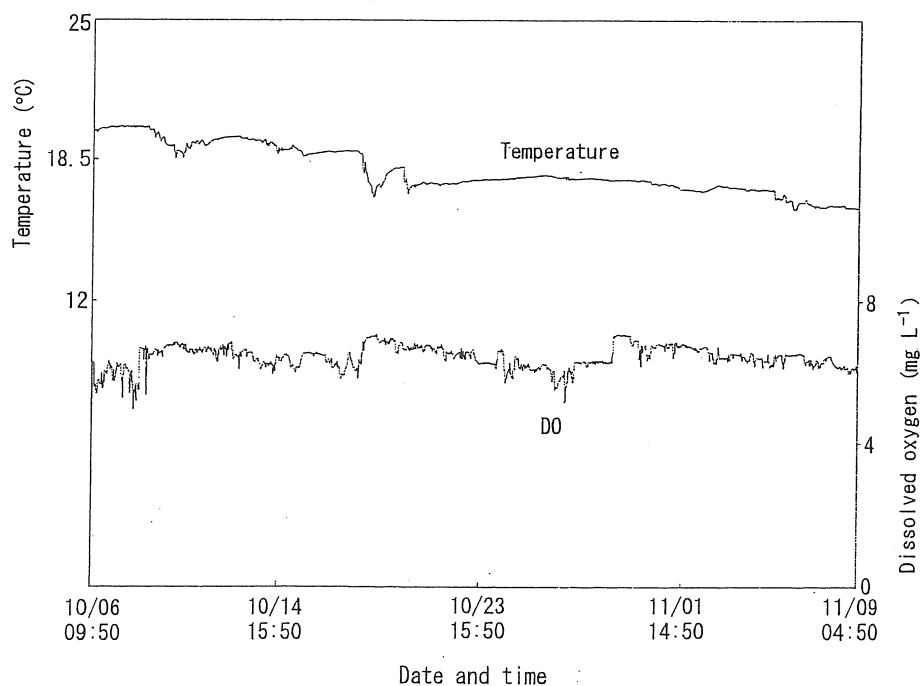
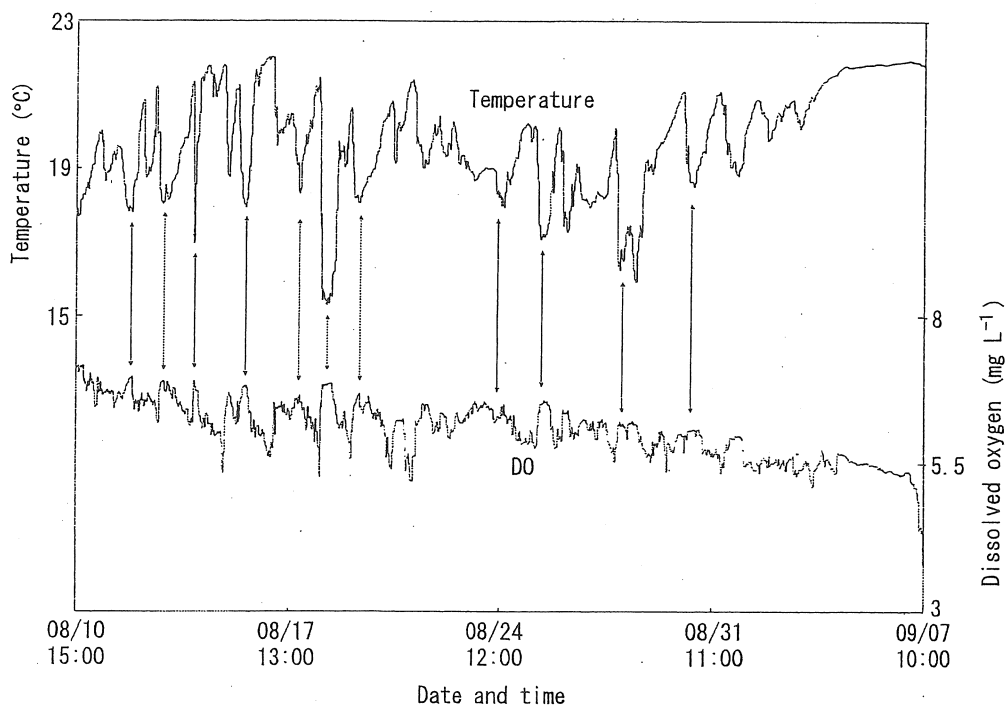


Fig. 5. Temporal variations in temperature and dissolved oxygen near the bottom at Stn. 2 in the periods between August and September 2000 (upper) and between October and November 2000 (lower). Arrows denote arbitrarily-selected coincidence of temperature drop and increase in dissolved oxygen.

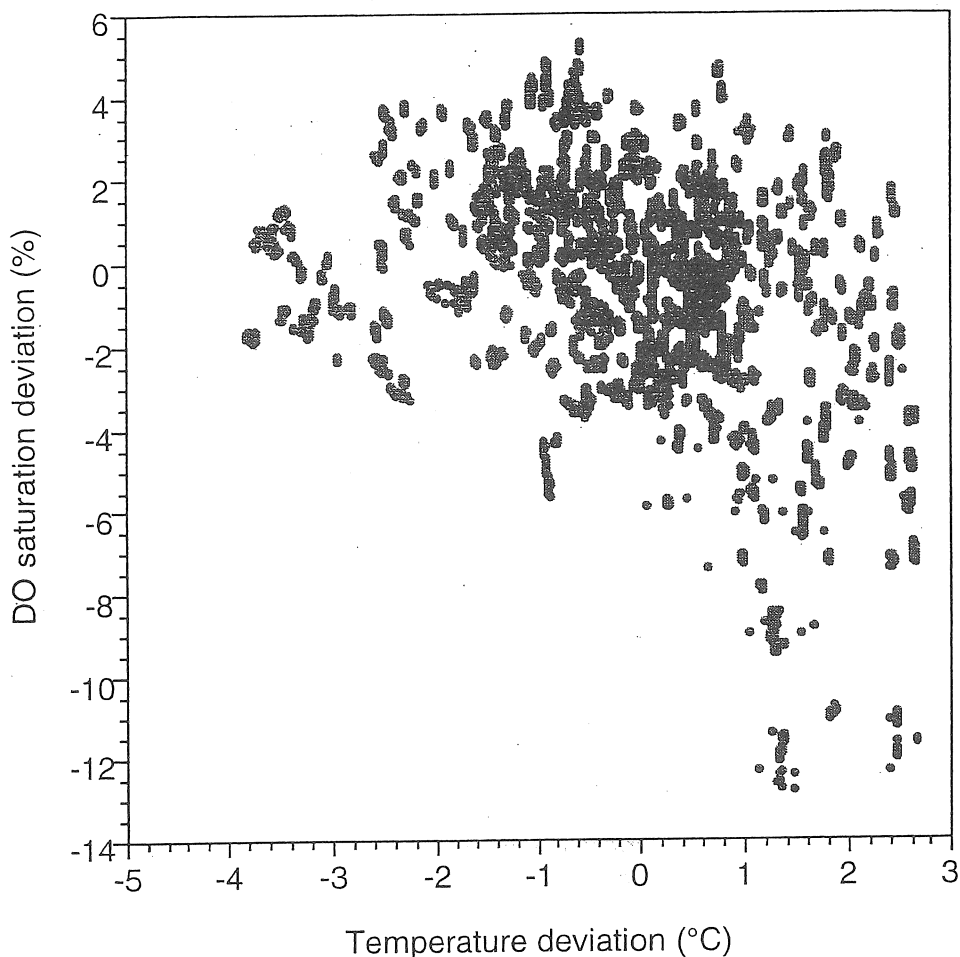


Fig. 6. Relationship between deviation of temperature and that of DO saturation in August and September 2000.

5. 文献

- Chamberlin, W.S. et al. (1990) *Deep-Sea Res.*, 37, 951-973.
Furuya, K. et al. (1993) *J. Oceanogr.*, 49, 459-475.
Kawamiya, M. et al. (1996) *Cont. Shelf Res.*, 16, 1683-1698.
平譯 享ほか (2001) *海の研究*、印刷中。
伊藤克彦 (1994) *水産と環境* (清水誠 編) 恒星社厚生閣、19-28。
岩手県 (1993) *平成5年岩手県水産技術センター報告*、120-129。
農林水産省 (2000) *漁業・養殖業生産統計年報*。327 p。
乙部弘隆 (1997) *東京大学海洋研究所大槌臨海研究センター報告*、22、39-44。
Platt, T. et al. (1980) *J. Mar. Res.*, 38, 687-701。
四竈 信行 (1980) *沿岸海洋研究ノート*、18、1-8。
山口正男 (1978) *タイ養殖の基礎と実際*。恒星社厚生閣、414 p。

Organic matter loadings in an aquaculture ground of shellfish

Yasuwo Fukuyo¹⁾, Ken Furuya²⁾, Katsushi Sekiguchi³⁾ and Hiroataka Otobe⁴⁾

1) Asian Natural Environmental Science Center, University of Tokyo

2) Graduate School of Agricultural and Life Sciences, University of Tokyo

3) Iwate Fisheries Technology Center

3) Ocean Research Institute, University of Tokyo

Summary

Organic matter loadings and dissolved oxygen concentration in bottom waters were examined in an aquaculture ground of shellfish. Field observation was conducted in spring, summer and autumn in Otsuchi Bay, a subarctic ria in the Sanriku coast, where intensive aquaculture of a scallop *Patinopecten yessoensis* and an oyster *Crassostre gigas* was conducted. Sinking flux of organic matter, mainly composed of fecal matter was higher under culture rafts of the oyster than under those of the scallop. The flux under the oyster rafts was $21.6 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ on average for spring and summer, while that under the scallop rafts was $7.75 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. The mean flux outside the raft area was $5.75 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Oxygen consumption rate of bottom seawater taken under the scallop rafts as determined by dark bottle incubation ranged from 0.26 to $3.07 \text{ mg L}^{-1} \text{ d}^{-1}$ with a mean of $1.49 \text{ mg L}^{-1} \text{ d}^{-1}$. The mean rate implied rapid depletion of dissolved oxygen near the bottom in 5 days. However, *in situ* dissolved oxygen was never exhausted in summer varying between 4.34 and $7.19 \text{ mg L}^{-1} \text{ d}^{-1}$. *In situ* continuous monitoring showed steady but slow decrease in dissolved oxygen in summer at a mean rate of $0.0409 \text{ mg L}^{-1} \text{ d}^{-1}$. The rate suggested it took 160 days to produce anoxic water. These observations indicated continuous supply of dissolved oxygen through water flow along the bottom was considerable and maintained the oxygen field in summer. The continuous monitoring of temperature, salinity and dissolved oxygen showed frequent occurrence of inflow of subsurface water from outside the bay along the bottom. Wind-induced circulation, density current and internal tide were considered to be responsible for the inflow of the outside water along the bottom. Although an *in situ* current meters were placed at the entrance of the bay during the field experiment, the instruments are not recovered due to a crash with a fishing boat. They are laid on the bottom. We keep trying to recover the sensors to conduct further analysis on the relationship between oxygen supply and water flow.