

河川水の流入が英虞湾の一次生産に及ぼす影響

館 洋・清水康弘*¹

Effect of Primary Production rate by river discharge in Ago Bay

Hiroshi TACHI, Yasuhiro SIMIZU

キーワード：英虞湾，一次生産，N:P比，制限栄養塩

英虞湾は、変化に富んだりアス式海岸が穏やかな内湾域を多数形成し、古くから真珠養殖が盛んに営まれてきた。また、冬期には支湾を中心にアオノリ養殖が営まれている。三重県の真珠養殖は全国に先駆け1893年に始まり、1960年代に湾内の筏台数は最盛期を迎えるが、1970年以降はいわゆる真珠不況の影響や、漁場環境の悪化による生産性の低下により、湾内の筏台数は減少してきている。しかしながら、現在も地域産業として重要な位置を占めていることに変わりはない。

一方、英虞湾は複雑な地形のために閉鎖性が強く、海水交換の悪い海域である。長年にわたる真珠養殖漁場としての利用と生活排水など陸域からの栄養塩負荷の増加により、底質の富栄養化が進行し（三重県水産研究所，1984-2010）、毎年のように貧酸素水塊や有害赤潮が発生するなど、漁場環境の悪化が顕在化している（中西ら，2001）。これに対して、底質改良剤の散布や、富栄養化した底泥の除去を目的とした浚渫などの環境改善策が実施されているが、根本的な解決策とはなっておらず、依然、貧酸素水塊や有害赤潮の発生が続いている。

そもそも、英虞湾の海底に堆積する有機物の主要な発生源は植物プランクトンによる一次生産であり（三重県，2008）、特に赤潮など植物プランクトンの急激な増殖は、動物による捕食が追いつかず、その多くが海底に沈降し腐敗する過程で酸素を消費するため、貧酸素化を助長しているものと考えられる。英虞湾は、東京湾や大阪湾、伊勢湾などの代表的な海域と比較して、河川の流入が少なく貧栄養の状態であると言われるが（増田ら，2004）、降雨の多くなる秋季には河口域を中心に珪藻類の急激な増殖が毎年のように見られていることから（三重県，2008）、英虞湾の環境改善対策を実施するためには、河川水の流入が一次生産量に与える影響を正しく把握する必要がある。

そのため、我々は、英虞湾内の河川の影響が異なる3つの海域において、陸起源物質の流入が増加する降雨後の一次生産量の変動を調査し、陸域からの栄養負荷が湾内の一次生産に与える影響を明らかにした。また、各海域における栄養塩状態と、それぞれの栄養塩条件下における植物プランクトンの増殖特性についても調査した。

材料および方法

1. 降雨前後の一次生産量調査

平成21年7月～10月に9回、平成22年1月に1回の計10回について一次生産量調査を行った。調査地点は、英虞湾の水質環境の特性をクラスター解析した増田らの分類（増田ら，2004）を参考に、河川の影響を強く受ける河口域（St.1）、影響の少ない湾奥域（St.2）、外洋の影響を受ける湾央域（St.3）の3地点（図1）とした。一次生産量の測定は溶存酸素の増減量を明暗ビンを用いて観測する酸素法を用いた（日本海洋学会，1990）。各調査地点において、日の出の約1時間後に表層（水深0.5m）、中層（測点により水深は異なる。河口域は3.5m、湾奥域は5m、湾央域は14m）、底層（B-1m）の海水を採水した。採水した海水は、層別に9本の200mlフラン瓶に分注し、3本を明ビン、3本を暗ビン、残り3本を試験開始時の溶存酸素濃度測定用とした。明ビン、暗ビンの各3本は元の採水層に垂下し、日没の約1時間前に取り上げ、溶存酸素濃度を測定した。なお、溶存酸素濃度の測定にはウインクラー法を用い、3本の平均を観測値とした。その他の観測項目として、調査開始時の水温、塩分、溶存酸素量、クロロフィルa量をクロロテック（アレック電子社製，AAQ1183）にて観測した。また、各層から採取した海水を、メンブレンフィルター（目合0.45 μm）でろ過後、栄養塩

*¹ 三重県津農林水産商工環境事務所水産室

($\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$) 濃度を自動栄養塩分析装置 (BLAN+LUEBE 製, TRAACS2000) により測定した。なお, 降水量は気象庁アメダスデータ (志摩市阿児町) を引用した。

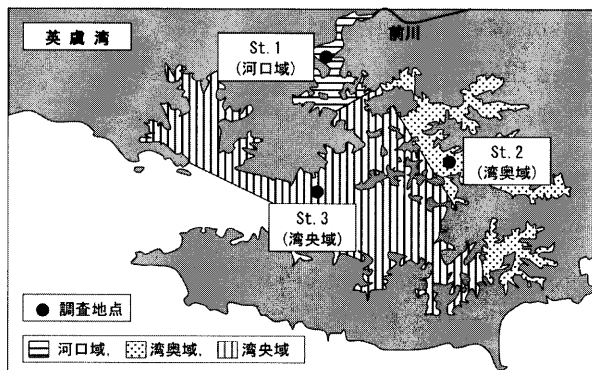


図1. クラスター解析による海域分類と調査地点

2. 植物プランクトン増殖と栄養塩調査

1) 現場での観測および試水処理

平成 22 年 6 月～11 月に月 1 回の頻度で調査を行った。調査地点は, 河川の影響を強く受ける河口域 (St.1), 影響の少ない湾奥域 (St.2), 外洋の影響を受ける湾央域 (St.3) の 3 地点 (図 1) とし, 各地点の表層 (水深 2m) と底層 (B-1m) の水温, 塩分, 溶存酸素量, クロロフィル a 量をクロロテック (同上記) にて観測した。また, 各層から採取した海水を, メンブレンフィルター (目合 $0.45 \mu\text{m}$) でろ過後, 栄養塩 ($\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$) 濃度を自動栄養塩分析装置 (同上記) により測定した。各海域で採取した海水は植物プランクトン増殖試験用に使用した。

2) 海水ろ過と栄養塩添加

植物プランクトン増殖試験に用いた海水は李・向井ら (1996) の手法を用いて処理を行った。すなわち, 各海水に含まれる動物プランクトンなどの植物プランクトン捕食者を取り除くため, $60 \mu\text{m}$ ナイロンメッシュフィルターでろ過し, このろ液を滅菌したスクリーキャップ付き試験管に 40ml ずつ分注し, 以下の様に栄養塩を添加した区を作成した。窒素添加区 (N 添加) では KNO_3 (1.011g/l) 液を $40 \mu\text{l}$ 添加し, 添加後の濃度を $10 \mu\text{M}$ とした。リン添加区 (P 添加) では, KH_2PO_4 (1.361g/l) を $4 \mu\text{l}$ 添加し, 添加後の濃度を $1 \mu\text{M}$ とした。また, 窒素とリンの両方添加区 (N+P

添加) と栄養塩を添加しない区 (無添加) を作成した (李・向井ら, 1996)。

3) 培養と増殖モニタリング

温度は 25°C , 照明は白色蛍光灯 $250 \mu\text{mol/m}^2/\text{s}$, 明暗サイクル 12 時間の条件下で静置培養した。増殖のモニタリングは, 蛍光光度計 (ターナーデザイン, 10-AU) により, クロロフィル生体内蛍光強度を 1 回 / 日, 10 日間測定した。なお, 各栄養塩添加区はそれぞれ 5 本ずつ作成して測定を行い, 結果はその平均値を用いた。

結果

1. 降雨前後の一次生産量調査

1) 降水量と栄養塩濃度の変動

試験期間中の降水量と栄養塩の変動を図 2, 3 に示した。調査期間中の降雨は, 7 月初旬から8月中旬にかけては断続的に, また, 9 月末からまとまった降雨があり, 10 月初旬には 150mm を超える豪雨があった。

硝酸態窒素濃度 ($\text{NO}_3\text{-N} + \text{NO}_2\text{-N}$) は, St.1 (河口域)

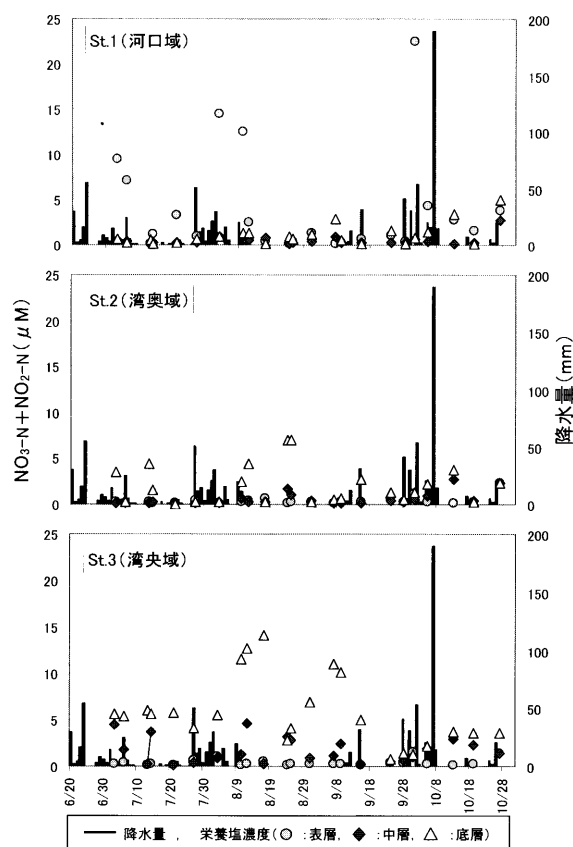


図2. 降水量 (阿児) と海域毎の硝酸態窒素 ($\text{NO}_3\text{-N} + \text{NO}_2\text{-N}$) 濃度の変動 (2009 年)

では表層においてのみ、降雨と連動して上昇しており、中・底層では大きな変動は見られなかった。また、St.2(湾奥域)、St.3(湾央域)では、表・中層とも低い濃度で大きな変動は見られず、底層でのみ濃度の上昇がみられたが、上昇時期は降雨と連動したものではなかった。また、アンモニア態窒素濃度(NH₄-N)は、St.1(河口域)の表層では降雨後に一時的な上昇が見られているが、St.2(湾奥域)、St.3(湾央域)では、大きな変動は見られなかった。

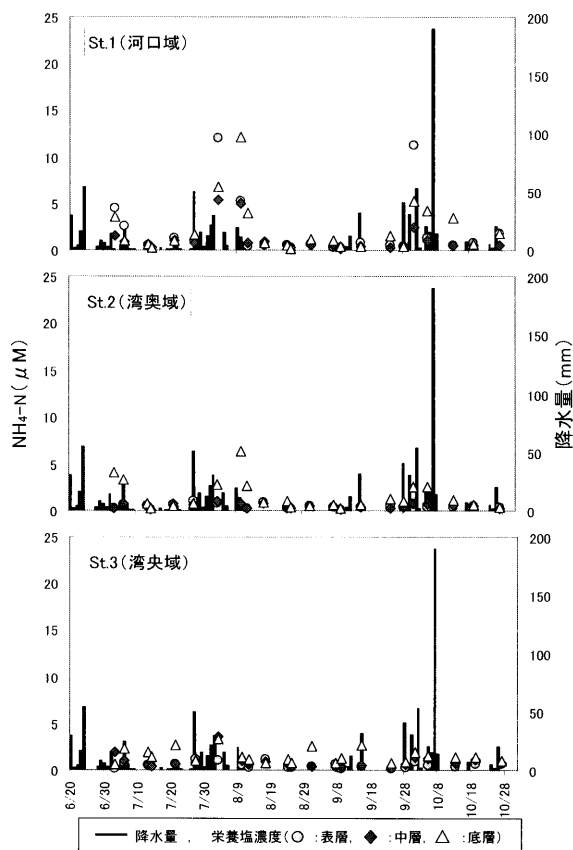


図3. 降水量(阿見)と海域毎のアンモニア態窒素(NH₄-N)濃度の変動(2009年)

2) 降水量と一次生産量の変動

調査期間中の降水量とNO₃-N、NO₂-N、NH₄-Nの合計値であるDINの変動を図4に、一次生産量の変動を図5に示した。河口域(St.1)の表層では、降雨のあった7月初旬から8月中旬、および10月初旬にDINの上昇が見られており、一次生産量もそれと連動するように、降雨のほとんどなかった8月下旬から10月初旬の一次生産量が0.29~0.63mgC/l/dayであったのに対し、降雨の続いた7月初旬から8月中旬で1.41~

2.08mgC/l/day、豪雨後の10月中旬では1.60 mgC/l/dayとなり、降雨後に一次生産量が大きく上昇していた。一方、湾奥域、湾央域では、いずれの測定層も0.5 mgC/l/day以下で、降雨による一次生産量の上昇は見られなかった。

2. 植物プランクトン増殖と栄養塩調査

1) 英虞湾における栄養塩環境

植物プランクトンの増殖には栄養塩濃度だけでなく、栄養塩比が重要であることが知られている(Redfield *et al.*, 1960)。相対的に不足する栄養塩類を推定する手段として用いられるレッドフィールド比(N:P=16:1)を、試験開始時におけるDIN、DIP濃度の散布図とともに図6に示した。測定を行った36サンプルのうちN:P比が16を超えたのは降雨直後の河口域表層の2サンプルのみであり、植物プランクトンの増殖面から見ると英虞湾のほぼ全域でリンに対して窒素不足の状態であった。特にN:P比が低い海域は、湾奥域と河口域の底層で、降雨前の河口域表層でも低かった。

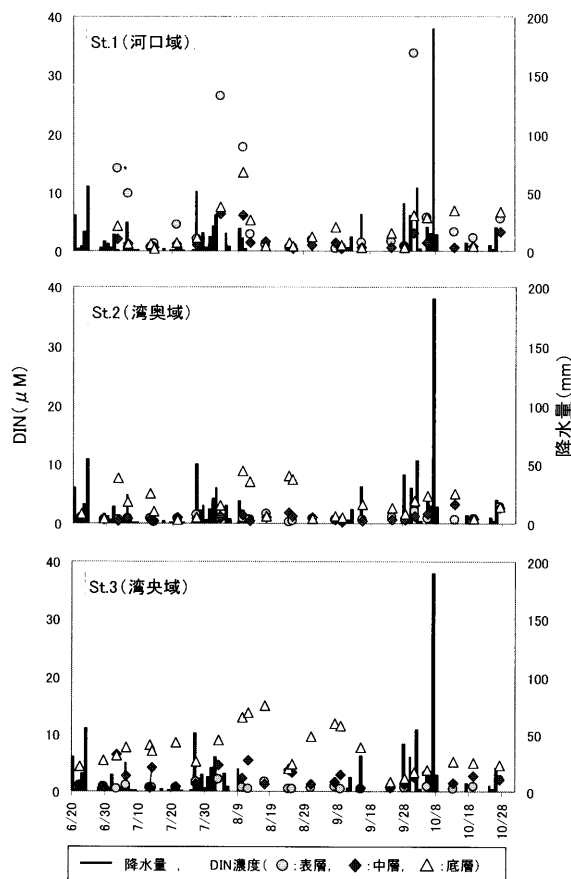


図4. 降水量(阿見)と海域毎のDIN濃度の変動(2009年)

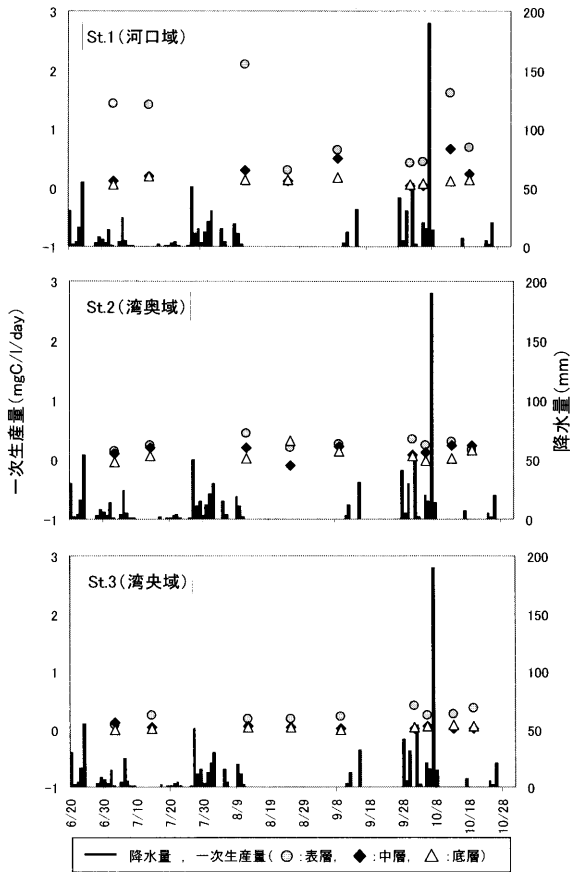


図5. 降水量(阿兒)と海域毎の一次生産量の変動(2009年)

2) 植物プランクトンの増殖制限要因

試験開始時の DIN 濃度と、培養期間中の最大蛍光値の関係を図7に示した。試験開始時の DIN 濃度が高いほど、培養期間中の植物プランクトンの蛍光値が高くなる傾向が見られた。また、各測点における栄養塩添加と最大増殖率の関係を図8に示した。リン(P)添加区では、無添加区より明らかに高い最大増殖率を示す測点は見られなかったが、窒素(N)添加区では、全ての測点で無添加区に比較して最大増殖率が高くなった。これらの結果から、英虞湾では3つの海域とも窒素が植物プランクトンの増殖制限要因となっていることが明らかとなった。さらに、無添加区やN+P添加区の最大増殖率も含めて分類すると、以下の3つの増殖パターンが見られた。

(1) 全ての添加区で高い増殖率を示すパターン

無添加区も含め、全ての添加区で高い増殖率を示したパターンで、湾央域の底層が該当した。湾央域は水深が約30mと英虞湾で最も深く、底層では光も制限要因となっていると考えられた。

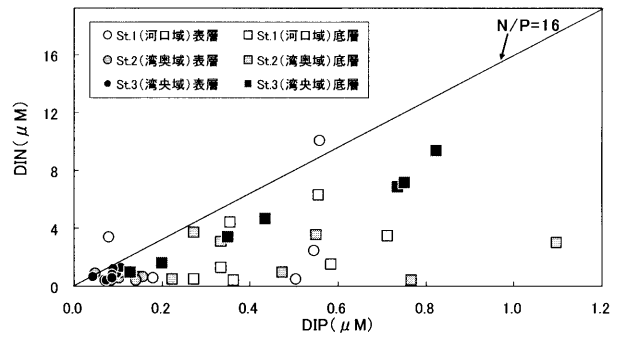


図6. 試験開始時の DIN 濃度と DIP 濃度の関係(2010年6月~11月)

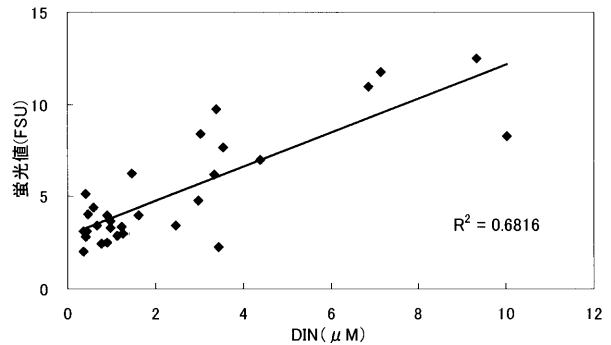


図7. 試験開始時の DIN 濃度と無添加区の最大蛍光値との関係(2010年6月~11月)

(2) N添加で増殖するパターン

N添加、およびN+P添加区で高い増殖率を示したパターンで、湾奥域や河口域の底層が該当した。これらの海域では底泥からリンの供給を受けるため、相対的に窒素不足状態が強く、窒素の単独添加でも高い増殖率を示したものと考えられた。また、河口域の表層もこのパターンを示したが、湾奥域や河口域の底層ほど明確ではなかった。これは、河口域の表層は河川から窒素の供給を受けることで、窒素不足状態が弱いためと考えられた。

(3) N+P添加のみで増殖するパターン

窒素やリンの単独添加では増殖率はさほど高くならず、同時添加でのみ高い増殖率を示したパターンで、湾奥域と湾央域の表層が該当した。これらの海域では窒素、リンがともに低い濃度となっており、どちらか一方が供給されても、他方が制限因子となるため、急激な増殖が起こりにくいものと考えられた。

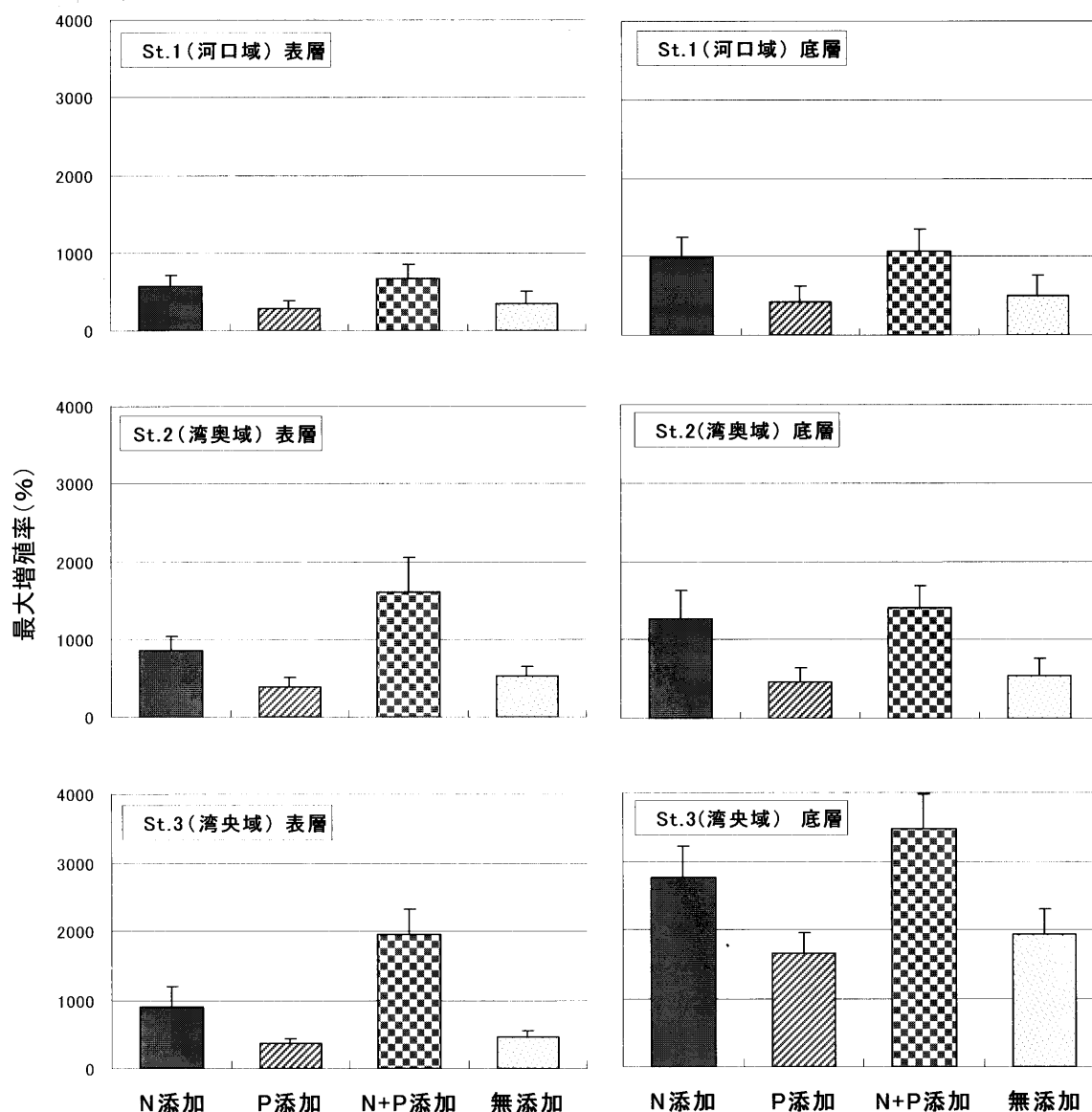


図 8. 各測点における栄養塩添加と最大増殖率 (2010 年 6-10 月) (左列: 表層 (水深 2m), 右列: 底層 (水深 B-1m))

考察

英虞湾における富栄養化の主たる原因は、陸域からの窒素やリンなどの栄養塩類による外部負荷や、底泥からの栄養塩溶出による内部負荷といわれている (三重県, 2008)。これらの栄養負荷が植物プランクトンの増殖に与える影響を知ることは、富栄養化の予測や効率的な制御のために非常に重要であると思われる。特に陸域からの栄養塩流入はその多くが河川から行われ、降雨時に増大するため、降雨前後の栄養塩濃度と植物プランクトンによる一次生産量を河口域、湾奥域、湾央域で測定した。

河口域では降雨後に表層を中心に、栄養塩濃度が顕

著に増加し、それとともに、一次生産量が著しく増大する現象が見られた。これらのことから、河口域においては河川からの栄養塩流入が植物プランクトンの増殖に強く影響しているものと考えられた。一方、湾奥域および湾央域では、10月の豪雨時においても栄養塩濃度の顕著な上昇は見られず、一次生産量も低水準で安定していた。英虞湾と同じく志摩半島に位置する矢湾における同様の調査では、河川の増水時に湾内の広域で DIN 濃度の上昇が見られており (今井ら, 2000)、これらの海域に比べると、英虞湾では河川からの栄養塩流入の影響は限定的であると考えられた。

また、植物プランクトンの増殖面から見た英虞湾の栄養塩比は、ほぼ全域でリンに対して窒素が不足状態

にあり、特に湾奥域と河口域の底層や、降雨のない時期の河口域の表層で顕著であった。このような状態の海域に、降雨や底泥からの溶出などで窒素が供給されると、植物プランクトンが急激に増殖しやすい状態になると考えられる。本調査でも8月以降は降雨がなく、河口域では窒素不足が顕著な状態であったため、10月初旬の豪雨時に河川から供給された窒素は河口域で急速に消費され、河口域以外の海域ではDIN濃度の上昇が見られなかったものと考えられた。

東京湾や大阪湾、伊勢湾などの代表的な海域と比較して、河川の流入が少ない英虞湾は貧栄養の状態であると言われるが(増田ら, 2004)、降雨の多くなる秋季には河口域を中心に珪藻類の急激な増殖や、湾奥域の底層では水温が上昇する夏季に、*Prorocentrum dentatum* や *Heterocapsa circularisquama* などの渦鞭毛藻が急激に増殖するといった現象が毎年のように見られている(三重県水産研究所, 1984-2010)。これらの現象は、窒素不足の海域に、降雨や底泥からの溶出、または外海水の浸入などによって窒素が供給されたことにより、一次生産が急激に増大することが要因と考えられた。

このように、植物プランクトンの急激な増殖は、*H.circularisquama* のような有害種の場合は魚介類のへい死を招き、また無害な種でも、動物による捕食が追いつかず、その多くが海底に沈降し腐敗する過程で酸素を消費するため、貧酸素化を助長するものと考えられる。英虞湾の環境改善対策を考える際、単に陸からの流入負荷の削減だけではなく、海域での一次生産を含めた健全な栄養塩バランスを考える必要がある。

要約

1. 河口域では、降雨後に栄養塩濃度の上昇と一次生産量の増大が見られ、河川からの栄養塩流入が植物プランクトンの増殖に強く影響していた。
2. 湾奥域および湾央域では、降雨時に栄養塩濃度の顕著な上昇は見られず、一次生産量も低水準であり、河川からの栄養塩流入が植物プランクトンの増殖に与える影響は限定的であった。
3. 植物プランクトンの増殖面から見た英虞湾の栄養塩比は、ほぼ全域でリンに対して窒素が不足状態であった。
4. 湾奥域と河口域の底層や、降雨のない時期の河口

域の表層では窒素不足が顕著で、降雨や底泥からの溶出などで窒素が供給されると、植物プランクトンが急激に増殖しやすい状態であると考えられた。

参考文献

- 今井 直・谷村 篤・太原英生・河村章人 (2000) : 河川水の流入が的矢湾の植物プランクトン現存量に及ぼす影響. 水産海洋研究 **64** (4), 215-223.
- 中西克之・増田 健・畑 直亜・山形陽一 (2001) : 英虞湾における底質汚染の現状と近年の進行状況. 三重県科学技術振興センター水産研究部研究報告, **10**, 71-77.
- 増田 健・山形陽一・畑 直亜 (2004) : 英虞湾の水質環境の特徴および長期変動, 三重県科学技術振興センター水産研究部研究報告, **11**, 23-32.
- 三重県 (2008) : 英虞湾物質循環研究調査報告書.
- 三重県水産研究所 (1984 ~ 2010) : 英虞湾汚染対策調査報告書, 志摩市.
- 日本海洋学会 (1990) : 海洋観測指針 (気象庁編), 244-248.
- Redfield, A.C., Ketchum, B.H. and Richards, F.A. (1963) : The influence of organisms on the composition of seawater, in "The Sea, 2, (ed. by Hill M.N.), Wiley Interscience, New York, 26-27.
- 李英植・向井徹雄・瀧本和人・岡田光正 (1996) : 現場の植物プランクトンを用いたAGP試験による制限栄養塩推定方法の検討. 水環境学会誌 **19** (5), 373-380.