

開放性沿岸域における基礎生産を制限する環境諸要因について

Environmental Condition as Limiting Factors in Primary Productivity in Disposed Coastal Area

足立久美子¹・中山哲厳²

Kumiko ADACHI and Akiyoshi NAKAYAMA

In order to clarify the primary productivity in disposed coastal area, we measured primary production of phytoplankton by simulated *in situ* deck incubations in southern part of Kashima-Nada every season from 1995 to 2002. Productivity was high in spring and when river water overflowed in summer. The mean value of the primary production in a site with a bottom depth of 40m in winter, spring, summer and autumn was estimated at 362, 932, 440, 210mg-C/m²/day respectively. Production was limited by lack of nutrients (DIN:<1μM, silicate:<5μM) or solar radiation (<17.5 MJ/m²/day). Spring bloom occurred from March to May when both nutrients and light condition were good.

1. はじめに

沿岸域における基礎生産機構を明らかにすることは、高次の生物生産性を評価するための基礎となるのみならず、環境変動が生物生産に及ぼす影響を評価する上で重要である。さらに、開放性の高い沿岸砂浜域では貝類やシラスなど低次栄養段階の生物が漁業対象種として重要な位置を占めており、これらの資源動態の評価にもつながる。このような観点から著者らは、国内有数の開放性砂浜域である鹿島灘沿岸域を対象として、種々の現地観測および流動・一次生産モデルの構築を行っている。本稿では、鹿島灘沿岸域における基礎生産量の季節変動と気象および水質との関係を整理し、基礎生産を制限する環境要因について考察した。その成果は、中山ら (2005)、新井ら (2006) が報告した流動・一次生産モデルの精度向上へ向け、計算で用いている生物化学過程パラメータや計算結果の妥当性を検討する材料として利用されるなど、開放性沿岸域の環境評価手法確立のための基礎知見となることが期待される。

2. 研究の方法

鹿島灘南部沿岸域において1995年7月～2002年7月まで、季節毎に水産工学研究所調査船たか丸による海洋観測を計29回実施した。各季節の観測時期および回数を表-1に示した。観測内容は多岐にわたるが、このうち図-1に示すSt.H1およびH4の2測点で擬似現場法による基礎生産量の測定を行った。両測点は、茨城県神栖市須田の(独法)港湾空港技術研究所波崎海洋研究施設(HORS)の沖合ライン上に位置し、離岸距離および水深はSt.H1

で1.1km・10m、St.H4で11km・40mである。なお、利根川河口からHORSまでの距離が約16kmである。

両測点において水中光量子計(Biospherical社製、INF-300)により光合成有効放射(PAR)を測定し、海中光量分布を把握した。表層水および海面直下の光量に対して50、25、10、1%光量となる計5水深からニスキン採水器を用いて採水した。動物プランクトン等を除去するため200μmメッシュのフィルターを通過させた試水を、容量1Lの透明ポリカーボネート瓶に分注し、NaH¹³C₃O₃溶液(¹³C試薬)を一定量添加したのち、船上水槽でそれぞれの水深に相当する光量に調節した状態で培養試験を行った。培養時間は10:30～15:30の範囲内の3～4時間で、光量調節には遮光フィルターを用い、水温は表層水を水槽にかけ流して調整した。培養前後の試水をWhatman GF/Fフィルター(孔径約0.7μm)で濾過し、フィルター上に捕捉したプランクトン粒子中の炭素安定同位体比および有機炭素量を質量分析計または¹³Cアナライザーにより測定した。また¹³C試薬を添加する前の試水につい

表-1 観測の実施時期と回数

季節	観測実施時期	Case 数
冬季	2月下旬	6
春季	4月中旬～5月下旬	7
夏季	7月上旬～8月上旬	9
秋季	11月上旬～12月上旬	7

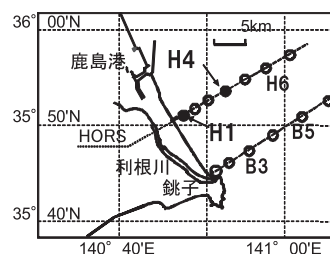


図-1 調査地点

1 正会員 水産修 (独法)水産総合研究センター水産工学研究所水産基盤グループ環境水理チーム
2 正会員 工修 (独法)水産総合研究センター水産工学研究所水産基盤グループ長

てchl.a, 全炭酸, 栄養塩の測定を行った. chl.aは海水0.2LをGF/Fフィルターで濾過し, フィルターをジメチルホルムアミドに浸漬することにより抽出した色素の蛍光量を, 蛍光光度計(ターナーデザイン社製, 10-AU)で測定して算出した. 全炭酸はTOC計(島津製作所製, TOC-5000A)で測定した. 栄養塩濃度は孔径0.45 μ mのメンブレンフィルターを通過した試水をBRAN+LUEBBE社製のTRAACS800で三態窒素(DIN:硝酸塩, 亜硝酸塩, アンモニウム塩), リン酸塩および珪酸塩について測定した.

観測点では, 多項目水質計(JFEアレック製, ACL-208)による水質の鉛直測定や, 透明度板による透明度の測定等も行った. また観測日を挟んだ数日間は空中光量子計を調査海域近くの陸上に設置し, 光量子量を連続的に測定して, これを海面PARとした.

粒子中の炭素安定同位対比と有機炭素量, 海水中全炭酸量の測定結果を用いて培養中の炭素同化量を算出し(Hamaら, 1983), 培養時間で除して1時間当たりの基礎生産量を概算した. 1日当たりの生産量は, 日出間の同化速度が変化しないと仮定し, 1日当たりの海面上PARと培養中の海面上PARの比から見積もった. さらに, 基礎生産量の鉛直分布から単位海面当たり生産量を算出した. これらの結果と, 同日の観測で得られた水温, 海面上PAR, 海中の栄養塩濃度等との関係について整理し, 基礎生産を制限する環境条件について考察した.

なお, 考察においては, 2007年春季以降に同海域において行っている海洋観測およびHORS観測機橋において港湾空港技術研究所の常駐スタッフにより日毎に実施されている採水観測の結果を一部使用した.

3. 結果と考察

(1) 植物プランクトン量の季節変動

1999年9月～2008年12月のHORS汀線部における各月のchl.a平均値を図-2に示した. 汀線部のchl.aは, 11～1月に低レベルで, 2月上旬～3月中旬に春季増殖が始まり, chl.aの高い期間が3ヶ月程度続く. 春季増殖の規模は冬季の栄養塩環境によって変動するため, この間のデータにばらつきがみられる. 冬季の栄養塩濃度には黒潮と親潮系南下水の勢力分布が関与している(足立ら, 2007). 6月以降, 秋季にかけては海域の成層化に伴い栄養塩が枯渇してchl.aが減少するが, 梅雨や台風来襲により河川が増水したときには, 栄養塩が大量に供給されchl.aが増加する. 海岸部は河川や砂浜に点在する排水口を通じて淡水の影響を受けやすい反面, 深部からの栄養塩供給を受けにくく, 水質変動の特徴が沖合と全く一致するわけではないが, St.H1～H4におけるchl.a季節変動のパターンは海岸部と同様であると考えられる.

生産量調査の実施時期を表-1のとおり「冬季・春季・夏季・秋季」として示したが, それぞれの時期を植物プランクトン変動から整理すると, 春季増殖が始まる前後, 春季増殖期後半, 夏の栄養塩枯渇によるchl.a低下期または出水による増加期, 晩秋のchl.a低下期に該当する.

(2) 有光層の季節変化

St.H4における海中の光合成有効放射(PAR)鉛直分布を図-3に示した. PARが海面の1%となる有光層水深は, 植物プランクトンが多い春季には16～32mと浅いのに対し, 夏～秋季には深くなる傾向を示し, ほとんどのケースで30m以上となった. 冬季は既に春季増殖が始まっているケースで20m以下となった. 1995年～2008年に, St.H4, H6, B3, B5の4点(図-1参照)で測定した有光層水深と透明度との関係を図-4に示した. 海水中の懸濁物や溶存物の濃度が鉛直的に変化し, 消散係数が一定でない場合が多いためばらつきが生じるが, 有光層水深は透明度の2.7倍程度となり, 一般に透明度から有光層水深を推定する場合に使用される値に等しかった. なお, St.H1は季節を通して全層が有光層となった.

(3) 基礎生産量の季節変動の特徴

季節ごとの水質および基礎生産量の鉛直分布について

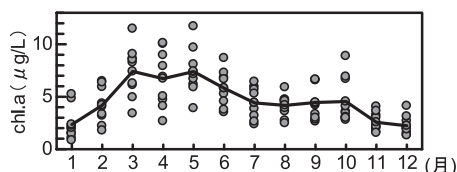


図-2 HORS 汀線部におけるchl.a月平均値 (1999年9月～2008年12月)

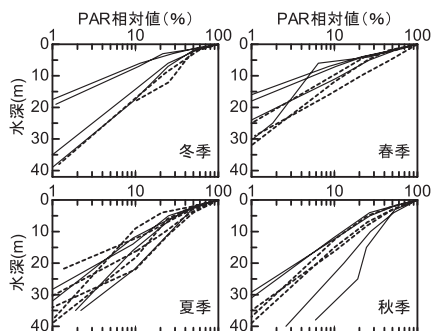


図-3 St.H4における季節別のPAR鉛直分布 (海面直下のPARを100%としたときの相対値)

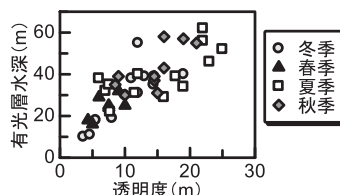


図-4 鹿島灘南部における季節別の透明度と有光層水深との関係 (1995～2008年の同海域における測定結果)

て、2001年秋季～2002年夏季の測定結果を図-5に例示した。これらから、当海域における水質と基礎生産の季節変動特性を以下にまとめた。まず冬季には、栄養塩が全層で豊富であるが生産層は表層に偏る。春季には、光量の増加や水温上昇を契機として増殖が活発になり、いわゆる春季増殖期を迎え生産性が高くなっているが、透明度が低下する分生産層が浅い傾向にある。なお図-5に例示した2002年春季は、生産層が30mと春季の中ではやや深く、また栄養塩濃度が高い例で、他のケースでは、春季増殖により栄養塩が消費され濃度が既に低下している事例もみられた。その後、成層化にともない表層で栄養塩の枯渇が生じる。夏季には著しい栄養塩枯渇により表層で生産が低下し、季節躍層の深部側に生産のピークが現れる。例示した2002年夏季の場合、chl.aの亜表層極大が水深18～25mに存在し、生産量もその付近で極大となっていた。ただし夏季には、利根川からの出水により栄養塩の豊富な低塩分水が表層を覆っている場合、水温・日射条件が良好であることから表層の生産性が非常に高くなった。秋季は成層状態が解消され、栄養塩濃度が回復過程にあるが、日射が少なく生産性が非常に低い。

表層における基礎生産量および単位海面当たり日生産量の算出結果を図-6に示した。生産量の表層値は、春・夏季に大きく秋・冬季に小さい傾向があった。ただし図中、点線で囲まれた4ケース（表層の生産量が20mg-C/m³/hour以上）は、いずれも河川出水の影響により表層の栄養塩濃度が高かった場合である（図-7、8も同様）。

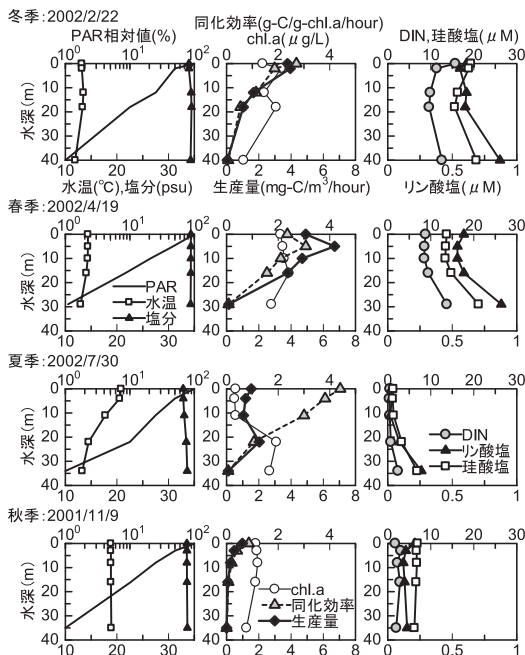


図-5 St.H4における水質・PAR・基礎生産量の鉛直分布（冬季・春季・夏季・秋季の測定事例）

夏季には岸に近いSt.H1でそのようなケースが多くみられ、それ以外のケースでは春季に比較して生産量が多いとはいえない。単位海面当たり日生産量は、St.H1における平均値が冬・春・夏・秋のそれぞれで229, 516, 533, 157mg-C/m²/day, St.H4における平均値が362, 932, 440, 210mg-C/m²/dayと見積もられた。夏季について、出水時とそれ以外のケースとに分けて平均値を比較すると、岸に近いSt.H1ではそれぞれ1116, 161mg-C/m²/dayと差が大きく、表層で栄養塩の枯渇が生じる夏季には、河川水の挙動が生産性に大きく関与していることが示された。

St.H1とH4では、生産量の表層値でみると岸側のH1の方が若干大きい傾向がみられた。単位海面当たり生産量で比較すると、水深はSt.H1とH4で10m:40mと4倍の差があるが、生産の盛んな層はおもに光の多い表層であるため、低塩分時のデータを除くと概ね1.5倍程度の差に止まった。

閉鎖性沿岸域における基礎生産量の測定例は比較的多く、日本全国沿岸海洋誌（1985）に海域ごとにまとめられているが、開放性沿岸域での報告例は少ない。東京湾や伊勢湾では年間平均値が1000mg-C/m²/day以上となり、外海水の影響を受けやすい瀬戸内海全域での平均的生産量は380mg-C/m²/dayと見積もられており、鹿島灘沿岸で得られた結果は瀬戸内海に近いものといえる。

(4) 基礎生産を制限する環境諸要因

基礎生産を制限する環境因子として水温・光量および栄養塩について検討した。図-7に、基礎生産量と表層水温との関係を示した。高水温時の生産量が多いように見えるが、河川出水による栄養塩供給があった場合を除くと、生産量と水温との間に明瞭な関係はみられなかった。

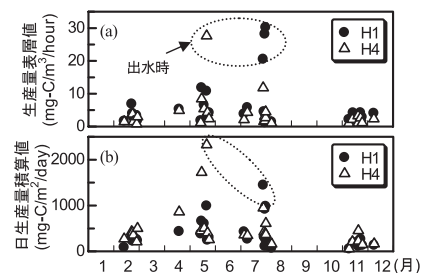


図-6 基礎生産量の季節変化（図中、点線内は河川出水あり）
(a): 表層における生産量, (b): 単位海面当たり日生産量

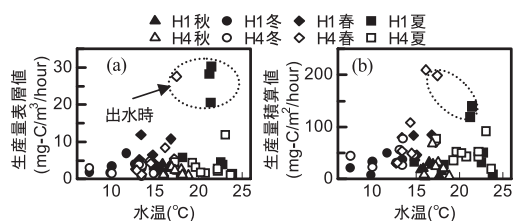


図-7 基礎生産量（1時間当たり）と表層水温との関係
(a): 表層における生産量, (b): 単位海面当たり日生産量

図-8に、基礎生産量と海面光量との関係を、秋・冬季と春・夏季に分けて図示した。基礎生産量と海面光量との間には、日射の少ない秋・冬季において生産量との間に正の相関がみられるのに対し、春・夏季には相関がみられない。秋季には、栄養塩濃度の回復が遅れ、低濃度である事例が若干みられるが、基本的に秋・冬季には栄養塩の枯渇が生じておらず、生産性は光量に大きく依存していると考えられた。

一方、栄養塩の枯渇しやすい夏季について、表層における生産量とDIN・珪酸塩濃度との関係を図-9に示した。それぞれ $1\mu\text{M}$ 、 $5\mu\text{M}$ を下回った場合に生産量が非常に小さく、栄養塩の枯渇がプランクトン生産を制限したと考えられた。リン酸塩については、夏季の表層ではほとんどのケースで $0.1\mu\text{M}$ を下回っており、分析精度上の問題から図示していない。春季にも栄養塩の枯渇により生産が制限される現象がみられたが、栄養塩が豊富であっても生産性が低い場合も多く、水温など、栄養塩以外の要因による制限も受けているようであった。

(5) 環境諸要因の基礎生産への影響度

DIN、リン酸塩、珪酸塩濃度がそれぞれ1, 0.1, $5\mu\text{M}$ 以下になると基礎生産が低下するとし、上記濃度を「閾値」、それ以下を「枯渇」状態であると仮定した。リン酸塩の場合、実際には $0.1\mu\text{M}$ では生産性の低下はみられず、閾値はさらに低いと考えられるが、測定精度上の問題から便宜上 $0.1\mu\text{M}$ とした。定常観測を行っているHORS海岸部における栄養塩変動から、枯渇状態となる日数の割合を月ごとに算出した結果を図-10に示した。なお、海岸部はアンモニウム塩濃度が局所的に高く、DINよりも硝酸塩濃度の方が調査海域のDIN変動に近い

ことから、ここでは硝酸塩濃度で示した。栄養塩の枯渇割合は、10~1月には10%以下と非常に低いが、春季増殖の始まる2月頃から増加し、6~8月には硝酸塩で70%以上が、リン酸塩で50%以上が枯渇となり、夏季を中心に、植物プランクトンの活発な増殖を制限する栄養塩環境にあると考えられた。沖合では陸水の影響を受けにくいので、夏季の表層における枯渇状態はさらに進んでいると考えられる。珪酸塩は、平均値では枯渇割合が50%を超えないが、年間を通じてばらつきが大きい。また2月から高い値となる年が多くみられ、硝酸塩やリン酸塩と変動傾向が異なる結果となっている。春季増殖期には大型珪藻が優占することから、珪酸塩の消費が著しい可能性もあるが、春季増殖初期に消費される栄養塩の構成比は海水中の濃度構成比にほぼ等しく、硝酸塩：リン酸塩：珪酸塩=17：1：27と見積もられた(足立ら, 2007)ことを考えると、珪酸塩の閾値を $5\mu\text{M}$ としたのは過大であったかもしれず、検討の余地がある。

栄養塩が枯渇状態の場合とそうでない場合に分け、日生産量と海面光量との関係をみてみると(図-11)、海面PARが $35\text{mol}/\text{m}^2/\text{day}$ 以下のときは栄養塩が枯渇してなくても生産量が少なかった。図-12に、観測日の海面光量と銚子における日射量の変動(気象庁HP参照)を示した。なお、海面PARの観測値($\text{mol}/\text{m}^2/\text{day}$)と銚子における日射量IRR($\text{MJ}/\text{m}^2/\text{day}$)との関係は、

$$\text{PAR} = 2.05 \times \text{IRR} - 1.02 \quad (R^2 = 0.992) \quad \dots\dots (1)$$

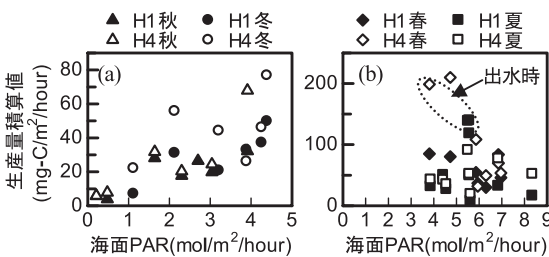


図-8 単位面積当たり基礎生産量と海面光量との関係
(a): 秋季と冬季, (b): 春季と夏季

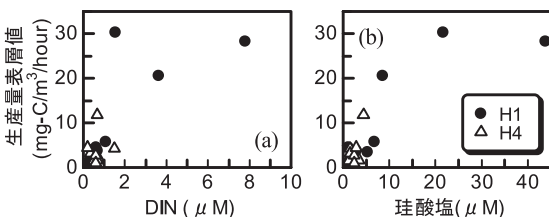


図-9 夏季の表層部における基礎生産量と栄養塩濃度との関係
(a): DIN, (b): 珪酸塩

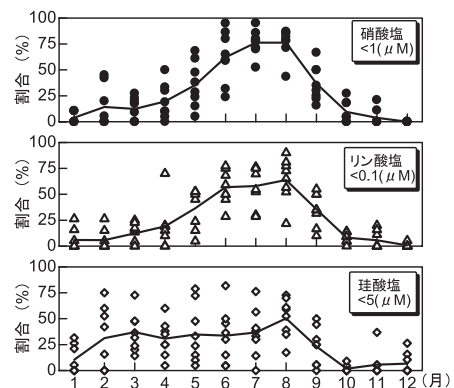


図-10 HORS海岸部で硝酸塩・リン酸塩・珪酸塩濃度がそれぞれ1, 0.1, $5\mu\text{M}$ を下回る日数の月別割合(2001~2007年)

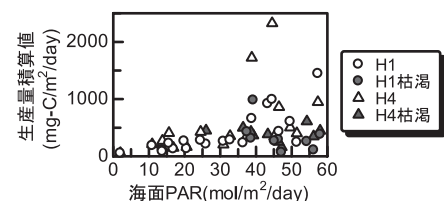


図-11 日生産量と海面光量との関係

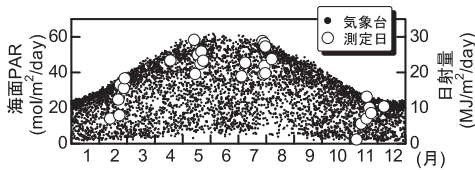


図-12 測定日の海面光量および1992～2007年の銚子地方気象台における日射量

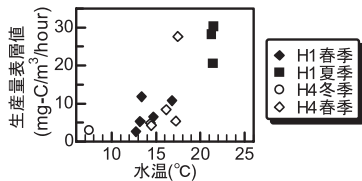


図-13 表層部における基礎生産量と水温との関係：日射と栄養塩の制限を受けないケース

であった。11月～2月中旬には快晴日でも光量が $35\text{mol}/\text{m}^2/\text{day}$ ($17.5\text{MJ}/\text{m}^2/\text{day}$ に相当)を下回っていることから、この時期には光量不足が基礎生産を制限しており、生産が表層に偏る原因にもなっていると推察された。

以上から、開放性沿岸域である鹿島灘における植物プランクトン基礎生産は、夏季を中心に栄養塩枯渇が、秋季～冬季には光量不足が基礎生産を制限する要因として重要であることが示された。閉鎖水域である東京湾の場合、夏季に栄養塩が不足することは少なく、水温や日射量が生産性を支配する要因として重要である(佐々木, 1996)。それに対し鹿島灘は、水温や日射条件は東京湾とさほど変わらないが、栄養塩環境が著しく異なり、春季増殖期後半から9月にかけて有光層でしばしば枯渇が生じることから、開放性沿岸域では栄養塩環境が生産性の制限因子として、より強い役割を果たしているといえる。栄養塩と光条件の制限を受けにくく生産性が高い時期は3月～5月頃で、春季増殖が生じる時期に一致した。また、両条件の制限を受けていないケースでは、基礎生産量と水温との関係(図-13)に正の相関がみられ、栄養塩と光量条件をクリアしている場合には、生産性は水温に依存することが示唆された。

中山ら(2005)による鹿島灘一次生産モデルにおいては、植物プランクトン生産速度が温度・光量・栄養塩濃度に依存するよう定式化あるいは半飽和定数を与えて計算を行っているが、今後、本調査結果をもとにこれらの式およびパラメータの調整方法について検討する予定である。

4. まとめ

1995年から2002年までの8年間にわたり、鹿島灘南部沿岸域において擬似現場法による基礎生産量の測定を季節毎に実施した結果、以下のことが明らかとなり、低次生産モデルの今後の精度向上に必要な知見を得た。

- (1) 光量が海面の1%となる有光層水深は、植物プランクトンが多い春季には16～32mと浅く、夏～秋季にはほとんどのケースで30m以上と深かった。また有光層水深は、透明度の2.7倍程度であった。
- (2) 基礎生産量は、日射量が増加する2月頃に増加して春季増殖期を迎え、栄養塩が消費された後は成層化も相まって枯渇状態となるため夏季に低下し、日射量と水温が低下する秋季から冬季に非常に小さくなるという季節変動傾向を示した。ただし梅雨期から秋季には河川出水による栄養塩供給があると、岸に近い浅部を中心に表層の生産が高くなった。生産の中心は、日射量が少ない季節には表層部に、表層で栄養塩が枯渇する夏季には季節躍層の下部に偏った。単位面積当たり日生産量は、水深40m地点における冬春夏秋の平均値がそれぞれ362, 932, 440, 210 $\text{mg-C}/\text{m}^2/\text{day}$ となった。
- (3) 基礎生産を制限する環境要因として水温・光量・栄養塩条件について検討したところ、DIN・珪酸塩でそれぞれ $1\mu\text{M}$, $5\mu\text{M}$ 以下と栄養塩が枯渇している場合、また日射量が $17.5\text{MJ}/\text{m}^2/\text{day}$ を下回り光量不足となる場合に生産が制限され、それぞれ夏季、晩秋～冬季に該当していた。両者ともに好条件となり生産性が高い時期は3月～5月頃で、春季増殖が生じる時期に一致した。

謝辞：本研究の遂行に当たって、元中央水産研究所の佐々木克之氏、たか丸の乗組員ならびに調査時に水産工学研究所環境分析研究室に在籍していた皆様に多大なご協力をいただいた。ここに厚く御礼申し上げる。なお、本研究の一部は(独法)港湾空港技術研究所、水産工学研究所ならびに茨城県水産試験場の共同研究「碎波帯環境と水産生物動態に関する共同研究」の成果の一環である。

参 考 文 献

- 足立久美子・中山哲蔵・齊藤 肇 (2007)：鹿島灘海岸における長期モニタリングからみた栄養塩および植物プランクトン変動，海岸工学論文集，第54巻，pp. 1156-1160。
- 新井雅之・中山哲蔵・足立久美子・齊藤 肇・奥西 武・八木 宏 (2006)：鹿島灘・九十九里浜沿岸での一次生産に及ぼす利根川・那珂川の影響について，海岸工学論文集，第53巻，pp. 1101-1105。
- 気象庁：気象統計情報(オンライン)，<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>
- 佐々木克之 (1996)：内湾および干潟における物質循環と生物生産 [19]，海洋と生物，vol.18, no.2, pp. 138-146。
- 中山哲蔵・齊藤 肇・新井雅之・足立久美子・奥西 武・八木 宏 (2005)：鹿島灘北部海域の一次生産に及ぼす那珂川の影響，海岸工学論文集，第52巻，pp. 1051-1055。
- 日本海洋学会沿岸海洋研究部会編 (1985)：日本全国沿岸海洋誌，東海大学出版会，1106p。
- Hama T., T.Miyazaki, Y.Ogawa, T.Iwakuma, M.Takahashi, A.Otsuki and S.Ichimura (1983): Measurement of Photosynthetic Production of a Marine Phytoplankton Population Using a Stable ^{13}C Isotope, Marine Biology, 73, pp. 31-36。