

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

Long-Term Monitoring on Variations of Nutrients and Phytoplankton Biomass in
Surf Zone of Kashima-Nada

足立久美子¹・中山 哲巖²・齊藤 肇³

Kumiko ADACHI, Akiyoshi NAKAYAMA and Hajime SAITO

In order to clarify the primary productivity in coastal area, we have sampled sea water in the surf zone on Kashima-Nada since July 1999, and investigated the variations of nutrients and chl a . It has been shown that the temporal variations of nutrients concentration are due to various meteorological or oceanographic conditions, and vertical mixture or stratification of sea water as seasonal change. It is thought that the difference in the rainfall from late spring to summer cause the yearly variation of nutrients concentration and phytoplankton biomass in summer. Moreover, it is thought that course of the Kuroshio Current in winter effects nutrients concentration and phytoplankton biomass in period of spring bloom.

1. はじめに

沿岸域における一次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、環境変動にともなう生物生産への影響を評価する上でも重要である。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の一次生産機構を明らかにすることを目的とした種々の現地調査および数値モデルの構築を行っている。本稿では、中山ら(2005)、新井ら(2006)が示した一次生産モデルの計算結果の妥当性や、計算に使用する生物化学過程パラメータの妥当性を検討するための基礎資料として、鹿島灘南部の海岸部で定常的に行っている採水観測の過去7年間のデータから、栄養塩や植物プランクトン色素量の季節変動傾向と気象・海象要因や水塊構造との関係、ならびに春季増殖発生の様相を明らかにすることを目的とした。

2. 研究の方法

茨城県神栖市須田地先の(独法)港湾空港技術研究所波崎海洋研究施設(HORS)観測栈橋においては、同研究所の常駐スタッフにより種々の定常観測が日毎に実施されている。鹿島灘の海岸は、元来は約80 km長の単調な砂浜海岸であるが、鹿島港により南北に分断され、また近年の海岸侵食の進行により、海岸保全のためのヘッドラ

ンドが多く設置されている。南部海岸は鹿島港と利根川河口に挟まれた約20 km長の砂浜で、HORSは図-1に示したように、利根川河口から約16 km北側に位置し、南北各4 kmには他の海岸施設がないポイントである。観測栈橋は総延長392 mで、先端部の水深は約5 mである。

1999年7月以降、HORS常駐スタッフによる定常作業項目として、汀線部と栈橋先端部の2点で表層水の採水が行われている。測定項目は水温、塩分、chl a 濃度および栄養塩濃度である。水温は採水後直ちにデジタル水温計で測定され、施設内の実験室にてYEO-KAL社製のS-T計MODEL602 $_{MK}$ による塩分測定とchl a および栄養塩測定のための海水の一次処理が行われる。一次処理は、chl a 測定用として海水0.2 LをWhatman GF/Fフィルター(孔径約0.7 μ m)でろ過しフィルターを冷凍保存、栄養塩測定用として孔径0.45 μ mのメンブレンフィルターを通過した試水を凍結保存する方法による。著者らはサンプルを定期的に回収し、chl a と栄養塩の定量を行った。chl a は、ジメチルホルムアミドにより抽出した色素の蛍光量をターナーデザイン蛍光光度計により測定して算出した。栄養塩はBRAN+LUEBBE社製のTRAACS800で三態窒素(硝酸塩、亜硝酸塩、アンモニウム塩)、リン酸塩および珪酸塩濃度を測定した。

これらの測定値と気象庁が公表している銚子地方気象

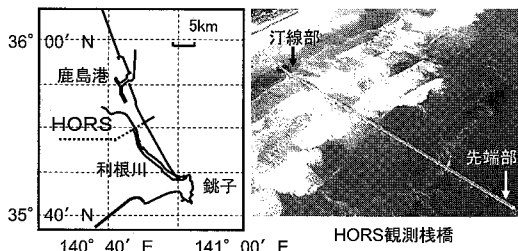


図-1 HORS位置図および観測栈橋の外観

- | | | |
|-------|-----|------------------------------------|
| 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
開発システム研究室 |
| 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
水理研究室 |
| 3 | 農博 | (独法)水産総合研究センター水産工学研究所
環境分析研究室 |

台(1999～2006)における日平均気温, 雨量, 日射量, 日平均風速・風向データをあわせてデータセットとし, 水質の季節変動および年変動傾向を整理し, 気象・海象要因との関係を考察した。さらに, 植物プランクトン変動に関しては, 特に春季増殖過程に着目して検討した。

3. 結果と考察

(1) 水質の季節変動と年変動

HORS 汀線部と先端部の水質変動を 1999 年 8 月～2006 年 12 月の月別平均値として図-2 に示した。各水質項目の季節変動・年変動の特徴を以下にまとめた。なお文中の数値はすべて汀線部の測定値である。

水温は 8～9 月に最高, 1～3 月に最低水温となった。最高水温の月平均値は 20.5(2004 年)～25.0℃(2001 年)と 4.5℃の最大差となった。2004 年夏季には黒潮が銚子半島の遙か沖を東方向に流去していたのに対し, 2001 年夏季には黒潮が沿岸を北上する傾向にあった。最低水温の月平均値は 4.9(2005 年)～7.6℃(2002 年)と 2.7℃の最大差となった。両年を比較すると, 黒潮流路には大きな違いがないが, 親潮分枝から派生した南下流の到達緯度が, 2005 年の方が 30 マイル程度南であったうえ, 南下流の水温が約 5℃低かった点で顕著な差がみられた。このように, 水温変動は主として沖合の海洋構造により特徴づけられ, 気温や陸水流入の影響は認められなかった。

塩分の月平均値は最高値が 34.3 psu(2006 年 4 月), 最低値が 29.5 psu(2004 年 10 月)であった。河川流量が少なく海水が鉛直混合状態となる冬季に高く, 河川流量が多い夏～秋季に低い傾向があった。冬季において, 黒潮の接岸傾向が強く高温・高塩分となったのが 2001・2002 の両年である。また 2004 年秋季, 2006 年夏～秋季には, 記録的豪雨により長期にわたって低塩分状態が持続した。このように, 塩分変動は沖合の海洋構造のほかに河川水の影響を強く受けた。

栄養塩濃度は, 10 月から 1 月にかけ海水の鉛直混合により上昇するが, 2～3 月に春季増殖が始まると速やかに減少した。6 月以降は基本的に低レベルで推移するが, その変動特性は強い南風による沿岸湧昇や降雨による河川水流入等の気象要因に支配され, 年による大きな差異が生じていた。全データの平均値は, 硝酸塩, 亜硝酸塩, アンモニウム塩, リン酸塩, 珪酸塩でそれぞれ 3.9, 0.56, 3.6, 0.26, 10.6 μM であり, 著者が船舶観測により得た HORS 沖合部のデータと比較すると, 三態窒素に占めるアンモニウム塩の割合が高いことが特徴的である。

中山ら(2005)による鹿島灘一次生産モデルでは, 植物プランクトン増殖による硝酸塩とリン酸塩取り込みの半飽和定数をそれぞれ 1.5, 0.15 μM と仮定して用いている。半飽和定数は植物プランクトンが低濃度の栄養素を

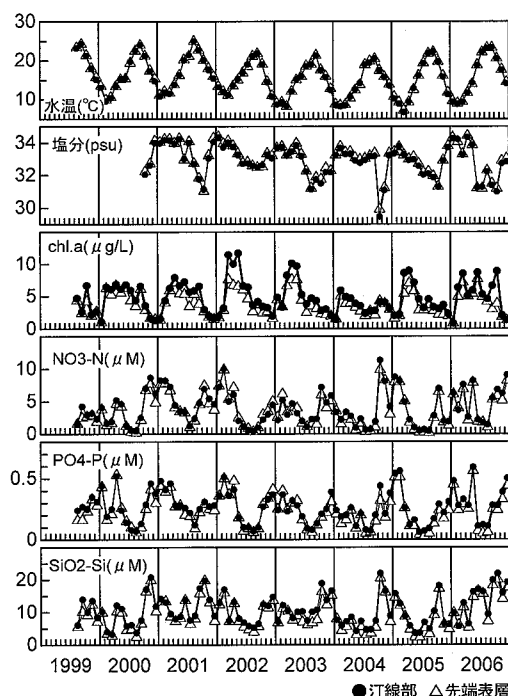


図-2 HORS における水質月平均値の推移

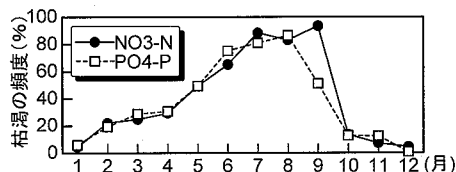


図-3 硝酸塩, リン酸塩濃度がそれぞれ 1.5, 0.15 μM を下回る月別の頻度

吸収する能力を表し, 生育可能な最低栄養素濃度を示すとされている。実際にはプランクトンの種類や生理状態, 諸環境条件により半飽和定数は大きく異なる(1996, 高橋ら)ので, モデル中での数値の扱いには検討の余地があり, 今後の課題である。ここでは, 上記数値を下回った場合を「枯渇」としてその月毎の頻度を図-3 に示した。10～1 月には枯渇頻度は 20% 以下であるが, 春季増殖の始まる 2 月頃から増加し, 5～9 月にはデータの 50% 以上が, 7・8 月には 80% 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。

栄養塩構成比は, 河川水等陸水由来の栄養塩供給が増加すると N/P, Si/P とともに非常に大きくなった。全データの平均値でみると, DIN : DIP : DSi = 31 : 1 : 41 であり, Redfield 値である 16 : 1 (16～) に比較して, 相対的にリン酸塩濃度が低い傾向にあった。

chl.a は, 11～1 月の冬季には 1～2 $\mu\text{g/L}$ 程度と低レベルで, 2 月頃に春季増殖が始まった後は, 約 3 ヶ月間高

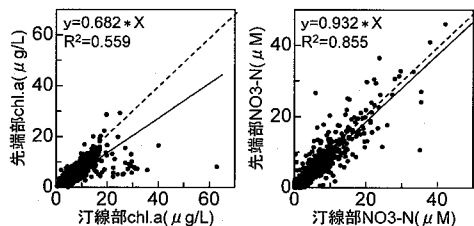


図-4 汀線部と先端部における chl.a および硝酸塩濃度の比較

表-1 各水質項目の汀線値に対する先端値の比(図-3の回帰直線の傾き)と相関係数: $n=1808$, 塩分値は $n=1515$

	傾き a	R^2
水温	1.004	0.990
塩分	1.003	0.909
chl.a	0.682	0.559
NO ₃ -N	0.932	0.855
NH ₄ -N	0.728	0.582
PO ₄ -P	0.909	0.851
SiO ₂ -Si	0.914	0.851

濃度で推移した。その後徐々に低下するが、夏季の chl.a レベルは淡水流入による栄養塩供給量の多少に依存するため年変動が大きく、7～10月の月平均値では2～9 $\mu\text{g/L}$ となった。全データの平均値は4.9 $\mu\text{g/L}$ である。

(2) 汀線部と桟橋先端部の比較

汀線部と桟橋先端部における月平均値(図-2)を比較すると、水温・塩分、栄養塩ともに値に顕著な差はみられなかった。ただしアンモニウム塩と chl.a は、汀線側でやや大きくなる特徴がみられた。chl.a と硝酸塩を例として、汀線部と桟橋先端部の日データを比較した結果を図-4に示す。また他の水質項目についても同様に比較し、回帰直線式の傾きと相関係数を求めた結果を表-1に示す。

水温と塩分は傾きがほぼ1で相関も高く、汀線部と先端部でほとんど差がないといえる。それに対し、アンモニウム塩以外の栄養塩類は汀線側で7～10%程度高い結果となった。アンモニウム塩と chl.a は30%程度汀線側で高い値が得られた。汀線側で栄養塩濃度が相対的に高くなる原因として、海岸地下水の滲出や後背地の排水溝からの負荷、底質からの溶出および激しい擾乱による内部生産の促進等が考えられる。海岸地下水については、内山ら(1999)がアンモニウム塩以外では栄養塩供給源としての寄与が認められることを現地観測と数値計算の結果から示している。また桟橋から約300m北側の砂浜には排水溝が存在し、後背地から汀線部に排水が流出している。報告者が排水の水質を実測した事例は1993年7月の一回のみで、このとき硝酸塩・アンモニウム塩濃度はそれぞれ243, 35 μM であった。柳嶋(1997)は汀線付近の流れが南下傾向のとき、アンモニウム塩濃度が高くなることを示しており、排水溝の影響は小さくないことが推察される。なお、当海岸における底質からの栄養塩溶

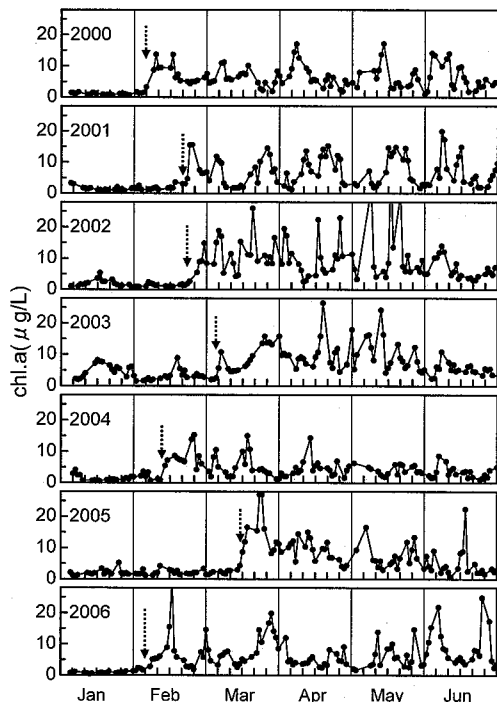


図-5 2000～2006年上半期の汀線部における chl.a 日変動

出や内部生産の効果に関する検討はされておらず、それぞれの供給源としての寄与度は不明である。

chl.a も汀線部側で多い傾向を示し、その分布特性については足立(1994)が詳しく述べている。特に高濃度期に岸沖方向の濃度勾配が大きくなる傾向があるほか、碎波帯内での擾乱により生じる気泡にプランクトンが凝集され、汀線に打ち寄せられる現象が多く観察されている。

(3) 春季増殖の発生要因と規模

植物プランクトン変動における最も特徴的な現象は、2月頃から起こる春季増殖である。ここでは春季増殖の発生要因と期間や規模など、諸変動の様相を把握するための検討を行った。

図-5にHORS汀線部における chl.a の日変動を2000～2006年上半期について示した。図中の矢印は春季増殖が発生したと判断された日を指している。ここで発生日とは2月以降に chl.a が5 $\mu\text{g/L}$ を超える日が7日以上継続した時の初日とした。春季増殖発生日は2月初旬～3月中旬と年により1ヶ月あまりの差があった。一般に、冬季混合により海洋表層の栄養塩濃度が回復したのち、日射量の増加により表層が暖められ鉛直安定度が増し、プランクトンが有光層内に留まれる状態になると春季増殖が生じるといわれている。図-6に例として2005年上半期の汀線部における水質と日射量(銚子)の日変動を示した。春季増殖を誘発する要因として、水温や日射量との関係について検討したが、本データからは明瞭な関係性

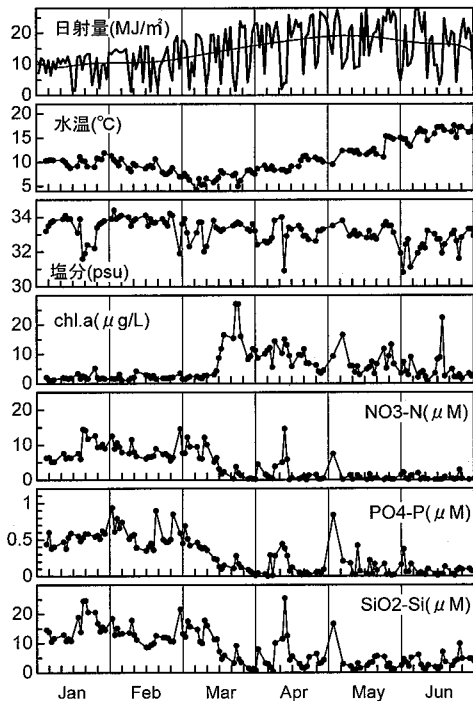


図-6 HORS 汀線部における水質値および珧子における日射量の推移 (2005 年上半期の例)

が得られなかった。むしろ、春季増殖以前の1月の平均 chl a がそれぞれ 1.1, 0.8 $\mu\text{g/L}$ と非常に低レベルであった 2000・2006 年には早くに増殖が生じ、4.8, 2.0 $\mu\text{g/L}$ と高かった 2003・2005 年には遅かった。春季増殖が起こる前の冬季におけるプランクトンによる栄養塩の消費と再回復過程、植物プランクトン群集組成や優占種の交代のタイミングなどが春季増殖の発生時期を決定づけていることが示唆された。つまり冬季の chl a レベルが非常に低い通常年には2月中に春季増殖が生じるが、何らかの原因で冬季に小さなブルームが起きた場合には春季増殖の発生時期が遅くなると推察された。

春季増殖の発生から chl a が高濃度な期間は3ヶ月程度継続した。図-5に示したとおり、一旦春季増殖が始まると、chl a は大きな増減を繰り返しながらも発生以前よりも高レベルで推移する。栄養塩濃度は、増殖が始まると同時に急速に減少するが、その後は河川水出水や沿岸湧昇、沖合海流の動向に応じて回復と枯渇を繰り返している。このような気象イベントや海流変動にともなう栄養塩の間欠的な補給が、高 chl a 濃度の持続を支えていると考えられる。一般に海洋においては、活発な増殖により有光層中の栄養塩が消費され、その後の成層化の進行によって深部からの新たな補給がなくなると春季増殖は終焉を迎える。しかし浅海・海岸部には栄養塩供給源が複数存在し、供給量の時空間変動も激しいため、春季増殖

表-2 観測年別の春季増殖発生日、発生後3ヶ月間の平均 chl a 、発生前1ヶ月間の平均栄養塩濃度および水温動向

年	春季増殖発生日	平均 chl a ($\mu\text{g/L}$)	NO $_3$ -N (μM)	PO $_4$ -P (μM)	SiO $_2$ -Si (μM)	水温(平年値との差 $\pm 1^\circ\text{C}$ で区分)			
						Jan	Feb	Mar	Apr
2000	2/4	6.74	3.93	0.44	10.16	暖中	中暖	暖暖	暖暖
2001	2/21	7.32	10.24	0.52	15.79	暖中	中暖	暖暖	暖暖
2002	2/22	11.30	9.28	0.53	16.64	暖中	中暖	暖暖	暖暖
2003	3/5	9.33	5.41	0.39	12.60	冷中	中冷	中冷	中冷
2004	2/12	5.45	3.53	0.29	8.45	冷中	中冷	中冷	中冷
2005	3/15	8.59	8.17	0.49	12.95	冷中	中冷	中冷	中冷
2006	2/8	6.77	6.43	0.47	10.08	冷中	中冷	中冷	中冷

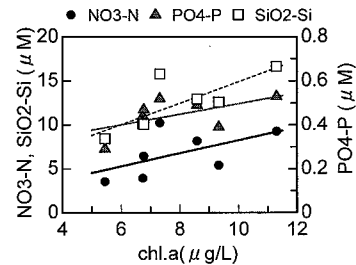


図-7 春季増殖期中の平均 chl a と発生前栄養塩濃度との関係 (年別にプロットして示す)

の終焉を判断するためには植物プランクトンの光合成活性や種組成の変遷等も把握する必要があると考えられた。

ここで、春季増殖期間が3ヶ月間であったと仮定して、期間中の平均 chl a 濃度、発生前1ヶ月間の平均栄養塩濃度、海水温の特徴を表-2に示した。表中の海水温は、本モニタリングの7年間における水温の月平均値を平年値とし、偏差が 1°C 以内を「中」、 1°C 以上高い・低いをそれぞれ「暖」「冷」として示した。春季増殖発生前の栄養塩濃度には、沖合の海洋構造との密接な関係がみられた。鹿島灘は黒潮と親潮がぶつかり合う「混合水域」の南端に位置している。房総半島沿岸を北上してきた黒潮は、通常は珧子半島沖合付近で東方向に変針して流去するが、親潮に端を発する南下流との勢力関係により、福島県付近まで北上する場合や、珧子半島沖まで到達せずに東方へ流去する場合がある。また、鹿島灘はしばしば黒潮から派生した暖水舌に覆われる。このように鹿島灘の海洋構造は大きく変動し、海岸近傍における水温・塩分変動にもその影響が現れる。表-2において暖水年は黒潮が接岸北上傾向にあるか暖水舌が張り出している場合であったが、このうち接岸傾向が強い2001・2002年冬季には栄養塩濃度が高くなった。暖水舌が張り出した年が2003・2005年である。黒潮の影響が弱い2004・2006年冬季には冷水年となったが、このとき栄養塩濃度は低めとなった。八木ら(2002)は、鹿島灘への黒潮流軸の接近が沿岸部の北上流を励起し湧昇を引き起こすことにより、栄養塩濃度が上昇することを示しており、このような現象が海岸部にも波及していると考えられた。

表-2中の chl a と栄養塩濃度との関係を図-7に示した。

冬季栄養塩濃度と春季増殖期間中の *chl a* との間には正の相関がみられた。期間中後半期には、河川からの栄養塩供給による増殖も生じていると考えられるため、相関が高いとはいえないものの、これらの結果は春季増殖の規模に冬季の黒潮の離接岸状況が関与していることを示唆している。

(4) 春季増殖期の植物プランクトンによる栄養塩消費

図-5 に示したように、本報告中で定義した春季増殖の発生日前後の約 1 週間は顕著な *chl a* 増加が認められる。この間、外部からの栄養塩供給はないと仮定し、増加初日から最初のピーク頂点までの 7~9 日間の *chl a* 増加率、単位 *chl a* 増加当たりの栄養塩減少(消費)量、消費栄養塩の濃度比を算出した結果を表-3 に示す。ただし 2003 年は期間中に明らかな塩分低下とそれに伴う栄養塩濃度の増加がみられたため、また 2000 年は塩分データの欠損により栄養塩流入の有無が判断できないため除外した。

chl a 増加率は 1.34/day、*chl a* が 1 $\mu\text{g/L}$ 増加するごとの硝酸塩、リン酸塩、珪酸塩減少量はそれぞれ 0.42, 0.025, 0.68 μM であった。栄養塩の流入がないと仮定すれば、これを増殖による消費速度に置き換えることができ、その結果、消費される栄養塩の構成比は $\text{NO}_3\text{-N}:\text{PO}_4\text{-P}:\text{SiO}_2\text{-Si}=17:1:27$ と見積もられた。なお、アンモニウム塩については、その変動の特徴から外部との流入や内部生産の可能性があるため、計算から除外した。

一方、春季増殖前 1ヶ月間の栄養塩構成比は、 $\text{DIN}:\text{NO}_3\text{-N}:\text{PO}_4\text{-P}:\text{SiO}_2\text{-Si}=28:15:1:28$ 、増殖期間中期 1ヶ月間の栄養塩構成比は $27:14:1:28$ で、両者ともに消費される栄養塩構成比とほぼ等しい値となった。これらの栄養塩構成比は平均値で示されており、その差が生じないということは、特定の栄養塩物質が常に春季増殖の制限因子となるわけではなく、どれもが制限因子となりうることを示唆している。

4. ま と め

1999 年から 2006 年までの 7 年間にわたり、鹿島灘南部海岸において実施した水質の長期モニタリングデータを解析した結果、以下のことが明らかとなり、一次生産モデルの今後の精度向上に必要な知見を得た。

- (1) 栄養塩濃度は、冬季に海水鉛直混合により上昇するが、2~3 月に春季増殖が始まると速やかに減少した。夏季の変動は南風による沿岸湧昇や河川水流入等の気象イベントに支配された。5~9 月には硝酸塩とリン酸塩の枯渇がみられ、それぞれ 1.5, 0.15 μM を下回る日数が 50% を超えた。
- (2) *chl a* は冬季には低レベルで、春季増殖が 2 月初旬~3 月中旬に始まると約 3ヶ月間高濃度で推移した。夏季の *chl a* は淡水流入による栄養塩供給量の多少に支配され、年変動が大きかった。

表-3 春季増殖発生初期の単位 *chl a* 増加当たり栄養塩減少量、栄養塩比、*chl a* 増加率

年	$\text{NO}_3\text{-N}$	$\text{PO}_4\text{-P}$	$\text{SiO}_2\text{-Si}$	$\text{NO}_3\text{-N}$	$\text{SiO}_2\text{-Si}$	$\Delta\text{chl a}$ /day
	$\mu\text{mol}/(\mu\text{g-chl a})$			/PO ₄ -P	/PO ₄ -P	
2001	-0.49	-0.025	-0.29	20.1	11.7	1.37
2002	-0.46	-0.032	-1.19	14.3	37.2	1.40
2004	-0.32	-0.023	-0.80	14.1	35.2	1.40
2005	-0.44	-0.025	-0.64	17.7	25.8	1.29
2006	-0.41	-0.021	-0.47	19.5	22.6	1.24
平均	-0.42	-0.025	-0.68	17.0	27.1	1.34

- (3) 冬季の栄養塩濃度と沖合の海洋構造、とくに黒潮流路との関係が示唆された。また、冬季栄養塩濃度と春季増殖中の *chl a* との間には正の相関がみられ、春季増殖の規模に冬季の黒潮の離接岸状況が大きく関与していることが示唆された。

- (4) 春季増殖の初期における *chl a* 増加率は 1.34/day と見積もられた。それにともなう栄養塩消費は増殖前の栄養塩構成比とほぼ等しく、 $\text{NO}_3\text{-N}:\text{PO}_4\text{-P}:\text{SiO}_2\text{-Si}=17:1:27$ の比率で減少した。

謝辞：本研究の遂行に当たっては、独立行政法人港湾空港技術研究所漂砂研究室のスタッフに長年にわたる多大なご協力を賜った。また観測の定常化は内山雄介氏のご尽力による。ここに厚く御礼申し上げる。なお、本研究は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「砕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・日向野純也・木元克則(1994): 鹿島灘砂浜海岸における一次生産(1992 年), 水産工学研究所技報, pp. 13-24.
- 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.
- 茨城県水産試験場・漁業無線局発行(1999~2006): 漁海況速報
- 内山雄介・Peter RÖLKE・足立久美子・灘岡和夫・八木 宏(1999): 海岸地下水浸透流およびそれに伴う沿岸域への栄養塩輸送過程, 土木学会論文集, No. 635/ II -49, pp. 127-139.
- 高橋正征・古谷 研・石丸隆監訳(1996): 生物海洋学 2, 粒状物質の一次生成, 東海大学出版会, pp. 61-73.
- 銚子地方気象台発行(1999~2006): 気象月報(気象庁 HP より)
- 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.
- 八木 宏・足立久美子・二平 章・高橋正和(2002): 黒潮流路変動に伴う沿岸域への栄養塩流入現象, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp. 1216-1220.
- 柳嶋慎一・加藤一正・中官利之・金澤 寛・原田久志(1997): 現地海岸に埋設した透水層の海水浄化効果, 海岸工学論文集, 第 44 巻, pp. 1171-1175.