

鹿島灘沿岸域における栄養塩及びクロロフィル a 量の 時空間変動特性

大森義暢*・八木 宏**・足立久美子***・二平 章****

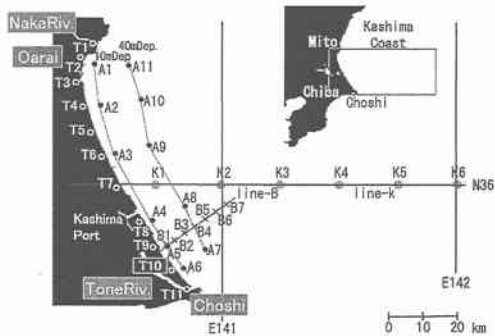
1. はじめに

開放性の高い砂浜海岸域は、これまで内湾域の干潟・藻場とくらべ貧栄養で生産力が低いと考えられることが多かった。しかしながら、最近の足立ら (1995) による長期間・高頻度の栄養塩及び基礎生産力の調査によって、開放性の高い鹿島灘海岸域が実際には比較的高い基礎生産力を有していることが明らかにされつつある。また、奥西ら (2000) は、足立らの栄養塩・クロロフィル a 量データに基づいて沿岸域における物質循環の仕組みを生態系モデルの面から検討しているが、それによると鹿島灘砂浜域では植物プランクトンの再生産過程が新生産過程に匹敵する大きさである可能性を指摘している。

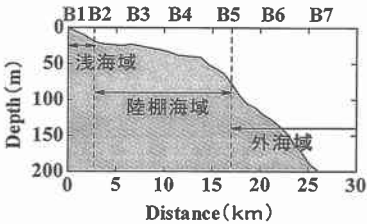
このように、開放性沿岸域の低次生産過程を基本とした物質循環の仕組みはその特徴が徐々に明らかにされつつあり、今後は栄養塩のソースとなる河口域から沖合域までを含む沿岸域全体にわたる物質循環の全体像を明らかにする中で、浅海域物質循環系を評価していくアプローチが必要であると考えられる。そこで本研究では、開放性沿岸域の鹿島灘沿岸域を対象とした広域現地観測を行い栄養塩・クロロフィル a 量の時空間変動の基本特性を把握することを試みたのでその結果を報告する。

2. 現地観測概要

現地観測は 2000 年 6～10 月までの 5 ヶ月間、茨城県水産試験場調査船「ときわ」により、茨城県鹿島灘沿岸域の栄養塩、クロロフィル a 量の調査を月 1 回行った。調査点は図-1 に示すとおりで、陸岸に沿った水深 10 m 帯に 6 箇所 (A1～A6)、大陸棚縁に近い水深 40 m 帯に 5 箇所 (A7～A11)、汀線近傍に 11 箇所 (T1～T11) を設定した。計測内容は、①採水による溶存態窒素・リン (測定層は水深 10 m 帯では 0, 2, 5, 10 m, 水深 40 m 帯では 0, 2, 5, 10, 25, 40 m)、②採水による表層クロロフィル a 濃度計測、③蛍光光度計付 STD による水温、



(a) 観測海域と観測点



(b) 観測線 B 上の海底断面図

図-1 観測対象海域

塩分、クロロフィル a 濃度 (蛍光光度値から換算) の鉛直分布計測である。なお、採水によるクロロフィル a 量の分析については、試水 200 ないし 300 ml を Whatman GF/F フィルターでろ過し、DMF による色素抽出ののち、蛍光法によりクロロフィル a を測定した。また栄養塩については試水をメンブレンフィルター (孔径 0.45 μ m) でろ過し、ブラン・ルーベ社製 TRAACS 800 により、ろ水中の濃度を測定した。

また、今回の調査だけでは、より詳細な岸沖断面分布構造や広域の空間分布特性などが把握できないため、本観測結果に合わせて、i) 足立らが同時期に実施した水産工学研究所調査船「たか丸」による鹿島灘須田浜沖観測線 B-line 断面の栄養塩・クロロフィル a 濃度調査結果 (観測点は B1～B7)、ii) 茨城県水産試験場による海洋観測定線調査結果 (観測点は K1～K6)、iii) 人工衛星 SeaWiFS による表層クロロフィル a 濃度空間分布を用いて解析を行った。

* 学生会員 東京工業大学大学院理工学研究科
** 正 会 員 博(工) 東京工業大学大学院助教授 理工学研究科
*** 水 修 (独) 水産総合研究センター水産工学研究所主任
研究官
**** 茨城県水産試験場沿岸資源部長

3. 現地観測結果と考察

本研究では、対象沿岸域全体を①浅海域、②陸棚海域、③外海域の3つの領域に分け(図-1(b)), 各領域の栄養塩、クロロフィル a 濃度の時空間変動特性を比較することで、沿岸域の空間構造を把握することを試みた。ここでは、河口海域を除く 10 m 深の観測点 (A2~A5) の平均値を浅海域の代表値、40 m 深の全観測点 (A7~A11) の平均値を陸棚海域の代表値とし、外海域についてはこれに対応する毎月の観測値がないために観測点 B 7 (水深 170 m) における 2, 5, 7 月の足立らの観測結果(但し、2 月は 1998 年, 5, 7 月は 2000 年計測)を用いて領域ごとの特性比較を行った。

(1) 栄養塩の時空間変動特性

a) 岸沖変化に着目した栄養塩変動の基本的な特徴

図-2 は、溶存態窒素 DIN ($\text{NO}_2\text{-N} + \text{NO}_3\text{-N} + \text{NH}_4\text{-N}$), 溶存態リン DIP ($\text{PO}_4\text{-P}$) の鉛直分布の月変化を、(a) 浅海域、(b) 陸棚海域、(c) 外海域それぞれについて示したものである。浅海域においては DIN, DIP とも 6, 7 月には鉛直変化が小さく、濃度レベルは高くないが、9, 10 月に濃度が急激に増加しており、表層で大きく底層で小さい顕著な鉛直分布を示す形に変化している。これに対して、外海域では季節を通して底層で濃度が大きく、冬季から夏季に向けて濃度レベルが大きく減少している。一方、陸棚海域では、6, 7 月に下層で濃度レベルが高い分布形から、8 月に全水深的に減少した後、特に DIN に顕著であるが表層で増加する分布形に変化している。図-3 は、2, 5, 7 月における観測線 B-line 観測結果に基づいて DIP の岸沖断面分布を示したものである。これを見ると、冬季(2 月)には、沖合下層部を中心に濃度が高く、浅海域、陸棚海域でも相対的に高い濃度レベルが維持されているが、5, 7 月にかけて表層から栄養塩が減少していく様子が顕著に現れている。これは、冬季から夏季にかけての外海域の栄養塩季節変動に沿岸域の栄養塩構造が大きく影響されていることを示唆している。

図-4 は、窒素とリンの存在量の相対的な大きさを示すために、その比である N-P 比 (DIN/DIP) を浅海域、陸棚海域、外海域で比較したものである。図中では、表層値を白抜き印、底層値を黒印で表示しており、窒素、リンの相対的な大きさとして、植物プランクトンの体組成比の目安となる Redfield 比による N-P 比 (=16) を実線で示している。これによると、浅海域の N-P 比は全体的に Redfield 比より大きい値を示しているのに対し、外海域では全体的に Redfield 比を下回っており、陸棚海域では Redfield 比をはさんで、大小の値が存在していることがわかる。これは浅海域では観測期間全体を通してリ

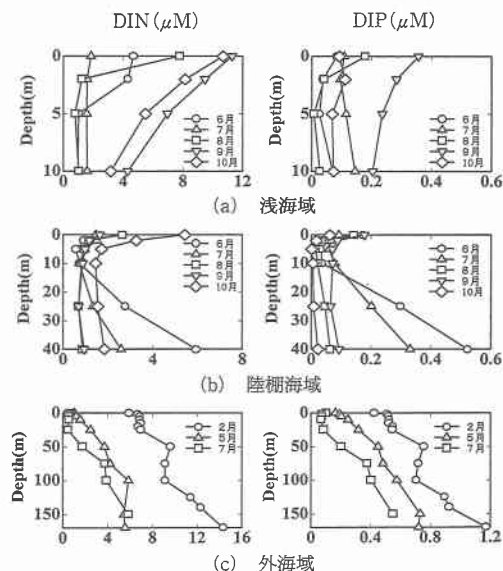


図-2 栄養塩の鉛直分布季節変化

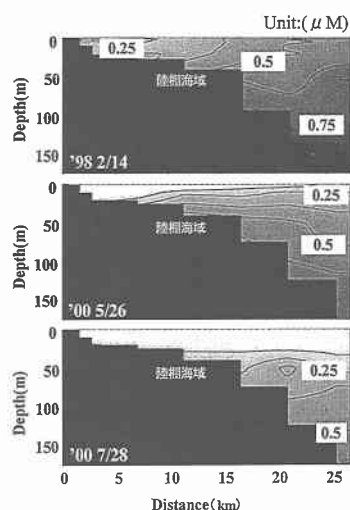


図-3 DIP の岸沖断面分布

ンが栄養塩の制限因子となっているのに対し、外海域では窒素が制限因子である可能性を示しており、また陸棚海域では季節によって制限栄養塩が変化することを意味している。図-5 は、陸棚海域の制限栄養塩の鉛直分布特性を示すために Redfield 比に基づき (DIN-16 DIP) という量を定義し、DIN と DIP の相対的な大きさの時空間変化を示したものである。この図で、正で示された部分は相対的にリン不足、負の部分(ハッチ部)は窒素不足を意味している。これを見ると初夏(6, 7 月)には下層で窒素不足となっているのに対し、秋季(9, 10 月)には表層でリン不足となっており、制限栄養塩の鉛直構造

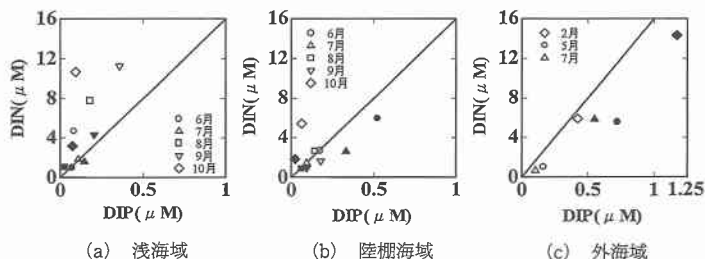


図-4 N-P 比の比較

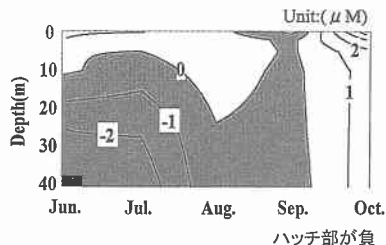


図-5 DIN-16DIP の鉛直分布の季節変化 (陸棚海域)

の季節変化が大きいことを示している。

次に図-6 は、塩分と DIN・DIP の関係を浅海域、外海域それぞれに対して各月ごとに示したものである。塩分と栄養塩の関係は、高塩分時に栄養塩が増加する関係があれば外海影響、低塩分時に栄養塩が増加する傾向があれば陸水影響と考えられ、栄養塩源が陸水か外海水かを示す指標となる。これを見ると、浅海域においては DIN は観測期間を通して陸水影響となっており、DIP は 6、7 月の外海水影響主体の状態から 9、10 月には陸水影響が大きい状態に季節的に変化している。一方、陸棚海域については、DIP は全期間にわたり外海水影響が主体的であり、DIN は 6、7 月の外海水影響が大きい状態から 9、10 月の陸水影響が大きい状態に季節変化していることがわかる。

b) 浅海域及び汀線における沿岸方向変化特性

陸域の影響を強く受ける浅海域では沿岸方向の栄養塩濃度変化が大きいと考えられるので、汀線域もあわせて栄養塩の沿岸方向変化特性についての検討を行った。図-7 は、浅海域の観測点の中から観測対象海域北部に位置する那珂川河口域に近い観測点 A1~A3 を選び、DIN と塩分の沿岸方向分布を示したものである。塩分の空間分布は、7 月にはあまり明確ではないものの、8 月には那珂川起源と考えられる低塩分水が河口に近い海域の表層 5 m 程度の領域に分布し、9 月にはその範囲をさらに拡大させて下層にも低塩分の影響が及んでいる。DIN は低塩分水の分布にほぼ対応した形となっており、表層 5 m 程度の領域を中心として 8、9 月と沿岸方向に分布範囲を拡大させている様子が見て取れる。

次に、図-8(a) は汀線域と浅海域表層における DIN の沿岸方向分布を比較したものである。DIN 濃度は、浅海域、汀線域両者ともに河口に近い海域で大きく、河口から離れるにしたがって減少しており両者の傾向に顕著な差は見られない。一方、図-8(b) は DIN 中に占める NH_4 の割合 (アンモニア比) を示したものであり、これは海域の一次生産過程に占める再生産の大きさの目安になると考えられる。これを見ると、浅海域は 7 月を除き、アンモニア比が 0.2 以下となっており顕著な沿岸方向変化

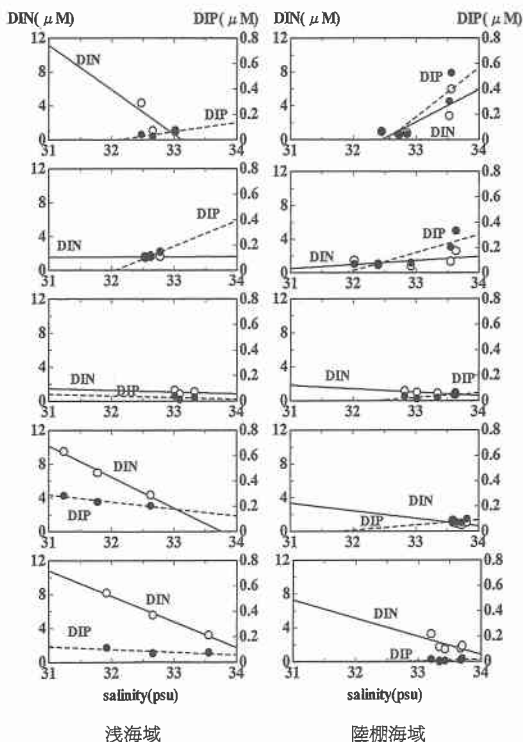


図-6 塩分と DIN, DIP の相関関係

も見られない。一方、汀線域はアンモニア比 0.2 を越えるものが多く、河川影響が小さい 7、8 月において特に河口域から離れた領域でアンモニア比が大きくなる傾向がある。これらの性質は、浅海域では河川からの直接的な影響が大きく、観測期間全体を通じて河川からの硝酸態窒素の供給が主体となっているのに対し、汀線域は河川影響が小さくなる時期に河口から離れた領域においてアンモニア比が相対的に大きくなる再生産過程を中心とした場が形成される可能性を示唆している。このことは、鹿島灘砂浜域において再生産過程が重要な役割を果たしているとする足立ら (1995)、奥西ら (2000) の指摘に沿ったものである。

c) 栄養塩分布とその変動に関するまとめ

以上の検討結果に基づき、栄養塩の時空間変動特性をまとめると以下になる。まず外海域については、冬季から夏季に向けて植物プランクトンの増殖に伴う栄養塩消費や外洋水波などが原因となって栄養塩濃度の減少が進む。浅海域、陸棚海域も外海域の影響を受けて表層を中心に栄養塩が減少するものの、春季～初夏には陸棚海域下層に高塩分・高栄養塩（相対的にリン大）の外海系の水塊が残存し、これは浅海域へのリンを中心とした栄養塩供給に重要な役割を果たしていると考えられる。夏季には表層を中心とした栄養塩消費がさらに進むために、浅海域～陸棚海域全体の栄養塩レベルは大きく低下するが、その後秋季にかけて低塩分・高栄養塩（相対的に窒素大）の陸水の影響が大きくなり、窒素を主体として浅海域・表層の栄養塩レベルが増加する。このように、栄養塩供給過程においては、春季から初夏は外海影響が大きく、また秋季は陸水影響が大きいと考えられ、浅海域と外海域の中間に位置する陸棚海域はこういった季節変動が顕著に現れる海域といえる。一方、河川水の直接的な影響は春季から夏季には河口付近でとどまるのに対し、秋季には沿岸方向に広く影響を与え浅海域、陸棚海域への重要な栄養塩源となっている。一方汀線域では、河川影響の少ない時期の河口から離れた領域で、有機物の分解過程で生じるアンモニアの占める割合が増加し、再生産が重要となる場が形成されることが示唆される。

(2) クロロフィル a 量の時空間変動特性

図9(a)は、季節的なクロロフィル a 量の空間分布の変化を示すために、茨城県水産試験場の定期海洋観測結果のうち観測点 K1～K6 の6点について、それぞれクロロフィル a 濃度鉛直分布の最大値を各観測点での代表的なクロロフィル a 濃度と考えて、その時空間コンターを表示したものである。これによると、冬季から春季には4、5月を中心に沖合100 km以上の範囲でクロロフィル a 濃度が高い値を示しており、これに対して9、10月は沿岸に近い海域（距岸20 km以内）で大きな値となっている。さらに、クロロフィル a 濃度の詳細な平面分布構造を理解するために、房総・鹿島灘海域の表層クロロフィル a 分布を人工衛星 SeaWiFS の画像データに基づいて検討した。図9(b)は、本観測期間に対応した、2000年4月と9月の表層クロロフィル a 濃度の1ヶ月間の合成画像を示したものである。これを見ると、春季の4月に南側の黒潮域を除く常磐鹿島灘全体で高クロロフィル a 濃度となっており、これは発生時期や発生領域のスケールなどから春季ブルーミングと考えられる。一方、9月には沿岸近くで、利根川河川水の影響と思われる犬吠埼南付近を中心としてクロロフィル a 濃度が高く

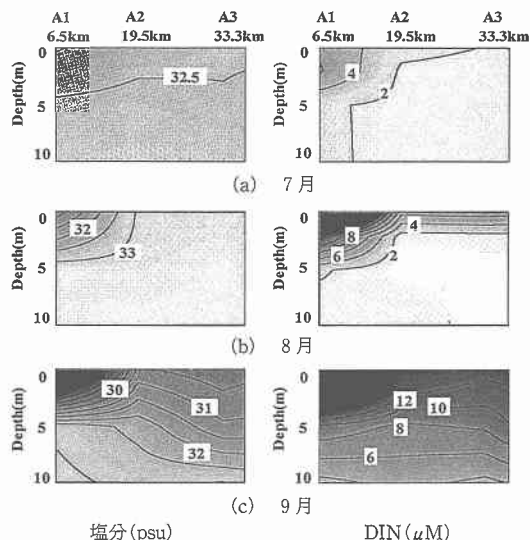


図7 浅海域での沿岸方向分布 (A1～A3)

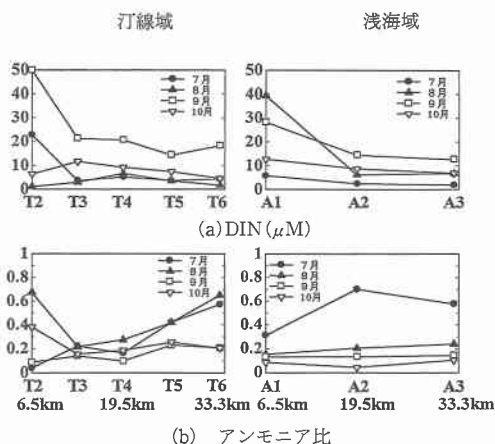
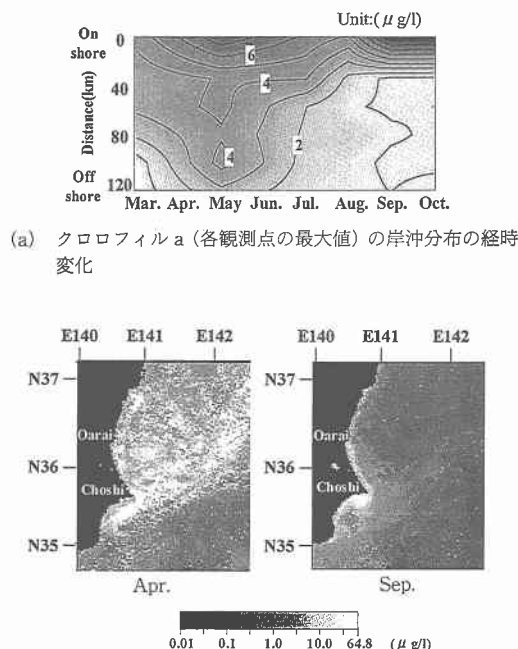


図8 汀線、浅海域の沿岸方向分布

なっており、分布パターンなどから陸水の影響によるブルーミングと考えられる。

図10は、クロロフィル a 濃度鉛直分布の経時変化を (a) 浅海域、(b) 陸棚海域、(c) 外海域それぞれについて水温分布とともに表示したものである。これを見ると陸棚海域については、3～7月には水深20 m付近にクロロフィル a 濃度の極大層が存在していたが、9～10月には表層付近で極大となっており、鉛直分布特性が季節的に変化していることがわかる。これは先述の栄養塩の空間構造との関係で考えれば、陸棚海域においては春季～初夏にかけては外海系の下層を中心とした栄養塩供給が主体であるために、クロロフィル a もそれに対応した



(a) クロロフィル a (各観測点の最大値) の岸沖分布の経時変化

(b) 人工衛星 SeaWiFS によるクロロフィル a 量の 1 ヶ月合成値の空間分布

図-9 クロロフィル a 量の平面分布

形で躍層より下に形成され、夏季以降には栄養塩供給が陸水系主体に切り替わることによって、表層を中心とした分布に遷移したと考えられる。これに対して、外海域では春季～夏季にかけて水深 20～30 m の位置付近にクロロフィル a 極大が形成されており、これは先に示した陸棚海域の極大層に連なるものである。6、7 月に極大層の位置がやや深くなるが、これはこの時期が温度成層の発達する時期に相当しており、海域の密度構造の影響を受けて極大層が低下したものであると考えられる。また、外海域は陸水影響が小さいために、栄養塩が低減する秋季には極大層は消滅している。一方、浅海域は陸棚海域の分布の特徴を反映した形となっており、初夏には底層でクロロフィル a 濃度が高く、秋季には表層で高くなる傾向がある。このように、沿岸域のクロロフィル a 濃度は、栄養塩分布に対応した顕著な季節変化、空間変化を示すことを本観測結果は表している。

4. ま と め

2000 年に実施した観測結果に基づき、鹿島灘海域の栄養塩、クロロフィル a 濃度の空間分布特性（汀線域、浅海域、陸棚海域、外海域の相違）とその季節変化の特徴を示した。主要な結果を整理すると以下ようになる。

(1) 栄養塩分布について、浅海域では相対的に窒素が

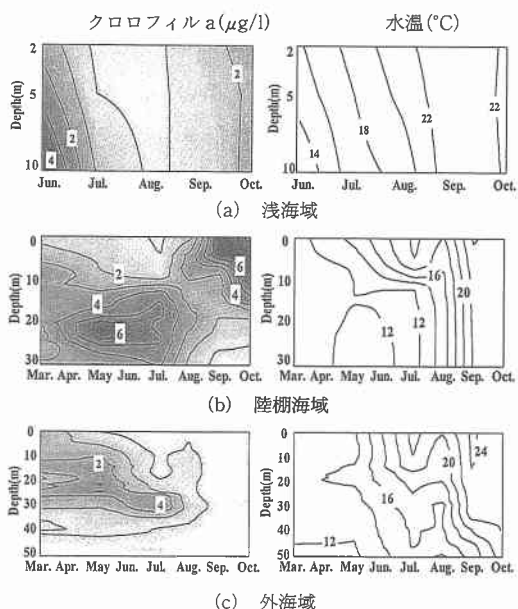


図-10 クロロフィル a、水温の鉛直分布の経時変化

多く、9、10 月に河川影響により濃度が高くなる。外海域では底層で栄養塩レベルが高く、冬季～夏季にかけて濃度が減少する。一方、陸棚海域では初夏には外海域の影響を受け、秋季になると浅海域の影響を受ける。また、汀線域では河川影響の少ない時期に、河口から離れるに連れて、アンモニア比が高くなり、再生産の重要な場が形成される。

(2) クロロフィル a 分布については、陸棚海域では初夏には下層で極大層が見られ、秋季になると極大層が表層に遷移する。このような鉛直分布の変化の特徴は浅海域にも現れる。

謝辞：今回の調査を実施するにあたり、茨城県水産試験場「ときわ」、水産工学研究所「たか丸」の乗務員の方々をはじめ、多くの方々の協力を得ました。ここに記して深く感謝の意を表します。なお、本研究は文部省科学研究費基盤研究 (c)「『開放性海岸に発達する広域沿岸境界層の空間構造計測現地実験と広域漂砂モデルの構築』(代表者：八木 宏)の補助を受けて行われたものであることをここに付記する。

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), 水工研技報, 第 16 巻, pp. 13-24.
奥西 武・足立久美子・日向野純也・中村義治・中山哲殿 (2000): 鹿島灘沿岸における一次生産の基本構造, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp. 1021-1025.