

鹿島灘南部沿岸域の栄養塩変動に及ぼす利根川河川水の影響

足 立 久美子*・中 山 哲 厳**

開放性砂浜域は内湾域に比べると貧栄養であるため、基礎生産性を評価するためには栄養塩動態を解明することが重要である。そこで鹿島灘南部沿岸域における栄養塩の時空間変動特性を整理し、海域への栄養塩供給源として河川水が果たす役割を明らかにすることを目的とした。当沿岸海域の栄養塩供給源は海水が鉛直混合する冬季には深部の海水、成層化する夏季には河川水が主体となると考えられ、渇水年の夏季には広い範囲で表層水中のリン酸塩と硝酸塩が枯渇することが明らかとなった。また河川から海域へ流入した栄養塩は、その輸送過程でリン酸塩は、硝酸塩、珪酸塩に比べると速やかに植物プランクトン生産による消費を受け消失すると推察された。

1. はじめに

海洋の基礎生産性を規定する重要な環境要因として、水温、光および栄養塩環境等が挙げられる。佐々木(1996)は東京湾のように夏季においても栄養塩の枯渇が起こらない海域では、基礎生産性は水温や光条件に支配されるとしている。しかし陸源の汚濁負荷が大きな海域を除いた通常の沿岸域では、夏季にしばしば表層部で栄養塩の枯渇が起こるため、生産性が低下すると考えられている。また、開放性沿岸域は内湾沿岸域に比べると貧栄養であり、生産性はさらに低いと認識されてきた。しかし実際に開放性沿岸域における基礎生産性を評価した研究事例は少なかった。

そこで著者らは 1992 年より、開放性沿岸域である鹿島灘において、植物プランクトン量変動や基礎生産量の季節変動に関する調査を開始した。鹿島灘は茨城県太平洋岸に位置し、北端に那珂川、南端に利根川河口を有する総延長約 80 km の開放的な砂浜域である。沖合は親潮・黒潮混合域の最南端に位置し、黒潮と南下冷水双方の影響を受ける海域である。一連の研究において、足立ら(1994)は、鹿島灘沿岸域では通常クロロフィル a が 1~5 $\mu\text{g/L}$ 程度はあり、生産性が低いとは一概に言えないこと、また Adachi (1998) は季節毎に鹿島灘沿岸域で基礎生産量を測定し、瀬戸内海などの内湾沿岸域と同等のレベルにあることを示した。ただし、夏季においては植物プランクトン量や基礎生産量の年変動が非常に大きく、栄養塩の供給が少ない場合には著しく生産性が低下すると考えられた。

当海域の主要な栄養塩供給源としては河川等の陸水および沖合深部の海水が考えられ、那珂川の洪水時に那珂川河川水が鹿島灘南端まで到達したことを灘岡ら(1999)が、またその際に当海域では植物プランクトン増殖が起こったことを足立ら(1999)が報告している。また八木

ら(2002)は、黒潮の接岸に伴い深部の栄養塩の豊富な海水が沿岸浅部に湧昇した事例を報告しており、徐々に鹿島灘沿岸域の栄養塩動態とその生産性への寄与が明らかになりつつある。しかし鹿島灘南部沿岸域は、通常は利根川河川水の影響下にあると考えられるため、生産性を評価するためには利根川河川水の海域での挙動や栄養塩運搬量等について明らかにする必要がある。そこで本報告では、鹿島灘南部沿岸域における栄養塩の時空間変動特性を整理し、栄養塩供給に果たす利根川河川水の役割を明らかにすることを目的として、これまでに鹿島灘南部砕波帯およびその沖合域で長期間にわたり観測して得たデータを取りまとめたので報告する。

2. 現地観測

調査海域を図-1 に示す。鹿島灘南部に位置する港湾空港技術研究所波崎海洋研究施設(HORS)の汀線部および棧橋先端部(水深約 5 m, 距岸 380 m)で日毎に表層水を採水し、水温・塩分の測定とクロロフィル a・栄養塩の分析を行った。採水調査は 1992 年以降に行っているが、ここでは年間を通してデータがそろっている 1993, 1994, 2001, 2002 年の汀線部におけるデータを使用した。採水頻度は 1993 および 1994 年が週 3 回程度、2001 およ

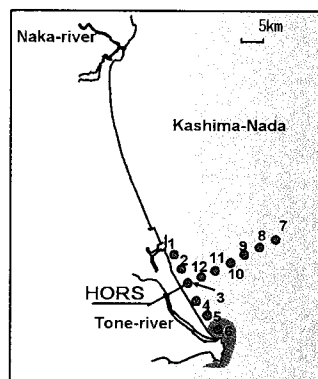


図-1 調査海域

* 正会員 水産修 (独法)北海道開発土木研究所環境水工部水産土木研究室

** 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土木工学部水産研究室

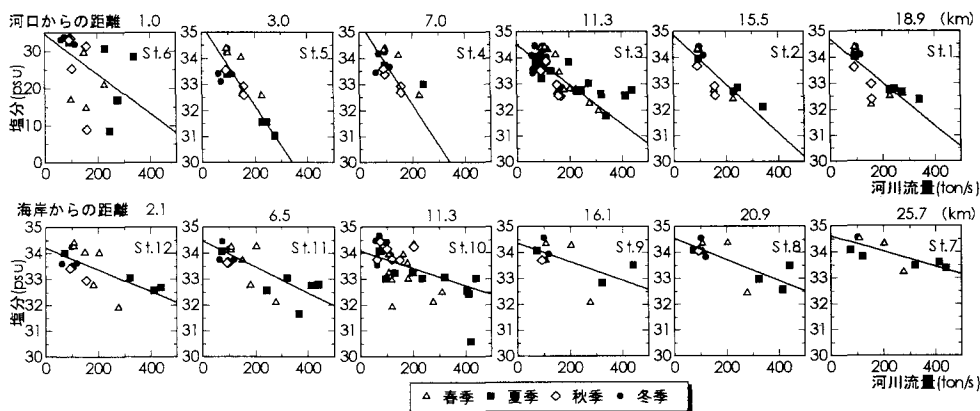


図-2 沖合観測点における塩分と利根川河川流量(布川地点)との関係

び2002年が平日の週5回程度である。

また1996～2002年には、鹿島灘南部沿岸域において水産工学研究所調査船たか丸による船舶観測を季節毎に行った。ここで春季・夏季・秋季・冬季調査はそれぞれ5月中旬, 7月下旬～8月上旬, 11月中旬～下旬, 2月に行われた。測点は沿岸方向に1測線(水深10mライン)とHORS沖の岸沖方向に1測線(水深10～200m)上の計12地点とし、多項目水質計による水温・塩分等の鉛直測定および各層採水によるクロロフィルa・栄養塩の分析を行った。

試水のうち200mlをWhatman GF/Fフィルターで濾過し、フィルター上に捕捉された粒状物中の植物色素をN,N-ジメチルホルムアミドにより抽出し、クロロフィルaとフェオフィチン濃度を水産工学研究所所有のターナーデザイン蛍光光度計により測定した。栄養塩サンプルは船上で凍結保存し、水産工学研究所所有の栄養塩測定装置 TRAACS 800 (Bran+Luebbe 社) により、硝酸態窒素 ($\text{NO}_3\text{-N}$)、亜硝酸態窒素 ($\text{NO}_2\text{-N}$)、アンモニウム態窒素 ($\text{NH}_4\text{-N}$)、リン酸態リン ($\text{PO}_4\text{-P}$)、珪酸態珪素 ($\text{SiO}_2\text{-Si}$) を測定した。

得られたデータから、空間変動については船舶観測結果を、時間変動については主に海岸部の観測結果を用いて、表層水の塩分および栄養塩濃度の変動特性と利根川河川流量との関係を整理した。

3. 調査結果および考察

(1) 利根川河川流量と塩分との関係

鹿島灘海域は、利根川および那珂川両河川水の影響を受ける海域である。利根川と那珂川はともに北関東を水源として関東平野を縦断する河川であることから、その流量変動傾向はほぼ同様に推移していた(流量年表, 1992～2001)。ただし流量は最下流部における10年間の平均流量がそれぞれ210, 80(ton/s)前後と規模は異なっ

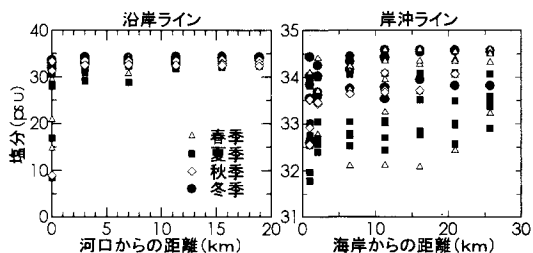


図-3 沖合観測点における塩分と利根川河口からの距離との関係

ていた。ここで、最下流部とは利根川が布川地点、那珂川が野口地点で、それぞれ河口から76.5, 38.7 km 上流に位置する。また、以後に記述する利根川河川流量はすべて布川地点の観測値であり、河口・海域への到達時間については考慮していない。

利根川河川流量は12～4月には100 ton/s 以下と少なく、梅雨期および秋季の台風到来期に多くなっている。また夏季を中心に流量の年変動が非常に大きい。沖合観測が行われた調査日における利根川河川流量の最大値は450 ton/s 程度で、極端な増水期には当たらなかった。

沖合観測点の表層水塩分と利根川河川流量との関係を図-2に示す。表層塩分と河川流量との間には負の相関がみられた。利根川・那珂川河川水は海域へ流出した後、南下することが多いと考えられおり、衛星画像等では利根川河口から流出した河川水が銚子半島を回り込むようにして南下する様子がしばしばみられるが、本調査時にも St. 6 付近に図-1に示したような明瞭な潮目が観察され、St. 6 表層のみで極端に塩分が低いことが多かった。

沿岸・岸沖方向の利根川河口からの距離と塩分との関係を図-3に示す。図-2および図-3から、秋季と冬季には河口部を除き高塩分であるのに対し、春季と夏季の河川流量が多い時には、広範囲にわたり表層水が低塩分

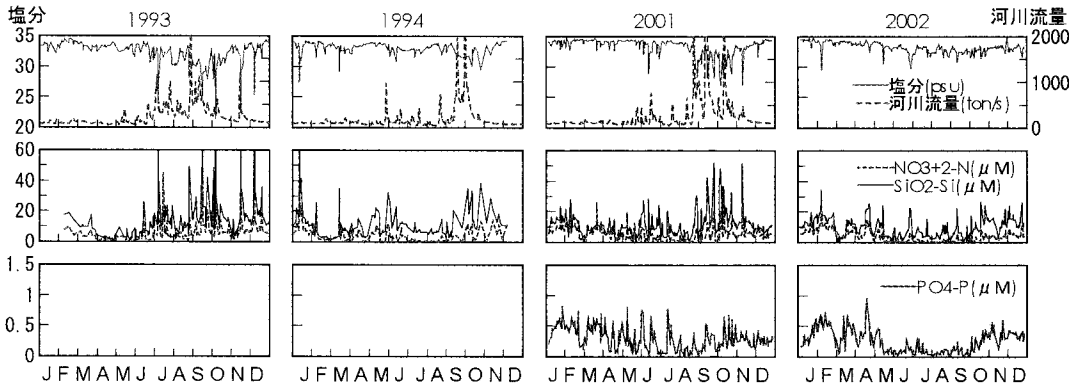


図-4 HORS 汀線部における塩分・栄養塩の推移と利根川河川流量の推移 (横軸: month)

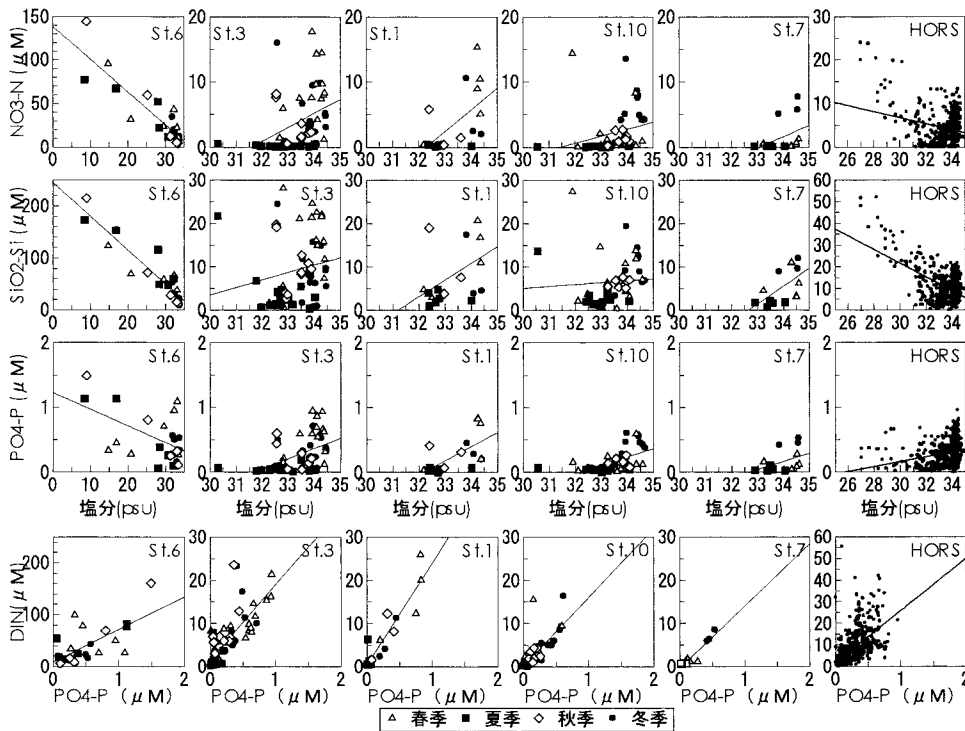


図-5 沖合観測点と HORS 汀線部における塩分と栄養塩濃度との関係、N-P の関係

化していることが推察された。また、利根川河口に近いほど河川水の影響が大きかったことから、少なくとも調査日における河川流量の範囲では、当海域は那珂川河川水ではなく、利根川河川水の影響下にあったと推察された。ただし 1998 年夏季に那珂川で洪水が起きた際には、流出水は鹿島灘南端まで到達した。したがって鹿島灘南部では通常は利根川河川水の影響下にあるが、流量によっては両河川の影響を受けると考えられた。

1993, 1994, 2001, 2002 年の HORS 汀線部における塩分と利根川河川流量の推移を図-4(上段)に示す。HORS

では毎日に採水しているため塩分と河川流量との関係がより明確に示され、利根川の河川流量が多い期間に著しい塩分低下がみられた。ここで、1993 年は夏季に多雨となり、日照不足と低温が全国的に問題となった年である。また 1994 年夏季は渇水が著しかった年である。これらの特徴が河川流量および塩分推移に明瞭に現れており、1993 年には 7~10 月の 4 ヶ月間にわたり低塩分が継続したのに対し、1994 年には 9 月後半からの台風による一時的出水による短期間の塩分低下にとどまった。

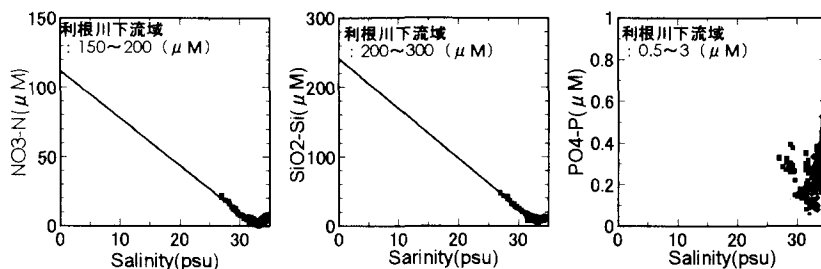


図-6 HORS 汀線部における塩分と栄養塩との関係

(2) 塩分と栄養塩濃度との関係

HORS 汀線部における栄養塩濃度の推移を図-4 (中, 下段) に, また沖合観測点のうち代表的な5点と HORS 汀線部における塩分と栄養塩濃度との関係を図-5 に示す。

沿岸表層における栄養塩濃度の年間推移は, 冬季には海水の鉛直混合により深部の栄養塩が供給されるため濃度が上昇するが, 春季ブルーミングにより消費された後は水温上昇とともに成層化すると枯渇し, 降雨等により陸源水の出水があると再び濃度が上昇するのが一般的である。HORS における栄養塩推移は上述の傾向とほぼ等しく, 夏季に低濃度, 冬季に高濃度となる傾向がみられ, 河川流量が多い場合には高濃度となっていた。したがって夏季の栄養塩濃度は年変動が大きく, 多雨年には高濃度, 小雨年には枯渇状態となった。また, 沖合表層水についても栄養塩濃度は冬季に高く夏季に低い季節変動傾向がみられた。

河口から近い St. 6~4 の範囲では塩分と硝酸塩・珪酸塩との間に明瞭な負の相関が示された。HORS で日毎に観測した結果においても, 利根川増水期には明らかに塩分低下と硝酸塩および珪酸塩濃度の増加がみられた。しかし St. 9 より沖合側では塩分と硝酸塩・珪酸塩の間には弱い正の相関が示された。このことは, 夏季を中心とした低塩分水つまり河川水の沖合への輸送による栄養塩供給の役割が, 冬季における海水の鉛直混合による供給に比べ, その相対的な寄与度が低いことを示唆している。

リン酸塩の季節変動傾向は, HORS 汀線部および沖合観測点において, やはり冬季に高濃度, 夏季に低濃度となった。しかし硝酸塩や珪酸塩に比較して, 河川出水に伴う濃度上昇は明瞭でなく, 河口部の St. 6 を除き, 塩分との関係は正の相関を示し, リン供給源としての河川水の役割はさらに低いと考えられた。

図-6 に HORS 汀線部の塩分と栄養塩濃度との関係を, 両軸の表示範囲を変えて再び示した。ここで, 利根川下流域の $\text{NO}_{3+2}\text{-N}$, $\text{SiO}_2\text{-Si}$, $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度はそれぞれおよそ 150~200, 200~300, 0.5~3 μM 程度であった(足立, 未発表)。また, 図-7 に沖合観測点の St. 3, St. 10

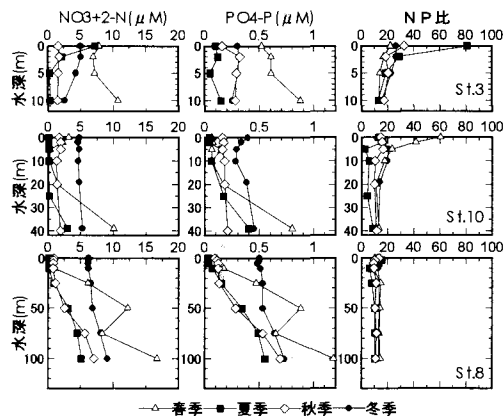


図-7 沖合観測点における栄養塩濃度と NP 比の鉛直分布 (1997~1999 年平均值)

および St. 8 における栄養塩濃度の鉛直分布を季節別に示した。沖合部下層水と利根川河川水中の栄養塩濃度を比較すると, 硝酸塩と珪酸塩では河川水が 1~2 オーダー高いが, リン酸塩では両者の濃度差がほとんどみられなかった。このため, リン酸塩と塩分との間に, 硝酸塩・珪酸塩のような明瞭な相関が得られなかったと考えられた。

河川から供給された栄養塩は海水との混合により希釈され, その過程で植物プランクトンにより消費される。図-6 中の回帰直線は, 沖合深部からの栄養塩供給を排除するため, 塩分が 32 psu 未満の場合について示した。HORS における珪酸塩濃度は, 河川水の希釈で説明する値であると考えられ, 河川出水による供給量は HORS に到達するまでの消費量に比べて十分多いと考えられた。また硝酸塩についても, 河川からの出水が重要な供給源となっていることが推察された。一方リン酸塩については相関が見いだされず, HORS に到達するまでに大部分が消費されてしまうと考えられた。

HORS 汀線部における水温・塩分・クロロフィル a・栄養塩濃度の, またこれらの日変動値を計算し, それぞれの項目ごとの相関分析を行った結果を表-1 に示す。硝酸塩・珪酸塩の日変動量と塩分の日変動量との間には高

表-1 2001年 HORS 汀線部における水質値の相関関係(左表)と日変動値の相関関係(右表), 値は r^2 を示す

	水温	塩分	chl.a	NO ₃₊₂ -N	NH ₄ -N	DIN	PO ₄ -P	SiO ₂ -Si
水温	1.00							
塩分	-0.47	1.00						
chl.a	0.15	-0.05	1.00					
NO ₃₊₂ -N	-0.39	-0.47	-0.21	1.00				
NH ₄ -N	-0.24	0.11	-0.29	0.30	1.00			
DIN	-0.36	-0.11	-0.32	0.69	1.00			
PO ₄ -P	-0.56	0.17	-0.34	0.59	0.44	0.61	1.00	
SiO ₂ -Si	0.02	-0.73	-0.12	0.77	-0.02	0.35	0.30	1.00

	水温	塩分	chl.a	NO ₂ -N	NO ₃ -N	NH ₄ -N	DIN	PO ₄ -P	SiO ₂ -Si
水温	1.00								
塩分	-0.16	1.00							
chl.a	0.04	-0.08	1.00						
NO ₂ -N	-0.09	-0.79	-0.04	0.03	1.00				
NH ₄ -N	0.08	0.06	-0.16	0.76	0.12	1.00			
DIN	0.04	-0.25	-0.15	0.80	0.50	0.92	1.00		
PO ₄ -P	-0.19	-0.01	-0.25	0.51	0.39	0.50	0.59	1.00	
SiO ₂ -Si	-0.08	-0.84	0.03	0.10	0.87	-0.06	0.29	0.23	1.00

い負の相関が認められ, 栄養塩変動が陸源水の挙動に強く支配されていると推察された。ただし, 汀線部は特異的に無機窒素に占めるアンモニア態窒素の割合が高いことが特徴としてあげられ, 内部生産等の生物学的要素もごく浅海域においては無視できないことが示唆された。

(3) NP比

栄養塩の構成比について検討した。図-5(下段)に沖合およびHORS汀線部表層のDINとリン酸塩との関係を, また図-7(右図)に沖合部におけるNP比の鉛直分布を示す。Redfield比(DIN/P=16/1)を基準にすると河川起源水は窒素過剰で, 沖合下層水のNP比はリン過剰かあるいはRedfield比に近い値であった。HORS海岸部では窒素が過剰である場合が多く, 特に低塩分時にその傾向が強く現れていたが, 南風により生じる沿岸湧昇時にはRedfield比に近い値となった。沖合部でも, 利根川河口に近いところで, すなわち河川水の影響が強い海域ではNP比が大きい傾向がみられ, 沖合側ほどRedfield比に近くなった。ただし, 夏季におけるSt. 10の鉛直分布をみると硝酸塩の枯渇が著しいためにNP比が非常に小さくなっている。この場合, 成層化が著しく, また河川水の寄与が全くない条件下で, 表層部では硝酸塩がリン酸塩よりも先に枯渇したと考えられた。

(4) 栄養塩とクロロフィルaとの関係

HORSにおいては, 栄養塩濃度とクロロフィルaとの間に負の相関がみられ, 植物プランクトン量が増加すると栄養塩濃度が減少する傾向が示された。相関は高い順からPO₄-P, NH₄-N, NO₃₊₂-N, SiO₂-Siとなった。このことはリンが最も植物プランクトン増殖の制限要因となる場合が多いことを示唆している。しかし, 前述のように沖合域表層では夏季に硝酸塩の枯渇が著しく, 5月の春季ブルーミングの後は硝酸塩欠損による生産性低下の可能性が示唆された。

4. おわりに

利根川河川水は, 特に夏季を中心とした成層期において, 沿岸部表層への栄養塩供給源として非常に重要であると考えられた。出水時には, 硝酸塩と珪酸塩は輸送過程で植物プランクトン生産による消費を受けつつも広く沿岸域へ供給されるのに比べ, リン酸塩は河口部で土砂粒子に吸着し沈降, あるいは輸送初期に速やかに消費さ

れると考えられた。今後, これらの知見と鹿島灘海域の流動特性を併せて解析することにより, 精度のよい低次生産モデルの構築が可能になると考えられる。

一方, 栄養塩供給源として, 河川水の影響が大きい場合と沖合深部水の影響が大きい場合とでは, 栄養塩構成比が大きく異なることが, 海域の植物プランクトン種組成や基礎生産性にどのように影響するかについて解明することも, 今後の課題の一つとして挙げられる。

本研究の遂行に際し, HORSにおける採水調査に関しては, 独立行政法人港湾空港技術研究所漂砂研究室の多大なるご協力のもと行った。特に1999年以降のほぼ毎日に行われた採水およびサンプルの一次処理は, 漂砂研究室のスタッフにより遂行されたものである。また1994年以前の採水調査に関しては, 現養殖研究所の日向野純也氏とともに実施したものである。たか丸調査に際しては, 戸部稀介・畑中享両元船長ならびに多くの乗組員の皆様, 現西海区水産研究所の本元克則氏をはじめ, 多くの研究者の方々にご協力をいただいた。厚く御礼申し上げます。

なお, 本研究の一部は, 水産工学研究所, 港湾空港技術研究所および茨城県水産試験場による共同研究「砕波帯環境と水産生物動態に関する共同研究」により実施された。

参 考 文 献

- 足立久美子・日向野純也・本元克則(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.
- 足立久美子・中山哲蔵・灘阿和夫・二瓶泰雄・小西伸英・山下俊彦(1999): 1998年夏季の鹿島灘沿岸域における水質変動, 日本海洋学会秋季大会講要.
- 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, 103巻, pp. 138-146.
- 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.
- 日本河川協会(1992~2001): 流量年表.
- 灘岡和夫・二瓶泰雄・小西伸英・中山哲蔵・足立久美子・藤井智史・佐藤健治・山下俊彦(1999): 鹿島灘における広域海水流動と河川水挙動に関する現地観測, 海工論文集, 第46巻, pp. 486-490.
- 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, 海工論文集, 第49巻, pp. 1216-1220.
- Adachi, K (1998): Primary Productivity of exposed sandy shore, Proceedings of 24th U.S.-Japan Aquaculture Panel Symposium, pp. 137-148.