

寄稿

播磨灘北部海域におけるノリ色落ちと漁場環境の変遷

堀 豊^{1†}, 望月松寿², 島本信夫³Relationship between the discoloration of cultivated *Porphyra thalii* and long-term changes of the environmental factors in the northern part of Harima-Nada, eastern Seto Inland Sea, JapanYutaka HORI^{†1}, Shouju MOCHIZUKI² and Nobuo SHIMAMOTO³

In order to elucidate the relationship between the discoloration of cultivated “Nori” (*Porphyra thalii*) and the change of environmental factors, we examined changes in dissolved inorganic nitrogen (DIN) and dissolved oxygen saturation of the bottom layer from 1973 to 2005, and compared with the changes of total nitrogen (TN) in the sea, loaded TN from land, reclaimed area, total number of incidents of red tides observed, and catch of benthic organisms in the northern part of Harima-Nada. Although DIN concentration in the sea water and input of TN from land decreased or remained on the same level, TN concentration in the sea water increased. Catch of large bivalves decreased in response to the decrease of the shallow area because of reclamation, but small bivalves like Manila clam increased. However, the catch of Manila clam showed a marked decrease because of extreme hypoxia that occurred in 1980 and 1998. The recovery of the catch in 1980 was rapid, but was slow in 1998. These facts imply that the decrease of shallow area has led to a decrease of suspension feeders like large bivalves, and to a loss of functions of water-purification in this area. These losses led to an oxygen deficiency and by a spiral of deterioration, small bivalves like Manila clam decreased suddenly, and thus allowed the occurrence of large-size phytoplankton like *Eucampia zodiacus* which is not edible for other organisms except for suspension feeders like bivalves and cause the discoloration of *Porphyra* through competitive utilizing of nutrients (DIN) in the sea. Therefore the restoration of the shallow waters is needed as a fundamental countermeasure for the recovery of the reproducible condition of this area.

Key words: DIN, TN, hypoxia, discoloration of *Porphyra*, bivalves, Harima-Nada

はじめに

播磨灘においては1990年代後半以降、養殖ノリの色落ちが頻発するようになり、ノリ養殖業者は毎年のように深刻な被害を受けている。2005年の兵庫県瀬戸内海区における漁業生産量111千トン、生産金額388億円のうち、ノリ養殖がそれぞれ64%、40%を占めることから、この色落ちの原因究明と対策が、水産行政の喫緊の課題となってい

る。

原因究明を進める際には、本海域で現在生じている現象を整理し、各現象の関連について検討する必要がある。本海域においては、30年以上継続しているモニタリング結果から、栄養塩類濃度や酸素飽和度等の環境諸要因の長期的な変動、赤潮発生状況、植物プランクトン種組成の変化等が明らかになりつつあるものの、これら環境変化相互の関係や、ノリの色落ち現象につながるシナリオについては十分に検討されていない。

そこで本稿では、ノリ養殖漁場が多く、近年色落ち現象によって漁業被害が拡大している播磨灘北部海域に注目し、観測結果と既存の資料から環境諸要因、植物プランクトン種組成、干潟浅海域面積、底生生物漁獲量の変化について特徴を把握するとともに、これら漁場環境の変化とノリの色落ち現象との関係について考察した。

2007年11月19日受付、2008年1月4日受理

¹ 兵庫県立農林水産技術総合センター 但馬水産技術センター
Tajima Fisheries Technology Institute, Hyogo Prefectural Technology Center for Agriculture, Forestry and Fisheries 1126-5 Sakai, Kasumiku, Kami-cho, Hyogo 669-6541, Japan

² 兵庫県水産課
Fisheries Division, Hyogo Prefectural Government 5-10-1 Shimoyamate-dori, Chuo-ku, Kobe, Hyogo 650-8567, Japan

³ 特定非営利活動法人 アマモ種子バンク
Non Profit Organization Amamo Shushi Bank 1-1-8 Naruohama, Nishinomiya, Hyogo 663-8142, Japan

† yutaka_hori@pref.hyogo.jp

材料および方法

海域のDIN濃度および溶存酸素濃度は、1973年4月から2005年3月までの各月上旬に実施した浅海定線調査結果を用い、Fig. 1に示す播磨灘北部海域12点の平均値を求め代表値とした。植物プランクトン種組成には、上記期間中の浅海定線調査時に、表層で採水した未固定の海水試料について同定・計数した結果を用いた。海域のTN濃度は、1978年から2000年までの環境省広域総合水質調査結果を用い、Fig. 1に示す播磨灘北部海域7点の平均値を求め代表値とした。播磨灘流域からの流入量の指標として、環境省資料から播磨灘への1979年以降の原単位法による排出負荷量（淡路島および四国沿岸からの負荷量を含む）を用いた。埋め立て竣工面積には兵庫県港湾課資料を用い、兵庫県の播磨灘沿岸における年度別埋め立て竣工面積から、その累計を求めた。赤潮発生件数には水産庁瀬戸内海漁業調整事務所資料を用いた。二枚貝類及び甲殻類の漁獲量として瀬戸内海漁業灘別漁獲統計累年表（中国四国農政局統計情報部）から播磨灘の値を抽出した。また播磨灘北部海域における二枚貝類の種別漁獲量として、近畿農政局兵庫統計情報事務所資料から兵庫県播磨地区漁協の魚種別漁獲量の合計値を用いた。

結果

水質および排出負荷量の変化

播磨灘北部海域における海水中のDIN濃度年平均値は、観測開始直後の1974年の $8.5 \mu\text{mol}\cdot\text{dm}^{-3}$ をピークとして、それ以降は減少傾向にある。1990年代前半にやや増加したものの、2005年の濃度は $3.8 \mu\text{mol}\cdot\text{dm}^{-3}$ とピーク時の半分

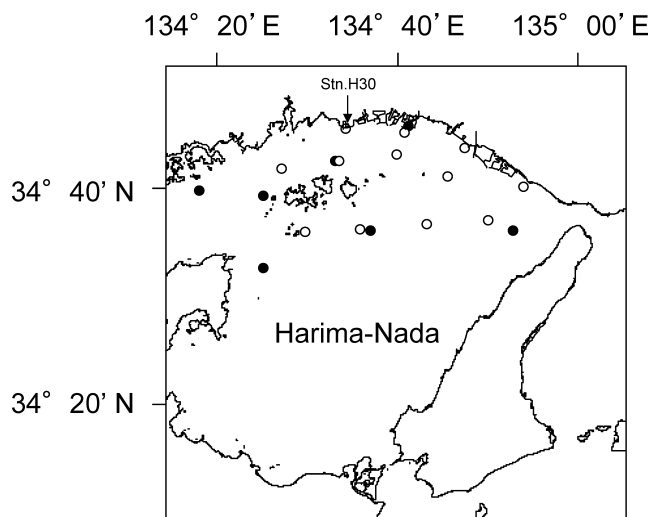


Figure 1. Map of the study site around Harima-Nada. Closed circles show the monitoring stations of the Ministry of Environment. Open circles show the monitoring stations of Fisheries Technology Institute, Hyogo Prefectural Technology Center for Agriculture, Forestry and Fisheries.

以下の濃度となっている。一方で播磨灘へのTN排出負荷量は、そのほとんどが灘北部の本州沿岸からの負荷量であるが、1979年以降大きな変化はみられないにもかかわらず、海水中のTN濃度は次第に上昇しており、海水中のDIN濃度の減少傾向とは乖離している (Fig. 2)。ノリ養殖盛期である各年1月から3月における1994年以降の播磨灘北部海域におけるDIN濃度は平均で $3 \mu\text{mol}\cdot\text{dm}^{-3}$ を下回ることが多くなり、1998年以降は $1 \mu\text{mol}\cdot\text{dm}^{-3}$ 以下にまで低下するようになってきている。またDIN濃度が $3 \mu\text{mol}\cdot\text{dm}^{-3}$ を下回る時期が早まっており、1999年、2002から2004年、2006年には2月上旬に、2003年、2006年には1月上旬にすでに平均DIN濃度が $3 \mu\text{mol}\cdot\text{dm}^{-3}$ を下回っている (Fig. 3)。

植物プランクトン種組成, 埋め立て面積, 赤潮発生件数, 底生生物漁獲量の推移

播磨灘における植物プランクトン細胞密度から種組成の推移をみると、本海域の主な構成種は珪藻であり全出現数の70~99%を占めている (Fig. 4)。珪藻の種組成の推移をみる

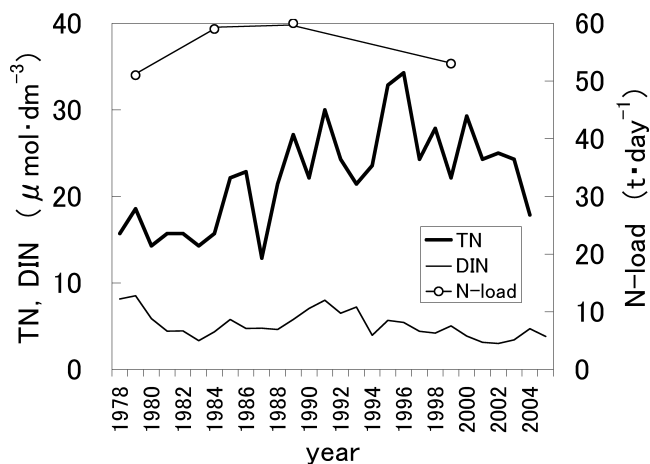


Figure 2. Long-term variations in total nitrogen (TN) and dissolved inorganic nitrogen (DIN) in the northern part of Harima-Nada and loaded TN from land to Harima-Nada.

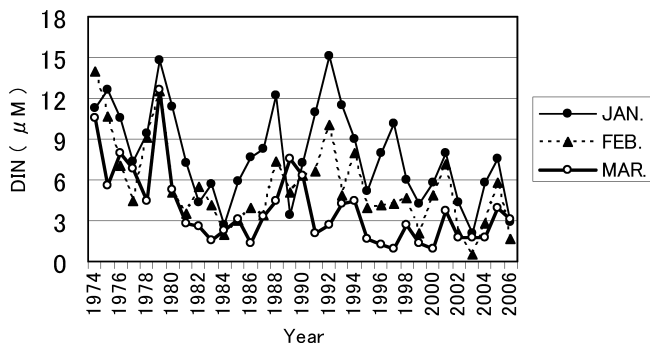


Figure 3. Long-term variations in DIN in the northern part of Harima-Nada from January to March.

と1970年代は *Skeletonema costatum* が大部分を占めていたが、1980年代前半を境に *Chaetoceros* 属をはじめ他種の占める割合が増大した (Fig. 5) (西川ほか, 2006). また1984年以降は、大型珪藻 *Coscinodiscus wailesii* が急激に増加し (Manabe and Ishio, 1991), その他の珪藻は減少した (眞鍋ほか, 1994). さらにノリ養殖盛期に注目すると、1990年代後半以降は *Eucampia zodiacus* が増加し、2001年に大発生するとともに、それ以降も大量発生が続いている (永田ほか, 1998; 永田ほか, 2001; 堀ほか, 2006; Nishikawa *et al.*, 2007).

播磨灘における埋め立ては姫路港から東播磨港にかけての北部沿岸で集中的に行われた. その竣工面積は1960年代後半から1970年代前半にかけ急速に拡大し、2002年までに灘北部海域の干潟や浅場が約230 ha減少した. 一方、瀬戸内海全域および播磨灘における赤潮発生件数は、共に1970年代に急激に増加しており、埋め立て面積の急速な拡大と時期を同じくしている (Fig. 6).

底生生物である二枚貝類および甲殻類の播磨灘全域における漁獲量の推移をみると、甲殻類は徐々に減少している

が、二枚貝類は赤潮発生件数同様に1970年代に顕著に減少している. 甲殻類の漁獲量も減少を続けているが、二枚貝類の減少ほど顕著な傾向は認められない (Fig. 7). 播磨灘北部海域における二枚貝類の種別漁獲量の推移を見ると、1970年代の埋め立て面積の急速な拡大と時期を同じくして、ハマグリ、ウチムラサキガイやバカガイを中心と

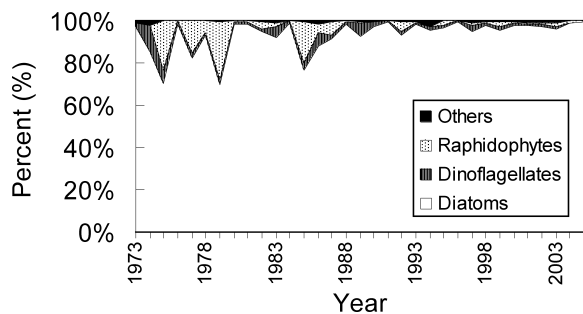


Figure 4. Long-term variations in cell density composition of phytoplankton in Harima-Nada (from Nishikawa *et al.*, 2006).

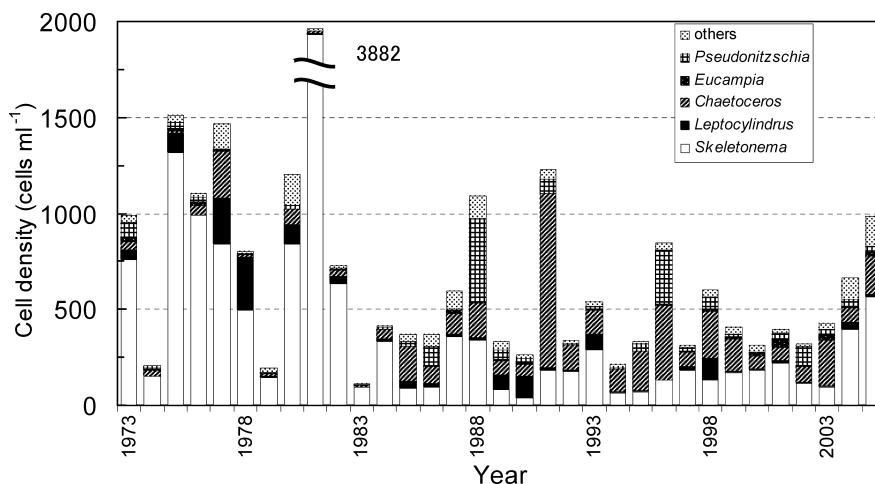


Figure 5. Long-term variations in cell density of diatoms in Harima-Nada (from Nishikawa *et al.*, 2006).

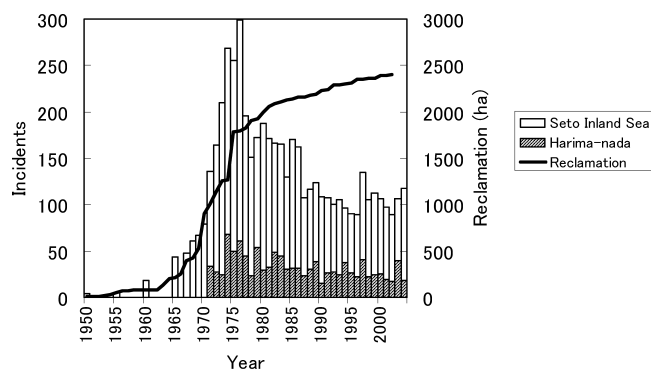


Figure 6. Long-term variations in incidents of red tides observed in Seto Inland Sea and Harima-Nada and area of reclaimed land in Harima-Nada.

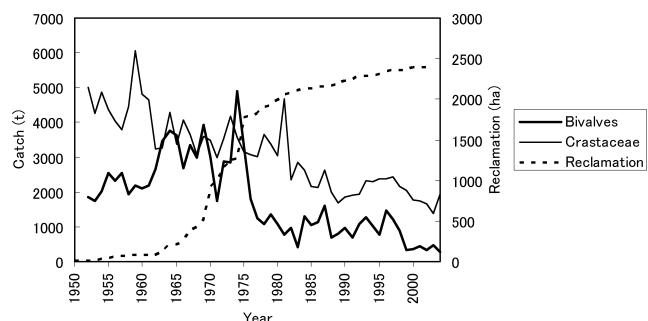


Figure 7. Long-term variations in catch of bivalves and crustaceans and the area of reclaimed land in Harima-Nada.

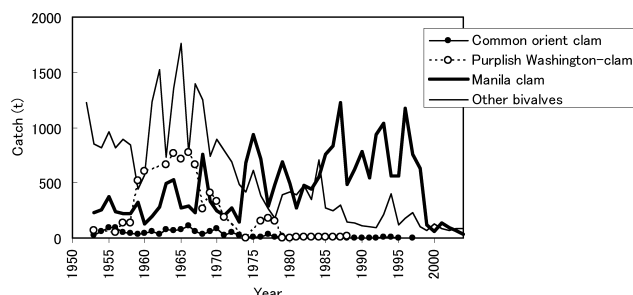


Figure 8. Long-term variations in catch of common orient clam (*Meretrix lusoria*), purplish Washington-clam (*Saxidomus purpuratus*), Manila clam (*Ruditapes philippinarum*), and other bivalves in the northern part of Harima-Nada.

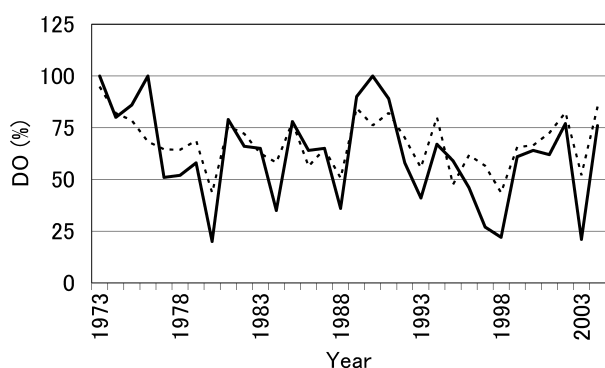


Figure 9. Long-term variations in dissolved oxygen saturation near the bottom of the northern part of Harima-Nada in September. Solid line: Stn.H30; Dashed line: average of 12 points.

するその他の貝類など大型二枚貝類の漁獲量減少が顕著になった。一方小型の二枚貝であるアサリの漁獲量は、年変動が大きいものの大型二枚貝類の減少後も次第に増加する傾向が認められた。しかし埋め立ての進行が緩やかになった1980年代以降でも、1981年および1999年には極端な漁獲量減少が認められ、2000年以降は非常に低い水準で推移している (Fig. 8)。

また播磨灘北部海域底層付近において季節的に値が最も低くなる9月の酸素飽和度平均値の推移をみると、顕著な貧酸素化は、1980年および1998年に発生している (Fig. 9)。

考 察

“色落ち”と呼ばれるノリ葉状体の退色現象は、全国各地の漁場でしばしば報告されており (有賀, 1974; 有賀, 1980), 本海域においてもノリの色落ち現象自体は養殖を始めた当初から認められたが、その範囲は灘北西部沿岸の一部に限られていた。しかし1996年には広範囲にわたる色落ち被害が発生し (永田ほか, 1998), 1998年以降は明石海峡付近の養殖生産漁場も含め、毎年大きな色落ち被害

が発生している。ノリの色落ちは、主として栄養塩不足によるものであり、栄養塩や微量栄養元素の中では窒素の減少が最も大きな影響を与える (有賀, 2003)。本海域において養殖ノリが色落ちを始めるDIN濃度は $3 \mu\text{mol}\cdot\text{dm}^{-3}$ (永田ほか, 2001) と指摘されているが、本海域におけるDIN濃度は、年々低下してきており (眞鍋ほか, 1994; Imai *et al.*, 2006), この濃度を下回る海域の面積が拡大するとともに、Fig. 3に示すように1999年以降は2月または1月の時点ですでに $3 \mu\text{mol}\cdot\text{dm}^{-3}$ を下回り、2003年以降は1月から3月の平均値でも色落ちが発生するような低レベルに至っている (鷲尾ほか, 2005) など、濃度低下の時期が早まっていることが養殖ノリ色落ち被害拡大の直接的な原因となっている。したがって色落ち被害の対策を考える上ではDIN濃度低下の原因究明が必要である。DIN濃度を減少させる要因としては、陸域からの流入量、隣接海域からの流入量、生物からの排泄量、海底堆積物からの溶出量の減少や植物プランクトンによる摂取量の増加等が考えられる。以下ではこれらの各要因について検討する。

(1) 陸域および隣接海域からの流入量：陸域からの流入量については、直接継続的に観測された資料がないため検討が困難であるが、Fig. 3に示すようにTN排出負荷量は減少または横ばいの傾向にあり、河川等から直接流入するDIN量も減少している可能性がある。また隣接海域からの流入量の変化要因として、夏季に外海から紀伊水道を通じて瀬戸内海に供給される窒素量が、紀伊水道への黒潮の接岸にともない1990年代半ば以降に低下したこと (Takashi *et al.*, 2006), 夏季における流入量の変化がノリ養殖時期におけるDIN濃度のピーク値の変化に間接的に影響している可能性があること (小林ほか, 2007), ノリ養殖時期には窒素は外海へ流出する傾向にあること (藤原ほか, 2006) などが指摘されており、今後これらの影響について検討する必要がある。

(2) 植物プランクトンによる摂取量：近年の珪藻類の種組成変化から1984年以降、大型珪藻 *Coscinodiscus wailesii* が急激に増加していることがわかる。同種は、それ以前に本海域で最も優占して出現していた小型珪藻の *Skeletonema costatum* と比較して、窒素と珪素の取り込み量がリンの取り込み量に比べて著しく大きい (眞鍋ほか, 2003) ことが明らかにされており、同種の出現が海域中のDIN濃度減少に大きく影響していると考えられた。また1990年代後半以降、群体を形成して大型化する珪藻 *Eucampia zodiacus* が増加し、同種の最小細胞内栄養塩含量が *C. wailesii* に比べ低く (西川・堀, 2004), 環境中のDIN濃度がより低い状況においても増殖可能であることから、さらに海域中のDIN濃度を減少させたことが推察される。

(3) 生物からの排泄量および海底堆積物からの溶出量：生物からの排泄量及び海底堆積物からの溶出量を大きく減少させる要因として、干潟・浅場の埋め立てがある。

干潟・浅場の埋め立ては他の海域においても大規模に行われており、例えば三河湾においては1957年から1999年にかけて埋め立て等により水深5m以浅の浅場の21%に相当する2700haが消失し、1970年代の10年間だけで約1200haの干潟・浅場が失われた(Suzuki, 2001)。瀬戸内海全域では1949年から1994年の間に約318km²の浅海域が消失している(門谷, 1996)。1981年以降の播磨灘における埋め立て面積は41haに及ぶが、このうち68%は姫路港における埋め立てである。この海域では現在も徐々に埋め立て面積が増加し続けており、播磨灘内の他海域に比べ環境変化が大きくなっていると考えられる。Fig. 7から、播磨灘ではウチムラサキガイなど大型二枚貝類の減少時期が、播磨灘北部沿岸の埋め立ての進行と一致しており、生息場所の喪失が大型二枚貝類生息量の急減をもたらしたと考えられる。これら大型二枚貝類の減少は、直接DIN排泄量の減少となって海域中のDIN濃度減少に影響し、干潟・浅場の堆積物からの溶出量も喪失面積に比例して減少する。なお本海域において埋め立ての進行と同時に大型二枚貝類が減少した後、アサリ漁獲量が増加したのは、アサリがウチムラサキガイやバカガイ、ハマグリなどに比べ有機汚濁に対する耐性が強い種であることや、大型二枚貝類が消滅したことによりアサリの生息場所が増大したことが考えられる。

(4) 貧酸素化とアサリ漁獲量の減少：さらに二枚貝類の減少をもたらすもうひとつの要因として、海域の貧酸素化を挙げることができる。Fig. 2に示すように、本海域では陸域からの排出負荷量が減少する中、海域におけるTNは増加しており、一方で海域におけるDINは減少傾向にある。このことは、本海域において溶存有機態窒素(DON)あるいはプランクトンなどの粒状態窒素(PON)が増加していることを示唆しており、これに伴い貧酸素化の原因となる海底付近の有機物堆積量も増加していると考えられる。播磨灘における貧酸素化の程度は、表層と底層の密度差、底層水温、台風接近数等その年の天候条件により左右され(堀, 1998)、悪条件の重なった1980年と1998年夏季には極端な貧酸素化が生じていた。したがってこれらの年には、有機物堆積量の増加に無風、高水温等の悪い天候条件が重なり、極端な貧酸素化を招いたと推測される。アサリ漁獲量は1980年の貧酸素化の後、1981年には減少したものの、1982年以降には元の水準にまで回復していた。しかし1998年に発生した貧酸素化後のアサリ漁獲量激減では、その後の回復が認められない状況が継続している。アサリ漁獲量回復のみられた1980年と回復のみられなかった1998年の貧酸素化後の状況の差は、姫路港周辺海域におけるアサリ生息適地の減少が、1998年には貧酸素化後の資源回復に必要な面積を下回ったことに一因があると推察される。さらに1998年には大量出水による干潟地形の変化が認められ、このこともアサリ漁獲量激減に大きく寄与していることが考えられる。先に述べた植物プラン

クトン種組成の変化において、*C. walesii*が急増し始めた時期は、大型二枚貝類、アサリともに漁獲量が少なくなった時期であり、近年の*E. zodiacus*の大量発生は、アサリの極端な減少と同時期に起こっている。これは貧酸素化の進行や埋め立て等の地形変化に伴う生息適地の減少が二枚貝類を減少させ、大型珪藻類への摂食圧が低下したため生じた現象と考えられる。

以上のことから、海水中の有機物を浄化する能力の高い大型二枚貝類や、大型の植物プランクトンを摂食することのできる小型の二枚貝類などの底生性生物が、干潟浅場の喪失、貧酸素化、地形変化などによって極端に減少した結果、陸からの負荷量は増加しないにもかかわらず、海水中の全窒素濃度が増加し、溶存無機態窒素が減少するという現象がこの海域で起こっていると推察される。干潟浅場に二枚貝などのろ過性生物が多く生息すれば、大型植物プランクトンは摂食され、消化、排泄の過程を経て尿に含まれるアンモニア態窒素のようにノリ葉体が直接利用できる形態の栄養塩として環境水中に還元される。しかし播磨灘では埋め立てや貧酸素等の影響により、浅場の生態系が破壊され、二枚貝類等の底生生物が減少したために、*C. walesii*や*E. zodiacus*といった大型植物プランクトンを摂食し、無機態栄養塩類として海に還元する機能が損なわれてしまっている。その結果、これまで大量に増えることのなかった大型珪藻が増え、DINを大量に消費し、養殖ノリに色落ち現象をもたらしていると考えられる。

本海域におけるノリ養殖漁業は漁場環境の変化により危機的な状況にある。その対策にあたっては、まず漁業者の経済的負担を軽減するために、速効的な対策を講じる必要があり、貧栄養水塊の移動・拡散範囲の正確な予測手法や、本海域のように流速の大きな浮き流し漁場においても効果のある施肥方法等の検討をまず進めなければならない。

しかし上記の環境悪化に関するシナリオは、養殖ノリの色落ち対策を行う上で、施肥等の対策だけでは抜本的な解決は得られず、干潟、浅場機能の回復から始まる一連の施策を講じ、特に播磨灘北部沿岸域における漁場環境を正常な状態に戻す必要があることを示している。今後は、対症的、速効的な対策によって、急激な漁業の衰退を避けながら、一方で生態系機能の回復を目指した抜本的な対策を講じることが求められる。

謝辞

本稿の作成にあたり終始有益な助言を賜った兵庫県ノリ漁場環境予測モデル検討委員会(委員長:有賀祐勝 東京水産大学名誉教授)の委員各位、貴重なご指導を賜った愛知県水産試験場の鈴木輝明博士、名城大学の高倍昭洋博士、兵庫県立農林水産技術総合センターの反田實博士、(株)日本海洋生物研究所の今尾和正博士および調査、分析に多大な協力をいただいた兵庫県立農林水産技術総合センター

の岡本繁好主任研究員, 二羽恭介博士, 西川哲也主任研究員, 山本強吏員, 調査船乗組員の方々, 中西寛文専門技術員, 兵庫のり研究所の方々にお礼を申し上げる。

引用文献

- 有賀祐勝 (1974) 養殖海苔の色調. 私達の海苔研究, **23**, 1-14.
- 有賀祐勝 (1980) スサビノリの色彩と色素. 遺伝, **34**, 8-13.
- 有賀祐勝 (2003) 有明海ノリ問題に関するコメント. 日本水産学会誌, **69**, 432-433.
- 藤原建紀・小林志保・国井麻妃・宇野奈津子 (2006) 瀬戸内海に存在するリン・窒素量の経年変動. 沿岸海洋研究, **43**, 129-136.
- 堀 豊 (1998) 夏季の播磨灘底層における溶存酸素量の動向. 第4回瀬戸内海資源海洋研究会報告, 瀬戸内海区水産研究所, 79-82.
- 堀 豊・中谷明泰・西川哲也・鈴木輝明・高倍昭洋 (2006) 冬季の播磨灘における *Eucampia zodiacus* の分布特性と環境条件. 海洋理工学会誌, **12**, 13-22.
- Imai, I., M. Yamaguchi and Y. Hori (2006) Eutrophication and occurrences of harmful algal blooms in the Seto Inland Sea, Japan. *Plankton Benthos Res.*, **1**, 71-84.
- 小林志保・藤原建紀・原島 省 (2007) 瀬戸内海における溶存態無機窒素の季節・経年変動とその要因. 沿岸海洋研究, **44**, 165-175.
- Manabe, T. and S. Ishio (1991) Bloom of *Coscinodiscus wailesii* and DO deficit of bottom water in Seto Inland Sea. *Mar. Pollut. Bull.*, **23**, 181-184.
- 眞鍋武彦・二羽恭介・岡本繁好・西川哲也・堀 豊・上田隆敏 (2003) 瀬戸内海. 日水誌, **69**, 424-425.
- 眞鍋武彦・反田 實・堀 豊・長井 敏・中村行延 (1994) 播磨灘の漁場環境と植物プランクトンの変動—20年間のモニタリングの成果—. 沿岸海洋研究ノート, **31**, 169-181.
- 門谷 茂 (1996) 瀬戸内海的环境と漁業の関わり. 瀬戸内海の生物資源と環境 岡市友利・小森星児・中西弘編 恒星社厚生閣, 1-40.
- 永田誠一・中筋昭夫・中谷明泰・井川直人・堀 豊 (1998) 1995, 1996年度漁期後半に播磨灘のノリ漁場において観測された珪藻プランクトンについて. 兵庫水試研報, (34), 41-48.
- 永田誠一・名角辰郎・中谷明泰・鷺尾圭司・眞鍋武彦 (2001) 近年の播磨灘主要ノリ漁場の環境調査結果. 兵庫水試研報, (36), 59-73.
- 西川哲也・堀 豊 (2004) ノリの色落ち原因藻 *Eucampia zodiacus* の増殖に及ぼす窒素, リンおよび珪素の影響. 日水誌, **70**, 31-38.
- 西川哲也・堀 豊・長井 敏・宮原一隆・中村行延・眞鍋武彦 (2006) 植物プランクトンの細胞密度および種組成の長期変動から見た播磨灘30年の変遷. 2006年日本プランクトン学会・日本ベントス学会合同大会, 講演要旨, 108.
- Nishikawa, T., Y. Hori, K. Tanida and I. Imai (2007) Population dynamics of the harmful diatom *Eucampia zodiacus* Ehrenberg causing bleaching of *Porphyra thalii* in aquaculture in Harima-Nada, the Seto Inland Sea, Japan. *Harmful Algae*, **6**, 763-773.
- Suzuki, T. (2001) Oxygen-deficient waters along the Japanese coast and their effects upon the estuarine ecosystem. *J. Environ. Qual.*, **30**, 291-302.
- Takashi, T., T. Fujiwara, T. Sumitomo and W. Sakamoto (2006) Prediction of slope water intrusion into the Kii Channel in summer. *J. Oceanogr.*, **62**, 105-113.
- 鷺尾圭司・島本信夫・堀 豊・岡本繁好・上田隆敏 (2005) 兵庫県における栄養環境の変化とノリ養殖漁業の盛衰. 海洋と生物, **27**, 238-245.