

徳島県沿海の藻類養殖漁場における珪藻増殖が DIN濃度減少に及ぼす影響

酒井基介*¹, 上田幸男*¹

Influence of diatom blooms on the decrease of dissolved inorganic nitrogen concentration in algal culture water around Tokushima Prefecture

Motosuke SAKAI*¹, Yukio UETA*¹

Relationship between dissolved inorganic nitrogen concentration (DIN) and blooms of diatoms such as *Coscinodiscus wailesii*, *Eucampia zodiacus* were examined in porphyra and wakame culture waters of the Harima-Sea, Konaruto Strait, northern Kii Channel, mouth of the Yoshino River, and the southern water along Tokushima Prefecture from October to March during 2006 to 2009. *C. wailesii* and *E. zodiacus* mainly formed blooms in November and during February and March respectively and caused marked reductions in DIN concentration. The increased level of these diatoms was significantly correlated to the decreased level of DIN. Decreased level of DIN was estimated to be $1 \mu\text{mol/L}$ when increased level of *C. wailesii* and *E. zodiacus* were 1,000cells/L and 158cells/mL respectively.

キーワード： *Coscinodiscus wailesii*, *Eucampia zodiacus*, 珪藻増殖, DIN, 藻類養殖

近年、徳島県沿海の藻類養殖漁場では溶存態無機窒素(以下DIN)濃度が著しく減少し、アマノリおよびワカメの色落ち現象が頻繁に発生している。DIN濃度がアマノリで $3 \mu\text{mol/L}$ 、ワカメで $2 \mu\text{mol/L}$ を下回ると色落ちが発生するとされ(萩平2005)、DIN濃度低下の直接の原因は珪藻類の大量発生に伴う消費による(藤原ほか2009)。このため徳島県水産研究所では藻類養殖期に栄養塩情報を発信し、漁業者に注意を喚起している。本研究では2006~2009年の10~3月に徳島県沿海の播磨灘、小鳴門海峡、紀伊水道北部、吉野川河口周辺、県南の5海域のアマノリとワカメの藻類養殖漁場におけるDIN濃度の消長と *Coscinodiscus wailesii*, *Eucampia zodiacus* の珪藻2種の細胞密度の経時変化から、珪藻の増殖時期とDIN濃度の減少時期および両者の経時関係について明らかにした。さらに、これらの珪藻がどの程度DIN濃度を低下させるか明らかにする目的で細胞密度の増加量とDIN濃度の減少量の関係を明らかにすることを試みた。

調査方法

図1に示したアマノリ養殖漁場14点、ワカメ養殖漁場18点において、2006~2008年漁期の10月~3月の間、月2~4回の採水を行い、DIN、塩分およびプランクトン細胞密度について調査した。対象としたプランクトンは、本県沿岸において藻類養殖期に大量発生して栄養塩を消費する代表種である *C. wailesii* および *E. zodiacus* とし、2007年漁期のみ *Thalassiosira diporocyclus* の群体を追加した。また、調査期間中の水温の推移を把握するため、徳島県水産研究所鳴門庁舎の汲み上げ海水温をデータとして用いた。

試水は、アマノリおよびワカメ養殖業者が採取した養殖漁場の表層水とし、塩分測定にはデジタルサリノ



図1 徳島県の藻類養殖漁場における調査地点

メーター (MODEL3-G: 鶴見精機社製) を用いた。DINは試水をGF/C (直径47mm, Whatman社) で重力ろ過した後、当日中に自動流れ分析装置swAAt (ピーエルテック社製) で $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$ を分析し、その合計値を用いた。プランクトン細胞密度は試水100mlをGF/Cで10mlまで濃縮し、光学顕微鏡下で細胞数を計数した。 *T. diporocyclus*

*1 徳島県立農林水産総合技術支援センター水産研究所鳴門庁舎 (Fisheries Research Institute Naruto Branch, Tokushima Agriculture, Forestry, and Fisheries Technology Support Center, Dounoura, Seto, Naruto, Tokushima 771-0361, Japan)

表1 各漁場における調査地点

漁場	地点
播磨灘	折野, 粟田, 北泊, 室1, 室2, 鳴門町2
小鳴門海峡	水研鳴門, 堂浦1, 堂浦2
紀伊水道北部	鳴門町1, 新鳴門, 里浦1, 里浦2, 里浦3
吉野川河口周辺	川内1, 川内2, 川内4, 渭東, 辰巳
県南	和田島1, 和田島3, 和田①, 和田②, 和田③, 今津, 今津1, 今津2, 今津3, 中島, 中島1, 福村, 中林

は、100ml中の群体数を肉眼により確認可能なサイズのみを計数した。

藻類養殖漁場を播磨灘、小鳴門海峡、紀伊水道北部、吉野川河口周辺、県南の5海域に区分し(表1)、各漁場に属する調査地点の塩分、DIN、珪藻細胞密度の平均値を海域の代表値として用いた。

5海域の塩分、DIN濃度および珪藻2種の細胞密度の経時変化から、これらの変動の関係を調べた。さらに、各調査地点における細胞密度の増加量とDIN濃度の減少量の関係について解析を行った。解析には、*C. walesii*については11月、*E. zodiacus*については1~3月の吉野川河口周辺および県南のデータを使用した。また、解析データ選定にあたっては以下の条件に基づいて実施した。1) 河川からのDIN供給の影響を避けるため、塩分が31psu未満の

データは除外した。2) DIN濃度への影響が不明瞭であることから、細胞密度および細胞密度の増加量が、*C. walesii*では200cells/L、*E. zodiacus*では50cells/ml以下のデータは除外した。3) DIN濃度への影響が不明瞭であることから、DIN濃度の減少量が $0.5 \mu\text{mol/L}$ 以下のデータは除外した。4) DIN減少量が過小となるのを避けるため、DIN減少後の濃度が $1 \mu\text{mol/L}$ 以下のデータは除外した。5) *T. diporocyclus*によるDIN消費の影響を避けるため、*T. diporocyclus*が3群体/100ml以上時のデータは除外した。

結果

2006年漁期

鳴門庁舎の汲み上げ海水温は、漁期をつうじて平年よ

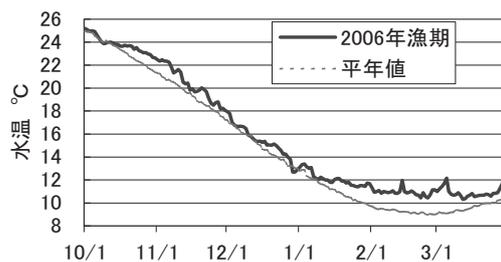


図2 2006年漁期の鳴門庁舎汲み上げ海水温

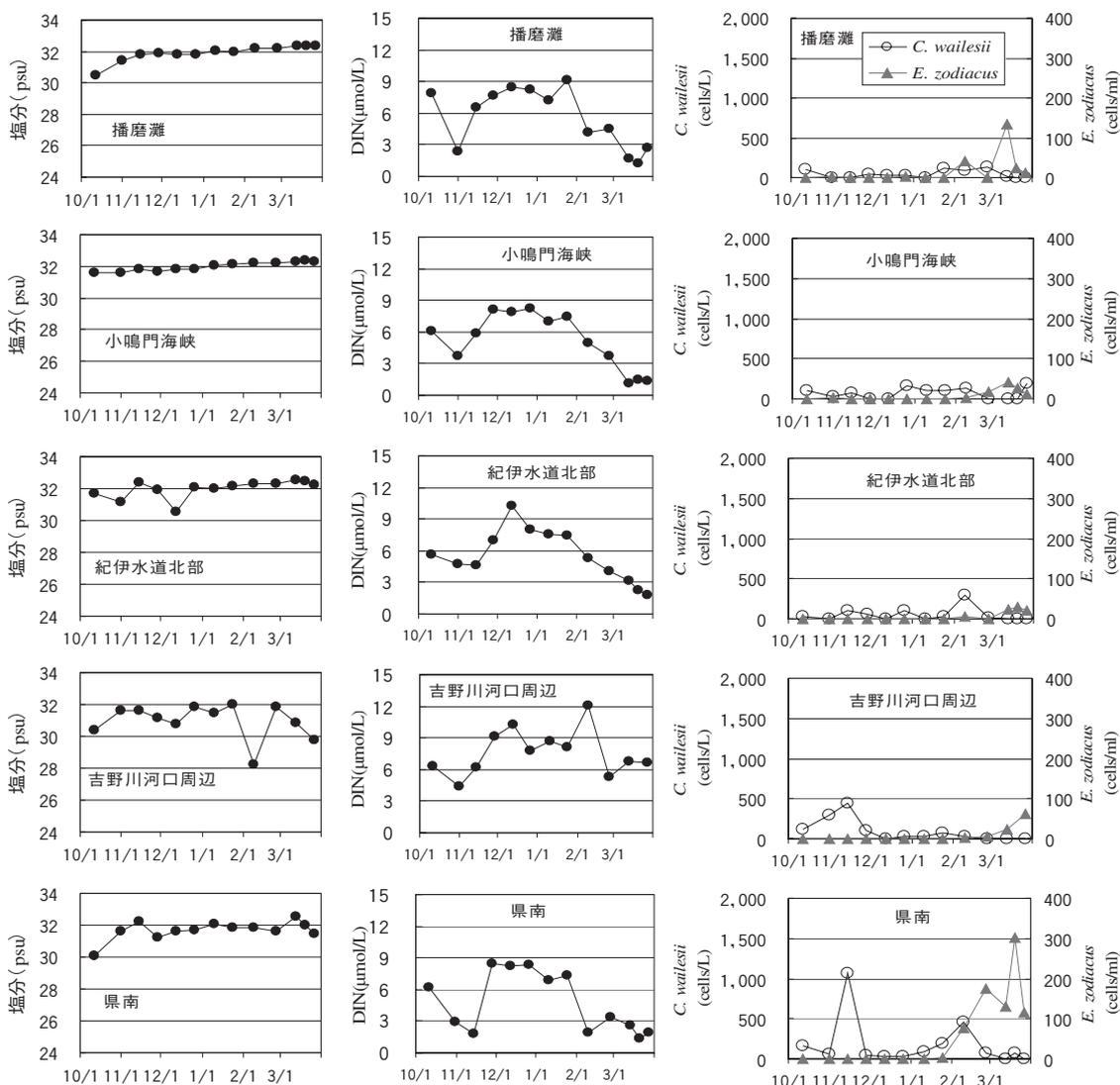


図3 2006年漁期の塩分(左)、DIN(中央)、珪藻細胞密度(右)

り高めで推移し、最低水温期の2月は平年より約1.7°C高めであった。10月31日に*Chaetoceros*属を主体とする小型珪藻の増加により播磨灘、小鳴門海峡、県南のDIN濃度が一時低下したが、11月14日には播磨灘、小鳴門海峡での増殖は終息しDIN濃度は回復した。一方、県南では11月14日においても小型珪藻の増殖が継続するとともに*C. wailesii*が1,067cells/Lの密度で出現しDIN濃度は1.9 μ mol/Lにまで低下し、11月28日に両種の増殖は終息しDIN濃度は回復した。著しい低塩分化は2月9日の吉野川河口周辺においてのみ見られ、一時的に高いDIN濃度となった。*E. zodiacus*は播磨灘で3月に132.9cells/ml、県南で2月から3月に76.1~302.8cells/mlに増加し、いずれの漁場もDIN濃度は3 μ mol/Lを下回った。他の漁場では*E. zodiacus*は低密度だったが、小鳴門海峡と紀伊水道北部では3月に3 μ mol/Lを下回った。

2007年漁期

鳴門庁舎の汲み上げ海水温は、10月は平年より高め、その他の期間は平年並みで推移した。DIN濃度は11月15日の*C. wailesii*出現ピーク時に低下し、県南では

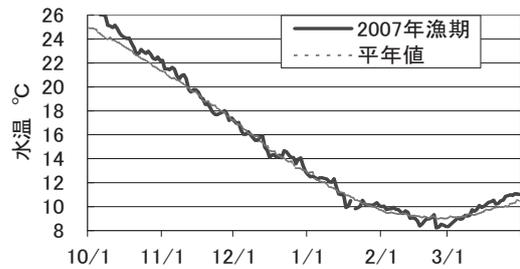


図4 2007年漁期の鳴門庁舎汲み上げ海水温

表2 100mlあたり *T. diporocyclus* 群体数

	播磨灘	小鳴門海峡	紀伊水道北部	吉野川河口周辺	県南
11月15日	全地点で少数確認(未計数)				
11月21日		1.0	11.3	27.5	33.1
11月29日	2.0	4.0	6.5	17.0	26.7
12月6日	<3	<3	<3	<3	<3
12月26日	9.5	3.2	6.6	5.9	1.8
1月10日	6.7	4.1	11.6	18.5	3.9
1月17日	9.3	3.8	7.3	8.6	2.9
1月23日	3.5	3.9	2.9	8.0	1.2
1月30日	2.3	2.0	2.5	2.8	0.4
2月7日	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

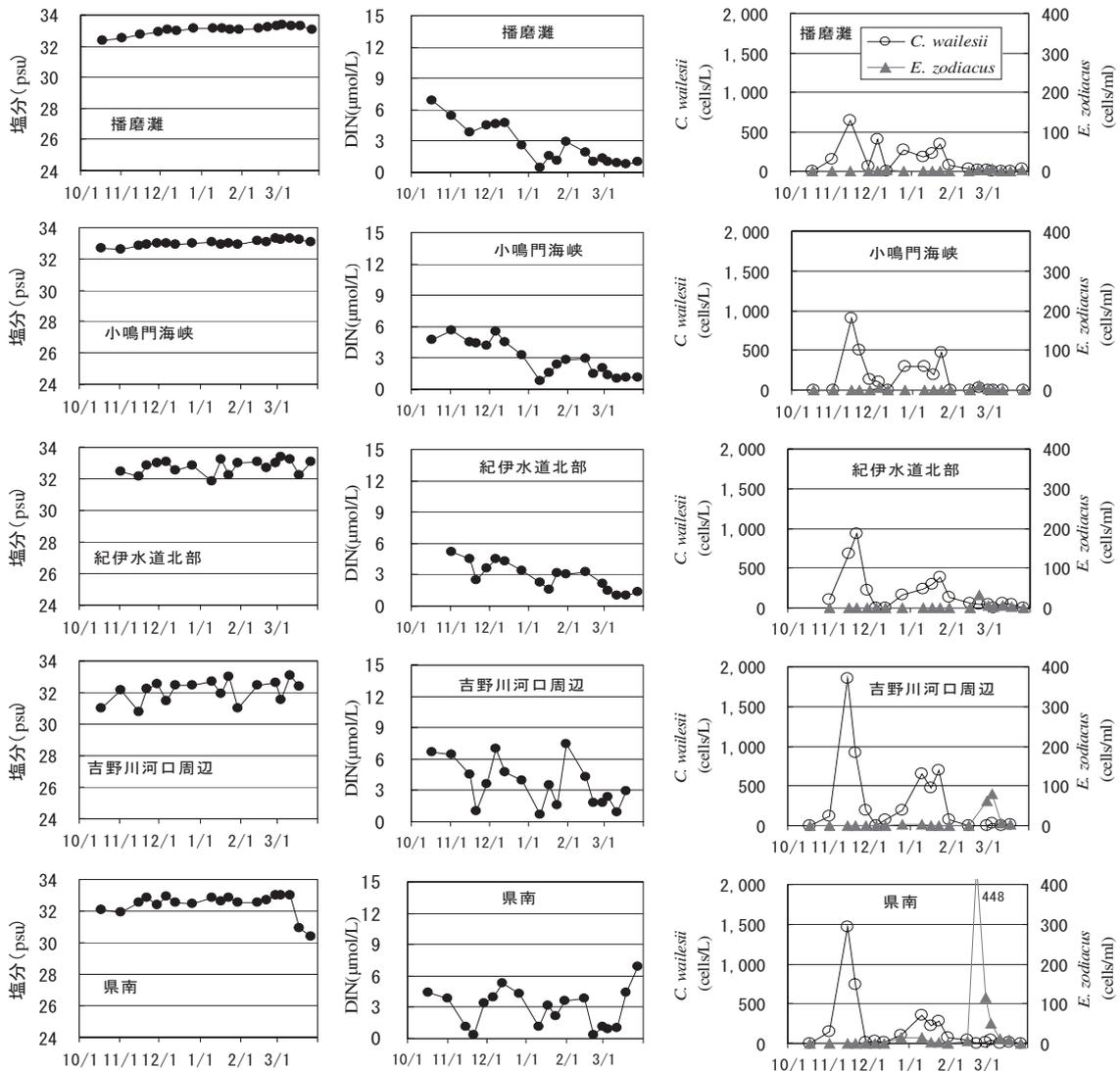


図5 2007年漁期の塩分(左), DIN(中央), 珪藻細胞密度(右)

1.0 $\mu\text{mol/L}$ にまで低下した。また、11月15日には*T.diporocyclus*の群体が全漁場でごくわずか(未計数)ながら確認され、11月21日には紀伊水道全域で大量発生してDIN濃度を低下させた。この時の群体数は南部海域に向かうほど多く、DIN濃度も県南、吉野川河口周辺、紀伊水道北部の順に低かった。群体数は12月上旬に一旦減少したが、12月下旬から1月にかけて全漁場で増加してDIN濃度の低下をもたらし、2月に増殖は終息した(表2)。*E.zodiacus*の顕著な増殖は県南のみで見られ、2月21日に448 cells/mlに急増し、DIN濃度は0.3 $\mu\text{mol/L}$ となった。出現ピークは短く3月上旬に終息したが、その時点ではDIN濃度の回復は見られなかったものの、3月下旬に降雨による塩分低下が見られ、これに伴いDIN濃度も上昇した。

2008年漁期

鳴門庁舎の汲み上げ海水温は、1月までは平年並み、2月は平年より0.7 $^{\circ}\text{C}$ 高めで推移した。吉野川河口周辺と県南では、*Chaetoceros*属を主体とする小型珪藻が増殖したことにより10月23日にDIN濃度の急激な低下が見られた。翌調査日の11月5日には紀伊水道北部と吉野川河口周辺で

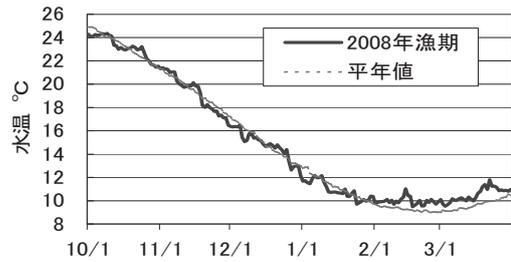


図6 2008年漁期の鳴門庁舎汲み上げ海水温

*C.wailesii*が、それぞれ1,075 cells/Lおよび1,760cells/Lの細胞密度で出現し、DIN濃度はいずれも2.1 $\mu\text{mol/L}$ に低下したが、11月19日には*C.wailesii*細胞密度減少に伴いDIN濃度は回復した。吉野川河口周辺では12月上旬にも1,240 cells/Lの細胞密度が見られたが、DIN濃度の顕著な低下は見られなかった。*E.zodiacus*は、吉野川河口周辺で1月下旬に277.8~298.6 cells/mlの細胞密度で出現してDIN濃度を低下させたが、3 $\mu\text{mol/L}$ を下回ることにはなかった。県南では1月下旬に404 cells/ml、2月中旬に279.6 cells/mlの細胞密度で出現し、いずれの出現時にもDIN濃度は3 $\mu\text{mol/L}$ を下回ったが、3月には吉野川河口周辺

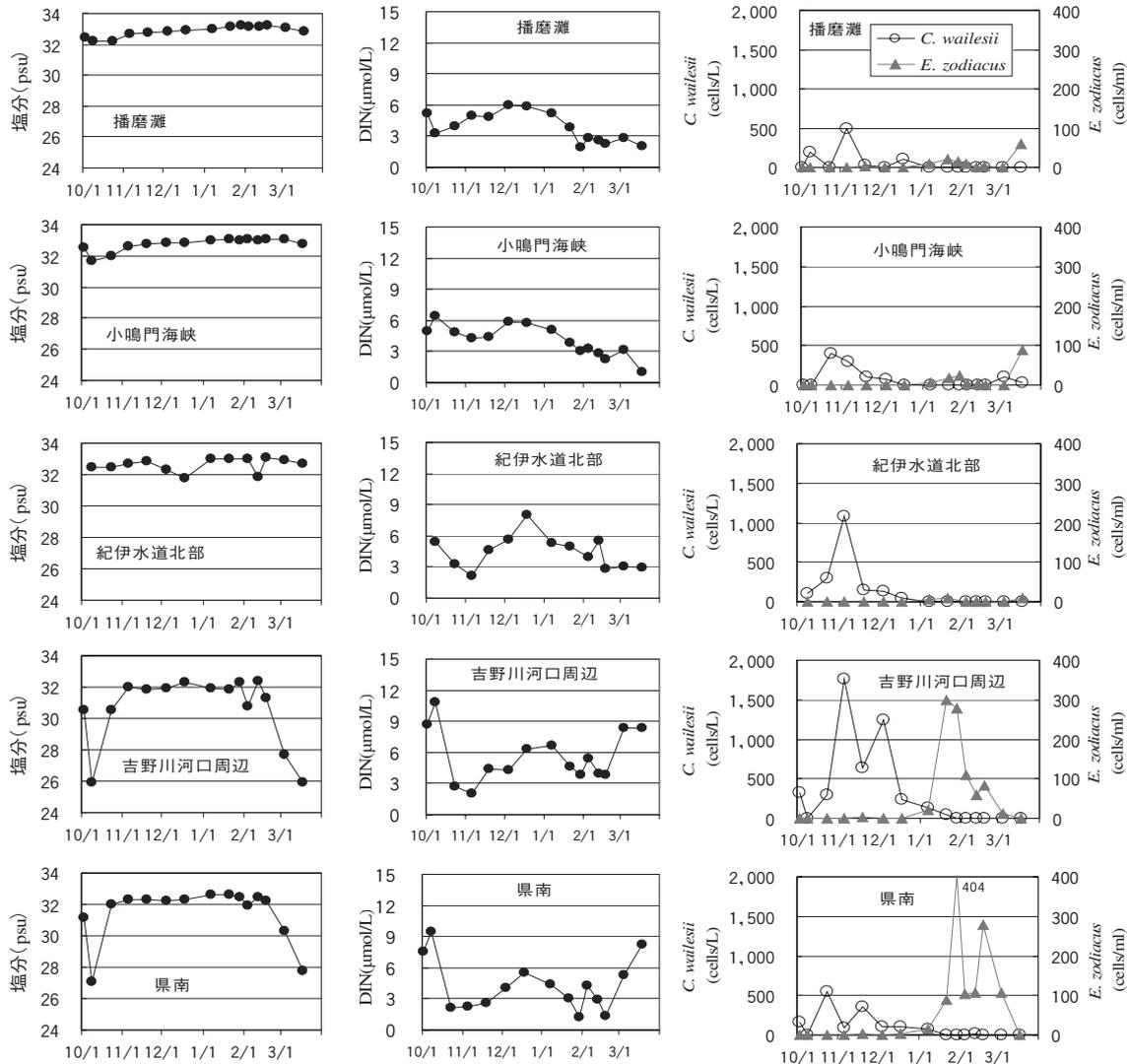


図7 2008年漁期の塩分(左)、DIN(中央)、珪藻細胞密度(右)

と県南で低塩分となり、両漁場ともDIN濃度は著しく上昇した。

2006～2008年漁期の共通事項

10～11月には、*C. walesii*や小型珪藻の増殖によりDIN濃度が低下することが多かったが、2007年漁期の*T. diporocyclus*群体大量発生のような特異事項がなければ出現ピーク後の12月には回復がみられた。一方、2～3月は*E. zodiacus*の増殖によってDIN濃度が減少したが、本種の細胞密度が低下しても降雨等による陸域からの供給がなければDIN濃度は回復しなかった。播磨灘、小鳴門海峡、紀伊水道北部では、*C. walesii*、*E. zodiacus*の細胞密度は低く、塩分とDIN濃度の短期変動は小さかった。また、1月以降には珪藻の発生がなくてもDIN濃度は徐々に減少し、3月には色落ちが発生する濃度まで低下した。吉野川河口周辺と県南では、*C. walesii*、*E. zodiacus*の細胞密度が高く、塩分とDIN濃度の短期変動が大きかった。3年間を通してみると、*C. walesii*は主として11月に、*E. zodiacus*は2～3月に増殖しDIN濃度を減少させた。また、両種ともに細胞密度の増加とDIN濃度の減少には時間的なずれが認められず、ほぼ同調していた。

珪藻細胞密度の増加量とDIN濃度減少量の関係

*C. walesii*の細胞密度の増加量とDIN濃度の減少量には有意な負の相関が認められた(図8, $n=16, r=-0.674, p<0.001$)。*E. zodiacus*の細胞密度の増加量とDIN濃度の減少量においても回帰式から外れた値がみられるものの有意な負の相関が認められた(図9, $n=41, r=-0.454, p<0.01$)。回帰式から両種の増加によってDIN濃度が $1\mu\text{mol/L}$ 減少する細胞密度は、*C. walesii*で1,000cells/L、*E. zodiacus*では158cells/mlであった。

考 察

瀬戸内海をはじめ、日本の多くの内湾海域では養殖ノリの色落ちが起こっており、その直接の原因は、大型珪藻が増殖し栄養塩を消費し尽くすことによるが、栄養塩が枯渇していくまでのプロセスは海域により、あるいは年により異なっている(藤原ほか2009)。瀬戸内海や有明海など多くのノリ養殖漁場ではDINが不足するのに対し、東京湾と博多湾ではDIP(溶存態無機リン)不足によって色落ちが発生している。瀬戸内海東部で色落ちを引き起こす主な原因藻は、*C. walesii*と*E. zodiacus*である。他の海域では、前2種以外を原因藻としながらも*E. zodiacus*を原因藻の1種とするところもあるが、*C. walesii*をあげる海域は少ない(樽谷2009)。徳島県の播磨灘および紀伊水道の沿岸においては、主な色落ち原因藻とその発生時期は瀬戸内海東部の各海域と一致し、枯渇する栄養塩の種類も同様にDINである。

本研究において、両珪藻の細胞密度の増加とDIN濃度の減少は同調していたことから、両種は急速にDINを消費していると考えられる。細胞密度増加量とDIN濃度低下量の関係においては*E. zodiacus*より*C. walesii*の方が高い相関が得られた。*C. walesii*の解析には11月のデータを用いたが、この時期は他の植物プランクトンの発生は非

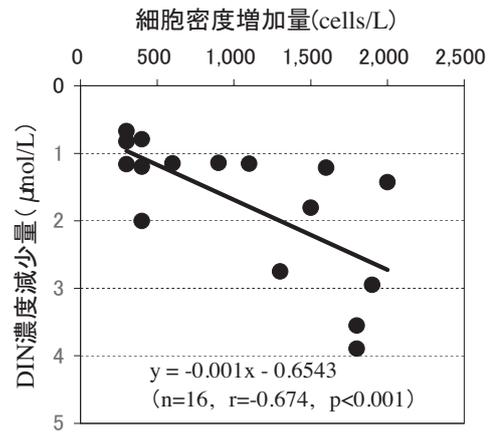


図8 *C. walesii*細胞密度増加量とDIN濃度減少量との関係

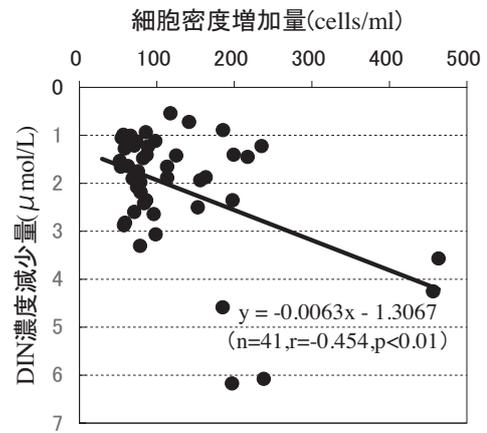


図9 *E. zodiacus*細胞密度増加量とDIN濃度減少量との関係

常に少ない。一方、*E. zodiacus*で用いた1～3月の吉野川河口周辺および県南では、*E. zodiacus*を優占種としながらも他の小型珪藻が混在する場合があるため、その影響からやや低い相関になったと考えられる。

西川、堀(2004)は、室内培養実験による窒素の最小細胞内含量からDIN濃度に及ぼす細胞密度を算出している。これによると、DIN濃度が $1\mu\text{mol/L}$ 減少する細胞密度は*C. walesii*では2,228cells/L、*E. zodiacus*では625cells/mlであり、本研究から得られた細胞密度よりもかなり大きい。この差は、最小細胞内含量が細胞の維持に必要な最小量ということから納得のいくものである。また、本研究では1～2週間間隔で採取した現場試料から得られたデータを基にしており、その間の珪藻の動態とDINの変動については考慮していないため、DINの収支を把握できる室内培養実験とは異なるものである。

2006年および2008年漁期には、*Chaetoceros*属等の増殖によるDIN濃度の低下が10月に見られた。この時期は鉛直混合の初期にあたり、底層からの栄養塩が表層に供給され始める時期である。鳴門庁舎汲み上げ海水温を見ると、10月に水温降下の鈍る時期がいずれの年にも見られることから、鉛直混合が弱まり栄養塩を含んだ海水が表層に停滞したことで一時的なブルームを形成したと考えられる。

本県沿岸において藻類養殖期にDIN濃度の低下を招く

代表種は*C. walesii*と*E. zodiacus*であるが、突発的に発生する小型珪藻や13年ぶりに大量発生した*T. diporocyclus*による影響も小さくないことが明らかとなった。*T. diporocyclus*の群体サイズは一定しておらず、当然1群体あたりの細胞数も一定ではない。長井ら(1995)は、1994年に本種群体が大量発生した際、1群体あたりの栄養細胞数を平均750と算出している。一方、安部ら(2009)が、2007年の大量発生時に調査した結果では平均3,712としており、このことから群体数を計数するだけでは本種によるDIN濃度への影響は把握できないことがうかがえる。安部ら(2009)は、*T. diporocyclus*群体を冷暗所で15時間静置後、振とうすることで群体を崩壊し、細胞を均一に分散させて計数できることを報告しており、本種については同様な手法によって細胞数を計数する必要があると考えられる。

最後に、本研究から本県の藻類養殖漁場における*C. walesii*と*E. zodiacus*の細胞密度に応じてどの程度DIN濃度が減少するのかが明らかとなった。両種の増殖によるDIN濃度低下量の予測精度を高めるためには、今後とも基礎的なデータの蓄積により可能であると考えられるが、他の珪藻発生量が多い場合はこれらの影響も考慮することが精度向上に不可欠である。また、安定した藻類養殖業を営むためには、珪藻ブルーム終息後のDIN濃度の回復量についても検討を進める必要がある。

謝 辞

本研究に使用したサンプルの採取にご協力いただいた関係漁業協同組合の方々に厚くお礼申し上げます。

文 献

安部昌明, 大山憲一, 吉松定昭, 北尾登史郎, 山田達夫. 群体を形成する珪藻*Thalassiosira diporocyclus*の細胞密度の簡易な測定方法および2007~2008年冬季に香川県東部沿岸域で発生したブルーム. 香川県赤潮研究所研究報告2009; 7: 9-20.

樽谷賢治. 日本におけるノリ養殖と栄養塩環境の現状. 海洋と生物2009; 181: 141-145.

長井 敏, 宮原一隆, 堀 豊. 1994-1995年冬季播磨灘に大量発生した*Thalassiosira* sp.について. 兵庫水試研報2005; 32: 9-17.

西川哲也, 堀 豊. ノリの色落ち原因藻*Coscinodiscus walesii*の増殖に及ぼす窒素, リンおよび珪素の影響. 日本水産学会誌2004; 70: 872-878.

西川哲也, 堀 豊. 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. 日本水産学会誌2004; 70(1): 31-38.

萩平 将. ノリ・ワカメ養殖漁場の栄養塩. 徳島水研だより2005; 53: 3-4.

藤原建紀, 渡邊康憲, 樽谷賢治. 「海の貧栄養化とノリ養殖」によせて. 海洋と生物2009; 181: 111.