

일본 Kochi현 Uranouchi만의 외편모조류, *Heterocapsa circularisquama* (Dinophyceae) 적조발생에 대한 환경 고찰

오석진^{1*} · 마쯔야마 유키히코¹ · 오다 수미오² ·
모리야마 타카미쯔³ · 우찌다 타쿠지⁴

¹National Research Institute of Fisheries and Environment of Inland Sea, Fisheries Research Agency,
2-17-5 Maruishi, Ohno, Saeki, Hiroshima 739-0452,

²Kochi Prefectural Office of Agriculture, Forestry and Fishery, Marunouchi, Kochi Prefecture, 780-8570,

³Kochi Prefectural Deep Seawater Laboratory, Maruyama, Murotomisaki, Muroto, Kochi Prefecture, 781-7101 and

⁴Hokkaido National Fisheries Research Institute, Katsurakoi, Kushiro, Hokkaido 085-0802, JAPAN

Environmental Feature Causing a Bloom of the Novel Dinoflagellate *Heterocapsa circularisquama* (Dinophyceae) in Uranouchi Bay, Kochi Prefecture, Japan

Seok Jin Oh^{1*}, Yukihiro Matsuyama¹, Sumio Oda²,
Takamitsu Moriyama³ and Takuji Uchida⁴

¹National Research Institute of Fisheries and Environment of Inland Sea, Fisheries Research Agency,
2-17-5 Maruishi, Ohno, Saeki, Hiroshima 739-0452,

²Kochi Prefectural Office of Agriculture, Forestry and Fishery, Marunouchi, Kochi Prefecture, 780-8570,

³Kochi Prefectural Deep Seawater Laboratory, Maruyama, Murotomisaki, Muroto, Kochi Prefecture, 781-7101 and

⁴Hokkaido National Fisheries Research Institute, Katsurakoi, Kushiro, Hokkaido 085-0802, JAPAN

To study the environmental features causing a bloom of the novel dinoflagellate *Heterocapsa circularisquama* (Dinophyceae), hydrographic and chemical aspects were measured in the Uranouchi Bay, Kochi Prefecture, Japan, from January to December, 1997. The cell density of *H. circularisquama* increased rapidly in early October, and dropped sharply in mid-October. Growth rate of *H. circularisquama* during bloom period appeared 1.50 division day⁻¹ under high water temperature (25°C) and salinity (32 psu) conditions. Although the result from hydrographic aspect indicated good condition for their growth, dissolved inorganic phosphorus (DIP) concentration in surface layer before bloom formation was less than 0.70 μM, which is lower than their half saturation constant (Ks). Dissolved inorganic nitrogen (DIN): DIP ratio was > 30, indicating potential P-limitation. However, before bloom formation period of *H. circularisquama*, DIP concentrations were high in bottom layer (> 4.0 μM). Some studies reported that *H. circularisquama* had the ability to migrate vertically and to utilize dissolved organic phosphorus (DOP). Thus, DIP in bottom layer might have been utilized by *H. circularisquama* for their growth. DOP might have weakly affected their growth because of low reactive DOP concentrations owing to low DOP concentration (ca. 0.39 μM). Thus, if nutrient condition of bottom layer in Uranouchi Bay is not improved, the outbreaks of *H. circularisquama* red tides may become an annual feature.

Key Words: dissolved inorganic phosphorus (DIP), dissolved organic phosphorus (DOP), *Heterocapsa circularisquama*, Uranouchi Bay, vertical migration

서 론

일본 Kochi현에 있는 Uranouchi만은 Tosa만의 중앙에 위

치하고 있다. 이 만의 폭은 12 km, 만입구의 평균 수심은 2 m, 만 중앙부의 평균 수심은 15 m로 전형적인 반폐쇄성 수역이다(Fig. 1). 만의 주위에는 공업단지와 큰 도심지역이 없지만, 1955년부터 방어 양식이 성행하여 급속히 부영양화가 진행되었다. 그로 인하여, 춘·하계에는 외편모조류

*Corresponding author (sjoh@fra.affrc.go.jp)

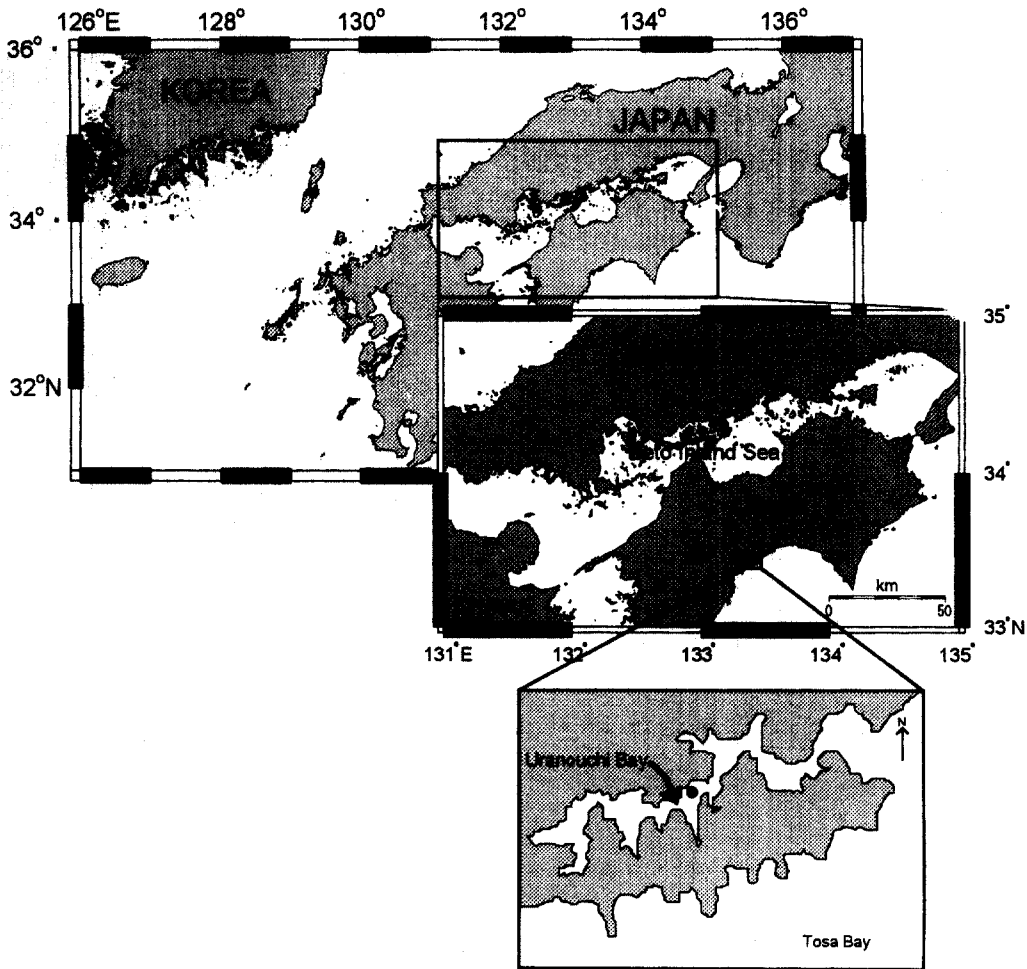


Fig. 1. Map showing a sampling station in the Uranouchi Bay, Kochi Prefecture, Japan. Closed circle represent observation point from January to December, 1997.

Ceratium furca, *C. fusus*, *Karenia mikimotoi*의 적조가 발생하였다(Ueda et al. 1998). 더욱이 1988년부터는 *Heterocapsa circularisquama* Horiguchi의 적조가 일본에서 처음으로 발생하여 바지락 양식에 큰 피해를 주었고, 1995년 이후에는 매년 이 종이 일으키는 적조가 발생하고 있다.

이와 같이 일본은 지난 10년 동안 이전에 발생하지 않았던 유독·유해 와편모조류의 적조가 발생하고 있다. 그 중 대표적인 와편모조류는 *H. circularisquama*로 최근 서일본 대부분의 연안에서 적조를 일으키고 있다(Nagai et al. 1996; Matsuyama 1999). 이 종은 어류를 폐사시키는 *Chattonella*속과 *K. mikimotoi*와 달리 trypsin에 의해 가수분해 되는 단백질 또는 폴리펩티드(polypeptide)가 이매패류의 심장 또는 아가미를 공격하여 폐사시킨다(Matsuyama et al. 1997). 1992-1998년간 이 종의 적조발생 건수는 연간 5-7건 정도로 일본에서 발생하는 전체 적조발생 건수 중 큰 부분은 아니지만, 피해액을 환산할 경우 100억 엔 이상(약 1000억원)으로 과거 일본에서 양식업에 피해를 준 *K. mikimotoi*의 피해액을 넘고 있다(Matsuyama 2003).

본 연구에서는 유해성 와편모조류 *H. circularisquama*의 적조를 발생시키는 환경적인 특징을 밝히는 데 목적을 두고, 일본에서 처음으로 *H. circularisquama*의 적조가 발생한 Uranouchi만에서 식물플랑크톤의 모니터링과 수온, 염분, 영양염 등 환경요인을 조사 하여, *H. circularisquama*의 발생에 영양을 미치는 환경요인을 보고하였다.

재료와 방법

본 연구는 Kochi현 수산시험장의 관측선을 이용하여 1997년 1월부터 12월까지 1-2주에 한번씩 Uranouchi만의 1개 정점에서 수층별 (0 m, 2 m, 5 m, 10 m, B-1 m)로 채수하였다(Fig. 1). 식물플랑크톤 동정과 계수는 각각의 수심 층에서 채수 후 Lugol용액 (최종 농도가 10%)으로 고정하여 관찰하였다. 세포밀도가 낮은 시료는 각 층의 시료를 혼합 후 Honjo식 플랑크톤 농축기로 1,000배 농축하여 계수하였다.

각 층의 수온과 염분은 CTD(YSI사; Model 58) 자료 중 해당 수심의 값들을 취하였다. 그리고 영양염류 측정용 시료는

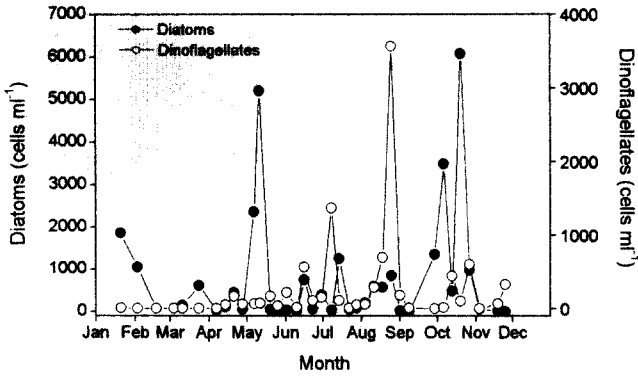


Fig. 2. Temporal changes of mean cell density (0-15 m depth) of flagellates and diatoms from January to December, 1997.

채수 즉시 여과하여 (Milipore HA, pore size 0.45 μm) 냉동 보관하였다가 분석 전 해동하여 비색 정량하였다. 여과시 세포의 파괴에 의한 영양염 증가를 막기 위해 30 mmHg 이하의 압력으로 여과하였다.

암모니아(NH₄-N)는 Indophenol 청법으로, 질산염(NO₃-N)은 Cu-Cd 환원칼럼을 이용한 아질산 환원법으로, 아질산염(NO₂-N)은 sulfanilamide와 naphthyl-ethylendiamine으로, 인산염(PO₄-P)은 molybden 청법으로 발색시켜 비색정량하였다(Strickland and Parsons 1972). 여기서 용존태 무기질소(dissolved inorganic nitrogen: DIN)는 NH₄ + NO₃ + NO₂-N로, 용존태 무기인(dissolved inorganic phosphorus: DIP)은 PO₄-P로 정의하였다.

용존태 유기인(dissolved organic phosphorus: DOP)은 Menzel and Corwin(1965)의 방법으로 용존태 총인(dissolved total phosphorus: DTP)과 DIP 농도의 차이로부터 구하였다(DOP = DTP-DIP). DTP는 potassium persulfate를 첨가하여 가압 분해(2 atm, 110°C, 30 min)한 후 molybden청법으로 측정하였다. 용존태 유기질소(dissolved organic nitrogen: DON)는 용존태 총질소(dissolved total nitrogen: DTN)를 구하고 DIN과의 농도차이로부터 구하였다(DON = DTN-DIN). DTN은 미량 총질소 측정장치(N-200; Sumika Chemical Analysis Service)를 사용하여 고온촉매산화법으로 분석하였다(Sugimura and Suzuki 1988; Maita and Yanada 1990).

현장에서 *H. circularisquama*의 증식 속도는 현장에서 대수 증식(exponential growth phase)을 보이는 기간 동안의 세포수를 이용하여 최소자승법(least square regression)에 의해 계산하였다.

$$\mu = \frac{1}{\Delta t} \ln \frac{N_t}{N_0}$$

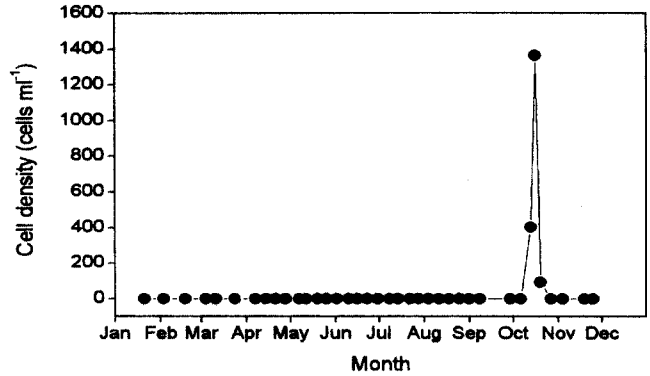


Fig. 3. Temporal changes of mean cell density (0-15 m depth) of *Heterocapsa circularisquama* from January to December, 1997.

N₀, N_t: 대수증식기에서 초기와 t시간 후의 세포수
Δt: 대수증식기의 기간

결과와 고찰

Uranouchi만에 출현한 식물플랑크톤

1997년 Uranouchi만에 출현한 식물플랑크톤을 보면, 편모조류가 7월, 8월과 10월에 비교적 높게 나타났다(Fig. 2). 우점종은 7월에 *Chattonella marina*, 8월에 *Gymnodinium* sp., 10월에는 *H. circularisquama*였다. 예전부터 Uranouchi만에서 적조를 일으켰던 *K. mikimotoi*는 4월에서 7월초까지 관찰되었으며, 6월에 최대 세포밀도가 관찰되었다(약 180 cells·ml⁻¹). 또한 *Heterosigma akashiwo*는 4월에서부터 6월까지 100 cells·ml⁻¹ 이하의 낮은 세포수를 나타내었다. 최근에 Uranouchi만에서 적조를 형성하고 있는 *Chattonella verruculosa*는 5월에서 6월까지 출현하였지만, 10 cells·ml⁻¹ 이하였다. 한편 규조류는 1월, 5월 그리고 10월에 비교적 높은 세포밀도를 보였으며(Fig. 2), 우점종으로는 *Skeletonema costatum*, *Chaetoceros* spp., *Rhizosolenia* sp., *Pseudo-nitzschia* sp., *Leptocylindrus minimum* 등이었다.

10월에 *H. circularisquama*의 세포밀도는 수주평균 1363 cells·ml⁻¹이었다(Fig. 3). 본 종의 증식은 10월 중순에 나타난 규조류의 감소시기에 나타났으며, 다시 규조가 증식할 때에는 세포밀도가 감소하였다. Uchida et al.(1996)은 규조와 *H. circularisquama*의 혼합배양에서 규조의 증가와 함께 *H. circularisquama*는 휴면포자(temporary cyst)가 되어 증식이 억제되었다고 보고하였으며, 이 메커니즘에 대해서는 확실히 밝혀지지 않았지만, 규조류에서부터 유출되는 물질(allelopathic)에 의해 휴면포자가 되는 것 같다고 보고하였다. 그래서 본 연구지역에서 또한 이와 같은 현상이 나타났을 것으로 생각된다.

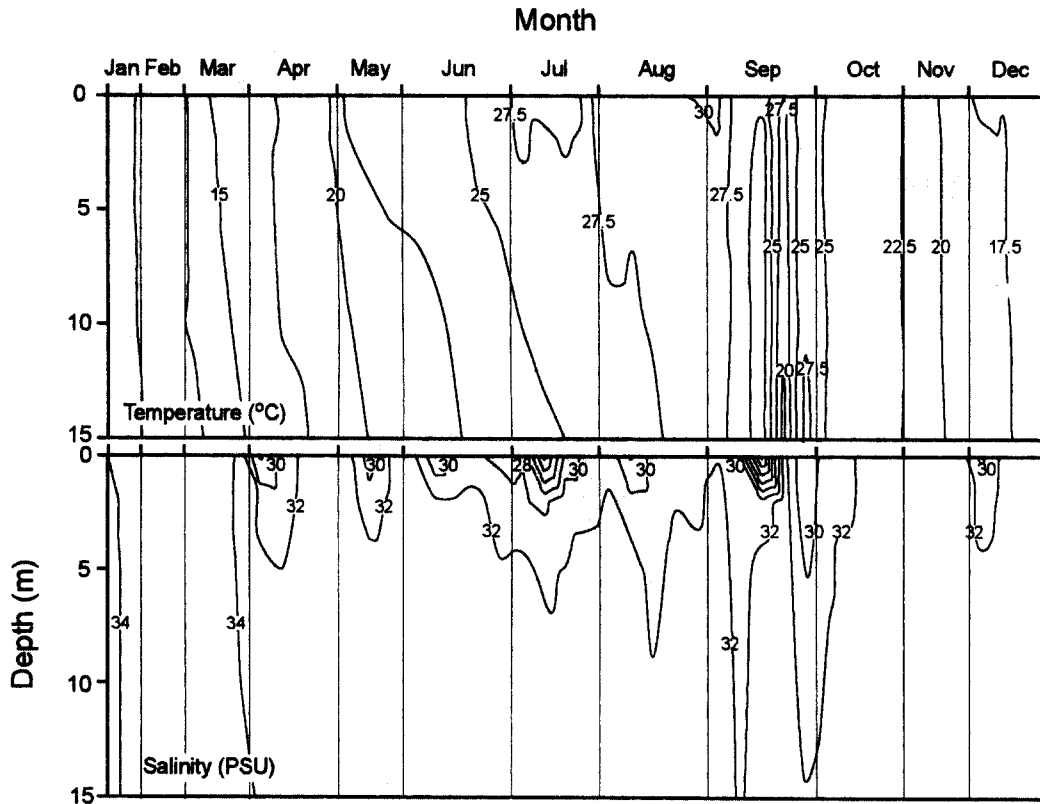


Fig. 4. Temporal changes of vertical profile of temperature and salinity from January to December, 1997.

Uranouchi만의 수문학적 변동과 *Heterocapsa circularisquama*의 관계

본 연구지역에서 수온의 변화는 11.0°C에서 30.5°C의 범위였으며, 5월부터 8월까지 미약하지만 수온약층이 형성되었다(Fig. 4). 하지만 9월에는 태풍의 영향으로 수층에 수직혼합이 발생하여, 저층의 온도가 표층보다 다소 높은 현상이 발생하였다. 10월부터는 수온 감소에 의하여 수직혼합이 발생하여 상하층이 균일하였다. Matsuyama *et al.* (1995, 1996)의 보고에 의하면, 수주의 수직혼합이 일어난 후에 *H. circularisquama* 적조가 발생하는 경향이 있다고 보고 했으며, 본 연구 기간에 *H. circularisquama*의 세포증식 또한 9월의 수직혼합 후 발생하였다. 염분을 보면, 19.6 psu에서 34.8 psu 범위이며, 우기인 7월과 태풍의 영향을 받은 9월의 표층에서 각각 22.0 psu와 20.0 psu 이하의 낮은 염분을 보였다(Fig. 4). 하지만 10월부터는 수주 전체가 균일하였다.

일본 Miyeh현 Ago만에서 분리한 *H. circularisquama*의 증식 가능한 수온과 염분 범위를 실내 실험을 통하여 조사한 결과, 수온은 5-30°C 그리고 염분은 10-35 psu로 넓은 범위에서 증식하였다(Yamaguchi *et al.* 1997). 최대증식속도를 보이는 수온과 염분은 30°C와 30 psu이며, 증식속도는 1.3 divisions day⁻¹였다(Yamaguchi *et al.* 1997). 본 조사 기간에 *H.*

*circularisquama*가 증식한 범위는 25.0°C와 32.0 psu의 전후로 Yamaguchi *et al.* (1997)가 보고한 최대증식속도가 나타난 수온보다는 낮지만 염분은 비슷하였다. 그리고 전체 조사기간 동안 수온과 염분 범위는 *H. circularisquama*가 증식 가능한 수온과 염분 범위였으며, 영양염, 광도, 중간 경쟁관계 등의 생물학적, 화학적 변수를 제외한 물리적 변수만 생각해보면, Uranouchi만에서 *H. circularisquama*는 연중 증식 가능할 것으로 생각된다. 실제로 매년 *H. circularisquama*의 적조가 발생하는 Ago만을 보면, 적조는 하계에 발생하여 추계까지 유지되지만, 부유세포는 사계절 모두 관찰되었다(Matsuyama *et al.* 1995).

한편, Yamaguchi *et al.* (1997)은 배양실험을 통해서 발생 예측을 위한 경험식을 만들었다($\mu = 0.25767 + 0.00145 \times T \times S - 0.00005 \times T \times S^2 + 0.00009 \times T^2 \times S - 0.00003 \times T^3$; μ : 증식속도, T: 수온, S: 염분). 조사기간 중의 *H. circularisquama*가 출현한 수온, 염분을 대입한 결과, 1.47 divisions day⁻¹였다. 본 연구기간 중 *H. circularisquama*의 현장 증식속도는 약 1.50 divisions day⁻¹로 경험식에서 구하여진 증식속도와 유사하였다. 이는 실내 실험에서 구하여진 최대증식속도보다 빠른 속도로, 수온과 염분만으로 본다면 10월초의 수온과 염분 조건은 *H. circularisquama*의 증식에 있어 최적 조건임을 알 수 있다.

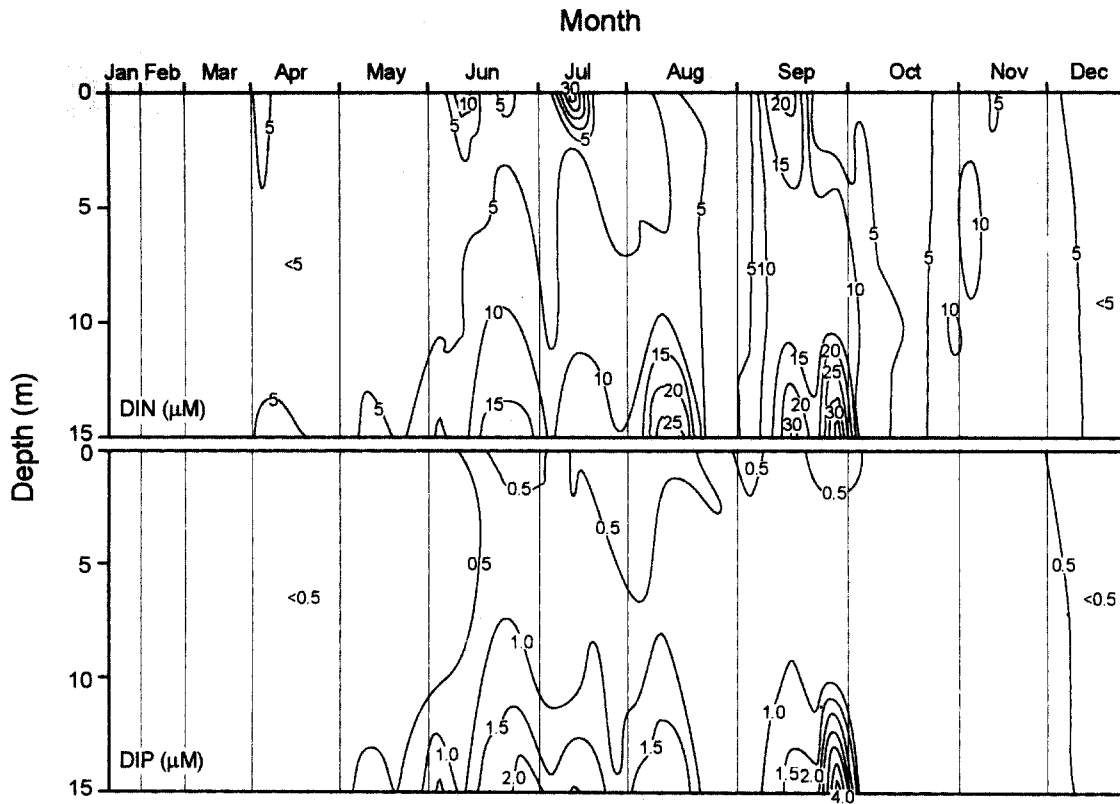


Fig. 5. Temporal changes of vertical profile of dissolved inorganic nitrogen (DIN) and dissolved inorganic phosphorus (DIP) from January to December, 1997.

Uranouchi만에서 용존태 무기 영양염과 *Heterocapsa circularisquama*의 관계

DIN은 0.41-38.5 µM의 범위로 6월에서 9월까지의 저층으로 갈수록 높아지는 경향을 보였지만, 7월의 우기와 9월중 태풍의 영향을 받던 시기에는 표층에서 20.0 µM 이상의 높은 농도를 보였다(Fig. 5). DIP는 0.01-4.42 µM의 범위로 6월에서 9월까지의 표층보다는 저층에서 높았으며, 표층에서는 0.50 µM 이하의 낮은 농도를 보였다(Fig. 5). 하지만 다른 기간에는 표층부터 저층까지 균일한 농도를 보였다.

이 기간 중 DIN:DIP비를 보면, 표층에서 30 이상이었으며, 6월부터 7월까지의 높은 비를 보였다. 하지만, 수심 5 m 아래 수층과 다른 기간에는 Redfield 비(16: Redfield et al. 1963) 보다 약간 낮았다. 일본에서 대부분의 내만역의 경우, 특히 Seto 내해에 있는 만에서는 춘계와 하계에 DIP가 제한되어 높은 DIN:DIP 비를 보이고 있다. 대표적으로 Hiroshima만과 Osaka만은 때때로 검출한계 이하의 농도 (<0.02 µM)를 보일 때가 있으며, 이로 인해 DIN:DIP 비는 40-50으로 높다. 이는 1979년부터 발효된 Seto 내해 환경 보전 특별 조치법(Law Concerning Special Measures for Conservation of the Environment of the Seto Inland Sea)에 의

해 인의 정화기준 강화와 인이 함유된 세제 제조 금지 등에 따라 해수로의 인 유입 감소로 연안역의 DIP가 현저히 감소하였다(Yamamoto et al. 2002). Uranouchi만 또한 육수유입이 강한 6월과 9월까지 5 m 이심에서 높은 DIN:DIP의 비가 나타났다.

*Heterocapsa circularisquama*가 발생하기 전의 영양염 상태를 보면 DIN은 18.7 µM이었으며, DIP는 0.70 µM이었다(9월 초의 표층 농도). 이 농도를 *H. circularisquama*의 반포화상수(half saturation constant; Ks)와 비교해 보면(data not shown), DIN의 Ks는 15.6 µM(NH₄-N의 경우 11.1 µM, NO₃-N의 경우 4.45 µM)로 현장농도보다 낮았지만, DIP의 Ks는 1.79 µM로 현장농도보다 높다. Ks는 영양염에 대한 최대흡수속도의 1/2일 때 농도를 지시하는 것으로, 이 값이 낮을수록 저농도의 영양염에서도 증식이 가능하다. 그래서 여러 연구에서 식물플랑크톤의 영양염 흡수능력의 지표로 사용되었다(Epply et al. 1969). 10월 초에 이 종의 증식속도는 생리학적으로나 환경적으로 충분히 좋은 조건에서 나타나는 최대증식속도를 보였다. 하지만 표층수의 DIP의 농도는 최대증식속도를 위한 영양염 조건으로서는 충분하지 않다.

이와 같은 환경 속에서 *H. circularisquama*가 증식할 수 있게 된 이유로 규조류가 가지고 있지 않은 수직일주운동 능력과

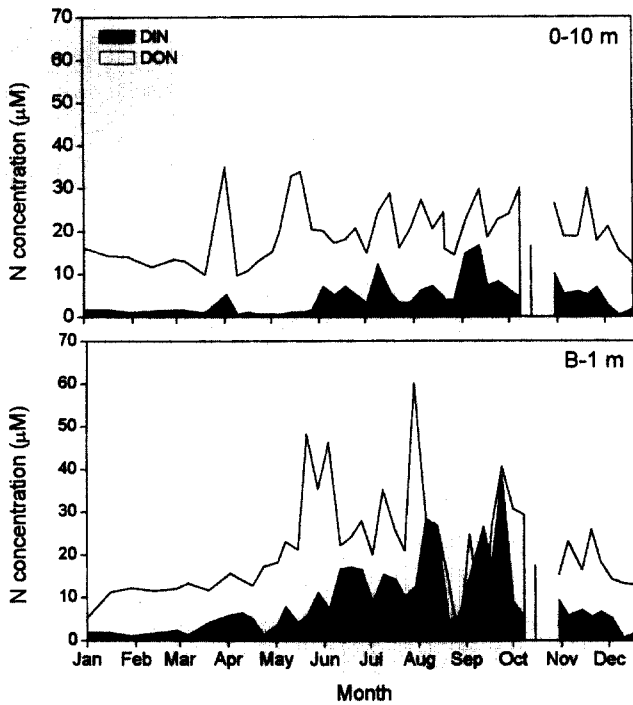


Fig. 6. Temporal changes of composition and concentration of dissolved nitrogen from January to December, 1997.

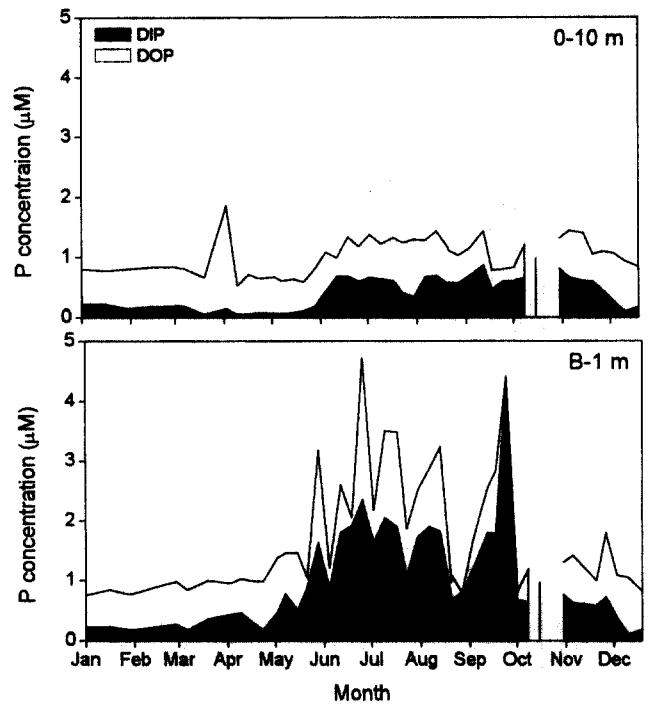


Fig. 7. Temporal changes of composition and concentration of dissolved phosphorus from January to December, 1997.

DOP의 이용성을 생각할 수 있다. Etou *et al.* (1998)은 일본의 Buzen해에서 *H. circularisquama*의 발생현황을 4시간 간격으로 조사한 결과, 주간에는 상층에, 야간에는 하층에 분포하는 것을 발견하였다. 유영속도를 계산하면 시간당 약 2.5 m 정도로, 본 연구지역의 수심이 15 m 이내이기 때문에 충분히 저층까지 이동하여 필요한 DIP를 흡수하였을 것으로 생각한다. 실제 9월 저층의 DIN과 DIP 농도를 보면 각각 최대 30.0 μM , 4.0 μM 이상으로 이 종의 K_s 보다 높은 농도를 보였다 (Fig. 5).

*Heterocapsa circularisquama*의 증식 후 우점한 대표적인 규조류 *S. costatum*, *Thalassiosira* spp., *L. minimum*의 K_s 는 DIN에서 0.10-6.60 μM , DIP에서 0.33-0.68 μM 이고 (Yamamoto 1998), 이는 *H. circularisquama*의 K_s 보다 낮은 농도이며, 현장의 농도와 유사하거나 낮은 농도이다. 이런 까닭에 영양염에 대한 친화성 (affinity)이 높아 *H. circularisquama*의 증식에 필요한 영양염을 규조류가 흡수하여 증식했을 것으로 생각된다. 따라서 10월 말의 *H. circularisquama*의 세포밀도의 감소는 영양염의 중간 경쟁 (species competition)에서 밀린 결과 일 수도 있다.

Uranouchi만에서 용존태 유기 영양염과 *Heterocapsa circularisquama*의 관계

조사 기간중에 DON의 농도는 0-10 m 수층에서 7.52-32.7 μM 이며, 하계를 제외한 계절에서 DTN 중 DON이 차지하는

비율은 90% 이상이지만, 하계에는 약 70%까지 낮아졌다. 또한 *H. circularisquama*가 증식한 10월달은 75% 정도였다 (Fig. 6). B-1 m 수층에서는 0.06-47.42 μM 의 범위이며, 동계와 춘계에서는 DTN 중 DON의 비율은 0-10 m 수층과 유사하였다. 하지만, 하계와 추계에서는 DIN의 증가에 따라 DON의 비율이 50%로 낮아졌다 (Fig. 6). DOP의 농도는 0-10 m의 수층에서 0.21-1.71 μM 이었으며, 동·춘계에 DIP 중 80%가, 하·추계에는 약 50%가 DOP였다. B-1 m 수층에서는 0.14-2.36 μM 의 범위로 동·춘계에는 60%가 DOP였지만, 하·추계는 35%가 DOP였다 (Fig. 7). *H. circularisquama*가 증식한 10월은 0.47 μM 로 DIP 중 35%가 DOP였다.

여러 연구자들은 식물플랑크톤이 무기태 영양염 뿐만 아니라 용존태 유기 영양염 또한 이용 가능하다고 보고하였다 (Cembella *et al.* 1984; Jackson and Williams 1985; Smith *et al.* 1986; Antia *et al.* 1991; Doblin *et al.* 1999; Yamaguchi and Itakura 1999; Oh *et al.* 2002). 하지만, *H. circularisquama*는 DON의 이용성이 다른 와편모조류보다 낮은 것으로 보고되어 있다. Yamaguchi *et al.* (2001)에 따르면 N이 제한된 batch 배양에 요소 (urea) 또는 요산 (uric acid)를 첨가한 후 시간에 따른 세포밀도의 변동을 본 결과, 증식이 전혀 일어나지 않았다고 보고하였다. 하지만, 인이 제한된 batch 배양에 여러 가지 DOP (phosphomonester와 phosphodiester)를 첨가한 결과, 모든 종류의 인에서 증식하였다. 또한, phosphomonester를 가수분해할 수 있는 alkaline phosphatase (AP) 효소의 활성

은 DIP가 제한되어 있을 때, 높은 활성도(activity)를 나타내었다(Matsuyama 2003; Oh et al. submitted). 또한, Yamaguchi et al. (2001)은 Hiroshima 만에서 *H. circularisquama*의 적조는 DOP를 이용하여 적조를 일으켰을 가능성을 보고했으며, Ago만에서 발생한 *H. circularisquama*의 적조 또한 DOP를 이용했을 가능성을 제시하였다(Matsuyama 2003). 따라서 본 연구기간중에 부족한 P도 DOP를 가수분해시켜 사용하였을 가능성이 있다. 하지만 DOP의 전부가 식물플랑크톤이 이용할 수 있는 반응성 DOP는 아니다. DOP의 조성에 관한 연구는 유기물의 다양성과 복잡성 때문에 연구가 활발히 진행되어 있지 않지만(Shanon et al. 1994), DOP는 분자량에 따라 저분자량 DOP(< 10 kda)와 고분자량 DOP(> 10 kda)로 나눌 수 있다. 저분자량의 DOP는 외양환경에서 식물플랑크톤에 의해서 잘 이용되지만 연안환경에서는 육상기원으로 인해 난분해성 물질이 많다(Suzumura et al. 1998). 고분자량의 DOP는 ester 결합수에 따라 phosphomonoester와 phosphodiester, 그리고 phosphonate와 같이 가수분해효소에 의해 분해 되지 않는 난분해성 DOP로 나누게 된다. Tokyo 만에서의 연구결과를 보면, 난분해성 DOP는 약 67% 이상으로 중요한 비율을 차지하였으며, 나머지의 DOP는 phosphomonoester와 phosphodiester로 존재하였다(Suzumura et al. 1998).

Uranouchi만에서의 DOP 조성에 관한 조사 또는 보고가 없어 이와 관련된 정보를 알 수 없지만, Tokyo만과 유사하게 DOP 중 phosphomonoester와 phosphodiester의 비율이 1/3로 그리고 다른 식물플랑크톤이 phosphomonoester와 phosphodiester를 이용하지 않는다고 가정한다면, 9월 표층에서 *H. circularisquama*가 이용 가능한 phosphomonoester와 phosphodiester는 약 0.13 μM 로 낮은 농도였다(DOP 농도는 0.39 μM). 그래서 10월의 *H. circularisquama*의 증식에서 부족한 인은 DOP의 가수분해로 얻을 수 있지만, 최대증식속도를 보이기 위한 농도에는 부족하여, 수직일주운동에 의한 저층 DIP 이용이 *H. circularisquama* 증식에 큰 영향을 미쳤을 것으로 생각된다.

결 론

본 연구는 *H. circularisquama*의 증식에 필요한 환경적 요인을 알아보았다. 1997년 *H. circularisquama*가 대량으로 증식하기 전의 수온과 염분은 이 종이 증식하기 위한 좋은 조건으로 증식속도는 1.50 divisions day⁻¹로 높았다. 이와 같은 증식 조건을 보이기 위해서는 수층의 영양염류 농도 또한 충분히 존재하여야 한다. 하지만 이 종이 증식하기 전의 표층 DIP농도는 Ks보다 낮은 0.70 μM 이하의 농도였으며, DIN:DIP 비는 30 이상으로 높았다. 그러나 이 종은 수직일주이동 능력

을 가지고 있어, 저층까지 이동할 수 있다. 실제 *H. circularisquama*가 증식하기 전 저층에는 4.0 μM 이상의 높은 DIP 농도가 존재하였다. 그래서 부족한 인을 저층에서 흡수한 후 증식하였을 것으로 생각된다. *H. circularisquama* 감소는 빠른 영양염의 흡수속도와 낮은 Ks로 정의할 수 있는 규조류들의 증식으로 *H. circularisquama*의 개체군 증식과 유지에 필요한 영양염을 규조류가 흡수하여 발생하였다고 생각된다. 본 연구에서는 *H. circularisquama*가 표층에 영양염이 고갈된 상태에서도 그들의 운동능력으로 저층의 영양염을 이용, 증식 가능성을 보였다. 만약 Uranouchi만의 저층에 영양염을 공급하는 퇴적물에 대한 정화 계획 없이는 *H. circularisquama*의 적조는 매년 계속될 가능성이 있다.

사 사

논문에 대한 귀중한 조언을 해주신 윤 양 호 교수님(여수대학교 해양학과)과 이 행 필 연구원님(한국원자력연구소 원자력환경연구부)께 감사드립니다. 또한 본 논문의 세밀한 심사와 유익한 조언을 해주신 심사위원, 담당편집위원님께 심심한 감사를 드립니다.

참고문헌

- Antia N.J., Harrison P.J. and Oliveira L. 1991. The role of dissolved organic nitrogen in phytoplankton nutrition, cell biology and ecology. *Phycologia* 30: 1-89.
- Cembella A.D., Antia N.J. and Harrison P.J. 1984. The utilization of inorganic and organic phosphorus compounds as nutrients by eukaryotic microalgae: A multidisciplinary perspective: Part 1. *CRC Critic. Rev. Microbiol.* 10: 317-391.
- Doblin M.A., Blackburn S.I. and Hallegraff G.M. 1999. Growth and biomass stimulation of the toxic dinoflagellate *Gymnodinium catenatum* (Graham) by dissolved organic substances. *J. Exp. Biol. Ecol.* 236: 33-47.
- Eppley R.W., Rogers J.N. and McCarthy J.J. 1969. Half-saturation constants for uptake of nitrate and ammonium by marine phytoplankton. *Limnol. Oceanogr.* 14: 912-920.
- Etou T., Kuwamura K. and Satou H. 1998. The occurrence of a *Heterocapsa circularisquama* red tide and subsequent damages to shellfish in the Buzen Sea in Autumn 1997. *Bull. Fukuoka Fisheries Mar. Technol. Res. Cent.* 3: 91-96 (in Japanese).
- Jackson G.A. and Williams P.M. 1985. Importance of dissolved organic nitrogen and phosphorus to biological nutrient cycling. *Deep-Sea Res.* 32: 223-235.
- Maita Y. and Yanada M. 1990. Vertical distribution of total dissolved nitrogen and dissolved organic nitrogen in seawater. *Geochem. J.* 24: 245-254.
- Matsuyama Y., Nagai K., Mizuguchi T., Fujiwara M., Ishimura M., Yamaguchi M., Uchida T. and Honjo T. 1995. Ecological

- features and mass mortality of pearl oyster during red tides of *Heterocapsa* sp. in Ago Bay in 1992. *Nippon Suisan Gakkaishi* **61**: 35-41 (in Japanese with English abstract).
- Matsuyama Y., Uchida T., Nagai K., Ishimura M., Nishimura A., Yamaguchi M. and Honjo T. 1996. Biological and environmental aspects of noxious dinoflagellate red tides by *Heterocapsa circularisquama* in the West Japan. In: Yasumoto T., Oshima Y. and Fukuyo Y. (eds), *Harmful and Toxic Algal Blooms*. UNESCO, Paris. pp. 369-372.
- Matsuyama Y., Uchida T. and Honjo T. 1997. Toxic effects of the dinoflagellate *Heterocapsa circularisquama* on clearance rate of the blue mussel *Mytilus galloprovincialis*. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **146**: 73-80.
- Matsuyama Y. 1999. The toxic effects of *Heterocapsa circularisquama* on bivalve molluscs. *Bull. Plankton Soc. Japan* **46**: 157-160 (in Japanese).
- Matsuyama Y. 2003. Physiological and ecological studies on harmful dinoflagellate *Heterocapsa circularisquama* — I. • Elucidation of environmental factors underlying the occurrence and development of *H. circularisquama* red tide. *Bull. Fish. Res. Agen.* **7**: 24-105 (in Japanese with English abstract).
- Menzel D.W. and Corwin N. 1965. The measurement of total phosphorus in seawater based on the liberation of organically bound fractions by persulfate oxidation. *Limnol. Oceanogr.* **10**: 280-282.
- Nagai K., Matsuyama Y., Uchida T., Yamaguchi M., Ishimura M., Nishimura A., Akamatsu S. and Honjo T. 1996. Toxicity and LD50 levels of the red tide dinoflagellate *Heterocapsa circularisquama* on juvenile pearl oysters. *Aquaculture* **144**: 149-154.
- Oh S.J., Yamamoto T., Kataoka Y., Matsuda O., Matsuyama Y. and Kotani Y. 2002. Utilization of dissolved organic phosphorus by the two toxic dinoflagellates, *Alexandrium tamarense* and *Gymnodinium catenatum* (Dinophyceae). *Fisheries Sci.* **68**: 416-424.
- Redfield A.C., Ketchum B.H. and Richards F.A. 1963. The influence of organisms on the composition of sea water. In: Hill M.N. (ed.), *The sea*. Interscience, New York. pp 26-77.
- Shanon Y., McKelvie I.D. and Hart B.T. 1994. Determination of alkaline phosphatase-hydrolyzable phosphorus in natural water systems by enzymatic flow injection. *Limnol. Oceanogr.* **39**: 1993-2000.
- Smith S.V., Kimmerer W.J. and Walsh T.W. 1986. Vertical flux and biogeochemical turnover regulate nutrient limitation of net organic production in the North Pacific Gyre. *Limnol. Oceanogr.* **31**: 161-167.
- Strickland J.D.H. and Parsons T.R. 1972. *A practical handbook of seawater analysis*, 2nd ed. Bulletin of Fisheries Research Board of Canada. 310 pp.
- Sugimura Y. and Suzuki Y. 1988. A high temperature catalytic oxidation method of non-volatile dissolved organic carbon in seawater by direct injection of liquid samples. *Mar. Chem.* **24**: 105-131.
- Suzumura M., Ishikawa K. and Ogawa H. 1998. Characterization of dissolved organic phosphorus in coastal seawater using ultrafiltration and phosphohydrolytic enzymes. *Limnol. Oceanogr.* **43**: 1553-1564.
- Ueda H., Iwasaki N., Uchida T., Matsuyama Y., Moriyama T. and Munekage Y. 1998. *Prorocentrum sigmoides* BÖHM (Dinophyceae) red tide in Uranouchi Inlet, Kochi, Japan. *Bull. Plankton Soc. Japan* **45**: 149-153 (in Japanese with English abstract).
- Uchida T., Matsuyama Y., Yamaguchi M. and Honjo T. 1996. Growth interactions between a red tide dinoflagellate *Heterocapsa circularisquama* and some other phytoplankton species in culture. In: Yasumoto T., Oshima Y. and Fukuyo Y. (eds), *Harmful and Toxic Algal Blooms*. UNESCO, Paris. pp. 369-372.
- Yamaguchi M., Itakura S., Nagasaki K., Matsuyama Y., Uchida T. and Imai I. 1997. Effects of temperature and salinity on the growth of the red tide flagellates *Heterocapsa circularisquama* (Dinophyceae) and *Chattonella verruculosa* (Raphidophyceae) *J. Plankton Res.* **19**: 1167-1174.
- Yamaguchi M. and Itakura S. 1999. Nutrition and growth kinetics in nitrogen- or phosphorus-limited cultures of the noxious red tide dinoflagellate *Gymnodinium mikimotoi*. *Fisheries Sci.* **65**: 367-373.
- Yamaguchi M., Itakura S. and Uchida T. 2001. Nutrition and growth kinetics in nitrogen- or phosphorus-limited cultures of the novel red tide dinoflagellate *Heterocapsa circularisquama* (Dinophyceae). *Phycologia* **40**: 313-318.
- Yamamoto T. 1998. Phytoplankton. In: Hirano T. (ed.), *Marine coastal environment*. Hujii technosystem, Tokyo. pp. 144-190 (in Japanese).
- Yamamoto T., Ishida M. and Seiki T. 2002. Long-term variation in phosphorus and nitrogen concentration in the Ohta River water, Hiroshima, Japan as a major factor causing the change in phytoplankton species competition. *Bull. Jpa. Soc. Fish. Oceanogr.* **66**: 102-109 (in Japanese with English abstract).

Received 9 September 2003

Accepted 2 October 2003