特集 変わりつつある海

熱帯性の有毒プランクトンの新たな出現と貝類の毒化問題

長井 敏,^{1*} 小谷 祐一,² 板倉 茂³¹水産総合研究センター瀬戸内海区水産研究所,²水産総合研究センター西海区水産研究所, ³水産庁

New appearance of toxic dinoflagellates and toxification of shellfish in the Seto Inland Sea, Japan

SATOSHI NAGAI,^{1*} YUICHI KOTANI² AND SHIGERU ITAKURA³¹Fisheries Research Agency, National Research Institute of Fisheries and Environment of Inland Sea, Hatsukaichi, Hiroshima 739-0452, ²Fisheries Research Agency, Seikai National Research Institute, Nagasaki, Nagasaki 851-2213, ³Fisheries Agency of Japan, Chiyoda, Tokyo 100-8907, Japan

1. はじめに

文明の発展に伴い、二酸化炭素の大量排出、オゾン層の破壊などにより、地球の温暖化が進行し、瀬戸内海においても冬季の水温上昇が指摘されている。¹⁻³⁾ 高橋・清水 (2004) は、浅海定線観測で得られたデータに一次近似直線を当てはめることにより、瀬戸内海の水温は、28 年間 (1972~2000 年) で全域的に 1.0℃ 程度上昇していることを報告している。⁴⁾ 地球の温暖化が直接的原因かどうか不明であるが、1990 年代後半に入り、瀬戸内海で熱帯性の有毒プランクトンの出現が新たに確認されるようになった。*Alexandrium tamiyavanichii* (図 1A) は、麻痺性貝毒の原因渦鞭毛藻で、日本では 1988 年に初めて、相模湾油壺において、ネット曳きのプランクトンサンプルから確認された。⁵⁾ その後、1997, 1998 年に沖縄県国頭郡塩屋湾で増殖し、これを摂食したミドリイガイが毒化した。⁶⁾ これは *A. tamiyavanichii* の出現により日本で初めて確認された食用貝類の毒化事例である。瀬戸内海でも 1997 年に初めてその出現が記録され、1999 年に、内の海においてカキ可食部から 6.6 MU g⁻¹,⁷⁾ 香川県津田町においてムラサキイガイおよびアカガイ可食部からそれぞれ 8.8 MU g⁻¹, 5.0 MU g⁻¹ の麻痺性貝毒が検出された。⁸⁾ これは瀬戸内海で本種による初めての麻痺性貝毒の記録である。2001 年には、瀬戸内海のほぼ全域で出現し、やはり内の海でアサリから 2.4 MU g⁻¹ の貝毒が検出された。⁹⁾ 以後、ほぼ毎年のように瀬戸内海では、本種の出現が確認されている。本稿では、これまでの筆者らの培養条件で得られた *A. tamiyavanichii* の性状を紹介するとともに、どうして熱帯種である本種が瀬戸内海に定着するようになったのか、その発生環境について推測を交えて考察したい。

図 1 *Alexandrium tamiyavanichii* の栄養細胞

A, 最大 200 細胞程度の連鎖を形成; B, 形成シスト。矢印は透明の保護膜を示す。左側には遊泳接合子が脱ぎ捨てた鎧板。スケールは 50 μm。

2. 増殖・毒生産の特性

本種は、非常に長い連鎖を作る種で、培養株だと 200 細胞もの連鎖を作ることもしばしばである (図 1A)。

細胞長は $30\sim60\ \mu\text{m}$ 、細胞幅は $35\sim65\ \mu\text{m}$ であり、培養条件により、細胞サイズの変動が大きい、同属の *Alexandrium tamarense*¹⁰⁾ や *A. catenella*¹¹⁾ と比べるとやや大型である。¹²⁾ 本種の有性生殖は、雌雄異株でヘテロタリズムを示し、異なる性を持つ株同士の接合により、耐久性シスト (図 1B) を作る。シストのサイズは、体長 $45\sim75\ \mu\text{m}$ 、体幅 $35\sim60\ \mu\text{m}$ 、体高 $40\sim60\ \mu\text{m}$ であり、球形に近い。¹²⁾

1999 年播磨灘南部海域に出現した *A. tamiyavanichii* 天然細胞の HPLC による毒分析の結果、麻痺性貝毒成分は、GTX2, GTX3, GTX4 が 83 mol% を占め、 $112.5\ \text{fmol cell}^{-1}$ 、1 MU は 7,200 細胞に換算された。¹³⁾ このように強毒性分である GTX4 (ゴニオトキシン) を主成分、GTX1-5 および STX (サキントキシン) を副成分とし、弱毒性分として知られる C-toxin 群の割合は低いのが本種の大きな特徴であり、これらの毒生産性については、相模湾油壺で分離された培養株とほぼ一致している。⁵⁾ 播磨灘において、本種の発生により毒化したムラサキイガイやアカイガイについてもほぼ同様な毒組成を示しており、 $<30\ \text{cells mL}^{-1}$ で上記のレベルの毒化が見られた。^{7-9,13)}

3. 耐久性シストの形成と発芽に及ぼす温度の影響

本種は、 $20\sim32.5^\circ\text{C}$ の範囲で増殖し、 $27.5\sim30^\circ\text{C}$ 付近で最も良く増殖が見られる (図 2A)。一方で、 15°C 以下まで低下すると死滅してしまう典型的な熱帯性種である。⁵⁾ 現場海域では、水温 15°C 程度まで遊泳細胞が観察されている。^{8,9)} 本種のシスト形成は、温度 $20\sim32.5^\circ\text{C}$ の範囲で認められ ($5\sim183\ \text{cysts mL}^{-1}$)、 17.5 および 35°C では観察されなかった (図 2B)。 15°C では栄養細胞が死滅した。最適温度は 25°C 付近にあった ($143\pm35\ \text{cysts mL}^{-1}$) (長井ほか未発表)。この時の栄養細胞の最大細胞密度は、 $2400\pm216\ \text{cells mL}^{-1}$ であり (図 2A)、形成率は $6.2\pm1.1\%$ であった。一方、*A. tamarense* では、 $5\sim24^\circ\text{C}$ の範囲でシスト形成が認められ ($28\sim2,955\ \text{cysts mL}^{-1}$)、 26°C では観察されなかった (図 2B)。最適温度は 14°C 付近にあった ($2,326\pm551\ \text{cysts mL}^{-1}$)。この時の栄養細胞の最大細胞密度は、 $9,760\pm594\ \text{cells mL}^{-1}$ であり (図 2A)、形成率は $23.8\pm5.1\%$ であった。¹⁰⁾ 以上から、*A. tamarense* に比べ、*A. tamiyavanichii* はより著しく高温側でシストを形成すること、また、あまり高密度でシストを形成しない種であることが示唆された。北海道周辺海域において、*A. tamarense* は $1\sim3^\circ\text{C}$ の低水温から出現し、¹⁴⁾ 15°C を超える時期にブルームは終息するといった、より低水温に適応してきたと種であると考えられる。また、1 年のうちの限られた時期のみ出現し、環境不適期を耐久性シストの状態でも乗り切るために、ブルームの末期に大量のシストを形成するといった生存戦略を取っていると推測

図2 *Alexandrium tamiyavanichii* および *A. tamarense* のシスト形成における温度の影響について (長井ほか未発表)

A, シスト形成時の各温度条件下における栄養細胞の最大細胞密度を示す。(遊泳接合子を含む); B, シスト形成密度を示す。

される。これに対して、*A. tamiyavanichii* は、典型的な熱帯種であり、1 年の水温の変化がほとんどなく、このため一度に大量の耐久性シストを形成して、環境不適期に備える必要がない。従って、大量のシストを形成する必要性がなかったと考えることができる。

本種シストの発芽において、シスト形成後、9 段階の温度条件下で暗黒に 7 日間保存した後、 25°C で発芽実験を行った場合、 17.5°C 以上の温度区では $3.3\sim10.8\%$ の割合で発芽が認められた (図 3)。15 日間保存した場合、 5°C 以外の温度区で発芽が観察された。とりわけ $10\sim17.5^\circ\text{C}$ では 60% 以上の発芽率を示した。その後 10°C では 50% 前後の発芽率を示し、 $15\sim27.5^\circ\text{C}$ ではほとんどの場合、 80% 以上の発芽率を示した。 30°C では

図3 *Alexandrium tamiyavanichii* シストの休眠期間に及ぼす温度の影響 (長井ほか未発表)

25℃でシストを形成させ、形成後10日以内に5～30℃の9段階の温度条件下、暗黒で保存した。その後、定期的にシストを取出し、25℃の光条件下で培養し30日後に発芽率(発芽シスト数/発芽実験に用いた全シスト数×100(%))を求めた。

51日目を過ぎてから発芽率が上昇し、良好な発芽が見られた。なお、5℃では実験期間中、全く発芽を観察することはなかった。7.5℃では15および30日間保存したシストは発芽したが、それより長期間暗黒で保存したシストは発芽しなかった。一方、暗黒で保存した温度と同じ温度で発芽させた場合、17.5℃以上の温度区で発芽が見られた。20～30℃の範囲では暗黒64日目を以降、79.4～96.6%の高い発芽率を示した。17.5℃では暗黒79日目を以降に発芽が観察された。以上から、本種の休眠期間はほとんどなく、あっても1週間程度であることが判明した。また、5℃及び7.5℃で暗黒に保存した場合、発芽能を失うことが判明し、以上の発芽実験の結果からも、本種が熱帯の環境に適応した生活史戦略を持つ種であることが明らかとなった。

4. 瀬戸内海における発生環境

瀬戸内海では、本種はこれまで、水温が28℃前後の8月中・下旬頃から海水中に確認され、晩秋に最大30 cells mL⁻¹までの密度まで増殖したことが報告されている。⁸⁾ また、海水温が15℃以下に低下すると死滅するため、海水温が15℃以下となる12月中旬頃に水中から見られなくなる。本種は、水中で遊泳細胞として増殖している間にシストを形成し(おそらく細胞密度が最大となる11月頃)、遊泳細胞としては生存できない低水温期(<15℃)である12月～翌年の6月上旬頃までは、海底泥中にシストとして生存し越冬していると推察される(図4)。翌年、底層水温が20℃を上回る6月中旬頃に発芽、水中に遊泳細胞として出現し、その後、増殖す

図4 瀬戸内海における *Alexandrium tamiyavanichii* の発生機構と底層水温との関係 (折線は、広島湾における底層水温の推移を示す)。

ると考えられる。2001年に食用貝類が毒化した徳島県内の海で、本種のブルームが生じた直後の海底泥を採集し、発芽実験を行ったが、シストらしき細胞や、発芽細胞は観察されなかった。現時点では、底泥中のシスト密度は著しく低いため、6,7月には検出されず、細胞密度が高くなる8月以降に検出されるようになると推察される。

5. おわりに

以上のように本種の場合、環境不適期である低水温期をシストとして乗り切ることができれば、瀬戸内海のような温帯域でも定着することは可能である。また、冬季の水温上昇により、海水中の栄養細胞および海底泥中のシストの生残率が上昇すると予想され、今後、*A. tamiyavanichii* の出現頻度の増加が懸念される。さらに別の熱帯性有毒プランクトンが、新たに出現・定着する可能性もあり、今後も、温暖化の指標として熱帯種のモニタリングを継続するとともに、貝毒の発生にも注意を払う必要がある。

文 献

- 1) 和西昭仁. 山口県周防灘における最近30年間の水温変動. 山口水研センター研報 2004; 2: 1-6.
- 2) 山本昌幸. 瀬戸内海中央部の備讃瀬戸における水温と塩分の長期変動. 水産海洋研究 2003; 67: 136-167.
- 3) 樽谷賢治. 瀬戸内海環境の30年間の変化—水産環境モニタリング“浅海定線観測調査”のとりまとめ. 日本ベントス学会誌 2007; 62: 52-56.
- 4) 高橋 暁, 清水祥平. 瀬戸内海の長期水温変動. 海と空 2004; 80: 69-74.
- 5) Ogata T, Pholpunthin P, Fukuyo Y, Kodama M. Occurrence of *Alexandrium cohorticula* in Japanese coastal water. *J. Applied Phycol.* 1990; 2: 351-356.
- 6) 沖縄県衛生研究所. 平成12年度自然食品自然毒対策事業報告書 沖縄産二枚貝の麻痹性貝毒調査(Ⅲ) 2001; 12.
- 7) 里圭一郎, 天真正勝, 宮田 匠. 内の海養殖漁場環境調査. 平成11年度徳島県水産試験場事業報告書 2000; 85-87.

- 8) 吉松定昭, 松岡 聡, 越智洋雄, 西尾幸郎, 橋本多美子, 西堀尚良, 吉田 誠, 福代康夫. 播磨灘南部海域に発生したによる二枚貝毒化 I. プランクトンの出現状況. 平成 12 年度日本水産学会春季大会講演要旨集 2000; 45.
- 9) 棚田教生, 天真正勝, 山添喜教, 宮田 匠. 有毒プランクトン調査 (漁場環境監視等強化対策事業). 平成 11 年度徳島水研報 2002; 98-99.
- 10) Nagai S, Matsuyama Y, Oh S J, Itakura S. Effect of nutrients and temperature on encystment of the toxic dinoflagellate *Alexandrium tamarense* (Dinophyceae) isolated from Hiroshima Bay, Japan. *Plankton Biol. Ecol.* 2004; **51**: 103-109.
- 11) Yoshimatsu S. Sexual reproduction of *Protogonyaulax catenella* in culture I. Heterothallism. *Bull. Plankton Soc. Jap.* 1981; **28**: 131-139.
- 12) Nagai S, Itakura S, Matsuyama Y, Kotani Y. Encystment under laboratory conditions of the toxic dinoflagellate *Alexandrium tamiyavanichii* (Dinophyceae) isolated from the Seto Inland Sea, Japan. *Phycologia* 2003; **42**: 646-653.
- 13) Hashimoto T, Matsuoka S, Yoshimatsu S, Miki K, Nishibori N, Nismo S, Noguchi T. First paralytic shellfish poison (PSP) infestation of bivalves due to toxic dinoflagellate *Alexandrium tamiyavanichii*, in the southeast coasts of the Seto Inland Sea, Japan. *J. Food. Hyg. Soc. Japan* 2002; **43**: 1-5.
- 14) Shimada H, Hayashi T, Mizushima T. Spatial distribution of *Alexandrium tamarense* in Funka Bay, Southwestern Hokkaido, Japan. In: Yasumoto Y, Oshima Y, Fukuyo Y (eds). Harmful Algal Blooms. International Oceanographic Commission of UNESCO, Paris. 1996; 219-221.