

韓国沿岸海域における渦鞭毛藻, *Cochlodinium polykrikoides* 赤潮の発生機構に関する一つの考察

誌名	日本プランクトン学会報
ISSN	03878961
著者名	尹,良湖
発行元	日本プランクトン学会
巻/号	48巻2号
掲載ページ	p. 113-120
発行年月	2001年8月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



韓国沿岸海域における渦鞭毛藻, *Cochlodinium polykrikoides*赤潮の発生機構に関する一つの考察

尹 良湖

麗水大学校 海洋システム学部 海洋システム保全専攻

A summary on the red tide mechanisms of the harmful dinoflagellate, *Cochlodinium polykrikoides* in Korean coastal waters

YANG HO YOON

Division of Ocean System, Yosu National University, Republic of Korea

Abstract The red tide of harmful dinoflagellate, *Cochlodinium polykrikoides* occurs in Korean coastal waters every year from 1984, since its first record in 1982 was showed from the coast of Gadeok Island and Chiljeon Island near Pusan, where is located in the southeastern part of Korean south sea. While the red tide area was limited in the mouth of bay or outer bay of Korean southeastern sea before 1995, it moved mostly to outside of Korean coast after 1995. And the scale of the red tide outbreak also had a small and short period in outer bay, while it became to have a large scale and a long period in outside of Korean coastal waters.

Judging from this specific of red tide occurrence, it can be concluded that the occurrence is caused by a physical stimulus rather than a chemical one based on nutrients from marine environmental characteristics of the Naro Islands coast, where is located in the central part of Korean south sea and had the first occurrence of harmful dinoflagellate, *C. polykrikoides*, red tide in Korean coastal waters from 1995. Especially as the physical stimulus, I can tell front between Tsushima warm current and Korean coastal water mass and water temperature stimulus from a temporary stratification collapse when the surface water temperature falls down.

And it have been also raising remarkably it possible for the seed coming into occurrence sea area to be vegetative cells coming from tropic and subtropic regions as well as cyst germination of surface sediment. It is brought out that the nutrients to control a growth depends on phosphate rather than nitrate, and the growth rate is very low as 0.3 divisions day⁻¹ by laboratory experiments and *in situ* data. Also it become to clear that red tide to have occurred in south coast has a mechanism to be carried to east coast with very high speed, and caused by the flow of surface sea water such as Tsushima warm current through the experiments of the drift buoy by satellite tracking in autumn 1999.

But we will have to study more on the origin of seed, competition of species, life cycle and the supply mechanism of nutrients during expansion by the Tsushima warm current for harmful dinoflagellate, *C. polykrikoides* in Korean coastal waters.

Key words: harmful dinoflagellate, *Cochlodinium polykrikoides*, red tides, Korean coastal waters

1. はじめに

韓国は半島の形で3面が海に囲まれているが、各々の海岸線は形と潮干満の差などの特性を持っている。即ち、西と南の海岸線は複雑で、リアス式である反面、東は単調である。また、潮の干満の差もソウル近辺にある西海の仁川沿岸は最大9 mで非常に大きいのに対し、東海岸は0.3 m以内の値を表す。したがって、西と東海岸は海岸線の形や潮の差で海水の流れが円滑であるのに対し、南海岸は潮の差は2から4 mで比較的に高い

が、海岸線が複雑で海水の交換が悪い内湾が多く、韓国沿岸海域の赤潮は主に南海岸の海域で発生している。特に韓国南海海域は黒潮から分かれて韓国の東海（日本海）へ流れる対馬暖流により沿岸から離れた海水は東海に運ばれるが、内湾の場合は複雑な海岸線を持って外からの波などを止めてくれるために昔から色々な水産養殖場として盛んに活用されている。そのため有害性の赤潮の発生はこの海域で行われる色々な水産生物や産業に大きな被害を与え（NFRDI 2000 b）、大きな社会問題に

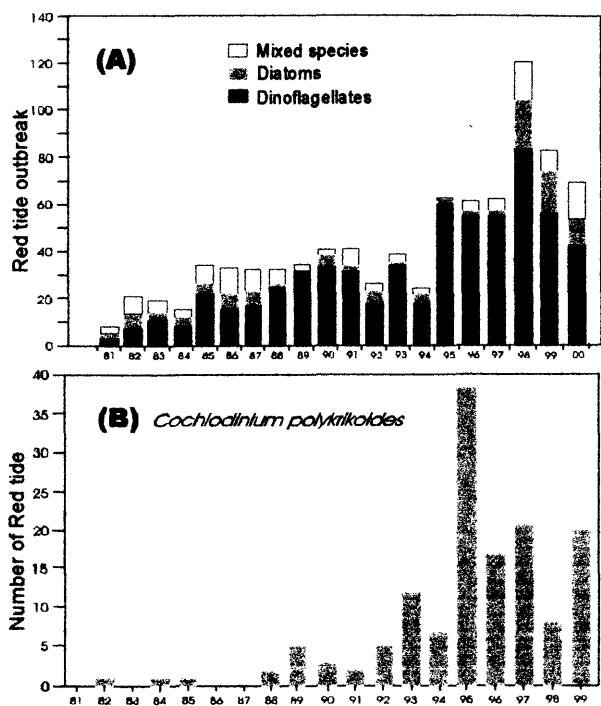


Fig. 1. The yearly changes in total red tide outbreak and the harmful dinoflagellate, *C. polykrikoides* in the Korean coastal waters.

なっている。

このような、韓国沿岸海域における赤潮発生に関する歴史的な記録は紀元前にも遡ることが出来るが (Hahn 1998), 科学的な報告は1961年の鎮海湾で珪藻の *Chaetoceros* と *Nitzschia* 属によって形成されたのが初めてである (Park & Kim 1967). その後, 1980年代までの韓国沿岸海域の赤潮は限られた海域のみで発生の報告が見られたのが, 2001年現在には3面の沿岸海域の全域で毎年赤潮が発生するようになっている。赤潮原因生物も1980年以前までは主に珪藻であったのが, その後は植物性鞭毛藻に変わるようになっている。特に, 1995年以後には韓国の全沿岸海域で渦鞭毛藻である *Cochlodinium polykrikoides* による赤潮が大規模で, しかも長い時間持続し, 大きな水産被害を発生させているが, その発生機構はまだ解明されていない。

従って, ここでは韓国沿岸海域で最近毎年晩夏から秋に掛けて大規模な赤潮を形成し, 大きな水産被害を出し, 大きな社会問題化されている渦鞭毛藻, *C. polykrikoides* 赤潮を中心に, その発生環境特性と発生機構を考察する。

2. 赤潮発生の件数及び海域の拡大

韓国沿岸海域では1961年に初めて赤潮発生記録されて以来, 1970年代には年間1-3件の頻度で出現しているが, 1980年代に入ると10-30件, 1990年代には40-130件と増加し, 今でも全般的にはその発生件数が増える傾向にある (Fig. 1A). 図からは

赤潮発生の件数が1998年の128件を最大とし, 次第に減少傾向を見せているが, それは人為的な措置による結果ではなく, 降水や台風の来襲のような自然現象によるもので韓国の沿岸海域での赤潮発生は今も次第に増加しているといえる。また, 韓国沿岸海域における *C. polykrikoides* 赤潮は1982年から出現し始め, 1980年代までは限られた海域のみで年間0から3件の発生頻度であったが, 1990年代にはその発生頻度が急に増え, 1995年をピークとし, 毎年10から30件の間で発生している (Fig. 1B).

月別の赤潮発生件数の変化は全体としては4月から10月まで, その中でも6-9月に集中的に発生しているが, 有害性の *C. polykrikoides* を除いた他の赤潮生物による赤潮は7月を最大

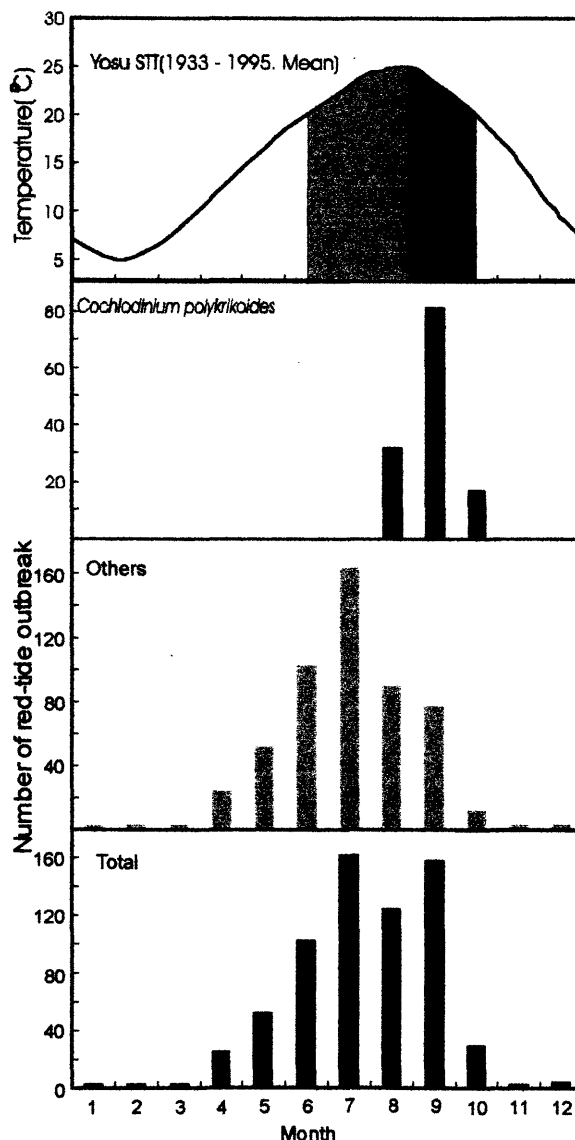


Fig. 2. The monthly changes in total red tide outbreak and the harmful dinoflagellate, *C. polykrikoides* in the Korean coastal waters.

ピークとし、正規分布の形を取り、主に5月から9月までに主として発生している。しかし、*C. polykrikoides*赤潮は韓国南部海岸で年中最高水温を示す8月中旬過ぎ、水温が下がり始める8月末から10月初旬にかけて発生する特徴がある。即ち、秋の始めに季節的な水温躍層が破壊される時期に赤潮が発生することから、この種の群成長による赤潮には水温が深く関係しているものと思われる (Fig. 2)。

次に、韓国沿岸海域における*C. polykrikoides*赤潮の発生とその発生域の拡大過程を見れば、1982年9月に初めて釜山の加徳島の東岸及び七前島の沿岸海域で、1984年9月には鎮海湾の唐東湾及び南海島沿岸海域で、1985年9月には晋州湾で発生したが、1988年以後には毎年この種による赤潮が発生するようになっている (Park 1991, Kim et al. 1998, NFRDI 1998)。しかし、1993年以前までは本種による赤潮は韓国南海の東部海域である鎮海湾から晋州湾及び南海島までの限れた海域のみで、しかも湾の入り口や内湾域にて小規模で発生しているのが、19

95年の秋には南海中部で、しかも外洋性の環境特性が強い開放された羅老島 (Narodo) の沿岸海域で発生した。しかもこの赤潮が、速い速度で南海西部の莞島から東海中部に位置する三抄沿岸海域まで非常に広い範囲にわたり発生海域を拡大しながら2ヶ月間持続し、養殖魚類などの水産生物に大きな被害を与えた (Table 1)。その後には本種による赤潮が毎年、定期的行事のように羅老島の沿岸海域において同じ時期に発生し、韓国の南海および東海の沿岸に掛けて大規模な赤潮を形成している (Fig. 3)。

また、1998年と1999年には大きな潮汐の差で海水の流れが円滑であった。今まで赤潮が発生しなかった西海の群山沿岸海域までも発生するようになってきている (NFRDI 2000a)。特に、1995年以後、今までこの種は韓国南海の中央部に位置する羅老島や麗水沿岸海域で発生し始まることや1年ごとにその発生規模が変化するなどの規則的な特性を示している (Fig. 1)。

また、本種による赤潮によって1985年南海の中央部に位置す

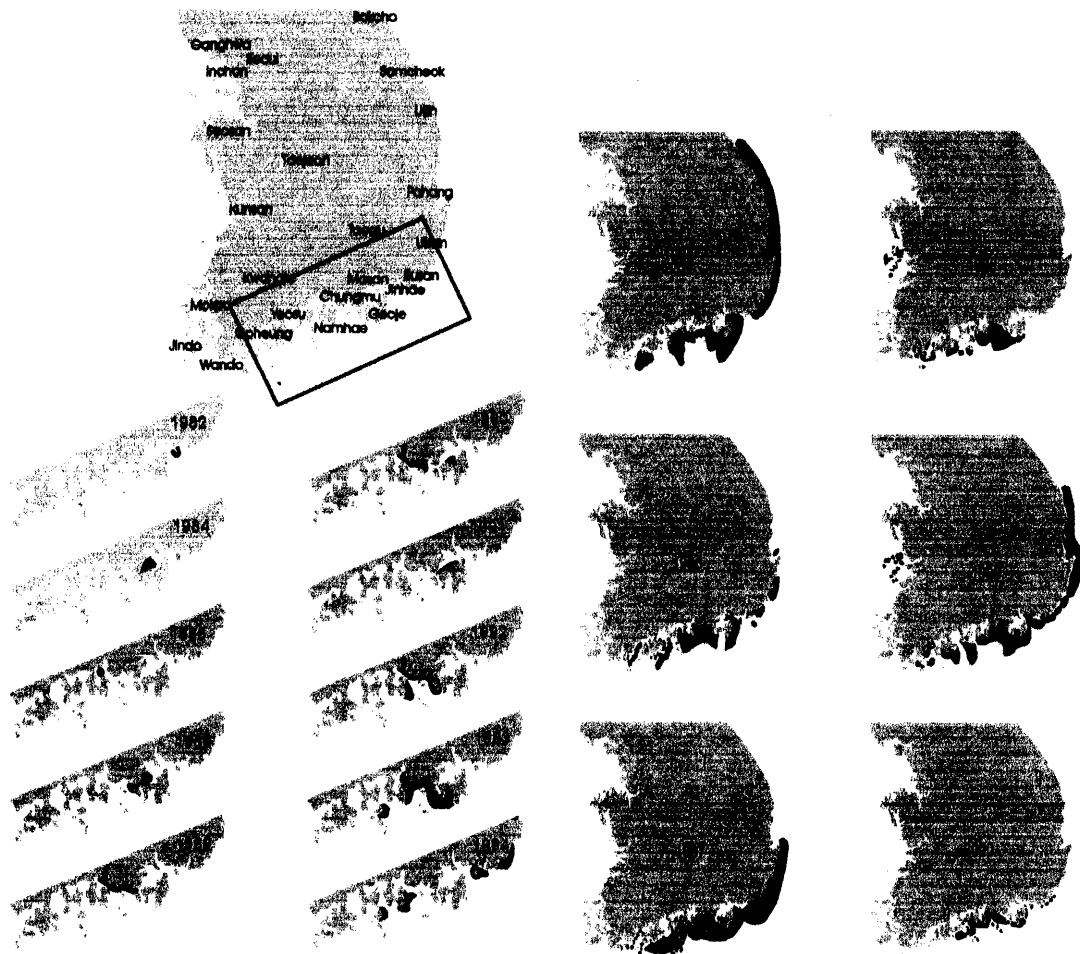


Fig. 3. The changes in outbreak area for the harmful dinoflagellate, *C. polykrikoides* in the Korean coastal waters.

Table 1. A characteristics of red tides on the harmful dinoflagellates, *C. polykrikoides* in the Korean coastal waters from 1995 to 2000. Cell density; cells ml⁻¹, damage; hundred million Won.

Items	Year					
	1995	1996	1997	1998	1999	2000
Outbreak date	Aug. 29	Sept. 4	Aug. 24	Aug. 30	Aug. 11	Aug. 22
Beginning place	Narodo	Narodo	Narodo	Narodo	Narodo	Yeosuhae
Disappearance date	Oct. 21	Oct. 2	Sept. 22	Oct. 2	Oct. 4	Sept. 20
Duration for red tides	54	29	29	34	55	30
Maximum cell density	30,000	23,350	20,000	25,000	43,750	15,000
Outbreak areas	South-East	South	South-East	West-South	W-S-E	South
Amount of damage	764	21	15	2	3	3 (?)

る南海島の彌助沿岸で、ブリ、クロソイなどの魚類に被害を与えたのを初めとし、1989年からは毎年のように水産被害が発生している。特に、1995年の大規模で、しかも長期的な赤潮では南海から東海の沿岸海域に至る多くの魚類養殖場に被害を与えて、約800億won(80億yen)に及ぶ水産被害額を引き起し(NFRDI 2000 b), 現在でも毎年本種の赤潮による大きな被害が発生している (Table 1). そして、Table 1には1995年以後、大規模な赤潮を発生させている *C. polykrikoides* 赤潮発生の時期、海域、持続時間などの特性を簡略に整理している。

3. 赤潮発生の環境特性と赤潮拡大の機構

韓国沿岸海域における *C. polykrikoides* の赤潮の発生環境や発生機構に対してはまだ詳しく知られてはいない。ただ、韓国の国立水産振興院では1995年以後に毎年のように羅老島の沿岸海域で赤潮が発生し始め、次第に南海の東部及び東海の沿岸海域まで拡大することや初期の赤潮発生海域の環境特性から、7月下旬から8月初旬に発芽し始めた休眠胞子 (cyst) が8月下旬から9月に初旬に韓国南海中央部の複雑な海洋環境特性、即ち、フロント形成や水温降下による表面冷却などで成層が破壊され水柱の鉛直混合により赤潮が発生する。発生した *C. polykrikoides* の赤潮は風や潮汐によって陸の方から海に、または海の方から陸へ移動する。そのうちの一部は沿岸外の対馬暖流などの海流に乗って南海から東海へ移動するとしている (NFRDI 2000a)。このような仮説ではまだ確認されない事柄が多く含まれているが、本種による赤潮発生にはフロントや表層と底層の水温差が深く関係している。すなわち、Fig. 4には *C. polykrikoides* 赤潮発生とNOAA衛星から取った韓国南海表面水温の水平分布を示している (Suh et al. 2000)。図から8月と9月南海の中間の羅老島沿岸海域は南から流れる暖かい対馬暖流と西側から拡大される黄海冷水または南海の沿岸水が複雑に混り合う所であり、そのような条件の場所で赤潮の発生が確認される。Yang et al. (2000) からも1997年現場の観測結

果から韓国南海の中央部におけるこの種による赤潮発生には羅老島の沿岸海域に外部から流入される中国大陸沿岸水などの不

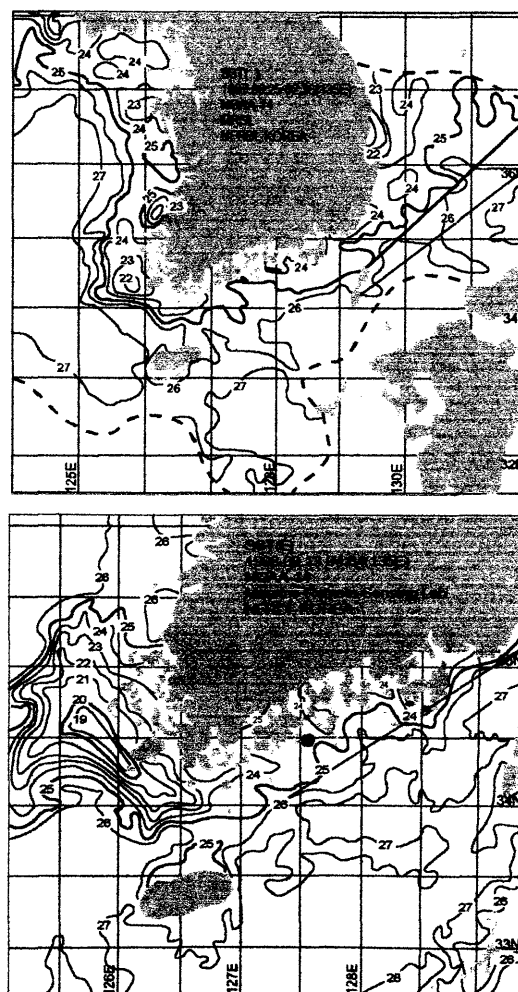


Fig. 4. The relationship between harmful dinoflagellate blooms (black dot) and surface temperature derived from NOAA (Suh et al. 2000).

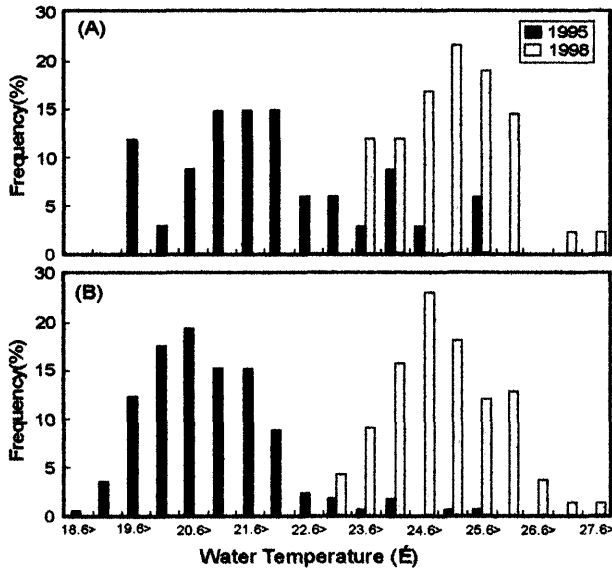


Fig. 5. The frequency of initial water temperature in the areas of harmful dinoflagellate blooms in 1995 and 1998 (Suh et al. 2000).

特定な低塩分海水の水塊が大きく関与していると報告している。

Fig. 5には1995年と1998年の*C. polykrikoides*赤潮の発生初期段階と発展持続期間に観測される水温の頻度を示している。図からこの種の赤潮発生初期段階には幅広い範囲の水温で適応していることが分かるが、この種は一回ある水温に適応すればその温度から狭い範囲で成長する特性を示している。

しかし、本種による赤潮は栄養塩の濃度が高い内湾域より、低い外洋域で発生頻度が高い事から栄養塩の濃度より低い塩分

濃度に大きく左右されると思われる。この種の赤潮発生と降水量との関係を調べた結果をFig. 6に示す。図からはこの種の細胞数と降水量との間には何等かの関係があるようにも見えるが、細胞が増える初めの時と降水量との間には何等の関係もないことから降水量はこの種の赤潮発生に直接には関与しないことと判断できる。また、この種は実験室での培養実験でも増殖速度が非常に遅いことになり (Fig. 7), 現場での赤潮までの群成長の可能性が疑問視されているが (Iizuka 1979, Iizuka & Mine 1983), 現場で観測したこの図から*C. polykrikoides*の細胞が出現し始まる8月13日から最高細胞密度に達する9月1日までの大略的な成長率を計算すれば約0.25 divisions day⁻¹になり、現場でも増殖速度が非常に遅い結果が出ている。このような遅い増殖率でも赤潮まで発展することが可能であると思われる。また、培養実験の結果、この種の成長と水温、塩分及び光との関係では22℃から25℃の水温、35%内外の比較的高い塩分及び高い照度でもっともよく成長している (NFRDI 1998, 2000a, Fig. 7)。

また、この種は日昼鉛直運動も行ない、赤潮のとき昼は表層から2-3 m水深のところに集まり、夜には表層から底層まで分散することが分かっている (Na et al. 1996)。

次に、南海の中央部で発生した*C. polykrikoides*赤潮の南海から東海への拡散機構に対しては1999年9月と10月に国立水産振興院が衛星追跡漂流浮を用いた現場実験で明らかになっている。すなわち、この種の赤潮発生環境の条件が合う南海中央部海域で発生した赤潮は風や潮汐により陸の方から外へ一部が運ばれる。運ばれた一部の赤潮は対馬暖流などの表面の海水の流れに乗り、南海岸から東海岸まで早い速度で拡散されると仮

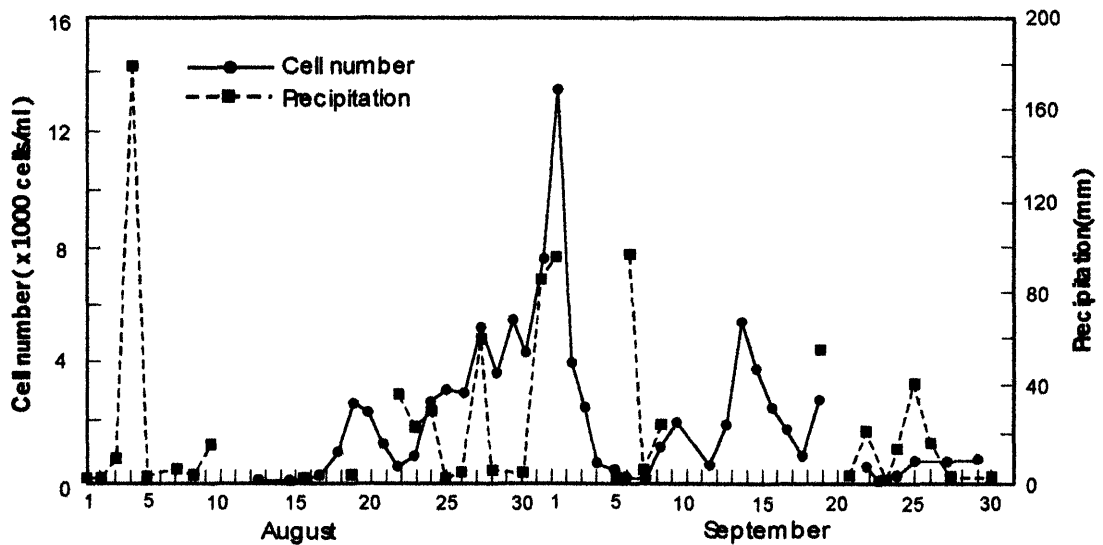


Fig. 6. The relationship between precipitation and cell number of the harmful dinoflagellate, *C. polykrikoides* in the Korean coastal waters (NFRDI 2000).

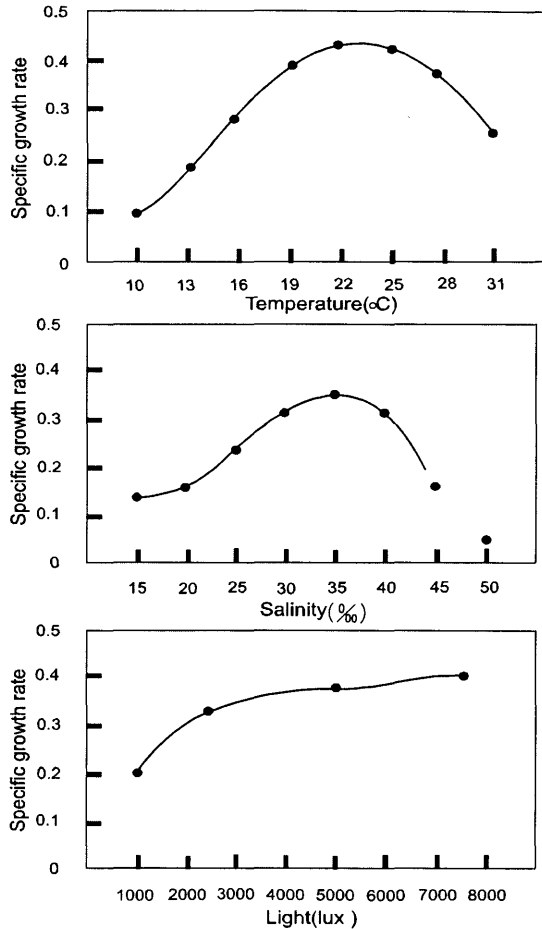


Fig. 7. A specific growth rate of the harmful dinoflagellate, *C. polykrikoides* in relation to various water temperature, salinity and light conditions (NFRDI 1998, 2000).

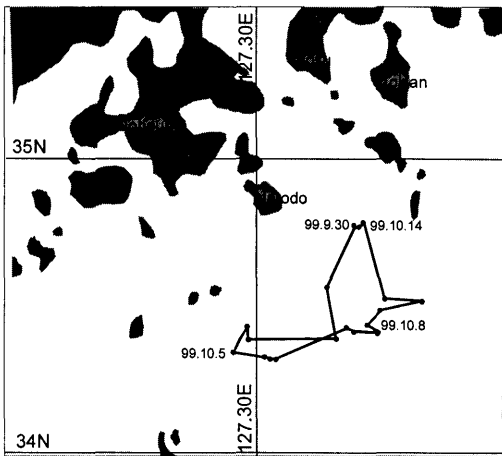


Fig. 8. A route of drifting buoy by satellite tracking from September 30 to October 14, 1999 in the Narodo coastal waters.

説して行われた実験の結果、毎年赤潮が発生し始める羅老島沿岸、すなわち、陸の方に近い海域で投下された浮は15日間投下された海域のみで留まり外まで運ばれなかったが (Fig. 8), 陸から離れた南海島の南東10 kmの海域で投下された浮は一周後に釜山の隣近に、10日後には東海岸のUljin沿岸まで、20日後にはKangneung沿岸まで運ばれ、赤潮が南海から東海岸に拡大する時間とよく一致し (Fig. 9), 南海の中央部で発生した赤潮は流れに乗って東海岸まで運ばれることが明らかになっている。

4. *Cochlodinium polykrikoides* 赤潮の発生機構

今まで韓国沿岸海域での、*C. polykrikoides* 赤潮の発生環境や一部の生理生態的な特性を考察したが、この種による赤潮に対してはまだその種の起源、発生初期の増殖刺激物質や成長率、そして、種間競争など明瞭でない事が結構あるが各々に対し次のように整理する事が出来る。

タネ (seed) の起源に対しては今まで現場の堆積物のcystから発芽するとされているが (NFRDI 1998), 赤潮が発生する2ヶ月前にも現場ではかなりの量で遊泳細胞が見つかった事 (Fig. 10), 赤潮発生海域ではないが韓国南方に位置する済州島沿岸でも遊泳細胞が観察される事 (Kim et al. 2000) から、この種は南方から海流に乗り韓国沿岸海域で運ばれる可能性が強くなり、赤潮発生におけるタネの役割はcystのみではなく、外部から運ばれる種に関しても考察しなければならない。

発生初期の増殖刺激物質に対してもこの種は栄養塩の濃度が高い内湾より濃度が低い湾の外で発生することから栄養塩より

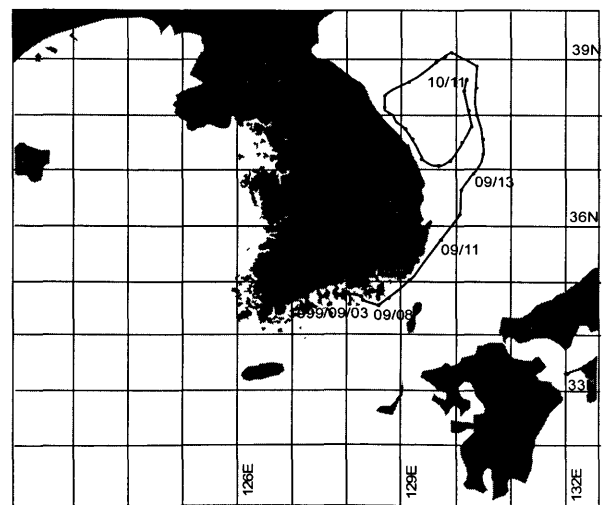


Fig. 9. A route of drifting buoy by satellite tracking from South to East coastal waters of Korean in September 1999 (NFRDI 2000).

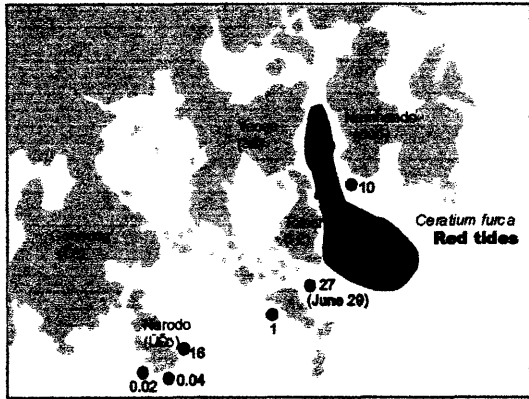


Fig. 10. Cell numbers (cells l⁻¹) of the harmful dinoflagellate, *C. polykrikoides* off Narodo and Yeosu, located central areas of Korean southern coast in June 26 and 29, 2000.

は物理的な刺激により発生が誘導されていると思われる。つまり、今までこの種による大規模な赤潮は沿岸フロントが形成されている所や海水の水温が最大値から下がり始め、水温の成層が破壊され始める時期に発生していることから急激な水温の差による刺激がこの種の赤潮発生に大きく関係していると判断できる。そのとき水温の差は成層期の表層と底層の水温差が6℃程度である事から5-6℃位であると判断できる。ただ、この種の赤潮発生並びに消滅は水温により決定され、水温の下がり方により赤潮の持続時間が決定されている。

しかし、この種の赤潮は栄養塩の濃度が低い外洋沿岸で発生

しているが赤潮生物の増殖に栄養塩は必ず必要であり、その供給源は主に外や底層であると判断できる。特に栄養塩の中では燐酸塩の挙動と原因生物間には類似性が見られることから、この種の増殖には燐酸塩の取り込みが重要であると思われた。

この種が主に外洋性の沿岸で赤潮を形成し、内湾で赤潮が見えないことや種間競争に対し、Jeong et al. (2000) は1997年赤潮発生の前後の時期に羅老島沿岸海域を対象に調査を行い、この種の赤潮発生の時には先行して、*Gyrodinium impudicum*が大量出現することを観察した。また、彼らは赤潮時にも*G. impudicum*の細胞密度が*C. polykrikoides*より高いし、*G. impudicum*は珪藻である*Skeletonema costatum*と種間競争の関係が見られることから、内湾では栄養塩の取り込みや増殖から鞭毛藻が珪藻との競争に負けるため赤潮にならないとし、種間競争の可能性を強く提議した。しかし、内湾と沿岸との栄養塩の取り込みに関しては、この海域の海洋条件などから受け入れ難い。このようなことをもとにし*C. polykrikoides*赤潮発生の模式図を作成したのがFig. 11である。

この種の赤潮は現場の堆積物からcystの発芽や南方から年中の遊泳細胞の形で供給されるタネが少なくとも6月からある密度で見え始め、水温が下がる8月下旬から前に考察した水温などの刺激により急速に増え始め赤潮になる。赤潮になれば潮汐などによって外に運ばれた赤潮の塊は対馬暖流などの表面の海水に流れに乗り東海岸まで拡大しながら赤潮は長く持続される。赤潮の消滅は主にその時韓国沿岸に来襲する台風や強い雨などの外部の力または水温の降下により決定される。

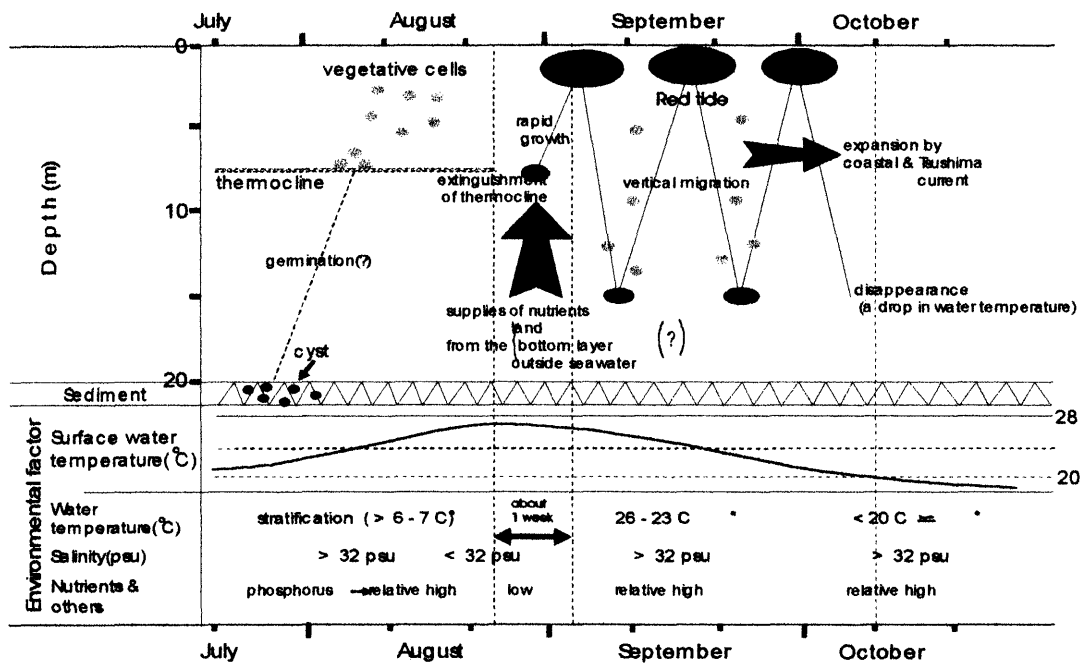


Fig. 11. A schematic mechanism of the harmful dinoflagellate, *C. polykrikoides* in the Korean coastal waters.

5. まとめ

これまで韓国沿岸海域で毎年のように発生している有害性渦鞭毛藻, *C. polykrikoides*赤潮発生の機構を得られた色々な結果から考察したが, 赤潮は海洋の現場で色々な条件の組み合わせの結果で発生が見られるもので, これからも赤潮になった海水が運ばれながら栄養塩は供給されているのか, その種になるタネの起源はどこであるのか, cystまたは外部から流入されるとすれば各々の種としての寄与率は, 何故内湾では発生しないのか, それが種間競争とすればその対象になる種とのメカニズム, 原因生物の生活史は, 西海岸赤潮生物の運搬のメカニズム, 等々, これからも解決しなければならない課題が数多くある。

謝 辞

本研究の一部は麗水大学校2001年度学術研究支援費により研究されたものであり, 感謝を表す。

参 考 文 献

- Hahn, S.D., 1998. History of algal records in Korean coastal waters, pp.34-43. In *Harmful algal blooms in Korea and China*. (ed. Kim, H. G., S. G. Lee & C. K. Lee). National Fisheries Research and Development Institute, Republic of Korea, Pusan.
- Iizuka, S., 1979. Maximum growth rate of natural population of a *Gymnodinium* red tide, pp.111-114. In *Toxic Dinoflagellate Blooms* (ed. Taylor, D.L. & H.H. Seliger). Elsevier.
- Iizuka, S. and K. Mine, 1979. Maximum growth rate of *Gymnodinium* sp. (Type-'65), a red tide dinoflagellate, expected under culture conditions. *Bull. Plankton Soc. Japan* 30: 139-146.
- Jeong, H.J., J.K. Park, H.-Y. Choi, J.S. Yang, J.H. Shim, Y.K. Shin, W.H. Yih, H. -S. Kim & K.J. Cho, 2000. The outbreak of red tides in the coastal waters off Kohung, Chonnam, Korea 2. The temporal and spatial variations in the phytoplanktonic community in 1997. *The Sea* (J. Korean Soc. Oceanogr.) 5: 27-36. (in Korean)
- Kim, H.G., 1998. Harmful algal blooms in Korean coastal waters focused on three fish-killing dinoflagellates, pp.1-20. In *Harmful algal blooms in Korea and China* (ed. Kim, H. G., S. G. Lee & C. K. Lee). National Fisheries Research and Development Institute, Republic of Korea. Pusan.
- Kim, H.G., C.S. Chung, C.G. Lee, W.E. Im, Y.C. Cho & Y.S. Kang, 2000. The occurrence of a harmful dinoflagellate *Cochlodinium polykrikoides*, in the south-western water off Cheju island, Korea. *Proceeding of the Autumn Meeting, 2000 of the Korean Soc. Oceanogr.*, pp.104-105. (in Korean)
- Na, K.W., K.D. Park, S.H. Lee, G.H. Kim & J.B. Nam, 1997. Dial migration of dinoflagellates, *Cochlodinium polykrikoides* in situ. *J. Aquaculture* 10: 457-462.
- NFRDI (National Fisheries Research and Development Institute), 1998. *Recent red tides in Korean coastal waters* (2nd ed.). Republic of Korea. Pusan, 292pp. (in Korean)
- NFRDI, 2000a. *Harmful algal blooms in Korean coastal waters in 1999*. Republic of Korea. Pusan, 206pp. (in Korean)
- NFRDI, 2000 b. *Proceedings of the inter-state symposium on the evaluation on the mitigation capability of clay and yellow loess at the harmful algal blooms and their impacts on marine ecosystem*. 121pp.
- Park, J. S., 1991. Red tide occurrence and countermeasure in Korea, pp.1-24. In *Recent approaches on red tides* (ed. Park, J.S. & H.G. Kim). National Fisheries Research and Development Institute, Republic of Korea, Pusan.
- Park, J. S. & J. S. Kim, 1967. A study on the "Red-water" caused at Chinhae bay. *Bull. Fisheries Research & Development Agency*, 1: 63-79.
- Suh, Y.-S., J.H. Kim & H.-G. Kim, 2000. Relationship between sea surface temperature derived from NOAA satellites and *Cochlodinium polykrikoides* red tide occurrence in Korea coastal waters. *J. Korean Envir. Sci. Soc.* 9: 215-221.
- Yang, J. S., H. Y. Choi, H. J. Jeong & J. K. Park, 2000. The outbreak of red tides in the coastal waters off Kohung, Chonnam, Korea : Physical and chemical characteristics in 1997. *The Sea* (J. Korean Soc. Oceanogr.) 5: 16-26. (in Korean).

2001年5月15日受付, 2001年7月15日受理