

湾外水の差込みが浦の内湾の鞭毛藻赤潮の発生に及ぼす影響

宗景志浩*・村田 宏**・森山貴光**・土居 聡**

1. はじめに

浦の内湾では、1960年代は珧藻を主体とする赤潮がまれにみられる程度であった。ところが、1970年代になると養殖による水質の悪化に伴って、プランクトン種の変遷が起こり、その後1980年代からは *Gymnodinium*, *Heterosigma* などの鞭毛藻も発生するようになった(高知県水産局, 1970)。最近では、これら有害鞭毛藻による赤潮が毎年のように発生し、養殖ハマチやアサリなどの魚介類にしばしば大きな被害を及ぼしている。

なかでも、*G. nagasakiense* (*mikimotoi*) は、1965年長崎県大村湾で大発生し、西日本沿岸域を中心に富栄養化した閉鎖性海域で頻繁に発生するようになり(岡市, 1987)、貧酸素水塊の発達する海域の水面下2~5mで濃密な増殖を示すことから中層赤潮と呼ばれ、当時から貧酸素水との関連性が指摘されていた(飯塚ら, 1987)。

本研究では、*G. nagasakiense* 赤潮発生の環境要因を解明し、発生時期を予測するために、水質の経年・経月変化と湾外水の差込み現象(Intrusion)の発達過程を調べ、赤潮発生に及ぼす水理・水質環境の影響を明らかにした。

2. 観測内容

観測は、1984年以降継続して進められている赤潮調査(高知県水産試験場, 1988~1991)と1988年から新たに始まった中層赤潮調査(*G. nagasakiense* 赤潮)(高知県水産試験場, 1988~1991)からなる。赤潮調査は図-1に示す観測点のうち St. 4'を除く St. 1~6において、4月から10月のうち通常月1回、赤潮の多発する7~8月には5日間程度の連続調査も含めて数回実施した。中層赤潮調査は先の赤潮調査とは別に、St. 1, 3, 4'で *G. nagasakiense* の増殖期に集中して行った。各定点において、表層(0m), 2m, 5m, 2.5m, 10m,

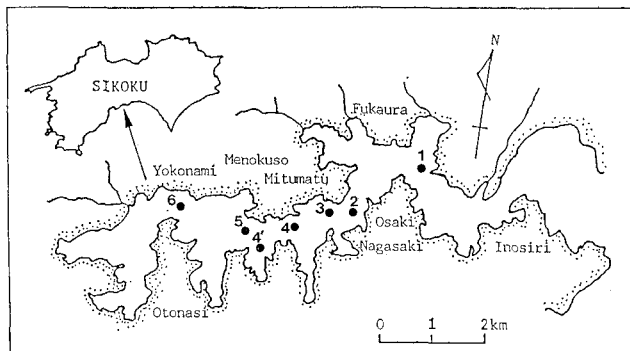


図-1 浦の内湾の地形と観測点

(12.5m) および底層(B-1m)の各層から北原式採水器を用いて採水し、プランクトン細胞数および栄養塩濃度の測定に供した。また、各層において水温、塩分、DOを測定した。

3. 浦の内湾の水質環境とプランクトン発生の変遷

3.1 プランクトン発生の経年・経月変化

図-2は、鞭毛藻赤潮が頻発する湾央部表層(St. 3, 水深20m)における鞭毛藻プランクトン現存量の経年・経月変化をみたものである。プランクトンは各観測日の単位体積当たり細胞数(cells/ml)で比較した。

現存量は1987年頃から増大の傾向にある。鞭毛藻は6から8月にかけて赤潮を形成する大規模な増殖がみられた。一方、珧藻は鞭毛藻の発生期をはずして、4~6月中旬および8月中旬以後に増殖していた。

3.2 栄養塩濃度とその経年変化

湾央底層部(10m以深)では、 $\text{NH}_4\text{-N}$ および PO_4

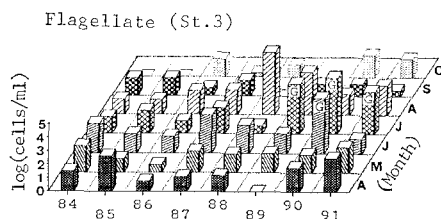


図-2 鞭毛藻現存量の経年・経月変化

* 正会員 農博 高知大学助教授 農学部生産環境工学科
** 高知県水産試験場

-P は、貧酸素化が強度を増す6月頃から急増し、ピーク時には、それぞれ $20.2 \sim 36.0 \mu\text{g-at/l}$, $3.7 \sim 7.2 \mu\text{g-at/l}$ となった。水面下 $2 \sim 10\text{m}$ の中層では、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ および $\text{NO}_3\text{-N}$ が湾外水の差込みの発達時に増加し、ピーク時には、 $\text{NH}_4\text{-N}$ で $2.7 \sim 12.6$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ で $0.6 \sim 1.8$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ で $1.2 \sim 3.6 \mu\text{g-at/l}$ 程度となって水質環境基準を上回ることもあった。これらの栄養塩は低レベルでも、鞭毛藻プランクトンは、鉄、マンガン、ビタミン B_{12} 、硫化物など土壌起源の物質によって増殖が促進される（高橋，1987），これらは、貧酸素化によって底泥から溶出する物質でもある。

$\text{NH}_4\text{-N}$ や $\text{PO}_4\text{-P}$ は、底層では貧酸素化すれば著しく増大し、湾外水の差込みがあれば減少する。また、 $\text{NO}_3\text{-N}$ のように分解の進んだ栄養塩は降雨により陸から運ばれるため表層部で増大するが、逆に（赤潮）プランクトンの増殖によって消費され急減することもある。比較的変動の少ない中層部（ $2 \sim 10\text{m}$ ）の経年変化をみると、 $\text{NH}_4\text{-N}$ は1987年頃から増大し、 $\text{NO}_3\text{-N}$ は減少する傾向にあり、 DIN （ $\text{NH}_4\text{-N} + \text{NO}_2\text{-N} + \text{NO}_3\text{-N}$ ）や $\text{PO}_4\text{-P}$ にはあまり経年変化はみられなかった。そこで、St. 3 の水面下 2m 、 5m および 10m における DIN の内訳（ $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ ）を DIN 全量に対する割合で示すと、図-3 のようになる。これは、7月の場合を示したものであるが、いずれの層でも $\text{NH}_4\text{-N}$ の DIN に占める割合は、1988年をピークとしているものの、1987年頃から徐々に増加の傾向にある。しかし、これとは対称的に、 $\text{NO}_3\text{-N}$ の占める割合は減少している。さらに、上層から下層にいくほど $\text{NH}_4\text{-N}$ の割合が増し、 $\text{NO}_3\text{-N}$

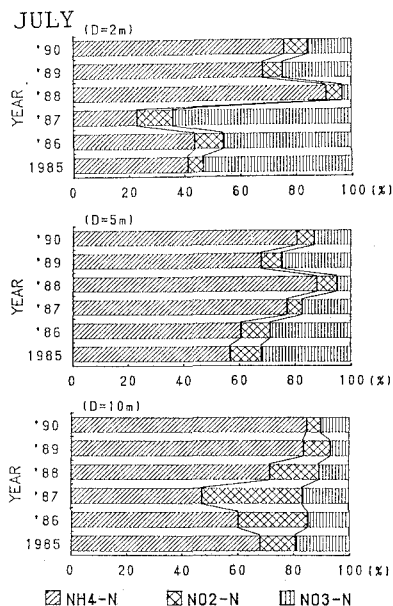


図-3 DIN の内訳の経年変化 (St. 3, 7月)

N 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ の割合が減少している。これらの結果は、底層部の貧酸素化によって、有機物の好気性分解が十分進行せず、貧酸素化がさらに強度を増していることを示している。また、 DO 濃度が過飽和となっている 2m 以浅でも、 $\text{NO}_3\text{-N}$ の占める割合の減少と $\text{NH}_4\text{-N}$ の占める割合の増大が著しい。これは底層部での貧酸素化がより強度を増したり、長期にわたって持続するようになって、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度が上昇したためである。これら栄養塩の経年変化や鉛直分布の特徴は、成層期の6月から8月のいずれの月でもみられた。

4. *G. nagasakiense* 赤潮発生の特徴

4.1 *G. nagasakiense* の出現状況と水質環境

図-4 には、1989年7月から8月にかけて、St. 2（水深 18m ）における *G. nagasakiense* の出現数を水温、塩分および DO のイソプレットに載せて示した。

a) 水 温

G. nagasakiense はいずれの年も7～10月にかけて長期にわたりほぼ全層で出現し、その水温も $17 \sim 30^\circ\text{C}$ の広い範囲にわたる。しかし、水面下 5m 以浅で、プランクトン密度が 10^2 cells/ml 以上に増加する場合は水温 26°C 以上、 10^3 cells/ml 以上の赤潮と認められる場合は 28°C 程度である。このような増殖を示す場合は底層部の水温も急上昇しており、 25°C 以上になる。これは浦

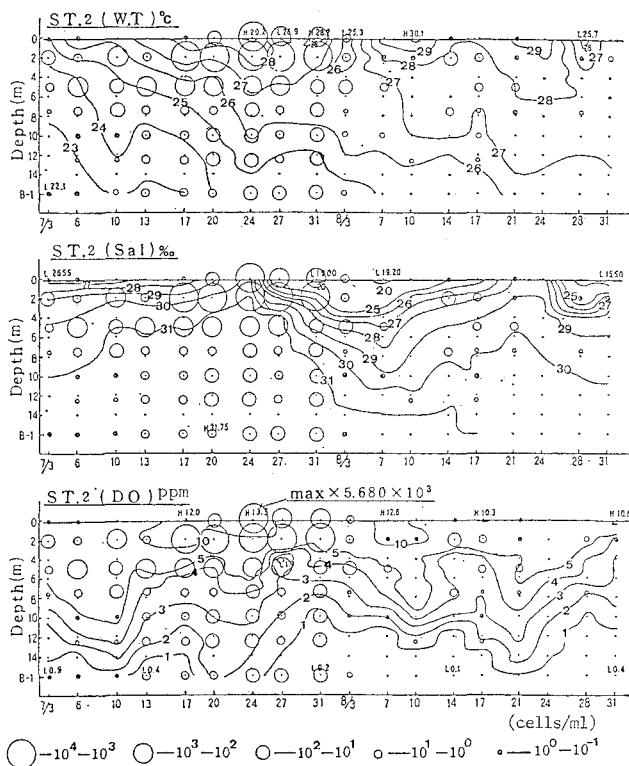


図-4 水温、塩分、DO の季節変化と *G. nagasakiense* 出現状況

の内湾では湾外水の差込みに起因するもので、時には水温の鉛直逆転もみられる(宗景ら, 1991)。

b) 塩 分

G. nagasakiense は、塩分は 22~32‰ の範囲で出現している。湾中央部 (St. 2~3) では 31‰ の等塩分線が 7 月 6 日頃から 27 日頃にかけてゆっくり上昇し、底層部の高塩分化が徐々に進行している。そして、差込みの強まる 17 日頃から *G. nagasakiense* が爆発的に増殖している。一方、降雨の影響で表層が低塩分化すると(例えば 1989 年 8 月 3 日以後)、急激に消失する。

湾外水の差込みに起因する高塩分化は、このようなゆるやかな場合の他に、僅か 4~5 日のうちに水面下 4 m 付近まで成層が崩れてしまう急激な場合もある。

c) DO

浦の内湾では、5 月初旬から湾中央部を中心に貧酸素化し始める。そして 6 月初旬には、水面下 14 m 以深で 2 ppm 以下の強い貧酸素水塊に発達する。しかし St. 1 や 2 では 7 月 20 日から 24 日にかけて底層部の DO 濃度が上昇している。これら底層部における貧酸素水塊の消滅は、湾外水の差込みに起因するもので(宗景ら, 1991)、底層部に多量の DO が補給されたためである。

G. nagasakiense は、底層部が貧酸素化し始める 5 月以後に中層付近で増殖が始まる。長期間貧酸素化が続いた後、大規模な湾外水の差込みに連動して爆発的な増殖が起こり赤潮を形成する。

4.2 *G. nagasakiense* の増殖密度と好適水温・塩分

図-5 は、1989 (A) および 1990 年度 (B) の浦の内湾湾中央部 (St. 3 (光松)、水面下 0 m および 2 m) での *G. nagasakiense* の細胞密度と水温・塩分の関係を示したもので、ここでは、細胞密度 (cells/ml) を円の大き

さで表現した。
浦の内湾では *G. nagasakiense* は、水温で 17~30°C、塩分で 22~32‰ の範囲で増殖可能であるものの、赤潮と認められる 10^3 cells/ml 以上の細胞密度となる場合の水温・塩分条件は、(年によって僅かに違いはあるが) 比較的狭く、24~30°C、27~31‰ 程度であった。これは山口ら (1989) の実験結果 (25°C、25‰) に比較して、水温はかなりよく一致しているものの、塩分はやや高い。ここでは、1988 から 1991 年の平均値として 28°C、30‰ を好適水温・塩分とする。

4.3 *G. nagasakiense* 赤潮発生域とその移動

図-6 は *G. nagasakiense* 赤潮の発生の過程を塩分縦断分布図にのせて示した。

1989 年の場合、31‰ の塩分線は 7 月 3 日には水面下 8 m 付近にあったが、10~17 日には 3~4 m に上昇している。24 日には 1~2 m までさらに上昇し、湾口側底層には 32‰ の高塩分水が侵入してきている。しかし 31 日には降雨のため表層は低塩分化し、この湾外水の侵入

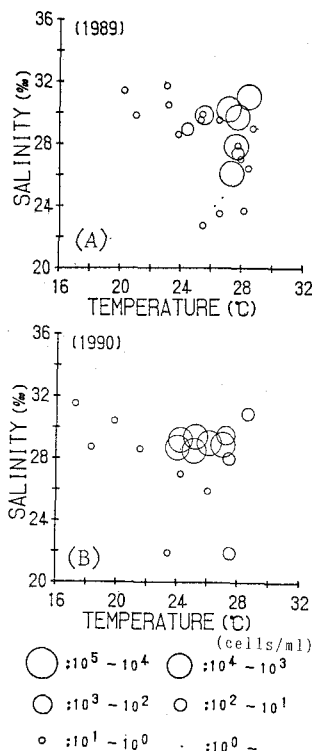


図-5 *G. nagasakiense* 出現密度と水温、塩分の関係

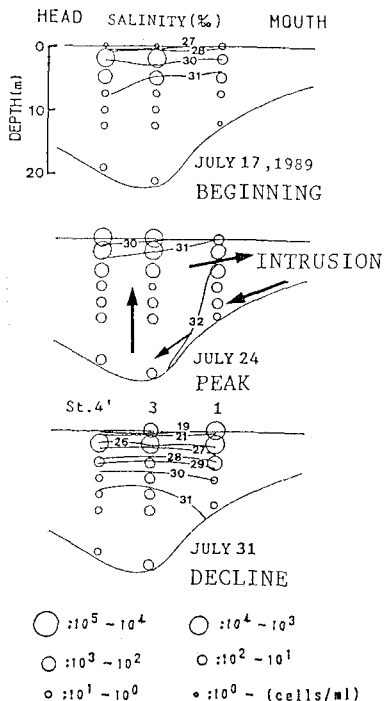


図-6 塩分縦断分布と *G. nagasakiense* の出現状況

(差込み)もおさまって、31‰ 塩分線は再び下降してきている。この年の底層部の高塩分化は、7月3日から17日にかけてゆっくり進行した。これはこの間に湾外からの高塩分(高密度)水が絶え間なく差し込んだことを意味している。湾外水の差込みは、浦の内湾では、一般には小潮から大潮にかけて発達するが、この例のようにゆっくりと徐々に進行する場合もある(宗景ら, 1991)。しかし、7月24日には湾口側底層部に 32‰ の高塩分水塊が見られることから、17日から24日にかけての大潮時により強い差込みがあったと考えられる。

G. nagasakiense の増殖は、湾外水の差込みの進行に伴って7月3日頃から湾中央部の水面下 2~5m 付近で始まり、17日には水面下 2m で 10^3 cells/ml を越えている。24日の差込みのピーク時には表層部でも 10^3 cells/ml を越え、赤潮を呈するようになる。湾口側 St. 1 でも水面下 2~5m で $10^2 \sim 10^3$ cells/ml まで増加している。31日には湾中央部では水面下 2m 付近での増加の傾向はまだ衰えていないが、表層部では急速に消滅している。その後差込みのピークを越えると増加域は湾口側に移動して、表層部でも 10^3 cells/ml を越えている。

湾外水の差込みは、湾外の高塩分・高密度海水が湾内底層部に侵入する現象で、同時に湾内底層水が浮上し、さらに湾内上層水は表層部を湾口側に流出する。従って、貧酸素水塊が発達している時期に湾外水の差込みが起これば、高濃度の栄養塩や硫化物、鉄、マンガンなどの増殖促進物質を含む底層海水を浮上させ、中層以浅のプランクトンの増殖を刺激する、また、水面下 2~10m の中層部で増殖したプランクトンを浮上させ、湾内表層部に集積させ、さらにこの表層水を湾口側に移動させる役割も果たしていると考えられる。

4.4 *G. nagasakiense* 赤潮の発生条件

図-7 には、St. 3 における 1989 年および 1990 年の *G. nagasakiense* の出現数と海象条件を整理して示した。(A) は水面下 2m の水温 (T_2) と増殖の好適水温・塩分 (28°C, 30‰) からの偏差の二乗和 ($O_{t,s}$) を、(B) は底層部(海底直上 1m) の DO (DO_{B-1}) とアンモニア態窒素 (NH_4-N_{B-1}) を示し、(C) は各深度における *G. nagasakiense* の出現数 (cells/ml) を円の大きさに表現した。

湾外水の差込みの発生は、底層部の塩分や DO 濃度の上昇から予測できる。さらに、底層部の DO の低下や NH_4-N の上昇は貧酸素化の強度が増したことを示す。 $O_{t,s}$ は、これが小さければ *G. nagasakiense* の増殖に適した水温、塩分条件となったことを示す。

G. nagasakiense の爆発的増殖時には $O_{t,s}$ は明らかに小さい値をとっており、好適水温・塩分 (28°C, 30‰)

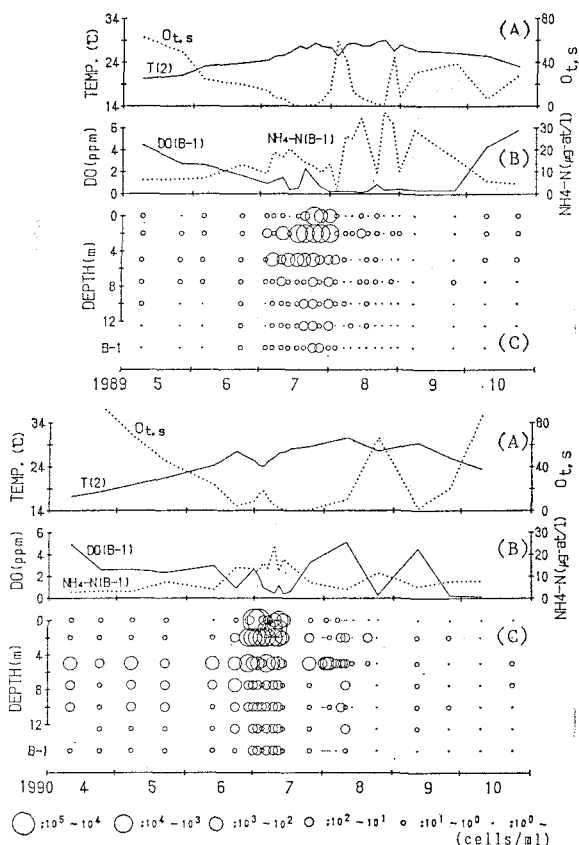


図-7 *G. nagasakiense* 赤潮発生条件 (1989, 1990 年)

が重要な条件となっていることが分かる。ところが、爆発的な増殖直後の1989年8月3日頃や9月中旬、1990年8月中旬などでは、降雨によって水温・塩分が低下して $O_{t,s}$ が増大し、*G. nagasakiense* の増殖はすみやかに停止している。しかし、その後 $O_{t,s}$ が再び小さくなって、水温・塩分条件がそろっても爆発的な増殖には至らない。

そこで湾外水の差込みの発達とプランクトン増殖の関連性を検討してみよう。浦の内湾では、例年5月初旬から貧酸素化が始まり、6月初旬になると底層の DO 濃度は 2ppm を割るようになる。さらに、7、8月にかけて徐々に貧酸素化は強度を増す。しかし、例えば、1989年7月7日、25日頃、1990年6月30日、8月7日、9月7日頃などはいずれの場合も底層部の DO は急上昇し、一時的ではあるが貧酸素化は消滅している。これは、湾外水の差込みに起因する変化である。このような差込みが発達すると (1988 および 1991 年の場合も)、全層にわたってプランクトンの増殖が活発化し、とくに水面下 2~5m では、水温・塩分が 25~28°C, 30‰ 程度となった場合に爆発的に密度が増大した。差込みのピーク時には最大密度の中心は表層に移り、赤潮を呈してやがて湾口側に移動する。

増殖速度 μ_2 は、水面下 5 m 以深で 0.5~1.0 程度であったのに、湾外水の差込みと水温・塩分条件が揃うと、この例のように全層で増殖が活発化し、2 m 以浅では 2 以上を示した。生態学的には μ_2 は 1 以下であるようで(飯塚ら, 1987; 山口ら, 1990), 表層部での細胞密度の異常な増加と湾口側への移動には、湾外水の差込み(移流的な流れ)に起因する輸送と集積機構が働いていると思われる。

しかし、この 7~10 日程度の増殖期を経て差込みが弱まると、急速に増殖は休息期に向かう。その後、水温・塩分が 28°C, 30‰ に近づき、かつ差込みが再び発達して、水面下 2~5 m 付近を中心に $10^2 \sim 10^3$ cells/ml 程度まで増殖することもあるが、最初の差込みの際のような爆発的な密度の増大には至らない。むしろこの場合は、1988 年 9 月初旬や 1991 年 9 月初旬に *Heterosigma akashiwo* が増殖した時のように鞭毛藻でも種の交代が起こる。

5. 結 論

浦の内湾の鞭毛藻赤潮の発生に及ぼす水理・水質環境の影響を調べ、以下の結果を得た。

① 鞭毛藻の発生は 1987 年以後増加しており、湾中央の光松付近を中心に 6~9 月の間に 2~3 回集中的な増殖がみられる。珪藻類の発生量も近年徐々に増加の傾向にあるが、鞭毛藻とは発生時期を交代する。

② $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$ は、底層部では貧酸素化の発達と共に増加するが、中層部(水面下 2~10 m)では湾外水の差込みの発達期と秋季鉛直循環期に増加する。

③ DIN, $\text{PO}_4\text{-P}$ には顕著な経年変化はみられないが、DIN の中では $\text{NH}_4\text{-N}$ が 1987 年頃から全層で増加し、 $\text{NO}_3\text{-N}$ が減少している。このことは貧酸素化の強度が徐々に増していることを意味する。

④ *G. nagasakiense* の増殖好適水温・塩分は、28°C,

30‰ 程度となったが、年により若干の差がみられる。

⑤ *G. nagasakiense* は、底層の貧酸素化の進行に伴って湾中央の水面下 5~10 m 付近から増殖が始まり、増殖の中心は 2 m 付近まで徐々に浅くなる。貧酸素化が長く続いた後、湾外水の差込みが発達するようになると、底泥中の増殖促進物質が巻き上げられるため、全層にわたって増殖が急速に活発化する。とくに、水面下 2 m 付近では(水温・塩分が 25~28°C・30‰ 程度の場合に)、細胞密度は 10^3 cells/ml (赤潮密度) を越え $5 \sim 15 \times 10^3$ cells/ml に達する。差込みのピークを過ぎる頃には、最大密度の中心は表層部に移りやがて湾口側に移動する。

最後に、本研究の一部は文部省科学研究費(一般 C, NO. 04650465)の補助を受けたことを記して謝意を表す。

参 考 文 献

- 飯塚昭二・上 真一 (1987): 赤潮の科学, 岡市友利編, 恒星社厚生閣, pp. 91-123.
- 岡市友利 (1987): 赤潮の科学, 岡市友利編, 恒星社厚生閣, pp. 16-36.
- 高知県水産局 (1970): 水産開発の方向と問題点, 179 p.
- 高知県水産試験場 (1984-1991): 昭和 59~平成 3 年度赤潮調査事業調査資料.
- 高知県水産試験場 (1988-1991): 昭和 63~平成 3 年度赤潮対策技術開発試験報告書.
- 高橋正征 (1987): 赤潮の科学, 岡市友利編, 恒星社厚生閣, pp. 61-83.
- 宗景志浩・木村晴保・村田 宏・森山貴光・田島健司 (1991): 浦の内湾における湾外水の差込み現象と貧酸素水塊の消長について, 日水誌, 第 57 巻, 9 号, pp. 1635-1643.
- 山口峰夫 (1989): 有害赤潮鞭毛藻 *Gymnodinium nagasakiense* の増殖におよぼす水温, 塩分および光強度の影響, 日水誌, 第 55 巻, 11 号, pp. 2029-2036.
- 山口峰生・本城凡夫 (1990): 有害赤潮鞭毛藻 *Gymnodinium nagasakiense* (Dinophyceae) の同調的細胞分裂と分裂頻度による増殖速度の測定, 日本プランクトン学会報, 第 37 巻, 1 号, pp. 3-17.