

広島湾・呉湾における有毒プランクトンシストの 発芽要因と海域攪乱

長尾正之*・橋本英資**・吉田みゆき***・高杉由夫****

1. はじめに

広島湾・呉湾では、1992 年以来まひ性貝毒の原因種である渦鞭毛藻類 *Alexandrium tamarense* により、主要産品である養殖カキの有毒化が深刻な問題となっている。図-1 は、広島湾・呉湾底泥に含まれる *Alexandrium* 属シストの分布を 1987 年 9 月 (水産庁, 1988), 1993 年 5 月 (山口ら, 1995) および 1998 年 11 月の観測値で比べたものである。図-1 により, 11 年間の間に広島湾奥部全体にシストの分布域が拡大したこと, また, 広島湾奥部の海田湾と呉湾は他水域に比べて, シストの分布密度が高く, この二つの湾がシストの供給源である可能性があることがわかる。

以上を踏まえて広島湾・呉湾の総合的管理を行い, *A. tamarense* による被害を防ぐには, なぜ *A. tamarense* を含む *Alexandrium* 属が上述のように急速に勢力範囲を拡大し得たのか, その理由を知っておく必要がある。

Alexandrium 属は生育条件が悪くなると, 直径が 25~35 μm の円形または楕円形 (山口, 1998) で, 環境変化に耐える硬い殻を持つシストを形成する。また, シストの比重は海水よりもわずかに大きいため, 形成された後は海水中を沈降し海底上に堆積する。海底に達したシストは, 有機・無機質で構成される他の堆積物中に混じって存在する。そのため, いわゆる懸濁物質とはほとんど区別できない。さらに, *Alexandrium* 属シストは形成直後は発芽できず, 約 5 ヶ月の成熟期間が必要とされる (Anderson ら, 1987)。また, 発芽に適した固有の水温域が種ごとに存在する (石丸・福代, 1996)。例えば *A. tamarense* の場合, 15°C 以下の水温で高い発芽率を示すが, 逆に 15°C 以上の水温ではほとんど発芽しない (板倉・山口, 1999)。なお, 光が発芽を誘起している可能性も指摘されている (石丸・福代, 1996)。

Alexandrium 属シストに関する以上の知見と, 呉湾の堆積速度が約 11 mm/year (星加・塩沢, 1982) であることを考え合わせると, 呉湾・広島湾の海底に堆積した形

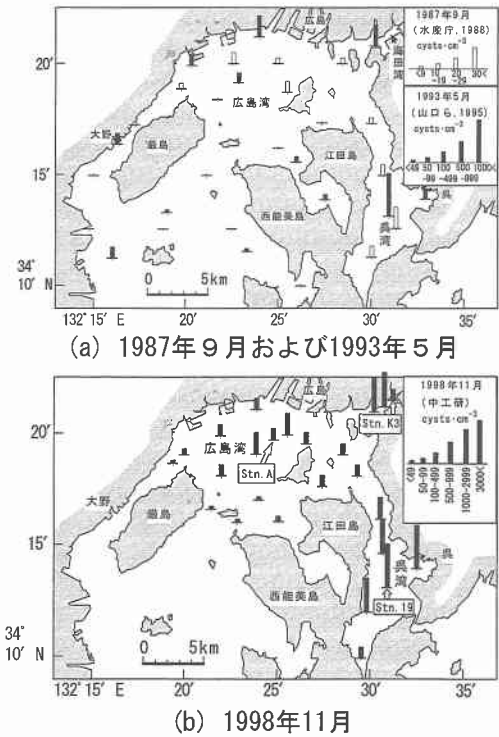


図-1 広島湾底泥中の *Alexandrium* 属のシスト分布と主要観測点

成直後のシストが発芽可能となる頃には, 海中から降り注ぐ他の懸濁物質とともにシストは底泥中に埋没してしまう。埋没したシストは発芽して栄養細胞を作ることができないため (石丸・福代, 1996), この状況が毎年維持されるなら, 発生する赤潮の規模も小さく, 水産業への被害も少ないと考えられる。

けれども, もし強い冬季季節風や台風などの海域攪乱により, 底泥中のシストが他の懸濁物質と共に海水中に再懸濁し, 光強度・水温等の発芽条件が満足される高さまで巻き上げられれば, シストは発芽し栄養細胞を作ることができる。そして, 形成された栄養細胞や巻き上げられたシストは, 冬季季節風等による鉛直循環流の輸送・拡散過程により, 他水域に移動し, 勢力範囲を拡大できる

* 正会員	工博	(独)産業技術総合研究所	海洋資源環境研究部門
** 正会員		(独)産業技術総合研究所	海洋資源環境研究部門
***		広島大学大学院	生物圏科学研究科
****	農博	(独)産業技術総合研究所	海洋資源環境研究部門

と考えられる (高杉ら, 1998)。

本研究では、以上の仮説に基づき、広島湾・呉湾内で強風に由来する海域攪乱とシスト発芽要因との関係を考察するため、以下の調査を行った。まず、セディメントトラップを広島湾に設置し、底泥から巻き上がるシストの量と到達高さを調べた。また、捕集されたシストが海底から巻き上げられた古いシストか否かを、蛍光分析手法 (板倉・山口, 1999) により判定した。また、発芽に必要な光強度と水温の鉛直分布の季節的な違いを、水中光量子計と小型水温計により調査した。この他、攪乱によりシストと共に海底から海中に巻き上がる懸濁物質の鉛直分布を把握するために、海底近傍の濁度と流速を観測した。そして、この観測の一部で捉えられた海域攪乱による懸濁物質の巻き上がりを、一次元数値モデルを使って再現した。

2. 観測方法

(1) セディメントトラップを用いたシスト調査

底泥からのシストの巻き上がりを把握するために、図-1(b) 中の Stn. A, Stn. 19, Stn. K3 にセディメントトラップを設置し、シストの捕集を行った。各測点の平均水深は、Stn. A が 17 m, Stn. 19 が 22 m, Stn. K3 が 8 m である。設置期間は、Stn. A は①2000年2月17日～24日と②3月21日～22日の二回で、Stn. 19 と Stn. K3 では②と同期間である。Stn. A での期間①では、口径が 150 mm で捕集ボトルを 7 本持つセディメントトラップ (SMC7S-500, 日油技研工業製) を海底上 7 m (B+7 m) と海底上 2 m (B+2 m) の二層に設置し、1 日毎に試料を採取した。一方、期間②の観測では、3 地点全てで、口径が 100 mm のセディメントトラップを水深 3 m と海底上 1 m (B+1 m) の二層に 24 時間設置し、試料を採取した。採取試料は分析室に持ち帰った後、5% 中性ホルマリンで固定し、*Alexandrium* 属シストの分析試料とした。*Alexandrium* 属シストの計数は、A 群 (*A. tamarense* および *A. catenella* シストの合計) と B 群 (*A. affine*: A 群以外の *Alexandrium* 属シストの合計) ごとに分けてから、赤潮生物研究指針 (福代・松岡, 1987) にしたがって実施した。

(2) 蛍光分析によるシスト成熟度の調査

A 群のシストが形成直後のものか発芽直前かを判断するため蛍光分析 (板倉・山口, 1999) を行い、青色励起光下で赤色発光色を呈するシストのうち、細胞内が澱粉粒で満たされているものを形成直後とし、発色が放射状で澱粉粒が不明瞭な場合を発芽直前のシストとした。分析は、①の期間中に Stn. A で確認された全ての *Alexandrium* 属シストと、②の期間中に Stn. 19 の上下二層および Stn. K3 の下層 (B+1 m) で確認されたシストに

ついて実施した。

(3) 海水中の *Alexandrium* 属遊泳細胞調査

海水中の *Alexandrium* 属遊泳細胞を調べるために、2000年2月24日は Stn. A で、3月21日は Stn. A, Stn. 19, Stn. K3 でバンドーン型採水器を用いて採水を行った。採水層は三層とし、2月24日は Stn. A の水深 0, 5, 10 m, 3月21日は Stn. A, Stn. 19 の水深 3, 10, B+1 m と Stn. K3 の水深 3, 5, B+1 m とした。採取試料は 5% 中性ホルマリンで固定した。この試料を 24 時間静置させた後、沈殿量の容量測定を行い、光学顕微鏡下で遊泳細胞の種類数と細胞数を計数した。

(4) シアー流速計による懸濁物質鉛直分布の

連続観測

海域攪乱により海底から巻き上がる懸濁物質を捉えるために、1997年8月12日から9月19日までの39日間にわたり、図-1(b) 中の Stn. A においてシアー流速計による濁度鉛直分布を行った (朱ら, 1999)。なお、シアー流速計は海底上 0.5, 1, 1.5, 2 m の高さに二成分電磁流速計と赤外後方散乱方式の濁度計を有している。

(5) 光強度・水温鉛直分布の連続観測

海中の光と水温は、季節により異なる。そこで、光強度鉛直分布の違いを秋と冬で比べるために、以下の調査を実施した。

Stn. A の海底に海底酸素消費量測定装置 ADO2000 (長尾ら, 2000) を、また水深 3 m に水中光量子計 (MPQ-I, 三洋測器製) を設置し、秋季 (2000年9月12日～10月3日) と冬季 (2000年1月27日～3月2日) に連続観測を行った。なお、ADO2000 に付属の水中光量子計は実際は海底上 0.5 m の位置にあるが、以下では簡単のためにこれが海底直上にあると仮定する。

観測中の海水が光学的に一様であれば、水深 D (m) での光強度 $Q(D)$ ($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$) は、次式で表すことができる (岡見・岸野, 1972)。

$$Q(D) = Q_0 \times \exp[-K \times (D-3)] \cdots \cdots (1)$$

ここで、 Q_0 は水深 3 m における光強度の観測値 ($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$)、 H は観測時の全水深 (m) であり、ここでは ADO2000 の深度計の値とする。なお、 K は消散係数 ($1/\text{m}$) であり、ADO2000 に付属の光強度計の値を Q_0 とすると、次式で求められる。

$$K = \frac{2.3}{H-3} [\log_{10} Q_0 - \log_{10} Q_0] \cdots \cdots (2)$$

この他、水温鉛直分布を捉えるために、小型水温計 (StowAway Tidbit, onset 製) を水深 1 m～17 m まで 1 m 間隔で配置するとともに、海底上 25 cm (B+0.25 m) の水温を ADO2000 付属の水温計で記録した。

3. 観測結果

(1) 底泥からのシストの巻き上がり

2000年2月に Stn. A でセディメントトラップにより捕集された *Alexandrium* 属シストの数を表一1に、また3月に Stn. A, Stn. 19, Stn. K3 で捕集されたシスト数を表一2示す。

2月の観測では、*Alexandrium* 属シストは、水深 B+2 m と B+7 m の両方で確認された。A 群と B 群のシスト数の合計は、B+2 m では $0.04\sim0.18$ cells/cm²/d、B+7 m では 0.02 cells/cm²/d であり、B+2 m で B+7 m の約9倍の量のシストが捕集された。

一方、3月の観測では、*Alexandrium* 属シストは Stn. 19 と Stn. K3 の表層を除く全てで確認された。また、A 群と B 群を合わせたシスト数の合計は、Stn. A の表層(水深 3 m)で 0.095 cells/cm²/d、底層(B+1 m)で 0.844 cells/cm²/d であった。一方、Stn. 19 と Stn. K3 の底層(B+1 m)では、それぞれ 0.055 、 0.330 cells/cm²/d のシストが捕集された。

(2) 蛍光分析によるシストの成熟度

表一3に、蛍光分析の結果を示す。成熟度が不明な分析結果が1件あったものの、それ以外は全て発芽直前のシストと判定され、形成された直後の新しいシストは皆無であったことがわかる。

なお、遊泳細胞調査により、Stn. A の水深 0 m (2月)、3 m (3月)、Stn. 19 の水深 3 m、および Stn. K3 の水深 3 m のいずれも表層で、*Alexandrium* 属の遊泳細胞が観測された。しかし蛍光分析結果によれば、セディメントトラップ中のシストは全て発芽直前の古いシストである。したがって、これらは海中の遊泳細胞から形成された新しいシストではなく、海域攪乱により海底から巻き上がり、海中に再懸濁した古いシストと考えられる。なお、*Alexandrium* 属シストは底層だけでなく Stn. A (平均水深 17 m) の B+7 m と水深 3 m でも捕集されている。このことから、海底から巻き上がったシストは、光が十分に届く表層まで達していると推察される。

(3) 秋季と春季での光強度・水温鉛直分布の違い

図一2は、Stn. A での水中光強度鉛直分布を秋と冬で比べたもので、白が光強度が $50 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 以上、黒が $0 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ を示す。また、図中の等値線は 10, 20, 30, 40, $50 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ を表す。

渦鞭毛藻類のシストが発芽するために必要な光条件はよく分かっていないが、少なくとも珪藻類のシストが必要とする $10 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ より弱い光照射でも発芽しうると考えられている(板倉, 2000)。そこで、下側の閾値として図一2中の $10 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ の等値線に着目すると、秋は海底上 7 m、冬は海底直上が条件を満たす。また、板

表一1 Stn. A でセディメントトラップに捕集された *Alexandrium* 属シストの気 (2000年2月)

		(cells/cm ² /d)	
設置水深	設置期間	A 群	B 群
B+2 m	2月17日12時~18日12時	0.	0.
	18日12時~19日12時	0.06	0.
	19日12時~20日12時	0.04	0.
	20日12時~21日12時	0.06	0.
	21日12時~22日12時	0.06	0.
	22日12時~23日12時	0.12	0.06
	23日12時~24日08時	0.	0.
B+7 m	2月17日12時~18日12時	0.	0.
	18日12時~19日12時	0.	0.
	19日12時~20日12時	0.	0.
	20日12時~21日12時	0.02	0.
	21日12時~22日12時	0.	0.
	22日12時~23日12時	0.	0.
	23日12時~24日08時	0.	0.

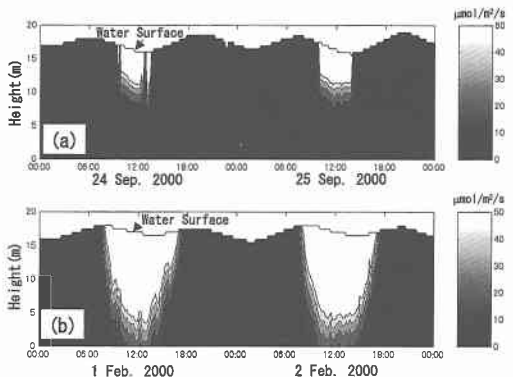
表一2 Stn. A, Stn. 19, Stn. K3 でセディメントトラップに捕集された *Alexandrium* 属シストの数 (2000年3月)

(cells/cm ² /d)			
測点	水深	A 群	B 群
Stn. A	3 m	0.063	0.032
	B+1 m	0.469	0.375
Stn. 19	3 m	0.000	0.000
	B+1 m	0.055	0.000
Stn. K3	3 m	0.000	0.000
	B+1 m	0.220	0.110

表一3 Stn. A, Stn. 19, Stn. K3 でセディメントトラップに捕集された *Alexandrium* 属シスト (A 群) の蛍光分析結果

		(cells/cm ² /d)			
測点	設置水深	設置期間	発芽直前	不明	
Stn. A	B+2 m	2月18日12時~19日12時	0.06	—	
		19日12時~20日12時	0.04	—	
		20日12時~21日12時	0.06	—	
		21日12時~22日12時	—	0.06	
		22日12時~23日12時	0.12	—	
	B+7 m	2月20日12時~21日12時	0.02	—	
Stn. 19	B+1 m	3月21日11時~22日11時02分	0.06	—	
Stn. K3	B+1 m	3月21日9時38分~22日9時50分	0.22	—	

*) 形成直後のシストは確認されなかった。



図一2 Stn. A における光強度鉛直分布の季節による違い

倉・山口 (1999) は、光強度を $50 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ とし発芽率の実験を行っている。仮にこの値が発芽に必要な十分な光強度と考えれば、冬は海底上 5 m 以上、秋は 12 m 以上の層が条件を満たしている。

図-3 は、図-2 と同じ期間についての水温変化を、Stn. A の水深 1 m, 10 m および海底上 25 cm で比べたものである。これによると、秋の平均水温は 23°C 以上あり、一方、冬は 12.5°C 以下である。A. *tamarense* シストは水温 15°C 以上では発芽できないので、海域攪乱により底泥中のシストが光の届く層に到達したと仮定すると、秋では水温が高すぎて発芽できない。

以上から、冬は秋よりもシスト発芽に好適であり、風による巻き上がりでシストが底泥中から海中に再懸濁する程度か、あるいは数 m 巻き上がれば良いと言える。

4. モデルによる懸濁物質巻き上がりの再現

Alexandrium 属シストの発芽が光に誘起される可能性があること (石丸・福代, 1996) から、底泥内のシストが、海域攪乱によってどの高さの水深まで巻き上げられるかは、重要な問題である。前述のように、底泥内のシストは他の懸濁物質と見分けができない状態で海底に堆積していることから、高杉ら (2001) は、シストの巻き上がり現象を単なる海底懸濁物質濃度の拡散現象と仮定した。そして、シアー流速計で捉えられた懸濁物質濃度鉛直分布の時間変化を再現し、その結果を使ってシスト巻き上がり高さの推定を行っている。

図-4 に 1997 年 9 月 16 日の強風時 (台風通過時) に Stn. A においてシアー流速計で観測された濁度分布と高杉らによる再現結果を示す。図-4(a) が海底近傍流速として与えたシアー流速計による海底上 0.5 m の流速値であり、(b) が海底上 1 m と 1.5 m でのシアー流速計による濁度濃度と計算値である。なお、ここでは巻き上がり現象は鉛直方向のみとし、水平移流、水平拡散は省略している。また、想定が強風下の海域攪乱状態であることから、鉛直拡散係数が濁度分布を支配するものと考え、鉛直流速は省略されている。計算値は実測値に比べて濁度のピークが 20 分程度遅れて現れているが、それ以外では計算値は実測値をよく再現している。

図-5 は、図-4 の結果による濁度鉛直分布の時間変化である。縦軸は海底からの高さ、横軸は各深度における濁度 C からバックグラウンド濃度 C_{bk} を引いたものである。また、分布に添えた時刻は、図-4 に対応した時間を表している。海底の流速が掃流限界流速を超えた時点から巻き上がりが始まり、流速が増すとともに指数関数的な鉛直分布が増加する。そして、流速が最大値に達した直後の 18:30 頃に、海底での濁度濃度は最大となっている。その後、流速の減少とともに粒子が沈降するため、

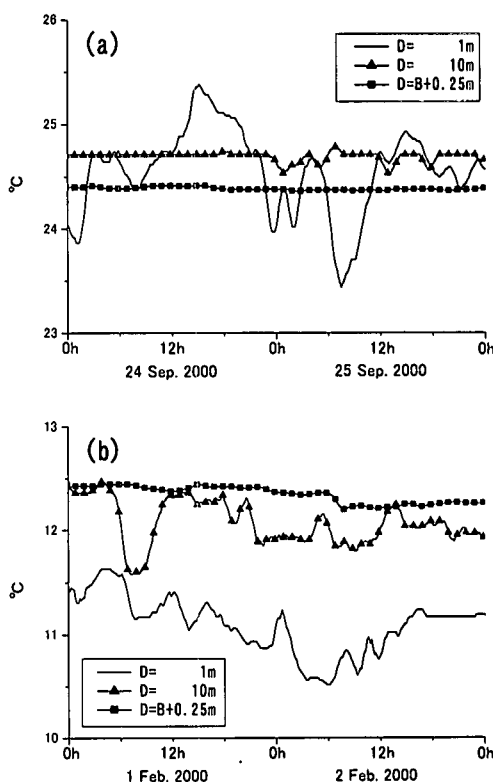


図-3 Stn. A における水温の季節による違い

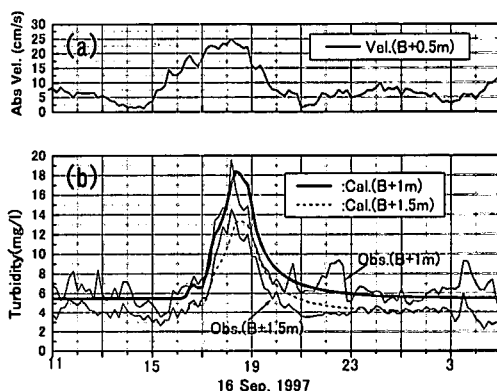
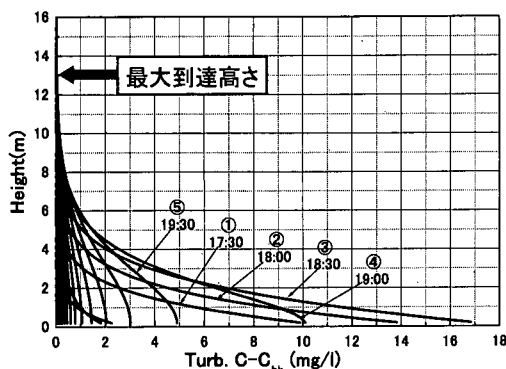


図-4 台風 9719 号通過時の Stn. A における懸濁物質濃度 (濁度) の再現計算結果

海底から濃度の減少が始まる。しかし、この時点でも鉛直拡散による上層への物質供給は行われており、上層の濁度濃度は増加している。さらに流速が弱まり、掃流限界流速以下となると、沈降し堆積する物質量が增加し、濁度濃度はさらに低下する。この傾向は、拡散と沈降がバランスするまで続く。このように、図-5 に示されている濃度物質の供給源は全て海底であり、濃度分布の上端は海底懸濁物質の到達位置、つまり海底からの巻き上が



図一5 懸濁物質濃度鉛直分布の時間変化 (計算結果)

り高さを表している。計算結果では、海底上13mまで濁度濃度値が現れており、海底懸濁物質が攪乱により海面近くまで巻き上げられることがわかる。前述したセディメントトラップ観測でも水深3mで *Alexandrium* 属シストが捕集されており、ここでの計算結果とよく符合している。以上のことから、海底懸濁物質中に含まれている *Alexandrium* 属シストは、海域攪乱により海中に巻き上げられ、その一部は強い光が当たる海面近くに到達できることが確認された。

5. まとめ

本研究の主要な結論は、以下の通りである。① 2000年3月に広島湾・呉湾で行ったセディメントトラップ調査により、水深3mと海底上1mで *Alexandrium* 属シストが確認された。また、捕集されたシストの中に形成直後のものは無く、1件の不明を除き全てが発芽直前のものであった。以上から、水深3mで捕集されたシストを含めて、全て強風等の攪乱により底泥中から巻き上がったものであることがわかった。② 2000年の秋と冬に、Stn. Aの水深3mと海底上0.5mで光強度の連続観測を実施し、光強度鉛直分布の時間変動を計算した。その結果、秋はシストが海底から5m以上まで巻き上がらないと発芽に十分な光強度を確保できず、また仮に表層まで巻き上がっても水温が高過ぎて発芽できない。一方、冬は海底上まで光が十分に届いており、水温も発芽可能な範囲にあるので、シストが底泥中から海底上に巻き上がる程度で十分に発芽しうる。③ 底泥中のシストが海底懸濁物質とともに巻き上がると仮定し、Stn. Aで観測された強風時(台風通過時)における濁度濃度を海域攪乱によるシストの巻き上がり現象と考え、その鉛直プロファイルを、鉛直一次元数値計算により再現し、巻き上

がり高さを求めたところ、海底上13mまで巻き上がるという結果が得られた。よって、これ以上の攪乱が冬季季節風によって生じるのであれば、シストは発芽に適した光・水温条件を満足する表層まで十分に到達できると予想される。

謝辞：蛍光分析による *Alexandrium* 属シストの成熟度判定は、瀬戸内海区水産研究所 赤潮生物研究室 山口峰生室長の御指導により行った。本研究は、環境省公害防止技術特別研究「海域攪乱が内湾生物環境に与える影響評価技術に関する研究」の一環として実施された。同特別研究の評価専門委員会である「内湾水域生物環境検討専門委員会」の委員の方々からは、貴重なご助言を数多く頂いた。以上、ここに記して深甚なる謝意を表する。

参考文献

- 石丸 隆・福代康夫 (1996): 生活史と増殖, 海洋植物プランクトン—その生理・生態—, 月刊海洋, 号外 No. 10, pp. 96-102.
- 板倉 茂・山口峰生 (1999): 広島湾における *Alexandrium tamarense* シストの存在密度と発芽率の季節変動, バイオニア特研平成10年度研報, 瀬戸内水研, pp. 12-17.
- 板倉 茂 (2000): 沿岸性浮遊珪藻類の休眠細胞に関する生理生態学的研究, 瀬戸内水研研報, 第2号, pp. 67-130.
- 岡見 登・岸野元彰 (1972): 海中光の測定, 海洋測定法 (黒木敏郎編), 東京大学出版会, pp. 107-136.
- 水産庁 (1988): 昭和62年度内湾海域シスト調査報告書 (日本水産資源保護協会編), pp. 53-61.
- 朱 小華・高杉由夫・橋本英資・安田秀一 (1999): 広島湾における底層懸濁物質の濃度変動, 沿岸海洋研究, Vol. 37, No. 1, pp. 59-67.
- 高杉由夫・埜口英昭・安田秀一 (1998): 広島湾における風による鉛直循環流と底泥プランクトンシスト分布, 水産海洋研究, 第62巻, 第3号, pp. 187-198.
- 高杉由夫・橋本英資・長尾正之・朱 小華 (2001): 風が広島湾底泥中の有害プランクトンシストの分布に及ぼす影響, 海と空, 第77巻, 第2号 (印刷中).
- 長尾正之・朱 小華・橋本英資・吉田みゆき・高杉由夫 (2000): 広島湾における海底酸素消費量の連続測定, 土木学会論文集, No. 663/II-53, pp. 109-117.
- 福代康夫・松岡数充 (1987): 赤潮生物の研究手法, 赤潮生物研究指針 (日本水産資源保護協会編), pp. 85-101.
- 星加 章・塩沢孝之 (1982): 堆積物からみた呉湾の汚染の歴史, 中工試報告, No. 18, pp. 9-18.
- 山口峰生・板倉 茂・今井一郎 (1995): 広島湾底泥における有毒渦鞭毛藻 *Alexandrium tamarense* および *Alexandrium catenella* シストの現存量と水平鉛直分布, 日本水産学会誌, Vol. 61, No. 5, pp. 700-706.
- 山口峰生 (1998): 赤潮, 沿岸の環境図 (平野敏行編), フジ・テクノシステム, pp. 181-190.
- Anderson, D. M., C. D. Taylor and E. V. Armbrust (1987): The effects of darkness and anaerobiosis on dinoflagellate cyst germination, Limnol. Oceanogr., Vol. 32, pp. 340-351.