

横浜港内の赤潮の発生と対策

——ウォーターフロントの公園における二例——

矢内栄二*・横堀浩一**・飯田 勲**・上杉忠男***

1. はじめに

1989年に横浜市内で開催された国際博覧会会場内の、日本丸メモリアルパークと海のパビリオンでは、横浜港内の海水を利用して展示を行った。しかし、横浜港内では毎年夏期に赤潮が発生するため、開催期間中における上記パビリオンにおいてはあらかじめ海水浄化対策を行うことが必要とされた。従来から赤潮対策として一般的に行われてきた方法（高分子凝集法、海面回収法など）は短期的な効果は期待できるが、6ヵ月間の開催期間中に連続して効果を維持させることは難しい。そこで新たな対策工を検討するため、博覧会開催前の2ヵ年にわたって赤潮の調査と対策工の試験を行い、パビリオンにおいては2種類の対策工を実施した。

本研究は、2ヵ年の調査の結果から横浜港内での赤潮の発生と消滅の状況について検討し、使用した対策工の成果について紹介したものである。

2. パビリオンの配置・施設

博覧会は、図-1に示すように横浜港奥部のみなとみらい21計画予定地で開催された。日本丸メモリアルパークは、大岡川河口部の長さ200m、幅25m、水深10mのドックに帆船を展示しているパビリオンであり、横浜港内と内径1200mmのパイプ2本で海水の交換が行われている。海のパビリオンは会場北側の水深10mのところに、高さ5m、1辺20mの六角形のポンツーンを浮かべ、イルカのショーを行っているパビリオンである。これまで、赤潮は毎年6月から9月の日射の続いた日に発生していたが、これによるハゼを中心とする魚類の大量死は見られていない。日本丸メモリアルパークでは1986年にドック奥部からドック外へ排水するポンプ施設を設置し、内径300mmのパイプにより約0.25m³/secを排水させているものの、赤潮に対する効果は全く認められていない。ドックへの汚濁物質負荷についてみると、日本丸からの排水はほとんど排水パイプにより

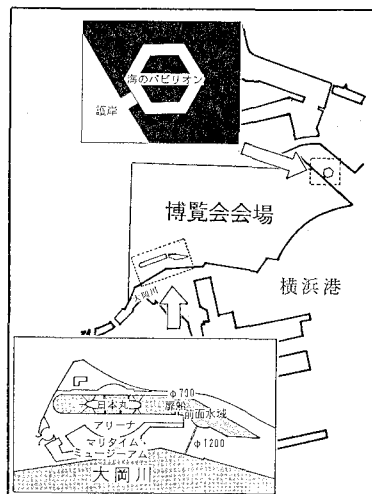


図-1 対象地点

ドック外へ排水されており、月に1~2回行われるデッキ清掃の排水があるだけである。一方、海のパビリオンの底部には直径50cmの通水口があり、パビリオン外の海水との自然交換が行われている。

3. 調査項目と方法

調査は、赤潮の原因を探ることと使用した対策工の成果を確認するために行った。日本丸メモリアルパークにおいては、図-2の地点での温度躍層の変化と破壊状況、水質・底質の変化、プランクトン数の変化と鉛直分布について開催前の2ヵ年の間の4ヵ月間調査した。赤潮の発生は透視度で判定した。水温測定は、水深方向に並べた15個の熱電対型温度計により1時間ごとに行った。観測位置は、1年目(1987)の観測では図-2の③で定置観測し、2年目は①~④の4ヵ所を順に測定した。透視度は1m型透視度計により1日1回の定時測定を行っ

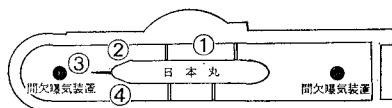


図-2 水温観測位置

* 正会員 工修 東亜建設工業(株)技術本部設計部
 ** 東亜建設工業(株)横浜支店
 *** 横浜市港湾局みなとみらい21建設所

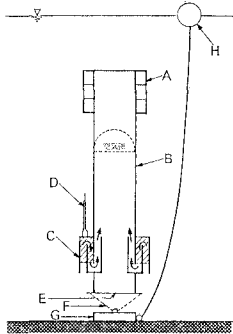


図-3 間欠曝気装置

た。水質・底質調査は 3~4 回、プランクトンは5回、それぞれ赤潮の発生時と未発生時に行った。海のバピリオンでは、開催期間中にバピリオン内と横浜港内の海水の SS 値を比較した。

4. 日本丸メモリアルパークにおける赤潮の性質

(1) 対策工法 (間欠曝気装置)

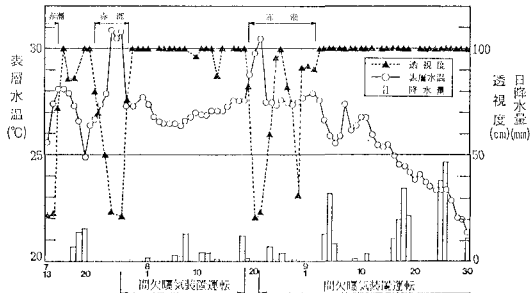
日本丸メモリアルパークでは赤潮対策として間欠曝気装置を使用した。その理由は、温度躍層が重要な原因の一つであること、大きな施設を設置することが不可能であることの2つによるものである。装置は、図-3 に示すように (A) 自立用ブイ、(B) 揚水筒、(C) 空気室、(D) 送気管、(E) 吸水口、(F) チェーン、(G) シンカー、(H) 標示ブイの各部からなっている。原理は、ブイによって水中に自立した本体に、陸上に設置されたコンプレッサーから空気室に送られた空気が図中斜線で示した部分のように充満し、一定量蓄積すると空気室中央の開口部から一挙に噴出し、空気弾となって揚水筒内の水をおしあげるものである。揚水筒上端開口部より放出された空気弾は、周囲の水を巻き込みながら温度躍層を破壊して表層まで上昇する。これら一連の動作が間欠的に行われ、大規模な対流攪拌作用を生じさせ、上下層の水温を均一化する。本装置は図-2 に示すように、日本丸の船首と船尾にそれぞれ1台ずつ設置した。

(2) 赤潮の性質

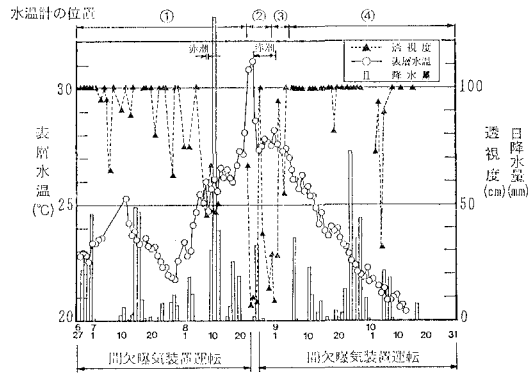
表-1 は水質と底質の分析結果である。水質の分析結果は環境基準を満たしていたが、2年目の COD 値は前年よりも高くなり、水質が悪化傾向にあることが認められた。DO 値は、赤潮発生時に異常に高くなっているがこれは赤潮の原因である植物プランクトンが盛んに活動し光合成を行って酸素を供給しているためで、飽和溶存酸素量 (7~8 mg/l) を越えた値となっている。底質については、赤潮未発生時でも全窒素が富栄養状態といわれる 2~3 mg/g を越えており、底泥の富栄養状態は変化していない。図-4 (a), (b) は表層の水温と透視度の比較

表-1 水質・底質分析結果

測 点	1987年				1988年	
	7月13日		8月18日		6月27日	
項 目	船 首	船 腹	船 首	船 腹	船 首	船 腹
水	COD(mg/l)	1.4	1.8	1.2	1.0	2.8
	全窒素(mg/l)	1.09	3.98	0.84	0.73	1.27
	全リン(ing/l)	0.08	0.10	0.12	0.11	0.12
	塩分濃度(%)	2.87	2.79	2.87	2.92	2.56
質	pH	7.8	7.8	7.8	7.9	7.4
	DO(mg/l)	16.3	15.9	7.7	6.5	8.0
	強熱減量(%)	14.0	15.7	14.7	12.0	4.8
	COD(mg/g)	45.2	46.8	51.7	45.5	44.5
底	全窒素(mg/g)	4.27	3.74	3.55	3.01	4.41
	全リン(mg/g)	1.17	0.88	1.04	0.70	1.58
	pH	7.6	7.6	7.8	7.7	7.5
	透 視 度 (cm)	21.5		100.0		100.0
水面の温度 (°C)		25.8		27.6		22.8



(a) 1年目の結果



(b) 2年目の結果

図-4 表層水温と透視度の関係

を行った結果を示したものである。1年目の結果では、7月22日から続いた晴天によって表層水温が上昇するにつれて透視度も低下し始め、7月25日には22cmまで低下した。この透視度の最も悪化した日に運転を開始

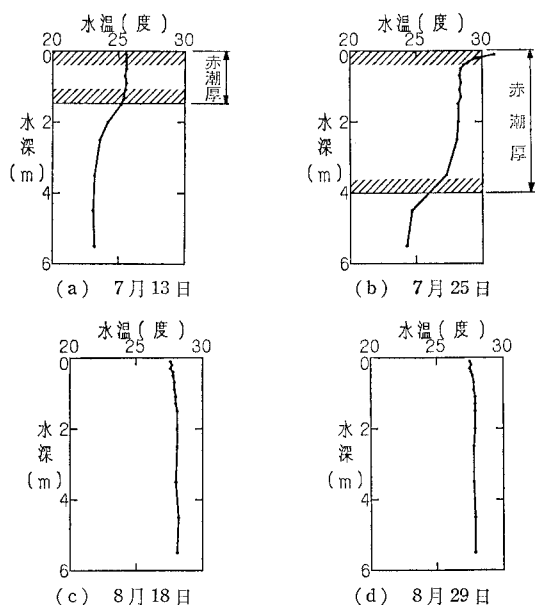


図-5 水温の鉛直分布と赤潮厚さ

した間欠曝気装置は2日後には透視度を1mにまで回復させ、表層水温も27°C前後に低下させた。その後は、間欠曝気装置により透視度は高い状態が維持され赤潮の発生を十分抑制している様子がみられるとともに、表層水温も27°C前後のはぼ一定の値に保たれている。図-5は間欠曝気装置の運転状況と水温の鉛直分布の関係について比較したものである。赤潮時の図-5(a)では、上層と下層の間に3°C前後の明確な温度躍層がみられるが、これは赤潮厚さとほぼ一致しており、赤潮が当地点では水温が25°Cを越えた部分で発生していることが認められる。図-5(b)は図-4(a)で透視度の最も悪化した日であるが、4mの躍層の上にさらに30°Cを越える非常に水温の高い層が存在している。一方、図-5(c)は間欠曝気装置運転後で透視度も良好であった日であるが、間欠曝気装置によって鉛直方向に海水が攪拌されたため、温度躍層が発生しなくなっている。この日の一日の水温の変化をみても当日は終日温度躍層は発生せず、一日の変化量も非常に少ないことが認められている。

次に図-4(b)の結果についてみると、2年目の結果の大きな特徴は、晴天の日が平年に比べて異常に少なく、降水量が多かったことである。そのため、前年のように水温の上昇との明確な相関性が見られないが、間欠曝気装置が停止した8月24日からは表層水温が30°Cを越えて、透視度の急激な低下と赤潮の発生が見られており、間欠曝気装置の運転が赤潮の発生を抑制していることがわかる。次に、装置の有効範囲についてみるために、4地点のそれぞれ最も水温の高かった日の鉛直分布

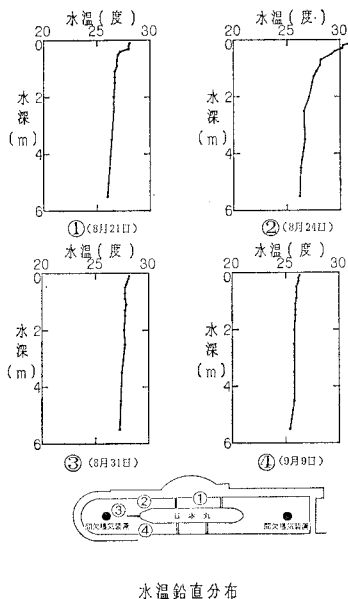


図-6 各地点の水温の鉛直分布

を示したものが図-6である。日本丸船頭の①の位置では約40cmの温度躍層が発生し、右舷船首付近の③の位置でも70cm程度の温度躍層が見られ、海水の鉛直混合が見られていない。間欠曝気装置から10m程度離れた③では、最下部の水温が4ヶ所中で最も高いにもかかわらず、十分に鉛直方向に均一化されている。日本丸左舷船首付近の位置④は午前中の日射の強い地点であるが、ほぼ均一な水温分布が見られている。しかし、最下部の水温が25°Cと低いので反対側の②と同様に水温の高い日には躍層の発生している可能性があり、間欠曝気装置がこの位置でも完全に影響しているとは言いがたい。以上のことから、博覧会会期中には①と反対側の位置に1台ずつ、計2台を追加して設置した。

当地区における赤潮プランクトンの性質を知るために、プランクトンの成分を調べた結果を表-1に示す。赤潮の原因である植物プランクトンについて見ると、当地区での赤潮プランクトンは渦鞭毛藻類であることがわかる。種名については殻が薄いため同定できなかった。プランクトン数の特徴について見ると、赤潮未発生時には珪藻プランクトンと渦鞭毛藻類の両方が存在し、これを捕食する動物プランクトンの個体数も多いが、赤潮の発生時には渦鞭毛藻類が植物プランクトンの99.7%を占め、個体数も倍近くになっているにもかかわらず、これを捕食する動物プランクトンの個体数は1/5となってしまう。図-7は、表層の植物プランクトン数と動物プランクトン数との比(以下プランクトン比と呼ぶ)を示したものである。これによると、海水が良好で赤潮が発生しないときにはプランクトン比が 10^5 以下である

表-2 プランクトン分析結果

測点 項 目		1987年			1988年											
		② ③			①：6月27日			②：8月22日			③：9月5日			④：9月12日		
		8/18	9/2	10/27	上層	中層	下層	上層	中層	下層	上層	中層	下層	上層	中層	下層
植物プランクトン	珪藻類 Bacillariophyceae	555	20	215	319	372	134		48	11	3	3	1	54	79	330
	ラフィド藻類 Heterosigma sp.				4	6										
	渦鞭毛藻類 Gonyaulax triacantha					1	3									
	Prorocentrum sp.							2,661	1,491	804	605	815	246	46	9	7
	Dinoflagellates	1,926	6,353		30	2		55	33		7	1		3	6	7
	ミドリムシ藻類 Englenophyceae	77		2	95	5			4	7						
	その他 Micro-flagellates	9		426	1,590	533	206	256	141	122	35	68	46	256	485	300
動物プランクトン	総細胞数 (細胞/ml)	2,567	6,373	643	2,039	921	340	2,976	1,720	944	643	887	293	359	579	644
	総種類数	7	4	16	7	7	3	5	6	6	3	6	5	9	6	6
動物プランクトン	纖毛虫類 Mesodinium rubrum				19.0	34.0	34.0									
	Tintinnopsis radix				0.2											
	Tintinnopsis sp.				2.4	9.2	8.8							0.4	0.4	
	Ciliata				2.4	4.8	4.4									
	多毛類 Polychaeta larva				0.2	0.4	0.8	0.4	0.8	1.0	4.2	2.8	2.8	0.8	1.6	16.0
	線虫類 Nematoda						0.4							128.0	0.4	0.4
	甲殻類 Copepodite of Oithona						1.2	0.4	0.4	0.2	0.4			0.4		1.2
	Nauplius of Copepoda				0.4				0.2	2.0	3.6	2.0	49.6	1.2	2.4	
	Nauplius of Balanomorpha				0.6		0.4	1.6	2.0	0.6	5.2	5.6	3.2	23.2	33.6	2.8
	尾索類 Appendicularia larva						0.4									
動物プランクトン	その他	30.1	6.0	7.0				1.2			1.6	1.2	1.2	19.8	2.0	13.6
	総個体数 (個体/l)	30.1	6.0	7.0	25.2	48.4	50.4	3.6	3.2	2.0	13.4	13.2	9.2	173.0	39.2	36.4
	総種類数	4	3	2	7	4	9	4	3	4	6	5	5	12	7	8
透 視 度 (cm)		100	80	100	100.0			67.0			100.0			100.0		

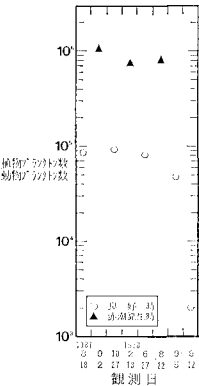


図-7 プランクトン比の変化

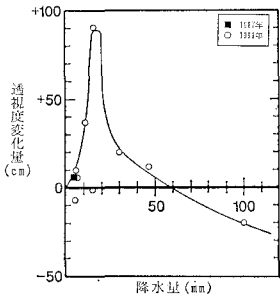


図-8 降雨と透視度の関係

が、赤潮が発生した日には 10^6 前後まで急激に増加している。このことから、赤潮発生の際には爆発的にバランスが崩れているものとみられる。

最後に、気象と透視度との関係を知るため、日降水量

と透視度の変化量(=当日の透視度-前日の透視度)を検討したのが図-8である。図-8では、日降水量が15 mmを越えると透視度が良くなるが、100 mm以上ではかえって透視度が悪化していることがわかる。この傾向を示したのが図中の実線であり、日降水量が60 mmを越えると透視度が悪化するものとみられる。

5. 海のパビリオンにおける赤潮の対策

(1) 対策工法 (大型濾過装置)

2ヵ年にわたる日本丸メモリアルパークでの調査から、横浜港内の赤潮の状況と間欠曝気装置の効果が明らかとなった。海のパビリオンでは当初通水口からの自然海水交換を行っていたが、既述のように赤潮がパビリオンの底部以下まで発達することが知られたことから、対策を行うことが必要とされた。しかし、海のパビリオンではイルカの飼育を行っていたため間欠曝気装置が使用できない。そこで、躍層厚以下の底層部の海水を図-9のような大型の濾過装置により取水する方法を使用した。これは、パビリオンが係留されている護岸の前面に碎石に

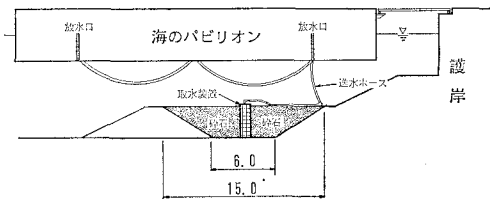


図-9 大型濾過装置

よる濾過帯を設け、その中に合成樹脂性の透水材を巻いた管径1mの多孔鋼管を設置して、この中に透過してくる海水を水中ポンプによって送水するものである。排水口は既存の通水口からの自然排水のみとした。また、濾過材料の決定にあたっては、砂と碎石の2種類が検討されたが、予備実験の結果から透水性の高い40mm粒径の碎石が選択された。

(2) 対策工の効果

海のパビリオンは水深が4mと浅いことから、対策工の効果としてパビリオン底部までの透明度を比較した。その結果、濾過装置設置前までは透明度が1~2m程度であったが、設置後は底部の透視が可能となるまで改善

された。パビリオン内の海水の色も、濾過装置設置前は緑色または暗茶褐色を呈していたが、設置後は透明となり観客へのイメージが大きく改善された。赤潮発生時のパビリオン内の海水と横浜港の海水のSS値を比較したものが表-3である。赤潮発生時に横浜港内でSS値が24.5mg/lであったものがパビリオン内では7.5~10.5mg/lまで改善され、赤潮の影響は受けなかったことがわかる。

6. む す び

ウォーターフロント開発にともない、海水を利用した施設の設置が増加しつつある。施設が大型化することにつれて、水質浄化装置も複雑化・大型化することが予想されるが、本研究で報告したような小規模の閉鎖水域では、間欠曝気装置や濾過装置でも赤潮に対して十分効果があることが認められた。

観測の実施にあたり、東亜建設工業(株)技術研究所五明美智男氏および石崎郁夫氏から多大な協力を得た。記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 川原田裕, 他: 海洋プランクトン, 海洋科学基礎論座, 東海大学出版会.
岡市友利編: 赤潮の科学, 恒星社厚生閣.
丸茂隆三編: 海洋プランクトン, 東京大学出版会.
矢内栄二・堺 和彦・横堀浩一・上杉忠男 (1988): 日本丸メモリアルパークの赤潮とその対策, 土木学会海洋開発論文集, Vol. 4, pp. 57~61.

表-3 SS 測定結果

位 置	SS 値 (mg/l)
パビリオン	流入口 7.5
	奥 部 10.5
横 浜 港 海 水	24.5