

閉鎖性海域での海陸風とクロフィルaの応答関係

RESPONSE OF CHLOROPHYLL-a TO SEA-LAND BREEZE IN A SEMI-ENCLOSED SEA

長尾正之¹・朱小華²・橋本英資³・吉田みゆき⁴・高杉由夫⁵

Masayuki NAGAO, Xiaohua ZHU, Eisuke HASHIMOTO,
Miyuki YOSHIDA and Yoshio TAKASUGI

¹正会員 博(工) 工業技術院 中国工業技術研究所(〒737-0197 呉市広末広2-2-2)

²工博 科学技術特別研究員(〒737-0197 呉市広末広2-2-2)

³正会員 工業技術院 中国工業技術研究所(〒737-0197 呉市広末広2-2-2)

⁴広島大学 大学院 生物圏科学研究科(〒739-8528 東広島市鏡山1-4-4)

⁵農博 工業技術院 中国工業技術研究所(〒737-0197 呉市広末広2-2-2)

To investigate remediation and enhancement of polluted marine environment, an environmental monitoring have been carried out at a special floating laboratory in Kaita Bay. This monitoring includes meteorological observation, current profiling and water quality measurement. The results indicated that sea-land breeze, which is common phenomenon around the coast of the Seto Inland Sea, greatly affects the marine environment of Kaita bay. Especially, time variation of chlorophyll-a at 4m depth had apparent diurnal oscillation that had good correlation with the movement of thermal stratification, which might be driven by sea-land breeze. The correlation between this oscillation and existence of sea-land breeze had a statistical significance.

Key Words : *Semi-enclosed sea, chlorophyll-a, sea-land breeze, remediation*

1. はじめに¹⁾

閉鎖性海域の代表とされる瀬戸内海では、高度成長期に行われた開発により、2万haの沿岸浅海域が埋め立てられ、自然海岸線の割合が実に38%にまで減少した²⁾。この結果、干潟や藻場が減少し、内湾が持つ自然浄化機能が大幅に低下した。また、陸域や過剰な水産養殖から発生する大量の栄養塩により、特に海水交換が生じにくい湾奥部では、赤潮や貧酸素水塊の発生、ヘドロの堆積等の問題が頻発している。このような状況に陥った沿岸海域の環境を修復する技術の開発が、今、急務となっている³⁾。

筆者らが所属する中国工業技術研究所(以下、中工研と記す)では、平成10年度から4ヶ年計画で「閉鎖性海域の環境修復・創造技術の開発と効果検証に関する研究」を開始し、物理的・生物学的な環境修復技術の開発を行っている。これらの技術を実海域に適用するためには、予め対象となる海域の気象、海象、水質、河川流入等の特性を十分に把握しておく必要がある。このため、中工研では平成11年より、内湾の環境変動を連続して計測できる浮体実験室(以下、マリナラボと記す)を広島湾の

枝湾である海田湾に設置した。

本稿では、このマリナラボの概要と、これまで得られたデータをまず紹介する。そして、海陸風がこの湾の流動、成層構造、および水質の変化に強い影響を及ぼしていることを示した上で、海陸風とクロロフィルaの増減の関係について論じる。

2. 海田湾とマリナラボの概要¹⁾

(1) 海田湾の概要

マリナラボを設置する海域は、次の三つの条件を満足する必要があった。①海域環境の悪化が進んでおり、実際にその改善が強く望まれていること。②設置許可が比較的容易に得られること。また、漁業権が設定されていないこと。③中工研から近距離に位置し、管理が容易であること。以上の条件を勘案した結果、マリナラボは広島湾の枝湾の一つである海田湾に設置された。図-1に広島湾および海田湾の場所を示す。

海田湾は、長さ3.5km、幅0.8kmの小湾である。湾の水表面積は2.8km²、平均水深は8m、容積は2200万m³である。周囲は企業や公共施設で占有されているため、全て人工

構造物で囲まれており自然海岸線や干潟などは存在しない。また、広島湾の最も奥にあるため、極度に閉鎖性が強く、海水交換が行われにくい。特に海底環境の悪化が著しく、汚染に強い多毛類以外に、海底に生物はほとんど住んでいない⁴⁾。

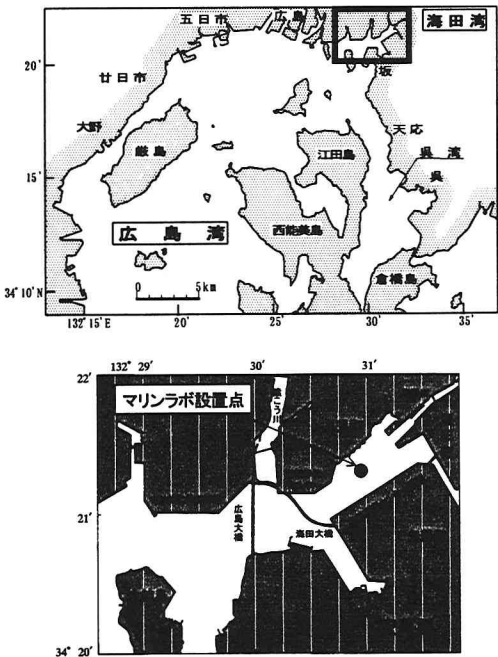


図-1 マリナラボの設置位置

海田湾は、また、河川の影響を受けやすい湾でもある。この湾の湾口北側には猿猴川が、また湾奥には瀬野川が流入している。この他にも矢野川、宮下川、的場川の3河川が海田湾に流入している。しかし、流域面積や流量から考えて、特に重要と考えられるのは、瀬野川と猿猴川の2河川である。

瀬野川は二級河川であり、平水時の流量は約1m³/sである。一方、猿猴川は太田川の一支流である。猿猴川の水位流量観測は行われていないので、平水時の流量を次のようにして求めた。昭和63年から平成9年の流量基準点の平水時流量は51.31m³/sである⁵⁾。また、昭和50年に建設省で策定された計画高水流量配分⁵⁾によると、流量基準点では7500m³/s、猿猴川では250m³/sであり、その比は3.3%である。この比を先ほどの太田川平水時流量に乗ざると、猿猴川の平水時流量は1.7m³/sとなる。

ここで、仮に猿猴川と瀬野川の平水時流量のみを利用したとして、海田湾の海水交換が年に何回行われるかを検討する。海田湾の容積を2200万m³とし、2河川の平水時淡水流量の合計を2.7m³/sと考える。すると、湾内水を河川流量で入れ替えるのに要する時間は、約100日となる。つまり、海水交換は1年間に3.5回は行うことが可能である。なお、通年で考えれば洪水が発生するため、年平均流量は平水時流量よりも高くなる。したがって、たとえば1999年のように、例年に比べて降水量が多い年

では、交換回数も増えると予想される。

この他、海田湾が位置する瀬戸内海沿岸地域は、周囲を山にとり囲まれているため、一般的に風が弱められるせいもあって、昔から海陸風がよく発達する地域としても知られている⁶⁾。しかし、これまで海陸風に対する関心は、大気中に放出される汚染物質の移流と拡散の担い手という点に集中していた⁶⁾。一方、湯浅⁷⁾は、干潮河川の流速鉛直分布が、夜間と昼間で大幅に異なることを示し、この原因が海陸風に起因する点を明らかにした。また、海域に入り込んだ栄養塩の挙動が夏季の昼間と夜間では異なることを、河口部での浮標追跡実験の結果から述べている。したがって、二つの主要流入河川を有し、また海陸風の強い影響下にある海田湾においても、流動・成層の変化や水質の物理的・生物的・化学的な物質循環が、海陸風の強い影響下にあると想像できる。

(2) マリナラボの概要^{1), 8), 9)}

マリナラボは1999年2月10日に海田湾に設置され、2月12日から表-1に示した項目について自動観測装置による計測を開始した。マリナラボの大きさおよび形状を図-2に示す。マリナラボは、内部にウェット・ラボとドライ・ラボの二つの実験室を有している。ウェット・ラボは、床下に1.2m×1mの観測孔を持ち、ここから測定装置を水中に吊り下げることができる。一方、ドライ・ラボには、気象計の記録部、電源供給部および保守作業のための空間等が設けられている。この他、水面から高さ6mの位置の屋上には、気象観測計が設置されている。

次に、マリナラボを使った観測結果の一例を示す。瀬戸内海は大潮時の干満差が3mを超えるため、潮流の影響を予め見積もっておくことが必要である。そこで、1999年3月26日から一ヶ月の間、ADCPによる潮流観測を実施し、得られた流速データの調和解析を行った。図-3-(a)、(b)は、M₂潮流および残差流の鉛直プロファイルを示している。図-3-(a)によれば、M₂潮流の振幅は、海面下1.5mから5mまで2~2.5cm/sで、ほぼ一定である。また、M₂潮流で見える限り、海田湾における潮流は、それほど大きな値とは言えない。一方、流向は方位角で20~30°で

表-1 環境データの観測項目

観測装置・項目	観測項目
気象観測計	水面から高さ6m上方で風向、風速、気圧、気温、日射、雨量を測定
流速計	流向・流速（ADCPにより水深1.5mから0.5m間隔で海底まで。ただし、7月16日以降は海底から上向きに設置） この他、電磁流速計による測定を実施
水質	水温（水面から0.5m間隔で水深8mまで） 塩分（水深0.5, 2, 3, 5m） 濁度・クロロフィルa（水深1m, 4m） DO（海底から高さ1m）

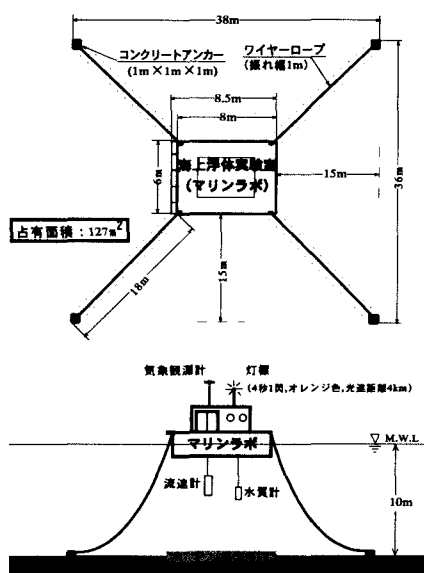


図-2 マリナラボの概要

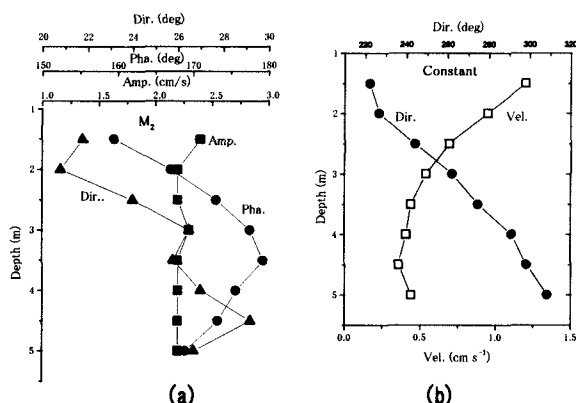


図-3 ADCPで得られた(a) M_2 潮流成分と(b) 残差流成分

あり、ほぼ湾の長軸に沿った流れである。ただし、表層から底層に向かうにしたがって、やや東側にシフトしている。位相は全層で約 20° の違いが見られ、中層で遅れが最大となっている。

次に図-3-(b)の残差流について見ると、流速は水深1.5mで最大値1.25cm/sを取り、海底に向かって徐々に減少する。流向について見ると、表層は 220° で湾奥から湾口に向かって流出しており、海底ではこの値から時計回りに約 90° 増加している。この残差流の鉛直分布は、河川からの淡水流出を反映していると考えられる。

3. 海陸風と流動・成層の応答関係

ここでは、海陸風が発生した場合の、流動・成層・水質の典型的な変化を示す。図-4は、8月1日から8月24日までの気象観測の結果である。また、図-5は、瀬野川流量（広島県）を示す。図-6は、電磁流速計により測定さ

れた水面近傍の流速を示している。図-7は、マリナラボにおける水温変化を等温線で表現したものであり、図-8は、同地点における塩分計の時間変化を表している。図-9は上層と中層のクロロフィルaの時間変化、図-10は海底から1m上方で測定された潮位変化を示す。

この期間のうち8月5日～8日は、雨はほとんど降らなかったものの、最大で10m/s程度の北寄りの風が吹き続け、水温鉛直分布は一様になっている。強風が止んだ後、速やかにほぼ元の水温分布に復帰していることから、強風による鉛直混合が進んだのではない。つまり、北風が表層水を湾口側に押し出し、この体積を補う形で下層水が表層に向かった結果、見かけ上鉛直分布が一様化したものと推察される。また8月17日～18日にかけて広島では総雨量81mmに達する大雨が降り¹⁰⁾、このため瀬野川流量は18日深夜に最大で $30\text{m}^3/\text{s}$ に達した。ただし、 $D=3\text{m}$ の塩分計記録は $D=0.5\text{m}$ に比べてほとんど変化せず、水温も均一になっていないため、全水深の成層を一様化するほどの出水は生じなかった模様である。

さて、このような突発的な海域攪乱現象を除いて図-4から図-9を概観する。まず風速・風向を見ると、午後からは5m/sの南寄りの風が吹き、夜間は逆に北寄りの風に変わる。水面近傍の流速は、潮流による半・日周変動に加えて、この海陸風の切り替えにしたがった変化を示していると考えられる。

一方、クロロフィルaの変化（図-9）は、表層と中層で異なっている。表層（ $D=1\text{m}$ ）のクロロフィルaは、強風と洪水による海域攪乱時では前後の値に比べて下がるが、それ以外の時期では、日周変動を伴った変化をしていることがわかる。一方、中層（ $D=4\text{m}$ ）は、海域攪乱時を除けば、深夜に非常にはっきりとした最大値を取り、反対に昼間の値は小さい。なお図-10の潮位に認められる半日周変化は、中層のクロロフィルaには認められない。

中層のクロロフィルaがこのような変動をする原因が植物プランクトンの日周鉛直移動ならば、日の出とともに表層へクロロフィルaが移動するため値は急減し、逆に日の入り時にはクロロフィルaの沈降により値は急増するはずである。しかし、図-4の日射量と図-9-(b)とを比べると、クロロフィルaの濃度変化は日射量と完全には対応していない。

次に植物プランクトンがその場の流体運動（たとえば密度流や内部波）を利用し、生育環境が最適な位置に移動した可能性が考えられる。たとえば図-7をよく見ると、 $D=4\text{m}$ 付近を通る 23°C または 24°C の等温線が深夜0時頃に鋭く下降していることがわかる。この原因として、次の機構が考えられる。昼間に吹く海風は河川水を湾奥に押し、湾口部にある高塩分の表層水をマリナラボ近傍に運ぶとともに、表層水の厚みを増加させる¹⁾。この現象は夜間に海風から陸風へと切り替わった後も、中層ではしばらく続くため、 $D=4\text{m}$ のクロロフィルa濃度にピークが

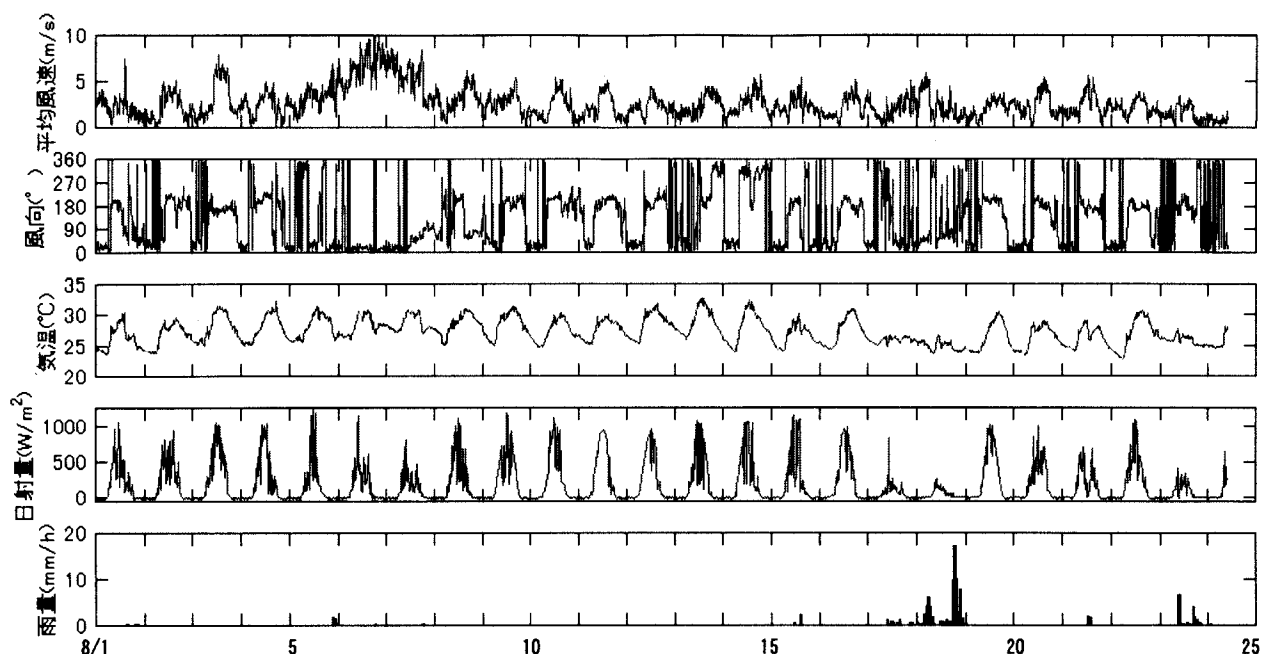


図-4 気象観測結果

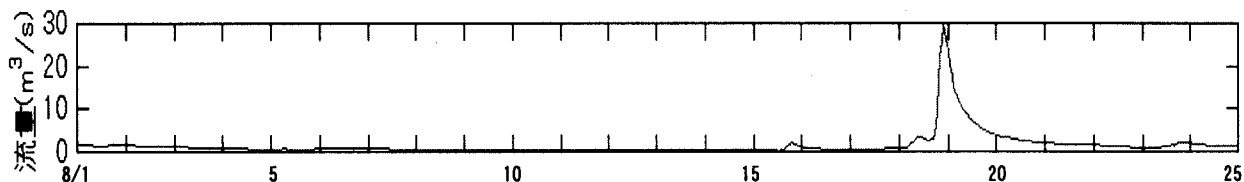


図-5 瀬野川流量

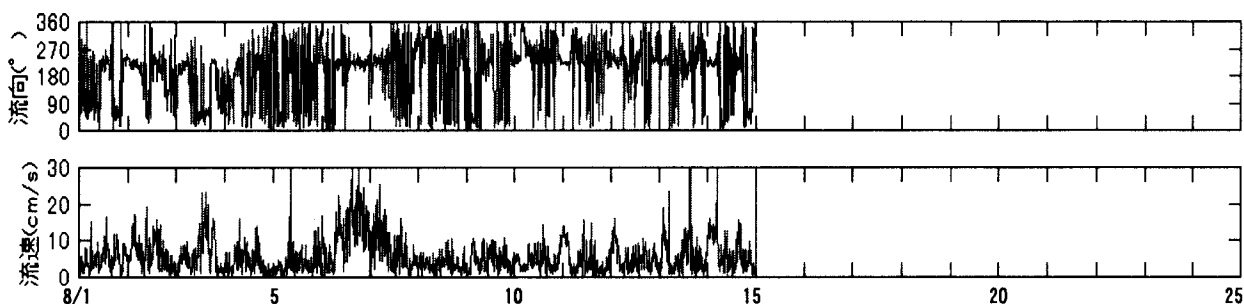


図-6 表層流速 (D=0.5m, 1999/8/1~15)

生じるのは、深夜になると考えられる。一方、陸風が吹き始めその大きさが強くなると、押し込められていた河川水は湾口部へと流出する。この結果、表層水の厚みは薄くなり表層塩分は急減する。また、中層には海底付近の低水温・低クロロフィルの海水が現れる。

連続成層場に海陸風が吹き続けた場合の物理的な解析をしていないので、この考えは推論に過ぎない。今後は3次元流動モデル等を用いて、詳しい検討を行いたいと考えている。

4. 海陸風の有無とクロロフィルaの対応

海陸風が吹いた場合の、流動、成層、水質の対応関係

を3. で見た。ただし、D=4mのクロロフィルaの変化を海陸風と結びつけ、定量的な議論を行うためには、海陸風が実際に吹いた日のデータを抜き出して議論しなくてはならない。一方で、図-4の風向・風速を見ても明らかに、海陸風の基本的な過程とそれからのバリエーションの区分を行うことは、それほど容易なことではない⁶⁾。つまり、何らかの基準を使って、海陸風が吹いたかどうかを判断しなければならない。基準としては、風の吹き方に着目した方法^{11), 12)}、気象条件で判断する方法¹³⁾、および両者を組み合わせて判断する方法^{4), 15), 16)}が提案されているが、ここでは海陸風の判断基準として、吹き方のみに判断の基準を置いた宮田ら⁶⁾の基準を用いることにする。ただし、元の基準では陸風の判定として「陸寄りの風向 or 風速0.5m/s以下」を用いているが、

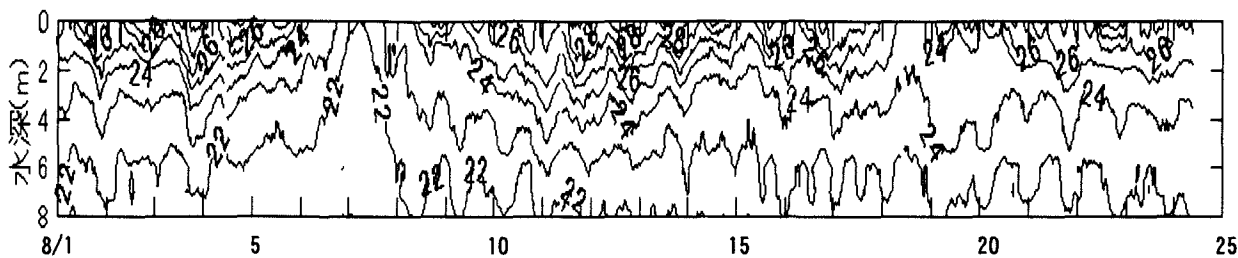


図-7 水温分布の経時変化

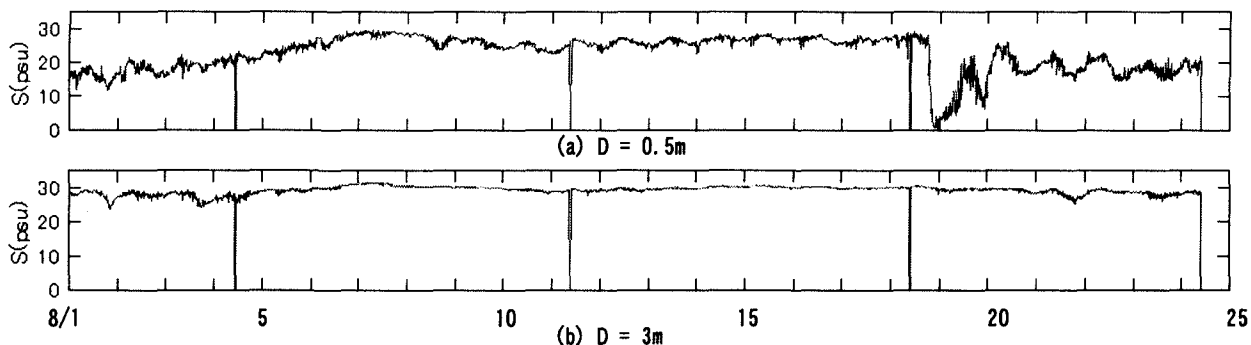


図-8 塩分経時変化. (a)D=0.5m, (b)D=3m. (8/4, 11, 18, 24のスパイクは、測器洗浄による.)

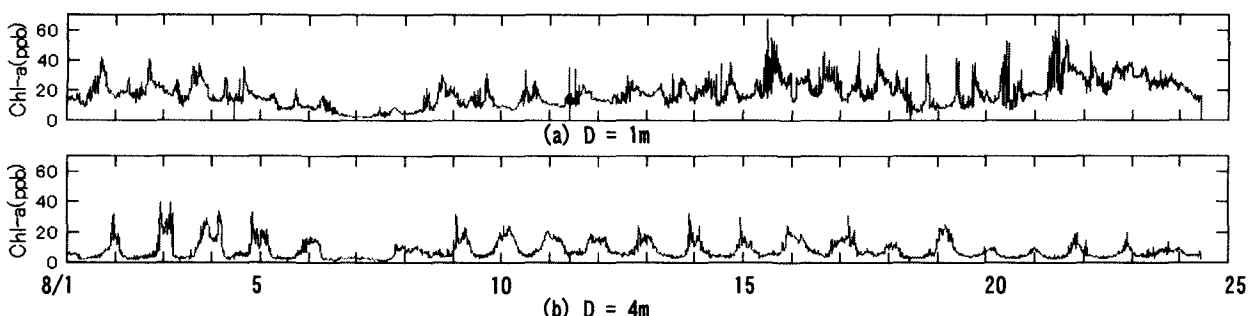


図-9 クロロフィルaの経時変化. (a)D=1m, (b)D=4m.

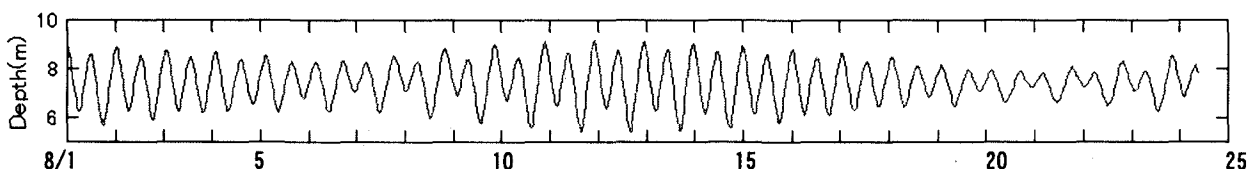


図-10 潮位記録 (海底上1mで計測)

マリナラボは海上に設置されており、また瀬野川の川筋にも当たるため、風は終日吹いており、夜間に風が弱まる時間帯でも0.5m/s以上の風速はかなりの頻度で出現する。そこで、陸風の判定基準のうち、風速のしきい値を0.5m/sから1m/sに引き上げた。この判定手順を図-11に示す。

図-11の基準を使って、2月13日から8月23日までの海陸風の有無を機械的に判断したところ、全観測日192日のうち、海陸風が吹いていたと判定された日は110日であり、全体の57%に相当していた。また、月別の頻度は表-2に示した通りであった。

次に、D=4mのクロロフィルaについて、海陸風由来と思われるピークが、夜間に認められたかどうかを各観測日ごとに判断する必要がある。クロロフィルaの平均値は、観測時期ごとに異なるため、ここでは①ピークが着

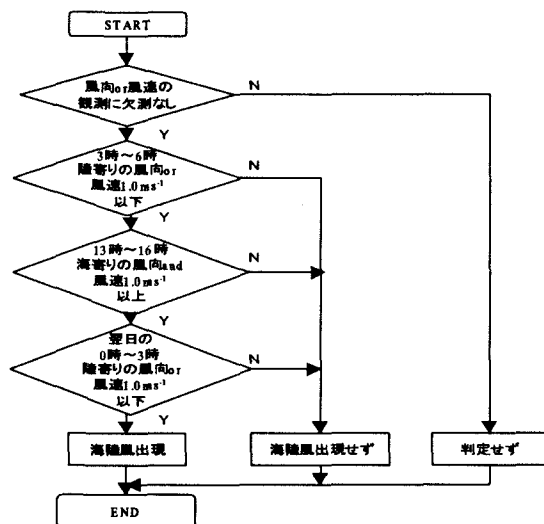


図-11 海陸風の判定手順 (宮田ら⁶⁾ の図2.2を修正)

表-2 海陸風の有無とクロロフィルa (D=4m) のピークとの対応

月	海陸風 発生日数	クロロフィルa(D=4m)に ピークが生じた日数	ピーク発生日の前日に 海陸風が生じた日数
2月(13-28日)	10	16	9
3月	13	6	4
4月	16	3	1
5月	22	17	12
6月	16	10	7
7月	17	10	7
8月(1-23日)	16	20	15
合計	110	82	55

目している日の0時前後の夜間に生じていること、②ピークが明瞭であること、の二つの条件を基準に判断することにした。その結果、全測定日192日のうち、D=4mのクロロフィルa濃度にピークが認められたのは82日であり、全体の43%に相当していた。

さて、注目している日に生じたD=4mのクロロフィルaの上昇は、その前日に海陸風が吹いたことによって生じていると考えられる。調べた結果、D=4mのクロロフィルaにピークがあり、かつその前日に風データが揃っていた81日のうち、前日に海陸風が生じていた日は55日(68%)であった。表-2は、以上の結果を月毎に整理したものである。また、海陸風の有無とD=4mのクロロフィルaピークの有無を2x2分割表にまとめ、有意水準5%で検定したところ、関連性が認められた。

5. おわりに

広島湾の枝湾の一つである海田湾において、流動、成層、水質、気象データの長期モニタリングを実施し、環境修復技術の実施に際しての基礎的データの取得と解析を開始した。その結果、以下の項目について知見を得た。

- 1) M_2 潮流成分を検討した結果、潮流の大きさは2～2.5cm/sであり、極めて小さな値であった。
- 2) 8月観測時に認められた強風や洪水による海域攪乱現象は、湾の成層構造を一時的に変化させるものの、全水深にわたって海水を混合または交換するほどの効果は持っていなかった。
- 3) 海陸風が平時の流動や成層、水質の変動に強い影響を与えている。特にD=4mのクロロフィルaが深夜にピークを持つのは、海風により表層水の厚みが増すからだと考えられる。また、D=4mのクロロフィルaがピークを持ったケースのうち、前日に海陸風が生じていた割合を調べたところ68%であった。また、海陸風の有無とクロロフィルaのピークとの関連を2x2分割表によって調べたところ、有意水準5%で関連性が認められた。

今後は、3次元流動モデル等を利用して、海陸風が吹いた場合に、どのような機構で表層水の厚みが増し、クロロフィルa濃度が増加するのかという点について解析

を続けていきたいと考えている。

謝辞：マリナラボの設置に際し、広島県広島港港湾振興局、海上保安庁広島海上保安部ならびに海田湾周辺の関係企業や漁業協同組合からの多大なご協力を頂いた。また建設省中国地方建設局太田川工事事務所からは、太田川の水位・流量データ等を提供して頂き、広島県土木建築部河川課からは、瀬野川の水位流量データを提供して頂いた。以上、ここに記して謝意に代えさせていただく。

参考文献

- 1) 橋本英資、朱小華、長尾正之、高杉由夫、上嶋英機：海洋環境修復に向けての新たな取り組み—海田湾におけるマリナラボ設置と長期モニタリング—、中国工業技術研究所報告、No.53, pp.15-21, 1999.
- 2) 環境庁水質保全局：平成8年度瀬戸内海の実環境保全—資料編—、瀬戸内海環境保全協会、p.161, 1997.
- 3) 上嶋英機：ミチゲーション、沿岸の環境圏（平野敏行監修）、フジ・テクノシステム、pp.933-943, 1597p., 1998.
- 4) 三島康史、星加 章、谷本照巳、上嶋英機：海田湾における環境修復技術の研究(III)—海田湾の生物・化学環境—、1999年度日本海洋学会秋季大会講演要旨集、p.108, 1999.
- 5) 建設省中国地方建設局太田川工事事務所：太田川・小瀬川概要（平成11年度）、1999.
- 6) 宮田賢二編：広島県の実環境風、溪水社、395p., 1982.
- 7) 湯浅一郎：内海における循環流・フロントと栄養塩類の挙動に関する研究、中国工業技術研究所報告、No.12, 184p., 1994.
- 8) 高杉由夫、朱小華、橋本英資、星加章、三島博史、谷本照巳、長尾正之：海田湾における環境修復技術の研究(I)—マリナラボの概要—、1999年度日本海洋学会秋季大会講演要旨集、p.106, 1999.
- 9) 朱小華、橋本英資、長尾正之、高杉由夫：海田湾における環境修復技術の研究(II)—マリナラボによる長期モニタリング計測の速報—、1999年度日本海洋学会秋季大会講演要旨集、p.107, 1999.
- 10) 広島地方気象台編：広島県気象月表（平成11年8月）、日本気象協会中国センター、1999.
- 11) 岸田和博：広島空港における風の特性—その2—海陸風、昭和42年度中国区気象研究会誌、pp.2-1-2-10, 1968.
- 12) 吉門 洋：海陸風に対する気圧配置の影響、公害、Vol.13, No.5, pp.36-45, 1978.
- 13) 佐橋 謙：岡山周辺の海陸風について、天気、Vol.25, No.5, pp.357-363, 1978.
- 14) 北林興二：海陸風の統計的解析、公害、Vol.11, No.5, pp.80-98, 1976.
- 15) 江口恒夫：大阪市の実環境風について—地上風データの統計解析—、天気、Vol.24, No.12, pp.739-746, 1977.
- 16) 森 征洋：香川・徳島における海陸風の統計的性質について、日本気象学会関西支部例会講演要旨集、pp.14-17, 1979. (1999. 9. 30受付)