

自動昇降式観測システムを用いた冬季の東京湾湾奥における 基礎生産の推定

佐々木 淳*・渡邊 亮太**・磯部 雅彦***・五明美智男****

1. はじめに

近年, 富栄養化した内湾域ではクロロフィル a 蛍光をはじめとする水質・生態系の現地モニタリングが盛んに行われるようになり, 長期的な時系列情報が蓄積されつつある。しかしセンサーが高価なこと, メンテナンスのコスト・労力の問題から鉛直方向にはせいぜい数点程度の情報しか得られていない。成層期には鉛直方向の水質変化が極めて大きいことを考えると, これでは不十分であることは明らかである。一方, 低次生態系を構成する渦鞭毛藻類や動物プランクトンは日周鉛直移動が知られており, 鉛直分布の詳細観測によりこれらの生態系に関わる現象をモニタリングできる可能性もある (Koizumi ら, 1996)。そこで本研究では内湾における鉛直方向の詳細な時系列情報の取得を目的として, 自動昇降式観測システムを開発する。次に本システムを用いて冬季の水質モニタリングを行うことで, 冬季におけるブルームの発生過程を捉え, その支配要因の考察と基礎生産の見積を行う。

2. 自動昇降式観測システムの開発

自動昇降装置はダム湖における濁度監視や生け簀内の水質監視, 外洋域における基礎生産の推定等に用いられ製品化もされているが, 多くは大がかりな設備となるため内湾域ではほとんど適用例がない。石丸ら (1993) は水中設置型自動昇降装置を開発したが, 航行船舶の多い東京湾への適用は困難であり, コストや労力を考えると手軽にできるものではない。本研究では東京湾に複数存在する灯標やシーバース等の海上構造物の利用を前提とすることで廉価かつ維持管理の簡便な自動昇降式観測システムの開発を試みた。

本システムの大きな特徴としては, a) 各項目はそれぞれ単一のセンサーで計測されるため, センサー間の校正誤差がない, b) 休止時は海底付近に止めおくことにより

付着生物の影響を大幅に軽減できる, c) 暴浪時には海底付近に止めおくことによりセンサーの損傷を防ぐことができる, といったことが挙げられる。特に春季から秋季の富栄養化した内湾においては付着生物の影響で週 1 回以上の頻度でセンサーの洗浄が必要となるが, 本システムではその頻度を大幅に低減させることが可能となる。

本システムは図-1 に示すようにウインチ, おもり, コントロールボックス, 電源装置, およびガイドワイヤーから構成されている。ウインチケーブル先端にはステンレス製のセンサー保護枠を取り付け, その中にセンサーを設置している。暴浪時にセンサーが大きく横揺れすることを防ぐため 2 本のガイドワイヤーを張り, センサー保護枠はこれらのガイドワイヤーに沿って昇降するようになっている。また, ガイドワイヤーには下端位置決め用ストッパーが取り付けられている。さらに運転開始後に発生したくず巻きの対策としてセンサー保護枠の直上に 25 kg 分のおもりを設置し, 高波浪時の水面付近におけるケーブルの張力低下によるたるみを防ぐようにした。ウインチにはトーヨーコーケン (株) 製 BH-730T を採用し, 制御装置等を含めたシステム全体の構築は三洋測器 (株) に依頼した。

昇降制御方法には時間制御, 回転計を利用した巻き長さによる制御等いくつかの方法が考えられるが, ここでは最も簡単なウインチの過巻防止機能および逆巻防止機

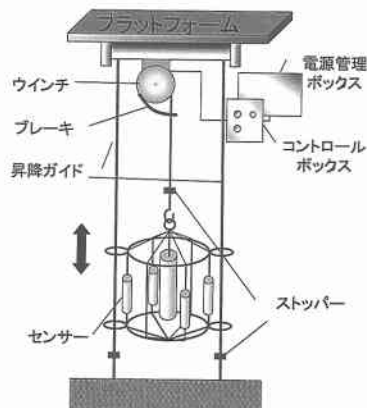


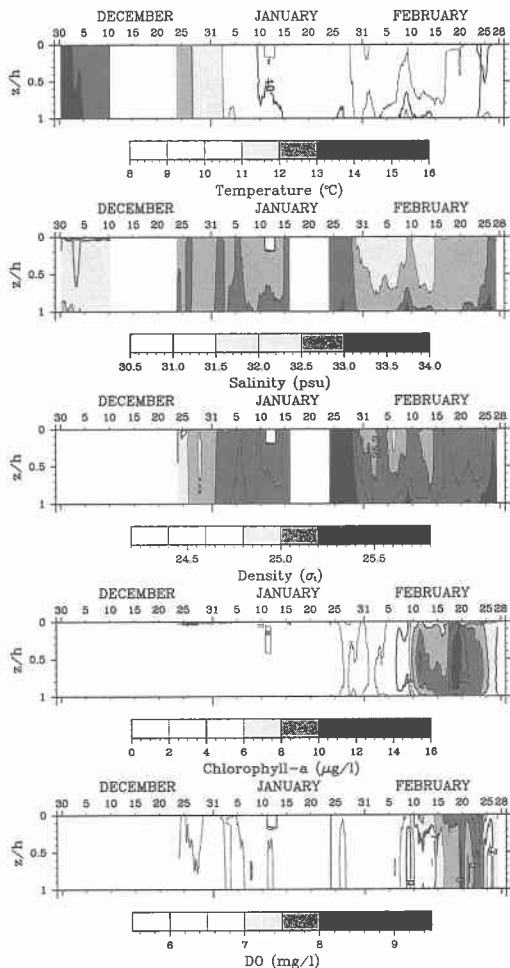
図-1 自動昇降装置の模式図

* 正 会 員 博(工) 東京大学助教授 大学院新領域創成科学研究科環境学専攻

** 東京大学大学院 工学系研究科社会基盤工学専攻

*** フェロー 工 博 東京大学教授 大学院新領域創成科学研究科環境学専攻

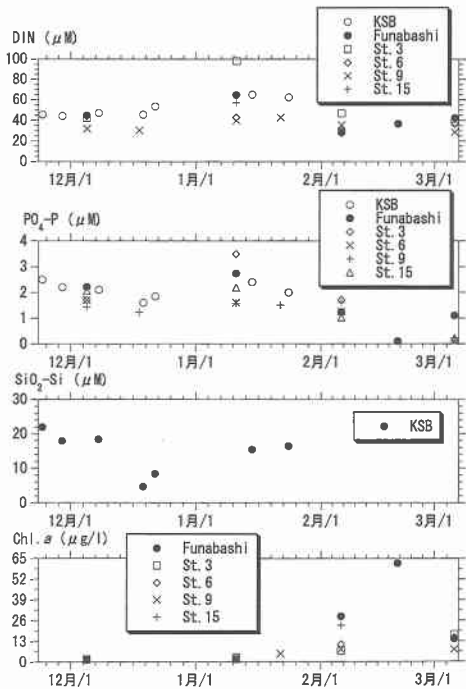
**** 正 会 員 博(工) 東亜建設工業(株)技術研究所水理環境研究室長



図一四 自動昇降式観測システムによる水温、塩分、密度(σ_t)、クロロフィル a 濃度、および溶存酸素濃度の鉛直分布の時系列(白抜きは欠測)

のブルーム前までは全般に飽和値を下回りやや低酸素状態となっているが、観測開始時から見ると基本的には単調増加となっている。観測開始時の11月下旬から12月始めに見られた低酸素水は夏季の貧酸素水の名残であり、これが冬季に回復していく様子が捉えられているものと思われる。2月中旬になると飽和値を越えてかなり高濃度となるが、これはクロロフィル a の増大とよく対応しており、活発な光合成によるものと考えられる。

本観測の特徴であるクロロフィル a の鉛直微細構造に着目すると、2月12日頃より16日頃にかけては下層に向かってクロロフィル a の増大が見られる(図一七)。ちょうど12日から日射が弱まったことによる植物プランクトンの活性の低下と、この間風が弱まっていたことによるプランクトンの沈降過程を捉えている可能性がある。



図一五 表層における溶存無機態窒素、リン酸態リン、珪素、およびクロロフィル a の時系列(船橋、St. 3, St. 6, St. 9およびSt. 15は千葉県水産試験場「東京湾海況速報」を基に作成)

4. 冬季のブルーム形成過程と基礎生産

(1) ブルームの支配要因

2月17日頃から見られたブルームは図一四および図一五からこの冬唯一のものであり、内湾全体でほぼ同時に起こっていることがわかる。一般にブルームの支配要因には有光層厚と成層状態から決まる上層混合層厚のバランス、栄養塩濃度、好適水温、好適塩分、動物プランクトンによる捕食圧が挙げられる。まず、水温および塩分とクロロフィル a の相関(図一八)を見ると、観測されたブルームにおいては全く相関が見られない。動物プランクトンの捕食圧に関しては直接的な情報はないが、一般に冬季にはその現存量は低いことが知られている。その上このブルーム時の植物プランクトンは0.5 mmを越える大型珪藻の*Rhizosolenia setigera*であり、これを捕食する動物プランクトンの世代時間を考えると捕食圧は非常に小さいと考えるのが妥当であろう。栄養塩については図一五からわかるようにブルーム発生までは窒素、リン、珪素共に内湾全体で十分量存在しており、制限因子とはなっていない。

冬季から春季にかけては日射が最も重要な植物プランクトン増殖の制限要因であることは古くから指摘されており、エスチャリーにおける春季珪藻ブルームの発生に

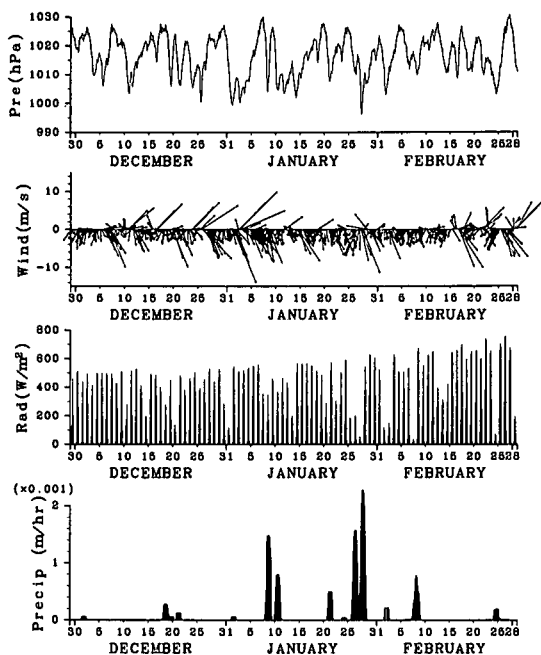


図-6 気象庁SDPデータ千葉および東京から作成した海面大気圧推定値と風向風速(時別値), および全天日射量と降水量(25時間移動平均値)の時系列

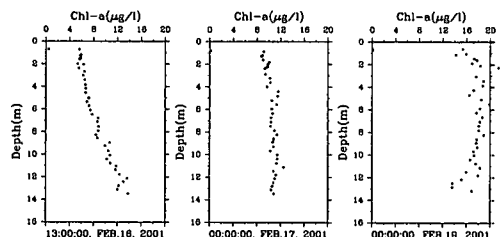


図-7 クロロフィルaの鉛直分布

は植物プランクトンの吸収量として約 20 W/m^2 の日射強度が必要とされる(Riley, 1967)。そこで本ブルームと日射との関係について詳細に見ていく。まず、図-9にクロロフィルa時系列から見積もった1日あたり水柱平均の増殖速度を示す。クロロフィルa濃度が低い1月中旬頃までは絶対値としてはわずかな変動でも速度に換算すると大きくなり、移流拡散による影響が支配的となる。しかしこの間にも非常にゆっくりとではあるが着実にクロロフィルaは増加している様子が捉えられており、1月下旬においては全層で $2 \mu\text{g/l}$ を越える値となっている。図-6より1月27日には低気圧の通過による北西の強風と気圧低下が見られ、沖合水の進入の影響と強い鉛直混合で高塩分水塊が全層で見られるが、このときにおいてもクロロフィルa濃度の変動は小さく、内湾全体での空間的一様性が高いことが示唆される。そして2月に入ると3日から6日にかけておよび8日から11日にか

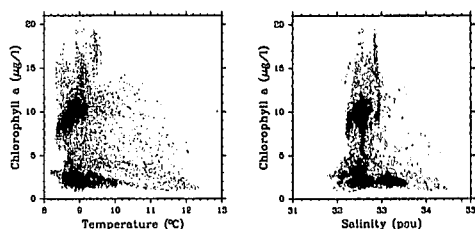


図-8 水温、塩分とクロロフィルaの濃度の相関

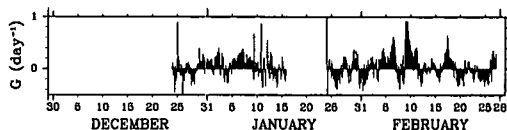


図-9 水柱平均増殖速度 (day^{-1}) の25時間移動平均による時系列

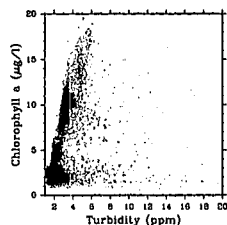


図-10 クロロフィルaと濁度の相関

けての好天時に増殖速度が著しく高まっている様子が見て取れる。この間は風も弱くまた1月27日頃のまとまった降水によって成層が形成され水塊が安定していたことが移流拡散の影響を弱め、日射強度によく対応した増殖速度の増大が観測されたと考えられる。その結果、11日にはクロロフィルaは $10 \mu\text{g/l}$ を越えた。この後2月15日から23日にかけて再び好天が続き、ちょうどこの間にクロロフィルa濃度は極大となった。

以上のように冬季のブルーム形成過程では、ゆっくりとしかし着実に湾内全体での増殖を引き起こす持続的で安定した日射強度の存在、および水塊の安定性等様々な要因が関係していて、Riley (1967) が指摘したような単純に日射強度の閾値でブルームが説明できる訳ではなさそうである。クロロフィルa濃度と濁度の相関を示した図-10を見ると、両者の相関は非常に高く、この間の濁りは基本的にはクロロフィルa濃度に依存していると見てよい。そこで、水面における光合成有効放射強度(PAR)を全天日射強度の半分と仮定し、光の消散係数 ϵ をクロロフィルa濃度 C_{chl} を用いて

$$\epsilon = 0.04 + 0.0088 C_{\text{chl}} \dots\dots\dots (1)$$

と表現して水中におけるPARを見積もったところ図-11が得られた。これによると、12月から1月初旬においてもPARは 20 W/m^2 を越えており、このような光環境

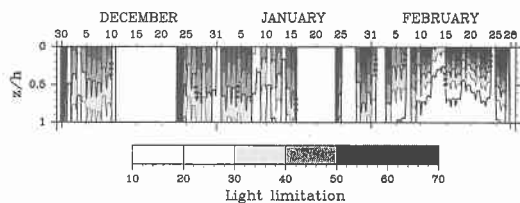


図-11 光合成有効放射強度の25時間移動平均時系列

が持続してクロロフィル *a* 濃度が湾全体で少しずつ上昇し、ある程度の濃度に達した後は好適条件の持続によっていつでもブルームが起きると考えられる。

このブルームは2月19日頃をピークに低減していくが、その要因としては図-11に見られる自己遮蔽による光制限と図-5に見られるリンの枯渇が挙げられる。光強度は図-6から2月19日以降もむしろ増大しているが、クロロフィル *a* が全層で高濃度化しているために自己遮蔽による消散係数の増大が効いている。またリン濃度は2月20日の船橋沖においては $0.1 \mu\text{M}$ を下回っており、これは植物プランクトンの一般的な半飽和定数を下回っている。

(2) 基礎生産の推定とその影響

本観測で得られたクロロフィル *a* の鉛直分布時系列データを基にして、水柱あたりの基礎生産時系列の概算を試みる。単位時間あたりの有機物純生産量 P_N は

$$P_N = \left\{ G_{\max} \frac{I}{I_{\text{opt}}} \exp \left(1 - \frac{I}{I_{\text{opt}}} \right) - k_r G_{\max} \right\} A_{\text{chl}} \cdots (2)$$

とかける。ただし、 $G_{\max}$ は光飽和下の光合成速度であり、光合成の制限要因としては光 I のみを考えこれを Steele の式を用いて表現する。 k_r は光飽和下の光合成速度に対する呼吸の割合、 A_{chl} はクロロフィル *a* 量である。これを水柱で積分することにより水柱あたりの基礎生産速度を求めることができる。用いた最適光量 I_{opt} 等のパラメータ値は山口(1999)を参考にして表-2の通りとした。

単位面積、1時間あたりの水柱における基礎生産速度の時系列は図-12のように推算された。これによると1日あたりの基礎生産としてクロロフィル *a* 濃度が $1 \mu\text{g/l}$ 程度と低い時期ではおよそ 0.3 gC であるが、ブルーム時には 5 gC にも達し、これは近年の夏季における基礎生産に匹敵する値である。この高い冬季の基礎生産は本来であれば底生生物の餌として重要な役割を果たすものであるが、東京湾においては貧酸素水のために底生生物量が小さく健全な物質循環が期待できない。その上冬季のブルーム時には大型の珪藻が卓越することから速やかに海底に堆積し、水温上昇期にかけて微生物分解が促進されるものと推察される。よって冬季のブルームの規模は春季から夏季にかけての貧酸素化や栄養塩の溶出等の規模

表-2 パラメータ値

$G_{\max}$ ($\text{mgC mgChl.a}^{-1} \text{ hr}^{-1}$)	I_{opt} (W m^{-2})	k_r
4.0	50	0.1

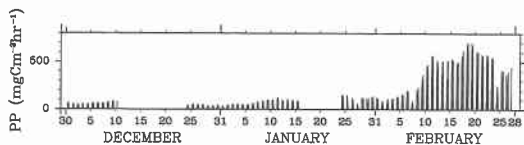


図-12 単位面積時間あたりの水柱基礎生産の時系列

に相当の影響を与えているものと思われる。

5. ま と め

本研究では海上プラットフォームを利用した廉価な自動昇降式観測システムを開発することで、従来困難であった内湾における鉛直微細構造のモニタリングが可能となった。本モニタリングは水平的には1地点の情報にすぎないが、詳細な鉛直構造を把握することが可能なため、沖合水や河川水の影響、強風時の混合過程、さらには植物プランクトンの沈降等の移動現象を把握することができる。本システムを用いて冬季におけるクロロフィル *a* 等の水質観測を行い、「海況速報」の情報と併せて解析することで、冬季のブルームの支配要因に関する考察および基礎生産の推定を行った。今後は SeaWiFS 等の衛星画像や他機関の観測結果を総合し数値モデルを用いた3次元的な解析を進め、より精度の高い基礎生産の見積とその物質循環における役割を見ていく予定である。

謝辞: 本観測システムの設置場所の提供からメンテナンス作業等のための通船の使用、有益な助言等、非常に多くの便宜をはかって頂いた、京葉シーバース (株) に謝意を表す。図面の作成には地球流体電脳倶楽部の DCL ライブラリーを使用させていただいた。本研究は住友財団環境助成 (代表: 佐々木 淳) の補助によるものであり、謝意を表す。

参 考 文 献

- 石丸 隆 (1993): 植物プランクトンの挙動とモニタリングシステム, 月刊海洋, Vol. 25, No. 1, pp. 52-54.
- 気象庁 (2000, 2001): SDP・地上気象観測データ (千葉管区気象台, 東京管区気象台).
- 千葉県水産試験場 (2000, 2001): 東京湾海況速報.
- 山口征矢 (1999): 植物プランクトンの一次生産, 月刊海洋, Vol. 31, No. 8, pp. 470-476.
- Koizumi, Y., T. Uchida and T. Honjo (1996): Diurnal vertical migration of *Gymnodinium mikimotoi* during the red tide in Hoketsu Bay, Japan, J. Plankton Res., Vol. 18, pp. 289-294.
- Riley, G. A. (1967): The plankton of estuaries, pp. 316-326, In Lauff, G. H. ed., Estuaries, Publ. Am. Assoc. Adv. Sci., 83.