

水中ロボットによるプランクトンの動態予測

正員 加藤直三^{*1}
 非会員 一見和彦^{*3}
 非会員 中田喜三郎^{*4}
 正員 広川潔^{*6}
 正員 日下祐三^{*8}

非会員 秋葉龍郎^{*2}
 非会員 中辻啓二^{*1}
 正員 川崎忠幸^{*5}
 非会員 荒井修亮^{*7}
 正員 服部真人^{*9}

Prediction of Harmful Algal Population Dynamics by Autonomous Lagrangian Platform Systems

by Naomi Kato, *Member*
 Kazuhiko Ichimi, *Non-Member*
 Kisaburo Nakata, *Non-Member*
 Kiyoshi Hirokawa, *Member*
 Yuzo Kusaka, *Member*

Tatsuro Akiba, *Non-Member*
 Keiji Nakatsuji, *Non-Member*
 Tadayuki Kawasaki, *Member*
 Nobuaki Arai, *Non-Member*
 Mato Hattori, *Member*

Key Words: Coastal Ecosystems, Phytoplankton, Sensors, Biological Model, Supervisory Monitoring System

1. 緒言

日本は周辺を海洋に囲まれており、その豊富な資源を活用して来た。しかし、種々の環境変化により、海洋資源の質・量ともに、我々の予測を越えて大きく変動するケースが増えて来ている。場合によっては、ある海域より特定の資源が一時的に枯渇するケースもあり、産業上の問題となることも多い。適正な海洋資源管理が求められている。これまで、主として自然の変動に任せて来た資源管理であるが、今後、科学的な根拠のもとに、生物種の多様性を維持し、海洋資源を精密な管理下に置くことが、海洋国としての日本の使命と考えられる。

海洋資源の中で、食物連鎖の中でもっとも下位に位置するプランクトンは、小動物捕食者の獲物となり、さらに上位捕食者へエネルギーを提供しており、生態系に与える影響も大きいものと考えられる。プランクトン種を追跡する移動ロボットによって、プランクトンの種類、分布、密度を現場で自動的に判定でき、同時に海洋環境を測定し、それらのデータを自動送信できるならば、その結果起こると考えられる海洋資源の変化へも、いち早く対処できると期待できる。また、それらの測定データを取り込んだ流況・水質・生態系シミュレータを持つ海域環境の総合監視システムを構築することで、重要な環境要因を抽出することができ、健全な海洋環境の再生と安心・安全な海洋資源の管理への指針を与えることが可能

となる。

これまで赤潮の防除策として、物理化学的手法や生物を用いた手法が検討されてきたが、未だに実現化は困難な状況にあり、赤潮の予察手法の開発により重点が置かれている。しかしながら、赤潮発生の予察としては、経時的な赤潮プランクトン密度のモニタリングを行うことで対応しているのが現状である。これらのモニタリングで問題となるのが、赤潮プランクトンの増減が明確に判断できない点である。赤潮プランクトンはパッチ状に分布することが多く、潮流によりそのパッチが移動するため、一定点において経時的に測定した細胞密度が純粋に赤潮プランクトン生物量の増減を表しているのかどうか明確でない。すなわち、その細胞群が現在成長過程にあるのか、衰退過程にあるのか判断が難しい。赤潮発生時期の予察はもちろん、赤潮の終焉時期を予察することは養殖産業にとって大変重要な情報となる。本システムからリアルタイムで送信される水塊構造、プランクトン群の現存量、プランクトン種組成などを解析することにより、より詳細かつ迅速な赤潮の予察が可能になるとと思われる。

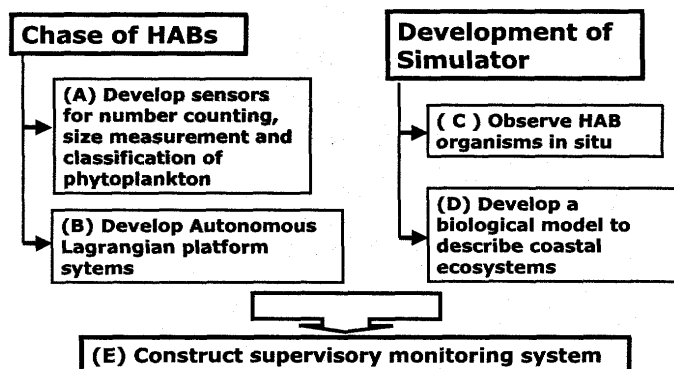


Fig.1 Schematic diagram for developing a supervisory monitoring system.

本論は、自動的に、ある一定海域を探索し、プランクトン種の同定、その分布、物理的・化学的海洋環境のデータを自動送信するシステムの開発と、流況・水質・生態系シミュレータを持つ海域環境の総合監視システムの

- *1 大阪大学大学院工学研究科
- *2 (独) 産業技術総合研究所
- *3 香川大学農学部
- *4 東海大学海洋学部
- *5 (株) 川崎造船
- *6 三菱重工(株)
- *7 京都大学大学院情報学研究所
- *8 (株) 三井造船昭島研究所
- *9 (有) ベースアドレステクノロジージャパン

原稿受付 平成 17 年 10 月 5 日

秋季講演会において講演 平成 17 年 11 月 24, 25 日

©日本船舶海洋工学会

構築について提案を行う(Fig.1)。これは、フィールドにおいて、このシステムを用いて、計測データから流況・水質・生態系シミュレータを更新しつつ、海域の生物多様性の変化の予測とそれに伴う環境への影響評価を行うこと、またこの流況・水質・生態系シミュレータを用いて、底質などの重要な環境要因を抽出し、健全な海洋環境の再生と安心・安全な海洋資源の管理への方向性を提示することを目指している。

2. プランクトン種の自動組成計測および自動識別装置

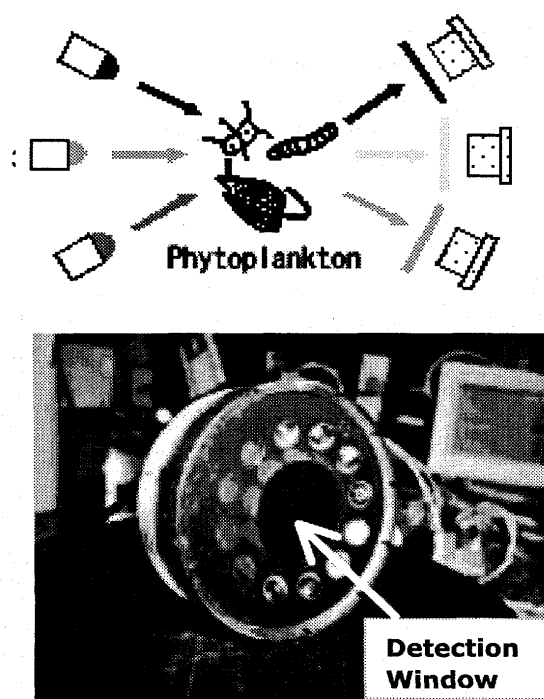


Fig.2 Exited fluorescence spectra sensor with multiple-wavelength light sources.

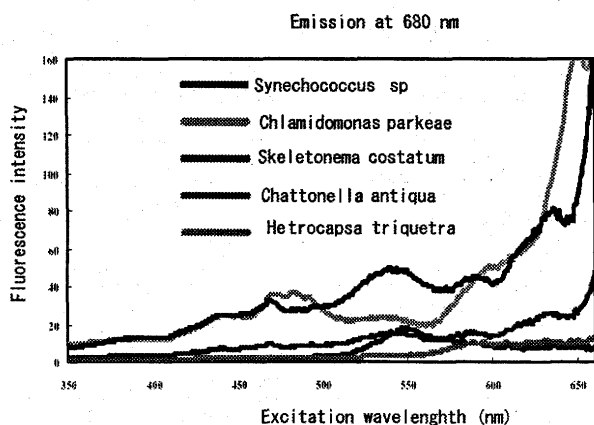


Fig.3 Distribution of excited fluorescence spectra for phytoplankton species

2.1 蛍光励起スペクトル利用種組成識別¹⁾

植物プランクトンは光合成を行うために光合成色素クロロフィル a を必ず有しているが、種に特有の補助色素が

あり、補助色素組成を測定することにより、種の識別が可能である。今までは有機溶媒により色素を抽出する方法が一般的であったが、励起蛍光スペクトルを測定することにより現場で種の識別が可能なが判明してきた (Fig.2 参照)。Fig.3 には、680 nm の波長の光源に対する植物プランクトン (藍藻、緑藻、珪藻、ラフィド藻、渦鞭毛藻) の励起蛍光スペクトル分布を示す。ある種のプランクトンでは、ピーク値が見られ、この特性を利用して植物プランクトンに関するマトリクス データが得られる。

2.2 自動撮像装置とパターン認識による大型植物プランクトンの種自動査定

植物プランクトンは一般に顕微鏡で種の同定がなされるが、近年のパターン認識技術により、種の同定の自動化が可能となってきた。本研究では自動撮像とコンピュータビジョンによる種の識別を行う技術を開発する (Fig.4)。また細管中を流れるプランクトンを様々な光学的なセンサーで測定し、サイズ測定、光合成活性等を測定する。

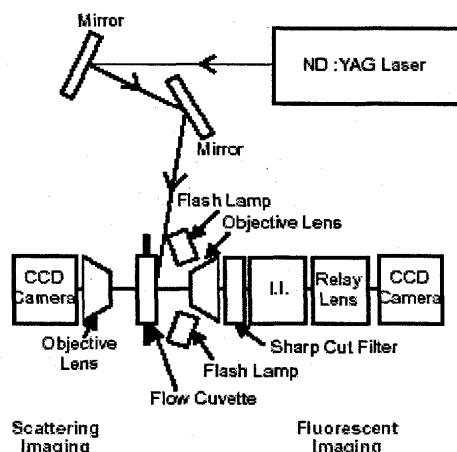


Fig.4 Schematic diagram of simultaneous imaging system.

3. 水中ロボットの設計と誘導制御

2で開発したプランクトン種の自動識別装置を搭載し、その他、水温、深度、D0、電気伝導度、塩分、濁度、光量子の計測センサーを搭載し、位置計測にGPSアンテナを持ち、PHSとのデータ送受信装置を持ち、浮力調整装置によって自動的に鉛直移動や水平移動が可能な水中ロボットの設計と誘導制御を扱う。

鉛直移動や水平移動が可能な水中ロボットの移動方式について、いくつかのタイプを考え、数値シミュレーションや鉛直・水平移動するための装置を組みこんだ模型を用いた船舶海洋試験水槽での実験を実施し、最適形状を決める。鉛直移動には、浮力調整弁を用い、水平方向移動には胴体のまわりに取り付けた翼を用いる。数値シミュレーションは、水中ロボットまわりの流れの数値解析と運動解析から成り立っており、実際の潮流分布を与え、代表的な植物プランクトンの日周鉛直移動を与え、翼の取り付け位置、大きさ、翼角のとり方によって、三次元的に移動可能な範囲を考察する。これは、複数台の水中ロボットを用いて、赤潮プランクトンの範囲を特定

できるように、広い範囲で水中ロボットを展開する必要があり、地上局から、移動場所を指定して、そこに移動する必要があるためである。

次に、2で開発したプランクトン種の自動識別装置やその他のセンサー、動力源（バッテリー）、PHSを用いたデータ通信装置、海面での位置計測装置を搭載した水中ロボットの設計・製作を行う。この水中ロボットの静水中、波浪中、潮流中における誘導制御方式について、水槽実験や海域実験を行い、性能を把握する。海域実験では、誘導制御、データ通信、位置検出、パワー消費量について、総合的に基本性能を確認する。

3.1 主要目(Fig.5)

- ・大きさ（胴体直径：0.15 m 胴体長さ：1.3 m）及び重量 23Kg
- ・鉛直移動距離：100m 程度
- ・観測センサー：水温、深度、DO、電気伝導度、塩分、濁度、クロロフィル、光量子、プランクトン種の自動識別装置
- ・誘導制御用センサー：方位計、傾斜計、高度計
- ・鉛直移動方式：浮力調整弁、水平移動方式：翼
- ・データ通信：PHSを用いたデータ通信
- ・海面での位置計測：D-GPS
- ・目標航続時間：2ヶ月

3.2 機能

赤潮プランクトン種を識別し、計測したその密度の上下方向の勾配を計算し、勾配の高い方向へ移動するように浮力調整弁を操作する。大きく水平移動する場合は、下降・上昇する間に翼を作動させる。海面に出た場合、計測データと位置データを送信し、また地上局から水平移動位置のデータを受信する。

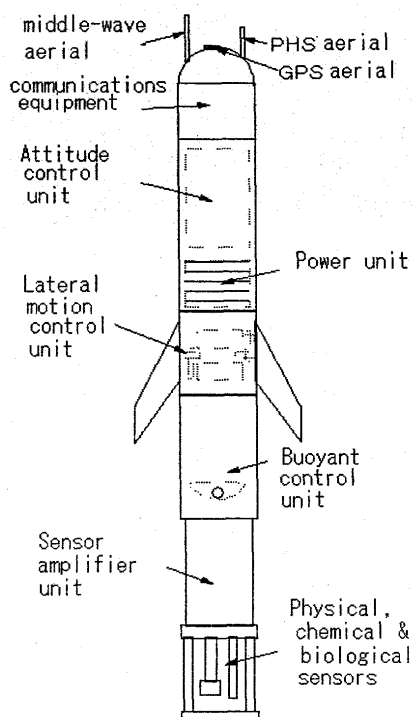


Fig.5 Schematic view of autonomous Lagrangian platform system.

4. 赤潮プランクトンの生態²⁾

通常の海域では、珪藻類を主とした多様な植物プランクトン群が共存する生物環境にあるが、漁業被害をもたらす鞭毛藻類の赤潮は、単一種が異常増殖することにより形成され、生物多様性が著しく減少した状況下にある。赤潮研究において、赤潮プランクトンの生理生態についてはかなりの知見が蓄積されてきたが、その発生のメカニズムについては未だに不明な点が数多く残されている。一般に、沿岸域では増殖速度に勝る珪藻類が優占する傾向にあり、鞭毛藻類の優占が観察されるのは、海域が成層構造をとり、鞭毛藻類の増殖に有利となる夏季に集中している。しかしながら、赤潮が発生する年、発生しない年が存在し、これにはその年の気象・潮流条件が大きく影響していると思われる。すなわち、鞭毛藻赤潮が発生しやすい夏季において、成層構造が頻繁に乱される年には珪藻類が卓越し、成層構造が長期間継続した年には鞭毛藻赤潮が卓越する傾向にある。

このサブテーマの研究では、水塊構造の変化とそれに伴う植物プランクトン種組成の変遷過程を明らかにする目的で、赤潮が頻発する海域に調査定点を設置し、水温、塩分、栄養塩濃度などから判断される水塊構造、および植物プランクトンの種組成について定期的な観測を行う。これらは、プランクトン種の自動追跡システムをフィールドで実証するにあたって基礎的な知見を得るために実施する必要がある。

5. 生態系の変化の予測

赤潮プランクトンの生態調査のデータを基に、その動態をモデル化し、赤潮プランクトンの増殖過程の予測が可能な生態系モデルを構築する。

対象海域における物理・化学・生物学的特性の把握と、構築した生態系モデルのモデル定数の決定とその検証のために、赤潮の発生頻度が高い時季に現地調査を実施する。調査には全水深にわたる流動構造を瞬時に捉えることのできる超音波ドップラー流速分布計（ADCP）と、水圧トリガーにより10cmピッチの水質（水深、水温、電気伝導度、クロロフィルa、濁度、DO、光量子）が計測可能な多項目水質計を用い、あわせて風や日射等、気象データの収集も行う。また、底泥からの栄養塩の溶出等、底質の特性を把握するために、底質分析も実施する。

開発された水中ロボットから送信される海域データの同化手法を確立し、精度の高い流況・水質の現況再現と変化予測を行う。また、流況シミュレーションによって得られた流速場のデータを用いて、赤潮プランクトン（水中ロボット）の挙動をラグランジェ的に追跡・予測するシステムを構築する。

流況シミュレーションには、これまで大阪湾の流動解析に適用され、その有用性が確認されている三次元パロクリニック流動モデルを用いる。また、水質シミュレーションにおいては、上図に示す動物プランクトンまで考慮した生態系モデル(Fig.6)と、底泥内での物質循環過程をモデル化した底泥モデルをリンクさせた三次元モデルを構築し使用する(Fig.7)³⁾。

一方、これまでの生態系モデルは、PZDN（植物プランク論、動物プランクトン、有機堆積物、栄養塩）モデルあるいは平均的なプランクトンモデルを用いた古典的な食物網に基づいている。これに対して、プランクトン種の大きさを定義することで微生物植物網を考慮したモデ

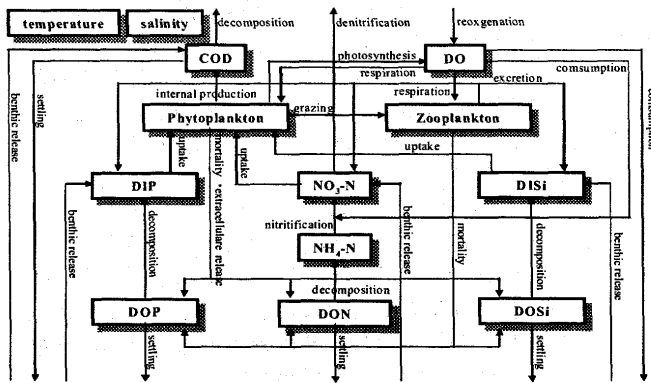


Fig.6 Ecosystem model

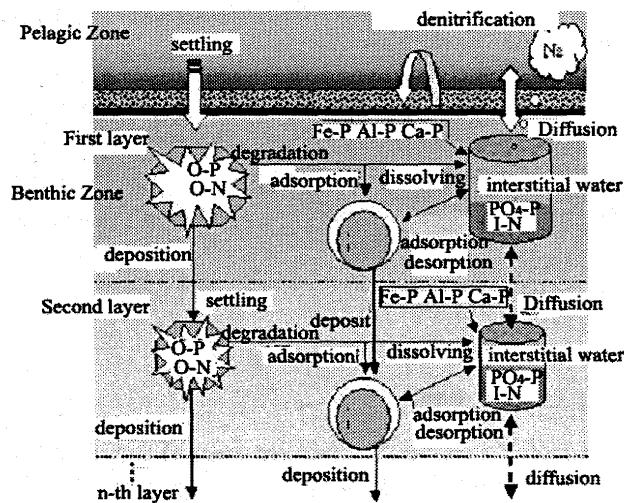


Fig.7 Sediment model.

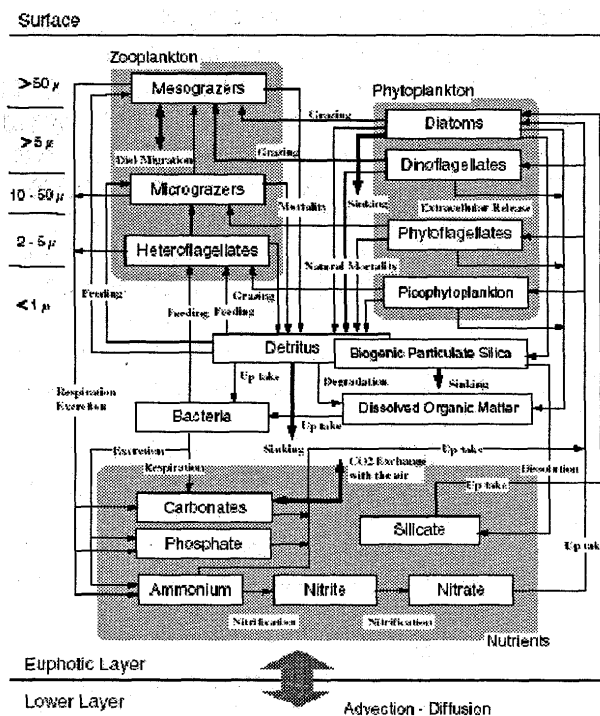


Fig.8 Schematic view of ocean ecosystem model considering microbial food web structure

ル (Fig. 8) では、一次生産者、消費者、分解者の三つのグループから構成し、一次生産者は、珪藻、渦鞭毛藻、独立栄養の微小鞭毛虫、ピコプランクトンから成り、消費者は中型グレイザー、小型グレイザー、従属栄養の微小鞭毛虫から成り、分解者は細菌から成る⁴⁾。このモデルの適用についても検討する。

6.全体監視システムの開発

全体監視システムは大きく分けて、a. 計測データ表示、b. 流況・水質・生態系シミュレーション結果の表示、c. 水中ロボットの移動予測と誘導制御から成り立っている (Fig. 9)。a. 計測データ表示では、PHS を用いた水面上の水中ロボットの位置情報、ドップラー速度計による水中ロボットの潜水中の位置情報、水中ロボットによる計測データの表示、リモートセンシングによる情報の表示をする。b. 流況・水質・生態系シミュレーション結果の表示では、a. の表示の時間と同期させ、計測データと同化させながら流況・水質・生態系シミュレーション結果を表示する。c. 水中ロボットの移動予測と誘導制御では、流況シミュレーションデータと水中ロボットの位置表示を行い、水中ロボットの移動を行う。この結果から、水中ロボットの次の移動場所の指定を行い、PHS を通して、位置制御情報を送り、水中ロボットの誘導制御を行う。

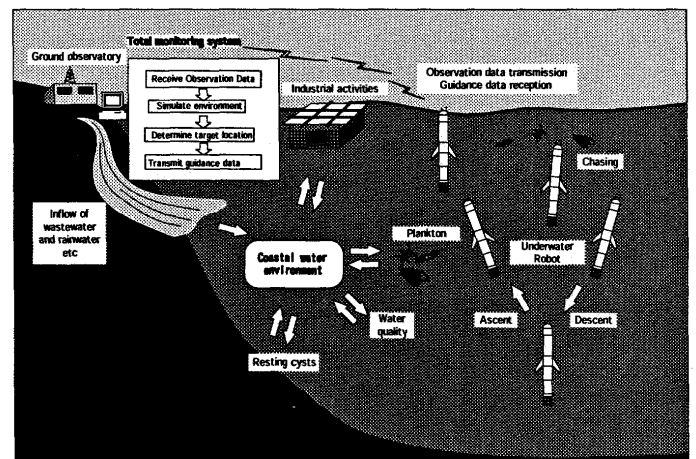


Fig.9 Schematic view of total system

参考文献

- 1) T. Horiuchi, T. Akiba and Y. Kakui : Development of a continuous imaging system equipped with fluorescent imaging for classification of phytoplankton, , Oceans' 04 MTS-IEEE Techno-Oceans, 2004
- 2) 多田邦尚, 一見和彦, 橋本俊也 : 大阪湾・紀伊水道における植物プランクトン群集のサイズ組成, 沿岸海洋研究, 40(2), 2003, pp.147-204
- 3) 入江政安・中辻啓二・西田修三 : 大阪湾における貧酸素水塊の挙動に関する数値シミュレーション, 海岸工学論文集, 第 51 巻, 2004, pp.926
- 4) K. Nakata and T. Doi: Estimation of primary production in the ocean using a physical-biological coupled ocean carbon cycle model, Environmental Modelling & Software, In Press