

### D-3 アジア縁辺海域帯における海洋健康度の持続的監視・評価手法と国際協力体制の樹立 に関する研究

#### (2) 定期航路船舶による海洋健康度のオンライン監視とプランクトン認識の高度化に関する研究

独立行政法人 産業技術総合研究所

電力エネルギー研究部門 電力環境計測グループ 飯高 弘、土井卓也、西山勝男、藤縄幸雄  
計測標準研究部門 電磁波計測科 電磁界標準研究室 中野 洋  
産官学連携部門 関西産官学連携センター 齋藤俊幸

平成 11 年～13 年度合計予算額 31,342 千円

(平成 13 年度予算額 9,000 千円)

【要旨】沿岸海域における海洋健康度の持続的監視・評価の実現を目標に、運航数が多く繰り返し計測を実現できる瀬戸内海定期航路船舶をプラットフォームとするリモートアクセスステーションの技術開発を行った。海水中の珪素とリン・窒素との組成比が海洋健康度の評価指標の有力候補である。珪藻と珪藻以外の植物プランクトンとの存在比は、珪素とリン・窒素との組成比に大きく影響すると考えられる。このような観点から、陸上から船舶衛星電話を介して顕微鏡撮像システムをリモート操作し、撮像・画像処理を行い、その結果をとおして海洋の健康度を評価することを目指した。

リモート操作の実現のため、船内 LAN を構築し陸上と船上との連携による運用実験を行った。その結果、陸上からの指令で、顕微鏡撮像システムの駆動、植物プランクトンの撮像・画像処理、GPS データも含むハードディスクへのデータ蓄積、画像・画像処理ファイル名の自動作成、そして陸上のデータサーバへの画像・画像処理データの転送が行えることをあきらかにした。撮像画像を JPEG 圧縮することによって、原画像に遜色のない画像を比較的短時間(約 36 秒)で陸上に転送できた。

船内振動による画像のぶれを抑制する工夫を施することで、種の判別指標となる特徴量の抽出に要求されるクリアな画像を得ることができた。計算機を用いた植物プランクトンの自動的な形状分類に必要な画像標本、ならびに採集された植物プランクトンの特徴量データ集を作成した。植物プランクトンを顕微鏡の視野内に誘導するため、上方ろ過法による海水中の植物プランクトン濃縮装置を設計・試作し良好に機能すること、ならびに濃縮液を委託分析した結果、最大 100 倍以上のプランクトン濃縮が可能であることを確認した。

以上の技術開発によって、船内の顕微鏡撮像システムを陸上においてリモート操作し、海洋健康度のオンライン監視を実現するための植物プランクトン特徴量および画像を取得する基盤を確立した。

[キーワード] 海洋健康度、プランクトン認識、オンライン監視、定期航路船舶、リモートアクセス

#### 1. 序

海洋の健康度を評価し海洋保全政策に結びつけるためには、海洋環境予測を念頭においた調査活動が必要である。海洋環境は空間的にも時間的にも幅広いスペクトラムをもつので、できるだけ多くのポイントで高頻度な調査活動が要求される。従来のように数少ない専用調査船のみでは要求に応えることができない。多くのルートをもつ定期航路船舶を用いた繰り返し観測を実現できれば、その効果は非常に大きいと言えよう。海洋調査のためのリモートアクセスステーションとしての諸機能を、定

定期航路船舶に組み込むことができれば、その普及によって健康度予測も視野に入れた調査活動の実現に大きな前進をもたらすものと期待される。

人為的要因がもたらす地球環境の変動の中で、海水中のリン・窒素と珪素との組成比の減少が取り上げられている(1)。人間活動の増大により河川等から流れ込むリン・窒素が増大するのに対し、人口増加がダム建設等の水利用形態の変化を引き起こし、その結果海域に到達するまでに沈下していき、沈下することによって珪素が増大すると考えられている。

リン・窒素の増大と珪素の減少は、健康な海域の証しである春季の大規模な珪藻の増殖(ブルーミング)の結果に大きな影響を与えているとされている。リン・窒素・珪素の取り込みによる珪藻のブルーミングの後、もしリン・窒素が過剰に残っていると、珪素を必要としない非珪藻類である渦鞭毛藻類等が増殖し赤潮発生の件数が多くなるデータが、とくに沿岸域において提出されている。その結果、海洋生態系の基盤が珪藻類から非珪藻類にシフトする可能性があると言う「シリカ欠損仮説」が注目されている(1)。シリカ(珪素)欠損に関連する海洋健康度の評価指標を定め、できるだけ多くの海域で頻繁かつ定期的に観測・計測が実施されることが必要である。

このような観点から、海洋健康度の評価を、珪藻類から非珪藻類への基盤変化をはじめとする海洋生態系の変動として把握することを意図する。定期航路船舶を植物プランクトン観測の機能をもつリモートアクセスステーションとして活用することとする。人間が生物であることを考えれば、生態系の観測による環境評価は、生物に対する影響を生物に対するインパクトとして直接的に見るという点でダイレクトセンシングの一形態と見なすことができよう。定期航路船舶をもつリモートアクセスステーションにするにあたっては、植物プランクトンの観測とくに顕微鏡撮像のみならず、海水の温度や塩分などのセンシング手段としての機能も含めて考えることにする。

## 2. 研究目的

定期航路船舶を海洋調査のためのリモートアクセスステーションとするには、先端的な情報通信システムの導入とともに、専任の人材が期待できないため調査活動そのものの自動化・省力化を図る必要がある。海洋健康度の調査に必要な計測機器に、自律的な機能を組み込む技術開発は避けて通れない。このような技術開発を進めながら、高頻度の調査活動を同時並行的に進めることによって、大きな容積と複雑な構造をもつ海洋環境の健康度予測および評価の展望が開かれよう。定期航路船舶のような調査手段を充分活用するためには、

- ①陸上のどこからでの調査活動に参加できるような自在アクセス機能
- ②調査活動を在宅で積極的に行うための臨場感覚リモート計測制御機能
- ③保守管理の無人化を目指したりリモートメンテナンス機能

の実現を目指すことが避けて通れない。しかし、これらは端末である計測機器の自律化が充分図られた上ではじめて機能する。自律的な機能をもつ海洋健康度評価のための計測機器の技術開発が前提であることは言うまでもなからう。

従来と同様に海洋健康度に関する調査は手を休める訳には行かない。海洋健康度に関する調査活動の継続と同時に、将来的に海洋環境予測の実現に向けた技術開発を合わせて進めていくことが、現在の海洋保全政策の限界を打破する一つの方策と考えられよう。そこで、海洋健康度のオンライン監視を実現するため、瀬戸内海を航行する定期航路船舶「さんふらわああいぼり」を、陸上から多様な操作が行えるリモートアクセスステーションとして利用することを基本的な目標とした。従来の調査活

動の継続とともに、上記①～③のような機能の実現を図ることとした。

当研究では、上述のように「さんふらわああいぼり」をリモートアクセスステーションとする技術開発を対象とする。将来の広域な海洋監視を念頭におき、船舶衛星電話をデータ伝送路として、

- (1) 船内観測・計測システムへのリモートアクセス
- (2) 観測・計測システムのリモート操作
- (3) GPS データを含む観測・計測データの自動ファイル作成・蓄積
- (4) 陸上のデータベースへのデータファイルの転送
- (5) データベースの共同利用

の諸機能を統合するリモートアクセスステーション技術の開発を図る。海域のシリカ欠損により海洋生態系の基盤が珪藻類から非珪藻類にシフトする可能性があると言う仮説にもとづき、新たにリモート操作による植物プランクトン撮像・画像処理技術の開発を目指す。

定期航路船舶「さんふらわああいぼり」をリモートアクセスステーションとするシステム構成を図1に示す。陸上との情報通信には船舶衛星電話を用い、イントラネットサーバ機能をもつデータベースサーバで取得情報を蓄積・管理し、多くの参加機関で利用できる構成になっている。陸上からの指令情報をとおして海洋健康度のオンライン監視の実現が期待できることが読みとれよう。

図1のシステム構成を念頭において、データベースサーバの構築、リモート操作による植物プランクトン顕微鏡撮像、自動的画像処理、ならびに処理画像の転送の実現を基本目標とした。顕微鏡撮像は、船底から汲み上げられた海水を顕微鏡下の石英フローセルに誘導して行う。

船舶衛星電話を介して、植物プランクトンの圧縮画像を陸上のデータベースサーバに転送することを試みる。図1に示すデータ通信制御装置をサーバとして船内LANを構築し、植物プランクトン顕微鏡撮像システムのリモート操作の実現を図る。顕微鏡撮像システムをはじめすべての機器の設置場所

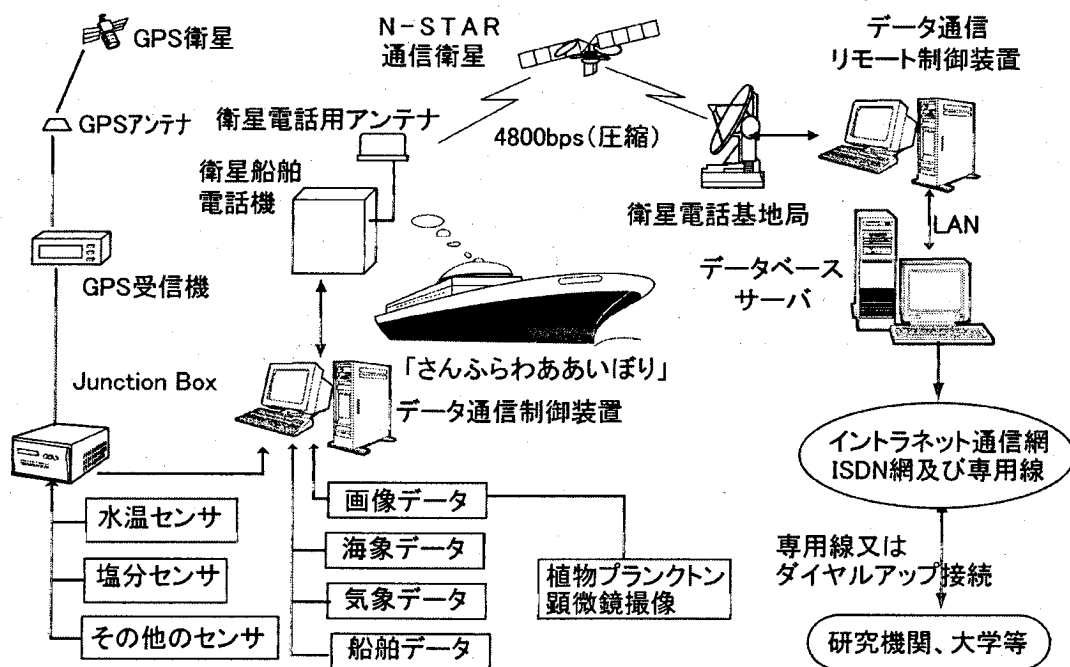


図1. 定期航路船舶を用いたリモートアクセスステーションのシステム構成

である機関室には、スクリー駆動用のプロペラシャフトが通っており振動および騒音は無視できない。そこで、船内の振動による顕微鏡撮像画像のぶれの解消するための防震対策、さらなる画像ぶれの解消方法について検討する。植物プランクトン画像のデータファイル名の自動作成、瀬戸内海航路での採水による植物プランクトン標本および特徴量データ集の作成、特徴量データから珪藻・非珪藻の分類を可能とする種の判別技術、および顕微鏡の視野内に植物プランクトンを自動誘導するための濃縮技術の開発を目的に研究を行う。とくに最終年度においては、船内に設置した植物プランクトン顕微鏡撮像システムを陸上からリモートで操作する技術、衛星船舶電話を介して取得画像とその特徴量データを陸上に転送する技術の実証を目的とした。

### 3. 研究方法

図1のシステム構成にもとづいて、構成要素の基本的な仕様について検討する。定期航路船舶をリモートアクセスステーションとする海洋健康度監視は、国立環境研をはじめ複数の研究機関が協力して行うこととした。そこで陸上のシステムにおいては複数の研究機関による共同利用を前提としてイントラネットサーバ機能をもつデータベースサーバを構築する(図1)。データベースサーバを構築するにあたっては、定期航路船舶「さんふらわああいぼり」による計測の時空間パターンを把握する必要がある。

「さんふらわああいぼり」は、大阪南港と別府の間を2日間で1往復する。すなわち同一通過点において1日1回の計測サンプリングが行うことができる。大阪南港および別府における出航時刻と着港時刻は、当初それぞれ午後7時および午前6時20分であった。

これらの諸条件をもとに導き出した計測データの蓄積の考え方を図2に表す。同図から通過ポイント

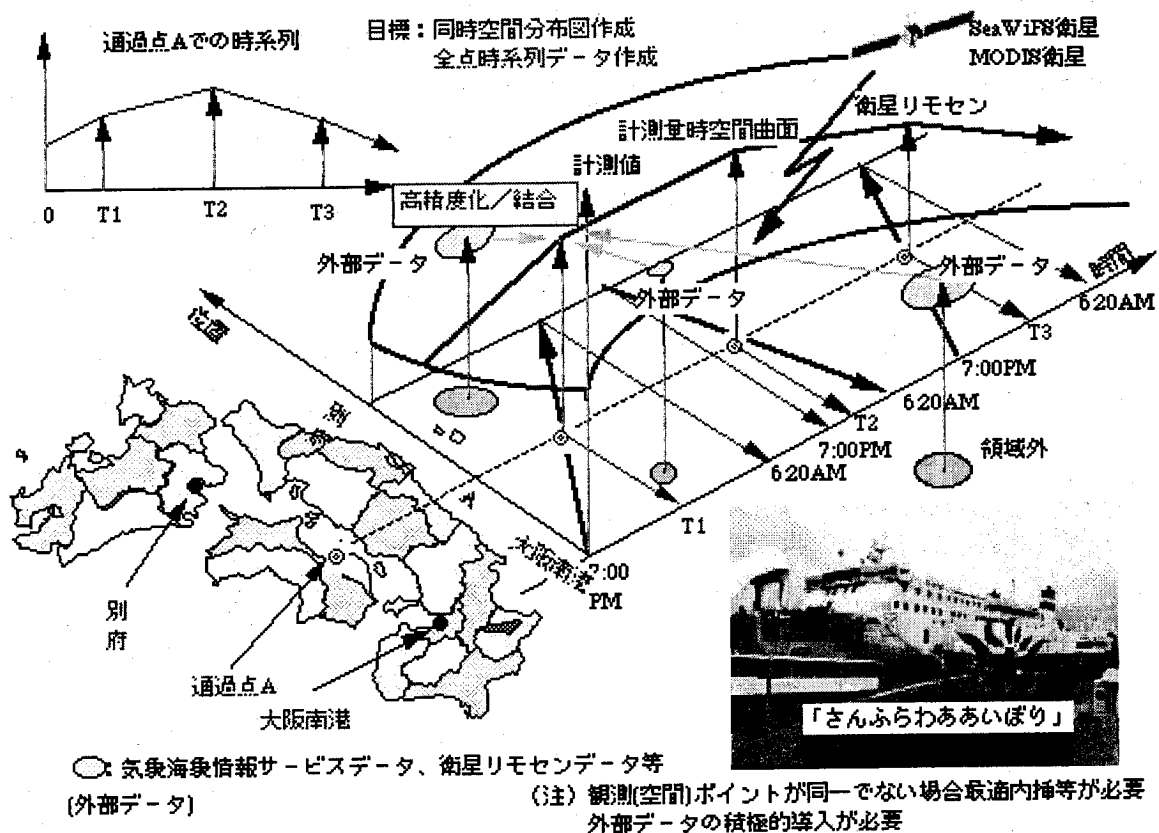


図2. 定期航路船舶による計測データ蓄積の考え方

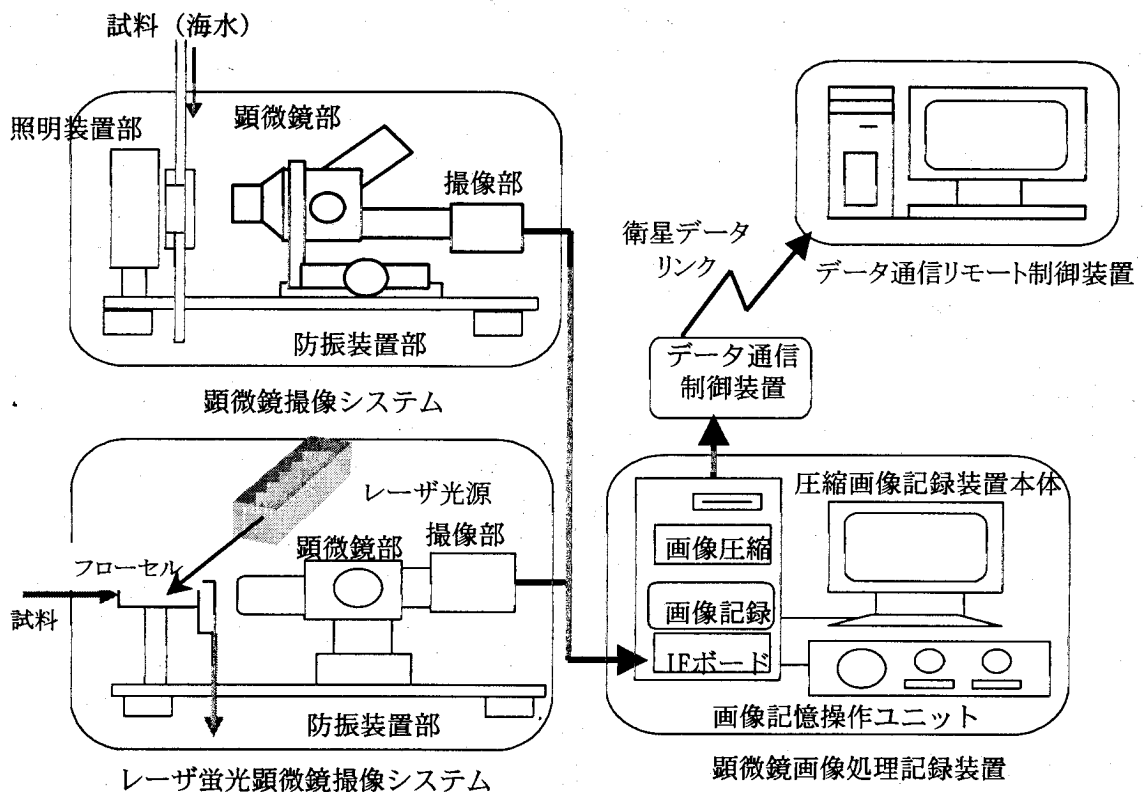


図3. 植物プランクトン顕微鏡撮像システムの概念図

ントと通過時刻とをベースに計測データを取得すれば、各通過ポイントでの時系列データが得られることが分かる。通過ポイントと通過時刻をベースにすることによって外部データと結合することができる。瀬戸内海航路の各通過ポイントでの時系列データおよび外部データなどを用い、同時刻におけるすべての通過ポイントのデータを内挿法等で計算することにより同時空間分布の作成が可能になる。現在は、双方の港における出航時刻および着港時刻は異なるが同様の考え方が当てはまる。

上述の観点から瀬戸内海航路の各通過ポイントにおけるサンプリング時間1日の時系列データを容易に取り出せることを基本指針としてデータベースサーバを構築し、既存の計測センサ(水温センサ等)データを蓄積して使い勝手について評価する。とくに視覚的な操作によって容易に各通過ポイントの時系列データを取り出せることを目標とする。

「さんふらわああいぼり」においては、既存センサ(水温センサ等)からの計測データおよび顕微鏡撮像による植物プランクトンの画像データを陸上に転送するため、通信制御装置をサーバとして船内LANを構築する(図1)。船内での計測および植物プランクトン撮像は、船底から汲み上げられた海水を用いて行う。船内LANをつかって植物プランクトン撮像のリモート操作を実現することとする。計測および撮像を行った時刻と位置の計測にはGPSを用いる。画像データおよび計測データを取得した時刻と位置を決定するため、船内LANの機能でそれらのデータとともにGPSで得た時刻と位置をサーバである通信制御装置に取り込むソフトウェアをつくる。

植物プランクトン顕微鏡撮像システムの概念図を図3に示す。同図の左上の顕微鏡画像撮像システムは、静止画像撮像を行うサブシステムで、左側の顕微鏡画像処理記録装置によって撮像画像を解析・

蓄積する構成になっている。船舶衛星電話のデータ転送速度 4,800bps にすぎないので、原画像と遜色ない範囲での画像圧縮を行い陸上への画像転送は圧縮された画像データを用いて行うこととする。顕微鏡画像処理記録装置は、JPEG 方式による画像圧縮と撮像画像から植物プランクトンの特徴量の計測を行うとともに、それらのデータをデータ通信制御装置に受け渡す機能をもつ。そこで、陸上からの指令に応じて、データ通信制御装置の表示画面を見ながら、圧縮画像データ、特徴量データ、および GPS による時刻・位置データが、陸上のデータサーバに蓄積できるかどうか実証するためのデータ転送実験を行う。また JPEG 圧縮された画像データ転送がどの程度の時間で誤りなく行えるかどうかについてあきらかにする。

図 3 の左下のレーザ蛍光顕微鏡撮像システムは、当初試験的に手持ちの機器を用いて組み立てたものである。図中のフローセルにシート状のレーザ光を照射し、フローセル流路の断面蛍光像から植物プランクトンの密度計測と形状分類を連続的に行うサブシステムである。レーザ蛍光を用いることによって、植物プランクトンのみの計数および形状計測を可能にする機能をもつ。数値化されたデータは、データ通信制御装置に受け渡され、必要に応じて陸上で取得できる。画像データは左側の顕微鏡解析記録装置によって撮像画像を記録される。上述の撮像システムによる撮像が不連続に行われるのに対し、植物プランクトンのサイズおよび形状を連続的に撮像し得るかどうかについて基礎的な撮像実験を行う。

データ通信制御装置の表示画面を見ながら所定の圧縮画像データおよび特徴量データを陸上に転送するには、それらのデータファイルに名前を自動的に付けることが要求される。データファイル名の自動作成に関しては、日時をファイル名に、原画像、圧縮画像、および特徴量データについて、それぞれ .bmp、.jpg、および .xls の拡張子を自動的に付けるプログラム作成する。Excel ファイルに書き込まれる特徴量データを得るにあたっては、原画像を 2 値化し特定のサイズ以上の画像のみを対象とする。植物プランクトンの形状分類に必要な画像標本および特徴量データ集を作成するため、瀬戸内海航路の代表的な海域(大阪湾、播磨灘、備前瀬戸、伊予灘、別府湾)において採水を行うこととした。

植物プランクトン顕微鏡撮像システムのリモート操作の実現を念頭において、船内 LAN のサーバで

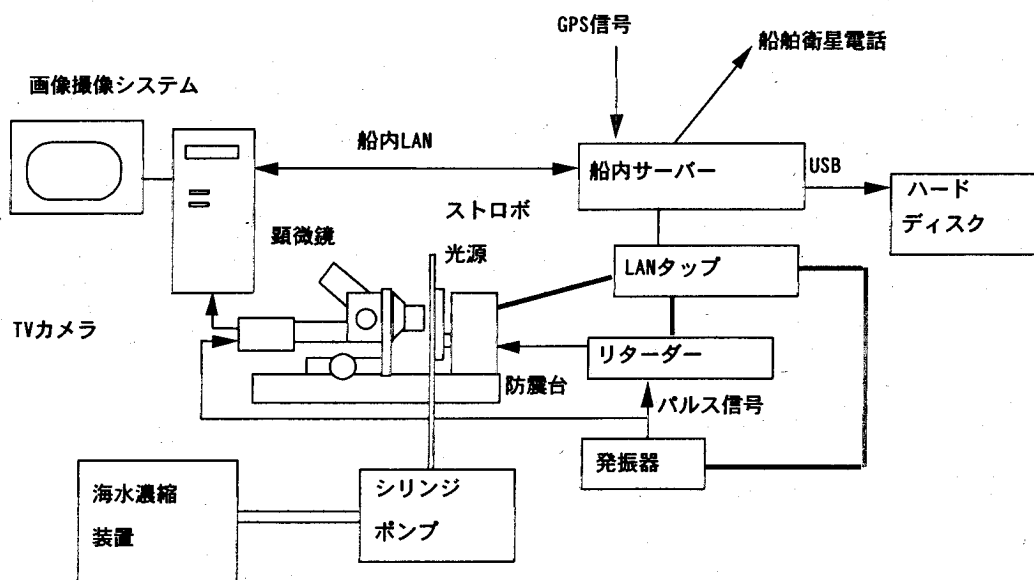


図 4. リモート操作のための顕微鏡撮像システムの構成図

あるデータ通信制御装置(図1)を介して電源のON/OFFがリモートで行えるLANタップを利用する。図

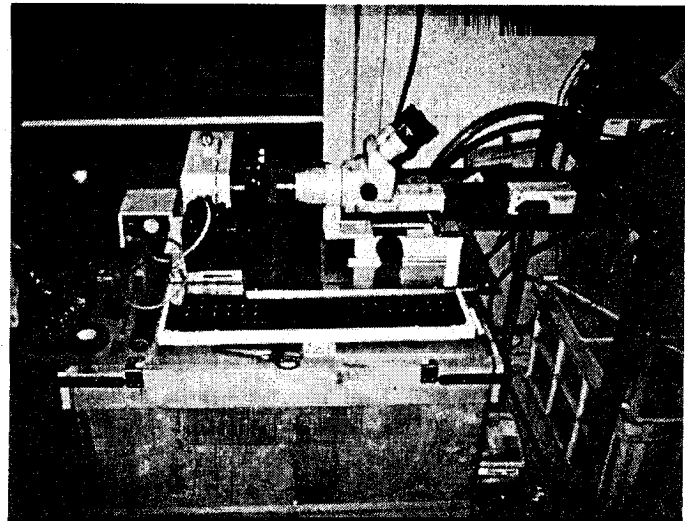


図5. 顕微鏡撮像部

4にリモート操作のための顕微鏡撮像システムの構成図を表す。LANタップを用いて、ストロボ光源、ストロボ光源とTVカメラのタイミングをとるためのリターダー、TVカメラ、ストロボ光源およびTVカメラに駆動パルスを送るための発振器の電源制御が行えるシステムを開発する。陸上からLANタップ等を制御することによって、顕微鏡撮像システムのリモート操作の可能性を実証する。

船内の振動による撮像画像のぶれを解消するため、顕微鏡撮像部を横向きにして防震台の上に設置する(図5)。さらに CCD カメラをインターレース方式のものから

プログレッシブ方式のものに代えるとともに、ハロゲン定常光源の代わりに閃光時間の短い( $\sim 5\mu$  sec)ストロボ光源を用いることとする。インターレース方式の CCD カメラでは、2コマの画像を重ねて1枚の画像を作るので、激しい振動場ではだぶって撮像されるからである。陸上においてストロボ光源の閃光に合わせて CCD カメラのシャッターを切る電子回路を組み込んで動作確認実験を行う。その後、船内に持ち込み撮像画像のぶれの解消できるかどうかについて撮像実験を行う。

顕微鏡の視野内への植物プランクトンの誘導を実現するため、上方ろ過法を用いた植物プランクトンの濃縮装置を設計・試作する。図6に濃縮機構を組み込んだ顕微鏡撮像システムの概念図を示す。濃

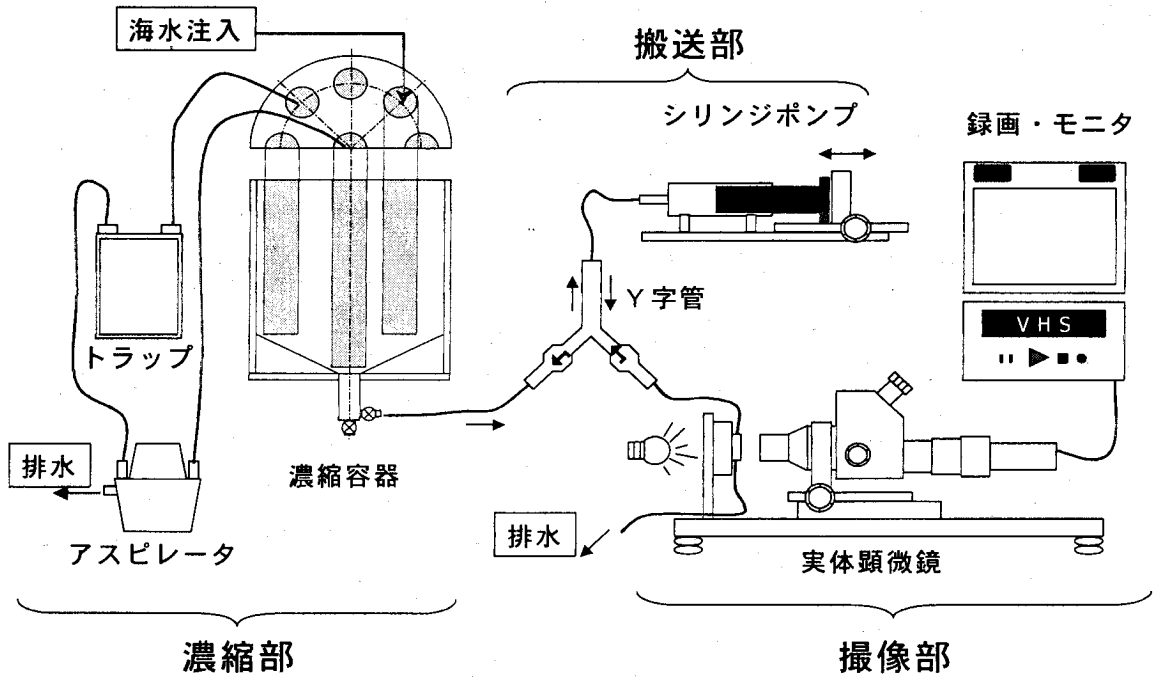


図6. 濃縮装置を組み込んだ顕微鏡撮像システムの概念図

縮機構は、濃縮部、搬送部、撮像部からなる。濃縮部は、透明アクリル樹脂で作られており、内径 280mm、

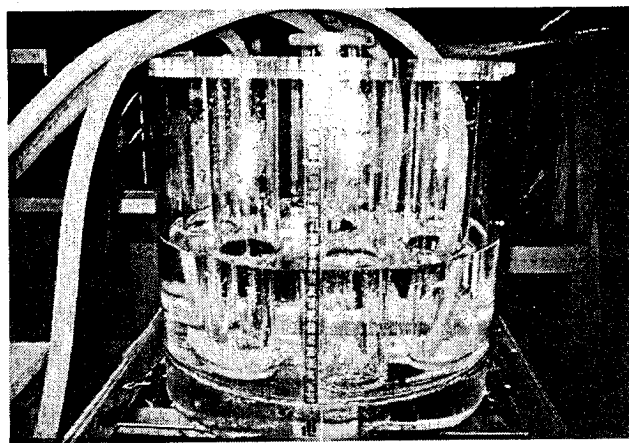


図 7. 濃縮部

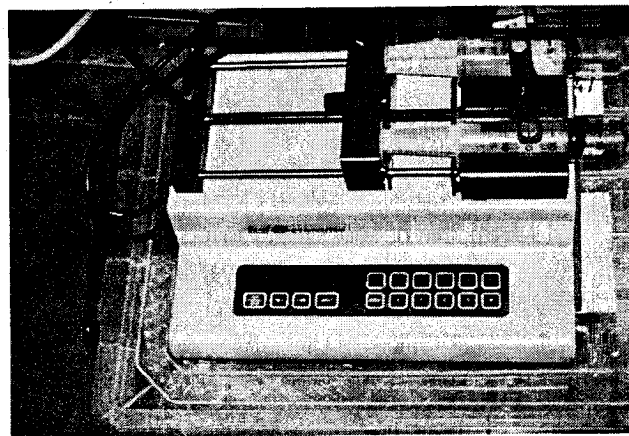


図 8. シリンジポンプ

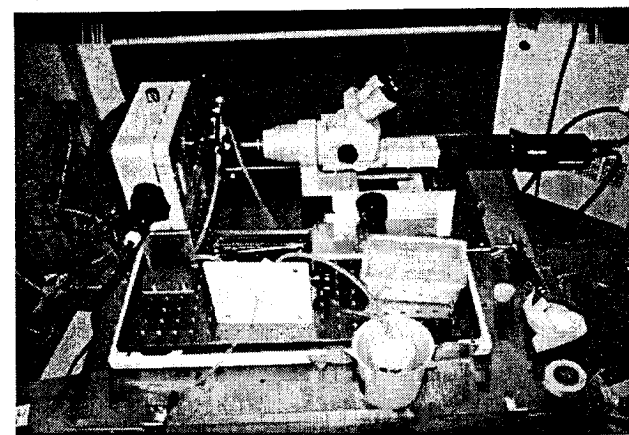


図 9. 撮像部と Y 字管

外径 300mm の円筒容器部とこの容器の蓋に当たる部分に内径 42mm の円筒を中心部に 1 本とそこから同心円上に 8 本配置してある。この円筒の下端にプランクトンネットを取り付け、蓋の上方からアスピレータに取り付けたホースをさし、海水を吸引・排水することで、円筒容器内に濃縮海水が残るようになっている。プランクトンネットの目合い、プランクトンネットの洗浄法、使用する海水の量等についても検討をおこなうこととした。

濃縮機構の搬送部は、マイクロシリンジポンプと Y 字管からなっている。Y 字管は逆止弁を 2 つ用いて、シリンジポンプの往復動に対しても、送液が一方向となるように構成されている。撮像部は、フローセル、実体顕微鏡、CCD、VTR、モニターで構成されている。フローセルは石英製で、流路幅 10mm、流路長 15mm、スリット幅については、0.1、0.2、0.3mm の 3 種を用意した。

濃縮部 (図 7) において濃縮された海水は、搬送部の機能で顕微鏡の撮像部にあるフローセルに送り込まれる。搬送部は、マイクロシリンジポンプ (図 8) と Y 字管からなっている。Y 字管は逆止弁を 2 つ用いて、シリンジポンプの往復動に対しても、送液が一方向となるように構成されている。図 9 は撮像部と Y 字管を表す。

#### 4. 結果・考察

臨場感のあるリモート操作を実現するため、陸上から衛星船舶電話を介して、船内のデータ通信制御装置にアクセスし、その画面をディスプレイに表示させて、あたかも船内のデータ通信制御装置が手元にあるかのように操作できる環境を作るソフトウェア”pcAnywhere”を用いることとした。陸上において船内のデータ通

信制御装置の表示画面を見ながら、リモート計測制御を行える環境整備の基礎を作った。船舶衛星電話経由でアクセスし、既存の計測センサ(水温センサ等)からのデータ収集の試みに成功した。

WEB ブラウザでの操作性の高い利用が可能であり、海洋健康度評価のためのデータ蓄積・検索に適合したデータベースサーバを構築した。瀬戸内海航路およびデータベースの検索画面をそれぞれ図 1



0におよび図11に示す。瀬戸内海の地図上をクリックすることによって、蓄積されたデータから目的とする航路のポイントの時系列データ得られる使い勝手を考慮したソフトを組み入れ、実際の運用によって使える確認を得た。

陸上のデータ通信制御装置でデータの補正等を行った後、データベースサーバへ定期航路船舶データを転送すると、自動的にデータベースへの追加を行う機能を有する。一度登録されたデータもその

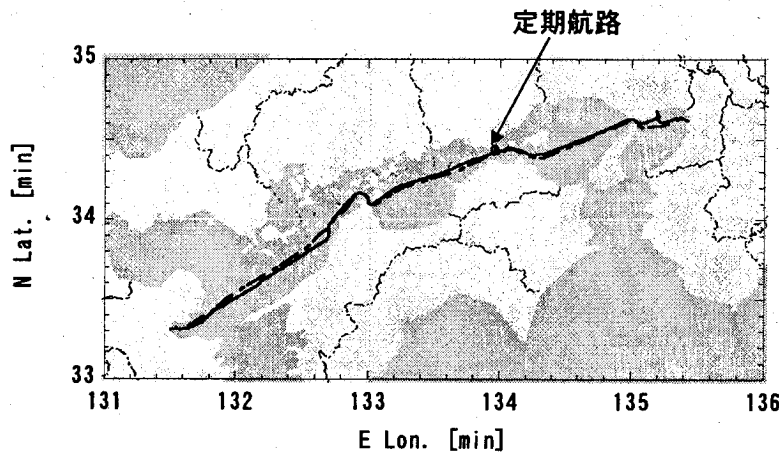


図10. 瀬戸内海航路

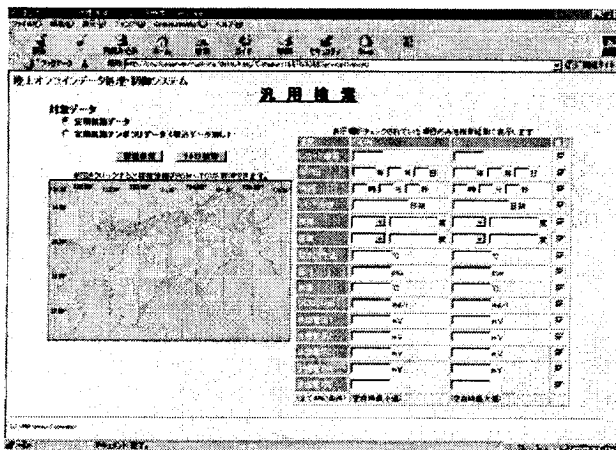


図11. データベースサーバの検索画面

(約18kB)を、船舶衛星電話を介して陸上のデータベースサーバに転送したところ、転送時間は約36秒であった。転送された画像(図13)は原画像と遜色なく、陸上において、肉眼による種の判定に使用することは充分可能であることが分かった。

レーザー蛍光顕微鏡システム(図14)のフローセルは矩形で、流路の断面は8mm x 8mmである。レーザー光源には532nmで発振する半導体レーザー励起Nd:YAGレーザーを使用し、シリンダリカルレンズで厚さ約50mmの薄いシート状のレーザービームに集光し、フローセル中の流路に垂直方向から照射して、流路方向から撮像するシステムになっている(図3参照)。蛍光像の撮像例を図15に示す。この時点においてレーザー蛍光顕微鏡システムを用いた撮像実験は終了したが、図15から珪藻と非珪藻との識別が可能であることが分かったので、今後の利用が期待できる。

リモート操作による植物プランクトン撮像実験は、2002年3月13日~14日の乗船期間に行われた。

後の修正が容易なように、既存のソフトウェア”CoolICE”をベースに改良を施したものを使用している。また、3年間分のデータを維持管理できるように十分なハードディスクを有している。イントラネットサーバとしての機能の実現によって、ISDN回線を介して複数の参加機関において共同利用できるシステムを構築できた。

顕微鏡撮像システム(図12)で取得した顕微鏡画像を処理することによって、植物プランクトンの種を判別する可能性をあきらかにするための撮像実験を行った。船内に汲み上げられた海水を10ミクロンメッシュのネットですろ過してプレパラートにとり、CCDカメラにより植物プランクトンの顕微鏡画像を撮像した。取得画像を処理し代表的な特徴量を求めるとともに、その画像(約900kB)をJPEG圧縮した。約50分の1に圧縮された画像

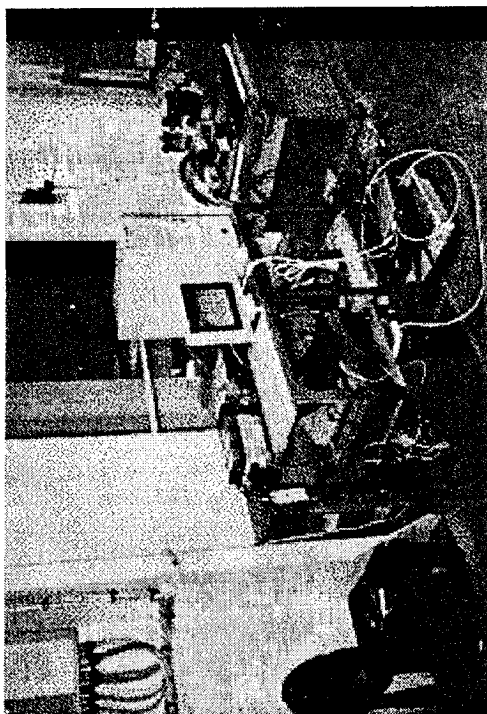


図 12. 顕微鏡撮像システムの設置状況

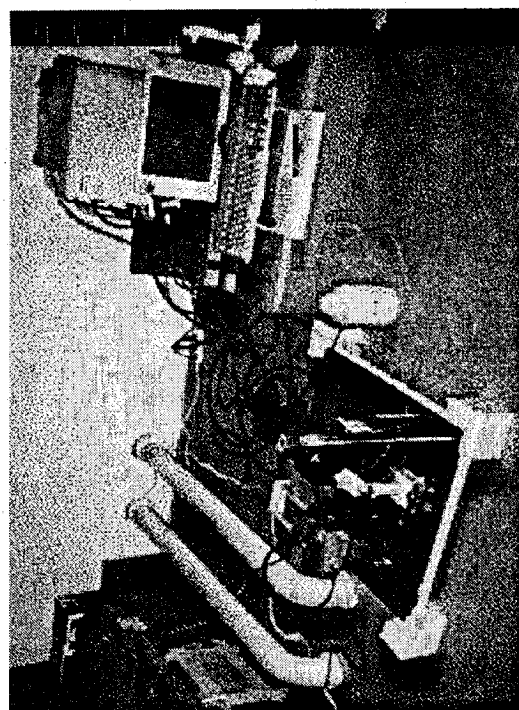


図 14. レーザ蛍光顕微鏡システムの設置状況

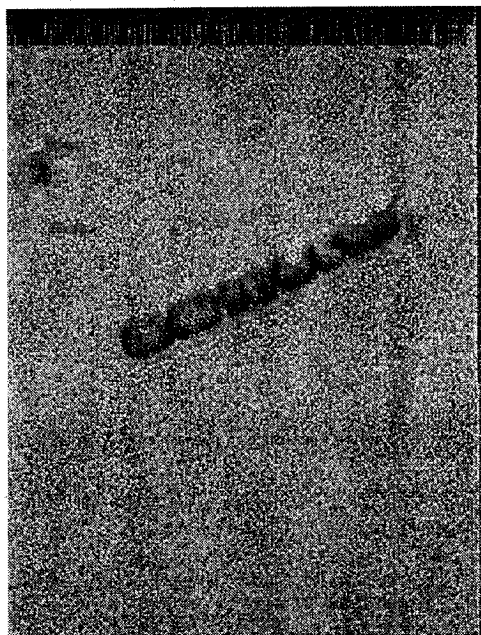


図 13. 転送された植物ブランクテン画像例

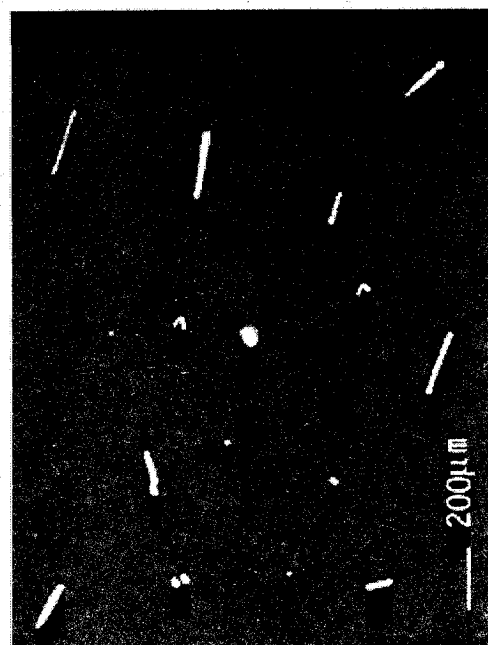


図 15. 植物ブランクテンの蛍光像の例

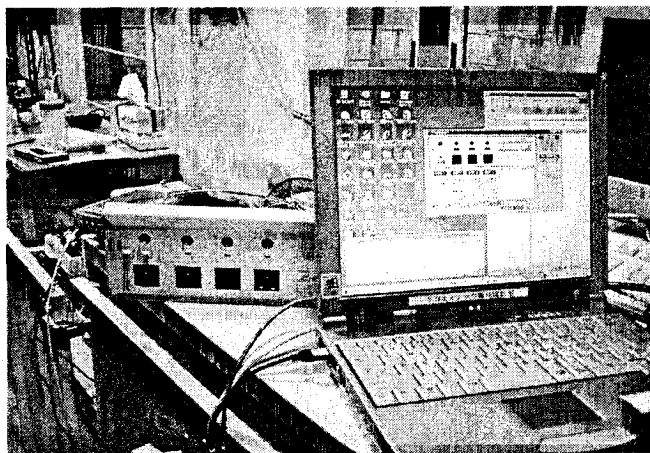


図16. LANタップの操作状況

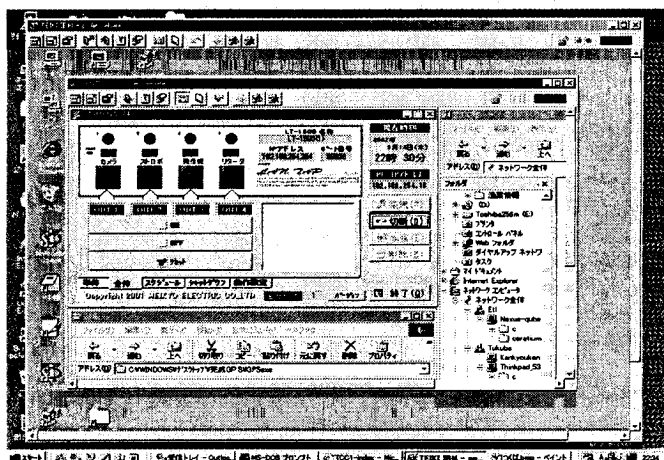


図17. LANタップ操作画面

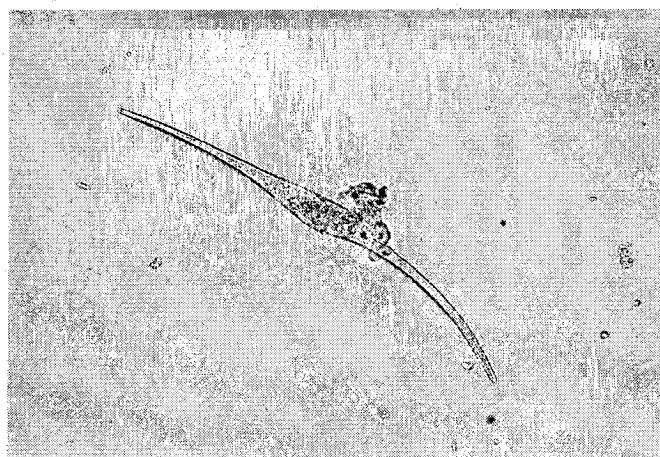


図18. 植物プランクトン撮像例

立ち上げ操作を行ったところ順調な結果を得た。濃縮海水を用いて植物プランクトンの撮像を行うことができた。さらに船内 LAN の機能によって、DGPS 受信機から時刻・位置データの通信制御装置への取り込み、撮像画像の 2 値化、特徴量の計測が行えるとともに、GPS データ（時刻・位置データ）を

リターダーによる TV カメラのシャッター解放後の閃光時間遅れおよび発振器による撮像の周期は、それぞれ  $500\mu\text{s}$  および  $2.3\text{Hz}$  にセットした。通信制御装置の画面を見ながら LAN タップを介しての TV カメラ、ストロボ光源、発振器、およびリターダーの電源の

表 1. 形状計測に用いた特徴量

周囲長
絶対最大長
真円度
円相当径
円相当周
周囲長対円相当周比
周囲長対面積比
慣性相乗モーメント
主軸に関する慣性モーメントの和
主軸に関する慣性モーメントの差
モーメント面積比
伸長度
ひろがり度
円らしさ
楕円の長短径比
重心からの最小距離と最大距離の比
回転不変モーメント 1
回転不変モーメント 2
回転不変モーメント 3
回転不変モーメント 4
回転不変モーメント 5
回転不変モーメント 6
回転不変モーメント 7

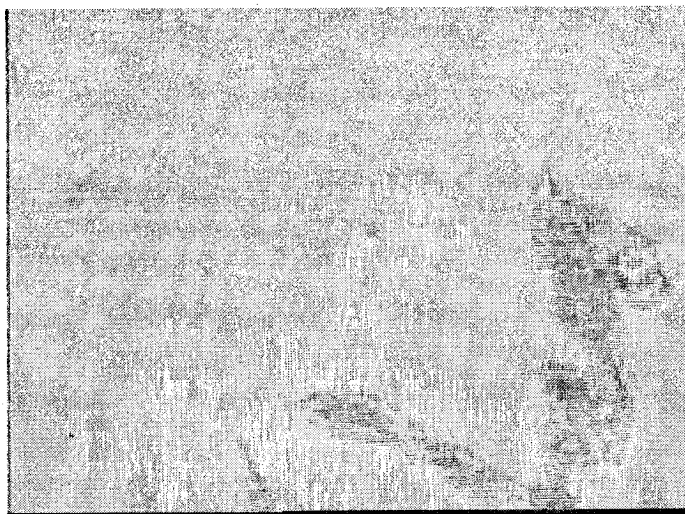


図 19. 従来方式によるぶれた撮像画像



図 20. 新方式によるぶれのない撮像画像

含む画像データと画像処理データ(特徴量計測データ)をハードディスクに蓄積できることを実証した。さらに JPEG 圧縮された画像データ、画像処理データ、および時刻・位置データを陸上に転送することに成功した。LAN タップの操作状況、LAN タップの操作画面、植物プランクトン撮像画像例をそれぞれ、図 16、17、および 18 に示す。

船内の振動による画像ぶれについて検討するため、まずハロゲン定常光源を用いインターレス方式の CCD カメラで撮像した(図 19)。図 18 から撮像システムが防振台に設置されているにもかかわらず、画像が 2 重になっていることが見てとれる。図 20 はストロボ光源のもとでプログレッシブ方式の CCD カメラで撮像した画像を表す。像がぶれてないことが見てとれる。画像処理に十分な静止画が得られていることが分かった。

原画像、圧縮画像、および特徴量データに、日時のファイル名およびそれぞれの拡張子を付ける自動プログラムは順調に動作した。2 値化した画像を用いて計測する特徴量としては、等価円の直径と周囲長との比あるいは等価楕円の短軸長と長軸長との比から与えられる円形度、平行移動お

よび回転によらない 7 つのモーメント不変量を用いることとした(表 1)。表 1 の 7 つのモーメント不変量については、文献(2) のとおりである。

濃縮機構の性能実験は、同じ時期の 2001 年 3 月 12 日~14 日と 2002 年 3 月 13 日~14 日との 2 回行った。図 21 に前者の航跡および東経 134 度の海水採取ポイントを記した地図を示す。図の実線が往路(西行き)、点線が復路(東行き)を示し、矢印の先端にある黒丸が海水を採取した地点である。

第 1 回目の性能実験は、メッシュの目合いが異なる 3 種類(10、50、100 μm)のプランクトンネットを用いて行った。海水の体積濃縮率、プランクトン濃縮率、プランクトン収支の関係を表 2 に示す。プランクトン収支は次の式で与えられる。

$$\begin{aligned} \text{原液の体積} \times \text{そのプランクトン濃度} &= \text{濃縮液の体積} \times \text{そのプランクトン濃度} \\ &+ \text{通過液の体積} \times \text{そのプランクトン濃度} \\ &\quad (+ \text{ ネットに捕捉されたプランクトン}) \end{aligned}$$

表 2 のプランクトン収支は原液のプランクトン総数で無次元化してあり、この値が 1 の時に収支が

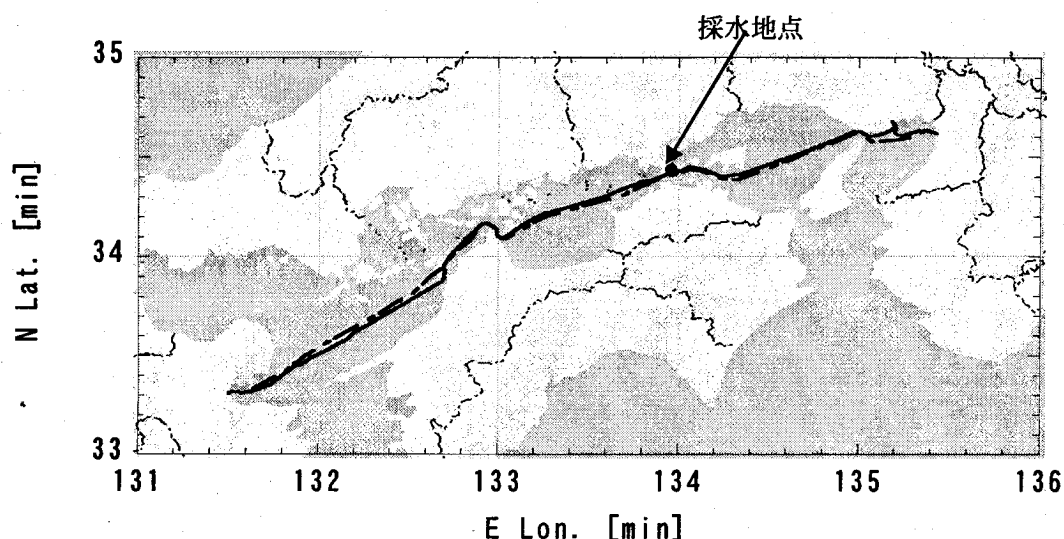


図 2 1. 航跡および海水採取場所(2001.3月)

表 2. 濃縮実験の結果 (濃縮率とプランクトン収支)

プランクトンネット目合い ( $\mu\text{m}$ )	10	50	100
原液の体積 (?)	12	12	12
通過液の体積 (?)	4.4	11.9	11.9
濃縮液の体積 (?)	7.6	0.1	0.1
体積濃縮率 (倍)	1.58	120	120
原液のプランクトン濃度 (cells/?) ※	218,150	220,400	336,000
通過液のプランクトン濃度 (cells/?) ※	17,400	79,750	243,400
濃縮液のプランクトン濃度 (cells/?) ※	311,250	26,269,000	3,187,600
プランクトン濃縮率 (倍)	1.43	119.19	9.49
(a) 原液のプランクトン総数 (cells)	2,617,800	2,644,800	4,032,000
(b) 通過液のプランクトン総数 (cells)	76,560	949,025	2,896,460
(c) 濃縮液のプランクトン総数 (cells)	2,365,500	2,626,900	318,760
プランクトン収支 [(b)+(c)]/(a)	0.933	1.352	0.797

※ (株) 日本海洋生物研究所に分析委託

取れていることになる。乗船実験にて実際の海水を用いて、濃縮・撮像実験を行い、濃縮機構が良好に動作することを確認した。しかし、目合い  $10\mu\text{m}$  のプランクトンネットでは、濃縮中目詰まりが激しく体積濃縮率が 2 倍にもならなかった。すなわち  $10\mu\text{m}$  の目合いに比して同程度あるいは大きい寸法の植物プランクトンが多かったと考えられる。

取得した濃縮液を委託分析した結果、目合い  $50\mu\text{m}$  のプランクトンネットでの濃縮が最適な結果であり、体積濃縮率・プランクトン濃縮率ともに約 120 倍であった。すなわち最大 100 倍以上のプランクトン濃縮が可能であることを確認した。濃縮前後のプランクトン収支については、最大 35% の誤差が見られるが、これについてはプランクトン検量手法 (全量計数ではなく、一部を計数し比例計算を行っている) を考慮するとある程度妥当なものと思われる。

目合い  $100\mu\text{m}$  のプランクトンネットでは、体積濃縮率は目合い  $50\mu\text{m}$  のケースと同様であるものの、プランクトン濃縮率は 10 倍にもならなかった (表 1)。  $10\mu\text{m}$  の目合いのケースとは逆に、  $100\mu\text{m}$  の目合いに比して小さい寸法の植物プランクトンが多かったと考えられる。ほとんどの植物プランクトンが、海水とともにろ過装置すなわちプランクトンネットを通過してしまい、濃縮されなかったと言

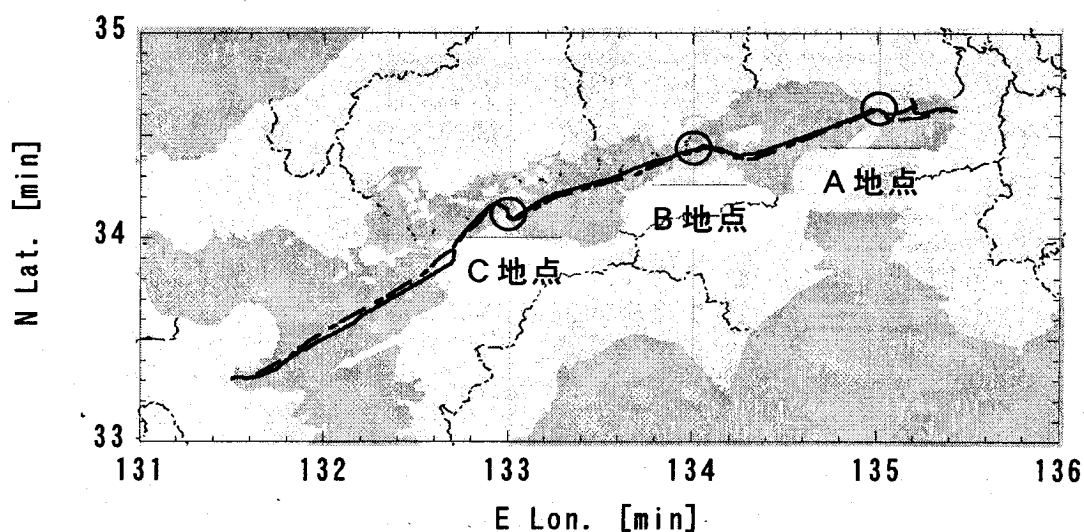


図 2 2. 航跡および海水採取場所(2002.3月)

表 3. 濃縮実験の結果 (濃縮率とプランクトン収支)

採水場所	A地点	B地点	C地点
原液の体積(?)	12.0	12.0	12.0
通過液の体積(?)	11.9	11.9	11.9
濃縮液の体積(?)	0.095	0.099	0.086
体積濃縮率(倍)	120.32	120.32	120.32
原液のプランクトン濃度(cells/?)※	824,600	176,600	54,889
通過液のプランクトン濃度(cells/?)※	595,222	189,756	41,667
濃縮液のプランクトン濃度(cells/?)※	1,606,947	3,328,889	228,605
プランクトン濃縮率(倍)	3.5	18.8	4.2
(a) 原液のプランクトン総数(cells)	9,895,200	2,119,200	658,667
(b) 通過液のプランクトン総数(cells)	7,086,121	2,258,281	496,417
(c) 濃縮液のプランクトン総数(cells)	152,660	329,560	19,660
プランクトン収支 ((b)+(c))/(a)	0.732	0.732	0.732

※日本気象協会関西本部環境科学センターに分析委託

うことができるものと思われる。

前年度の結果を受けて、プランクトンネットの目合いを50 $\mu$ mにして2回目の性能実験を行った。図22のA、B、Cの3地点で海水を採取し、濃縮前後およびプランクトンネットを通過したそれぞれの海水について、植物プランクトン計数用の試料を得た。

表3に各地点での濃縮率とプランクトン収支の関係を示す。海水濃縮率が全て100倍以上であるのに対して、プランクトン濃縮率は、A、B、Cの地点で、それぞれ2倍、18倍、4倍程度であった。最大のB地点でも約20倍と小さい値にとどまった。表1と見比べると伺いしれるように、第1回目と第2回目の実験において採集された植物プランクトンの大きさおよび形状の違いがあると考えられる。第2回目の実験で採取された植物プランクトンの寸法がプランクトンネットの目合い50 $\mu$ mに対して、小さいすぎた可能性がある。第1回目の目合い100 $\mu$ mのケースと同様に、多くの植物プランクトンが海水とともにプランクトンネットを通過したと思われる。

春季の珪藻のブルーミングが期待できる同じ時期の2001年3月12日~14日と2002年3月13日~14日において濃縮実験を行ったが、植物プランクトンの優占種が同じでないことは充分考えられる。



表3. 計数分析したプランクトン種 (2001年と2002年の比較)

2001.3.12			2002.3.13				
No.	種名	原液 個体数	割合	No.	種名	原液 個体数	割合
1	硅藻類			1	硅藻類		
2	Skeletonema costatum	3600	1.6%	2	Melosira sulcata	140	0.1%
3	Leptocylinthus danicus	1800	0.8%	3	Skeletonema costatum	75120	47.3%
4	Guinardia flaccida	50	0.0%	4	Leptocylinthus minimus		
5	Corethron pelagium			5	Guinardia flaccida		
6	Detonula pumila			6	Thalassiosira rotula	20	0.0%
7	Thalassiosira spp.	3000	1.4%	7	Thalassiosira sp. (small type)	27680	17.4%
8	Thalassiosiraceae	8600	3.0%	8	Thalassiosira spp.	680	0.4%
9	Coscinodiscus sp.			9	Thalassiosiraceae	3840	2.4%
10	Rhizosolenia delicatula	600	0.3%	10	Coscinodiscus asteromphalus		
11	Rhizosolenia fragillima	1200	0.5%	11	Coscinodiscus spp.		
12	Rhizosolenia setigera	400	0.2%	12	Actinocyclus senarius	20	0.0%
13	Rhizosolenia stofferfothii	1200	0.5%	13	Asteromphalus heptactis		
14	Chaetoceros compressum	3600	1.6%	14	Rhizosolenia delicatula		
15	Chaetoceros constrictum			15	Rhizosolenia fragillima		
16	Chaetoceros danicum			16	Rhizosolenia setigera	20	0.0%
17	Chaetoceros debile			17	Chaetoceros affine		
18	Chaetoceros didymum			18	Chaetoceros compressum	160	0.1%
19	Chaetoceros eibeni	1050	0.5%	19	Chaetoceros constrictum		
20	Chaetoceros radicans			20	Chaetoceros danicum		
21	Chaetoceros sociale			21	Chaetoceros debile	17680	11.1%
22	Chaetoceros subsecundum			22	Chaetoceros didymum		
23	Chaetoceros spp.	4800	2.2%	23	Chaetoceros eibeni		
24	Biddulphia sinensis			24	Chaetoceros lorenzianum		
25	Ditylum brightwellii			25	Chaetoceros peruvianum		
26	Eucampia zoodiacus	158400	71.9%	26	Chaetoceros sociale	480	0.3%
27	Navicula spp.	1200	0.5%	27	Chaetoceros subsecundum		
28	Diplois sp.			28	Chaetoceros spp.	9840	6.2%
29	Pleurosigma sp.	100	0.0%	29	Biddulphia mobilienis		
30	Trachyneis sp.	600	0.3%	30	Hemiaulus sinensis		
31	Nitzschia pungens	400	0.2%	31	Ditylum brightwellii		
32	Nitzschia spp.			32	Eucampia zoodiacus	940	0.6%
33	Cylindrotheca closterium	1800	0.8%	33	Asterionella formosa		
34	Bacillaria paradoxa			34	Synedra acus		
35	Dityocha fibula			35	Synedra ulna		
36	Distephanus spiculum			36	Thalassionema nitzschoides		
37	Ebria tripartita			37	Licnophora sp.	20	0.0%
38	Heterocapsa triquetra			38	Navicula membranacea	20	0.0%
	Ceratium furca				Navicula spp.	20	0.0%

表4に第1回目と第2回目の実験中の採取した海水の計数分析結果を表す。同表によると第1回目の実験時における植物プランクトンの優占種は *Eukampia zodiacus* で全体の70%以上を占めるのに対し、第2回目の実験時では1%以下にすぎないことが見てとれる。他方第2回目の実験時における植物プランクトンの優占種は *keletnema sulcata* であり全体の半数程度を占める。しかし、*keletnema sulcata* は、第1回目の実験時では2%以下にすぎないことが読みとれる。*Thalassiosira* sp.(small type) においては、第2回目の実験時には20%の割合で居たものが、第1回目の実験時には計数されなかった。目合い50 $\mu$ mのプランクトンネットを通過し易いかどうかをあきらかにする観点から、上述の植物プランクトンの大きさや形状の計測が要求されるが、植物プランクトンの優占種の違いによる可能性は、極めて大きいと考えられる。

A地点で採取した海水を濃縮した後のプランクトンネット(周辺部シリンダ用4枚+中心部シリンダ用1枚)を用いて、清水による洗浄を数回行い、所定の回数毎にネットを取り除き、このネットをプランクトン計数用のサンプルとした。なお、1回の洗浄の定義は、まず、清水を12 $\text{L}$ 入れた後、1分間静置した後、容器下部のコックから水を抜くまでとした。図23に洗浄回数とプランクトンネットに残留付着していたプランクトン量の関係を示す。この結果から、洗浄回数は3回でネットに付着していたプランクトンは10分の1以下に減少することが明らかになった。

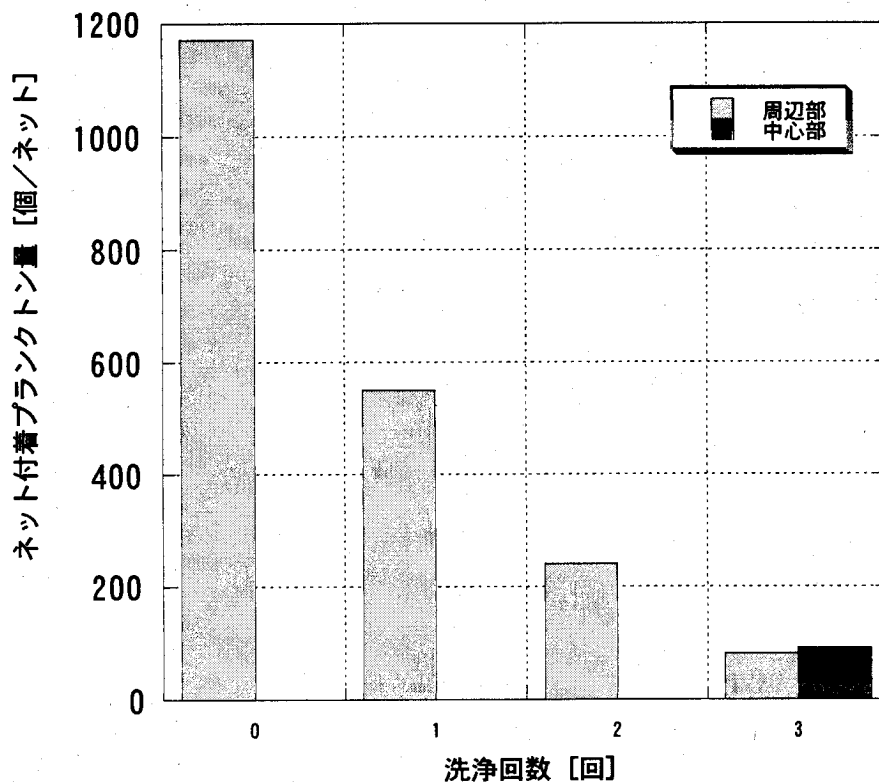


図20. プランクトンネット洗浄効果



## 5. 本研究より得られた成果

定期航路船舶による海洋健康度のオンライン監視の実現を目標として、船舶衛星電話をデータ伝送路とするリモートアクセスステーション技術の開発を図った。まず陸上基地にはリモート操作端末である通信制御装置とデータベースサーバを設置した。他方定期航路船舶の機関室には通信制御装置をサーバとする船内 LAN を構築した。

陸上と船内の通信制御装置にはリモートコントロールソフトウェア”pcAnywhere”を組み込み、陸上のデータ通信制御装置において船内のデータ通信制御装置の表示画面を見ながら視覚に訴える臨場感のある船内機器のリモート操作およびデータ転送できる環境を実現することでできた。実際の運用によって、船舶衛星電話経由でアクセスし、船内のデータ通信制御装置の表示画面を見ながら既存の計測センサ(水温センサ等)からのデータ収集が行えることを実証した。

陸上において、複数の研究機関による取得情報の共同利用と使い勝手の良さを念頭において、イントラネットサーバとして機能し、WEB ブラウザによって高い操作性をもつデータベースサーバを構築した。複数の研究機関による共同利用は汎用性を考慮して ISDN 回線を通して行える仕組みとした。データベースサーバの検索画面に表示された地図上(瀬戸内海)のポイントをクリックすることによって、クリックポイントと同経度の航路上における蓄積された時系列データが検索できるソフトウェアを組み入れ、使い勝手の良さを実際の運用によって確認することができた。

リモート操作による植物プランクトン顕微鏡撮像の実現を試みた。顕微鏡撮像システムは通信制御装置をサーバとする船内 LAN に組み込んだ。構成要素として LAN を通して動作する電源タップ(LAN タップ)を用いて、撮像システムのストロボ光源、TV カメラ、シャッターとストロボ閃光の連動に要求されるリターダー、決められた時間間隔での撮像を可能にする発振器の一連の電源制御を行ったところ、サーバである通信制御装置の表示画面を見ながら、リモート操作による顕微鏡撮像システムの駆動が行える可能性をあきらかにすることができた。

クライアントである画像処理装置によって、TV カメラでの撮像信号はデジタル原画像として取り込まれる。ついでデジタル原画像から作成された 2 値化画像を対象とする特徴量の計測、ならびに陸上への画像転送のため JPEG 方式による画像圧縮操作が実施される。ファイル名を撮像時刻とするファイル名自動作成プログラムの開発によって、陸上においてサーバである通信制御装置の表示画面を見ながら視覚的に操作することによって、所定の撮像時刻の JPEG 圧縮画像と特徴量データのファイル取り込みを行うことができた。さらに植物プランクトンの形状分類に必要な画像標本および特徴量データ集を作成し、特徴量データから植物プランクトンの種の識別を行うことが可能になった。

デジタル原画像と特徴量のデータファイルは、通信制御装置のサーバ機能によって大容量のハードディスクに、自動的に蓄積されることが実証できた。さらに船内 LAN の機能を使って、DGPS データ同時に撮像時刻データを取り込むことによって、撮像の正確な時刻と位置を明確にする仕組みができた。瀬戸内海航路で採水を行い、植物プランクトンの形状分類に必要な画像標本を作成し、採集された植物プランクトンの特徴量データ集を作成した。

船舶衛星電話によるデータ転送速度は 4,800bps で画像転送には長時間掛かる。そこで、TV カメラによる植物プランクトン撮像画像(約 900kB)を JPEG 方式で圧縮して陸上への転送実験を行ったところ、50 分の 1 程度に圧縮された転送画像(18kB)でも原画像と遜色なく、肉眼による種の判定に使用可能な画像を比較的短時間(約 36 秒)で陸上に転送できることが分かった。

スクリー駆動用のプロペラシャフトによる振動が無視できない悪環境での顕微鏡撮像を可能にす

るため、防震台の上に顕微鏡を横向きに設置することに加え、プログレッシブ CCD カメラおよび閃光時間の短いストロボ光源を組み込んだ結果、画像処理に使用可能な静止画像を得ることができた。

植物プランクトンを顕微鏡の視野内に誘導するため、上方ろ過法による海水中の植物プランクトン濃縮装置を設計・試作し、乗船実験にて実際の海水を用いて、濃縮・撮像実験を行い、装置が良好に機能することを確認するとともに、取得した濃縮液を分析した結果、最大 100 倍以上のプランクトン濃縮が可能であることを確認した。

最終的な運用実験において、陸上からの指令で、顕微鏡撮像システムの駆動、植物プランクトンの撮像、撮像画像の 2 値化、特徴量の計測、GPS データも含むハードディスクへのデータ蓄積、そして陸上のデータサーバへの画像および画像処理データの転送が行えることを実証できた。

以上より、定期航路船舶をリモートアクセスステーションとする基本的な技術を開発することができた。陸上からのリモート操作により植物プランクトンの存在状況を認識しながら海洋健康度のオンライン監視の足掛かりが得られたと考えられる。

## 6. 引用文献

- (1) 原島 省：シリカ欠損に関する地球観測問題—SCOPE, IGBP/LOICZ 共済ワークショップ開かれる—、地球環境研究センターニュース, Vol. 1, No. 7、環境庁国立環境研究所地球環境研究センター、8-16. (1999).
- (2) G. F. Paskusz, J. E. Stice : Correction to "A Pedagogical Palimpsest : Retracing Some Teaching Methods", Proceeding of the IEEE, Vol. 67, No. 4, pp. 697-699 (1979)

### [研究成果の発表状況]

#### (1) 誌上発表 (学術誌・書籍)

- ① H. Iitaka, T. Doi, T. Saito, H. Nakano, S. Sato, Y. Fujinawa, A. Harashima, K. Saitou, Y. Kusaka : Research and Development of Ocean Remote Access Station, Proceedings of Techno Ocean 2000 International Symposium, Vol. 3, pp. 669-672 (2000)
- ② T. Saito, H. Iitaka, H. Nakano, T. Doi, S. Sato, Y. Fujinawa, A. Harashima, K. Saitou, Y. Kusaka : Development of a flow type laser fluorescence microscope system for hi-speed and continuous measuring of phytoplankton images, Proceedings of Techno Ocean 2000 International Symposium, Vol. 3, pp. 799-804 (2000)
- ③ 飯高 弘、中野 洋、斎藤俊幸、土井卓也、西山勝男、佐藤宗純、藤縄幸雄：定期航路船舶による海洋環境のオンライン監視とプランクトン認識の高度化に関する研究、フェリーによる海洋環境モニタリングおよび関連研究に関する総合報告書、環境庁国立環境研究所、pp. 59-67 (2000)
- ④ 飯高 弘、中野 洋、斎藤俊幸、土井卓也、西山勝男、佐藤宗純、藤縄幸雄：定期航路船舶による海洋環境のオンライン監視とプランクトン認識の高度化に関する研究、地球環境研究総合推進費平成 11 年度研究成果報告集(中間報告)、環境保全対策課研究調査室、環境庁企画調整局地球環境部、pp. 137-141 (2000)
- ⑤ 飯高 弘、中野 洋、斎藤俊幸、土井卓也、西山勝男、佐藤宗純、藤縄幸雄：定期航路船舶による海洋環境のオンライン監視とプランクトン認識の高度化に関する研究、地球環境研究総合推進費平成 11 年度研究成果報告集(中間報告)、環境保全対策課研究調査室、環境庁企画調整局地球環

環境部、pp.137-141(2000)

- ⑥ H.Nakano, H.Iitaka, T.Doi, T.Saito, A.Harashima, K.Saitou : Automated Image Processing System on Ship of Opportunity, Techno Ocean 2002 International Symposium(submitted), (2002)
- ⑦ T.Doi, H.Iitaka, H.Nakano, T.Saito, A.Harashima, K.Saitou : Experimental Study on the Phytoplankton concentration for Capturing the Microscopic Image, Techno Ocean 2002 International Symposium(submitted), (2002)
- ⑧ H.Iitaka, T.Doi, H.Nakano, T.Saito, Y.Fujinawa, A.Harashima, K.Saitou M.Aoyagi : Research and Development of Ocean Remote Access Station, Techno Ocean 2002 International Symposium (submitted) ,(2002)

(2) 口頭発表

- ① 飯高、中野、土井、斎藤、佐藤、藤縄：海洋リモートアクセスステーションの研究開発(その1)、海洋理工学会平成11年度春季大会(1999)
- ② 飯高、土井、中野、斎藤、佐藤、西山、藤縄：地球環境計測のための海洋リモートアクセスステーションの研究開発、環境技術研究総合推進会議第4回研究発表会(2000)
- ③ 中野、斎藤、土井、飯高、西山、佐藤、藤縄、原島、齊藤：定期航路船舶を用いた植物プランクトン顕微鏡画像撮像システムの研究開発、海洋理工学会平成12年度春季大会(2000)
- ④ 斎藤、飯高、中野、土井、佐藤、藤縄、原島、齊藤：フロー型レーザ蛍光顕微鏡による植物プランクトンの連続計測法の開発、海洋理工学会平成12年度春季大会(2000)
- ⑤ 飯高、土井、中野、斎藤、佐藤、西山、藤縄、日下、原島、齊藤：海洋リモートアクセスステーションの研究開発(その2)、海洋理工学会平成12年度春季大会(2000)
- ⑥ 飯高 弘、中野 洋、斎藤俊幸、土井卓也、西山勝男、佐藤宗純、藤縄幸雄、齊藤貢献、原島 省：定期航路船舶による海洋環境のオンライン監視とプランクトン認識の高度化に関する研究、「海洋環境・情報モニタリングシステム」に関する意見交換会、シップ・アンド・オーシャン財団(2000)
- ⑦ H.Nakano, H.Iitaka, T.Doi, T.Saito, S.Sato, Y.Fujinawa, A.Harashima, S.Saitou : Advancement in the online evaluation of the health of the sea and the detection of plankton using ship of opportunity, The 2nd Meeting Towards a Cooperative Marine Environmental Monitoring in the Asian Marginal Seas(2000)
- ⑧ 中野 洋、飯高 弘、土井卓也、斎藤俊幸、原島 省、齊藤幸賢：定期航路船舶を用いた植物プランクトン顕微鏡画像撮像システムの運用実験、海洋理工学会平成13年度春季大会(2001)
- ⑨ 飯高 弘、中野 洋、土井卓也、斎藤俊幸、原島 省、齊藤幸賢：海洋リモートアクセスステーションの研究開発(その3)、海洋理工学会平成13年度春季大会(2001)
- ⑩ 斎藤俊幸、飯高 弘、中野 洋、土井卓也、佐藤宗純、藤縄幸雄、齊藤幸賢：フロー型レーザ蛍光顕微鏡による植物プランクトンの連続計測法の開発2、海洋理工学会平成13年度春季大会(2001)。
- ⑪ 久保田祐輔、土井卓也、飯高 弘、中野 洋、斎藤俊幸、原島 省、齊藤幸賢、根本俊雄：顕微鏡撮像のための植物プランクトン濃縮技術に関する基礎実験、海洋理工学会平成13年度春季大会(2001)
- ⑫ 土井卓也、久保田祐輔、飯高 弘、中野 洋、斎藤俊幸、原島 省、齊藤幸賢、根本俊雄：顕微鏡撮像のための植物プランクトン濃縮技術の研究(船上実験)、海洋理工学会平成13年度春季大会

(2001)

- ⑬ 中野洋、飯高弘、土井卓也、斎藤俊幸、原島省、齊藤幸賢：定期航路船舶を用いた植物プランクトン顕微鏡画像自動撮像システムの運用実験平成14年度春季大会一般講演、海洋理工学会

(2002)

- ⑭ 土井卓也（産総研）、飯高弘、中野洋、斎藤俊幸、原島省、齊藤幸賢：顕微鏡撮像のための植物プランクトン濃縮船上実験、平成14年度春季大会一般講演、海洋理工学会(2002)
- ⑮ 飯高弘、土井卓也、中野洋、斎藤俊幸、西山勝男、葛西直子、藤縄幸雄、原島省、齊藤幸賢、青柳 勝：海洋リモートアクセスステーションの研究開発(その4)、平成14年度春季大会一般講演、海洋理工学会(2002)

(3) 出願特許                   なし

(4) 受賞等                   なし

(5) 一般への公表・報道等   なし

(6) その他成果の普及、政策的な寄与・貢献について

本成果の一つである、フェリーを「リモートアクセスステーション」として常時オンライン的に海洋環境監視を行う技術の発展を考慮し、国立環境研究所とともに、平成13年度の別途予算項目に「UMIDAS (Unattended Marine Information and Data Acquisition System)の創出による海域環境管理」という課題名で応募した。未だ採択に至っていないが、大気側ではAMeDASが機能しているのに、海域側でこれに対応する技術基盤が存在しないことから、UMIDASは将来の海洋環境管理施策の根幹として貢献できると考えている。