フェリー利用による海洋モニタリングのシステム設計・管理方法に関する技術的問題と対策

原島 省[1], 若林 孝[2], 利安忠夫[2], 太田英介[2], 坂本重次[2], 辰田裕[2],
古澤一思[3], 洲崎吉郎[4], 竹内義治[5], 萩原富司[5]

1) 国立環境研究所
2) (財)日本気象協会
3) 日本海洋生物研究所(株)
4) 紀本電子工業株式会社
5) (財)地球・人間環境フォーラム

要旨: フェリーによる連続無人モニタリングシステムの設計・管理には、従来型の調査船による観測とは異なった手法の開発と実行が要求される。特に計測用海水の取水・排水管理の安全性と効率性が重要な位置付けとなる。本報告は、過去約１０年間に設計した６つのモニタリングシステムの設計例とモニタリング継続期間中に発生した問題点・解決策について技術的な点をまとめる。今後の同様な事業においての指針あるいはチェックリストとして生かされれば幸いである。

キーワード：定期航路船舶, システム設計, 管理, センサー計測, 自動ろ過サンプリング

１．はじめに

フェリーをプラットフォームとして無人で継続的なモニタリングを行うにあたっては、従来の調査船あるいは研究船による海洋観測とは異なるシステム設計と運用手の技術が要求される。本モニタリング事業においては、カーフェリーに関して、「檀皇」（神戸－釜山、大阪国際フェリー株式会社）、「さんふらわあ２」および「さんふらわあいぼり」（大阪－別府、関西汽船株式会社）、「フェリーくろしお」（大阪－那覇、同）の４船、外洋のコンテナ船に関して「Alligator Hope」（日本－マレーシア航路から香港－日本－北米航路に変更、大阪商船三井株式会社）および「ACX-LILY」（日本－マレーシア、東京船舶株式会社）の２船の合計６船に順次モニタリングシステムを設置し、ほぼ10年間、海洋モニタリングを継続するにいたった。その間に、計画時においては予測しなかった設備上あるいはモニタリング運営上の多くの問題点が生じ、またそれを解決する技術的なノウハウが蓄積されてきた。

本報告書内の別報「フェリーによるモニタリングの経緯とまとめ」に示したように、1998年に韓国海洋研究所（KORDI）によって同様な海洋モニタリングが開始されたり、ヨーロッパ各国の沿岸海域で"European Ferry Box Program"が計画されるなど、フェリー利用による常時モニタリングが世界各国で普遍的な手法になりつつある。このため、同様なモニタリングを立ち上げ、最終的にはネットワークを形成することが海洋環境施策の重要な要素となることが予想される。本報告では、ほぼ10年間の経験から得られた技術的な蓄積が、同様のモニタリング計画のデザインのための指針あるいはチェックリストとなることを念じ、このレポートを取りまとめた。

２．協力船の選択と設置スペース

基本的には、沿岸海域あるいは近海域を高頻度でモニタリングする目的では、カーフェリーが、国外までの海域までカバーする場合には、コンテナ船に協力を依頼することが適している。船の設計・建造段階でモニタリング設備・機器の設計ができることが理想であるが、そのような機会は少なく、本モニタリングにおいても、「さんふらわああいぼり」のみがその恩恵に浴した。船会社側（関西汽船）からは設計段階で機器設置スペースや専用海水取水管の提供を約束していただいたり、造船所側（三菱重工下関造船所）からは、配管、配電、通信線の設置工事等の多くの便宜をはかっていただくことができた。Fig.1にそのフロー図を示す。

計測機器のスペースは、通常は機関室近くあるいは船底近くに提供してもらうことになる。カーフェリーの場合、主機関が船央部に置かれ、主機関とスクリューの間にシャフトルームが置かれることが多い。ここでは、機関室よりもやや振動、騒音、高熱が軽減されるので、この付近にスペースの提供を受けることが好ましい。また、「ACX-LILY」では機関室より１階上のエアコンルームの一部を提供してもらった。

３．電気系統

「さんふらわああいぼり」では、450Vの電源の提供を受け、これをトランスで100V・60Aにステップダウンして使用した。計測機器やパソコン等の電力消費はそれほど大きいものではないが、取水ポンプ、排水ポンプの稼動（特に起動時）や、自動ろ過サンプリング装置の冷蔵などには、あるまとまった電力を必要とするので、この位が基準になる。配線工事には、船としての基準があるので、船専用の電気業者に委託することが安全である。電源管理に必要な機器は、上記トランスのほか以下があげられる。

(1)配電盤およびブレーカー

(2)機器への配線

船では、電源接続用に専用のレセプタクル（3本足）が使われることが多いので、コンセント、プラグともに、該当する部品を用意しておくことが好ましい。

(3)照明工事（メンテナンス作業に十分な照度を有すること）

(4)電源監視ＢＯＸ（漏電メーター、電圧、電流メーター等）

計測システムの故障が船全体に影響を及ぼすことが無いように、独自の漏電監視システムを用意することが好ましい。「さんふらわあ２」では、一時漏電が発生し、船全体の漏電警報システムが作動する事があり、船側で計測システムの停止が行われた。原因は、計測システムで用いているパソコンやシーケンサーのバックアップ電源として使っている無停電電源装置の故障によるものと判明し、新しい装置と交換した。

(5)漏水センサー設置・アラーム配線・電磁弁作動用配線

計測用海水が漏れた場合、それを漏水センサーによって検知し、それによって取水ポンプを停止したり、該当する管の電磁弁を閉じるなどのシステムが必要である。なお、これに関連して、モニタリングスペースの床には、溢水防御堤（10～20cm）を設け、漏水がまずここにたまって漏水センサーに検知され、さらに床の他の部分におよばないよう、船底のビルジに導かれるような仕組みが好ましい。また漏水が検知された場合、船の機関員詰所に通報するブザーあるいは警報ランプの設置が好ましい。

4．海水系統

4.1 配管

水温・塩分などのセンサーのみの場合には、船側からの海水を完全に閉じた系に流して、その中にセンサーを置き、そのまま船側にもどす、あるいは船外に放出する、といった単純な構成が可能である。生物・化学量のサンプリングや任意のセンサー計測を行うためには、どうしても開水面あるいはサンプリング用流しが必要になり、Fig.1に示すように、取水ポンプで取水した海水を調整水槽で常時オーバーフローさせ、そこからセンサー計測、自動ろ過サンプリング装置および任意サンプリング用流しに分流することにした。また計測済みの海水は、計測システムが喫水線よりも下にあるため、排水タンクに貯めてポンプで船外に押し出すことが必要となる。また、管内の清掃等のため、計測システムを迂回するバイパスラインを設けておくことが好ましい。さらに、船側から清水の供給が受けられれば、設備の洗浄等に便利である。

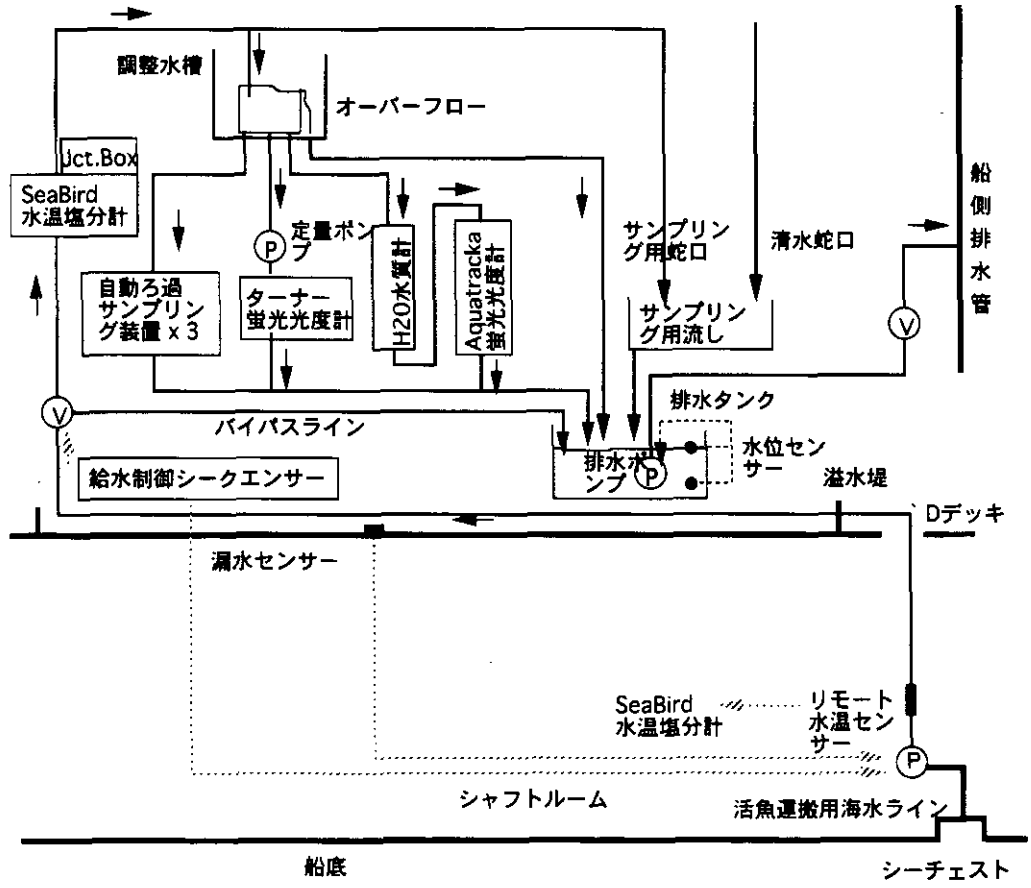


Fig.1 Flow diagram of the marine environmental monitoring system deployed on "Sunflower-Ivory (Kansai Kisen Co., Ltd.).

「檀皇」と「さんふらわあ２」では、取水源として機関冷却用の海水を利用した。ただし、このラインの取水口には、生物付着防止用の塩素注入システム（MGPS）があり、この塩素が希薄ではあるが化学計測に影響する可能性がある。したがって、両船では、生物・化学量のサンプリングを行う時にのみ船側に塩素注入を止めてもらうよう依頼した。また、「さんふらわ

あ２」では、夏季に冷房機器用に使用する分が多くなり、計測用海水の流量が減る等の問題も起こった。

「フェリーくろしお」では船尾近くのシーチェストの不使用のバルブに、専用の揚水ポンプと取水管を設置した。「さんふらわあ２」では、MGPSのない活魚運搬用の取水管があり、ここから分流した。取水に関しては、固形物の混入を防ぐため、ストレーナーを設置し、定期的に清掃を行うことが必要になる。ストレーナーでの目づまりを防ぐため、メッシュのサイズの検討・調整が必要である。

一方、MGPSが無い場合、内湾では貝類等の生物付着が起こりやすくなることが問題になり、特に入港時にスクリューによる巻き上げ等で汚れた海水がシステムに入ることがあることも問題になる。従来は、入港前にシークエンサ制御により入港以前に取水を停止していたが、2000年3月に「さんふらわああいぼり」の東行き・西行きの運航時刻が異なるようになったため、大阪南港においても２時間ほど取水が継続されることになった。その後、2000年5月末に、大阪港内で稚貝が大量に配管に取りこまれた。このため8月2日に配管掃除を行うまでの間、揚水効率が落ちる、植物プランクトンがろ過摂取されてクロロフィル量が低下する、栄養塩計測でアンモニア濃度が高めに出る、などの事態が起こった。これを避けるためには、配管掃除を、初夏１回を含めて年１回以上行うこと、また。船員に依頼するか、時刻をセットしたシークエンサー・リレー回路等により取水を停止することなどの対策が必要になる。

また、モニタリングの初期には、配管に鉄管を使ったが、これは腐蝕により２年程度で劣化することがわかった。また、リン酸が吸着される傾向もあるほか、鉄錆部分に生物や汚れの付着が起こりやすくなる。このため、SUS管、ライナー管、チタン管等が好ましい。ただし、ライナー管は溶接部分には使えない。異種の金属が接触している時には電蝕が起こりやすくなるので、絶縁材を介在させたり、防蝕ピースをとりつける等の算段が必要となる。特にバルブの選択にこの注意を要する。チタン管自身は腐蝕せず理想的であるが、接触している他の金属が電蝕しやすくなるといわれる。

また、電蝕については、電力を使用している機器と船体とのアースの問題も関わっているようである。「フェリーくろしお」では、取水ポンプ回転部のシーリングから水漏れが発生したが、これは電蝕が顕著に進行したものと考えられる。このためポンプも約２年おきに交換の必要があり、機器ごとに電蝕が顕著に進行している箇所の有無を点検する必要もある。

運航時の振動のため、配管にも防振対策を行うことが必要である。海水が船内の配管を通る間に船内の気温の影響を受け、海中よりも高くなっている可能性がある。この対策として、「さんふらわああいぼり」では、管を断熱材で巻くとともに、取水ポンプ前に水温センサーを設置してデータの信頼性を高めている。

4.2 排水系（排水タンク・排水ポンプ）

計測システムが喫水下にある場合には、計測済み海水を排水タンクにため、ポンプで船外または船のドレイン管に排水する必要がある。喫水線以下にシステムを置く場合には、この部分に逆止め弁をつけることも必要になる。排水系の故障は溢水につながりやすいので、取水ポンプ以上に慎重に設計し管理しなければならない。本システムでは、投げ込み型ポンプを用いた。また、頻繁なオンオフを避けるため、タンク内の最高推移、最低水位の設定用に水位センサーを２基置き、最高水位でスイッチオンとなり、ポンプが稼働して水位が低下した後、最低水位でスイッチオフとなるような回路を設計した。また、水位の上下があるため、排水タンクの膨

張・伸縮による金属疲労に耐えうる構造にすることが必要である。

「さんふらわあ２」でのアクシデントとしては、排水系の最終逆止弁が動作しなくなり、船側の排水が計測システムに逆流したことがあげられる。この時は、非常停止フロートが働き停止した原因は、鉄サビや腐食によって弁が作動しなくなっていたためで、弁を交換した。

4.3 オーバーフロータンク（調整水槽）

計測システムに不可欠だったのが、このオーバーフロータンクであある。システムの中で最も高い位置に設けて、ここに取水した海水を連続揚水し、水圧をここで取り除くとともに、この底部から各計測器に海水を分配する。オーバーフローした海水は排水タンクに流下する。

各計測器には自然流下も可能であるが、流量を制御する必要がある場合には、ペリスターポンプやダイアフラムポンプ等の定量ポンプを用いる。この際、気泡が入らない工夫が必要である。また、オーバーフロータンクの容積／流量で計測の応答時間が決まるので、設計においては注意を要する。

また、各計測器への配水は基本的には並列がよいが、流量が十分でないとかえって応答時間が長くなるので、機器ごとのタイムラグを把握したうえで直列にするのも次善の策となる。「さんふらわああいぼり」では、毎分10～20リットルの流量が得られているが、SeaBird水温塩分計のジャケットが比較的大きく、流量分配すると応答時間が長くなってしまうため、最終的には海水をすべてSeaBird水温塩分計を経由させた後に調整水槽に送る設定とした。

５．蛍光光度計

「檜皇」ではターナーの蛍光度計でクロロフィル蛍光の計測を始め、2000年現在では、オンラインデータ転送用のアクアトラッカ蛍光光度計（チェルシー社）を併用している。前述のように、クロロフィルa他の色素量と蛍光度の間には相関があることは間違いない。本フェリーで得られた約300サンプルについて比較したところ、 クロロフィルa＋フェオ色素が1μg/lに対し蛍光値（校正用のフルオレッセイン溶液の濃度）が8μg/l程度の比較的よい相関が得られた。値のばらつきは、植物プランクトンの種組成の相違、個体数・細胞のサイズ分布の相違、生理状態が日周変化をするなかでの計測時刻の相違、溶存有機物（DOM）の存在量の相違などによると考えられる。植物プランクトンの個体数が多く、個々の細胞体積が小さい場合、求めた相関式より蛍光値は高くなると考えられ、反対に植物プランクトンの個体数が少なく細胞体積が大きい場合は蛍光値が低くなると考えられる。

一方、蛍光度計の問題として、連続的に通水していると、光学セルの壁面に汚れが付着してくるため、出力信号が低くなる一方、ブランク値が高くなることがあげられる。このような信号ドリフトを補正するため、毎週のメンテナンスの際にフルオレッセイン溶液で校正を行った。すなわち、１週間の前と後の値から信号ドリフトを求め、これを経過時間にリニアにわりふってデータを補正する。これにより概ねの補正ができたが、信号ドリフトが経過時刻に対してリニアでない成分もあり、沖縄航路のように、内湾と亜熱帯外洋の双方を横切る場合には、このノンリニア成分が亜熱帯外洋の低いクロロフィル値に対して相対的に無視できなくなる場合もあった。

このような問題に対して、ハードウウェアの面からの対策として、計測セルに回転するブラシを上下させるタイプのワイパーユニットを試験的に導入したが、ユニットの耐久性に問題があること、ブラシの毛が抜けて影響すること、ブラシが降りている間のデータのカットが必要

である、等の問題が残った。ターナー蛍光度計が装置内部の光学セルに海水を通水させるのに対し、アクアトラッカ蛍光度計では、光放出用と計測用のガラス面が外側に向いている。したがって、後者のほうがワイパーを開発しやすいと考えられる。また、航海中にも定期的に標準溶液あるいはブランク水を流して、光学セルの汚れを評価できるようにすることも対策になる。

6．自動ろ過サンプリング装置

6.1 設計

化学成分の計測には、(a)電気的センサーによるもの、(b)現場自動分析によるもの、(c)自動サンプリングによるもの、の３種に分かれる。栄養塩については(a)は不可能である。また、(b)は本プロジェクトの開始時には高精度のものが存在しなかった。さらに、植物プランクトン量の計測は、(a)としてクロロフィルと相関をもつ蛍光度センサーが利用できるものの、クロロフィルa量そのものではないため、やはり取得されたサンプルを回収して陸上で分析する必要がある。このため、プロジェクト開始時に次のような仕様による自動ろ過サンプリング装置を開発した。この装置では、１週間単位でサンプリング開始日時と間隔をセットし、ろ過水と粒子状物質が同時に取得する。管をとも洗いするシークエンスを含み、ろ過は吸引ろ過とする。この装置１台で12本のサンプルを採取するものとし、これを３台設置した。サンプリングは夜開始し、翌朝のメンテナンス時まで冷蔵できるようにした。

当初、冷風を吹き込む方式で開始したが、冷却効率が悪かった。次に携帯冷蔵コンテナ用の冷蔵モジュールを使用したところ比較的よい結果が得られたが、このモジュールは販売停止となった。現在、ペルチエモジュールを採用しているが、さらに冷却効率のよいモジュールが必要となっている。理想的には、排水タンク内に放熱するような熱交換が効率的である。「さんふらわあ」では実質的に冷却を進めるため、装置の内面に発泡スチロールの張り付けを行うことと採水器の密閉度の向上により冷却効果の向上をはかった。また、船内湿度が高いため制御部に結露の可能性があり、漏電が懸念されたが、断熱強化で対応した。また、海水をろ過するための吸気管に塩水のミストが混入し、電磁弁がよく錆びて作動状況が悪くなった。テフロン性電磁弁の使用が対策となる。

ろ紙として、ミリポアフィルター、グラスファイバーフィルター（GFC, GFF等）が考えられるが、前者はろ過に時間を要し、本装置に適さなかった。したがって、当初GFCを使用したが途中により目の細かいGFFに切り替えた。大阪湾の海水でGFCとGFFとの比較を試みたが大きな差は見られなかった。内湾域での植物プランクトンバイオマスについては、ほとんどが、マイクロプランクトン（20～２00μm）やナノプランクトン（２～20μm）であるといわれておりクロロフィルaの分析であれば、GFFあるいはGFCでも可能であると考えられる。ただし、外洋部ではもともとバイオマス濃度が低く、そのかなりの部分をピコプランクトン（２μm以下）が占めることもあるので、注意を要する。

また、自動ろ過サンプリング装置で、電磁弁が故障した場合には、重力による自然ろ過が行われることになるが、実験的に吸引ろ過との結果を比較したところ、大きな差は見られなかった。

6.2 栄養塩分析と色素分析の結果

栄養塩と植物プランクトン色素の分析は、理想的には、ろ過直後に冷凍され、分析に回されることが好ましいが、自動ろ過サンプリング装置では、前夜から順次ろ過されたサンプルが、

冷蔵（8度C以下）され、翌日回収されて分析にかかることになる。この差異がどのくらいの誤差をもたらすかの実験を1994年5月に行った。瀬戸内海西部から東部までの５地点でサンプリングを行い、船上でGFFろ紙を用いて、色素分析のためのろ紙サンプルを、(1)採取しただちに冷凍保存した場合と、(2)自動ろ過サンプリング装置で冷蔵状態に置き、サンプル回収時に冷凍庫に入れた場合の、栄養塩５項目（NO_2-N, NO_3-N, NH_4-N, PO_4-P, $Si(OH)_4$）の濃度の差異を調べた。色素分析については、船上で以下の３方法でろ紙サンプルを採取し、回収の後、蛍光光度法によりクロロフィルaとフェオフィチンの値を求めた。

(a)ろ紙を現場ろ過後直ちに冷凍庫に入れる方法

(b)ろ紙を現場ろ過後直ちに液体窒素で瞬間冷凍してから冷凍庫に入れる方法

(c)自動ろ過器サンプリング装置で冷蔵保存し、栄養塩サンプル回収時に冷凍庫に入れる方法

全体的には、クロロフィルa濃度とフィオフィチンa濃度ともに大きな差異はなかったが、(c)では、ややクロロフィルaがやや分解した傾向が見られた。NO_2-N, NO_3-N, PO_4-P, $Si(OH)_4$については(1)と(2)の差ほとんど見られなかった。NH_4-Nについては、(2)のほうが濃度がやや高くなった。これは、冷蔵状態では、有機物の分解に伴ってNH_4-Nがやや増加することや、窒素の態が変化すること等が考えられる。対策としては、冷蔵モジュールの強化が有効であると思われる。

また、色素関係の分析方法が、従来の蛍光分析法から高速液クロマトグラフィー（HPLC）分析法に変わりつつある。このため、1998年4月からは、HPLC分析に変更した。両者の比較を行ったところ、HPLC分析法では、フェオフィチンa値の値が蛍光法と比較して低かった。これは、蛍光法では、フェオフィチンa値が過大に見積もられるという文献等の指摘事項と一致する。HPLC分析法ではクロロフィルaの他に、補助色素（フコキサンチン、ペリディニン等）の分析も可能になる。したがって、植物プランクトン種組成に関するある程度の情報にもなる。一方、蛍光法によるフェオフィチンデータについては、他機関も含め既存データの蓄積が大きいので、利用法の再検討を行えば、今後も貴重な情報になると考えられる。

７．その他の乗船航海による検証実験

連続取水された海水と船外の海水との関連を確認するために、「檀皇」の停泊中に、北原式採水器を用いて船外で採水したサンプルと船内でのシステムを稼働して取ったサンプルとの比較検討を行った。ちなみに、船外取水口は海面下6mにあった。栄養塩は、概ね6mの船外海水とほぼ同程度であり、取水位置と船内冷却水サンプルとの同一性は確認した。詳細には、リン酸とケイ酸が若干低くなる傾向もみられたが、これは「檀皇」では鉄管を使用していたため、リン酸やケイ酸を吸着する可能性があったことが考えられる。なお航走中では取得海水の深度が異なり、本報告書中の日夏ほかの論文にあるように、より海面に近い海水を代表していると考えられる。

8. システム設計とモニタリング実行の簡略化の方向性

上記のようなシステムはすべての船で実現可能であるとはいえない。したがって、システムと運用法の簡略化の方向性も重要である。コンテナ船 ACX-LILY においては、寄港間隔が４週間と長く、また調査員の便乗もできないため、メンテナンスも最小限にとどめ、サンプリングの方法も簡略化・マニュアル化して船員に依頼するという形をとった。

システムの維持の上でもっとも神経を使うのが、漏水とともに、排水ポンプの動作不良で溢水が起こることである。このため、モニタリングスペースは、喫水線よりも上に提供してもらい、船側の機関冷却水のポンプの揚圧（約 2kg/cm^2）でここまで揚水した。このため、排水はドレイン管への自然流下で済み、取水ポンプ、排水ポンプとも新設・管理の必要がなくなる。

また、MGPS は通常は稼動させて生物付着を防ぎ、サンプリングの時のみ止めてもらうようにしてもらった。さらに、可能な限りスウェッジロック等の着脱可能な部品を使い、システムの移設等が容易となるよう配慮した。

謝辞：

以上のような知見を得るにあたり、協力いただいた大阪国際フェリー株式会社、関西汽船株式会社、三菱重工下関造船所、大阪商船三井株式会社、東京船舶株式会社に深謝する。

Technical points in designing and maintaining the unattended marine environmental monitoring system deployed on ferryboats

Akira HARASHIMA[1], Takashi WAKABAYASHI[2], TadaoTOSHIYASU[2], Eisuke OHTA[2], Shigetsugu SAKAMOTO[2], Hiroshi TATSUTA[2], Kazushi FURUSAWA[3], Yoshiro SUZAKI[4], Yoshiharu TAKEUCHI[5] and Tomiji HAGIWARA[5]

1) National Institute for Environmental Studies
2) Japan Weather Association (Foundation)
3) Marine Biological Research Institute of Japan Co., Ltd.
4) Kimoto Electronics Co., Ltd.
5) Global Environmental Forum (Foundation)

Abstract: Lots of technical points, which have not been considered in the traditional marine observation using R/V, are required for the design and maintenance of the unattended marine environmental monitoring system deployed on ferries. This report summarizes them based on the experience of designing systems deployed on six ships and duration of monitoring programs in these ten years as a guide or a check list for the planning of similar marine environmental monitoring.

Keywords: technical points, checklist, designing, maintenance, piping, electricity