

水環境モニタリングシステムの要素技術に関する基礎検討

村田政隆, 宮原則行, 松村一弘

Study on Basic Technology of Water Environment Monitoring System

Masataka Murata, Noriyuki Miyahara and Kazuhiro Matsumura

要 旨

近年、飲料・食糧生産用途等の水について、様々な問題が広く議論されるようになり、水環境問題は、地球温暖化などとともに、国際的な問題として取り組まれている。水環境のモニタリングは、定点観測の自動化技術や衛星リモートセンシング技術が進歩し、部分的な水環境空間では大きな成果をあげているが、観測範囲が限定されているため未だ不明な点も多く、現在でも様々な研究開発が進められている。本研究では、水環境の中でも特に水質改善が遅れている湖沼を対象とし、現在のモニタリング技術を補完して空間分布データを取得可能とする水環境モニタリングシステムの実現を目指し、要素技術に関する基礎検討を行った。

1.はじめに

21世紀は「水の世紀」、「水紛争の時代」と呼ばれており、飲料・食糧生産用途の安全な水の確保、水系生態系の保全、洪水などのリスク管理等が、国際的な水問題として広く議論されるようになった。この水とは、主に人々にとって有効に利用しやすい河川や湖沼等を源とする淡水をさし、地球上に存在する海水等を含む水資源の中で、僅か0.01%しか存在しない非常に貴重な資源となっている。そのため、淡水源の保全活動や有効活用は重要な取り組みではあるのだが、この貴重な淡水源となる閉鎖性水域の湖沼は、生活排水や工業廃水に含まれる汚染物質が水中または污泥に蓄積しやすい環境であることや、大気降下物等によるノンポイント負荷¹⁾の影響を受けるため、日本では水質改善がほとんど進んでいない²⁾。

環境省水・大気環境局水環境課の公開資料「平成18年度公共用水域水質測定結果(平成19年12月)」によると、BODまたはCODの環境基準達成率は、全体では86.3%と過去最高の水準となっている。

しかし、湖沼の達成率は55.6%と最も低く、全窒素及び全磷に至っては45.9%に留まっており、湖沼の水質改善は強く望まれている。

水質改善の技術開発を進める上では、効率的な改善計画や適切な効果の確認や評価が必須となるため、水環境のモニタリング^{3),4)}技術は必要不可欠である。しかし、日本では、直接的に水質改善が図られないとの見方から、手間を要しながら地道に継続している水環境のモニタリング技術や作業に対する評価は低く、モニタリングの継続が危ぶまれる兆しも見受けられる^{5),6)}。

水環境のモニタリングの主流は定点観測であるため、観測点と離れた位置で生じている変化を捉えることは難しく、大局的な変化が現れて初めて水環境に変化があったことが確認される。それゆえに、迅速な水環境保全を実現するためには、水質悪化が懸念される特定の場所に対して、素早く空間の情報を収集できるモニタリングシステムが必要である。

そこで、本研究では、これまで実施されてきた

定点観測によるモニタリング技術に対し、空間的なデータや測定項目の追加を柔軟に実現する補完型水環境モニタリングシステムについて検討した。

2. 補完型水環境モニタリングシステム

2.1 水環境モニタリングシステムの要素技術

湖沼の水質改善が進んでいない要因のひとつに、水質変化の挙動や状況にかかわる情報量が少ないということがある。従来から継続されている精度の高いモニタリングは当然必要であるが、精度が低くても容易な方法により測定項目やモニタリングポイントを追加することによって、水域全体の特徴を捉える技術も必要である。そこで、本システムは、水質改善が遅れている湖沼を対象とし、より効果的なモニタリングや水質改善の計画⁷⁾および実行を実現するため、従来の計測に対しての補完的な計測システムとして位置づけた。そして、本システムの構成技術を図1に示すように、モニタリングポイントの位置決め技術、センサ技術、採水技術、分析技術、情報管理技術の5つの要素技術に分類し、過去の研究成果や実験結果等も踏まえ、各要素の実現性等について検討した。

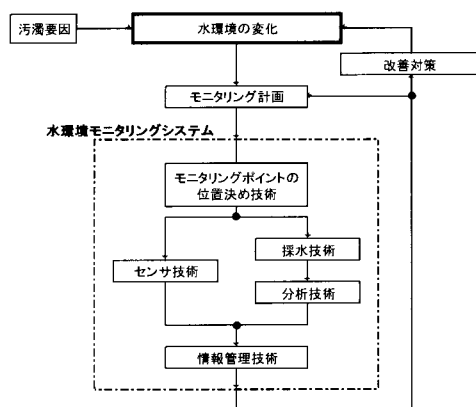


図1 水環境モニタリングシステムの構想

2.2 モニタリングポイントの位置決め技術

仮想的に図2に示すようなモニタ空間を構成する技術について検討する。図中の添字*i,j,k*は、それぞれ緯度、経度、水深を示す。

図2に示す基準点とは、便宜上水面上のモニタ範囲の中心を示している。まず、この基準点を含む水面上にある測定点の位置を決める方法として、

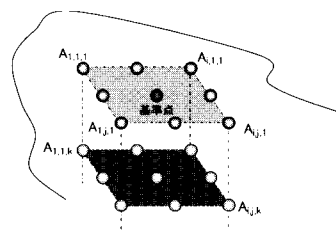


図2 モニタ空間のイメージ

測定点が浮遊している位置の緯度と経度を記録する方法と、指定した緯度・経度の位置に測定点を移動させる方法の2種類がある。前述の方法では測量技術を用いることで精度良く測定点の位置を知ることができる。また、数mの誤差を許容できるのであれば、測定点の位置を単純にGPSで測定すれば良い。電子基準点を利用したRTK-GPSでは、数mm程度の誤差の位置情報を取得できることが示されている⁸⁾ほか、移動体管理システムとしてP4-GPS等の商品もあるが、これらのGPSシステムは数十万円～数百万円規模であるため、多点計測向きではない。後述の方法では、GPSにモータ等の動力技術を組み合わせた誘導制御技術⁹⁾により実現可能である。将来的に、自動化を見据えた利便性を考慮すると、GPSを用いた誘導制御技術が、有望な要素技術と成り得る。シリアル通信規格で情報を出力するGPSモジュールを使用すれば、マイコンで受信可能なため、位置情報を組込技術として利用することができる。そして、河川のように流れの影響が少ない湖沼環境においては、この位置情報の取得技術を基本とし、水中定位センサシステム¹⁰⁾の技術や、協調やフォーメーションに適した制御理論¹¹⁾を応用すれば、水面上のモニタリングポイントを指定した位置に固定することが可能となる。

次に、水深方向の位置決め技術を有線式と無線式に分けて、それぞれ検討する。有線式とは、1本のロープにいくつかの計測機器を等間隔に固定し、水面から下ろす方法である。このロープを下ろす作業により、最下部の水質状態はほぼ実状を再現できるかもしれないが、水面に近いモニタリングポイントでは、1本のロープに固定された複数の計測機器が通過したことにより、大きく水塊が乱れ、近傍空間との平均値が得られる可能性がある。

無線式として、情報通信の手段に超音波を用いることが考えられる。なお、超音波は、情報通信だけではなく、反射波を利用した2点間の距離測定にも利用される。超音波は、概ね30kHz以上の疎密波であるため、振幅によっては機器の筐体や内部に振動が伝搬する可能性がある。よって、水中定位などの運動制御では、加速度センサがこの振動を検知する可能性が高いため、防振構造や信号のフィルタ制御を別途検討する必要がある。また、超音波では、音響キャビテーションによる汚泥浮上の研究¹²⁾等にも利用されていることから、使用する超音波が水塊に与える影響についての実験的検証も必要である。また、無線技術には、超音波だけではなく、電磁波も利用でき、淡水中では微弱電波による通信が可能であることを実験的に確認済みである¹³⁾。電波は、超音波のように振動を生じないため、機器の設計・制御も単純化できる利点がある。ただし、現時点で確認している微弱電波の通信距離は、電波法の規則範囲内では3mにも満たないため、長距離通信の実現化については、更なる検討が必要である。

なお、有線式でも無線式でも、水中での物体移動に伴う、周囲の水塊を乱れは回避することができない。そこで、この影響を極力低減する方法として、流体抵抗を少なくした釣り用オモリの開発技術¹⁴⁾を応用することが効果的である。以上のように、GPSや水中定位システム等の技術を複合させることで、モニタ空間を構成することは可能だと考える。

2.3 センサ技術

水質にかかわる市販センサの一例を表1に示す。

表1 市販センサの一例

市販センサの種類	目的など
溶存酸素	化学反応状況の推定。低い水生生物が窒息死、悪臭
電気伝導率	溶存イオン量のおおまかな推定、水塊の推定など。
水素イオン濃度	飲料用、産業用等、用途の適正判断。地質・土壌等の状況推定など。
水深	鉛直方向の位置測定
クロロフィルa	植物プランクトンの量
水温	分布状況から水の運動や異水の流入を推定。水塊の推定など。
酸化還元電位	酸化力または還元力の傾向をみる

生活環境や人の健康にかかわる水質関連の測定項目数は30以上あり、全ての測定項目に市販センサが存在しているわけではない。また、市販のセンサであっても、数十cmの長さがあったり、数十万円の価格帯であったりするため、多点同時測

定のモニタリングシステムには適さないものが多い。温度センサのように、汎用的に使用されている安価で小型のセンサを選択するか、市販されているセンサの測定原理¹⁵⁾¹⁷⁾を参考にして、検出部や信号処理部を簡素化することが必要である。

また、イメージセンサを活用すれば、数値的な測定値だけではなく、静止画または動画の記録が可能である。携帯電話のCMOSカメラやLEDディスプレイ等の普及により、画像処理技術は、従来に比べて活用しやすい状況であることから、画像をモニタリング要素に加えることは比較的容易に実現できる。

2.4 採水技術

採水作業は人的負荷が大きいだけでなく、危険を伴う場合もある。そこで、無人水中機器搭載型採水技術について検討した。

現在使用されている「採水器」は、海洋・河川・湖沼・地下水などの現場によって、使い分けられているものの、その種類は大別すると10種にも満たない。現場で採水作業を実施している企業数社に聞き取り調査を実施したところ、採水は主に表層水から水深2mまでの範囲を対象としている場合が多く、使用する採水器には、図3に示すような、長手方向の寸法が0.3m~1.0m程度のバンドーン、ハイロートの他、バケツや柄杓を使用している。

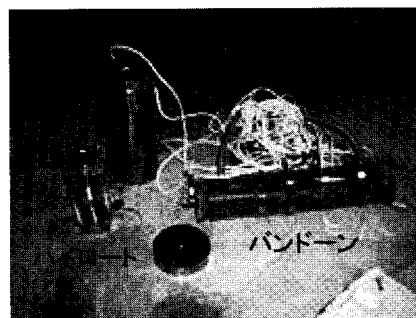


図3 使用頻度の高い採水器

また、深度プロファイル試料を一括で採水する採水器として、「安藤式同時多層採水器」がある。水面下30mまでの水深に使用でき、20 ~ 30個の採水器が取り付けられる構造であることから、サンプリング距離の間隔（グリッド）は1m以上と推定される。以上より、プロファイル試料の採水を目的とする採水機の目標グリッドを0.3m未満

に設定することで、これまでの採水器や採泥器では確認することができなかった、水と泥の境界・混在層の水質プロファイル調査への利用も可能になると考えた。そこで、JIS K0410-3-2(水質-サンプリング-第2部：サンプリング技術の指針)中の附属書A(規定)「自動サンプリング装置の望ましい特徴」を参考にし、規定の第一項に示されている「部品数を少なくする」ことに着目して、弁、タンク、ノズルおよび配管から構成する採水機構に圧力計を接続し、図4の構成にて実験を行った。

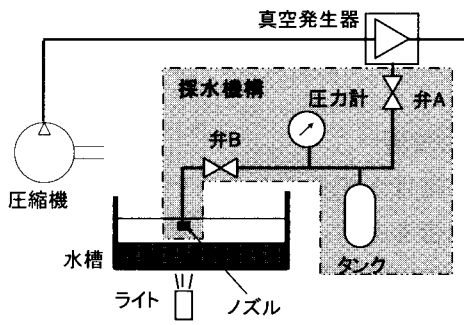


図4 採水実験概要

本機構では、弁Bを閉じて、空気の圧縮機と真空発生器により採水機構内を-50kPaの真空状態にして弁Aを閉じ、この状態を採水機構の初期状態とする。そして、ノズルを水槽内に水没させ、弁Bを開いて配管内とタンクに水を採水し、弁Bを閉じることで採水作業の終了とした。なお、この採水方法が周囲の水塊に与える影響を目視確認するため、水の比重を利用して水槽内を二層にし、下層をフルオロセインナトリウムで緑色に着色した。また、ノズル付近の状況を鮮明にするため、水槽底部からライトで照射した。外径8mmのノズルに流入する流体状況の確認実験を行い、その状況を図5に示す。

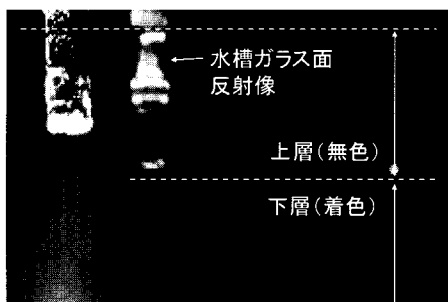


図5 実験状況

着色水面とノズル先端の距離を約1~2cmとって採水を行ったところ、着色水はノズル中心部のごく僅かな範囲に吸い込まれることから、採水した水の大部分はノズル面と垂直に分布する水塊であることが予測された。ゆえに、2つの同心円で構成されるノズルをつくり、内側のノズルで採水した水を試料用に、外側のノズルで採水した水を捨て水とするダブルノズル構造を考え、ノズルが1つの場合であるシングルノズルとの比較を、流体解析によるシミュレーションにより実施した。図6に示したシミュレーション結果から、流線を確認すると、ターゲットとする水塊の乱れは少なく、グリッド間隔を0.3m未満とする採水技術構築の可能性を見出した。

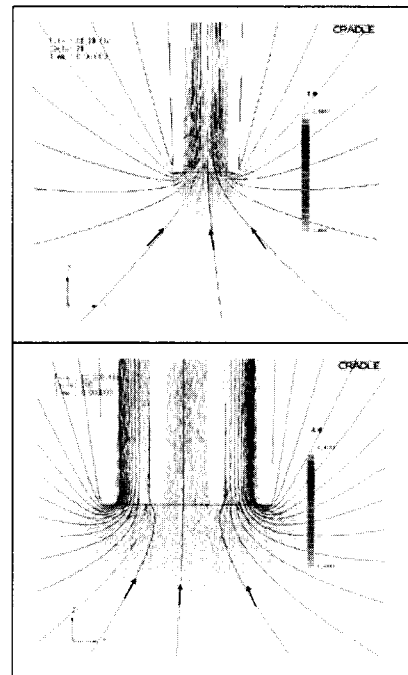


図6 ノズル近傍の流体解析例
(上：シングルノズル 下：ダブルノズル)

また、シミュレーションと実験結果の比較検証を行う手法として、現段階では画像処理が適するものと考えた。本実験では流体の状態を比較検証するため、本来は動画での処理が有効かと思われる。しかし、まずは定常状態での比較検証方法を構築することが必要と考え、静止画を有効に利用することを考えた。そこで、実験した二層状況について画像抽出や加工処理方法などについて確認するため、JPEG形式の画像データを簡易的に処理する専用プログラム¹⁸⁾を試作した。試作プログラムの動作画面を図7に示す。このプログラムそ

のものでは、画像解析はできないが、JPEG形式の画像を扱い、画像のRGBデータをそれぞれ256階調で取得し、画像編集するといった基本機能は確認できた。今後は、解析モジュールの組込など採水器の実験的検証に役立つ工夫が必要である。本採水技術は、採水速度制御により、瞬時サンプルや時間平均サンプルの選択も可能となるため、水平・深度プロファイルの選択制御性を高めた自動化機器の基盤技術とも成り得る。

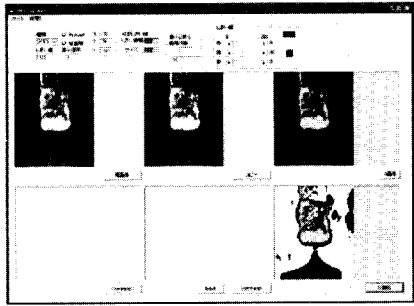


図7 画像処理用の試作プログラムGUI

2.5 分析技術

水質分析では、特定点の測定値に対し、高い信頼性を求めると、高精度で高価な分析機器が利用され、対象によっては、数日を要するなど分析時間も長い。本研究の目的とする補完データとしての役割を傾向把握として捉えると、精度の高い数値を求めるよりも、安価で早く、多くの試料を分析できるほうが合理的である。そこで、試料分析方法は比色法を利用した(株)共立理化学研究所の「パックテスト」の利用を前提にした。パックテストでは、使用する試料は数mLと極めて少ないため、少ない採水量で多くの項目を測定できる。なお、専用機器によってデジタル表示も可能だが、大量のサンプルを処理するにはコストや手間がかかる。そこで、短時間に大量のサンプルを扱うことで分析作業を効率化するには、画像処理による簡便な比色装置を開発することが必要となる。さらに、センサやパックテストで確認することができず、かつ生活環境の保全に関する環境基準に指定されている項目に大腸菌群数がある。大腸菌は、食品衛生の観点から見ても非常に重要な測定項目である。逆に、環境基準に指定されていなくても、食品衛生にかかわる細菌を水質測定項目に掲げ、水環境の情報量を増やすことは、有益にはなっ

ても無益になることはない。そこで、現在、主に腸内細菌科の検査技術として、迅速細菌検査技術¹⁹⁾が研究開発されており、大腸菌群数の測定への適用可能性についても検討されている。多サンプル処理機構の追加や、傾向把握に十分な精度の条件を示した上で、簡便化すれば、低コスト化につながり、実用性が高まる。

2.6 情報管理技術

情報管理はデータベースによる一元管理が効率的な手法である。データベースは様々な分野で利用されているが、各情報を手入力する使い方では、間違いを生じやすい。ゆえに、センサや分析での結果を自動的に管理できるインターフェースの検討が必要である。また、測定結果に関しては、位置情報と組み合わせたデータ空間構成技術成や、時間情報と組み合わせた経過・予測などの技術開発も必要である。

また、情報の公益性を考え、最近利用が進むGIS技術を用いた国土地理院の電子国土webシステムの利用について検討した。まず、電子国土webシステムを用いて、国立環境研究所等で公開されている公共水域の測定データや観測点の位置情報を、短期的に立ち上げたwebサイトにアップロードして確認した。本システムは、地図情報を手軽に利用できるため、非常に理解しやすいサイトを容易に構築できる。今後はデータベース技術との連携を図り、情報検索の高速化・最適化技術の検証が必要である。

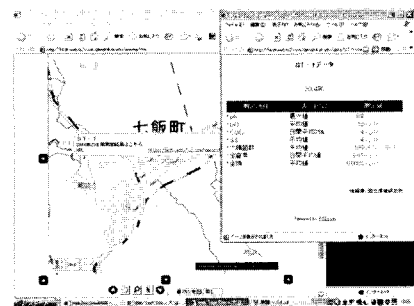


図8 情報公開の一例

3.おわりに

本モニタリングシステムでは、モニタリングポイントの位置決め後、トリガ信号により時間的な精度を確保する必要があり、ZigBee等の無線モジュ

ルを利用することで実現は可能である。また、数kmも離れた間を通信するのであれば、水面上の機器に携帯電話を設置し、パソコンから各携帯電話にメールを一括送信することで、音声やバイブレータ機能の振動をトリガとして利用できる。本研究では、これまでの研究成果を中心に、水環境モニタリングへのかかわりについて検討したが、機器の材質や、流体特性、実用性など、まだまだ検討不足の事項も多分にある。また、現在に至っても、浄水場での計測・制御システムの高度化が求められている²⁰⁾ことから、屋外に限らないシステム構成の検討も必要とされている。また、河川が対象ではあるが、ノンポイント負荷を考慮した疑似観測量を導入したシミュレーションの研究²¹⁾もなされている。このようなシミュレーションを有効に活用できれば、湖沼のモニタリングを効果的に計画できる可能性もある。今後は、実用的な水環境モニタリングシステムの構築を実現できるように、調査研究、基礎研究、応用研究を重ねていくと共に、水環境のモニタリングの重要性を示すことが必要と考える。

参考文献

- 1) 例えば、(社)水環境学会：水環境学会誌,Vol.29,No.11(2006)
- 2) 田淵俊雄：湖の水質保全を考える(技報堂出版)(2005)
- 3) 環境庁告示59号
- 4) 総理府令第103号
- 5) 石川靖：水環境学会誌,Vol.29,No.10(2006),P574-579
- 6) 石飛裕：水環境学会誌,Vol.29,No.10(2006),P589-592
- 7) 例えば、半谷高久,小倉紀雄：第3版水質調査法(丸善株式会社)(1995)
- 8) 服部進,長谷部博幸,小野徹：土木学会論文集D,Vol.63,No.2(2007),P216-222
- 9) (社)計測自動制御学会：計測と制御,Vol.44,No.4(2005),P236-277
- 10) 松村一弘,宮原則行：青函インターブロック交流事業,青函テクノネットワーク事業研究論文集,Vol.3(1999),P1-10
- 11) 例えば、(社)計測自動制御学会：計測と制御,Vol.46,No.11(2007),P823-859

- 12) 沢田雄太,長島聡志他：日本音響学会2005年春季研究発表会講演論文集(2005),P861-862
- 13) 村田政隆,宮原則行：第39回計測自動制御学会北海道支部学術講演会論文集,(2007),P113-116
- 14) 吉野博之他：平成17年度日本水産学会講演要旨集(2005),P3
- 15) 大浦政弘,溝口次夫他：環境計測学(環境新聞社)(1998)
- 16) (社)日本電気計測器工業会：環境計測器ガイドブック第5版(公害対策技術同友会)(2000)
- 17) 大森豊明他：普及版センサ技術((株)フジ・テクノシステム)(1998)
- 18) 酒井幸市：VisualBasic&VisualC++によるデジタル画像処理入門(CQ出版)(2002)
- 19) 大坪雅史,宮原則行,剣持美帆他：食品工業,Vol.142,No.20(2006),P46-53
- 20) (財)水道技術研究センター：新しい浄水技術産官学共同プロジェクトの成果(技報堂出版)(2005),P307-351
- 21) 大住晃,小見山資朗他：計測自動制御学会論文集,Vol.43,No.5(2007),P408-417