

三宅 亮

国立大学法人東京大学工学系研究科
教授

モデルベースによる水循環系スマート水質モニタリング網構築技術の開発

§ 1. 研究実施体制

(1)「東大マイクロ・ナノ流体」グループ

① 研究代表者: 三宅 亮 (東京大学工学系研究科、教授)

② 研究項目

水循環系スマート水質モニタリング網構築技術に関する研究

i) 研究項目 1: マイクロ流体対応モデルベース型開発環境構築

i - ②) マイクロ流体対応モデルベース型開発環境の高度化と改良

ii) 研究項目 2: 水質分析に必要なマイクロ流体要素の試作とモデル開発

ii - ②) マイクロ流体要素の試作とモデル化

iii) 研究項目 3: 水質モニタ対応モデルベース型開発環境構築と開発効率の評価

iii - ①) 水質モニタリングの現状調査と適用先の提案

iii - ③) 水質モニタ設計・試作効率の評価

iv) 研究項目 4: スマート水質モニタリング網対応モデルベース型開発環境構築と検証

IV - ②) フィールドでの水質モニタ性能評価

(2)「日立水インフラ」グループ

① 主たる共同研究者: 津留英一 ((株)日立製作所 インフラシステム社 機械システム事業本部、主任技師)

② 研究項目

マイクロ流体要素・モニタ装置の試作研究

ii) 研究項目 2: 水質分析に必要なマイクロ流体要素の試作とモデル開発

ii - ②) マイクロ流体要素の試作とモデル化

iii) 研究項目 3: 水質モニタ対応モデルベース型開発環境構築と開発効率の評価

iii -①) 水質モニタリングの現状調査と適用先の提案

iii -③) 水質モニタ設計・試作効率の評価

(3)「広大ナノデバイス」グループ(研究機関別)

①主たる共同研究者:横山 新 (広島大学ナノデバイス・バイオ融合科学研究所、教授)

②研究項目

連続監視センサの試作研究

iii) 研究項目3: 水質モニタ対応モデルベース型開発環境構築と開発効率の評価

iii -①) 水質モニタリングの現状調査と適用先の提案

(4)「豊橋技科大」グループ(研究機関別)

・主たる共同研究者:村上裕二 (豊橋技術科学大学電気電子情報工学系、准教授)

・研究項目

マイクロ流体要素の試作研究

ii) 研究項目2: 水質分析に必要なマイクロ流体要素の試作とモデル開発

ii -②) マイクロ流体要素の試作とモデル化

§ 2. 研究実施の概要

試薬反応等を用いて目的とする溶存化学物質を定量するタイプの水質モニタは、一連の化学分析プロセスを自動で行うための流体系を内部に備える。本研究では、それら流体系を構成するマイクロ流体要素(μ -fluidics)のレベルから、モニタを多点配置した監視システムに至るまで動作予測・評価が可能な、マイクロからマクロまで統合した、HILS(Hardware In the Loop Simulator)技術を核とした水質モニタリング網向けのモデルベース型開発環境基盤を構築する。また本開発環境を利用して、実際に水質モニタを試作し、開発効率(設計・試作期間の効率化、設計性能等)の向上度合いを評価する。さらに試作した水質モニタを実環境変動下に設置し動作安定性の評価を行うとともに、多点モニタリングに関する諸条件(設置台数、測定頻度等)の探索を行う。以上の研究を4つの研究項目に分けて進める。

(1) マイクロ流体対応モデルベース型開発環境構築(研究項目1)

HILS 技術は、水質モニタ内の流体系を模擬した仮想流体システムと実マイクロ流体要素とを同期させてハイブリッドでシミュレーションを可能とするものである。平成26年度まで、仮想モニタリング網と実水質モニタとを同期動作可能な HILS 環境の高度化を図ってきた。

(2) 水質分析に必要なマイクロ流体要素の試作とモデル開発(研究項目2)

水質項目に応じた化学分析プロセスに不可欠なマイクロ流体要素の開発・改良とモデル化を行ってきた。まず試料水を濃縮するための濃縮器(希薄な溶存成分の検出感度を見かけ上向上させるため)に対しては、濃縮プロセスの最適化や耐久性の高い蒸発膜構造に変更するなどの改良を施した¹⁾。また試料水中の細菌数を計数するためのデバイスにおいては、細菌を染色反応する流路と検出用の振り絞りフローセルを一体化した前処理機能付シースフローセルを試作²⁾し、染色と検

出の一貫動作(試料として酵母菌を利用)が可能であることを確認した。残留塩素については、試薬添加時に圧力感度の高い反応流路系を求め、モデル・実機に反映させた。硝酸態窒素の分析(ナフチルエチレンジアミン吸光光度法)のための還元カラム(硝酸→亜硝酸)に対しては、還元処理量を増大するために開発した4層構造のマイクロ還元カラム(高耐圧シームレス加工、基材:Cu)の評価を実施し、単層に比較して同じ還元率の下、約6倍の処理量($\sim 0.2 \mu\text{L/s}$ → $\sim 1.3 \mu\text{L/s}$)が得られることを確認した。また水道水中のトリクロロミン分析のための濃度勾配形成用滴定デバイスについては、模擬試料(フェリシアン化カリウム溶液)を用いて還元電流による検出性能の評価を実施し、課題抽出(濃度勾配性不十分)及び流路の改良指針(流路幅変更)を得た。さらに環境水等も計測可能とするためのサイクロン型試料水フィルタ(懸濁粒子の除去)を新たに開発し、模擬試料(μm オーダーから数百 μm オーダーの粒子を懸濁)を用いて除去性能の評価を実施したところ、有用($50 \mu\text{m}$ 以上、90%除去)であることを確認した。

(3) 水質モニタ対応モデルベース型開発環境構築と開発効率の評価(研究項目3)

研究項目3①では、MBRなどで利用される膜の汚れ付着状態を監視するために、表面への汚れ付着を直接検知可能で、水中に実装しても漏電の恐れのない光共振リング型センサの適用を提案しており、平成26年度はセンサ寸法・形状と信号量のシミュレーション及び実験による検証など、感度バラツキ低減のための条件探索(リング間距離 $100 \mu\text{m}$ が良好)を行った。研究項目3③では、60 mm立方サイズの水質計ユニットと処理ユニットとを様々に組み合わせるによって多項目に汎用対応する水質計システムの概念を提案した(図1参照)。これに合せて、モデルベース型開発環境と3Dプリンタ/積層形成技術を利用して、60 mm立方のサイクロン型フィルタユニット、濃縮器ユニット、水質計測用では残留塩素、硝酸態窒素、細菌数の水質計ユニットを各々試作した。またトリクロロミンについては、上記滴定デバイスを備え、かつ60 mm立方ユニットに収めるための流路構造設計を終えた。これらの設計・試作を通じて、設計・試作期間を最短では2日程度まで大幅に短縮可能であることを確認した^{1),3)}。

(4) スマート水質モニタリング網対応モデルベース型開発環境構築と検証(研究項目4)

研究項目4②では、無線機能を一体搭載したマイクロ水質モニタを試作し、通信可能距離、データの安定性などを評価、課題を抽出し、省電力化の工夫や、安定な情報伝達のためのポスト・ログ化通信方式などを新たに提案した。また実際の水道水による通水試験を通して、モニタ内流路への長期的な汚れ堆積の可能性や、水道水中に溶存するガスの信号への影響などの課題を抽出した。対応策として、その場で流量パラメータを検定する方法及び3色LEDを用いた時間分解多波長測光・リアルタイム光量補正法を新たに考案した。これらの対策を盛り込んだ通信系、水質モニタを3か所(内2か所水道供給箇所)の離れた位置に配置し、無線での水質測定と測定結果のホッピング情報伝達動作の評価を実施した。その結果、データが混在することなく伝達可能であることを確認した。またリアルタイム光量補正方式等対応策の有効性を確認した。

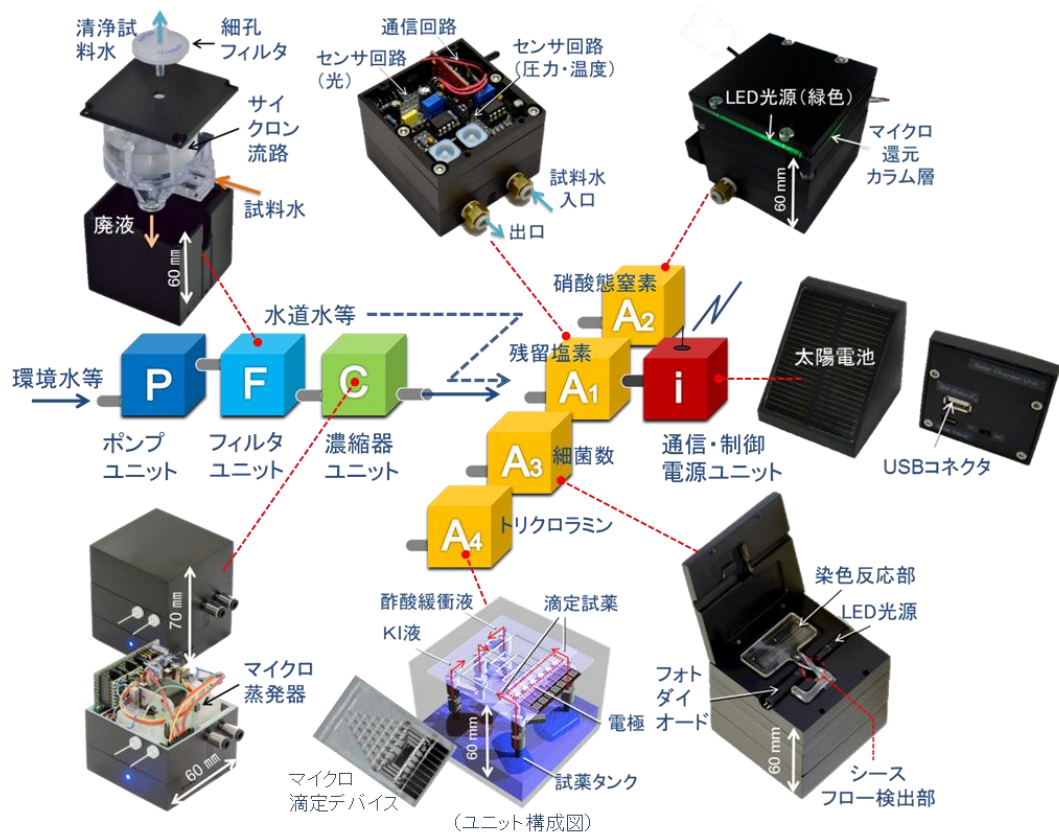


図1 ユニット組み合わせによるシステム構成と試作した各ユニット類

【代表的な原著論文】

- 1) Bula, W.P., Aritome, K., Miyake, R.(2014) 3D printed microfluidic circuit board, Proc. of the 18th Int. Conf. on Miniaturized Systems for Chemistry and Life Sciences (microTAS 2014), San Antonio, USA, 1524-1526
- 2) 佐藤友美、三宅亮(2014) 振りマイクロ流路を用いたシースフロー形成、日本機械学会論文集、Vol. 80、No. 813. (DOI:10.1299/transjsme.2014mn0132)
- 3) 三宅亮、有留克洋(2015)モデル化技術と3D プリンタを活用したオーダーメイド型マイクロ化学システム、化学装置、57、3、21-24.