

〈第35回環境システム計測制御学会 (EICA) 研究発表会〉

一般論文/概要発表・ポスター発表

一般論文概要発表

【座長】佐藤 圭輔 (立命館大学)

【副座長】豊岡 和宏 (㈱明電舎)

産・官・学の研究者・技術者による全20編の一般発表、未来プロジェクト TSUNAGU21 IVの活動紹介が行われた。また、同内容についてポスター発表によるパネル前ディスカッションが行われ、活発な議論が交わされた。

1. 浄水塩素注入最適化アプリケーションのモデル検証

東芝インフラシステムズ(株) 毛受 卓, 鷹箸幸夫
横山 雄, 金谷道昭
(株)東芝 松本 隼

浄水場における塩素注入の自動化・最適化に向け、高精度な残留塩素濃度予測モデルを搭載した塩素注入最適化アプリケーションの開発を進めてきた。実フィールドにおいて実証試験を行い、アプリケーション適用による有用性の検証を完了した。本アプリケーションは、物理・化学反応に基づくホワイトボックスモデルと、AIによるブラックボックスモデルを組み合わせた残留塩素濃度予測モデルを演算エンジンとしているが、浄水場のオペレーターにアプリケーションで演算した塩素注入率を安心して利用してもらうためには、演算結果に対する説明性が重要と考えている。そこで、演算エンジンの説明性を評価するため演算におけるホワイトモデルボックスの演算範囲をカバー率として評価したところ、原水中に含まれる塩素消費要因物質の濃度や紫外線量、揮発放散量をホワイトボックスモデルに入力、演算することで前塩素が沈澱池出口までに消費される現象をほぼ説明できることを確認した。物理・化学反応に基づく説明性の高い残留塩素濃度予測モデルを用いた制御の導入により、浄水場の自動化に寄与する技術として期待される。

2. オゾン溶解シミュレーション技術の開発

— pH 影響の評価 —

東芝インフラシステムズ(株) 大澤 俊, 村山清一
中嶋可南子, 牧瀬竜太郎

オゾンは臭気物質や難分解性物質を分解することが可能で、浄水・下水処理への適用が進められている。当社ではオゾン設備の設計計画支援・オゾンの注入率制御に向けて、オゾン溶解を予測するシミュレーション技術を開発している。実プラントへ適用する際には、

原水 pH の変化によりオゾンの自己分解速度も変化し、溶存オゾン濃度も変化するという課題がある。本報告では、pH とオゾン自己分解速度定数の関係を実験的に求めた。一方、水深が変化すると溶存オゾン濃度への影響はより顕著であることが分かり、自己分解速度式の改良が必要であることが明らかとなった。これをシミュレーションに組み込むことで pH や水深が変動しても溶存オゾン濃度の予測が期待され、オゾン注入率制御の最適化に寄与すると期待される。

3. 窒素除去と省エネを両立する曝気量制御技術の開発

三菱電機(株) 植田怜央, 吉田 航, 林 佳史
今村英二, 木本 勲, 霜田健太

好気タンク内での窒素除去の促進と省エネを両立する曝気量制御技術を開発した。好気タンクでの完全硝化を抑制した運転条件において、窒素除去量が極大化する好気タンク出口 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度が存在し、この濃度は流入負荷条件により変動することを確認した。この知見を踏まえ、リアルタイムに計測した流入負荷に基づいて過去の運転データから最適な好気タンク出口 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度の目標値を算出する制御目標値自動設定機能を構築した。目標値を達成するよう実機場の曝気量を制御した結果、曝気量は平均 15.2% 削減、処理水 T-N は平均 34.7% 低減された。処理水質と省エネの両立に貢献する曝気量制御技術として期待される。

4. 数値流体解析を用いた浸漬型正浸透膜エレメントの構造最適化

北九州市立大学 源田泰士, 寺嶋光春
アルイサウイ アルミアニムハンマド アルアミン
安井英斉
(有)九州技研 田中伸一
水 ing(株) 高橋惇太, 松林未理, 岩本拓也
(一)造水促進センター 山本志野歩, 大熊那夫紀

下水処理の省エネを目的として、流入下水を直接メタン発酵しメタンガスとしてエネルギーを回収しながら下水を省エネ処理する検討がなされているが、下水中の有機物濃度が低いいためメタンガスの回収効率が低く、大部分のメタンガスが処理水放流先で大気中に放散してしまうという課題がある。一方、日本の下水処理場は、処理水量ベースで約 45% が臨海部（最寄りの海岸から距離 2 km 以内）に位置している。そこで、海水を駆動液 (DS) とした正浸透 (FO) 膜を用いた

下水濃縮方法が研究されている。本研究では浸漬型 FO 膜エレメントを開発することを目的とし、小型セルで流路高さや駆動液の循環流量を変化させることにより膜面剪断応力を変化させ、膜面剪断応力と膜面透過流束の関係を求め、浸漬型 FO 膜エレメントの内部の数値流体力学解析により膜面剪断応力分布を求めて、エレメントの総合的な透過流束を算出、エネルギー消費量と膜コストの総合的な観点からエレメント構造および駆動液循環流量を検討した。折り返し回数が多いエレメントほど圧損が大きい傾向となったが、ポンプ揚程に比べると無視できる程度であった。一方、折り返し回数が多いほど総括膜利用効率 H_c が大きいため全体コストが小さくなった。本研究は省エネに資する浸漬型 FO 膜を用いた下水濃縮の実用化に寄与する技術として、今後の研究が期待される。

5. AIによる下水処理場の運転支援

北九州市上下水道局 小野泰弘

安川オートメーション・ドライブ(株) 平林和也, 上野和博
占部正敏, 藤原 翔

下水処理場の運転管理に係る職員の減少や技術継承などの対策が課題となっている。本研究ではこれらの課題解決を目的として、北湊浄化センター(北九州市)でAIの予測アルゴリズムの1つであるランダムフォレスト法を用いた「水処理制御支援システム」を用いた水処理曝気制御の風量調節弁開度制御設定値を予測する実機実証試験を実施した。過去の運転データからAIモデルを構築しリアルタイムデータから予測値を算出、ガイダンスを行う経験ガイダンスを行ったところ、風量調節弁の開度予測が正常にできていることを確認した。AIを用いた運転ガイダンスに寄与する研究として今後の展開が期待される。

6. 硝化抑制運転における自動制御を用いた省エネの実例

(株)ウォーターエージェンシー 池畑将樹, 湛 記先

硝化抑制運転を行っている下水処理場において送風運転の自動制御を実施した実例を紹介する。反応タンクへの送風量はOR制御を用いたFF制御を行いながら、反応タンク出口においてわずかに硝酸性窒素が出現するよう硝酸センサーを指標としたFB制御を併用した。また、同時に送風機の吸込み風量についても一体的に自動制御をおこなうことで、送風システム全体の最適な運転を目指した。この結果、送風機吐出圧の低減や、安定的な硝化抑制運転の実現がなされた。これにより良好な処理水質を維持しながら、送風機消費電力量が減少した。送風の省エネに資する技術として期待される。

7. 下水道施設の発電設備制御と再整備事業手法

横浜市環境創造局 勝木弘樹, 石原卓磨

横浜市の下水道施設では、機械・電気設備等の老朽化に対応するため、再整備に計画的に取り組んでいる。このうち、発電設備については現在80台設置されており、これまでに32台の発電設備の再整備が完了している。2030年度までに再整備が集中する見込みであり、安定的な下水道サービスを提供するため、計画的に再整備を進めている。発電設備の再整備事業は、ストックマネジメント計画に基づき計画的に実施しているが、今後48台の再整備を進める上で施設毎に更新時及び更新後に適した制御を構築することに加え、設置条件や周辺環境、関係法令など様々な制約条件の中で最適な手法により再整備をする必要がある。今後再整備が増えていく中厳しい設置状況のものも数多くあるとのことで、これまでの経験を基に工夫しながら再整備を行っていただきたい。

8. 太陽光強度の違いによる光触媒層/セラミック平膜ろ過のウイルス様粒子の除去効果

京都大学大学院	本間亮介
(株)日水コン	丹後元秀
立命館大学	沈 尚
京都大学大学院	竹内 悠
(株)明電舎	鮫島正一
京都先端科学大学	黄 永杰
京都大学大学院	西村文武
(株)明電舎	新井喜明

安価かつ安全な水処理システムの構築を最終的な目標として、セラミック平膜上に光触媒層を形成させ、そこに太陽光を照射させる処理システムを考案した。本処理システムでは、促進酸化による強力な処理能力と太陽光利用による低コスト化を期待できる。また、小規模での運用が可能であり、オンサイト処理への適用にも可能性がある。本報では、基礎研究として、太陽光照射の違いによる光触媒層/セラミック平膜ろ過のウイルス除去効果を評価した。実太陽光の照射強度に応じて、 TiO_2 層上で $\cdot OH$ を効率良く生成し、ウイルス様粒子を除去できることが確かめられた。また、ここで促進酸化が主要因であったことが判明し、光触媒層によるウイルス除去効果の研究におけるウイルスと活性酸素の量論的關係を把握する重要性が示唆された。本処理システムのウイルス除去の最適化につなげることが期待される。

9. 省エネルギー型セラミック平膜ろ過システムの実証試験

(株)明電舎 渡辺哲文, 中川彰利, 土屋 達
加藤直樹, 大下晃司

膜分離活性汚泥法（以下、MBR）は、様々な利点を有するが、特に膜曝気洗浄に係るエネルギー多消費な点が課題とされてきた。膜寿命の長さが期待され、海外で採用が進んできたセラミック平膜を用いた浸漬型 MBR においても、これまで膜ろ過に係る省エネルギー化を図るべく、膜ユニットおよび曝気洗浄装置の改良等を行ってきた。今回、この省エネルギー型セラミック平膜ろ過システムの実証試験を、国内の都市下水処理場にて実施した。低水温から高水温期を含む 14 カ月弱の長期膜ろ過運転を実施し、安定した膜ろ過が可能であることが実証された。今回実証結果に基づく膜曝気洗浄に係る消費電力量原単位は、0.08 kWh/m³と試算され、セラミック平膜の従来技術に比べて原単位が 50% 低減された。今回実証した省エネルギー型セラミック平膜を用いることで、MBR のさらなる省エネルギー化が期待される。

10. 水処理施設におけるスカム堆積抑制の取り組み（その 2）

東京都下水道サービス(株) 兼子清隆
東京都下水道局 桑折健太郎
イービストレード(株) 寺井健太
エビスマリン(株) 中村 光

都内の下水処理施設では、スカム堆積抑制のため、湖沼等の水質浄化に利用されている「ジェットストリーマー技術」を用いた導水式無閉塞水流発生装置（以下「AS：アクアストリーマー」という）を開発し実用化している。今回は、本装置（AS）を用いてスカム堆積抑制の取り組みを行った前回の報告に引き続き、スカム浮上を抑制するメカニズムと最初沈殿池導水渠の形状における AS の効果及び適用範囲を理論式や流体解析等により導出した。今回は導水渠形状による AS の適用範囲を調査したが、7.5 kW ポンプの AS を設置している最初沈殿池クロス水路（水路幅約 5 m）への設置を想定すると 48 時間運転後では装置から 20 m の地点で 0.3 m/s の流速があることをすでに確認していることから、水路幅が広い施設形状では小容量ポンプ仕様の AS が適していることが明らかとなった。今後、より大型ポンプ向け AS の検証や他の形状での適用範囲調査を行っていただき、スカム堆積抑制効果の拡大を期待したい。

11. 下水道ブルーカーボン構想

——沿岸生態系促進のための栄養塩供給管理技術の開発——

「ブルーカーボン促進のための栄養塩供給管理」プロジェクトチーム

(株)日立製作所 三宮 豊, 山野井一郎

圓佛伊智朗

信州大学

田中宏明

港湾空港技術研究所

桑江朝比呂

(株)東京設計事務所

田村一郎

下水道はこれまでに貢献してきた公共用水域の水質保全と同時に、持続可能な水産資源が育める豊かな海への貢献を期待されている。下水処理水由来の窒素やリンの栄養塩類は、沿岸域での海藻や海藻、植物プランクトンなどの生産による CO₂ 吸収・貯留を促進する重要な要素と考えられる。適切な時期と場所に応じた下水処理水質を制御できる栄養塩供給管理技術を開発することで、豊かな海だけでなくブルーカーボンへの活用も期待できる。このためには、沿岸海域の環境保全およびブルーカーボンクレジットの認証に必要な MRV（計測・報告・検証）に資するブルーカーボン計測技術、そこから得られた情報に基づき炭素・栄養塩類の動態評価・管理データで CO₂ 吸収促進・認証を支援するブルーカーボン管理・制御技術、カーボンクレジット認証対応技術、栄養塩類供給効率化技術が必要で、これらが一体となった本構想の実現が期待される。

12. 極値制御を利用した画像処理型凝集センサを用いた凝集剤注入制御の目標値最適化

東芝インフラシステムズ(株) 大西祐太, 山中 理
有村良一, 平野雅己
金谷道昭

凝集剤注入制御システムの制御目標値を最適化する手法を開発し、本研究ではその有効性を実験により検証した。本システムでは、フロックの荷電状態を定量化する画像処理型凝集センサを用いて凝集剤注入率のフィードバック制御を行うが、その制御目標値は水温や処理状況などに応じて適切に調整しなければならない課題があった。そこで、極値制御という探索型の最適制御技術を用いて制御目標値を調整する手法を開発し、ベンチスケールの実験により、処理水質を管理値内に維持しつつ、運用にかかるコストを最小化できることを確認した。浄水場オペレーターの負担削減とともに薬品コストを縮減する技術として、今後の実用化が期待される。

13. 雨水利用に向けた光触媒膜 / セラミック平膜システムファウリング抑制効果

京都先端科学大学 黄 永杰
 京都大学大学院 本間亮介, 竹内 悠
 (株)日水コン 丹後元秀
 京都大学大学院 河中祐也
 (株)明電舎 鮫島正一
 京都大学大学院 西村文武
 (株)明電舎 新井喜明

水不足の課題解決のため、日本国内でも雨水貯留で得られた水資源を有効活用する取り組みが注目されている。雨水利用方式の導入において、一般的に広く使用される膜処理技術が挙げられる。本報では、雨水利用に向けた膜処理技術の課題である膜ファウリングの抑制手法として、光触媒を集積したセラミック平膜処理システムによるファウリングの抑制効果を評価した。UV/TiO₂層/セラミック平膜システムでは、セラミック平膜に比べて約25倍の長時間ろ過が可能であった。また、UV照射によるファウリングの抑制と解消効果を確認した。一方、貯水タンクと太陽光利用を組み合わせた本処理システムは、下水処理設備が整備されていない開発途上国の地域においても、低コストで安全な水供給を実現する可能性を秘めている。本システムでは、約8日間にわたってろ過が効果的に行われることが確認された。地域ごとの降水率の違いが、持続可能な水供給の観点からどのような示唆をもたらすかが明らかになり、特に新たな技術や方法論が、雨水の浄化と供給の課題に対する有望な解決策となり得る可能性が示唆された。世界の水不足を解決するシステムとして、今後のご研究が期待される。

14. 酸発酵によって食品廃棄物から揮発性脂肪酸を回収するための生物反応モデル

北九州市立大学 孫 夢, 張 溪
 寺嶋光春, 安井英斉

既存のADM1にメタン生成菌の分解におけるpH阻害式を組み込み、食品廃棄物の嫌気性発酵中の酸破壊の臨界pHを計算した。効率的なVFA回収のための最適な操作条件は、既往研究の実験データを用いたシミュレーションにて求めた。また、メタン生成菌に影響を与えるpHの範囲を特定した。pH阻害が低くなるようにパラメーターを選定(pH_{UL}=6.41, pH_{LL}=5.47, n=0.23)したところ、酸欠に対して安定したメタン発酵が可能であった。一方、一定のpH阻害を考慮し効率優先として選定した場合(曲線pH_{UL}=5.55, pH_{LL}=5.11 および n=0.24), メタン生成菌の比減衰速度は0.4/d減少して適切な酸性化が促進されVFA収量が最大化した。実験結果によると、酸を生

成する細菌の活性に最適なpH範囲はpH5.5~6.2であり、これは酸阻害によるVFA消費を大幅に減少させることによりVFAの回収量も増加することを示している。pH阻害モデルのパラメーターは基質によって若干異なる場合があるが、酸性条件下での反応器の性能を正確に予測可能である。特定の目的のVFAを得るには、反応プロセスでpHを慎重かつ正確に制御する必要があるといえる。今後のご研究が期待される。

15. 硫化物によるメタン生成古細菌の不可逆的な失活を表現するための生物反応モデル

北九州市立大学大学院 フン ティ オァン
 北九州市立大学 孫 夢, 寺嶋光春, 安井英斉

メタン生成バイオマスに対する硫化物阻害の殺菌効果について研究を行った。北九州市内の下水処理場の嫌気性消化槽から採取したメタン菌リッチな消化液を用いて、硫化物濃度を変化させた場合の微生物濃度の動的変化を解析するために6日間の阻害試験を実施した。基質を添加せずに培養物を高硫化物に曝露すると、メタン生成古細菌の濃度は大幅に減少し、系内の硫化物濃度が高いほどより多くのバイオマスが死滅した。さらに、H₂Sガスのメタン生成菌死滅への影響を調査するためpHを変えた試験を行った。これらの実験結果はほぼ一致しており、メタン生成菌はH₂Sガスだけでなく全硫化物によっても抑制されたと考えられる。今後のご研究が期待される。

16. 一般廃棄物焼却飛灰による二酸化炭素の固定

— ウルトラファインバブルを利用した固定量増加 —

鹿島建設(株) 鈴木祐麻, 河合達司, 上島 裕
 篠原智志, 田中真弓

二酸化炭素(CO₂)を固定するためのカルシウム源として一般廃棄物焼却場から採取した飛灰を選定し、ウルトラファインバブル(UFB)を利用してCO₂の固定量増加を試みた。UFBを含まないCO₂溶解水で炭酸化処理を行った場合はCO₂含有量が141 mg/g増加したのに対して、UFB水を用いた場合は178 mg/g増加した。XRD(X線回折)やSEM(走査電子顕微鏡)を用いた分析によりそのメカニズムを検討した結果、UFBが有する固着塩剥離効果により炭酸カルシウムによる焼却灰粒子の被覆が抑制され、より多くの水酸化カルシウムが溶出して炭酸化されたことが分かった。あらたなCO₂固定化技術として、今後のご研究が期待される。

17. データ同化を用いた原水濁度実時間予測手法の開発と水道事業への活用

(株)日水コン 濱谷義晃, 村田道拓, 榊原康之
浅田勇次, 春日井太, 川口智也

近年は集中豪雨の発生頻度が増加し、河川水の濁度が急激に悪化する場合がある。特に水道事業においては、原水における高濁度の発生によって取水を制限または停止する措置を取る場合があり、原水濁度の予測が喫緊の課題となっている。著者らは、土砂流入等に由来すると考えられる高濁度の発生ポテンシャルが不確実性を有することに着目し、観測値を活用するデータ同化手法を導入した。本研究では、予測降雨を活用して6時間先まで原水濁度を予測した結果をもとに、降水時における現場作業員の負担軽減について検討した。気象庁から配信される予測降雨量には不確実性が含まれており、これを基に将来の河川水濁度を推定するにはその精度について更なる検証が必要である。一方で、非常時の対応については熟練技術者の暗黙知に依存してきた部分もあることから、本研究で構築した予測モデル等を用いて将来水質の「見える化」をすることで、安定的な運転管理と技術継承に繋がると考えられる。さらには、緊迫した場面での適切な対応が求められる現場職員に対して、時間的および精神的な余裕を与えることに繋がるものと考えられる。現場技術者の負担を軽減する技術として、今後のご研究が期待される。

18. 滋賀県西の湖流域を対象にした水質モニタリングによる汚濁負荷構成の特徴と季節変動の分析

立命館大学大学院 榎田健生
立命館大学 佐藤圭輔
(株)日吉 川上奈津子

内湖などの小さな水域は環境基準の対象外であり、結果として水質汚濁が長期化する原因となっている。本研究では琵琶湖東岸地域に位置する西の湖を対象とし、流出入河川の特徴と比較することで湖内における栄養塩類の季節的变化や変動要因を分析し、物質収支の推定や汚濁源の特定を試みた。調査は夏季(8月)、冬季(1月)および春季(4~5月)のそれぞれにおいて実施された。その結果、夏季においては内部生産の影響(窒素形態の変化)、底泥由来のリン酸の排出などが推察された。春季においては琵琶湖に対する西の湖の濁水・栄養塩流出緩和能が示され、特に全リンの変動は代掻き由来の懸濁物質濃度に大きく依存していること、また、内部負荷と合わせて琵琶湖に流出していることが示唆された。本手法を基に汚濁の特徴や原因を把握して、水質汚濁の長期化が改善されることを期待したい。

19. 監視制御システムの変遷とクラウド型監視サービス

メタウォーター(株) 潰田純也

人口減少とともに上下水道事業の従事技術者が減少しており、保守点検業務の効率化課題となっている。また、運転管理業務についても他業務との多能工化の観点から運転管理のみを行うことが困難になり、監視制御システムも管理形態の変容に合わせた機能が実装されるようになってきている。さらに、昨今では広域化を見据えたクラウド監視システムも登場しており、各社様々なサービスを提供している。本稿ではクラウドシステム Water Business Cloud が提供するサービスや、監視システムの特徴について紹介した。上下水道事業が抱える課題に対応するサービスとして期待される。

20. 用水供給事業・末端給水事業の連携促進のためのマクロ水運用シミュレーションの基礎検討

(株)日立製作所 藤井健司, 小泉賢司, 小熊基朗

水道事業は、水需要の減少に伴う料金収入の減少や施設稼働率の低下、老朽化施設の更新などの課題に直面しており、水道事業の経営基盤の強化を図るための有効な手段の1つとして水道広域化が期待されている。本稿では、用水供給事業と末端給水事業による水運用に関する広域連携に着目し、詳細な管網データ等を必要とせずオープンデータ等から容易に構築可能で、上記広域連携の実現可能性やその効果などの評価が可能なマクロな水運用計画シミュレーション方式とその可視化ツールを開発し紹介した。本ツールに入力するデータや設定条件を変えて様々なシミュレーションを行うことで、自己水設備のダウンサイジング効果やブロック間水融通の可能性などを評価することが可能で、広域連携の導入・促進への寄与が期待できる。今後は実際の水系を対象とした本方式の有効性の検証や水道事業者のニーズを取り入れたモデルの改良を行うとのことで、実用化が期待される。