

開発途上国における都市排水マネジメントと技術適用に関する研究

研究予算：運営費交付金

研究期間：平成 23～27 年

担当チーム：材料資源研究グループ

研究担当者：南山瑞彦、桜井健介

【要旨】

開発途上国における省エネルギー型の水処理技術として高速藻類増殖池(HRAP)に着目し、HRAP で増殖した藻類の沈降を促進させるため *Moringa oleifera* の種子の水溶液を凝集剤として適用させたところ、HRAP の藻類の沈降促進に効果があり、凝集剤添加量や pH の違いが沈降効果に影響を与えること等を確認した。それに伴って生じる下水汚泥や藻類の熱量回収量は、時間・敷地面積当たり、 $371\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ であった。下水処理水の安全なかんがい利用に資するため、開発途上国で重症化の懸念があるノロウイルスを対象に、安定化池やエアレーティッドラグーンの水処理方法による除去率を測定した。さらに、開発途上国におけるノロウイルス感染 1 件あたりの疾病負荷を整理し、健康影響の指標として障害調整生存年数を用い、ノロウイルスによる健康影響軽減を勘案して、安定化池やエアレーティッドラグーン処理水のかんがいへの適切な利用方法を示した。

キーワード：高速藻類増殖池、安定化池、かんがい、ノロウイルス、定量的微生物リスク評価

1. はじめに

新興国を中心に、急速な経済成長により工場排水や生活排水の河川、湖沼等への放流に伴い、著しい水質汚濁とそれに伴う利水障害、生態系の破壊など深刻な影響が生じている。また、昨今、人口増加による水資源の逼迫に伴う高度な水の再利用、地球温暖化対策に配慮した下水汚泥等を有効利用した省エネルギー対策が求められつつある。我が国では、こうした状況に対応しうる優れた公害対策の経験や汚水処理、汚泥有効利用技術等を保有しており、海外の多くの開発途上国から支援要請があるものの、開発途上国では気候風土、生活様式、経済状況、水資源の逼迫状況等が異なっており、我が国における下水道に関する考え方や技術がそのまま適用できない場合がある。

本研究は、平成 23-27 年度にかけて、開発途上国の近年の社会的要請を踏まえ、エネルギー消費量の少ない水処理技術の開発とそれに伴って生じる下水汚泥や藻類の有効利用可能性の検討、下水処理水の安全なかんがい利用方法の提示を目指した。

平成 23 年度は、マレーシア国を対象に下水・汚泥処理に関わる地域要件や都市排水に対する社会的要請について現地調査を実施し、適用技術に対する課題、留意点等を整理した。特に、エネルギー消費量の少ない水処理技術として、高速藻類増殖池(High Rate Algal Ponds, HRAP)等の導入が有望であるが、適用事例が少ないため適用可

能性の評価に資するデータの蓄積が必要と考えられた。

平成 24 年度は、水・汚泥処理技術の適合性の評価やそれらの適用方法の開発に向け、統計情報からアジア地域の現状の整理を行った。また、HRAP で課題となっている藻類の沈降促進を目指し、恒温器内の人工的な環境下で下水から培養された藻類に、熱帯・亜熱帯地域に生育する *Moringa oleifera* の種子の水溶液(MO 溶液)を添加し、攪拌したところ、藻類の沈降が促進することを確認した。

平成 25 年度は、恒温器内の人工的な環境下で下水から培養された藻類に、MO 溶液を凝集剤として適用する条件の最適化を目指し、ジャーテストを行い、凝集剤添加量や pH の違いが沈殿効果に与える影響を調べた。

平成 26-27 年度は、HRAP の藻類を、MO 溶液を用いて効率的に回収する方法の確立を目指し、容量 440L の HRAP を屋外に設けて藻類を増殖させ、MO 溶液の添加濃度が藻類の凝集沈殿に与える影響を調査した。さらに、燃料としての利用可能性を検討するため HRAP で増殖した藻類の熱量を測定した。

また、開発途上国における下水処理水の安全なかんがい利用にも着目し、開発途上国で重症化の懸念があるノロウイルスを対象に、安定化池やエアレーティッドラグーンによる除去率を測定し、農作物の喫食者を想定したシナリオについて、定量的微生物リスク評価(Quantitative microbial risk assessment, QMRA)の手法を用いて、下水処理水のかんがいへの適切な利用方法を示した。

表 1 下水道施設の整備に関係する経済・衛生・水資源・エネルギー・農業等の統計情報

	GNI per capita, PPP (current international \$, 2011)	Improved sanitation facilities (% of population with access, 2010)	Renewable internal freshwater resources per capita (cubic meters, 2009)	Arable land (hectares per person, 2009)	Agriculture value added per worker (constant 2000 US\$)	Energy self-sufficiency rate, net (% of energy use, 2009)	CO2 emissions (metric tons per capita, 2008)
United States	48,890	100	9,186	0.53	47,320	78	18.0
United Kingdom	35,940	100	2,346	0.10	26,330	81	8.5
Japan	35,530	100	3,371	0.03	40,763	20	9.5
Malaysia	15,190	96	20,752	0.06	6,432	134	7.6
China	8,450	64	2,113	0.08	521	92	5.3
Thailand	8,390	96	3,268	0.22	715	60	4.2
Indonesia	4,530	54	8,504	0.10	710	174	1.7
Philippines	4,160	74	5,223	0.06	1,126	60	0.9
India	3,620	34	1,197	0.13	479	74	1.5
Vietnam	3,260	76	4,178	0.07	361	120	1.5
Pakistan	2,880	48	323	0.12	963	76	1.0
Bangladesh	1,940	56	714	0.05	480	84	0.3
Median	8,360	85	2,769	0.14	2,755	77	2.7
Number of countries	162	171	173	203	148	134	197

(世界銀行資料より作成)

2. 統計情報からのアジア地域の現状の整理

近年の開発途上国の社会的要請を踏まえた水・汚泥処理技術の適合性の評価やそれらの適用方法の開発に向け、統計情報を用い国レベルの視点から水・汚泥処理技術の現状について整理した。対象国は、アジア地域9か国（マレーシア、中国、タイ、インドネシア、フィリピン、インド、ベトナム、パキスタン、バングラデシュ）と日本、米国、英国とした。

世界銀行の資料¹⁾より作成した下水道整備に関係する経済・衛生・水資源・エネルギー・農業等の統計情報を表1に示す。衛生施設普及率については、年々改善が進んでいるものの、インドネシア、インド、パキスタン、バングラデシュは、いまだ60%を下回っている。水資源について、アジア地域は、一人当たりの水資源利用可能量が日本並みの国が多く、比較的恵まれていた。ただし、インド、パキスタン、バングラデシュは、日本の1/3~1/10程度であり、処理水の再利用（間接利用を含む）の需要が高いと思われる。また、農業生産高について、マレーシアを除いて各国とも労働者当たりの農業生産高が日本の1/36~1/113程度と低かった。安価な汚泥肥料が望まれるものと考えられた。

また、平成23年度の調査²⁾や文献³⁾によると開発途上国の排水基準は、下水処理水の放流先の用途によって設定され、BOD20から60程度まで幅広かった。開発途上国では、中級処理を含む幅広いレベルの処理技術が求められているものと考えられた。

3. 恒温器内の人工的な環境下で下水から培養された藻類の *Moringa oleifera* 凝集剤による凝集沈殿効果

HRAPは、滞留日数2-8日、水深0.2-1mで連続的に攪拌される人工池であり、藻類の光合成による酸素供給によって、排水中の溶解性有機物が従属栄養細菌によって好気分解するのを促進する処理方法である⁴⁾。バイオ燃料への変換のために藻類を生産する技術が世界的に研究されており、HRAPは経済的に実施可能で、かつ、最小の環境影響でできる方法と考えられている⁵⁾。しかし、沈殿しにくい藻類の除去及び回収効率が悪いことが、HRAPの課題の一つとなっている。

*Moringa oleifera*は、アジア、中東、アフリカの熱帯、亜熱帯地域で広く生育する樹木で、MO溶液が、数ある天然凝集剤の中でも優れた凝集作用を持つ⁶⁾ことが知られている。MO溶液がHRAPの藻類の凝集沈殿に効果があれば、HRAPの導入が容易になると思われる。また、現在の化学凝集剤の代わりに*Moringa oleifera*の種子が利用されることになれば、化学凝集剤の生産に伴って排出される温室効果ガスの排出抑制になると思われる。

近年、*Moringa oleifera*の凝集性に関しては、いくつか報告がある。Pritchardら⁷⁾は、開発途上国での浄水処理のための凝集性を評価し、硫酸アルミニウムや硫酸鉄には劣るが、十分な処理能を有することが報告している。Bhuptawatら⁸⁾は、インド国の下水の処理に適用し、硫酸アルミニウムと比較しながら、下水処理への適用性を検討している。Seguptaら⁹⁾は、ガーナ国の農業かんがい水等に適用し、濁度と寄生蠕虫卵の除去に有効であることを示している。Viciraら¹⁰⁾は、乳業排水に、安価に適用

可能であることを報告している。しかし、藻類への適用事例は見当たらない。

そこで、本研究の目的は、MO溶液によるHRAPの藻類の凝集沈殿処理への適用可能性の評価に向けて、簡易試験により、MO溶液による下水培養藻類の凝集沈殿効果を明らかにすることである。試験にあたり、pHの変化がMO溶液による凝集沈殿効果に与える影響について検討を行った後に、MO溶液の添加量が藻類の凝集沈殿効果に与える影響を検討した。比較対象としてポリ塩化アルミニウム(PAC)による藻類の凝集沈殿効果も併せて試験した。また、 Ca^{2+} と Mg^{2+} がMO溶液と共存することで凝集能力が向上することが知られており¹¹⁾、それらの下水培養藻類の凝集沈殿への影響も調査した。

3.1 方法

3.1.1 下水による藻類の培養

HRAPの藻類培養液を想定し、模倣的に培養液を作成した。培養液は、静置した流入下水の上澄み5Lを容量5Lの三角フラスコに入れ、回分式で曝気およびマグネチックスターラーで1,000rpmの攪拌を行い、照明付きの恒温機内で水温24°C、照射条件は光子フラックス $150 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、12h/dで2週間培養し作成した。流入下水は、処理区の一部に合流式下水道を採用している実下水処理場から晴天日（採水前の24時間の降雨量が0mm）に採取した。実験は2回に分けて行い、実験毎に流入下水を採取して培養した。

3.1.2 MO溶液の作成

MO溶液は、精製を行わず、作成が比較的容易な既報の方法⁸⁾とした。すなわち、*Moringa oleifera*の種の内部2gを1.0mol/Lの塩化ナトリウム水溶液200mLに加え、30分攪拌したのち、孔径 $8.0 \mu\text{m}$ 、 $0.45 \mu\text{m}$ のニトロセルロースメンブレンフィルター（ミリポア社）の順にろ過した。MO溶液のTOCを測定し、炭素量で注入量を管理した。TOC濃度は毎回やや異なり、1,300mg/L程度であった。また、MO溶液の二クロム酸カリウムによる酸素要求量(COD_{Cr})も測定した。MO溶液の保管中の劣化が不明であったため、溶液は作成後、2日以内に使用することとした。

3.1.3 ジャーテスト

pHの変化がMO溶液による凝集沈殿効果に与える影響を評価するため、異なるpHでMO溶液を反応させ、凝集沈殿後の上澄みの水質を分析した。手順は、下水による藻類の培養液400mLを500mLビーカーに入れ、水酸化ナトリウム溶液または希硫酸でpH調整をした後、急速・緩速攪拌しながらMO溶液を終濃度で20mg-C/Lを添加し、pH4と11の間で反応させた。90分間静置した後、上澄み100mLを水面付近からピペットで採取した。採取した上澄みについて、

残存する藻類量の指標としてクロロフィルa、藻類に限らない懸濁物量の指標として波長660nmの吸光度（以下、 A_{660} と表記する）、凝集のしやすさを示す指標としてゼータ電位、凝集剤添加による変化の確認のためにpHと総アルカリ度を測定した。MO溶液を注入しない試料も同様に静置し、上澄みの分析をした。

次に、MO溶液の添加量が藻類の凝集沈殿効果に与える影響を評価するため、凝集剤の添加量を変化させて、凝集沈殿後の上澄みの水質を分析した。手順は、500mLビーカーに入れた下水による藻類の培養液400mLを5点用意し、急速・緩速攪拌しながら終濃度で、それぞれ、0、5、10、20、40mg-C/Lを添加し、pH調整なしで反応させた。また、PACはpH調整なしまたはpH7の条件下で、終濃度で0、1.5、3、6、12mg-Al/Lを添加し、同様に試験した。採取した試料のクロロフィルa、全COD_{Cr} (TCOD_{Cr})、溶存態COD_{Cr} (DCOD_{Cr})を測定した。

また、塩化カルシウムと塩化マグネシウムを添加し、 Ca^{2+} と Mg^{2+} 濃度をほぼ倍増させて、pH調整無しで20mg-C/LのMO溶液により凝集沈殿させ、同様に試験した。

凝集のための急速・緩速攪拌は、ジャーテスター（宮本理研工業株式会社、JMD-4E）を用い、2分間150rpm（G値： 86s^{-1} ）の後、15分間30rpm（G値： 7.7s^{-1} ）で攪拌した。PACは、酸化アルミニウム濃度10.0～10.6重量%のものを用いた。

3.1.4 水質分析

実験中の水質の分析の方法は、以下のとおり行った。クロロフィルaの分析は、分光光度計（島津製作所株式会社、Spectrophotometer UV-160）を用い、河川水質試験方法（案）の三波長吸光度法に従った。 A_{660} は分光光度計にて光路長10mmで波長660nmの吸光度を測定した。pHおよび水温の測定にはポータブルpH計（東亜DKK株式会社、HM-30Pと31P）を使用した。ゼータ電位の測定はDelsa Nano HC（ベックマン・コールター社）と低濃度用フローセルを使用した。MO溶液のTOC分析にはTOC-5000（島津製作所株式会社）を使用した。TCOD_{Cr}、DCOD_{Cr}および Ca^{2+} や Mg^{2+} 濃度の測定は吸光度計DR3900および試薬（ともにハック社）を用いた。DCOD_{Cr}および Ca^{2+} と Mg^{2+} 濃度の測定は、ガラス繊維ろ紙（ワットマン社、GF/B）のろ過試料を用いた。総アルカリ度の分析は、下水試験方法に従った。

3.2 結果

3.2.1 pHがMO溶液の凝集沈殿効果に与える影響

実験原水として用いた藻類を培養した下水（MO溶液注入前）のpHは9.53、クロロフィルa濃度は3,125 $\mu\text{g/L}$ で、その試料の静置後の上澄みは1,281 $\mu\text{g/L}$ であった。異なるpH条件下でMO溶液により凝集沈殿した試料の上澄みのク

クロロフィルa濃度を図1に示す。図1のとおり、高いクロロフィルa濃度を示したpH5と6の条件で反応した試料の上澄みを除いて、MO溶液により凝集沈殿した試料の上澄みは67 $\mu\text{g/L}$ から113 $\mu\text{g/L}$ であり、MO溶液が沈殿を促進する効果が確認された。しかしながら、pH5と6は、それぞれ369 $\mu\text{g/L}$ 、259 $\mu\text{g/L}$ と高く、凝集沈殿効果が劣るpHが存在した。pH7と11の間では、pHが高いほどクロロフィルa濃度が高くなる傾向が見られた。HRAPの放流水はpH7より高くなることが多いが、夜間に重点的に凝集させる、凝集前に日陰を設けるなどの運転方法の工夫や薬品によるpH調整などにより、pH7に近付けた方が効率よく沈殿すると考えられた。なお、A₆₆₀も同様に、pH5と6が高くなり、pH7と11の間では、pHが高いほどA₆₆₀も高くなる傾向が見られ(図2参照)、藻類だけでなく濁質全体も同様の対策が有効と考えられた。

図3に異なるpH条件下で20mg-C/LのMO溶液により凝集沈殿した試料の上澄みのゼータ電位を示す。pH7では、最も増加し、藻類の凝集に適していると言われるゼータ電位(-12mV)¹²⁾に達した。

なお、MO溶液の添加によるpHの低下は最大で約0.1であり、大きく変化しなかった。また、原水の総アルカリ度は96CaCO₃-mg/Lであり、MO溶液による凝集後もほとんど変化が無かった。

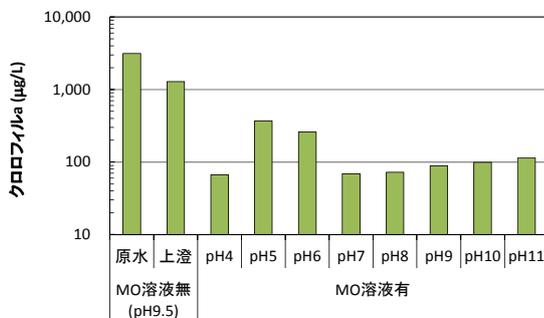


図1 異なるpH条件下で20mg-C/LのMO溶液により凝集沈殿させた試料の上澄み液のクロロフィルa濃度

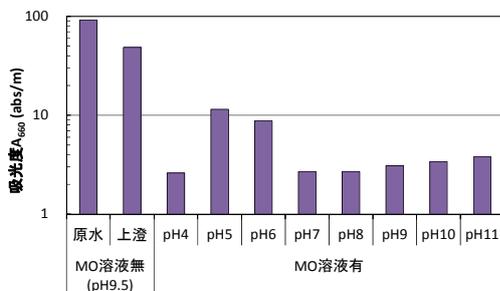


図2 異なるpH条件下で20mg-C/LのMO溶液により凝集沈殿させた試料の上澄み液の吸光度A660

3.2.2 MO溶液の添加量が藻類の凝集沈殿効果に与える影響

本試験で用いた藻類の培養環境下では、pHは24時間内に9と11の間で変動し、消灯後12時間経過時にpHが9程度で最低になった(図4参照)。そのため、pHが最も7に近づく消灯後12時間経過時に実験原水を採取し、試験した。実験原水として用いた藻類を培養した下水のpHは9.48、クロロフィルa濃度は2,119 $\mu\text{g/L}$ であった。その試料の静置後の上澄みは1,085 $\mu\text{g/L}$ であった。

MO溶液(pH調整無し)またはPAC(調整無しとpH7)により凝集沈殿した試料の上澄みのクロロフィルa濃度を図5に示す。MO溶液の添加量が多い時に、クロロフィルa濃度は低下し、凝集沈殿効果の向上が見られた。5mg-C/L添加時に、凝集剤添加無しで沈殿させた時よりもさらに60%を除去し、20mg-C/L添加時には94%をさらに除去した。PACも同様に、添加量が多い時にクロロフィルa濃度は低下し、pH7に調整したところ、少ない添加量で効率よく低下した。

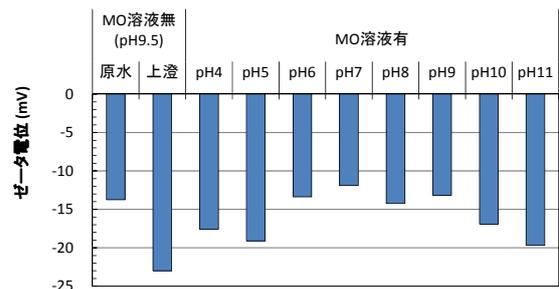


図3 異なるpH条件下で20mg-C/LのMO溶液により凝集沈殿した試料の上澄み液のゼータ電位

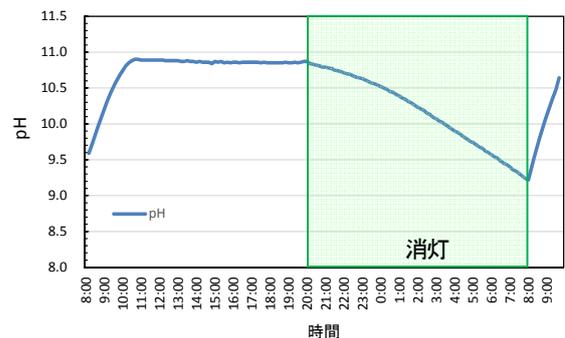


図4 照明付き恒温機による藻類の培養環境下でのpHの連続計測(20時から8時までは消灯)

また、MO溶液(pH調整無し)により凝集沈殿した試料の上澄みのTCOD_GとDCOD_Gを図6に示す。MO溶液の添加量を増やすにつれてDCOD_Gが増加していた。これは、MO溶液自身が持つ有機物が残留するためと思われる。MO溶

液40mg-C/L(DCOD_{Cr}で135mg/L)相当を添加した際、上澄みのDCOD_{Cr}は、MO溶液を添加しなかった場合と比較して、41mg/L多く、有機物添加量の30%が上澄み中に残留しているものと計算された。そのため、流出する有機物の最小化の観点からは、MO溶液の過剰な添加に配慮する必要があると思われる。

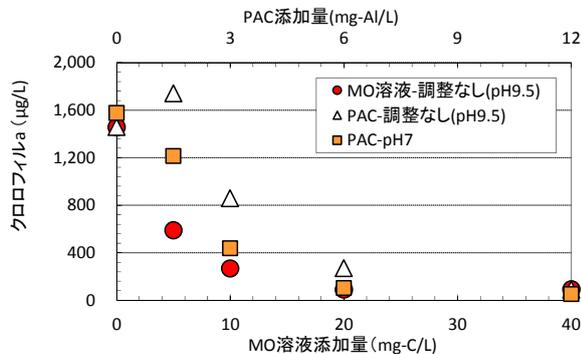


図5 MO溶液(pH調整無し)またはPAC(調整無しとpH7)により凝集沈殿した試料の上澄みのクロロフィルa濃度

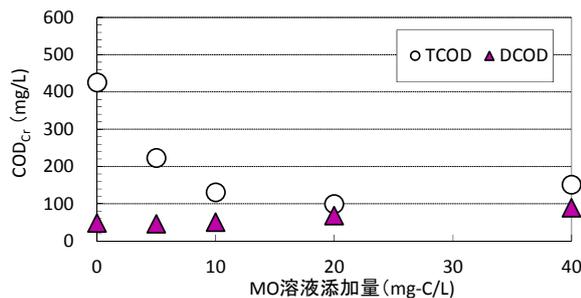


図6 MO溶液(pH調整無し)により凝集沈殿した試料の上澄みのTCOD_{Cr}とDCOD_{Cr}

3.3 Ca²⁺とMg²⁺濃度の変化がMO溶液による凝集沈殿効果に与える影響

pH調整無しで20mg-C/LのMO溶液で反応させた試料の上澄み中のクロロフィルa濃度は96.8µg/Lであった(図1参照)。それと比較して、Ca²⁺とMg²⁺濃度をほぼ倍増させて、同様に試験したところ、クロロフィルa濃度は65.3µg/Lとなり、さらに低下した。本試験で用いた藻類を培養した下水は、Ca²⁺濃度18mg/L、Mg²⁺濃度2.7mg/Lであった。この結果より、凝集の対象が藻類でも、Ca²⁺とMg²⁺がMO溶液と共存することで凝集能力が向上すること確認された。開発途上国で導入する際、地域によっては、本試験で用いた原水よりCa²⁺とMg²⁺濃度が高いことが考えられ、その様な場合は、本試験で用いた原水よりも効率的に藻類が除去できる可能性があると考えられる。

3.4 恒温器内の人工的な環境下で下水から培養された藻類のMoringa oleifera凝集剤による凝集沈殿効果のまとめ

HRAP で発生する藻類の沈殿効率を向上させるため、下水から培養された藻類に MO 溶液を凝集剤として沈殿実験を行った。その結果、以下のことが明らかになった。

- 1) MO溶液が下水で培養された藻類の沈殿を促進する効果が確認された。
- 2) pH4と11の間で20mg-C/LのMO溶液により藻類を凝集沈殿させたところ、pH5と6は効果が小さく、pH7と11の間では、pHが低いほど効果が大きくなった。
- 3) pH調整無しの場合、添加したMO溶液のDCOD_{Cr}の30%が上澄み中に残留した。
- 4) Ca²⁺とMg²⁺濃度をほぼ倍増させて、MO溶液で藻類を凝集沈殿させたところ、凝集沈殿効果が向上した。

4. HRAP の藻類の植物由来凝集剤による凝集効果と燃料としての利用可能性調査

前章の調査で、pH の違いが藻類の沈降性に与える影響を調査したところ、HRAP 処理水で想定される pH7 以上において、pH7 が最も効率良く沈降し、pH が高くなるにつれて、沈降性が低下した。このため、HRAP の藻類の沈降性を高めるには、凝集前に日陰を設けて pH7 に近づけることが有効と考えられた。そのため、MO 溶液を用いて効率的に HRAP の藻類を回収する方法の確立を目指し、日陰を設けた時の pH の変化を把握するため、屋外に設置した HRAP の後段に遮光槽を設け、HRAP と遮光槽中の処理水の pH を測定した。また、MO 溶液の添加濃度が藻類を含む浮遊物質の凝集沈殿に与える影響を調査した。さらに、燃料としての利用可能性を検討するため HRAP で増殖した藻類の熱量を測定した。

4.1 実験方法

4.1.1 実験装置および運転方法の概要

茨城県内の屋外に設置した実験装置の概略を図7に示す。実験装置は、最初沈殿池(容量50L、HRT8時間)、HRAP(容量440L、HRT3日間)、遮光槽(容量50L、HRT8時間)で構成した。HRAPの有効水深は40cmとした。全天日射量が多くなる夏季に、実下水処理場の下水を毎分100mL流入させ運転した。遮光板設置による処理水のpHへの影響を調査するため、運転の途中から遮光槽に遮光板を設置した。HRAPと遮光槽でpHを15分間隔で測定した。pH測定には、ポータブルpH計(HM-30P、東亜DKK株式会社)を用いた。

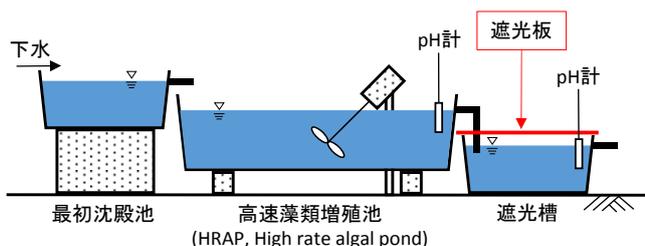


図7 実験装置の模式図

4.1.2 植物由来凝集剤の調製

MO 溶液は、精製を行わず、作成が比較的容易な既報の方法¹¹⁾とした。すなわち、*Moringa oleifera* の種の内部 2g を 1.0mol/L の塩化ナトリウム水溶液 200mL に加え、30 分撹拌したのち、孔径 8.0 μ m、0.45 μ m のニトロセルロースメンブレンフィルター（メルク株式会社）の順にろ過した。MO 溶液の TOC を測定し、炭素量で注入量を管理した。TOC 分析には TOC 計（TOC-5000、島津製作所株式会社）を使用し、測定値は 1,310mg-C/L であった。

4.1.3 MO 溶液の添加濃度が藻類を含む浮遊物質の凝集沈殿に与える影響

MO 溶液の添加濃度が藻類の凝集沈殿に与える影響を把握するため、異なる添加濃度で凝集沈殿させ、上澄み液の水質を分析した。手順は、HRAP で採取した試料を遮光しつつ 3 時間静置した後、400mL を 500mL ビーカーに移し、0、5、10、20mg-C/L となるように MO 溶液を添加し、急速・緩速撹拌した。試験時の試料の pH は 7.2 であった。90 分間静置した後、上澄み 100mL を水面付近からピペットで採取し、ゼータ電位、クロロフィル a(Chl.a) を測定した。急速・緩速撹拌は、ジャーテスター（JMD-4E、宮本理研工業株式会社）を用い、2 分間 150rpm (G 値: 86 s⁻¹) の後、15 分間 30rpm (G 値: 7.7 s⁻¹) で撹拌した。Chl.a の分析は、分光光度計（Spectrophotometer UV-160、島津製作所株式会社）を用い、河川水質試験方法（案）¹³⁾の三波長吸光光度法に従い測定した。ゼータ電位の測定は、ゼータ電位計（Delsa Nano HC、バックマン・コールター株式会社）と低濃度用フローセルを使用した。また、藻類を含む浮遊物質の凝集沈殿状況を Chl.a 沈殿率として評価することとし、凝集前の原液と凝集沈殿後の上澄み液の測定値を用いて式(1)によって計算した。

$$\text{Chl.a 沈殿率(\%)} = \left\{ \frac{\text{原液の Chl.a 濃度} - \text{上澄み液の Chl.a 濃度}}{\text{原液の Chl.a 濃度}} \right\} \times 100 \dots (1)$$

4.1.4 遠心分離により回収された藻類を含む浮遊物質の熱量

HRAP で培養された藻類を含む浮遊物質の高位発熱量の測定のため、HRAP 処理水 10L を 1 週間間隔で 3 回採取した。その都度、MO 溶液を 20mg-C/L となるよう添加し、前節と同程度の G 値および撹拌時間で急速・緩速撹拌し、大容量遠心機（H-7000UL、株式会社コクサン）により、2,000g で 20 分間遠心分離し、沈渣を凍結乾燥機（FDU-2100、東京理化工業株式会社）で凍結乾燥させた。その凍結乾燥試料を、粉状にして真空式断熱々量計（OSK150、小川サンプリング株式会社）により高位発熱量を測定した。

4.2 実験結果

4.2.1 遮光板設置による処理水の pH 低減効果

図 8 に、遮光板設置前後の HRAP と遮光槽の pH の経時変化を示す。遮光板設置前では、HRAP の pH のピークから約 2 時間後に、遮光槽の pH のピークが生じていた。遮光板設置後、HRAP の pH は最大で 8.5 まで上昇したが、遮光槽の pH は 7.0-7.3 の範囲となり、凝集の最適値(pH7)に近づいた。

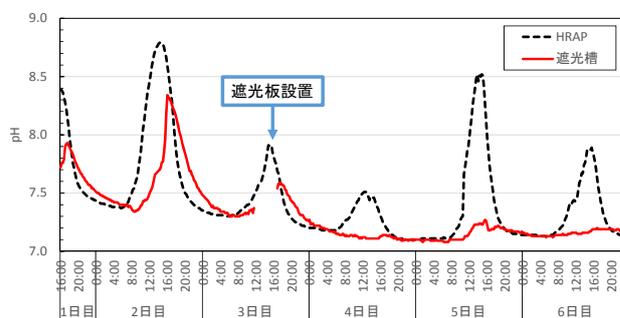


図8 遮光板設置前後の高速藻類増殖池(HRAP)と遮光槽中の処理水の pH

4.2.2 MO 溶液の添加濃度が藻類を含む浮遊物質の凝集沈殿に与える影響

図9にMO溶液の添加濃度と凝集沈殿後の上澄み液のゼータ電位と Chl.a 濃度を示す。添加前の原液の Chl.a 濃度は 348 μ g/L、ゼータ電位は -20.6mV であった。MO 溶液添加濃度の増加と共に、ゼータ電位は増加した。MO 溶液添加濃度 20mg-C/L では、ゼータ電位は -11.6mV となり、藻類の凝集に適していると言われるゼータ電位 (-12mV 以上)¹²⁾に達した。凝集沈殿後の上澄み液の Chl.a 濃度は、今回の MO 溶液添加条件の中では 20mg-C/L で最も低かった。また、Chl.a 沈殿率は、MO

溶液を添加しない場合(0mg-C/L)は 28%であったが、MO 溶液添加濃度 20mg-C/L の場合は 68%であった。

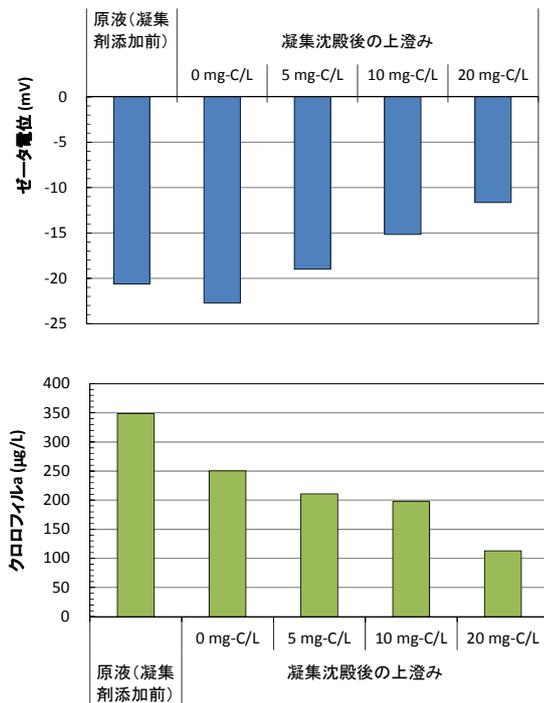


図 9 ジャーテストによる植物由来凝集剤 (*Moringa oleifera* の種子の水溶液) の添加濃度と凝集沈殿後の上澄み液のゼータ電位 (上図) とクロロフィルa (下図)

4.2.3 遠心分離により回収された藻類を含む浮遊物質の熱量

MO 溶液を添加し、遠心分離して回収した藻類を含む浮遊物質の高位発熱量の平均は 19.4kJ/g-dry であった。これは、ニュージーランドで行われた同様の事例¹⁴⁾ (19-22kJ/g-dry) と同程度であった。この藻類を含む浮遊物質は、下水汚泥の焼却や発電などの際に、燃料として利用できる可能性がある。

また、藻類を含む浮遊物質の遠心分離による回収量の平均は、時間・敷地面積当たりで換算すると 19.1g-dry/(m²・d)であり、熱量は 371kJ/(m²・d)であった。仮に、MO 溶液を 20mg-C/L となるように添加し、浮遊物質を 68%回収することができた場合、回収熱量は 252kJ/(m²・d)となる。これは、回収熱量を高めるため沈殿した藻類を返送して培養する方法¹⁴⁾で得られた熱量 195 kJ/(m²・d)と比べて高く、回収熱量を高める方法として有望と考えられる。

4.3 HRAP の藻類の植物由来凝集剤による凝集効果と燃料としての利用可能性調査のまとめ

実下水処理場の流入下水を用いて、屋外に設置した HRAP を HRT3 日、有効水深 40cm で運転し、以下の知見を得た。

- 1) HRAPの後段に遮光槽を設けることで、処理水のpHは7に近づいた。MO溶液が下水で培養された藻類の沈殿を促進する効果が確認された。
- 2) HRAPで採取した藻類を含む処理水を対象としたジャーテストの結果、Chl.a沈殿率は、MO溶液を添加しない場合は28%であり、MO溶液添加濃度20mg-C/Lの場合は68%であった。
- 3) HRAPで採取した藻類を含む処理水にMO溶液を添加し、遠心分離して回収した沈渣の高位発熱量の平均は 19.4kJ/g-dryであり、時間・敷地面積当たり、371kJ/(m²・d)であった。

5. 開発途上国における下水処理水の安全なかんがい利用方法の検討

開発途上国では、下水や下水処理水等をかんがい利用する場合がある¹⁵⁾。下水や下水処理水がかんがい利用される場合には、農作物の喫食者に対し、病原微生物による健康被害が生じる懸念がある。特に、ノロウイルス (NoV)は、開発途上国で乳幼児 109 万人を入院させ、21.8 万人を死亡させていると推測され、開発途上国で重症化する傾向が報告¹⁶⁾されており、注目すべき病原微生物の一つと考えられる。しかし、開発途上国における下水処理水中の病原微生物やかんがい利用時の健康影響に関する情報は乏しく、開発途上国において導入が見られる安定化池(Waste stabilization ponds, WSP)やエアレーテッドラagoon(Aerated lagoons, AL)での、NoV 濃度の測定事例は少ない。また、「下水の農業利用に関する WHO ガイドライン」¹⁷⁾においても、ロタウイルス(RV)などの病原微生物による健康影響について検討されたが、NoV は対象となっていない。

そこで、健康影響の指標として障害調整生存年数 (Disability-adjusted life year, DALY)を用い、NoV による健康影響軽減の観点から、WSP や AL の処理水のかんがいへの適切な利用方法を明らかにすることが有用であると考えられる。手順は、まず、実際の WSP や AL の NoV 除去率を求めた。次に、農作物の喫食者を想定したシナリオについて、QMRA の手法を用いて、健康影響目標値以下を達成可能な NoV 除去率を示した。最後に、それらを比較し、下水処理水のかんがいへの適切な利用方法を示した。

表2 対象処理場の処理方法、流入量と平均滞留時間

処理場	処理名称	処理構成	計画流入量(m ³ /日)	流入量(m ³ /日)	平均滞留時間
A	WSP	嫌気性池+好気・嫌気池+熟成池	約 80,000	約 40,000	約 20 日
B	AL	曝気池+沈殿池	約 50,000	約 20,000	約 3 日
C	AL	曝気池+沈殿池	約 20,000	約 10,000	約 2 日

5.1 WSP、AL における NoV の除去率

5.1.1 調査方法

下水処理におけるNoV濃度の除去に関する調査は、インドネシア共和国の表2で示した下水処理場で1度ずつ行った。流入水、処理水中のNoV genogroup1, 2 (G1, G2)濃度、浮遊物質を測定し、NoVの除去率(R)と対数除去率(LR)を $R = (C_{in} - C_{out}) / C_{in} \times 100$ と $LR = -\log_{10}(C_{out}/C_{in})$ により求めた。ここで、 C_{in} と C_{out} は流入水と処理水中のNoV濃度である。また、処理水をガラス繊維ろ紙(GF/B、Whatman)でろ過した試料のNoV濃度も測定した。NoV濃度は、既報¹⁸⁾に従い、逆転写定量PCR法で測定した。浮遊物質は、下水試験方法に従い、ガラス繊維ろ紙(GF/B、Whatman)で測定した。

5.1.2 調査結果

各下水処理場のNoV G1とG2濃度、除去率および浮遊物質を表3に示す。WSPを採用したA処理場の除去率は、da Silva¹⁹⁾らによるフランスの事例と同等であり、ALを採用したB、C処理場の除去率より高かった。熟成池は、滞留時間の大半を占め、太陽光の働き等で病原微生物を消毒する役割が期待されており、フランスの事例¹⁹⁾でも熟成池においてNoVの高い除去率が報告されている。本調査においても、WSP中の熟成池が機能し、高い除去率を示したと考えられる。ただし、逆転写定量PCR法では、不活化されたNoVも検出される場合があり、実際に感染価を有するNoVの除去率は、本調査で測定された除去率よりも高い可能性がある。

各処理水をろ過した試料中のNoV濃度は、各処理水のろ過していない試料中のNoV濃度の11.6%~32.0%であり、

大半は浮遊物質に付着していると考えられた。また、B処理場の除去率は、同じくALを採用したC処理場の除去率より、高かった。C処理場は、流出した浮遊物質がB処理場より多く、多くのNoVは、浮遊物質に付着したまま流出したものと考えられた。

5.2. ノロウイルスの健康影響評価に基づく WSP および AL 処理水のかんがいへの適切な利用方法の検討

5.2.1 方法

WHOガイドライン¹⁷⁾に従う次の手順で、健康影響目標値を耐容感染確率に換算した後、農作物(レタス、玉ねぎ、穀類・芋類)の喫食者を想定したシナリオについて、QMRA手法を用いて、換算耐容感染確率以下が達成されるかんがい水のウイルス濃度と必要除去率を計算した。必要除去率と前章で示された下水処理による実際に測定した除去率を比較して、WSPおよびAL処理水のかんがいへの適切な利用方法を示した。

第一に、健康影響目標値を耐容感染確率に換算するため、健康影響目標値を、NoV感染1件あたりのDALYで除して、耐容感染確率を求めた。健康影響目標値は、WHO¹⁷⁾が使用している 10^6 人⁻¹年⁻¹を用いた。

NoV感染1件あたりのDALYは、処理水のかんがい利用によって生育した農作物によるNoV発症1件あたりのDALY(DB)に、飲料水質ガイドライン²⁰⁾と同様に、感染者あたりの発症確率(0.68²¹⁾)とNoVに対して感受性を持つ人の割合(0.8²¹⁾)を乗じて算出した。DBは、開発途上国全体のNoV発症によるDALYの合計の5%を年間発症件数で除して算出した。この5%は、WHOが用いているRV¹⁷⁾の値と同等と仮定して用いた。ここで、開発途上国全体とは、

表3 各下水処理場の NoV G1 と G2 濃度、除去率、対数除去率および浮遊物質

処理場	NoVG1				NoVG2				処理水中の浮遊物質(mg/L)
	流入水 (コピー/L)	処理水 (コピー/L)	除去率 (%)	対数除去率(-)	流入水 (コピー/L)	処理水 (コピー/L)	除去率 (%)	対数除去率(-)	
A	2.7×10 ⁷	1.6×10 ⁵	99.4	2.2	8.4×10 ⁶	6.7×10 ⁴	99.2	2.1	50
B	1.4×10 ⁷	1.5×10 ⁶	88.9	1.0	2.1×10 ⁶	2.1×10 ⁵	89.8	1.0	10
C	5.1×10 ⁶	1.3×10 ⁶	74.5	0.6	5.0×10 ⁶	1.2×10 ⁶	76.0	0.6	55

米国、カナダ、オーストラリア、ニュージーランド、日本、イスラエル、欧州33国を除く全世界である。開発途上国全体のNoV発症によるDALYは、乳幼児(5歳未満)の入院と死亡によるDALYとした。乳幼児の入院未満で軽症のDALYと成人の全症状のDALYは、開発途上国全体のNoV発症によるDALYに占める割合は小さいと推測されることから、加味しなかった。乳幼児の入院および死亡によるDALYは、文献⁶⁾より、入院者数と死亡者数を109万人と21.8万人とし、Havelaarの報告²²⁾と同様に、入院者数と死亡者数に、重み(入院; 0.23、死亡; 1)と影響期間(入院; 1週間、死亡; 損失余命80年)をそれぞれ乗じて計算した。開発途上国全体で発生する年間発症件数は、開発途上国人口50.8億人²³⁾の0.048件人⁻¹である2.44億件とした。この開発途上国人口に占める発症件数の割合は、先進国の値²⁴⁾と同等と仮定した。

第二に、下水処理水のかんがい利用により生育した3種類の農作物(レタス、玉ねぎ、穀類・芋類)の喫食者を想定したシナリオについて、QMRA手法を用いて、換算された耐容感染確率が達成されるかんがい水中のウイルス濃度と必要な除去率を計算した。レタスと玉ねぎは、生食を想定し、WHOガイドライン¹⁷⁾と同じ計算条件とした。穀類・芋類は、加熱調理を想定し、処理水付着量10-15mL/100g、喫食量700g/日、喫食頻度365日/年、農地での収穫時減少率 10^2 から 10^3 まで、加熱調理による減少率 10^6 から 10^7 まで¹⁷⁾とした。1日あたり感染確率 $P_{inf,d}$ は、Teunisら²⁵⁾の用量-反応モデルに基づき、式(2)で計算した。

$$P_{inf,d} = 1 - {}_2F_1(\alpha, \mu(1-a), \alpha + \beta; (-a)/(1-a)) \quad (2)$$

ここで、 ${}_2F_1$ は超幾何関数、 μ はNoVの摂取量、 $\alpha=0.04$ 、 $\beta=0.055$ 、 $a=0.0001$ である。既報²⁵⁾では、NoVの凝集の違いを考慮したモデルを提示しているが、残留したNoVの摂取時の凝集に関する判断材料が無いため、既報²¹⁾と同様に凝集が無い状態を想定している。年間感染確率 $P_{inf,y}$ は、式(3)によって計算した。

$$P_{inf,y} = 1 - (1 - P_{inf,d})^n \quad (3)$$

ここで、 n は年間の喫食頻度である。なお、この計算される確率には、家庭内での2次感染や他の経路(飲料水など)からの感染は含まれていない。

5.3 結果

NoVのDBは 3.6×10^3 年・件⁻¹であり、健康影響目標値 10^6 人⁻¹年⁻¹は、耐容感染確率 5.1×10^{-4} 人⁻¹年⁻¹に換算された。RVのDB¹⁷⁾と比較して、NoVのDBは低かった。しかし、感染者あたりの発症確率とNoVに対して感受性を持つ人の割合は高いため、最終的に、NoVの耐容感染確率は、RVの耐容感染確率(7.7×10^{-4} 人⁻¹年⁻¹)より、わず

かに低かった。

レタス、玉ねぎ、穀類・芋類へのかんがい利用で、耐容感染確率 5.1×10^{-4} 人⁻¹年⁻¹を達成するNoV濃度は、それぞれ、 9.7×10^{-1} 、 3.7×10^1 、 2.8×10^5 コピー/Lであった。かんがい水のNoV濃度を、前章で測定した流入水のNoV G1とG2の濃度の合計の中央値の 1.6×10^7 コピー/Lと仮定すると、レタス、玉ねぎ、穀類・芋類へのかんがい利用で、必要な除去率は、それぞれ、99.999994%(LR:7.2)、99.9998%(LR:5.6)、98.4%(LR:1.8)であった。

必要な除去率と下水処理による除去率の比較から、WSPの処理水は、加熱調理用の穀類・芋類には利用可能であるが、ALの処理水は、適当でなかった。また、WSPとAL処理水は、生食用のレタスや玉ねぎのかんがいに使うのは適当でなく、水処理方法の改善や消毒設備の付加が必要であると考えられた。

5.4 開発途上国における下水処理水の安全なかんがい利用方法の検討のまとめ

得られた知見は以下の通りであった。

- 1) 下水処理場のNoVの実態を調査したところ、WSPの処理場のNoV除去率は、ALの処理場の除去率より高かった。
- 2) NoVのDBは 3.6×10^3 年・件⁻¹であり、健康影響目標値 10^6 人⁻¹年⁻¹は、耐容感染確率 5.1×10^{-4} 人⁻¹年⁻¹に換算された。
- 3) 農作物の喫食者を想定したシナリオについて、健康影響目標値を 10^6 人⁻¹年⁻¹(耐容感染確率 5.1×10^{-4} 人⁻¹年⁻¹)とした場合、流入水のNoV濃度を 1.6×10^7 コピー/Lと仮定すると、生食用のレタス、玉ねぎ、加熱調理用の穀類・芋類へのかんがい利用で、必要な除去率は、それぞれ、99.999994%(LR:7.2)、99.9998%(LR:5.6)、98.4%(LR:1.8)であった。WSPの処理水は、穀類・芋類にはかんがい用水として利用可能であったが、ALの処理水は、適当ではなかった。また、WSPとAL処理水は、レタスや玉ねぎに使うのは適当ではなかった。

6. おわりに

本研究において、開発途上国における省エネルギー型の水処理技術として高速藻類増殖池(HRAP)に着目し、HRAPで増殖した藻類の沈降を促進させるため *Moringa oleifera* の種子の水溶液を凝集剤として適用させたところ、HRAPの藻類の沈降促進に効果があり、凝集剤添加量やpHの違いが沈降効果に影響を与えること等を確認した。それに伴って生じる下水汚泥や藻類の熱量回収量は、時間・敷地面積当たり、 $371 \text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ であった。

下水処理水の安全なかんがい利用に資するため、開発途上国で重症化の懸念があるノロウイルスを対象に、安定化池やエアレーティッドラグーンの下処理方法による除去率を測定した。さらに、開発途上国におけるノロウイルス感染1件あたりの疾病負荷を整理し、健康影響の指標として障害調整生存年数を用い、ノロウイルスによる健康影響軽減の観点から、安定化池やエアレーティッドラグーン処理水のかんがいへの適切な利用方法を示した。

参考文献

- 1) The World Bank, World Bank Open Data, <http://data.worldbank.org/indicator>
- 2) 内田勉、諏訪守、日高平、桜井健介、開発途上国における都市排水マネジメントと技術適用に関する研究、平成23年度下水道関係調査研究年次報告書集、p.49-52.
- 3) 実用水の処理・活用大辞典編集委員会編集、実用水の処理・活用大辞典、産業調査会辞典出版センター、2011.
- 4) Shilton, A., 2006. Pond treatment technology, IWA publishing.
- 5) Park, J. B. K., Craggs, R. J., Shilton, A. N., 2011. Wastewater treatment high rate algal ponds for biofuel production. *Bioresource Technology*, 102(1), 35-42.
- 6) Yongabi, K.A., 2010. Biocoagulants for water and waste water purification: a review, *International review of chemical engineering*, 2(3), 444-458.
- 7) Pritchard, M., Craven, T., Mkandawire, T., Edmondson, A. S., O'Neill, J. G., 2010. A comparison between Moringa oleifera and chemical coagulants in the purification of drinking water – An alternative sustainable solution for developing countries. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 35(13-14), 798-805.
- 8) Bhuptawat, Hitendra, Folkard, G. K., Chaudhari, Sanjeev, 2007. Innovative physico-chemical treatment of wastewater incorporating Moringa oleifera seed coagulant. *Journal of Hazardous Materials*, 142(1-2), 477-482.
- 9) Sengupta, M. E., Keraita, B., Olsen, A., Boateng, O. K., Thamsborg, S. M., Palsdottir, G. R., Dalgaard, A., 2012. Use of Moringa oleifera seed extracts to reduce helminth egg numbers and turbidity in irrigation water. *Water research*, 46(11), 3646-3656.
- 10) Vieira, Angelica Marquetotti Salcedo, Vieira, Marcelo F., Silva, Gabriel F., Araújo, Álvaro A., Fagundes-Klen, Márcia R., Veit, Márcia T., Bergamasco, Rosângela, 2009. Use of Moringa oleifera Seed as a Natural Adsorbent for Wastewater Treatment. *Water, Air, and Soil Pollution*, 206(1-4), 273-281.
- 11) 鈴木祐麻, 新苗正和, 真田靖瑛, 2012. 天然凝集剤 *Moringa oleifera* によるカオリナイト粒子の凝集沈殿に水質が与える影響, *環境資源工学*, 59, 73-80.
- 12) Parsons, S. A., and Jefferson, B., 2006. Introduction to portable water treatment processes, Blackwell publishing Ltd.
- 13) 建設省河川局監修、1997. 河川水質試験方法(案)、技法堂出版、922-923.
- 14) Park, J. B., Craggs, R. J., Shilton, A. N. 2013. Enhancing biomass energy yield from pilot-scale high rate algal ponds with recycling. *Water Research*, 47, 4422-32.
- 15) Takashi Asano, Franklin Burton, Harold Leverenz, Ryujiro Tsuchihashi, George Tchobanoglous, 2007. *Water Reuse: Issues, Technologies, and Applications*. 61, McGraw-hill New York, USA.
- 16) Patel, M. M., Widdowson, M. A., Glass, R. I., Akazawa, K., Vinjé, J., Parashar, U. D., 2008. Systematic literature review of role of noroviruses in sporadic gastroenteritis. *Emerging infectious diseases*, 14(8), pp.1224-31.
- 17) World Health Organization, 2006. *WHO guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater*. WHO Press, Switzerland.
- 18) 諏訪守, 岡本誠一郎, 尾崎正明, 陶山明子, 2009. 下水処理のノロウイルス除去効果とその検出濃度に及ぼす濃縮法の影響, *下水道協会雑誌*, 46(512), pp.91-101.
- 19) da Silva, A. K., Le Guyader, F. S., Le Saux, J.-C., Pommepuy, M., Montgomery, M. A., & Elimelech, M. (2008). Norovirus removal and particle association in a waste stabilization pond. *Environmental Science and Technology*, 42(24), pp.9151-9157.
- 20) World Health Organization, 2011. *Guidelines for drinking-water quality – 4th ed.*, pp.131-133, WHO Press, Switzerland.
- 21) Schoen, M.E., Ashbolt, N.J., 2010. Assessing pathogen risk to swimmers at non-sewage impacted recreational beaches. *Environmental Science and Technology*, 44 (7), pp. 2286-2291.
- 22) Havelaar A. H., Melse J. M., 2003. *Quantifying public health risk in the WHO Guidelines for Drinking-Water Quality: a burden of disease approach*. RIVM report 734301022.
- 23) The United Nations Children's Fund, 2005. *The state of the world's children 2005*, UNICEF House, New York, USA.
- 24) Kemmeren, J.M., Mangen, M.-J.J., van Duynhoven, Y.T.H.P., Havelaar, A.H., 2006. *Priority setting of foodborne pathogens -Disease burden and costs of selected enteric pathogens*. RIVM report 330080001/2006.
- 25) Teunis, Peter F. M., Moe, Christine L., Liu, Pengbo, E. Miller, Sara, Lindesmith, Lisa, Baric, Ralph S., Le Pendu, Jacques, Calderon, Rebecca L., 2008. Norwalk virus: How infectious is it?, *Journal of Medical Virology*, 80(8), pp. 1468-1476.

A STUDY ON URBAN WASTEWATER MANAGEMENT AND THE APPLICATION OF TECHNOLOGY IN DEVELOPING COUNTRIES

Budgeted : Grants for operating expenses

Research Period : FY2011-2015

Research Team : Materials and Resources Research Group

Authors : MINAMIYAMA Mizuhiko, SAKURAI
Kensuke

Abstract : In order to improve the removal performance of cultural algae in high rate algal ponds, a solution of *Moringa oleifera* seeds which is a natural coagulant was investigated by jar test. As a result, the settleability of algae was increased by the coagulant, and affected by its dose and pH changes. To demonstrate the safe use of treated wastewater for crop irrigation, the norovirus removal ratios by waste stabilization ponds and aerated lagoons were measured, and evaluated by using a quantitative microbial risk assessment technique whether the treatment methods are applicable to crop irrigation.

Key words : High rate algal ponds, Waste stabilization ponds, Irrigation, Norovirus, Quantitative microbial risk assessment