

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（リサイクル）

研究担当者：内田 勉、桜井健介、王 峰

【要旨】 変化する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、統計情報からアジア地域の現状の整理を行った。また、High Rate Algal Ponds の藻類の沈降促進を目指し、下水から培養された藻類に *Moringa oleifera* の種子の水溶液を凝集剤として適用したところ、藻類の沈降が促進した。特に pH4 で凝集剤 20mg-C/L による凝集沈殿処理が、上澄み中の A₆₆₀ とクロロフィル a を最も効率よく低下させた。

キーワード：アジア、統計、*Moringa oleifera*、藻類、凝集、ゼータ電位

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。

本研究では、開発途上国の変化する社会的要請を踏まえ、処理水の各種用途への再利用、下水汚泥等の副産物の有効利用や水・汚泥処理の省エネルギー化などの水・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を目指すものである。

本研究は、平成 23～27 年度にかけ、①途上国の地域要件を踏まえた水・汚泥処理技術の適用性の分類、②水・汚泥処理技術の現地適用手法の開発、③都市排水マネジメント方策の提示、の各項目を達成目標に掲げ実施するものである。

2. 統計情報からのアジア地域の現状の整理

変化する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

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)

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。

世界銀行の資料より作成した下水道整備に係る経済・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、昨年度の調査¹⁾や文献²⁾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. 凝集剤による藻類の凝集沈殿処理

3.1 背景と目的

排水処理の一つに、High Rate Algal Ponds (HRAPs) がある。HRAPs は、滞留時間 2-8 日間、水深 0.2-1m で継続的に攪拌されたポンドであり、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方法である³⁾。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いるが、現在、HRAPs 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⁴⁾。

Moringa oleifera は、多くの開発途上国が位置するアジア、中東、アフリカの熱帯、亜熱帯地域で広く生育する樹木で、*Moringa oleifera* の種子の水溶液(以下、MO 溶液と呼ぶ)が優れた凝集作用⁵⁾を持つことが知られている。MO 溶液が HRAPs の藻類の凝集沈殿に効果があれば、HRAPs の開発途上国で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、収入を得る機会が増えるだけでなく、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。

そこで、本研究の目的は、MO 溶液を藻類の凝集沈殿処理に適用し、その効果を評価することとした。評価にあたっては、PSI (ポリシリカ鉄凝集剤) と比較することとした。

3.2 方法

HRAPs の処理水を想定し作成した藻類培養液に MO 溶液を添加し、PSI を対象として、凝集沈殿の効果を評価した。HRAPs の処理水を想定した藻類培養液は、流入下水の上澄みを 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、照明付きの恒温機で水温 24°C、照射条件は 150 μ mol/m²/s、12hr/day で 2 週間行い作成した。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。

評価にあたっては、沈殿のための静置時間について予備実験を行った上で、pH および添加量の与える影響を検討した。実験は数回にわたって行い、実験毎に流入下水を採取して培養した。

MO 溶液は、精製を行わず、比較的作成が容易な既報⁶⁾の方法とした。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 μ m および 0.45 μ m のニトロセルロースメンブレンフィルターでろ過した。溶液の TOC を測定し、炭素量で注入量を管理した。MO 溶液の劣化による影響が不明であったため、溶液は作成後 1 週間以内に使用することとした。PSI は PSI-025 (シリカ/鉄モル比 0.25) を用いた。

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 : 85.6 sec⁻¹) の後、15 分間 30rpm (G 値 : 7.66 sec⁻¹) で攪拌した。

実験中の水質の分析の方法は、以下のように行った。吸光度(A₆₆₀)は分光光度計（島津製作所株式会社、SPECTROPHOTOMETER UV-160）にて光路長 10mm で波長 660nm の吸光度を測定した。なお、10.0abs/m はカオリン標準液を用いた透過光測定法による濁度 50 度に相当した。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 または 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。クロロフィル a の分析は河川水質試験方法（案）の短波長吸光度法に従った。

3. 3 凝集沈殿処理後の静置時間の影響

凝集沈殿処理後の静置時間を決定するため、静置時間を変化させて上澄みの水質の変化を調査した。

500mL ビーカーに入れた 400mL の実験原水に 1,360mg-C/L の MO 溶液を 15mL 加えて、終濃度 51mg-C/L で急速・緩速攪拌し、静置後の水質を測定した。また、参考に凝集剤を添加しない原水も、急速・緩速攪拌の後に静置した。静置時間はそれぞれ 0、15、30、60、90、120 分とした。静置後、上澄み 100mL を水面付近からピペットで採取し、 A_{660} を測定した。

結果を図 1 に示す。MO 溶液の添加により藻類の沈殿による分離の効率が向上した。また、MO 溶液の沈殿による水質への影響が安定するのは 90 分から 120 分程度と考えられた。

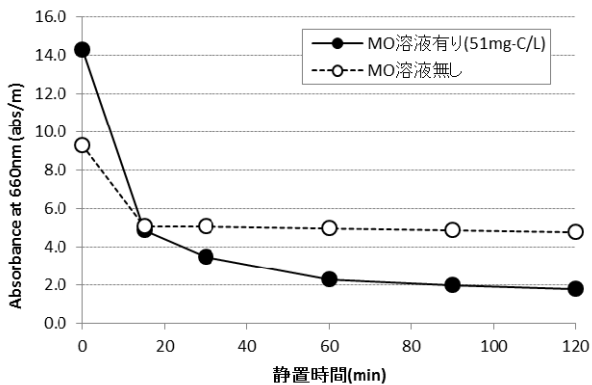


図 1 MO 溶液を添加し急速・緩速攪拌した後の静置時間と上澄みの A_{660} の関係

3. 4 一定 pH での凝集剤の添加量が藻類の凝集沈殿効果に与える影響

一定 pH での凝集剤の添加量の違い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調査した。

下水を用いた藻類培養液 400mL を 500mL ビーカーに入れ、急速・緩速攪拌しながら、終濃度で MO 溶液 0、10、20、30、40mg-C/L、または PSI 0、1.5、3、6、12mg-Fe/L を添加し、MO 溶液は pH4 と 9、PSI は pH4 で反応させた。なお、MO 溶液の pH は既報⁵⁾を参考に選んだ。PSI の pH は、pH4~11 までの添加量 6mg-Fe/L での予備試験の結果、最も高い除去率を示したものを選んだ。pH 調製には、水酸化ナトリウム溶液 0.5mol/L および希硫酸 0.5mol/L を用いた。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。

結果を図 2、3、4 に示す。MO 溶液および PSI の添加量が多くなるにつれてゼータ電位も高くなる傾向が見ら

れ、藻類培養液中での MO 溶液による電荷の中和効果が確認された。藻類の凝集に適したゼータ電位は -12mV から 12mV の範囲と言われる⁷⁾。MO 溶液 10 または 20mg-C/L でその藻類の凝集に適したゼータ電位(-12mV) に達した。

MO 溶液の添加により上澄みの A_{660} とクロロフィル a が大幅に低下した。特に pH4 で MO 溶液 20mg-C/L の凝集沈殿処理により上澄み中の A_{660} とクロロフィル a が最も低下した。pH4 の条件下で、MO 溶液 10-20 mg-C/L と PSI-025 3-6 mg-Fe/L が同程度の能力を示した。しかし、MO 溶液を多く添加した際 (30 または 40mg-C/L)、 A_{660} およびクロロフィル a が高くなった。MO 溶液による藻類の凝集では、適した注入量の把握が重要になる可能性が考えられた。

4. まとめ

変化する開発途上国の社会的要請を踏まえた水・汚泥統処理技術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、High Rate Algal Ponds の藻類の沈降促進を目指し、下水から培養された藻類に *Moringa oleifera* の種子の水溶液 (MO 溶液) を凝集剤として適用し、以下の結果を得た。

- A) MO 溶液の添加により藻類の沈殿による分離の効率が向上した。
- B) MO 溶液の添加によりゼータ電位が上昇し、pH4 で MO 溶液 20mg-C/L、pH9 で MO 溶液 20mg-C/L でゼータ電位 -12mV に達した。
- C) pH4 で MO 溶液 20mg-C/L の凝集沈殿処理により上澄みの A_{660} とクロロフィル a が最も低下した。
- D) pH4 で MO 溶液 10-20 mg-C/L と PSI-025 3-6 mg-Fe/L が同程度の能力を示した。
- E) MO 溶液を多く添加した際 (30 または 40mg-C/L)、上澄みの A_{660} およびクロロフィル a が高くなった。MO 溶液による藻類の凝集では、適した注入量の把握が重要になる可能性が考えられた。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) Andy Shilton, Pond treatment technology, IWA publishing, 2006.

- 4) J.B.K. Park, R.J. Craggs, A.N. Shilton. Wastewater treatment high rate algal ponds for biofuel production. *Bioresource Technology*, 102(1), 35-42, 2011.
- 5) K.A. Yongabi, Biocoagulants for water and waste water purification: a review, *International review of chemical engineering*, 2(3), p.444-458.

- 6) 鈴木祐麻, 新苗正和, 真田靖瑛: 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, p.73-80, 2012.
- 7) S A Parsons and B Jefferson: Introduction to portable water treatment processes, Blackwell publishing Ltd., 2006.

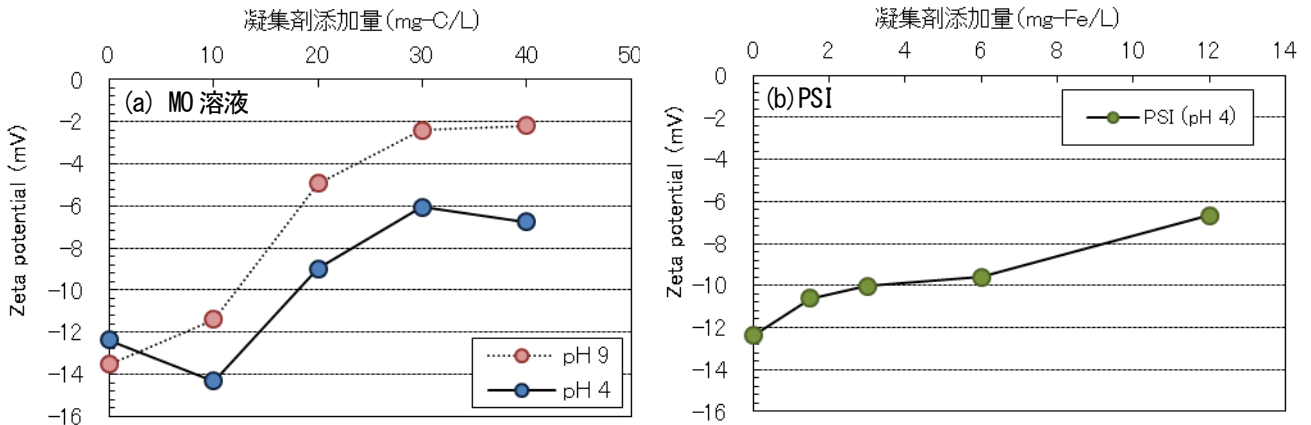


図2 凝集剤添加量とゼータ電位の関係 (静置・pH調整前の藻類培養液のゼータ電位は-15.0mV)

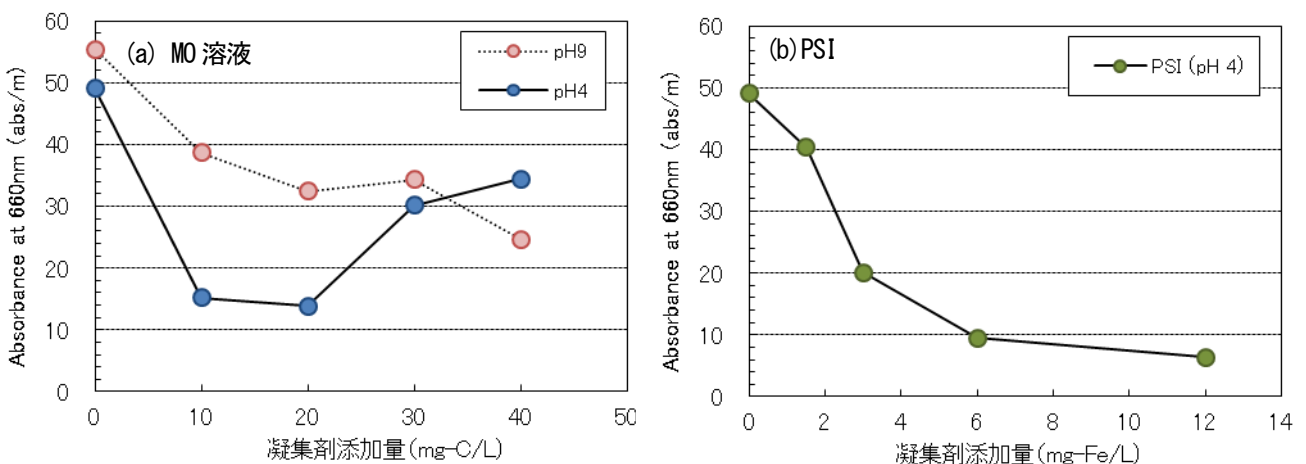


図3 凝集剤添加量と A_{660} の関係 (静置・pH調整前の藻類培養液の A_{660} は105 abs/mであった)

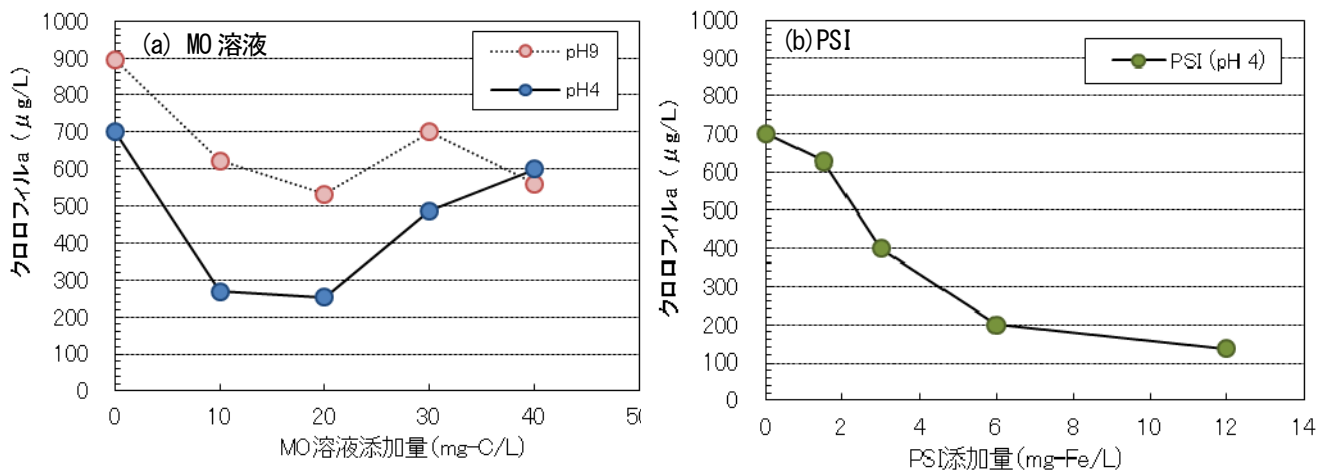


図4 凝集剤添加量とクロロフィルaの関係 (静置・pH調整前の藻類培養液のクロロフィルaは1510 $\mu\text{g/L}$ であった)

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 : Recycling Research Team, Materials and Resources Research Group

Author : UCHIDA Tsutomu, SAKURAI Kensuke, WANG Feng

Abstract : The current situation of wastewater management in nine Asian countries was reviewed using statistical information provided by the World Bank. In addition, a solution of *Moringa oleifera* seeds as a natural coagulant was tested by jar test to check the performance of coagulation-sedimentation. The method was shown to improve the settleability of algae cultured in municipal wastewater. The best performance was obtained with 20 mg-C/L of the coagulant at pH 4.

Key words : Asia, Statistical information , *Moringa oleifera*, Algae, Coagulation, Zeta potential