

氏 名	佐藤 尚文
博士の専攻分野の名称	博士（工学）
学位記番号	博理工甲第 1063 号
学位授与年月日	平成 29 年 3 月 22 日
学位授与の条件	学位規則第 4 条第 1 項該当
学位論文題目	UTILIZATION OF LOCAL-AVAILABLE BIOMASS RESOURCES FOR WASTEWATER TREATMENT: APPLICATIONS TO SEWAGE AND LEACHATE TREATMENT AT SOLID WASTE DISPOSAL SITES IN SRI LANKA（汚水処理を目的とした地域バイオマス資材の有効活用：スリランカにおけるし尿及び廃棄物処分場浸出水処理への適用）
論文審査委員	委員長 教 授 川本 健 委 員 教 授 田中 規夫 委 員 准 教 授 八木澤順治 委 員 准 教 授 浅本 晋吾 委 員 東京大学大学院新領域創成科学研究科 准 教 授 佐藤 弘泰

論文の内容の要旨

1.Introduction

One of environmental issues in Sri Lanka is the water pollution caused by the improper discharged of collected sewage and the poor solid waste management (SWM) in Sri Lanka. In order to solve these issues, it is essential to develop sustainable, low environmental impact, and low cost wastewater treatment systems, particularly considering site-specific conditions in target local areas. The Coconuts-fiber Treatment Systems (COTS) facilities for sewage treatment were constructed at some local authorities in 2009 and 2010, while for landfill leachate treatment in 2003. The COTS are utilizing coconut-fibres as a biofilm support, which are easily available in Sri Lanka. Besides, designed systems use no machines or electricity and so requires very little maintenance. This study presents the current performance of the coconut-fibre biofilm treatment system (COTS) as wastewater treatment facilities constructed at several local authorities in Sri Lanka. It has been reported that COTS performed well for treating wastewater under proper maintenance and operation. However, the mechanisms of wastewater treatment in COTS and quantitative analyses for designing and optimizing the system are not fully understood. In this study, we carried out microcosm experiments in a laboratory using both synthetic sewage and leachate to evaluate the wastewater treatment efficiencies of COTS.

2.Investigation on current condition and issues of municipal solid waste management in Sri Lanka

The expenditure of solid waste management of some local authorities reaches approximately from 13% to 34% in the total expenditure. The estimated discharge amount of waste in whole country exceeds 6,000 tons/day in 2000, while the waste composition of municipal waste in Sri Lanka composed of approx. 70% of bio-degradable waste i.e. kitchen or

garden waste, approx.20% of recyclable waste such as plastic or paper, and the others. Although the number of off-site compost was only five (5) in 2000, it has rapidly increased for a decade and reached totally 105 compost plants in 2011. There are four categories of final disposal facilities categorized as class A (< 10 tons/day), class B(10-50 tons/day), class C (50-200 tons/day) and class D (200 > tons/day) according to technical guideline in 2007. The number of local authorities in Sri Lanka in accordance with the category belonging to class A is 200, class B is 70, class C is 11 and class D is three (3). There are some requirement for applicable engineered landfill; 1) use of local available material, topography, natural condition and public acceptance as “Site specific” 2) less construction cost and less O&M cost as “Low cost”, 3) simple structure, easy maintain and operation as “Sustainable”, and 4) less pollution and easy mitigation system as “Environmentally friendly”.

3.Development of wastewater treatment method by local-available biomass resources: Preliminary works and current performance of coconut-fibre biofilm treatment system (COTS) in Sri Lanka

In order to solve serious environmental degradation caused by improper treatment of wastewater from collected sewage and leachate at dumping sites, it is essential to develop sustainable, low environmental impact, and low cost wastewater treatment systems. The coconut-fibre biofilm treatment system (COTS) utilizes coconut-fibres as a biofilm support, which are easily available in Sri Lanka. Some COTS were constructed at some local authorities to treat wastewater.

From each COTS, water samples, coco-fibre and sludge samples were taken and used for laboratory analyses. In addition, in-situ measurements characterizing present environmental conditions of COTS were carried out. As a result, the COTS were not fully well operated compared to the initial stage of operation due to lack of maintenance and improper operation. Especially, to enhance microbial activity in the treatment tank, sludge removal from tank must be carried out regularly.

4.Development of wastewater treatment method by local-available biomass resources: Microcosm experiments on a coconut-fibre biofilm treatment system for evaluation wastewater treatment efficiencies

The microcosm experiments on a COTS were carried out to evaluate wastewater treatment efficiencies in the laboratory using two wastewaters, synthetic sewage and leachate, with different pollutant loads. Three coconut-fibre conditions were set as a single bundle (low fibre density: LFD), two bundles (high fibre density: HFD), and no coconut fibre (blank). The wastewater was first circulated in the system for six weeks (circulation stage) and then discharged from the treatment tank for 7–24 weeks (treatment stage). Water quality parameters of effluents, pH, DO, EC, BOD, COD, TC, and TN, were measured at one-week intervals, and the sedimented sludge in each treatment tank was collected to determine C, N, and P contents. Results showed effective reductions in BOD and COD in the LFD and HFD conditions for the synthetic leachate, indicating that the coconut fibre contributed to the treatment of wastewater. On the other hand, the fibre density had less or no effect on the reduction of water quality parameters in the synthetic sewage. For both synthetic sewage and leachate, the C and N consumptions generally increased in the order of blank, LFD, and HFD. In particular, sludge sedimentation contributed to C consumption under the HFD condition.

5.Conclusions and perspectives

There are still many issues of wastewater caused by solid waste management and wastewater management in Sri Lanka such as illegal dumping, low recycling rate, difficulties in landfill sitting, poor technical capacity on landfill

operation and so on in spite of the acts, regulations and strategies related to SWM, and technical and financial supports through donor-oriented projects. Based on water quality analyses, the filed COTS constructed in Sri Lanka performed well to treat wastewater at the initial stage. Due to lack of maintenance and improper operation, however, the performance degraded after several years, suggesting the proper guidance and training to operators are needed to maintain the facility. The results of laboratory tests showed that the microcosm COTS contributes to the reduction of water quality parameters. The removal % of pollutants was dependent on the load conditions and the proper control of pollutant loads is effective to improve the treatment efficiencies of sewage and leachate in COTS. In order to solve existing and future wastewater issues, the proper policy decision, affordable and applicable technology for final disposal site, proper financial, and awareness program should be more encourage.

論文の審査結果の要旨

当学位論文審査委員会は、平成 29 年 2 月 2 日に論文発表会を開催し、論文内容の発表に続いて質疑と論文内容の審査を行なった。以下に審査結果を要約する。

開発途上国において、回収されたし尿や一般廃棄物の大半は、浄化や汚染防止措置を講ずることなく不衛生なオープンダンプング（開放投棄）として投棄・処分されている。し尿投棄場や廃棄物処分場から発生する汚水は、周辺河川や地下水に直接流入し、投棄・処分場およびその周辺域での環境汚染を引き起こしている。本研究で対象としたスリランカも、都市域の人口増加、商業活動の活発化、生活の多様化等により、し尿や一般廃棄物の排出量が増加する一方、適切なし尿処理施設や廃棄物処分場の整備は進まず、今後も環境汚染はより一層深刻となることが予想される。先進国が有する高度なし尿処理、処分場浸出水処理技術の現地導入は、経済的・技術的な理由により困難な状況が多く、適用可能な低コスト・低メンテナンス・低環境負荷な汚水処理技術の開発・導入が強く望まれている。このような背景のもとに、本学位論文では、スリランカで安価で入手が容易なバイオマス資材であるココヤシ殻繊維に注目し、ココヤシ殻繊維を上部開放式の処理水槽内部に敷設した汚水処理システム（Coconuts-fiber Treatment System; COTS）の開発や性能評価を目的とし、現地で導入された COTS の汚水浄化能力を評価するとともに、室内マイクロコズム試験によって汚濁物質（炭素・窒素・リン）の浄化効率や物質収支についての評価を行った。

第 1 章では、研究の背景や目的、関連する既往研究について記述している。特に、これまで未把握であったスリランカのし尿処理実態を把握することを目的とし、現地の地方自治・州議会省全国廃棄物管理支援センター（NSWMS）と共同で全国し尿管理実態調査を実施し、地方自治体におけるし尿の収集や処理実態について整理している。第 2 章では、スリランカにおける廃棄物管理実態や法整備、ドナー機関の廃棄物支援状況をまとめ、その問題点などを整理した。

第 3 章では、現地で導入された COTS の汚水浄化能力を評価した。現地では、3 つの地方自治体にし尿処理用の COTS、1 つの自治体に廃棄物処分場浸出水処理用の COTS を導入し、2010 年～2013 年にかけて水質分析を行い、システム稼働後の初期浄化性能と稼働数年後の浄化性能を比較した。その結果、現地 COTS の初期浄化性能はいずれの施設においても良好であり、代表的な水質項目である BOD、COD、アンモニア態窒素などは、COTS からの放流時にスリランカ排出基準値以下となった。しかし、稼働数年後は一部の施設で浄化能力の低下が見られ、現地確認により、処理層底部に堆積した汚泥が要因と考えられ、定期的な汚泥除去作業などの維持管理が現地 COTS の性能を維持するために重要であることが示された。また、現地 COTS では、他の水質項目に比べて、リンの浄化率がやや低く、排出基準値を上回ることが多かったことから、今後リンに対する追加処理の導入などが検討すべき点として挙げられた。

第 4 章では、室内マイクロコズム試験による汚濁物質（炭素・窒素・リン）の浄化効率や物質収支についての評価を行った。試験では、ココヤシ殻繊維を敷設したマイクロコズム（1 つの容器水量 12L）に、人工し尿もしくは人工浸出水を流入し、一定期間（6 週間）循環させた後、滞留時間 2 週間で浄化処理（7-24 週間）を行った。浄化処理中は、排水溶液の水質分析、汚泥や繊維の有機物含有量測定などを行った。人工し尿、人工浸出水は 2 種類の汚濁負荷（低濃度と高濃度）に設定し、マイクロコズムは 3 種類のココヤシ殻繊維密度（低密度:1 束/12L、高密度:2 束/12L、ココヤシ殻繊維なし:コントロール）に設定した。その結果、マイクロコズムによる BOD と COD の浄化効率は、人工浸出水の場合最大で 87% に達し、人工し尿（最大で 33%）よりも高い値を示した。人工浸出水の浄化効率は、ココヤシ殻繊維密度が大きくなるにつれて大き

くなった。また一方、窒素の除去効率は、人工浸出水が最大で 33%、人工し尿が最大で 32% と両者に差は見られず、ココヤシ殻繊維密度の影響もはっきりと示されなかった。

次に、マイクロコズム試験における炭素・窒素・リンの物質収支、酸素消費量について検討を行った。その結果、人工し尿・人工浸出水ともに、ココヤシ殻繊維密度が大きくなるにつれてマイクロコズム内の炭素・窒素・リン消費量は増大し、ココヤシ殻繊維が水質浄化に寄与することが示された。特に、人工浸出水では、汚泥に含まれる炭素含有量が最大で 22% に達し、汚水処理時の適切な汚泥除去が浄化効率維持に有効であることが理解できる。また、酸素消費量の結果から、人工浸出水は、人工し尿よりもマイクロコズムの酸素消費量は大きく、ココヤシ殻繊維密度が大きい程、酸素消費が大きくなった。これらのことから、ココヤシ殻繊維の有無は COTS の酸素消費量に影響を及ぼし、高密度のココヤシ殻繊維条件下における人工浸出水の高い BOD・COD 浄化効率が得られたものと考えられた。

第 5 章では、第 1 章から第 4 章までに得られた知見をもとに結論を述べるとともに、今後の COTS の改良と普及に必要な課題を挙げるなど、今後の研究展開の方向性を示した。

以上のように、本研究は、スリランカを対象として、現地で適用可能な低コスト・低メンテナンスの汚水処理システムとして期待される COTS に注目し、現地施設で汚水浄化能力を評価するとともに、室内 COTS マイクロコズム試験によって汚濁物質（炭素・窒素・リン）の浄化効率や物質収支について評価した。成果として得られた実証データは、ココヤシ殻繊維が汚水浄化に寄与することを定量的に明らかにしたものであり、今後の現地での同システムの普及やし尿・廃棄物処分場の環境汚染防止技術に効果的に活用されるものである。このことから、当学位論文審査委員会は、本論文が博士（工学）の学位に相応しい内容であると判断した。

なお、本論文の内容は、第 2 章が国際プロシーディングス論文 Proceedings of the 7th Asian-Pacific Landfill Symposium (APLAS 2012)、第 3 章が国際プロシーディングス論文 Proceedings of Fourteenth International Waste Management and Landfill Symposium (Sardinia 2013) に掲載済みである。第 4 章は国際学術雑誌 International Journal of GEOMATE に掲載受理されている。