

氏名	ふるいち まさひろ 古市昌浩
授与学位	博士(工学)
学位授与年月日	平成31年3月27日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科(博士課程) 土木工学専攻
学位論文題目	日本製浄化槽のEUへの適用における設計手法の最適化と環境負荷の削減施策に関する研究
指導教員	東北大学教授 西村 修
論文審査委員	主査 東北大学教授 西村 修 東北大学教授 風間 聡 東北大学教授 李 玉友 東北大学准教授 坂巻 隆史

論文内容要旨

国際社会は貧困を根絶し、持続可能な世界を実現するために、17の目標と169のターゲットからなる持続可能な開発目標(SDGs)を掲げた。その目標の一つに、2030年までに未処理生活排水の割合を半分にすることが折り込まれた。さらに、パリ協定(COP21)が発効したため、温室効果ガス(GHG)排出量をさらに削減することが必要となった。世界規模で推進されている污水处理施設の普及に際しては、人口密度や地形および排水基準等の地域性に適した污水处理施設により整備されることが望まれている。また、排水処理施設の普及に伴い、排水処理の過程で廃棄物として発生する汚泥と温室効果ガスの排出量が増加することから、これら環境負荷を抑制した污水处理施設であることが求められている。特に、污水处理施設の普及率が低い低人口密度地域では、分散型の污水处理施設による整備が期待されているが、世界で主流の分散型污水处理施設は固液分離処理のみで好気性処理を伴わないものが多く、汚濁濃度が高い処理水の河川、湖沼、海域への排出による水質汚濁、地下浸透による地下水汚染が深刻化していることから、適正な処理ができる分散型污水处理施設の構築が求められている。日本において独自に開発されてきた浄化槽は、BODのみならず窒素・磷も高度に処理が可能であり、日本の浄化槽を海外の生活排水未処理地域に適用することができれば、水環境の保全および衛生的な環境の確保に寄与することが可能と考えられる。しかし、生活排水の水量や性状等の使用条件や環境条件の異なる海外への適用に際しては、あらためて日本において最適な設計がなされてきた浄化槽が、そのまま海外へも適用可能であるのかどうか検討する必要がある。また、汚泥発生量や温室効果ガス排出量等の環境負荷に関する検討もなされていないため、総合的な環境負荷低減に関する研究を行う必要がある。

本研究ではこれらの課題を踏まえ、日本製浄化槽のEUへの適用における設計手法の最適化を行なった。また、環境負荷低減に関して日本の浄化槽分野における温室効果ガス排出量と削減施策を分析・検証し、EUへ適用可能な浄化槽と固液分離処理のみのセプティックタンクおよび集合型污水处理施設を対象として、水環境保全、廃棄物発生抑制と温室効果ガス排出量削減に関する比較分析を行なった。本論文は以下の7章より構成される。

第1章「緒論」では、汚水処理施設の普及に関する現状、課題および分散型汚水処理施設の必要性を述べ、トレードオフの関係にある水環境負荷の低減と温室効果ガス排出量の削減を解消することのできる、分散型汚水処理施設構築の必要性について述べた。また、海外で普及している分散型汚水処理施設に比べて極めて清澄な処理水質を得ることができる日本製浄化槽の海外適用化における設計手法の最適化の必要性をまとめ、それらの課題を背景とした本研究の目的を述べた。

第2章「既往研究」では、生活排水の性状と分散型小規模汚水処理プラントの性能評価方法における日本および海外の相違点を整理し、日本の生活排水の性状と大きく異なり、かつ性能評価の観点から最も厳しい試験条件を設定していると考えられたEUを、本研究における浄化槽の海外適用地域に設定したことを述べた。また、これまでの汚水処理の研究・開発および設計のプロセスと、各プロセスにおける検討事項を調査して、異なる使用条件、環境条件において適用するための各設計因子の調整による汚水処理機能の制御を設計手法と定義し、その設計手法と浄化槽が与える環境負荷に関する既往の研究をまとめ、研究課題を整理した。日本製浄化槽の海外適用化に関する既往研究は、設計因子であるBOD容積負荷を統一する処理水質確保指向の設計手法が報告されているが、水温や流入負荷の変動に伴う処理水質および汚泥貯留能力への影響に関する成果は見当たらない。また、浄化槽を含む分散型と集合型汚水処理施設を対象とした水環境保全、廃棄物発生抑制と温室効果ガス排出量削減に関する比較分析もなされていないのが現状である。そこで第1章にて述べた本研究の目的を達成するために、日本製浄化槽のEUへの適用における設計手法の最適化と環境負荷の削減施策に関する研究を行った。

第3章「浄化槽のEUへの適用における排水処理性能に関する設計手法の最適化」では、日本製浄化槽をEUの使用条件、環境条件に適用できる小規模汚水処理プラントに変更するための設計手法を見いだすことを目的に研究を行った。EUと日本の性能評価方法の相違点である汚水量と汚濁量に着目し、EU適用品はBOD容積負荷を日本仕様に合わせて設計し、EU域内（フランス）に設置して現地試験を行い、日本仕様の国内試験結果と処理性能を比較・分析した。その結果、EU基準による476日の試験期間中、清掃および保守点検の必要性は確認されず、処理水のBODとSSは日本仕様と同等の値を示し、短期間の流入負荷変動に対しても処理水の悪化は確認されなかった。水温変動による窒素除去能力への影響分析結果では、水温13℃未満で硝化速度が低下したことから、窒素に関する排水基準を設定している地域に対しては、BOD容積負荷に加え硝化反応の絶対量を確保するために、硝化速度に応じた好気槽容量の拡大、好気槽内ろ材充填量の増加、または、それらの組み合わせを設計手法に追加することが必要と考えられた。さらに、水温低下のリスクを回避する小規模汚水処理プラントの埋設深度を深くするなどの施工により、槽内水温13℃を確保する設計手法も必要と考えられた。磷除去に関しては、EU適用品の流入水質は16mg/Lであり、日本仕様の4mg/Lより高かった。このため、EU適用品の排水水質は9.8mg/Lと日本仕様の3.1mg/Lを上回った。EU適用品および日本仕様における磷除去は、磷の汚泥への同化（生物摂取）によるものであり、磷除去量の指標となる汚泥の磷含有率は1.2%～3.1%であることを確認した。これらのことから、生物摂取のみでは磷除去量が不足すると推定される排水の水質基準が厳しい地域にお

いては化学的燐除去方法の追加が必要と考えられた。これらの知見により、EU域内の各排水基準に適用可能な排水処理からみた設計手法の最適化を図った。

一方、ハンガリー国での3施設を対象とした現地検証においては、放流水質が設定値を満足できなかった。この原因を分析した結果、一つの施設ではEU試験でのBOD汚濁量に対して115%と超過していたことが原因であることを確認した。他の2施設は、BOD汚濁量がEU試験に対して56%~78%と過小であったが、馴養期間中に低水温(8.7~10.1℃)の環境が続いて微生物の増殖が進まなかったことが原因であった。このことから、建築物に付帯する汚水処理施設の人槽選定(規模選定)に関する知見の蓄積と、槽内水温13℃を確保するための施工方法の開発を同時に行うことが重要であることを明らかとした。

第4章「浄化槽のEUへの適用における汚泥貯留能力に関する設計手法の最適化」では、地域性に応じた汚泥管理の適正化を目的に、第3章にて検証したEU向け小規模汚水処理プラントにおける汚泥発生量と汚泥貯留能力に関する検討を行った。その結果、EU向け小規模汚水処理プラントの汚泥排出量は1.1L/人・日であり、日本仕様の1.5L/人・日に対して汚濁物質の異化転換比率が高く、流入BOD量あたりの汚泥排出量が少ないことを明らかにした。また、汚泥発生量と一次処理槽の実滞留時間との間において比例関係を確認し、脱窒は汚泥発生量の抑制に寄与することを明らかにした。設計手法の最適化については、処理水質確保を前提とした一次処理槽第2室における堆積汚泥の許容量、水温13℃を境とした堆積汚泥増加率の相違、一次処理槽の有効容量変動に伴うBOD汚泥転換率への影響、BOD汚泥転換率とSS汚泥転換率との比例関係に関して知見を得て、汚泥貯留能力確保からみた設計手法の最適化を図った。日本仕様の浄化槽をEU向け小規模汚水処理プラントへ転換するための第3章にて示した設計手法に、本章の汚泥貯留能力確保からみた設計手法を加味することにより、日本製浄化槽の海外への適用における設計手法の最適化を図ることが可能であることが示された。

第5章「浄化槽分野における温室効果ガス排出量と削減施策」では、日本における浄化槽分野の低炭素化推進に関する温室効果ガス排出量の評価を行った。日本における浄化槽分野の低炭素化推進に際し、出荷実績の約90%を占める戸建住宅向け浄化槽(5~10人槽)を対象に1990年からの20年余の技術開発による温室効果ガス排出量の推移を明らかにし、この結果を基にさらなる削減施策のあり方について考察した。その結果、主流である戸建住宅向け浄化槽における2013年度生産品の排出量は1990年度に対し、一基当たり35%の削減を確認し、ブロワの省エネ化と浄化槽のコンパクト化は効果的な低炭素化手法であることを明らかにした。COP21に基づく2030年度の削減目標は、2013年度比マイナス26%であり、本章で示したブロワの消費電力低減、排水処理プロセスでの低減、処理水の高度処理、さらに清掃頻度の見直しによる新たな低減策により、2013年度生産品に対して34%削減の可能性を示した。また、温室効果ガス排出量低減策として、流入水量の変動を緩和する流量調整機能の搭載とT-Nの高度処理化を同時に実現することにより、非エネルギー起源の排出量は2013年度生産品の温室効果ガス全排出量の12%相当まで低減されることを示した。これらは、現時点で最高性能を有する浄化槽の普及にて可能となるものの、全排出量を対象とした長期目標(2050年までに8割削減)達成には、さらなる削

減施策が必要であることを明らかとした。

第6章「日本製浄化槽のEUへの適用における環境負荷削減効果の評価」では、第3章から第5章にて得られた知見を基に、環境負荷に関する集合型と分散型の排水処理システムの比較を行った。具体的には、海外で普及している固液分離処理のセプティックタンクと好気処理を組み合わせた小規模汚水処理プラント、本研究の対象である浄化槽のEU適用品、および集合型の標準活性汚泥方式を対象に、水質汚濁負荷、廃棄物発生量、および温室効果ガス排出量の観点から、対象とした排水処理システムの環境負荷低減効果の比較検討を行なった。その結果、水質汚濁負荷では、人の健康の保護と生活環境の保全の観点から、分散型による汚水処理普及については、セプティックタンクから小規模汚水処理プラント、特に窒素除去機能を有したプラントへの転換が急務であることを示した。廃棄物抑制に関する汚泥排出量は、処理水質を考慮した除去BOD量当たりの汚泥発生量において、EU適用品が最も低いことを明らかとし、さらに第4章にて示した汚泥貯留能力確保に関する設計手法を用いることにより、汚泥発生量の抑制が可能となることを示した。温室効果ガス排出量は、処理対象人口の規模が小さくなる程、分散型と集合型の温室効果ガス排出量の差が減少し、処理対象人口120人にて分散型の排出量が集合型を下回ることを明らかにした。また、第5章で示した温室効果ガス排出量の削減施策等を分散型であるEU適用品に施すことにより、600人～2,000人規模では集合型の温室効果ガス排出量とほぼ同等となることを示した。これらの知見によって、地域性に応じた環境負荷低減型の汚水処理施設の普及が可能となることから、SDGsおよびCOP21の目標達成に寄与するものと期待する。

第7章「総括および展望」では、本研究で得られた結果を総括し、日本製浄化槽の海外適用化のあり方を提言するとともに、生活排水未処理地域における汚水処理施設普及に関する課題と展望を述べた。

論文審査結果の要旨

生活排水処理技術として我が国において独自に開発されてきた浄化槽は、BODのみならず窒素・磷も高度に処理が可能であり、持続可能な開発目標（SDGs）における、2030年までに未処理生活排水の割合を半分にすることを達成する技術として期待されている。しかし、生活排水の水量や性状等の使用条件、および環境条件の異なる海外への適用に際してはあらためて適用可能性を検討し、設計手法を最適化する必要がある。さらに、汚泥発生量や温室効果ガス排出量等も含めて総合的な環境負荷低減を図る必要がある。本論文はこのような課題をふまえて、日本製浄化槽のEUへの適用における設計手法の最適化を行ない、かつ総合的な環境負荷低減施策を検討したもので、全編7章よりなる。

第1章「緒論」では、本研究の背景および目的を述べた。

第2章「既往研究」では、分散型小規模污水处理プラントの性能評価方法における日本および海外の相違点を比較し、浄化槽の設計因子および浄化槽から発生する環境負荷に関する既往の研究をまとめ、研究課題を整理した。

第3章「排水処理を中心とした浄化槽のEUへの適用における設計手法の最適化」では、BOD容積負荷を日本仕様に合わせて設計した浄化槽をフランスに設置して現地試験を行い、EU基準による476日の試験期間中処理水のBODとSSは日本仕様と同等の値を示し、設計因子としてBOD容積負荷が有効であることを明らかにした。これは極めて有用性の高い知見である。

第4章「汚泥発生量を考慮した汚泥貯留能力に関する設計手法の最適化」では、浄化槽一次処理槽第2室における堆積汚泥の許容量、水温13℃を境とした堆積汚泥増加率の相違、一次処理槽の有効容量変動に伴うBOD汚泥転換率への影響、BOD汚泥転換率とSS汚泥転換率との比例関係に関する知見を得て、汚泥貯留能力から設計手法の最適化を図ることが可能になった。これは新規性および有用性の高い知見である。

第5章「浄化槽分野における温室効果ガス排出量と削減施策」では、日本における浄化槽分野の低炭素化の効果を解析し、主にプロワの省エネ化と浄化槽のコンパクト化によってここ20年で35%の削減がなされたこと、今後はプロワの消費電力低減、排水処理プロセスからの発生抑制、処理水の高度処理、清掃頻度の見直し等の施策により34%の削減の可能性を示した。これらは有用性の高い知見である。

第6章「日本製浄化槽のEUへの適用における環境負荷削減評価」では、集合型と分散型の排水処理システムの環境負荷の比較を行い、廃棄物発生抑制に関しては本研究成果を適用した浄化槽が最も低いこと、温室効果ガス排出量は処理対象人口120人以下において分散型が集合型を下回ること、第5章で示した温室効果ガス排出量の削減施策を適用することで600人～2,000人規模の集合型とほぼ同等となることを明らかにした。これらは有用性の高い知見である。

第7章「総括および展望」では、本論文で得られた知見を総括した。

以上の通り、本研究は日本の浄化槽の設計手法がEUへの適用においても有効であることを実証し、汚泥発生抑制に資する設計手法を開発し、さらに温室効果ガス排出抑制のための施策を提案し、これらの知見を活用することによる浄化槽からの環境負荷削減効果を評価したもので、環境工学の発展に寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。