

学 位 論 文 題 名

Appropriate Technology of Domestic Wastewater Management in Low-income Urban Communities

（都市の低所得地域における生活排水の適正処理に関する研究）

学位論文内容の要旨

開発途上国の都市の低所得地域における生活排水処理は、感染症予防や水道水源の安全確保のために不可欠なものである。し尿の処理に関しては、国際的な枠組みの中で達成目標が設定されている。しかし、生活排水処理全般でみると、その環境負荷が高いにもかかわらず、下水道等集合処理施設整備には莫大なコストがかかるため、その普及が遅れている。その阻害要因の一つであるコストの削減を図るため、「適正技術」と呼ばれる手法を開発し、適用することが求められている。適正技術とは、その地域の気候風土や社会経済的なレベルを考慮に入れた適用可能な手法のことであり、比較的簡便な技術ということになる。そこで、本研究は、開発途上国の都市・周辺地域において生活排水処理を普及させるに当たっての課題を明らかにし、その改善手法としての適正技術の開発及び適用可能性の評価を行うことを目的とした。

本論文は6章より構成される。すなわち、第1章は序論、第2章は文献考察、第3章ではインドネシアにおける現地調査、第4章では低コスト高性能技術の開発と適用、第5章ではコンピューターシミュレーションによる費用効果分析について論じ、第6章総括及び展望からなる。

第1章では本論文の目的と背景を論じている。

第2章では、環境衛生問題に関して過去から現在、将来に渡っての流れを俯瞰し、これから取り組んで行くべき方向性を整理した。そして、環境工学と社会科学両面からの複合的なアプローチ及び、実施プログラムを適正に評価するための客観的な指標の設定の重要性を明らかにしている。

第3章では、インドネシアを本論文のフィールドとして取り上げた。まずインドネシアの都市域におけるし尿処理、生活排水処理状況を調査し、インドネシアではし尿のみを腐敗槽で処理し、生活雑排水は無処理で放流しているところが多いことが明らかとなった。そこで汎用されているし尿の腐敗槽方式について調査を行い、し尿の TOC、懸濁物質を約 40% の除去されていることが推計された。流入有機物は汚泥の管理状況に依存するものの 10～50%は懸濁性として流出することが分かった。また、汚泥管理や HRT によらずほぼ 30%は溶存性として流出することが分かった。一方、窒素は腐敗槽ではほとんど除去されないことが明らかとなった。これらのことから、し尿の腐敗槽による処理は環境負荷の低減効果が低く、生活雑排水の環境負荷をも考慮すると、し尿と生活排水を併せて処理する合併処理をインドネシアでも導入すべきであることが明らかとなった。

腐敗槽方式のし尿処理のみから、生活雑排水を併せた合併処理への移行について社会経済的な調査を行った。すなわち、仮想市場法(CVM: contingent valuation method)を用いて都市住民の汚水処理に対する支払い意思額(WTP: willingness to pay)を求め、その便益レベルを把握するためのアンケート調査を行い、解析した。その結果、平均 WTP は 1 世帯当たり月額

12,400 ルピア(US\$ 1.55)で、家計収入の 0.85%と推計された。また、WTP は家計収入が多いほど、教育レベルが高いほど高くなることも明らかとなった。他方、住民は水供給に対して家計収入の 3.4%を支出していることも明らかとなった。

ついで、現地資機材等を用いてコストの削減を図った合併処理浄化槽を導入するとして費用便益分析を行い、その整備についてのフィージビリティを考察した。合併処理浄化槽の設置によるイニシャルコストとランニングコストの合計と CVM より求めた便益と比較した。その結果、B/C 比は 0.13 となり、プロジェクトとしては成立しないことが明らかとなった。経済成長に伴う WTP の上昇、外部効果としての社会的便益の加算、割引率の再検討を行ったが B/C 比は 1 を超えることもなく、世界銀行等が示している上下水道に係る支払い可能額にも達していないことが明らかとなった。すなわち、住民が自らの手で汚水処理施設を整備することは現状では困難であることが明らかとなった。しかし、海外資本の導入による初期投資の軽減により、B/C 比は大きく改善されることが明らかになった。

第 4 章は、低コスト処理技術として、微好氣的雰囲気における有機物の生物分解反応に着目し、微量曝気手法の開発を行った。微量曝気とは、好気状態を維持できる最低レベルの動力消費で処理を行おうとするものである。Heating, Stirring, Trickling, Bubbling の 4 種の曝気方法について検討した。その結果、Trickling (滴下) 法はエネルギー強度の低い条件において最も単位酸素移動フラックス当りのエネルギー消費量が低くなる方式であることが明らかとなった。なお、エネルギー強度が高くなると、Bubbling の方が相対的に有利になる。それは、Trickling が水表面のみでの曝気であるのに対し、Bubbling の場合気泡表面での物質移動が大きく寄与するためである。

この微量曝気方式を適用した生物処理として Cascade Trickling (多段滴下) 方式を考えた。この方式は反応器を縦型多段に組み合わせた方式であることから、設置面積が少なくなる長所がある。この方式は、有機物を低濃度レベルまで酸化分解が可能であることが明らかとなった。しかし、この方式は槽内攪拌を行わないため、懸濁物質の抑留除去が期待できる反面、沈積汚泥界面のみで有機物分解が行われるために、処理速度に限界がある。したがって、この方式は嫌気処理水の後工程として有機物を放流可能なレベルまで除去する目的での適用性が高い方式であることが明らかとなった。

第 5 章では、IWA の Activated Sludge Model (ASM) と Anaerobic Digestion Model (ADM) を用いて、UASB (上向流式嫌気ろ床) の後工程として Cascade Trickling を付加したシステムの性能評価をコンピュータシミュレーションにより解析した。その結果、UASB のみでは有機物の除去率は低い、Cascade Trickling と組み合わせることにより 80%以上の除去率が達成できることが明らかとなった。また、その処理コストは合併処理浄化槽の約 50%に低減化出来ることが明らかとなった。しかし、イニシャルコストを加えた総費用では、大幅なコスト低減を図ることは出来なかった。従って、この方式を用いたとしてもインドネシアで普及させることは困難であることが明らかになった。

第 6 章は、本論文の総括と結論である。すなわち、開発途上国の都市・周辺地域での生活排水の水環境への影響を軽減するためには、し尿と生活排水を併せ処理する合併処理の導入が必要である。そこで、管渠施設整備が必要の無い低コストの分散型処理方式について検討をした。また、地域住民の生活排水処理施設整備に対する WTP を求め、水環境への負荷削減目標を達成できる、現地資機材等を用いてコスト削減を図った合併処理浄化槽や曝気コストを低減できる Cascade Trickling 方式を考案し、これと低コストな UASB 方式と組み合わせるより低コストな合併処理方式とについて費用便益分析を行った。しかし、いずれの方式であっても B/C 比は 1 を超えることは不可能であった。しかし、本論文で提案した Cascade Trickling 方式は、維持管理コストを合併処理浄化槽の 50%まで低下できることが明らかになったことから、海外資本の導入による初期投資の軽減、住民教育による WTP の増加といった環境社会工学的なアプローチの導入や、工学的には規模の効果を期待した戸別分散処理から地区単位処理の適用により、生活排水処理の導入促進を図るべきであると結論する。

学位論文審査の要旨

主 査	教 授	眞 柄 泰 基
副 査	教 授	高 桑 哲 男
副 査	教 授	清 水 達 雄
副 査	教 授	渡 辺 義 公
副 査	助教授	亀 井 翼
副 査	助教授	船 水 尚 行

学 位 論 文 題 名

Appropriate Technology of Domestic Wastewater Management in Low-income Urban Communities

(都市の低所得地域における生活排水の適正処理に関する研究)

開発途上国の都市の低所得地域における生活排水処理は、感染症予防や水道水源の安全確保のため不可欠なものである。し尿の処理に関しては、国際的な枠組みの中で達成目標が設定されている。しかし、生活排水処理全般でみると、その環境負荷が高いにもかかわらず、下水道等集合処理施設整備には莫大なコストがかかるため、その普及が遅れている。その阻害要因の一つであるコストの削減を図るため、「適正技術」と呼ばれる手法を開発し、適用することが求められている。適正技術とは、その地域の気候風土や社会経済的なレベルを考慮に入れた適用可能な技術のことであり、比較的簡便な技術ということになる。そこで、本研究は、開発途上国の都市・周辺地域において生活排水処理を普及させるに当たっての課題を明らかにし、その改善手法としての適正技術の開発及び適用可能性の評価を行うことを目的とした。

本論文は6章より構成される。すなわち、第1章は序論、第2章は文献考察、第3章ではインドネシアにおける現地調査、第4章では低コスト高性能技術の開発と適用、第5章ではコンピューターシミュレーションによる費用効果分析について論じ、第6章総括及び展望からなる。

第1章では本論文の目的と背景を論じている。

第2章では、環境衛生問題に関して過去から現在、将来に渡っての流れを俯瞰し、これから取り組んで行くべき方向性を整理した。そして、環境工学と社会科学両面からの複合的なアプローチ及び、実施プログラムを適正に評価するための客観的な指標の設定の重要性を明らかにしている。

第3章では、インドネシアを本論文のフィールドとして取り上げた。まずインドネシアの都市域におけるし尿処理、生活排水処理状況を調査し、インドネシアではし尿のみを腐敗槽で処理し、生活雑排水は無処理で放流しているところが多いことが明らかとなった。そこで汎用されているし尿の腐敗槽方式について調査を行い、し尿の TOC、懸濁物質を約 40 パーセントの除去されていることが推計された。流入有機物は汚泥の管理状況に依存するものの 10~50 パーセントは懸濁物質として流出することが分かった。また、汚泥管理や HRT によらずほぼ 30 パーセントは溶存物質として流出することが分かった。一方、窒素は腐敗槽ではほとんど除去されないことも明らかとなった。これらのことから、し尿の腐敗槽による処理は環境負荷の低減効果が低く、

生活雑排水の環境負荷をも考慮すると、し尿と生活雑排水を併せて処理する合併処理をインドネシアでも導入すべきであることが明らかとなった。

腐敗槽方式のし尿処理のみから、生活雑排水と併せた合併処理への移行について社会経済的な調査を行った。すなわち、仮想市場法(CVM: contingent valuation method)を用いて都市住民の汚水処理に対する支払い意思額(WTP: willingness to pay)を求め、その便益レベルを把握するためのアンケート調査を行い、解析した。その結果、平均 WTP は 1 世帯当たり月額 12,400 ルピア(US\$ 1.55)で、家計収入の 0.85%と推計された。また、WTP は家計収入が多いほど、教育レベルが高いほど高くなることも明らかとなった。他方、住民は水供給に対して家計収入の 3.4%を支出していることも明らかとなった。

ついで、現地資機材等を用いてコストの削減を図った合併浄処理化槽を導入するとして費用便益分析を行い、その整備についてのフィジビリティを考察した。合併処理浄化槽の設置によるイニシャルコストとランニングコストの合計と CVM より求めた便益とを比較した。その結果、B/C 比は 0.13 となり、プロジェクトとしては成立しないことが明らかとなった。経済成長に伴う WTP の上昇、外部効果としての社会的便益の加算、割引率の再検討を行ったが B/C 比は 1 を超えることもなく、世界銀行等が示している上下水道に係る支払い可能額にも達していないことが明らかとなった。すなわち、住民が自らの手で汚水処理施設を整備することは現状では困難であることが明らかとなった。しかし、海外資本の導入による初期投資の軽減により、B/C 比は大きく改善されることが明らかになった。

第 4 章は、低コスト処理技術として、微好氣的雰囲気における有機物の生物分解反応に着目し微量曝気法の開発を行った。微量曝気とは、好気状態を維持できる最低レベルの動力消費で処理を行おうとするものである。Heating, Stirring, Trickling, Bubbling の 4 種の曝気方法について検討した。その結果、Trickling (滴下) 法はエネルギー強度の低い条件において最も単位酸素移動フラックス当りのエネルギー消費量が低くなる方式であることが明らかとなった。なお、エネルギー強度が高くなると、Bubbling の方が相対的に有利になる。それは、Trickling が水表面のみでの曝気であるのに対し、Bubbling の場合気泡表面での物質移動が大きく寄与するためである。

この微量曝気方式を適用した生物処理として Cascade Trickling (多段滴下) 方式を考えた。この方式は反応器を縦型多段に組み合わせる方式であることから、設置面積少なくなる長所がある。この方式は、有機物を低濃度レベルまで酸化分解が可能であることが明らかとなった。しかし、この方式は槽内攪拌を行わないため、懸濁物質の抑留除去が期待できる反面、沈積汚泥界面のみで有機物分解が行われるために、処理速度に限界がある。したがって、この方式は嫌気処理水の後工程として有機物を放流可能なレベルまで除去する目的での適用性が高い方式であることが明らかとなった。

第 5 章では、IWA の Activated Sludge Model (ASM) と Anaerobic Digestion Model (ADM) を用いて、UASB (上向流式嫌気ろ床) の後工程として Cascade Trickling を付加したシステムの性能評価をコンピュータシミュレーションにより解析した。その結果、UASB のみでは有機物の除去率は低いが、Cascade Trickling と組み合わせることにより 80 パーセント以上の除去率が達成できることが明らかとなった。また、その処理コストは合併処理浄化槽の約 50 パーセントに低減化出来ることが明らかとなった。しかし、イニシャルコストを加えた総費用では、大幅なコスト低減を図ることは出来なかった。従って、この方式を用いたとしてもインドネシアで普及させることは困難であることが明らかになった。

第 6 章では、本論文の総括と結論である。すなわち、開発途上国の都市・周辺地域での生活排水の水環境への影響を軽減するためには、し尿と生活排水を併せ処理する合併処理の導入が必要である。そこで、管渠施設整備が必要のない低コストの分散型処理方式について検討をした。また、地域住民の生活排水処理施設整備に対する WTP を求め、水環境への負荷削減目標を達成できる現地資機材等を用いてコスト低減を図った合併処理浄化槽や曝気コストを低減化できる Cascade Trickling 方式を考案し、これと低コストな UASB 方式と組み合わせるより低コストな合併処理方式とについて費用効果分析をおこなった。しかし、いずれの方式であっても B/C は 1 を超えることは不可能であった。しかし、本論文で提案した Cascade Trickling を組み入れた方式の維持管理コストを合併処理浄化槽の 50% 迄低下できることが明らかになったことから、海外資本の導入による初期投資の軽減、住民教育による WTP の増加といった環境社会工学的なアプローチの導入や、工学的には規模の効果を期待した戸別分散処理から地区単位処理の適用により、生活排水処理の導入促進を図るべきであると結論している。

これを要するに、著者は開発途上国における生活排水処理の適正技術を検討し、その費用分析を行った。その結果、工学的な技術開発ばかりでなく、その適用性の検討には環境社会工学的なアプローチも必要であることを明らかにし、都市環境工学とくに環境衛生工学に対して貢献するところ大なるものがある。よって、著者は北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。