

「水の循環系モデリングと利用システム」

平成14年度採択研究代表者

船水 尚行

(北海道大学大学院工学研究科 教授)

「持続可能なサニテーションシステムの開発と水循環系への導入」

1. 研究実施の概要

「**混ぜない（排水分離）**」，「**集めない（分散型）**」を前提とした，持続可能性の高い新しいサニテーションシステムの開発を目的として4つの要素研究と国内，海外実証研究，ならびにこの新しいコンセプトを広める活動を行っている．**要素研究－1（排水分離・分散型処理システムの開発）**ではコンポスト型トイレによるし尿処理・資源回収とバイオ＋エコ技術による雑排水処理に関する研究を行っている．トイレに関する研究では有機物分解，水分蒸発に関する研究成果を総合化し，コンポスト型トイレの設計法ならびに運転管理法を確立した．バイオ＋エコ技術開発では傾斜土壌システムの雑排水処理への適用に関する検討を進め，その処理特性を明らかにした．**要素研究－2（コンポスト利用技術開発）**では最終産物であるコンポストから生物分解性資材であるボードの形成に成功した．**要素研究－3（病原性微生物・微量化学物質モニタリングと健康リスク評価）**では，サルモネラ菌を用いた不活化過程の実測を行い，含水率に加えて水分活性が重要な影響因子であることを見出した．また，病原ウイルスに対する安全性を確保するための運転条件管理図を完成させた．多様なヒト由来細胞を用いたバイオアッセイ系の構築に成功し，プロテオーム解析と合わせた環境毒性評価のためのバッテリーが用意された．分析の困難であった，コンポスト中のホルモン類，抱合体，医薬品のLC/MS/MSによる測定法の開発を行い，測定条件を確立した．**要素研究－4（新システムの流域水・物質循環に対する寄与の評価法開発）**では，サニテーションシステム導入効果と波及的な環境影響間のトレードオフの評価手法を確立し，その手法をタイ，中国の流域への適用を開始した．**国内実施による実証研究**では，埼玉県秩父市の個人宅に実証施設を設置し，その維持管理性，処理性能の実証を開始した．また，新しいシステムの導入戦略の検討も開始した．河川敷に設置したトイレのNPOによる維持管理実験を継続し，バイオトイレの認知度，使用後の感想を尋ねるアンケート調査も行った．**海外における実証研究**では中国，インドネシアの合計4研究機関にコンポスト型トイレを設置し，現地で利用かのようなマトリックスの検討，公共トイレも設置し，現地適用実験および使用者へのアンケート調査を開始した．**コンセプトを広める活動**では2nd International Symposium on Sustainable Sanitation（JST，南京大学，東北師範大学，西安建築科学技術大学，Indonesia Institute of Science）

を開催した。また、訳本「分散型サニテーションと資源循環 概念、システムそして実践」を技報堂出版より出版した。

2. 研究実施内容

研究目的 2035年には約55億人が衛生状態の悪い状態での生活を余儀なくされると推定されている。水資源の不足、飲料水の量的・質的不足、水環境の劣悪化といった水問題は、し尿・有機性廃棄物問題－サニテーション問題と極めて密接な関係にあり、現用水利用システムの構造的な矛盾が顕在化しているとも考えられる。また、汚水をパイプで集め処理する集中処理システムを世界中に導入することは経済的に現実的ではない。本研究では、「**混ぜない（排水分離）**」、「**集めない（分散型）**」を前提とした、持続可能性の高い新しいサニテーションシステムの開発を目的としている。また、この新システム導入戦略を多くのアジア諸国が抱える社会問題とリンクさせ、流域ベースで具体的かつ実証的に検討する。これにより、アジアの開発途上国の社会基盤施設整備計画立案に貢献し、実質味のある国際援助への道を日本発の技術により開くことが可能となる。

研究方法

- **要素研究—1 分離・分散型処理システム開発**——— 水を用いないし尿と生ごみ処理ユニット（バイオトイレ）の開発を糞尿の分解過程の反応工学的により行う。また、自然生態系の浄化機能を工学的に強化したバイオ+エコ技術による生活雑排水処理ユニットの開発を行う。
- **要素研究—2 コンポスト利用技術開発**——— ここでは、コンポストの有機肥料としての適性試験ならびに、コンポストに付加価値をつけた生物分解性資材の製造技術を開発する。
- **要素研究—3 病原性微生物・微量化学物質モニタリングと健康リスク評価**——— し尿の再利用系の維持に必要な病原性微生物（ウイルス、バクテリア、寄生虫）、微量汚染物質のモニタリングと健康リスク評価を行う。
- **要素研究—4 新システムの流域水・物質循環に対する寄与の評価法開発**——— GIS上のデータベースと各種モデルを用いたシナリオ分析により、新システムの流域水・物質循環ならびに健康リスクの視点からの評価方法を開発する。
- **国内実施による実証研究**——— 実証施設により負荷変動への対応性や維持管理性を実証する。また、システムの維持管理をNPO組織のようなグループで実施する場合の維持管理性、問題点を実証的に検討する。
- **海外における実証研究**——— インドネシア、中国において社会現況調査により、新しいサニテーションシステムの有効性を明確にすることを第一の課題とする。また、現地資材の利用や、エネルギー消費の少ないシステムへの改良、ならびに、利用者へのインタビューによる社会での受け入れ可能性を検討する。
- **コンセプトを広める活動**——— 新しいサニテーションの考え方を広め、ネットワークを作る活動を行う。

研究成果と今後の展開

■ コンセプトを広める活動

平成16年9月、中国長春市においてThe 2nd International Symposium on Sustainable Sanitationを開催した。バイオトイレに関する産学官連携シンポジウムを平成16年10月に旭川で開催した。また、訳本「分散型サニテーションと資源循環 概念、システムそして実践」を技報堂出版より出版した。新しいサニテーションの考え方を広め、ネットワークを作る活動を今後も続けていく。

■ 要素研究—1 分離・分散型処理システム開発

(1) バイオトイレグループ

トイレ性能評価を有機物、栄養塩、病原性微生物、微量化学物質、水分移動の観点から行う必要がある。本年度は研究が進んでいる有機物分解について水分の影響の検討を行った。栄養塩については窒素成分の挙動を表現するために、窒素変換モデルを有機物分解モデルに組み込んだものを開発し、実測結果との火か組を実施した。特に、有機物分解過程における有機態窒素のアンモニア態窒素への変換、窒素揮散過程のモデルの充実を図った。水分移動については、実装置を対象に水分乾燥速度の推算式を求めた。以上のことを総合化することによって、コンポスト型トイレの設計手法が確立された。

コンポスト化過程における有機物の変化、医薬品の分解、ホルモン類の分解を実験的に検討した。また、動物細胞を用いたバイオアッセイにより、最終産物であるコンポストが有意な毒性を示さないことが確認された。

また、ポータブルバイオトイレについては、その改造（攪拌翼を縦型）を行い、臭いの発生状況とおが屑水分量の関係を検討した。その結果、水分を60%以下に制御する必要性が確認された。

(2) バイオエコユニットグループ

実際の家庭の台所排水に設置してある傾斜土槽処理システムについて、流入水質、処理水質のモニタリングデータを解析し、(1)BOD, COD, T-Pに関して平均除去率で80%以上となること、(2)流入負荷変動に対して安定であること、(3)冬期の低温時期においてもBOD, COD, T-N, T-Pの除去率は安定していること、(4)面積あたりの水量負荷が増加するにしたいBOD除去率は減少することが明らかとなった。また、傾斜土槽処理システムの設計および操作条件の適正化について検討し、水量負荷は $200 \text{ L/m}^2/\text{day}$ 以下が適正水量であることが判明した。また、界面活性剤の処理能についての調査結果より、5段のシステムでは処理がほぼ完全に行われていること、さらに、界面活性剤の分解菌についてスクリーニングを行った結果、多くの細菌が分解できることが解ったが、特に優れた分解活性を持つ微生物の存在も明らかとなった。生活排水の分散型処理システムとしての生物膜処理システムや、人工湿地システムなどにおける硝化細菌などの迅速モニタリング手法や、微生物群集構造解析を実施した。また、生活排水の適正処理を有毒アオコの発生防止の観点から評価検討するために、藻類増殖能試験 (AGP) 試験の改良を行い、河川水、浄化槽処理水などへの適用を検討した。

■ 要素研究—2 コンポスト利用技術開発

バイオトイレから発生するコンポストで生物分解性資材製造の可能性が明らかになった。具体的にはコンポストからボードを形成することに成功し、その材料としての特性を評価した。

■ 要素研究—3 病原性微生物・微量化学物質モニタリングと健康リスク評価

バイオトイレにおける病原リスク評価——モデル微生物として大腸菌，大腸菌ファージ，サルモネラ菌を用い，含水率に加えて水分活性が重要な影響因子であることを見出した。また，おが屑の100℃での乾燥処理が微生物挙動に非常に大きな影響を与えることもわかった。おが屑とウイルスの脱吸着を調べたところ，ウイルスはほとんど吸着されずに直ぐに脱離することがわかった。またおが屑および園芸用土を用いたカラム通水実験においてウイルスの溶出傾向を調べた結果，おが屑ではほぼ全量が溶出し，初期溶出量が通水流量に依存することがわかった。園芸用土ではほとんどが吸着されることがわかった。実際に運転しているバイオトイレ内の温度・含水率を用いて，病原ウイルス投入後の二次感染リスクを算定し，安全性を確保するための運転条件管理図を作成することが出来た。

バイオアッセイを用いた微量化学物質の有害性総合評価——処理プロセスにおける環境汚染物質の安全性評価のためのバイオアッセイの構築を行った。現段階で開発できた環境毒性評価用の細胞は乳腺上皮細胞，熱ショックタンパク質プロモーター導入細胞，ヒト腸管上皮細胞，ラット初代培養肝細胞，ヒト上皮細胞，ヒト血球細胞，ヒト骨芽細胞にのぼる。そして，有機リン系農薬5種類・ノニルフェノール・ミクロシスチンについてバイオアッセイ及びプロテオームを用いた安全性評価，ならびに，活性汚泥中のリポポリサッカライドのヒト腸管上皮細胞における影響をプロテオームを用いた方法により調べた。

微量化学物質のモニタリング技術の開発——し尿中に含まれるホルモン物質の把握のためにエストロゲンに着目し，エストロゲン類(17β-エストラジオール，エストロン)，およびエストロゲン抱合体9種〔Estrone-3-D-Glucuronide (E1-G)，Estrone-3-Sulfate (E1-3S)，Estradiol-3-D-Glucuronide (E2-3G)，Estradiol-17-D-Glucuronide (E2-17G)，Estradiol-3-Sulfate (E2-3S)，Estradiol-3-Sulfate-17-Glucuronide (E2-3S, 17G)，Estradiol-3, 17-Disulfate (E2-3, 17-DiS)，Estrisol-3-D-Glucuronide (E3-3G)，Estrisol-16α-D-Glucuronide (E3-16G)，Estrisol-3-Sulfate (E3-3S)〕について，高速液体クロマトグラフ/タンデム質量分析計 (LC/MS/MS) を用いて測定条件(イオン化条件，カラム・溶離液の選択等)の検討を行った。し尿中に含まれる医薬品の代謝物の把握のため，人用医薬品(イブプロフェン，カルバマゼピン，プロプラノロール)，合成抗菌剤(スルファメトキサゾール，スルファジメトキシン，カルバドックス)についてLC/MS/MSを用いて測定条件(イオン化条件，カラム・溶離液の選択等)の検討を行い，下水等を用いた実試料について分析を行った。

■ 要素研究—4 新システムの流域水・物質循環に対する寄与の評価法開発

有機性廃棄物管理の視点にたった総合環境評価システムの構築——次の4項目について検討を行った：(1) サニテーションシステム導入による衛生状態の改善と波及的な環境

影響間のトレードオフの評価手法の検討；（２）タイ農村部（東北地方）におけるサンテーションシステム導入による環境影響評価；（３）Kelani river（スリランカ）における河川水質モデルの適用と水質対策の評価；（４）中国の流域を対象としたバイオトイレ導入に伴う水循環系への影響の基礎的な解析。このうち、（１）では、水供給・廃水処理の各プロセスの導入による健康リスク改善とライフサイクルでの環境負荷の評価の枠組みを構築し、仮想的な流域を対象としてそれぞれの評価を試みた。（２）では、Roi-et県の3地区を対象としたアンケート&ヒアリング調査を行い、各家庭におけるサンテーション施設と利用実態について解析を行うとともに、それらのサンテーション施設のLCAを行った。（３）では、河川水質モデル（QUAL2K）をKelani Riverへ適用し、生活系汚濁負荷削減の影響についての評価を行った。（４）では、清華大学との共同研究として、対象地域（北京郊外）を選定し、水収支モデルを構築する作業を行った。

GIS上データベースと水・物質循環モデルによる新システムの評価———15年度に引き続き、霞ヶ浦流域を対象として構築した水循環・物質循環モデルを用いて、下水道や合併処理浄化槽、バイオトイレなど各排水処理システムを導入することによる水環境への効果、影響の評価を試みた。改良点ははまだ残るものの、各システム導入による排出負荷量、湖沼への流入負荷量、湖沼水質への影響を大まかながら把握することができた。また、経済性などほかの観点から各システムの特徴を把握し、将来家庭用トイレとしてバイオトイレを導入する場合の課題を整理した。

■ 国内実施設による実証研究

埼玉県秩父市橋本邸にコンポスト型トイレと雑排水処理システム（傾斜土槽処理システム）を設置し、詳細な処理特性解析を行うための実証実験システムを構築した。システムの運転データはネットワークで遠隔からのモニタリングが可能となっている。本実証実験では、し尿および雑排水の処理性能と維持管理性を検討することを目的としている。また、関係自治体の協力を得て、新しいシステムをいかに水循環系に組み込んでいくか、すなわち、新システムの導入戦略の検討ならびにその実現も大きな目標とし検討を進めている。昨年度から引き続き、NPOによるバイオトイレ管理方法の検討を行うとともに安全性に関するメーカーへのヒアリング、コンポスト成分分析、アンケート調査も行った。日常管理方法については、チェックシートをもとに日常点検を行い、バイオトイレは循環式に比べて便器が汚れやすいことからより効率的な清掃方法の検討等を行った。バイオトイレメーカーに安全性に関するヒアリングを行い、転落事故等防止に向けた各メーカーの対策を抽出、検討を行い、いくつかの改善ポイントについて提案した。バイオトイレコンポストへの無機塩類等蓄積状況を把握するため成分分析を行った。使用人数が増えるにつれて、リン、ナトリウム、窒素が担体中に蓄積されていくことなどが把握できた。5月に藤代町の運動公園で、花祭り来場者を対象にバイオトイレの認知度、使用後の感想等を尋ねるアンケート調査を行った。実際に使用した感想としては、臭い、汚れなども気にならない、との意見が圧倒的に多く、NPOの管理によりバイオトイレが適切な状態に保たれていると考えられた。

■ 海外における実証研究

南京大学・東北師範大学・西安建築科技大学(以上, 中国), Indonesian Institute of Science(インドネシア)において小型バイオトイレを研究室に設置し, 基礎実験および代替マトリクスの検討を行った. 現在, 長春ではコーンストーク, 南京ではモミガラ, 西安とインドネシアでは現地オガクズを代替マトリクスとして使用するための実験を行っている. また, 中国・南京, 長春, 西安において大型バイオトイレを公衆トイレとして設置し, 現地適用実験および使用者へのアンケート調査を開始した.

インドネシアにおいてバイオトイレ設置のパイロットプロジェクトを行う予定の地域の河川水量・水質, および流域住民の水使用の実態に関する調査を行った.

3. 研究実施体制

バイオトイレグループ (要素研究-1)

- ① 研究分担グループ長: 船水尚行 (北海道大学工学研究科, 教授)
- ② 研究項目: し尿分解過程の反応工学的解析に基づく合理的設計法の開発

バイオ・エコユニットグループ (要素研究-2)

- ① 研究分担グループ長: 稲森悠平 (国立環境研究所, 室長)
- ② 研究項目: (1)分離・分散型処理システムの開発
(2)し尿分離後雑排水処理ユニットの開発

コンポスト利用技術グループ (要素研究-3)

- ① 研究分担グループ長: 寺澤実 (北海道大学農学研究科, 教授)
- ② 研究項目: コンポスト利用技術の開発

リスク評価グループ (要素研究-4)

- ① 研究分担グループ長: 大瀧雅寛 (お茶の水女子大学, 助教授)
- ② 研究項目: (1)バイオトイレにおける病原リスク評価
(2)微量化学物質のモニタリング技術の開発

流域グループ (要素研究-5)

- ① 研究分担グループ長: 長谷川聖 (東京大学工学系研究科, 助手)
- ② 研究項目: GIS上データベースと水・物質循環モデルによる新システムの評価

アドホック-1

- ① 研究分担グループ長: 田辺秀二 (長崎大学, 助教授)
- ② 研究項目: (1)実施設による実証実験 (国内)
(2)ダム水源地流域における分離・分散型処理システムの適用に関する研究

アドホック-2

- ① 研究分担グループ長: 石川忠晴 (東京工業大学, 教授)
- ② 研究項目: (1)海外における実証実験

4. 主な研究成果の発表（論文発表および特許出願）

(1) 論文発表

- 成田裕樹，船水尚行，高桑哲男，国本学：活性汚泥法の自己酸化過程における毒性物質の生成とその由来に関する研究，水環境学会誌 Vol. 28, No. 2, pp93-99(2005)
- Hiroko Isoda, Terence P.N. Talorete, Han Junkyu, Shuichi Oka, Yukuo Abe, Yuhei Inamori: Effects of Organophosphorous Pesticides Used in China on a Variety of Mammalian Cells, *Environmental Sciences*, Vol.12 No.1(2005)
- Hiroko Isoda, Terence P.N. Talorete, Han Junkyu, Shuichi Oka, Yukuo Abe, Yuhei Inamori: Effects of Organophosphorous Pesticides Used in China on a Variety of Mammalian Cells, *Environmental Sciences*, Vol.12 No.1(2005)
- M. A. Lopez Zavala, N. Funamizu, T. Takakuwa: Biological activity in the composting reactor of the bio-toilet system, *Bioresource Technology*, Vol.96/7, pp805-812(2004)
- 堀田真也，寺澤実，船水尚行：コンポスト型トイレにおけるアンモニアガスの揮発特性に関する基本的研究，環境工学研究論文集，Vol. 41, pp69-78(2004)
- 今井陽介，船水尚行，成田裕樹，柿本貴志，国本学：おが屑をマトリックスとした非水洗ドライトイレコンポストへのバイオアッセイの適用，用水と廃水，Vol. 46, No12, pp. 1044-1049(2004)
- M. A. Lopez Zavala, M. Terazawa, N. Funamizu, T. Takakuwa: Temperature effect on aerobic biodegradation of feces using sawdust as a matrix, *Water Research*, Vol. 38, pp. 2406-2416(2004)
- Miguel Angel Lopez Zavala, Naoyuki Funamizu and Tetsuo Takakuwa: Modeling of aerobic biodegradation of feces using sawdust as a matrix, *Water Research*, vol. 38, No. 5, pp. 1327-1339 (2004)
- Mun'im A., Isoda H., Seki M., Negishi O. and Ozawa T.: Estrogenic and acetylcholinesterase-enhancement activity of a new isoflavone, 7, 2', 4'-trihydroxy- isoflavone-4'-O- β -D-glucopyranoside from *Crotalaria sessiliflora*, *Cytotechnology*, (2004)
- Cui Y., Abe Y., Kojima A., Yasuda H. and Isoda H.: Evaluation of vertical subsurface drip irrigation in sandy soil on soil moisture distribution and evaporation under arid condition, *J. Arid Land Studies*, (2004)

(2) 特許出願

H16年度特許出願件数：0件（CREST研究期間累積件数：2件）