

「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

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。すなわち、(1)非水洗トイレによりし尿を水循環系からの分離、(2)し尿と厨芥のコンポスト化と物質循環ルート確立、(3)し尿以外の生活雑排水の適切な処理の実現を目指し、要素技術開発研究(水を用いないし尿と生ごみの処理・コンポスト資源化装置、尿の処理装置、グレイウォーター処理・資源化装置、コンポスト利用技術開発)、新システム評価手法開発(病原性微生物・微量化学物質モニタリング技術と健康リスク評価、流域の水・物質循環に対する寄与の評価手法)、国内・海外における実証研究(国内:4箇所、海外:中国3箇所、インドネシア)を実施してきた。現段階で(1)非水洗コンポスト型トイレの設計・維持管理手法の確立、(2)コンポストを用いた生物分解性資材製造、(3)コンポストに含まれる微量汚染物質の評価手法の確立(ヒト細胞を用いたバイオアッセイ、ホルモン類・医薬品類の分析手法)、(4)病原性微生物の健康リスク評価手法の確立、(5)傾斜土槽法によるグレイウォーター処理の確立、(6)社会現況調査を含む事例研究を通して、新しいシステムの導入戦略、以上 6 項目についての検討に目途がついている。実証研究はシステムの長期間の運転による処理性の評価に加え、施設の運転の段階へと進んでいる。

2. 研究実施内容

「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実施している。

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、電気化学的方法による尿の処理、雑排水処理に関する研究を行っている。平成 18 年度の主要な成果を列記すると:

- 尿とふん便を同時に処理するコンポスト型トイレと糞便のみを処理するコンポスト型トイレの設計・維持管理手法の違いを明らかにし、かつ、両者の設計法を確立した。
- コンポスト化過程における窒素成分の挙動を表現するモデルを構築し、その妥当性を実験により

検証した。また、長期間運転したときの窒素の回収率の算定が可能となった。

- コンポスト反応時の医薬品の分解に関して実験的に検討した。抗生物質は容易に分解され、コンポスト反応槽内のアンモニアやリン酸濃度が高いことに起因する化学的分解によることが確認された。これは、コンポスト型トイレの特徴である。
- 尿の貯蔵過程におけるアンモニア生成、有機物の変化、医薬品濃度変化等を総合的に検討した。この総合的な検討は世界で初めての試みである。
- 尿中微量有害物質の処理法の一つとして、電解処理プロセスをとりあげ、その医薬品処理への有効性を明らかにした。
- 分子生物学的手法を用いた秩父・沖縄実証実験施設槽内の微生物群集の解析を行った結果、好熱細菌である *Bacillus* 属の優先が見られた。その単離に成功した。
- コンポスト型トイレの安全性を担保するための装置として「糞便除去機能を具備したバイオトイレ 幼児落下防止装置」を開発し、実用新案(登録第3121603号)を提出した。また、長野県諏訪市諏訪中学校グラウンドに設置したバイオトイレにて、その効果を検証するとともに、維持管理の難易を評価した。
- 約 10 ヶ月にわたり、傾斜土槽システムによる雑排水処理実験を行い、生活雑排水の流入パターンと処理性能および土槽内の微小動物特性等の関係について検討を行った。実際の生活パターンを模擬した間欠流入系において運転および除去性能の安定性が明かとなった。また、亜熱帯のモデルサイトにおいて軽石・南九州の土・島尻土を組み合わせたコンポジット系は、鹿沼土系と同等の厨房排水処理能を有することが実証され、今後、他地域への導入において鹿沼土以外の土でも、十分またはそれ以上の処理性能が得られる事が明らかになった。
- Membrane Bio-Reactor による台所排水処理実験により、有機物負荷と有機物・窒素・リンの除去、反応槽内への有機物の蓄積、膜ファウリングの関係に関する知見を得た。

要素研究一2(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の有効利用について検討し、次の知見を得た:

- 昨年度までは、加熱圧縮により、接着剤なしにボード化することを検討した。今年は、接着剤を使用し、ポーラスボードの成型を試みた。イソシアネート系接着材を用いて加圧を軽減しつつポーラスボードの成型に成功した。

要素研究一3(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、コンポストトイレ内での病原性微生物の不活化、コンポスト中の微量汚染物質の測定法の開発を行い、

- 実際に運転しているコンポスト型トイレの担体中に存在する指標細菌の挙動を調べることによって、どの指標細菌が、リスク管理の上で最適であるか検討した結果、糞便性連鎖球菌はが指標として有効である可能性が示された。また、病原ウイルスを考慮した場合の指標細菌として適していると考えられた。
- 施肥の場合を仮定して、カラム実験によって琉球石灰岩土壌中の浸透ウイルスの挙動把握を試みた。回分試験によっておが屑(トイレ担体)や、琉球石灰岩には吸着が起こらないことが確認できた上で、カラム実験での通水実験を行った結果、移流によるモデルでは説明できず流出の遅延現

象を説明するための滞留項を含める必要性があることが示された。

- コンポスト型トイレを含んだ分散型排水処理システムのリスク評価および環境負荷評価を行った。リスク評価に関しては、複数のケーススタディを通して、担体交換時の直接暴露および地下水汚染による間接暴露に対して定量的リスクを算定した結果、コンポスト型トイレにおいて希釈、不活化を含めて 10^{10} ~ 10^{12} 分の1の濃度減少を見込めれば、十分な安全性が担保できることがわかった。
- 医薬品のコンポストトイレ中濃度推移を把握するため、秩父の実証実験サイトで1年間、前述の医薬品10項目についてモニタリングを行った。本実証実験サイトでは個人宅にコンポストトイレを設置しているため、服用している医薬品の種類や量を把握しやすい利点がある。分析の結果、解熱鎮痛剤3種(アスピリン、イブプロフェン、ケトプロフェン)が検出され、その中でも常時服用されているケトプロフェンについては経時的に濃度が上昇したため、ケトプロフェンはコンポスト中で蓄積する可能性が考えられた。
- 細胞毒性・環境ホルモン活性・ストレス応答性が認められた都市部排水処理水により、ヒト乳腺上皮細胞においてバイオマーカーとして有用な下記に示す3つのタンパク質の発現が顕著に認められた。

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、その手法を各地の流域への適用した。

- ベトナムハイフォン市における **Material Flow Analysis** を用いた有機性廃棄物管理の現状解析により、**Input**としては食物の移入が、**Output**としては **Septic tank** からの廃水や汚泥の寄与が大きく、**Septic tank** の適正な管理が重要であることが示唆された。
- 中国 **Xiaotangshan** 地区における水収支モデルの構築とサニテーションシナリオの評価を行い、従来型の下水道、コンポスト型トイレといったサニテーション施設の普及シナリオを仮定し、**SWAT** モデルにより流域全体負荷量への減少効果を検討し、バイオトイレの普及が従来型下水道より良い効果が得られると推定された。またコストの概算を行い、バイオトイレは初期投資が高いが、雑排水量の増加及び水の価格の上昇に伴い従来型下水道の費用が急速に増加し、いずれバイオトイレの方が全体として安くなるという見込みが示された。
- **Dhaka** 市の低所得層居住エリアを対象としたサニテーションによる健康影響の改善と副次的な環境影響に関する調査を行い、サニテーション施設のレベルがよいコミュニティにおいて感染症の発生頻度が低く、**DALY** 値(障害の程度を勘案した生命年数)に換算して健康リスクを計算した場合、汚水処理設備の普及による副次的な環境影響よりはるかに大きいことが示された。

国内実施による実証研究では、埼玉県秩父市、名護市に実証施設を設置し、その維持管理性、処理性能を実証している。また、コンポスト型トイレのエネルギー消費構造を明らかにし、消費エネルギー低減方策について試行を行った。また、太陽光発電および太陽熱利用の可能性を検討した。加えて、新しいシステムの導入戦略について、イノベータの役割について検討している。

海外における実証研究では中国およびインドネシアにおいてサステナブルサニテーション導入の具体的な対象エリアを想定し、その地域・社会特性の分析と個別の問題点抽出およびその改善策について検討した。その結果、

(1) 中国東北師範大学(長春市)

上水道が整備されておらず、非近代的な汚物処理が成されている農村部をバイオトイレ普及の対象と想定し、農民の生活実態と農作業の詳細について調査を行った。同時に農民に対してコンポスト型トイレの技術を紹介し、その購入可能価格を問うたところ 1000 元前後であり、現在の日本製コンポスト型トイレの 1/100 程度の価格であった。またトイレから発生するコンポストの利用可能性について検討した。試験的に家畜糞尿とコーンストークをもとにコンポスト型トイレで作られたコンポストを使用してトウモロコシやホウレンソウの栽培を行ったところ、いずれも良好な施肥効果が見られた。

(2) 中国西安建築科技大学(西安市)

都市遠隔の観光地にコンポスト型トイレを導入することを想定し、バッテリー型の自作コンポスト型トイレを郊外の森林公園に設置し、観光客に使用してもらった。運転状況は良好で、悪臭の発生などもなく、使用者の評価も概して良好であった。ただし、自作機の製造コストは依然として高く、さらなるコストダウンが望まれる。また、別途実験室においてコンポスト型トイレのマトリクス内の回虫卵の死滅や病原性微生物に関する分析を行った。

(3) 中国南京大学(南京市)

中国南部では大豆残渣が大量の産業廃棄物として発生するため、これをマトリクスとする基礎実験を行ったところ、オガクズ同様の良好な実験結果を得た。また、農民にコンポスト型トイレの技術紹介を行ったところ、よい印象を与えたが、購入可能価格は現状の日本製コンポスト型トイレの価格の 1/100 ほどで、大幅なコストダウンが必須であることが明らかとなった。また、トイレで生産されたコンポストを用いて小松菜などの栽培を行ったところ、天然土で適度に希釈して使用すれば塩類集積などの問題もなく施肥効果を得られることがわかった。

(4) インドネシア科学技術院(バンドン市)

人口の集中するスラムにコンポスト型トイレを導入することを想定し、スラム住民の生活実態と現地を流れる水路の水環境に関する調査を行った。特に現地のごみ収集システムは住民の自治活動によって支えられており、コンポスト回収においてもその枠組みが活用できるものと考えられた。また、現地の生活状況を十分に鑑みて、住民の生活習慣に十分に即し得るデザインの廉価版コンポスト型トイレを提案した。

コンセプトを広める活動では4th International Symposium on Sustainable Sanitation (JS T, 南京大学, 東北師範大学, 西安建築科学技術大学, Indonesia Institute of Science)をインドネシア バンドン市で開催、公開シンポジウム バイオマスタウン構築に向けて―「集めない」、 「混ぜない」排水処理システムの地域導入― を沖縄県宮古島市で開催した。

3. 研究実施体制

(1)「バイオトイレ」グループ

①研究者名

船水 尚行(北海道大学大学院工学研究科 教授)

②研究項目

- ・し尿分離過程の反応工学的解析に基づく合理的設計法の開発
- ・ポータブルトイレにおける臭気対策, 尿中有機物の酸化処理

(2)「バイオ・エコユニット」グループ

①研究者名

稲森 悠平(独立行政法人国立環境研究所循環型社会形成推進・廃棄物研究センターバイオエコ技術研究室 室長)

②研究項目

- ・分離・分散型処理システムの開発(アジア諸国で適用性の高い排水処理システムの開発)

(3)「コンポスト利用技術」グループ

①研究者名

寺沢 実(北海道大学大学院農学研究科 教授)

②研究項目

- ・コンポスト利用技術の開発

(4)「リスク評価」グループ

①研究者名

大瀧 雅寛(お茶の水女子大学大学院人間文化研究科 助教授)

②研究項目

- ・バイオトイレにおける病原リスク評価
- ・微量化学物質のモニタリング技術の開発
- ・サニテーションシステム開発における生物影響評価に関する研究

(5)「流域」グループ

①研究者名

栗栖(長谷川) 聖(東京大学先端科学技術研究センター 講師)

②研究項目

- ・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

(6)「アドホック-1」グループ

①研究者名

船水 尚行(北海道大学大学院工学研究科 教授)

②研究項目

- ・秩父, 名護実証実験サイトにおける実証実験, 実施による実証実験(国内)
- ・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
- ・亜熱帯域における分離・分散型処理システムの適用に関する研究

(7)「アドホック-2」グループ

①研究者名

石川忠晴(東京工業大学総合理工学研究科 教授)

②研究項目

- ・海外における実証実験

4. 研究成果の発表等

(1) 論文発表(原著論文)

(国内)

- 柿本貴志, 船水尚行: コンポスト型トイレにおける酸性医薬品, 塩基性医薬品の挙動, 用水と廃水(印刷中)
- 柿本貴志, 船水尚行: コンポスト型トイレにおける抗生物質の分解に及ぼすリン酸, アンモニア, pH の影響, 環境工学研究論文集, vol.43, pp. 429-436(2006)
- 伊藤竜生, 小川真吾, 船水尚行: おがくずマトリックスの乾式コンポスト型トイレにおける乾燥特性, 環境工学研究論文集, vol.43, pp. 437-442(2006)

(国際)

- S.Hotta, N.Funamizu: Evolution of ammonification potential in storage process of urine with fecal contamination, *Bioresource Technology* (in press)
- S.Hotta, T.Noguchi, N.Funamizu: Experimental study on nitrogen components during composting process of feces, *Water Science and Technology*, (in press)
- Takashi Kakimoto, Naoyuki Funamizu: Antibiotic effect of amoxicillin on the feces composting process and reactivation of bacteria by intermittent feeding of feces, *Bioresource Technology* (in press)
- Shinya Hotta and Naoyuki Funamizu: Biodegradability of fecal nitrogen in composting process, *Bioresource Technology* (in press)
- Takashi Kakimoto and Naoyuki Funamizu: Factors affecting the degradation of amoxicillin in composting toilet, *Chemosphere*, vol.66, pp.2219-2224 (2007)

- Hiroki Narita, Terence P.N. Talorete, Junkyu Han, Naoyuki Funamizu and Hiroko Isoda: Human intestinal cells incubated with activated sludge and lipopolysaccharide express Hsp90b, *Environmental Sciences*,14-1,1-16 (2006)
- F. Ben Fredj, T. P.N. Talorete, Y. Abe, M. Ozaki and H. Isoda: Evaluation of a domestic wastewater treatment system for arid and semiarid lands by *in vitro* bioassays. *Journal of Arid Land Studies* 16-3:149-156 (2006)
- Takuya Shibata, Masuo Ozaki, Hideaki Higashino, Mitchell Jones, Yukuo Abe and Hiroko Isoda : Adjustment of the Water Environment by Wastewater Treatment, *Journal of Arid Land Studies*, 15-4, 355-358 (2006)
- K. P. Oliveira-Esquerre*, H. Narita, N. Yamato, N. Funamizu and Y. Watanabe: INCORPORATION OF THE CONCEPT OF MICROBIAL PRODUCT FORMATION INTO ASM3 AND THE MODELING OF A MEMBRANE BIOREACTOR FOR WASTEWATER TREATMENT, Brazilian *Journal of Chemical Engineering*, vol.23, No.4, pp.461-471 (2006)
- K.Kakimoto, Y.Imai, N.Funamizu, T.Takakuwa and M.Kunimoto: Toxicity assessment of the extract of compost as a final product from Bio-Toilet, *Water Science and Technology*, vol.54, No.11-12, pp.421-428(2006)
- H. Narita, J. Abe, N. Funamizu, T. Takakuwa and M. Kunimoto : Toxicity assessment of constituents in wastewater treatment plant using cultured human cell lines, *Environmental Monitoring and Assessment*, DOI: 10.1007/s10661-006-9428-x
- Toshiya Aramaki, Mona Galal and Keisuke. Hanaki. Estimation of reduced and increasing health risks by installation of urban wastewater systems, *Water Science and Technology*, Vol.53,No.9, 247-252(2006)
- Tomoaki Itayama, Masato Kiji, Aya Suetsugu, Nobuyuki Tanaka, Takeshi Saito, Norio Iwami, Motoyuki Mizuochi and Yuhei Inamori: On site experiments of the slanted soil treatment systems for domestic gray water, *Water Science & Technology*, Vol.53, No.9, pp.193-201(2006)
- M.A. Lopez Zavala, Naoyuki Funamizu: Design and Operation of the Bio-Toilet System, *Water Science & Technology*, Vol.53, No.9, pp.55-61(2006)
- X.C. Wang and P.K. Jin. Water shortage and needs for wastewater re-use in the north China. *Water Science & Technology*, Vol.53, No.9, pp35-44(2006)

(2) 特許出願

平成 18 年度特許出願: 0 件 (CREST 研究期間累積件数: 3 件)