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に関する研究

研究代表者
船水　尚行

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に関する研究

北海道大学・工学研究科環境創生工学専攻サニテーション工学研究室　船水尚行

1．新しいサニテーションシステムの必要性[1),2),3)]

a)　いま，世界は水の危機に直面している

なぜ，水の危機か．なぜ，水の危機であるか，その現状を示す情報を以下に箇条書きにする．

- 2000年時点で世界中で約10億人の人々が安全な飲み水を得ることができない．
- 約24億人の人々が適切な衛生設備を持たない．
- もし，現状の衛生・下水道整備方策を続ければ，事態はさらに悪化し，25年間に適切な衛生状態にない人口はさらに20億人増加する．この増加は主に開発途上国の都市域で生じ，水問題の解決が無ければ，これらの人たちは貧困に苦しめられる運命にある．
- 世界で発生する排水の90％は不完全な処理または全く処理されないで排出されている．
- 開発途上国における疾病の80％，死亡原因の25％は汚染された水に起因している．

国連では，貧困の撲滅を目標に，水，食料，衛生，エネルギーの各分野に達成目標を設定している．水分野では2015年までに，これらの人口を半減させることを目標にしている．新しい水サニテーションシステムが必要とされている．

b)　世界経済の視点

世界中に下水道を整備することは，全世界の経済レベルをはるかに超えていることが認識されており[4)]，上記の問題への対応について下水道では解決策とならないのも現状である．特に，下水道建設費用の約70％は下水管路に必要となっている．また，ドイツの例ではこれから下水管路の更新・維持管理に約1000億ユーロ必要である試算が出されている[4)]．下水道の維持管理費用（特に管路の維持管理費用）を将来にわたり確保することが重要な課題であると考える．すなわち，管路を必要としないシステムが求められている．

c)　持続可能な水循環の視点

流域の限られた地点で取水し，それを配水・水利用・集水した後，処理後特定の場所に放流することで，地域の水循環構造を歪めていると考える．

また，浅層地下水レベルの低い地域では，下水管からの漏れが生じ，下水管が土壌汚染源となっている．逆に，地下水位が高い地域では，地下水が下水管路に浸入し処理水量が増加する場合もある．この視点においても管路で「集めない」システムが必要である．

d)　水資源管理

都市域において，上質の水道水のほんの一部しか飲料用に用いられておらず，多くはトイレの洗浄や散水に用いられ，相当量の飲料可能水を下水処理場までの汚濁物質の輸送のために利用している．このような飲料可能な水道水を単に糞便のような汚濁物質を輸送するために使用できる地域は極めて限定されている．水を用いない，「集めない」サニテーションシステムが必要とされている．

e)　栄養塩の管理・再利用の視点

肥料要素である栄養塩（リンや窒素）のうち，リンが枯渇が心配されている資源であり，リンの回収が求められている．また，逆に現状では，排水中のリンや窒素が湖沼等において富栄養化を引き起こしている．肥料要素を回収し，農業へ循環するシステムが必要とされている．

しかし，下水処理において発生する汚泥には有用成分と同時に有害成分も含まれているため，有効利用が難しい．

家庭排水の発生源別汚濁物質負荷を整理すると，し尿の負荷は有機物で約44％，アンモニア態窒素で約97％，リンで約80％を占める．し尿（し尿由来の排水を通常Black water）を分離・処理すれば栄養塩の循環が容易となる．

すなわち，排水を発生源で分離し，処理する，「集めない」システムが望まれる．

f)　処理技術の視点

あたらしいサニテーションシステムの構築には家庭から排出される排水をどのように処理すべきかをその発生形態から検討する必要がある．

「水中に存在する処理対象物質の種類がシンプルなほど処理は容易であり，多様な排水の発生源から成る排水より単一発生源からの処理のほうが容易である.」という水処理の原則を想起すれば，もう一度排水の発生形態から処理システムを検討することは，すべての国に共通な新しい排水処理システム開発の出発点ともなると考える.

し尿は有機物濃度が高く，かつリン，窒素を高濃度に含んでいることを述べた．し尿以外の排水では，台所と洗濯機からの有機物負荷が大きい．このため，し尿以外の排水のうち処理が必要な排水として，台所ならびに洗濯機からの排水があげられる．台所と洗濯機以外の雑排水はその負荷が小さい.「混ぜない」システムが水処理の原則に合致していると考える.

g)　微量有害物質の管理の視点

循環型社会を構築し，物質や水の循環を行う場合に，注意する必要があるものに微量汚染物質がある．水に関連するものとしては，人間が排出する女性ホルモンや医薬品がある．この女性ホルモンや医薬品は排出源における制限が難しいものであり，このような微量汚染物質の現状の下水道システムにおいて処理するためには多くのエネルギーと費用がかかる．このような物質の管理にもし尿を分離して処理・再利用する「混ぜない」,「集めない」システムが必要である.

h)　水にかかわる文化の視点

水の使い方，し尿の取扱，水との関わり方は各地域において独自の文化として発展してきた. そして，し尿に関する考え方も宗教・文化と密接に関係している．現状の下水道システムは，水に関わるシステムを世界中同一のものにすることにより，これらの水に関わる文化を画一的なものすることに他ならない．これは持続可能なものとはいえず，多様なシステムが必要である.「混ぜない」,「集めない」コンセプトは多様なシステム構成の可能性を提供する.

2.「集めない」,「混ぜない」排水処理（排水分離・分散型処理）の利点[5)]

分離・分散型排水処理システムのイメージを図1に示す．このシステムでは家庭からの排水を3つに分離する．すなわち，排水はし尿から成る Black water，負荷の高い雑排水（台所排水と洗濯機排水）より成る Higher-load gray water，ならびに負荷の低い雑排水（洗面，風呂，シャワー）Lower-load gray water に分離し，処理する．特にトイレからの排水は従来型システムとは異なり，水を輸送手段としないことから，排水というよりは，有機性廃棄物として捉える．これは，トイレを水洗型からバイオトイレ(コンポスト型トイレ)に転換することにより達成される.

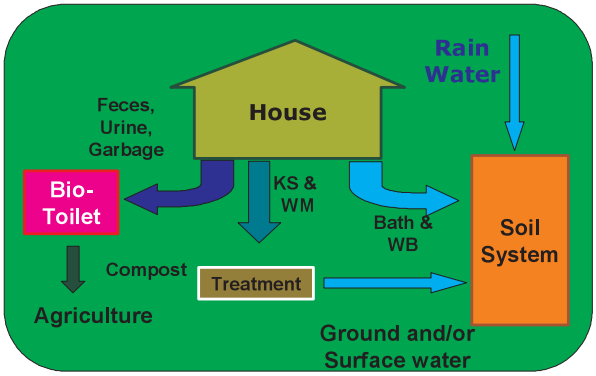

図1　「集めない」,「混ぜない」排水処理システムのイメージ

「集めない」,「混ぜない」排水処理システムの利点を水系や土壌系の汚染，資源循環，ならびに健康リスクのなどの多くの観点から整理すると以下のようになる：

a)　し尿の輸送に水を用いないことから，水消費量を減少させ，水需要構造を転換することができる.

b)　し尿に多く含まれる栄養塩類を水循環過程から分離でき，水質保全効果をもつ.

c)　し尿は安定な有機物源（コンポスト）に変換され，コンポスト内に保持されている栄養塩を農業利用できる.

d)　し尿に多く含まれる微量有害化学物質（ホルモン類，医薬品残渣）を水循環系から分離できる．また，化学物質の拡散を防ぐことが可能となる.

e)　病原性微生物・有害物質が水循環系から分離されることにより，水利用に伴う健康リスクを低減する.

f)　処理すべき雑排水量が減少し，処理装置のサイズが小さくなり，運転コストも低減. また，栄養塩のレベルも低下.

g)　処理水を土壌系に排出することから地下水

位の維持をはかり，再利用も可能となる．

h) パイプを必要としない（下水道施設建設の70％を管路費用が占める）．

３．研究目的：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

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．

本研究では，図１のような「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．本研究では（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バイオ＋エコ技術を用いた適切な処理の実現を目指す．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ります．

４．研究手法・体制

本研究のゴールを達成するために，参加研究機関ごとに研究を実施する要素研究とアドホックグループによる総合研究を行なう．本申請のような新しいサニテーションシステムの開発とその導入に関する研究では，新システムを構成する各ユニットの開発研究と新システムの流域の水・物質循環に与える影響の評価手法の開発といった従来型の要素研究のみでは不十分と判断し，各研究機関からの参加者からなるアドホックグループによる総合研究を組織する．これは，新システムを構成する各ユニットをシステムとして機能させた場合の，物理的な性能評価に加えて，社会システム・生活システムとしての総合評価や日常の生活パターン変動への対応性や維持管理性の評価といった極めて多角的な検討を同時にかつ実証的に行なう必要があるためである．

図２に示したように，本プロジェクトを支えるハードウェアは（１）家庭等から排出されるし尿，生活雑排水ならびに厨芥を発生源で処理する分離・分散型処理システム（要素研究―１），（２）処理システムで生産されるコンポストの利用技術（要素研究―２）である．ソフトウェアとしては，（３）サニテーションシステムの水・物質循環機能を時空間的に評価，監視するためのモニタリング技術と健康リスク評価技術（要素研究―３），ならびに（４）新システム導入効果を水循環・物質循環の観点から流域スケールで評価する手法（要素研究―４）が必要である．加えて，新システムをアジア諸国のある地域に導入していくための戦略も重要である．この導入戦略は地域の社会システムとの関連が極めて強く，かつ，一般的な理論構築よりも，学際的かつ実証的にケースタディを通して検討していく方が適切と判断し，アドホックグループによる研究（アドホックグループ研究―２）として位置付ける．また，国内においても，分離・分散型処理システムを設置した実証施設を建設し，要素研究で得られた知見を総合的にシステムとして実証することも行なう（アドホックグループ研究―１）．

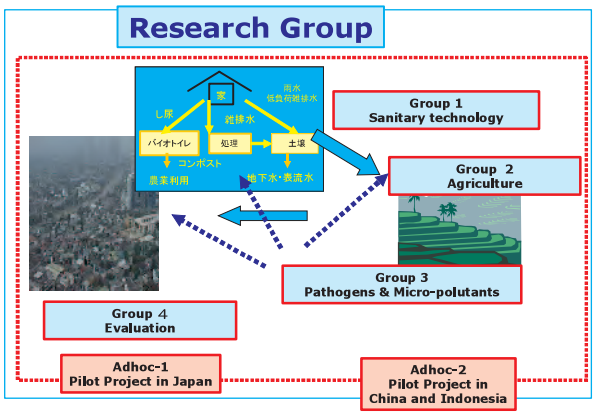

図２　研究体制

５．研究成果

本研究で実施している多くの研究のうち，本講演では，（１）霞ヶ浦流域における新しいシステムの導入効果の試算，（２）バイオトイレに関する研究，（３）秩父で実施している実証実験について紹介する．

（１）霞ヶ浦流域における新しいシステムの導入効果の試算[6)]

（１―１）設置のシナリオ

本研究では，下水道やバイオトイレなどの整備を

進めた場合に，霞ヶ浦へ流入する負荷量や霞ヶ浦の水質がどのように変化するかシミュレーションモデルを用いた検討を行った．下水道や高度処理合併浄化槽，バイオトイレ（し尿）＋傾斜土層処理システム（雑排水処理）を以下の割合で整備する６つの代替案を設定し，現況との比較から各排水処理システムの負荷量削減効果を把握した．

案１：下水道整備率 100％

案２：現況での下水道未整備地域すべてに高度処理合併浄化槽を設置

案３：現況での下水道未整備地域すべてにバイオトイレ＋傾斜土層処理システムを設置

案４：バイオトイレ＋傾斜土層処理システム設置率 100％

案５：現況での下水道未整備地域すべてにバイオトイレのみ設置

案６：バイオトイレのみ 100％設置

（１―２）負荷削減効果試算

本研究では，霞ヶ浦流域を対象として，各排水処理システムを整備することによる湖沼への流入負荷量や湖心水質の変化を把握した．図３に示した COD 濃度の低下量で各案を比較すると，バイオトイレのみを設置した場合の効果が最も低く，続いて，案１の下水道整備，案２の高度合併浄化槽，そして，最大の効果が期待できるのが案３，案４のバイオトイレ＋傾斜土層処理法という結果であった．

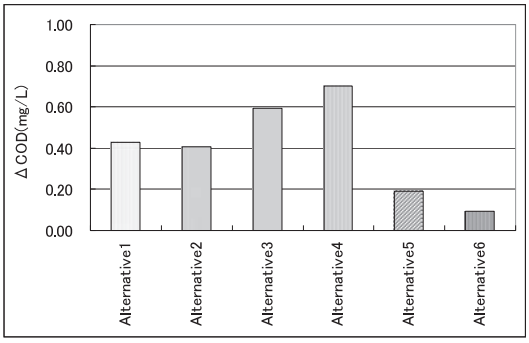

図３　各代替案による湖心水質改善効果

窒素，リンの観点からはみると，以下のように整理される：

- 下水道は，TN，TP 全てで処理能力が高く，負荷量削減効果が高い．特に，霞ヶ浦流域の処理場はリンの高度処理を行っているため，リンは約 95％除去されている．また，いくつかの下水処理場では，処理水を流域外へ放流しているため，他の処理方法と比較して流域内の河川，霞ヶ浦へ流入する水量は少なくなる．
- 高度処理合併浄化槽は，下水道よりはやや処理能力が劣るが，従来の合併処理浄化槽より TN，TP の除去率が高いため，湖心水質は下水道整備の場合と同程度改善される．
- バイオトイレは，し尿を完全に取り除くことができるため TN，TP の削減効果は非常に高い．また，水を使用しないため，水消費量を削減することができる．

（２）バイオトイレに関する研究

（２―１）研究課題

し尿の分解過程の把握は，(a) 有機物，(b) 窒素・リン等の栄養塩，(c) 病原性微生物，(d) 微量化学物質ならびに (e) 水分といった各種パラメータにより評価する必要がある．また，し尿分離型トイレを前提として，尿の処理技術を検討することも必要である．本研究では，検討課題を次のように整理している：

1) コンポスト反応に関わる微生物の分解活性に関する知見を得る
2) 糞便中有機物の解析方法の開発
3) コンポスト反応の数学モデルの開発
4) コンポスト反応の温度影響の把握とモデル化
5) コンポスト反応に与える含水率の影響の検討
6) コンポスト反応における有機性窒素の形態変化過程の把握
7) 病原性微生物の不活化過程の実測とリスク評価
8) コンポストに残存する有機物特性の評価
9) 水分の移動速度（乾燥速度）の測定と乾燥工学の知見をもとにしたモデル化
10) コンポスト型トイレの運転管理指針と設計法の確立
11) 微量化学物質（ホルモン類と医薬品）のコンポスト過程における分解過程のモデル化
12) 尿の処理：尿中微量汚染物質の物理化学的方法による酸化分解法の確立．

（２―２）研究の進捗状況

上記の 12 の研究項目に対し，現在（１）～（９）の項目については，ほぼ終了し，コンポスト型ト

イレの運転管理指針と設計法の確立を行うことができた．これらの成果は海外の学術雑誌に論文として公表されている．（６）窒素形態の変化については，機構の解析ののデータ取得がほぼ終了した段階である．(11) 微量汚染化学物質の分解過程についてはデータ取得中である．(12) 尿の処理のうち，オゾンを用いた医薬品の酸化処理についても，反応過程のデータ取得がほぼ終了した段階である．また，電気化学的方法を用いた方法について，実験を開始した段階である．

（２―３）主な研究成果

上記 12 項目のうち，現段階で主要な結果が得られているものついて整理して示す．

１）コンポスト反応に関わる微生物の分解活性[7)]

コンポスト反応に関与する微生物の反応活性を TS，VS，COD により評価し，有機物負荷が反応過程を変化させることはないことを確認した．また，糞便の質量の約 80％は水分であること．コンポスト反応による水以外の物質の減量は約 56％可能であること，COD 単位でみると減量率は約 70％であることが分かった．このことを構成員４名の家族に適用すると，１年間に約 15kg の固形物がコンポストトイレに残留することが分かった．

２）糞便中有機物の解析方法の開発[8)]

この研究では，糞便中有機物の反応工学的観点からの分類方法を提案し，実際に有機物の分類を行った．その結果，糞便中有機物の約80％が生物分解可能有機物，20％が極めて安定な有機物であることを確認し，この組成については個人差（摂取する食品差等）が少ないことも確認された（図４）．また，糞便中有機物は生物分解の過程で一度加水分解されることが必要なことも明らかとなった．

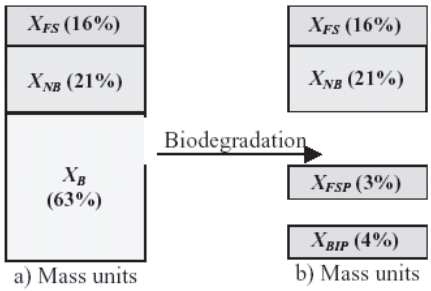

図４　糞便中有機物の分類結果

３）コンポスト反応の数学モデルの開発[9)]

この仕事では，トイレ中で観察される糞便の好気的分解過程（コンポスト過程）の数学モデルの開発を行った（図５）．この方法は有機炭素の分解過程を，(a) 糞便中有機物の加水分解，(b) 加水分解された有機物を用いた微生物の増殖，(c) 微生物の死滅の３つのプロセスによって近似したものである．また，モデル中の化学量論係数，反応速度係数を実験結果を用いて同定した．最後に，糞便の間欠的供給過程における反応速度のシミュレーションと実測結果の比較を行い，モデルの妥当性を検証した．

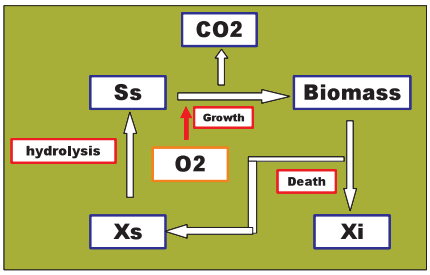

図５　コンポスト反応のモデル

４）コンポスト反応の温度影響の把握とモデル化[10)]

この項目では，糞便の好気的分解反応に与える温度の影響を OUR（酸素消費速度）の実測値と微生物の最大比増殖速度を変化させたシミュレーション結果を比較することによって検討した．検討した温度範囲は 20℃～70℃の範囲であり，反応速度定数を mesophilic と thermophilic の範囲をカバーしている．その結果，温度と微生物の最大比増殖速度の関係はアレニウス式により表現可能であることが示された．

５）コンポスト反応に与える含水率の影響[11)]

この研究では，thermophilic 範囲の糞便の好気的分解反応に与える含水率の影響を実験的に検討した．反応への影響の評価は TS，VS，COD の変化，含水率が上昇した場合に嫌気性反応が生じることから，嫌気性反応の指標としての有機酸の測定を実施した．また，同時に OUR と二酸化炭素生成速度の時間変化の実測も行った．その結果，含水率 65％を境とし，65％以上の領域では反応装置内に嫌気的な部分が形成され有機酸生成ならびに不快な臭気の発生が生じることを確認した．

すなわち，これまでの検討（有機物負荷，温度影響，含水率影響）から，コンポスト型トイレの運転指針として，有機物負荷が想定される運転条件範囲では問題を生じることはなく，温度と含水率の管理幅を求めることができた．

6）コンポスト反応における窒素の形態変化[12)]

コンポスト反応において，有機性窒素が分解され，アンモニア態窒素へと変化する．また，反応装置からの排気中にアンモニアガスが含まれることから，コンポスト化反応槽の液相のアンモニア態窒素，pH 変化，気相との平衡関係など，窒素に関わる反応過程の整理とそれぞれの反応速度の実測を，コンポスト回分過程における窒素成分（全窒素，有機態窒素，アンモニア態，硝酸態，亜硝酸態窒素）の測定により実施した．その結果，生物反応による有機態窒素からアンモニア態窒素への変換，反応槽中の液相 pH の増加，アンモニアガス濃度の増加のそれぞれの事象を実測した．これらの過程の進行には時間遅れが生じていることが確認され，現在その理由について検討中である．

7）病原性微生物の不活化とリスク評価[13)]

コンポスト反応過程における病原性微生物の不活化過程を大腸菌群数（バクテリアの指標），バクテリオファージ（ウィルスの指標）数の経時変化を実測することにより検討した．その結果，微生物，ウィルスの不活化過程は一次反応モデルにより表現することが可能であり，反応速度定数に与える温度影響はアレニウスプロットにより整理できることが示された．

この不活化過程のモデルと実際のトイレの温度分布を用いて反応槽中のコンポストを取り替える際の健康リスク評価を実施し，所定のリスクレベルに抑えるために必要な反応温度，時間ならびに撹拌回数の関係を得た（図６）．

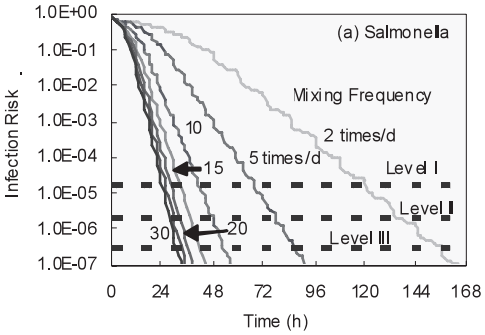

図６　健康リスクと温度，撹拌回数・反応時間の関係

8）コンポストに残存する有機物特性の評価[13)]

コンポスト中に残存する有機物の性質を土壌，下水処理水，環境水と比較した．その結果，残存する有機物は土壌中有機物に近い特性を有していることを確認した．また，反応過程における有機物特性経時変化を測定した結果，糞便中有機物の反応は 24 時間程度で終了するが，その後約 10 日間かけて有機物特性が変化し，安定化に向かうことが示された（図７）．

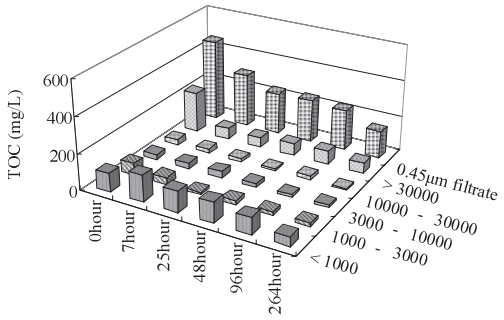

図７　コンポスト過程における有機物特性の変化

9）水分の移動速度（乾燥速度）の測定と乾燥工学の知見をもとにしたモデル化[14)]

トイレからの水分蒸発速度推算法を開発するために，実験室スケールのおが屑の乾燥実験と実トイレからの蒸発速度の実測を行った．その結果，単位面積・単位時間あたりの水分乾燥速度は

［単位面積・単位時間あたりの水分乾燥速度］＝［乾燥速度係数］×（［反応槽温度で決まる飽和蒸気圧］－［供給空気の飽和蒸気圧］

で表現でき，乾燥速度係数の無次元表示であるシャーウッド数は換気量で定まるレイノルズ数と供給空気物性により定まるシュミット数の関数で整理できることが示され，室内実験結果から実装置の水分蒸発フラックスが推定可能となった．また，トイレを設置する地域の気候条件により，供給空気の物性が異なることから地域特性を考慮したトイレの設計が可能となった．

10）コンポスト型トイレの運転管理指針と設計法の確立[15)]

上記の実験結果，解析結果よりコンポスト型トイレの運転・管理指針ならびに設計指針を得ることができ，トイレの設計が可能となった．

コンポスト型トイレ反応槽の適切な運転管理範囲として，反応槽温度・含水率・撹拌回数について図８のような所定の範囲を定めることができた．

次に，コンポスト型トイレの設計は，水分負荷によって設計する必要性を明らかにし，トイレの表面積と必要体積を求める方法をし尿の発生パターンと水分の移動速度推算法を用いた計算法を開

発した．

11）微量化学物質のコンポスト過程における分解過程のモデル化とバイオアッセイ[16)]

コンポスト過程における環境ホルモン物質（女性ホルモン類）と医薬品の分解過程の実測を行い，これらの物質を分解することが可能であることを示した（図９）．現在は反応条件の反応速度に与える影響を検討し，分解過程のモデル化を検討している．

12）尿の処理[17)]

微量汚染物質管理の方策として，尿分離型トイレを用い，分離した尿中の医薬品をオゾン処理により酸化分解できることを約 10 種類の医薬品について実験的に確認した．尿中医薬品のオゾン処理の特徴を検討した結果，(a) 医薬品間の競合作用は認められないこと，(b) 尿中の不明な物質によりオゾン消費が律速されること（尿素，高濃度のアンモニア，その他のイオン類のオゾン処理への影響は認められない）が明らかとなった．

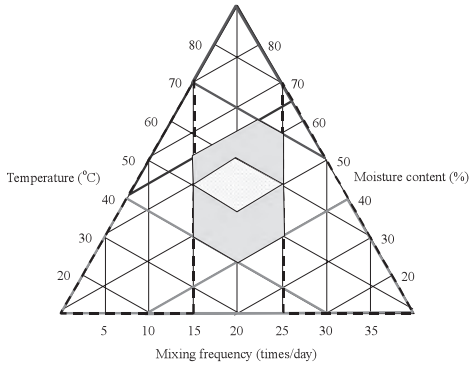

図８　コンポスト型トイレの適正運転条件範囲

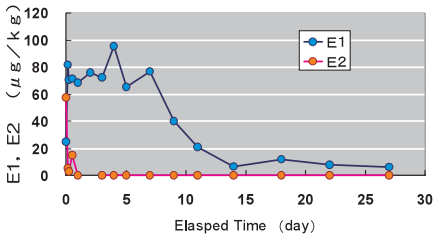

図９　コンポスト過程における女性ホルモンの分解

（3）秩父で実施している実証実験

（3―1）実証試験の目的

実証実験の目的は（1）分離・分散型処理システムを設置した実証施設を建設し，要素研究で得られた知見を総合的にシステムとして実証する，（2）事例研究を通して，地域特性に応じた新システムの導入方策を検討する，（3）分離分散型処理システムが公共施設に設置されたり，コミュニティー単位で利用される場合を想定し，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．

この目的を達成するため，(A) 小貝川実証実験（特定非営利活動法人 NPO 小貝川プロジェクト 21），(B) 名護実証実験（ダム水源地環境整備センター），(C) 秩父実証実験（北海道大学，国立環境研究所，お茶の水女子大学）を実施してきた．特に，処理特性については気候条件に大きく影響を受ける．沖縄の気候条件が東南アジアの状況に近いことを利用し，秩父や札幌に設置されている施設の処理特性と比較することも目的の一つである．

秩父市における実証実験では次の事項について，総合的な検討を行うことを目的としている．

- 分離・分散型処理システム導入の仕組み作り
- 総合的にシステムとして評価・実証する（エネルギー・有機物・栄養塩・病原微生物，おが屑性状）
- 分散型システムの維持管理方策の提案（センサーリング＋情報＋維持管理のための社会システム）
- コンポスト型トイレ（し尿と厨芥）＋生活雑排水処理の処理性能，負荷変動への対応，維持管理性
- 使用者の評価，自治体としての評価
- 流域の水管理としての評価

（3―2）現在の実証研究進捗状況

図 10 のような実証実験施設を秩父市山田　橋本光夫氏宅に設置し，平成 17 年 4 月より総合的にデータ取得を行っている．分離・分散型処理システム導入に関する仕組み作りでは，イノベータという役割を定義し，イノベータを中心とした自治体・住民・研究者の役割・導入への実施を検討している．なお，イノベータ役を横田が担当している．施設特性の総合的把握ではコンポスト型トイレについて，エネルギー・有機物・おが屑性状の把握（担当：伊藤），病原性微生物の把握とリスク評価（担当：大瀧），グレイウォータ処理施設の運転・データ取得（担当：板山），インターネットを利用したセンサリング＋情報管理（担当：板山，伊藤）を実施している．使用者・自治体評価に関しては，イノベータ（担当：横田）を経由

した使用者・住民との関係構築や地域システムの全体像の構築を行っている．

（A）分離･分散型処理システム導入の仕組み作り

施設設置場所選定過程において，イノベーション（人々に広く受け入れられ、社会に広まる）には、「安心・安全・信頼」を実現するシステム全体の設計思想、メンテナンス、バイオマス循環、バリューチェーン全体の最適化（Optimization）をリードして行くイノベーターの存在が欠かせないとことが確認された．特に，イノベーターを，「地域の自然と文化を踏まえたSocialモデル、コミュニティと連携した「人と自然の良い循環」をプロデュースし，生活者に優しい，地域の特色を活かした持続可能な仕組み作りを担う役割を果たすもの」との定義を確立した．この，イノベーターが，「水を中心とした自然循環を重視する社会システムをプロデュース」という役割を果たし，複数の主体（自治体，生活者，イノベーター，大学と研究機関）がビジョンを共有し，かつ社会に役立つ成果を残していくことを牽引していけることを確認した．地域社会コミュニティ･住民にとっての長期的な価値を実現するパートナーとして、バリューチェーン全体を観た上で最適な仕組みをプロデュースしていくイノベータは，実証実験が部分最適化しないように研究者に外部の視点を齎す社外取締役の役割も果たしていると考えている．

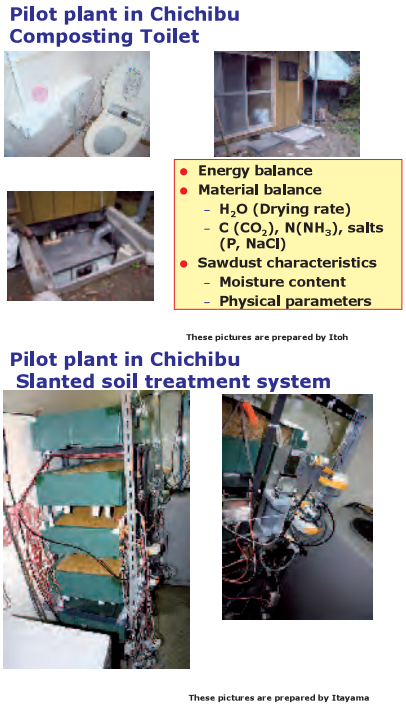

図 10　実証実験施設

（B）分散型システムの維持管理方策の提案(センサーリング＋情報＋維持管理のための社会システム）

センサーリング項目の項目としては，1）反応槽内の含水率，2）供給空気の温度，湿度，3）排気空気の温度，湿度，4）反応槽温度，5）排気中二酸化炭素濃度,6)排気中アンモニアガス濃度,7)全消費電力量，8）ヒータ消費電力量を測定している．測定データはインターネットを通して北海道大学，国立環境研に送られている．

要素研究により，コンポスト型トイレの適正な運転条件は反応槽温度，反応槽含水率，撹拌回数の組み合わせにより定められることが明らかとなっているので，この実証研究では含水率の連続測定の試行を行っており，含水率計の出力と実際の含水率測定結果の比較検討も実施している．

（C）コンポスト型トイレ

実証実験では，エネルギーのバランスを実測し，コンポスト型トイレのエネルギー構造を把握し，エネルギーインプットを最小化するための方策を検討している．また，物質のバランス（水分，有機物，窒素）も測定し，反応速度・反応量を把握することにより，要素研究により得られた反応機構の確認を行っている．また，病原性微生物濃度の測定も定期的に実施している．特に，水分管理が重要であることから，乾燥速度の推算も行っている．図 11 にエネルギーのバランスを示すデータを示す．また，おが屑の粒径分布・形状，保水率・保気率等のおが屑の物理特性の測定も実施している．

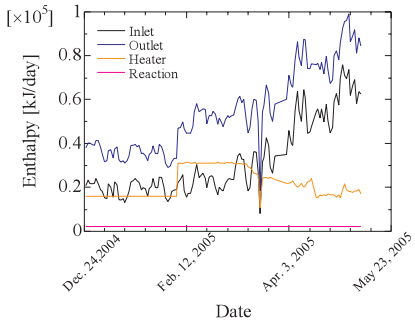

図 11　エネルギーバランス

（D）雑排水処理システム

傾斜土壌処理システムは窒素処理能が高くないものの，有機物が多く窒素含有率が低い雑排水を処理する場合には，コンパクトで省メンテナンス

なシステムとして極めて有効なシステムであることが明らかとなった．そのため，この傾斜土壌処理システムを用い，秩父市における生活雑排水の現場実証試験を開始した．原水貯留槽（600L）と自動サンプリング装置も設置した傾斜土壌処理システム（４段）を FRP 製の小屋のなかで運転した．なお，自動サンプリング装置は１日平均化された原水および各段からの処理水を定期的に採取し冷蔵保存できるようになっている．

今回の試験ではミミズの接種はおこなわず処理を開始し，流入量は 144L/day に設定した．実雑排水の原水濃度は BOD で約 50 ― 200mg/L の間で変動したが，３，４段目の処理水は安定しており，３段目でも 20mg/L 以下となった場合もあった．COD 除去率も変動するが，１段目で，平均約 35%，２段目で約 50%，３段目で 66%，４段目で 75% となり，３段目で７割近い除去が可能であることが示唆された．これらの結果から，お風呂の水を含む家庭雑排水の場合にも３段の傾斜土壌処理システムで実用になるシステムを構成できる可能性が示された．

表１に示したように，各段での有機物除去はおおむね均等に行われ良好であったのに対して，T-N 除去率は低かった．窒素除去に関しては硝化が後段で起ってはいるものの，アンモニア態窒素の流出も確認された．台所排水の場合には排水を貯留することなく，そのまま傾斜土壌処理システムに流入させているため，土槽内の水位変動が大きく一種の間欠バッキ状態となっており，嫌気好気が繰り返されることで硝化脱窒が促進され窒素除去率が高かったが，秩父の装置ではタンクに貯留したのち定常的に流入させているため，嫌気好気の繰り返しがなく窒素除去率が低かったとが考えられた．このように硝化脱窒のためには有機物の嫌気好気の適正な組み合わせが必要であるが，お風呂の水も同時に処理する場合には貯留タンクは不可欠であるので，窒素除去のためには傾斜土槽内の構造の改良や間欠流入制御方式の導入などの適正化が必要であると考えられた．また，秩父の実証試験ではミミズを接種しておらず，ミミズの効果も大きいと考えられるため，今後ミミズを接種し硝化脱窒への効果について検討する．

表１　各段毎の平均除去能（硝酸態窒素とアンモニア態窒素は流出水中の濃度を記載）

	１段目	２段目	３段目	４段目
COD（%）	27.7	21.7	23.0	19.3
BOD（%）	36.9	26.4	34.4	29.1
全窒素（%）	7.9	6.2	8.6	-0.6
全リン（%）	24.3	15.9	26.2	-7.2
SS（%）	17.7	21.1	35.6	19.5
NH_4-N（mg／L）	3.1	3.5	3.5	2.6
NO_3-N（mg／L）	0.16	0.08	0.09	1.7

４．類似研究の国内外の研究動向・状況と本研究課題の位置づけ

国内外における新しいサニテーションに関する研究を実施している主なグループは（１）Swiss Institute of Aquatic Science and Technology, Eawag を中心とするスイス，（2）Technical University Hamburg-Harburg を中心とするドイツ，（３）Wageningen University を中心とするオランダ，（４）Swedish Institute for Infectious Disease Control 等のスウェーデンのヨーロッパのグループがあげられる．日本国内ではこのテーマの研究を活発に進めている本研究チーム以外には極めて少ない．本研究の特徴を整理すると：

(1) 本研究では科学的な側面からは，水循環系における医薬品をはじめとする微量汚染物質の管理のためのサニテーションシステムという視点を始めて導入している．
(2) 尿の処理に関する研究において，酸化処理による医薬品やホルモン類の制御を主要な研究対象としている．
(3) 糞便やブラックウォーターの処理における特徴はコンポスト型トイレの開発とその反応工学的な検討である．本研究で開発しているコンポスト型トイレはヨーロッパにこれまで無かった形式のものである．また，コンポスト過程における多様な成分（医薬品・ホルモン類・有機物・窒素・水分）の挙動を同時に扱い，かつ，数学モデルの構築を行っているところにも特徴を有している．
(4) グレイウォータの処理に関しては，ヨーロッパのグループは人工湿地に関する検討が多い．一方，本研究グループにおいては傾斜土壌法のような土壌処理ならびに中空糸膜による膜分離生物処理法の検討を実施している．

(5) サニテーションシステムの受容ならびに導入戦略に関する検討は事例研究を通して実施されている．本研究の特徴を整理すると，1）アジアを対象とし，宗教・文化・社会システムに注目し，イスラム圏においてもその可能性をイスラム神学校に施設を設置して検討していること，2）自治体・市民・学識経験者を結ぶイノベータ（地域の自然と文化を踏まえた社会モデル，コミュニティと連携した「人と自然の良い循環」とプロデュースする役割）いう概念を導入していることに特徴を有している．

本研究で展開しようとしているオガクズを使った好気式のコンポストトイレと雑排水の土壌処理を軸としたSustainable Sanitationシステムは、臭気を発生させず、比較的限られたスペースで済むという点で、発展途上国の衛生環境改善のための一つの新しい代替案になるものと思われる。

(6) バイオトイレにおける病原微生物の挙動を考察したものはほぼ皆無である．バイオトイレを介するリスク評価については，類似研究は，ほとんど皆無であり，本研究成果の重要性は高いと考えられる．

(7) 本研究グループのように、途上国地域を対象として包括的な視点から行っているグループは、EAWAG（スイス）のSANDECなどヨーロッパのいくつかの研究グループに限られている。また、研究項目(c)はQMRAとLCAを利用した全く新しい試みとして評価されるものである。

５．引用文献

1) Naoyuki Funamizu：Bio-toilet：A key technology for sustainable sanitation. Water Supply, Sanitation and Health：Public Health Aspects, Commission on Sustainable Development, 12th Session, UN Department of Economic and Social Affair, New York, Tuesday 27 April 2004

2) Naoyuki Funamizu：Development of sustainable sanitation system and its implementation to Asian countries - an interdisciplinary research project, Keynote Lecture, IWA Conference Xi'an 2005, Future of Urban Wastewater Systems - Decentralization and Reuse, May 18-20, 2005, Xi'an, China

3) Naoyuki Funamizu：Developing Sustainable Sanitation System based on the concept："don't collect" and "don't mix" wastewater, Keynote lecture at East South Asian Water Forum on September 1st, 2005

4) Wildere P.A. (2001). Decentralized versus centralized wastewater management. In Decentralised Sanitation and Reuse (edited by Lens, P., Zeeman G. and Lettinga G.), pp.39-54, IWA Publishing, London U.K

5) 船水尚行：Sustainable Development for Human and Environment, 第18回環境工学連合講演会講演論文集，pp.135-140 (2003)

6) Tsuyako FUJII, Masahiro TAKAHASHI, Kohichi FUJITA：Study on the effects of Bio-toilet on water environment in Kasumigaura Basin, IWA International Conference 2005 Xi'an 2005.5.18～19

7) ６．主要成果論文９）

8) ６．主要成果論文43）

9) ６．主要成果論文17）

10) ６．主要成果論文16）

11) ６．主要成果論文３）

12) ６．主要成果論文 10)，13）

13) ６．主要成果論文 33）

14) Ryusei Ito：Studies on biodegradation of estrogenic chemicals and drying kinetics of sawdust for composting-toilet system, and development of remote measuring methods on demonstration tests, IWA International Conference 2005 Xi'an 2005.5.18～19

15) Miguel Angel Lopez Zavala, Naoyuki Funamizu：Design and operation of the bio-toilet system, IWA International Conference 2005 Xi'an 2005.5.18～19

16) ６．主要成果論文4)，5)，6)，11)

17) Linh Vu NGUYEN：Treatment of high concentration of pharmaceuticals in urine by ozonation process, Master Thesis for Hokkaido University, 2005

６．主要な成果報告等

（１）論文（国内 10 件，海外 36 件）

1) N. Nakagawa, M. Otaki：Application of microbial risk assessment on a residentially operated Bio-toilet, J. of Water and Health (in press)

2) H. Narita, M.A. Lopez Zavala, K. Iwai, R. Ito, N. Funamizu：Transformation and Characterization of Dissolved Organic Matter during the Thermophilic Aerobic Biodegradation of Faeces, *Water Research*, (in press)

3) H. Isoda, T.P.N. Talorete, J. Han, K. Nakamura：Expressions of Galection-3, Glutathione S-transferase A2 and Peroxiredoxin-1 by Nonylphenol-incubated Caco-2 Cells and Reduction in Transepithelial Electrical Resistance by Nonylphenol, *Toxicology in Vitro*, (in press)

4) M.A. Lopez Zavala, N. Funamizu：Effect of Moisture on the Composting Process in the Bio-Toilet System, *Compost Science & Utilization*, Vol.13, No.3, pp.208-216 (2005)

5) H. Narita, N. Funamizu, T. Takakuwa：Inert Soluble Organic Matter in Return Flow form Sludge Treatment Process and Its Control by Coagulation, *Environmental Engineering Science*, Vol.22. No.5, pp.689-698 (2005)

6) H. Narita, I. Isshiki, N. Funamizu, T. Takakuwa, H. Nakagawa, S-I. Nishimura：Organic Matter Released from Activated Sludge Bacteria Cells during their Decay Process, *Environmental Technology*, Vol.26. pp.433-439 (2005)

7) 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)

8) 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)

9) N. Funamizu, T. Takakuwa：Mathematical Model for Describing Reactions of Residual Chlorine with Organic Matter in Reclaimed Wastewater, Water Science and Technology, Vol.50, No.2, 195-201 (2004)

10) M. A. Lopez Zavala, N. Funamizu, T. Takakuwa：Biological activity in the composting reactor of the bio-toilet system, *Bioresource Technology*, Vol96/7, pp805-812 (2004)

11) 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)

12) 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)

13) H. Narita, N. Funamizu, T. Takakuwa. M. Kunimoto：Role of Hydrophilic Organic Matter on Developing Toxicity in Decay Process of Activated Sludge, Full paper in CD-ROM, 4th World Water Congress, Marrakech, Morocco (2004)

14) M.A. Lopez, N. Funamizu, T. Takakuwa：Nitrogen Transformations in the Composting Reactor of the Bio-Toilet System, Full paper in CD-ROM, 4th World Water Congress, Marrakech, Morocco (2004)

15) T. Kakimoto, Y. Imai, N. Funamizu, T. Takakuwa, M. Kunimoto：Toxicity Assessment of the Extract of Compost as a Final Product from Bio-Toilet, Full paper in CD-ROM, 4th World Water Congress, Marrakech, Morocco (2004)

16) W. Ruangyuttikarn, P.R. Hawkins, Y. Peerapornpisal, T. Itayama：Comparison of Method for Detecting Microcystin and Microcystin-Producing Cyanobacteria, *Chiang Mai University Journal*, Vol.3, No.3, pp.217-223 (2004)

17) 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, NO.9, pp.2406-2416 (2004)

18) M.A. Lopez Zavara, N. Funamizu, T. Takakuwa：Modeling of Aerobic Biodegradation of Feces Using Sawdust as a Matrix, Water Research, Vol.38, No.5, pp.1327-1339 (2004)

19) 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*, Vol.3, No.1-3, pp.127-134 (2004)

20) 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*, Vol.13, No.3, pp.153-161 (2004)

21) Miguel Angel Lopez Zavala, Naoyuki Funzmizu, Tetsuo Takakuwa：Modeling of aerobic biodegradation of feces using sawdust as a matrix, *Water Research*, Vol.38, No.5, pp.1327-1339 (2004)

22) Mara Regina Mendes, Toshiya Aramaki, Keisuke Hnaki：Comparison of the environmental impact of incineration and landfilling Sao Paulo City as determined by LCA, *Resources, Conservation and Recycling*, Vol.23, No.5, pp.403-409 (2004)

23) M. A. Lopez Zavala, M. Terazawa, N. Funamizu, T. Takakuwa：Achievements on the Onsite Wastewater Differentiable Treatment System (OWDTS). Full paper in CD-ROM, *Proceedings of IWA 6th Specialist conference on small water and wastewater systems and 1st international conference on onsite wastewater treatment and recycling*,. (2004)

24) 中川直子、山越一乃、大江華、大瀧雅寛「コンポスト型トイレにおける病原微生物の二次感染リスク評価」土木学会論文集、No.748/VII-29, 91-98, 2003

25) Miguel Angel Lopez Zavala, Naoyuki Funamizu, Tetsuo Takakuwa：Moisture content effect on aerobic biodegradation of feces using sawdust as a matrix. Full paper in CD-ROM, *Asian Waterqual* 2003, Bangkok, Thailand. (2003)

26) Mara Regina Mendes, Toshiya Aramaki, Keisuke Hnaki. Assessment of the environmental impact of management measures for the biodegradable fraction of municipal solid waste in Sao Paulo City, *Waste Management*, Vol.23, No.5, pp.403-409 (2003)

27) T. Saito, N. Sugiura, T. Itayama, Y. Inamori, M. Matsumura：Degradation Characteristics of Microcystins by Isolated Bacteria form Lake Kasumigaura, *Journal of Water Supply：Research and Technology-AQUQ*, 52, No.1, pp.13-18 (2003)

28) T. Saito, N. Sugiura, T. Itayama, Y. Inamori, M. Matsumura：Biodegradation of Microscystis and Miceocystins by Indigenous Nanoflagellates on Biofilm in a practical Treatment Facility, Environmental Technology, 24, pp.143-151 (2003)

29) T. Saito, T. Itayama, N. Sugiura, Y. Inamori, M. Matsumura, Characteristics of Biodegradation of Cyanobacterial Toxin Microcystin LR in Environmental Water under the River-Die-Away Test. *Jpn. J Wat. Tret, Biol.* Vol.39, pp.1-8 (2003)

30) T. Saito, K. Okano, P-D Park, B.P. Burns, B.A. Neilan, T. Itayama, Y. Inamori, N. Sugiura, Detection and Sequencing of microcystin LR-degrading Gene, mlrA, from new bacteria isolated from Japanese lakes. *FEMS Microbiol. Lett.* 229, pp.271-276 (2003)

31) Sugiura N., Isoda H. and Maekawa T.：Degradation Potential of Musty Odor in Drinking Water Source by Biofilm Methods, *J. Water Supply*, Vol. 52, No.3, pp.181-187 (2003)

32) Isoda H., Oka S., Kido H., Yokota S., Kitahara M. and Abe Y.：Anti-allergy Effect of Snow Lotus Saussurea involucrate from Tian Shan Mountain in China, *J. Arid Land Studies*, Vol.13, No.2, pp.139-146 (2003)

33) Talorete T., Isoda H., Nakamura K.：Tow-

dimensional Electrophoresis of Proteins from Human Intestinal Caco-2 Cells Exposed to the Known Xenoestorgen nonylphenol, *Animal Cell Technology*, Vol.13, pp.375-379 (2003)

34) Naoyuki Funamizu, Tomonari Iwamoto, and Tetsuo Takakuwa：Decline of Residual Chlorine in Artificial Stream Flow Sustained by Reclaimed Wastewater：Field Study in Sapporo, W*ater Science and Technology*：*Water Supply*, Vol.3, No.3, pp.79-84 (2003)

35) Sonoko Nakata, M. A. Lopez Zavala, Naoyuki Funamizu, M. Otaki, T. Takakuwa Temperature effect on pathogens decline in the bio-toilet system. *Proceedings of 1st International Dry-Toilet Conference*, pp.131-139, Tampere, Finland. (2003)

36) Miguel Angel Lopez Zavala, Naoyuki Funamizu, Tetsuo Takakuwa：Aerobic biodegradation of feces in the bio-toilet system. *Proceedings of 1st International Dry-Toilet Conference*, pp.168-172, Tampere, Finland. (2003)

37) Miguel Angel Lopez Zavala, Naoyuki Funamizu, Tetsuo Takakuwa：Temperature effect on aerobic biodegradation of feces using sawdust as a matrix. *Proceedings of 2nd International Symposium on Ecological Sanitation*, pp.421-424. Lubeck, (2003).

38) 吉川勝秀：技術リポート　自然共生型流域圏・都市再生のための基盤 GIS 情報「コモンデータベース」の作成について，*土木学会誌*，Vol.88.4, pp40-42 (2003)

39) 吉川勝秀：「自然共生型流域圏・都市の再生」，*土木技術資料*，Vol.45, No.5 pp.14-23 (2003)

40) 辻倉祐喜，田中伸治：湖沼流域管理のための総合的な水循環・物質流動モデルの構築，*土木学会水工論文集*，第 47 巻，pp.217-222 (2003)

41) Isoda H., Talorete T., Kimura M., Maekawa T., Inamori Y., Nakajima N., Seki H.：Phytoestrogens genistein and Daidzin Enhance the Acetylcholinesterase Activity of the Rat pheochoromocytoma Cell Line PC12 by Binding to the Estrogen Receptor, *Cytotechnology*, Vol.40, pp.117-123 (2002)

42) Kameyama K., Sugiura N., Isoda H., Maekawa T.：Effect of Nitrate and Phosophate Concentrations on Microcystins Production by Microcystis Viridis NIES 102, *Aquatic Ecosystem Health and Management*, No.5, Vol.4, pp.443-449 (2002)

43) Kitamoto D., Isoda H., Nakahata T.：Functions and Potential Applications of Glycolipids Biosourfactants- from Energy-saving Materials to Gene Delivery Carriers-, *J. Bioschi. Bioeng.*, Vol.94, pp.187-201 (2002)

44) 成田裕樹，船水尚行，高桑哲男：汚泥処理返流水の栄養塩除去への効果的な利用方策に関する研究，環境工学研究論文集，Vol.39, pp.267-278 (2002)

45) Lopez Zavala Miguel Angel, Naoyuk Funamizu, Tetsuo Takakuwa：Characterization of feces for describing the aerobic biodegradation of feces, *J. Environ. Syst. And Eng. JSCE*, No.720/VII-25, pp.99-105 (2002)

46) Lopez zavala Miguel Angel, Naoyuki Funamizu and Tetsuo Takakuwa：Onsite Wastewater Differentiable Treatment system：modeling approach, *Water science and Technology*, Vol.46, No.6-7 pp.317-324 (2002)

＜その他著作物＞

1) 船水尚行：“混ぜない”，“集めない”をコンセプトとした排水処理システム，pp.223-232, 自然と共生した流域圏・都市再生，（自然と共生した流域圏・都市再生ワークショップ実行委員会編著），山海堂（2005 年）

2) 船水尚行／橋本健　監訳　虫明功臣：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，技報堂出版（2005 年）

3) 船水尚行：水，衛生そして健康，平成 16 年度北海道大学公開講座「健康を支える科学と技術」，pp15-19 (2004)

4) Y. Watanabe, N. Funamizu：Water Resources and Water Supply in the 21st century, Hokkaido University Press (2003)

5) 船水尚行：第 9 章都市水施設系の過去・現在・未来，循環型社会構築への戦略（田中勝，田中信壽編著），pp.234-265，中央法規（2002）

（２）口頭発表　（国内 140 件，海外 100 件）

（３）特許出願（国内２件）

（４）受賞等

北海道大学，正和電工㈱：「おがくずを用いた乾式し尿処理装置の開発」，平成 17 年度環境賞（環境大臣賞・優秀賞）（2005）

新聞報道等８件