

学 位 論 文 題 名

Onsite storage and treatment of
Source separated human feces and urine

（し尿のオンサイト処理、貯蔵に関する研究）

学位論文内容の要旨

オガクズを担体とするコンポスト型トイレを用いたし尿のオンサイト処理システムの改善に関する研究を行った。従来本コンポスト型トイレはオガクズ担体中でし尿を合わせて処理する方式を取ってきたことにより、シンプルかつ衛生的なし尿処理が可能であった半面、次の二点が課題として挙げられてきた。すなわち、1) 水分蒸発（担体の好気性維持）に要する電力消費量（主として加熱）、2) 窒素の損失（アンモニアガスの揮発）、の低減である。糞便と尿の成分を比較すると、問題の原因となっている水分と窒素の大半が尿由来であることから、オガクズ担体から尿を分離（し尿分離型処理）することで、上述の二つの課題を改善することを検討した。このし尿分離型処理は、欧州など異なる糞便処理システムを持つ地域においても、広く支持されている考え方であり、その目的にはやはり尿に偏在しているとされる微量汚染物質（医薬品、ホルモン類）の管理にあるとされており、欧州等では糞便から尿を分離する事ができる便器（洋式）もすでに研究開発がなされており、普及も進んでいる。本コンポスト型トイレにおいてし尿分離方式を検討する場合、上述の二点の課題を大きく改善することが想像される一方で、分離された糞便と尿いずれの処理においても新しい研究課題を得た。本研究では糞便はコンポスト化処理を、分離尿は貯蔵をそれぞれオンサイトで行之、その一切を周辺環境へ放出しないことを想定している。貯蔵尿はオガクズ担体の交換時期にあわせて回収された尿を集めて、有価物の回収を行うことを想定した。以上のことから、本研究の目的を、1) 分離糞便の非加熱コンポスト化過程における窒素の挙動に関する知見を得ること、2) 分離尿の貯蔵過程における尿の変性に関する知見を得ることとした。また非加熱処理によって懸念される病原性微生物の増殖について知見を得た。

分離糞便のコンポスト化では、コンポスト中の微量汚染物質や塩分の投入量も大きく低減できることなどから、より長期間の担体使用を想定することが可能となった。そこで、糞便窒素の生物分解性に関する知見が窒素の回収率をより正確に評価するために求められた。本研究では実験室規模の回分実験の結果から、糞便窒素はコンポスト化過程において約3割5分が生物学的に不活化した有機物中に存在する事が示され、残り約6割5分は主としてアンモニアガスとして失われることが示された。また糞便窒素がコンポスト化過程において無機化されアンモニアが生成し、揮発するまでのプロセスについて数学モデルを用いて記述することを試みた。すでに作成されていた糞便有機物の生物学的分解モデルに、本研究で得られた糞便窒素の生物分解性の情報を組み込み、担体液相中のアンモニアの解離、微生物体への再吸収、気相への移行などを新たにモデル化した結果、回分実験におけるアンモニアの挙動をほぼ記述する事ができた。そして、本コンポスト型トイレを実験室

に設置し、実状況に近い稼働(糞便の連続投入)を50日間継続する実験を行い、有機物、窒素について投入量、オガクズ担体中に残存していた量を正確に測定した結果についても、分離糞便由来の有機物、窒素の分解についてほぼ正確にシミュレーションを行うことができた。分離糞便を非加熱でコンポスト化する際に危惧された、病原性微生物の増殖についても、いくつかの指標(糞便性大腸菌、糞便性連鎖球菌、大腸菌群数)から、一時的な増殖は認められたものの50日間の実験終盤において明瞭な減衰傾向が確認された。コンポスト型トイレを用いた連続投入実験は、し尿混合処理(し尿の連続投入)についてもなされ、両実験の結果を比較することにより、尿由来窒素の損失率はおおよそ9割であると推定された。新鮮尿に大量の糞便を加えて、し尿混合処理に近い状況を再現した尿中窒素のアンモニアへの分解率を評価した実験における結果もこれを支持するものとなったため、尿中窒素の約9割はコンポスト化過程で揮発することが結論付けられた。実動実験における有機物や窒素の担体への残存は、回分実験の結果と比較するとその残存率は大きくなることが示されたが、シミュレーションの結果から未分解有機物、窒素の寄与が定量的に示され、運転開始から約150日程度で、投入量と分解量がほぼ等しくなる状態に移行する事が予測された。分離糞便のコンポスト化処理における窒素(未分解窒素、生物学的に不活化した窒素)の回収率はおおよそ3割になると推定された。

尿中窒素は人体から排出される窒素の約8~9割を占めその主成分が尿素であることが知られている。尿は分離過程で少量の糞便混入が避けがたいことが報告されている。糞便にはウレアーゼ(尿素加水分解酵素)生成菌の存在が多数報告されているものの、その特性に関する知見は乏しいため糞便汚染を与えた尿貯蔵の回分実験を行った。貯蔵尿中のアンモニア濃度の経時変化から、十分な尿素が残存しているにもかかわらず加水分解が止まる状況が確認された。またそれと平行して行った植種実験(貯蔵過程における糞便汚染尿の一部を種菌として採取し、新鮮尿へ植種してそのアンモニア生成速度から植種した汚染尿中のアンモニア生成ポテンシャルを評価)の結果から、アンモニア生成速度(アンモニア生成ポテンシャル)は、貯蔵の過程において増加、減少、定常状態の三つの段階が存在することが示された。また定常状態におけるポテンシャルは糞便汚染が起こった初期のポテンシャルよりも明らかに高いことが示されたため、尿貯蔵過程における加水分解の阻害が示唆された。尿素加水分解の阻害は貯蔵尿からの窒素の回収率と密接な関係にあるため、本研究では貯蔵尿の性状と微生物活性に影響を与える因子として、pH、分子状アンモニア濃度、そして塩分濃度の三点に注目した回分的な実験を行った。そして、それぞれの因子において若干の阻害効果が認められたものの、単純な貯蔵過程においてそれらは明確な阻害因子にはなりえないことが示された。よって、尿貯蔵過程における加水分解の完全な阻害を起す因子として、尿中有機物量の諸費速度等、更なる研究が求められた。ただし、加水分解のコントロールという観点からは、酸の添加によりpHを酸性側(pH4以下)へコントロールすることで、完全な阻害効果が得られることは示され、オンサイトにおける貯蔵尿中の尿素加水分解を阻害するためにはpHのコントロールが有効であることが示された。尿の性状は健康状態、時間帯、個人間における差が比較的大きいことが指摘されていた。尿貯蔵プロセスを議論するためには新鮮尿の一般的な性状が求められることから、不特定多数(189名)から短時間(約4時間)の間に採取した新鮮尿をして一般的な尿の性状を約60の項目から示した。この新鮮尿を用いた約90日間の尿貯蔵実験の結果から、新鮮尿中有機物は室温(30℃)貯蔵過程において、その約8割が100Da以下の有機物へ分解される一方で、0.45 μ m以上の有機物も約0.6割程度残存することが示された。貯蔵尿の回収後に想定される栄養塩類の回収、微量汚染物質の不活化の工程に、膜技術の利用には前処理工程の必要性が示唆された。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 船 水 尚 行

副 査 教 授 渡 辺 義 公

副 査 教 授 高 橋 正 宏

副 査 教 授 寺 沢 実 (農学研究院)

学 位 論 文 題 名

Onsite storage and treatment of Source separated human feces and urine

(し尿のオンサイト処理、貯蔵に関する研究)

オガクズを担体とするコンポスト型トイレを用いたし尿のオンサイト処理システムの改善に関する研究を行った。従来本コンポスト型トイレはオガクズ担体中でし尿を合わせて処理する方式を取ってきたことにより、シンプルかつ衛生的なし尿処理が可能であった半面、次の二点が課題として挙げられてきた。すなわち、1) 水分蒸発 (担体の好気性維持) に要する電力消費量 (主として加熱)、2) 窒素の損失 (アンモニアガスの揮発)、の低減である。糞便と尿の成分を比較すると、問題の原因となっている水分と窒素の大半が尿由来であることから、オガクズ担体から尿を分離 (し尿分離型処理) することで、上述の二つの課題を改善することを検討した。このし尿分離型処理は、欧州など異なる糞便処理システムを持つ地域においても、広く支持されている考え方であり、その目的にはやはり尿に偏在しているとされる微量汚染物質 (医薬品、ホルモン類) の管理にあるとされており、欧州等では糞便から尿を分離する事ができる便器 (洋式) もすでに研究開発がなされており、普及も進んでいる。本コンポスト型トイレにおいてし尿分離方式を検討する場合、上述の二点の課題を大きく改善することが想像される一方で、分離された糞便と尿いずれの処理においても新しい研究課題を得た。本研究では糞便はコンポスト化処理を、分離尿は貯蔵をそれぞれオンサイトでを行い、その一切を周辺環境へ放出しないことを想定している。貯蔵尿はオガクズ担体の交換時期にあわせて回収された尿を集めて、有価物の回収を行うことを想定した。以上のことから、本研究の目的を、1) 分離糞便の非加熱コンポスト化過程における窒素の挙動に関する知見を得ること、2) 分離尿の貯蔵過程における尿の変性に関する知見を得ることとした。また非加熱処理によって懸念される病原性微生物の増殖について知見を得た。

分離糞便のコンポスト化では、コンポスト中の微量汚染物質や塩分の投入量も大きく低減できることなどから、より長期間の担体使用を想定することが可能となった。そこで、糞便窒素の生物分解性に関する知見が窒素の回収率をより正確に評価するために求められた。本研究では実験室規模の回分実験の結果から、糞便窒素はコンポスト化過程において約3割5分が生物学的に不活化した有機物中に存在する事が示され、残り約6割5分は主としてアンモニアガスとして失われることが示された。また糞便窒素がコンポスト化過程において無機化されアンモニアが生成し、揮発するまでのプロセスについて数学モデルを用いて記述することを試みた。すでに作成されていた糞便有機物の生物学的分解モデルに、本研究で得られた糞便窒素の生物分解性の情報を組み込み、担体液相中

のアンモニアの解離、微生物体への再吸収、気相への移行などを新たにモデル化した結果、回分実験におけるアンモニアの挙動をほぼ記述する事ができた。そして、本コンポスト型トイレを実験室に設置し、実状況に近い稼動(糞便の連続投入)を50日間継続する実験を行い、有機物、窒素について投入量、オガクズ担体中に残存していた量を正確に測定した結果についても、分離糞便由来の有機物、窒素の分解についてほぼ正確にシミュレーションを行うことができた。分離糞便を非加熱でコンポスト化する際に危惧された、病原性微生物の増殖についても、いくつかの指標(糞便性大腸菌、糞便性連鎖球菌、大腸菌群数)から、一時的な増殖は認められたものの50日間の実験終盤において明瞭な減衰傾向が確認された。コンポスト型トイレを用いた連続投入実験は、し尿混合処理(し尿の連続投入)についてもなされ、両実験の結果を比較することにより、尿由来窒素の損失率はおおよそ9割であると推定された。新鮮尿に大量の糞便を加えて、し尿混合処理に近い状況を再現した尿中窒素のアンモニアへの分解率を評価した実験における結果もこれを支持するものとなったため、尿中窒素の約9割はコンポスト化過程で揮発することが結論付けられた。実動実験における有機物や窒素の担体への残存は、回分実験の結果と比較するとその残存率は大きくなることが示されたが、シミュレーションの結果から未分解有機物、窒素の寄与が定量的に示され、運転開始から約150日程度で、投入量と分解量がほぼ等しくなる状態に移行する事が予測された。分離糞便のコンポスト化処理における窒素(未分解窒素、生物学的に不活化した窒素)の回収率はおおよそ3割になると推定された。

尿中窒素は人体から排出される窒素の約8~9割を占めその主成分が尿素であることが知られている。尿は分離過程で少量の糞便混入が避けがたいことが報告されている。糞便にはウレアーゼ(尿素加水分解酵素)生成菌の存在が多数報告されているものの、その特性に関する知見は乏しいため糞便汚染を与えた尿貯蔵の回分実験を行った。貯蔵尿中のアンモニア濃度の経時変化から、十分な尿素が残存しているにもかかわらず加水分解が止まる状況が確認された。またそれと平行して行った植種実験(貯過程における糞便汚染尿の一部を種菌として採取し、新鮮尿へ植種してそのアンモニア生成速度から植種した汚染尿中のアンモニア生成ポテンシャルを評価)の結果から、アンモニア生成速度(アンモニア生成ポテンシャル)は、貯蔵の過程において増加、減少、定常状態の三つの段階が存在することが示された。また定常状態におけるポテンシャルは糞便汚染が起こった初期のポテンシャルよりも明らかに高いことが示されたため、尿貯蔵過程における加水分解の阻害が示唆された。尿素加水分解の阻害は貯蔵尿からの窒素の回収率と密接な関係にあるため、本研究では貯蔵尿の性状と微生物活性に影響を与える因子として、pH、分子状アンモニア濃度、そして塩分濃度の三点に注目した回分的な実験を行った。そして、それぞれの因子において若干の阻害効果が認められたものの、単純な貯蔵過程においてそれらは明確な阻害因子にはなりえないことが示された。よって、尿貯蔵過程における加水分解の完全な阻害を起す因子として、尿中有機物量の諸費速度等、更なる研究が求められた。ただし、加水分解のコントロールという観点からは、酸の添加によりpHを酸性側(pH4以下)へコントロールすることで、完全な阻害効果が得られることは示され、オンサイトにおける貯蔵尿中の尿素加水分解を阻害するためにはpHのコントロールが有効であることが示された。尿の性状は健康状態、時間帯、個人間における差が比較的大きいことが指摘されていた。尿貯蔵プロセスを議論するためには新鮮尿の一般的な性状が求められることから、不特定多数(189名)から短時間(約4時間)の間に採取した新鮮尿をして一般的な尿の性状を約60の項目から示した。この新鮮尿を用いた約90日間の尿貯蔵実験の結果から、新鮮尿中有機物は室温(30℃)貯蔵過程において、その約8割が100Da以下の有機物へ分解される一方で、0.45 μ m以上の有機物も約0.6割程度残存することが示された。貯蔵尿の回収後に想定される栄養塩類の回収、微量汚染物質の不活化の工程に、膜技術の利用には前処理工程の必要性が示唆された。

これを要するに、筆者はし尿分離型コンポストトイレにおける窒素挙動に関する有用な知見の収集とモデル化、尿の貯蔵過程における尿素の加水分解に関する貴重な知見、ならびに排水分離型排水処理システムにおける窒素回収効率化方策を提案している。これらの成果は衛生工学の発展に寄与すること大であると認められる。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。