

藤原 拓

高知大学教育研究部自然科学系農学部門・教授

気候変動を考慮した農業地域の面的水管理・
カスケード型資源循環システムの構築

§1. 研究実施の概要

本研究課題は、サブグループ G1「資源創出と N_2O 排出抑制を同時に実現する面的植物浄化・水再生システムの構築」、サブグループ G2「畜産施設等点源由来の廃水・廃棄物の高度再生システムの開発」、サブグループ G3「農業系廃棄物からの高付加価値製品創出・水再生システムの開発」、サブグループ G4「面的水管理・カスケード型資源循環システムの統合評価」、の構成により実施した。平成 22 年度の研究成果は以下のとおりである。

【G1】資源創出と N_2O 排出抑制を同時に実現する面的植物浄化・水再生システムの構築

地下水硝酸性窒素汚染の抑制、温室効果ガス(N_2O)排出の抑制およびバイオマス資源の獲得を同時に実現するため、高知県および岡山県のハウス圃場でクリーニングクロップを栽培し、その環境保全効果を検証した。その結果、いずれにおいても、クリーニングクロップの窒素溶脱低減効果が示された。また、クリーニングクロップおよび水生植物に適したバイオマス糖化条件に関する検討を終えた。さらには、バイオマス糖化の前処理過程においてリンだけでなくカリウム回収の可能性が見いだされた。

【G2】畜産施設等点源由来の廃水・廃棄物の高度再生システムの開発

家畜糞の高度再生システム開発を目指し、乳牛糞の分解速度および pH とアンモニアガス発生量の関係を調べた。肉牛の肥育期に糞中のリン濃度が上昇する傾向が見られ、この時期におけるリン回収が重要であると考えられた。肉牛糞の液化ジメチルエーテルによる脱水により糞中の水分は 90%以上を常温で脱水できた。肉牛糞の燃焼実験を実施し N_2O の排ガス経路での排出レベルを調査した結果、 N_2O 転換率は平均で 4%であった。

コンポストの水分蒸発モデルを構築し、コンポスト型トイレの設計を可能にした。尿から、ホタテ貝殻を用いたリン化合物結晶回収、ホルムアルデヒド添加による遅効性窒素肥料(ウレアホルム)合成が可能であることを確認した。光触媒酸化による尿中の医薬品処理を検討し、操作条件と分解挙動との関係を明らかにした。また、吸着除去法の吸着挙動の解明とモデル化、豚尿

からの吸着除去を行った。傾斜土層および間欠流入 MBR による雑排水処理特性を把握した。

【G3】農業系廃棄物からの高付加価値製品創出・水再生システムの開発

ブリ用飼料に大部分が廃棄されているユズ果皮ペーストを段階的に加え、夏期から秋期にかけてブリ幼魚に与えた。水温に関わらず、ユズ果皮ペーストの飼料への添加によって、ブリの血合肉の褐変を防止できた。天然材料であるゼラチンを活用して精油の徐放機能を有する高付加価値な機能紙の調製条件の確立を試みた。その結果、紙への精油の定着および徐放機能を付与することが可能であった。

【G4】面的水管理・カスケード型資源循環システムの統合評価

廃棄物フロー、水文および園芸施設等の地理情報等のデータを収集・整理した。地域におけるバイオマスフローを表現し、環境負荷を集計する投入産出表を示した。地理的な窒素の動態や資源の需給バランス、システム変更による温室効果ガス排出量や水質汚濁負荷を評価するモデルの開発と実地域への適用の準備を進めた。

§2. 研究実施体制

(1) 高知大学グループ: 気候変動を考慮した農業地域の面的水管理・カスケード型資源循環システムの構築

① 研究分担グループ長: 藤原 拓 (高知大学教育研究部自然科学系農学部門、教授)

② 研究項目

【G1】資源創出と N₂O 排出抑制を同時に実現する面的植物浄化・水再生システムの構築【藤原・大年・山根】

- ・ポット栽培試験および実フィールド栽培試験によるクリーニングクロップの栽培条件の検討
- ・実フィールド栽培試験による面的植物浄化・水再生システムの検証

【G2】畜産施設等点源由来の廃水・廃棄物の高度再生システムの開発【藤原・市浦・松川・深堀】

- ・市販光触媒による人尿・家畜尿中の医薬品の分解特性およびその影響因子の検討
- ・家畜糞尿の組成解析と貯留中の性状変化
- ・イオン液体を用いた製紙スラッジ中に含まれる酸化チタンおよびパルプ成分分離技術の確立
- ・畜産系廃棄物からの資源回収システムの構築

【G3】農業系廃棄物からの高付加価値製品創出・水再生システムの開発【市浦・深田・藤原】

- ・廃棄物バイオマスからの有用成分利用の検討
- ・廃棄物バイオマスを利用した機能紙調製
- ・廃棄物バイオマスの養殖魚飼料における至適添加濃度と有効性についての検討

【G4】面的水管理・カスケード型資源循環システムの統合評価【松岡】

- ・モデル地域の土地利用の把握
- ・窒素の発生量・処理量の定量化

(2) 北海道大学グループ: 農業地域に適した分散型水・資源再生システムの開発

① 研究分担グループ長: 船水 尚行 (北海道大学大学院工学研究院・環境創生工学部門、教授)

② 研究項目

【G2】畜産施設等点源由来の廃水・廃棄物の高度再生システムの開発【船水】

- ・コンポスト化過程における水分蒸発速度を考慮したコンポスト型トイレの設計
- ・コンポスト化過程における家畜糞の分解速度
- ・糞中に含まれる病原性微生物の不活化速度
- ・家畜尿の組成解析と貯留における性質の変化
- ・ヒドロキシアパタイト(HAP)の晶析による尿中リンの回収
- ・晶析法を用いた尿中尿素の回収
- ・尿中医薬品の電解処理特性
- ・雑排水の小型 MBR 処理装置の設計
- ・雑排水の傾斜土層処理装置の設計

(3) 国立環境研究所グループ: 面的水管理・カスケード型資源循環システムの統合評価

① 研究分担グループ長: 山田 正人 ((独)国立環境研究所、主任研究員)

② 研究項目

【G4】面的水管理・カスケード型資源循環システムの統合評価【山田】

- ・統計情報等を用いた地域マテリアルフローの把握

(4) 岡山大学(前田)グループ: 面的植物浄化・水再生システムの構築

① 研究分担グループ長: 前田守弘 (岡山大学大学院環境学研究科、准教授)

② 研究項目

【G1】資源創出とN₂O排出抑制を同時に実現する面的植物浄化・水再生システムの構築【前田】

- ・畑圃場における窒素収支の解明
- ・クリーニングクロップの選定

(5) 岡山大学(永禮)グループ: セルロース系バイオマス糖化・発酵過程における窒素・リン回収技術の確立

① 研究分担グループ長: 永禮 英明 (岡山大学大学院環境学研究科、准教授)

② 研究項目

【G1】資源創出とN₂O排出抑制を同時に実現する面的植物浄化・水再生システムの構築【永禮】

- ・L-乳酸発酵過程における窒素・リン回収に関する検討

(6) 京都大学グループ: 水・バイオマス資源のカスケード型循環システムの開発

① 研究分担グループ長: 高岡 昌輝 (京都大学大学院工学研究科、教授)

② 研究項目

【G2】畜産施設等点源由来の廃水・廃棄物の高度再生システムの開発【高岡・大下】

・畜産系廃棄物からの資源回収に関する研究

(7) 鳥取大学グループ: セルロース系バイオマスからの L-乳酸発酵プロセス開発と「分散型水・資源再生システム」統合評価に関する研究

① 研究分担グループ長: 赤尾 聡史 (鳥取大学大学院工学研究科、助教)

② 研究項目

【G1】資源創出とN₂O排出抑制を同時に実現する面的植物浄化・水再生システムの構築【赤尾】

・バイオマス糖化条件の至適化

【G4】面的水管理・カスケード型資源循環システムの統合評価【増田】

・現状システムの把握と資源分布データベース化

・要素技術データベースとシステム評価式の試作

(8) 埼玉県環境科学国際センターグループ: 「水・バイオマス資源のカスケード型循環システム」統合評価

① 研究分担グループ長: 長谷 隆仁 (埼玉県環境科学国際センター、専門研究員)

② 研究項目

【G4】面的水管理・カスケード型資源循環システムの統合評価【長谷】

・カスケード型循環システムにおける要素技術の評価法

・要素技術間の資源分配(フロー)システムの評価法

・カスケード型循環システムにおける資源分布・需要分布等の地域制約把握・データベース化

・要素技術の評価法・資源分布・需要分布等データベース化の統合化と総合評価

§3. 研究実施内容

【G1】資源創出と N_2O 排出抑制を同時に実現する面的植物浄化・水再生システムの構築

高知大学農学部農場で実施したポット栽培試験の結果、クリーニングクロップ（飼料用トウモロコシ）栽培と湛水の組み合わせにより、 NO_3^- 溶脱量が湛水除塩のみを行うより 85～96%削減され、とともに、Na を除く土壤中塩類の約 60%を除去でき、特に K の除去効果が大きいことが示された。また、ライシメータ栽培試験においても NO_3^- 溶脱量が 88～92%削減されることが示され、加えて亜酸化窒素放出量も半減することが明らかになった。さらに、上記農場での実圃場栽培試験結果より、夏期における実圃場でのクリーニングクロップの窒素吸収能力を把握できた。

岡山県南東部のナス栽培ハウス内において、休閑期に飼料用トウモロコシを栽培することにより、除塩時の窒素溶脱を低減することができた。一方、亜酸化窒素発生については、クリーニングクロップの影響は小さく、有機物施用と関連している可能性が高いことが示された。また、作土層下に硝酸性窒素吸着能を有するコーヒーカス機能炭を埋設することにより、肥料や灌水量の違いによらず、窒素溶脱を低減できた。さらに、地下水に含まれる硝酸性窒素の除去に電子供与体としてポリ乳酸を用いる技術を検討した結果、易溶解性有機物を用いる場合より、有機炭素濃度の上昇を低く抑えることができたが、硝酸除去能の向上に課題が残った。

クリーニングクロップおよび水生植物に適した酵素糖化の前処理について複数の方法を実施し、その後の酵素糖化によるこれらのバイオマスからのグルコース回収率（前処理前バイオマスあたり）を比較した。その結果、いずれのバイオマスにおいてもアルカリ系の前処理が有効であった。飼料用トウモロコシとヒシについて組成分析をした結果、セルロース成分に対してそれぞれ 89%、45%のグルコース回収率となった。酵素糖化の効率化としてヘミセルロースの糖化を目的とする酵素ブレンドも検討した。A/O 処理したトウモロコシを用いて糖化を試みた結果、セルラーゼとして市販されている酵素同士のブレンドにより、ヘミセルロース由来のキシロースの回収を確認した。トウモロコシ由来のグルコースとキシロースに対して高温 L-乳酸発酵を実施した結果、単糖に対する収率 0.88 g/g で L-乳酸の生成を確認した。

L-乳酸発酵過程におけるリン・窒素回収方法に関して、L-乳酸発酵の前処理過程においてトウモロコシからのリン抽出方法を検討した。その結果、水または 1%水酸化ナトリウムに浸漬するだけでトウモロコシ中リンが速やかに液中へ溶出し、24 時間後までに約 80%以上を抽出できることが示された。この時、リンだけでなくカリウムも同時に抽出できており、カリウム回収の可能性が見いだされた。

【G2】畜産施設等点源由来の廃水・廃棄物の高度再生システムの開発

家畜糞の高度再生システム開発を目指し、まず乳牛糞の分解速度および pH とアンモニアガス発生量の関係を調べた。また、肉牛糞中の組成や様々な物性値を生育ステージごとに調査した結果、肥育期にリン濃度が上昇する傾向が見られ、この時期におけるリン回収が重要であると考えられた。さらに、これまでの結果から日本国内におけるリンの物質収支図を作成したところ、家畜糞

尿由来のリンは、下水汚泥由来のリンに比較し 2-3 倍程度のポテンシャルを有していることが明らかとなり、家畜糞尿からのリン回収の重要性が示唆された。

肉牛糞の燃料化を想定し、液化ジメチルエーテル(DME)を用いた省エネルギー脱水・乾燥を実験的に検討した結果、液化 DME/牛糞(液固比):60mL/g、120 分で 90%以上の牛糞中水分を常温で脱水できた。下水汚泥での結果と比較し、牛糞は脱水しやすい傾向がうかがえた。

肉牛糞の燃焼実験をロータリーキルン炉にて実施し、 N_2O 、メタンの排ガス経路での排出レベルや、その挙動を調査した。その結果、特に N_2O 濃度については、燃焼温度が $750^{\circ}C$ から $850^{\circ}C$ まで上昇するにつれ、また、空気比が 1.4 から 0.9 まで低下するにつれて減少した。日本の家畜糞尿焼却由来 N_2O の算定で設定されている N_2O 転換率が 0.1% (現状値:温室効果ガス排出インベントリ) であるのに対し、本研究では平均で 4%であり、現状値が見直されるべきであると考えられた。

実スケールでの測定に基づきコンポストの水分蒸発モデルを構築し、コンポスト型トイレの設計法を示した。尿中栄養塩類の回収技術として、粉碎ホタテ貝殻を用いたリン酸+カルシウムの結晶回収、ホルムアルデヒド添加による遅効性窒素肥料(ウレアホルム)の合成・回収がそれぞれ可能であることを人工尿・実尿の両方で確認した。尿中医薬品の分解について、貯留中の分解状況、電解処理における電極枚数が医薬品分解速度に与える影響を調べた。光触媒分解では、pH、UV 強度などの操作条件と分解挙動との関係を明らかにした。また、吸着除去についても検討し、吸着挙動の解明およびモデル化を行うとともに、豚尿中からの吸着除去試験を行い、イオンや有機物の影響を明らかにした。雑排水処理に関しては、傾斜土層および小型 MBR について、雑排水の間欠流入による影響を実験によって調べた。

【G3】農業系廃棄物からの高付加価値製品創出・水再生システムの開発

農業系廃棄物であるユズ果皮を飼料に添加し、冬期にブリに給与することで、血合肉の褐変を抑制できることを平成 21 年度に明らかにしたが、魚類は変温動物のため、夏期にも同様の効果が得られるか平成 22 年度に確認した。飼料重量 1450g(湿重)に 50g(湿重)のユズ果皮ペーストを添加することで、夏期においてもブリの成長を損なうことなく血合肉の褐変を抑制できることが明らかとなった。

ブリ飼料にカツオ煮熟水を添加する際の輸送コスト・エネルギー低減を目的として、食品としての安全性を確保する自然由来成分を用いた凝集処理による煮熟水濃縮法の開発を目指している。本年度は予備試験として一般的な凝集剤であるポリ塩化アルミニウムを使用した場合の凝集特性を検討した結果、処理後の沈殿物体積は原水の約 1/4 となり大幅な削減を達成した。

コアセルベーション技術を活用することにより、ゼラチンを利用した徐放性機能紙を調製することができた。ゼラチン水溶液の貧溶媒である炭酸ナトリウム濃度が 10%であるとき、精油の定着量は最大であった。その条件下で徐放試験を行った結果、ブランクシートと比較して、精油成分残率が高かった。これより、天然成分であるゼラチンを活用することにより、精油を紙へ定着することができるだけでなく、徐放性を付与することが可能であることが示された。以上により、今後廃棄バイ

オマス由来の精油と紙の複合化による高付加価値機能紙を創出するための基礎的知見を得た。

【G4】面的水管理・カスケード型資源循環システムの統合評価

高知県において、平成 21 年度分の産業廃棄物および畜産廃棄物のフローを調査し、リレーショナルデータベース化した。これらの廃棄物および処理・資源化産物の組成と施設のエネルギー使用量等の把握を進めた。有機性廃棄物の複雑な物質フローを整理し、系全体からの環境負荷等を集計する投入産出表を示した。

農業にかかわる窒素動態を県全体で把握するため統計資料等を用いて窒素バランスを推計した。また、クリーニングクロップの潜在的な導入可能面積を見積もるため、施設園芸が盛んな数市町村において、衛星画像を用いて園芸施設の抽出を行なった。

分散型水・資源再生システムの評価モデルの枠組みを検討し定式化を行い、評価に必要な各種関数を文献から収集整理した。また、評価モデルを実地域へ適用するための準備として、解析対象地域における河川の水文水質情報、流域情報、水利用・排水処理に関する情報（生活排水処理施設、ダム・利水施設等）の収集とデータ整理、地域施設間の最短輸送距離や河川の基底流量・水質の計算を行った。

高知県において、システム導入の地域制約条件であるバイオマス資源分布等のデータベースを整備した。また、昨年度開発した、カスケード型循環利用システムにおける温室効果ガス排出量や水質汚濁負荷量等を評価するモデルに関して、既存技術を中心に拡充した。さらに、コンポスト化を対象として、資源配分モデルのプロトタイプを用いて、原料である家畜糞に加えて副資材である稲藁等の資源分布を考慮し、設定した地域間で堆肥の需要分布をバランスさせ、資源利用を最大化する手法を示した。

§4. 成果発表等

（4－1）原著論文発表

●論文詳細情報

- 1) 深田陽久, 河相光太郎, 田所大二, 森岡克司, 益本俊郎 (2010) マルソウダ加工の際に廃棄される煮熟水のブリ幼魚飼料への添加効果, 日本水産学会誌, **76(6)**, 1035-1042.
- 2) 井上賢大, 近藤圭介, 藤原拓, 前田守弘, 高岡昌輝, 大年邦雄, 山根信三, 永禮英明, 赤尾聡史 (2010) クリーニングクロップ栽培と湛水の組み合わせによるハウス土壌集積塩類の除去特性, 環境工学研究論文集, **47**, 273-279.
- 3) 永禮英明, 井上司, 藤原拓, 赤尾聡史, 前田守弘, 山根信三 (2010) トウモロコシからのリン抽出方法の検討, 環境工学研究論文集, **47**, 459-464.
- 4) 牛島健, 吉川宙希, A.P. HUEL GAS, 伊藤竜生, 船水尚行 (2010) 生活雑排水のオンサイ

ト処理を想定した間欠流入条件下における MBR の処理性能, 環境工学研究論文集, **47**, 719-726.

- 5) Ichiura H. Takayama M. and Ohtani H. Interfacial polymerization preparation of functional paper coated with polyamide film containing volatile essential oil, Journal of Applied Polymer Science. (in press).
- 6) Shuji Fukahori, Taku Fujiwara, Ryusei Ito, Naoyuki Funamizu. pH-Dependent adsorption of sulfa drugs on high silica zeolite: modeling and kinetic study, Desalination, (in press).

(4-2) 知財出願

- ① 平成22年度特許出願件数(国内 1 件)
- ② CREST 研究期間累積件数(国内 1 件)