

機関番号：12605

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2007～2010

課題番号：19201018

研究課題名（和文）

飼料イネを用いた資源循環型の生産および環境修復システムの構築

研究課題名（英文） Construction of environmental restoration and forage rice production system basing on resources recycling

研究代表者

細見 正明（HOSOMI MASA AKI）

東京農工大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：90132860

研究成果の概要（和文）：

本研究では、飼料イネを「環境材料」として用いて、地域における循環材料生産および環境修復システムを構築し、適切な窒素循環を図るために、飼料イネにより汚濁河川水、牛及び豚ふん尿のメタン発酵消化液、畜産ふん尿を固液分離した液肥の窒素除去を評価した。また、飼料イネ水田による窒素除去のモデル及び流域規模の水収支モデルの構築を行った。さらに、飼料イネを環境材料とした循環材料生産システムの持続性を評価するために、飼料イネの生産を20年以上にわたり継続している埼玉県熊谷市妻沼地区の善ヶ島において、聞き取りアンケート調査を行い、飼料イネの普及や継続生産に伴うシステムの構築や経済的な評価を把握することができた。

研究成果の概要（英文）：

In the present study, to construct the system of circulation material production and environmental restoration basing on appropriate nitrogen cycling in the region by using the forage rice as "Environmental material", the nitrogen removal efficiency of anaerobic digestion slurry, nutrient polluted river water, and liquid cattle waste by forage rice were evaluated. Moreover, the model of the nitrogen removal by forage rice field and the water balance model of watershed size were constructed.

In addition, to evaluate the sustainability of circulation material production system using forage rice, the survey was done at the Zengajima, Menuuma district of Kumagaya city, Saitama prefecture, where forage rice has been producing over 20 years. The system construction and further economic evaluation are important for the spread of forage rice and maintenance of stable production.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	13,900,000	4,170,000	18,070,000
2008年度	5,000,000	1,500,000	6,500,000
2009年度	4,900,000	1,470,000	6,370,000
2010年度	5,300,000	1,590,000	6,890,000
総計	29,100,000	8,730,000	37,830,000

研究分野：環境工学

科研費の分科・細目：環境学・環境技術・環境材料

キーワード：飼料イネ、循環材料生産、環境浄化、畜産、窒素

## 1. 研究開始当初の背景

飼料の自給率24%に示されるように、

膨大な飼料・食糧の輸入に伴い大量の窒素、リンが国内に持ち込まれている。こ

これらの窒素、リンは畜産業や食生活を通じて、河川や湖沼など水環境の栄養状態に影響を及ぼす。なかでも年間 9000 万トン発生する家畜糞尿（この中には 74 万トンの窒素が含まれる）は、我が国で最大の窒素負荷となっている。このため、家畜糞尿の堆肥化、液肥化やメタン発酵処理が実施されてきた。しかし、堆肥は需要量が供給量よりも少ないし、さらに液肥の需要量はより少ない。また、メタン発酵ではその残液（メタン消化液）の処理が大きな問題になっている。

一方、河川、湖沼や内湾では様々な富栄養化対策が講じられてきたが、顕著な改善効果が認められない。主な理由は従来の施設型の水質浄化対策のみでは、非特定汚染源の対策が不十分なためである。非特定汚染源対策として、有効かつ省エネルギー的手段である人工湿地が挙げられるが、わが国では公共事業としてのみ、ヨシ原の復元や創出が琵琶湖・淀川や霞ヶ浦周辺で一部実施されているに過ぎず、まだ広く普及していない状況である。

## 2. 研究の目的

こうした現状を打開するために、飼料イネを「環境材料」として用いて、地域における循環材料生産および環境修復システムを構築し、適切な窒素循環を図ることを目的とする。その結果として、飼料の自給率の向上も期待できる。本研究では、家畜糞尿由来の堆肥、液肥、メタン消化液を施肥源として、飼料イネを栽培し、家畜の飼料として循環生産するシステムを構築すると同時に、休耕田（生産調整水田）を一種の人工湿地とみなし、飼料イネを植栽して汚濁した河川水を施肥源として流入させて浄化し、収穫した飼料イネを家畜の飼料として循環利用する環境修復システムを構築し、さらに、飼料イネの栽培管理技術、窒素収支や地球温暖化ガスなど環境負荷を踏まえた最適窒素浄化手法を提示することを目指す。

## 3. 研究の方法

本研究は、飼料イネを「環境材料」として用いて、地域における循環材料の生産及び環境修復システムを構築し、適切な窒素循環を図ることを目的とする。

具体的な計画として：

(1) 飼料イネに対する様々な窒素負荷に対する耐性やバイオマス生産量を明らかにするとともに、飼料イネによる窒素吸収量、

土壌中の窒素などをはじめとした窒素収支について、ラボスケールの室内実験で明らかにする。

(2) ライシメーターや埼玉県妻沼地区の実水田において様々な飼料イネを栽培し、メタン硝化液、堆肥、液肥を添加し、栽培期間を通じて飼料イネのバイオマス、水収支及び窒素収支を明らかにする。さらに、メタン放出速度やアンモニア放出速度、亜酸化窒素放出速度の評価や間隙水や浸透水中の窒素濃度の測定を行う。沖縄県石垣島では、牛ふん尿からの液肥を各水田区画に施用し、石垣島の気候特性から 3 期作の可能性を検討する。また、不耕起栽培による飼料イネのバイオマス生産に及ぼす影響を評価する。

(3) 霞ヶ浦山王川では、実験水路を用いて、水量負荷、表面流れ及び浸透流れ方式、さらにはそのハイブリッド方式による飼料イネによる水質浄化効果を明らかにする。

(4) 室内と現場実験で得られたデータから、飼料イネを植栽した水田における窒素挙動と収量予測モデルを作成するとともに、流域全体の水収支モデルを作成する。

すでに耕畜連携が実施されている埼玉県妻沼地区を対象として、耕種農家と畜産農家の連携の可能性について、聞き取りアンケート調査を実施し、飼料イネの普及に伴う経済的評価や問題点を把握する。そこで得られたデータに基づき、耕畜連携に対する考え方、経済性、将来性などについて解析する。さらに、行政的支援も含めた総合的な経済性及び飼料イネ栽培に伴う環境負荷量を加味した実現可能な飼料イネ栽培システムを提案する。

## 4. 研究成果

(1) 様々な窒素負荷に対して、飼料イネ（品種としては、クサホナミ、リーフスター、ハマサリ、タカナリ）を植栽することにより、バイオマスへの吸収のみならず、脱窒による窒素の除去が認められた。また、窒素負荷の増加と共に、飼料イネの地上部バイオマス生産量は高くなる結果が得られた。また、飼料イネに吸収された窒素のおよそ 80% は地上部バイオマスに含まれることに対して、土壌への吸着分は無視できることがわかった。

(2) 飼料イネの乾物生産量を最大化し、メタン、亜酸化窒素、アンモニア、栄養塩溶脱といった環境負荷を最少化するメタン硝化液の効果的な水田への施用方法を明らかにするために、ライシメーター実験を行った。同一の無機態窒素量を施用した時、飼料イネの収量は化学肥料とメタン消化液とで大差なかった。消化液を窒素として  $300\text{kg-N ha}^{-1}$  および  $600\text{kg-N ha}^{-1}$  投入した全ての処理区において、飼料イネの生育に障害はなく  $1.9\text{kg}$

m<sup>2</sup>を超える高い収量が得られた。したがって、メタン消化液は化学肥料の代替となると考えられた。しかし、メタン消化液を施肥源に用いると、アンモニア揮散とメタン発生量が増加した。メタン消化液施用水田において起こる顕著なアンモニア揮散は、田面水の深水管理（施肥時のみ田面水を通常の3-4cmから10cmに増やす）もしくは酸（木酢液あるいは硫酸）の添加で50%程度削減できた。田面水の深水管理や硫酸の添加といったアンモニア揮散削減策はメタン消化液施用水田におけるメタン発生を促進しなかった。作付け期間中の亜酸化窒素発生量は極めて少なかった。牛糞尿由来の消化液の代わりに豚糞尿由来の消化液を使うことで、メタン発生量を45%削減できた。また、牛糞尿由来の消化液の固形分をガーゼで取り除いてから水田に施用しても、20%程度メタン発生量が削減された。作付け期間中の亜酸化窒素発生量は極めて少なかったが、休閑期には全メタン発生量の1割程度を占める発生が見られることがあった。豚糞尿由来の消化液には銅や亜鉛が比較的高濃度で含まれることが知られるが、収穫されたイネ中のこれらの含量は、穂部では化肥と比べて全く差はなかった。しかし、茎葉部では2-3割高く、飼料に添加するCu、Zn量よりは少なかったが、長期にわたる連用の影響を見る必要性が示唆された。水田に施用するメタン消化液の種類が水田からのメタン発生に及ぼす影響をみたところ、牛糞尿由来の消化液に比べて炭素含有量の少ない3種類の消化液（豚糞尿由来2種類、生ゴミ・尿由来1種類）では化学肥料と同程度であることがわかった。

(3) 埼玉県妻沼地区の各水田区画に195~600kg-N ha<sup>-1</sup>の窒素負荷量で畜産ふん尿由来の液肥や堆肥を添加し、飼料イネのバイオマス、水収支及び窒素収支を明らかにした。異なる窒素負荷による飼料イネ「ハマサリ」を栽培する実験では、対照系及び添加系を設け、アンモニア揮散及び窒素収支の解明を行った。一方、異なる飼料イネ品種（ハマサリ、クサホナミ、リーフスター）に対して、対照系及び高窒素負荷添加系を設定し、バイオマス生産量や窒素収支の解明を行った。

異なる飼料イネ品種の実験において、高負荷液肥添加系のリーフスターのバイオマス生産量は約1.8kg m<sup>2</sup>と最も多かったが、品種間に有意な差は見られなかった。また、飼料イネ品種の違いによる窒素吸収量の有意な差は見られなかったが、高窒素負荷添加系と対照系の間では有意な差が見られた。さらに、各系の窒素収支も明らかにした。大量の液肥を追肥として投入した（600kg-N ha<sup>-1</sup>）場合、約30~50%の窒素が脱窒により除去されたことがわかった。

(4) 霞ヶ浦山王川では、飼料イネを植栽した実験水路を用いて、汚濁した河川水の浄化実験を実施した。実験水路における窒素除去は主に脱窒反応と飼料イネの吸収によることがわかった。表面流型浄化方式は、バイオマス生産量や飼料イネに吸収された窒素量がほかの浄化方式より高くなる傾向が認められた。しかし、浸透流型やハイブリッド型の浄化方式は、飼料イネの窒素吸収量が少ないにもかかわらず、同じ水量負荷での窒素除去速度は表面流型浄化方式より2.3~2.8倍高いことがわかった。

(5) 作成した窒素挙動・収量予測モデルにおいて、異なる窒素負荷条件下で飼料イネ収量の実測値と計算値が一致した。また、感度解析により、流入したアンモニアはほとんどが硝化・脱窒され、河川への表面流出負荷は非常に小さいことが示された。飼料イネを植栽した水田は、慣行施肥量の3倍までは、高い窒素濃度（負荷）に対応できるほどの高い窒素浄化能力を持つことが示された。一方、霞ヶ浦の桜川を研究対象流域とし、地理情報や地質データを基に統合型水循環シミュレータを作成した。感度解析の結果より求めたパラメータや水田モデル、桜川流域の治水データを流域モデルに組み込むことにより、現実の水循環の挙動を再現することが可能となった。桜川流域シミュレータに最も影響を及ぼす因子として水田モデルであり、水田は桜川流域内の水循環系に非常に大きな影響を与えていることがわかった。

(6) 飼料イネを環境材料とした循環材料生産システムを提案するために、飼料イネの生産を20年以上にわたり継続している埼玉県熊谷市妻沼地区の善ヶ島において、耕種および畜産農家に対して、聞き取りアンケート調査を行い、飼料イネの普及や継続生産に伴うシステムの構築や経済的な評価を把握することができた。善ヶ島において1987年にはじめて飼料イネが生産され、そのあと、地域全体でのイネ発酵粗飼料の生産体制が確立された。耕種農家の間で協議会が設立され、酪農で組織された台牧草生産組合との間に生産利用協定が締結された。畜産農家から耕種農家へ町単事業の水田飼料作物作付拡大事業8,000円/10aと、取引価格4,000円/10aを渡すことにより、耕畜連携推進対策13,000円/10aと合わせ、飼料イネの生産費用25,000円/10aを確保している。このとき、畜産農家は乾物kgあたり19円~26円程度でイネ発酵粗飼料を生産していると試算される。この価格は、乾物kgあたり20~33円程度で推移している輸入乾草に匹敵している。従って、有機性廃棄物を肥料源として、耕畜連携に基づ

き、飼料イネを環境材料とした循環材料生産システムの構築は社会的な意義が大きく、経済的にも実現可能と考えられる。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 14 件)

1. 細見正明、水田は地球を救う？用水と廃水、52(1), 45-47, 2010. (査読なし)
2. 周勝、細見正明、飼料イネを活用した資源循環型河川水浄化技術の開発、用水と廃水、52(1), 63-68, 2010. (査読なし)
3. 豊田剛己・笹田優：メタン発酵消化液の飼料イネ栽培への適用、用水と排水、52(1), 69-75 (2010). (査読なし)
4. 小川真如、淵野雄二郎：耕畜連携による飼料イネ生産の継続要因と効果—熊谷市妻沼地区善ヶ島水田転作協議会 20 年の軌跡—、農業経営研究、48(3), 31-36(2010). (査読あり)
5. Khin Thawda WIN, Ryoko NONAKA, Koki TOYODA, Takashi MOTOBAYASHI and Masaaki HOSOMI: Effects of option mitigating ammonia volatilization on CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions from a paddy field fertilized with anaerobically digested cattle slurry, *Biology and Fertility of Soils*, 46(6), 589-595 (2010) (査読あり)
6. Masaki Sagehashi, Sheng Zhou, Tatsuro Naruse, Mari Osada, Masaaki Hosomi, Nitrogen Dynamics and Biomass Production in a Vertical Flow Constructed Wetland Cultivated with Forage Rice and their Mathematical Modeling, *Journal of Water and Environment Technology*, 7(4), 251-266, 2009. (査読あり)
7. Sheng Zhou and Masaaki Hosomi “Nitrogen removal from polluted river water by surface flow wetland with forage rice (*Oryza sativa* L. cv. Kusahonami)” *International Journal of Environmental Engineering*, 1(2), 123-135, 2009. (査読あり)
8. Sheng Zhou, Kotoha Nishiyama, Yoichi Watanabe, Masaaki Hosomi. “Nitrogen budget and ammonia volatilization in paddy fields fertilized with liquid cattle waste” *Water, air, & soil pollution*, 201, 135-147, 2009. (査読あり)
9. Sheng Zhou, Yutaka Nakashimada, Masaaki Hosomi “Nitrogen transformations in vertical flow

systems with and without rice (*Oryza sativa*) studied with a high-resolution soil-water profiler” *Ecological Engineering*, 35(2), 213-220, 2009. (査読あり)

10. Khin Thawda Win, Koki Toyoda, Takashi Motobayashi and Masaaki Hosomi, Suppression of ammonia volatilization from a paddy soil fertilized with anaerobically digested cattle slurry by wood vinegar application and floodwater management, *Soil Science and Plant Nutrition*55(1), 190-202, 2009 (査読あり)
11. 須永薫子、吉村季織、侯 紅、Khin Thawda WIN、田中治夫、吉川美穂、渡邊裕純、本林隆、加藤誠、西村拓、豊田剛己、細見正明、飼料イネ栽培へのメタン発酵消化液の多量投入が土壌、水質、大気環境に及ぼす影響 *日本土壌肥料学会誌*, 80(6), 596-605, 2009 (査読あり)
12. Hosomi Masaaki, Role of rice paddy fields in our finite planet earth, *Clean Technology and Environmental Policy*, 11, 139-141, 2009(査読なし)
13. Sheng Zhou and Masaaki Hosomi “Nitrogen transformations and balance in a constructed wetland for nutrient polluted river water treatment using forage rice in Japan”, *Ecological Engineering*, 32(2), 147-155, 2008. (査読あり)
14. 周勝、細見正明、「人工湿地に関する研究と利用の動向について」、*用水と廃水*, 50(2), 41-50, 2008. (査読あり)

[学会発表] (計 16 件)

1. S. Zhou, H. Iino, Y. Watanabe, A. Terada, M. Hosomi, Nitrogen transformations in paddy fields applied with high load liquid cattle waste, 19th Japan/Korea Symposium on Water Environment, Fukuyama, Japan, Oct. 25-27, 2010.
2. 笹田優・Khin Thawda Win・豊田剛己：水田に施用するメタン発酵消化液の原料の違いによる温室効果ガスへの影響の比較、日本土壌肥料学会 2010 年度北海道大会、北海道、2010 年 9 月 8 日。
3. Khin Thawda WIN, Ryoko NONAKA, Koki TOYODA, Takashi MOTOBAYASHI and Masaaki HOSOMI: Effects of ammonia volatilization mitigation options on greenhouse gas emissions from a paddy field fertilized with anaerobically digested cattle slurry (ADCS). 2009 International Annual Meeting of Soil

- Science Society of America, Pittsburgh, Nov 1-5, 2009.
4. Sheng Zhou, S. Sugawara, S. Riya, K. Toyoda, M. Hosomi, Effect of infiltration rate on nitrogen dynamics in paddy soil after high-load nitrogen application containing 15N tracer, 3rd International symposium on wetland pollutant dynamics and control: WETPOL 2009, 20-24 Sept. 2009, Barcelona, Spain.
  5. 野中諒子・Khin Thawda Win・豊田剛己 : メタン発酵消化液を施用した水田におけるアンモニア揮散軽減処理がメタンおよび亜酸化窒素発生に及ぼす影響、日本土壌肥料学会 2009 年度京都大会、京都、2009 年 9 月 16 日
  6. 西村 拓, 篠原 貴志, 井本博美, 宮崎毅, バイオエタノール糖化残渣を施用した水田における CH<sub>4</sub> および CO<sub>2</sub> 生成, 農業農村工学会大会、つくば、2009 年 8 月
  7. Masaki Sagehashi, Sheng Zhou, Tatsuro Naruse, Masaaki Hosomi, River water treatment and biomass production using forage rice and its mathematical modeling, The Eighth China-Japan Symposium on Water Environment, Suzhou, 29-30, Nov, 2008.
  8. Sheng Zhou, H. Iino, Y. Watanabe, M. Hosomi. Nitrogen balance and nitrous oxide emission of paddy fields following treatment with high load liquid cattle waste. 11th International Conference on Wetlands Systems for Water Pollution Control, Nov.1-7, 2008, Indore, India.
  9. Sheng Zhou, Tatsuro Naruse, Masaaki Hosomi. “Nutrient polluted river water treatment using SF-VF constructed wetland”, The 16th Seminar of JSPS-MOE Core University Program on Urban Environment, Oct. 23-25, 2008; Xi’an, China.
  10. 周勝、成瀬辰郎、中島田豊、細見正明, 「ハイブリッド型人工湿地による富栄養化した河川水の浄化」, 第 42 回日本水環境学会年会講演集, 名古屋, 2008 年 3 月
  11. 飯野洸、周勝、細見正明, 「畜産糞尿液肥を施肥した飼料イネ水田における窒素挙動」, 第 42 回日本水環境学会年会講演集, 名古屋, 2008 年 3 月
  12. 飯野洸、周勝、細見正明, 飼料イネへの液肥添加による窒素挙動に関する研究、「平成 20 年度関東飼料イネミニ現地検討会」埼玉、2008 年 3 月
  13. Sheng Zhou, Kotoha Nishiyama, Masaaki Hosomi “Ammonia emission from liquid manure applied to paddy field at top-dressing period” ESAFS 8 (Eighth International Conference of the East and Southeast Asian Federation of Soil Science”, Oct. 22-23, 2007, Tsukuba, Japan
  14. S. Zhou, Y. Nakashimada, M. Hosomi “Nutrient polluted river water treatment and biomass production using hybrid wetland systems with forage rice in Japan” 2nd International symposium on wetland pollutant dynamics and control: WETPOL 2007, 16-20 Sept. 2007, Tartu, Estonia, Volume I, 376-379.
  15. S. Zhou, Y. Nakashimada, M. Hosomi “Comparative study of nitrogen transformations in vertical flow systems using a high resolution soil-water profiler” 2nd International symposium on wetland pollutant dynamics and control: WETPOL 2007, 16-20 Sept. 2007, Tartu, Estonia, Volume II, 565-568.
  16. Sheng Zhou, M. Hosomi, Simultaneously Treating Nutrient Polluted River Water and Recycling Nitrogen with Forage Rice in Constructed Wetland, Proceedings of The 14th Seminar of JSPS-MOE Core University Program on Urban Environment, 155-160, September 7-8, 2007; Kyoto University, Kyoto, Japan
6. 研究組織
- (1) 研究代表者  
細見 正明 (HOSOMO MASAACKI)  
東京農工大学・大学院工学研究院・教授  
研究者番号：90132860
  - (2) 研究分担者  
豊田 剛己 (TOYODA KOUKI)  
東京農工大学・大学院農学研究院・准教授  
研究者番号：30262893  
本林 隆 (MOTOBAYASHI TAKASHI)  
東京農工大学・農学部・講師  
研究者番号：20262230  
淵野 雄二郎 (FUCHINO YUUJIROU)  
東京農工大学・大学院農学研究院・教授  
研究者番号：60015104  
西村 拓 (NISHIMURA TAKU)  
東京大学・大学院農学生命科学研究科  
准教授  
研究者番号：40237730

柏 雅之(KASHIWAGI MASAYUKI)

早稲田大学・人間科学学術院・教授

研究者番号：40204383

(H20→H21：連携研究者)

板橋 久雄 (ITABASHI HISAO)

日本獣医生命科学大学・応用生命科学部・  
客員教授

研究者番号：00280991

(H20→H21：連携研究者)