

Symposium (Oral) | Symposium : Earth's limits? Crisis Avoidance with Plasma and Energy Systems in Planetary Boundaries

📅 Thu. Sep 19, 2024 1:30 PM - 5:30 PM JST | Thu. Sep 19, 2024 4:30 AM - 8:30 AM UTC 🏢 A22 (TOKI MESSE 2F)

[19p-A22-1~8] Earth's limits? Crisis Avoidance with Plasma and Energy Systems in Planetary Boundaries

Kazunori Koga(Kyushu Univ.), Tomonori Kawano(Univ. Kitakyushu)

1:30 PM - 2:00 PM JST | 4:30 AM - 5:00 AM UTC

[19p-A22-1]

Nitrogen Fertilizer Production by Air Plasma without Direct CO₂ Emission

○Manabu Tanaka¹, Takayuki Watanabe¹, Takamasa Okumura², Pankaj Attri², Kazunori Koga², Masaharu Shiratani², Nozomi Takeuchi³, Katsuyuki Takahashi⁴ (1.Kyushu Univ., 2.Kyushu Univ. ISEE., 3.Tokyo Tech, 4.Iwate Univ.)

2:00 PM - 2:15 PM JST | 5:00 AM - 5:15 AM UTC

[19p-A22-2]

Generation of Atmospheric Pulsed Discharges and Their Applications for Agriculture

○Katsuyuki Takahashi¹, Koichi Takaki¹ (1.Iwate Univ.)

2:15 PM - 2:45 PM JST | 5:15 AM - 5:45 AM UTC

[19p-A22-3]

Marine aquaponics with photosynthetic organisms for sustainable C and N cycles

○Tomonori Kawano¹ (1.Univ. Kitakyushu)

2:45 PM - 3:15 PM JST | 5:45 AM - 6:15 AM UTC

[19p-A22-4]

Eco-island project with circular food economy

○Toki Taira¹ (1.Ryukyu Univ.)

3:30 PM - 4:00 PM JST | 6:30 AM - 7:00 AM UTC

[19p-A22-5]

Emerging carbon recycling and energy systems using plasma

○Tomohiro Nozaki¹ (1.Tokyo Tech)

4:00 PM - 4:30 PM JST | 7:00 AM - 7:30 AM UTC

[19p-A22-6]

Energy Production Using Subsurface Microbial Communities

○Katsunori Yanagawa¹ (1.Univ. Kitakyushu)

4:30 PM - 5:00 PM JST | 7:30 AM - 8:00 AM UTC

[19p-A22-7]

Center of Excellence of the Sustainable Integration of Land-based Aquaculture with Agriculture to build the Resource Circular Symbiotic Society

○Fumihiro Haga¹ (1.Univ.Ryukyus)

5:00 PM - 5:30 PM JST | 8:00 AM - 8:30 AM UTC

[19p-A22-8]

Evaluation of nitrogen load to the environment from food system and mitigation measures using food nitrogen footprint—a case study in Ishigaki Island

○Kosuke Hamada¹, Sadao Eaguchi², Nanae Hirano², Kei Asada², Naoko Oka¹ (1.JIRCAS, 2.NARO)

空気プラズマを用いた CO₂ 直接排出のない窒素肥料生成

Nitrogen Fertilizer Production by Air Plasma without Direct CO₂ Emission

九大院工¹, 九大院シス情², 東工大³, 岩手大⁴ ○田中 学¹, 渡辺 隆行¹, 奥村 賢直²,
Pankaj Attri², 古閑 一憲², 白谷 正治², 竹内 希³, 高橋 克幸⁴

Kyushu Univ.¹, Kyushu Univ. ISEE.², Tokyo Tech³, Iwate Univ.⁴ °Manabu Tanaka¹, Takayuki
Watanabe¹, Takamasa Okumura², Pankaj Attri², Kazunori Koga², Masaharu Shiratani²,
Nozomi Takeuchi³, Katsuyuki Takahashi⁴
E-mail: mtanaka@chem-eng.kyushu-u.ac.jp

プラズマを利用した窒素固定による肥料生産は、化石燃料を利用した工業プロセスに代わる魅力的な方法の一つである。

地球上の窒素の 99%以上は大気中の N₂ の形で存在しているが、反応性の形態（アンモニアや硝酸塩など）に変換する必要がある。このプロセスが窒素固定プロセスであり、窒素の強力な三重結合を切断し、窒素原子を酸素、水素、炭素などの他の元素と結合させる。このプロセスによって、地球の窒素サイクルが完成する。

世界の推定窒素固定量は、約 413 Tg/年と報告されている[1]。生物学的窒素固定が主要な供給源であるが、時間がかかるため、増加する世界人口を支えるために必要な肥料をまかなうのは現実的でない。最も広く利用されている工業的窒素固定プロセスはハーバー・ボッシュ（HB）で、不均一系触媒を用いた高温高压条件下での化学反応（水素と窒素）によってアンモニアを合成する。2010 年まで、このプロセスによって年間 120 トン以上の窒素が固定され[2]、そのうちの約 80%はその後肥料として使用され、残りの 20%は他の窒素含有化学物質の合成原料として使用されている[3]。工業的窒素固定化の発展により、世界の食糧生産は指数関数的に増加し、急増する人口の需要を満たすことができるようになった。世界人口のさらなる増加が見込まれる中で、HB プロセスは工業的窒素固定において極めて主要な役割を担っている。しかしながら、HB プロセスは非常にエネルギー集約的であり、環境への懸念がある。実際、全世界の総エネルギーの約 1~2%、総天然ガスの 2%がこのプロセスで消費され、その結果、3 億トンの CO₂ 排出の原因となっている。人口の急増と天然資源の枯渇を考慮すると、窒素固定のエネルギー効率を改善できれば、経済的にも環境的にも非常に有益である。そのため、HB プロセス用触媒の改良、プラズマを用いた窒素固定プロセスの開発、生物学的窒素固定など、持続可能な窒素固定法に関する継続的な開発が進められている。

本研究では、一般的な窒素固定にとどまるのではなく、プラズマまたはプラズマ下流ガスを直接腐葉土等の固体試料に照射することで、一段のプロセスで肥料製造するプロセスを検討し、多角的な視点からその評価を行う。

- [1] F. David, et al., The global nitrogen cycle in the twenty-first century, *Phil. Trans. R. Soc. B*, 2013, 368.
- [2] J.W. Erisman, et al., How A Century of Ammonia Synthesis Changed the World. *Nat. Geosci.* 2008, 1, 636–639.
- [3] J.N. Galloway, et al, Transformation of the Nitrogen Cycle: Recent Trends, Questions, and Potential Solutions. *Science* 2008, 320, 889–892.

大気圧パルス放電の発生と農業への応用

Generation of Atmospheric Pressure Pulsed Discharges and Their Agricultural Applications

岩手大¹, 岩手大次世代アグリ² °高橋 克幸¹, 高木 浩一^{1,2}

Iwate Univ.¹, Agri-Innovation Center, Iwate Univ.², °Katsuyuki Takahashi¹, Koichi Takaki^{1,2}

E-mail: ktaka@iwate-u.ac.jp

高電圧パルスパワーを用いて発生する大気圧パルス放電は、電気エネルギーのみでその場で容易にプラズマを形成することができる。プラズマ中では、原子状酸素やヒドロキシラジカルなどといった、酸化力が高い活性酸素種や活性窒素種が生成される。これを利用することにより、薬品などを用いずとも、環境中の難分解性化合物の酸化分解、菌やウィルスの不活化、窒素化合物の生成などが可能となることから、環境浄化や農林水産・畜産業などにおける応用が期待されている。農林水産・畜産業においては、プレハーベストにおける応用として、水耕栽培液や土壌中に含まれる有機化合物の分解や、病原菌の不活化による成長阻害や病害の抑制、窒素固定による養分の生成などがある(Figure 1)。また、畜舎における悪臭物質の除去や粉塵除去による、畜産動物の生育環境改善や、電気刺激によるキノコの増産など、生産性の向上が期待できる。ポストハーベストにおける応用としては、エチレン分解による青果物の鮮度保持や、残渣物からの有用成分抽出、乾燥速度の向上など、鮮度保持による商品価値や新しいチェーンサプライの構築に寄与できる。本発表においては、小型高電圧パルスパワー電源を用いた大気圧パルス放電の発生技術とともに、農林水産・畜産業への応用の取り組みについて紹介する。

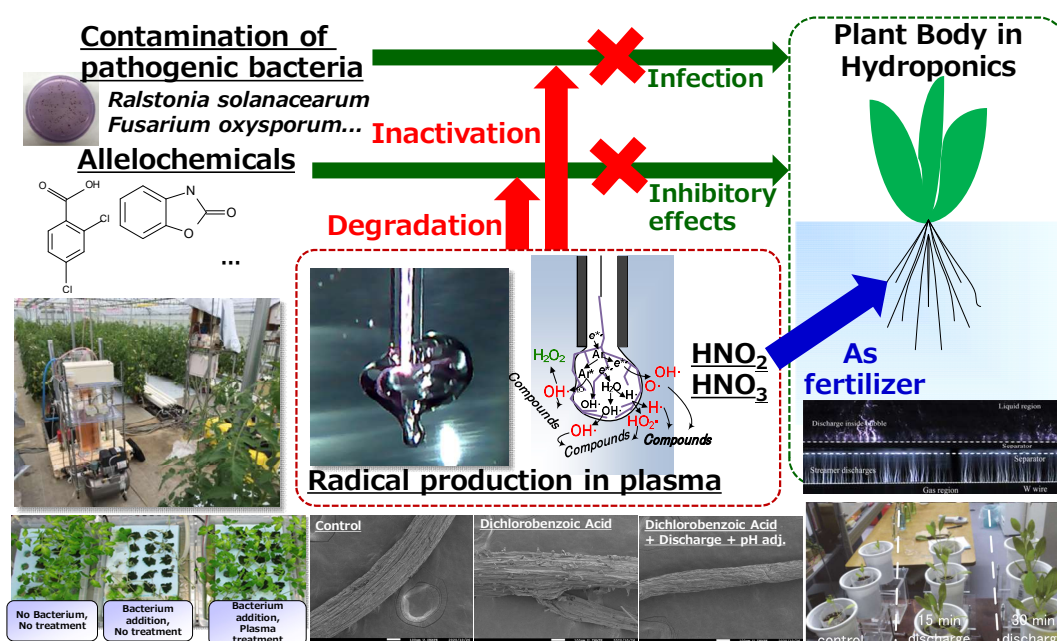


Figure 1 Treatment of nutrient solution of hydroponics
by pulsed discharges generated over liquid surface

海産性光合成生物を利用した新しいアクアポニクスと物質循環

Marine aquaponics with photosynthetic organisms for sustainable C and N cycles

北九州市大¹ ○河野 智謙¹

Univ. Kitakyushu¹, °Tomonori Kawano¹

E-mail: kawanotom@kitakyu-u.ac.jp

現在、地球規模での人口増加に起因する食料問題や環境問題は、それぞれが複合的に関連しており、農作物の生産性向上のための化学肥料の使用や水産資源枯渇を回避するための水産養殖が土壌や海洋の汚染につながるなど、特定の課題を解決するための施策が、別の問題を引き起こす事例が多くある。Paul Crutzen ら(2000)は、人類が地球環境に与える影響が増大した現代を、過去の地質学的時代と区別して「人新世」と呼ぶことを提唱したが、人新世を特徴づける 24 の指標の内、8 項目が、化学肥料（窒素）の使用を起点とした地球規模の環境問題である。

アクアポニクスは、農業と漁業における物質循環を接続させ、効率的な食料生産の実現と環境負荷の低減を企図する技術であるが、その原型は、古代の東アジアでの稲作と淡水魚の飼育の併用や中米におけるチナンパ（湖水に浮かぶ浮島）での耕作に見出すことができるとされる。一方、本格的に窒素循環の効率化を企図して急速に開発が進んだのは 20 世紀後半以降のことであり、現在までに淡水環境での魚類飼育と連結した多様な農作物の栽培がプロトコル化されている。アクアポニクスでは、生産者が魚介類養殖と農業生産の両方から収入を得ることができるため、魚介類養殖に伴う水質汚染を解決する方法としては、コストの面で非常に優れたアプローチである。

年間 96 万トンの魚介類を養殖する日本国内においても（2021 年時点）、環境への負荷を低減する持続可能なアプローチとして、農業と漁業での窒素利用を効率的に接続するアクアポニクス技術が大きな注目を集めている。しかし、日本の水産養殖の約 97%が海面を利用した養殖であるため、淡水魚を想定して開発されたアクアポニクス技術を利用することができない。近年の Satreps プログラムでの国際協力を通じた改良型アクアポニクスの実証試験では、乾燥地特有の塩濃度が高い水環境での魚類養殖と農業に特化した技術導入が試みられているが、海産性の魚類を対象としたアクアポニクス技術は開発されていない。

一方、海洋には、サンゴのように光合成により炭素を固定することで生育する生物が分布しており、この中には、水産資源として高い価値を持つ生物も含まれる。サンゴ礁生態系を代表する動物であるサンゴやシャコガイの仲間は、体内に褐虫藻を共生させ光合成で生育する。北九州市立大学では、宮古島市の海業センターと共同で、地域の高級食材として知られるヒメシャコガイの人工飼育研究に取り組んできたが、近年、ヒメシャコガイが、旧来のアクアポニクスにおける農作物のように魚類由来の窒素成分を効率的に吸収し、自らの生育に利用することを明らかにしている。本講演では、サンゴ礁の生態系を再現した光合成生物と熱帯魚をモデルとした海水対応型アクアポニクスの事例を中心に、生物地球化学的循環から見た持続的な水産養殖や農業の在り方について議論する。

食資源循環による「美ら島」実現プロジェクト

Eco-island project with circular food economy

琉球大農 平良東紀

University of the Ryukyus, Toki Taira,

E-mail: tokey@agr.u-ryukyu.ac.jp

琉球大学では、研究推進機構 共創拠点運営部門内に「地域共創プロジェクトチーム」を設置し、「食資源循環による美ら島実現事業（通称:FoodX プロジェクト）」を推進している。本プロジェクトは地域課題の解決に向けた取組であると同時に、島嶼空間における窒素循環と自然環境との関係を考えるプロジェクトでもある。背景とビジョンを以下に示す。

沖縄は、美しいサンゴ礁の海に象徴される豊かな自然と琉球王朝時代から続く独自の文化を有する「美ら島」として、観光業を中心とした産業で発展してきた。しかし、いま、農業・生活・観光による環境への負荷が美ら島の持続性を脅かしている。畜産農家による家畜糞尿の堆肥化技術が不十分あることに加え、多くの耕種農家が化学肥料に頼っているため、やせた土壌から肥料成分が地下水を通じて海に流出し、サンゴ礁にダメージを与えている。また、沖縄の食文化の象徴である養豚は、ほぼ外国産に依存している飼料の暴騰や散発する感染症により衰退の一途を辿っている。このままでは観光資源である美しい海と食文化は島民の誇りとともに失われてしまう。

フード・トランスフォーメーション（FoodX）がこの状況を転換する。我々は美しいサンゴ礁に囲まれた島嶼空間において、食品残渣を最大限回収・飼料化・エネルギー化するシステムおよび家畜糞尿の効率的堆肥化とその流通・耕畜連携システムを構築する。安価で環境負荷の少ない食品残渣飼料は畜産農家の経営安定化につながり、食品残渣のエネルギー化は多量の食品残渣を出す観光業や食品産業の持続可能性を高める。家畜糞尿堆肥の流通システムの確立は畜産農家の経営安定化と持続可能性を高め、耕種農家の化学肥料から有機肥料（堆肥）への転換による土壌改良と環境負荷低減を実現する。加えて環境モニタリングにより農畜産のサンゴ礁への影響を数値化するとともに閾値を決定し、島民の生活を守りながら環境を守るシステムを構築する。これらにより、「島嶼型食資源循環モデル」を確立する。食品残渣を排出し、有機肥料で作られた農産物を使用・消費する企業・住民・観光客は、このモデルを確立するための重要なステークホルダーである。島嶼における食資源循環の課題を共に考えるプログラムを開発し、地域の小中高生および修学旅行生に向けて実施する。また、観光を学ぶ大学生に食・農・環境についての課題探索型授業を開講しこれらを理解した観光人材の育成を行う。同時に、琉球大学内に実証農場「琉大つながるファーム琉大つながるファーム」を設置し、循環型農業の実践と普及の場、農家同士および農家と地域住民・生徒・学生が交流する場を県・自治体・大学で連携して提供する。

これらを通じて美ら島の再生に向けた農業・生活・観光をつなぐコミュニティが形成される。自らが係わって再生した美しい海と誇れる文化によって醸成されたシビックプライドが、世界で最も持続可能な食資源循環の島「美ら島」を共創する。

プラズマによる新しい炭素循環・エネルギー利用システム

Emerging carbon recycling and energy systems using plasma

東工大工学院 °野崎 智洋

Tokyo Tech, °Tomohiro Nozaki

E-mail: nozaki.t.ab@m.titech.ac.jp

化学反応プロセスの大部分が熱エネルギーの大量消費のうえに成り立っている。熱エネルギーのカスケード利用など省エネ技術はほぼ成熟しており、化石燃料の燃焼熱を利用するかぎり CO₂ 排出量削減に対する根本的な解決は困難を極めている。低温熱エネルギーを利用する場合でも、温度差が小さくなるほど熱流束が小さくなり、生産性の低下や反応器の大型化に伴うコスト増加によって技術の実装が制限を受ける。水蒸気発生のような単純プロセスでも(大気圧なら 100℃)、装置の小型化や迅速な起動停止が要求されるため、1000℃を超える燃焼熱が利用される。一方、物質変換に伴う物理・化学操作の実行にはエネルギーの投入が不可欠であり、低炭素なエネルギー供給源として再生可能エネルギーの利用が求められる。わが国では、「2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」に基づき、様々な産業分野で既存熱プロセスの電化が推進されており、電気化学、光化学、生化学に加え、電場、マイクロ波、電気加熱などを利用した物質変換技術が検討されている¹⁾。触媒や分子ふるい機能を集積したデバイスの開発や、新しい概念に基づいた分子転換に関する研究も活性化しているが、エネルギー効率や生産性など課題が多く、水の電気分解や CO₂ 共電解など一部を除き基礎研究にとどまっているのが現状である。

近年、非平衡性が高い反応場を大容量でつくるプラズマと、触媒科学を融合したプラズマ触媒に関する研究が既存の熱触媒技術の課題を解決しうる新しい低炭素技術として注目を集めている^{2,3)}。電気エネルギーを用いて分子を活性化するため、熱依存型の従来システムから脱却した新たな低温化学反応システムの創出が期待できる。プラズマの形成には電力を必要とするため、再生可能エネルギーの利用推進と相まって、プラズマ触媒に関連する技術は、電気化学、光化学に次ぐ新しいプロセス電化技術として基礎・応用研究が加速している。本発表では、プラズマ触媒による CO₂ 転換について、最も機構解明が進んでいる逆水性シフト反応 ($\text{CO}_2 + \text{H}_2 = \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$: 吸熱反応) とともに、発熱反応である CO₂ メタネーション反応 ($\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 = \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$: 発熱反応) を比較してプラズマ触媒技術の特徴を紹介する。これらの反応は再生可能エネルギーから生成されるグリーン水素を必要とするため、特にコストの点で実装が制限されやすい。そこで、グリーン水素を利用しない炭素循環技術として CO 二量化反応 ($2\text{CO} = \text{C} + \text{CO}_2$) によるカーボンブラック合成についてプラズマ触媒技術の展望を述べる。

謝辞：本研究は JST CREST(JPMJCR19R3)の支援を得て行われた。

- 1) A.I. Stankiewicz and H. Nigar, *React. Chem. Eng.* **5**, 1005 (2020).
- 2) T. Nozaki, X. Chen, D.-Y. Kim, C. Zhan: *Plasma Chem. Plasma Process.* **43**(6), 1385 (2023).
- 3) T. Nozaki, D.-Y. Kim, X. Chen: *Jpn. J. Appl. Phys.* **63**, 030101 (2024).

地下圏微生物を活用したエネルギー生産 Energy Production Using Subsurface Microbial Communities

北九州市立大¹, °柳川 勝紀¹

Univ. Kitakyushu¹, °Katsunori Yanagawa¹

E-mail: kyanagawa@kitakyu-u.ac.jp

2050年までに実現を目指すカーボンニュートラルは、温室効果ガスの排出を全体として無くすことを想定しており、化石燃料に依存したエネルギーの需給体制を見直しや温室効果ガスの排出削減が喫緊の課題となっている。さらに、日本の長期的なエネルギー計画を考慮すると、新たな科学的知見と技術開発によるイノベーション創出が不可欠である。特に、国土に豊富に存在するエクセルギーの低い天然資源を有効利用するための研究が、資源の乏しい我が国にとって極めて有益である。

温泉などの地熱水は地下深部で様々な化学反応を経験した溶液である。結果的に多量の還元物質を含んだ熱水が、地表の酸化的な環境で噴出する際に熱力学的に非平衡状態が生まれる。熱水中に生息する微生物は、その際に利用可能な種々の酸化還元反応を触媒することで自由エネルギーを獲得し、自らの非平衡状態を維持している。さらに、多くの熱水環境ではその温度条件で至適増殖が可能な微生物が選択されており、極めて高い代謝活動と自己増殖能を有することも少なくない。これらの物理・化学的特徴に起因する理由で、熱水中の機能性未知微生物は魅力的な生物工学的ポテンシャルを秘めているが、我々はそれらを十分に有効活用できているとは言い難い状況である。

近年、我々の研究グループは大分県杵築市に位置する山香温泉が特徴的な微生物生態系が発達することを見出した。泉温は33-38度、pH 6.6付近で、酸化還元電位は低く、溶存無機炭素濃度が高い物理・化学的環境であった。また、大きな特徴として、塩化物イオンに富み、リチウムやヨウ素も検出され、溶存有機物濃度も高い。微生物群集としてはメタン生成アーキアが優占する。この微生物を含む複合微生物によるプロセスが働き、有機物を分解しメタンを作り出すポテンシャル高く、エネルギーハーベスト手法や分散型エネルギーシステムの構築に繋がる可能性がある。本講演では、それら温泉中微生物の着目し、その代謝活動を刺激することで、様々な未利用もしくは廃棄物バイオマスからメタンの産生を促すバイオメタネーションの取り組みについて紹介する。

資源循環型共生社会実現に向けた農水一体型サステナブル陸上養殖のグローバル拠点

Center of Excellence of the Sustainable Integration of Land-based Aquaculture with Agriculture to build the Resource Circular Symbiotic Society

琉球大共創 羽賀 史浩

Univ. of the Ryukyus, Fumihiko Haga

E-mail: f-haga@cs.u-ryukyu.ac.jp

1. 拠点ビジョン

本プロジェクトでは、一次産業から見える将来課題（人口増に伴う食糧不足、エネルギー供給の持続可能性、食品ロスや食品廃棄の弊害、担い手不足による一次産業の経営困難）を「食」、「エネルギー」、「人材」の好循環を生む仕組みを構築することから解決を目指す。本プロジェクトの未来のありたい社会像は「世代を超えてすべての人が、環境負荷ゼロで食資源の確保と経済的な自立が出来る社会」、20年後の未来には水産業や農業の垣根がなくなり、一次産業が融合した新しい産業が創出され、そこで若者たちが活躍している姿が我々の拠点ビジョンである。

2. 研究開発と社会実装

拠点ビジョンを実現するためには、若者が自信と希望をもって就労できる農水一体型の資源循環型産業の構築が第一歩となる。そのために、本プロジェクトでは6つの研究開発課題に取り組んでいる。研究開発課題1は「無駄を省いた海洋生物の生産技術の開発」で、生物学的アプローチとして養殖対象生物を早く大きく育てる技術開発とともに魚粉代替飼料の開発を行うことで生産コストの削減を目指す。研究開発課題2は「物質循環型農水一体養殖技術の開発」で、海水魚の養殖から排出される水溶性物質および固形物を、それぞれ環境負荷の少ないアクアポニックス技術によって付加価値の高い農産物へ変換する。これにより環境的、経済的に持続可能な物質循環型農水一体型養殖技術の開発を行う。研究開発課題3は「再生可能エネルギー100%による電源供給」で、環境が異なる様々な地域で閉鎖循環式養殖が導入できるための研究開発を行う。モデル予測制御を適用すると共に養殖施設のポンプ等負荷のデマンドレスポンス能力を活用する。研究開発課題4は「ICTを活用したスマート陸上養殖技術の開発」で、閉鎖循環式陸上養殖の技術基盤の構築を目指し、スマート水産業の取り組みで行われているICT活用の効果を検証し、最先端の技術の活用を実施する。研究開発課題5は「沖縄モデルを実現するシステム技術開発」で、4つの研究開発課題を融合し全体最適化を図ることで、部分最適化に陥らずに拠点ビジョンに合致したシステム開発を行う。研究開発課題6は「社会実装のためのビジネスモデル開発」で、水産業や農業でICTを活用して経験や勘に頼らない客観性、情報に基づくオペレーションやビジネスモデル開発をし、若者にとって魅力があり参入しやすい産業を構築する。我々の拠点では、上流の研究開発から下流の流通・販売までサプライチェーン全体を一気通貫した産学官連携グローバル共創プロジェクト拠点を目指している。

食の窒素フットプリントを活用したフードシステムからの窒素負荷の算定および改善策の提案-石垣島を例にして

Evaluation of nitrogen load to the environment from food system and mitigation measures using food nitrogen footprint—a case study in Ishigaki Island

国際農研¹, 農研機構² ◯濱田 耕佑¹, 江口 定夫², 平野 七恵², 朝田 景², 岡 直子¹

JIRCAS¹, NARO² ◯Kosuke Hamada¹, Sadao Eguchi², Nanae Hirano², Kei Asada², Naoko Oka¹

E-mail: hamadak302@affrc.go.jp

世界における窒素に起因する環境問題は逼迫した状況にあり、窒素循環の適正化が強く求められている。そのため、農業生産においては堆肥のようにその地域にすでに存在する有機資源を活用し、化学肥料の使用量を削減することが必要であり、消費においては窒素負荷の少ない食生活へのシフト（食べ過ぎや食品ロスを減らすなど）が必要である。食の窒素フットプリントは、食料の生産、加工、流通、消費、ヒトの排泄の全過程から、どれくらいの反応性窒素（Nr； N_2 を除く全ての窒素）が環境中に排出されるかを表す簡易な科学的指標である。本研究では、食の窒素フットプリントの考え方を活用し、石垣島のフードシステムにおける窒素フローと窒素負荷の現状を物流データ等の統計資料に基づき評価すると共に、その改善策を提案することを目的とした。改善シナリオとして、①牛糞堆肥の利用率向上を通じた化学肥料使用量の低減による窒素負荷削減量と②消費者の食べ過ぎや食品ロスを軽減した場合の窒素負荷削減量を検討した。窒素負荷削減は地球規模で考える必要があるため、島内だけでなく、輸入食飼料を生産する島外の窒素フロー・窒素負荷量も考慮した。

分析の結果、石垣島の主要な食料生産にかかる全 Nr 排出量の 28%が島内消費者向け、72%が島外輸出向けの食料生産に起因することが明らかになった。石垣島の食料生産量は、牛肉を除くと消費者の需要を満たすには十分ではなく、輸入粗食料（非可食部も含む食料）Nr は、島内で生産された粗食料 Nr の 5.1 倍と推定された。これらの結果から、(i) 石垣島の食生活に由来する Nr 排出の一部が、輸入農産物の生産を通じて島外で発生していること、(ii) 島外の食生活のための Nr 排出が、輸出用農産物の生産を通じて石垣島内で発生していることが明らかになった。

堆肥利用率の向上により化学肥料 Nr の 30%を代替するには、島内で産出される堆肥 Nr の約 70%を農地に施用する必要があることが示された。このシナリオでは、島内での Nr 排出は、現状から 17%削減される。一方、消費者の食べ過ぎを現在の半分にするシナリオでは、島内での Nr 排出削減率は 3%程度だが、輸入食飼料を生産する島外での Nr 排出を 10%削減できることが明らかになった。また、食品ロスの飼料利用（エコフィード）や、食品ロス分だけ輸入食料を削減するシナリオでは、前者より後者の方が、島内・島外における Nr 排出削減効果が高いことが示された。

本シナリオ分析より、堆肥利用率の向上は主に島内での Nr 排出削減に寄与すること、食品ロスの削減など消費者の食生活の改善は島内・島外両方の Nr 排出削減に効果があることが示された。