

## ゼロ・エミッションの農業

舟川晋也\*・矢内純太\*\*

〔キーワード〕：環境低負荷型農業，水田，生産生態基盤，ゼロ・エミッション，窒素

## 1. はじめに

近代農業は，外部からのエネルギー投入(化学肥料や農業機械)によって，多収と経済性の向上を第一義的に目指して推進されてきた．その結果食糧生産は確かにめざましく増大したが，同時に農業起源の環境問題や，土地劣化など生産基盤そのものの劣化が顕在化してきた．これらの問題を回避するためには，基本的には，関連する技術開発の主たる方向性を，「多収・経済性」一辺倒から「持続性の担保・環境負荷の抑制」へ転換しなければならないと考える．

このあたりの状況を解析するために，本論では図1のような分析スキームを用意した．農業の持続性を危うくするプロセスは，大まかには以下の3つの状況に分けることができる．1) 水や化学肥料といった農業への投入資材の枯渇，2) 温室効果ガスや硝酸イオンといった環境負荷物質放出の増大，3) 土壌侵食や土壌有機物減耗といった生産基盤の劣化である．これらの問題のうち，本論では特に2)の「環境負荷物質の放出」を適切に管理する方策を考えてみたい．その際，1)に関する問題の多くは，農業に対する資源分配(水・肥料・エネルギー等)

に関わる社会・経済的課題であることが多く，3)はむしろ不適切な1)・2)の管理に起因する結果としての側面が強いこと，また2)が科学研究の枠組みで比較的アプローチしやすい課題群であることを意識しておきたい．

## 2. 農業開発と環境問題

人類の農耕活動において，一般に「水」と「養分」は，両立することがまれな資源である．降水量の多い地域の土壌ではすでに鉱物風化が進行しており，これ以上養分元素を放出することのない強風化土壌が残されていることが多い．また温暖湿潤な気候条件下では，有機物の生産・分解のサイクルが速く，土壌中に有機物は蓄積されにくい(Funakawa 2017)．これに対して乾燥地～半乾燥地では，土壌は無機養分に富みその肥沃度は高いのであるが，こちらでは不足しがちな水資源量が農業生産の可能性を制限する(Funakawa et al. 2007)．これら自然の制約を意識しながら，その限界を少しずつでも超えるために，前者の湿潤地では，伝統的には植生の焼却/無機養分放出に依存した焼畑移動農耕のような粗放な農業が，また後者の半乾燥地では河川水あるいは地下水を利用した灌漑農業が展開されてきたのである．このように近代以前の農耕活動は，生産の持続性に

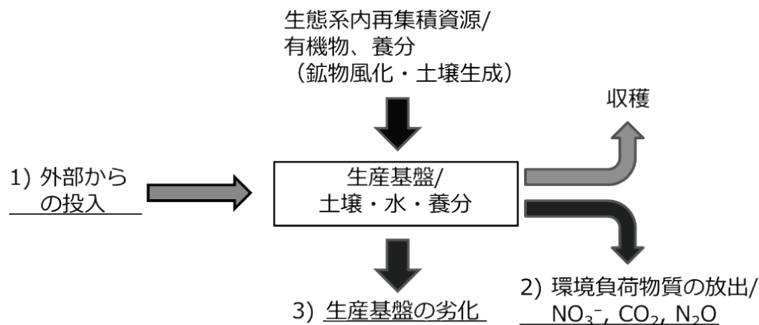


図1 農業による環境負荷発生を理解するための基本スキーム

\*京都大学大学院地球環境学堂 (Shinya Funakawa)

\*\*京都府立大学大学院生命環境科学研究科 (Junta Yanai)

欠ければその文明が淘汰されてしまうような危険をはらみながら、どちらかといえば所与の生産生態環境に対して適応的なものであったであろうことが推察される。

しかしながらこのような状況は、政治・社会的にはコロブス以降各大陸の往来が飛躍的に拡大し、また技術的には産業革命によってほぼ無尽蔵なエネルギー利用が可能となって以降、大きく変容した。乾燥地・半乾燥地においては大規模な灌漑農業の展開が、また湿潤地においては窒素を代表格とする化学肥料の利用が広く可能となるとともに、社会・経済的には、以前には相当程度自給的であった食糧生産が商品経済に組み込まれることによって、生産の上限が事実上消失した。「多収と経済性」を第一義的な目的とした農業生産システムが、現在の世界標準となっている。

しかしながら湿潤地における多量の施肥は下流の水系において硝酸汚染・富栄養化などの環境問題を引き起こす (Scientific American 編集部, 2010)。乾燥地においては、良質の淡水資源は世界的に底をつきかけており、その過度の利用は例えばアラブ海消失や黄河断流あるいは合衆国やガンジス平原での地下水枯渇など、深刻な環境・資源問題を顕在化させている (総合地球環境学研究所 2009)。養分や水という、かつて私たちの農業生産に制限をかけてきた問題を克服するために適用した近代農業が、それゆえに水圏の富栄養化や水資源の枯渇・土地劣化といった問題を顕在化させているのが現在の状況である。このように私たちの生産生態空間は、実はそれほど強韌ではなかったことが示され始めている。そして、農業起源の環境問題が、農業に必須の「水資源」あるいは「養分」に対する強い希求とその獲得実現を通して発生したことを考えれば、環境に負荷をかけない農業は、実は世界的には少ないということも首肯されることである。

### 3. 日本の生産生態環境の特徴

このような観点から日本をはじめとするモンスーン・アジアの低地稲作を中心とした農業空間を眺めたとき、これが水と養分の双方に恵まれた稀有な生産基盤の上に成り立っていることに気づかされる。まず多雨地帯の低地に位置することから、水資源は潤沢にある。上流から移動してきた溶存成分

や懸濁物を水田に貯めることにより、常に資源が下方へ失われる斜面上部と比べて、無機養分にも恵まれている (川口 1978)。また山麓部あるいは台地上においても、日本であれば火山灰の堆積など、畑作地としては例外的に肥沃な土壌が広く分布する。このような複雑な地形要因に支配された日本の農地の条件は一方で、「傾斜地が多く、小規模で、多量の労働投入が必要とされる」ため、経済的合理性の観点からは弱点として認識されることが多かった。またこれを理由の一部として、高度成長期以来農山村の過疎化、都市部への人口集中が進行してきたのは事実である。しかしながら、先述したような近代農業の限界が明らかになってきた今日、これら日本の自然に由来する諸条件をポジティブな価値に転化しようとする発想が真に必要とされている。日本では、「生産の持続性が保証され、環境負荷の小さい農業」を行う条件が整っているのである。

このような背景をふまえて、本論では特に、基本的に水資源に富み、山間地と低地のコントラストが明瞭な日本の生産生態空間に適した環境保全的な農業、すなわち図1における2)の環境負荷物質の放出を最小とするような農業とはどのようなものか考えてみたい。このような条件下では、無機元素はその移動方向が土壌表層から下層方向 (洗脱的)へ、また土壌圏から水圏へと一方的であり、また生態系内での有機物の回転も早いため、農業生産を維持するためには基本的に施肥が必須であり、また土地劣化を避けるために適切な土壌有機物管理も求められる。このことを認識した上での窒素や炭素の動態の適切な管理が、環境低負荷型農業の確立には必須であるといえる。ここでは、まず炭素と窒素の元素としての本質的な類似点、相違点を意識した上で、農地から系外へのこれらの無用な放出を抑制しようとするような技術的要件を考えたい。

### 4. 窒素を巡る環境問題の本質

生態系を構成する有機物の骨格構造を形成する炭素は、大気中の炭酸ガスより光合成を通して系に取り込まれ、生物間の被捕食関係あるいは様々な同化・異化 (呼吸) プロセスを経て、最終的には再度炭酸ガスとして系外へ放出される。一方炭素と比べて、生態系中の窒素の動態はより複雑である、重要な点として、一次的な給源が大気中の窒素ガスであ

るのに対し、陸上生態系内で最も安定な形態が硝酸イオンであるため、硝酸イオンを窒素ガスに戻す（脱窒）にはさらに還元剤（多くのケースでは有機物）が必要である点が炭素と大きく異なる。一般に硝酸塩は高い水への溶解度を持ち、かつ硝酸イオンは土壌コロイドに吸着されにくいため、土壌中には長時間とどまりにくく、植物や微生物に吸収されなければ、還元的な環境では脱窒を通して大気、また洗脱条件では水の下方浸透に伴い水圏に抜けやすい。その結果、脱窒の中間産物としての亜酸化窒素放出や、水圏の富栄養化が起こるのである。

このように、窒素は農業生産に必須であると同時に、その多量使用は環境問題の発生に直結することが多い。一方炭素は、生態系に有機物として取り込まれる際には光エネルギーが利用され、系外への放出は主として微生物の代謝（呼吸）によって行われるため、原理的には光合成と呼吸を制御することによって生態系での収支均衡を図ることがより容易である。

## 5. ゼロ・エミッションへのアプローチ

以上窒素動態管理の困難さについて論じてきたが、それでもこれを適切にコントロールすることは可能であろうか？ 窒素動態を簡略に示した図2、農耕地における資源収支を表す図1に加えて、地形の複雑な我が国において特徴的な農地の空間的異質性、温帯域に特徴的な温度・水環境の季節変動と

いう4つの観点からその可能性を考察してみたい。

- 1) 窒素動態のプロセス・レベルで見れば、主要な放出経路の中心を占める硝酸イオンの生成（硝酸化成）抑制が課題である。ここからはすぐに硝化菌の活動抑制という考えに至るが、単純な抑制はアンモニウムイオンの蓄積を促進するのでこれは短絡的すぎると思われる。むしろアンモニウムイオンの同化・異化（呼吸）の拮抗関係から制御を考えるべきであろう。微生物によるアンモニウムイオンの同化を促進するという観点からは、その活動を強化しうる有機基質の添加が有望である。ただし筆者らのタンザニア耕地における経験でいえば、少量の作物残渣施用では、硝酸化成、硝酸イオンの流亡に対しては効果がなく、かつ脱窒・亜酸化窒素の放出を促進したケースがあるので注意が必要である。
- 2) 窒素投入量を減らせば、硝酸イオン生成が抑制されるであろうことは明らかである。また硝酸イオン流亡による水圏汚染と亜酸化窒素放出に伴う諸問題がトレード・オフであることを考えれば、ある程度の収量減を見込んでも、窒素投入レベルを減らす努力は必要であろう。窒素による環境負荷が問題となっている現在、より積極的には、窒素施用に対して鋭敏に反応し収量も増大する品種特性よりも、ある程度土壌の窒素レベルが低くともそれなりの収量が見込まれ

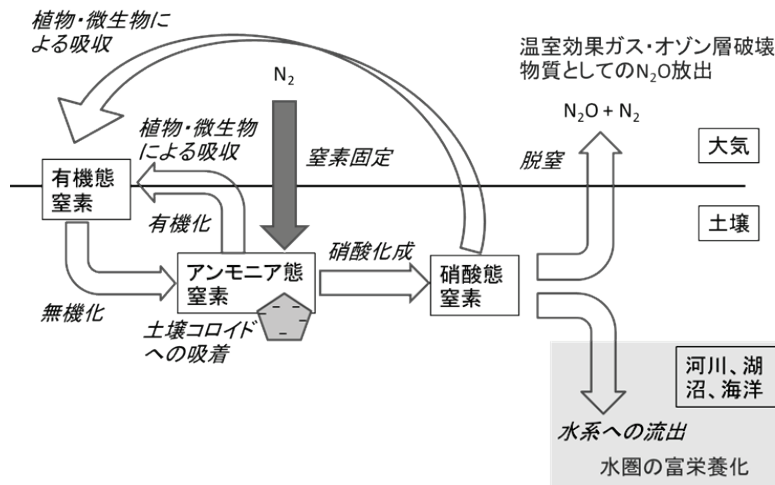


図2 陸上生態系における窒素動態

る品種特性を意識した育種戦略が必要になってくるのではないかと考える。

- 3) 例えば棚田のような景観がある場合、その最末端（下流）で窒素をバイオマスに取り込ませるような仕組み、例えば人工池などを配置し水生植物あるいは藻類に窒素を吸収させるような土地利用を設計することは可能であろう。
- 4) 乾湿あるいは気温・地温の年変動を利用して、高温湿潤期に微生物バイオマスに一時的に窒素を収容させるように有機物施用を同期させ、必要な時期（例えば作物の移植期）に耕起などを入れて窒素放出を促し作物に利用させるなど、微生物バイオマス・活動の消長によって窒素動態を制御することは、理論上は可能であると思われる。

## 6. おわりに

近年、日本の農業を巡る議論が、ともすればグローバル経済に要請される農業自由化か、食糧自給を至上命題とする食糧安全保障論かに収斂される傾向にあるが、ここまで述べてきたような、日本を含めたモンスーン・アジアにおける低地稲作を中心に配した新たな農業生産空間の創出、そして生産持続性あるいは環境負荷低減を実現しうる農業の可能性は、もっと強く認識されてよいように思われる。

その上で、先述したように、これまで日本農業において不利な状況の一因ともなってきた複雑な地形条件、ほぼ年一作に限られる気候条件などを逆に長所として利用し、近代農業の限界が見え始めてきた現代において、環境低負荷型農業として新たな価値を付与して世界に問うことは、日本農業の再興にも資するところが大きいはずである。あらためて日本では、「生産の持続性が保証され、環境負荷の小さい農業」を行う条件が整っていることを再認識したい。

## 引用文献

- Funakawa, S. (Ed) 2017. Soils, Ecosystem Processes, and Agricultural Development: Tropical Asia and Sub-Saharan Africa. Springer, pp.392.
- Funakawa, S., Yanai, J., Takata, Y., Karbozova-Salnikov, E., Akshalov, K., Kosaki, T. 2007. Dynamics of water and soil organic matter under grain farming in Northern Kazakhstan - Toward sustainable land use both from the agronomic and environmental viewpoints. In Climate Change and Terrestrial Carbon Sequestration in Central Asia. Eds. R. Lal, M. Suleimenov, B.A. Stewart, D.O. Hanson, and P. Doraiswamy. pp.279-331, Taylor & Francis, Leiden, Netherlands.
- Scientific American 編集部 2010. 臨界点に迫る地球, 日経サイエンス 2010年7月号, pp.73-87.
- 川口桂三郎編 1978. 水田土壌学, 講談社, pp.583.
- 総合地球環境学研究所編 2009. 水と人の未来可能性—しのびよる水危機, 昭和堂, pp.182.