

## 国際農業環境研究の進展と日中協力 ー農業生態系の窒素循環とその環境影響ー

八木一行<sup>\*1</sup>・宝川靖和<sup>\*2</sup>

<sup>\*1</sup> 農研機構農業環境変動研究センター

(現在：タイ王国モンクット王工科大学エネルギー・環境連合大学院)

<sup>\*2</sup> JIRCAS(現在：農研機構農業環境変動研究センター)

### Abstract

Nitrogen fertilizer has been excessively used in China's crop production, resulting in large environmental impacts on the atmosphere and water systems. To assess these environmental problems, JIRCAS has conducted a collaborative research project from 1997 to 2004, entitled "Evaluation and development of methods for sustainable agriculture and environmental conservation". The research was carried out in three intensive agriculture regions, *i.e.*, Huan-Huai-Hai plain, Taihu catchments, and southern red soil area. Field experiments and monitoring identified croplands to be a major source of nitrogen loads to the environment at all the regions. Especially, large amounts of ammonia volatilization equivalent to more than one third of the rate of fertilized nitrogen were detected both at the paddy and upland fields. As options to reduce nitrogen losses from croplands without yield penalty, use of controlled release fertilizer, animal manure, and deep placement of fertilizer are recommended. These options are expected to contribute to reduce environmental impacts of Chinese agriculture, coping with a new direction in Chinese policy for "green society" that was recently incorporated in the 13th Five Year Plan of the government

### 1 はじめに

中国は世界最大の食糧の生産・消費国であるが、市場経済移行にともなう所得向上と継続する人口増加は、中国の食糧需要を増大させ、農業を質的にも量的にも大きく変化させてきた。米、小麦、トウモロコシ等の「穀物」に、豆類とイモ類を加えた「食糧」(中国語では「粮食」)の年間生産量は、中国全体で1980年代初頭には3億2,000万トン程度であったものが、その後2000年前後の数年間を除いて増え続け、1996年には5億トン、2011年には6億トンにそれぞれ達した。

この急速な食糧増産は、何よりも、さまざまな農業技術の革新によるものであるが、特に、化学肥料投入量の増加の寄与が大きい。図1に示すように、中国の窒素肥料消費量の増加は、食糧生産量の増加とほぼ並行しており、中国は世界最大の消費国となっている。中国における単位面積あたり平均窒素肥料消費量は、2000年前後において、すでに我が国や欧米先進国の値を超えていた。さらに、中国では、所得格差と同様に、地域による化学肥料消費量に著しい差があり、沿岸部や長江流域の比較的豊かな地域では、1990年代より、この平均値よりもはるかに多量の年間400 kg N/haを超える窒素肥料が投入されている現状であつ

た (Zhu & Chen 2002; Zhang F et al. 2013)。

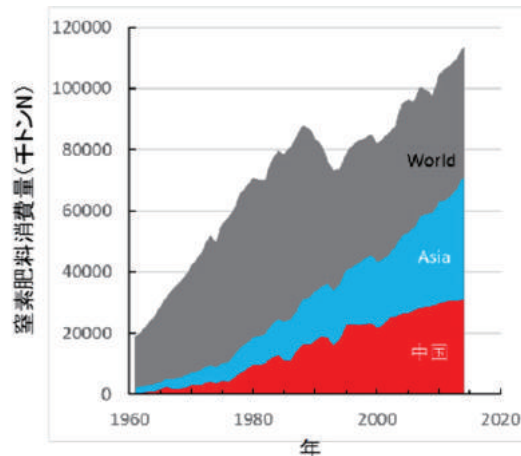


図1 世界、アジア、および中国の窒素肥料消費量の推移 (FAO-STAT より作図)

このような過剰な化学肥料の投入は、各種の環境問題を引き起こす。地下水や河川水の水質汚染、湖沼や内湾の富栄養化、発生する温室効果ガスによる地球温暖化、成層圏オゾン破壊、光化学大気汚染、酸性雨、大気中微粒子 (PM2.5 など) の増加の問題である (Mosier 2002)。このような問題は、先進国ではすでに大きな社会問題となっており、化学肥料投入量は減少傾向にある。しかし、中国では、未だ化学肥料の投入量が高く、重要な飲料水源である地下水の水質、淡水魚介類生産に対する悪影響、そして、大気汚染の深刻化に結びつく問題である。一方、農業所得に対する化学肥料購入費用も決して小さくなく、農家の経済的側面からも適切な化学肥料の投入が望まれている。

## 2 環境保全型農業に関する日中共同研究

### 1) 共同研究プロジェクトの概要

国際農林水産業研究センター (JIRCAS) では、平成9年度より15年度まで、中国における第1期総合プロジェクト「中国における主要食料資源の持続的生産及び高度利用技術の開発」を実施した。本プロジェクトで対象とされたのは、(1) 食料需給構造等の変化に対応した効率的生産流通システムの設計、(2) 主要食料資源の持続的高位安定生産技術の開発、(3) 流通加工利用技術の開発であり、中国における食料問題を総合的な視点から解決し、より「安定した豊かな生活」もたらしめるための科学的知見を提供することを目的としていた。しかし、食料増産を目指した農業技術は、多くの場合、その負の側面として環境負荷の増大をもたらす。このことが、目的とする「安定した豊かな生活」を阻害する「負のフィードバック」になりかねない (図2)。

そこで、上記の研究内容(2)において、「持続的生産」の問題を担当する課題、「環境保全型農業生産技術の評価と開発」が設定され、適切な化学肥料の投入を中心とした、高い作物生産量を維持し、環境と調和した安定持続生産を可能とする技術開発の共同研究を行った。この課題においては、その目標として、プロジェクト開始当時に中国の農業が直面していた以下の重要な問題 (キークエスト) に答えることを考えた：

- ① 中国の集約的な食糧生産システムは、環境にどのようなインパクトを与えているの

か？

- ② 現在、どのような変化が起きているのか？
- ③ 将来、どうなるのか？
- ④ そのインパクトを軽減するには、どうしたらよいのか？

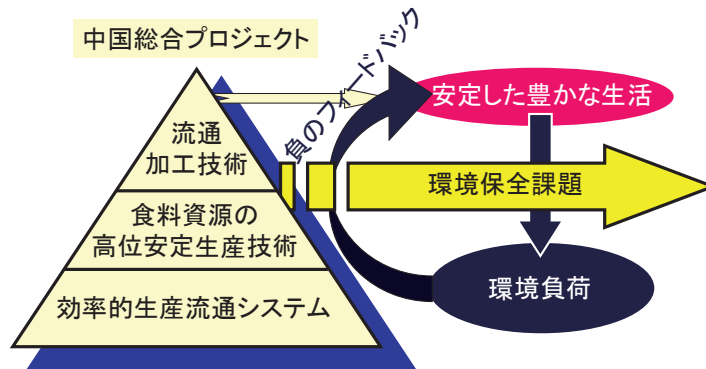


図2 中国総合プロジェクトにおける環境保全課題の位置付け

しかし、環境問題に関する個々のインパクトは多様で、限られたプロジェクトのなかでそのすべてを網羅して上記の目標に対応することは難しい。そこで、本共同研究では、上記のキークエストionsの「切り口」として、「農業生態系の窒素循環とその環境影響」を取り上げた。窒素は、作物にとって、最も重要な養分であると同時に、その環境影響は顕著で、かつ、重大である。したがって、窒素を対象とすることで、上記のキークエストionsに対する回答として、最も重要な「指針」が得られることを期待した。

## 2) 研究推進体制と研究課題

本共同研究課題は、JIRCAS と中国側の 2 つの研究機関、すなわち、中国農業科学院土壤肥料研究所（所在地：北京、現在：農業資源・農業区画研究所）および中国科学院南京土壤研究所（所在地：南京）の連携のもとに行われた。中国側の両研究所は、中国の土壌学の最高峰に位置しており、多くの優秀な研究者を有すると同時に、中国各地に独自の試験地を持ち、活発な研究活動を行っている。

試験対象地域として、中国の典型的、かつ重要な 3 つの地域における耕作体系を取り上げ、圃場試験と広域の農業環境調査を実施した（表 1）。第 1 に、トウモロコシ-小麦栽培地域である黄淮海平原の山東省陵県および北京市昌平県、第 2 に、長江下流域の水稲-小麦栽培地域である太湖集水域地域の江蘇省錫山市および常熟市、第 3 に、中国南部の水稲二期作地域である紅壤地域の湖南省祁陽県である。

表 1 環境保全課題における実施課題と対象地域

| 実施課題                             | 地域    | 省・都市 | 作付体系          | 地勢  | 年平均気温(°C) | 年降水量(mm) | 平成9 | 平成10 | 平成11 | 平成12 | 平成13 | 平成14 | 平成15 |
|----------------------------------|-------|------|---------------|-----|-----------|----------|-----|------|------|------|------|------|------|
| (1)-1<br>(1)-2                   | 黄淮海平原 | 山東省  | トウモロコシ<br>-小麦 | 平野  | 12.5      | 600      | ←   | ←    | ←    | ←    | ←    | ←    | ←    |
| (2)-1                            | 京津唐地域 | 北京市  |               |     |           | 588      | ←   | ←    | ←    | ←    | ←    | ←    | ←    |
| (3)-1<br>(3)-2<br>(4)-1<br>(4)-2 | 太湖集水域 | 江蘇省  | 水稻-小麦         | 低地  | 16.1      | 1175     | ←   | ←    | ←    | ←    | ←    | ←    | ←    |
| (5)-1<br>(5)-2                   | 紅壤地帯  | 湖南省  | 水稻二期作         | 丘陵地 | 18.0      | 1310     | ←   | ←    | ←    | ←    | ←    | ←    | ←    |
|                                  |       |      |               |     |           |          |     |      |      |      |      |      |      |
|                                  |       |      |               |     |           |          |     |      |      |      |      |      |      |

圃場試験、広域評価、

## 3) 共同研究プロジェクトの成果の概要

各農業生態系における窒素を中心とした主要元素の動態を調査した結果、すべての対象地域において、農耕地が環境への大きな窒素負荷源となっていること、それが速効性肥料の多量施肥に由来していることを明らかにした（図 3）。特にアンモニア揮散による環境負荷が著しく、畑地と水田の双方において、すべての対象地の慣行施肥条件下で施肥窒素の 1/3 以上にあたる揮散が認められた。水田においては、日中に田面水の pH が高まることによりアンモニア揮散の生ずることが一般的であるが、畑地においても、特に黄淮海平原に広く分布するアルカリ性土壌の特性として大きなアンモニア揮散の生ずることが明らかにされた。

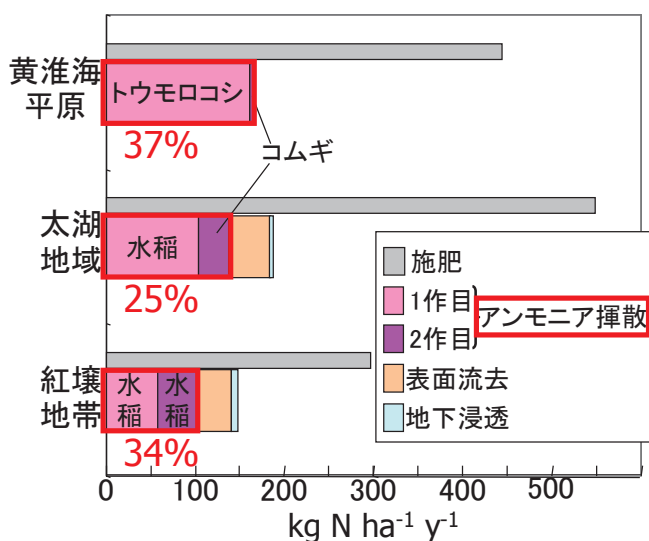


図 3 各試験地における窒素施肥量と計測された環境負荷量

農耕地から環境への窒素負荷を軽減するための対策として、肥効調節型肥料の利用、堆きゅう肥の利用、深層施肥等が有望であることを確認した。特に、肥効調節型肥料の適切な施用により、アンモニア揮散量を大幅に軽減できることを明らかにした（図 4）。また、水田田面水の表面流去の削減についても同様の結果を得た。以上の結果より、各対象地域において、環境負荷軽減と収量維持の視点から推奨される施肥法を提示した（表 2）。

以上の成果は、JIRCAS Working Report No. 65 に取りまとめ、公表されている（Hosen 2010）。以下に、各実施地域における成果の概要を示す。

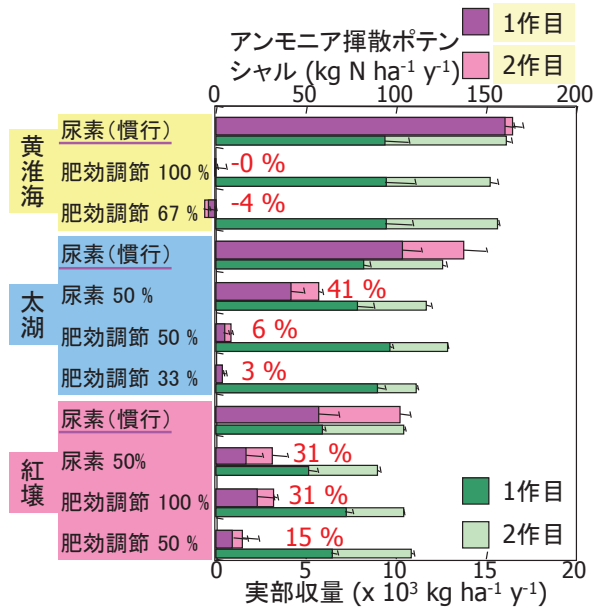


図 4 各試験地におけるアンモニア揮散ポテンシャルと作物収量

表 2 各対象地域において環境負荷・収量の視点から推奨された施肥法

- 黄淮海平原
  - トウモロコシ：肥効調節型肥料 33%減肥または溝施肥（慣行施肥量）
  - コムギ：慣行法
- 太湖地域：
  - 水稻：肥効調節型肥料 50%減肥
  - コムギ：慣行法
- 紅壤地帯：
  - 早稲：肥効調節型肥料 50%減肥
  - 晩稲：肥効調節型肥料 50%減肥
  - 堆きゅう肥 50%+化学肥料 50%施用または堆きゅう肥 100%

### (1) 黄淮海平原の農業生態系における窒素動態解明とその制御

#### ①地域の有機物および窒素フローの分析

黄淮海平原の典型的な農業地域である山東省陵県において、窒素フローモデルを用いて 1979～1997 年の地域の窒素フローを分析するとともに、地下水水質調査を行った (Yagi et al. 2010)。その結果、農耕地土壌と環境への多量の窒素負荷（1997 年時点で  $288 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ ）が経年的に増加していること（図 5）、しかしながら地下水の硝酸汚染は広域には顕在化していないことを明らかにした。以下に示す圃場試験で得られた結果を考慮すると、この窒素負荷の大部分がアンモニア揮散によって大気に放出され環境負荷源となっている可能性が示唆された (Yagi & Hosen 2003)。

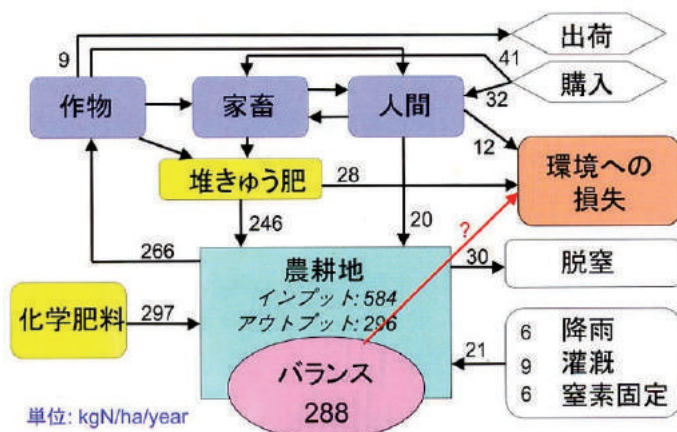


図5 山東省陵県における農耕地窒素フローの推定値（1997年度）

### ②集約的な農業システムからの環境負荷の定量とその抑制方策の開発

山東省陵県において、施肥深度及び肥効調節型肥料の施用が、アンモニア揮散及び作物収量に及ぼす影響を試験した（Zhang R et al. 2002; 2010a; b）。慣行施肥量（ $450 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ ）の試験区間を比較すると、当地域の慣行肥料である尿素を表面施肥した場合、 $165 \pm 10 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ （施肥窒素量の37%）の高いアンモニア揮散が観察された。これに対して、同肥料を深度5 cmに溝施肥した場合、 $97 \pm 2 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ （同22%）に軽減された。溝施肥によるアンモニア揮散量は表面施肥の場合の59%であった（図6）。また、肥効調節型被覆尿素（以下、被覆尿素）を同溝施肥した場合には、 $-0.5 \pm 7.1 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ （同0%）と窒素無施肥区と同水準に低下した（図4）。高いアンモニア揮散は、トウモロコシ栽培期（温暖期）の施肥直後1週間に顕著に観察された。トウモロコシ及び小麦の収量は、それぞれ被覆尿素減肥区（慣行施肥量の33%減）および尿素深層施肥区（慣行施肥量）で最高となった。環境負荷軽減と収量の維持向上を両立する施肥法として、トウモロコシに対しては被覆尿素33%減肥施肥もしくは尿素的深層施肥（慣行施肥量）、小麦に対しては尿素的深層施肥（慣行施肥量）が推奨された。

### ③異なった施肥量と肥料タイプにおける窒素損失量の定量

北京市昌平県のライシメータ試験圃場において、慣行灌漑条件下での地下浸透に伴う肥料成分の溶脱量を3年間定量調査した（Zhang S et al. 2010）。その結果、地下浸透水量及び無機態窒素溶脱量は、すべての肥料種（尿素及び被覆尿素）、施肥量（ $0 \sim 450 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ ）条件下で、それぞれ  $6 \sim 73 \text{ mm y}^{-1}$  および  $0.3 \sim 2.1 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$  の範囲に収まり、いずれも無窒素施肥区で最大、慣行施肥区（尿素  $450 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ ）で最小となった。当地域では農地生態系からの肥料分の地下浸透による地下水汚染の危険性が低いことが示された。

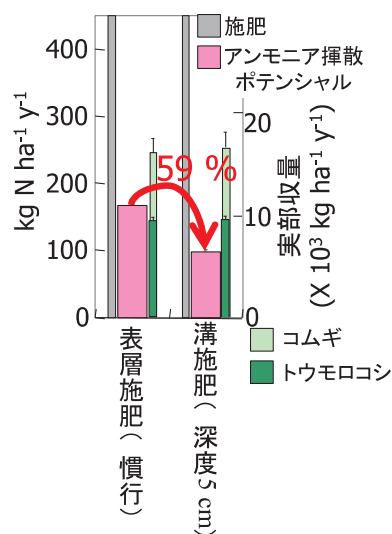


図6 山東省陵県の畑圃場におけるアンモニア揮散量と作物収量



## (2) 太湖の水質汚染に及ぼす面源負荷の影響評価

### ①集落スケールの評価

太湖北西岸地域の典型的な集落である武進市雪堰橋鎮 (33 km<sup>2</sup>、30,000 人)を対象に、窒素及びリンを対象として行った圃場レベルの表流水調査により、これらの水田からの年間流出パターンを明らかにした。また、村落レベルの調査結果から、農業・家禽・村・鎮市街地別の面源負荷強度を推計した。これらデータを用いて、米国ペンシルベニアで用いられた GIS 技術を用いた農業面源負荷ポテンシャル指数 (APPI) の重み係数を太湖地域に適合するよう改良し、雪堰橋鎮内各村の表面流去指数、堆積物生産指数、化学肥料使用指数、人および家畜負荷指数を推計した (Guo et al. 2010)。

### ②集水域スケールの評価

太湖西岸地域の典型的な農業集水域である江蘇省宜興市梅林集水域 (1.22 km<sup>2</sup>) からの地表水移動にともなう窒素及びリンの流出量は、それぞれ域内施肥量の 8.5 %および 3.2 %にあたる 20.3 および 1.0 kg ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup> と推定され、主要作物の施肥時期に増大するが、水稻生育の旺盛な 7~9 月に減少した。水稻基肥施肥時期にのみ用水中のアンモニア態窒素濃度が顕著に上昇したことから (図 7)、同時期の水管理の重要性が指摘された (宝川ら 2004; Gao et al. 2010)。

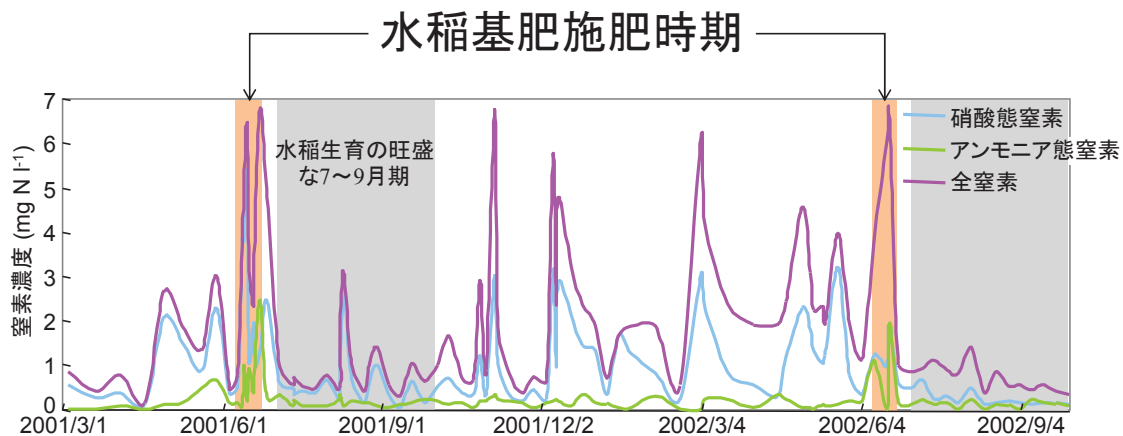


図 7 江蘇省宜興市梅林集水域から流出する水路水中硝酸態窒素、アンモニア態窒素、および全窒素の濃度の推移

### ③ライシメータ試験

江蘇省常熟市のライシメータ試験圃場において、水稻-小麦輪作体系における窒素収支をモニタリングし、被覆尿素の施用がアンモニア揮散、一酸化二窒素放出、表面流去、地下浸透および収量に及ぼす影響を試験した。その結果、アンモニア揮散が最大の環境負荷源であることを明らかにした (Li H et al. 2010)。当地域の慣行肥料である尿素の慣行施肥量 (550 kg N ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup>) 条件下で、アンモニア揮散量は 109±13 kg N ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup> (施肥窒素量の 37%) に達したが、尿素施肥量を慣行の 50%、被覆尿素施肥量を慣行の 50%、33%に減肥した条件下では、それぞれ 42±7 (同 28%)、2±1 (同 1%)、2±2 kg N ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup> (同 2%) に軽減された (図

4)。被覆尿素の施用により、水稻収量は有意に増加し、慣行の 50%減の施肥量で最大の収量が得られたが、小麦収量は低下した。被覆尿素の施用により表面流去による環境負荷量も有意に軽減された。以上から、当地域の水稻作には適切な肥効調節型肥料を慣行施肥量の 50%減肥することが推奨された (Wang et al. 2010)。

### (3) 紅壤地帯における環境と調和した水田農業技術体系の開発

#### ①物質循環を基にする環境保全型水稻栽培技術の開発

湖南省祁県において、被覆尿素の施用がアンモニア揮散及び収量に及ぼす影響を試験した (宝川ら 2003)。慣行施肥量 ( $300 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ ) 試験区間を比較すると、当地域の慣行肥料である尿素施肥条件下で、アンモニア揮散量は  $102 \pm 16 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$  (施肥窒素量の 34%) に達したが、被覆尿素区では  $32 \pm 8 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$  (同 11%) に軽減された (Li J et al. 2010)。被覆尿素施肥量を慣行の 50%削減 ( $150 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ ) した結果、アンモニア揮散は  $15 \pm 18 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$  (同 11%) に軽減され、更に慣行尿素区と有意差のない収量が得られた (図 4)。以上から、当地域では適切な肥効調節型肥料を慣行施肥量の 50%減肥することが推奨される。また、堆きゅう肥の施用によってもアンモニア揮散を軽減可能であり、収量も維持できる可能性が示された (図 8) (Xu et al. 2002a; 2010a)。

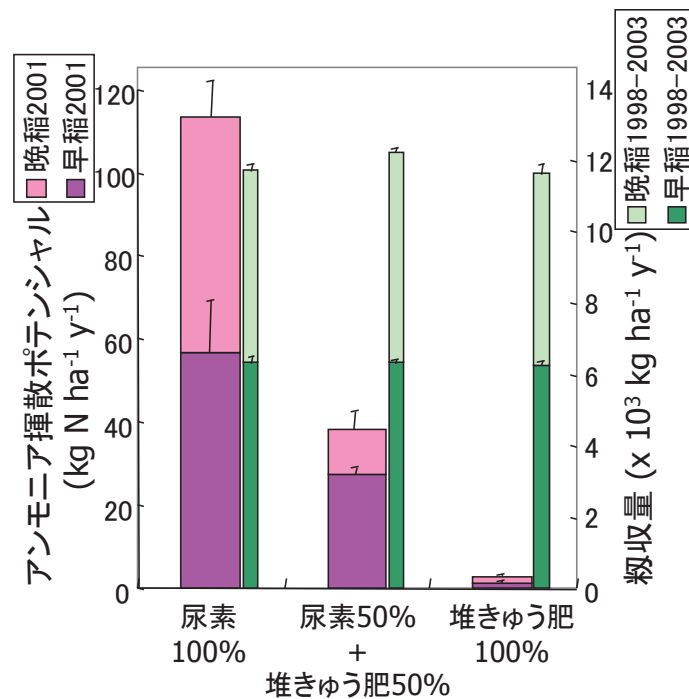


図 8 湖南省祁県の水田圃場におけるアンモニア揮散量と作物収量

#### ②水田の環境保全機能の有効利用

紅壤地帯の典型的な水稻二期作地帯である湖南省祁陽県官山坪集水域 (254 ha) を対象に、地表水移動にともなう窒素を中心とした養分収支をモニタリングするとともに、農家聞き取り調査および圃場試験で得られたデータをもとに、当地域水田農業生態系における窒素収支を推計した (Xu et al. 2002b; 2010b)。その結果、窒素の総インプット量は  $467 \text{ kg N ha}^{-1}$



$y^{-1}$ 、そのうち肥料、降雨、灌漑が、それぞれ 95、3.1、1.6%を占めると推計された。総アウトプット量は  $464 \text{ kg N ha}^{-1} y^{-1}$ 、そのうち作物吸収、アンモニア揮散、表面流去、地下浸透が、それぞれ 52、38、8.3、1.5%を占めると推計された。地表水モニタリングの結果、水稻施肥時期に降雨の重なった際の養分流去、特にアンモニア態窒素の流去が顕著であり、同時期の水管理の重要性が指摘された。

### 3 中国と東アジアにおける今後の展望

中国における窒素肥料消費量は、2000 年代および 2010 年代においても、それ以前ほど急激ではないにせよ、継続して増加を続けている。しかし、2000 年以降の各 5 年間の年平均増加率は、2.8% (2000～2004 年)、2.0% (2005～2009 年)、1.3% (2010～2014 年) と着実な減少傾向にある (図 9 左図)。

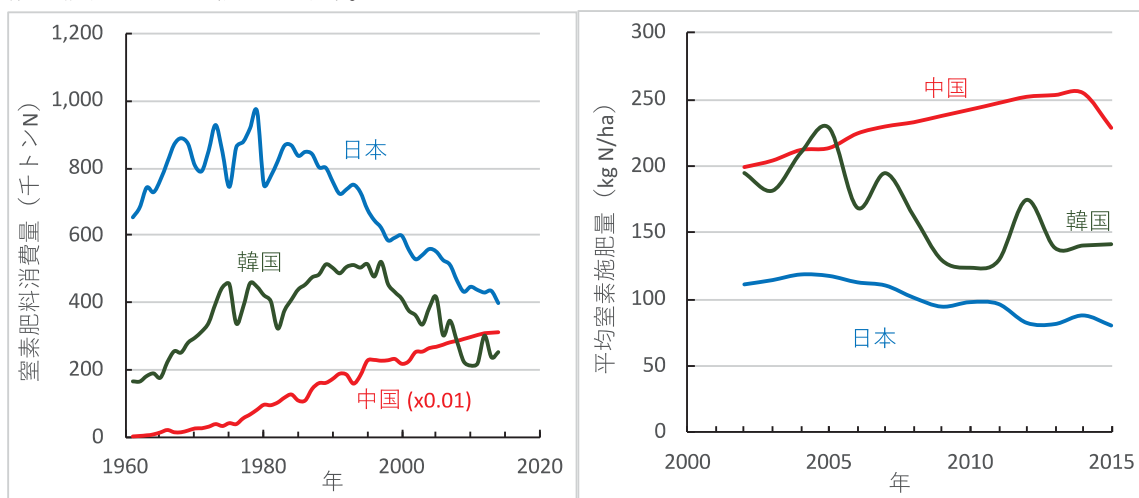


図 9 東アジア 3 カ国における窒素肥料消費量 (左図) および平均窒素施肥量 (右図) の推移 (FAO-STAT より作図)。左図では、中国についてはスケールを 1/100 としている。

ただし、中国における単位面積当たりの窒素肥料投入量を考える場合、社会構造や食料の輸出入の急激な変化に伴う国土全体の耕地面積の変化を考慮する必要がある。中国政府から公表される統計値には不確実な情報があるが、国家统计局によれば、1997 年から 2008 年までの 11 年間で国土全体の耕地面積は約 6%減少したと報告されている (巖 2014)。そのため、国土全体での窒素肥料消費量の減少に関わらず、中国における単位面積当たりの窒素肥料投入量は、2002 年から 2014 年の間では継続的に増加していると推定される (図 9 右図)。

しかし、近年の中国の経済発展において後回しにされて来た環境対策について、最近、その方向性の見直しが検討され始めたことは注目に値する。2016 年 3 月に第 12 期全国人民代表大会 (全人代) 第 4 回会議で採択された「国民経済・社会発展第 13 次 5 ヶ年計画要綱」では、「5 つの発展理念」として、イノベーション、協調、開放、共享と並んで、「グリーン」すなわち環境対策がキーワードとして挙げられている。続いて、2016 年 11 月に国务院より公表された「第 13 次 5 ヶ年生態環境保護計画」では、生態文明建設を国家戦略に高め、同戦略で定められた全面的要求と具体的計画のなかに環境法制体系やモニタリング体制の整備が盛り込まれた。さらに、中国で初めてとなる「環境保護税法」が 2018 年 1 月より正式

に施行されている。一方、米国が消極的な地球温暖化対策の国際的枠組み「パリ協定」に対して中国が先導する姿勢を見せるなど、環境対策への国際的なプレゼンス発揮に積極的に努めるようになった。

窒素肥料消費について、中国と近い耕作体系を持つ、同じ東アジアの我が国と韓国の状況をみると、窒素肥料消費量は、我が国においては 1970 年代に、韓国においては 1990 年代にピークに達した後、急激な減少を示している（図 9）。この要因としては、この両国において農耕地面積が減少していることもあるが、それ以上に環境負荷の問題に対する社会的関心が高まり、我が国における環境保全型農業の導入など、施策的な対応に寄るところが大きい（Yagi & Minami 2005）。環境対策への関心が高まり始めた中国においても、今後、日韓両国が辿って来た道と同じ道を歩むことが期待できる。

研究コミュニティにおいては、上記のプロジェクト終了後も、その成果をさらに発展させるための日中協力が継続されてきた。2017 年 12 月に開始された国際共同研究プロジェクト「国際窒素管理システム（Towards INMS）」のもとでは、これまでの日中における国際協力に加え、韓国、フィリピンの研究者も参加する「東アジア地域デモンストレーション」が立ち上げられ、東アジア各国の窒素収支・動態の特徴・実態等を把握するための情報交換・議論を進めている。その第 2 回国際シンポジウム「東アジアにおける窒素循環とその環境影響」が農研機構とモンスーンアジア農業環境研究コンソーシアム（MARCO）により、2018 年 11 月に開催される。今後、中国だけでなく東アジア全域を対象とした農業生態系の窒素管理、すなわち窒素利用の便益の最大化とその環境影響の最小化を目標とする国際協力のさらに拡大することが期待される。

#### 参考文献

- 1 Gao, C. (2010) Nutrient exports from agricultural land in a rural watershed in the Taihu Lake area, China. JIRCAS Working Report No. 65, JIRCAS, 35–40.
- 2 Guo, H. et al. (2010) Study on agricultural non-point source pollution potential index (APPI) in Taihu Lake region with GIS. JIRCAS Working Report No. 65, JIRCAS, 27–34.
- 3 宝川靖和ら (2003) 中国紅壤丘陵地帯水田二期作地域におけるアンモニア揮散とその制御. 国際農林水産業研究成果情報, 10, 17–18.
- 4 宝川靖和ら (2004) 中国太湖地域の農業集水域からの地表水による窒素の流出. 国際農林水産業研究成果情報, 11, 19–20.
- 5 Hoson, Y. (2010) Evaluation and Development of Methods for Sustainable Agriculture and Environmental Conservation in China. JIRCAS Working Report No. 65, JIRCAS, pp. 81.
- 6 Li, J. et al. (2010) Effect of polyolefin-coated urea on rice yield and ammonia volatilization in red soil region of southern China. JIRCAS Working Report No. 65, JIRCAS, 65–72.
- 7 Li, H. et al. (2010) Model estimation of ammonia volatilization in paddy soils by monolithic lysimeter experiments in Changsu Agroecological Experiment Station. JIRCAS Working Report No. 65, JIRCAS, 53–56.
- 8 Mosier, A.R. (2002) Environmental challenges associated with needed increases in global nitrogen fixation. Nutr. Cycling. Agroecosys., 63, 101–116.

- 9 Wang, X. et al. (2010) Effect of coated urea under rice-wheat rotation on environment and economical benefit in Taihu Region. JIRCAS Working Report No. 65, JIRCAS, 41–51.
- 10 Xu, M. et al. (2002a) Transformation and utilization of nitrogen in paddy soil under combining chemical and organic fertilizers application. *Acta Pedol. Sin.*, 39, 421–426 [in Chinese].
- 11 Xu, M. et al. (2002b) Characteristics of nitrogen supply from paddy soil in red soil hilly regions of southern Hunan. *Soil Environ.*, 11, 50–52 [in Chinese].
- 12 Xu, M. et al. (2010a) Transformation and utilization of nitrogen in paddy soil applied with chemical fertilizers combined with manure in double-rice region of southern China. JIRCAS Working Report No. 65, JIRCAS, 57–63.
- 13 Xu, M. et al. (2010b) Evaluation of nitrogen losses from double-rice cropping agro-ecosystems based on a typical watershed in the hilly red soil region of southern China. JIRCAS Working Report No. 65, JIRCAS, 73–81.
- 14 Yagi, K. et al. (2010) Flow-model analysis of nitrogen cycling in agro-ecosystems of Lingxian County, Shandong Province. JIRCAS Working Report No. 65, JIRCAS, 1–7.
- 15 Yagi, K. & Hosen, Y. (2003) Nitrogen cycling in agro-ecosystems of Huang-Huai-Hai Plain, China. *Farming Japan*, 37, 43–45.
- 16 Yagi, K. & Minami, K. (2005) Challenges of reducing excess nitrogen in Japanese agroecosystems, *Sci. China Ser. C*, 46, 928–936.
- 17 厳 善平 (2014) 中国の食糧安全保障と戦略的農業への展望. *日中経協ジャーナル*, 2014年10月号.
- 18 Zhang, F.S. et al. (2013) Chinese agriculture: An experiment for the world. *Nature*, 497, 33–35.
- 19 Zhang, R. et al. (2002) Measurement of ammonia volatilization in a closed chamber system. *Acta Pedol. Sin.*, 39, 313–320 [in Chinese].
- 20 Zhang, R. et al. (2010a) The effect of soil moisture and N application practice on nitrification and ammonia volatilization. JIRCAS Working Report No. 65, JIRCAS, 9–12.
- 21 Zhang, R. et al. (2010b) The effect of coated urea on N use efficiency and ammonia volatilization. JIRCAS Working Report No. 65, JIRCAS, 13–17.
- 22 Zhang, S. et al. (2010) N balance affected by different release rates and application rates of N fertilizer in a lysimeter system. JIRCAS Working Report No. 65, JIRCAS, 19–26.
- 23 Zhu, Z.L. & Chen, D.L. (2002) Nitrogen fertilizer use in China – Contributions to food production, impacts on the environment and best management strategies. *Nutr. Cycling. Agroecosys.*, 63, 117–127.