

産総研シンポジウム「窒素循環における課題とその解決に向けて」

2021年11月 8日（火） 13:00～17:00 オンライン開催



# 窒素循環に関する課題と解決策—農業研究の立場から—

江口定夫<sup>1</sup>、朝田景<sup>1</sup>、平野七恵<sup>1</sup>、箭田佐依子<sup>1</sup>、森昭憲<sup>2</sup>、廣野祐平<sup>3</sup>、  
濱田耕佑<sup>4</sup>、安西俊彦<sup>4</sup>、松本成夫<sup>5</sup>

<sup>1</sup>農研機構 農業環境研究部門 土壤環境管理研究領域 土壤資源・管理グループ

<sup>2</sup>農研機構 畜産研究部門 畜産飼料作研究領域 省力肉牛生産グループ

<sup>3</sup>農研機構 果樹茶業研究部門 茶業研究領域 茶品種育成・生産グループ

<sup>4</sup>国際農林水産業研究センター 熱帯・島嶼研究拠点

<sup>5</sup>国際農林水産業研究センター 生産環境・畜産領域





# 反応性窒素 (reactive nitrogen, Nr) の増大と地球環境問題

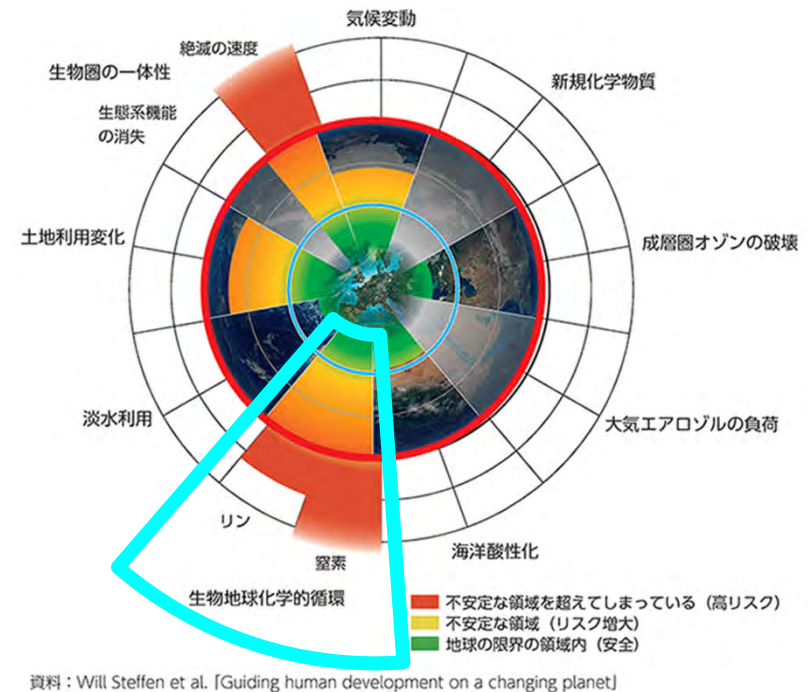
地球上の自然・人為プロセスによる「新しい」反応性窒素(Nr)の生成量(Tg N/年)

|                |     |
|----------------|-----|
| 自然プロセス         | 203 |
| 海洋生態系の生物学的窒素固定 | 140 |
| 陸域生態系の生物学的窒素固定 | 58  |
| 雷による放電         | 5   |
| 人為プロセス         | 210 |
| 化学工業的窒素固定 化学肥料 | 97  |
| 工業用原料          | 23  |
| 農地の生物学的窒素固定    | 60  |
| 化石燃料の燃焼        | 30  |

Fowler et al (2013) Phil Trans Royal Soc B 368 (1621): 20130164 より作成

- 人為プロセスによる「新しい」Nr生成 (210) は、既に、自然プロセス (203) を超過
- 地球2個分以上の「新しい」Nrが生成
- その75%以上は農業利用 (農畜産物の生産)

## Planetary boundary (地球の限界)



環境省HP <https://www.env.go.jp/policy/hakusyo/h30/html/hj18010101.html>

- Nr負荷の削減は、地球規模での喫緊の課題!!
- 特に、フードシステムでのNr負荷削減が必要!!

# 地球上のNrプールを増大させないために

## 反応性窒素(Nr)の大きな利点

- 農地土壌の肥沃化 → 安定した作物生産 → 食料安全保障
- **「新しい」**Nrが20世紀の人口爆発（16億→60億人）を支えた



反応性窒素は、ただ減らせば良いのではなく、  
どう使うのか？が重要

「新しい」Nrの生成を極力減らし、既に地球上に大量に存在する「古い」Nrを如何に効率的に循環利用するか？が問題

⇒ 有機物主体の環境保全型農業へ

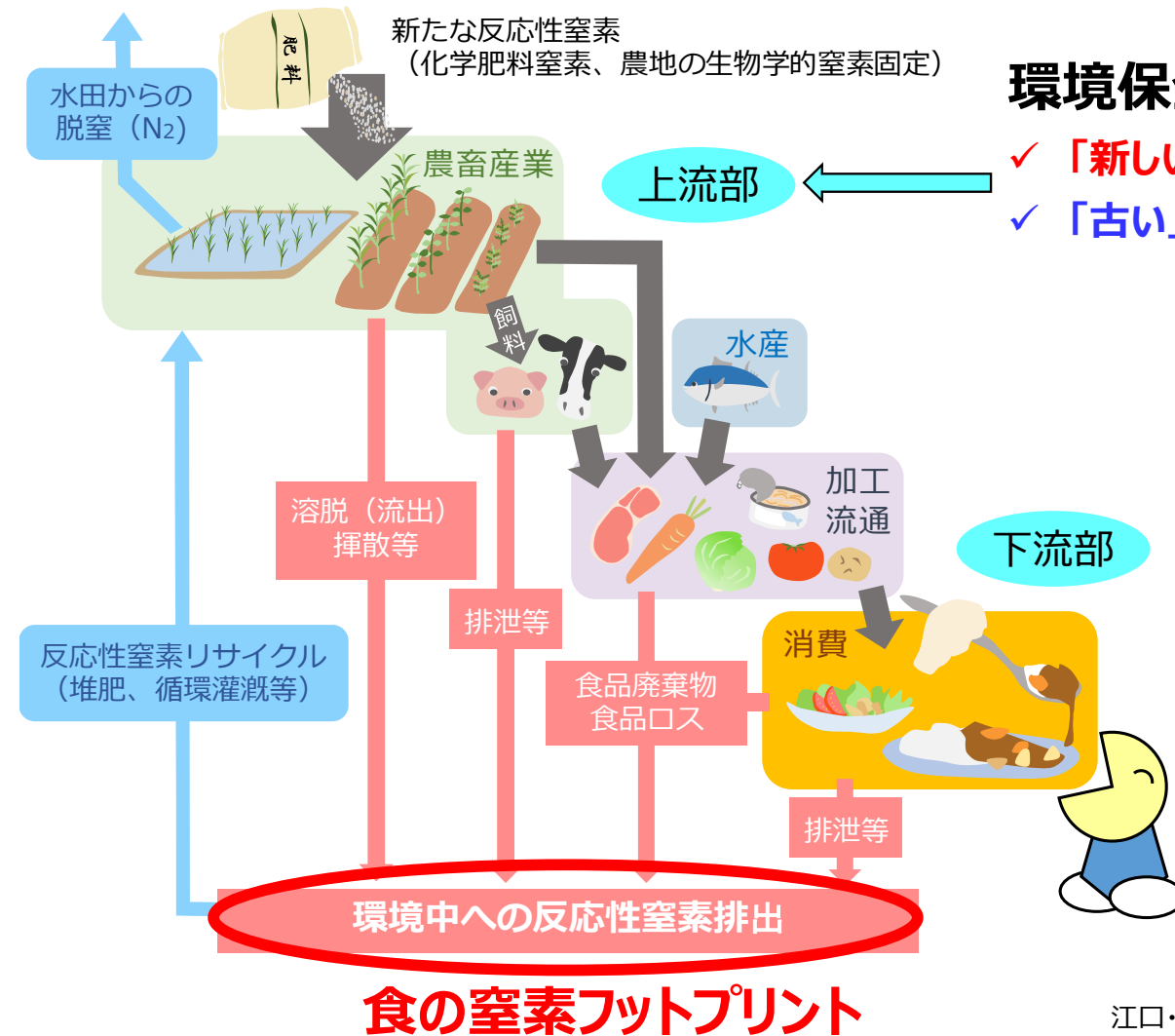
食料生産側と食料消費側の双方に、多くの課題がある

**「新しい」Nr**：化学肥料Nr、生物学的窒素固定Nr、etc

**「古い」Nr**：家畜排泄物Nr、食品廃棄物Nr、作物残渣Nr、土壌有機物Nr、etc



# 食の窒素カスケード (nitrogen cascade: プールと漏れがある階段状の滝)



## 環境保全型農業の推進

- ✓ 「新しい」Nr (化学肥料) の削減
- ✓ 「古い」Nr (家畜排泄物堆肥など) の利用促進 (耕畜連携など)

- **上流部 (食料生産側)** だけでは、環境保全型農業を十分に推進することは出来ない
- **下流部 (食料消費側)** が環境保全型の農畜産物を要求し、上流部がそれに応える、という構図が必要

## 駆動力は？

→ **消費者ニーズ (市場ニーズ)**  
消費～生産の全体を制御すること  
(**消費者の理解・協力**) が必要!!



# 窒素フットプリントとは？

- 様々な人間活動(食料生産～消費、エネルギー消費)を通じて環境中に排出される反応性窒素の総量

消費者行動と窒素排出を定量的に結び付ける指標

従来の指標・基準は、排出者(農家、工場等)が対象

窒素フットプリントは、「窒素負荷問題の根源は、消費者の生活にある＝主役は消費者」ということを、定量的に示した簡易指標として画期的!!

N<sub>2</sub>Print



$\text{N}_2\text{O}$   
 $\text{NO}_x$

Org-N

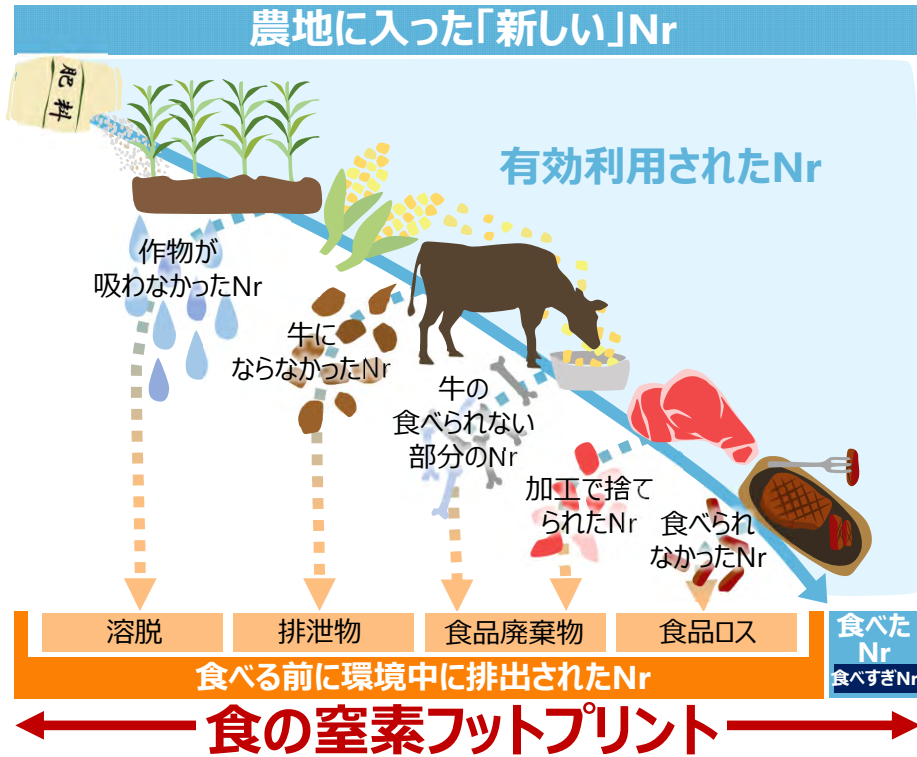
$\text{NH}_3$

$\text{N}_2\text{O}$

Org-N

$\text{NO}_3^-$

# 仮想窒素係数 (virtual nitrogen factor, VNF)



仮想窒素係数 (VNF)

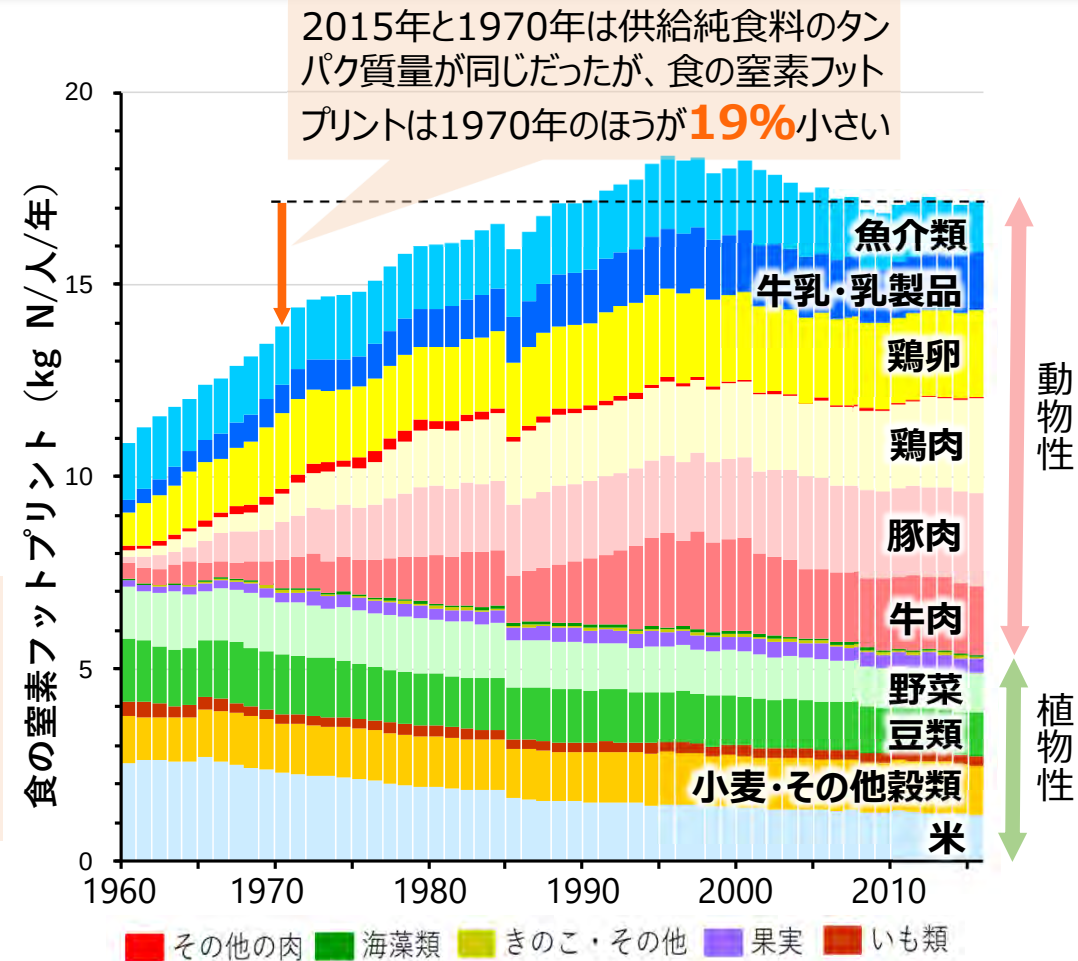
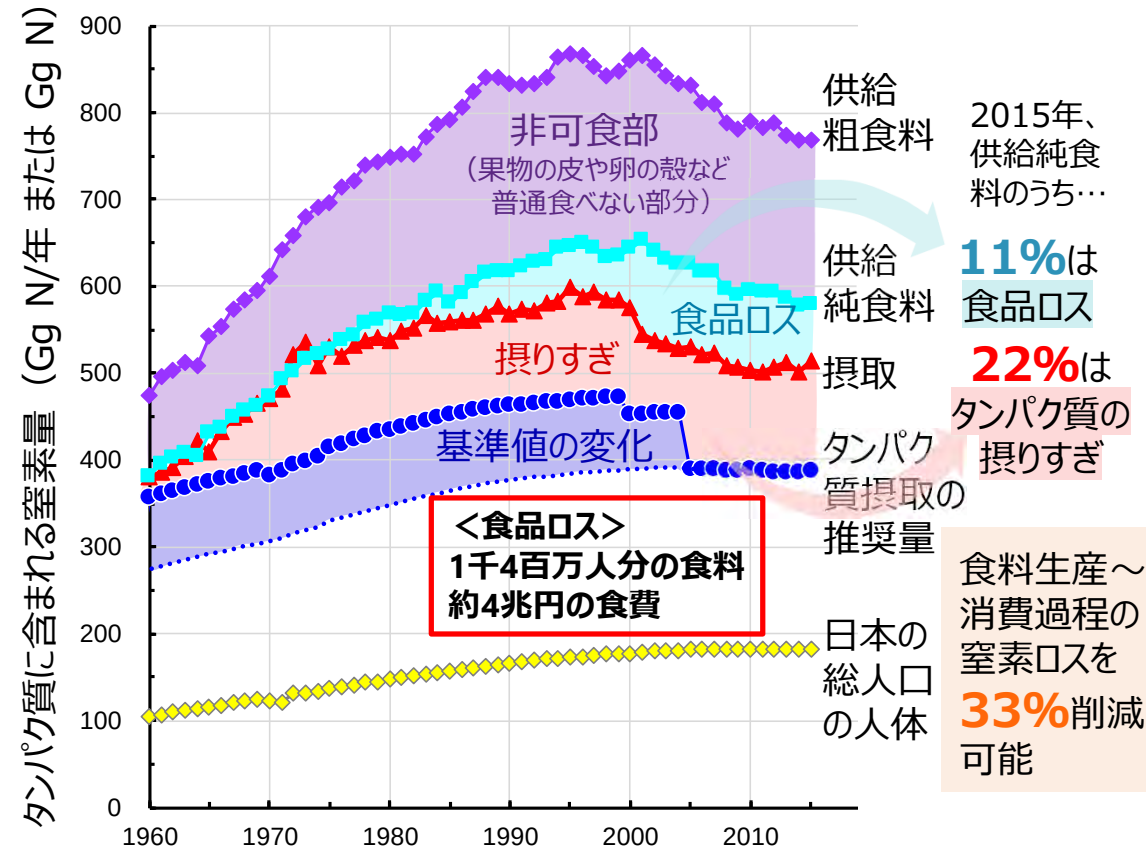
$$\text{VNF} = \frac{\text{摂取前のNr排出}}{\text{摂取Nr}}$$

日本の主要食品群別のVNF  
(輸入食飼料を考慮)

| 食品群・項目名 |                                                                                          | VNF  |
|---------|------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 穀類      |                                                                                          | 1.5  |
| いも類     |                                                                                          | 4.9  |
| 豆類      |       | 1.3  |
| 野菜      |                                                                                          | 5.5  |
| 果実      |                                                                                          | 7.5  |
| 肉類      | 牛肉    | 12.4 |
|         | 豚肉   | 6.7  |
|         | 鶏肉  | 6.0  |
|         | 羊肉、その他                                                                                   | 5.2  |
|         | 鶏卵                                                                                       | 6.7  |
| 牛乳及び乳製品 |                                                                                          | 2.7  |
| 魚介類     |     | 0.8  |
| 海藻類     |                                                                                          | 0.2  |

- 食品群によって、VNF値は大きく異なる：豆類・魚介類で小さく、畜産物で大きい
- 摂取するタンパク質の量と種類によって、環境中へのNr排出量が異なる

# 食品ロス・食べ過ぎの削減と食の選択による窒素負荷の削減



- 食品ロス・食べ過ぎの削減により、**33%**削減
- 1970年頃の食事（魚介類と豆類等植物性タンパク質が多い）により**19%**削減（→ 併せて、**46%**削減可能!!）
- 栄養学的に健康な食事と、窒素負荷の小さい食生活は、同じ方向



# 農地土壌：食べ物（+繊維など）が生まれるところ

## <環境>

### 大気圏への負荷

温室効果ガス ( $\text{N}_2\text{O}$ )  
の排出等

### 水圏への負荷

硝酸態窒素 ( $\text{NO}_3\text{-N}$ )  
の溶脱・流出等

排出N  
55



## <人間社会（人間圏）>

投入N

100

化学肥料  
堆肥  
生物的窒素固定  
灌漑水 etc

収穫N

45

食料 etc



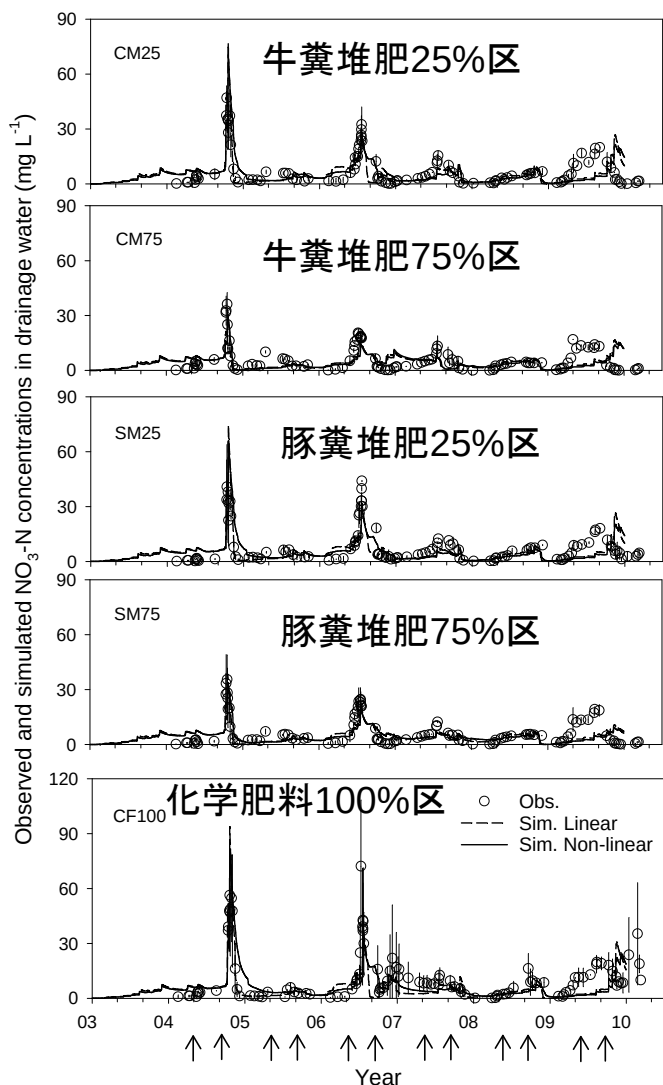
**農地土壌（＝人間と環境の間にあるインターフェイス）を持続可能かつ高度に利用**

農地土壌の向こう側にある水圏・大気圏への窒素等による環境負荷を制御することが出来る（はず）

**化学肥料に依存せず** 土壌機能の最大化（作物・家畜生産性の維持・向上）と持続可能な利用を実現



# 土壌中の物質循環（水・炭素・窒素等）の設計・制御とモデル化



国内各地の長期モニタリングデータを用いて、プロセスモデル（改良LEACHM）の適用性を評価 → 妥当な予測精度

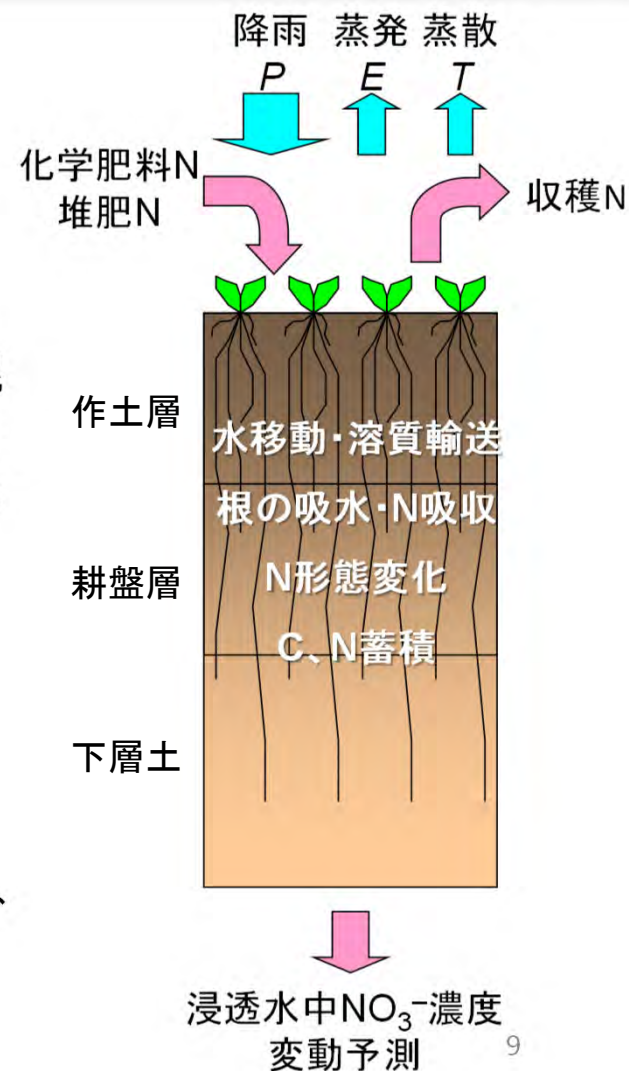


農業生態系（様々な有機質肥料、輪作・混作体系、etc）全体の物質循環（水・炭素・窒素等）をデザイン・制御する**次世代型の土壌・作物管理技術の開発とそのモデル化へ**

有機農業の公的ルールは常に検討すべき  
（2050年のルールは今とは違うはず）

有機物長期連用土壌（黒ボク土野菜畑ライシメータ圃場、緑肥作物ソルガム導入、茨城県農業総合センター）における硝酸態窒素溶脱モニタリング結果（約8年間）とそのモデル化（改良LEACHM）

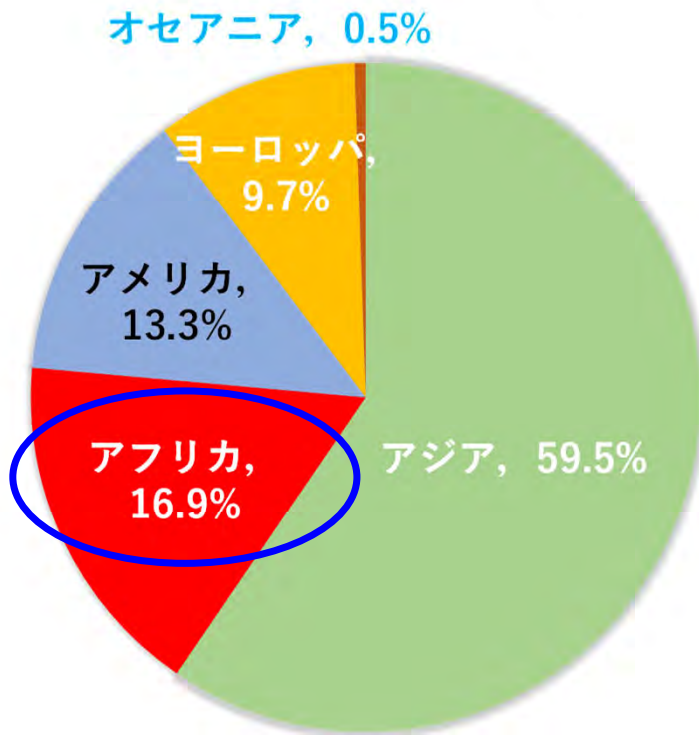
Asada et al (2018) Nutr Cycl Agroecosys 110:307–326



# 国際的な窒素供給のアンバランス

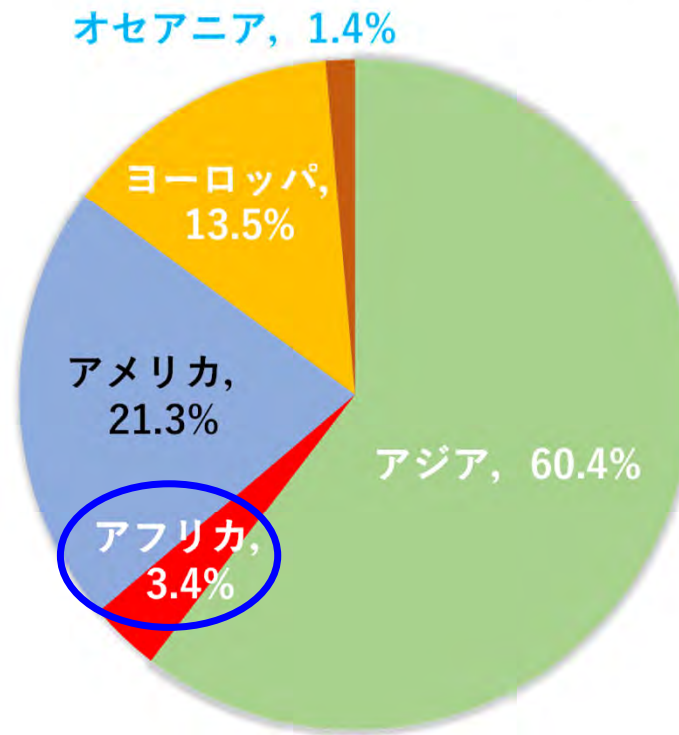
世界の地域別の人口割合  
(2018年)

世界人口 7,633百万人



窒素肥料の使用量割合  
(2008～2017年)

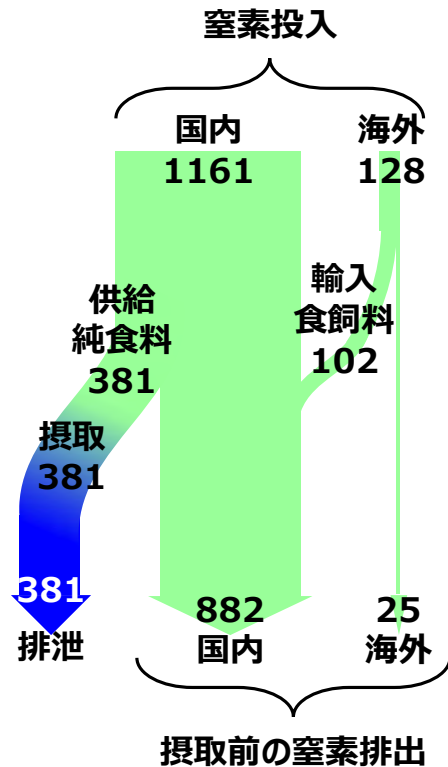
化学肥料の窒素 104百万トン/年



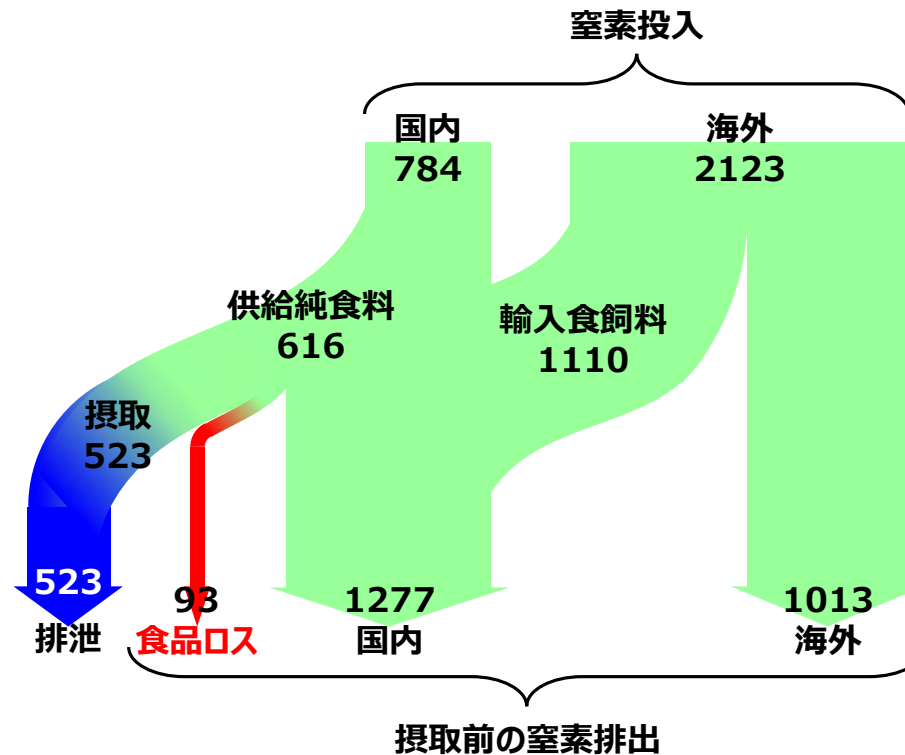
- 窒素肥料使用量の地域別シェアは、アジアは60%で人口割合と一致
- **アフリカは僅か3%**に過ぎず、人口割合に見合った化学肥料が使用されていない
- 反対に、南北アメリカ、欧州、オセアニアは、それぞれ、21%、14%、1.4%と人口割合を大きく上回っている
- 人口一人当たりに換算すると、南北アメリカ、欧州、オセアニアでは世界平均の1.4～2.8倍の窒素肥料を使用しているのに対して、**アフリカでは世界平均の1/5**しか利用していない

# 日本のフードシステム（国内・海外）における窒素投入量・排出量

1960年 食料自給率 79%  
窒素利用効率 30%



2007年 食料自給率 40%  
窒素利用効率 18%



江口（2019）理科教室 62(12):38-42

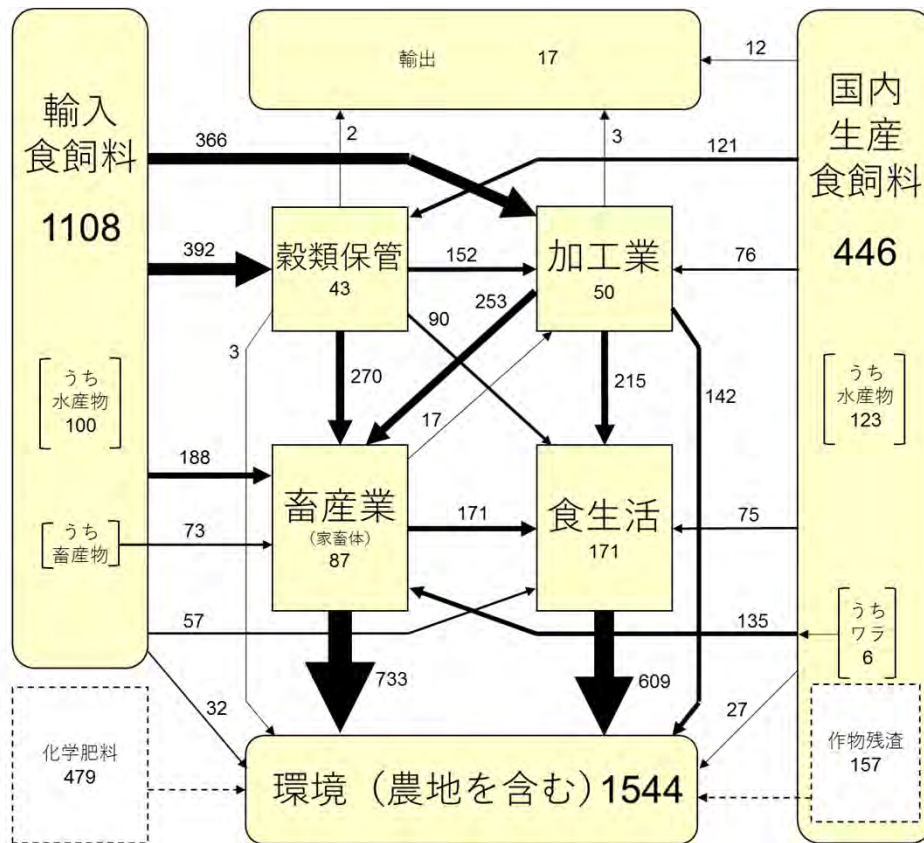
- 食飼料輸入が多い日本の消費者の食生活は、海外の輸出国における環境中への窒素負荷に多大な影響
- 自給率が低い（or 輸入Nフローに占める割合が高い）品目（濃厚飼料など）の有機栽培（無化学肥料Nr）



# 国レベル～地域レベルの食の窒素フロー解析、シナリオ分析

## 日本の食飼料システムにおける 窒素フロー（2007年）

単位：Gg-N



松本ら（2017）日本土壌肥科学雑誌 88(1):1-11 より作成

- 国～地域レベルの窒素フローの現状把握、問題点の抽出、シナリオ分析、効果的な削減策の提示
- **資源循環型の農業及びフードシステム**の実現に向けては、まずは、地域レベルから、可能な取り組みから、開始する
- 島嶼環境は、地球環境の縮図
- サンゴ礁（海洋生態系）は、島の経済を支える貴重な観光資源かつ水産資源
- 島の基幹作物であるサトウキビ畑に、島の製糖工場から出る有機物（バガス灰、フィルターケーキ）や、生産が盛んな肉牛（主に繁殖～育成）から出る有機物（牛糞堆肥）を連用  
Ishigaki Island
- 島全体の窒素循環、作物生育、土壌の物理性等に与える影響を評価

# 行政施策、法的措置（規制）、公的資金投入などは非常に強力

**社会全体が、対話・議論・協働するためのきっかけ・大義名分を与え、革新的な技術開発や社会・経済活動の変革を後押しする**

- 欧州では、硝酸塩指令（Nitrate Directive）、水枠組み指令（Water Framework Directive）など → OECD農地の窒素収支の大幅な低下 → Farm to Folk戦略へ
- 国内では、水質環境基準（硝酸性・亜硝酸性窒素濃度 <10 mg N/L）、第99代内閣総理大臣の所信表明演説（温室効果ガス排出を実質ゼロ）、みどりの食料システム戦略（有機農業面積25%、化学肥料削減30%、etc）など
- **食育**の場として、**学校給食**（などの公共食堂）に有機農産物を導入することの重要性（デンマークでは食材の60%を有機産物にする目標を掲げ、法律や補助金により支援 → 首都コペンハーゲンでは既に約90%が有機食品）

有機農産物に対して、安定した市場ニーズを提供する  
児童・生徒の親（家庭の食卓、農家の生産方式）を変える可能性  
5～10年後には大人の消費者となり、有機農産物を嗜好する（だろう）

有機農業  
とは何か？



- 農業（主に食料を生産）に関わる窒素循環の問題解決のためには、日本のフードシステム全体（社会全体）として取り組むことが必要、窒素負荷削減ポテンシャルはかなり大きい
- 生産側では、**化学肥料削減**（適正施肥）と**有機物主体の資源循環型農業**（有機農業面積25%に拡大）への転換を進め、作物の生産性・品質の向上と環境負荷低減を両立する革新的な土壌管理・作物栽培技術（次世代型の有機農業技術）の開発・普及、農業生態系全体（輪作・混作、養分バランス、土壌断面の物理性・生物性変化、etc）を対象とした物質循環モデル開発・シナリオ分析が必要
- 消費側では、栄養学・医学的に**健康な食事**と環境負荷が小さい**持続可能な食生活**の関係解明を進めると共に、窒素フットプリントのような簡易指標を用いて、両者の関係をまず社会全体に知ってもらうこと、持続可能な農業拡大及びフードシステム構築のために対話・議論・協働することが必要
- 国レベル～地域（流域）レベルでの窒素負荷削減シナリオを策定すると共に、まずは地域（流域）レベルを対象に、資源循環型フードシステムの実現に向けた取り組み（実践）を進めることが必要