

窒素利用の問題に関する 世界の動向

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(月)

農研機構 農業環境研究部門 土壤環境管理研究領域
総合地球環境学研究所

林 健太郎

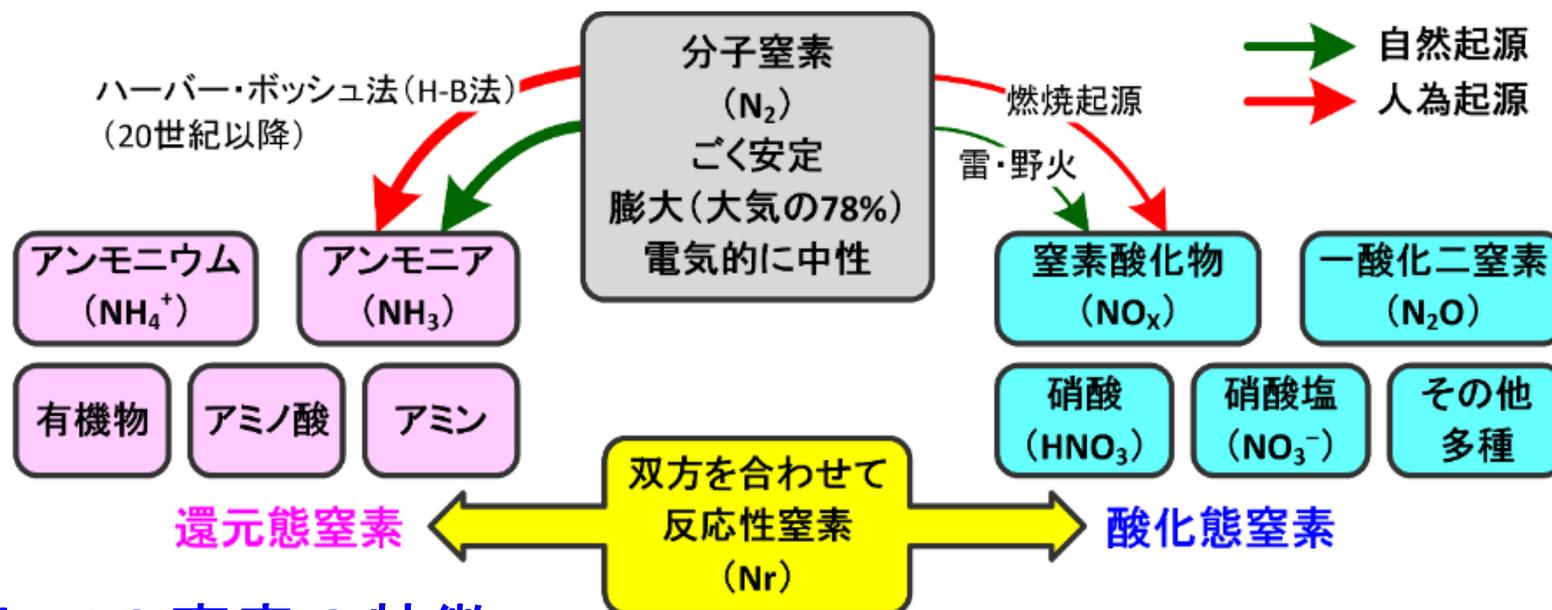
本日の話題

1. 窒素利用と窒素問題
2. 世界の動向
3. 日本の状況と将来

1. 窒素利用と窒素問題

キーワード: 反応性窒素 (Nr)

安定な分子窒素 (N_2) を除く窒素化合物



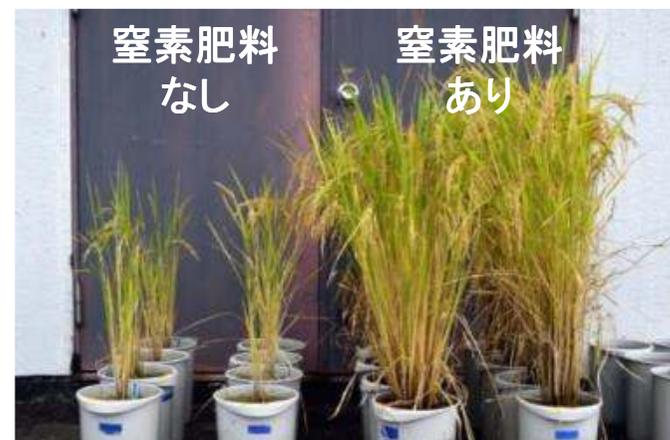
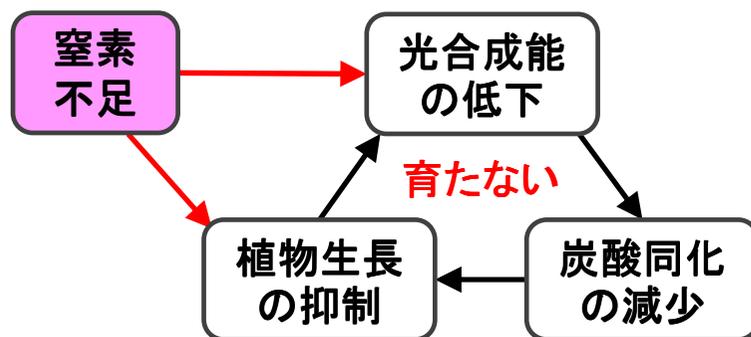
資源としての窒素の特徴

- 用途: 窒素肥料, 爆薬, 薬品, ポリマー, 半導体など
- 賦存: N_2 は実質無尽蔵だが, Nrの合成にエネルギー・資源が必要
- 供給: ハーバー・ボッシュ法の実現で Nr を望むだけ合成可能

窒素は生き物に必須

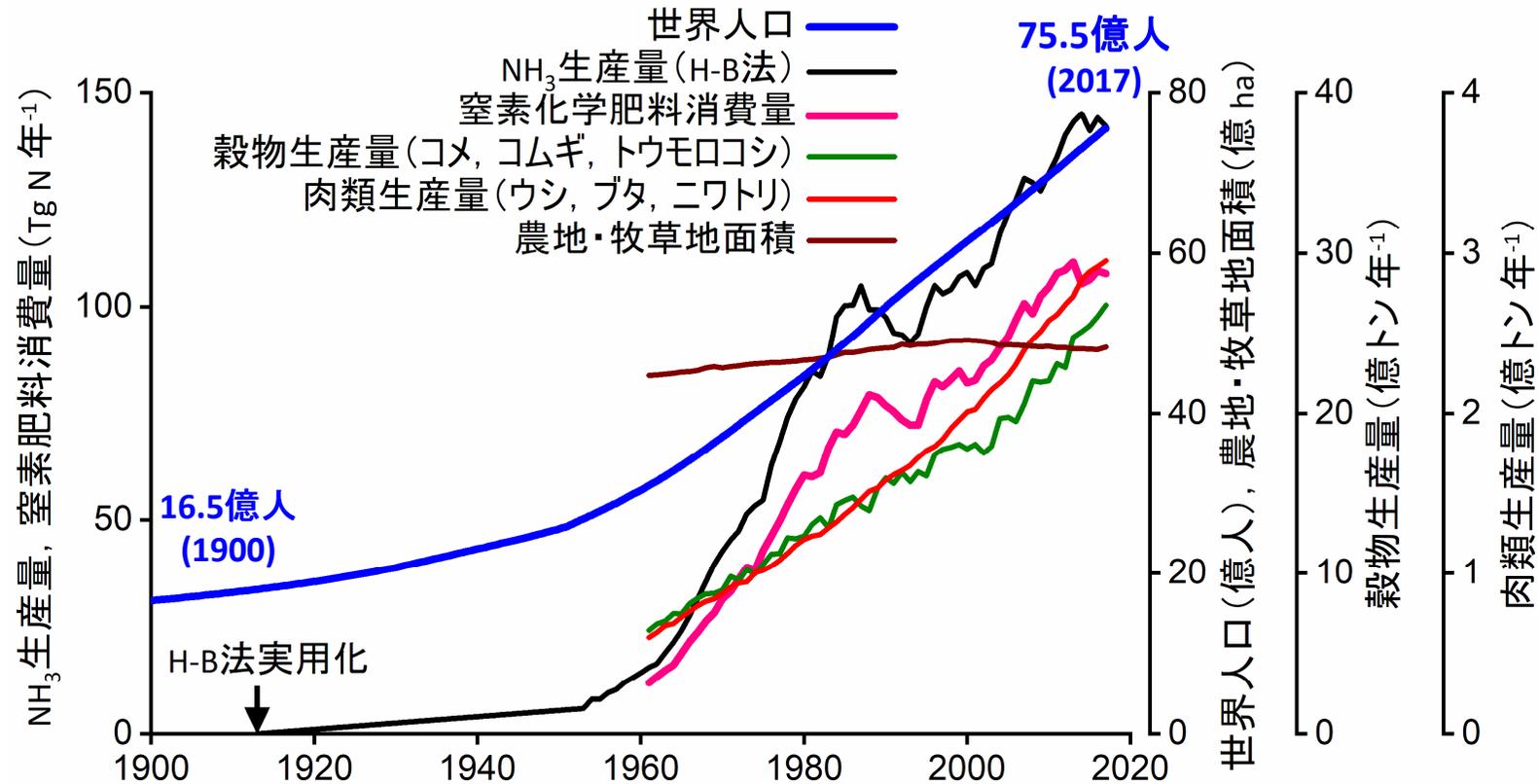
生命代謝, 体づくり, 遺伝情報

- 窒素は, アミノ酸や核酸塩基に必ず含まれる
 - アミノ酸はタンパク質, 核酸塩基はDNAの素材
- 多くの生物は, 大気に満ちる分子窒素(N_2)を同化できない
 - 動物: 有機態窒素(他の生物・有機物)を摂食
 - 植物: 無機態窒素(特にアンモニアと硝酸)を吸収
- 酵素もタンパク質 → 光合成を担うのは酵素 → 窒素は重要な肥料



ハーバー・ボッシュ後の世界

増えようとする人口を食料増産で支えてきた



窒素獲得

作物生産増

経済発展・世界人口増

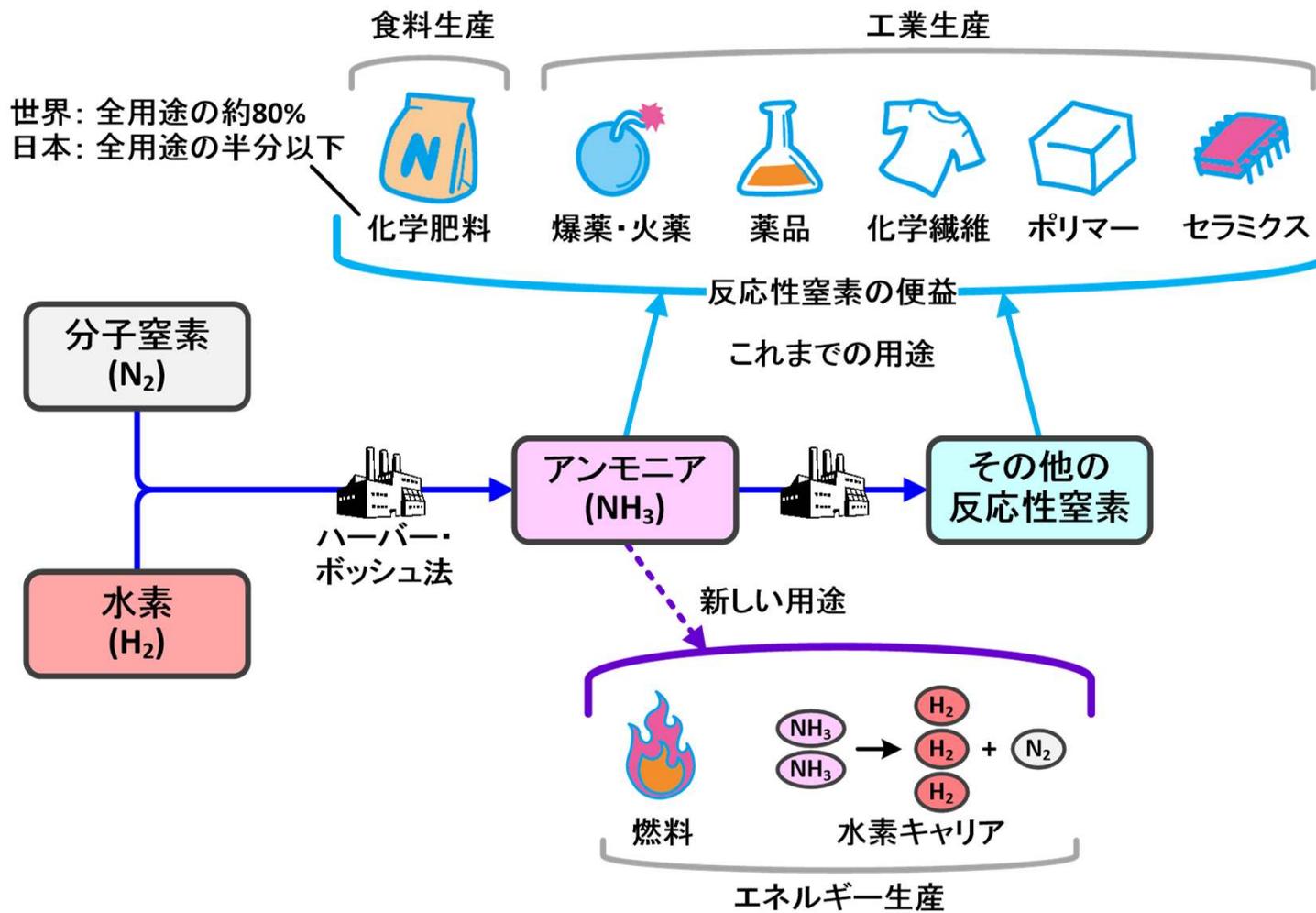
余剰 → 飼料供給増

家畜生産増



窒素の便益はさらに広がっている

肥料用途に加え、工業用途、そしてエネルギー用途

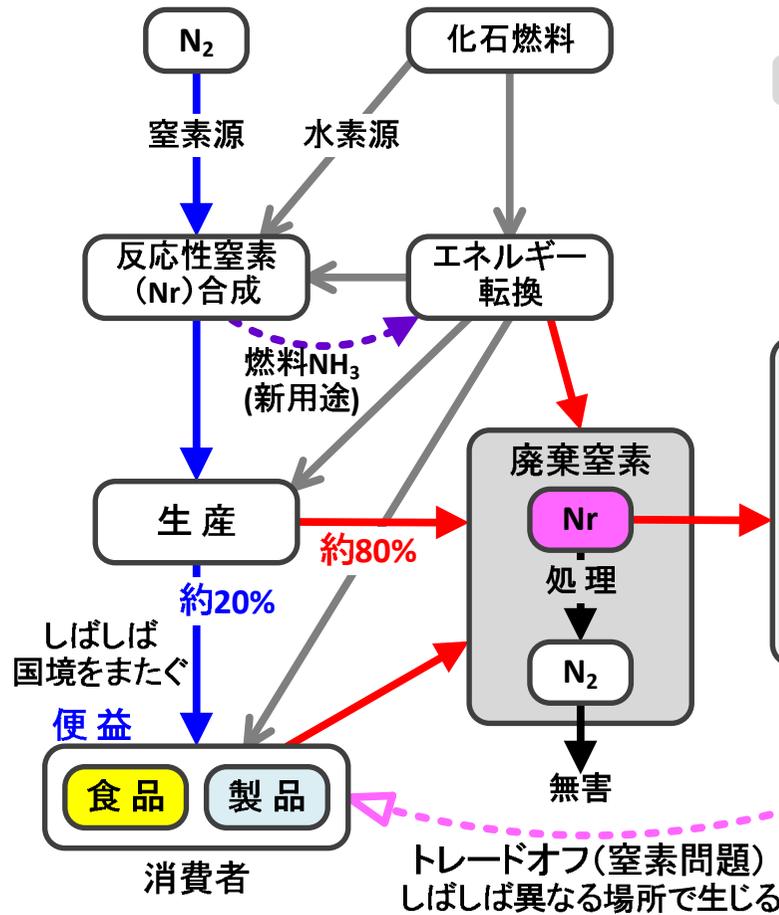


キーワード: 窒素問題

窒素利用は窒素汚染という脅威を伴うトレードオフ

1 Tg N = 100万トン窒素

これまで何が起こり、2050年にはどうなるか？



廃棄窒素は 増加する
 (Sutton et al., 2021)
 1961: 35 Tg N yr⁻¹
 2005: 150 Tg N yr⁻¹
 2050 (BAU): 210 Tg N yr⁻¹
 *1961年に比べて4~6倍に

NO_x排出は 減少する
 (Rao et al., 2017)
 2005: 125 Tg NO_x yr⁻¹
 2050 (SSP2): 90 Tg NO_x yr⁻¹
 *排出規制が効く

農地の余剰窒素は 増加する
 (Mogollón et al., 2018)
 2005: 90 Tg N yr⁻¹
 2050 (SSP2): 160 Tg N yr⁻¹
 *我々の行動次第

新用途(燃料NH₃)が 加わる
 2005: 0 Tg N yr⁻¹
 2050: ??? Tg N yr⁻¹
 *脱炭素化が後押し(要注意)

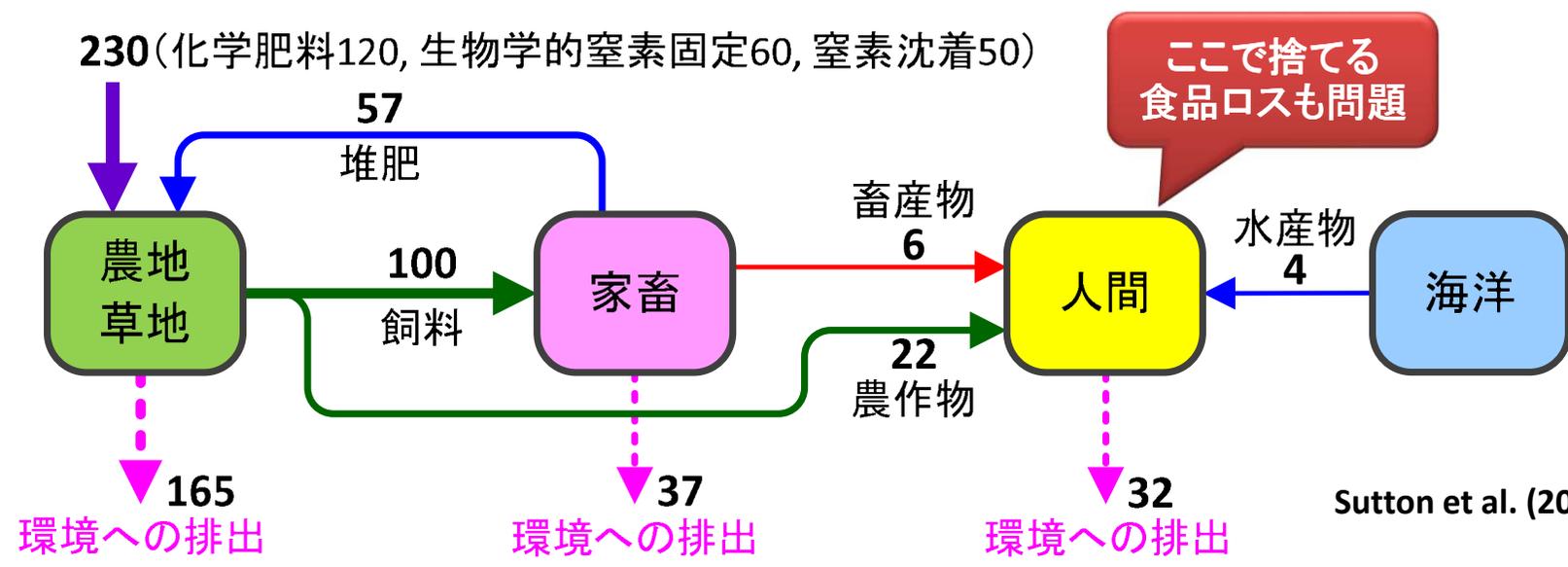
窒素汚染

- N₂O** 温暖化, 成層圏オゾン破壊
- NO_x** 大気汚染, 酸性化
- NH₃** 大気汚染, 酸性化, 富栄養化
- NO₃⁻** 水質汚染, 酸性化, 富栄養化

被害コスト(2000s):
 約37~370 兆円 年⁻¹ (UNEP, 2019)

食料システムの課題

窒素利用効率(NUE)が低く、畜産物嗜好や食品ロスでさらに低下



Sutton et al. (2013) に基づき作図

フードシステム窒素フロー(世界, 2000~2010) (Tg N yr⁻¹) *1 Tg N = 100万トン窒素

作物生産
NUE: 43%

家畜生産
NUE: 6%

フードシステム
NUE: 12%

畜産物嗜好は
NUE低下の一因

UNEP Frontiers 2018/19 “The Nitrogen Fix”

「窒素問題」を10ページで解説

和訳版(林・柴田) <https://iges.or.jp/en/pub/unep-frontier-nitrogen/ja>
 協力: 日本UNEP協会, 地球環境戦略研究機関(IGES)

窒素問題の解決 IGES ◀

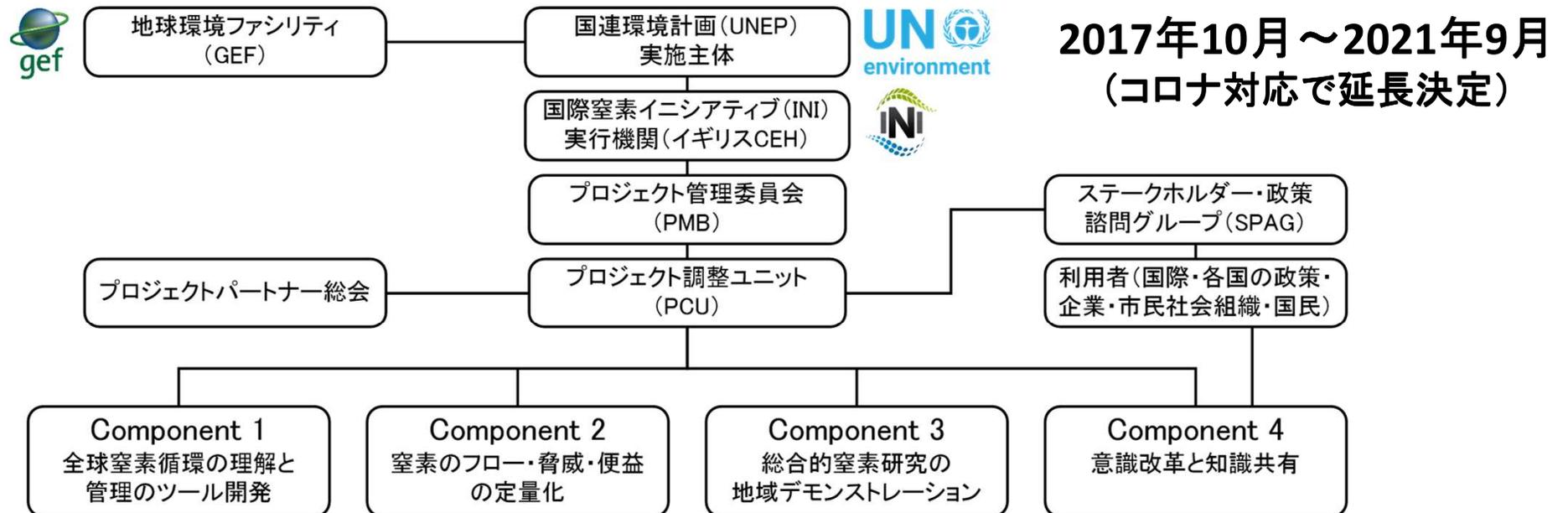


2. 世界の動向

国際窒素管理システム (INMS) プロジェクト

Towards International Nitrogen Management System

自然科学・政策の知見を束ねて国際政策に活かすプロジェクト
 国際窒素アセスメント (2022年末刊行予定)



<https://www.inms.international/>



国際窒素アセスメント (INA) Cambridge University Press *制作中

Sutton M, Howard C, Read N, Aduramigba V, Baron J, van Grinsven H, Hayashi K, Kanter D, Ometto JP, Raghuram N, de Vries W (Eds.)

イントロダクション: 汚染問題から窒素の好機へ

Part A 全球の窒素チャレンジ

窒素・環境・持続可能な開発

窒素と食料安全保障

現在の各国・国際政策における窒素

世界の窒素チャレンジへの全体的な対応に向けて

Part B 窒素循環のアセスメントの基礎

窒素がもたらす影響の評価手法

全球の窒素循環の指標

窒素負荷とその空間分布の評価手法

窒素の便益と脅威の評価手法

Part C 窒素循環の全球統合アセスメント

全球スケールの窒素収支評価

WATER: 陸水・沿岸・海洋の窒素フローと影響

AIR: 排出と大気質そして健康と作物への影響

GREENHOUSE: 窒素利用に伴う温暖化・放射収支・成層圏

オゾン破壊への影響

ECOSYSTEMS: 陸域・水域の生物多様性影響

SOILS: 窒素利用の農地・非農地への影響

Part D 世界地域の窒素チャレンジと好機

地域スケールの窒素アセスメントから学ぶこと

東アジア(日・中・韓)の窒素アセスメント

南アジアの窒素アセスメント

アフリカの窒素アセスメント

ラテンアメリカの窒素アセスメント

西ヨーロッパの窒素アセスメント

東ヨーロッパの窒素アセスメント

北アメリカの窒素アセスメント

Part E 将来のチャレンジの把握

よりよい窒素管理に向けた主要措置

よりよい窒素管理に対する障壁の解決

全球の窒素循環の将来シナリオ群

全球・地域スケールの窒素コスト・便益

どのように2030年までに廃棄窒素を半減するか

よりよい窒素管理のための政策オプション

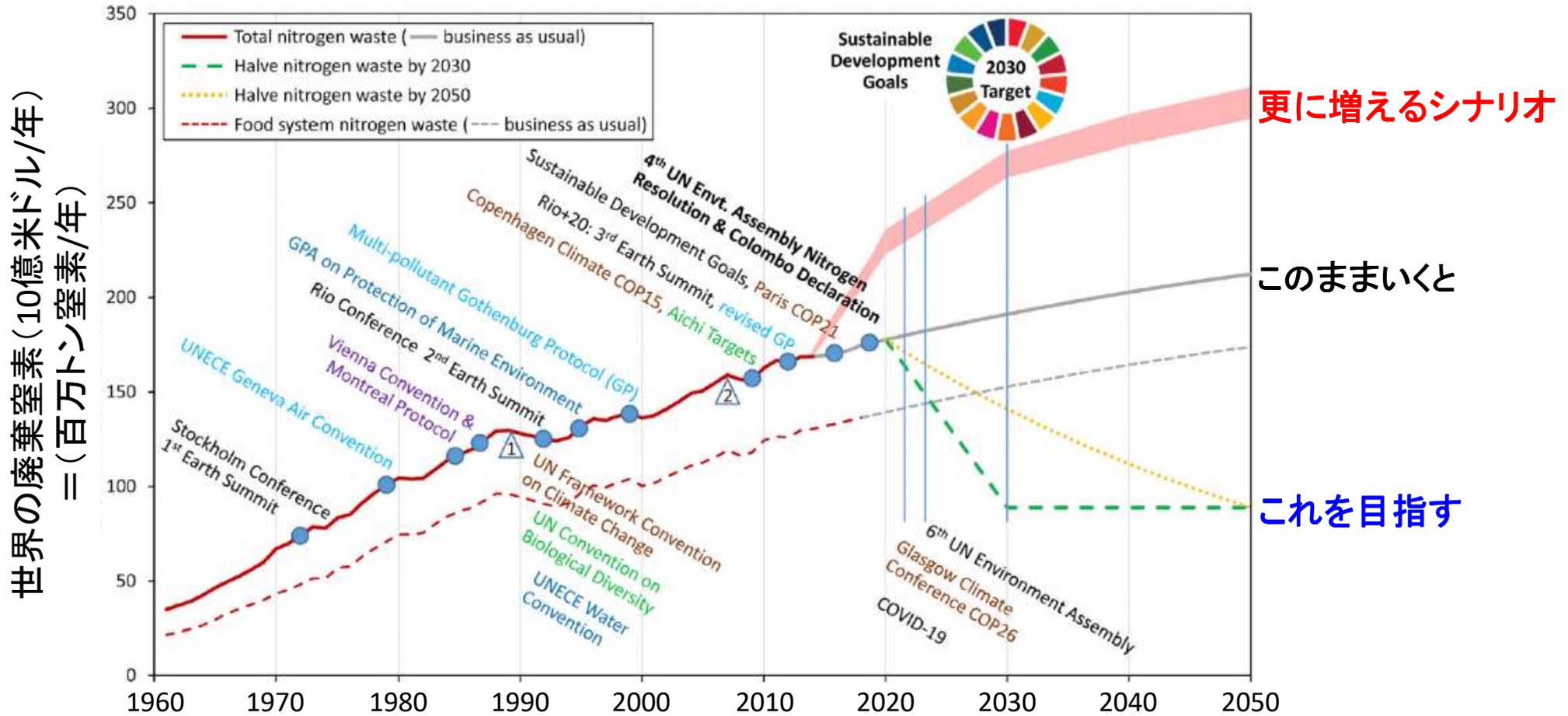
窒素とコミュニケーション

(注)章立てやタイトルは暫定かつ仮訳

増大する廃棄窒素への対応

国連主導の国際窒素管理に向けて

2005年の廃棄窒素 = 1億5000万トン

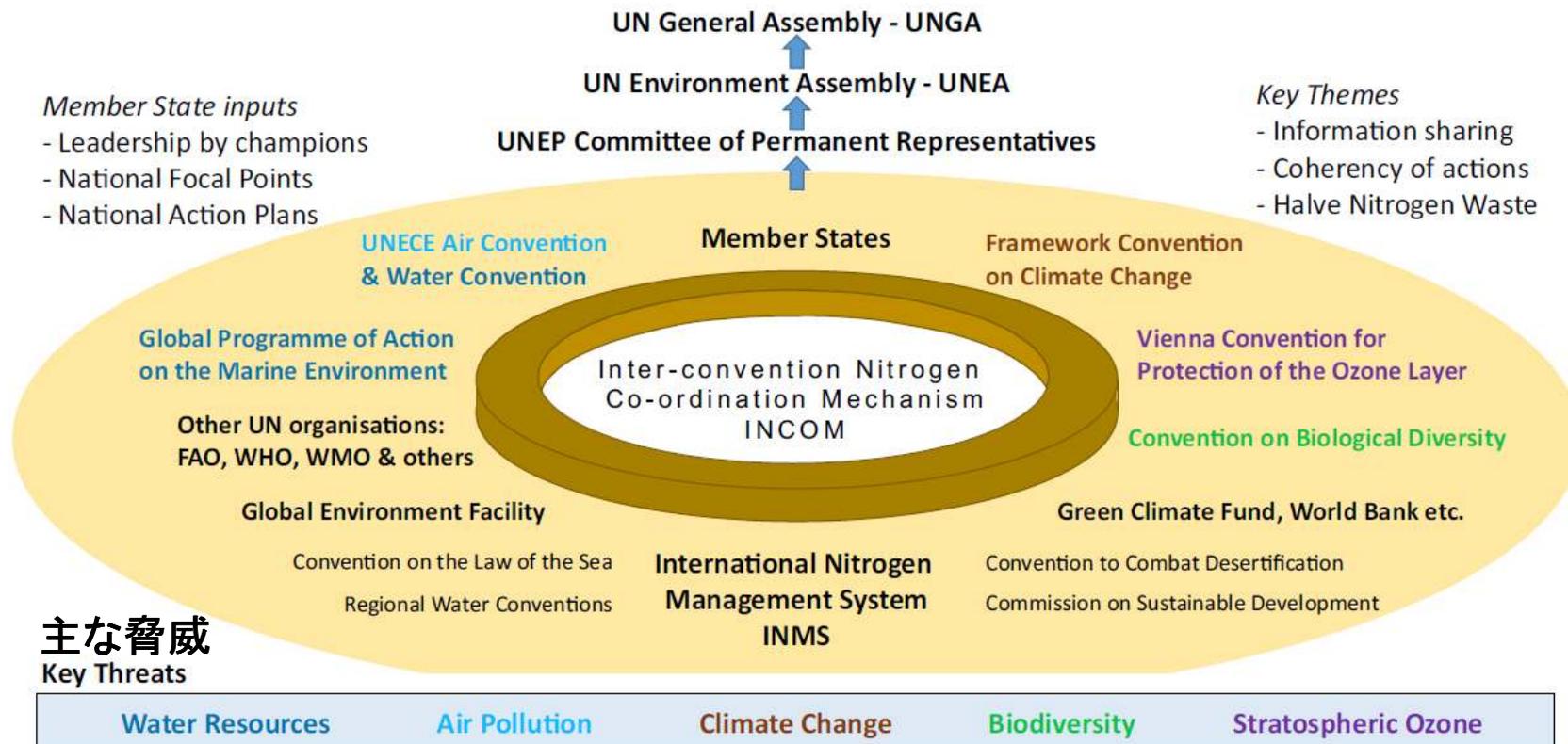


Sutton et al. (2021) One Earth 4, 10-14

条約間窒素調整メカニズム (INCOM)

既存の国際条約などの窒素に関する活動をつなぐ

第5回国連環境総会 (2022年2月) において提案見込み



主な脅威
Key Threats

Water Resources	Air Pollution	Climate Change	Biodiversity	Stratospheric Ozone
-----------------	---------------	----------------	--------------	---------------------

水資源

大気汚染

気候変動

生物多様性

成層圏オゾン

Sutton et al. (2021) One Earth 4, 10-14

国連持続可能な開発目標 (SDGs)

窒素は全てのSDGsと関係しうる

SDG 1 貧困	やせた土地への窒素施肥による食料生産向上	SDG 2 飢餓	窒素肥料は十分な食料生産に不可欠	SDG 3 保健	環境汚染の健康影響防止, たんぱく質の適正な摂取
SDG 4 教育	環境教育と食育は窒素管理に有効	SDG 5 ジェンダー	家事・職業機会の公平・平等性と食環境の向上	SDG 6 水・衛生	窒素利用がもたらす水質汚染の防止
SDG 7 エネルギー	窒素利用効率向上による省エネ, エネルギー源となる窒素	SDG 8 成長・雇用	食料安全保障は経済成長の基本	SDG 9 イノベーション	窒素利用効率向上の新技術, 新たな素材となる窒素化合物
SDG 10 不平等	窒素の便益を受ける者と脅威を被る者の不平等の解消	SDG 11 都市	反応性窒素による大気・水質汚染の防止	SDG 12 生産・消費	廃棄食品・食品ロスの削減, 窒素リサイクルの向上
SDG 13 気候変動	窒素利用に伴う温室効果ガス排出の削減	SDG 14 海洋資源	海洋生態系の富栄養化・貧栄養化, 生物多様性損失の改善	SDG 15 陸上資源	陸域生態系の富栄養化・貧栄養化, 生物多様性損失の改善
SDG 16 平和	火薬・爆薬原料となる窒素の平和利用の促進	SDG 17 実施手段	窒素管理に向けた研究分野間・ステークホルダー間の連携		

3. 日本の状況と将来

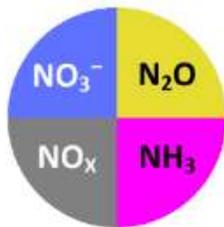
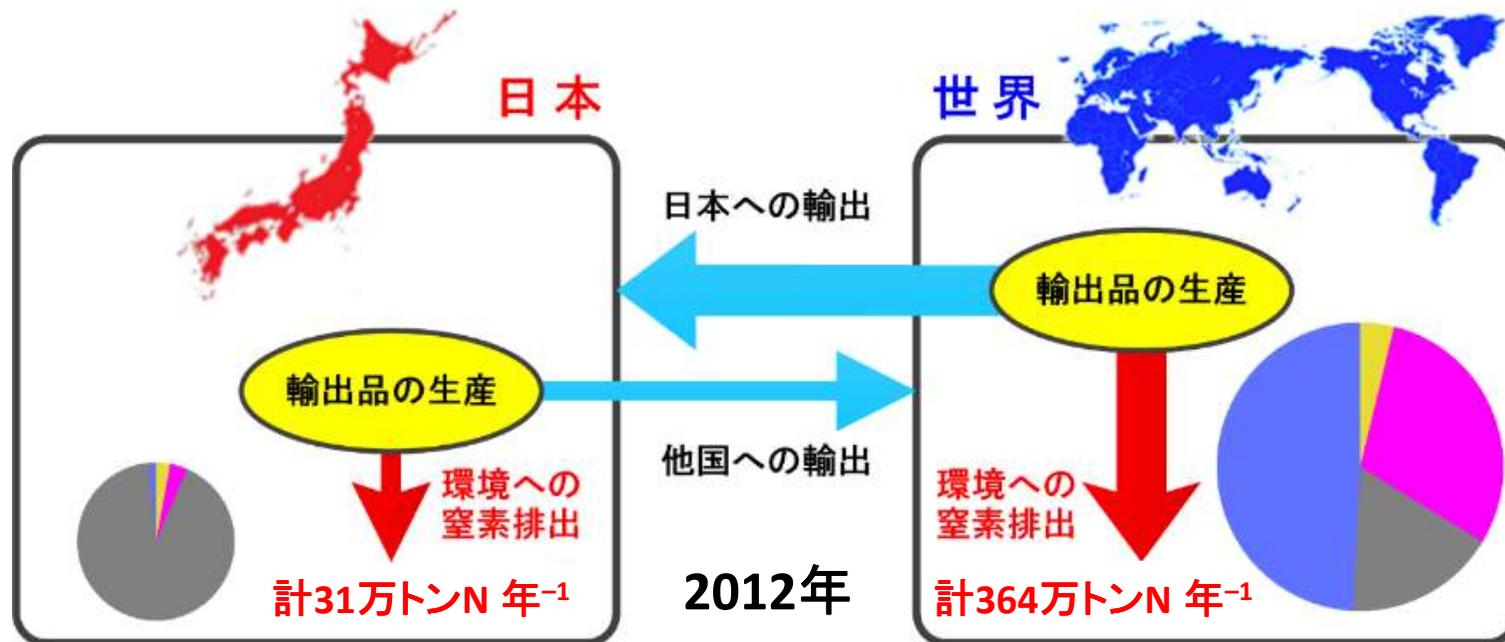
窒素メタボになりやすい日本

大量の反応性窒素が流入する構図

- 人口に比して狭い国土
 - 人口： 1億2640万人(2018年) **窒素排出の総量が大**
 - 人口密度： 337 人 km⁻²(2018年) **窒素排出が空間的に集中**
- 低い食料・飼料自給率(強い輸入依存)
 - 食料自給率： 37%(2018年) **国外からの窒素流入が大** → **国内で再利用しきれない**
 - 飼料自給率： 25%(2018年)
 - 食品の輸入超過額： 60億米ドル(2012年, 世界一) **窒素の輸入超過も世界一**
*Oita et al. (2016) Nat. Geosci. 9:111–115
- 食生活の変化
 - 肉類消費： 9.2(1965年)→ 33.5(2018年)kg 人⁻¹ 年⁻¹ **畜産物嗜好が定着**
 - 廃棄食品2550万トン, うち食品ロス612万トン 年⁻¹ (2017年) **同年のコメ生産量782万トン, 世界食糧援助380万トン**

国際貿易に伴う窒素排出

日本は世界に大きな窒素排出を負わせている



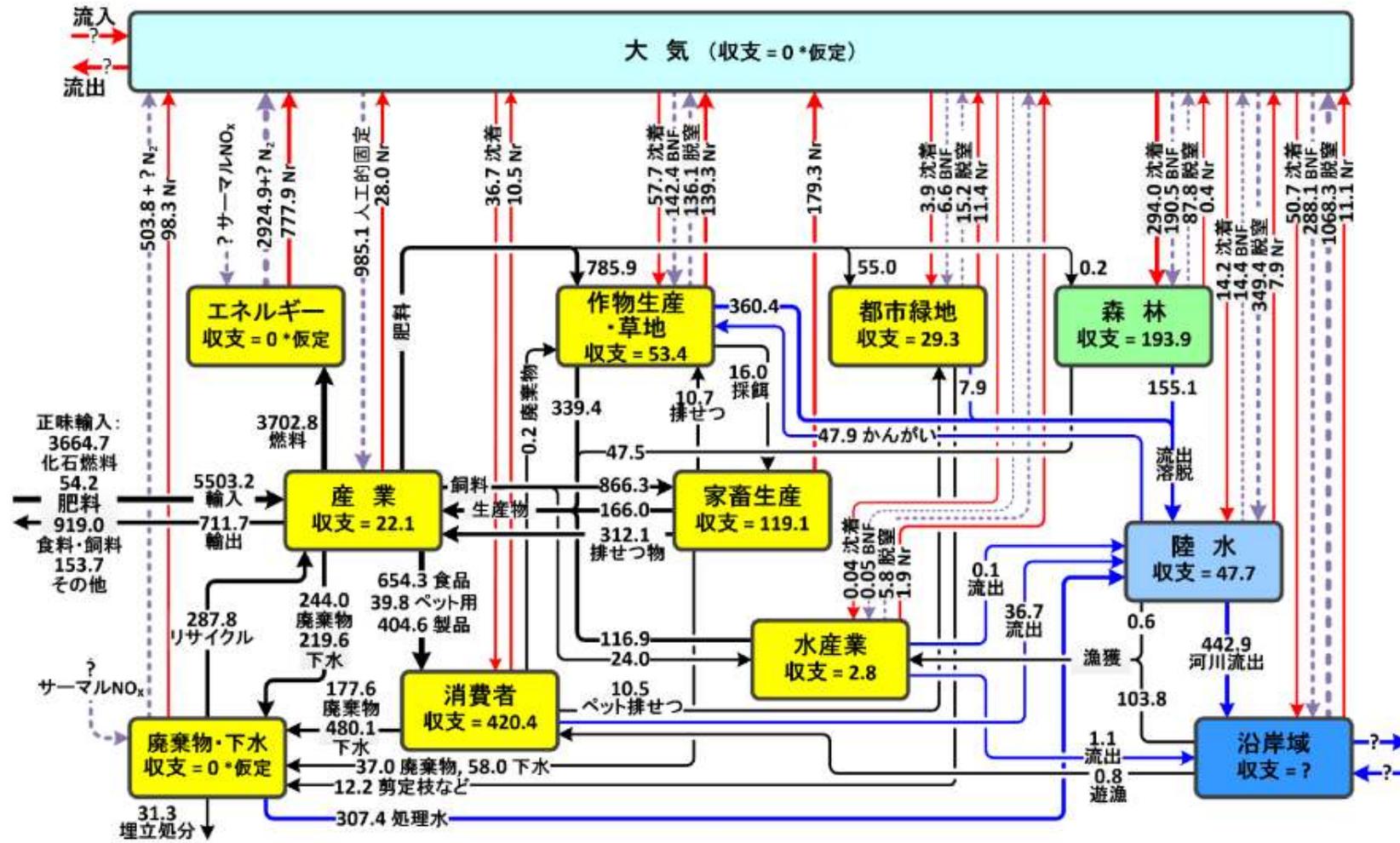
- 日本の輸出がもたらす日本国内の窒素排出 = 31万トンN年⁻¹
- 日本の輸入がもたらす相手国内の窒素排出 = 364万トンN年⁻¹
- 日本が国際貿易を通じてもたらす正味の窒素排出
= 3642 - 314 = 世界の他国に対し, 333万トンN年⁻¹

世界一の多さ

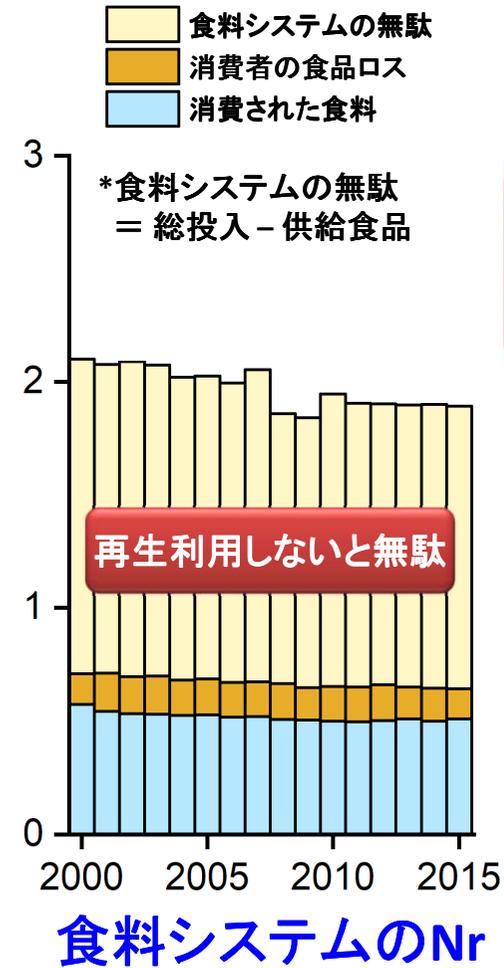
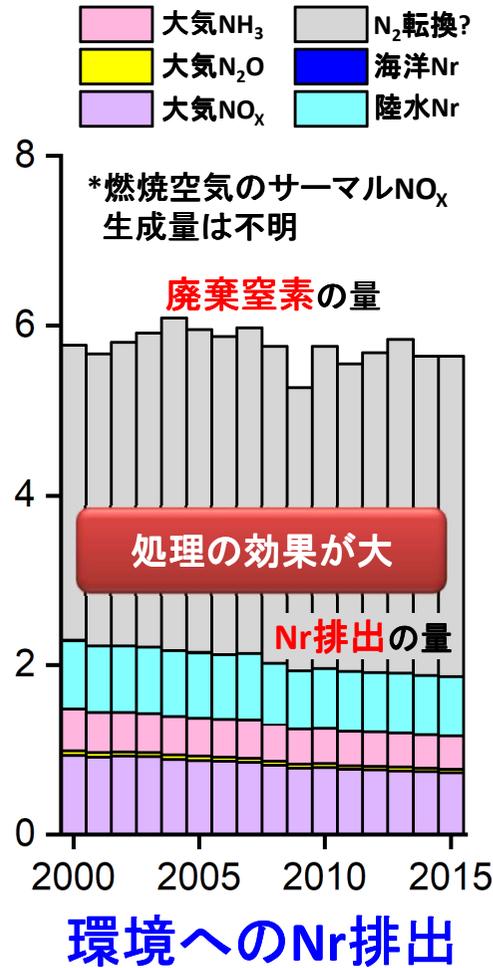
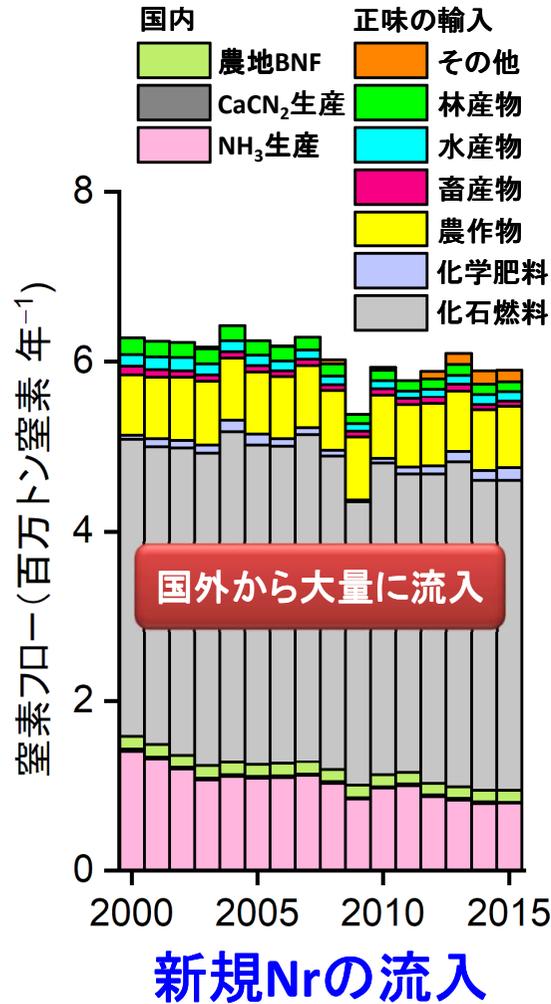
Oita et al. (2016)に基づき作図

日本の窒素収支はどうか (参考)2010年の窒素フローとバランス

Hayashi et al. (2021)
Environ. Pollut. 286, 117559



日本の特徴：Nr排出は減少，廃棄窒素は多い



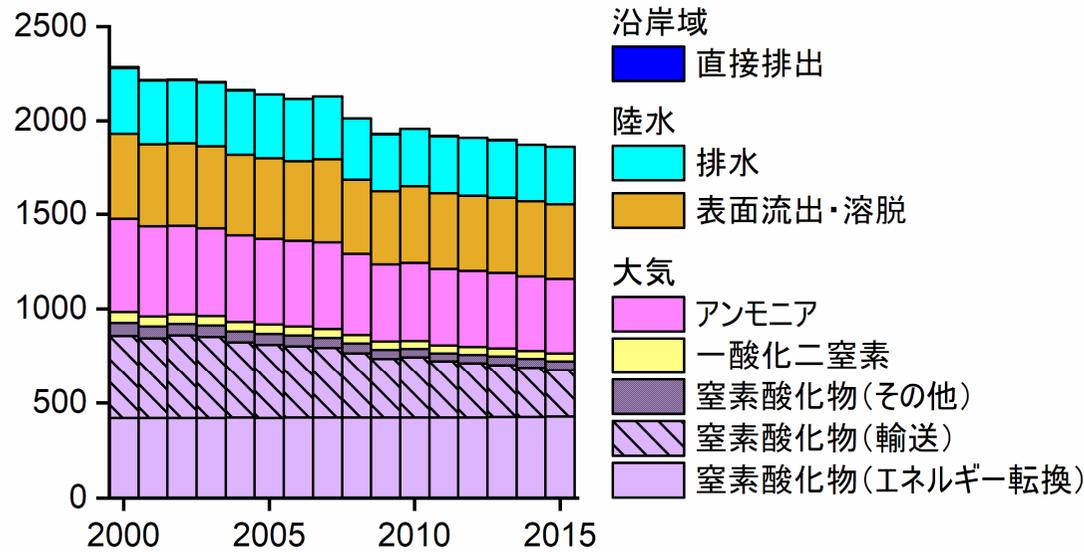
1人あたりの
 廃棄窒素は
 世界平均の約2倍

日本の反応性窒素の排出量

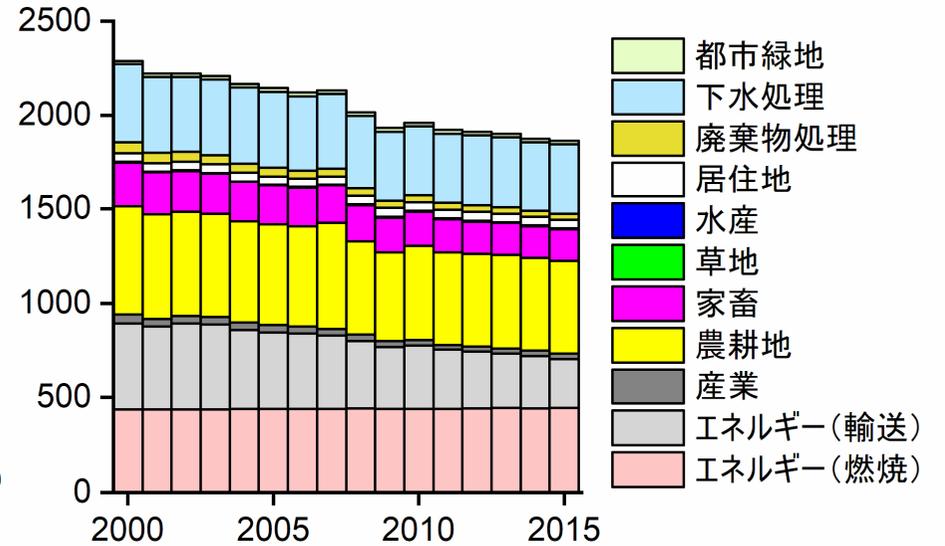
減少傾向は特に輸送部門の窒素酸化物(NO_x)で明瞭

反応性窒素の排出量(千トン窒素年⁻¹)

(a) 行き先別



(b) 発生源別



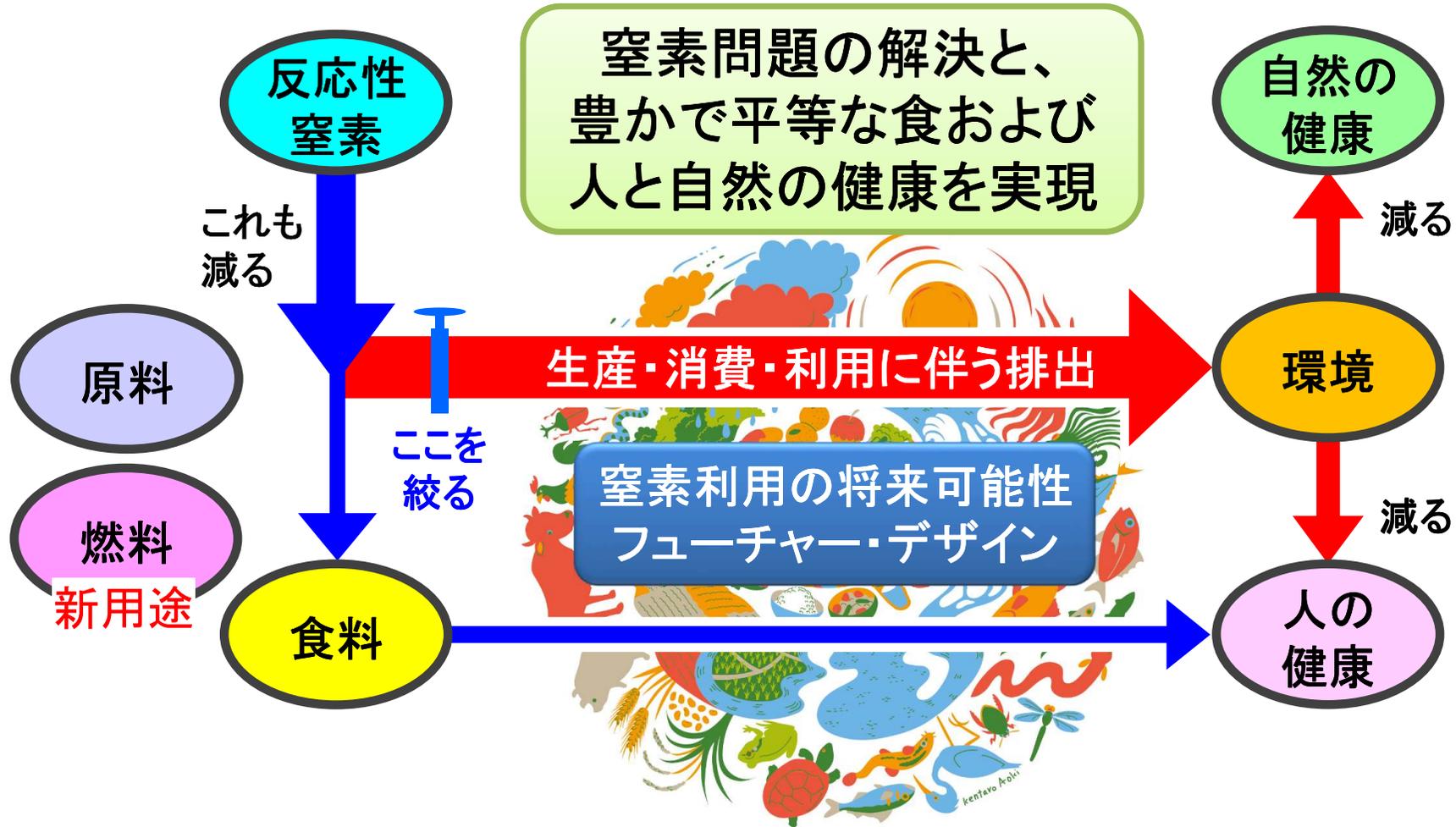
将来の窒素フローが大きく変わる？

脱炭素化 ⇒ アンモニアのエネルギー用途の拡大

- なぜアンモニアか： 燃やしてもCO₂が発生しない
- アンモニアの国内供給： 燃料用途を増やす計画
 - 2015年： 肥料・産業向けに100万トン窒素未満
 - 2030年： + 燃料向けに410万トン窒素（500万トンのアンモニア）
 - 2050年： + 燃料向けに2500万トン窒素（3000万トンのアンモニア）
 - 参考： 世界のアンモニア生産量（2015年）は1億4100万トン窒素
- 心配なこと： 脱炭素化の努力が報われるか
 - 経済面： アンモニアの価格変動と肥料・産業・エネルギー用途間の競合
 - 環境面： 廃棄窒素の増加，アンモニア燃焼で生成する窒素酸化物の処理・回収，残余の窒素酸化物が大気に排出される影響

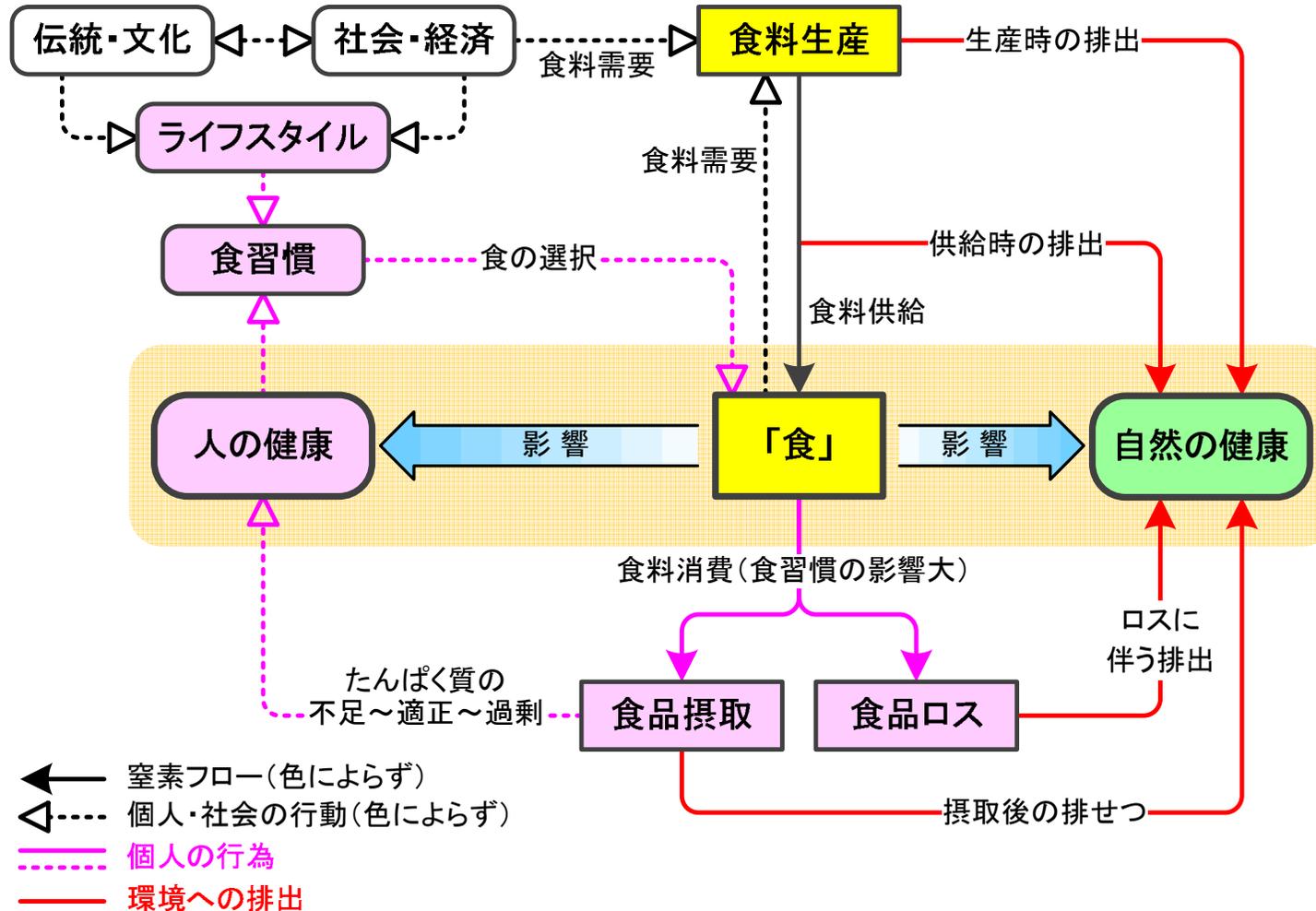
将来世代のために
よい方法を議論する場を
設けられたらと願います

持続可能な窒素利用に向けて 地球研プロジェクト(予備研究)実施中



「食」は人と自然の健康のハブ

「食」を大切にすることは窒素問題の解決にもつながる



「図説 窒素と環境の科学」朝倉書店

林・柴田・梅澤編(2021年12月刊行)

判型: B5判192ページ(予定)

定価: 本体4500円+税

ISBN: 978-4-254-18057-2

第1部 つながりを知る総論

- 1-1 本書の道案内: 窒素はすべてをつなぐ
- 1-2 人類の窒素利用がもたらす環境問題
- 1-3 人類による窒素の発見と利用の歴史
- 1-4 元素としての窒素と多様な化合物
- 1-5 生物に不可欠な窒素

コラム1 出汁のうま味を引き出す窒素化合物と日本の水

- 1-6 窒素の形態変化と環境中の移動
- コラム2 大気-海洋間の窒素のやりとり
~地球の窒素循環の重要なピース~

- 1-7 環境中の窒素分析方法
- 1-8 窒素と他の物質との強いつながり

コラム3 窒素分子の溶解度の謎

第2部 日本の現状の理解に向けた各論

- 2-1 エネルギー

コラム4 光合成そして窒素固定の夢

- 2-2 製造産業

コラム5 窒素の意外な用途

- 2-3 作物生産

コラム6 窒素と宮沢賢治

- 2-4 家畜生産

- 2-5 水産業

コラム7 水産物の窒素安定同位体比 ($\delta^{15}\text{N}$) を利用した様々な解析

- 2-6 人の生活

コラム8 医療に役立つ窒素酸化物

- 2-7 廃棄物・下水

コラム9 最先端下水処理技術

- 2-8 国際貿易

- 2-9 大気

コラム10 アンモニア吸着剤による窒素回収技術

- 2-10 陸域生態系

- 2-11 陸水生態系

コラム11 三酸素同位体を用いた窒素循環解析

- 2-12 海洋生態系

コラム12 海洋窒素循環への分子生物学的手法の導入

- 2-13 日本の窒素収支

- 2-14 経済圏の窒素フロー

コラム13 窒素問題のDPSIR

- 2-15 健康影響

コラム14 潜水時の窒素酔い・減圧症とナイトロックス

- 2-16 生態系への影響を評価する

- 2-17 窒素のトレードオフ

- 2-18 窒素管理にかかわる政策と法令

第3部 国内外の取り組みと将来展望

- 3-1 世界の取り組み

コラム15 新型コロナウイルス感染症 (COVID-19) がもたらした大きな変化

- 3-2 日本の現状と未来

- 3-3 持続可能な未来に向けて