

人と自然の健康を結ぶ「窒素」

賢明な窒素利用は
「持続可能で豊かな食」の礎

2021年9月13日(月)
食生活ジャーナリストの会
2021年度西日本支部第2回勉強会

総合地球環境学研究所
農業・食品産業技術総合研究機構
林 健太郎

本日の話題

1. 窒素問題とは
2. 未知が多い窒素の挙動
3. 日本はどうなのか
4. 国内外のプロジェクト
5. 将来に向けて

1. 窒素問題とは

「何ですか、そもそも窒素って？」

大別して2種類の窒素 「分子窒素」と「その他の窒素」

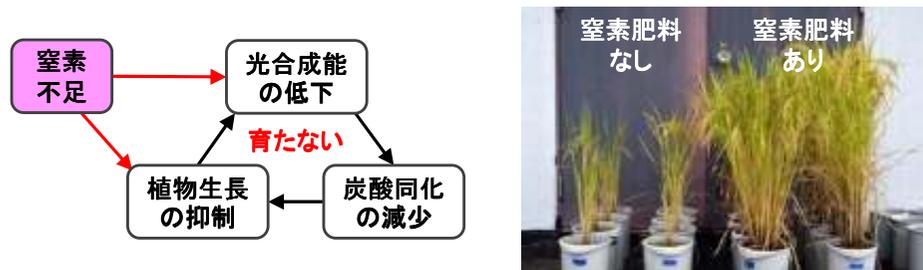
- 環境中で **不活性** か **反応性** か
 - **不活性**: 分子窒素(N_2), 大気の78%(圧倒的)
 - **反応性**: 他の窒素, **反応性窒素**と総称

環境中の主な反応性窒素

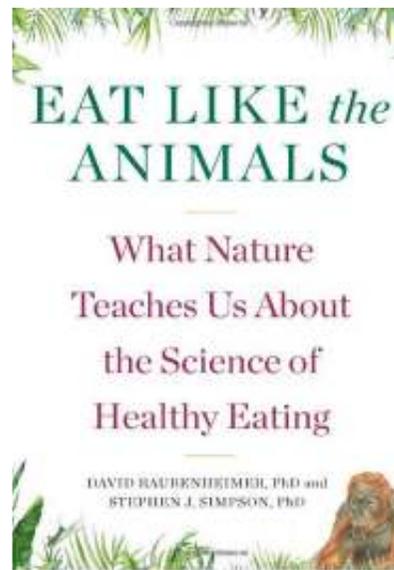
還元窒素	アンモニア(NH_3)とそのイオン・塩(NH_4^+) 有機態窒素(アミン, アミノ酸など, 例:尿素)
酸化窒素	硝酸(HNO_3)とそのイオン・塩(NO_3^-) 一酸化窒素(NO)(狭義の窒素酸化物) 二酸化窒素(NO_2)(狭義の窒素酸化物) 一酸化二窒素(N_2O)

窒素は生き物に必須 生命代謝, 体づくり, 遺伝情報

- アミノ酸や核酸塩基に必ず含まれる
 - タンパク質やDNAなどの素材
- 多くの生物は, 分子窒素(N₂)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
- 光合成酵素もタンパク質 → **窒素は重要な肥料**



全ての生き物は **タンパク質** が欲しくて食べる

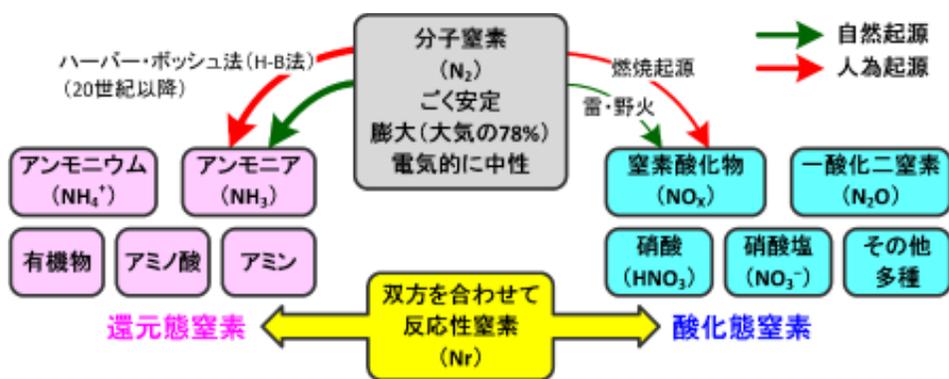


和訳版: サンマーク出版

スナック・菓子類・超加工食品の
食べ過ぎ問題にもリンク

Houghton Mifflin Harcourt

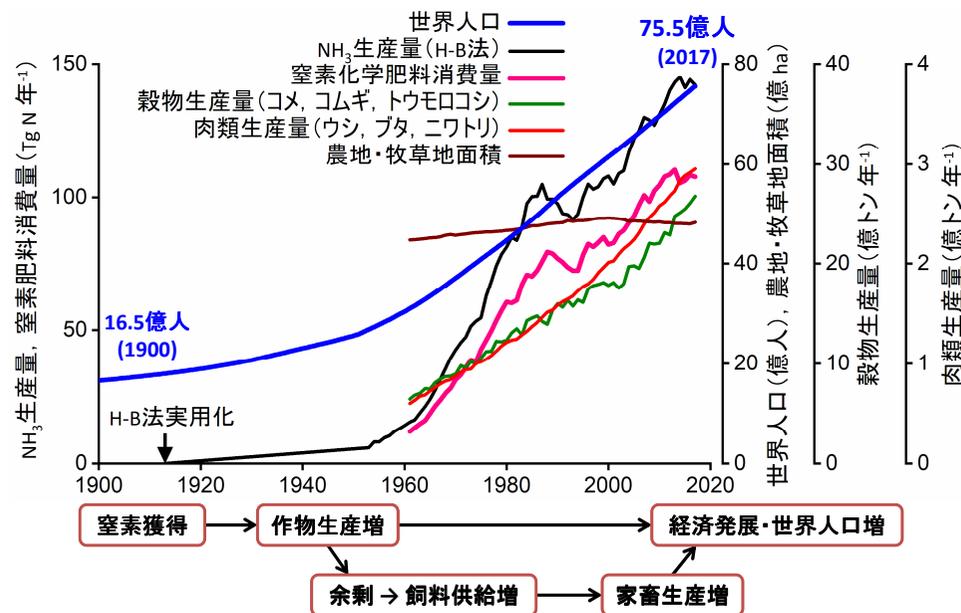
キーワード: 反応性窒素 (Nr) 安定な分子窒素(N₂)を除く窒素化合物



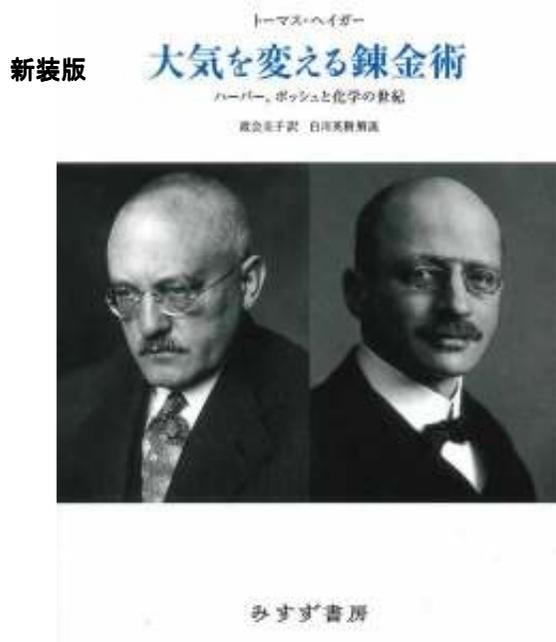
窒素資源の特徴

- 用途: 窒素肥料(8割), 爆薬, 薬品, ポリマー, 半導体など
- 賦存: N₂は膨大だが, Nr合成にエネルギー・資源が必要
- 供給: H-B法の実現で Nrを望むだけ作れるようになった

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が支えてきた



ハーバー・ボッシュ法の経緯の読み物



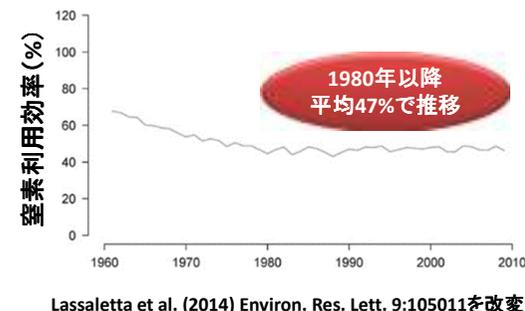
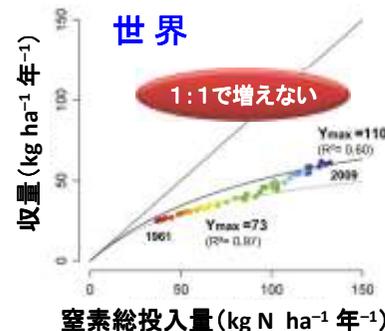
初版(図書館にはこちらが多いかも)



みすず書房

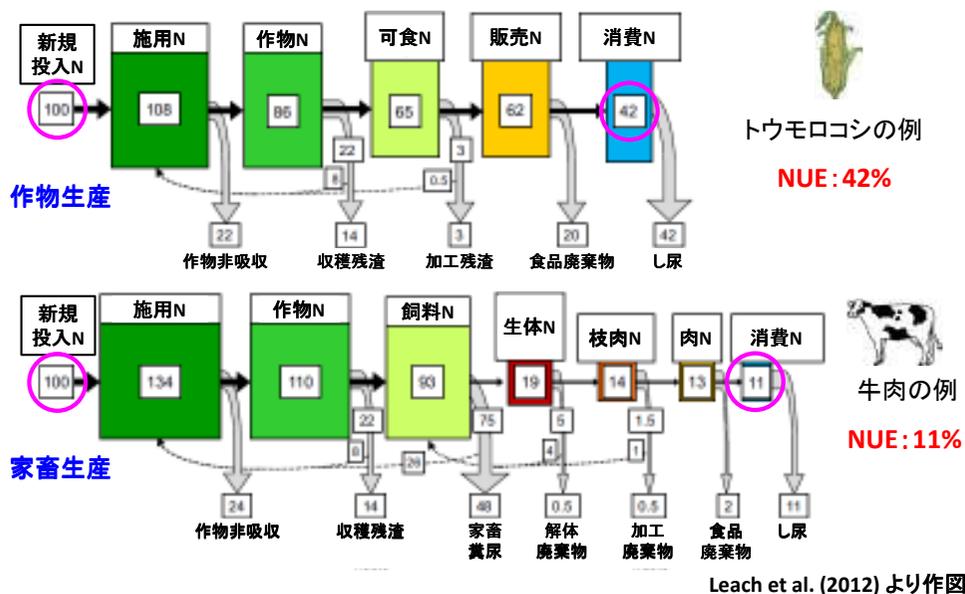
窒素利用の問題点 ① 作物生産の窒素利用効率が低い

- 窒素利用効率 (NUE: Nitrogen Use Efficiency)
 - ここでの定義: 農地投入 (= 化学肥料 + 有機肥料 + 窒素固定 + 窒素沈着) に対する作物吸収の割合
 - 1961~80年: 68% → 45%, 化学肥料の消費増と符号
 - その後30年: 平均 47% で横ばい (= 約半分が未回収)

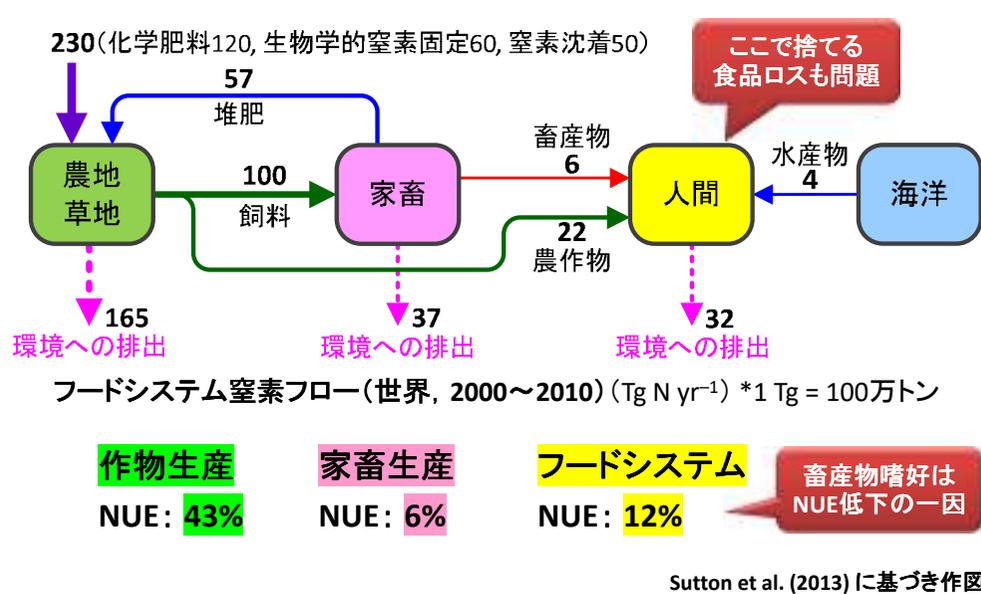


Lassaletta et al. (2014) Environ. Res. Lett. 9:105011を改変

窒素利用の問題点 ② 家畜生産のNUEは作物生産より低い



窒素利用の問題点 ③ 畜産物嗜好はフードシステムのNUEを下げる

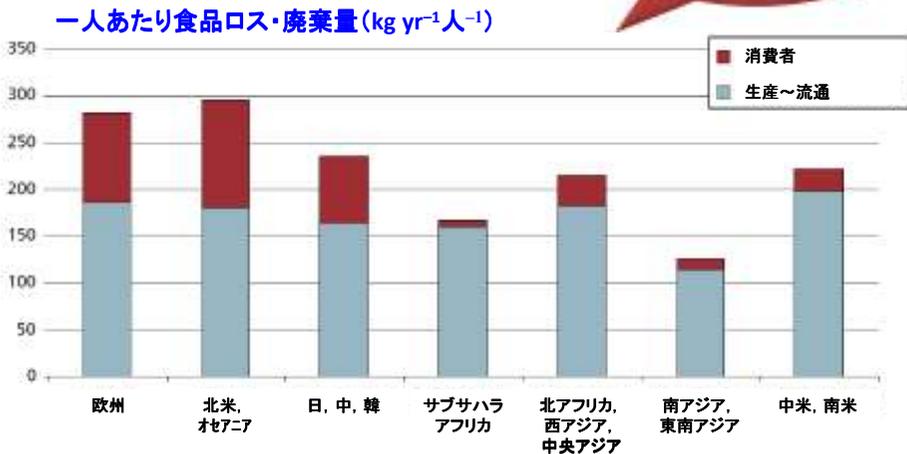


窒素利用の問題点 ④

折角の食べ物を捨てる

- 生産～流通の廃棄と食品ロス

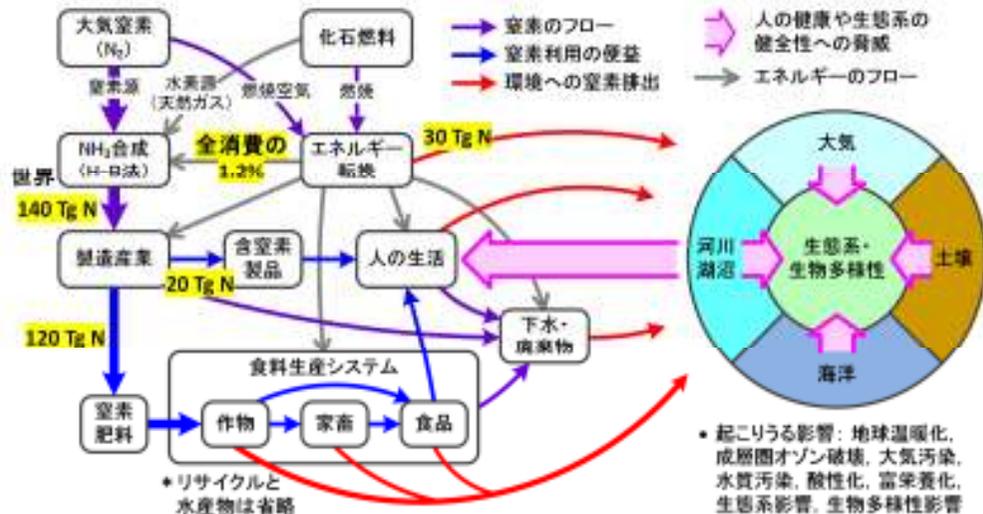
1/3の食品が捨てられている (FAO, 2011)



FAO (2011) Global food losses and food waste を改変

キーワード: 窒素問題

窒素利用の便益と脅威のトレードオフ

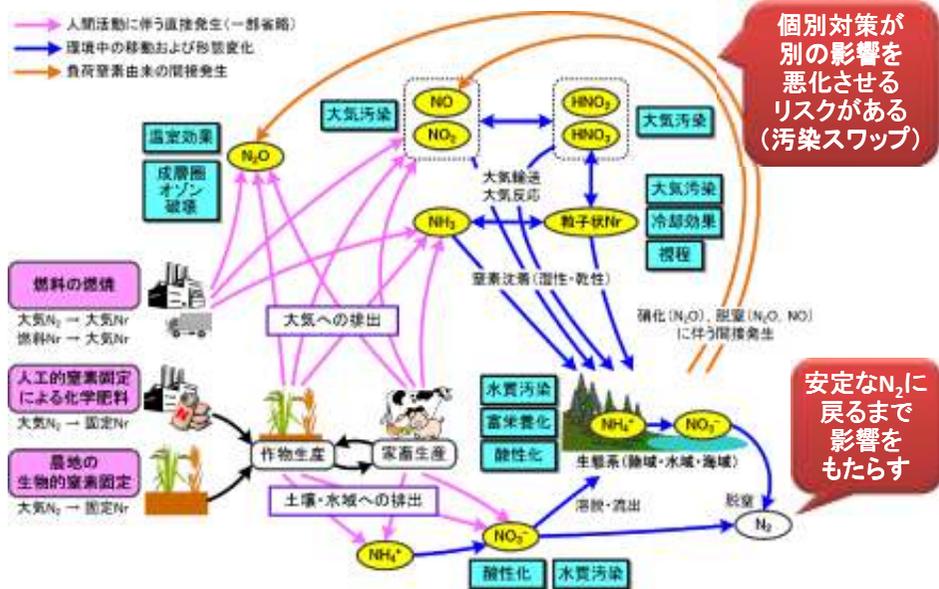


参考: 生物学的窒素固定(全球)は, 陸上生態系 60 Tg N, 海洋生態系 140 Tg N

数値はFowler et al. (2013), IFA (2009) より

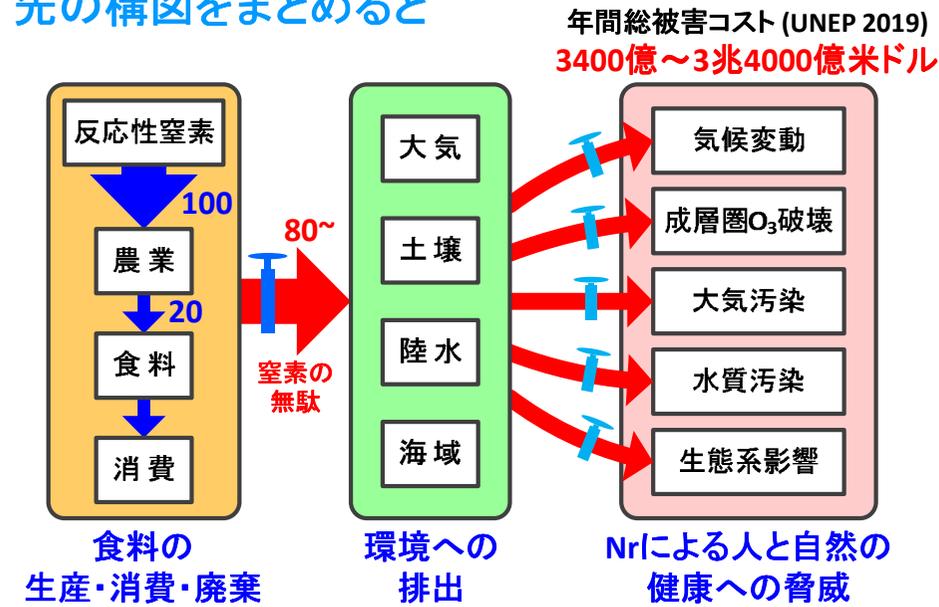
キーワード: 窒素カスケード

形を変え複雑に巡るNrがもたらす多様な影響



反応性窒素の排出がもたらす脅威

先の構図をまとめると



窒素問題の紹介動画

The Two Faces of Nitrogen

約5分の動画, ポルトガルの研究チームが作成

窒素のはなし～おもてとウラの顔

上記の日本語字幕版(和訳:柴田・林・梅澤)

<https://youtu.be/PTtU8ZzKu18>



UNEP Frontiers 2018/19 "The Nitrogen Fix"¹⁸

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. 未知が多い窒素の挙動

皆さまを無理やり極地にご案内

北極島嶼の窒素循環

気候変動と氷河後退が何をもたらすのか

スバルバル諸島

1936

1969

1977

1990

1995

2008

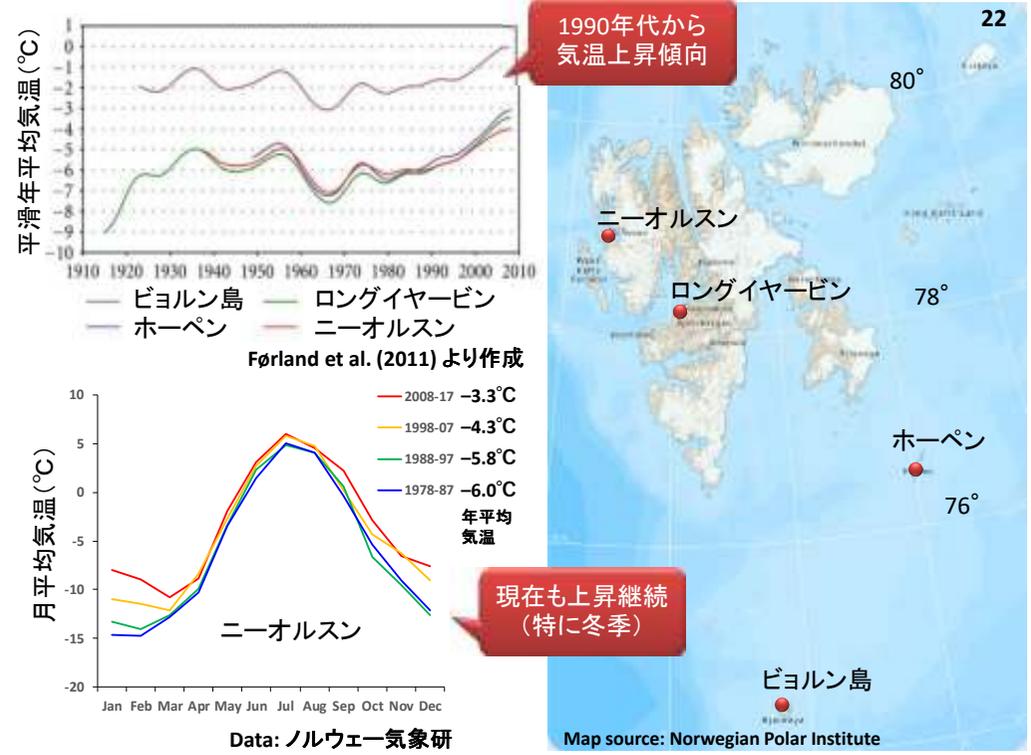
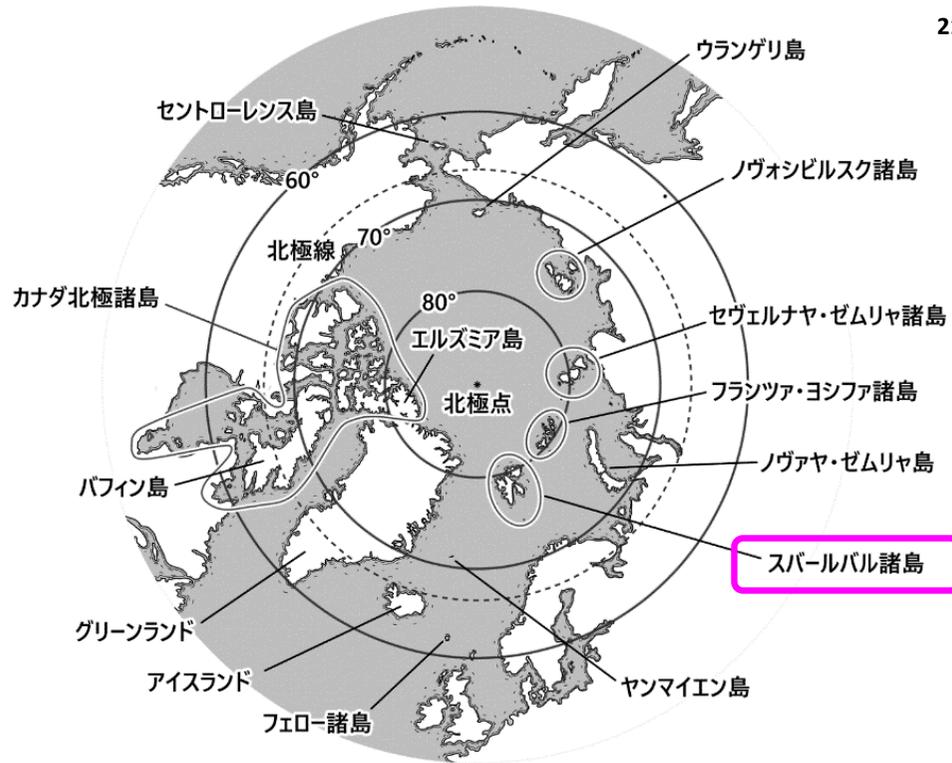
2015

東ブレッガー氷河

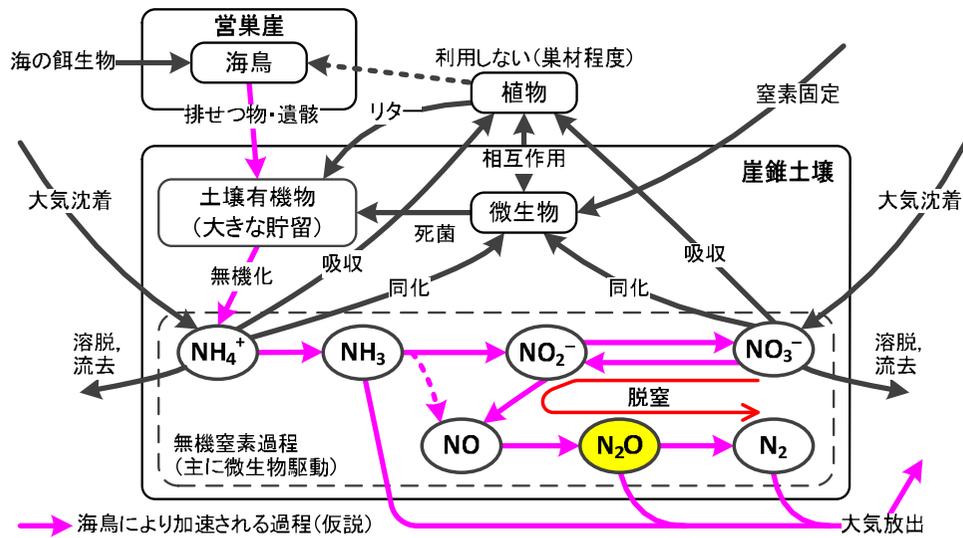
26304018

航空画像:
ノルウェー極地研究所

- 氷河後退後の土壌生成の再開
- その時, 炭素や窒素の巡りは?
- そこに, 気候変動が加わると?
- そして, 動植物の相互作用は?



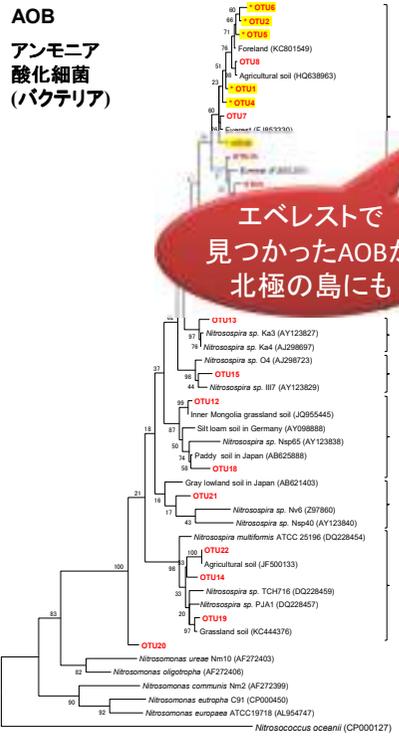
海鳥は窒素循環を加速 物質循環が遅い極域の例外的ホットスポット



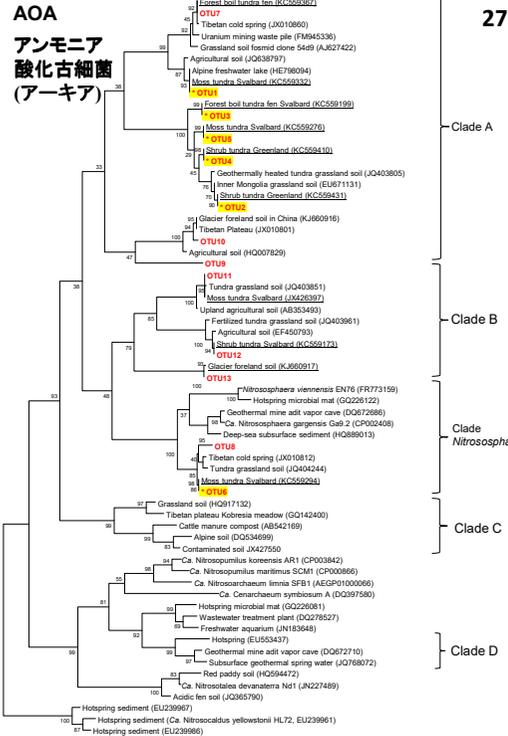
Hayashi et al. 2018



AOB アンモニア酸化細菌 (バクテリア)



AOA アンモニア酸化古細菌 (アーキア)



Hayashi et al. (2016) Polar Biol. 39:725-741

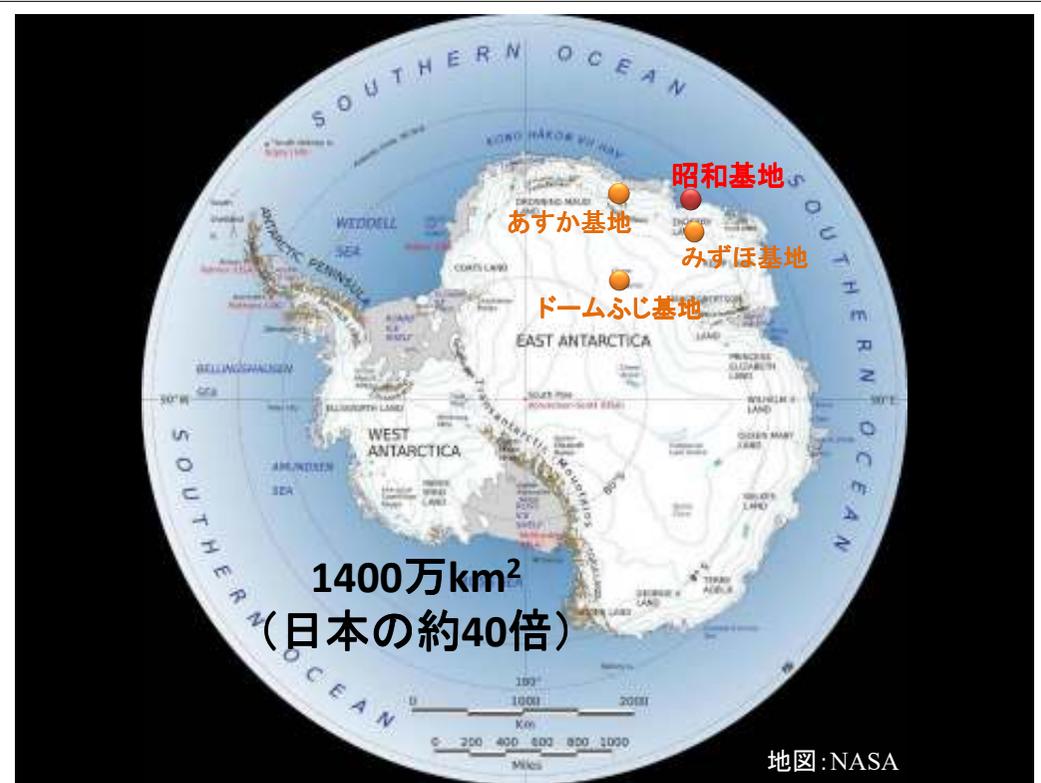


ちょっと宣伝！

北極ツンドラの生き物たちの
関わり合いを紹介する小説
+北極の解説

* 文芸書登録されましたが
ネイチャー・ライティングです

幻冬舎
紙版・Kindle版



アデリーペンギンは好奇心旺盛



沿岸部には露岩域と多くの湖沼



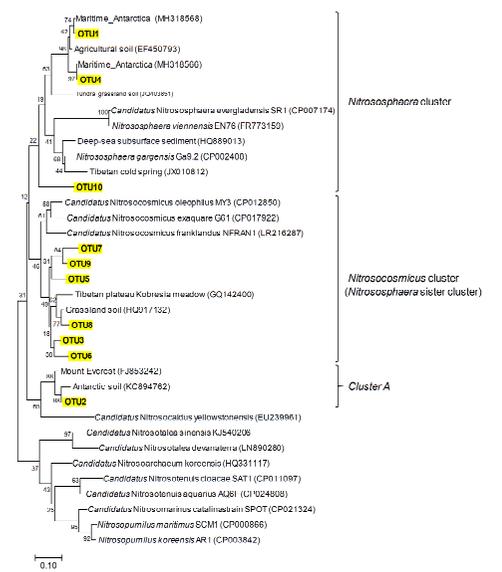
南極にも土壌があり、窒素が循環 地形、水、おそらく鳥類が鍵



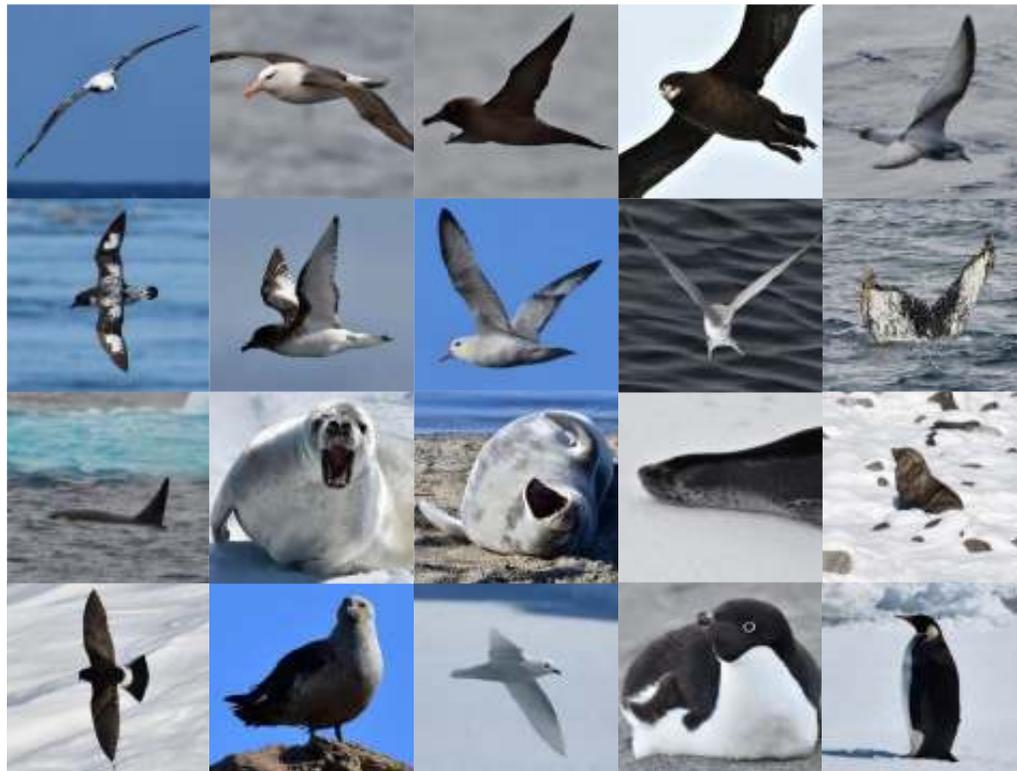
a. AOB-amoA
アンモニア酸化細菌
(バクテリア)



b. AOA-amoA アンモニア酸化古細菌 (アーキア)



Hayashi et al. (2020) Microb. Environ. 35:19126



3. 日本はどうか

申し上げにくいのですが、実は・・・

・・・「窒素メタボ」です 大量の反応性窒素が流入する構図

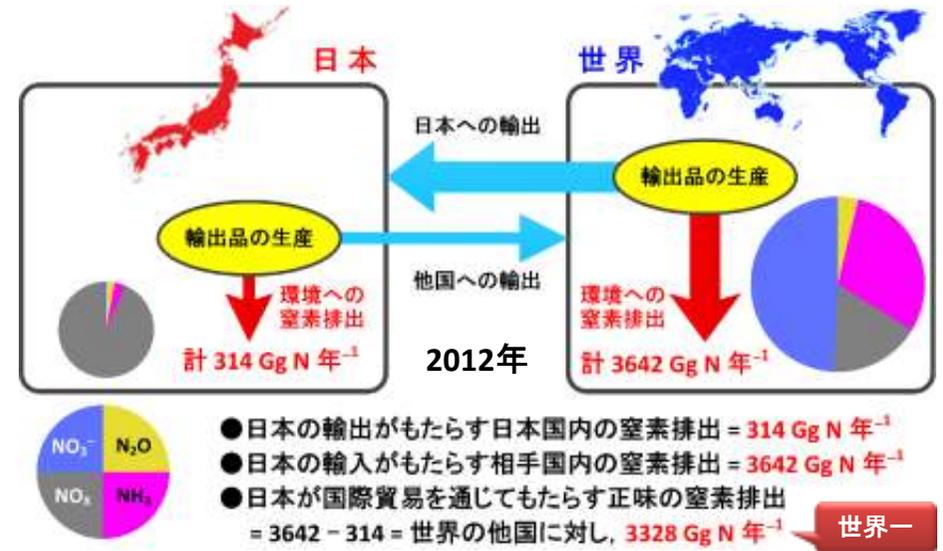
- 人口に比して狭い国土
 - 人口：1億2640万人(2018年) **窒素排出の総量が大**
 - 人口密度：337人 km⁻²(2018年) **窒素排出が空間的に集中**
- 低い食料・飼料自給率(強い輸入依存)
 - 食料自給率：37%(2018年) **国外からの**
 - 飼料自給率：25%(2018年) **窒素流入が大 → 国内で再利用しきれない**
 - 食品の輸入超過額：60億米ドル(2012年, 世界一)
- 食生活の変化 **窒素の輸入超過も世界一**

*Oita et al. (2016) Nat. Geosci. 9:111-115

 - 肉類消費：9.2(1965年)→33.5(2018年)kg 人⁻¹年⁻¹
 - 廃棄食品2550万トン, うち食品ロス612万トン 年⁻¹(2017年)

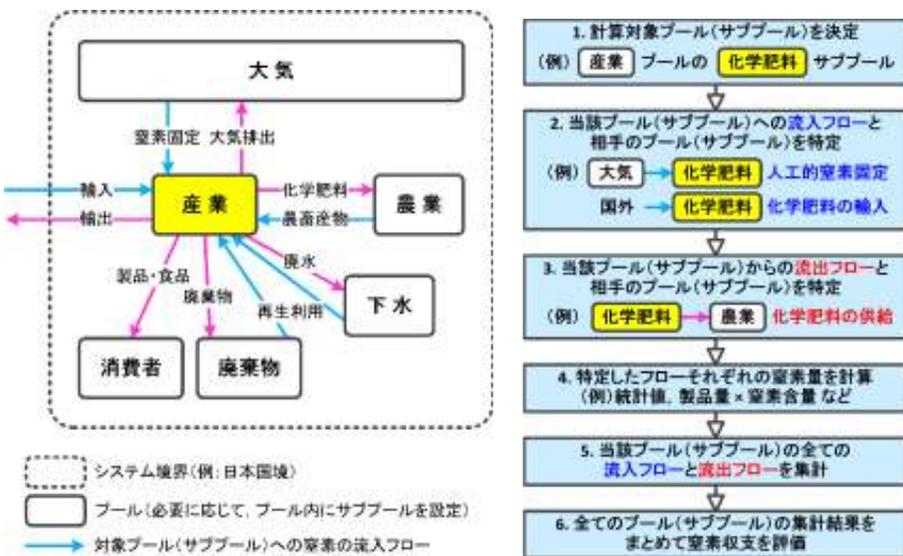
同年のコメ生産量782万トン, 世界食糧援助380万トン

国際貿易に伴う窒素排出 日本は世界にも大きな窒素排出を負わす



Oita et al. (2016)に基づき作図

窒素収支 窒素の出入りを捉える基礎情報



林ほか編, 作成中

日本の窒素収支 プールと外界とのフローの設定

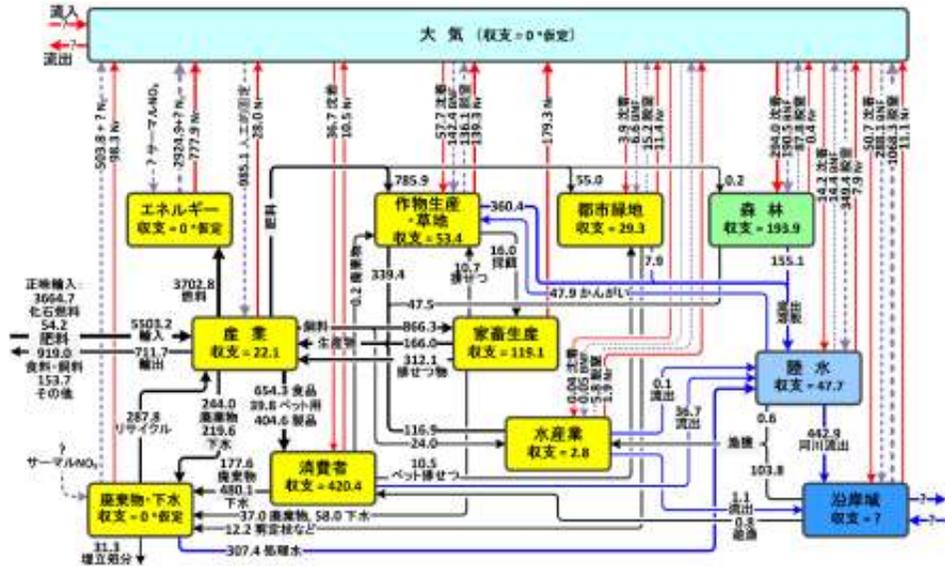


Hayashi et al. (2021) Environ. Pollut. 117559

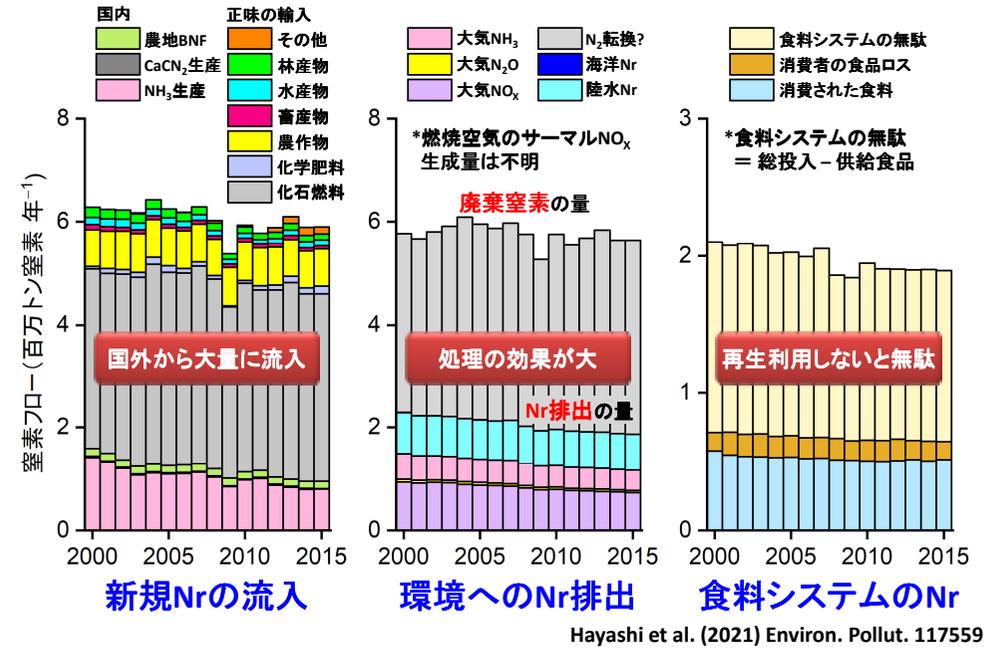
算定結果

2010年の窒素フローと窒素バランス

単位: Gg N 年⁻¹



日本の特徴 (廃棄窒素は多く, Nr排出は減少)



プレスリリース (2021/8/24)

農研機構・北大・国環研・地球研

日本の2000年から2015年の窒素収支を解明

— 持続可能な窒素利用の実現に向け基礎情報を提供 —

一人あたり廃棄窒素は世界の2倍 ほか

https://naroprd.powercms.hosting/publicity_report/press/laboratory/niaes/143545.html

日本の窒素収支 農研機構 ◀

こちらも是非ご覧ください

4. 国内外のプロジェクト

生まれつつある大きな枠組み

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、たんばく質の適正な摂取
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		

From Farm to Fork戦略

欧州グリーン・ディール政策の一環

「みどりの食料システム戦略」(農林水産省)にも影響
Farm to Fork Strategy: overall goals



図説 窒素と環境の科学(仮)朝倉書店

林・柴田・梅澤編(2021年11月刊行予定)

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

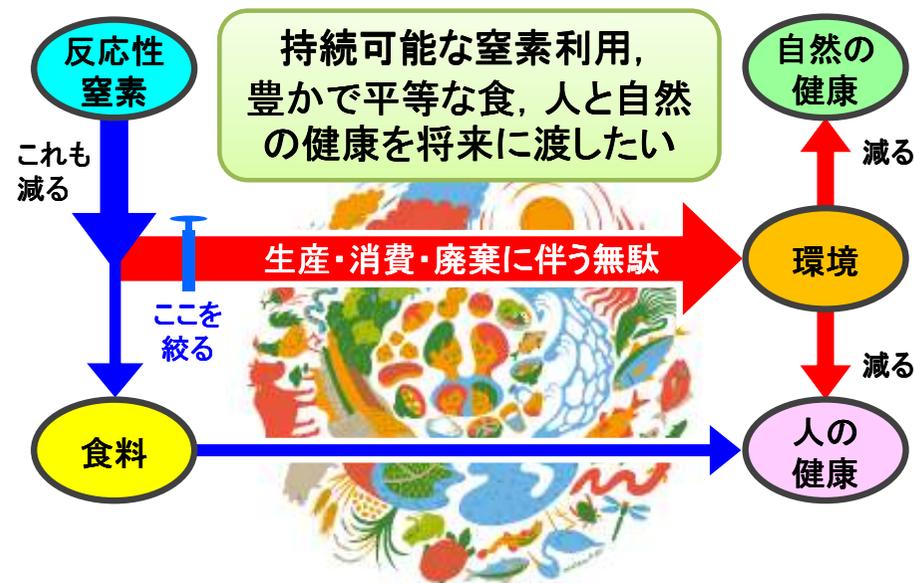
第2部 日本の現状の理解に向けた各論

- 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 医療に役立つ窒素化合物
- 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

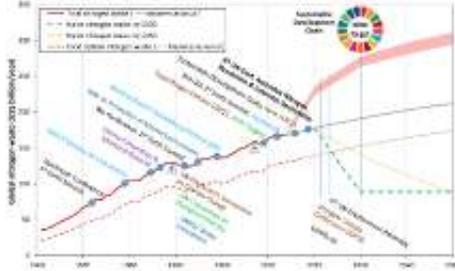
地球研実践プロジェクト:Sustai-N-able

2021年度は予備研究(責任者:林)



Sustai-N-ableが目指すこと (2022-2026)

世界: 2030年もしくは2050年までに「廃棄窒素を半減」にしようとする動き (INMSおよびUNEP)

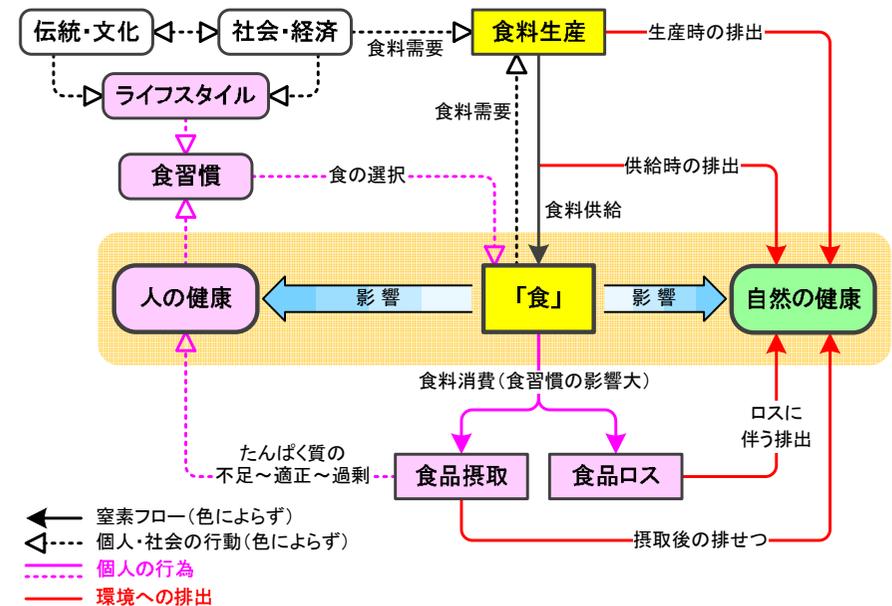


- 日本**: 一人あたり廃棄窒素は世界の2倍
- みどりの食料システム戦略: 2050年までに「化学肥料使用量30%低減」, 「有機農業を農地25%(100万ha)に拡大」
 - 地域循環共生圏プラットフォーム: 地域でのSDGsの実践
 - 窒素の新用途: 燃料アンモニアほか

Sustai-N-ableプロジェクトでは?

- ・ **反応性窒素(Nr)フロー解明**
 - 投入 (合成+輸入+燃焼生成): 低減~現状維持~増大
 - 消費 (食料+原料[+燃料]): 低減~現状維持~増大
 - 処理 (排ガス+排水+廃棄物): 低減~現状維持~増大
- ・ **学際・超学際の繋がりがづくり**
 - 自然科学: 実態, 未知
 - 社会科学: 経済, 制度, 変容
 - 人文科学: 食文化, 思想
 - ステークホルダー: すべて
 - 将来世代の観点: ゴール設定
- ・ **「持続可能な窒素利用」のフューチャーデザイン: 2050年目標**

「食」は人と自然の健康のハブ



分野融合シンポジウムの案内

産業・農業・環境・ステークホルダーの連携

- ・ 題目: 窒素循環における課題とその解決にむけて
- ・ 日程: **2021年11月8日(月)13:00-17:00**
- ・ 場所: オンライン, 参加無料
- ・ 対象: どなたでも
- ・ 主旨: 世界を取り巻く窒素循環・アンモニアに関する課題の外観をつかみ、国内機関の連携の在り方を探る
- ・ 主共催: 産総研, NEDO, 農研機構, 国環研, 地球研
- ・ 内容: 基調講演・ムーンショット型研究の取り組み, 基調講演・世界の動向, 燃料アンモニア, 産業の窒素フロー解析, 窒素循環の環境研究・農業研究, パネルディスカッション
- ・ ウェブサイト: 正式HP公開と参加登録は10月上旬予定
<http://gtrgnriaist.blogspot.com/2021/09/symposium.html>

5. 将来に向けて

すべて繋がっています

4つのアクション

将来世代への責任は他人事ならず

- **共有する:** 情報, 科学的知見, ギャップ(足りないもの, わかっていないこと), ナラティブ(物語, 形態は様々), ツール, 対話の機会, 将来シナリオなど
- **解明する:** 実態, 未知, 予測, 人・社会の応答など
- **繋がる:** 人(最も大切), ステークホルダー(メディアも大切), 多分野の科学的知見, 既往の取組(食文化, 食品ロス, 廃棄物・下水, 温暖化など)など
- **将来から考える:** あるべき姿, そこに至る幾つかの道, 到達への距離(解決すべき事柄), 行動など

Take home messages

- 人の営みが「窒素問題」を作りだした
- 「食」は窒素問題の中心

お問い合わせなど
kentaroh@affrc.go.jp

