

## トーク&ディスカッション (17) 事後報告

「窒素循環」の図から何を伝えますか？  
～持続可能な窒素利用に焦点を当てて考える～

開催日 2025年3月9日(日)13:30～15:30

話題提供者 総合地球環境学研究所 林健太郎教授

参加者 話題提供者含めて13名

報告作成にあたり、林先生からは、2月25日に実施された大手町アカデミア×人間文化研究機構 オンライン無料特別講座「必要でやっかいなもの～あなたと窒素の深い関係」のアーカイブのURLの紹介があった。「9日に用いた資料+αについて講演し、読売新聞の研究者とのトーク、Q&Aが動画になっています。ご覧になる方のペースで細切れに視聴も可能です」とのこと。

<https://www.youtube.com/watch?v=XUfaEqSAVs8>

林先生は多くの講演をされており、講演資料がウェブサイトにアップされている。以下に、2つのURLを紹介するので参照されたい。

<https://www.n-cycle.jp/wp-content/uploads/2023/12/0a868e02d24b984e442f2c8414ad38fd.pdf>

[https://pubpj.t.mri.co.jp/seminar/ic0bo2000000086p-att/seminar20250117\\_4.pdf](https://pubpj.t.mri.co.jp/seminar/ic0bo2000000086p-att/seminar20250117_4.pdf)

当日は、多くのスライドを使ってお話いただき、後半は質疑応答、意見交換を実施した。以下の報告は中道によるまとめであり、間違いなどがあれば中道の誤解によるものであることをご了承ください。

### 0. 林健太郎氏 プロフィール

専門分野：生物地球化学、土壌学、大気科学のほか、文理問わず幅広い関心を有し超学際アプローチに挑戦中

窒素とその問題に関する役割：

- ・地球研「人・社会・自然をつないでめぐる窒素の持続可能な利用にむけて」プロジェクトリーダー
- ・国際窒素イニシアティブ (INI)：東アジアセンター代表、運営委員
- ・栄養塩類の管理に関するグローバル・パートナーシップ (GPNM)：運営委員
- ・国連環境計画窒素作業部会 (WGN)：アドバイザー
- ・環境省「持続可能な窒素管理に関する行動計画」：検討委員会座長 (R5年度)
- ・第10回国際窒素会議：組織委員長、事務局長
- ・日本窒素専門家グループ：提案者、代表代行

### 1. 窒素とは

窒素原子の反応性はとても高く、多様な元素と反応する。無機酸化物や還元物、有機物にもなる。2個のN原子が結合してN<sub>2</sub>になると(三重結合で繋がり)極めて安定。

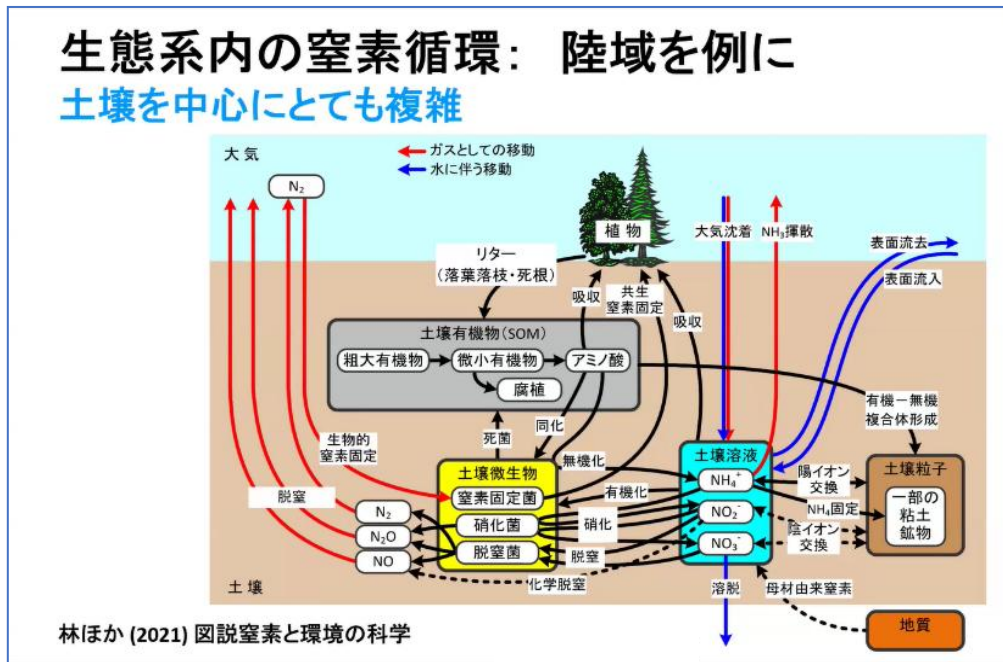
窒素は環境中で不活性(N<sub>2</sub>, 大気の78%)か反応性(反応性窒素 Nr)かの2種類に大別される。

窒素は生命代謝、体づくり、遺伝情報の要素として、生物の必須元素である。アミノ酸や核酸

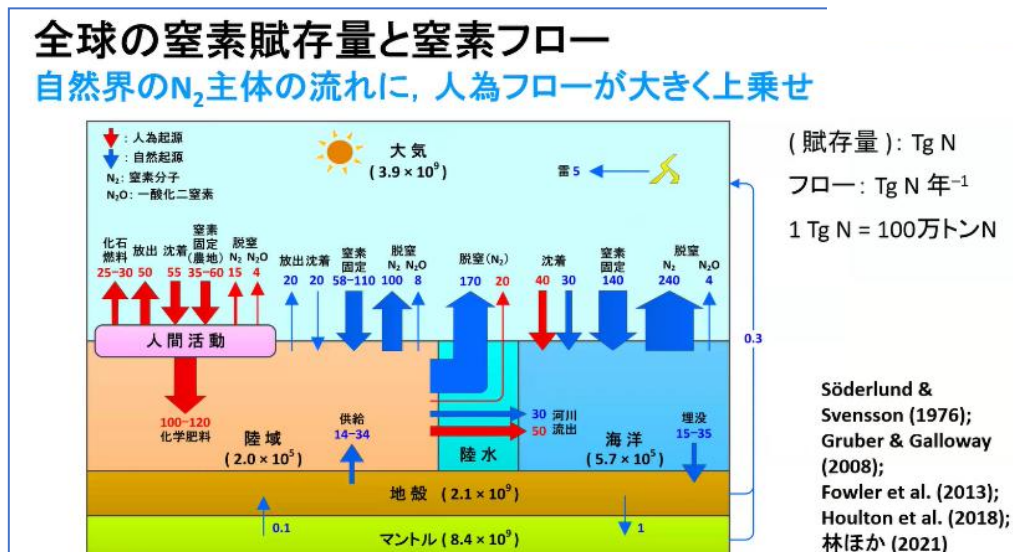
を構成する塩基の形成に必須。酵素はタンパク質であり、光合成を担うのも酵素（地球上でもっとも存在量の多い酵素はルビスコといわれている）。窒素は重要な肥料要素である。しかし、多くの生物は大気中の窒素ガス（ $N_2$ ）を利用できない。

自然生態系の窒素量は、生物学的窒素固定で大気中の  $N_2$  を  $Nr$  に変えて取り入れる過程： $N_2 \rightarrow NH_3$ （ $\rightarrow$ アミノ酸）と、脱窒：生態系の  $Nr$  を  $N_2$  に変えて大気に還す過程（アミノ酸 $\rightarrow NH_3 \rightarrow NO_3^- \rightarrow NO_2^- \rightarrow NO \rightarrow N_2O \rightarrow N_2$ ）という形で、地球全体で見ればある一定の割合量に保たれるようにバランスしている。

下図は、陸域を例に生態系内の窒素循環を示したもので、とても複雑である。



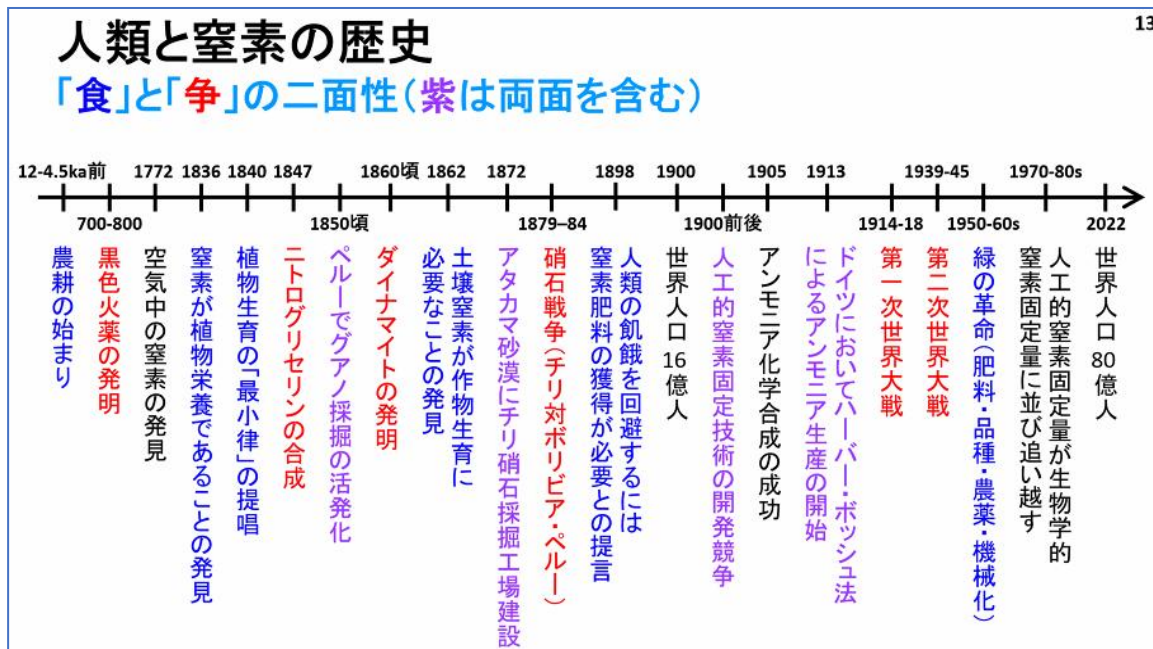
下図は、地球をワンボックスで描いたもので、地球の大気・陸域・海洋全体を示している。大きな青色矢印は、固定した大気中の  $N_2$  を脱窒で返すというフロー。赤色矢印で描いているのは人間活動。人間がインプットする窒素の量は、自然生態系がインプットする量に匹敵している。



青色矢印が自然界の窒素の流れを示しており、こうした窒素循環の流れに、赤色矢印で示す人為フローが大きく上乗せされているのが現在の状況である。

## 2. 人類と窒素

下図は、人類と窒素の歴史を示したものである。



人類と窒素の歴史は一言でいえば「食と争いの二面性」ということになる。

窒素という元素の発見前から、人類はそれと知らずに、例えば家畜や自分たちの排泄物を与えると作物がうまく育つというように農業で窒素をうまく使っていた。

「争」の話では、中国で黒色火薬（主成分は硝酸カリウム）が発明された。これはヨーロッパにも輸入されて戦争の質を変えた。ニトログリセリンが合成されてダイナマイトが発明された。

20 世紀初め、ヨーロッパ主体に人工的な窒素固定で技術の開発競争が起きた。いちばん効率よく作れる方法で世界に普及していったのがハーバー・ボッシュ法であり、それは二回の世界大戦で火薬などをつくるどころまで支えてしまった。その後、緑の革命を経て、食糧の増産が進んで世界人口が増えて今に至っている。

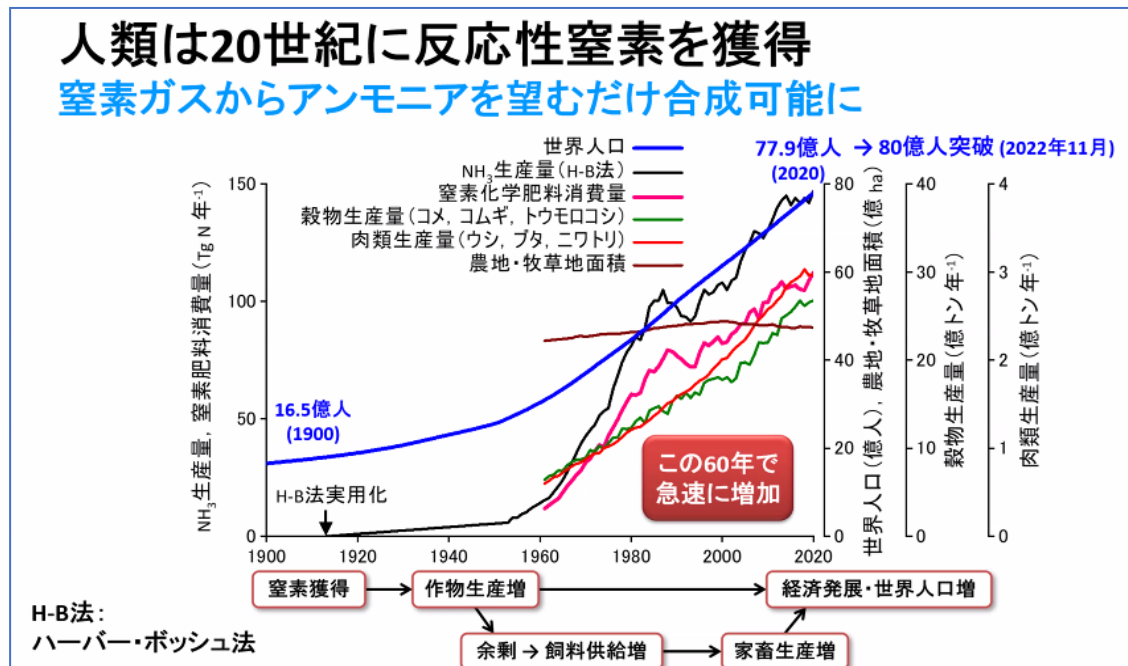
自然生態系では、 $N_2$  を  $Nr$  に変換するのはわずかであり、生物学的窒素固定 (BNF) で  $N_2 \rightarrow NH_3$  をつくるのは特定の微生物。また、雷で  $N_2$  から窒素酸化物が作られるが量的な寄与は小さい。

人間社会では、既にある  $Nr$  を利用することから始まって人工的  $N_2$  固定技術を獲得することに至った。排泄物の利用は、食料に余裕がないと不足する。緑肥や BNF は持続的だが効果は緩やかであり、作物収量を増やすには足りない。グアノやチリ硝石は有効だが非持続的である。

19 世紀末、William Crookes は、「人口は増加の一途で食料需要が増加する。伝統農業、農地開拓には限界があり、過剰耕作による土壌劣化が生じる。1930 年前後から先進国を中心に飢餓が蔓延する」ことを予言した。彼がすごかった点は、解決法まで提示した事である。空気中にたくさんある窒素から肥料を作ることができれば解決できるとした。当時の窒素肥料はグアノやチリ硝石であり、いずれも枯渇性資源である。空気が  $N_2$  を含むことは知られていたが、固定技術は持つ

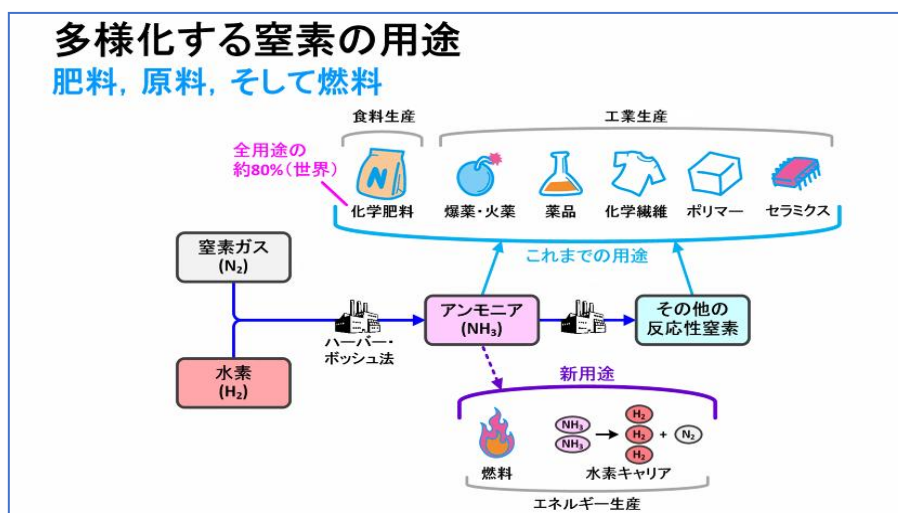
ていなかった。欧州での人工的な窒素固定技術の開発競争の結果、ハーバー・ボッシュ法がドイツで確立した。

下図は、その後何が起こったかを示すグラフである。



ハーバー・ボッシュ法の商業生産が始まったのが1913年。黒線のグラフがハーバー・ボッシュ法によるアンモニアの製造量。現在、およそ150テラグラム（1億5千万トン）ある。そして、その約8割が化学肥料として使われている。緑線が主要穀物三種（コメ、コムギ、トウモロコシ）で、生産力がぐんぐん伸びている。人が食べる作物を作って、さらに家畜に食べさせる飼料も作る余力があるので、赤線の肉類生産量も同じく伸びている。青線が世界人口で、1950年代に変曲点があり、食料生産に支えられる形、言い換えると人口増加の勢いを食料増産が支えて今も続いているということである。2022年には20世紀に入る前の5倍に世界人口が増えた。窒素の化学肥料が手に入ったことが大きなエポックだった。この点だけで言うと、人類のサクセスストーリーということができる。

人類は、その窒素の用途を非常に増やした（下図）。



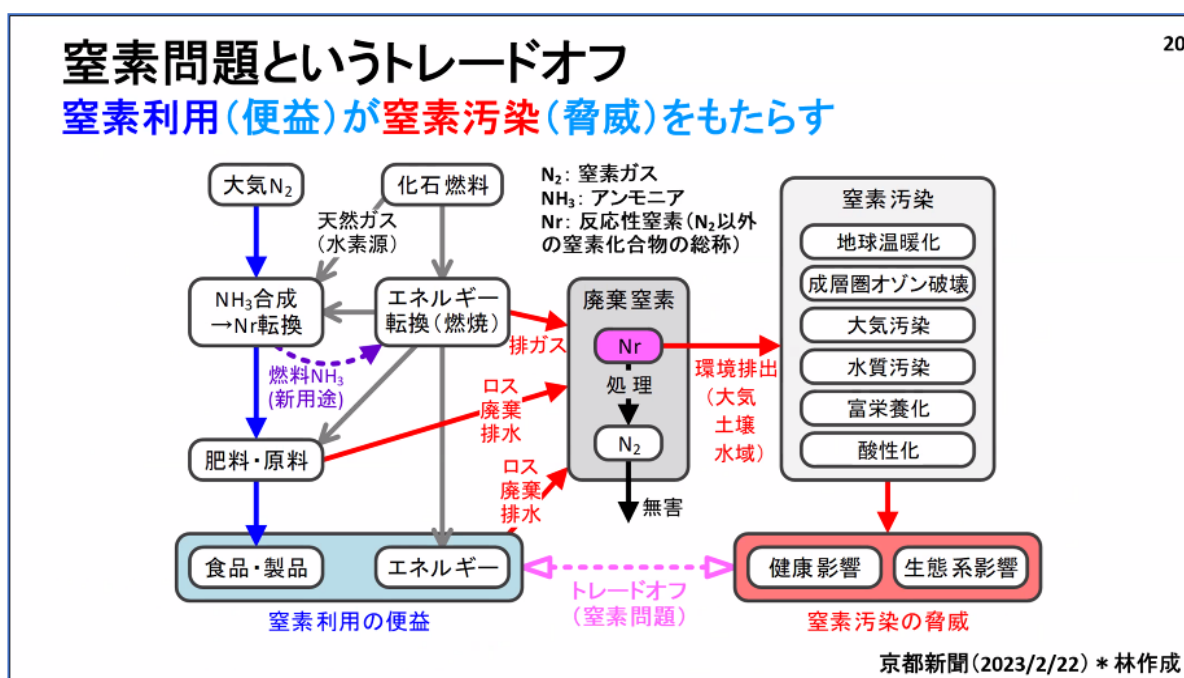


最も残念な用途は、通常火薬、殺傷兵器に使われる火薬（トリニトロトルエン、ニトログリセリンなど）。また、化学繊維、ポリマー、セラミクスなどにも窒素が入っている。青色ダイオードもセラミクスであり、ガリウム、インジウム、これらに窒素をくっつけて作った人工物質である。RGB（光の三原色）のダイオードが揃って白色光が作れるようになった。これが植物工場や家庭の照明などに低電力で十分な明かりが得られる光源として非常に普及している。アンモニアは燃やしても  $\text{CO}_2$  が出ないので、日本政府は今、火力発電所で石炭を燃やしているところにアンモニアを混ぜて燃やすことを始めている。

### 3. 窒素問題

我々人類は今、窒素問題に直面している。（次の URL にある「窒素問題」の動画紹介があった）

[https://loftwork.com/jp/project/chikyuken\\_workshop](https://loftwork.com/jp/project/chikyuken_workshop)

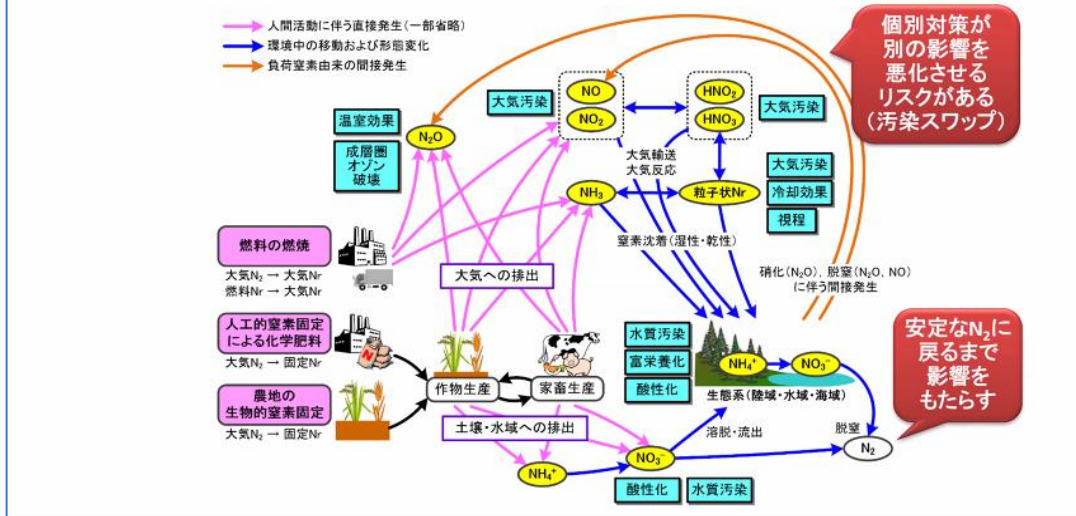


我々は窒素をたくさん使うが、たくさん漏れてしまう。それを処理する能力も持っている。排ガス、排水処理などと同様に、日本は特に世界トップクラスの廃棄物処理技術を持っているが、それでも漏れてしまうし、そういった技術を使うためには当然、コストがかかる。その結果、様々な環境問題が起きて、その結果、我々の健康にも生態系の健全性にもダメージを与えてしまう。ここはトレードオフになっており、窒素問題と呼んでいる。

環境中に一度出たある反応性窒素は姿を変え、形を変え、あちこち巡り、そして、最終的に安定な  $\text{N}_2$  に戻るまでにさまざまな影響をもたらすという特徴がある。また、個別の対策が別の問題を悪化させるリスクがある（汚染スワッピング）。我々はカスケード全体を見て、全体がいい方向にいくように対策を打つ必要がある。これが難しさの一つの理由になる。

# 窒素カスケード

## 複雑に環境を巡るNrがもたらす多様な影響



窒素汚染の影響はさまざまあり非常に複雑。窒素が単独でこれが悪いと指摘しづらい所があって、これが窒素問題を見えにくくしている大きな要因になっている。

# 窒素汚染の影響

## Nrは多くの環境問題に関与



### 窒素汚染の影響 (1)

地球温暖化 (N<sub>2</sub>O、他のガス、粒子状 Nr には寒冷効果も)

N<sub>2</sub>O の温暖化寄与は CO<sub>2</sub> の約 11% (大気濃度は 1/1000 以下)。少量でも CO<sub>2</sub> よりずっと効く、だから大事ともいえる。

### 窒素汚染の影響 (2)

成層圏オゾン破壊 (N<sub>2</sub>O)

対流圏では安定な N<sub>2</sub>O が成層圏に入ると強い紫外線で壊れ、連鎖的にオゾンを壊すことになる。フロン撤廃で N<sub>2</sub>O が相対的に一番になった。

### 窒素汚染の影響 (3)

大気汚染 ( $\text{NO}_x$  [ $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ], 粒子状  $\text{Nr}$  [特に  $\text{PM}_{2.5}$ ])

**窒素酸化物 ( $\text{NO}_x$ )** : 呼吸器疾患 (代表的大気汚染物質) / 対策進展、ただし、 $\text{NO}_x$  が減ると光化学オキシダントの主成分である対流圏オゾンが減りにくくなる / 硝酸の前駆物質  $\rightarrow$   $\text{NH}_3$  と  $\text{PM}_{2.5}$  を形成

**微小粒子状物質 ( $\text{PM}_{2.5}$ )** : 呼吸器・循環器疾患 (近年着目) /  $\text{PM}_{2.5}$  により世界で年間 400 万人の早期死亡 / 窒素は  $\text{PM}_{2.5}$  の 39% を占める (2013 年、世界)

### 窒素汚染の影響 (4)

大気沈着を介した陸域の酸性化 ( $\text{NO}_y$ ,  $\text{NH}_x$ ) と富栄養化 ( $\text{Nr}$ )

大気沈着 : 遠く離れた場所にも負荷を及ぼす / 降水に伴う湿性沈着と、ガス・粒子の乾性沈着  
**酸性化 (日本では問題となりにくい)** :  $\text{HNO}_3$  と  $\text{NH}_3$  ( $\text{NH}_3$  は硝化により酸として寄与)

**富栄養化 ( $\text{Nr}$  が主因 ; リンの大気沈着は小さい)** : 生態系の物質循環は、多くの場合、窒素もしくはリンの可給性が律速 /  $\text{Nr}$  の大気沈着は生物生産を増やす効果 (+) / 一方で、生態系の機能や生物多様性に影響を及ぼす可能性がある (-) / 森林の窒素飽和の懸念 (例 : 溪流に硝酸性窒素が流出しやすくなる)

### 窒素汚染の影響 (5)

水質汚染 ( $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ )

**硝酸性窒素 ( $\text{NO}_3^-$ ) と亜硝酸性窒素 ( $\text{NO}_2^-$ )** : 有害影響は  $\text{NO}_2^-$  に由来 /  $\text{NO}_3^-$  の一部が消化管内で  $\text{NO}_2^-$  に変換 /  $\text{NO}_2^- \rightarrow$  血中でメトヘモグロビン形成  $\rightarrow$  メトヘモグロビン血症 /  $\text{NO}_2^- \rightarrow$  消化管内でニトロソ化合物を形成  $\rightarrow$  発がん性 ; 環境中では圧倒的に  $\text{NO}_3^-$  が多い / 環境基準 (健康項目)  $10\text{mgNL}^{-1}$  (硝酸性窒素と亜硝酸性窒素の合計として) / 日本では地下水が問題

**その他の  $\text{Nr}$  (シアン)** : 環境基準 (健康項目) 検出されないこと

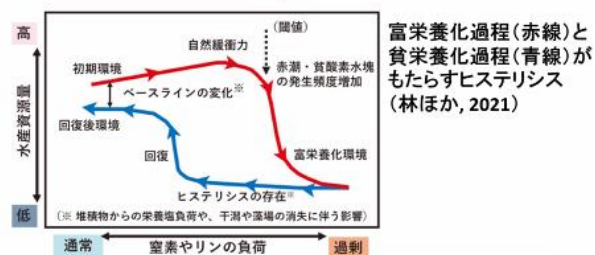
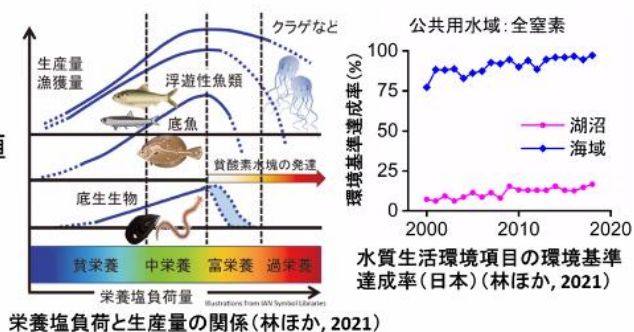
### 窒素汚染の影響 (6)

## 窒素汚染の影響(6) 水域の富栄養化(Nr全般)

### 全窒素(無機窒素と有機窒素の合計)

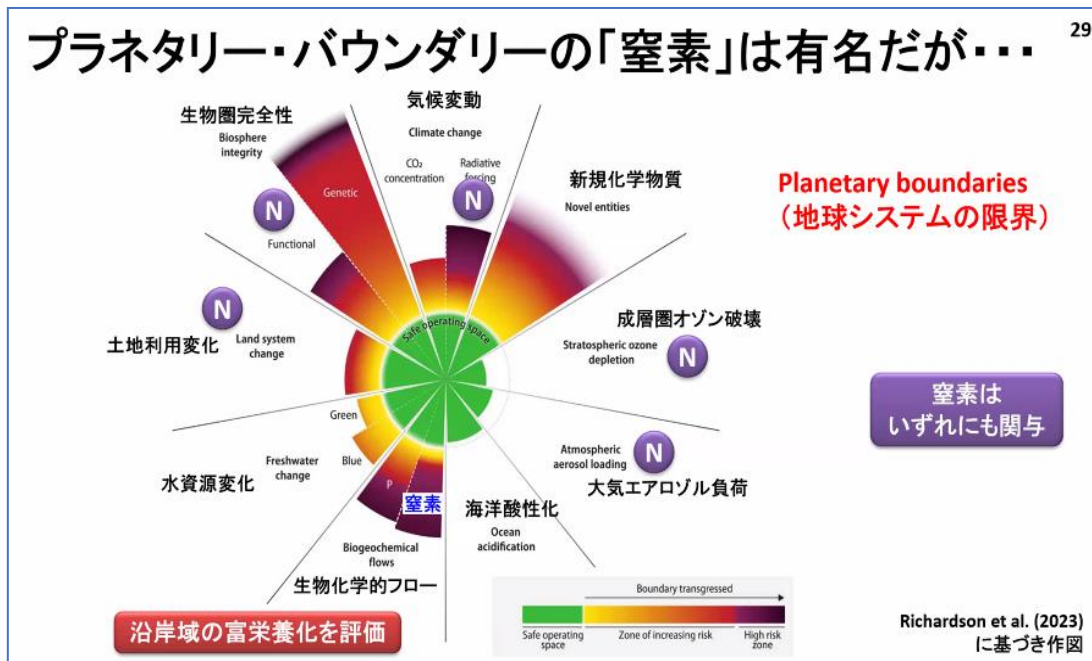
- 栄養塩として植物プランクトンや水生植物の生育促進  $\rightarrow$  生産増加(+の面も)
- 食物網を通じて系全体に波及
- リン(P)が律速の場合は利きにくい
- 一部藻類の過剰増殖  $\rightarrow$  赤潮
- 生物の過剰増殖  $\rightarrow$  貧酸素化  $\rightarrow$  青潮
- 生態系機能の変質, 生物多様性の低下
- 環境基準(生活環境項目) : 水域の性状により異なる複数段階の基準
- 日本では湖沼の富栄養化が問題
- ヒステリシス: 富栄養状態から回復しても生産性が元に戻らない(右図)

\* 貧栄養化問題





最初、赤色のライン(富栄養化過程)。リンが増えてくると窒素もリンも生物の必須元素なので、最初はバイオマスを増やす効果がある(プラス面)。ところが、ある段階に行くと特定種の生物だけバイオマスがすごく増え、それで起こる典型的な現象が赤潮。次いで、過剰増殖した生物が死滅した後の分解で酸素が一気に消費されるので酸素がない青潮が発生してしまっていて、生物が大量死する。その段階で、これは大変だということで水質の改善を行うと、水質は良くなっていくが、一度失われた生物種、バイオマスはなかなか戻らないので、思ったほど回復しなくて、水質が元の状態に戻ったが魚の種類も量も減ったという状態になる。このことを貧栄養化と呼んでいる(青色のライン)。こういったことが日本で起きている。特に瀬戸内海でかなり重要視されている。

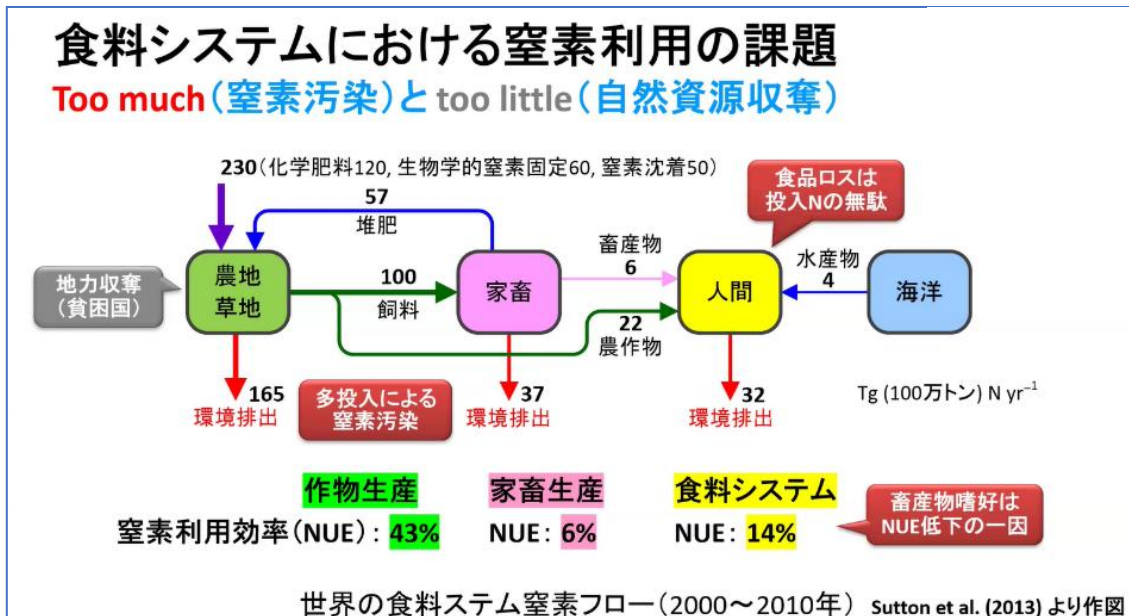


上図はプラネタリー・バウンダリー(地球システムの限界)。9つの地球環境問題に対して、人間活動が緑の範囲に収まっていれば、まだ地球の限界を超えていないという判定。窒素が限界を超えていることは有名だが、これが何を意味しているかが伝わっていない。原典を読むと、沿岸域海(陸域に接している海)が富栄養化しないために人間がどれだけ窒素を使っているのかということ、地球スケールのモデルで計算し、その結果、人類は許容量の二倍以上窒素を使っているから限界を超えているという判定。リンに対してもほぼ同じ判定をしている。窒素化合物は温室効果ガスでもあるし、成層圏オゾンも壊すし、PM2.5にも入っている。土地利用が変われば窒素の状態も変わる。窒素が増えすぎたり、あまりにも少なくなると、生態系の機能、あるいは生物多様性にも影響があるということで、窒素はいずれにも関与している。この点も考慮すると、窒素はプラネタリー・バウンダリーをもっと大きく逸脱しているのかもしれない。

次の図は非常に乱暴な図になるが、地球だと思ってほしい。地球の農地・草地一家畜がいて、人間に食料が届いている。数字はテラグラムなので、100というのは1億トンの窒素ということになる。富裕な国の農業では作物生産、家畜生産のいずれも環境にたくさんの窒素を漏らしている。一方、作物生産に関しては、貧困な国、典型的にはサハラ砂漠以南のアフリカの国々(南ア



リカ共和国だけ豊かなので除く)では、人口が多いが、経済的に貧しくて肥料が買えない。人口を養うために土壌が蓄えている有機物を削りながら（地力収奪しながら）農業をやっている。長い目では土壌が劣化して大変なことになるが、現状はそれに歯止めがかかっていない。こういった別の問題もある。



図の下の数字は窒素利用効率 (NUE) で、100 の窒素を入れたら、どれだけ作物と家畜に行くかを示している。43%が作物として人に回るという意味で、家畜の方は 100 入れて 6 だけ人に届く畜産物になっている。残っている一部分はリサイクルされているが、リサイクルされなければ完全に漏れてしまう。食料システム全体、人に届く食料全体については、フローのいちばん上流で入れている数値で割ると 14%。これは 我々がタンパク源として作物を食べるのか、家畜たちを食べるのかによって数値が変わってくる。畜産物を好めば好むほど、この数字が下がっていく。人間は経済成長すると肉類の消費が増える。例外はインドだけで、それはおそらく宗教の縛りがあるからだろう。

もう一つの問題は、年間 32,000,000 トン窒素の食糧が我々の所に届くが、我々はこの 1/3 を食べずに捨てている。捨てたものは無駄になるが、捨てられてしまうものを生産する過程（フローの上流）でも生産して捨ててしまっている。捨ててしまうものは本来生産しなくてよかったものなので、大きな無駄になってしまっている。言い換えると、食品ロスを減らすだけでフローの上流も含めた窒素の利用効率の改善が図れるわけである。

#### 食料システムの課題 (1)

##### 作物生産の窒素利用効率が低い

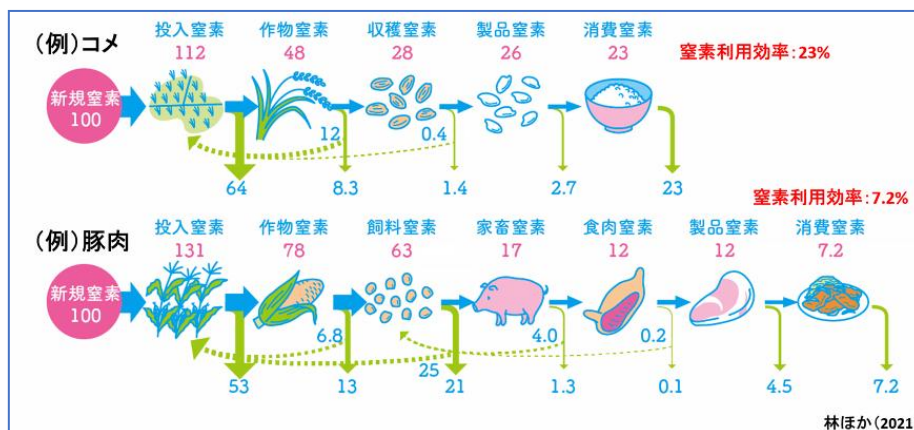
窒素利用効率 (NUE)

- ここでの定義：農地への投入（＝化学肥料+有機肥料+窒素固定+窒素沈着）に対して作物が吸収する割合
- 1961～80年：68%→45%、化学肥料の消費増に伴って低下
- その後30年：平均47%で横ばい（＝投入量の約半分が未回収）

## 食料システムの課題（2）

家畜生産の窒素利用効率はさらに低い

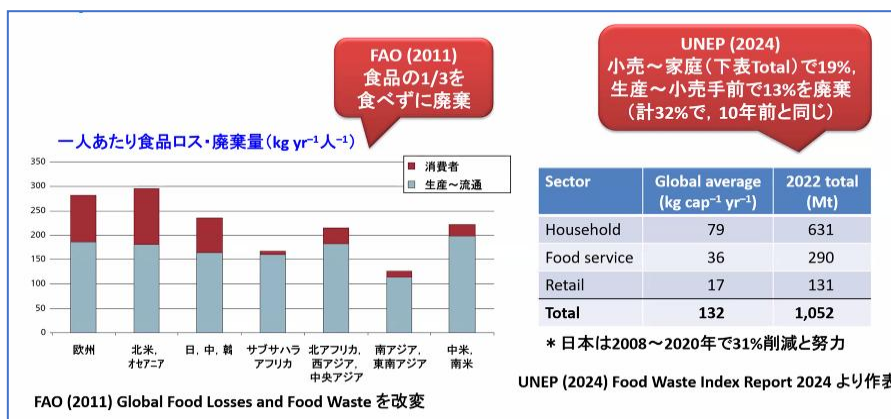
下図は日本のコメと豚の生産の例。



人の口に入るところまでの窒素利用効率は、コメの場合は23%だが、豚肉の場合は効率7%くらい。つまり93%が無駄になってしまっている。

## 食料システムの課題（3）

約1/3の食品を食べずに捨てる（食品ロス）



左図は10年以上前のFAOのレポートから持ってきたもので、食品の1/3を人は食べずに捨てている(グラフ赤部分)。右図は国連環境計画の昨年のレポート。小売りから食堂や家庭、つまり我々の日々の活動下のトータルでは食品の19%を捨てており、一方、生産してから小売りに至るまでの間では13%捨てている、と書かれている。合計すると32%で、およそ1/3と、10年前とほとんど変わっていない。我々は相変わらず食品を捨て続けているが、一ついい話は、日本は2008年から2020年で31%削減と、このレポートで褒められていた。2位のイギリスが18%とかだったので、世界に比べて、日本はやると決めたらすごいんだと改めて思ったが、それでも結構捨てている。

## 将来の窒素フロー激変の可能性

### 脱炭素化→アンモニアの燃料用途

今、日本政府としてはアンモニアを燃料にしたいとしている。現在、日本が使っている量が年間百万トン窒素くらい。結構な量を燃やそうという数値を経産省が持っていて、2050年の目標値は2500万トン窒素で、それは新たに上乗せする数字なので、100万トンくらい使っていた国がプ

ラス 2500 万トンの窒素を使うようになる。しかもそれが全部燃料ということ。これは、世界のアンモニア生産量（2015 年）の 18%相当。それを日本一国で調達して燃やすって本当にできるのかという疑問がある。

経済面では、そもそも手に入るのかに加えて、他の肥料や産業用途との競合も懸念される。また、燃やすと、燃やし方によっては窒素酸化物が出たりする。このあたりをきちんと解決しないと、燃料利用は将来世代に不利益になるという話を環境省などにしているし、関係機関もその懸念については情報共有はできている。

#### 4. 日本はどうか

##### 窒素メタボになりやすい国

##### 大量の反応性窒素が流入する構図

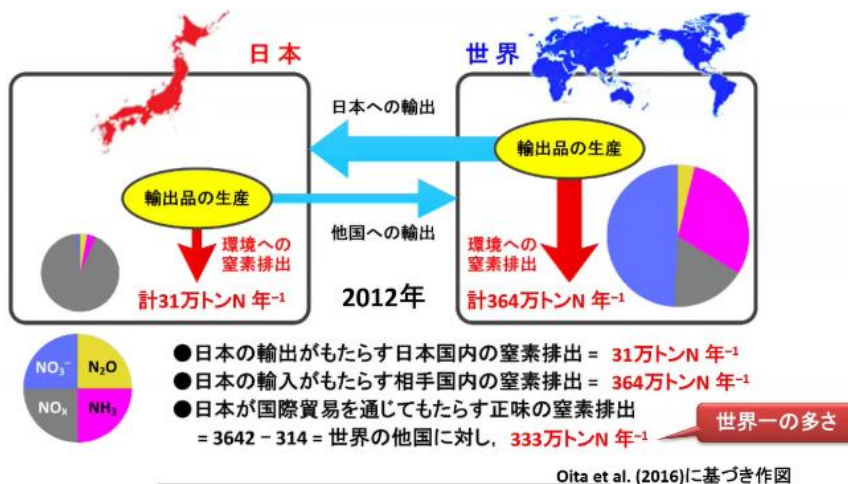
日本は 1 億 2409 万人の人口なので、排出の総量として大きい。人口密度が高い、家畜が集約的に飼われている場所もあり、そういった場所では窒素排出量が空間的に集中する。また、食料自給率が低いので、食料・飼料の大部分を外から持ってくる。排出する窒素を国内で再利用しようと思っても、国内で使える場所が限られているので、どうしてもだぶつきやすい。一方、食料・飼料をみんな国産にすればいいのではないかと、輸入しているものを生産する時の窒素排出は相手国が背負ってくれたのが、自国での窒素排出が増える。それをうまく解決できるような技術やルールをセットにして組み入れる必要がある。

また、日本の食生活も大きく変わり、肉類は 1965 年頃の一人当たり年間 9 キロの消費量が 2022 年には 34 キロになった。畜産物志向が日本に定着したと言える。

そして食品ロス。先ほど、日本は減らしていると褒められたという話をしたが、年間 640 万トン（2012 年）捨てていたものを 470 万トン（2022 年）まで減らしている。この努力は評価されるが、一方で、コメの生産量が 700 万トン（2022 年）スケールなので、（捨てているものと生産量の）オーダーは同じ。また、WFP の食糧援助は 480 万トン（2022 年）なので、こちらもほとんど同じオーダー。日本一国でこれだけまだ食べられるものを捨てている、本当にもったいないということが言える。

##### 国際貿易に伴う窒素排出

世界が日本の窒素排出を肩代わり = 日本の窒素汚染を緩和

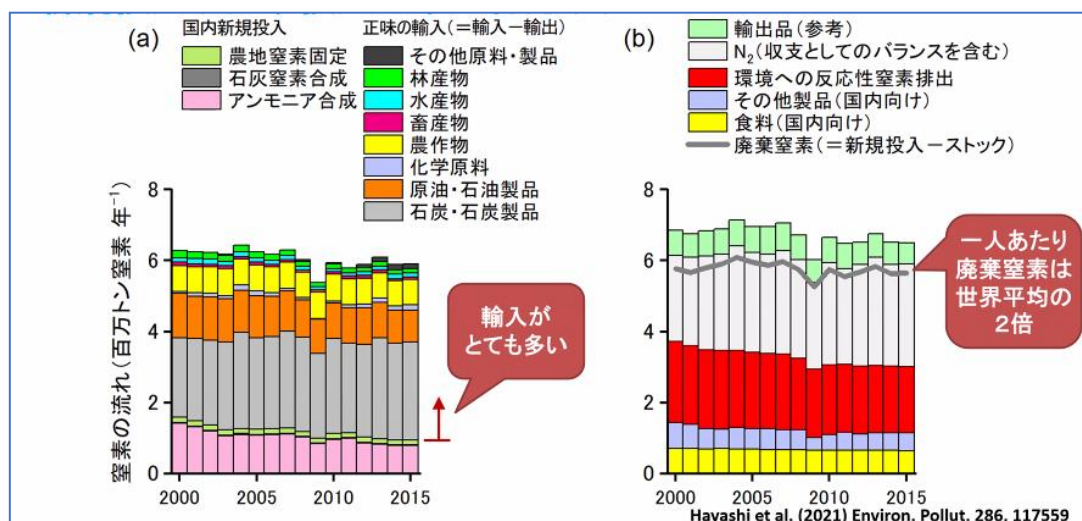




上図から、日本は、他の国々に対して年間 330 万トンの窒素排出を背負わせていると言える。この量は世界一の多さであり、2位のドイツはこの半分くらい。

## 日本の窒素収支全体

### 新規投入(a)と、投入窒素の行方(b)

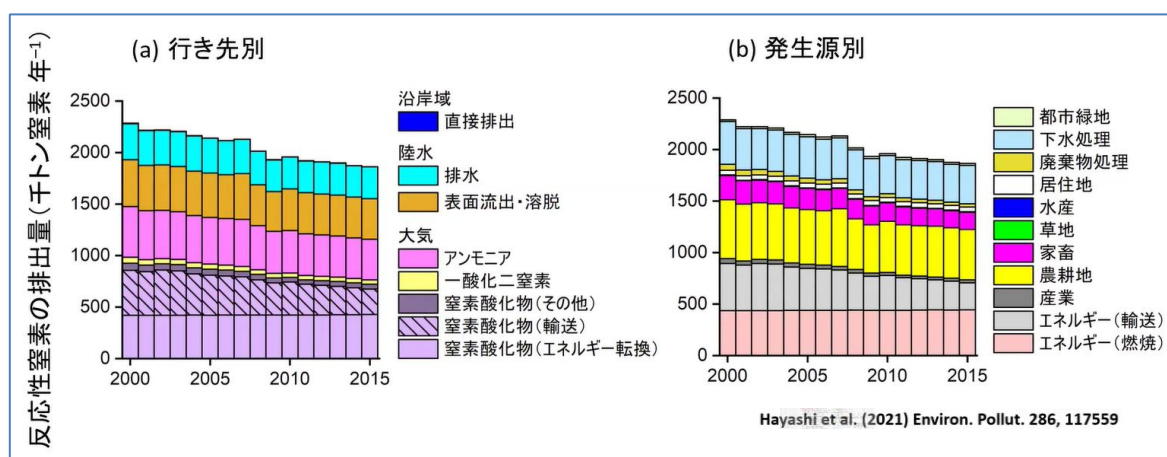


左側のグラフは、毎年日本に新しく入ってくる窒素の量 (2000年～2015年の推定値)。淡い緑から下が国産で、その上の部分が正味の輸入でとても多い。年間日本にはおよそ 600 万トンの窒素が入ってくる。落ち込んでいるのはリーマンショックの 2009 年で輸入が減った。石炭・石油・原油で入ってくる窒素が意外と多い。作物で入ってくるのは、食料向けと飼料向けの両方。

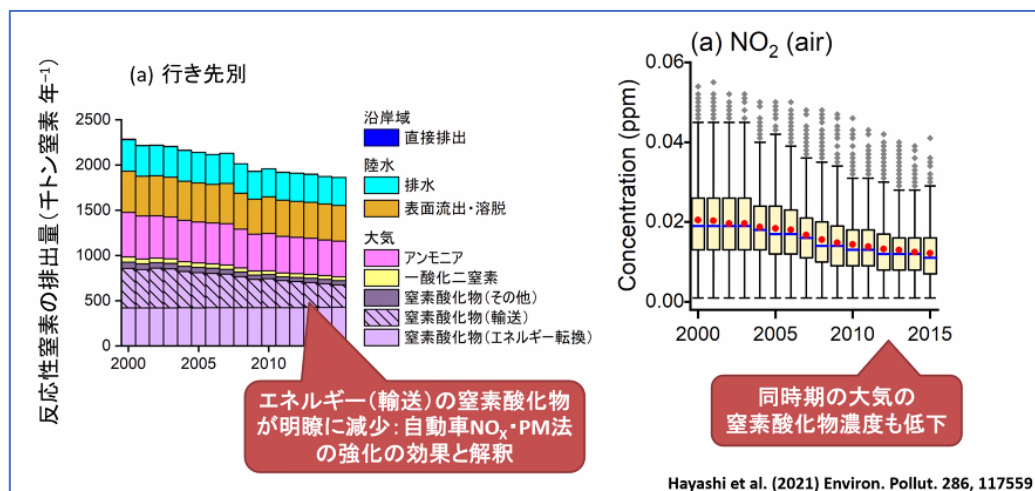
右側のグラフは入ってきた窒素がどこにどれだけいったかを示すグラフである。黄色が食品になるもの、淡い紫が何らかの製品になっているもの、赤色が反応性窒素で環境に排出されたもの。例えば、このおおよそ 600 万トンという窒素を人口で割ると、世界平均で出した数値のおよそ二倍。日本人は世界で比べてもたくさんの窒素を使っていると言える。そして、環境にだす窒素の量が大体 1/3 になっているので、排出は結構押さえているという言い方もできる。この内訳は次のグラフ。

## 日本の窒素収支：環境への反応性窒素排出

### 行き先別(a)と発生源別(b)



図(a)と図(b)は同じデータで、図 a は出たものが大気に行ったのか、水に行ったのかという行き先別と、図 b はそれがどこから出たのか—エネルギーセクターなのか、農業なのか、その他ののか—ということを示している。

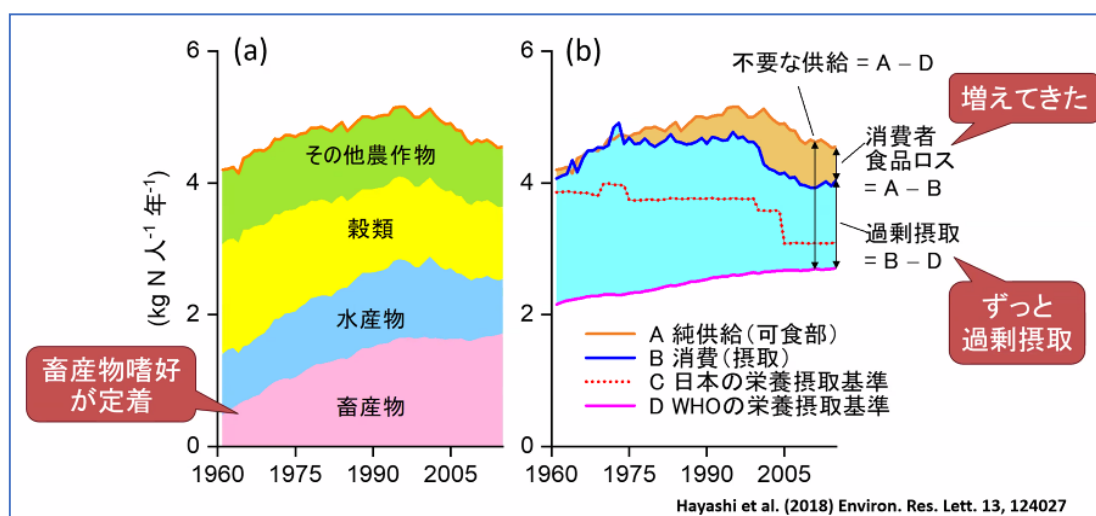


左側のグラフで総排出量が減ってきているのは、削減努力が実を結んでいるという言い方ができる。特に何が効いているかという、斜線をかけている大気中に排出される輸送部門の窒素酸化物、つまり自動車の窒素酸化物。この時期に環境省が自動車 NO<sub>x</sub>・PM 法という大気汚染に関する法律を強化した。それが統計ベースでもきちんと減る形で現れている。

右は、二酸化窒素という窒素酸化物をずっとモニタリングしている全国の観測データ。それを見ると、黄色のバー内の赤丸が平均値で青線が中央値だが、2000年から2015年にかけて、きれいに減ってきている。統計ベースで減ったのではないかとこの数値が観測ベースでちゃんと減っていることが確認できた。これは環境行政がどのぐらいうまくいったかを評価できる貴重な事例だと思っている。

### 日本の食料供給と消費：1961年～2015年

一人当たり平均の準供給量(左)と、消費量(右)



日本の食料供給(a)についてみると、1961年～2015年の平均量として、畜産物の供給量が増えていったが、90年代半ばで安定化している。日本人の特徴としては、水産物は変わらず好きとい

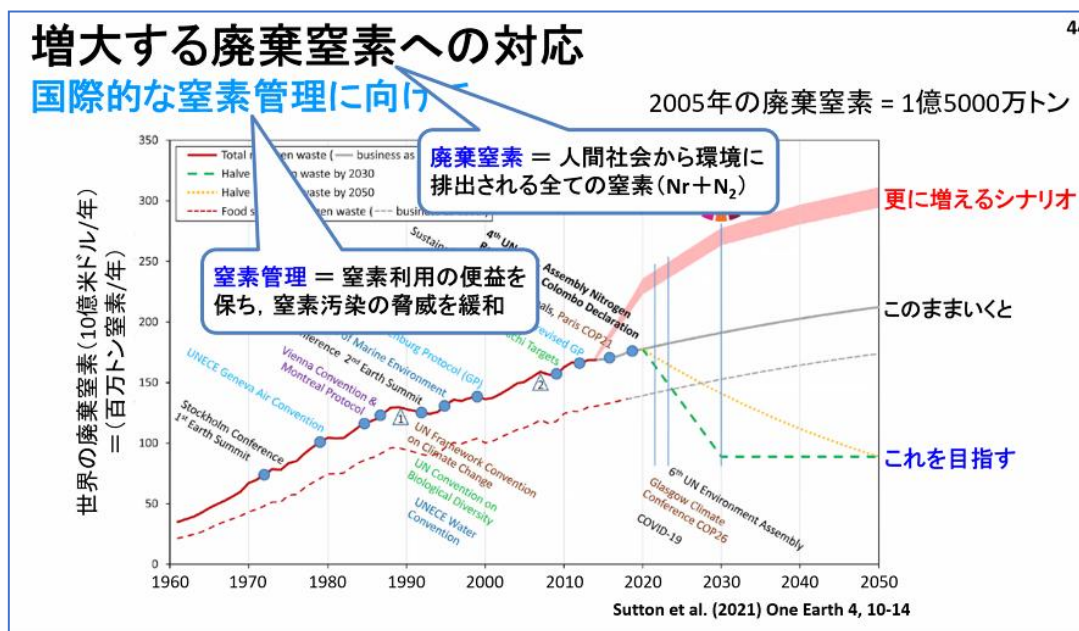
うことがいえる。

一方、右側(b)のオレンジ色の線 (A) は供給された食料の量で、青色線 (B) が食べたとみなされる量。次第に差ができてきているのがわかる。この差が消費者レベルの食品ロスと推定される。ピンク色線 (D) は WHO のタンパク摂取基準 (体重1キログラムあたりいくらかという数字) で、これがじわじわ増えているのは、日本人の平均体重が増えていると読み取れる。日本人はタンパク質をしっかりと食べてきた。赤色の破線 (C) が厚労省のタンパク摂取基準で、かなり高く設置していたのを最近では WHO にすり寄せてきている。ともあれ、タンパク質に関しては、日本人はむしろ過剰摂取だったという言い方ができる。

## 5. 窒素管理に向けて

廃棄窒素というのは、人間社会から環境に出ていく窒素のすべてであり、反応性ではない  $N_2$  も含めて考慮する。なぜ、反応性のない  $N_2$  も含めるかということ、ハーバー・ボッシュ法でエネルギー資源を使って  $N_2$  から反応性窒素を作った。それをさらにコストをかけて、また  $N_2$  に戻すのはもったいないという発想からきている。

窒素管理という言葉は、窒素利用の便益を保ちながら、窒素汚染を緩和しようといった色々なアプローチのマネジメントをまとめて窒素管理と呼んでいる。



## 国際的な窒素管理に関する主な機関・プロジェクトなど

\* 窒素管理・窒素利用の便益を担保しつつ、窒素汚染の脅威を削減

国際専門家グループ：国際窒素イニシアティブ <https://initrogenm.org/>

- ・主旨：持続可能な食料生産における窒素の利便性の最適化と、食料・エネルギー生産に由来する窒素負荷が人間健康や環境に及ぼす負の影響の最小化の両立
- ・主な活動：国際プロジェクトの立案 (例：INMS プロジェクト)、国際機関の活動支援 (例：UNEP)、国際窒素会議の主催 (原則3年ごと)、最近ではウェブナーシリーズも実施



- ・組織（2025年1月現在）：代表（アメリカ）；地域センター群・東アジア（代表：日本 [林]、副代表：中国）、南アジア（パキスタン、インド）、欧州（スペイン）、北米（アメリカ）、中南米（コスタリカ）、オセアニア（オーストラリア）、アフリカ（ナイジェリア、チュニジア）

### 国際窒素会議（INI 主催）

- ・1998年より3年ごとに開催：COVID-19の影響でずれが生じた
- ・話題は多様：農業、産業、社会、経済、政策、自然生態系、分野融合の取り組み
- ・第1回：オランダ（1998）、第2回：アメリカ（2001）、第3回：中国（2004）、第4回：ブラジル（2007）、第5回：インド（2010）、第6回：ウガンダ（2013）、第7回：オーストラリア（2016）、第8回：ドイツ（コロナ延期→オンライン 2021）、第9回：インド（2024）、第10回：日本（京都 2026）

### 国際機関：国連環境計画（UNEP）

- ・国連環境総会（UNEA:United Nations Environment Assembly）主催：原則隔年  
→UNEA-4(2019)とUNEA-5（2022）で「持続可能な窒素管理決議」が採択  
→次回のUNEA-7（2025年12月8～12日予定）で三度目の決議はどうなるか？
- ・栄養塩類の管理に関するグローバル・パートナーシップ（GPNM:Global Partnership on Nutrient Management）：2009年設立、窒素・リン・カリウムをターゲット  
→政府機関・専門家・民間企業・NPOsなどが参画、UNEPは事務局を担当  
→新体制の共同議長の一人は日本の環境省より、林は運営委員として参画
- ・UNEP 窒素作業部会（WGN:Working Group on Nitrogen）：2020年発足  
→UNEA-4の1回目の窒素管理決議を受けて発足  
→政府機関が当該国窓口（national focal point）として参画、UNEPは事務局を担当  
→これまで6回の会合を実施、日本は2022年から参画（環境省を中心に）  
→窒素管理に関する国家行動計画の策定を推奨→日本は策定済み

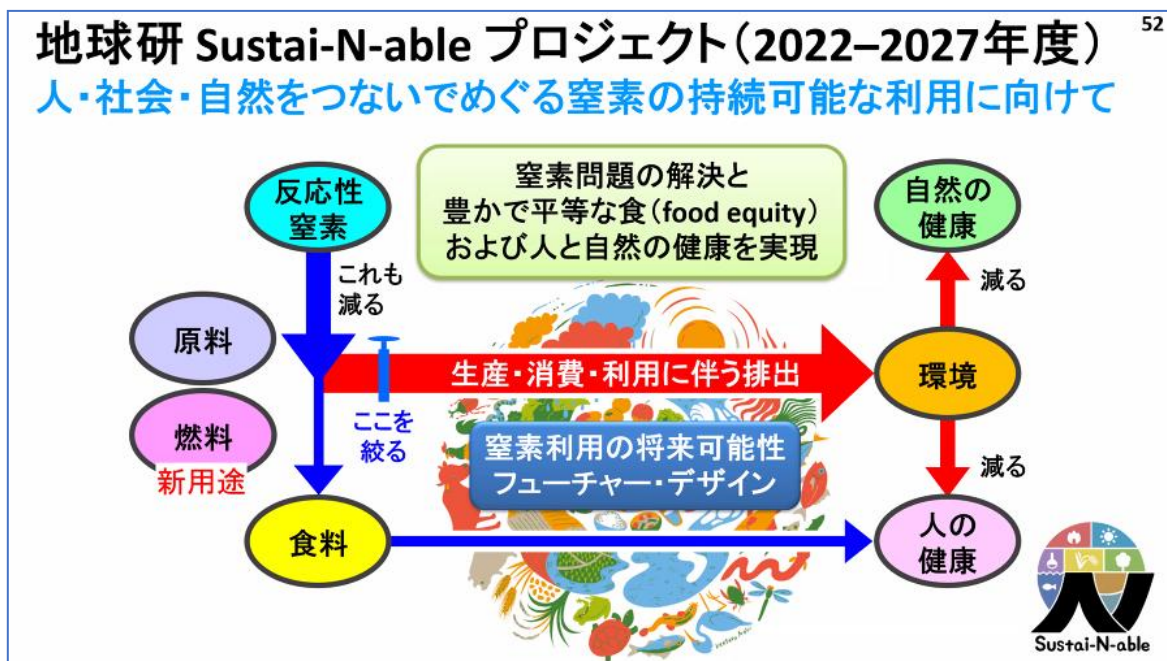
### 日本の動向

#### 環境省とその省庁連絡会—他省庁の政策とも連携を

- ・環境省：環境保全面（[https://www.env.go.jp/press/press\\_03772.html](https://www.env.go.jp/press/press_03772.html)）  
→「持続可能な窒素管理に関する行動計画」（2024年9月）：省庁連絡会（環境省、農林水産省、経済産業省、国土交通省）、WGNの推奨に応じて世界初  
→UNEP 窒素作業部会：窓口機関として参画（農林水産省も会議に参加）  
→栄養塩類の管理に関するグローバル・パートナーシップ：共同議長選出
- ・農林水産省：食料安全保障面  
→みどりの食料システム戦略：減肥と有機農業拡大は窒素管理にも貢献  
→食料・農業・農村政策審議会：持続可能な食料生産・消費の在り様のデザインにも

地球研 Sustai-N-able プロジェクトでは、豊かな食を保ちながら、窒素の汚染を緩和する方策をどうしたらよいか、ということに取り組んでいる。そういったものを実現するためのいろいろな知恵を作っていこうということで、自分自身は自然科学の人間だが、人文社会関係の人達に

も入ってもらったり、実際の農家とか、プロの料理人とか、食文化の専門家とか、多様な人に入  
 っただいたっている。



## 6. 関連情報

### ・第10回国際窒素会議 (N2026)

日程：2026年11月2日(月)～6日(金)

会場：国立京都国際会館 日本初開催

参加者：国内外の専門家、政策関係者、民間企業、生産者、教育者、ユース他、多様なステークホルダーが幅広く集まる場に

プログラム(作成中)：研究発表セッションに加え、市民公開シンポジウム、ユース向けプログラム、マルチステークホルダーラウンドテーブルなどを想定

### ・窒素問題と SusN の概要を伝えるリーフレット

<https://www.chikyu.ac.jp/Sustain-N-able/index.html>

[https://www.chikyu.ac.jp/Sustain-N-able/documents/SusN\\_brochure.pdf](https://www.chikyu.ac.jp/Sustain-N-able/documents/SusN_brochure.pdf)

### ・地球研ニュース No. 89 の記事

<https://www.chikyu.ac.jp/rihn/publicity/detail/351>

### ・「図説 窒素と環境の科学」朝倉書店 林・柴田・梅澤編 B5判 192ページ

### ・おもしろくて読みやすい本の紹介

「食欲人」 ローベンハイマー&シンプソン サンマーク出版

「大気を変える錬金術 ハーバー・ボッシュ法と化学の世紀：トーマス・ヘイガー(みすず書房)

## 本日の話題のまとめ

- ・ **窒素問題**：我々の窒素利用が窒素汚染を伴うトレードオフ
- ・ **窒素の便益**：化学肥料、工業原料、エネルギー資源
- ・ **窒素の脅威**：環境への反応性窒素排出による多様なインパクト
- ・ **なぜ起こるか**：人間社会の窒素利用効率が低く無駄が多い
- ・ **どう解決に導く**：技術・政策・行動変容を伴う窒素管理
- ・ **大切なこと**：窒素問題と日々の暮らし深いかかわりへの気付きの促進
- ・ **今後のアプローチ**：窒素問題の因果関係の解明、窒素フットプリントなどの可視化ツール開発、窒素問題の認識浸透、国内外で始まった窒素管理を支援しつつ持続可能な窒素利用の設計、N2026 を国内外のアクション強化に向けた重要な機会に

### 【質疑応答・意見交換】（林先生敬称略）

参加者：瀬戸内海の海が貧栄養になっているという話で、ヒステリシスという言葉が出てきたが、もう少し説明をしてほしい。

林：ヒステリシスは専門用語で、現在の生態系の状態は過去の状態に引っ張られているという意味。かつての富栄養状態から水質だけ改善して水はきれいになったが魚もいないみたいな状態、貧栄養化と呼んでいる。例えば、瀬戸内海で起きている問題としてはノリの養殖など。伊勢志摩などでも起きていると聞いている。カキやアサリの養殖をしても、水がきれいになりすぎて栄養が足りないから夏場過ぎてからの卵をつくるための栄養不足になって死ぬとのこと。

参加者：報道では、瀬戸内海の水がきれいになりすぎたから、逆に少し汚いものを流していくという対策がとられているような話を聞き、えっと思った。

林：栄養が足りないといわれる冬の時期に実施していると国交省の資料にある。全国50か所くらいの下水处理場でも、そういった緩和運転をやっているとレポートには書かれている。その結果、どれくらいの効果があるのかはこれから調べないと分からない状況。もう少し実験的に、例えば負荷量を増やして本当にバイオマスが戻るのかを小さいスケールでやってから実施した方がよいかなどは思う。

参加者：瀬戸内海のノリの養殖の話でいうと、ヒステリシスの存在で元の生態は戻らないのに、そこで窒素を増やしてしまうと、どこに向けて窒素を調整しているのか？理解が追いついていない。

林：ヒステリシスは、あくまで人が介入しない自然生態系の中での生物の増減、結果という話。下水の運転緩和に関しては、養殖側のニーズが大きい。海苔では種（たね）になるものを付着させて海に吊るし、海苔が育つのを待つようなやり方をするので、種になるものは人が入れる。それが吸収できる栄養を供給したいということで、下水の運転緩和をやっているのだと思う。カキにしても、海苔にしても大事な特徴は、いわゆる一次生産者に近い所にいる。カキの場合は消費者なので、先ずプランクトンが増えてくれる必要がある。栄養濃度が上がればその栄養濃度を好むプランクトンは増える可能性があるので、何かしらの効果はあると思う。愛知県ではアサリの養殖も結構盛んだと思うが、アサリもカキもかなり浄化能力が高い貝なので、上手く活用できればいいだろうとは思っている。



参加者：つまり、人間のはたらきがベースにあってのことなのか。

林：そうです。残念ながら、人間の影響が存在しない沿岸域は、日本にはもはや存在していない。

人の営みをやめることはできないのが現状なので、その中でどうやってなるべく元の生態系を取り戻せるのかという一種の挑戦をしているのかなと思う。完全にあてはまるかはわからないが、里山になぞらえて、里海という言葉もある。人の管理が入って、何かしら安定している生態系みたいなものを海に求めてもいいのかもしれない。

参加者：「生物基礎」では、日本における生態系の保全がメインに出てきていて、その中には、環境省の資料などにある自然に対する働きかけの現象、いわゆる里山生態系を守ろうというような話も出てくる。一方、高学年用「生物」では世界の生態系の保全が中心になってくる。ここでは、里山や里海のような話はあまり見ないと思う。日本と世界でギャップがあるように感じるがそのあたりはどうか？

林：そう思う。世界でもいろいろ違いがあると思っていて、我々が今、日本で学んでいる自然科学もそうだが、要は西洋的な自然観に基づく。自然は荒ぶる存在であって、人がコントロールすべきみたいなどころからきているのでコントロールしたがる。ただ、世界は結構多様であり、特にアジアなどは多様なので、場合によっては日本に近い自然観を持っている国々もあると思う。ただ、昨今は輸出してお金を儲けるということをやっているケースがかなりある。それで結局破壊が起きていて、元々持っていた日本の里山的な自然観が失われてきているのかもしれない。

一方、ケースとしては少ないが、イギリスのかたが地球研の教員となって、里山のコンセプトを広げたいというプロジェクトをやっている。この中では、世界あちこちにも里山的な人の手が入ることで維持されている自然があって、それが本来の自然と人が住んでいる場所との良い意味でのバッファになっている、という概念がある。世界も多様なんだということを感じている。

司会：現在の学習指導要領では、窒素の話は高学年用「生物」にしか出てこないが、今日の話はどう授業でいかせばよいだろうか？

参加者：「生物基礎」の授業の中で、例えば、川での水質浄化の話で窒素を出したり、遷移のところで、パイオニア植物のオオバヤシヤブシは窒素固定ができるという話ができる。窒素を抜きにして生態系は語れないと思っている。光合成と呼吸だけだと、CHOの話だけになる。タンパク質や核酸の話をする為にも窒素はすごく大事だと思っているので、「生物基礎」でも窒素の話を少しずつ入れるようにしている。

司会：「生物基礎」で意識的に窒素にこのように触れているとか、今日話を聞いて、こういう所で話したいとかあればコメントを。

林：生態系内の窒素循環の図を見せると、窒素循環はややこしいということは伝わると思う。ストーリーを持った話の一環として窒素の話も混ぜ込んで行くのが一番いいアプローチかと思う。個別に分けて話すと、生徒は個別に覚えていたとしても、個別の話が頭の中で繋がらないと思う。ストーリー的なものがあるって、その中には炭素も窒素も入っていて、みんな繋がっているといったことが伝わればいいのかと思う。例えば、「稲を育てる時に何が起きているか？」など。田植え→苗が大きくなるために光合成→光合成だけだと炭素しか入らないから、根から窒

素やリンを吸っている→実る→とれたお米が人の口に入る、など。理科では農業的な切り口では教えていないかもしれないが。

参加者：農業に関しては、中学に技術家庭科があり、多分、そこでは肥料のことなども学んでいるのかと思う。生徒がなかなか自分事として窒素の問題をとらえられないと思っており、 $N_2O$ に関しては、これも地球温暖化に関係しているんだよといえど通じると思う。自分事と思いなことかというと、オーガニック・有機農業とかは普段耳にすると思う。しかし、有機農業がなぜよいのかはイメージで思っている気がする。そこに、窒素の循環的にいいからだということ、日常家庭で聞いているワードと習っている窒素循環が結びついていいかなと思う。

参加者：有機農業はこうだからいいよという何か説明はあるか？

林：9頁の図では、農地・草地に肥料を入れ、ただ漏れているかのようにになっているが、実際にはリサイクルもできている。最近の有機農業では家畜の排泄物を堆肥にして戻していることもある。家畜から出る窒素排出量を減らすことができるのと、農地に入ってくる肥料も減らせている。合計287の窒素がほしい所に、有機肥料（堆肥）として57入れているから、それ以外（化学肥料など）が230で済んでいるという言い方もできる。ただ、有機農業だから環境にいいとは限らない。有機肥料でも化学肥料でも与え方を間違えると環境に漏れてしまうので、適正量を適正な時に適正な方法で入れなさいということは有機肥料にも当てはまる。

司会：今日見せてもらったような図を生徒に示して自ら考えさせるような授業ができればよいが、時間がとれないという現実があると思う。

林：京都の小学校4年生たちが環境に関する話を聞いたテーマから、自分たちで新聞をつくる取り組みをしていた。小学生の時にやってもらいたいと思う。

司会：授業の中で、何か種を播いておき、総合的な探究の時間に、生徒それぞれが課題を見つけて取り組むようなこともやってほしいと思っている。プラネタリー・バウンダリーの図を見た時、多様性の喪失や窒素問題が非常に大きな問題なのに、温暖化だけがクローズアップされていていいのかと思った。この図を「生物基礎」の中でちょっと見せておく。そして、総合的な探究の時間に、生徒たちが取り上げて調べるといった活動をしてほしいという思いがある。「生物基礎」中に何か種を仕込んでおいて、それを探究の課題で取り上げるといったことは無理か？

参加者：その通りだと思うが、種をうまく仕込める教師がどれだけいるのかと、それを芽吹かせて育てていくには、実際にいろんな体験を積まないといけないと思う。本校では企業に体験に行ったりする生徒も一部にはいる。今日の話も生物学だけではなく、大きな経済の動きと連動して初めて理解できるような話があると思うので、もう少し教科横断的な側面を育ててやれば、芽吹いてくるかなというのが感想。

司会：教科横断という言葉がキーワードになって色んな取り組みがあると思うがどうか？

参加者：高校では個別のテーマで取り組みさせているので時間がないが、中学では学年を一緒に持っている担任たちと色々な企画ができる時間がある。教科横断の例として、地理の先生と世界の野生動物と人の暮らしについて調べたことをやっている。普段はインターネットか本で調べるしかないが、現地の学校とオンラインでつなぐ団体があり、今回、インドネシアのバリ島の学校とスリランカの学校とどんな生き物がいるかなど情報交換をした。

司会：高校でできる窒素循環に関する実験があれば教えてほしいという問いがあった。実験に関

するアイデアは？

林：循環になっている一個のプロセスを取り出して、それを実験することはできると思う。硝化というプロセスは、アンモニアを亜硝酸から硝酸に持って行くプロセスであり、試薬で調べることはできる。

司会：循環ではないが、窒素に関しては、根粒細菌の観察などがあると思う。

参加者：実験ではないが、白川郷の床下で、火薬の原料となる硝石をつくっていた話を話題として取り上げている。窒素が循環しているイメージ自体が生徒にはない。窒素が回るイメージがもてなくて、しかも微生物がやっている硝化作用もなかなかイメージがわからないところだと思う。実は日本人は随分古くから硝化作用の現象は知っていて、白川郷の合掌造りの床下で、カイコの糞、ヒトの尿、作物の使わなかった葉っぱなどを混ぜ込んで寝かしておくところに硝石ができ、火薬としての供給源になっていたような話は生徒も興味を持ってくれる。話としては良い教材かと思う。

林：かつてヨーロッパでは硝石プランテーションとして、特にイギリスなどでは大々的にやっていた。日本でもやっていたのはすごく面白い。

参加者：生徒は植物の成長に窒素、リン、カリウムが必要な肥料であることは、小学校や中学校で習ってきて、そこはとても話がつながっている。遷移の初期段階では窒素源を自分で大気窒素からとれるような根粒細菌が共生しているようなものが強いという話をすると、高校で初めてへえ〜ってなるので、小中と高校の生徒をつなぐところで、根粒細菌は入口としておもしろい気がしている。このあたりのトピックはないか？

林：植物は自分でアンモニアとか硝酸をつくることができないので誰かにつくってほしい。パイオニア植物は根に窒素固定できる微生物が住める家と有機物を供給して、その代わりにつくった窒素を分けてくださいという典型的な相利共生として、世界的に通用する話としてよい教材だと思う。根粒の観察で面白いと思っているのは、根粒は劣化する。最初に植物は根粒を用意してくれるが、栄養が詰まっている場所なので、外にいる微生物が常にアタックする。どこかの段階で老化すると、人間でいう皮膚みたいなものが破られて、別の雑菌が入ってきて、根粒が壊滅して、見た目にはどろっと溶ける。根粒が生まれて死んでまた土に還るまでみたいなストーリーがあってもよいかも知れない。日本のマメ科植物は基本的に一年草なので一年経ったら植物体もなくなってしまう。樹木になるものでは常に新しく作っているのだと思う。

参加者：パイオニアと共生というと地衣類がある。地衣のシアノバクテリアは、窒素供給の役割もしているのか？

林：シアノバクテリアは窒素固定能を持っている。共生している真菌の方が窒素を分けてもらっている。菌の方は強い酸を出せるので、それで張り付いている岩石などを溶かして、他のミネラルを吸って供給する。地衣類があるおかげで北極圏の生態系のかなりな部分が回っていると思う。トナカイも大型地衣類を食べる。パイオニアとして大切な役割をしていると思う。いろいろな植物が入ってくると、地衣は追い払われる。

司会：シアノバクテリアの話があったが、「生物基礎」の原核生物の話でイシクラゲが出てくる。その時に、窒素固定をする細胞に触れることも可能ではないかと思う。

林：ほしい栄養をどうやって手に入れているのか？水は？炭素は？窒素は？という問いを出し、

生徒になぜ窒素なのかと言われたら、体の中で必要なタンパク質が窒素でできているというような話に持って行くことができるのではないか。生き物を見ながら話すのはいいことと思う。ビジュアルの情報と聞いている情報と、できれば、それらを手を使ってメモを書くと最高かなと。

司会：プラネタリー・バウンダリーの図（8頁）で、測定の仕方が違うものを一つの図にして比べることが妥当なのかという疑問がある。

林：それぞれについては、何らかの判断基準に対して何倍か超えているという評価をし、それを並べている。安全な段階を何倍超えているかを横並びにして相対的に見せ、本当に大変だよねというのを見せるための図である。問題どうしの重要性とはまた別個である。

参加者：プラネタリー・バウンダリーの図の見方として、緑で一周揃っている所がいわゆるセーフオペレーティングスペースの基準値となるところで、この基準値の何倍かがこのレーダーチャートに出ている所だと思う。一方で、どこからがハイリスクゾーンでもう戻れないかっていうのは紫色になるところが切り替わり。このゾーンは揃っていないで、窒素などはハイリスクゾーンがものすごく低い位置に来ていたり、Radiative forcing（放射強制力）もものすごく低い位置に来ている。どちらを重視して生徒に見させたらよいか難しい。

林：どちらも同じくらい大事だと伝えられるかどうか。判断基準の設定の数値はエビデンススペースで計算するのだろうが、設定自体が少し恣意的な所もあるかもしれない。何でもって評価するかということは自由度が結構高い。窒素に関しても沿岸域の富栄養化という話でやっているが、人への健康影響がバウンダリーになっていた可能性もある。