

窒素の環境問題 —化学肥料がもたらす恩恵と脅威—

館野 隆之輔 (フィールド科学教育研究センター 教授)



フィールド科学教育研究センターの館野と申します。今日は、よろしくお願ひいたします。

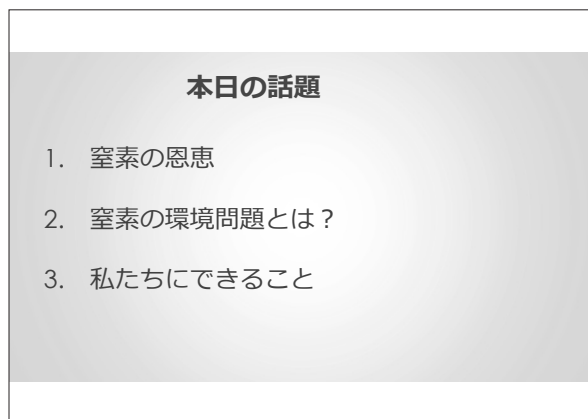
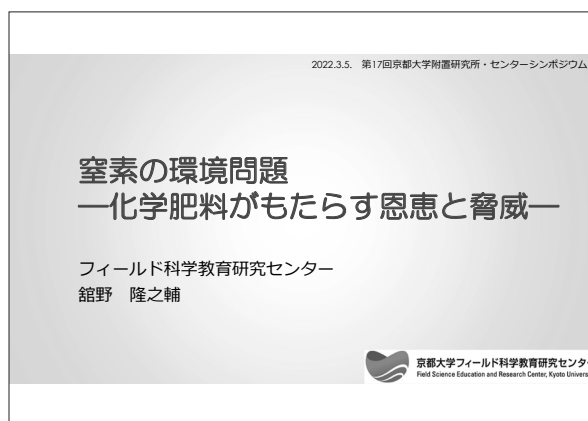
まず、簡単に自己紹介させていただきます。私は、フィールド科学教育研究センターというところにいまして、京大が北海道から近畿地方に森林、あるいは海の施設を持っておりまして、そこでフィールドの実習とかフィールド研究をやっているんですが、そのセンターから来ました。

専門は、森林生態学とか、生態系生態学と呼ばれる分野で、研究テーマは、主に窒素を対象とした物質循環の研究を行なっています。

今日は、窒素の環境問題というお話なんですけども、大きく3つのお話をしていきたいと思います。まずは、窒素が我々にもたらしてくれる恩恵についてです。窒素の話なんですけど、まず我々人間や生物にとって、窒素というのはどういう物質なのか、簡単にご説明したいと思います。

窒素は、アミノ酸とかタンパク質の原料となっていて、我々の身体の約16%がタンパク質なんですけど、そのうち窒素は人体の3%ぐらいだと言われてます。多くの生き物にとって不可欠な物質なんですけども、一方で毒にもなってしまうので、体にためておくことができないんです。そうすると、必要だけとためられないので、いつも食べたりすることによって吸収し続ける必要がある物質になります。

それ以外にも、私たちの生活には、いろいろなところに窒素が使われていて、今日のテー



マで肥料、あるいは火薬の原料にもなります。それ以外にも、樹脂や、化学繊維にも入っていますし、燃料としては、水素の燃料が着目されていますけれども、それと並んでアンモニアを燃料にしようというかたちで、未来の燃料としても期待されています。

大気中の約80%が窒素ですが、この窒素分子の状態にあります。この窒素分子は非常に安定な物質なので、害にならない反面、我々生物が簡単に使うことはできません。我々が使うことができる窒素が、反応性窒素と呼ばれるもので、このようにいろいろな物質があるんですが、気体、液体、固体、さまざまなものがあります。

自然条件だと、大気中の安定な窒素はなかなかこういうものにならないんですけども、例えば細菌が窒素固定をして、窒素分子をアンモニアにしたり、あるいは、大気中で雷が鳴って窒素が酸化されて窒素酸化物になる。そういうような過程を経て、反応性窒素と呼ばれるものになります。

自然界だとなかなか作り出すことが難しい反応性窒素なんですけども、今からちょうど100年ぐらい前に、それを化学的に作る方法が発明されました。それがハーバー・ボッシュ法と呼ばれる方法で、理科の教科書にはハーバー・ボッシュ法が必ずと言っていいほど出てくるんですけども、この技術は空気中の窒素をアンモニアに変える発明で、水と石炭と空気からパンを作る方法と言われています。

このハーバー、ボッシュは、それぞれこの反応を考えたことと、大量生産できるようにしたということで、ノーベル化学賞を受賞しておられます。

窒素の恩恵のお話をする前に、まず、生態

本日の話題

1. 窒素の恩恵
 - 窒素の環境問題とは？
 - 私たちにできること

生物にとっての窒素

- 生物にとって必須な元素
- アミノ酸やたんぱく質の原料
- 人体の約3%は窒素
- 多くの生物の制限要因の一つ
- 毒にもなるので貯められない

不可欠だけど、貯められないので吸収し続ける必要がある

水分	60%
タンパク質	16%
その他脂肪	16%

窒素と私たちの生活

- 肥料
- 火薬
- 樹脂 (ABS樹脂など)
- 化繊 (アクリル繊維など)
- 燃料 (アンモニア)

写真：経産省資源エネルギー庁web page
https://www.enecho.meti.go.jp/about/rap/energy/01/ammn02_01.html

窒素のさまざまな形態

反応性窒素 (Nr) が問題を引き起こす

大気の78%

窒素分子
N₂

安定で非活性
害にならない = 使えない

アンモニア
NH₃

一酸化窒素
NO

二酸化窒素
NO₂

アンモニウム
NH₄⁺

一酸化二窒素
N₂O

気体や液体、固体など形態もさまざま

学の基本なんですけども、ロジスティックモデルと呼ばれるやつで、生物、あるいは我々人間の個体数の増殖を表すようなモデルがあるんですけども、何も制限がないと、生き物は指数関数的に増えるだろうと言われていますが、やがて環境の収容力がいっぱいになってくると増殖が抑えられてきまして、やがて環境収容力で頭打ちになってしまいます。こういうモデルがあるわけです。

18世紀から19世紀にかけて、マルサスさんという人がいて、経済学者で人口論と呼ばれる本で有名な人なんですけど、この人は、人口は指数関数的に増加するんだけど、一方で食料生産は土地の制約のために直線的にしか増加しないということで、人口は増えるんだけど、食料がないということで、人口は制約を受ける、あるいは、限られた食物を多くの人間で分け合うので、豊かさが制約を受けるだろうと予測した人がいます。

ですが、実際には、人口はその後も増え続けています。人類の環境収容力を増やす努力ですけども、一つには農地の面積を増やす。例えば森林を農地に変えろとか、そういう努力が人類の歴史において続けられてきたわけです。

森林は、陸地の約3割を占めておりますけれども、森林には食べ物があまりないので、多くの人を養うことはできません。一方で、耕地面積は陸地の1割ちょっとなんですけども、そこでは食べ物を作ることができます。ですが、作物を収穫すると地力がどんどん悪化していきますので、そこには肥料を足し続ける必要があるんです。

これは、過去200年ぐらいの、農地、穀物生産、あるいは人口のグラフを示していますが、

ハーバー・ボッシュ法

アンモニアの工業的製法

$$N_2 + 3H_2 \rightleftharpoons 2NH_3$$

Fe₃O₄触媒




フリッツ・ハーバー
(Fritz Haber, 1868-1934)



カール・ボッシュ
(Carl Bosch, 1874-1940)

水と石炭と空気からパンをつくる方法

環境収容能力



やがて環境収容力で頭打ちになる

K

ロジスティックモデル

$$\frac{dN}{dt} = (K - N)rN$$


生物数の増殖をあらわすモデル

制限がないと指数関数的に増加する

マルサスの罠

- 人口は幾何級数的に増加
- 一方で、食料生産は土地資源の制約のため、算術級数的にしか増加しない

人口や豊かさが制約を受けるだろう



トマス・ロバート・マルサス (1766~1834年)

↓

実際には人口は増え続けた

環境収容力を増やす努力

- 農地面積の増大
 - 開墾・干拓・灌漑など
 - 森林・草地・荒地を農地に
 - 品種改良
- 面積あたりの生産性の向上
 - 施肥
 - 灌漑
 - 品種改良



マルサスの予想どおり、農地面積はある程度までは増えたんですけど、そこから増えないどころか、頭打ちになってしまいます。

一方で、穀物生産は、それ以降も増えていますし、それに合わせて人口も増え続けています。これはどうしてかということなんですけども、環境収容力、つまり食料の量を増やす努力は、もう一つ面積当たりの生産量を増やす努力でも解決することができます。例えば施肥をしたり、あるいは灌漑を行う、あるいは品種改良を行う。こういった努力があるんですけども、先ほどの図に窒素肥料のところをやってみると、ハーバー・ボッシュ以来、窒素肥料の量がどんどん増えていって、今ちょっと頭打ちになっていきますけども、これを見てやると、人口の増加は、農地面積の増加ではなくて、面積当たりの穀物生産が増えた結果であるということが、見て取れます。

これは、世界の人口の変化と活性窒素の放出量を示しています。ハーバー・ボッシュ法ができるまでは、地球上の活性窒素の量は、生物窒素固定がほとんどだったわけです。ハーバー・ボッシュ法ができてから、人工肥料がどんどん増えていって、同じぐらいのタイミングで、化石燃料の使用もどんどん増えていきます。こういう形で、地球上の活性窒素の総量がどんどん増えてきています。おかげで、人口も増えているわけですけども。

この図は、過去1万2000年ぐらいの世界の人口を示しています。人口はずっと増えてきているんですけども、それに、食料増産に関わるようなイノベーションがいつごろできたかをプロットしています。

例えば農耕牧畜が始まったり、灌漑、あるいは鉄器を使うことで、これまで耕せなかつ

森林は多くの人を養えない



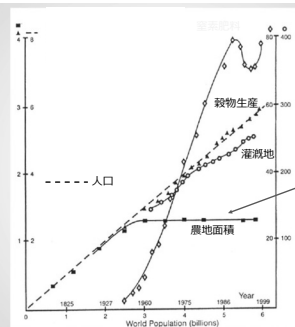
陸地の3割

農地に変える



耕地面積：陸地の1割ちょっと

農地
灌漑地
穀物生産
窒素肥料
人口



EVANS 1999
Feeding the ten billion—
Plants and population growth.
Cambridge university press.

環境収容力を増やす努力

- 農地面積の増大
 - 開墾・干拓・灌漑など
 - 森林・草地・荒地を農地に
 - 品種改良
- 面積あたりの生産性の向上
 - 施肥
 - 灌漑
 - 品種改良



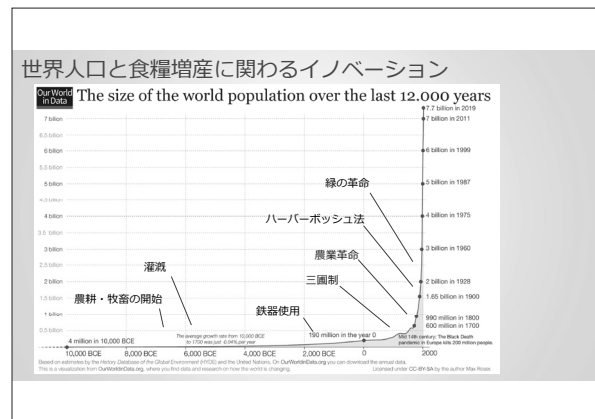
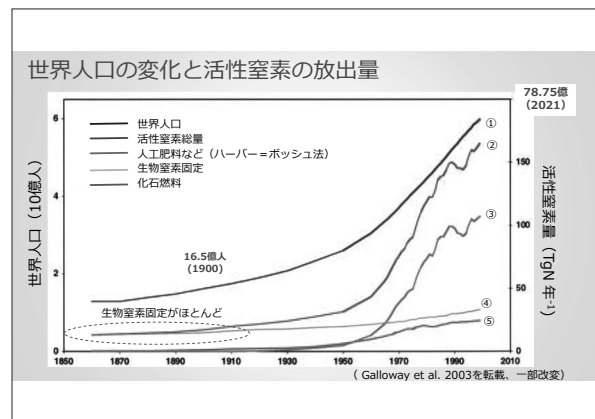
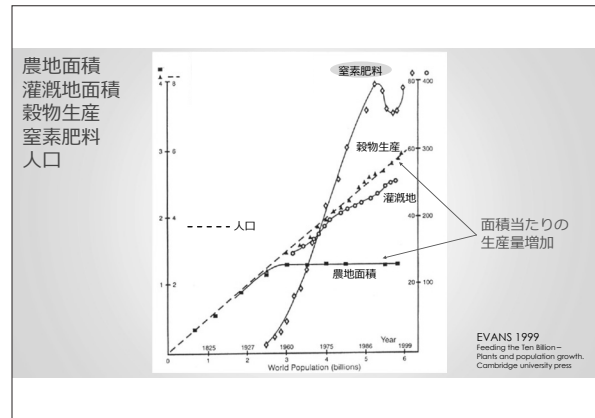
たような土地を新たに耕地にする。あるいは、三圃制、農業革命は、地力低下を招かないような農法のイノベーションだったりするんですが、その後、このハーバー・ボッシュ法が生まれて、さらにそれを、肥料と品種改良を使って緑の革命が広がっていきますと、人口が飛躍的に増えています。

こんな感じで、人類の歴史は、食べ物を得るためにいろんなイノベーションを起こしてきたわけなんですけども、最近の発明のおかげで、人口が増えて餓えから解放されるというようなことが生まれたという意味で、化学肥料は我々人類にとって非常に大きな恩恵をもたらしてきたものになります。

では、次に、それがどのような脅威を及ぼしているのか、というお話をしていきたいと思ひます。

地球環境問題と言ひますと、例えば地球温暖化、酸性雨、熱帯林の喪失、砂漠化、こういった地球環境問題は皆さんもよく聞ひていると思ひますが、窒素の環境問題は、こういうものに比べると知名度が低いのではないかと思ひます。

ところが、環境問題を考える際に、プラネタリー・バウンダリーという考え方があって、これは、もともと地球の状態がどのぐらい限界に近づいているのかを相対的に示すようなもので、緑や黄色だから完全なわけでは全然ないんですけども、どのぐらい元に戻すのが難しいのかという観点で、相対的に示したものがあって、一つが遺伝的な多様性です。これは、地球上から生き物がいなくなってしまうと、元に戻すことはできません。それと同じく、赤色で出ているのが、生物地球化学的循環ということで、窒素とリンがあり



本日の話題

窒素の恩恵

2. 窒素の環境問題とは？

私たちにできること

ます。自然界になかったものを、人工的に自然界にばらまいていく。そのことでいろいろな問題を起こしているのが、窒素の環境問題になります。

次に、窒素が人の社会と自然の間を行き来しながら、どのような問題を起こしているかですが、窒素の問題はいろいろなものがあります。黄色で示したものが、いろいろな窒素に関わる環境問題になります。

これは、窒素のカスケードというもので、小さな滝が連なっているのをカスケードというのですけれども、窒素がどんなふうに形態を変えながら、人間界から自然界へ渡り歩いているのかを示したものです。


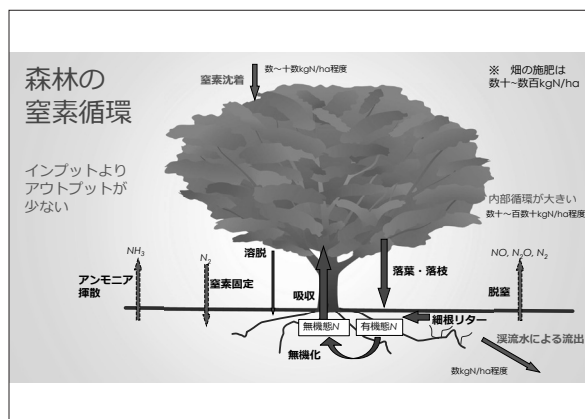
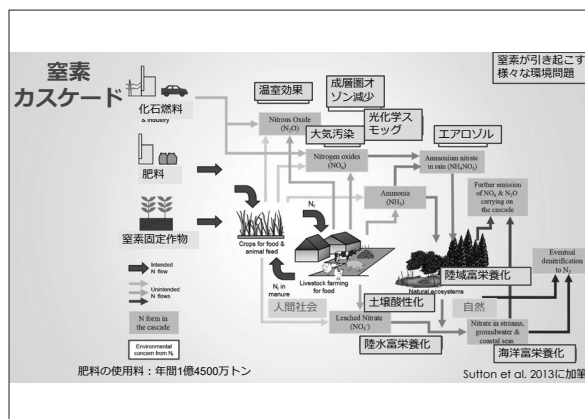
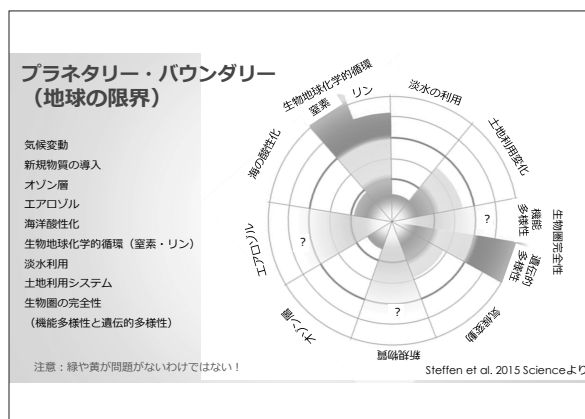
スタートは、化石燃料だったり、肥料だったりします。最初は、肥料を畑とかに投入して、さらにこれを飼料にして家畜を育てる。糞尿は肥料として戻す。これは食料を生産するために、人間が意図的に行っている行動です。

一方で、それ以外の矢印は、人間が狙っているわけではなくてこういうことをした結果、自然界にいろいろと漏れ出ていっている矢印になります。例えば、農地から硝酸が流出して富栄養化を引き起こしたり、農地から温室効果ガスを排出してしまったり、あるいは、それ以外の物質が大気中に流れて、いろいろな問題を引き越しつつ、自然界に入ってきて、自然界も抱えきれない窒素が下流に流れていったりして、いろいろなところでいろいろな問題を起こすということです。

私は、普段は森林の中の窒素循環を研究しているんですけども、森林にももちろん窒素が降ってくるんですが、空から降ってくる窒素は、日本の森林ですと、1年間に、1ヘクタール当たり数キロから十数キロくらい、100m ×

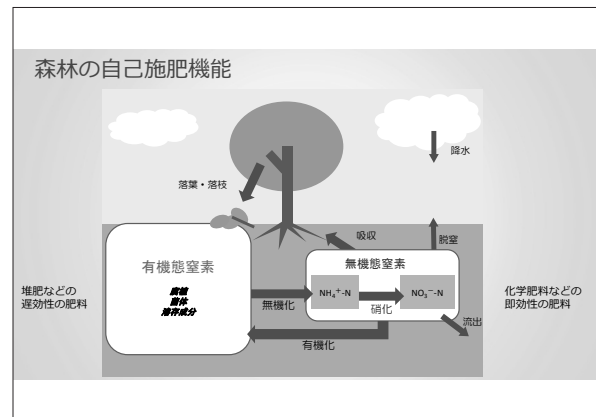
さまざまな地球環境問題

- 地球温暖化
- 酸性雨
- 熱帯林の喪失
- 砂漠化
- 生物多様性の喪失
- 水資源の枯渇
- オゾン層の破壊
- 海洋汚染 など

100mの所に空から降ってきます。一方で、外に出ていく量は、1ヘクタール当たり数キロくらいです。ですので、入ってくる量より出てくる量が普通は少ないのが森林の特徴です。

もう一つ、森林の特徴は、入ってくる外部の生態系とのやりとりの量と比べて、中で回っている窒素の量、木が育つために土から養分を吸収して、葉っぱを作って、それがやがて枯れて落ちて、また土の中で分解して使える形になる。こういう循環を内部循環というんですが、このほうが非常に大きいのが森林の特徴です。

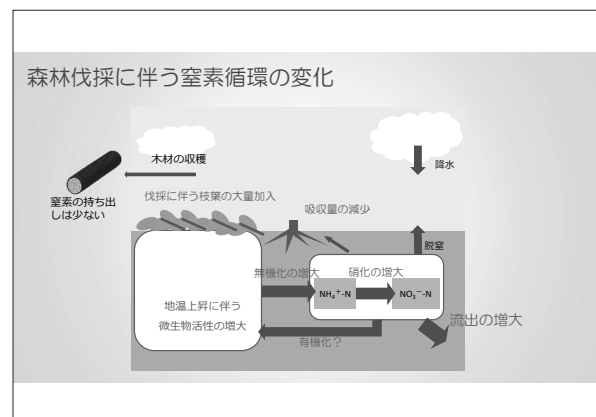


ちなみに、畑にまく窒素の量は、空から降ってくる量と比べると1桁、2桁多くて、数十キロから数百キロぐらい施肥をして、その分収穫をして、別のところに運ばれたりして、我々が食べたりすることになっています。

森林の土の中の話をもう少しさせていただきます。枝とか葉っぱで落ちた状態は、そのままでは植物が吸うことはできないんですが、土の中で腐植と呼ばれる、堆肥みたいな遅効性の肥料みたいなものになって、さらにそれが微生物の働きで化学肥料の材料と同じアンモニウムとか、硝酸といった無機態の窒素になっていく。そうすることで、水と一緒に吸収することができるんですね。

森林というのは、自分たちで葉っぱを落として、そこで微生物の力を使って肥料を作り出して、それを吸うということで、自己施肥機能があり、肥料を与えなくても自分で肥料を作り出してしまいうということで、非常に持続的な系になっています。

ところが、森林を伐採しますと、作物だと相当な窒素が持ち出されるんですけども、森林を伐採しても、木材の中にはそれほど窒素が入っていないので、持ち出す量自体は少ないわけです。また木が大きくなっていく間に、空から降ってきて森の中に窒素をためるので、そういう意味で地力は長い年月をかけると回復していくんですが、一時的に木がない状態があると、その間、土の中にできた無機態の窒素が雨などと一緒に流出してしまうことが知られているわけです。



では、森林を伐採した時に、窒素がどのぐらい出ていくのかということなんですが、私に前に鹿児島大学の森林で、こんな感じで12ヘクタールの森林を全部伐採してどうなるかを見ました。

これが森からの出口で、ここに小川が流れていて、この川の水とか、ここに入っている窒

素の量を測ることで、伐採をするとどのぐらい窒素が出てくるのかが分かります。こんな感じで、ロボットみたいな林業機械で木材を処理して、そこから木材を収穫して行って、伐採試験区を作ります。

4年ぐらいたちますと、片方の流域には杉を植えたんですが、このぐらいになっていて、もう一つのほうは何もせずほったらかして、常緑の天然林に復活させようということをやっています。

そんな感じで10年ぐらいつとどちらの流域でも河川の硝酸の濃度を測ったんですが、森林区のほうは、季節変化をするんですけど、10年間それほど濃度の変化が見られません。一方で、伐採した所は、伐採した後、1年目、2年目、3年目、4年目ぐらまでは、少し硝酸の濃度が高くなっていました。ですが、この濃度は、普通の農地を流れたり、都市を流れている河川の硝酸の濃度と比べると随分低いことが分かって、しかも、伐採の影響はあるんですけども、数年ぐらいで元の森林と変わらない状態に戻りました。

この場所ではこういう結果ですが、世界のほかのところだと、これがもう少し出たり、あるいは回復が遅かったり、いろいろあるわけですけども、伐採しても窒素の流出量はそれほど多くないんじゃないか、というのがこの結果では見えてきました。

窒素が生態系にあふれる状態を窒素飽和というんですけども、窒素の沈着で、空から降ってくる量が増えても、最初は樹木にとっては施肥の効果みたいな感じで、生産量が伸びたり、土の中の無機化活発になったり、割りとプラスの面しかないんですけども、やがてそれが吸収できなくなってきて、場所によ

集水域スケールでの研究サイト



森林からの水の流出



伐採試験地の状況



伐採後4年目の調査地



放置（ここは何もしなくても常緑の天然林に）

スギの植栽地



では木が枯れて生産量が落ちてしまったり、あるいは、流出していく窒素が増えたりして、入ってきたものがより出ていくもののほうが多い流出過多な状態になってしまったりする場所もあります。

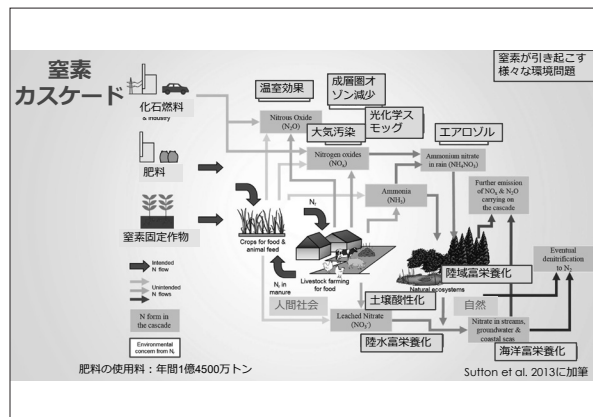
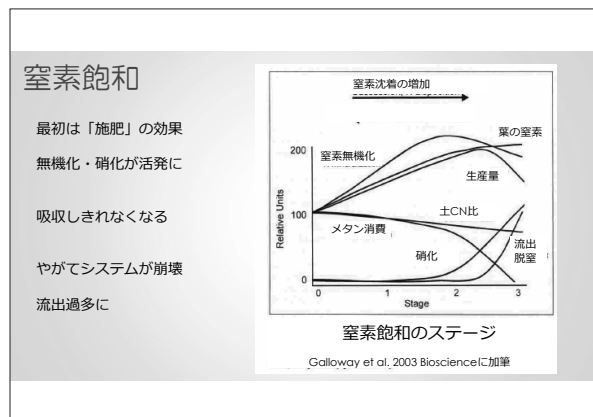
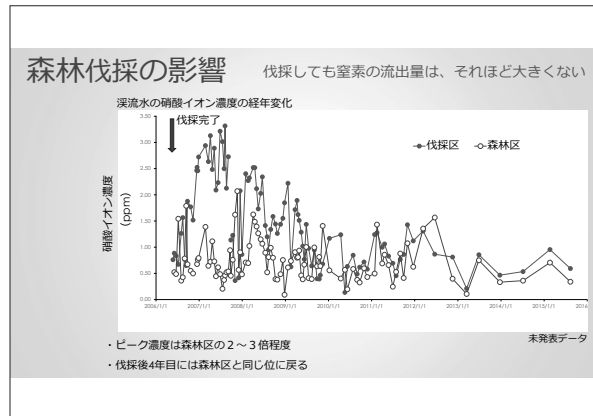
そういうわけで、いろいろなところを巡っている窒素が、自然生態系に入ってきて、どういう挙動を示すのかが、我々の分野の研究で、特に森林の管理と、下流への影響がどうなっているのか、まだまだ分かっていないことがたくさんあるので、そういうのを普段は研究しています。

最後に、私たちができることは何だろうということで、少しでも関連するお話ができたらなと思います。

窒素問題の解決に向けては、一つは、農業で肥料を過剰に使わないのが大事なことになります。さらに、化石燃料の使用を減らすとか、あるいは、環境中に窒素が漏れ出さないようにする、いろいろな処理技術も大事かと思えます。そういうのをするためには、例えば自治体だとか国が、規制だとか農業指導をすとか、あるいは、国際的な枠組みだったら、国際機関が連携してこういうものを考えていくのが大事かなと思います。

あるいは、技術革新に関しては、企業とか、生産者の側が、いろいろなことを生み出していくということで、解決につながるんじゃないかと思いますが、我々一人ひとりの心掛けも大事で、我々が変わると、こういうことを推進するいろいろなステークホルダー変わっていくんじゃないかと考えています。

SDGsというのを最近よく耳にすると思いますが、SDGsと窒素は、実はほとんど全ての項目に関わっていて、例えば今日お話



本日の話題

窒素の恩恵

窒素の環境問題とは？

3. 私たちにできること

ししている食料は、貧困とか飢餓をゼロにするとか、健康にも関わってきます。さらに、公衆衛生では、トイレとか、水の問題にも関わってきます。さらに、温室効果ガスは、大気、水、土とも関わりますし、いろいろなイノベーションを生み出したり、あるいはエネルギーのところのリサイクルなどにも関わります。

こういうことを解決するためには、国際協調ですけれど、食料自体も安全保障にも関わってくる問題なので、そういうことで、いろいろなことに関わってきます。

今は温暖化で炭素の話がメインですけども、関わり方としては、窒素もほとんど同じですので、合わせて窒素の問題も皆さんに少し意識していただければと思います。

具体的な行動に向けて、意識してもらいたいこととして、窒素のフットプリントと、もう一つは持続可能な生活という、二つの話題を少しだけご紹介したいと思います。

窒素フットプリントというのは、人間が食料とかエネルギーを消費する際に、環境中に放出される反応性窒素の総量を示します。ここに日本人の窒素フットプリントということで、1年間当たり、1人の人がどのくらい窒素を環境中に放出していることになっているのか、というのを示します。例えば移動手段です。そういうので使ったり、家で燃料を使ったり、電気を使ったりする。あるいは、ものの中にも窒素が入っていますので、そういうものを入れて、このくらいの量を、毎年皆さんが使っている。

さらに食べ物なんですけども、これは直接の消費なので、我々が直接食べている窒素の量になります。これは、今の日本人、特に先進国のいろいろな国々は、窒素を余分に食べ

窒素問題の解決に向けて


■農業 肥料の削減	規制や農業指導	生産者
■化石燃料の使用減少	規制や国際的な枠組み	企業
■排水処理技術	技術革新	自治体
		国
		国際機関

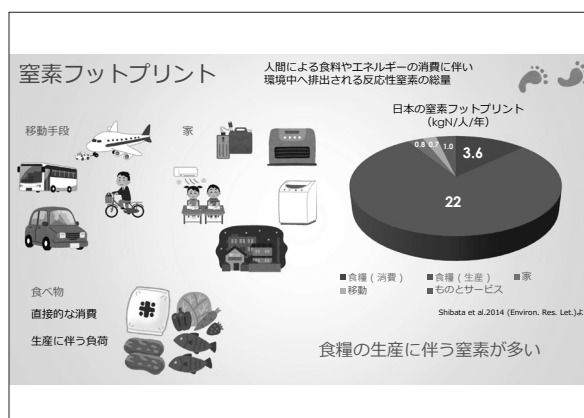
一人一人の心がけ

窒素とSDGs

1 貧困をなくそう	2 気候変動に具体的な対策を	3 すべての人に健康と福祉を	4 質の高い教育をみんなに	5 ジェンダー平等を促進しよう	6 安全な水とトイレを世界中に
7 エネルギーをみんなにそしてクリーンに	8 働きがいも経済成長も	9 産業と技術革新の基盤をつくろう	10 人や国の不平等をなくそう	11 住み続けられるまちづくりを	12 つくばない、減らさない、リサイクル
13 気候変動に具体的な対策を	14 海の豊かさを守ろう	15 陸の豊かさも守ろう	16 平和と公正をすべての人に	17 パートナリシップで目標を達成しよう	エネルギー リサイクル
大気	水	土	イノベーション	平和	国際協調

具体的な行動に向けて意識してもらいたいこと

- 窒素フットプリント 
- 持続可能な生活



過ぎているわけですが、人間なので、大昔の10倍のものを食べられるようにはなりませんので、この部分はそれほど昔から変わっていない。多いとは言え、昔からそれほど変わっていないんですが、この赤い部分、これは、生産に伴う窒素の負荷になります。

ここが、ライフスタイルを変えることで大きく変わる。日本人の窒素フットプリントは少し高めなんですけども、ここを意識するのはどうかということです。

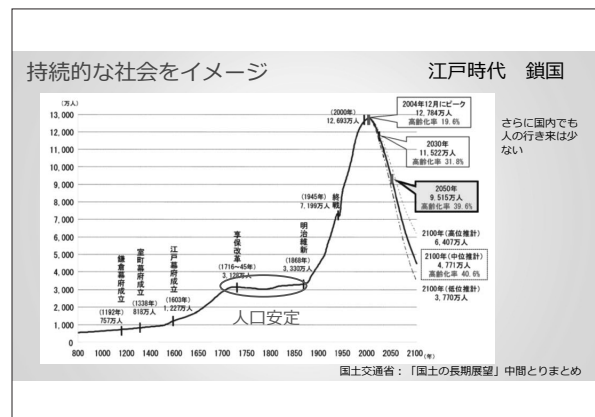
生産する時に、窒素がどれだけ排出されるかということなんですけども、例えば輸送する際に化石燃料を使います。あるいは、輸入してくるんですけども、その輸入先がどんな農業を行っているかということで、どのぐらい窒素フットプリントがあるのかも変わってきます。

例えば、集約的な農業で肥料をたくさんあげる国と、粗放的にやっている国だと、集約的な国から輸入すると、窒素フットプリントが高くなってしまいます。そういう意味で、どこのものを食べるかも大事だし、あるいは、何を食べるかも大事で、例えば肉は、飼料に肥料をまいて育てるので、そういうのを全部入れると、実際に食べているのはほんの4%ぐらいで、96%の窒素が環境中に放出されているわけです。

一方、海から魚を捕ってくるだけだと、そこに燃料は掛かりますけども、あまり環境に窒素を排出しないし、あるいは、豆類は窒素固定するので、肥料が少ないので、あまりたくさん窒素を使わない。そういうことで、何を食べるかも重要です。

さらにもっともったいないのが、せっかくこれだけ窒素を排出して作った食べ物も、食べられないで捨ててしまうものがあります。食品ロスです。無駄なく食べているかも、非常にフットプリントとは関係してきます。

もう一つ、持続可能な社会はどういうものか、少しイメージしていただければと思います。これは日本の人口なんですけども、江戸時代は鎖国をしていたので、外から物が入ってきません。さらに、国内でも、人の行き来が今ほどないので、小さい村とか、そういう

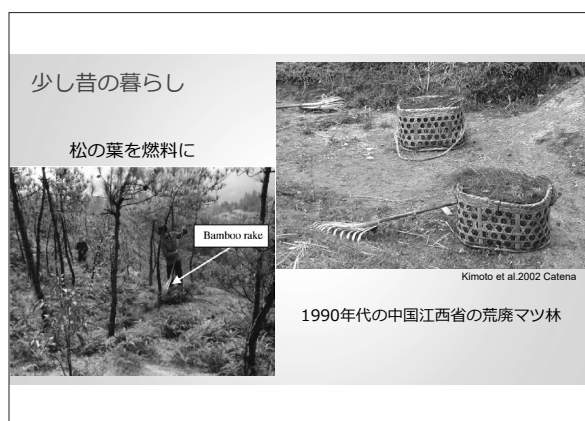


単位で見ると、ほとんど物の動きがなかったわけです。そういう状態だと、日本の国土で3000万人ぐらいの人が持続的に生活できていたことになります。

そういう社会では、外から肥料や燃料が入ってきませんので、自分たちが食べて、肥だめに肥料としてためておいたり、あるいは裏山で葉っぱを取ってきて、それを堆肥にして畑にまいたり、あるいは、燃料も入ってきませんから、裏山から取った木を燃やして灰ができます。この灰をまた肥料として畑にまく。

そういうので、村の人口を維持しつつ、なおかつ年貢を出して、都市の人口まで維持していた。そういうのが、江戸時代の持続的な社会になります。

そうなんですけど、江戸時代まで戻らなくても、ほんの少し前、これは中国で1990年くらいに私が学生のころに行った森林なんですけど、松の葉っぱを集めて燃料にして煮炊きに使っているような生活が、ほんのこの間まで残っていたし、日本でも、これよりもう少し前ですけど、そういった生活が残っていました。



ここまで戻る必要はないんだけど、持続可能な社会はどういうものか、食べ物、燃料、肥料、そういう観点で見直してみるのもいいのではないかと思います。



最後に、窒素環境問題に向けての一人ひとりの心掛けということですけども、何らかの行動変容を起こすためには、まずは知ることが大事です。窒素の環境問題は、今日初めて知った方もおられるかもしれませんが、何も知らない状態から今日の話聞いて少し、窒素も危ないなと思っていただけるといいのかなと思います。

さらに、何か準備して何かしていくんですけども、いろいろ我慢して、肉を食べないとか言うと楽しくないし、我慢我慢ではあまりよろしくないと思うんですけど、例えば運動を兼ねて自転車に乗ってみようとか、そもそももったいない食品ロスを少しでも減らそうとか、あるいは、食生活を、自分の健康と自



然の健康を改善するために少し見直してみようかなということで、SDGsとか、温暖化とかで、ほかの環境問題とも非常に関連する問題になってくるので、一人ひとりが行動を変えていくことが、窒素の問題に限らずいろいろな環境問題を考えていく上で重要なんじゃないかと思っています。

私の発表は以上です。どうもありがとうございました。