

CRDS-FY2012-WR-12

# 科学技術未来戦略ワークショップ 「窒素循環研究戦略ワークショップ」報告書

平成 24 年 3 月 23 日(金)開催



独立行政法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター  
Center for Research and Development Strategy, Japan Science and Technology Agency

研究開発戦略センター（CRDS）は、国の科学技術イノベーション政策に関する調査、分析、提案を中立的な立場に立つて行う公的シンクタンクの一つで、文部科学省を主務省とする独立行政法人科学技術振興機構（JST）に属しています。

CRDS は、科学技術分野全体像の把握（俯瞰）、社会的期待の分析、国内外の動向調査や国際比較を踏まえて、さまざまな分野の専門家や政策立案者との対話を通じて、「戦略プロポーザル」を作成します。

「戦略プロポーザル」は、今後国として重点的に取り組むべき研究開発の戦略や、科学技術イノベーション政策上の重要課題についての提案をまとめたものとして、政策立案者や関連研究者へ配布し、広く公表します。

公的な科学技術研究は、個々の研究領域の振興だけでなく、それらの統合によって社会的な期待に応えることが重要です。「戦略プロポーザル」が国の政策立案に活用され、科学技術イノベーションの実現や社会的な課題の解決に寄与することを期待しています。

さらに詳細は、下記ウェブサイトをご覧ください。

<http://crds.jst.go.jp/aboutus/vision/>

## エグゼクティブサマリー

人間社会の持続性にとって肝要な窒素循環の実態とメカニズムを解明し、持続的窒素循環を可能とする対策技術を構築するための研究開発をどのように推進すべきかについて、実態解明、対策技術構築、対策の評価にかかわる専門家に集まっていただき、討議した。

持続可能な社会の目標として「低炭素社会」「自然共生社会」とともに「循環型社会」があげられるが、これまで「循環型社会」の話題は人工物のリサイクルに偏りがちであった。しかし自然の元素循環の人間活動による改変も重要な問題である。そのうちで窒素循環については、人口を支える食料生産に不可欠な窒素肥料の利用をしながら環境負荷を低減するという困難な課題がある。

日本国内について見ると、これまでのところ広域で顕在化した深刻な問題は生じていないようである。しかし、規制のない野菜の硝酸イオンなどによる健康リスクや、窒素飽和が生じた森林から流出する反応性窒素による水域の富栄養化などが、将来顕在化する可能性はある。反面、水域の貧栄養化が問題とされることもある。アジアに目を向ければ、とくに中国やインドなどの新興経済圏で負荷の増加が大きく、深刻な環境問題が生じているところもあり、また大気・海洋の越境汚染や貿易を通じて日本とも関わる。アジアの窒素循環の実態を把握し、過剰な負荷をどう減らすか考えることが重要である。

窒素循環の実態把握には、比較的データがそろっている日本についても、自治体等の現状の環境モニタリングでは不足であり、観測を強化する必要がある。また外国については利用できるデータが乏しい。これには各国のモニタリングやデータ処理の能力、データに関する各国の政策、研究者間の情報交換の不足などさまざまな事情がある。

窒素肥料に由来する環境負荷を減らす対策としては、適度な速さで効く肥料の開発、窒素利用効率の高い作物品種の開発、硝化や脱窒の働きをする微生物の培養・利用、窒素分のリサイクルを重視した生活排水処理技術など、多様なものが必要である。その基礎としては植物や微生物の機能に関する研究も必要となる。また既存の技術を省エネルギー型に改造することも有意義である。

窒素循環のプロセス解明にあたっては、対策技術の効果や副作用の評価にあたっては、実験農場、集水域、東アジアなど、複数の空間スケールでの研究を並行して行い、モデリングによってスケール間をつなぐことが重要である。

アジアの窒素循環の問題解決には、国際的な取り組みが不可欠である。すでに行われている EANET（東アジア酸性雨ネットワーク）、LTER（長期陸域生態研究）、アジアフラックスなどの拠点間のネットワークを生かし、さらに国際科学技術協力を進めていくことが望ましい。

窒素循環の課題解決に向けた研究プロジェクトは、従来の専門分野を横断したものになる。科学と政策との関係にも踏み込むことになる。プロジェクトメンバーに限らず関心をもつ人が窒素循環の課題解決をいっしょに考える場が必要である。そのようなプロジェクトおよび場を運営する人の働きが重要となる。また、従来の専門分野を横断した研究開発能力をもつ人材を育て、その活躍の場を作っていく必要がある。

## 目 次

### エグゼクティブサマリー

|   |    |
|---|----|
| 1. ワークショップ開催趣旨                                  | 1  |
| 1-1. 背景   | 1  |
| 1-2. ワークショップの目的                                 | 1  |
| 1-3. ワークショップの構成                                 | 1  |
| 2. 主催者あいさつ・開催趣旨説明                               | 2  |
| 2-1. 主催者あいさつ                                    | 2  |
| 2-2. 開催趣旨説明                                     | 4  |
| 3. セッション1. 窒素循環の実態解明                            | 11 |
| 3-1. 東アジアの食料生産と窒素循環—窒素フローモデルによる環境負荷の広域推定        | 11 |
| 3-2. 森林域の窒素動態とNO <sub>3</sub> 流出の把握：安定同位体比情報の利用 | 16 |
| 3-3. 日本の湖沼・沿岸域における窒素負荷対策の課題                     | 22 |
| 3-4. 大気循環と窒素循環                                  | 28 |
| 3-5. セッション1の討論                                  | 34 |
| 4. セッション2. 対策                                   | 36 |
| 4-1. 窒素化学肥料の環境負荷の正体                             | 36 |
| 4-2. 窒素に関する人為的環境改変の植物に対する影響とそれらに対する対策について       | 40 |
| 4-3. 水処理技術に関する研究開発課題                            | 46 |
| 4-4. セッション2の討論                                  | 52 |
| 5. セッション3. 対策の評価                                | 53 |
| 5-1. 気候変動に対する窒素循環の応答の予測評価に向けて                   | 53 |
| 5-2. 陸域生態系における窒素物質循環の応答変化予測とその環境リスク評価           | 59 |
| 5-3. セッション3の討論                                  | 67 |
| 6. 総合討論   | 68 |
| 7. まとめ  | 73 |
| 付録  | 74 |
| ワークショップ開催概要、プログラム                               | 74 |
| 参加者リスト  | 75 |

## 1. ワークショップ開催趣旨

### 1-1. 背景

人類社会は工業化によって自然環境を大きく改変してきた。そのうちには生物多様性、気候とともに、物質循環の改変が含まれる。とくに、生物にとって必須な元素のひとつである窒素の循環は、人工窒素固定と燃焼時の窒素酸化物発生とによって大きく改変されており、大気・水質汚染による人間の健康への影響、生態系・生物多様性への影響、大気への一酸化二窒素の放出による地球温暖化の促進など、多面的問題をもたらしている。人類社会が今後も水・食料・エネルギー等の資源を持続的に生産・確保していくためには、エネルギー源の低炭素化、生態系保全、人工物の循環利用とともに、窒素の持続的な利用を実現させる必要が明らかになってきた。こうした背景から JST-CRDS 窒素循環チームでは窒素循環の持続可能性を高めるために必要な方策について調査研究を基に検討を進めている。

### 1-2. ワークショップの目的

本ワークショップは JST-CRDS 窒素循環チームの検討の一環として企画し、(1) 窒素循環に関わる社会的課題の具体的認識と整理、(2) 国内外における研究開発の現状や動向の把握、(3) 国として取り組むべき研究開発課題やその推進方策検討、などに関する幅広い視点からの議論を行なうことを目的とする。

### 1-3. ワークショップの構成

1日の日程で、外部有識者9名に話題提供いただき、関係府省、JST関係者などを含め約20名で討論を行なった。セッションは、(1) 窒素循環の実態解明、(2) 対策、(3) 対策の評価、のそれぞれの主題に関する話題提供および質疑討論と、(4) 総合討論とした。

## 2. 主催者あいさつ・開催趣旨説明

### 2-1. 主催者あいさつ

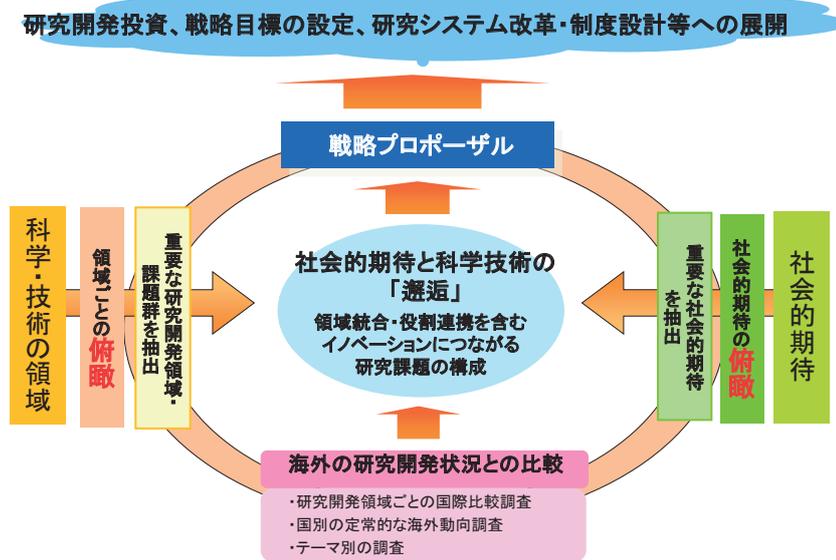
笠木伸英（CRDS 上席フェロー）

科学技術振興機構（JST）の研究開発戦略センター（CRDS）の役割についてご説明したい。CRDSは、社会ニーズを充足し社会ビジョンを実現する科学技術の有効な発展に貢献するというビジョンのもとで、科学技術分野全体を俯瞰し、そこから重要な課題を抽出し、国の研究開発戦略に対する提言を出していくことを任務としている。

CRDSは、文部科学省の研究資金提供機関の機能をもつJSTに属してはいるが、JSTあるいは文部科学省の事業に限るのではなく、わが国全体の研究開発がどうあるべきかを考え、政府全体の省庁に、広くは社会全体に、提言をしていく立場である。提案は根拠に基づいた中立・公正なものにすることをめざしている。

その立案プロセスの考えかたを示す（スライド5）。国の研究開発に関する提言は「戦略プロポーザル」という形で出していく。そのために、一方で、科学技術に対して社会はどうかを期待しているかを俯瞰し、他方で科学技術の研究開発について日本の中だけでなく世界の状況を俯瞰して、両方が出会うところにある課題を見つけていく。

### 研究開発戦略の立案プロセス



スライド 5

科学技術基本計画が2012年度から第4期に入っている。第3期は重点分野を決めてその科学技術を推進するという形だったが、第4期は課題に対応した形で科学的な知識を集約して目的を達成していく立場をとっており、課題として、復興再生、グリーンイノベーション、ライフイノベーションをあげている。

CRDSでは社会的期待について2年ぐらい前から議論してきており、最終的な目標は「豊かな持続性社会」であろうと現時点では考えている。それには健康、生物多様性、物質循環、

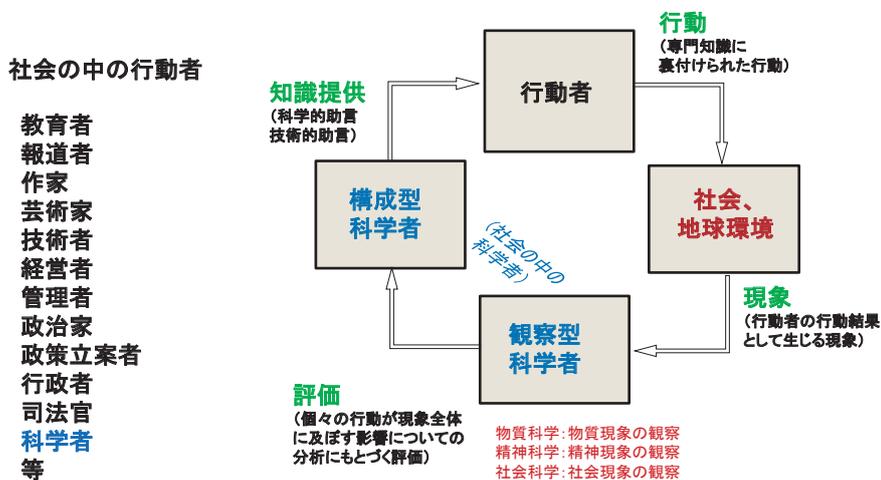
エネルギーシステムなどの側面があり、共通の基盤となる学術や人材育成の課題もある。そのような考えのもとで、具体的なテーマを探索するチームが、現在（2011年度）は9つ動いており、窒素循環のチームもその一つである。

CRDSが検討する様々なテーマにおいて、学術の中には文科系と理科系とか、基礎研究と応用研究とのギャップがある。また、世の中と科学者との間のギャップがある。現場の科学者と研究資金を提供する側との間で資金の趣旨についての理解が必ずしも共有されていないというギャップもある。

CRDSセンター長の吉川（2010）による「持続的進化」のための科学技術のありかたに関する概念図（スライド9）を示す。社会や地球環境に問題が生じる、あるいは問題が表面化する前に専門家がその可能性に気づくことがある。その状況を計測し解析する観察型の科学者がいる。それを受けて、その課題をどう解決していくかを考える構成型の研究者がいる。その両方が寄与した科学的な知識あるいは助言をもとに、産業界であるとか政府であるとかが具体的なアクションを起こす。それによって社会や環境が変わっていく。その変化をまた観察し対応を考えていくというように循環が回る。

きょうは、このような観点から、窒素循環について社会はどのような課題を抱えており、それを解決するためにはどのようなことを推進したらよいか、議論いただきたい。

## 持続的進化(イノベーション)のための循環 と相互作用



(吉川弘之による資料) スライド9

## 2-2. 開催趣旨説明

中村 亮二 (CRDS フェロー)

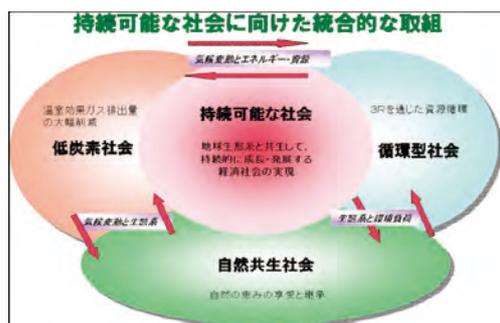
### 問題意識

#### 物質循環の重要性

まず、今回のワークショップに至った問題意識を説明する。

持続可能な社会の実現にとって、持続的な物質循環が中心的な要素の一つであると考えている。それをどう実現するかというところでは、中央環境審議会の 21 世紀環境立国戦略では、「低炭素社会」「自然共生社会」「循環型社会」の 3 つに統合的に取り組むべきと提言している (スライド 12)。これをやや大胆に言い換えれば、物質循環というのは自然生態系と人間活動を中心とした人工循環系の統合であるべき、ともいえるのではないかと考えている。

### 物質循環の重要性



「21世紀環境立国戦略の策定に向けた提言」  
(中央環境審議会、2007年)

持続可能な社会の実現にとって  
物質循環の持続性は中核的要素。

政策的には  
「低炭素社会」、「循環型社会」、  
「自然共生社会」の統合的な取り  
組みによる推進が期待されている  
(左図)。

換言すれば、物質循環は  
「自然生態系と  
人工循環系の統合」  
であるべき(武内和彦、2007)。

スライド 12

### 生物地球化学サイクルへの着目

物質循環の問題は大きく二つに分けてとらえられている。一つは、人工循環系のマテリアル・フローである。これに対する対策として、いわゆる 3R (reduce, reuse, recycle) の取り組みがある。もう一つは自然の物質の動態であり、生物地球化学サイクルとも言われる。現在の CRDS における検討では、主に後者に着目している。

生物地球化学サイクルのうちでもまず、炭素、窒素、リン、硫黄など、生命活動に必須な元素の循環に着目する。その自然の循環の記載はいちおうできているが、人間活動が与えている影響については、まだ十分に理解できているとは言えない。素過程の解明あるいは素過程どうしの相互作用を明らかにする必要もある。炭素循環については、地球温暖化原因物質として、すでに地球環境研究の重点項目として取り組まれている。それに加えて、窒素についても同様に取り組みが必要ではないかと考えた。

## 窒素循環に関するこれまでの検討概要

### 現時点での認識

工業化した人類社会は、人工窒素固定と、化石燃料燃焼時の窒素酸化物の発生によって、窒素循環を大きく改変してきた。その結果として、大気や水質の汚染による健康への被害、生態系への影響、地球温暖化の促進という多面的な問題をもたらしている。こうした問題を解決するために、窒素循環の持続的な利用が非常に重要な課題であろうと認識している（スライド 19）。

### 窒素循環についての現時点での認識

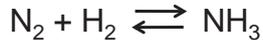
- 人類社会は工業化によって**窒素循環**を大きく改変してきた。
- とくに
  - **人工窒素固定**
  - **燃焼時の窒素酸化物発生**によって大きく改変されており、
  - **大気・水質汚染による健康への影響、生態系への影響**
  - **地球温暖化の促進**など、多面的問題をもたらしている。
- 人類社会の持続のためには、**エネルギー源の低炭素化、生態系保全、人工物の循環利用**とともに**窒素の持続的な利用**が必要。

#### スライド 19

窒素循環を大きく変えたきっかけは、ハーバー・ボッシュ法というプロセスで大気中の窒素を固定し、利用可能な形に変えることができるようになったことである（スライド 20）。人工窒素固定で肥料をつくることによって過去の世界の人口増加が支えられてきたが、一方ではそのプロセスに必要な水素をつくるために多くの化石燃料が使われているという面もある。現在、人工窒素固定は、自然の生物による窒素固定に匹敵する規模になっており、窒素循環はこの 1 世紀の間に顕著に変化した。

## 人工窒素固定

- Haber - Bosch法、1913年から稼働
- 過去100年の人口増を支えた。



水素は主にナフサの水蒸気改質法で供給される。1tのNH<sub>3</sub>製造に0.8tのナフサが使用され、2.5tのCO<sub>2</sub>が発生。

### 世界

- 全世界で年間1.6億t生産。
- うち8割(1.29億t)が肥料用。年間2-3%の伸び。
- アンモニア合成用の水素製造に使われる石油は65Mt/年。全原油消費(3.7Gt/年)の約2%。
- 生産は発展途上国へシフト。
- 中国は現在世界最大のアンモニア生産国(4900万t/年)

### 日本

- 1972年が生産のピークで390万t/年。
- その後減少し現在は122万t/年。
- 肥料生産は既に大幅減退し、アンモニア生産の2割にとどまる。
- しかし、窒素輸入量(67万t)、農耕地の単位面積あたり窒素収支(120kg/haの持ち込み)では世界第一位(1990年)。

スライド 20

こうした社会の状況に対して研究者コミュニティの対応も進んでいる(スライド 23)。世界の研究者間の連帯として、INI(国際窒素イニシアチブ)というものがあり、科学的なアセスメント、解決策の開発、政策立案者へのインプットなどを目標として活動が行われている。またこれに関連して、ヨーロッパでは、自らの地域の窒素循環の現状をアセスメントし、それに伴う経済的損失の定量化も行うという活動が見られる。このような窒素循環に関する研究者コミュニティの活動は、現在は欧米を中心に進んでいると我々は認識している。

## 欧米を中心に進む研究および社会との連携



- **INI: 国際窒素イニシアチブ**
  - 窒素利用の最適化、健康や環境への負の影響の最小化
  - 科学的なアセスメント、解決策の開発、政策立案者へのインプット
  - 研究者間の連帯であり、実質研究資金提供体制はない
  - SCOPE(環境問題科学委員会)とICSU IGBP(地球圏・生物圏)が支持
  - 日本からは八木一行・農業環境技術研究所研究コーディネータなど
- **ENA: ヨーロッパ窒素循環アセスメント(Sutton et al., 2011)**
  - 5年にわたるEU圏を対象とする調査
  - 窒素化合物(とくにNO<sub>x</sub>やNH<sub>3</sub>)の排出が人体(健康)や生態系に及ぼす影響による経済損失は年間700-3200億ユーロあり、窒素肥料によってもたらされる農業収入の2倍以上にもなると推定
  - 地球規模でのアセスメントの必要性指摘
  - *NinE*: European Science Foundation のResearch Networking Programme
  - EU FP7 (Framework Programme)も密接に関連

スライド 23

アジア、特に東アジアでは、人口が多くて食料生産のために現在も大量の肥料を必要としている。特に新興工業国においては、肥料の過剰投入が行われていたり、広域の大気汚染が顕著に現われていたりする（スライド 24）。FAO の統計によれば、世界の窒素肥料の消費のおよそ 6 割がアジアで行われているとのことである。特に中国は非常に大きい割合を占めている（スライド 25）。こうした状況にも関わらず、東アジアの研究体制は、欧米と比べてまだ手薄ではないかと感じている。アジア特有の気候、地理、文化、経済活動における特性があるので、研究は欧米に任せておけばよいというものではなく、アジアとしての活動が必要であろう。

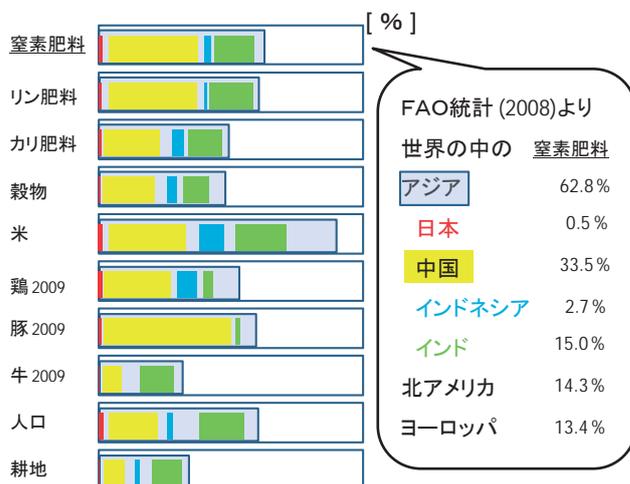
## 東アジア

- 広がり
  - 日本、韓国(・朝鮮)、中国、モンゴル、東南アジア(ASEAN諸国)
  - 南アジア(インド亜大陸)に広げるかは要検討
- 現状
  - (社会・経済)
    - 人口が多く、食料生産のために(適量の)施肥が必要
    - 新興工業国(とくに中国)で肥料過剰投入と広域大気汚染
      - ・ 全球規模で見ても大きな負荷
      - ・ 沿海の富栄養化 → クラゲ異常発生など、水産への影響
      - ・ 日本の日本海側で硝酸等が大気から沈着
  - (科学技術)
    - 欧米に比べて連携した研究体制が手薄
    - 他地域の研究でカバーされにくい東(・南)アジアの特徴
      - ・ 農地の形態のうちで水田が重要
      - ・ 気候: 夏に降水 > 蒸発 → 土壌中の窒素が流出しやすい
      - ・ 海岸付近(多くは湾)に巨大都市(メガシティ)が発達

スライド 24

## 東アジア

- 人口が多く、産業が成長し、窒素循環の改変が大きい。



スライド 25

日本では、窒素に関する問題意識は比較的希薄になっている（スライド 26）。それは、急峻な地形や雨が多いことなどの地理的・気候的な特性や、排ガス抑制技術の進展、環境規制の一定の成功などによって、深刻な環境汚染を経験せずに済んできたためであろう。しかし、近隣諸国や世界的な動向を見ると、今後も日本だけが窒素の問題と無縁であるとは言い切れない。

## 日本の現状

- 地理的条件や、環境規制の一定の成功、排ガス抑制技術の大きな進展などにより、窒素に対する問題意識が社会的に希薄になっている。
- しかし農産物の輸入や近隣諸国の活動などを考慮すると、窒素に関する問題とは未だ無縁ではない。
- 研究面では、各々の専門分野内では窒素に関する研究が連綿と続けられている。
- 公的な研究プロジェクトやファンディングにおいて窒素に着目した枠組みはあまり見られない。
- 水環境・大気環境などを主題とし窒素にもかかわるものは、CREST、国際科学技術協力、SATREPS、環境研究総合推進費、国際環境協力、農水省等のプロジェクトがある。
- 国際科学技術協力の新しい動き：「東アジアサイエンス・イノベーション・エリア共同研究プログラム (e-ASIA JRP)」

スライド 26

研究面では、窒素循環に関連する研究はさまざまな分野において続けられてきている。

しかし、公的な研究プロジェクトやファンディングにおいては、他の主題のもとで窒素にもかかわるものがいくつか動いているが、主として窒素に着目した枠組みはあまり見られない。なお、国際科学技術協力の枠組みとして「東アジアサイエンス・イノベーション・エリア共同研究プログラム」というものが作られようとしており、東アジアという枠組みでの研究を推進する機会として注視している。

## 提案の骨子

このような現状把握のもとで検討途上の提案の内容の骨子を示す（スライド 27）。

目標は、東アジアの持続可能な窒素循環とする。

それを達成するために、ステークホルダーが連携した、ある種のネットワークを構築する必要があるだろう。主催者あいさつの中（スライド 5）で示された吉川概念図のように、窒素循環のプロセスや現状を把握する観察型の研究と、対策を開発する構成型研究が組み合わせられ、さらに、対策が実施されて窒素循環がどのように変わってきたかをあらためて観察して評価していくようなフィードバックループを含む研究体制を組むべきだと考えている。

もう少し具体的には、次のような構成を考えている。(1) いろいろな分野の研究者が共同で取り組む場を設定し、その中で、観察型の研究をするとともに、対策を開発し、その効果を検証する。(2) そういった場での取り組みをスケールアップして広域で効果を検証していく。(3) 東アジアのさまざまな地域に対応した形での対策を構成あるいは実装していく。

なお、対策は、科学技術だけではなく、それをいかに社会に普及させていくかに関する社会技術や、規制・制度も重要になってくると考えている。

## 提案の骨子

- **東アジアの持続可能な窒素循環**という目標。
- **ステークホルダーが連携したネットワークの構築。社会実装の結果の評価** (フィードバックループ)を含む。
- (1) **多分野の研究者が共同で取り組む「場」の設定**
  - 観察(先端的計測を含む) → 窒素循環プロセスを把握
  - 対策 → 対策を開発し、効果を検証
- (2) **広域での窒素循環の把握と対策の評価** (スケールアップ)
  - ここで使うモデルは(1)で較正・検証
- (3) **東アジアの多くの地域で対策を構成・実装**
  - (1)(2)の知見を各地の自然条件・社会条件を考慮して移植
  - 各国ごとのイニシアチブをつなぐ国際的共同研究ネットワーク

スライド 27

## ワークショップのねらい

本日のワークショップには、陸・海・大気を対象に窒素循環の現状把握・対策・対策評価に取り組む専門家に集まっていただき、次のようなポイントについて、幅広い視点から、特に科学的な根拠に基づいた議論をして、できればこの場としての結論を得たい（スライド30）。

- ・ 窒素循環に関する知見とそのギャップ
- ・ 分野間の連携のポイント
- ・ 研究推進体制
- ・ 東アジア規模の国際協力をどのように進めるか
- ・ その他、提案骨子への意見など

プログラムは大きく「窒素循環の実態解明」「対策」、「対策の評価」と分けたが、それぞれの専門家には、必ずしも観察だけあるいは対策だけということではなく、いろいろなご意見をいただきたい。

## ワークショップの狙い

- 戦略プロポーザル作成の一環として、

陸・海・大気を対象に窒素循環の現状把握・対策・対策評価に取り組む専門家の方々に、以下に掲げるポイントについて幅広い視点から科学的根拠に基づきご議論いただき、それらを踏まえてこの場としての**一定の結論を得る。**

討論の課題(本WSのアウトプット):

- ◆ 窒素循環に関する知見とそのギャップ
- ◆ 分野間連携のポイント
- ◆ 研究推進体制
- ◆ 東アジア規模の国際協力をどのように進めるか
- ◆ その他、提案骨子への意見など

スライド 30

## 引用文献

- ・ 武内 和彦．2007. 地球持続学のすすめ．岩波書店．
- ・ 吉川 弘之．2010. 研究開発戦略立案の方法論 - 持続性社会の実現のために．科学技術振興機構 研究開発戦略センター．<http://crds.jst.go.jp/about/pdf/handbook2010.pdf>

### 3. セッション 1. 窒素循環の実態解明

#### 3-1. 東アジアの食料生産と窒素循環—窒素フローモデルによる環境負荷の広域推定

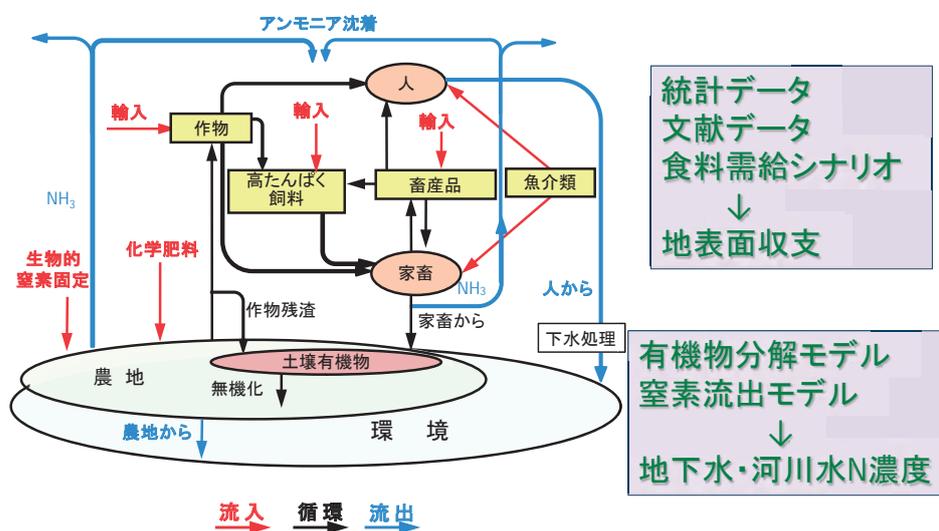
新藤 純子（農業環境技術研究所 [2012年4月から 山梨大学 生命環境学系]）

陸域の窒素循環のうちで食料生産と関係することを中心に話題提供する。特に、窒素フローモデルによる環境負荷の広域推定をここ10年ほど行っているのので、この話を主にしていきたい。

食料生産・消費に伴う窒素循環を広域に推定する目的は次の通り。(1) 国や地域ごとの食料生産の推移を窒素循環を通して統一的に理解する。(2) 国あるいは地域ごとの窒素負荷の主な原因を特定する。(3) 観測データの少ないあるいは入手できない地域で窒素が環境とくに水質にどんな影響を与えているのかを把握する。(4) 将来の社会経済状況や食料需給のシナリオ等を想定した上で、窒素による環境への負荷がどうなるか、それを低減するためにどんな対策が有効かを考える。

窒素フローモデルを作っている。それによって、食料の生産から消費・廃棄までのプロセスの中での窒素の流れが示される（スライド3）。

### 窒素フローモデル



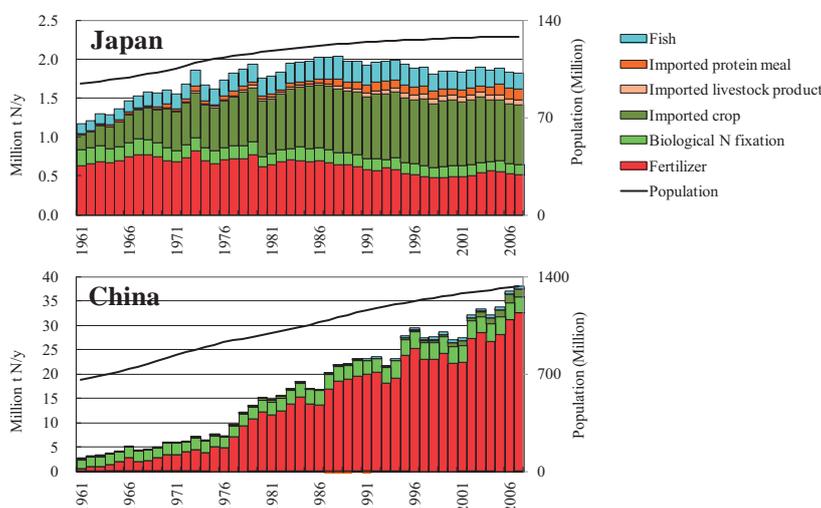
スライド 3

すなわち、国や地域へ窒素が流入し、それが農地・人・家畜等の中を循環し、最終的には環境へ流出していく。流入には、化学肥料の投入や生物学的な窒素固定、食料・飼料の輸入などがある。環境への流出は、(1) 農地から、(2) 人から、(3) 農地や家畜糞尿などから発生するアンモニア、の3つに分けて考える。そして、統計や文献データ、将来に関しては食料の需給シナリオ等をもとに、地表面での窒素のインプット・アウトプットを見積もり、環境への潜在的な負荷を評価する。これを地表面収支と呼ぶ。また、土壌に入った有機物の分解や脱窒などを考えながら、最終的に地下水や河川・海へどう流れていくか、

簡単なサブモデルを使って推定している。

1980年と2005年の地表面収支を比較すると、日本はあまり変わらないが、中国では大きく増大し、日本の10倍から20倍の規模となった。特に窒素肥料（化学肥料）の投入量が大きく増加したことにより、この25年間で農地から環境へ流出した窒素の負荷は約2.5倍になった。人口の増加（1.34倍）よりずっと大きい。日本では化学肥料の使用量が40年間（1961年～2007年）で徐々に減っている代わりに、輸入作物による窒素の流入が多くなった（1990年ぐらいまで急激に増えた）。中国では流入のほとんどが化学肥料で、その量は現在も上昇基調にある（スライド6）。

## 日本と中国の窒素流入量変化

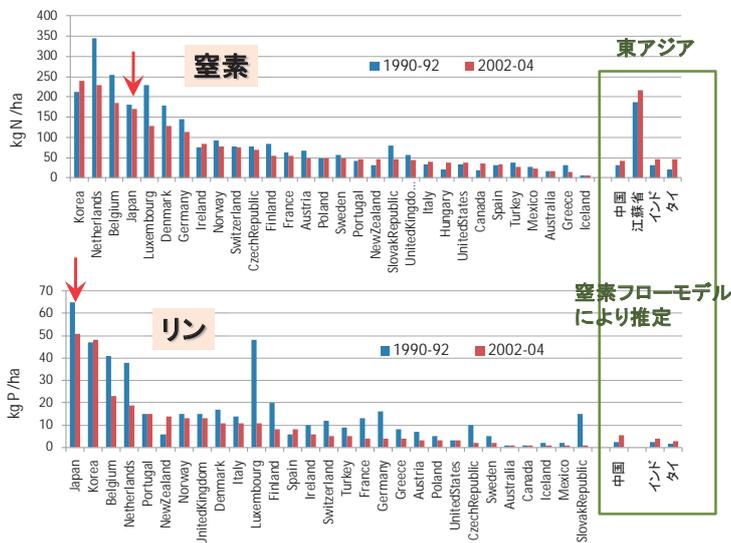


### スライド 6

東南アジアで農業が盛んな国でも、中国に似た傾向がみられる。環境への窒素の流出量（1年間・陸地面積1haあたり）を比較すると、1980年には日本と韓国が一番多いが、2007年には特に人口の多いバングラデシュでは日本を超え、インドや中国などが日本と同程度になりつつあり、ベトナムでも増えている。

一方、EUやOECD加盟国については、農地の余剰養分量を推定し、それをもとに環境管理が行われ始めた。図（スライド8）には窒素とリンの農地面積あたりの余剰養分量を示す。ただしこの農地には草地を含む。これによると日本は窒素が4位、リンが1位（図中で赤の矢印のところ）で、欧米諸国に比べてかなり高い。図の右側は東アジアについて同様の推定をしたものだが、中国は全体としてはまだあまり高くない。しかし地域別に見るとたとえば江蘇省では窒素余剰量が大きい。

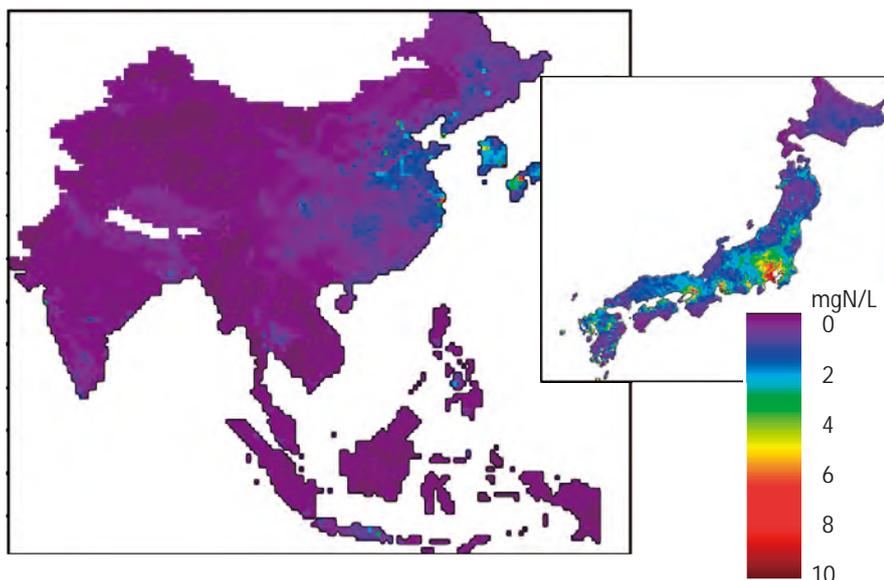
OECD: 環境に配慮した農業に関する指標の一つとして、  
農地における**余剰養分量**(kgN(P)/ha農地)を評価



スライド 8

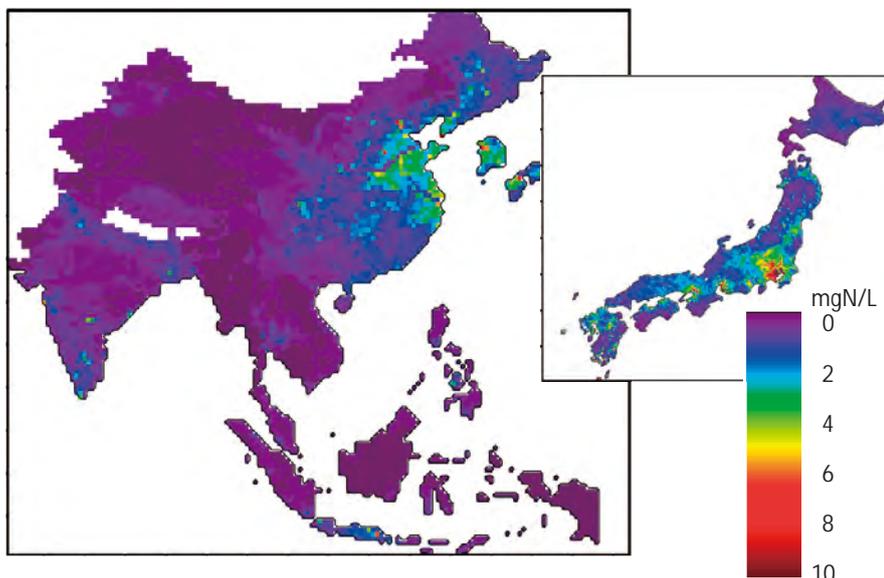
次に、環境への流出量や大気からの NO<sub>x</sub> 沈着量なども考慮し、河川の窒素濃度を推定した (スライド 9・10・11)。1980 年には日本と韓国のみで高濃度だったのが、1990 年、2005 年では中国の東部や東北地方でも高濃度の部分が現れてそれが拡大してきた。インドの一部の地域もかなり高濃度である。日本の場合は公共用水域の測定結果があり、県平均で今のモデルによる推定値とかなり高い相関がある。しかし、東アジアに関してはこのようなデータを手に入できず、この数年間現地でも測っている。データ数が少ないので実態はよくわからないが、中国東部の地下水や河川水で高濃度が観測された。

### N Concentration in River Water in 1980



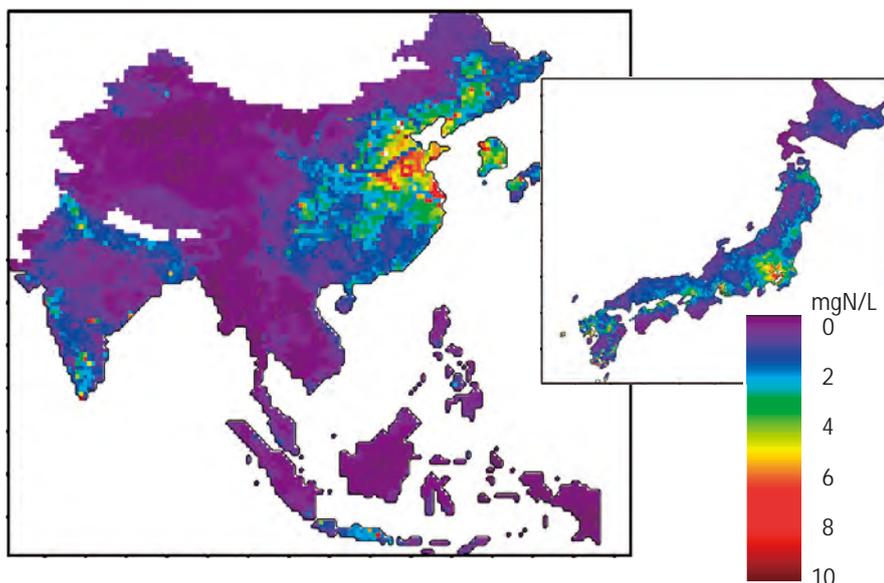
スライド 9

## N Concentration in River Water in 1990



スライド 10

## N Concentration in River Water in 2005



スライド 11

将来予測では、それぞれの国で人口がどのくらい増えるのか、食料特に肉の消費量がどう変化するか、が重要と思われる。多くの国では経済が発展すると肉の消費が増えるが、インドのような例外もあるので社会条件や宗教も考慮する必要がある。非常に粗い試算だが、窒素負荷は中国では2030年に2005年の約1.3倍に、インドでは2倍近くなる（スライド 15）。

## 2030年の食料需要と窒素負荷

|     | 肉消費量                      |               | 穀物消費量                     |               | N負荷                        |               |
|-----|---------------------------|---------------|---------------------------|---------------|----------------------------|---------------|
|     | 2005<br>10 <sup>6</sup> t | 2030<br>/2005 | 2005<br>10 <sup>6</sup> t | 2030<br>/2005 | 2005<br>10 <sup>6</sup> tN | 2030<br>/2005 |
| 中国  | 71.5                      | 1.16          | 206                       | 0.89          | 30.1                       | 1.30          |
|     |                           | ↓             |                           | ↓             |                            | ↓             |
|     |                           | 1.23          |                           | 0.94          |                            | 1.42          |
| インド | 5.7                       | 2.35          | 165                       | 1.51          | 13.7                       | 1.78          |
|     |                           | ↓             |                           | ↓             |                            | ↓             |
|     |                           | 2.50          |                           | 1.60          |                            | 1.96          |

1人当たり肉消費量  
2005 2030  
中国: 54.5 kg/y ⇒ 60.0 kg/y  
インド: 5.1 kg/y ⇒ 9.6 kg/y

**2030年の窒素負荷は、中国で2005年の1.3-1.4倍に、  
インドでは1.8-2.0倍に**

スライド 15

最後に、推定における問題点をまとめると次の通り（スライド 16）。アジア諸国で信頼できる統計データが非常に不足しており、FAOのデータについても信頼性に関する議論がある。また、モデルの検証データが不足している。東アジアに関しては、水質データやアンモニアの揮散等の測定データが不足している。モデルの改良はこれからも必要だが、そもそもデータに大きな不確実性があるので、あまり精緻なモデルを追求する必要はないと考える。

### 広域窒素循環推定の問題点と今後必要とされる研究

- アジア諸国の信頼できる統計データが不足
- モデルの検証データの不足（水質、アンモニア揮散などの測定値。地域平均を推定できることが望ましい）
- モデルの改良の余地は多々あるが、精緻なモデルは必要ではない。
- アジア各国との共同研究により、データの量と信頼性の向上
- 各国の実情に即した、窒素利用効率を向上させる技術研究との連携
- 大気圏・陸域間の物質移動
- 妥当な将来の食料需給シナリオ
- 欧米で使われている指標とのすりあわせ、指標作成

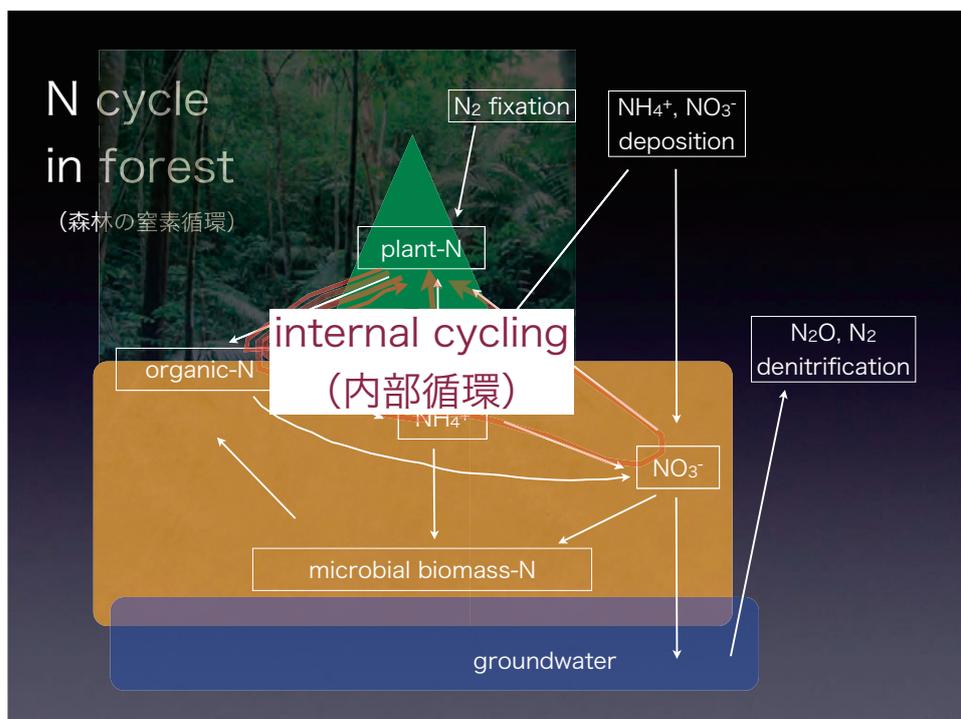
スライド 16

### 3-2. 森林域の窒素動態と $\text{NO}_3^-$ 流出の把握：安定同位体比情報の利用

大手 信人（東京大学 農学生命科学研究科）

自然生態系である森林域での窒素の循環と流出について話す。とくに、ツールとして安定同位体、トピックとして窒素飽和現象を話題にする。

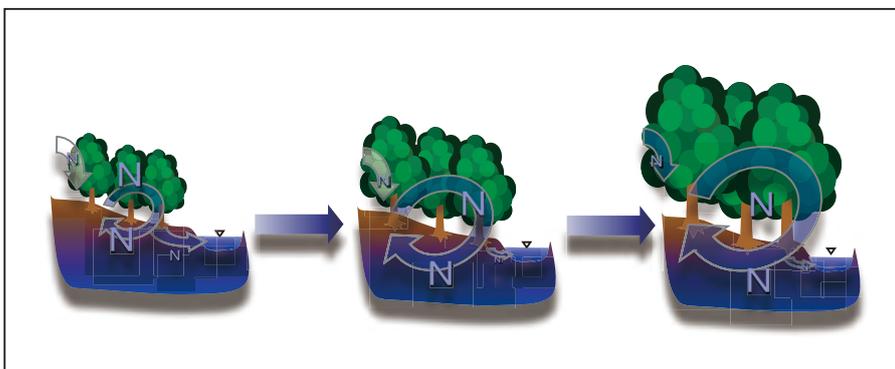
炭素循環が大気と海・陸（植物）との交換が行われるオープンな循環であるのに対し、窒素循環は、陸、海それぞれの内部での循環が特徴となっている。窒素ガス  $\text{N}_2$  が生物として利用しにくいことがその根本にあって、それ以外の形の窒素を内部循環させるように生態系が進化してきた。森林生態系での窒素循環の概念図（スライド4）を示す。各形態の現存している窒素のプールがあって、その間のやりとりがある。たとえば、植物は有機物が分解されてできたアンモニアや硝酸などを使って成長する。われわれは森林の維持機構としてこのような窒素循環を研究してきた。



スライド 4

全世界での窒素降下物量は、この百数十年ほどの間に、特に人口の多いところで大きく増加しており、その原因として農地に投下される肥料や化石燃料の燃焼が考えられる。これらの窒素が自然生態系に降下していくが、森林への影響は森林の成長段階によって異なる。

森林が成長段階にある時は降下物で入ってきた窒素は内部に取り込まれる（スライド7）が、森林が成熟すると内部に取り込む必要がなくなり窒素の流出が始まる（スライド8）。この現象はまず欧米で指摘されて「窒素飽和」と呼ばれている。

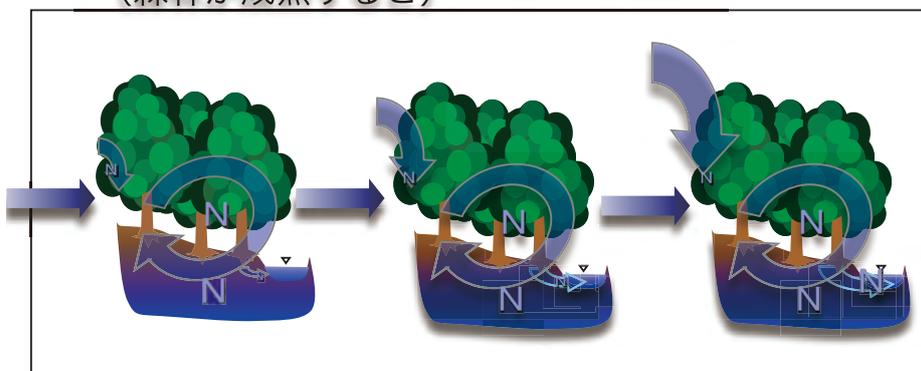


### 森林の成長段階

During forest growing, internal N cycle gets thick, and the N leaching (in  $\text{NO}_3^-$ ) decreases.

スライド 7

But, the forest becomes mature,  
(森林が成熟すると)

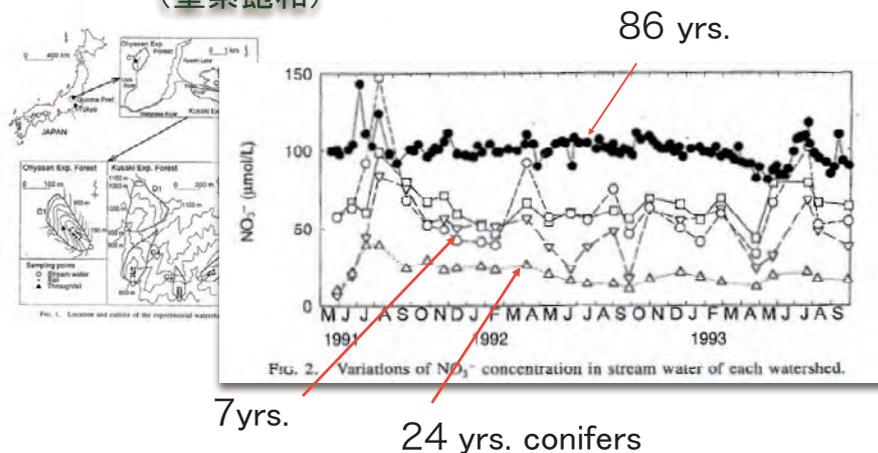


Internal N cycling can not be thick any more, then the excess N starts outflowing from the cycle in the form of  $\text{NO}_3^-$ .

スライド 8

日本でも窒素飽和が起こっていることが 10 年あまり前の研究で示された。群馬県の東京農工大の演習林で、7 年生、24 年生、86 年生の杉人工林について溪流水の硝酸濃度を比べると、若い森林よりも年寄りの森林の方が高い (スライド 9)。

## Nitrogen Saturation (窒素飽和)



Ohrui and Mitchell, 1997

### スライド 9

出典：Ohrui and Mitchell (1997)

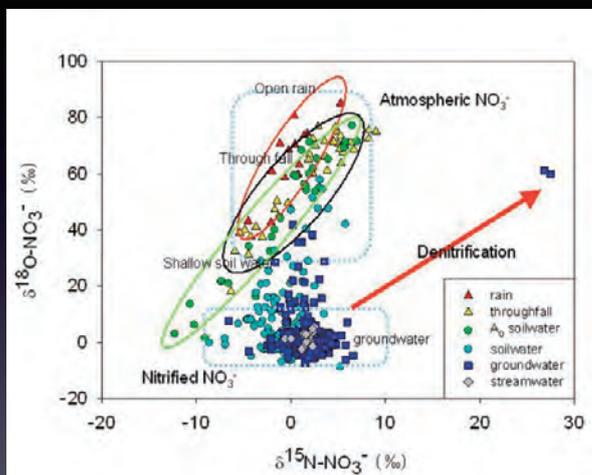
研究者が山地の河川の上流の水質を調べた結果、関東平野の縁辺部など、大都市周辺に硝酸濃度の高い溪流がある。その窒素は大気降水由来と見てよい。

流出する窒素は硝酸イオンの形が多い。森林生態系内の窒素循環（前出スライド 4）には、微生物がアンモニアから硝酸を作る経路（硝化）、その硝酸を植物が吸収する経路と微生物が吸収する経路、微生物が  $\text{N}_2$  または  $\text{N}_2\text{O}$  に変えて空気中に出す経路（脱窒、denitrification）、硝酸が地下水や川に流出する経路がある。土壌中の現存量をはかれば増減はわかるが、それが何が起こった結果かを把握するのはむずかしい。また、溪流に出て行く硝酸が、内部の生物によって作られたものなのか、大気中から降下したものが素通りしているのか、ということも知りたい。

これをトレースするために、硝酸イオンを構成する窒素と酸素の同位体比を使うという方法を採用した。大気降水物は酸素同位体比が高い。また、有機物由来の（生物に取り込まれて排出された）硝酸は窒素の同位体比が低く、化学肥料由来のものは窒素の同位体比が高いという特徴がある。それを測定するのに、脱窒菌法と呼ばれる方法が、2000年代の前半に発達した。脱窒菌法では、サンプルの硝酸イオンを脱窒菌に脱窒させて  $\text{N}_2\text{O}$  ガスにし、これを質量分析にかけることによって、N と O の同位体比を同時に測定することができる。これには  $\text{N}_2\text{O}$  を  $\text{N}_2$  に還元する酵素が欠落した脱窒菌の菌株を使う。

琵琶湖の周辺の小流域での測定結果（スライド 21、22）からは、溪流に出ていく硝酸イオンのほとんどは、大気降水由来のものがそのまま流出するのではなく、微生物による吸収（有機物合成）と硝化を経て出ていくというプロセスになっていることがわかった。

## N-O diagram of $\text{NO}_3^-$

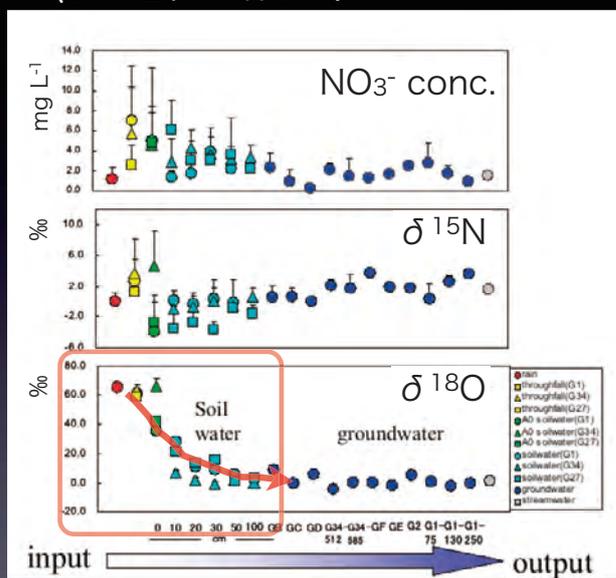


after Osaka et al. (2010)

スライド 21

出典 : Osaka et al. (2010)

## along the hydrological processes (水文過程に沿って)



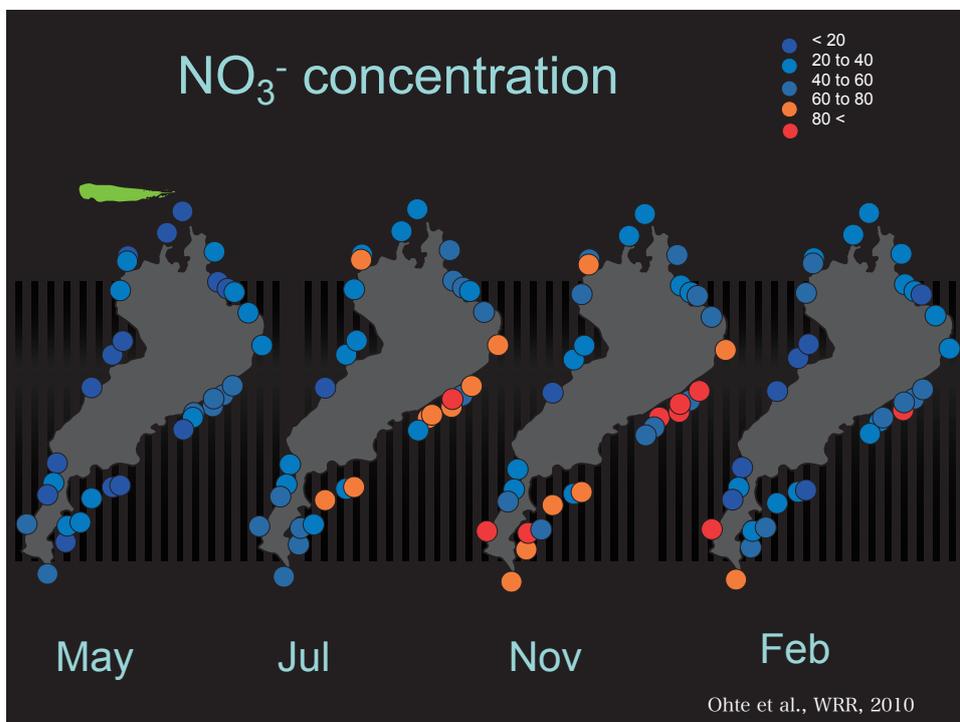
Osaka et al. 2010

スライド 22

出典 : Osaka et al. (2010)

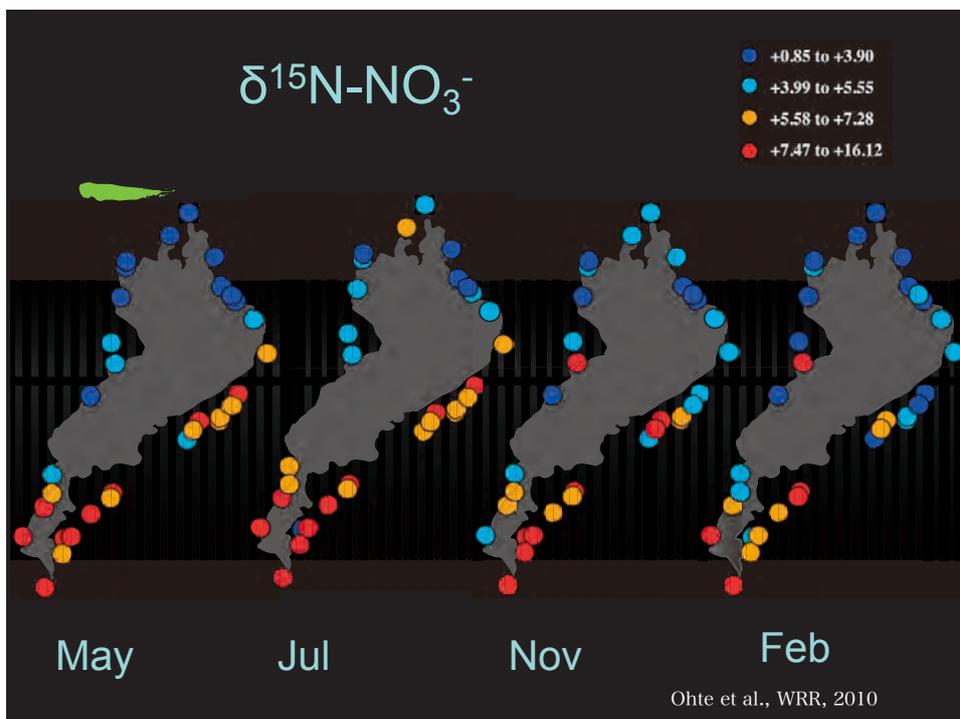
同位体比利用の別の例として、琵琶湖に流入する主要な 32 河川の河口での水質の研究がある。硝酸イオンそのものの濃度は季節性があって農業地帯や都市域の下流で夏から秋にかけて高くなる (スライド 26)。他方、硝酸イオンの窒素 15 の同位体比は季節に関係なく農業地帯や都市部の下流で高くなっている (スライド 27)。窒素濃度が高くなる原因は生活排水と考えられる。人口密度と硝酸イオン濃度との間にも相関があるが、人口密

度と硝酸の窒素同位体比との間の相関のほうが顕著である。そこで、同位体比を人口密度で説明する同位体質量収支モデルを構成することができた。ただし、人が一人あたり年間に排出する下水の硝酸イオン濃度や同位体比の値は資料をもとに与えた。この結果からも、生活排水が第一義的な原因であると言える。



スライド 26

出典：Ohte et al. (2010)。数値の単位は  $\mu$  M。



スライド 27

出典：Ohte et al. (2010)

このように、窒素の同位体比を計測することで、生態系の変化を解明することができる。2004年から数年間参加したCREST水循環の研究では、水の窒素負荷が生態系にどのように影響を及ぼしていくかを、食物連鎖の各段階の生物の同位体比を使って調べた。

### 引用文献

- Ohrui, K.; Mitchell, M.J. 1997. Nitrogen saturation in Japanese forested watersheds. *Ecological Applications*, 7, p. 391-401.
- Ohte, N.; Tayasu, I.; Kohzu, A.; Yoshimizu, C.; Osaka, K.i.; Makabe, A.; Koba, K.; Yoshida, N.; Nagata, T. 2010. Spatial distribution of nitrate sources of rivers in the Lake Biwa watershed, Japan: Controlling factors revealed by nitrogen and oxygen isotope values. *Water Resources Research*, 46, W07505, doi: 10.1029/2009WR007871.
- Osaka, K.; Ohte, N.; Koba, K.; Yoshimizu, C.; Katsuyama, M.; Tani, M.; Tayasu, I.; and Nagata, T. 2010. Hydrological influences on spatiotemporal variations of  $\delta^{15}\text{N}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  of nitrate in a forested headwater catchment in central Japan: Denitrification plays a critical role in groundwater. *Journal of Geophysical Research*, 115, G02021, doi: 10.1029/2009JG000977.

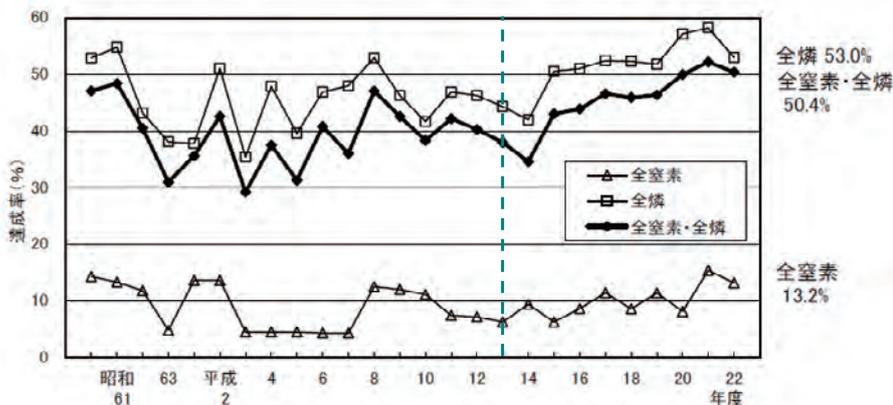
### 3-3. 日本の湖沼・沿岸域における窒素負荷対策の課題

山室 真澄 (東京大学 新領域創成科学研究科)

窒素負荷の問題として、健康問題がありうるが、日本では今のところ水道源水の硝酸濃度が 10 mg/L を超えることはないので、直接的な健康影響はないだろう。環境問題としては主にアオコや赤潮等の一次生産者（低次生産者）の異常増殖が話題になるが、ここでは観点を变えて魚や鳥のような高次生産者から見た窒素の問題を説明したい。

現在 11 ある湖沼水質保全特別措置法の指定湖沼では 5 年に一度、次期の COD（化学的酸素要求量）や窒素・リンの濃度の規制目標を達成するための対策の見直しをする。指定湖沼で問題になるのは有機汚濁負荷による貧酸素化なので、水質・水環境管理はつまり富栄養化対策になる。環境基準達成率（スライド 4）を見ると、特に平成 13（2001）年以降、（全リンの環境基準達成率は 50% を超えているにもかかわらず）全窒素の環境基準達成率が 10% 位と非常に低い。湖沼別に濃度を見ると、全リン濃度はどこもほぼ横ばいだが、手賀沼だけが一時期（平成 13～15 年）顕著に減っている。全窒素でも手賀沼が少し減少した以外は横ばいである。窒素の目標値達成率がこれだけ低いのは、目標値の設定が高過ぎるからだと思う。

図 5 湖沼における全窒素及び全燐の環境基準達成率の推移

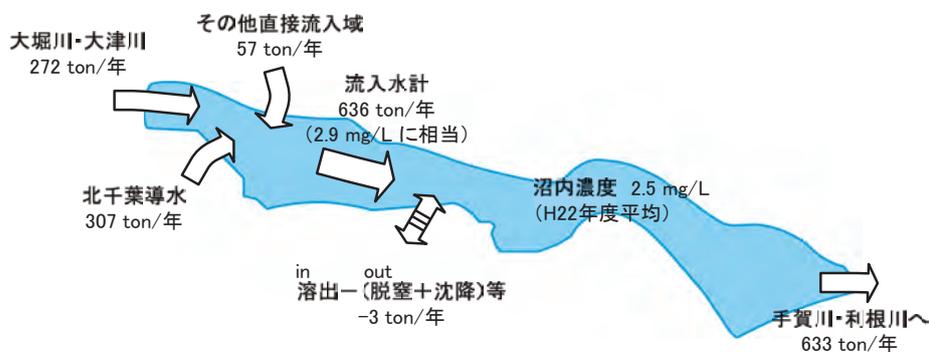


平成22年度公共用水域水質測定結果(環境省水・大気環境局)

スライド 4

手賀沼では、平成 12（2000）年までは COD [化学的酸素要求量] が高止まりだったが、導水（利根川の水を直接手賀沼に入れる事業）を始めると下がり、今は一定の導水量に対して一定の COD で落ち着いている。逆に手賀沼に入る年間窒素負荷量は導水で増えている。このように、湖水の有機物濃度は窒素・リンの流入負荷量や濃度を減らさなくても削減できる（スライド 8）。

### 手賀沼導水事業(平成12年度(2000年)開始)



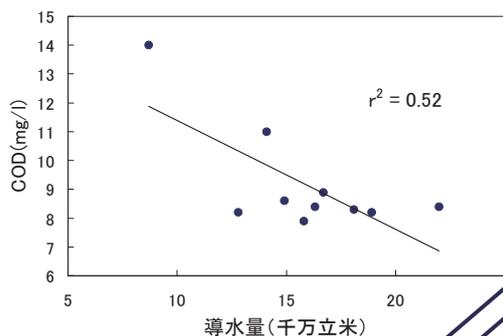
導水が増えた分、年間の窒素・リン負荷量は増えている

→ 湖水の有機物濃度(COD)は窒素・リンの流入負荷量や濃度を減らさなくても削減できる

#### スライド 8

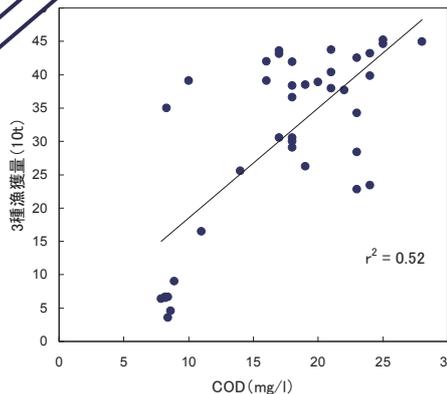
新藤氏の講演で海外のデータを得るのが困難だという話があったが、日本でも信頼できるデータがそろっているとは限らない。手賀沼に流入する大堀川と大津川の2河川は隣り合っているが、同じ雨が降っても両者で基本的な流量のデータでさえ大きく食い違う場合があった。さらに水質については、公共用水域水質のモニタリングは基本的に平水時のみ月1回行うが、負荷が入るのは主に洪水時であり、それがきちんと測られているわけではない。また分析の精度に問題があることもある。各地の公共用水域水質測定機関が同じサンプルを分析する試験で値が10倍も違っていたりする。しかも今、自治体は予算削減の中で環境の分析件数を減らしている。公共用水域の水質モニタリングは危機的状況にあると感じている。

次に、高次生産者の話。日本は公害列島と言われるほどであった1971年には手賀沼でも赤潮やアオコが最も多く、漁獲量はそれから1990年代なかばまでずっと高止まりだったが、導水によって有機物濃度(COD)が減り(前述)、漁獲量も減った。これには明らかな相関関係がある(スライド11)。これは、浄化対策をしてきた琵琶湖や諏訪湖でもみられる。これは先進国でも問題になっており、アメリカの生態学者スコット・ニクソンは2009年に「oligotrophication(貧栄養化)」と呼んで「生態系への有機物の供給量の減少」と定義した。



諏訪湖・琵琶湖でも漁獲量が減少しており、植物プランクトンによる一次生産量が減少していることが原因と考えられている

Oligotrophication (noun) – a decrease in the rate of supply of organic matter to an ecosystem. (Nixon, 2009)



スライド 11

引用英文の出典：Nixon (2009)

瀬戸内海における貧栄養化を広島大学の山本氏が調べている。総量規制でリンが減っても窒素が下げ止まらないので N/P 比が変わり、植物プランクトンも珪藻（ケイソウ）よりも渦鞭毛藻（ウズベンモウソウ）が増え、それによって水産漁獲量が減ると山本氏は論じている。さらに、ダム建設の影響でシリカがダムに沈降し海に出てこないことも渦鞭毛藻が増える原因ではないかと指摘されている（スライド 17）。

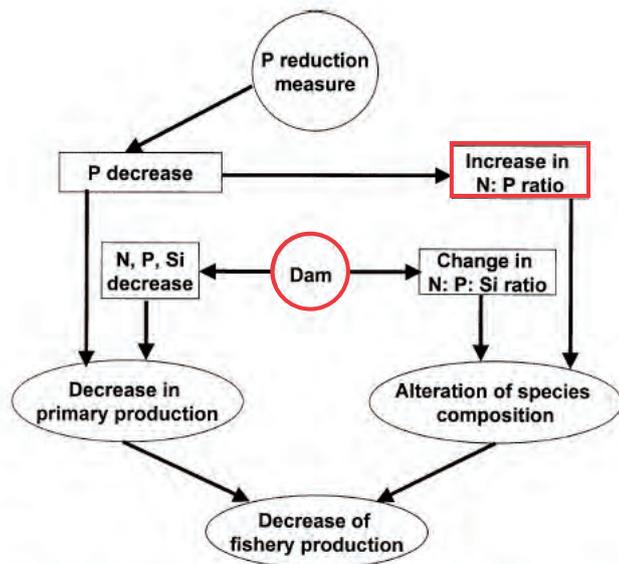


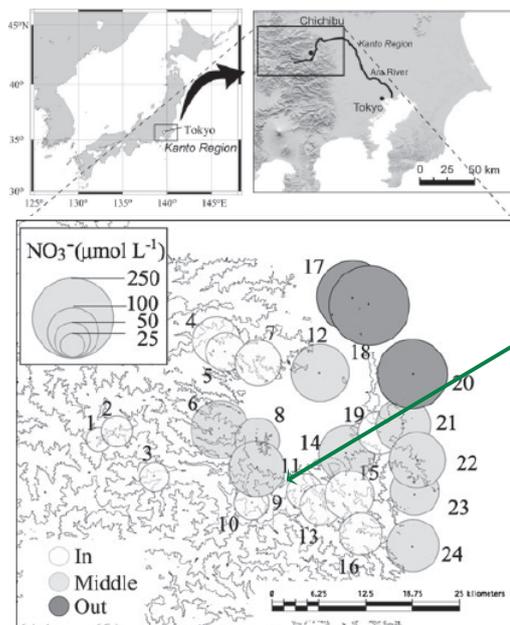
Fig. 5. Processes presumed to have occurred in the course of phosphorus reduction during 1980s and 1990s in the Seto Inland Sea, Japan.

Yamamoto 2003

スライド 17

出典：Yamamoto (2003)

今後日本で何が起こるかを考えると、燃烧起源窒素には自国の責任と他国の責任の両方がある。前者の例としては、海風によって首都圏の燃烧起源窒素が秩父地方、特に寄居のあたりに沈降する（スライド 19）。しかも、秩父地方には首都圏の水源となるダムが幾つかあるが、これは窒素飽和現象がまだわかっていなかった時期に造ってしまった。



Tabayashi & Koba (2011)



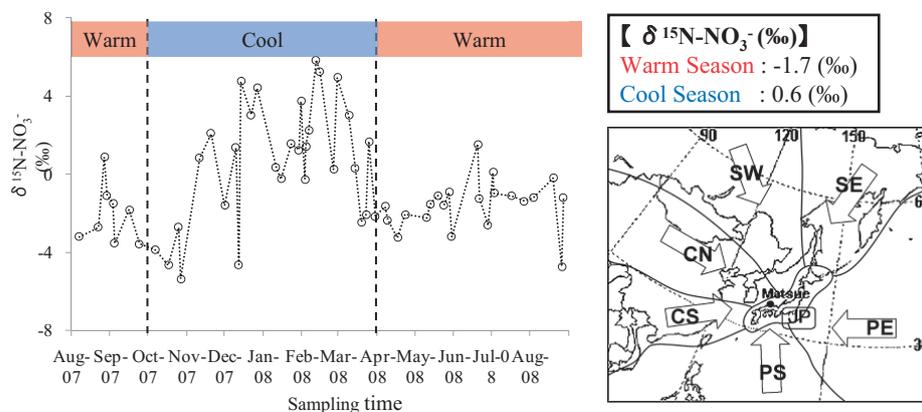
浦山ダム

スライド 19

図の出典：Tabayashi and Koba (2011)

後者の例として、宍道湖に流れている斐伊川の上流では窒素濃度が季節変動を繰り返しながら次第に増えているが、それが下流の宍道湖にも来ている。これの起源を調べるためトレーサーを使い、また風上にさかのぼる流跡線（バックトラジェクトリー）を計算すると、中国から高濃度の硝酸が来ていることがわかる（スライド 23）。北九州の渓流域も同様である。日本海側では大陸間規模で対策を立てることが重要になる。

## Result — $\delta^{15}\text{N-NO}_3^-$ in rain samples



- ▶  $\delta^{15}\text{N-NO}_3^-$  値は冬季に高く、夏季に低くなる季節変化を示した
- ▶ CNやSWと正の相関を持ち、JPやPE・PSとは負の相関が見られた

【 $\delta^{15}\text{N-NO}_3^-$ 】

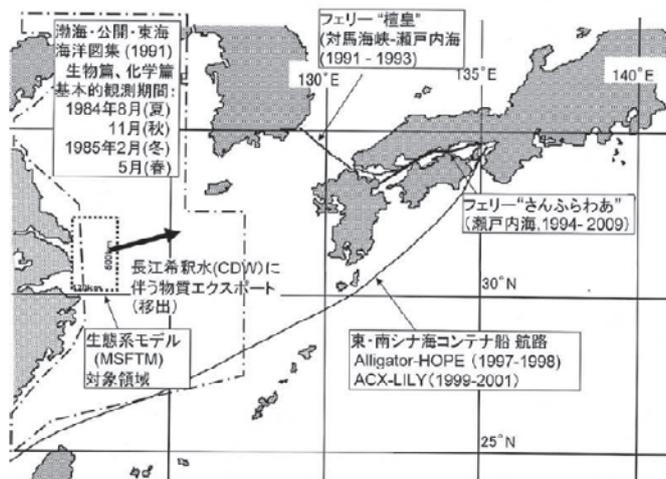
自然起源 < 人為起源



冬季は**自然由来**よりも高い $\delta^{15}\text{N}$ を有する**人為起源(燃烧由来)**の $\text{NO}_x$ が大陸から輸送されたため  
(Tabayashi et al. in prep)

スライド 23

東アジアでは、特に中国における巨大ダム開発が重要になる。中国は三峡ダムの他メコン川の上流でも大きなダムを建設しているが、下流の国との間で対策が出来ていない。国立環境研究所の原島氏は、肥料等に由来する窒素・リン負荷が増えると同時に巨大ダムにより下流に流れるシリカが減ることで、渦鞭毛藻が増え、食物連鎖を通じてクラゲが増えると考えた。エチゼンクラゲの増加を含む東アジア縁辺域の生態系変質の因果関係はN・P・Siの比だけで一概に説明できないが、それらがベースになり他の要因が加わって起こるのではないかと結論づけている。(スライド 28)



東アジア縁辺海的环境変質は、陸域からのN、P、Si流入組成変化だけで説明できるものではないが、このベースライン上に他の複数要因が重なったことによるものと推定できる。

原島(2009)

スライド 28

出典：原島 (2009)

まとめると次の通り。日本では、水域の窒素やリンを減らすのが一概によいのではなく、高次生産を養っているという部分も考えないといけない。ただし、対策を立てる上で基礎となる環境モニタリングの精度は必ずしも十分ではない。かつて激甚な公害を克服した時には、地方自治体の環境研究所が調査し、地方条例で対策が進んだ。しかし今では技術者・科学者はリストラにあい、研究所そのものがなくなっている。こうした状況で、モニタリングの担い手をどうするかも今後考えなければいけない。その意味では、データの一元化を省庁が自治体の分まで担うべきだが、省庁によって同じ対象でも分析方法が違うといった問題もある。アジア全体では、燃焼起源やダムの問題もあり、陸水や沿岸域で総体的に窒素を減らす対策が必要かもしれない。

### 引用文献

- 原島 省 . 2009. 流下栄養塩組成の人為的变化による東アジア縁辺海域の生態系変質の評価研究 (1) N、P、Si 流下比変化による海洋生態系変質の総合解析 . 環境省環境研究総合推進費報告書 D-061. <http://www.env.go.jp/earth/suishinhi/wise/j/pdf/J08D0061100.pdf>
- Nixon, S.W. 2009. Eutrophication and the macroscope. *Hydrobiologia*, 629, p. 5-19.
- Tabayashi, Y.; Koba, K. 2011. Heterogeneous atmospheric nitrogen deposition effects upon the nitrate concentration of stream waters in a forested mountain area. *Water Air and Soil Pollution*, 216, p. 105-115.
- Yamamoto, T. 2003. The Seto Inland Sea - Eutrophic or oligotrophic? *Marine Pollution Bulletin*, 47, p. 37-42.

### 3-4. 大気循環と窒素循環

秋元 肇（日本環境衛生センター アジア大気汚染研究センター）

窒素は大気環境の面でも注目されている。東アジアではその理由は大きく2つある（スライド2）。1つは、大気そのものとして。オゾン汚染とPM2.5 [直径2.5 μm以下の粒子状物質]汚染が健康、農作物、自然植生に及ぼす影響は、経済的損失コストを考えると現時点で最大の環境問題であり、オゾンとPM2.5の前駆体物質である窒素酸化物の削減が非常に重要だとの認識が出てきている。もう1つは、陸域生態系との関係から。ヨーロッパでは以前からだ東アジアでもかつての酸性化から富栄養化へと視点が移ってきている。硝酸イオン、アンモニウムイオンの沈着による環境の富栄養化や窒素飽和への関心が高まってきている。最近では生物多様性との関わりからも議論が進みつつある。

#### なぜ今窒素か？ 一東アジア大気環境の視点から一

##### 1. オゾン汚染、PM<sub>2.5</sub>汚染

O<sub>3</sub>: 健康影響、農作物影響、自然植生影響

PM<sub>2.5</sub>: 健康影響

経済的損失コストの視点から最も重要な大気環境問題

O<sub>3</sub>, PM<sub>2.5</sub>の前駆体物質として窒素酸化物(NO<sub>x</sub>)が最も重要

##### 2. 酸性化から富栄養化へ (from Acidification to Eutrophication)

東アジア酸性雨モニタリングネットワーク(EANET)の10年

降水酸性化による環境影響は当面の生態系リスクではない

NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>沈着による富栄養化、窒素飽和への関心の高まり

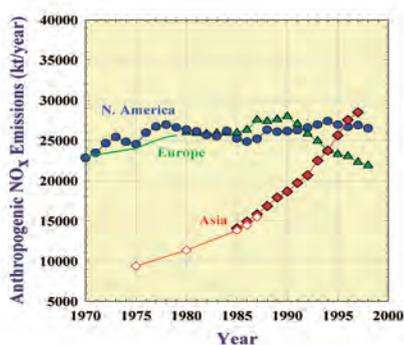
#### スライド2

NO<sub>2</sub>とNOを総称してNO<sub>x</sub>と言っている。NO<sub>x</sub>に関する数量はNO<sub>2</sub>換算で示す習慣になっている。なお、N<sub>2</sub>Oは温暖化原因物質だが、大気中で安定な化合物なので、大気汚染という視点からの考慮対象に含まれていない。

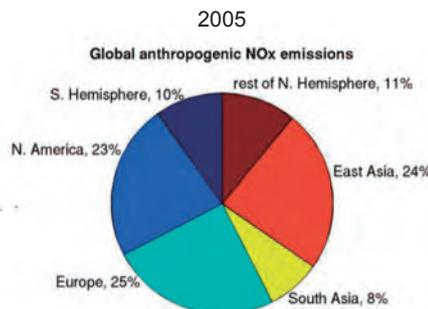
世界の大陸別の1970年代から1990年代にわたるNO<sub>x</sub>の排出量変化を見ると、アジアでの増加が著しい（スライド3左図）。かつては北アメリカとヨーロッパが多かったが、1990年代なかばにアジア（これは南アジアも含む）が追いつき、追い越した。2005年時点ではアメリカ、ヨーロッパ、東アジアがほぼ25%ずつで拮抗している。南アジアを加えるとアジア大陸が圧倒的に多い（スライド3右図）。アジアの内わけを見ると1980年から2005年までの間にアジア全域で3.5倍、中国では5倍に排出量が増えている（スライド4）。日本はほぼ一定で、2000年以降はやや減少し、2005年の量は約4Mt/年である。

## アジアにおける窒素酸化物排出量の増大

2000年以降、アジア大陸におけるNOxの人為排出量は欧州、北米大陸を凌駕し、2005年には、東アジア(北東アジア・東南アジア)だけで欧州・北米大陸に匹敵



Akimoto, Science (2003)



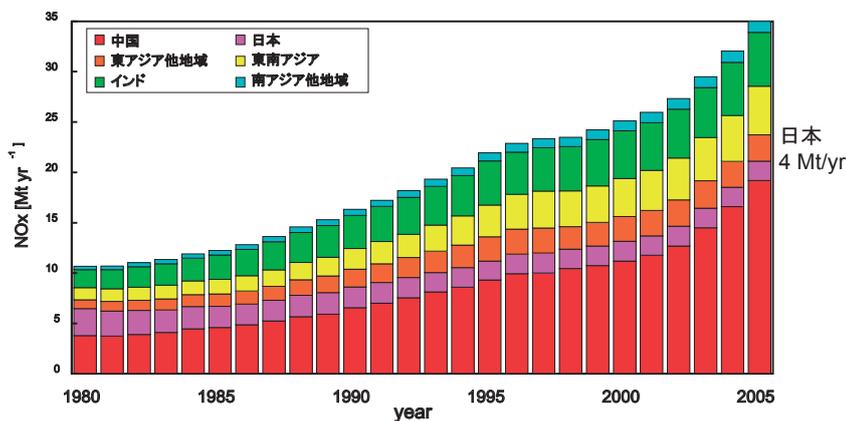
HTAP Report 2010

スライド 3

出典：左は Akimoto (2003)、右は HTAP (2010)

## アジアにおけるNOx排出量の変化(1980~2005年) (REAS)

アジア(中国)のNOx排出量は3.5(5.0)倍に増加(1980~2005年)



Ohara et al., ACP, 2007.

NOx排出量は一般にNO<sub>2</sub>換算

スライド 4

出典：Ohara et al. (2007)

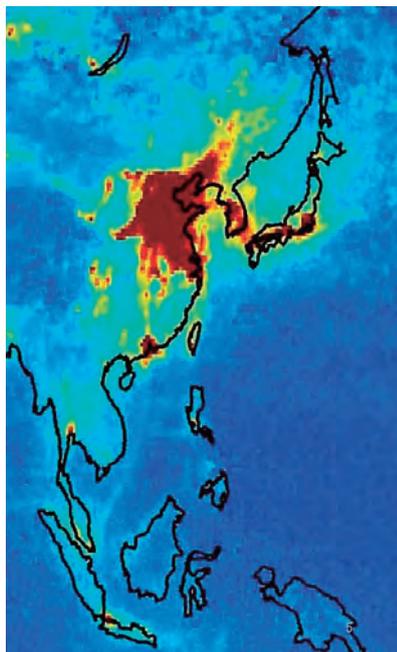
スライド 5 は衛星観測による NO<sub>2</sub> の対流圏カラム密度 (面積あたりの鉛直積算質量) だが、地表の NO<sub>2</sub> の分布もほぼ同じ形である。中国の中東部が一番ひどいが、朝鮮半島や、日本の東京から瀬戸内海・北九州あたりまでの地域も高汚染地域である。NOx 単位面積あたりの排出量でも日本は決して中国よりも良好とは言えない (スライド 6 左図)。またその値を使った化学輸送モデルによる計算からは大気からの硝酸イオンの沈着が陸域のほか沿岸の海域でも相当な量あることが予想された (スライド 6 右図)。

東アジアにおける  
NO<sub>2</sub>汚染の衛星観測

NO<sub>2</sub> 対流圏カラム密度  
SCIAMACHY (2004.5 ~ 2005.4)

窒素酸化物汚染から見た場合日本の立ち位置  
日本の本州以南はホットスポットの一つ

Martin et al., JGR, 2006

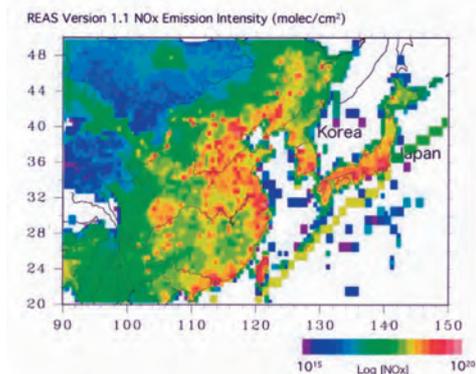


スライド 5

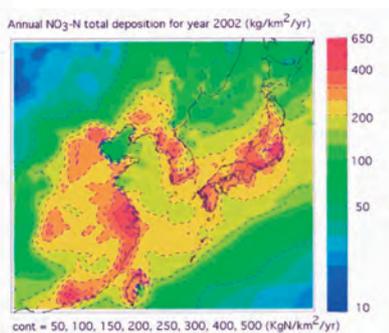
出典 : Martin et al. (2006)

北東アジアにおけるNOxの排出量とNO<sub>3</sub>-沈着量の地域分布

NOxの排出量(2000年)  
エミッションインベントリ: REAS v.1.1



NO<sub>3</sub>-の沈着量(2002年)  
RAMS/CMAQ 領域モデル



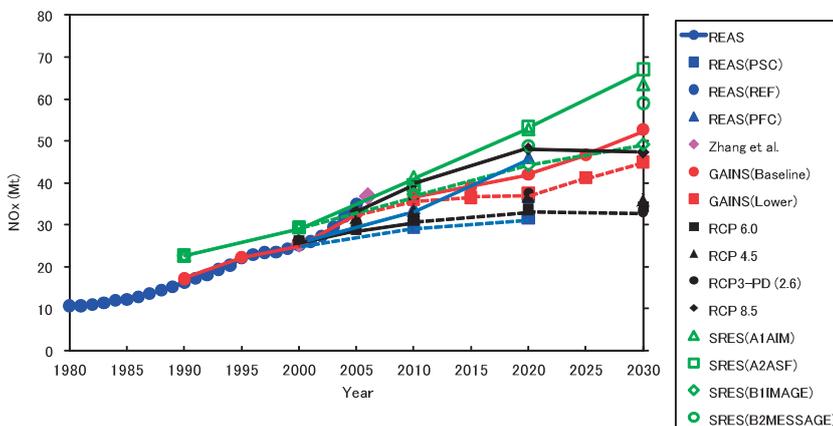
Uno et al. 2007.

スライド 6

右の図の出典 : Uno et al. (2007)

環境問題では将来の見通しを持って対策を考えることが重要である。NO<sub>x</sub>の排出量についても将来予測の取り組みがある。その結果(スライド7)はシナリオによってだいぶ差がある。これにはシナリオごとの前提(環境やエネルギーに関する政策など)による差もあるが、用いるデータベースによる推定値の差もかなりある。

### アジアにおけるNOx排出量の将来予測



Ohara: Prepared for HTAP 2010 assessment report, 2010

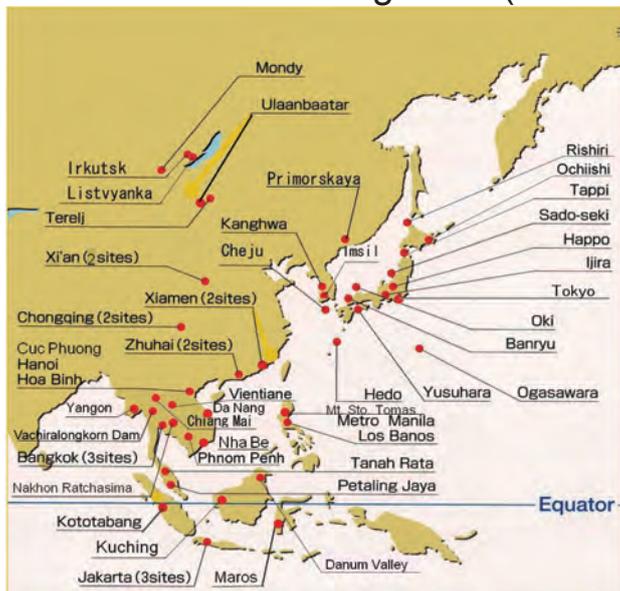
### スライド 7

出典：HTAP（2010）のために大原利真氏が作成した資料

東アジア酸性雨ネットワーク（EANET）はカンボジア、中国、インドネシアなど北東アジア・東南アジアの13か国で構成されている政府間のモニタリングネットワークである。観測サイトは55か所ある（スライド9）。雨の中の各種の硫酸イオン、硝酸イオン、その他のイオン成分のモニタリングに力を入れている。気体やエアロゾルのモニタリングも始めているが、雨ほどはそろっていない。日本では越境汚染を意識して離島の観測点が多いが、内陸の湖のサイトもある。

3 セッション1. 窒素循環の実態解明

### EANET Monitoring Sites (as of 2010)



Rain Water Comp. /Wet Deposition  
**55 Sites**  
Gases & Aerosol Concentration /Dry Deposition  
**44 Sites**

Data available at:  
<http://www.eanet.cc/product/index.html>

### スライド 9

最近5年間の雨の中の濃度で見ると、硫酸・硝酸の合計のうちの硝酸の比率が、たとえば日本の地点では0.3～0.5になっている。硫黄酸化物については、排出源対策が中国でも進んでおりそれほど増える状況にない。それに対し、窒素のほうはほとんどの国で増え続けている。またアンモニウムイオンと硝酸イオンの比率を見ると日本は比較的アンモニウムイオンが低い（合計のうち0.4から0.5）。他の国のうちにはアンモニウムイオンが非常に多い（0.7から0.8）ところも多い。

EANETサイトにおける陸水への窒素離脱（リーチング leaching）の事例が報告されている（Nakahara et al., 2010）。岐阜県の伊自良湖の集水域における酸性化と窒素離脱の観測を行ったところ、大気からの窒素沈着が、日本のEANETサイトで最大だった。ただし、日本の内陸のEANETサイトは数少ない。ここに沈着する窒素の発生源は名古屋あたりが主であろう。窒素沈着量は1.1 kmol/ha/年で、欧米で地表水へのNO<sub>3</sub>放出を促進するとされているしきい値0.7 kmol/ha/年（10 kg N/ha/年）を超えている。他にもそういう地域があるものと予想される。

今後の窒素循環の解明に必要な研究（スライド14）としては、大気側からはまず、大気沈着による地表への負荷量の正確な把握が必要。陸水への窒素離脱は大気からの窒素インプットに非常に強く関連しているため。大気化学の研究者と陸域生態系の研究者との一体型の研究が必須である。コミュニティ、視点、興味の対象が異なるのでむずかしいが、これをやっていかないと次の新しい、おもしろい結果が出てこないのではないかと。また、モニタリングデータの適切な評価、モデリングによる沈着量の地域分布、アジアレベルの視点が重要。大気モデルは直接地上のデータがないところの状況を推定することにも役立つ。

## 窒素循環解明に必要な研究

### 1. 大気沈着による地表への負荷量の正確な把握

大気化学研究者と陸域生態研究者との一体型研究が必須。

- ・モニタリングデータの適切な評価
- ・モデリングによる沈着量の地域分布
- ・アジア域への視点

### 2. 窒素の大気中排出・輸送・変質・沈着過程の正確な把握

- ・NO<sub>x</sub>, NH<sub>4</sub>の排出量インベントリの精緻化と将来予測  
自然発生源（土壌・雷、他）と人為発生源（工業起源・農業起源、他）
- ・領域化学輸送モデルの精緻化（空間分解能：80 km → 20 km → 5 km）
- ・沈着モデルの精緻化（乾性沈着・湿性沈着過程）

## スライド 14

2つめは、窒素の大気中排出・輸送・変質・沈着過程の正確な把握。大気側だけの問題ではあるが、モデル研究がだいぶ進んできたなかで、特に窒素に関してはNO<sub>x</sub>（NO<sub>3</sub>）とアンモニアの排出量インベントリの精緻化と将来予測を進める。特に自然発生源に関する

る把握が遅れている。土壌からの NO<sub>x</sub> ないしアンモニア、あるいは雷からの NO<sub>x</sub> など。人為発生源では工業起源は比較的押さえやすいが農業起源の NO、アンモニアは難しく、今後インベントリの精緻化が必要。

領域化学輸送モデルの精緻化は、東アジア全域でやるときは大体 80 km メッシュぐらいで計算するが、日本だけを対象にすると 20 km、集水域の生態系を議論するならば 5 km ぐらいのメッシュでの計算をして窒素の負荷や沈着量を計算する必要があるのではないか。沈着モデルの精緻化では乾性沈着や湿性沈着などのプロセス精度の向上が必要ではないか。

## 引用文献

- Akimoto, H. 2007. Global air quality and pollution. *Science*, 302, p. 1716-1719.
- HTAP (Task Force on Hemispheric Transport of Air Pollution) . 2010. Hemispheric Transport of Air Pollution 2010. [http://www.htap.org/publications/assessment\\_reports.htm](http://www.htap.org/publications/assessment_reports.htm)
- Martin, R.V.; Sioris, C.E.; Chance, K.; Ryerson, T.B.; Bertram, T.H.; Wooldridge, P.J.; Cohen, R.C.; Neuman, J.A.; Swanson, A.; Flocke, F.M. 2006. Evaluation of space-based constraints on global nitrogen oxide emissions with regional aircraft measurements over and downwind of eastern North America. *Journal of Geophysical Research*, 111, D15308, doi:10.1029/2005JD006680.
- Nakahara, O.; Takahashi, M.; Sase, H.; Yamada, T.; Matsuda, K.; Ohizumi, T.; Fukuhara, H.; Inoue, T.; Takahashi, A.; Kobayashi, H.; Hatano, R.; Hakamata, T. 2010. Soil and stream water acidification in a forested catchment in central Japan. *Biogeochemistry*, 97, p. 141-158, doi:10.1007/s10533-009-9362-4.
- Ohara, T.; Akimoto, H.; Kurokawa, J.; Horii, N.; Yamaji, K.; Yan, X.; Hayasaka, T. 2007. An Asian emission inventory of anthropogenic emission sources for the period 1980-2020. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 7, p. 4419-4444, doi:10.5194/acp-7-4419-2007.
- Uno, I.; Uematsu, M.; Hara, Y.; He, Y.J.; Ohara, T.; Mori, A.; Kamaya, T.; Murano, K.; Sadanaga, Y.; Bandow, H. 2007. Numerical study of the atmospheric input of anthropogenic total nitrate to the marginal seas in the western North Pacific region. *Geophysical Research Letters*, 34, L17817, doi:10.1029/2007GL030338.

### 3-5. セッション 1 の討論

#### 1. 窒素の動態の観測・計測技術について

- 技術的には確立したものが多い。
- 政府・自治体が設定したパラメータについては、企業が積極的に開発するようになる。
- トレーサビリティを確保するのはむずかしい。

#### 2. データへのアクセスについて

- 日本国内でも信頼できるデータが不足している。地方自治体による環境モニタリングの予算削減のために観測そのものが減っていることや、観測は続いていてもデータの質が低くて研究に使えないことがある。観測の維持と、観測にかかわる人の能力開発が必要。
- 中国等でも多くの地点でデータが取られている。まずその現状を把握することが重要。
- 外国のデータの入手は簡単でない。ただし、中国の大気汚染の場合は国内の公開要求の世論もあって事情が変わってきている。
- 研究機関レベルで協定を結べる場合もあるが、個別研究者レベルではデータの入手が困難なことが多い。データ共有・公開の枠組みができるとよい。

#### 3. 窒素循環の目標設定

- 炭素が地球温暖化への寄与という一つの尺度で議論されているのに対し、窒素の影響は様々なレベルで起こり、評価尺度が一つに定まらない。窒素が環境中に増えていてもそれがどう悪いのかをアピールすることがむずかしい。
- これまでの環境政策では湖沼・河川の富栄養化は防止するべきだとされてきたが、漁業等の生物生産を維持するという観点では自然状態よりも高いレベルの富栄養化を維持する政策もありうる。
- 水の窒素をどこまで減らせばよいのかの社会的要求が明確になれば、水処理の技術開発も進む。
- 窒素循環と炭素循環の関連に注目し、地球温暖化防止と大気汚染防止のコベネフィットをめざすべき。
- 窒素循環とリン循環の関連も重要。窒素は余るがリンは不足する。施策にはリン資源の観点も必要。
- 窒素を循環させるのに必要なエネルギーを最小にすることを目指し、窒素固定の量を減らしていくべき。

#### 4. 科学と政策の関係について

- 生態系モデルは、学術的な意味だけでなく人々の合意形成のツールとして有効。
- ほんとうの社会的期待を知るために科学者だけでない社会的議論が必要。
- 窒素循環の場面別にそれぞれ指標を共通化するとよい。
- これまで行政が施策を決めてから科学的裏づけのようなものを求めることが多かった。これからは科学的知見に基づくモデルが施策決定の根拠として使われるようにしたい。

## 4. セッション2. 対策

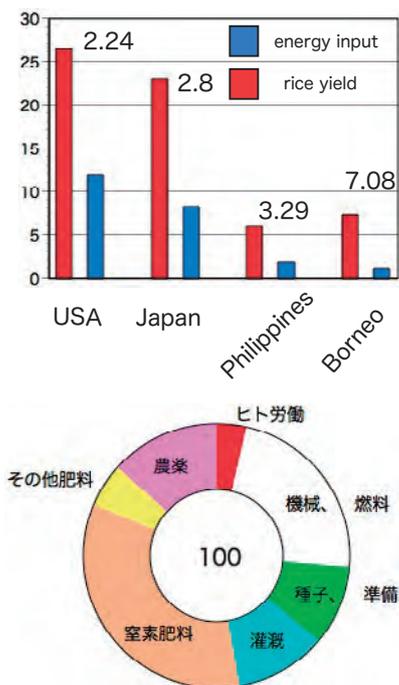
### 4-1. 窒素化学肥料の環境負荷の正体

間藤 徹 (京都大学 農学研究科)

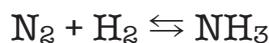
工業的窒素固定は世界全体で 2000 年ごろに生物的窒素固定と同じ規模になったと言われる。今は工業的窒素固定のほうが大きいだろう。なぜ工業的な窒素固定が行われるかという、土壌中にアンモニウムイオンを増やして作物の生育を促進するために化学肥料として窒素を投入するためである。

土壌中への窒素の負荷量が増えているが、重要なのはその内訳である。耕地土壌においては土壌の有機物が増えているのは確かで、インプットが倍になった分の過剰な窒素は恐らく炭素と結合して土壌中の有機物あるいは地表の生ごみのような形になっている。これが硝酸イオンになる。植物が吸収してくれるか脱窒にまわればよいのだが、余る分が、環境の富栄養化、土壌の酸性化、地下水の硝酸蓄積につながっている。ただし、硝酸態窒素の過剰、有機物の過剰によって、目に見えて気温が上がるとか生物環境が悪くなるとかいう問題が起きてはいないのが現状ではないかと思う。

化学肥料を使うこと自体にも問題がある。工業的窒素固定には水素の供給に炭化水素が使われて CO<sub>2</sub> が出る。また、日本のイネ作のエネルギー投入 (スライド 5 の円グラフ) を見ると、窒素肥料に投入全エネルギーの 3 分の 1 が使われている。工業的な窒素固定にこれだけのエネルギーが必要となり、CO<sub>2</sub> も排出される。だが、現在 70 億を超え恐らく 2050 年には 90 億ぐらいとなる地球人口を支えるための食料生産には、窒素の投入は不可欠であり、環境の負荷をどう減らすかの議論が必要である。



化学肥料は製造時CO2を放出する



この水素は石炭、ナフサ、天然ガスの改質で供給され、1トンのNH<sub>3</sub>製造に0.8トンのナフサ、または0.65トンの天然ガスが使用され、2.5トンのCO<sub>2</sub>が発生する

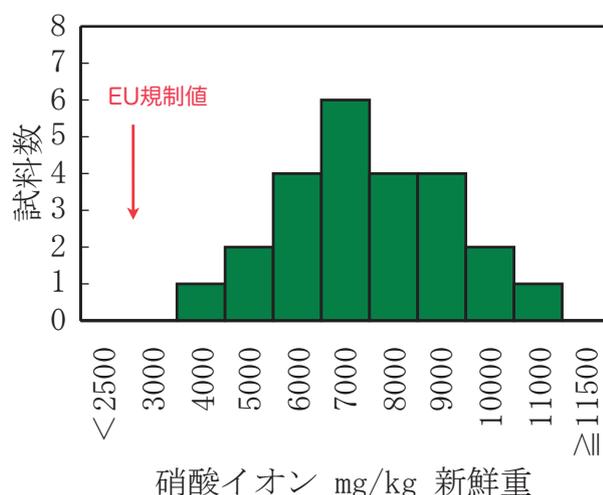
Distribution of input energy in unit production of rice

D Pimentel and M Pimentel 2008  
"Food, Energy, and Society 3rd Ed."

スライド 5

出典 : Pimentel and Pimentel (2008)

ホウレンソウの中の硝酸態窒素の蓄積は、EUの基準は硝酸イオンとして2500ppmだが、2003年に日本の市場で市販されているホウレンソウでは7000ppm近くあった（スライド8）。その後は次第に下がりつつあるが、化学肥料の投入によって硝酸イオンが農地に蓄積している事例である。



京都市内での市販ホウレンソウでの硝酸イオンの蓄積（落合ら、2003）

減少傾向にあり、窒素源として有機質肥料（油粕、魚粕）を使用すると硝酸イオンは減少する。しかし肥料価格は高い

スライド 8

出典：落合ほか（2004）

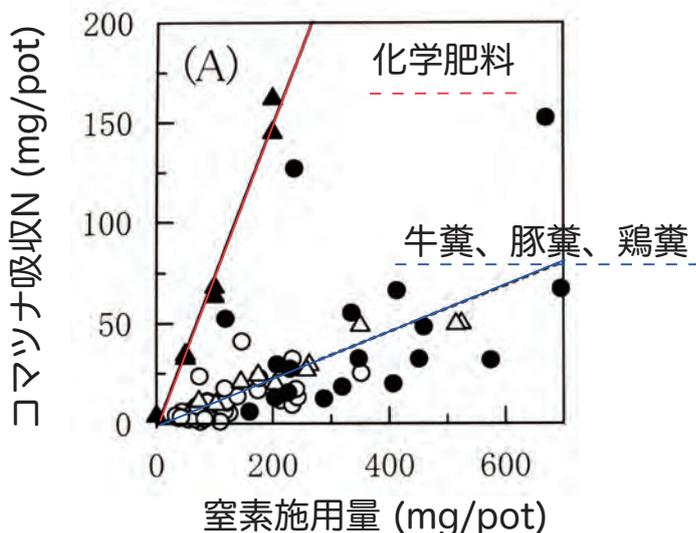
日本に向けて輸出されるアスパラガスを生産しているタイの村で、地下水中の硝酸イオンの濃度を2001年から2011年まで測定した。日本の飲用基準10ppmを越えることがあるが、健康被害が出るほどではない。陸水の富栄養化は起きている。

京都の生産者が昨年度の土壌中の硝酸態窒素の濃度をはかっており、10アールあたり硝酸態窒素20～100kgが蓄積されている。畑では冬の間は作付けしないので、たまった硝酸イオンは、冬の降雨によって地下水に行くはずである。

人間が食物として取り込んだ窒素は、ほとんど全量が二、三日じゅうに環境に出ていく。食料を確保しなければいけないが、人や家畜の排泄物が窒素を含む廃棄物として出てくる。90億人になったときに、排泄物の処理が果たして適切に行われるだろうか。

そこで廃棄物を全部堆肥にするというゼロエミッションの話となるが、窒素化学肥料の場合は、スライド14のグラフの赤線の勾配からもわかるように70%ぐらい吸われるが、窒素を等量含む家畜ふん堆肥の利用率はせいぜい20%程度である。この勾配の違いの分だけ、土壌中に有機物の形で残っていく。有機物は10年あるいは100年の半減期で減少し、使われなくてもいいわけではないが、作物を、イネで4か月、コマツナだと大体2か月で収穫できるような急速な成長を支える窒素の供給は堆肥にはできない。炭素と窒素の結合が切れにくいのだ。堆肥を多投入すると硝酸イオンの環境負荷が大きくなる。

堆肥窒素は化学肥料窒素より肥効が劣る

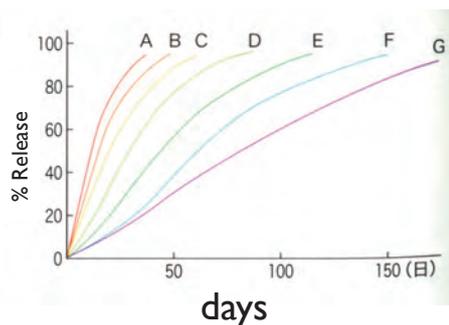
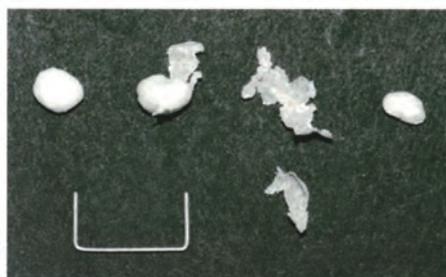


スライド 14

出典：松田ほか (2007)

そこで、被覆肥料が検討されている。化学肥料、例えば尿素の周りをコーティングしてゆっくり出るようにする (スライド 16)。作物の生育にあわせてゆっくり放出されて、利用率は上がり、環境中に漏れていくものは減る。価格がコーティングによってかなり高くなる点が問題である。

緩効性肥料  
(被覆肥料)



Fertilizer grains are coated with polyolefin, such as polyethylene, P-propylene, sulfur, and gypsum

スライド 16

出典：間藤ほか編 (2010) p. 254

もう一つは、窒素肥料の利用率の良い育種が考えられる(スライド 20)。こうした育種は実はまだ行われていなかった。肥料が十分安く、米が十分高いからである。試みに、コシヒカリの一部の染色体が入れかわった品種を 200 ほどスクリーニングしたら、窒素をコシヒカリよりも 20% くらい多く吸い、収量もよい品種が 1 つ見つかった(スライド 22) が、食味は悪かった。窒素肥料を節減してもまあまあの収量が取れるようなイネの育種を、メカニズムの理解に基づいたサイエンスとして取り組む必要がある。

## 有機栽培、化学肥料減肥へのこころみ

収穫量を減らさず施肥量を下げることができるイネを選抜したい

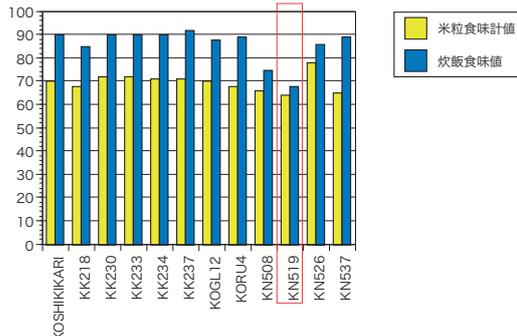
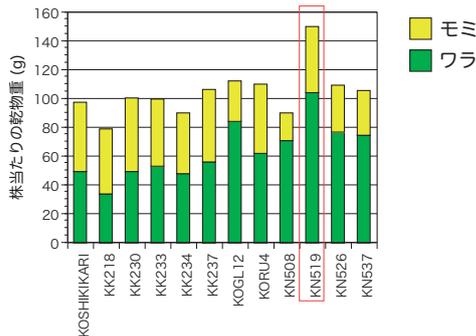
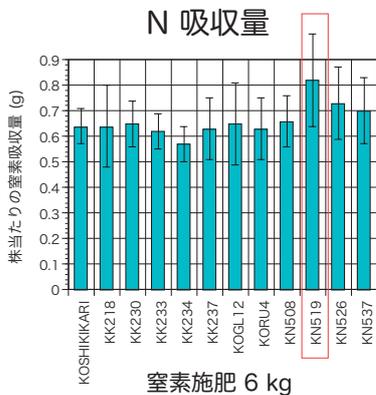
- 1 アンモニウムイオンの吸収力を増強する
- 2 アンモニウムイオンの同化力を増強する
- 3 速度の速いRubisCO (光合成の鍵酵素) をデザインする
- 4 老化葉から穂への窒素の転流速度を上げる
- 5 土壌(有機態) 窒素の利用率の高いイネを探す
- 6 根圏で窒素を固定できるイネを探す

少ない窒素で大きくなるイネを見つけた後で、  
理屈を考えよう

コシヒカリの染色体置換系統群で窒素利用効率の違いを検討する

スライド 20

### 窒素吸収の多い コシヒカリの選抜



スライド 22

出典: 間藤 徹 (未発表, 2011 年)

中国の直立穂と言われるイネは、麦のように穂が全部立っており、光が下まで入るので、窒素肥料を入れると入ただけ収穫がふえる。中国のイネ作では10アールあたり30kgと、日本の3倍の窒素肥料を入れている。収量は日本の2倍程度であり、環境中に出ていく窒素は莫大な量となると思う。中国ではとにかく収量を増やすことをめざした育種をやっている。

まとめると、次のような課題がある。

- ・ 作物の肥料利用率を上げること。肥料と作物の両方の改良。
- ・ 生ごみ・堆肥・排泄物の循環利用、その中でどうしたら植物が吸いやすい窒素になるかを考えること。
- ・ 脱窒が起こる場所を保護すること。

スライド 26 にはワークショップ前に CRDS から受けた質問に対する答えをまとめた。

### 東アジアの窒素循環の解決に向けて

#### ◆作物の選択による対策（今後の育種に期待する事を含む）

窒素循環には面積の大きい水田利用が重要 イネの減肥-少肥中収-を狙う

#### ◆肥料のやりかたによる対策

野菜作には土壌と収穫物の硝酸イオンのモニターが大切

#### ◆肥料の形態・製法による対策

すでに硫安はほとんど副製硫安、被覆肥料の購入補助

#### ◆肥料分リサイクル（コンポスト、汚泥肥料、メタン消化液ほか）

堆肥窒素の肥効向上の研究が必要 堆肥前処理、嫌気発酵など

#### ◆リン循環の問題との兼ね合い

リン酸は化成肥料の陰イオン成分として重要 低リン耐性品種の育種

#### ◆対策がうまくいっているかを知るには何をモニターしたらよいか

硝酸イオン濃度（葉菜、地下水、海水）、アンモニウムイオン濃度（陸水）  
陸水、海水の緑藻密度？

#### ◆新技術の実用化の担い手はどのようなひとたちになるか

農家、リサイクル業者、肥料製造業者

#### ◆アジア共存共栄の中で日本はどのような役割を果たせるか

中国で省肥を実践すること（土壌養分のモニター）、少肥中収イネの育種

スライド 26

### 引用文献

- ・ 間藤 徹, 馬 建鋒, 藤原 徹 編. 2010. 植物栄養学 第2版. 文永堂出版.
- ・ 松田 晃, 山崎 恭子, 間藤 徹. 2007. 化学分析と小ポット栽培試験による家畜排泄物堆肥の窒素肥効の評価. 日本土壌肥料学雑誌, 78, p. 479 - 485.
- ・ 落合 久美子, 岩田 良子, 間藤 徹. 2004. 市販ハウレンソウ, コマツナの硝酸態窒素含有率と全窒素, カリウム含有率との関係. 日本土壌肥料学雑誌, 75, p. 693-695.
- ・ Pimentel, D.; Pimentel, M.H. 2008. Food, Energy and Society, 3rd ed. CRC Press.

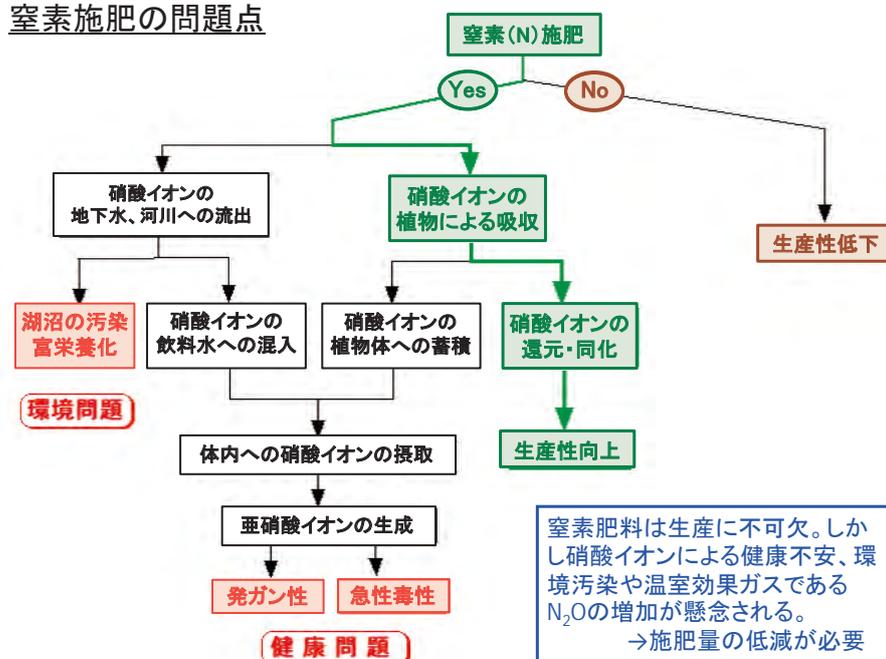
## 4-2. 窒素に関する人為的環境改変の植物に対する影響とそれらに対する対策について

小俣 達男 (名古屋大学 生命農学研究科)

窒素にはいくつもの酸化還元状態があって生物によってお互いに変換されている。硝酸イオンを同化することは動物にはできないがそのほかの生物(植物やバクテリアなど)にはできる。アンモニアのほうが硝酸よりもエネルギーを多く持っている状態なので、畑にアンモニアが与えられればバクテリアがそのエネルギーを使って硝酸に変換する。植物はその硝酸を取り入れることになる。ただし水田のように水をかぶっているところではバクテリアの活動が少なく、イネがアンモニアを直接取り入れる。嫌気的環境では、硝酸イオンを、窒素源ではなくわれわれが呼吸のとき酸素を使うように酸素受容体として使うことによって、還元して $N_2$ にする微生物がいる。また $N_2$ をアンモニアにする窒素固定微生物がいる。このようなさまざまな作用が同時に働いて、全体として定常状態が保たれている。このような生物的過程の全容はいまだ解明できていない。比較的最近になって嫌気的な場所にいるバクテリアで硝酸をアンモニアにするものもあることがわかってきた。未知の酵素もあるかもしれない。たとえば硝酸還元酵素は何種類もある。土壌中の微生物の働きを知ることはほんとうにむずかしい。

植物に対する影響は、農作物に対する影響と野生植物に対する影響を分けて考える必要がある。農作物に対しては、われわれはたくさんの窒素肥料を与え、本来あり得ないような高い窒素環境においている。野生植物は、もともと窒素が制限されたところで生活している。

### 窒素施肥の問題点



スライド 3

農作物に対する影響には、以前から言われているが、葉もの野菜や根菜への硝酸イオンの蓄積がある。窒素肥料をやらないと農作物の生産性は低下する。しかし、やれば過半が流出してしまっ植物に取り入れられない。スライド 3 の緑色で示した部分は望まし

い流れで、すべての硝酸イオンが植物によって吸収され、それが植物によって還元、同化されるといふものである。しかし実際は吸収したものが、かなりの部分、使われないで蓄積してしまう。そのため生産性向上に結びつかない。農作物にどれだけ吸収されるか、どれだけ使われるかを、どれだけコントロールできるかが重要なポイントである。大気から沈着するNO<sub>x</sub>も硝酸イオンになるので、それを含めると窒素肥料が過剰になってしまう事態もあると聞いている。

吸収されずに流出した硝酸イオンが飲料水として人体に入ってきた場合、体内で細菌の働きによって亜硝酸イオンが生成され、急性毒性をもたらしたり、さらにニトロソアミンができて発がん性を示すこともあり得る。湖沼へ出れば環境問題になる。硝酸イオンの毒性については以前から知られていた（スライド4）。古くはそれで実際に死ぬような例もあった。日本では、1999年に硝酸性窒素・亜硝酸性窒素合わせて10 mg/L以下という基準ができ、2000年には食品成分表に標準的な含量が記載されるようになった。EUは2001年にハウレンソウやレタスに対する規制をした。日本でも2002年頃に同様の規制を求める声が出始めた。当時、特に高いものでは、乾燥重量の10%ぐらいが硝酸イオンという例もあった。農水省は野菜における硝酸イオン蓄積の解明と低減化技術の開発を始めた。2006年になって低減化のためのマニュアルが作成されたが、目標値はまだ設定されていない。日本は飲料水に関してはEUよりも厳しい基準を持っているが、野菜に関する基準はなく、政府からの働きかけと、生産者の自主的判断に任されている（スライド7）。

## 硝酸イオン問題の認知と対策の歴史

- 1907 野菜中の硝酸イオンの存在が明らかとなる
- 1945 米で井戸水の硝酸イオンにより乳児死亡  
(メトヘモグロビン血症=ブルーベビー症候群)
- 1945~1950 米で井戸水やハウレンソウの硝酸イオンにより中毒 (39死亡/278件)
- 1948~1964 欧で井戸水やハウレンソウの硝酸イオンにより中毒 (81死亡/1015件)
- 1986 東京都 野菜中の硝酸、亜硝酸イオン濃度検査開始
- 1992 水道水基準改定:要監視項目に硝酸追加(10mg/L以下)
- 1996 日本で井戸水により生後21日の乳児が重度の酸欠状態。
- 1999 水道水基準改定:環境基準項目に追加(硝酸性・亜硝酸性窒素合計10mg/L以下)
- 2000 五訂日本食品標準成分表 備考欄に硝酸イオン含量掲載
- 2001 千葉県議会 硝酸イオンの危険性をSIDS対策に加えるべき事を求める意見書提出
- 2001 EUハウレンソウ、レタスに関する上限値を設定

スライド 4

### 硝酸イオン含量の基準値

|     |                                 |
|-----|---------------------------------|
| 飲料水 | 25 mg/L (or 0.4 mM) (EU)        |
|     | 10 mg/L (or 0.16 mM) (日本)       |
| 野菜  | 3.5 g/kg fresh wt. (ホウレンソウ, EU) |
|     | 2.0 g/kg fresh wt. (結球レタス, EU)  |

→日本では野菜に関する規制はなく、生産者の自主的努力と判断に任されている

### 日本の市場における野菜の硝酸イオン含量 (例)

|                                     |
|-------------------------------------|
| 9.7 g/kg fresh wt. (ホウレンソウ)         |
| 8.9 g/kg fresh wt. (コマツナ)           |
| ca. 1.5 g/kg fresh wt. (ホウレンソウ、日本産) |

### スライド 7

EUの規制値は2011年11月改定後のもの(講演後にスライド改訂)。

現在まだ硝酸イオンの含量が高いものがある。見栄えのよい野菜を作ろうと思えば施肥は増えるので、有機農法だからといって少ない保証はない。水耕栽培も、管理はしやすいはずだが管理を間違うとかえって硝酸イオンが高くなる傾向がある。水に接したあらゆるところから吸収できてしまうから吸収が多くなる。植物工場にも注意が必要だ。基本的に水耕であり、また人工光なので光が弱く、光が弱いと硝酸イオンは貯まりやすいからである。野菜の硝酸には規制がないだけでなく、定期的体系的な調査も十分に行われていない。調査しているところもあるそうなので、結果が公開されることを望む。

対策のうち技術的なものとしては、まず品種の選択がある。しかしより重要なのは、窒素肥料の使用量を削減することだ(スライド9)。人工窒素固定にかかるエネルギーを削減することにつながる。そのためのさまざまな施肥方法の検討がなされているが、それに対応した品種改良もおそらく必要になるだろう。そのほか、栽培条件や方法や収穫時期なども非常に重要な意味を持っている。なるべく長く育ててから、つまり十分成長させてから収穫したほうが含有量が少ないことなどがわかってきている。栽培方法については農水省のマニュアルにいろいろなくふうが述べられている。政策的な対策としては、現状でも適量の施肥の奨励はされているが、さらなる奨励や、目標値の設定があるとよいのではないか。

技術的対策

- (1) 硝酸イオンの蓄積が少ない品種の利用
  - ・品種選択と育種
- (2) 窒素肥料の使用量の低減 (←環境負荷の低減のために重要)
  - ・施肥方法の検討
  - 窒素吸収に優れる品種の選択と育種
  - 少量の窒素で生育できる品種の選択と育種
- (3) 栽培条件・方法や収穫時期の検討

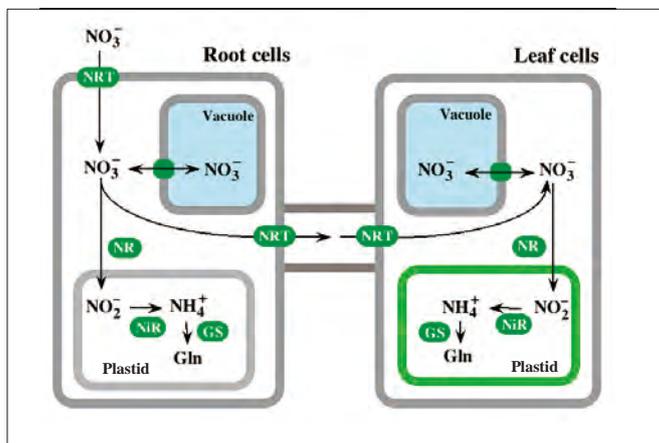
政策的対策

- (4) 低硝酸野菜のさらなる奨励
- (5) 目標値の設定、実情調査の実施と結果の公表

注：(1)の品種は必ずしも(2)の条件に適合するとは限らない。  
(2)が抜本的な対策である。

スライド 9

品種改良については次のようなことがポイントとなる。植物の体の中で膜を通るところそれぞれで輸送体（トランスポーター）が働いている。葉内の液胞にたまる硝酸の量が非常に問題になっている（スライド 10）。



硝酸イオンの蓄積量は、  
吸収量、同化量、輸送量によって左右される。  
↓  
様々な遺伝的要因で変化する可能性がある。

窒素施肥量低減のための品種改良のポイント

- ・低濃度の窒素を効率的に吸収する能力
- ・少量の窒素で成長する能力
- ・過剰の硝酸イオンを吸収しない「能力」  
微生物ではフィードバック制御が一般的 ← 「足るを知る」戦略: エネルギーの節約に主眼  
高等植物は可能な限り吸収する ← 「貪欲な」戦略: 「競争」に主眼がある

スライド 10

硝酸イオンを吸収する能力が弱い品種を選ぶだけならば比較的容易だ。しかし、肥料として与える硝酸イオンの量を減らしたいので、吸収能力はあったほうがよい。それでも葉に行くものは少なくするというのは簡単でない。輸送体だけでなく、根の形や量、光合成活性、硝酸イオンが還元される際の受け手となる有機酸の量なども重要になる。し

たがって育種にはさまざまな可能性がある。今までは、少ない窒素でよく育つものを選抜しなかったためにそういう品種があまり知られていないが、そういう品種を選抜することは現実的に可能だと思う。

また、過剰な硝酸イオンを吸収しない品種があればよいと考えている。植物の間でも緑藻類とかシアノバクテリアは過剰な窒素を吸収しない。フィードバック制御がかかっていて、十分な窒素を吸収したら輸送をやめて吸収しなくなる。たとえば、シアノバクテリアの輸送体は、アンモニアが十分あると硝酸の輸送を止める。高等植物は違うタイプの輸送体を持っていて、そういう制御は基本的にないようである。アンモニアがあっても硝酸の輸送が減らない。両者の輸送体の制御の違いを見ていけば、将来は高等植物にフィードバック制御を付与して「足るを知る」作物をつくることができるようになるかもしれない。

他方、野生植物に対する影響については楽観できない（スライド 12）。日本の NO<sub>x</sub> の排出量は OECD の資料によれば 192 万 t、窒素換算だと 58 万 t となるが、削減が進んでいる。窒素肥料の消費量は FAO の値だと 2005 年に 55 万 t だが、2009 年で 43 万 t とかなり減っている。したがって国内状況は良い方向に向かっている。しかし中国から来る NO<sub>x</sub> を含めた全体としてはまだ問題がある。また、日本では人間から窒素が 45 万 t ぐらい出ている。それが肥料として循環されず環境に出ている。とくに貧栄養環境に適応した植物（モウセンゴケなどの食虫植物、蘭・サギソウなど）に影響があるのではないかと懸念されている。

### 野生植物に対する影響

#### 日本における人間活動にともなう窒素の放出量

- ・NO<sub>x</sub>排出量 192万t<sub>ノ</sub>(NO<sub>2</sub>換算、2005年\*) → N換算58万t<sub>ノ</sub>
- ・窒素肥料消費量\*\* 55万t<sub>ノ</sub>N(2005年)  
43万t<sub>ノ</sub>N(2009年)
- ・人間からの窒素放出45万t<sub>ノ</sub>/年（1人1日10g排出と仮定）

\*OECD Environmental Data, Compendium 2006/2007

\*\*FAOSTAT(<http://faostat.fao.org/default.aspx>)

- 酸性雨とともに大量のNが国土に散布されている
- 特に貧栄養環境に適応した植物\*\*\*に対する影響が懸念される
  - \*\*\*過剰の窒素に対する感受性を示すものが多い
  - \*\*\*低窒素条件下で他の植物に対して優位性をもつ

スライド 12

野生植物保護のためには、貧栄養湿地のようなところの硝酸イオン濃度の測定も重要と思われる。ただし複数の地点で年間を通じて定期的に測定を継続することは人件費などの面からも大変で、包括的な調査はむずかしいとも思う。また近隣諸国への排出削減要請も必要である（スライド 13）。

## 野生植物に対する影響への対策

- (1) NO<sub>x</sub>排出量の削減 → 日本では着実に進行中
- (2) 耕作地やゴルフ場での窒素肥料使用量の低減
- (3) 土壌中や湧水、湿地における硝酸イオン濃度の広範な調査による現状の包括的把握
- (4) 近隣諸国でのNO<sub>x</sub>排出量の削減の要請

## スライド 13

スライド 14 にはワークショップ前に CRDS から受けた質問に対する答えをまとめた。

### 窒素循環の問題に関しての一般的な問題

- \*どのような知見が最近進展しているか。
  - 植物による窒素の吸収・輸送・蓄積・同化とそれらの調節の分子機構
  - 窒素固定エンドファイトの研究
  - 土壌微生物群集の解析
- \*どのような知見が不足しているか。
  - 耕作地(作物)や実験室(モデル植物)以外での植物の研究が不足している
    - 貧栄養環境の植物や栄養制限状態の植物の生理学
- \*研究推進体制や、実用化への連携には、どのような注意が必要か。
  - 研究推進体制 : 多角的、多面的な研究者集団であること
    - 一分野に数名以上の研究者を含むこと
  - 実用化への連携: 省庁横断型の体制
- \*東アジア規模の国際協力にはどのような形が考えられるか。
  - 規模的に中国の参加なくして成果は期待できない。
  - 窒素循環と人類活動の関係についての理解の普及を図る必要がある。

## スライド 14

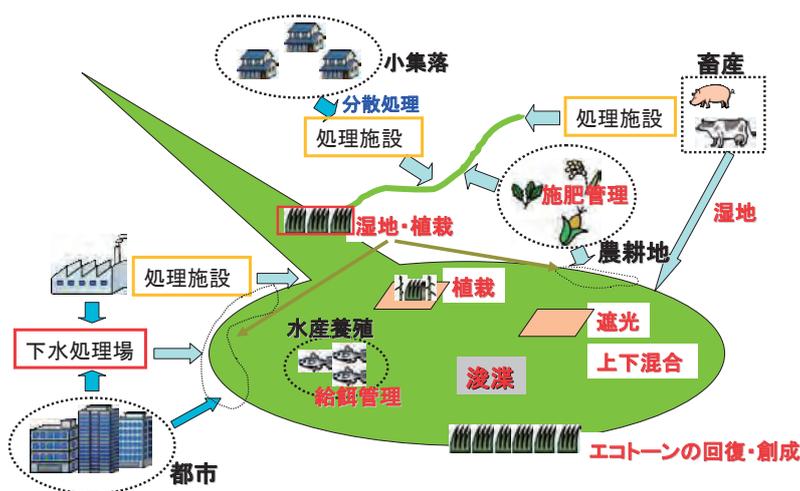
### 4-3. 水処理技術に関する研究開発課題

水落 元之（国立環境研究所）

たとえば中国の太湖のように、アオコがたくさん出て、COD（化学的酸素要求量）などの環境基準が達成されていない、その原因は富栄養化であり、栄養塩対策を流域でしなければいけない、という状況で、対策を考える。

閉鎖系水域の富栄養化対策は、施肥の適正化、畜産廃棄物・生活排水・都市下水・工業排水の処理などがある（スライド 3）。水産養殖の場合に給餌の適正化もある。そのうちで、自分が取り組んでいるのは排水処理であり、ここでは主として生活系排水処理技術に関して述べる。

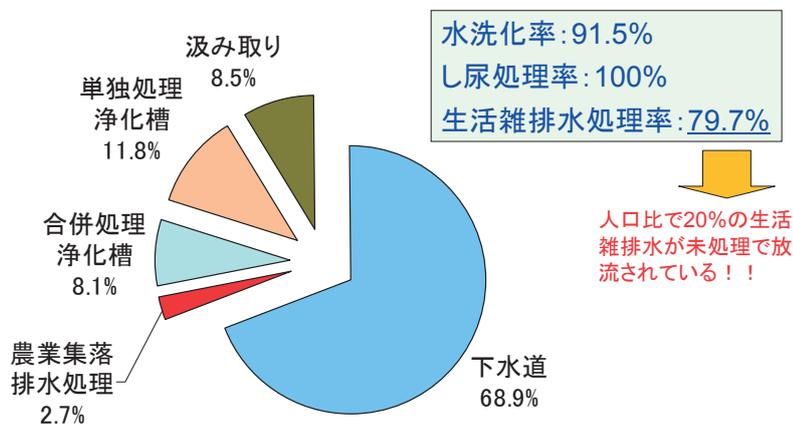
#### 閉鎖性水域における一般的な富栄養化対策



#### スライド 3

2009 年度末の日本における生活排水の処理状況をスライド 5 に示す。日本の場合、生活排水の大部分は下水道で処理され、残りを小規模の浄化槽などで処理している。し尿の処理率は 100% で、水洗化率は 90% を越えている。ただし、トイレ以外の生活排水（雑排水という）は、まだ 20% ぐらいが未処理で流されており、BOD（生物学的酸素要求量）が高い川が存在する要因となっている。

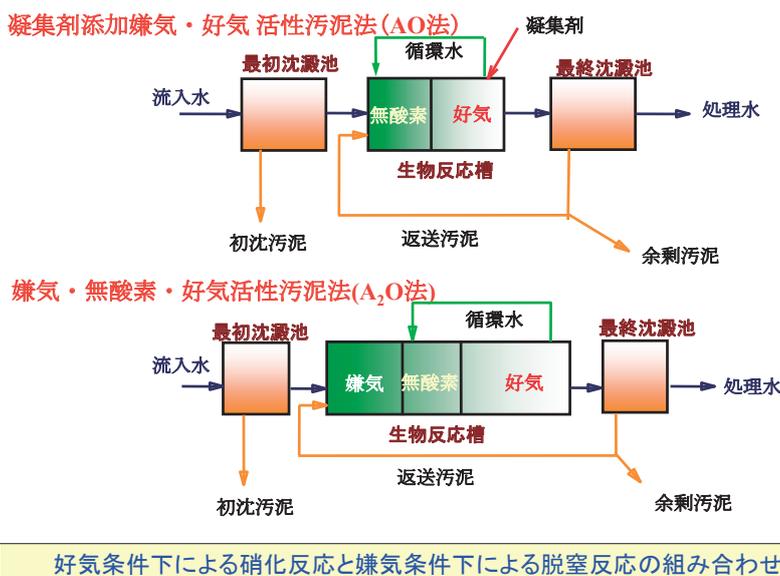
日本における生活排水処理の状況（2009年度末）



スライド 5

処理技術については、基本的に確立されていると考えてよい。下水道で一般的な活性汚泥法という処理方法に若干手を加えて窒素を除く技術がある（スライド 6）。自然生態系で起きている硝化と脱窒を人為的に凝縮した処理だが、窒素とともにリンも同時に除去する方法である。かなり前に開発されている技術であり、窒素を除去するのはそれほど困難ではない。

下水道における代表的な窒素除去手法

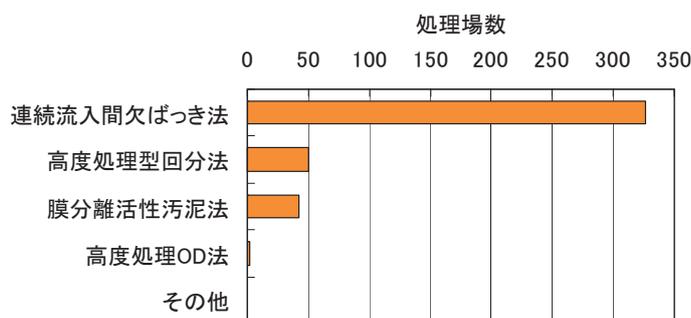


スライド 6

この技術については、下水道施設の設計指針でも、農業集落排水処理施設の設計ガイドラインでも示されているものがあり、技術的にはかなり成熟している。農業集落排水処理

施設は日本に 5000 カ所ぐらいあるが、このうち 30% 以上は窒素除去を行っており、安定した技術と考えられる（スライド 9）。

日本における高度処理技術毎の農業集落排水処理施設数



5,100箇所の処理施設が存在し、窒素あるいは窒素・リン除去のいずれかを行っている処理場は1700箇所程度であり、窒素・リンの同時除去を行っている処理場は400箇所程度(2010年末)

### スライド 9

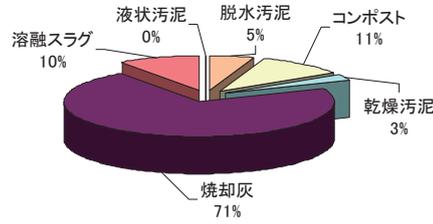
家庭用の浄化槽についても窒素・リン除去も行う製品は既に売られている。窒素除去はこの規模の処理施設にとっても技術的に大きな問題ではない。ただしリンの除去について、この規模の処理施設では物理化学的な処理が適用される。

一般的に下水処理施設に流入する窒素のうち、水処理系の処理にかかるものが 70% で、残りの 30% は汚泥に移行するといわれている（スライド 11）。水処理系は経済的に処理ができる生物処理のシステムとしての限界があり、窒素除去率は 70% 程度である。汚泥のほうは、下水道汚泥の場合、10-15% 程度が農業に再利用されている。農業集落排水処理施設の場合は、汚泥の大部分はし尿処理場で処理されており、約 40% が農業利用されている。日本の生活排水の 70% 程度は下水道で扱われていることを考えれば、処理によって発生する汚泥のうち農業利用されているのはごく一部といえる。

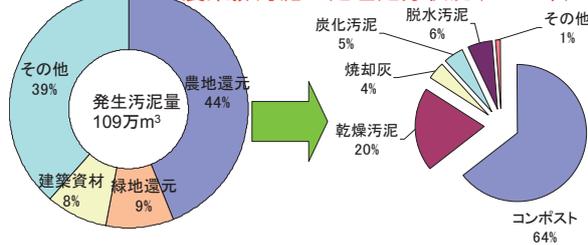
日本の生活排水処理から発生する汚泥の処理処分及び農業利用状況

一般的な活性汚泥処理における窒素の分配 水処理系70% 汚泥処理系30%

下水汚泥の処理処分状況(発生汚泥固形物ベース(2005年))



農集排汚泥の処理処分状況(2007年)



スライド 11

農業利用が少ない理由としては、重金属による汚染の心配がある。また、季節ごとの肥料の需要の変化に対応するために貯留場所を確保することが課題である。また、下水処理場でよく用いられているコンポストなどの肥料化施設は機械施設であり、初期投資と維持管理に経費がかかる。

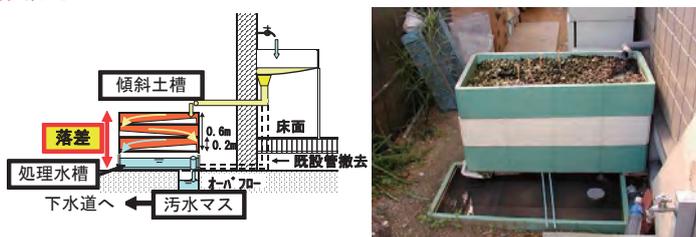
最近のトレンドとして、エコロジカルサニテーションがある。日本で昔やっていたし尿の循環利用を取り戻そうというような考え方である。JSTのCREST水循環の研究課題で北海道大学の船水教授が開発した例がある(スライド14)。し尿と生活雑排水を分け、トイレでコンポストをつくって、生活雑排水は非常に簡便に処理をするものを作るという考えである。

エコサンに関する国内検討事例(CREST(北大 船水先生))

し尿 ⇨ コンポスト型トイレの内部(現状のトイレと違和感が無い構造)



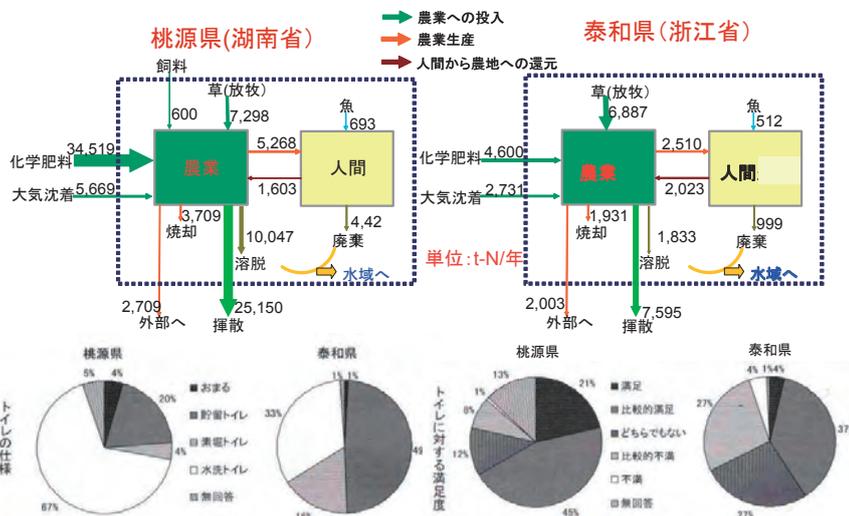
雑排水 ⇨ 土壌を活用した簡易処理(雑排水のうち、台所の負荷が大きい)



スライド 14

ただ、中国の農村地域で、人間から出る排出物がどの程度、農業を通じて地域内で循環されているかを調べたところ、大部分はやはり環境へ出てきてしまう(スライド 15)。また、農村の生活環境改善のため近代的な高層住宅が整備されつつあり、そこではトイレが必ずといってよいほど水洗トイレとなり、これまでにない排水の問題が発生する。かつて日本でも進行したように、各国で水洗トイレはものすごいスピードで普及すると思われる。住民が生活する範囲の衛生上のリスクは低下するが、その排水が流れ込む先で生じる問題に対応が必要になる。そこで適切な処理が期待されるが、日本型の、あるレベルの維持管理技術を前提とした、いわゆる完成された技術ではコストに合わない国が出てくる。非常に簡単な土を使う処理技術を開発したこともある。ただし、この技術はエネルギー投入量は少なくてもすむが、必要な土地面積が大きく、経年的な処理の安定を欠くという欠点もある。

中国南東部の農村地域(県レベル)における窒素収支とトイレを巡る状況



出典: 劉・王・水落・楊・石村: 中国長江中下流農村地域における人間生活が窒素フローに及ぼす影響の現地調査研究、システム農学, 23, 305-316, 2007

スライド 15

出典: 劉ほか (2007)

そのようなことを踏まえて、中国で農村部の生活排水処理のモデル事業に協力している。一つの重慶の事例では、予備的に少しエネルギーをかけた下水処理を行った後は湿地を使って自然の処理に任せるといった方法をとっている。もう一つの雲南省の事例では、予備的な生物処理と土壌を使った自然処理を組み合わせることでコスト的に有利な方法を考えた。

まとめとして、日本では排水処理技術は一定の完成したレベルにあり、技術開発が必要な要素はそれほどないと考えてよいと思われる。他方で、開発途上国への海外展開を考えたときには、日本の現在の技術を適用させるのはむずかしいことが多く、相手のさまざまな状況に合わせていく必要がある。そこでエコロジカルサニテーションのような尿を循環利用するというトレンドがある。ただし、水洗トイレに対してどう考えるかという問題もある。政策的には、末端の技術だけでなく、社会インフラとして考えていかないと成り立たない。

もう一つ、日本の将来について、技術が熟成されていても、将来の人口や税収の減少を考えると、生活排水処理を現在と同じように公共サービスとして続けていくのには無理が

あるかもしれない。基本的な衛生学的な処理を今の公共サービスの範疇で行い、その後ろの部分として分散して栄養塩を除去する場を位置づけていく必要があるかもしれない。これもインフラの変更として考えることになる。

#### 引用文献

- ・ 劉 晨, 王 勤学, 水落 元之, 楊 永輝, 石村 貞夫. 2007. 中国長江中下流農村地域における人間生活が窒素フローに及ぼす影響の現地調査研究. システム農学, 23, p. 305-316.

## 4-4. セッション2の討論

### 1. 植物の成長と施肥量の関係について

- 施肥量を多くすると植物の成長も促進される。ただし施肥量が多くなるにつれて施肥追加の効果は小さくなる。窒素肥料の値段があまり高くないので、農家は結果として過剰に施肥してしまい、環境に流出してしまう。
- 作物の種類、土壌、気象条件などを入れて施肥量を出すモデルもあるが、実際の利用メカニズムは解明されていない面も多い。
- 植物による窒素利用の律速になるのが、植物の根の細胞膜から吸収される硝酸イオン濃度なのか植物中での循環なのか等、反応速度論的な解明が必要なのではないか。
- 植物は一旦はあるだけの窒素を吸収してしまう能力を持つ。
- 土壌中の微生物が消費する分もある。
- 植物が吸収しやすい施肥のしかたのマニュアルも作られているが、実際に農家が実行できるかは別問題である。

### 2. 日本での規制について

- 日本では、水道水の硝酸の基準はEUより低い値であるが、食物の硝酸が規制されていないのはなぜか。
- 日本の川は短いので硝酸が集積しにくく厳しい基準が作りやすい。他方、食物の硝酸からは明確な健康被害が出ていないからではないか。

### 3. 植物工場のような集中管理の是非は？

- 環境中で希薄にならないうちに回収処理したほうが熱力学的に得ではないか？
- 植物工場は、太陽光を利用せず人為的なエネルギーを必要とする。もともと太陽光であってもいったん電気に変換するのでエネルギー効率が悪い。土と根が植物を支えていることを水耕液で代行するコストは高い。窒素肥料の利用効率を上げられる、使う農薬を限定できるなどのプラス面を考慮しても、農業の主要部分にはなりえない。

### 4. エネルギー消費も減らして窒素利用効率をあげる方法はないか？

- 肉食を減らし、植物性食料の利用率を上げる。食べ残しや生ゴミの飼料利用など、食料分配の問題もある。
- 不耕起栽培で肥料の流出が抑えられる。ただし耕起しないと除草が困難。遺伝子組み換えで除草剤耐性をもたせた作物と除草剤を組み合わせる方法がある。

### 5. 生活排水を排水源に近いところで分散的に処理をすることのメリットとデメリットは？

- 熱力学的に考えると、希薄化しないで処理したほうがよい。
- コンポストトイレは技術的には可能。ただし水洗にしたいという欲求に勝てるか。使い勝手のよいものは初期コストが高くエネルギーも使う。低コスト化が必要。既存の下水道インフラをどう更新していくかという方針ともかかわる。更新時期に小規模分散化も考えられる。

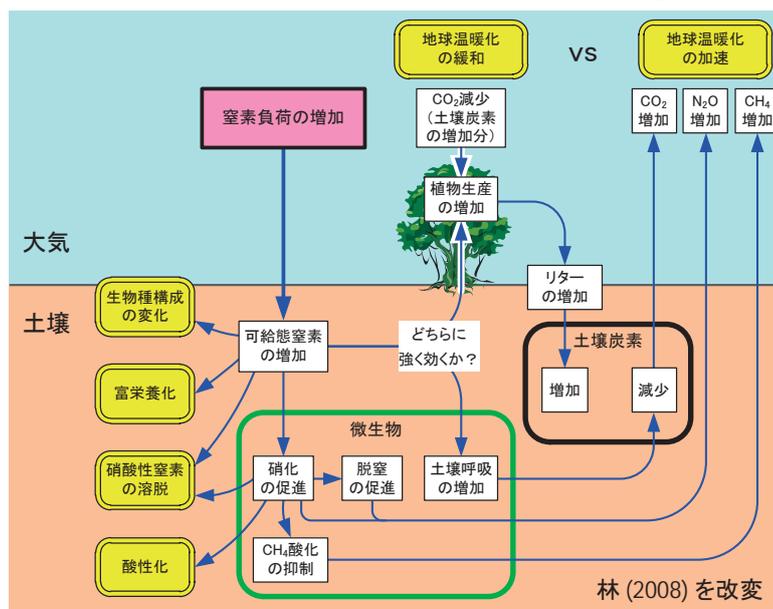
## 5. セッション3. 対策の評価

### 5-1. 気候変動に対する窒素循環の応答の予測評価に向けて

林 健太郎（農業環境技術研究所）

ハーバー・ボッシュ法と呼ばれるアンモニア合成技術によって大量製造が可能になった化学肥料によって世界人口を養う食料生産が可能となっている。しかし、投入される窒素の大部分が大気・土壌・水への窒素負荷をもたらしている。窒素負荷は多様な環境影響を及ぼす可能性がある。例えば気候変動に関しては、CO<sub>2</sub>の固定を促進するして地球温暖化を緩和する効果がある一方で、一酸化二窒素等の排出を増やして温暖化を加速する効果もある（スライド3）。

#### 窒素負荷がもたらす環境影響



スライド 3

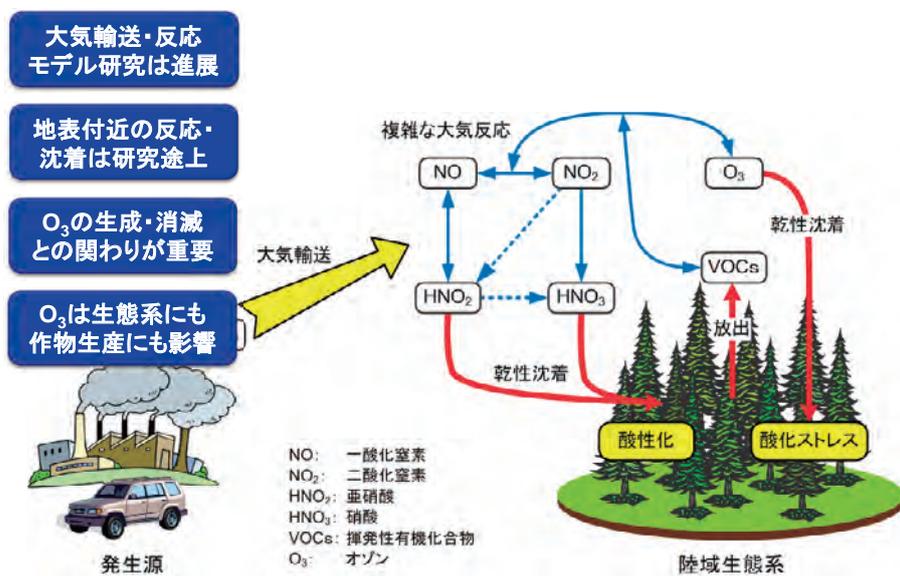
出典：林（2008）

窒素原子を含む化学物質は非常に多種多様であるが、分子窒素 (N<sub>2</sub>) を除く形態の窒素を反応性窒素 (reactive nitrogen) と称する。今回はそのうちの3種類の窒素化合物に着目して紹介する。

1つめは一酸化二窒素 (N<sub>2</sub>O) である。この生成には硝化および脱窒に関わるが、いずれも微生物の作用である。人為的な窒素肥料の投入が増えた結果、N<sub>2</sub>O 発生量が増えている。2つめの物質群はアンモニア性窒素である。気体のアンモニアと、水に溶けたり粒子状物質に含まれるアンモニウムイオンを含む。アンモニアは人為的発生量が最大の窒素化合物である。アンモニア性窒素は直接に窒素負荷として働くほか、大気中で酸を中和して二次粒子を形成して広域大気汚染にも関わる。3つめは窒素酸化物 (特に NO と NO<sub>2</sub>) である。これら自体大気汚染物質であると同時にオゾンの生成・消滅にも関わり亜硝酸や硝酸の前駆物質でもある。亜硝酸や硝酸は酸性化物質として環境の酸性化に寄与する。

3つの物質群についてどこまで理解が進んだかについて述べる。まず  $N_2O$  について。硝化・脱窒はいずれも微生物が成すプロセスである。硝化の能力は硝化菌というバクテリアのほか一部のアーキア（古細菌）がもっている。硝化は順調に進めば亜硝酸を経て硝酸に到達するが、一部、 $N_2O$  に向かう経路もある。脱窒の能力は脱窒菌と呼ばれる微生物群や一部のカビ（糸状菌）がもっている。これらは硝酸を還元してエネルギーを得る。脱窒の最終産物は  $N_2$  であるが、カビや一部の脱窒菌は  $N_2O$  までの還元で脱窒を止めてしまう。ただし、 $N_2O$  を  $N_2$  に還元する能力を積極的に発揮する微生物群も知られていて、これを微生物資材として  $N_2O$  の発生を減らすのに使おうという研究もなされている。このように  $N_2O$  の生成と消費には微生物が強く関わるのが特徴であり、個々のプロセスの理解は進んできたが、環境中でそれらがどのように発現しているか、また温度や水分などの条件の変化にどう応答するかについては、未解明なことが多い。

次にアンモニアの話に移る。農業生産に投入される窒素の大部分は人為的に合成されたアンモニウム態窒素である。また、一部の微生物は窒素固定、つまり大気中の  $N_2$  を有機態窒素として固定する能力をもつ。農業生産に投入された窒素のうち作物に取り込まれるものは一部であり、残りは地下に浸透して水域に流出したり、アンモニア揮散や脱窒などのプロセスによって大気に還る。大気と陸域の間でどの窒素化合物がどれだけ行き来しているかの定量的説明は不十分であり、大気・陸面相互作用のメカニズムに基づくモデルの構築も途上である。



地表付近における窒素酸化物の動態および陸域生態系への影響

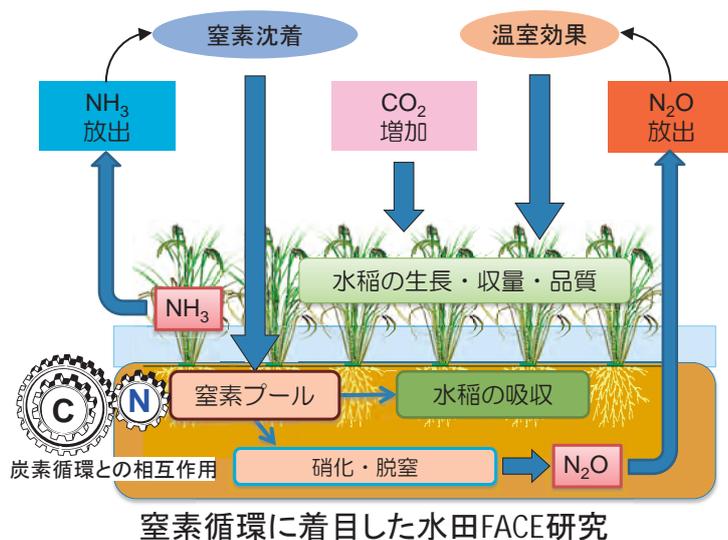
スライド 7

窒素酸化物については、発生源から出てきた  $NO$  および  $NO_2$  が大気中で酸化されて亜硝酸および硝酸といった酸性物質ができ、それが生態系に酸性化のストレスを与える。また、 $NO$ 、 $NO_2$ 、および揮発性有機炭素（VOC）の複雑な大気反応は対流圏オゾンの生成・消滅にも関わり、そのオゾンは植物などに酸化性ストレスを与える。オゾンはイネなどの収量にも影響を及ぼしうる。これらの大気輸送・大気反応のモデリング研究は比較的進んでいる。一方、地表付近で起こる大気・陸面相互作用については観測研究もモデリング研

究もまだ途上である（スライド 7）。

ここで私が代表を務めている FACE-N プロジェクトを紹介したい。FACE とは Free Air CO<sub>2</sub> Enrichment の略で、開放系で CO<sub>2</sub> 濃度を上げて植物の応答を調べる研究をさす。実際の圃場スケールで観測する。森林の FACE 実験もあるが、農環研が設立したつくばみらい FACE では、水田に CO<sub>2</sub> 放出リングを設け、風向、風速、CO<sub>2</sub> 濃度をモニタリングしつつ、CO<sub>2</sub> 濃度を外気プラス 200ppm となるように調節してイネの生育応答などを調べている。FACE 研究の主な目的は将来予想される CO<sub>2</sub> 濃度の上昇に対するイネの生育・収量の応答を調べることであるが、水田は温室効果ガスであるメタンの重要な発生源の一つでもあるため、炭素循環の研究も行っている。炭素循環と窒素循環には密接な相互作用があることから、FACE 研究の中で特に窒素循環の面に着目した FACE-N を実施している。

FACE-N プロジェクトのコンセプト（スライド 9）は、水田の窒素循環、特に大気も含めた全体の系の循環を把握することと、CO<sub>2</sub> 濃度増加等に対する応答を、特に N<sub>2</sub>O とアンモニアに着目して高 CO<sub>2</sub> に対する動態の応答を解明することである。そして、窒素循環について、一次元のプロットスケールのモデルと、10km 四方くらいの地域スケールのモデルを開発する。また、N と C（さらに P）の循環の間の関わりの基礎的理解を進めたいと考えている。

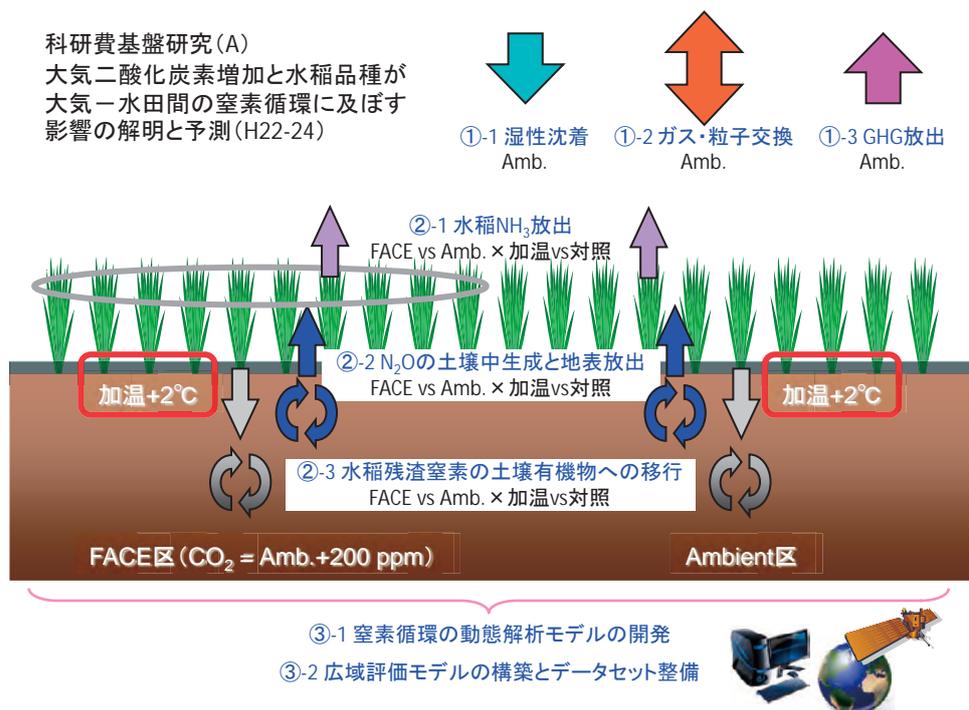


FACE-Nのコンセプト:

- 窒素循環の定量および気候変動に対するN<sub>2</sub>OおよびNH<sub>3</sub>動態の変化の解明
- プロットスケールから地域スケールの窒素循環モデルの開発
- 気候変動に対する炭素・窒素循環の相互作用の応答への基礎的な理解

スライド 9

FACE-N は 2010-2012 年度の科研費に採択され、図（スライド 10）に示す、(1) 大気・水田間の窒素交換、(2) 水田の水稲・土壌系での窒素循環、(3) これらの観測研究とモデリング研究という 3 要素で構成される。関連する窒素化合物とプロセスは大部分を網羅しているものの、微生物が駆動するプロセス群についてはまだブラックボックスであるのが現状である。



スライド 10

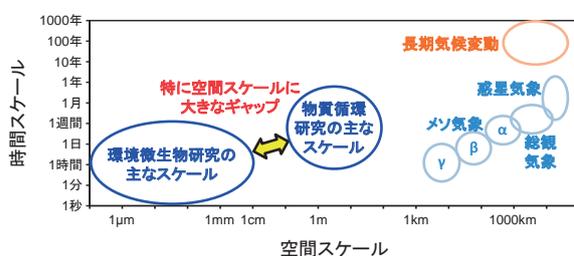
結果の一例を紹介する。まず大気-水田間の交換と灌漑水の出入りを合わせた水田の窒素収支である。1年間の収支はNとして27 kg /haの正味のインプットとなるが、これはこの水田への施肥窒素量の約40%に相当し、決して少なくはない。ただし、まだ測定誤差が大きい。これを解決するためには時間解像度の高い濃度計が安価に利用できるようになってほしい。また、研究の現段階ではまだ考慮していない窒素化合物やプロセスもある。次にさまざまな窒素循環過程の研究について紹介する。1つめは、イネの葉がアンモニアを放出することである。2つめは、水田とその土壤から放出されるN<sub>2</sub>Oの測定結果である。N<sub>2</sub>O放出のピークと土壤中N<sub>2</sub>O濃度のピークは一致しない。つまり、地表からの放出を見ているだけでは土の中で起きていることはわからない。共同研究者である東工大のメンバーが窒素安定同位体を使った解析によりこの問題に取り組んでいる。3つめとして、土壤有機物に有機態として蓄えられている窒素から無機態のアンモニウムとして放出される正味の窒素量を積算で調べている。最後に、空气中窒素を固定する窒素固定菌の能力を調べている。残念なことに、脱窒で大気に還るN<sub>2</sub>のフラックスの測定は実現できていない。海の底で水の出入りを測るようなむずかしさとたとえられよう。これらが気候変動にどう応答するかについてさらに調べていく必要がある。各プロセス間の相互作用、また炭素循環と窒素循環との相互作用も解明する必要がある。

最後にモデルの側面であるが、今回のプロジェクトでは2種類のプロットスケールモデルを使っている。1つは大気陸面相互作用の表現が得意なモデル、もう1つは土壤中での挙動の表現が得意なモデルである。これにイネの養分吸収の表現が得意なモデルも加えて、観測研究から得られるデータを用いたモデルの検証およびモデル間の相互比較を行い、オフラインでモデルを結合しようとしている。また、モデルの構造を簡素化させて、10kmスケールの水田地域の窒素収支を評価するモデルの開発にも取り組んでいる。これからの課題としては、観測研究と連携を強化する必要がある。最終的にはモデルをオンラインでパッケージにしたい。水田だけでなく他の土地利用にも適用したい。また、地域スケール

から日本、東アジア、全球等の各スケールのモデルへの橋渡しが必要と考えている。今後望まれる窒素循環研究の方向性について意見を述べたい（スライド 15）。

## 今後望まれる研究開発・展開1

- 既存技術の進化
  - 高時間解像度で現場測定が可能な濃度計の開発: 特に $N_2O$ と $NH_3$
  - 大気-陸域間の交換フラックス算定手法の進化
- 新規技術の開発
  - 地球環境問題において重要な $N_2O$ の生成・消費は微生物が駆動
  - 陸域の窒素循環諸過程の大部分が土壌で起きている
  - 微生物スケールに対応可能な土壌窒素循環の計測技術の開発



スライド 15

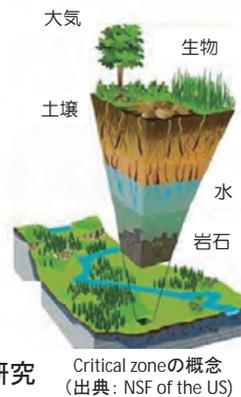
まず、既存の技術について、日本は非常に良い技術がありさらなる進化を望みたい。まず、高時間解像度で現場測定が可能な濃度計があげられる。窒素酸化物では実現しているが、特に  $N_2O$  とアンモニアについて開発と普及を願いたい。また、これに関連して、大気-陸域間の交換フラックスを精度よく測定する手法をさらに進化させたい。

新しい技術の方向として、土壌中で微生物が担う物質循環を定量的に把握する技術がほしい。例えば  $N_2O$  の生成・消費は微生物が駆動している。環境微生物研究と物質循環研究の間には空間的にも時間的にも大きなギャップがある。特に空間スケールのギャップが大きい。微生物活動の空間スケールはサブミクロン ( $1 \mu m$  以下) から  $1cm$  程度であるのに対し、物質循環研究の主な空間スケールは  $1m$  から  $1km$  である。微生物活動のスケールは変えようがないので、物質循環研究側から歩み寄る技術開発が必要と考えている。

最後に、土壌を中心とする重要な境界領域、クリティカルゾーン (critical zone) の重要性を主張したい。この概念は、アメリカ合衆国の National Science Foundation が推進している National Critical Zone Observatory Program の主題となっているものである (スライド 16)。大気と岩石、水が接するところに生物作用によって土壌が形成されている。ここにはさまざまな圏 (sphere) が集まっており、物質循環が活発である。ここで陸上生産の大部分が賄われており、土壌なくして陸域生態系は存続できない。ところが、この土壌というのは非常に脆弱な存在であり、これをはぎ取れば生産力は落ちてしまう。したがって、土壌の持続可能性の観点からも窒素循環研究に取り組む必要がある。

## 今後望まれる研究開発・展開2

- 土壌を中心とする重要な境界領域 (Critical zone) への着目
  - 土壌は物質循環が活発な場所
  - 土壌無くして陸域生態系は存続できない
  - しかし、土壌はとても脆弱な存在
    - 常圧に圧縮した大気の厚さは8000m
    - 海洋の平均的な深さは3800m
    - 土壌の平均的な厚さは 1m
  - 環境研究は、窒素循環に加えて土壌の持続可能性に傾注すべき
- ギャップの解消
  - 分野間: 例) 環境微生物研究と物質循環研究
  - 手法間: 例) 観測研究とモデル研究
  - 空間スケール間: プロット～地域～全球



### スライド 16

図の出典は、National Critical Zone Observatory Program の研究課題紹介のページ [http://instaar.colorado.edu/temp/natl\\_czo\\_update/Research.html](http://instaar.colorado.edu/temp/natl_czo_update/Research.html)。

また、研究上のギャップの解消も必要と考えている。研究分野間では、例えば環境微生物研究と物質循環研究のギャップがあげられる。研究アプローチについても、観測研究とモデル研究のギャップ、また、観測研究の中にも手法間のギャップがたくさんある。空間スケールについても、例えばプロットスケールの取り組みを地域・全球の評価につなげるためにギャップを埋める必要がある。

### 引用文献

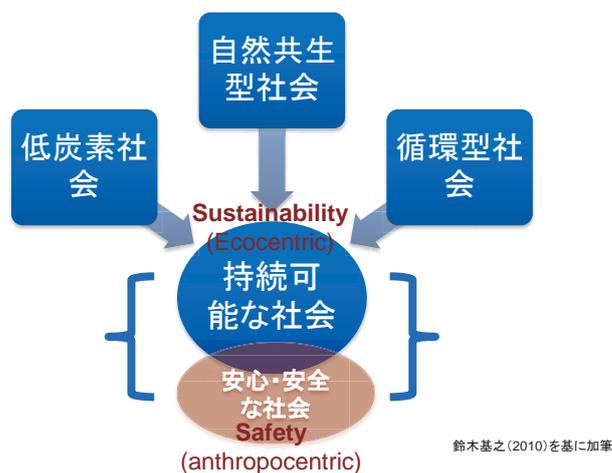
- 林 健太郎 . 2008. 人間活動に伴う窒素沈着の増加がもたらすこと . 化学と生物 , 46:377-379.

## 5-2. 陸域生態系における窒素物質循環の応答変化予測とその環境リスク評価

林 彬勲（産業技術総合研究所）

これからめざす社会像のキーワードは「低炭素社会」、「自然共生型社会」、「循環型社会」等があったが、これらに含まれた理念を整理してみると、環境の許容力を越えない「持続可能な社会 (Sustainability)」と社会の受容力を越えない「安全・安心な社会 (Safety)」の「2つのS」に集約できる(スライド2)。産総研の安全科学研究部門はこの「2つのS」にねざした評価研究をやっている。窒素循環に関わる評価研究は、この「2つのS」の社会像をめざす上で重要な課題だと考える。

### これから目指す社会像(2S)



➡ 窒素循環(収支)に配慮した人間活動が必要不可欠

スライド2

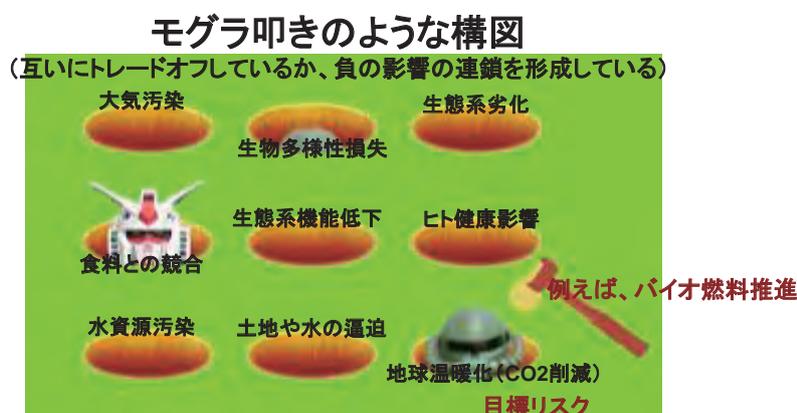
窒素はすべての生物の必須元素であって代わるものがない。生命相（微生物、植物、動物）と非生命相（大気、水、土壌）の中の窒素化合物の移動・変換過程を「窒素の生物地球化学循環 (Nitrogen Biogeochemical Cycle)」あるいは窒素循環と呼ぶ。産業革命以前の窒素循環は自然的な窒素固定によるものであるゆえ、自然界では常に不足しがちの活性窒素を無駄なく利用し、バランスの取れた健全な物質循環系であったと思われる。しかし、産業革命以来、人類は大量な化石燃料を燃やし続けてきたことに加え、大気から大量な窒素を固定して肥料生産と施肥を行ってきたので、窒素循環が大きく攪乱された (Galloway et al., 2004)。その結果、生態系に使いきれない多大な量の窒素を持ち込み、直接的・間接的に多面的な健康問題や環境影響問題をもたらしている。人類にとって、窒素はなくてはならない存在だが多すぎても困る。したがって、人間活動による窒素循環攪乱と窒素の二面性に着目し、環境の許容力と社会の受容力を踏まえた窒素利用最適化の管理システムを構築すべきである。

これまでの環境政策の多くは、個々の健康・環境問題の最適解を求めてきた。しかしながら、1つの問題を解決する対策を求めても、他の問題が生じ、あるいは、強まってしま

うという、もぐらたたきのような構図がある（スライド5）。たとえば、地球温暖化という目標リスクを解決するため、バイオ燃料推進という政策（二酸化炭素の排出削減）をとったとすると、食料との競合や、生態系の破壊・生物多様性の損失など、さまざまなリスクが出てくる。窒素関連でも同じ構造がある。窒素の最適利用をめざすには、窒素関連の個々の問題に対する最適解を求めたのではだめで、リスクのトレードオフの視点から、窒素関連の多面的な問題を統合的・包括的に評価する必要がある。

## 従来の評価では対応できない

- ✓ 個々の問題の最適解を求めるでは、ダメ
- ✓ リスクトレードオフの視点から、窒素関連の多面的な問題を**統合的・包括的**に評価し、その総合的な**最適解**を求めると共に、問題解決の**対策**（目標リスク選ぶ戦略）を**提示する評価研究**が、必要不可欠

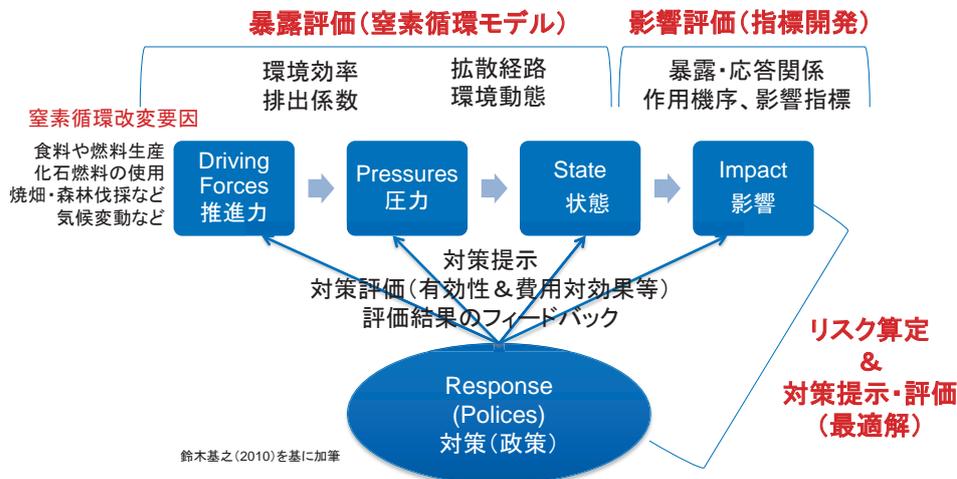


スライド5

リスク評価は複雑な環境問題に対する最適解を提供できる科学的な評価手法で、ものごとの正と負の両面の特質を共通の尺度によって定量的に評価できる。環境問題の構図は Driving Force（推進力）、Pressure（圧力）、State（状態）、Impact（影響）、Response（対策・政策）という枠組みで整理することができる（スライド6）。

窒素環境リスク評価の研究では、DからPを経てSまでが「暴露評価」で、各要因により窒素循環がどう改変されたかを時空間的に定量的に評価する。ここでは、既に開発したプロセスベースの窒素循環モデルを改良すれば、各要因による窒素循環の攪乱量を時空間的な窒素環境負荷量として定量的評価できる。SからIへは「影響評価」に該当し、各種窒素環境負荷量とその影響の応答関係を評価する研究である。IからRへはリスク算定と対策の提示・評価の研究であり、暴露評価で得られた「各種環境媒体中の窒素環境負荷量」と影響評価で得られた「各種影響の応答関係」を用いて、リスクを算定したうえ、算定したリスクの大小を基に、最適解となる対策を提示／評価を行う。リスク評価はこの構図で最適解を提供できる手法であると考えている。

## リスク評価は最適解を提供



物事の正と負の両面の特質を共通の尺度(リスク指標)として  
定量的に評価できる強力な科学的評価法

スライド 6

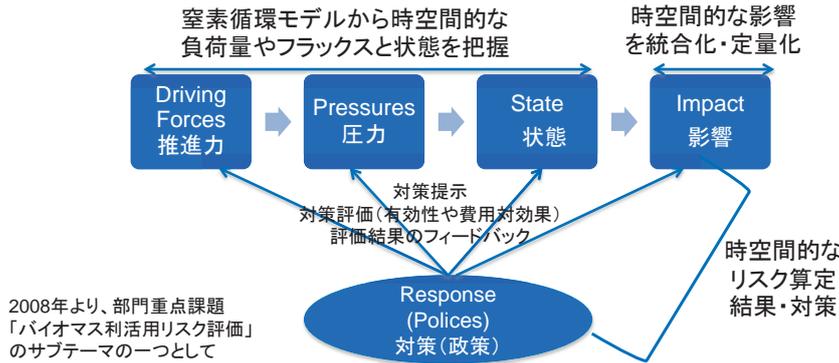
産総研では 2000 年からリスク評価技術の開発に取り組んできた。しかしながら、開発したリスク評価手法は窒素の環境リスク評価には適さない。その理由のひとつは、手法が簡単すぎることである。これまでに開発した手法は化学物質の管理規制のために開発したもので、ヒト健康と生態系への影響を別々に評価している。もうひとつは、これまでに開発した手法は直接的な影響は評価できるが、間接的影響や質もスケールも異なるものを含む多面的な影響を統合できるようなリスク指標がまだ開発されていない。そこで、私どもは、窒素の最適利用管理システムを構築したいという最終目標に向かって、窒素の環境リスク評価手法を確立することをめざした研究をしている。

具体的には、2008 年から、産総研の安全科学研究部門の重点課題であるバイオマス利活用リスク評価のサブテーマとして窒素の環境リスク評価手法を開発している(林 2011)。すなわち、バイオ燃料の生産を推進すると、エネルギー作物を栽培するための土地利用変化が生じる。その結果、窒素循環がかく乱されることによって、窒素関連の多面的な健康・環境への影響が現われる。私どもはこのような構図での窒素の環境リスク評価の課題を設定した(スライド 9)。

これまで取り組んできた研究のまとめと成果をスライド 10 に示した。まず、窒素循環改変要因の 1 つとして、近年注目されている油糧作物 *jatropha* (ジャトロファ) を例に、「人と食料を争わない、食料と土地を争わない、生物多様性を損なわない」というバイオ燃料推進 3 大原則に基づいて、国・大陸・グローバルの 3 つのレベルにおける潜在的なジャトロファ栽培面積と生産量の評価を行った(Li et al., 2010)。次に、ジャトロファの大規模なプランテーションに伴う土地利用変化による窒素循環への攪乱影響については、既に開発した地球規模の窒素循環モデル(Lin et al., 2000, 2001)を用いて検討している。最後に、窒素関連の多面的な環境影響を統合する共通リスク評価指標の開発では、emergy という新しい環境計量指標(Odum, 1996)を導入して、3 つのケーススタディー論文を発表した(Liu et al., 2012, Lu et al., 2012, 2013)。

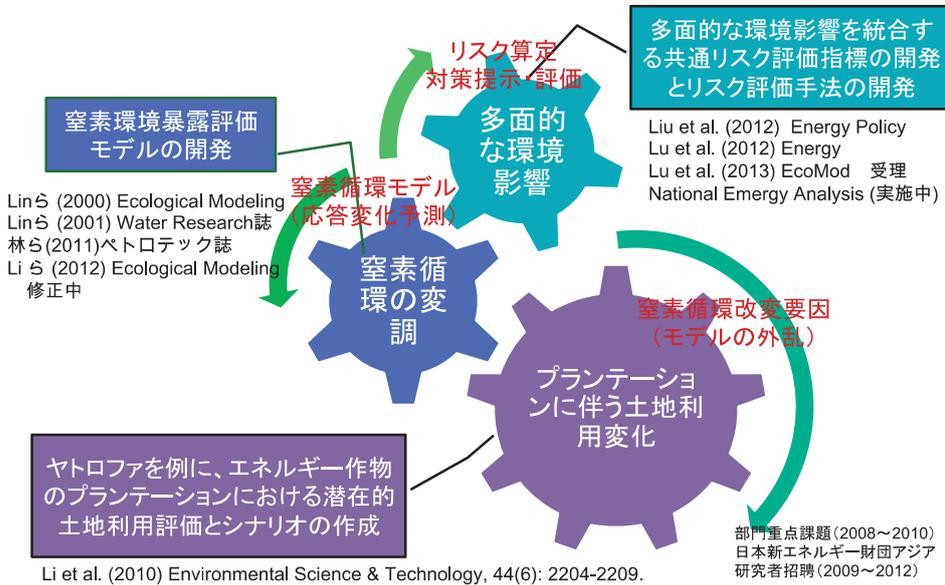
## 産総研での研究課題設定

- バイオ燃料の推進 (第一世代の耕作型バイオマス) ← D (窒素循環改変要因)
- エネルギー作物の大規模なプランテーション導入 ← P
- 土地利用変化 (農地の転換、森林伐採、窒素施肥等) ← P
- 窒素のBiogeochemical循環が変調 ← S
- 多面的な健康・環境影響 (温暖化や生物多様性損失等) ← I



スライド 9

## これまでの取組みと成果

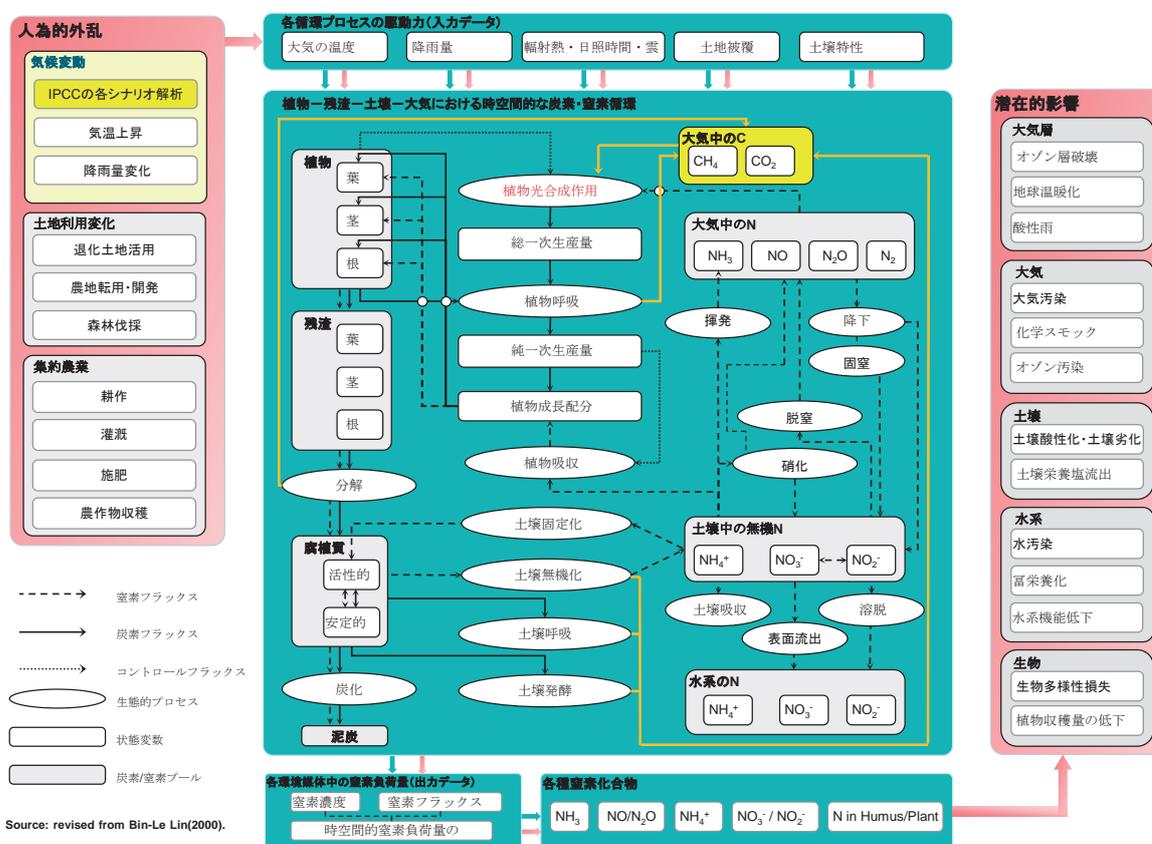


スライド 10

窒素の環境暴露評価で使った窒素循環モデルは2000年に開発した地球規模のモデル (Lin et al., 2000,2001) を最近改訂したものである。そのモデルの構造をスライド13に示す。対象は陸域である。人間の影響のない自然生態系では窒素の物質循環はバランスがとれていると仮定して定常状態で扱う。大気は一つの混合層として扱う。空間分解能は緯度経度 0.25 度 (2000年版では 0.5 度)、時間分解能は 1 日 (2000年版では 1 か月)。まず、人間活動のない自然生態系の窒素循環を想定して、温度、降雨、日照、土地被覆、土壌特性 (スライド13の図の上側) を与えて、モデルが定常状態になるまでシミュレーション

を行う。モデルが定常状態に達した時、各状態変数やプールの窒素濃度とフラックスが求まって、それらの値は自然生態系における窒素循環の状態だと仮定する。そこに外乱として気候変動や土地利用変化などの入力データ（図の左側）を与えると、定常状態の窒素循環が変化する。新たな定常状態に至るまでシミュレーションを行うと、窒素循環モデルに外乱を与える前と後のそれぞれの定常状態におけるフラックスやプールの窒素量の変化分はモデルの外乱であった気候変動や土地利用変化等の要因によるものと定量的に評価できる。この変化量（窒素環境負荷量）をもとに、オゾン層破壊、地球温暖化、酸性雨、光化学スモッグなどの大気への影響や、土壌、水系、生物への影響（図の右側）を評価することができる。

### モデルの構造と評価能力(0.25° のグリッド、日単位)



### スライド 13

既存の窒素循環モデルには、統計データをもとにした物質収支モデルと、窒素循環における窒素化合物の変換・移動過程をプロセス的に記述し表現したプロセスベースモデル (PBM モデル) がある。環境条件の変動に対する窒素循環の応答の予測には PBM モデルが適している。スライド 15 に国内外の主な PBM モデルの特徴をまとめて比較した。たとえば、窒素循環と炭素循環の結合のしかたがモデルによって違う。表では、植物体の炭素と窒素の比 (C/N of plant tissues) という項目で、固定している (fixed) か変化する (floating) かの違いとして現われている。

## 国内外における主要なプロセスベースモデル比較

| Processes and functions                 | TEM   | DNDC                   | Hybrid 3.0           | Century                                     | CASA                       | TBNC                    | DyN                    | TBNC-Updated      |
|---|---|------------------------|----------------------|---|----------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------|
| Plant N uptake                          | ○   | ○                      | ○                    | ○   | ×                          | ○                       | ○                      | ○                 |
| Plant N allocation                      | ×   | ×                      | ○                    | ×   | ×                          | ×                       | ○                      | ○                 |
| N turn over, reproduction and mortality | ×   | ×                      | ○                    | ×   | ×                          | ×                       | ○                      | ○                 |
| C/N of plant tissues                    | Fixed                                       | Fixed                  | Floating             | Fixed                                       | Fixed                      | Fixed                   | Floating               | Floating          |
| Nitrification                           | ×   | ○                      | ×                    | ○   | ×                          | ○                       | ○                      | ○                 |
| Denitrification                         | ×   | ○                      | ×                    | ○   | ×                          | ○                       | ○                      | ○                 |
| NO <sub>x</sub> production              | ×   | ○                      | ×                    | ○   | ○                          | ×                       | ○                      | ○                 |
| NH <sub>3</sub> production              | ×   | ○                      | ×                    | ○   | ×                          | ○                       | ○                      | ○                 |
| Reference                               | Raich et al. (1991), MacGuire et al. (1992) | Li et al. (1992, 2000) | Friend et al. (1997) | Parton et al. (1988), Schimel et al. (1996) | Potter et al. (1993, 1996) | Lin et al. (2000, 2001) | Xu and Prentice (2008) | Li and Lin (2012) |

○考慮している ×考慮していない Revised from Xu and Prentice, Global Change Biology (2008)

### スライド 15

出典：Xu-Ri and Prentice (2008) をもとに講演者改変

窒素循環モデル開発に関連して、次のような研究や体制整備が必要である。

- ・ 各種生態系の窒素飽和能（過剰な窒素に耐える能力）、脱窒能力、窒素固定能力などの解明
- ・ 土壌中の窒素循環メカニズムの解明、特に N<sub>2</sub>O 生成のメカニズムや生成量
- ・ モデルを検証するための観測値データベースの構築、たとえば硝化や脱窒のフラックス実測値。
- ・ 各種窒素循環モデルの相互検証システムの整備。例えば、同じ入力変数（例環境条件のデータセット）を提供し、異なるモデルの応答変化をシミュレートし、それぞれの出力結果をもって、相互検証する。

窒素関連リスクのうち何が重要かは地域の自然条件・社会条件によって違ってくる。

- ・ 大気降下の窒素負荷による生態系の酸性化・富栄養化、生物多様性損失（窒素欠乏系に適応していた野生生物の生息可能域減少、特に北欧で顕著）。
- ・ 日本でも北欧と同様のリスクの懸念があるが、川が短い、下水道整備率が高い等のことから顕在化していない。島国の生物多様性保全は重要。
- ・ 他の東アジア諸国では、主に過剰施肥に起因する水域富栄養化、大気・地下水汚染とそれによる人の健康問題、酸性雨等が顕著。
- ・ 地球規模には、気候変動やオゾン層破壊への寄与。

窒素の環境リスク評価結果を基に、最終的には、窒素最適利用管理システムを構築したい。すなわち、窒素循環から時空間的な窒素循環改変量とその影響の度合い（リスク）を基に、3つの段階におけるリスク削減対策を提示し、その結果をフィードバックしながら、窒素最適利用管理システムを構築していく。

- ・ 窒素循環の改変の原因をつきとめ、活性窒素の生成を抑制する。
- ・ 窒素循環がプロセスのどこでも滞らずにうまく脱窒に向かうように循環を健全化する（自然の循環に近づける）。
- ・ リスク評価から雪だるま式に影響が増幅しうるところを特定し、それを断ち切ることで影響を軽減する。

今後の研究展開と国際協力については次のように考える。

- ・ 窒素の最適利用管理システムを提案して社会で実装することをめざす。リスク評価はその必要不可欠な部分であり、産総研はこの部分の研究を担える。
- ・ 多面的な健康・環境問題に対する総合的な最適解を導くリスク評価方法はまだ開発されていない。窒素関連の健康・環境問題は当今の環境問題の代表格である。
- ・ 窒素環境リスク評価技術の研究開発は、行政のための技術開発（応用研究）だけではなく、これから目指す社会像（2S）を実現するための科学的基礎研究でもある
- ・ とくに東アジアでの国際協力を強化する。
- ・ Nitrogen in Asia の組織を強化する。たとえば、予算執行を含む実施機関にする、政府間の多国間共同研究にするなど。
- ・ トップダウン式の政策対応型の研究課題として、観察型研究、構成型研究、社会実装研究を一体化したものを日本から積極的に提案する。
- ・ なお、窒素循環は中国やインドでは大きな関心がある課題になっているが、日本ではまだ関心が薄い。関連した課題との連携が重要である。たとえば、気候変動の文脈に窒素の課題も含めるのがよいかもかもしれない。

## 引用文献

- ・ 林 彬勲 . 2011. バイオマスエネルギー推進における窒素への期待と憂慮. ペトロテック . vol. 34, p. 559-566.
- ・ Galloway, J. N. et al. 2004. Nitrogen cycles: past, present and future. Biogeochemistry. vol. 70, p. 153-226.
- ・ Lin, B.-L.; Sakoda, A.; Shibasaki, R.; Goto, N.; Suzuki, M. 2000. Modelling a global biogeochemical nitrogen cycle model in terrestrial ecosystems. Ecological Modelling. vol. 135, p. 89-110.
- ・ Lin, B.-L.; Sakoda, A.; Shibasaki, R.; Suzuki, M. 2001. A modelling approach to global nitrate leaching caused by anthropogenic fertilisation. Water Research. vol. 35, p. 1961-1968.
- ・ Liu J.; Lin B.-L.; Sagisaka, M. 2012. Sustainability assessment of bioethanol and petroleum fuel production in Japan based on emergy analysis, Energy Policy. vol. 44, p. 23-33.
- ・ Li Z.; Lin B.-L.; Zhao, X.; Sagisaka, M.; Shibasaki, R. 2010. System approach for evaluating the potential yield and plantation of jatropha on a global scale. Environ. Sci. Tech. vol. 44, p. 2204-2209.
- ・ Lu H.; Lin B.-L.; Campbell, D.E.; Sagisaka, M. 2012. Biofuel vs. biodiversity? Integrated emergy and economic cost-benefit evaluation of rice-ethanol production in Japan, Energy, vol. 46, p. 442-450.
- ・ Odum, H.T. 1996. Environmental Accounting: Energy and Environmental Policy Making. Wiley.
- ・ Xu-Ri; Prentice, I.C. 2008. Terrestrial nitrogen cycle simulation with a dynamic global vegetation model. Global Change Biology, vol. 14, p. 1745-1764.

## 5-3. セッション 3 の討論

### 1. 硝化・脱窒をする微生物の活性について

- 微生物の活性には温度依存性もおそらくあるが、FACE-N 実験での季節による変化を見ると大きくは変わらない。また、例えばアンモニアを硝酸に変化させる硝化菌の活動は、北極圏と日本での畑とでも大きくは変わらない。微生物群ごとの温度依存性の相違についての知見は乏しい。しかし、おそらくその温度に最も適応した群が優占できるのではないかと思われる。
- FACE-N で二酸化炭素濃度を変えた効果については研究中。イネの生育には大きな違いが出ているので、それに関わる場所で窒素にも若干挙動の違いがあり、例えば無機化速度は異なる。窒素固定についてははっきりとした統計的な差は出ていないが、異なる可能性はある。

### 2. 窒素循環のモデルについて

- 空間分布をもちながら時間変化も扱うモデルは世界でもまだ発達していない。国立環境研究所の伊藤昭彦氏たちのモデルでは炭素循環とともに窒素循環を時間変化のある形で扱っているが、まだ粗いものである。
- 海域の窒素動態は陸域とは大きく異なるので同じモデルではカバーされない。

### 3. リスク評価について

- 曝露評価、影響評価、リスク評価の 3 つの段階があり、窒素循環モデルは曝露評価の段階で使われる。
- リスク評価には便益と悪影響のトレードオフの評価を含む。それは合意形成の材料として使われるものである。

## 6. 総合討論

(「CRDS」と注記したもの以外は講演者からの発言。複数の人の発言をまとめた場合もある。関連の話題をまとめるために発言の順序を入れかえた場合もある。)

- [CRDS: 次のような論点を中心に議論したい。
  1. 社会的期待にこたえる研究開発課題、そのうちでも特に国が重点をおくべきものは?  
... モニタリング、観察型研究、対策技術開発、モデリング、評価。... それぞれのうちの重点は?
  2. 元素の循環のうちでなぜ窒素に注目するのか?... 窒素循環は大気・水圏・土壌にまたがっている。かつ他に比べ人間活動による影響量が多い。リンも重要だが大気が基本的に関与せず資源リサイクルの観点で扱える。炭素循環は温暖化関連ですでに研究プロジェクトが動いている。
  3. 窒素循環をどうしたいのか、目標は?... 必ずしも自然の循環に戻すことではない。まず自然の循環から大きく外れたところを修復し、それから適応型管理のプロセスへ、という考えでよいか?
  4. 推進体制... 国内、東アジア、世界の規模のものがそれぞれ必要。]
- 森林に関しては窒素過剰と因果関係が示された被害が顕在化していない。酸性雨についても、陸水の酸性化は見られたが、森林被害との因果関係を明確にすることは難しい。しかし、放置して危険が顕在化した時に実質的対策を考えるのは望ましくない。予測をし、それに基づいて早めに対策を立てるべき。窒素飽和の森林への影響などの研究はヨーロッパが進んでいる。日本ないしは東アジアでの窒素循環関連の環境リスク顕在化について予測をもっとしっかり進めるべき。
- 海への窒素放出は海洋生態系の一次生産を大きく変える。どのように変化するかよくわかっていない。その状況で今のように窒素固定を続けるのは危険が大きい。人間にとっての必要量を検討し、影響を最小にするように努力すべき。
- 生態系への影響については、海洋生態系、陸域生態系、富栄養化という柱を立てられるのではないか。
- 生態系への影響についてはモニタリングが重要である。
- 窒素は植物にとって貴重な資源であり、現代社会は窒素を作るのにも多量のエネルギーを使っている。原油価格が上昇した折には窒素肥料価格も遅れて追随した。このような貴重な窒素肥料を、日本ではかなり過剰に投入している。肥料の量を適正にする考えかたを普及し、ハーバー・ボッシュ法によるアンモニア生産を減らすをことも重要。
- 食料との関係。日本の人口は1億2千万から1億へと減少していくとしても、食料をどう確保するのは重要な課題。食料を輸入すれば自国内の環境負荷は小さいが、今後自給率を上げるとなれば窒素の環境負荷は増大する。
- 現在でも日本は食料を輸入しており生産国で窒素負荷が生じている。タイのアスパラガスが例。日本で窒素循環対策を明確にできれば、貿易相手国にメリットがあるようにできる。
- 日本では陸域生態系での窒素飽和は明らかではないが、農業生態系では畜産廃棄物での地下水汚染などの明確な環境汚染が多々見られる。アジアに目を向ければ中国やインドでは環境汚染はたくさんある。陸域の一部として農業生態系の窒素をどう減らす

かを考えること、どう循環をしているかをモニターすることは重要である。

• [CRDS :

o 窒素循環自体が自然から大きく外れたところだけでなく、食料生産やエネルギー消費という観点でも持続可能性から大きく外れたところについて対策を考えていく必要がある。

o それと並行して、リスクが顕在化する前にリスクを発見する研究を進める。]

• 自然の窒素固定量と同じ規模の人為的な固定が入り込んでおり、それは炭素の利用率にも影響するため、何かの攪乱が起こることはまちがいないだろう。どんな攪乱が起こっているかのアセスメントをすべき。ヨーロッパでは Europe Nitrogen Assessment が行なわれ、本が出されている。アジアでもやるべきだ。それによって、一次的研究の目標もよりよく見えてくるだろう。

• 多段階の波及効果によって影響が大きくなるという話があるが、ほんとうか、実証的に知る必要がある。

• 詳しく調べるまでもなく改善したほうがよい問題もある。中国では日本の 80 倍くらい肥料を使っている。人口あたりにしても多い。不必要な量を投与して利用効率は低く経済的にも損失をしている。

• [CRDS :

o 普遍的課題として、自然の循環に対する攪乱を減らすべきである。

o 日本にとって、エネルギーと食料の国家安全保障の問題に関連する。

o アジアへの貢献として、新興産業国の窒素循環の問題を解決していく。]

• [CRDS : 個々の研究者が取り組むだけでは解決できない課題は何か?]

o 農業への工業的窒素インプットを減らすこと。そのために

• 少ないエネルギーで窒素肥料を生産する方法。

• 生ゴミそのほかの有機物の廃棄物を減らし資源化することと、有機肥料が作物の代謝にまわるプロセスを加速すること。

• 重要な科学分野は微生物学・微生物生態学。すでに連携を考えている研究者もいる。

• 嫌氣的発酵（メタン発酵）をすれば炭素・窒素の結合が切れて、アンモニアができて肥料としては有効。ただし肥料として使うには衛生上の問題がある。またこのプロセスは技術が先行していて微生物の働きは未解明なところがある。

• メタン発酵はエネルギー利用のために期待されている技術ではあるが 残渣処理プロセスがエネルギー多消費である。残渣を肥料にできれば都合がよいが、環境の心配もあるので、実証試験やリスク評価をしっかりと進める必要がある。技術ができあがれば他国へも展開可能となる。

• 硝化菌の純粋培養に工学的な発想で取り組んでいる人がいる。これも有効な手段になりうる。

o CO<sub>2</sub> 濃度が上昇した場合に世界の光合成がどう応答するかはまだよくわかっていない。これまでの実験は窒素が豊富な条件で行なわれているが、自然界は窒素濃度が低い。

o 環境面では陸域での集水域 (catchment) スケールの物質収支を明らかにすることが重要である。肥料と大気からの負荷、土壌中でのプロセス、それが流れ出すプロセスを含む。また海洋での窒素循環と生態系への影響についても同様に考える必要が

ある。

- [CRDS：陸上では窒素循環の大きな部分が水で流れるので、集水域あるいは川の流域に注目するのがよい。そこで、これまで別々に研究していた人がいっしょに窒素循環に取り組む形を提案したい。どんなスケールあるいは場所に注目するのがよいか?]
  - 流域圏の研究は東京湾、大阪湾、伊勢湾ですで行なわれている。たとえば「伊勢湾流域圏の自然共生型環境管理技術開発」は文部科学省振興調整費(H18-22年度)で実施された。
  - さきほど集水域として意図したのは数十 km スケール。そこでの陸域生態系、土壌、河川を含む相互作用を見る。
  - 森林水文分野のプロセス研究では数ヘクタール(数百メートル四方)を見る。その中の土地利用は一定。しかし、琵琶湖集水域のような数百平方 km のスケールの農地も都市も含む地域を見ることもある。
  - 東京はアジアのメガシティでの窒素フローを考えるモデルケースになる。メガシティの窒素収支のモデルを作ることによってアジアに貢献できる。アジアでは大規模な都市化が進んでいるところが多い。東京が早く、上海などが追いかけている。海岸平野があり港湾がありビルがあるという形で均質化している。ダムを作って水を人工的に供給している。海洋の富栄養化は内湾で顕在化する。上流のダムで窒素飽和の問題が起こっていても下流域は希釈されれば小規模の問題ですむ。ある程度大きい地域で見てどこに重点的な対策を施すかを考えることが重要ではないか。
- [CRDS：集水域などでのローカルな知見を全球までスケールアップするにはどうするか。線形的に拡大すればすむか?]
  - スケール間をつなぐのはモデリングが重要。窒素の場合プロセスが複雑で、まだ不明な点が多い。土壌中の微生物が大きな外乱に対してどのようなバッファ作用をとりうるかといった点が不明である。
  - 生態プロセス研究もするべき。たとえば、貧栄養に適応した植物種が追いやられるケースなどを、植物の側、窒素循環の側の両面からしぼりこんで評価し、しぼりこんだ場所で細かい物質循環研究もする。
  - ローカルなケーススタディからすぐにグローバルに持っていくことは難しい。日本、中国、タイなどの東南アジアそれぞれで典型的なところを研究することによって普遍的なものがわかってくることを期待したい。
  - 欧米の強みはデータの数である。数多くのパラメータを長期にわたって調べておぼろげながらも仮説を立て、実証につなげている。日本でも、いろいろなケーススタディのデータを統一して解析できるようにしたい。比較可能なデータをとるようにしたい。
  - 大学の研究は小規模である。5-6年前からようやく大学演習林の間でのネットワークなどができデータベースの拡充が図られつつある。ただしファンディング体制がない。アメリカでは1980年代からあった。1960-70年代から酸性雨問題があって国家プロジェクトになったからだろう。
- 欧米、とくにヨーロッパでは越境大気汚染条約という法的拘束力のある条約のもとで各国が拠出して共通のプロトコルのもとで国際モニタリングが進められてきた。アジアの国は越境大気汚染条約に加盟しておらず、国際モニタリング体制はEANETだけ

で、地点数も少なく測定内容も雨と大気汚染に限られる。

- [CRDS：国際ファンディングにとって EU は重要か？]
- 当然 EU の存在は大きい。越境大気汚染条約の事務局は国連ヨーロッパ経済委員会だが、そこと EU との実質的結びつきもある。
- EU は窒素に関する共同研究を進めてきた。科学研究も、経済的損失の評価もしている。ただし、自治体によるモニタリングなどは日本のほうが緻密かもしれない。また海については日本が強い。研究船があって全国の研究者や学生が参加するシステムができている。淡水の場合は、大学などの研究室レベルで閉じているケースが多いので、今後まとまって研究するしくみができるとよい。
- EANET のほか、LTER（陸上生態系長期研究）やアジアフラックスなどの拠点間のネットワークがある。それらを合わせて共有データセットにすると強力だろう。
- 現状だけでなく、将来の気候変動や CO<sub>2</sub> 濃度変動に対して、生態系、とくに微生物がどう応答するかの研究も必要なので、フィールド拠点では人為的操作を加えた実験研究もやるのがよい。
- [CRDS：国立環境研がデータベースを統合しているのではないか。]
  - 「環境 GIS」というサイトで日本国内の環境汚染などの情報をまとめている。 <http://tenbou.nies.go.jp/gis/>
  - アジアフラックス <http://asiaflux.net/> の事務局をしている。
  - (窒素循環に関連するもの) 全体をまとめるには、予算が必要となるが、ついていない。研究費の出どころがまちまちであるせいもあり、研究所側から積極的に提案してこなかったせいもあると思う。
- [CRDS：アジアとの共同研究の推進体制]
  - 中国とは最初からジョイントで進めることが望ましい。それぞれ自国でお金を出す形でよい。中国は大きな地域であり、科学者のレベルも高くなってきた。研究資金も日本よりも多いほどだ。日本だけで閉じていては今後が心もとない。
  - 中国からはデータがなかなか出てこない。しかしこの点は変わりつつある。とくに、ジョイント・ファンディングのしくみがあるとデータ協定も結びやすいと思う。
  - [CRDS：JST がかかわっている国際共同研究の枠組みには、中国との二国間のものがある（その内には窒素循環に関連する主題のプロジェクトもある）。SATREPS という JICA との共同事業もあるがこれの対象には中国は含まれていない。ほかに東アジアの多国間の枠組みが動き出そうとしている。]
- [CRDS：異分野連携についてご意見をうかがいたい。
  1. ファンディングだけで異分野連携は進むのであろうか？
  2. 人材育成はうまくいっているか？若い人がはいつてくるか？
  - (1) (まとめ役に加えて) つなぎ役・コンサルティングを担当できる中堅研究者が重要。(2) 関心をもっている若手がかなりいる。問題はポスドク(ポストドクトラルフェロー)よりも先の就職口が少ないこと。  
研究に飛び込んでくるが、出口の人材の受け皿が少ない。
  - 文理融合型の研究をやっている。サブテーマのひとつは国際交渉のための政策科学。政策科学と自然科学の意思疎通はむずかしいが3年めでだいぶできるようになってきた。内容がわかる評価委員が厳しく成果を要求すると研究者がやる気になる。

- 日本では研究分野が縦割りになっている。科学に境界はないはずだが実質は学会や科研費の審査の枠などで切れている。枠を越えるには強制力が必要だろう。若い人については、博士課程に進む学生が少なくなってしまった。先輩がポストクから先に進めない状況なので無理もない。おそらくすべての分野に共通。教員ポストがふえなくてポストクでつなぐしかないとしても、前の職での経験が次のところでも役にたつならばがんばれる人もいる。
- 博士修了者を異業種に就職させる手もある。植物栄養学(肥料学)の卒業生で光学メーカーに就職して土壌分析に使える比色計をつくっている人もいる。文理融合の研究も総合地球環境学研究所でやっている。異分野の人がいっしょに仕事をするには同じフィールドに一緒に出て問題意識を共有することが大事である。数百万円クラスのファンディングがほしい。
- 最近の大きなファンドは機関ごとにつくので、他機関の人といっしょにチームを組みたい場合に制約になるケースが多い。CRESTでは領域内の課題間連携ができる場合もある。昔は科研費で少額だが多くの研究者が参加するしくみがあった。
- 異分野が融合しないと解明できないテーマ設定が重要。
- 窒素循環に関する論文を出せる学術雑誌は国際的に多数ある。
- 学会などについて
  - ・ 生態、海洋、大気といった領域をまたぐ議論が重要。
  - ・ アメリカの AAAS のような組織が日本にはない。
  - ・ 地球惑星科学連合などが一番広い受け皿である。ただしそこには生物関係者は少ない。アメリカの AGU も地球物理の学会だが、最近は生態系の部門がどんどん大きくなっている。
  - ・ 大気化学については研究会を作った。気象、大気中の反応、陸からの放出を扱う人の学会が別々だったので。
- フィールドを共有する。多様な課題に取り組める「スーパーサイト」を作る。たとえば、つくばみらい FACE の水田サイトにはのべ約 20 機関から 70-80 人が集まる。
- ・ [CRDS: とても充実した議論ができた。これまでの国の制度が十分に機能していない。苦しい境界条件の中だが、世の中への期待にこたえる行動を起こすためのスキームを作っていく必要がある。これを機会に横連携をさらに広げていただくことを期待する。CRDS ではプロポーザルをまとめるので、引き続きご協力をお願いしたい。]

## 7. まとめ

このワークショップでは結論をまとめて参加者で確認することは行わなかったが、主催者としては、次のような共通認識ができたと考えている。

持続可能な社会の目標として、「低炭素社会」「自然共生社会」とともに「循環型社会」があげられるが、これまで「循環型社会」の話題は人工物のリサイクルに偏りがちであった。しかし自然の元素循環の人間活動による改変も重要な問題である。そのうちで窒素循環については、人口を支える食料生産に不可欠な窒素肥料の利用をしながら環境負荷を低減するという困難な課題がある。

日本国内について見ると、これまでのところ広域で顕在化した深刻な問題は生じていないようである。しかし、規制のない野菜の硝酸イオンなどによる健康リスクや、窒素飽和が生じた森林から流出する反応性窒素による水域の富栄養化などが、将来顕在化する可能性はある。反面、水域の貧栄養化が問題とされることもある。アジアに目を向ければ、とくに中国やインドなどの新興経済圏で負荷の増加が大きく、深刻な環境問題が生じているところもあり、また大気・海洋の越境汚染や貿易を通じて日本とも関わる。アジアの窒素循環の実態を把握し、過剰な負荷をどう減らすか考えることが重要である。

窒素循環の実態把握には、比較的データがそろっている日本についても、自治体等の現状の環境モニタリングでは不足であり、観測を強化する必要がある。また外国については利用できるデータが乏しい。これには各国のモニタリングやデータ処理の能力、データに関する各国の政策、研究者間の情報交換の不足などさまざまな事情がある。

窒素肥料に由来する環境負荷を減らす対策としては、適度な速さで効く肥料の開発、窒素利用効率の高い作物品種の開発、硝化や脱窒の働きをする微生物の培養・利用、窒素分のリサイクルを重視した生活排水処理技術など、多様なものが必要である。その基礎としては植物や微生物の機能に関する研究も必要となる。また既存の技術を省エネルギー型に改造することも有意義である。

窒素循環のプロセス解明にあたっては、対策技術の効果や副作用の評価にあたっては、実験農場、集水域、東アジアなど、複数の空間スケールでの研究を並行して行い、モデリングによってスケール間をつなぐことが重要である。

アジアの窒素循環の問題解決には、国際的な取り組みが不可欠である。すでに行われている EANET（東アジア酸性雨ネットワーク）、LTER（長期陸域生態研究）、アジアフラックスなどの拠点間のネットワークを生かし、さらに国際科学技術協力を進めていくことが望ましい。

窒素循環の課題解決に向けた研究プロジェクトは、従来の専門分野を横断したものになる。科学と政策との関係にも踏み込むことになる。プロジェクトメンバーに限らず関心をもつ人が窒素循環の課題解決をいっしょに考える場が必要である。そのようなプロジェクトおよび場の運営を運営する人の働きが重要となる。また、従来の専門分野を横断した研究開発能力をもつ人材を育て、その活躍の場を作っていく必要がある。

## 付 録

### ワークショップ開催概要、プログラム

#### 開催概要

日時：平成 24 年 3 月 23 日（金） 10:00～17:30

場所：JST 東京本部別館 2 階会議室 A-2（千代田区五番町 7 番地 K's 五番町）

主催：JST 研究開発戦略センター

#### プログラム

セッション I、II、III は話題提供（各 15 分）と質疑討論。（以下、敬称略）

10:00 - 10:30 【開催趣旨説明】

- ・ 笠木 伸英（JST CRDS / 東京大学 大学院工学系研究科 教授）： 主催者挨拶
- ・ 中村 亮二（JST CRDS）： 窒素循環チームのこれまでの取組と本 WS の趣旨について

10:30 - 12:30 <セッション I> 【窒素循環の解明に関する研究開発課題】

- ・ 新藤 純子（農業環境技術研究所 物質循環研究領域 領域長）： 陸域
- ・ 大手 信人（東京大学 大学院農学生命科学研究科 准教授）： 森林・水・同位体
- ・ 山室 真澄（東京大学 大学院新領域創成科学研究科 教授）： 湖沼・海洋
- ・ 秋元 肇（日本環境衛生センター アジア大気汚染研究センター 所長）： 大気
- ・ 質疑討論（60 分）

12:30 - 13:10 <休憩>

13:10 - 14:40 <セッション II> 【対策に関する研究開発課題】

- ・ 間藤 徹（京都大学 大学院農学研究科 教授）： 作物・肥料
- ・ 小俣 達男（名古屋大学 大学院生命農学研究科 教授）： 植物
- ・ 水落 元之（国立環境研究所 地域環境研究センター 主任研究員）： 水処理・水環境
- ・ 質疑討論（45 分）

14:40 - 14:45 <休憩>

14:45 - 15:45 <セッション III> 【対策の評価に関する研究開発課題】

- ・ 林 健太郎（農業環境技術研究所 物質循環研究領域 主任研究員）： 試験地での計測・統合解析
- ・ 林 彬勲（産業技術総合研究所 リスク評価戦略グループ 主任研究員）： 広域モデル、リスク評価

15:45 - 16:00 <休憩>

16:00 - 17:30 <セッション IV> 【総合討論】

司会：増田 耕一（JST CRDS）

- ・ 研究重点目標（基礎・応用の研究者が連携し実践者につなぐ課題）
- ・ 現状把握・対策・対策の評価にわたる共同試験地の構想
- ・ 東アジア規模の問題解決のための国際協力をどのように進めるか 等

17:30 - <閉会挨拶>

## 参加者リスト（所属・役職はワークショップ開催時の平成24年3月現在。）

| 氏名       | 所属  | 役職           |
|----------|---|--------------|
| 講演者（講演順） |   |              |
| 新藤 純子    | 独）農業環境技術研究所 物質循環研究領域                            | 領域長          |
| 大手 信人    | 東京大学 農学生命科学研究科                                  | 准教授          |
| 山室 真澄    | 東京大学 新領域創成科学研究科                                 | 教授           |
| 秋元 肇     | 財）日本環境衛生センター アジア大気汚染研究センター                      | 所長           |
| 間藤 徹     | 京都大学 農学研究科                                      | 教授           |
| 小俣 達男    | 名古屋大学 生命農学研究科                                   | 教授           |
| 水落 元之    | 独）国立環境研究所 地域環境研究センター                            | 主任研究員        |
| 林 健太郎    | 独）農業環境技術研究所 物質循環研究領域                            | 主任研究員        |
| 林 彬勅     | 独）産業技術総合研究所 安全科学研究部門                            | 主任研究員        |
| 窒素循環チーム  |   |              |
| 笠木 伸英    | JST 研究開発戦略センター 環境・エネルギーユニット<br>／東京大学 工学系研究科     | 上席フェロー<br>教授 |
| 増田 耕一    | JST 研究開発戦略センター 環境・エネルギーユニット                     | フェロー         |
| 中村 亮二    | JST 研究開発戦略センター 環境・エネルギーユニット                     | フェロー         |
| 関根 泰     | JST 研究開発戦略センター 環境・エネルギーユニット<br>／早稲田大学 先進理工学部    | フェロー<br>准教授  |
| 福田 哲也    | JST 研究開発戦略センター 環境・エネルギーユニット                     | フェロー         |
| 前田 知子    | JST 研究開発戦略センター 政策ユニット                           | フェロー         |
| 鈴木 雅博    | JST 知的財産戦略センター                                  | 主査           |
| 単 谷      | JST 中国総合研究センター                                  | フェロー         |
| 府省関係者    |   |              |
| 荒木 徹也    | 内閣府 科学技術政策担当 グリーンイノベーショングループ<br>／東京大学 農学生命科学研究科 | 政策調査員<br>准教授 |
| 海邊 健二    | 文部科学省 研究開発局 環境エネルギー課                            | 行政調査員        |
| 河里 太郎    | 環境省 地球環境局 総務課 研究調査室                             | 係長           |
| 小早川 鮎子   | 環境省 地球環境局 総務課 研究調査室                             |              |
| JST      |   |              |
| 安岡 善文    | JST 研究開発戦略センター システム科学ユニット                       | フェロー         |
| 鈴木 至     | JST 研究開発戦略センター 環境・エネルギーユニット                     | フェロー         |
| 仲 大地     | JST 国際科学技術部                                     | 主任調査員        |
| 黒田 雅子    | JST 社会技術研究開発センター                                | フェロー         |

■ワークショップ企画メンバー■

|          |        |                |
|----------|--------|----------------|
| 笠木 伸英    | 上席フェロー | (環境・エネルギーユニット) |
| 増田 耕一    | フェロー   | (環境・エネルギーユニット) |
| 中村 亮二    | フェロー   | (環境・エネルギーユニット) |
| 関根 泰     | フェロー   | (環境・エネルギーユニット) |
| 福田 哲也    | フェロー   | (環境・エネルギーユニット) |
| 前田 知子    | フェロー   | (政策ユニット)       |
| 鈴木 雅博    | 主査     | (知的財産戦略センター)   |
| (協力) 単 谷 | フェロー   | (中国総合研究センター)   |

お問い合わせ等は下記ユニットまでお願いします。

CRDS-FY2012-WR-12

科学技術未来戦略ワークショップ

「窒素循環研究戦略ワークショップ」報告書

平成 24 年 3 月 23 日 (金) 開催

平成 25 年 3 月 March 2013

独立行政法人 科学技術振興機構 研究開発戦略センター 環境・エネルギーユニット  
Environment & Energy Unit,  
Center for Research and Development Strategy  
Japan Science and Technology Agency

〒102-0076 東京都千代田区五番町 7 番地

電 話 03-5214-7481

ファックス 03-5214-7385

<http://crds.jst.go.jp/>

©2013 JST/CRDS

許可無く複写 / 複製することを禁じます。  
引用を行う際は、必ず出典を記述願います。

No part of this publication may be reproduced, copied, transmitted or translated without written permission. Application should be sent to [crds@jst.go.jp](mailto:crds@jst.go.jp). Any quotations must be appropriately acknowledged.

