

世界の中の日本として窒素問題にどのように向き合うべきか

(独) 農業環境技術研究所物質循環研究領域 林 健太郎

1. はじめに

窒素 (N) は生物の多量必須元素である。大気の大部分 (78%) は分子窒素 (N_2) で構成されているものの、一部の窒素固定微生物を除き、生物は N_2 を直接に利用できない。人類の食料生産においても、かつては肥料としての反応性窒素 (N_2 を除く窒素化合物、以下、特に断らない限り窒素は反応性窒素を指す) の獲得が困難な課題であった。 N_2 からアンモニア (NH_3) を合成するハーバー・ボッシュ法が 20 世紀初期に確立して以来、窒素化学肥料の大量生産が可能となり、作物生産は飛躍的に向上した。2010–2011 年の窒素化学肥料の消費量は約 110 Tg N yr^{-1} に達し^{1,2)}、現在は世界人口の約半数が窒素化学肥料に依存している³⁾。

人類が窒素化学肥料の恩恵を享受する一方で、ハーバー・ボッシュ法による人為的窒素固定量はいまや生物的窒素固定量に匹敵するようになった。すなわち、全球の大気 N_2 の固定量は自然起源単独の 2 倍に加速されている⁴⁾。作物生産における窒素化学肥料の利用効率は世界平均で約 25% にとどまり⁵⁾、残りは大気、土、および水を介して環境に負荷される。また、家畜生産においても排せつ物から大量の窒素が発生する。

環境中の窒素は多様な形態 (例えば、無機態・有機態、酸化態・還元態、あるいは、ガス・粒子状物質・溶存物質) で存在し、その形態を変化させつつ循環する。その過程で各化合物の理化学性や生物との相互作用を通じて環境条件および生物に様々な影響を与える。このような複雑な窒素の流れを「窒素カスケード」と呼ぶ⁶⁾。人間活動に伴う環境への窒素負荷が増加し続けている結果、窒素カスケードを通じて、窒素は様々な環境問題に直接あるいは間接に関わる物質となった (図 1)。本稿では、人間活動に伴う窒素負荷が多様な環境影響をもたらすことを「窒素問題」と表す。

図 1 に示したように、窒素は井戸水の硝酸性窒素汚染のような局地的な問題から一酸化二窒素 (N_2O) がもたらす気候変動や成層圏オゾン破壊のような地球環境問題にまで関与している。しかし、日本における窒素問題の認識は、水質汚染や富栄養化の原因としての窒素が中心であり、温室効果ガスとしての N_2O への関心が近年に加わった状況と思われる。炭素や窒素が地球システムの物質循環において重要な役割を果たしていることは以前よりよく知られていた一方で、窒素問題に関する一般の理解は世界的にも十分に浸透していない。温室効果ガスとしての二酸化炭素を中心とした炭素循環と環境との関わりが、たとえ言葉だけでもよく知られていることと対照的である。その主な理由として、窒素問題の包括的な解明への科学的関心が薄かったことと、窒素と環境との複雑な相互作用を一般にわかりやすく説明することが難しかったことが挙げられている⁷⁾。そのような状況であっても、世界的には窒素問題への取り組みが活発化しつつある。本研究では、窒素負荷がもたらす環境影響を概観した上で、日本の窒素問題の特徴を述べ、世界における窒素問題解決への取り組みについて紹介し、そして、我々は今後どのように窒素問題に向き合い、その解決に貢献していくべきなのかを議論できることを願う。

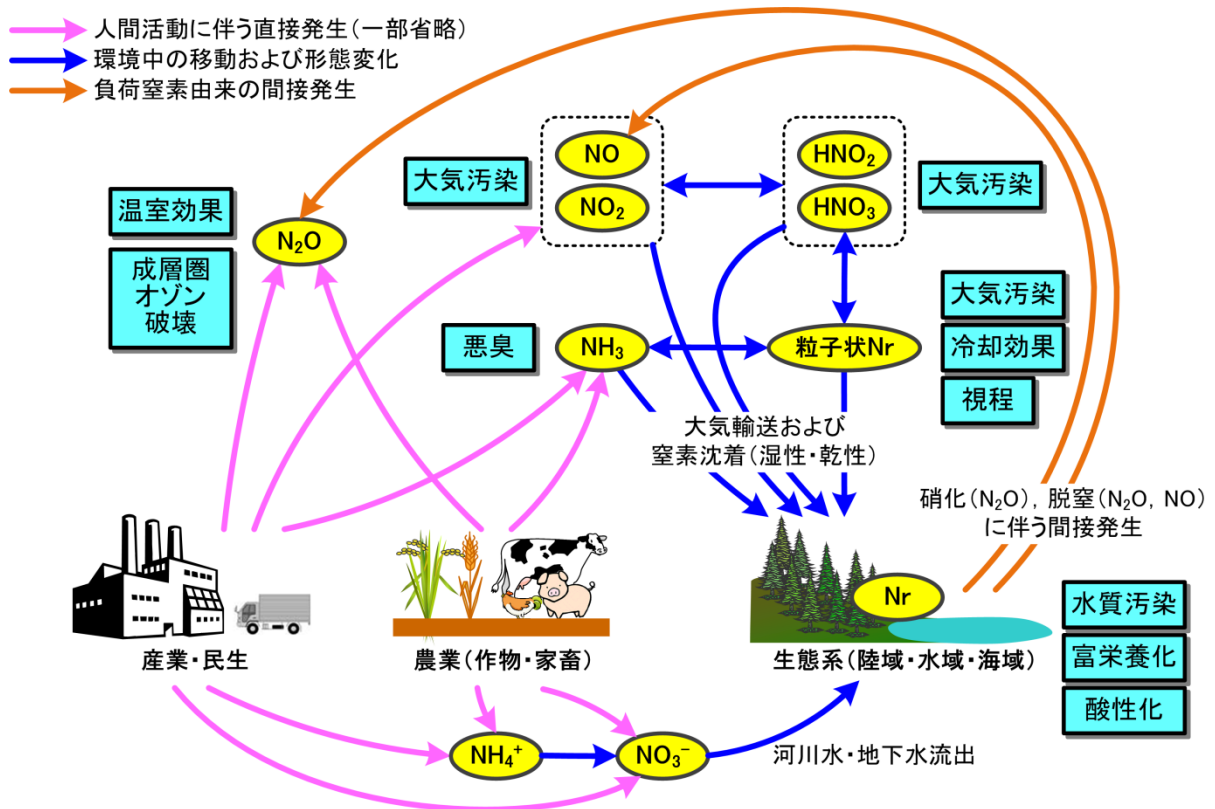


図1 人為起源の反応性窒素がもたらす多様な環境影響

Nr, 反応性窒素; NH₄⁺, アンモニウムイオン(アンモニア態窒素); NO₃⁻, 硝酸イオン(硝酸態窒素); N₂O, 一酸化二窒素; NH₃, アンモニア; NO, 一酸化窒素; NO₂, 二酸化窒素; HNO₂, 亜硝酸ガス; HNO₃, 硝酸ガス; 粒子状Nr, 硝酸アンモニウムなどの粒子状窒素化合物。

2. 日本の窒素問題

2.1. 窒素負荷に起因する環境影響の現状

窒素負荷をもたらす様々な人間活動のうち、食料生産・消費は最大の負荷源である。例えば、1997年の日本において、食料生産・消費に伴う環境への窒素負荷(1,675 Gg N yr⁻¹)⁸⁾は人間活動に伴う窒素化合物の大気発生量(603 Gg N yr⁻¹)⁹⁾の3倍近い大きさであった。現状と将来の日本および世界の窒素負荷については、本研究会の新藤博士の講演で詳しく述べられると思われるため、ここでは窒素負荷に起因する日本の環境影響を簡潔に整理する。

公共用水域の水質監視のうち窒素に関する項目は、「人の健康の保護に関する環境基準」(健康項目)としての硝酸性窒素及び亜硝酸性窒素および「生活環境の保全に関する環境基準」(生活環境項目)としての全窒素である。平成24年度は、健康項目では河川、湖沼、および海域のほぼ全ての地点で環境基準を達成したものの、生活環境項目の環境基準達成率は湖沼で12.8%、海域で88.6%に留まった¹⁰⁾。特に、湖沼水質保全特別措置法の指定湖沼では全て(ただし、全窒素の基準が定められている湖沼)において環境基準を超過した¹⁰⁾。このように湖沼の全窒素濃度が高い状態が続いている。湖沼水質保全特別措置法の指定湖沼の1つで

ある霞ヶ浦の全窒素濃度の推移を図2に示す。霞ヶ浦流域では様々な水質改善措置が行われているにもかかわらず、全窒素濃度には顕著な改善がみられないことが分かる。一方、地下水については健康項目としての硝酸性窒素及び亜硝酸性窒素の環境基準が定められており、①全国的な状況を把握するための概況調査、②汚染井戸周辺地区調査、および③汚染井戸の継続監視調査が行われている。平成24年度の環境基準達成率は、①96.4%、②76.6%、および③52.7%であり¹²⁾、汚染が問題となった井戸の半数とその周辺地域4分の1で環境基準を超過した状態が続いている。湖沼および地下水ともに、窒素の主な負荷源は農業（施肥窒素や家畜排せつ物）および生活排水、すなわち、食料生産・消費の影響が大きいと考えられている。ただし、後述のように反応性窒素の大気沈着も窒素負荷となりうる。

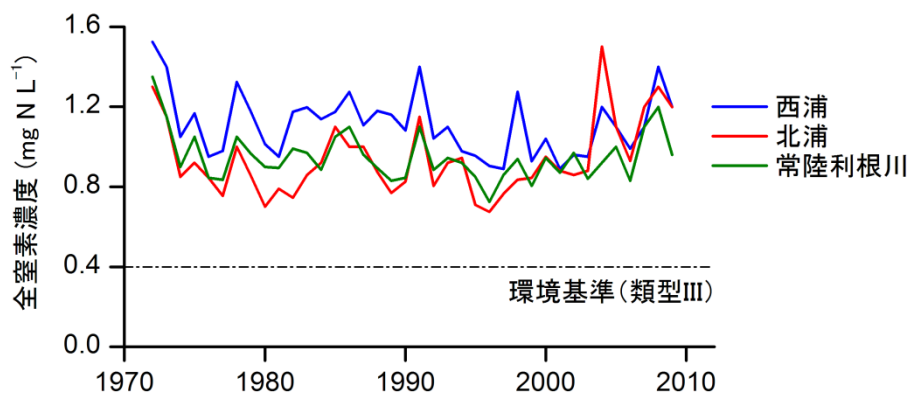


図2 霞ヶ浦の全窒素濃度の推移（出典：国立環境研究所¹¹⁾）

人間活動に伴う大気への窒素負荷は、窒素肥料を施用した農耕地や家畜排せつ物などからのNH₃の発生、および、化石燃料やバイオマスなどの燃焼に伴う窒素酸化物や窒素を含む粒子状物質の発生（発生した前駆物質から大気中で生成するものも含む；例えばNH₃とHNO₃から生成する硝酸アンモニウム粒子）に大別される。農業（施肥窒素、家畜排せつ物）は大気中のNH₃の主な発生源である。日本においても、施肥方法により相応のNH₃発生が起こるといった圃場レベルの知見は得られているものの（例：水田への30 kg N ha⁻¹の穂肥で尿素窒素の21%がNH₃として揮散¹³⁾）、全国的にどれだけのNH₃が発生し、大気NH₃に農業がどの程度寄与しているのかは十分に解明されていない。窒素酸化物は主に燃焼起源であり、食料生産・消費の直接の寄与は大きくない。ただし、農耕地における作物残渣の野焼きは、局地的な大気汚染の原因や、長距離を含む大気輸送中の化学反応において重要な化学種の発生源となりうる¹⁴⁾。そして、大気発生した反応性窒素は、大気輸送中に化学的に変質しつつ、降水と共に地表にもたらされ、または、ガス・粒子状物質として直接に地表に沈着する（窒素化合物の大気沈着、あるいは、窒素沈着という）。窒素沈着は、その発生源から離れた広範囲の地域に窒素をもたらし、集水域への窒素負荷の一因となりうる。

農業は、強力な温室効果ガスかつ成層圏オゾン破壊物質のN₂Oの主要発生源でもある。2012年の日本の人為起源N₂O発生量42 Gg N yr⁻¹のうち48%が農業起源であった（農耕地土

壤：30%，家畜排せつ物：18%）¹⁵⁾。ただし、これまで多数の研究が行われてきたものの、突発的な発生の寄与が大きい農耕地の N₂O 発生量を精度よく予測する手法は確立していない。N₂O の生成・消費は微生物のはたらきであるが、そこには土壌と作物（植物根）との強い相互作用が関与する。N₂O 生成のホットスポットが土壌－植物相互作用を通じてどのような形成、維持、そして消失するかのプロセス解明が農耕地の N₂O 発生の実態解明に不可欠である¹⁶⁾。

2.2. 構造的に大きくなりやすい窒素負荷

日本の人口密度の高さは窒素負荷が集中しやすい要因となるものの、食料生産・消費に伴う廃棄物や排せつ物に由来する窒素の大部分が有機肥料としてリサイクルされていれば窒素負荷を抑えることが可能である。しかし、日本では特に一部の湖沼・地下水の水質において窒素負荷の影響が顕在化している。よって、日本には窒素のリサイクルを妨げる構造的な問題が存在することが示唆される。

現在の日本は食料と飼料の多くを輸入に頼り、2013年の食料自給率（供給熱量ベース）は39%、飼料自給率は26%である¹⁷⁾。食料・飼料の消費に伴い発生する窒素の量は、その栄養価が同様であれば国内産でも国外産でも同程度である。ならば、農業生産に伴う窒素負荷が国内で発生しない点で、食料・飼料を国外に頼る現状はうまい戦略に見える（ただし、輸出国で窒素問題が深刻化すれば、この環境コストが将来的に内部化される可能性がある）。一方で、食料・飼料の高い輸入依存は、廃棄物や排せつ物の窒素を有機肥料としてリサイクルする点で不利である。なぜなら、リサイクル窒素を受け入れられる国内生産の場が限られるためである。ましてや、リサイクル窒素を国外に送ることは現実味に乏しい。結果として、食料・飼料の消費に伴い発生する窒素の大部分が余剰となって環境に負荷される。言い換えれば、日本は世界中から食料・飼料に含まれる形で窒素をかき集め、最終的に環境にばらまいている。日本は輸入額と輸出額の差分では世界一の食料輸入超過国である¹⁸⁾。よって、窒素の輸入超過でも世界一であるのかも知れない。

食生活の変化は窒素負荷を変える。経済発展に伴い畜産物（肉類、鶏卵、および乳製品）の消費量が増えるのは世界共通のことであり、日本も例外ではない¹⁹⁾。肉類はたんぱく質に富むため、その消費は結果として窒素負荷を増やすことになる。また、国内飼養の家畜について、その飼料の国内生産および家畜排せつ物が窒素負荷をもたらす。日本では1965年から2012年にかけて一人あたり年間の供給純食料が肉類で9.2 kg から30.0 kg、鶏卵で11.3 kg から16.7 kg、牛乳・乳製品で37.5 kg から89.5 kg に増加した¹⁷⁾。この間に総人口は9,920万人から12,750万人に増加し²⁰⁾、消費増加に人口増加を乗じた分の窒素負荷が増えたことになる。加えて、現在の日本では、本来食べられるのに廃棄される食品（食品ロス）が多い。食品関連事業者および一般家庭における食品ロスは年間500～800万トン（2010年）に達する（参考：世界全体の食料援助が年間400万トン、日本のコメ生産量が年間850万トン）²¹⁾。ここには生産現場から出荷されずに捨てられる農産物が含まれておらず、実際にはさらに多くが食品として消費されずに処分されている。食品ロスが増えるだけ窒素負荷も増えてしまう。

窒素負荷が空間的に集中すれば、そこでは環境影響（典型的には地下水や湖沼の水質汚染や富栄養化）が生じやすい。集約的畜産地域では地域内の農耕地に比して多量に発生する家

畜排せつ物が、肥料多投入型作物の生産地域では農耕地からの溶脱が増える窒素肥料が、窒素負荷の原因となる。これらの窒素負荷源が集水域のどこに位置し、水の流れと他の土地利用がどう関わるかといった要素もまた、窒素負荷がもたらす環境影響を大きく左右する。

2.3. 切り口で形が変わる窒素問題

窒素がもたらす環境影響の空間スケールは多様である。よって、窒素問題を評価する指標には、総量、一人あたり、および面積あたりなど様々な切り口がある。例えば、温室効果ガスとしての N_2O 発生量を評価するには国の総量がよく、食料消費に伴う窒素負荷を国別に比較するならば人口あたりがよく、生態系への影響評価に用いるには面積あたりがよい。目的に応じた指標は重要である。しかし同時に、指標が複数あることは、切り口によって見え方が変わることを意味する。単一の指標に頼っては窒素問題の本質を見誤る危険性がある。

ここまですら読む限り、読者の多くが日本の窒素負荷は大きいと思うであろう。しかし、国民一人あたりの窒素負荷を比べると日本は OECD 諸国の中で 2 番目に小さい（日本： $21.2 \text{ kg N cap}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ，OECD 平均： $47.9 \text{ kg N cap}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ）²²⁾。その原因は食料生産に伴う窒素負荷がとてもし小さいことにある（日本： $3.8 \text{ kg N cap}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ，OECD 平均： $26.2 \text{ kg N cap}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ）²²⁾。これは日本が輸入する食料・飼料を生産する国における窒素負荷が日本の負荷として考慮されていないためである。将来的には、食料・飼料輸入国はその生産国における窒素負荷を補償すべきという議論が起こるかも知れない。一方、国土面積あたりの窒素負荷を比べると日本はアジア諸国の中で 3 番目に大きく、2000 年時点で約 $50 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ であった²³⁾。環境への窒素負荷の観点では、日本の負荷は決して小さくない。また、農耕地の余剰窒素（耕地面積あたりの窒素負荷）という指標もある。これは農耕地への窒素投入量（施肥、大気沈着、窒素固定など）から作物として収穫される窒素量を差し引いたものである（ただし、事例により考慮する過程が若干異なる）。2002–2004 年の日本の農耕地の余剰窒素は 171 kg N ha^{-1} であり、これは OECD 諸国の中で韓国、オランダ、ベルギーに次いで 4 番目に大きく、OECD 平均 74 kg N ha^{-1} より約 100 kg N ha^{-1} も多い²⁴⁾。日本の農耕地には廃棄物や排せつ物由来の窒素をこれ以上に受け入れる量的な余地はなく、余地を作るには化学肥料としての窒素投入量を減らす必要がある。このように、指標ごとに様々な状況を読むことができる。個々の指標の切り口を考慮しつつ、多様な指標を用いて全体像をあぶりだすことが大切である。ただし、総合評価を行うには、各指標の統合的な解釈方法の開発が必要となる。

補足として、上記の指標はいずれも窒素の化学種を区別しない。冒頭で述べたとおり、窒素は環境中において酸化態、還元態（有機物を含む）、および N_2 と多様な化学種として存在し、ガス、溶存イオン、固体などの多様な化学形態をとる。そして、諸反応により化学種や化学形態がめまぐるしく変化する。これらのために特定の化学種を対象とした指標を定めにくい。対流圏で安定なガスとして存在する N_2O は例外的である。

3. 世界における窒素問題への取り組み例

3.1. 国際窒素イニシアティブ (INI)

INI は窒素問題に携わる研究者の組織であり、1998 年の第 1 回国際窒素会議において概念

が議論され、2003年に正式に発足した。INIの目的は、持続可能な食料生産における窒素の利便性を最適化するとともに、食料・エネルギー消費に伴う人の健康や環境への窒素の負の影響を最小化することである²⁵⁾。INIの主な活動は3年ごとの国際窒素会議の開催および世界各地の窒素アセスメントの実施の支援である。次回の国際窒素会議は2016年におそらくオーストラリアで開催の予定である。窒素アセスメントは欧州²⁶⁾およびアメリカ²⁷⁾で実施された。日本を含む東アジアの窒素アセスメントの実現に向けた研究コミュニティの確立が重要な課題である。

INIは地球圏－生物圏国際協同研究計画(IGBP)の認証活動でもある。2015年にはIGBP自体が次に述べるFuture Earth(FE)という巨大な国際プロジェクトに統合されることを踏まえ、INIもFEに貢献する方針であると、2013年の第6回国際窒素会議においてINI議長が明言した。INIは他機関との連携プロジェクトにも取り組んでいる。例えば、国連環境計画(UNEP)が事務局を担い、国連機関、民間企業、市民団体、および科学コミュニティから構成されるGlobal Partnership on Nutrient Management(GPNM)がまとめた報告書Our Nutrient World(世界の窒素・リン利用の現状と将来展望)⁵⁾の作成に貢献した。また、地球環境ファシリティ(GEF)の資金援助を得て、INIが研究計画を立案し、UNEPが実施する予定のInternational Nitrogen Management System(INMS:国際窒素管理システム)が現在プロジェクト準備ステージに入っている。INMSには農環研も参画を予定している。

3.2. Future Earth (FE)

FEは、かつてない大規模な国際プロジェクトであり、2015年より本格的な活動が開始する。自然科学系と人文・社会科学系の融合学際研究にとどまらず、研究コミュニティと社会の様々な利害関係者(行政・政策担当者、研究資金提供者、産業界、教育関係者、メディア、市民団体など)との協同を通じて、持続可能な展開を目指すところに特色がある²⁸⁾。先に述べたIGBPを含み、これまで動いていた国際プロジェクト(それぞれが巨大なものである)の多くがFEへの統合を予定している。FEには3つの大課題として、①ダイナミックな地球の理解、②地球規模の開発、および③持続可能な地球社会への転換、が設けられており、さらに分野を超えた統合を目指している。全球・地域規模の様々な問題が対象となる中で、持続的な食料生産や栄養塩(窒素・リン)の管理は重要な研究対象に位置付けられている²⁹⁾。

日本はFEに積極的にコミットしようとしている。日本(日本学術会議)は、アメリカ、カナダ、フランス、スウェーデンとともに5極の国際本部事務局を担い、また、総合地球環境学研究所がアジア地域事務局を担う³⁰⁾。Future Earthと連動する主要先進国の研究助成機関の連合体であるベルモントフォーラムには日本から文部科学省と科学技術振興機構(JST)が参加している。今後は文部科学省を中心にFEの国内委員会が設置される予定である²⁸⁾。JST社会技術研究開発センター(JST/RISTEX)では「フューチャー・アース構想の推進」事業としてフィジビリティ研究などの公募を始めている。2014年11月にJST/RISTEXが開催したFEワークショップでは、食・農と物質循環がテーマの一つとなり、筆者は窒素問題について話題を提供した。世界最大の食料輸入超過国の日本として、食料問題および窒素問題の解決への貢献の観点からもFEへのコミットが期待される。

3.3. 経済協力開発機構（OECD）

これまで OECD では、貿易農業局の農業環境指標³¹⁾のように農業活動に伴う環境負荷の一つとして窒素問題を扱ってきた。現在は、農業環境指標に加え、環境局環境政策委員会の2つの作業部会において人間活動全体に起因する窒素問題に取り組んでいる。一つは環境情報作業部会（WPEI）、もう一つは生物多様性・水・生態系作業部会（WPBWE）である。

WPEI では経済全体の窒素収支とその指標の開発に取り組んでいる。2.3 で述べた国民一人あたりの窒素負荷は、WPEI に提出された方法論の資料²²⁾の Tier 1 推計値（統計情報に基づき算定したもの）である。2014年3月31日～4月1日のワークショップにおいて方法論の議論を行い（筆者も参加）、その後はメンバー国のボランティアを募って窒素収支評価を行って問題を洗い出す方針となった。しかし、ボランティアに参加するメンバー国があらわれないために、WPEI のこの活動は終了する可能性が高いと聞いている。

WPBWE では窒素専門家グループ（筆者も参加）を設置してメンバー国の窒素に関する法令、規制、基準、および政策情報を収集している。また、農業分野の窒素政策に関するレポート提出のボランティアが募られ、日本もこれに応じて報告書を提出した（筆者ほか執筆し、関係省の確認を経たもの、現時点では非公表）。2015年2月のWPBWE 会合においてこれまでの情報収集の結果と今後の活動方針が議論される見込みである。

4. おわりに

本稿では日本の窒素問題を概観し、世界における窒素問題の取り組み例を紹介した。日本では、水質汚染、大気汚染、および気候変動の原因物質としての窒素に着目した個別研究が進んでいる一方で、様々に形を変えて環境を巡る窒素を包括的に捉え、窒素問題の全体像を解明し、有効な対策を導くための戦略的な研究に乏しいのが実情である。JST 研究開発戦略センター（JST/CRDS）は2012年3月に「窒素循環研究戦略ワークショップ」を開催し³²⁾、その成果と関連情報の収集整理に基づき、先見的な戦略プロポーザル「持続的窒素循環に向けた統合的研究推進」³³⁾を取りまとめた。JST/CRDS の担当者からは、行政・政策・資金提供機関に同プロポーザルをアピールをしているものの、反応は芳しくないと聞いている。なぜ窒素が問題なのか？総じて投げかけられるその問いに分かりやすく正しく答えるのは窒素問題に携わる研究者の責務でもある。

日本における窒素負荷の要因には、食料・飼料の高い海外依存、畜産物の消費量の増加、そして食品ロスの多さが挙げられる。これらはいずれも食料の消費スタイルが大きく影響する事柄である。日本の一国民として、世界の一市民として、我々個々人が窒素問題にどのように関与し、その問題解決に何ができるのかを考える時期にきているだろう。

参考文献

- 1) FAO (2014) FAOSTAT. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://faostat.fao.org/>
- 2) Heffer, P. (2013) Assessment of Fertilizer Use by Crop at the Global Level 2010-2010/11.

- AgCom/13/39, International Fertilizer Industry Association, Paris, 9 p
- 3) Erisman, J.W., Sutton, M.A., Galloway, J.N., Klimont, Z., Winiwarter, W. (2008) How a century of ammonia synthesis changed the world. *Nature Geosci.* 1, 636–639
 - 4) Gruber, N., Galloway, J.N. (2008) An Earth-system perspective of the global nitrogen cycle. *Nature* 451, 293–296
 - 5) Sutton, M.A., Bleeker, A., Howard, C.M. et al. (2013) Our Nutrient World: The challenge to produce more food and energy with less pollution. Global Overview of Nutrient Management. Centre for Ecology and Hydrology, Edinburgh on behalf of the Global Partnership on Nutrient Management and the International Nitrogen Initiative
 - 6) Galloway, J.N., Aber, J.D., Erisman, J.W., Seitzinger, S.P., Howarth, R.W., Cowling, E.B., Cosby, B.J. (2003) The nitrogen cascade. *BioScience* 53, 341–356
 - 7) N-PRINT Team (2015) Background Information. The website of the N-Print Project. <http://www.n-print.org/background>
 - 8) Yagi, K., Minami, K. (2005) Challenges of reducing excess nitrogen in Japanese agroecosystems. *Sci. China Ser. C* 48 Suppl., 928–936
 - 9) REAS 1.11 (2007) Version 1.11, Regional Emission inventory in ASia. http://www.jamstec.go.jp/frsgc/research/d4/reas_h_a.html (*2000 年以降のインベントリについては REAS 2.1 がよい; <http://web.nies.go.jp/REAS/>)
 - 10) 環境省 (2013) 平成 24 年度公共用水域水質測定結果. 環境省水・大気環境局, 130 p
 - 11) 国立環境研究所 (2015) 霞ヶ浦データベース. 国立環境研究所生物・生態系環境研究センター. <http://db.cger.nies.go.jp/gem/inter/GEMS/database/kasumi/index.html>
 - 12) 環境省 (2014) 平成 24 年度地下水質測定結果. 環境省水・大気環境局, 93 p
 - 13) Hayashi K, Nishimura S, Yagi K (2008) Ammonia volatilization from a paddy field following applications of urea: Rice plants are both an absorber and an emitter for atmospheric ammonia. *Sci. Tot. Environ.* 390, 485–494
 - 14) Hayashi K, Ono K, Kajiura M, Sudo S, Yonemura S, Fushimi A, Saito K, Fujitani Y, Tanabe K (2014) Trace gas and particle emissions from open burning of three cereal crop residues: Increase in residue moistness enhances emissions of carbon monoxide, methane, and particulate organic carbon. *Atmos. Environ.* 95, 36–44
 - 15) 地球環境研究センター (2014) 日本国温室効果ガスインベントリ報告書 2014. 国立環境研究所, http://www-gio.nies.go.jp/aboutghg/nir/2014/NIR-JPN-2014-v3.0_J.pdf
 - 16) Hayashi, K., Tokida, T., Kajiura, M., Yanai, Y., Yano, M. (2015) Cropland soil-plant systems control production and consumption of methane and nitrous oxide and their emissions to the atmosphere. *Soil Sci. Plant Nutr.* 61, 2–33
 - 17) 農林水産省 (2014) 平成 25 年度食料需給表.
 - 18) 総務省統計局 (2014) 第 9 章貿易, 世界の統計 2014.
 - 19) Shindo, J., Okamoto, K., Kawashima, H. (2006) Prediction of the environmental effects of excess nitrogen caused by increasing food demand with rapid economic growth in eastern Asian

- countries, 1961–2020. *Ecol. Model.* 193, 703–720
- 20) 総務省統計局 (2014) 第2章人口・世帯, 日本の統計 2014.
 - 21) 農林水産省 (2013) 食品ロス削減に向けて～「もったいない」を取り戻そう!～. http://www.maff.go.jp/j/shokusan/recycle/syoku_loss/pdf/0902shokurosu.pdf
 - 22) Bleeker, A., Sutton, M.A., Winiwarter, W., Leip, A. (2013) Economy-wide nitrogen balances and indicators: Concept and methodology. ENV/EPOC/WPEI(2012)4/REV1, OECD, Paris
 - 23) Shindo, J., Okamoto, K., Kawashima, H. (2003) A model-based estimation of nitrogen flow in the food production–supply system and its environmental effects in East Asia. *Ecol. Model.* 169, 197–212
 - 24) OECD (2008) Environmental Performance of Agriculture in OECD Countries Since 1990. OECD, Paris, 575 p
 - 25) INI (2015) 国際窒素イニシアティブのウェブサイト. <http://www.initrogen.org/>
 - 26) Sutton, M.A., Howard, C.M., Erisman, J.W. et al. (2011) The European Nitrogen Assessment: Sources, Effects and Policy Perspectives. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 664 p
 - 27) Suddick, E.C., Davidson, E.A. (2012) The Role of Nitrogen in Climate Change and the Impacts of Nitrogen-Climate Interactions on Terrestrial and Aquatic Ecosystems, Agriculture, and Human Health in the United States: A Technical Report Submitted to the US National Climate Assessment. North American Nitrogen Center of the International Nitrogen Initiative (NANC-INI), Woods Hole Research Center, 149 Woods Hole Road, Falmouth, MA, 02540-1644 USA
 - 28) 総合地球環境学研究所 (2014) Future Earth 持続可能な地球社会を目指して. 総合地球環境学研究所, 11 p. http://www.chikyu.ac.jp/future_earth/pdf/20141001.pdf
 - 29) Future Earth (2014) Strategic Research Agenda 2014. International Council for Science (ICSU), Paris. <http://www.futureearth.org/media/strategic-research-agenda-2014>
 - 30) 総合地球環境学研究所(2015) Future Earth in Asia 持続可能な未来の社会へ向けて. 総合地球環境学研究所. http://www.chikyu.ac.jp/future_earth/index.html
 - 31) OECD (2015) OECD Agri-environmental indicators website. <http://www.oecd.org/tad/sustainable-agriculture/agri-environmentalindicators.htm>
 - 32) CRDS (2013) 「窒素循環研究戦略ワークショップ」報告書. 科学技術振興機構研究開発戦略センター, CRDS-FY2012-WR-12, 74 p. <http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2012/WR/CRDS-FY2012-WR-12.pdf>
 - 33) CRDS (2013) 戦略プロポーザル: 持続的窒素循環に向けた統合的研究推進. 科学技術振興機構研究開発戦略センター, CRDS-FY2012-SP-01, 45 p. <http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2012/SP/CRDS-FY2012-SP-01.pdf>