

持続可能な環境と食料安全保障を両立させる窒素利用の在り方

林健太郎*

〔キーワード〕：窒素問題，窒素利用，窒素汚染，
窒素循環，持続可能性

1. はじめに

窒素 (N) はタンパク質や DNA の形成に不可欠な元素である。地球大気の 78% を構成しているように、窒素自体はどこにでもある元素である。しかし、大気の大半を占める窒素は 2 個の窒素原子が三重結合で強力に結びついた分子窒素 (N_2 ，窒素ガスともいう) であり、安定かつ不活性でほとんどの生物は利用できない。生物学的窒素固定 (BNF: biological nitrogen fixation) の能力を有する一部の微生物だけが、 N_2 からアンモニア (NH_3) を合成できる。元来、地球生態系は BNF を窒素循環の最上流として成立していた。植物はアンモニア性や硝酸性の窒素を吸収する。動物は他の生物あるいはかつて生物だった有機物を摂食して窒素を取り入れている。人類も他の動物と同じである。私たちはそれを「食料」と呼んでいる。

地球史としては極めて最近の 20 世紀初期に、人類はハーバー・ボッシュ法という人工的窒素固定技術を獲得した。固定した窒素の主な用途は化学肥料であった。この技術が世界に普及するには 50 年ほどを要したが、緑の革命として知られる 1950~60 年代から化学肥料消費と作物生産が大きく伸び、世界人口の増加を支えてきた。2022 年 11 月には世界人口が 80 億人の大台を突破した。2050 年前後には 100 億人に達すると予測されている。食料の獲得による人口の継続的な増加は一つのサクセスストーリーである。人類は自身の環境容量のキャップを上げ続けることができたのである。しかし、生物圏から滲み出すように分離形成された人間圏は肥大化を続け、地球本体の環境容量を圧迫するようになった。食料増産にも負の側面がある。詳細は後述するが、人類の窒素利用は窒素汚染を伴うトレードオフとなっている。また、人類の窒素利用には、戦争の道具となる爆薬のように暴力的なものもある。

本稿は、窒素を欲した人類が遂に自由に使える窒素を手にした経緯を概観し、その成功が人口問題、食料・国家安全保障への懸念、および地球から局所スケールの多様な窒素汚染という環境問題を生み出してきたことを述べる。窒素利用の負の側面を解消し、将来世代が窒素利用の便益を享受して幸せに暮らしていくために、私たちにできることは何か、そして、どのような変容を成していくべきなのかを考える機会となれば幸いである。

2. 窒素を欲した人類の歴史 ～火薬、肥料、そして様々な用途へ

元素としての窒素の発見は 1772 年とされる。ただし、 N_2 を単離同定したのではない。空気を詰めた密閉容器内で炎が消えるまでロウソクを燃し、生じた二酸化炭素を吸収させた後に、不燃でいてハツカネズミが窒息する気体が残ることを発見したのである。確かにその気体のほとんどは N_2 ながら、アルゴンなども残っていただろう。一方、人類は遥かに昔から、それとは知らずに反応性窒素 (N_2 を除く窒素化合物の総称、reactive nitrogen [Nr]) を利用してきた。BNF は農地や草地を肥やし、排せつ物などの有機物に含まれる Nr は肥料になる。

8 世紀ぐらいには硝石 (硝酸カリウム) が火薬となることが発見され、西暦 1000 年ぐらいには中国で黒色火薬 (硝石と炭と硫黄を混ぜたもの) が発明され、戦争の道具となった (ヘイガー, 2010)。近代にはニトログリセリンやトリニトロトルエンといった爆発力の高い Nr が開発され、戦争をより破壊的にした。不安定で暴発しやすいニトログリセリンを珪藻土に染み込ませ、筒に収めて導火線を付け、安全に使える爆発物とした発明品がダイナマイトである。発明者のノーベルは、ダイナマイトの戦争利用を悔やみ、彼の遺言からノーベル賞が創設された。この経緯のため、平和賞が最も重みのある賞とされる。ノーベル賞とは、窒素を手に入れた人類のモニュメントでもあるだろう。

人口が増えると、それだけ多くの食料が必要になる。農地を増やすことには自ずと限界がある。なれば単収を上げる必要があり、それを可能とする肥料が求められる（農薬、品種、機械化などの農業技術も重要であることを添えておく）。19世紀末の欧州では、このままでは食料生産が頭打ちになり、いずれ飢餓が起こると懸念された。当時の欧州では、南米に出向いてグアノ（鳥糞石、長い年数を掛けて積もった海鳥の糞が石化したもの）やチリ硝石（かつて海だったアタカマ砂漠で採れ、硝酸ナトリウムが主成分）を採掘して利用していた。これらは化石燃料と同じく枯渇性の資源であり、グアノは早々に掘り尽された。N₂は周りにいくらでもあるのに、肥料となるNrが欠乏しそうになったのである。

この状況を打開するために、20世紀はじめに人工的窒素固定技術の開発競争が起こった。例えば、空気中でのアーク放電によりN₂から主に窒素酸化物（NO_x）を生成するビルケランド・アイデ法、生石灰から作り出した炭化カルシウムに高温下でN₂を吹き付けて石灰窒素を生成するフランク・カロ法（同法は現在も一部で用いられている）、そして、N₂と水素を高温・高圧下で反応させてNH₃を生成するハーバー・ボッシュ法である。ハーバー・ボッシュ法は大きな成功を見て、1913年にドイツで商業生産が始まった。同法は二度の世界大戦を経て世界に普及し、緑の革命として知られる1950年代以降、同法によるNH₃製造が急速に伸び、化学肥料の消費

量が世界的に増加した。現在の人工的なNH₃生産量は陸域生態系のBNF量を大きく上回っている（Fowler et al., 2023；林ら, 2021）。余裕のある作物生産力は家畜飼料の生産にも振り向けられ、畜産物の生産も大きく伸びた。世界人口は食料増産に支えられて増え続けている（図1）。人類は、その何百万年も歴史において初めて、豊富な食料という黄金を手に入れたのである。

人類はNrの用途を工業原料にも広げてきた。例えば、ナイロン、ウレタン、メラミン、アクリロニトリルといった合成樹脂にも窒素が使われている。青色ダイオードは窒化ガリウムからできた半導体ダイオードである。これで赤・緑・青（RGB）の光の三原色が揃って白色ダイオードが実用化され、照明工学とこれを用いた施設栽培などが大きく発展した。NH₃は水素キャリアとして着目され、分子中に炭素を含まないことから脱炭素化に資する燃料としても注目されている。石炭火力発電所における混焼（将来には専焼）や、NH₃を動力源とするアンモニア船の開発などが進められている。N₂についても、安定で安価で大量に手に入ることを活用し、充填ガス、洗浄ガス、医療ガス、また、冷媒としての液体窒素などの多様な用途が見出されている。

3. 窒素問題～利用と汚染のトレードオフ

うまい話には得てして裏がある。人類の窒素利用も例外ではない。人口増加はエネルギーや資源の要

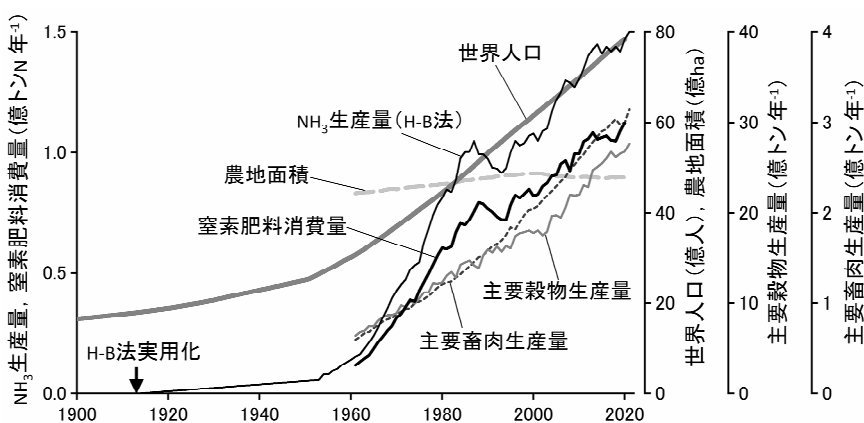


図1 人工的窒素固定量、農業生産、世界人口の推移

H-B法：ハーバー・ボッシュ法、主要穀物生産量：コメ、コムギ、トウモロコシの合計、主要畜肉生産量：ウシ、ブタ、ニワトリの合計。
林（2023）を改変。

求量を比例的に増やし、経済成長は更に一人あたりの要求量を増やす（少なくともこれまではそう推移してきた）。その結果、一生物種にとっては莫大なはずの地球の環境容量が逼迫している。豊富な食料は、食品ロスや飽食・肥満という新たな問題を生みだした。その一方で、経済格差や紛争・戦争をもたらす貧困や食糧難は今なお解決していない。そして、肥料や工業原料として利用される Nr の大部分が Nr のまま環境に排出されている。多投入の農地はその現場の一つでもある。反面、経済事情で窒素肥料が手に入らない国々での過剰耕作は、土壌有機物として蓄えられた窒素などの収奪による土壌劣化をもたらす。化石燃料の燃焼や廃棄物の焼却においても主に NO_x の形で Nr が発生する。

環境に排出された Nr は、その化学種の理化学性に応じた多様な窒素汚染をもたらす。主な影響は、地球温暖化（一酸化二窒素 [N₂O]）、成層圏オゾン破壊（現在は N₂O が最大の寄与物質、Hayashi and Itsubo, 2023）、大気汚染（NO_x、NH₃、硝酸ガス [HNO₃]、PM2.5 の主要成分であるアンモニウム塩・硝酸塩粒子など）、水質汚染（硝酸性窒素 [NO₃⁻]、亜硝酸性窒素 [NO₂⁻]）、富栄養化（溶存 Nr 全般、全窒素として監視されることが多い）、および酸性化（HNO₃、NH₃ [硝化の第一段階のアンモニア酸化において酸として寄与]）である。窒素利用の便益が窒素汚染の脅威を伴うこのトレードオフを「窒素問題」（nitrogen issue）と呼ぶ（図 2）。

重要な課題であるはずの窒素問題への世間的な認識はいまだに薄い。筆者は、1990 年ごろの地球温暖化問題と似た状況、つまり、問題の存在を広く知らしめる努力が必要な段階と捉えている。ただし、窒素汚染の影響は地球温暖化と比べて見えにくい。窒素は地球温暖化を含む遍く環境問題に関わっているものの、他の原因物質の影響もあって窒素単独の寄与がわかりにくい。さらに、環境中の窒素の挙動が複雑で科学的な未知が多く残されていることも窒素汚染をわかりにくくさせている。地球環境問題の総合評価を行ったプラネタリー・バウンダリー（地球システムの限界）において、生物化学的フローの「窒素」が突出して高リスクと評価されたこと（Rockström et al., 2009；Stefen et al., 2015；Richardson et al., 2023）は比較的良好に知られているだろう。では、その意味についてはどうだろうか。これは沿岸域の富栄養化リスクを評価したものであった。その他の項目にも、例えば、「気候変動」と「成層圏オゾン破壊」には N₂O、「大気エアロゾル負荷」には硝酸塩・アンモニウム塩粒子、「遺伝的・機能的多様性」には栄養塩としてのその多寡が生物多様性と生態系機能に影響する Nr 全般が関与する。どこをめくっても窒素が隠れている。

翻って日本ではどうだろう。窒素汚染とは、大気汚染や水質汚染のようにおよそ解決した公害の類と捉えられているのかも知れない。日本が高度成長期の公害をよく克服し、世界トップ水準の排ガス・

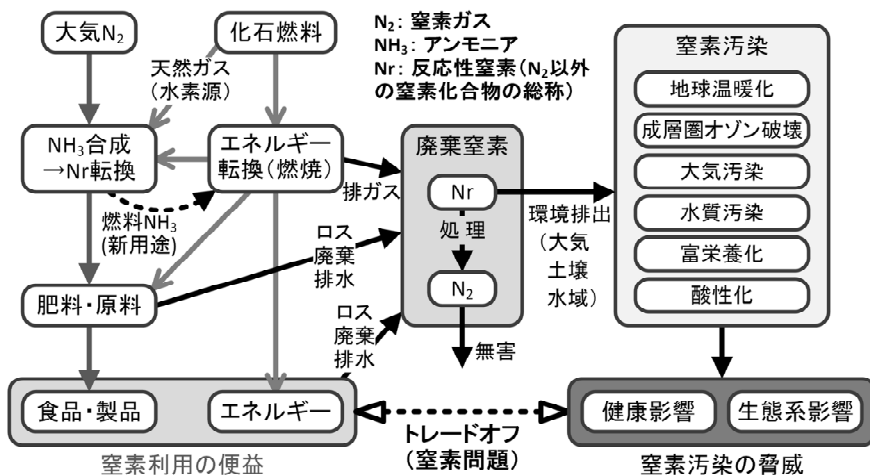


図 2 窒素問題：窒素利用の便益と窒素汚染の脅威のトレードオフ
 京都新聞に提供した図（著者作成）を改変。

排水処理技術を有することは事実である。しかし、現在の日本は食料・飼料・原料・燃料の大部分を輸入に頼っている。これらの輸出国がその生産に伴う窒素汚染を肩代わりしている。2012年において、日本は国際貿易を通じて世界で最も他国に窒素排出を負わせている国であり、その量 330 万 t N 年^{-1} は2位のドイツの約2倍であった (Oita et al., 2016)。もし、輸入を控えて国産で賄おうとすれば、十分な対策を伴わない限り、自国の窒素汚染が悪化する。

では、どうすればよいのだろうか。まずは、多様なステークホルダーの窒素問題への認識を深める必要がある。特に、ステークホルダーの種別によらず、一人ひとりの日々の暮らしが食料・製品・エネルギーの消費という形で窒素問題と深く結びついている。このことを自分ごとに落とし込むことが求められる。そこから「皆ごと」への展開の機会が生まれると期待する。窒素問題の緩和には三つのオプションがある (林ら, 2021)。一つは、生産・消費の窒素利用効率 (NUE : nitrogen use efficiency) の向上であり、特に食料生産に関して農学・土壌学が果たす役割は大きい。もう一つは、環境に漏れようとする Nr を無害な N_2 に処理することである。ただし、処理にもエネルギー・資源が必要なため、人間活動の結果生じる廃棄窒素 (nitrogen waste, Nr と N_2 の双方を含む、図2) そのものを減らすことが優先される。最後の一つは、NUE がより高い食品への転換や過剰消費を控えるなど、そもそもの窒素要求量を抑えることである。これらは自然科学・技術のみでは達成が困難であり、政策や個人・社会の行動変容も求められる。「食」は人間文化と深く関わっていることから、人文・社会科学の知見も大切である。

国際的には、窒素管理に向けた取り組みが本格化しつつある。専門家グループである国際窒素イニシアティブ (INI : International Nitrogen Initiative, INI, 2023) が企画し、国連環境計画 (UNEP : United Nations Environment Programme) が推進した国際窒素管理システムプロジェクト (INMS : International Nitrogen Management System, 2017年10月~2023年6月, INMS, 2023) が後押しとなり、2年ごとの国連環境総会 (UNEA : United Nations Environment Assembly) の第4回と第5回のそれぞれで「持続可能な窒素管理決議」が採択され、UNEP が設けた窒素作業部会ではメンバー国 (日本も環境省を窓口として 2022

年より参加) による行動計画の策定などが議論されている。第6回 UNEA は 2024年2月26日~3月1日に開催予定である。INI はまた、1998年から原則3年ごとに国際窒素会議を開催してきた。第9回会議は 2024年2月6日~8日にニューデリーで予定されている (INI, 2023)。筆者は、2022年11月より INI 東アジア地域センター代表を担っており、国内外の専門家のネットワークおよび環境省や農水省への専門的見地からの支援などに取り組んでいる。

日本においても窒素問題を対象としたプロジェクトが展開しつつある。筆者は 2015年に有志による「日本窒素専門家グループ」(JpNEG : Japanese Nitrogen Expert Group, JpNEG, 2023) を立ち上げ、多分野にまたがる専門家の情報共有を図るネットワークとなっている。JpNEG を通じた連携をきっかけとして、地球研実践プロジェクト「人・社会・自然をつないでめぐる窒素の持続可能な利用に向けて」(Sustai-N-able, 2022~2027年度, SusN, 2023) の実現に至った。Sustai-N-able では、学際・超学際アプローチにより、窒素問題をわかりやすく伝えるナラティブの制作 (例 : リーフレット, SusN, 2023) や、将来世代の持続可能な窒素利用に資する統合知の形成を目指している (図3)。また、ムーンショット型研究開発事業にも窒素に関する技術開発テーマがあり (例 : MSN, 2023 ; dSOIL, 2023)、環境研究総合推進費においても「廃棄窒素削減に向けた統合的窒素管理に関する研究」プロジェクト (2023~2025年度) が始まった。また、これらの関係者が企画する「窒素循環シンポジウム」を開催してきた (第3回は 2023年11月27日開催, MSN, 2023)。

4. 持続可能な環境と食料安全保障 ~農学・土壌学への期待

私たちの持続可能性はさまざまな脅威に曝されている。近年では新型コロナウイルス感染症とロシア・ウクライナ戦争が典型である。日本では 2020年2月より影響が顕在化した新型コロナウイルス感染症は、2023年になって収束を見たものの、世界の経済と物流を停滞させ、社会は適応を強いられた。今後も新たな感染症の発生が懸念されている。2022年2月に始まったロシア・ウクライナ戦争は、窒素を爆薬に用い、肥料の生産・流通を滞らせ、世界有

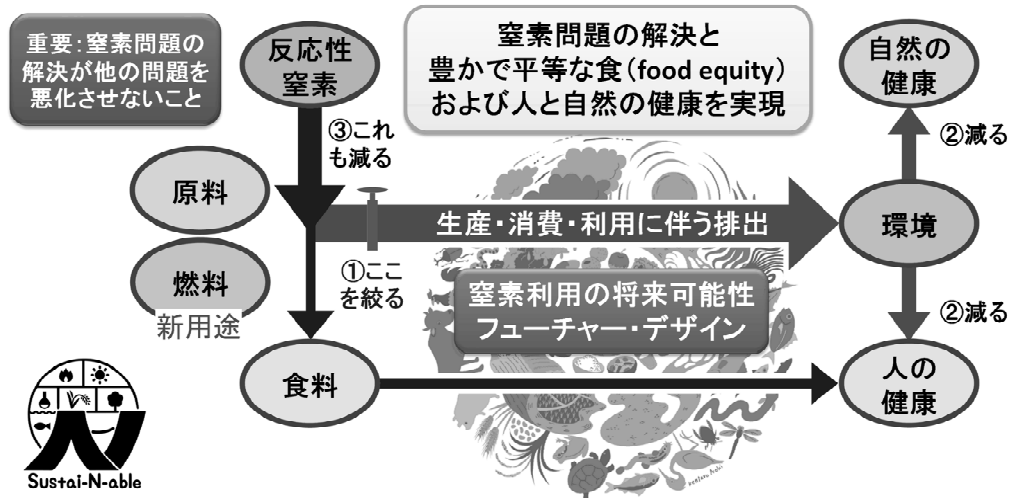


図3 地球研 Sustai-N-able プロジェクトのコンセプト

数の穀倉地帯を支える豊かなチェルノーゼム土壌を戦場として破壊し、生産した作物の輸出を妨げ、肥料・食料の生産・流通への大きな脅威となっている。これらの事態は、資源の大半を輸入に頼る日本にとって安全保障上の大きな懸念であり、ここにおいて窒素は、肥料・原料・燃料として、また、国外で窒素を用いて生産した輸入食料・飼料という形で私たちの生活を支える大切な資源である。国際的なサプライチェーンの変容や大きなかく乱に適応可能なレジリエントな社会を早急に作り上げることが求められる。ただし、安全保障リスク低減のために国内の食料生産を増加させると、国内の窒素汚染リスクが増加する。国内外のこういった困難な状況を乗り越えて持続可能な発展を成し遂げるには、窒素問題の正しい知識・知見を得るとともに、問題解決に資する科学・技術の開発とそれらを正しく用いる仕組みづくりが求められる。ハーバーもボッシュも彼らの取り組みの100年後までは予想していなかったかも知れない。しかし、私たちの現在の行いは将来世代に決定的な影響を及ぼす。このことをよく覚えておくべきである。

農学・土壌学にできることは多い。例えば、食料生産のNUEの向上は大命題である。増加が続く世界人口を支えるには、単収を上げる窒素投入が今後必要である。2005年には9千万tNであった世界の農地の余剰窒素は、中庸シナリオによると2050年には1億6千万tNに増加する (Mogollón et al.,

2018)。この余剰窒素は農業生産のNUE向上によって減らすことができる。また、世界の作物生産のNUEは約50%であるが (Lassaletta et al., 2014)、日本では約30%にとどまる (Hayashi et al., 2021)。おそらく、栽培された作物の相当量が流通していないと思われる。外観や味へのこだわりが価格に強く影響し、せっかく育てた作物の多くが廃棄されているのではないか。すなわち、NUEの向上には生産に加えて消費を含む食料システム全体の改善が必要である。消費行動や経済面から農学・土壌学にできることもたくさんあるだろう。土壌が生物生産の貴重な基盤であることを伝える食・農・環境教育も次世代につながる重要な活動である。そして、専門分野を超えた研究者交流がとても大切である。知識の共有、新しいアイデア、何より共に取り組む仲間を得ることができる。

引用文献

- 地球研 2023. Sustai-N-able プロジェクト「人・社会・自然をつないでめぐる窒素の持続可能な利用に向けて」.
地球研要覧 2023, 総合地球環境学研究所, 京都, 28-29.
- dSOIL 2023. 「微生物による地球冷却」プロジェクトウェブサイト. <https://dsoil.jp/>
- Fowler, D., et al. 2013. The global nitrogen cycle in the 21st century. *Phil. Trans. R. Soc. B* 368:20130164.
- 林健太郎・柴田英昭・梅澤有 2021. 図説 窒素と環境の科学. 朝倉書店, 192p.
- Hayashi, K., et al. 2021. Nitrogen budgets in Japan from 2000 to 2015: Decreasing trend of nitrogen loss to the environment and the challenge to further reduce nitrogen

- waste. *Environ. Pollut.* 286:117559.
- 林健太郎 2023. 持続可能な窒素利用と地球環境 SDGs ネクサス. 地球環境 SDGs ネクサス—環境と経済と社会とのつながり—, 谷口真人編, 共立出版, 東京, 164-185.
- Hayashi, K. and N. Itsubo 2023. Damage factors of stratospheric ozone depletion on human health impact with the addition of nitrous oxide as the largest contributor in the 2000s. *Int. J. LCA* 28:990-1002.
- ヘイガー, T. 2010. 大気を変える錬金術. みすず書房, 東京, 303p.
- INI 2023. 国際窒素イニシアティブウェブサイト (英語). International Nitrogen Initiative, <https://initrogen.org/>
- INMS 2023. 国際窒素管理システムプロジェクトウェブサイト (英語). International Nitrogen Management System, <https://www.inms.international/>
- JpNEG 2023. 日本窒素専門家グループウェブサイト. <https://jpneg.jimdofree.com/>
- Lassaletta, L., et al. 2014. 50 year trends in nitrogen use efficiency of world cropping systems: the relationship between yield and nitrogen input to cropland. *Environ. Res. Lett.* 9:105011.
- Mogollón, J.M., et al. 2018. Assessing future reactive nitrogen inputs into global croplands based on the shared socioeconomic pathways. *Environ. Res. Lett.* 13:044008.
- MSN 2023. 「産業活動由来の希薄な窒素化合物の循環技術創出」プロジェクトウェブサイト. <https://www.n-cycle.jp/>
- Oita, A., et al. 2016. Substantial nitrogen pollution embedded in international trade. *Nat. Geosci.* 9:111-115.
- Richardson, K., et al. 2023. Earth beyond six of nine planetary boundaries. *Sci. Adv.* 9:eadh2458.
- Rockström, J., et al. 2009. A safe operating space for humanity. *Nature* 461:472-475.
- Steffen, W., et al. 2015. Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science* 347:1259855.
- SusN 2023. Sustai-N-able プロジェクトリーフレット. 総合地球環境学研究所, 京都, https://www.chikyu.ac.jp/Sustai-N-able/documents/SusN_brochure.pdf