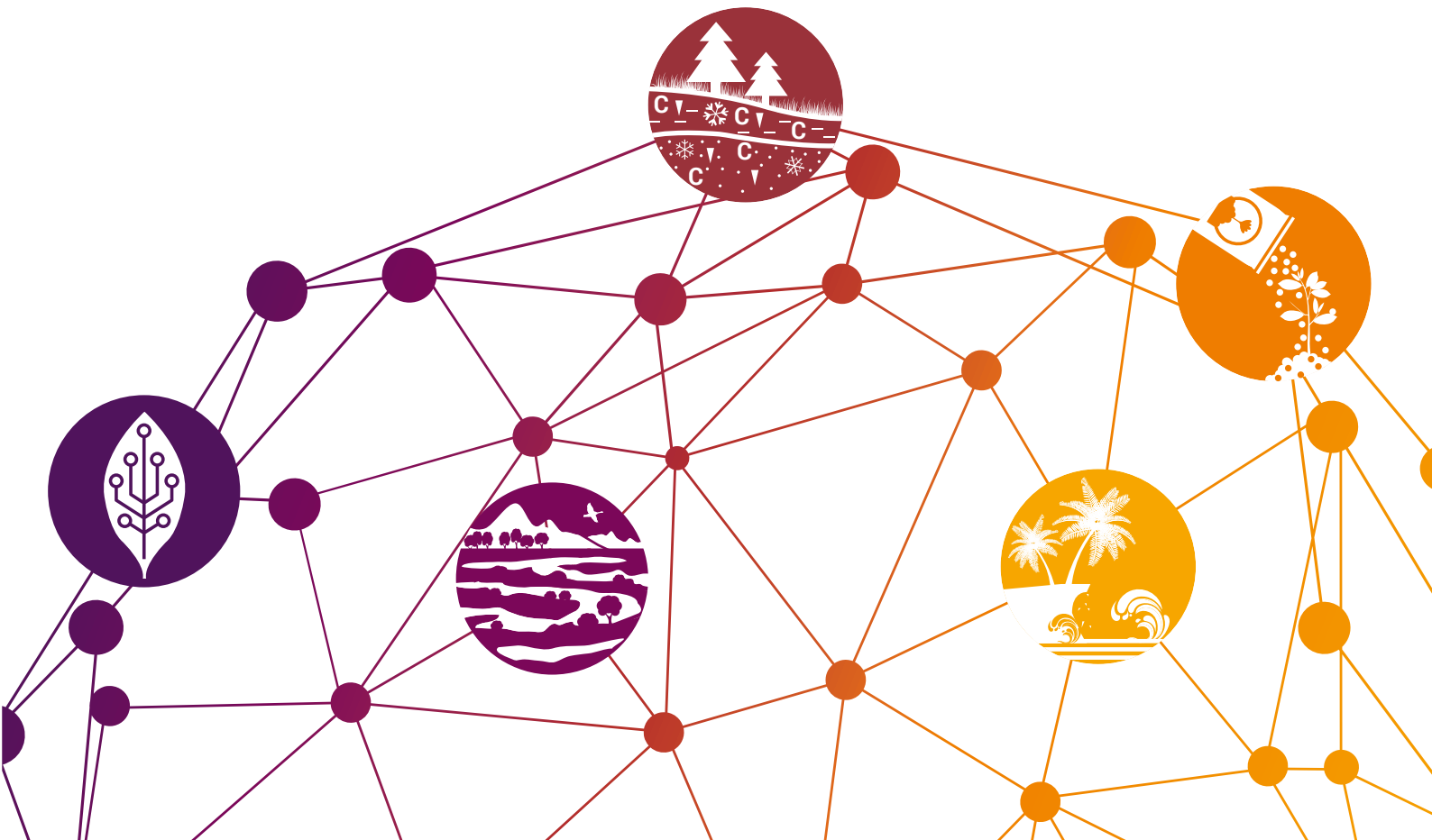


# フロンティア 2018/19

新たに懸念すべき環境問題



© 国連環境計画 (2019年)  
ISBN: 978-92-807-3737-0  
Job No: DEW/2221/NA

## 免責事項

本報告書は、教育または非営利目的に限り、出典を明記した場合に、著作権者からの特別許可なしに形式を問わず全体または一部を複製することができる。本報告書を出典として使用した出版物のコピーを国連環境計画に送付して頂ければ幸いである。

国連環境計画からの書面による事前の許可なしに、本報告書を再販目的またはその他の商業目的で使用することはできない。使用の場合には、使用目的及び範囲について記載し、以下に申請が必要である。

Director, Communication Division, UN Environment, P. O. Box 30552, Nairobi, 00100, Kenya.

本報告書で使用されている名称及び提示された資料は、国、領土、都市、またはその権限の法的地位に関する、あるいは国境や境界に関する国連環境計画の見解を示すものではない。本報告書における地図の使用に関する一般的なガイダンスについては、以下を参照のこと。

<http://www.un.org/Depts/Cartographic/english/htmain.htm>

本報告書における企業や製品についての言及は、国連環境計画の承認を意味するものではない。専有商品に関する本報告書からの情報を宣伝または広告目的で使用することはできない。

地図、写真、図の著作権は明記されている通りである。

## 引用表記 (推奨)

UNEP (2019). Frontiers 2018/19 Emerging Issues of Environmental Concern. United Nations Environment Programme, Nairobi.

## 制作

Science Division  
UN Environment  
P.O. Box 30552  
Nairobi, 00100, Kenya  
Tel: (+254) 20 7621234  
E-mail: [publications@unenvironment.org](mailto:publications@unenvironment.org)  
Web: [www.unenvironment.org](http://www.unenvironment.org)

本版は国連環境計画 (UNEP) 「Frontiers 2018/19: Emerging Issues of Environmental Concern」の「The Nitrogen Fix: From Nitrogen Cycle Pollution to Nitrogen Circular Economy」章の日本語翻訳版である。

国連環境計画は、  
世界において、そして自らの  
活動において環境的に健全な  
取り組みを推進している。配布に  
あたっては、国連環境計画のカーボン・  
フットプリント削減を目指している。

# はじめに



20世紀はじめに二人のドイツ人化学者、フリッツ・ハーバーとカール・ボッシュは、安価で大規模に合成窒素を生産する方法を開発した。その発明は窒素肥料の大量生産を加速し、世界の農業を転換させた。これは同時に、地球の窒素バランスに対する我々の長期的な干渉のはじまりでもあった。毎年、推定2,000億米ドル分の反応性窒素が環境に排出され、土壌を劣化させ、大気を汚染し、河川や湖沼における「デッドゾーン」や有毒な藻類繁殖の拡大を引き起こしている。

多くの科学者が「人新世 (Anthropocene)」を現代の地質年代の公式名とすべきだと唱えるのも無理はない。ほんのここ数十年で、人類は自然変化の170倍もの速さで地球の温度を上昇させてきた。人類はまた、地球の陸面の75%以上を意図的に改変し、世界の河川の93%以上の流れを不可逆的に変えてしまった。生物圏に大きな変化をもたらしているだけでなく、今や人類は生命の基本構成単位を書き換えることや、新たに創り出すことさえも可能になった。

毎年、世界中の科学者、専門家、および研究機関のネットワークは、国連環境計画と協力して我々の社会、経済、および環境に大きな影響を与える新たな問題を見いだして分析している。これらの問題の幾つかは、思いがけない用途と不確定なリスクを伴う新技術とリンクし、その他は、自然景観の断片化および長期間凍結していた土壌の融解といった永続的な問題である。もう一つの問題、窒素汚染は、生物圏における数十年の間活動の非意図的な結果をあらわしている。本報告書で取り上げた最後の問題、気候変動への不適切な適応は、変わりゆく世界に対する十分かつ適切な順応に我々が失敗することに注目している。

良い知らせもある。当該箇所を読むとわかるとおり、窒素管理という世界的な問題に対する全体的なアプローチが始まりつつある。中国、インド、および欧州連合において、窒素肥料のむだを減らして効率を改善する前途有望で新たな取り組みが成されている。究極的には、その他の価値ある栄養塩や素材と同様に窒素を回収して再循環させることが、クリーンで持続的な農業を助ける。真の循環型経済である。

本報告書で取り上げた問題を通じて、我々の自然への介入は常に、全球規模でも分子レベルでも、我々の住まう地球に長期的な影響を引き起こすリスクを伴うことを認識すべきである。しかし、先見の明を持って協働することにより、問題の一步先を進み続け、何世代も先までを見据えた解決策を創造できるだろう。

Joyce Msuya  
国連環境計画  
事務局長代理





Photo credit: oticki / Shutterstock.com

## 窒素問題の解決： 窒素循環汚染から窒素の循環型経済へ

### 地球規模の窒素問題

国連環境計画 (UNEP) の 2014 年報告書 (Year Book) は、環境中の過剰な反応性窒素 (安定な窒素分子  $[N_2]$  を除く窒素化合物) がとても重要であることを強調している<sup>1</sup>。そして、その結論は我々に警鐘を鳴らしている。窒素汚染が大規模かつ複雑であることのみならず、窒素汚染の削減がほとんど進展していないのである。これまでに見出された解決策は十分に普及せず、その一方で、世界の窒素汚染は引き続き進んでおり、大気汚染の進行、陸域および水域環境の悪化、気候変動の激化、そしてオゾン層の破壊が続いている<sup>2-10</sup>。これらの悪影響は、人の健康、資源管理、生活、そして経済にもおよび、持続可能な開発目標 (SDGs) の達成の妨げとなっている<sup>11-15</sup>。しかし、希望の兆しはある。過去 4 年間で窒素汚染の管理に対する取り組みに

変化が見られたのだ。そこには、窒素問題 (人類の窒素利用がもたらす負の影響) に真剣に取り組むため、消費と生産の双方についての新しい考え方が含まれている<sup>16-24</sup>。

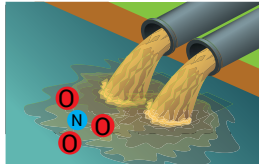
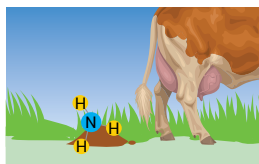
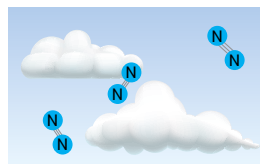
窒素は、地球の大気中にきわめて豊富に存在する元素である。窒素分子 ( $N_2$ ) としての窒素は無害で、我々が吸う空気の 78% を占めている。 $N_2$  の二つの窒素原子は強い三重結合で結び付いていて、非常に安定しており化学的に不活性である。地球は  $N_2$  の恩恵を受けている。なぜなら、安定性の高い  $N_2$  は生命が繁栄できる安全な大気を作り出し、酸素濃度が上昇し過ぎることによる火災の頻発を抑えているからだ。環境の面では、 $N_2$  が反応性の高い他の化学形態に変換すること、すなわち、「固定窒素」や「反応性窒素 ( $N_r$ )」と呼ばれる窒素化合物に変換することが注目される<sup>11,25</sup>。 $N_r$  には多くの恩恵と有害な

効果があり、問題を複雑にしている。N<sub>r</sub>は地球上のすべての生物に必須な物質である。例えば、アンモニア(NH<sub>3</sub>)は、アミノ酸、たんぱく質、酵素、DNAのもととなり、すべての生物の代謝の中心にある物質だ。同様に、一酸化窒素(NO)は生体内で情報を伝達する物質としてはたらき、アンモニウム(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>)と硝酸塩(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)は窒素を必要とする植物の主な窒素養分となる。つまり、N<sub>r</sub>には食料や飼料の生産を促すという重要な恩恵(便益)がある。人工的に窒素を固定する技術であるハーバー・ボッシュ法により、人類はアンモニア、尿素、硝酸塩といった肥料を大量に製造することで、増加を続ける世界人口を支えている<sup>26</sup>。これと並んで、人類は生物学的窒素固定(マメ科植物などの根と共生する一部の土壌細菌のはたらき)の恩恵も得ている。

これらの便益に対して、環境への多量のアンモニア、硝酸塩、一酸化窒素、一酸化二窒素(N<sub>2</sub>O)、その他の形態の反応性窒素の排出による窒素汚染が、多様な影響をもたらしている。これらの反応性窒素に

は、農地への窒素肥料の施用後に直接発生するものもあるが、家畜と人間の排せつ物や他の有機廃棄物からも大量に発生する。生物学的窒素固定に伴う環境へのN<sub>r</sub>の排出は、多くの窒素肥料による排出よりも少ないと考えられている。しかし、家畜と人間から排せつされた窒素には肥料と生物学的固定の両方の窒素が含まれていて、ともにN<sub>r</sub>による汚染に関与している。反応性窒素は人間活動の副産物としても発生する。例えば、化石燃料やバイオマスを燃やすとNOと二酸化窒素(NO<sub>2</sub>)が発生する。NOとNO<sub>2</sub>をまとめて窒素酸化物(NO<sub>x</sub>)とも呼ぶ。これまで、自動車やエネルギー産業から発生するNO<sub>x</sub>の削減に大きな努力が払われてきたが、世界で急速な経済発展を遂げている地域ではNO<sub>x</sub>の排出量が依然として増加している<sup>6,12</sup>。つまり、人類は健康、気候、そして生態系を脅かす「反応性窒素のカクテル」を作っており、窒素は人類が直面する最も重要な汚染問題の一つとなっているのだ。しかし、この問題の深刻さは科学分野の外ではほとんど認識されておらず、不明点が多く残されたままとなっている。

## 環境中における窒素のさまざまな形態



### 窒素分子(N<sub>2</sub>)

#### 発生源

我々が呼吸する空気の78%を占める。

#### 便益

地球上の生物にとって安定した大気を維持する。また、空を青く見せる。

#### 影響

無害で反応性に乏しい物質である。

### アンモニア(NH<sub>3</sub>)

#### 発生源

堆肥、肥料、バイオマス燃焼。

#### 便益

アミノ酸、たんぱく質、酵素のもととなる物質である。また、肥料として広く用いられている。

#### 影響

富栄養化を引き起こし、生物多様性に影響する。大気中で粒子状物質を形成して健康影響をもたらす。

### 一酸化窒素(NO) 二酸化窒素(NO<sub>2</sub>)

#### 発生源

運輸・産業・エネルギー部門における燃焼。NOとNO<sub>2</sub>はまとめてNO<sub>x</sub>とも呼ぶ。

#### 便益

NOは人間の体内で生理学的に重要なはたらきを有しており、不可欠な物質である。NO<sub>2</sub>の便益は知られていない。

#### 影響

NOとNO<sub>2</sub>(あわせてNO<sub>x</sub>)は主要な大気汚染物質であり、心疾患や呼吸器疾患を引き起こす。

### 硝酸塩(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)

#### 発生源

下水・廃水、農業、NO<sub>x</sub>の酸化。

#### 便益

肥料や爆薬に広く使われている。

#### 影響

水中で富栄養化を引き起こす。大気中で粒子状物質を形成して健康影響をもたらす。

### 一酸化二窒素(N<sub>2</sub>O)

#### 発生源

農業、工業、燃焼。

#### 便益

ロケット推進剤、笑気ガスとして医療活動に利用される。

#### 影響

N<sub>2</sub>OはCO<sub>2</sub>の約300倍の効果をもつ温室効果ガスである。また、成層圏オゾンの減少も引き起こす。



### 窒素についてわかっていること・わかっていないこと

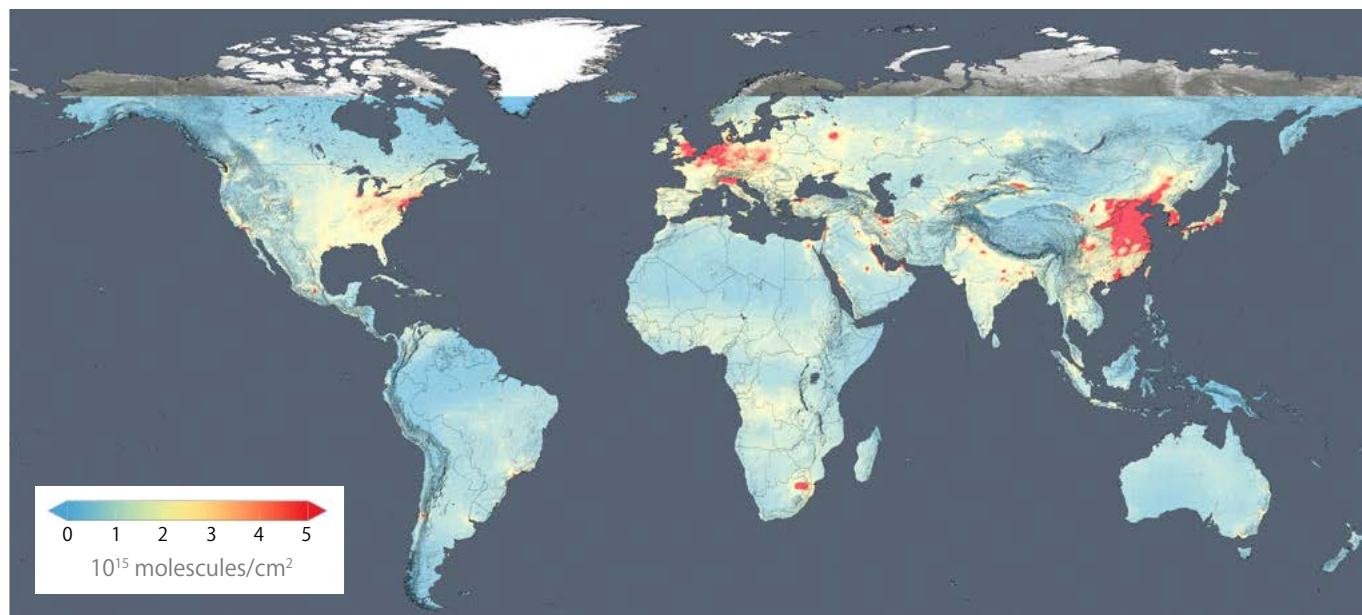
窒素化合物の循環や、人間活動が窒素循環に及ぼす影響は、これまでもさまざまな文書に記述されている<sup>4,12,27,28</sup>。しかし、気候変動における炭素の位置づけと比べて、窒素問題に関して具体的な行動を促す議論はほとんどなされていない。都市や農地の上空では、反応性窒素(例えば $\text{NO}_x$ 、 $\text{NH}_3$ 、微小粒子状物質 $[\text{PM}_{2.5}]$ など)の濃度上昇が検出されている。世界のいくつかの地域では、農地での地下水に含まれる硝酸塩濃度や、下水処理があまり進んでいない都市下流の河川に含まれる硝酸塩濃度が上昇している。温室効果ガスである $\text{N}_2\text{O}$ の大気濃度は加速度的に上昇している。人類は地球規模で窒素循環を大きく変化させて多様な影響を引き起こしており、反応性窒素は地域から地球規模で取り組むべき重要な汚染物質なのだ<sup>22</sup>。

「欧州窒素アセスメント(ENA)」は、窒素汚染がもたらす主要な脅威を、水質、大気質、温室効果ガスのバランス、生態系と生物多様性、土壌の質の5つとした<sup>4</sup>。同報告書は、窒素汚染自体は新しい問題で

はないけれども、多くの既存の環境問題に対する解決策の1つとしての窒素管理が必要であると強調した。食料生産については、地球規模の窒素利用はきわめて非効率的である<sup>20,29</sup>。フードチェーン全体を考えると、農業生産に投入される反応性窒素のうち、人間の食品となるものは20%前後に過ぎない<sup>11,17</sup>。つまり、残り80%は、汚染物質あるいは $\text{N}_2$ として環境に放出されることを意味する。反応性窒素汚染とは、貴重な資源の大規模な損失でもあるのだ。

過去の対策は、反応性窒素の種類ごとにばらばらに取り組みられてきた。これらすべてを一緒に考慮することにはいくつかの利点がある。第一に、反応性窒素がもたらすさまざまな便益のシナジー(相乗効果)や、便益と脅威のトレードオフ(相反効果)の検討が可能となる。第二に、同じく重要なこととして、政策や市民への情報提供のために、窒素汚染によるすべての影響の社会的コストの算定を行うことができる<sup>13,30</sup>。ただし、コスト推計は緩和政策の導入に役立つが、窒素汚染の真のコストを推計することは容易ではない。なぜなら、窒素汚染のそれぞれの影響は基本的に同一基準での比較ができない傾向

### 2014年の対流圏二酸化窒素( $\text{NO}_2$ )の平均濃度



$\text{NO}_2$ は主に自動車、発電所、産業活動から排出されるガスである。 $\text{NO}_2$ および $\text{NO}$ (あわせて $\text{NO}_x$ )は、他の大気汚染物質との反応を通じて、対流圏オゾン、酸性物質、粒子状物質を生成する。

Photo credit: NASA Goddard Space Flight Center

▶ ビデオ: 有毒藻類から五大湖を救う



Video link: <https://www.youtube.com/watch?v=b6JzL4NG26k>

© PBS NewsHour

Photo: Algal bloom in Pelee Island in the southeast of Lake Erie

Photo Credit: Tom Archer / Michigan Sea Grant ([www.miseagrant.umich.edu](http://www.miseagrant.umich.edu))

にあり、共通尺度を見つけることが難しいためである。人の健康、生態系、気候のコストを比較するのは、リンゴとオレンジを比べるようなものだ。そうであっても、窒素汚染のリスクを減らそうという意思、あるいは生態系への影響と医療サービス面に基づいたコストの推計は有益である。窒素汚染がもたらす世界全体のコストは、年間3千4百億米ドル~3兆4千億米ドルと見積もられている<sup>11</sup>。

一方、より単純な計算がより説得力を持つこともある。世界全体では、年間2億トン前後の窒素が反応性窒素や $N_2$ として環境へと排出されている<sup>11,28</sup>。これに窒素1kg当たり1米ドルという肥料価格を乗じると、年間約2千億米ドルの損失に相当する。このことは行動を起こすための強い動機になりえる。このような情報は、サハラ以南アフリカのように反応性窒素が著しく不足する地域にも適用できる。サハラ以南アフリカでは、窒素汚染を低減することによって、限られた反応性窒素資源を、食料生産のためにより多く利用できるようになる<sup>31</sup>。反応性窒素の $N_2$ への変換(脱窒と呼ばれる)は、窒素汚染を防ぐ安全な方法とは言えない。なぜなら、その分だけ新規の $N_f$ を投入する必要があり、それは汚染を増やす傾向にあるからだ。経済全体の窒素利用効率(NUE)を高めるためには、 $N_2$ と反応性窒素すべての損失を減らす必要がある。



2014年8月3日のカナダ-米国間のエリー湖西部における水の華(藻類ブルーム、乳白色を帯びた緑色)。エリー湖で頻発する藻類の大発生は、農業に用いる肥料や堆肥の流出、都市下水、大気沈着による窒素とリンの負荷によって引き起こされている。

Photo credit: Jeff Schmaltz / NASA Goddard Space Flight Center

▶ ビデオ: 地球全体の大気質への人類の「指紋」



Video link: [https://www.youtube.com/watch?time\\_continue=7&v=aMnDoXuTGSA](https://www.youtube.com/watch?time_continue=7&v=aMnDoXuTGSA)

© NASA Goddard Space Flight Center

Photo credit: Doin / Shutterstock.com

## 運輸・エネルギー・産業部門における化石燃料の燃焼

石炭、石油、天然ガス的高温燃焼はNOとNO<sub>2</sub>  
(あわせてNO<sub>x</sub>)の形で多量のN<sub>x</sub>を放出する。

輸送部門は  
NO<sub>x</sub>排出の  
65%以上に  
関与する<sup>49</sup>。

化石燃料の燃焼は  
N<sub>2</sub>からN<sub>x</sub>への  
人為的な固定の  
13%を占める<sup>4</sup>。



## 肥料製造

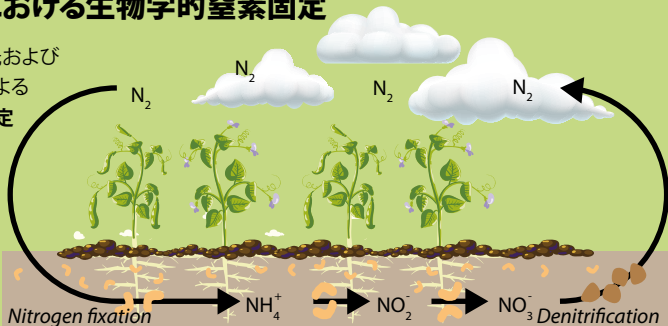
ハーバー・ボッシュ法は、100年以上前に  
窒素肥料と窒素を用いた爆薬の大量生産の  
ニーズ向上に応えるために発明された。  
一部の細菌による生物学的窒素固定と同様に、  
人工的に大気中のN<sub>2</sub>をNH<sub>3</sub>として固定する。

肥料製造は  
N<sub>2</sub>からN<sub>x</sub>への  
人為的な固定の  
63%を占める<sup>4</sup>。



## 作物栽培における生物学的窒素固定

自然界では、雷光および  
窒素固定細菌による  
生物学的窒素固定  
によってN<sub>2</sub>が  
N<sub>x</sub>に変換される

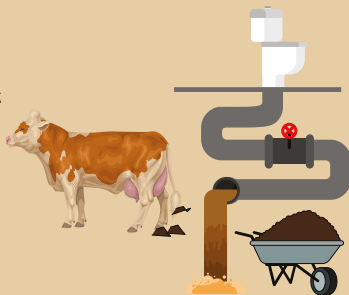


一部のNrは嫌気性微生物による脱窒で  
N<sub>2</sub>に還元される。天然のプロセスでは生  
物学的窒素固定と脱窒によって窒素循環  
のバランスは維持される。しかし、窒  
素固定細菌と共生するマメ科作物のよ  
うな窒素固定作物の栽培増加が追加的  
なN<sub>x</sub>の投入量を著しく増加させ、環境  
へのN<sub>x</sub>損失を増やした。

作物生産における  
生物学的窒素固定は、  
N<sub>2</sub>からN<sub>x</sub>への  
人為的な固定の  
24%を占める<sup>4</sup>。

## 廃棄物

N<sub>x</sub>の排出削減において  
食料生産と化石燃料の燃焼が  
重要であることに加え、  
廃棄物管理の役割は、  
環境への連鎖的なN<sub>x</sub>流出を  
防ぐにも重要である。



生活排水・産業  
排水・食品廃棄物は  
たんぱく質を含む。  
たんぱく質の重量の約  
16%が窒素である<sup>22</sup>。

生活・産業排水と異なり、多くの食品廃棄は  
回避可能である。



穀物、果物、野菜、  
根菜は食品廃棄物  
および食品ロスの  
最大部分を構成する<sup>50</sup>。

毎年、世界で消費  
される食品の1/3が廃棄  
あるいは消費されずに  
損失されている<sup>50</sup>。



# 窒素カスケード

窒素はあらゆる生物にとって必須である。  
DNA、アミノ酸、たんぱく質、クロロフィル、酵素、ビタミン、  
その他多くの有機化合物に含まれている。

$N_2$ は豊富に存在するが、一部の微生物を除いて、  
生物は直接に代謝利用できない。  
窒素を利用可能にするためには、 $N_2$ を他の形態の窒素  
(反応性窒素、 $N_r$ )に変換しなくてはならない。

空気の  
78%は  
 $N_2$ である。

一酸化二窒素 ( $N_2O$ ) は、  
 $CO_2$ の300倍強力な  
温室効果ガスであり、  
オゾン層も破壊する。

人為起源の  
 $N_2O$ 排出量のほぼ  
80%は農業から  
発生する<sup>51</sup>。

世界のアンモニア ( $NH_3$ )  
排出量の80%は、  
主に肥料の施用と畜産  
といった人間活動に  
由来している<sup>53</sup>。

アンモニアと硝酸は  
反応して粒子状物質の  
硝酸アンモニウムを形成し、  
呼吸器疾患と心疾患の  
リスクを増加させる<sup>53</sup>。

大気へのN排出は、  
降水との混合により  
硝酸性の酸性雨を生成させる。

農地に施用される  
窒素肥料の50%が、  
窒素汚染源になり、  
あるいは脱窒により  
 $N_2$ に戻されて  
無駄になる<sup>30</sup>。

農地からの硝酸塩 ( $NO_3^-$ ) は  
土壌を通じて地下水に溶脱し、  
飲料水の水質に影響を及ぼし、  
人の健康に重大なリスクを  
もたらす<sup>35</sup>。

$Nr$ の増加は水域の  
富栄養化を促進し、  
陸水・海洋環境における  
有害な藻類ブルーム、  
デッドゾーン形成、  
生物多様性の損失を  
もたらす<sup>4</sup>。

2016年に世界で  
消費された窒素肥料は  
1億500万トンで、これは  
トラック420万台分に  
相当する<sup>52</sup>。

アンモニウム性肥料の  
長期施用は土壌を  
酸性化させ、作物生産に  
悪影響を及ぼす<sup>22,53</sup>。

アンモニア汚染は  
富栄養化、土壌酸性化、  
生物への直接毒性を  
もたらし、生物種の豊かさ  
と生物多様性を  
減少させる<sup>22,54-56</sup>。



## 政策細分化と循環経済の解決策

窒素に関する科学が、環境媒体（例：大気、水、土壌）や反応性窒素の化学形態ごとに細分化されてきたように、窒素政策も対象領域ごとに細分化されてきた。反応性窒素の影響は、大気汚染、気候変動、水域・海域、生物多様性、人の健康、食料安全保障など、いくつかの政策領域にまたがる。こういった政策の細分化は、多くの国々における国内政策と同様にSDGsにも見られる。SDGsとその指標を調べてみると、窒素はほぼあらゆる目標や指標に関連しているものの、ほとんど明示されていないことがわかる。現在提案されている指標のうち、海洋資源に関するSDG 14.1で提案されている指標のみが窒素と直接に関連づけられている<sup>32</sup>。SDGsの指標群にNUEや窒素損失を含めるといふ提案はまだ採択されていない<sup>20,33</sup>。

窒素循環をまたぐ政策が細分化された結果は、政策のトレードオフという形で容易に認識できる。例えば、欧州連合(EU)の硝酸汚染を低減する政策は、冬季における農地への堆肥の施用を禁止した。しかし、その結果、春から夏にかけての堆肥の施用を増やし、大気中のNH<sub>3</sub>濃度の増加をもたらした<sup>34</sup>。このような一時的な影響は、NH<sub>3</sub>発生を抑える堆肥施用法を定めている少数のEU国においてのみ部分的に回避できるものであった<sup>35</sup>。もう一つの例は、ウシの屋内飼育により温室効果ガスであるN<sub>2</sub>O排出を削減しようとする勧告である。しかしながら、排出緩和の最良の技術手段があったとしても、この方法は一般的にはNH<sub>3</sub>の排出量を増やす<sup>36</sup>。こういったトレードオフは、燃焼起源の反応性窒素にもみられる。例えば、1990年代にNO<sub>x</sub>排出を削減するための触媒技術を導入した結果、N<sub>2</sub>OとNH<sub>3</sub>の排出量が増加した。

上記の例は、複数の脅威を横断する形で窒素の科学と政策を統合化することが早急に必要であることを示している<sup>11,30,37</sup>。例えば、中国政府は2015年の「肥料使用増加ゼロに向けた行動計画」(Action Plan for the Zero Increase of Fertilizer Use)において、2020年までに食料生産を減らすことなく化学肥料の消費増加を止めることを目標とした。これはあらゆる形態の窒素汚染の抑制に有効である。次のステップとして、耕地区画の見直し、技術革新、および情報伝達に関連する社会経済的な障害に焦点を当てるべきと提案されている<sup>38</sup>。



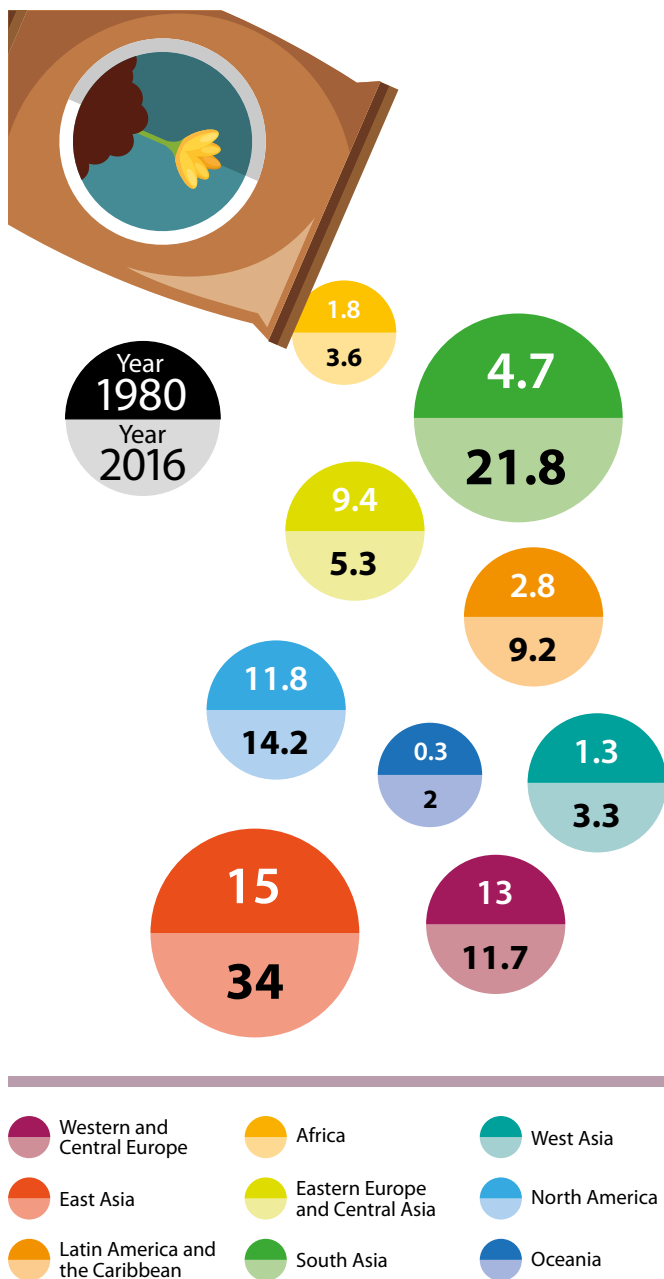
## 窒素、栄養塩、そして循環型経済

2015年に欧州連合(EU)で採択された「循環型経済パッケージ」は、生産、消費、廃棄物管理、二次原料リサイクルというバリュー・チェーン(価値連鎖)のすべての段階における資源利用効率を最大化することを目指している<sup>42,43</sup>。その計画では、有機肥料と廃棄物由来肥料の管理と取引が、EU経済における窒素とリンなどの栄養塩の回収とリサイクルの鍵になると認識されている。新たな規制では、国内で入手可能な生物性廃棄物、乾燥あるいは消化した排せつ物などの畜産副産物、その他の農業由来残渣を用いた有機肥料の持続可能かつ革新的な生産を奨励している。現在、EUでは有機廃棄物(生ごみなど)の5%のみがリサイクルおよび肥料として利用されているに過ぎない。生物性肥料の国境を越えた自由度の高い流通を可能とすることで、EU域内の二次原料向け新規市場とサプライチェーン(供給網)の創出につながる。その結果、約12万人の雇用が生み出されると試算されている。生物性廃棄物からの窒素の回収は、製造に伴う炭素とエネルギーのフットプリントが大きい合成無機肥料の需要を削減、代替すると期待されている。同時に、環境への反応性窒素の排出の削減に役立つだろう。

窒素と他の栄養塩の循環型経済への着手は農地から始まる。農地からの窒素損失を減らすことによって、作物生育を支える栄養塩の供給がより効率的になる。ここで主に必要なのは、この緩和手法の実施により農地からの窒素損失が削減される分だけ、農地への窒素投入量を減らすことができるという点を農家にわかりやすく伝える実用的なツールを提供することだ。このようなツールは、栄養塩レベルを細かく調整することになる農家への信頼を得るために、適切な土壌診断によって裏付けられるべきである。

また一方、付加価値の高い産物の生産のために、窒素と他の栄養塩の再利用を拡大する可能性も大いにある。大規模な投資が社会を「低炭素経済」に転換しつつあるように(例：再生可能エネルギー資源の導入)、窒素の価値は、「窒素の循環型経済」に向けての投資を通じた大きな経済機会を示唆している。

1980年と2016年の窒素肥料の地域別消費量  
(単位:百万トン窒素)



Data source: International Fertilizer Association (<https://www.ifastat.org/databases/plant-nutrition>)

農業における窒素循環を窒素の循環型経済モデルに転換することも容易に想定できる。農業における窒素利用効率が改善し、肥料、生物学的窒素固定、排せつ物からの窒素損失を削減することにより、我々が必要とする食品やバイオ燃料に到達する新規窒素の割合を増やすことが可能となる。同時に、家畜や人の排せつ物を肥料として再循環させることは、再生肥料製品の市場機会を拡大させる。

燃焼を起源とするNO<sub>x</sub>への対策については、全ての利用可能な技術（例えば、触媒還元や非触媒還元）がNO<sub>x</sub>をN<sub>2</sub>に脱窒させる技術であり、農業と比べて状況が大きく異なる。しかし、これは資源の大規模な損失でもある。世界のNO<sub>x</sub>排出量に窒素肥料としての価格を乗じると、年間500億ドルの資源となる。つまり、NO<sub>x</sub>を硝酸塩として回収する技術が必要とされているのだ<sup>11,39</sup>。

インドは、財政的観点より、反応性窒素の環境的損失と非農業用途での尿素施用に関わる補助金の双方を削減するために、2016年からすべての尿素肥料は二ム油で被覆することを国家政策に盛り込んだ。同様な財政的観点により、2017年11月のインド首相から農家への呼びかけ(Prime Minister's call)では、インド国内のいくつかの州における「ゼロ予算自然農法」(ZBNF: Zero Budget Natural Farming)に向けた政府支援と同様に、2020年までに肥料を半減することを求めている。ZBNFは、高価な肥料や農薬の投入を避けることに焦点を当てており、農家の負債を減らすとともに、土壌有機物の増加や土壌肥沃度の改善を促す。インドのアンドラ・プラデシュ州では、「持続可能なインドのための金融ファシリティ」(SIF)を通じてBNPパリバ銀行、UNEP、国際アグロフォレストリー研究センター(ICRAF)との提携により、ZBNFが数千人の農家に急速に普及している。この革新的なアプローチは、投資拡大を支援する貸付に支えられている。その貸付は、肥料消費量の削減によって得られる肥料向け補助金の多額の剰余を財源として、インド政府により返済される<sup>40,41</sup>。



## 窒素に関する包括的な国際アプローチに向けて

いくつかの国が統合的な窒素管理手法を試験的に導入していることは明るいニュースだ。例えば、ドイツは「欧州窒素アセスメント」の提言に速やかに対応し、統合的な窒素戦略に取り組んだ<sup>23,44</sup>。多くの国にとって難しいことは、窒素の脅威への対応が複数の省庁に分かれてしまい、行動の調整が難しいことである。例えば、ブラジルでは農地のさらなる拡大が続いており、作物と家畜の生産に伴う環境影響の削減について、はっきりとした取り組みはなされていない<sup>45</sup>。国際的には、反応性窒素の越境汚染の影響についても明確な立法および政策行動が必要である。

窒素の科学に関する専門家グループである国際窒素イニシアティブ (INI) のメンバーは、窒素汚染の問題にかなりの考慮を払ってきた。最初のステップは、UNEPと協力して、国際政策の立案を科学面から支援する協働的アプローチを「国際窒素管理システム」(INMS: International Nitrogen Management System) として確立することだ。

INMSは、地球環境ファシリティ (GEF) および80の参画機関の協力を得て、窒素管理、窒素フローと影響の統合解析、費用・便益評価、将

### ビデオ: 農業による大気汚染



Video Link: [https://www.youtube.com/watch?v=07P\\_wXTTusI](https://www.youtube.com/watch?v=07P_wXTTusI)  
Photo credit: gillmar / Shutterstock.com

© European Union

### ビデオ: 肥料が環境とあなたの問題である理由



Video Link: <https://www.youtube.com/watch?v=5TzzPOy1T3g>  
Photo credit: Visual Generation / Shutterstock.com

© Environmental Defense Fund

来の窒素シナリオに関するガイダンスを作成している。INMSはまた、統合的な窒素管理がどのように役立つかを示すために、世界各地域における実証(デモンストレーション)を展開している。2022年に公表予定の世界初の「国際窒素アセスメント」は重要な成果となるだろう。

次の課題は、複雑な窒素循環に対してより一貫した政策枠組みを開発することである。この枠組みの必要性は、国連環境総会 (UNEA) の窒素に関する多数の決議、すなわち、2/6 (パリ協定)、2/7 (化学物質・廃棄物)、2/8 (持続可能な消費と生産)、2/9 (食品廃棄)、2/10 (海洋)、2/12 (サンゴ礁)、2/24 (土地劣化)、3/4 (環境と健康)、3/6 (土壌)、3/8 (大気質)、および3/10 (水質汚染) に明確にみられる<sup>46,47</sup>。その要点は、各国政府に対し、効率的な窒素管理によって大気、海洋、水質汚染を相乗的に低減させる効果を活かすよう勧告する決議3/8に示されている。

科学と政策のコミュニティにおける最近の議論では、窒素政策間の連携をより効果的に調整する方法を模索している<sup>48</sup>。幾つかのオプションを以下に示しておく。

オプション1：現状における複数の政策枠組みをまたぐ窒素問題の細分化。

オプション2：1つの既存の政策枠組みによる窒素問題へのリーダーシップ。ただし、既存の多国間環境協定 (MEAs) はそれぞれ窒素問題の一面のみに対応しており、本来の権限を拡大することが課題。

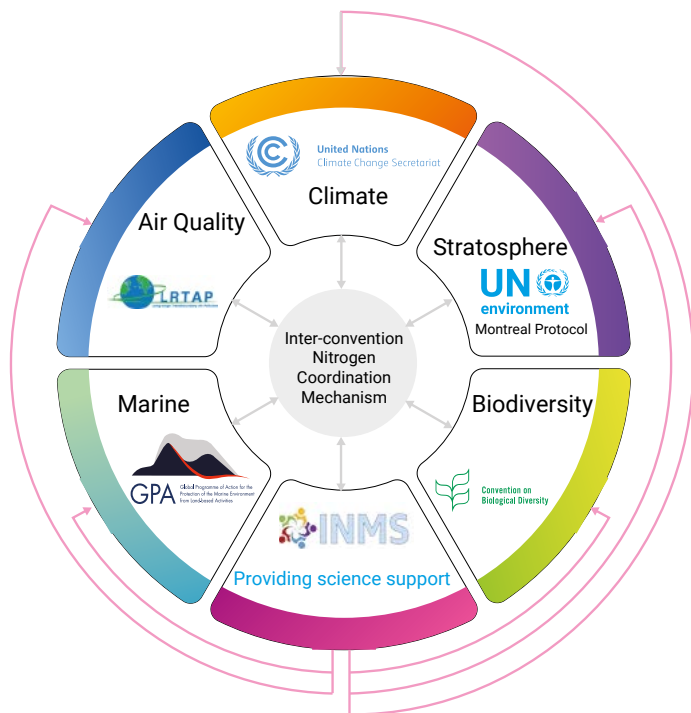
オプション3：窒素問題に対処する新しい国際条約。現在、このアプローチへの準備はほとんどなされていない。

オプション4：UNEAの委任によりおそらく設置される、窒素に関する機関間協力のための政府間フォーラム「条約間窒素調整メカニズム」(Inter-Convention Nitrogen Coordination Mechanism)。

現時点では、条約間調整メカニズムは存在しておらず、既存のMEAsが互いに学び合う機会を制限するとともに、INMSと多数のMEAs間の作業も非効率になっている。条約間調整メカニズムは、国連加盟国と関連MEAsとの繋がりの強化に役立つことだろう。UNEPのメジャーグループとその他利害関係者は、企業と市民の参加を既に促している。ただし、オプション4はあくまで1つの選択肢であることに注意が必要だ。どのアプローチが最も機動的で、効率的で、費用対効果が高いのかを各国政府が議論することが大切である。

それでもなお、このような議論には別のメリットがある。グローバル社会が窒素に関する科学と政策の包括的アプローチを必要としていることが、ますます明らかになってきているからだ。第一に、窒素汚染の発生源と関連する人間活動セクターがともに多様であるという視点をもつことで、その対策が有しているシナジーやトレードオフを検討することが可能となる。これは、ビジネス面での首尾一貫した意思決定の基盤を提供し、農業と産業に利益をもたらすことだろう。第二に、この包括的アプローチは、人類の窒素利用の変革をもたらすために不可欠な循環型経済という視点を進展させる基盤となる。これらに加えて、窒素に対する包括的アプローチは、将来の環境政策が問題間の調整をいかに効率的に行えるかの例証となる。UNEPは「汚染のない地球へ」(Pollution-Free Planet) という戦略の実現に向けて活動している。相互作用する全ての汚染問題に対して、窒素問題への取り組みから得られる教訓はより大切なものとなるだろう。

## 条約間窒素調整メカニズム



## ビデオ：農業のアンモニア問題



Video Link: <https://www.youtube.com/watch?v=y0IG5mOWyAs>  
Photo credit: Mark Sutton

© CAFREtv

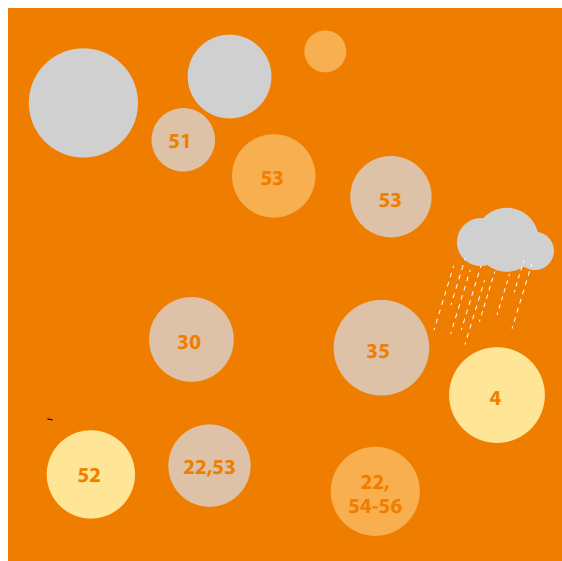
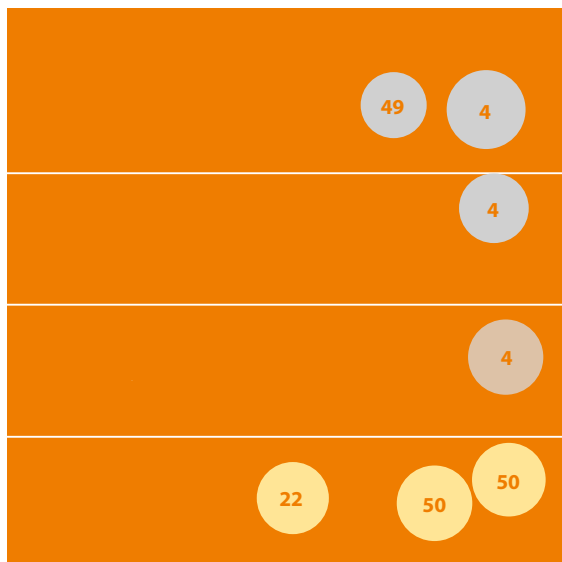
## 参考文献

- United Nations Environment Programme (2014). *UNEP Year Book 2014*. Nairobi. <http://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/9240>
- Duce, R.A., LaRoche, J., Altieri, K., Arrigo, K.R., Baker, A.R., Capone, D.G. *et al.* (2008). Impacts of atmospheric anthropogenic nitrogen on the open ocean. *Science* 320, 893–897. <https://doi.org/10.1126/science.1150369>
- Voss, M., Bange, H.W., Dippner, J.W., Middelburg, J.J., Montoya, J.P. and Ward, B. (2013). The marine nitrogen cycle: recent discoveries, uncertainties and the potential relevance of climate change. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 368, 20130121–20130121. <https://doi.org/10.1098/rstb.2013.0121>
- Sutton, M.A., Howard, C.M., Erisman, J.W., Billen, G., Bleeker, A., Grennfelt, P. van Grinsven, H. and Grizzetti, B. (eds.) (2011). *The European Nitrogen Assessment*. Cambridge, UK: Cambridge University Press. <http://www.nine-esf.org/node/360/ENA-Book.html>
- Pearce, F. (2018). Can the world find solutions to the nitrogen pollution crisis? *Yale Environment* 360, 6 February. <http://e360.yale.edu/features/can-the-world-find-solutions-to-the-nitrogen-pollution-crisis>
- Liu, X., Zhang, Y., Han, W., Tang, A., Shen, J., Cui, Z. *et al.* (2013). Enhanced nitrogen deposition over China. *Nature* 494, 459–462. <http://dx.doi.org/10.1038/nature11917>
- Fowler, D., Steadman, C.E., Stevenson, D., Coyle, M. Rees, R.M. Skiba, U.M. *et al.* (2015). Effects of global change during the 21st century on the nitrogen cycle. *Atmospheric Chemistry and Physics* 15, 13849–13893. <https://doi.org/10.5194/acp-15-13849-2015>
- Lelieveld, J., Evans, J.S., Fnais, M., Giannadaki, D. and Pozzer, A. (2015). The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale. *Nature* 525, 367–371. <https://doi.org/10.1038/nature15371>
- United Nations Environment Programme (2013). *Drawing Down N<sub>2</sub>O to Protect Climate and the Ozone Layer: A UNEP Synthesis Report*. Alcamo, J., Leonard, S.A., Ravishankara, A.R. and Sutton, M.A. (eds.) Nairobi. <http://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/8489>
- Suddick, E.C., Whitney, P., Townsend, A.R. and Davidson, E.A. (2012). The role of nitrogen in climate change and the impacts of nitrogen–climate interactions in the United States: foreword to thematic issue. *Biogeochemistry* 114, 1–10. <https://doi.org/10.1007/s10533-012-9795-z>
- Sutton, M.A., Bleeker, A., Howard, C.M., Bekunda, M., Grizzetti, B., de Vries, W. *et al.* (2013). Our nutrient world: the challenge to produce more food and energy with less pollution. Edinburgh, UK: NERC/Centre for Ecology & Hydrology. <http://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/500700/>
- Abrol, Y.P., Adhya, T.K., Aneja, V.P., Raghuram, N., Pathak, H., Kulshrestha, U., Sharma, C. and Singh, B. (eds.) (2017). *The Indian Nitrogen Assessment: Sources of Reactive Nitrogen, Environmental and Climate Effects, Management Options, and Policies*. UK: Elsevier. <https://www.sciencedirect.com/book/9780128118368/the-indian-nitrogen-assessment>
- Van Grinsven, H.J.M., Holland, M., Jacobsen, B.H., Klimont, Z., Sutton, M.A. and Willems, W.J. (2013). Costs and benefits of nitrogen for Europe and implications for mitigation. *Environmental Science & Technology* 47, 3571–3579. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es303804g>
- Organisation for Economic Cooperation and Development (2018). *Human Acceleration of the Nitrogen Cycle: Managing Risk and Uncertainty*. Paris. <https://doi.org/10.1787/9789264307438-en>
- Brunekreef, B., Harrison, R.M., Künzli, N., Querol, X., Sutton, M.A., Heederik, D.J.J. *et al.* (2015) Reducing the health effect of particles from agriculture. *Lancet Respiratory Medicine* 3(11), 831–832. [https://doi.org/10.1016/S2213-2600\(15\)00413-0](https://doi.org/10.1016/S2213-2600(15)00413-0)
- Westhoek, H., Lesschen, J.P., Rood, T., Wagner, S., De Marco, A., Murphy-Bokern, D. *et al.* (2014). Food choices, health and environment: Effects of cutting Europe’s meat and dairy intake. *Global Environmental Change* 26, 196–205. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.02.004>
- Westhoek, H., Lesschen, J.P., Rood, T., Leip, A., Wagner, S., De Marco, A. *et al.* (2015). *Nitrogen on the Table: The influence of food choices on nitrogen emissions and the European environment*. European Nitrogen Assessment Special Report on Nitrogen and Food. UK: Centre for Ecology & Hydrology. [https://www.pbl.nl/sites/default/files/cms/publicaties/Nitrogen\\_on\\_the\\_Table\\_Report\\_WEB.pdf](https://www.pbl.nl/sites/default/files/cms/publicaties/Nitrogen_on_the_Table_Report_WEB.pdf)
- Springmann, M., Clark, M., Mason-D’Croz, D., Wiebe, K., Bodirsky, B.J., Lassaletta, L. *et al.* (2018). Options for keeping the food system within environmental limits. *Nature* 562, 519–525. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0594-0>
- Brownlie W.J., Howard, C.M., Pasda, G., Nave, B., Zerulla, W. and Sutton, M.A. (2015). Developing a global perspective on improving agricultural nitrogen use. *Environmental Development* 15, 145–151. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2015.05.002>
- EU Nitrogen Expert Panel (2015). *Nitrogen Use Efficiency (NUE) - an indicator for the utilization of nitrogen in food systems*. Wageningen, NL: Wageningen University. <http://www.eunep.com/wp-content/uploads/2017/03/N-ExpertPanel-NUE-Session-1.pdf>
- Sutton, M.A., Howard, C.M., Brownlie, W.J., Skiba, U., Hicks, K.W., Winiwarter, W. *et al.* (2017). The European Nitrogen Assessment 6 years after: What was the outcome and what are the future research challenges? In *Innovative Solutions for Sustainable Management of Nitrogen*. Dalgaard, T. *et al.* (eds). Aarhus, Denmark, 25–28 June. Aarhus, DK: Aarhus University and the dNmark Research Alliance. [http://sustainableconference.dnmark.org/wp-content/uploads/2017/06/JYC\\_Final\\_Book-of-abstracts160617.pdf](http://sustainableconference.dnmark.org/wp-content/uploads/2017/06/JYC_Final_Book-of-abstracts160617.pdf)
- Reis, S., Bekunda, M. Howard, C.M., Karanja, N. Winiwarter, W., Yan, X. *et al.* (2016). Synthesis and review: Tackling the nitrogen management challenge: from global to local scales. *Environmental Research Letters* 11, 120205. <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/11/12/120205/meta>
- Umweltbundesamt (2015). *Reactive Nitrogen in Germany: Causes and effects - measures and recommendations*. Dessau-Roßlau: The German Environment Agency (Umweltbundesamt). <https://www.umweltbundesamt.de/en/publikationen/reactive-nitrogen-in-germany>



24. Tomich T.P., Brodt, S.B., Dahlgren, R.A. and Scow, K.M. (eds.) (2016). Davis, CA: University of California Press. <http://asi.ucdavis.edu/programs/sarep/research-initiatives/are/nutrient-mgmt/california-nitrogen-assessment>
25. Galloway J.N., Townsend, A.R., Erisman, J.W., Bekunda, M., Cai, Z., Freney, J.R. et al. (2008). Transformation of the Nitrogen Cycle: Recent Trends, Questions and Potential Solutions. *Science* 320, 889-892. <https://doi.org/10.1126/science.1136674>
26. Erisman, J.W., Sutton, M.A., Galloway, J., Klimont, Z. and Winiwarter, W. (2008). How a century of ammonia synthesis changed the world. *Nature Geoscience* 1, 636-639. <https://doi.org/10.1038/ngeo325>
27. Davidson, E.A., Davidson, M.B., David, J.N., Galloway, C.L., Goodale, R., Haeuber, J.A. (2012). Excess nitrogen in the U.S. environment: trends, risks, and solutions. 15. The Ecological Society of America, Washington. <http://www.esa.org/esa/wp-content/uploads/2013/03/issuesinecology15.pdf>
28. Fowler, D., Coyle, M., Skiba, U., Sutton, M.A., Cape, J.N., Reis, S. (2013). The global nitrogen cycle of the twenty-first century. *Philosophical Transactions of the Royal Society, B* 368, 2130164. <http://dx.doi.org/10.1098/rstb.2013.0164>
29. Bleeker, A., Sutton, M., Winiwarter, W. and Leip, A. (2013) *Economy Wide Nitrogen Balances and Indicators: Concept and Methodology*. OECD, Environment Directorate, Environment Policy Committee, Working Party on Environmental Information, Paris, France ENV/EPOC/WPEI(2012)4/REV1. Paris. <http://inms.iwlearn.org/inms-meeting-lisbon/NBalancesandIndicators.pdf>
30. Sutton, M.A., Oenema, O., Erisman, J.W., Leip, A., van Grinsven, H. and Winiwarter, W. (2011). Too much of a good thing. *Nature* 472, 159-161. <https://doi.org/10.1038/472159a>
31. Masso, C., Baijukya, F., Ebanyat, P., Bouaziz, S., Wendt, J., Bekunda, M. et al. (2017). Dilemma of nitrogen management for future food security in sub-Saharan Africa – a review. *Soil Research* 55(6), 425-434. <https://doi.org/10.1071/SR16332>
32. United Nations Statistic Division (2018). *Global indicator framework for the Sustainable Development Goals and targets of the 2030 Agenda for Sustainable Development*. New York. A/RES/71/313 E/CN.3/2018/2. <https://unstats.un.org/sdgs/indicators/indicators-list/>
33. Zhang, X., Davidson, E.A., Mauzerall, D.L., Searchinger, T.D., Dumas, P. and Shen, Y. (2015). Managing nitrogen for sustainable development. *Nature* 528, 51-59. <https://doi.org/10.1038/nature15743>
34. Sutton, M.A., Reis, S., Riddick, S.N., Dragosits, U., Nemitz, E., Theobald, M.R. et al. (2013). Toward a climate-dependent paradigm of ammonia emission & deposition. *Phil. Trans. Roy. Soc. (Ser. B)* 368, 20130166. <http://dx.doi.org/10.1098/rstb.2013.0166>
35. Van Grinsven, H.J., Tiktak, A. and Rougoor, C.W. (2016). Evaluation of the Dutch implementation of the nitrates directive, the water framework directive and the national emission ceilings directive. *NJAS-Wageningen Journal of Life Sciences* 78, 69-84. <https://doi.org/10.1016/j.njas.2016.03.010>
36. Bittman, S., Dedina, M., Howard C.M., Oenema, O. and Sutton, M.A. (eds.) (2014). Options for Ammonia Mitigation: Guidance from the UNECE Task Force on Reactive Nitrogen. Edinburgh: Centre for Ecology and Hydrology. <http://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/510206/1/N510206CR.pdf>
37. Gu, B.J., Ju, X.T., Chang, J., Ge, Y. and Vitousek, P.M. (2015). Integrated reactive nitrogen budgets and future trends in China. 112, 8792-8797. <https://doi.org/10.1073/pnas.1510211112>
38. Ju, X.T., Gu, B.J., Wu, Y.Y. and Galloway, J.N. (2016). Reducing China's fertilizer use by increasing farm size. 41, 26-32. <https://doi.org/10.1073/pnas.1806645115>
39. Mangano E., Kahr, J., Wright, P.A. and Brandani, S. (2016). Accelerated degradation of MOFs under flue gas conditions. *Faraday Discussions*, 192. <https://doi.org/10.1039/C6FD00045B>
40. Food and Agriculture Organization (2016). Zero Budget Natural Farming in India. *Agroecology Knowledge Hub Trends in Biosciences Circular Economy Package: Questions & Answers*. 2 December. [http://europa.eu/rapid/press-release\\_MEMO-15-6204\\_en.htm](http://europa.eu/rapid/press-release_MEMO-15-6204_en.htm) Closing the loop – An EU action plan for the Circular Economy. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions <https://www.eea.europa.eu/policy-documents/com-2015-0614-final>.
41. Bishnoi, R. and Bhati, A. (2017) An Overview : Zero Budget Natural Farming. *Trends in Biosciences* 10(46), 9314-9316
42. European Commission (2015). Circular Economy Package: Questions & Answers. 2 December. [http://europa.eu/rapid/press-release\\_MEMO-15-6204\\_en.htm](http://europa.eu/rapid/press-release_MEMO-15-6204_en.htm)
43. European Commission (2015). Closing the loop – An EU action plan for the Circular Economy. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. COM(2015) 614 final. <https://www.eea.europa.eu/policy-documents/com-2015-0614-final>
44. Sachverständigenrat für Umweltfragen (2015). *Nitrogen: Strategies for resolving an urgent environmental problem - Summary*. Berlin. [https://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/EN/02\\_Special\\_Reports/2012\\_2016/2015\\_01\\_Nitrogen\\_Strategies\\_summary.html](https://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/EN/02_Special_Reports/2012_2016/2015_01_Nitrogen_Strategies_summary.html)
45. Austin, A.T., Bustamante, M.M.C., Nardoto, G.B., Mitre, S.K., Perez, T., Ometto, J.P.H.B. et al. (2013). Latin America's Nitrogen Challenge. *Science* 340, 149. <https://doi.org/10.1126/science.1231679>
46. United Nations Environment Programme (2018). *Resolutions and Decisions: UNEA 2*. Nairobi. <http://web.unep.org/environmentassembly/resolutions-and-decisions-unea-2>
47. United Nations Environment Programme (2018). *Documents: Third session of the UN Environment Assembly*. Nairobi. <http://web.unep.org/environmentassembly/node/40741>
48. Sutton, M. (2018). The global nitrogen challenge: a case of too much and too little nutrients. A presentation to the Committee of Permanent Representatives to the United Nations Environment Programme, 24 October 2018. <http://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/26379/Sutton%20Global%20Nitrogen%20Challenge%20%28UNEP%20CPR%20Oct%202018%29.pdf?sequence=24&isAllowed=y>

Graphic references



49. Zhang, R., Tie, X. and Bond, D.W. (2002). Impacts of anthropogenic and natural NOx sources over the U.S. on tropospheric chemistry. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 100(4), 1505-1509. <https://doi.org/10.1073/pnas.252763799>
50. FAO (2011). Global food losses and food waste – Extent, causes and prevention. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome. <http://www.fao.org/docrep/014/mb060e/mb060e00.pdf>
51. Ussiri D., Lal R. (2013) Global Sources of Nitrous Oxide. In: *Soil Emission of Nitrous Oxide and its Mitigation*. Springer, Dordrecht. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-5364-8\\_5](https://doi.org/10.1007/978-94-007-5364-8_5)
52. IFA (2018). International Fertilizer Association database (IFASTAT). International Fertilizer Association, Paris. <https://www.ifastat.org/>
53. Behera, S.N., Sharma, M., Aneja, V.P. and Balasubramanian, R. (2013). Ammonia in the atmosphere: a review on emission sources, atmospheric chemistry and deposition on terrestrial bodies. *Environmental Science and Pollution Research*, 20(11), 8092-8131. <https://doi.org/10.1007/s11356-013-2051-9>
54. Field, C.D., Dise, N.B., Payne, R.J., Britton, A.J., Emmett, B.A., Helliwell, R.C., Hughes, S, et al. 2014. The Role of Nitrogen Deposition in Widespread Plant Community Change Across Semi-natural Habitats. *Ecosystems*, 17, 864-877. <https://doi.org/10.1007/s10021-014-9765-5>
55. Payne, R. J., N. B. Dise, C. J. Stevens, D. J. Gowing, and Begin Partners. 2013. 'Impact of Nitrogen Deposition at the Species Level'. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(3): 984–87. <https://doi.org/10.1073/pnas.1214299109>
56. Sheppard, L. J., Leith, I. D., Mizunuma, T., Cape, N., Crossley, A., Leeson, S., Sutton, M.A., Dijk, N. and Fowler, D. (2011). Dry deposition of ammonia gas drives species change faster than wet deposition of ammonium ions: evidence from a long-term field manipulation. *Global Change Biology*, 17: 3589-3607. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02478.x>

Lead Authors、Contributors及びReviewers等への謝辞については以下の原著にあるAcknowledgementsを参照のこと。  
<https://www.unenvironment.org/resources/frontiers-201819-emerging-issues-environmental-concern>

日本語版出版：公益財団法人 地球環境戦略研究機関 (IGES)

翻訳の正確性について万全を期しているが、IGESは、翻訳により不利益等を被る事態が生じた場合には一切の責任を負わないものとする。  
翻訳版と原典の英語版との間に矛盾がある場合には、英語版の記述・記載が優先する。