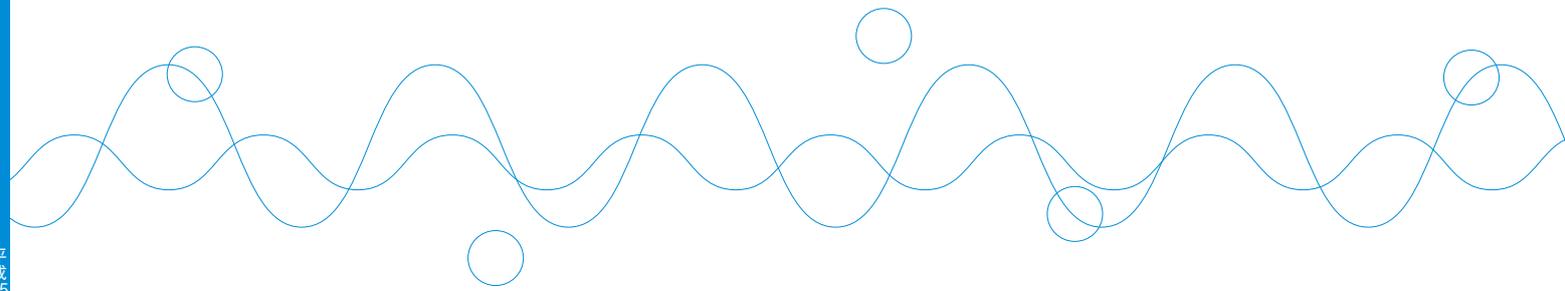


CRDS-FY2012-SP-01

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

STRATEGIC PROPOSAL

Consolidated Research Initiative for
Sustainable Nitrogen Cycle



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把握し、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統合的に推進すべきである。

人間活動による環境変化は社会の持続性を脅かす深刻な課題である。すでに国際的な課題として認知されている気候変動と生物多様性の喪失とともに、各種の物質循環も重要な課題である。とりわけ、化学肥料合成および大気汚染による窒素循環の改変の大きさは、生物による自然の窒素循環と同規模と推定されている。地域によっては硝酸等による水質汚染や水域の酸性化・富栄養化による生態系影響が生じており、国境を越える物質の動きも認識されている。窒素循環の改変は持続性の限度を越えていると考えられている。

窒素肥料は食料の生産のために不可欠である。食料生産と窒素による環境負荷の軽減とを両立できる農・畜産業および廃物・廃水処理の技術や、各地域が窒素循環を把握し制御できる技術を開発し、それらを普及させることが必要である。

わが国を含む東アジアは人口が多いため窒素による環境負荷も大きい。特に中国・東南アジア等の新興経済圏では、環境規制はしだいに整備されつつあるものの、産業の急速な発展や食生活の変化によって窒素負荷は増加傾向にある。広域的影響が被害として顕在化する前に予防的に環境負荷を減らすことが肝心である。そのためには、国内外の有効な政策的措置が必要であり、そうした政策立案に科学的知見を提供するために、東アジア規模の窒素循環と、対策技術適用がそれに及ぼす効果とをシミュレートする技術を開発する必要がある。さらに、東アジアの多数の地域で、窒素循環の常時モニタリングが整備され、環境中のいずれかの部分で環境負荷が増加していれば警告を発し、地域社会が負荷軽減対策を発動できるようにすることが求められる。これを可能にするために、経済性にすぐれた環境負荷のモニタリング技術と軽減対策技術の研究開発が必要である。

国際科学会議（ICSU）傘下の地球環境に関する国際研究プログラムが **Future Earth** の名のもとに再編成されようとしており、また、国際的な研究開発ファンディング体制も整備されつつある。これらの枠組みをも活用して、東アジアの窒素循環の課題解決に取り組むべき時が来ている。

以上の背景から、日本は、すでに第3期科学技術基本計画フォローアップで指摘されていたように、府省が連携して、持続的窒素循環をめざす研究開発を推進すべきである。これを「持続的窒素循環研究開発イニシアティブ」と呼ぶことにする。具体的には次のように東アジア、流域圏、農場の3つのスケールにそれぞれ焦点をあてたプロジェクトを柱として構成され、それらの共通基盤と研究成果の統合を可能とする体制を含む。

- (1) **東アジア域窒素循環研究**：窒素循環の諸プロセスに基づく東アジア規模の統合モデルを構築し、窒素収支の全貌を把握する。過去・現在の窒素循環とその変化の原因となりうる自然・社会諸要因の時空間データを整備し、再現型実験や感度実験によって、技術や政策が窒素循環に及ぼした効果を明らかにする。さらにモデルを複数の将来シナリオに適用し、対策技術の効果を評価する。
- (2) **流域圏窒素循環研究**：人間活動の影響の大きい数十キロメートル規模の流域圏を一つの窒素循環系として注目し、窒素循環およびそれらを変化させる諸要因についての計測や調査を強化して、一貫性のある窒素収支の基礎データを得る。また、計測

を強化された流域内で社会実験を行い、対策技術適用の効果を評価する。

- (3) **農場窒素循環研究**: 数百メートル規模の、詳しい計測と保守管理が可能な実験農場で、農地の植物・土壌系の窒素循環の素過程を詳しく観察しモデル化する。また、農業に関する対策技術を構成し、詳しい観察を伴う実験を行うことによって、対策技術の効果や副作用を評価する。計測技術の実地評価も行う。
- (4) **共通基礎研究**: (1) (2) (3)のプロジェクトに貢献する窒素循環のメカニズムの解明や対策技術の開発に関する基礎的研究を統合的に推進する。

本研究イニシアティブの内容は以下の諸研究課題を含み、多くの専門学術分野の連携を必要とする。

- 窒素循環のプロセスとメカニズムの解明・理解のための研究
 - ▶ 窒素循環を構成する生物・土壌・水文・地球化学等の諸プロセスの解明
 - ▶ 窒素循環の全体像と人間活動による改変の実態把握
- 窒素循環計測技術の研究開発
 - ▶ 計測手段の開発、実態・メカニズム把握の研究への応用、対策技術への導入
- 窒素循環シミュレーション技術の研究開発
 - ▶ シミュレーションモデルの開発、過去の窒素循環の再現によるモデル較正・検証
 - ▶ 対策技術の効果や副作用の評価（対策技術適用シナリオのもとでの予測型実験）
- 環境負荷軽減対策技術の研究開発。次のような技術を開発するとともにその実証実験を行い技術適用による窒素循環の変化を観察して技術の改良にフィードバックする。
 - ▶ 窒素肥料の利用効率を高める育種、肥料開発、施肥・水管理・耕作技術
 - ▶ 人・家畜の排泄物の窒素分をリサイクル（肥料化）あるいは無害化（脱窒）する技術
 - ▶ 環境負荷軽減が便益になるようなインセンティブをもたせる税制等の社会技術

本研究開発イニシアティブの実施には府省が連携した推進体制が必要である。そして、その前提として、専門分野を越えて持続的窒素循環という課題を共有する研究コミュニティの形成を促すことが必要である。研究コミュニティには狭い意味の研究者だけでなく、国内外を問わず各地域で対策技術の実証実験をしようとする研究者を含むようにする。

本研究開発イニシアティブの実施により、農場スケール、流域圏スケール、東アジア域スケールで、人々が窒素循環を把握して環境負荷軽減を図る政策的・技術的な対策の立案・適用を可能にすることができる。さらに、地球規模の課題の解決における科学技術外交の観点からは、窒素循環に関する国際的なアセスメントを含めて、国際的な政策決定に対する科学的助言を形成する継続的努力も求められる。本研究開発イニシアティブによって得られた知見、特に観測データ、標準的モデル、シミュレーション結果、評価指標などが国際的に公開・共有され、また長期にわたって維持されれば、それらは日本の先導的な国際貢献となるはずである。

Executive Summary

Nitrogen cycle is essential for the sustainability of the human society. We should promote a consolidated research and development (R&D) initiative which aims at understanding its status and its mechanism as well as at establishing technological capability to make it sustainable.

Modification of the environment due to human activities is a serious issue that threatens sustainability of the human society. Modification of the global biogeochemical cycle is one of its most important aspects, along with climate change and biodiversity loss which have already been recognized as major issues internationally. In particular, modification of the nitrogen cycle by synthesis of chemical fertilizers as well as by air pollution has already reached a magnitude comparable to that of the natural biogeochemical cycle. Water pollution due to nitrates and ecological impacts of acidification and eutrophication of water bodies have occurred in various places. Also, movements of matter beyond national boundaries have been discerned. The modification of nitrogen cycle is deemed to have exceeded the limit of sustainability.

Nitrogen fertilizer is indispensable for food production. We should develop and disseminate such technologies that fulfill the needs for food production as well as those for reduction of environmental burden due to nitrogen together, including those in agriculture and livestock business, in treatment of waste water and solid waste, and in monitoring and control of the nitrogen cycle in various scales.

East Asia, which includes Japan as well, has a large population, and accordingly its environmental burden of nitrogen is large. It is ever more increasing particularly in such emerging economies as China and Southeast Asia, because of their rapid industrial development and changes in food choices, although environmental regulation is also being strengthened. It is crucial to act proactively to reduce environmental burden before any large-scale damage appears evident.

To do this, both national and international policy measures are needed. In order to provide scientific knowledge to them, we need to develop capability to simulate the nitrogen cycle over the East Asia as well as the effects of technological options on it. Also, each district in the East Asia should have a continuous monitoring system of the nitrogen cycle, and dispatch warning if significant increase in any part of local environmental load of nitrogen is detected, so that people can apply measures to reduce the environmental burden. In order to achieve this, we should promote R&D on cost-effective monitoring and abatement technologies.

International scientific programs that deal with global environmental issues under the auspices of the International Council of Science (ICSU) are being reorganized as "Future Earth". International funding schemes of R&D are also being developed.

Thus, the time has come to work on solving the problem of the nitrogen cycle in the East Asia by taking advantage of the above-mentioned frameworks.

In this context, Japan, as suggested by the follow-up of the Third Basic Plan of Science and Technology, should promote R&D aiming at sustainable nitrogen cycle by overcoming administrative boundaries. We call it "Research Initiative for Sustainable Nitrogen Cycle". It principally consists of R&D projects that focus on three spatial scales: East Asia, watershed, and farm. Each of them should include a common scientific basis and a scheme for integration of entire research outcomes.

(1) **East Asia.** Integrated process-based models of the nitrogen cycle applicable to East Asia are to be developed. Making use of them, the complete nitrogen balance is evaluated. Spatio-temporal data of the nitrogen cycle as well as of the natural and social factors causing possible changes to it, both at present and in the past, will be collected and organized. Model experiments to represent the actual states will be carried out. Also, sensitivity studies will be done in order to clarify effects of technologies and policies. The models are also applied to multiple future scenarios in order to evaluate technological options.

(2) **Watershed.** A river catchment, which has a length scale of tens of kilometers, and which is heavily affected by human activities, is to be studied as a system of biogeochemical cycle. Focusing on the nitrogen cycle as well as the factors that can change them, enhanced observations and surveys will be made, and a consistent data set of the nitrogen balance would be available. Also, field experiments should be made in the watershed with implementation of enhanced measurements, in order to evaluate impacts of technological options.

(3) **Farm.** Intensive studies will be made in an experimental farm of a length scale of hundreds of meters, which is precisely maintained and measured. Detailed observations and modeling of basic processes of the nitrogen cycle in the soil-plant complex in the cropland will be made. Abatement technologies in agriculture will be developed and tested in experiments with detailed observations, and their intended and unintended effects will be evaluated. Also, appraisal of measurement technologies should be made in the field.

(4) **Basic R&D.** R&D projects that contribute to (1), (2) and (3), including those to fully understand mechanisms of nitrogen cycle and those to develop technological options, will be planned in a collaborative way.

The R&D initiative should include the following subjects and need inter-disciplinary collaboration.

- Observational and experimental studies to understand processes and mechanisms of nitrogen cycle.
 - Understanding of processes (biological, soil, hydrological, geochemical etc.)

that comprise the nitrogen cycle.

- Understanding of the overall nitrogen cycle and its degree of modification.
- Development of measurement technologies. They will facilitate observational studies and will also be incorporated in the abatement technologies.
- Development of simulation technologies.
 - Model development, calibration and validation based on the data of nitrogen cycle in the past.
 - Evaluation of intended and unintended effects of abatement technologies by prognostic experiments with scenarios of technological options.
- Development of abatement technologies, and experiments to assess them. These experiments involve comprehensive observations, which will comprise feedbacks to improvements of the technologies.
 - Agricultural technologies: breeding of such crop varieties that can utilize nitrogen fertilizer effectively; development of fertilizer products; techniques of applying fertilizer, controlling water, and tillage.
 - Technologies to recycle (as fertilizer) or treat (denitrify) animal manures and human wastes.
 - Social technologies to make incentives for reduction of nitrogen burden, such as tax reforms.

Implementation of this R&D initiative needs collaboration cutting across administrative boundaries. Also, for its success, it is mandatory to cultivate a research community, which shares the recognition of the existing issue of sustainable nitrogen cycle and moves forward beyond disciplinary boundaries. The community should include, besides researchers in the conventional sense, those who are willing to participate in demonstration experiments both in Japan and in foreign countries.

With this R&D initiative promoted, it will be possible to comprehend nitrogen cycle and also to plan and to implement policy/technology measures to reduce its environmental burden, at such multiple scales as farms, watersheds, and East Asia. Also, from the viewpoint of science-technology diplomacy, it is necessary to work ceaselessly to form science-based advice to international policy-making, partly by way of international assessments on nitrogen cycle. The knowledge gained in this R&D initiative, particularly, observational data, standard models, results of simulations, indices for evaluation, should be publicized, shared internationally, and be maintained for the years ahead. That can be Japan's leading international contribution.

目 次

エグゼクティブサマリー

Executive Summary

1. 研究開発の内容	1
2. 研究開発を実施する意義	3
2-1. 現状認識および問題点	3
2-2. 社会・経済的効果	18
2-3. 科学技術上の効果	19
3. 具体的な研究開発課題	21
(1) 東アジア域窒素循環研究	
(2) 流域圏窒素循環研究	
(3) 農場窒素循環研究	
(4) 共通基礎研究	
4. 研究開発の推進方法および時間軸	25
4-1. 研究開発の推進方法	25
4-2. 国際研究協力体制の必要性	28
4-3. 時間軸に関する考察	29
4-4. 研究開発推進上の留意点	30
謝辞	34
付録1. 検討の経緯	35
付録2. 国内外の研究開発の状況	39
参考文献	43

1. 研究開発の内容

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把握し、それを持続可能にする対策技術を構築することを目的とした研究開発を、府省連携体制で統合的に推進することを提案する。以下、これを「持続的窒素循環研究開発イニシアティブ」と呼ぶ。

地球上の窒素循環には、未解明のことがらも多く、また非線形性があるので、その変化の予測には不確かさが避けられない。したがって、今後、窒素循環を持続可能にしていくためには、「現時点での窒素循環の観察に基づき、対策を構築し、対策適用後の窒素循環の変化を再び観察して対策を修正していく」というフィードバック・ループを組みこんだ方法が必要となる。この方法は「順応型管理」(adaptive management)^[注1]と呼ぶこともできる。

わが国を含む東アジア^[注2]は世界の窒素環境負荷の大きな部分を占めておりその軽減が重要な課題である。東アジアの多数の地域で、窒素循環の常時モニタリングが整備され、環境中のいずれかの部分で環境負荷が増加していれば警告を発し、地域社会が環境負荷軽減対策を実施できるようにすることが求められる。これを可能にするために、経済性にすぐれた環境負荷のモニタリング技術と軽減対策技術の研究開発が必要である。また、窒素は自然の循環過程によっても人による貿易によっても国境を越えて運ばれるため、順応型管理の実施には、一国ごとだけでなく国際的に連携した有効な政策的措置が必要となる。そうした政策立案に科学的知見を提供するために、東アジア規模の窒素循環と、対策技術適用がそれに及ぼす効果とをシミュレートできる技術を開発する必要がある。

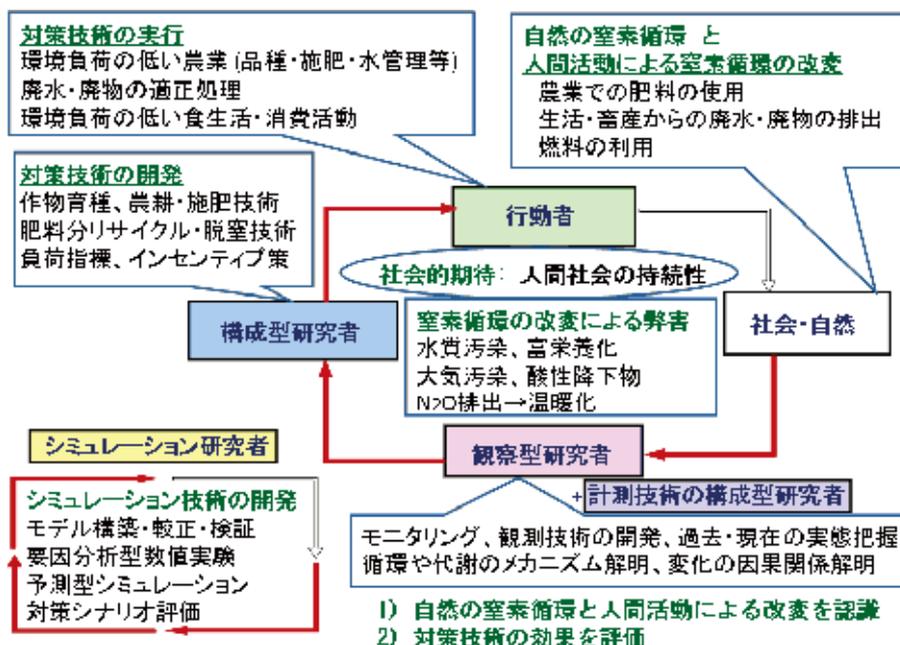


図 1. 持続的窒素循環研究の構造化俯瞰図。シミュレーションのループ(図の左下)は現実世界のループ(図の中央)を仮想的に再現するものである。

[注 1] 「順応型管理」は「適応型管理」とも表現されるが、「適応」という用語は気候変動の文脈で「緩和」と対照して使われるので(2-1節の「持続可能性の重要な部分としての自然物質循環」の項参照)、それとの混同を避けるため別の表現を採用した。

[注 2] 本プロポーザルでは「東アジア」の範囲を厳密に規定しないが、少なくとも日本、中国、韓国、ASEAN 諸国を含む地域を想定している。東アジア酸性雨モニタリングネットワーク(EANET)が対象としている地域とほぼ一致する。図6で示す国連食料農業機関(FAO)の地域区分では「東アジア」と「東南アジア」を合わせたものにほぼ相当する。

この研究開発においても、対策の実行を試み、その結果を観察して対策を修正するようなフィードバック・ループを意識的に組みこむべきである。これを吉川(2010)による「構造化俯瞰図」にならって図1のように表現する。

このようなフィードバック・ループを組みこんだ研究開発体制は、次のような人々を含めて構築される。

- 窒素循環の理解をめざす観察型研究者
 - ▶ 窒素循環を構成する生物・土壌・水文・地球化学等の諸プロセスの解明
 - ▶ 窒素循環の全体像と人間活動による改変^[注3]の実態把握
 - ▶ 対策技術の実証実験で窒素循環の変化を観察、対策技術の効果を評価
- 窒素循環を計測する技術を構成する研究者
 - ▶ 観察型研究で使われる計測手段を提供
 - ▶ 計測を構成要素として含む対策技術の構成に関与
- 窒素循環をシミュレートする技術を構成する研究者
 - ▶ 窒素循環モデルの開発、過去の窒素循環の再現による較正・検証
 - ▶ 対策技術の効果や副作用の評価(対策技術適用シナリオのもとでの予測型実験)
- 窒素循環を制御する技術の開発に取り組む構成型研究者
 - ▶ 窒素肥料の利用効率を高める育種、肥料開発、施肥・水管理・耕作技術
 - ▶ 人・家畜の排泄物の窒素分をリサイクル(肥料化)あるいは無害化(脱窒)する技術
 - ▶ 環境負荷軽減が便益になるようなインセンティブをもたせる税制等の社会技術

上記の課題に関して、特に東アジア、流域圏、農場の3つのスケールに焦点をあてた研究プロジェクトを推進する。またそれらに貢献する共通基礎研究を推進する。プロジェクトは相互に連携する。例えば、(1)のモデルのパラメータの値を(2)あるいは(3)によって較正・検証する。また、(2)で使われる計測技術を(3)で精密な計測と比較して評価する。

- (1) **東アジア域窒素循環研究**。窒素循環の諸プロセスに基づく東アジア規模の統合モデルを構築し、窒素収支の全貌を把握する。過去・現在の窒素循環とその変化の原因となりうる自然・社会諸要因についての時空間分布をもつデータを整備し、再現型実験や感度実験によって、技術や政策が窒素循環に及ぼした効果を明らかにする。さらにモデルを複数の将来シナリオに適用し、対策技術の効果を評価する。
- (2) **流域圏窒素循環研究**。人間活動の影響の大きい数十キロメートル規模の流域圏を一つの窒素循環系として注目し、窒素循環およびそれらを変化させる諸要因についての計測や調査を強化して、収支の一貫性のある基礎データを得る。また、計測を強化された流域内で社会実験を行い、対策技術適用の効果を評価する。
- (3) **農場窒素循環研究**。数百メートル規模の、高度な計測と保守管理が可能な実験農場で、農地の植物・土壌系の窒素循環の素過程を詳しく観察しモデル化する。また、農業に関する対策技術を構成し、詳しい観察を伴う実験を行うことによって、対策技術の効果や副作用を評価する。計測技術の実地評価も行う。
- (4) **共通基礎研究**。(1)(2)(3)のプロジェクトに貢献する窒素循環のメカニズムの解明や対策技術の開発の研究を統合的に推進する。

[注3] 本プロポーザル中では単に「改変」というときも人間活動に起因する変化を想定している。しかし現実の変化の多くは複合的なので、人為起源と自然起源の変化を明確に分離しようという態度はとらない。

2. 研究開発を実施する意義

2-1. 現状認識および問題点

持続的窒素循環に向けた統合的研究開発の推進を提案するに至った現状認識および問題点について、次の順に説明する。

- 問題認識の概要
- 持続可能性の重要な部分としての自然物質循環
- なぜ窒素循環か
- 窒素循環改変が起こす環境問題
- 東アジアにおける窒素循環改変のリスク
- 日本の窒素循環改変の状況
- 持続的窒素循環達成のための技術的課題
- 日本の施策の現状
- 国際的な状況
- 持続的窒素循環をめざす研究開発にかかわる問題点

問題認識の概要

人間活動による環境改変が人間社会の持続性を脅かすものになりうることは、20世紀後半以来認識されている。環境改変としては、気候変動^[注4]や生物多様性の喪失とともに地球の物質循環の改変も重要である [Box 1]。とりわけ、化学肥料合成および大気汚染による窒素循環の量は自然の窒素循環と同規模になっており、持続性の限度を越えたと考えられている [Box 2]。顕在化している問題は局地的な硝酸等による水質汚染や水域の酸性化・富栄養化による生態系影響であるが、改変は広域に及んでいる。

窒素肥料は食料生産に不可欠である。窒素環境負荷軽減と食料生産を両立させるように、窒素循環を把握する技術および農業および廃物・廃水処理等の対策技術を開発し、普及させることが必要である。

人口が多い東アジア、特に中国・東南アジア等の新興経済圏では、環境規制の強化にもかかわらず、産業の急速な発展や食生活の変化によって、窒素負荷は増加傾向にある。広域的影響が顕在化する頃には被害が深刻になる恐れがあり、予防的に環境負荷を減らす国際的な取り組みが必要である。

国際科学会議（ICSU）傘下の国際研究プログラムが Future Earth の名のもとに再編成されようとしており、また、国際的な研究開発ファンディング体制も整備されつつある（「国際的な状況」の項および付録2参照）。これらの枠組みをも活用して、東アジアの窒素循環の課題解決に取り組むべき時が来ている。

[注4] 本プロポーザル中で「気候変動」は「気候変化」と区別せず、英語の climate change に対応する意味で使う。しかもその内で主として人間活動に起因する全地球規模の変化をさす。

Box 1. 地球環境問題のうち物質循環への関心の歴史概観

人間活動が地球規模の環境に影響を与え、それが人間の生存条件を制約するという問題意識は、20世紀の後半に次第に高まってきた。1950-60年代の核実験による放射性物質の広がりに対する懸念と、1957-58年に国際科学会議(ICSU)の主導で行われた国際地球観測年(IGY)などの研究活動により、大気・海洋の物質循環のパターンと時間スケールに関する科学的理解が進んだ。1960年代には、公害問題などのローカルな環境問題への関心が高まったが、すでに先駆的な地球化学者や生態学者は生物地球化学サイクルの改変に関する問題意識をもっていた(半谷・安部 1966)。

全球規模の環境問題への認識は1970年ごろに高まった。まず、超音速旅客機の開発計画に対して、排気に含まれる窒素酸化物を原因とする成層圏オゾン減損の懸念が起こり、科学者によるアセスメントが行われた(SCEP, 1970)。1980年代にはフロン類がオゾン減損の原因物質として特定され、その規制が国際政治の課題となった。

世界の科学者の共同の活動として、ICSU傘下に環境問題科学委員会(SCOPE、現在はICSUから独立している)が1969年に結成され、多数のアセスメント報告書を出した。ダム湖や沿岸海域などさまざまなスケールの環境問題を取り上げているが、特に第7巻(Svensson and Sondelund, 1975)では全球規模の窒素・リン・硫黄の循環に関する知見の総括を行なっている。

また1970年代には、世界の長期的食料供給などに関する懸念から、気候変動に関する研究が注目されるようになった。人間活動の気候への影響は、大気中の二酸化炭素濃度(CO₂)増加がもたらす温暖化とエアロゾルの増加がもたらす寒冷化のうち、前者が主になると、次第に定まった。CO₂濃度の見通しを得るためには炭素循環を知る必要があることを、SCOPEは報告書第13巻(1979年)などに繰り返し取り上げた。炭素循環のメカニズム解明や変動予測のためにも、生物の活性を制約する窒素の循環をあわせて見る必要が認識されてきた。生物が関与した地球規模の諸元素の循環つまり「生物地球化学サイクル」というとらえ方が発達し(水谷, 1987)、ICSU傘下で1986年に発足した地球圏・生物圏国際協同研究計画(IGBP)でも主要な課題の一つとなった。

他方、地球の生態系の生産能力がどのくらいあり、そのうちのどれくらいを人間が使うことができるのかという問題への関心も1970年代から続き、特に1990年代に深刻さがますます認識されるようになった(例えばVitousekら, 1997。Vitousekは生態系の窒素循環の研究者)。地球規模の生態系の変動もIGBPの主要な課題である。

なお、必ずしも全球規模ではないが国境を越えた環境問題として、酸性雨に代表される大気からの汚染物質沈着がある。1970年代にヨーロッパと北アメリカで国際政治の課題となり、長距離越境大気汚染条約(CLRTAP)が1979年に調印され1983年発効した。これに先立って科学的アセスメントである「長距離移動大気汚染物質モニタリングのヨーロッパ共同プログラム」(EMEP)の整備が始まり、オーストリアにある国際的研究機関International Institute for Applied Systems Analysis(IIASA)で開発されたRAINSモデルが採用され、CLRTAPのオスロ議定書(1994年、対象は硫酸酸化物)や複数汚染物質議定書(1999年、対象に窒素酸化物を含む)での削減目標設定に利用された(石井 2005; 米本 2011)。東アジアでは、東アジア酸性雨モニタリングネットワーク(EANET)が1998年に発足した。しかしまだ国際政治の枠組みがなく、そのための社会科学研究が環境省環境研究総合推進費S-7(付録2参照)の中で行われている。

持続可能性の重要な部分としての自然物質循環

産業革命以後、人間一人当たりの物質・エネルギー利用量のみならず人口も増えた。人間活動による環境改変の度合いがある水準を越えると、人間社会の持続可能性が脅かされる。この水準を「地球の限界」(水谷, 1999)あるいは「Planetary Boundaries」(Rockström, 2009a,b)と呼ぶことがある。Rockströmらの論文では環境改変の10の側面を取り上げ、そのうち生物多様性の喪失、窒素循環、気候変動はすでに限界を越えているとしている[Box 2]。この研究での限界の値は必ずしも客観的に根拠づけられたものではない。しかし、大筋として、人間社会を持続可能にするためには、環境のこれらの側面について、人間活動由来の改変を減らしていくことが必要と判断できる。本プロポーザルではこれを「環

境負荷軽減」と表現する^[注5]。ただし、完全に自然状態に戻すことは不可能であり、人間社会が改変された環境に適応すること（adaptation）もあわせて必要である。現在の人口を支える食料生産を続けながらも、持続不可能な溜まりが生じないような準定常的な窒素循環の状態をめざすべきであろう。本プロポーザルでは、この状態を「持続的窒素循環」と呼ぶ。

Box 2. Planetary Boundaries

Rockström ら（2009a,b）は地球環境改変のうち表 1 にあげた側面それぞれについて持続可能性の限界と現状の定量的評価を試みた。このうち窒素循環とリン循環は生物地球化学サイクルの細分である。その結果、窒素循環は生物多様性の喪失、気候変動と並んで限界を超えていると評価された。

表 1 Planetary Boundaries (Rockström ら, 2009a)

地球システムのプロセス	変数	単位	限界と考えられる値	現在の値	産業革命前の値	限界に対する現在の値の比率
気候変動	放射強制力	相対値	1	1.5	0	1.5
生物多様性の喪失	単位時間あたりの種の絶滅数	種数/(百万種・年)	10	100 以上	0.1 - 1	10 以上
窒素循環	人間の利用のために大気から取り出された窒素の量	百万トン/年	35	121	0	3.5
リン循環	海に流出するリンの量	百万トン/年	11	8.5 - 9.5	約 1	約 0.8
成層圏オゾン減損	オゾン濃度	ドブソン単位	276	283	290	0.5
海洋酸性化	海水に対するアラレ石の飽和度		2.75	2.90	3.44	0.78
淡水利用	人間による淡水の消費	立方キロメートル/年	4000	2600	415	0.63
土地利用変化	陸のうち耕地化された面積の割合	%	15	11.7	少量	0.7 (仮に産業革命前を 4 として)
大気エアロゾル負荷	大気中の粒子濃度	まだ定量的に評価されていない				
化学物質汚染	排出量、濃度、生態系への影響など	まだ定量的に評価されていない				

右端の列の「比率」は上記文献の表の数値から次のように計算した。文献の図ともほぼ対応する。
 $(\text{現在の値} - \text{産業革命前の値}) / (\text{限界と考えられる値} - \text{産業革命前の値})$

環境改変には大きく、気候変動、生態系の改変・生物多様性の喪失とともに、物質循環の改変が挙げられる。日本の環境行政では「持続可能社会」の特徴を「低炭素社会、自然共生社会、循環型社会」の 3 本柱で示すことが多い（日本の行政については後述「日本の施策の現状」の項を参照）。ただし物質循環の改変には次の 2 類型を区別すべきであろう。

「循環型社会」の文脈で話題となる物質の多くについて言えば、自然物は動きが遅いストックとみなすことができ、循環は人間が人工的に作り出している。その際に生じる問題

[注 5] 気候変動対策の分野では「緩和」(mitigation) と呼ばれている。

は、人間にとっての資源枯渇であったり、生物にとっての毒性であったりする。対策としてはいわゆる 3R (reduce, reuse, recycle)、つまり、資源節約と、閉じた人工循環の実現が挙げられることが多い。

本プロポーザルの対象である窒素循環はこれらとは異なる類型に属する。人間はもともと自然の循環のフローを利用していたが、現代の人間活動はそのフローを大きく改変し、環境中に物質の過剰や不足をもたらし、生態系や気候へも影響を与えている。その対策は先に述べた環境負荷軽減と適応ということになる。ただし、自然循環も、人間によるその改変も、完全には解明できず、制御も不可能である。持続的窒素循環の目標も自明ではない。例えば改変された窒素循環に適応した魚が水産資源として使われている場合、社会にとって望ましい状態は自然状態とは違うかもしれない。したがって、循環の実態とその影響のモニタリングを継続し、順応型管理を行うべきである。また、循環の改変はすべての人の日常の生産・消費活動に伴って起こるので、その解決には多くの人の行動変化が必要であり、政策的措置の役割が重要となるであろう。

なぜ窒素循環か

生物にとって主要な元素としては水素、酸素、炭素、窒素、リン、硫黄が挙げられる。ここではそのうち窒素に注目する。水素と酸素は非常にありふれており、水 (H₂O) の循環として、また他の元素の循環過程で化合する相手として扱われる。その他の元素のうちで、窒素を特に取り上げることについては、表 2 にあげたような根拠が存在する。

表 2. 窒素循環と他の主要な元素の循環との対比

元素	窒素循環との関係	窒素と同じ重みで取り上げない理由
炭素 C	生物体には一定の C/N 比 (高等植物と藻類・動物とで異なる) で共存	炭素循環はすでに重点とされている気候変動 (地球温暖化) の課題で取り上げられている。
リン P	水域富栄養化の件では包括必要	リン鉱石はストック資源であり 3R 型の対処が適切であることが明らかになっている。(大竹 2011 参照)
硫黄 S	大気汚染・大気からの降下物の件では包括必要	硫黄酸化物の環境負荷軽減は化石燃料の脱硫で対応が可能となっている。

地球環境中の窒素の大部分は窒素分子 (N₂) として大気中にある。しかし、ほとんどの生物は窒素を直接利用することができず、アンモニア・硝酸等の化合物あるいはイオンの形になった窒素を利用している (図 2)。窒素分子以外の形になった窒素を「反応性窒素」(reactive nitrogen) という (「結合態窒素」「活性窒素」という表現も基本的に同じ意味である)。

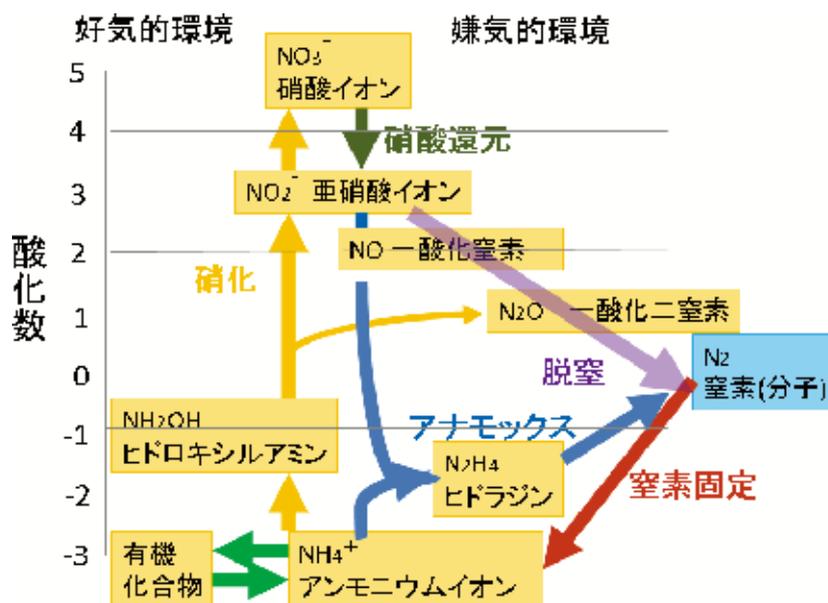


図 2. 環境中の窒素の形態と変換過程。Canfield ほか (2011) の図 1 から簡略化。

窒素はタンパク質に必ず含まれる元素なので生物の生育に必須だが、農地では作物とともに運び出されて不足することが多いので、肥料として供給することが必要になる。窒素肥料の施肥は農作物の収量に明確に影響を与える (図 3)。

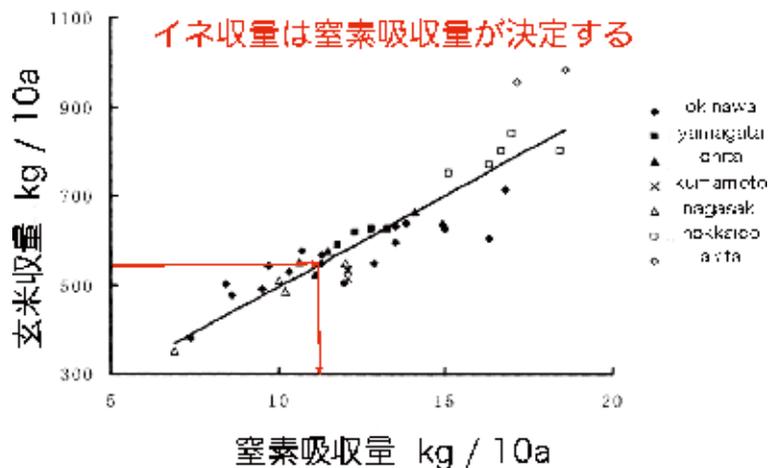


図 3. 作物収量と窒素肥料。安藤 (2006) より。

窒素肥料は、1913 年のハーバー (Haber) とボッシュ (Bosch) の発明により大気中の N_2 を固定してアンモニアを合成することにより、大量に生産できるようになった。現在、窒素化学肥料なしでは、世界の人口を支える食料を供給できない。アンモニア合成には天然ガスが使われるため、窒素化学肥料合成は化石燃料を消費し二酸化炭素 (CO_2) を排出する。使用された肥料中の窒素は、一部は環境中に漏れ、一部は作物に吸収されて人や家畜に供給され、最終的に排出される。土壌中では図 2 に示すように形を変え、多くは硝

化作用によって硝酸イオンとなる。

また、燃焼に伴う二酸化窒素 (NO₂) や一酸化窒素 (NO) などの窒素酸化物 (NO_x) も重要である。これらは主に大気中の N₂ と O₂ の反応によって生成される。NO_x は大気汚染物質であり、直接に健康被害をもたらすとともに、対流圏オゾンの生成を促す。大気中を運ばれた NO_x の多くは、硝酸イオンとして陸や水域に沈着する。

土壌中には、硝酸を N₂ に変える脱窒作用をもつ微生物がいる。しかしその働きが硝酸の供給に追いつかないと、土壌水分やそれに由来する地下水等の硝酸濃度が高くなる。また酸化還元状態によっては、脱窒の産物が温室効果気体である一酸化二窒素 (N₂O) になる。

全地球規模の窒素循環の定量的推計を図 4 に、人為的改変の量の時系列を図 5 に示す。

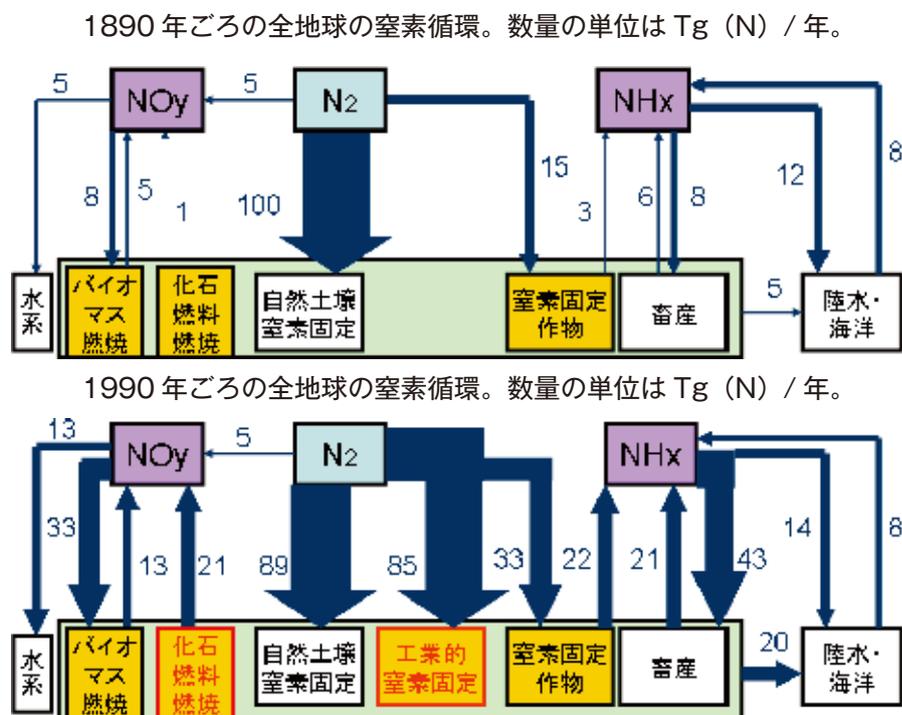


図 4. 全地球規模の窒素収支

上がハーバー・ボッシュ法の利用が始まる前、下が 1990 年の状況である。NO_y は窒素酸化物の NO, NO₂ のほか硝酸イオン・亜硝酸イオン等を含めた総称。NH_x はアンモニア・アンモニウムイオン等の総称。(Galloway and Couling (2002) の図を小川・及川・陽 (2009) にならって日本語化、一部強調した。)

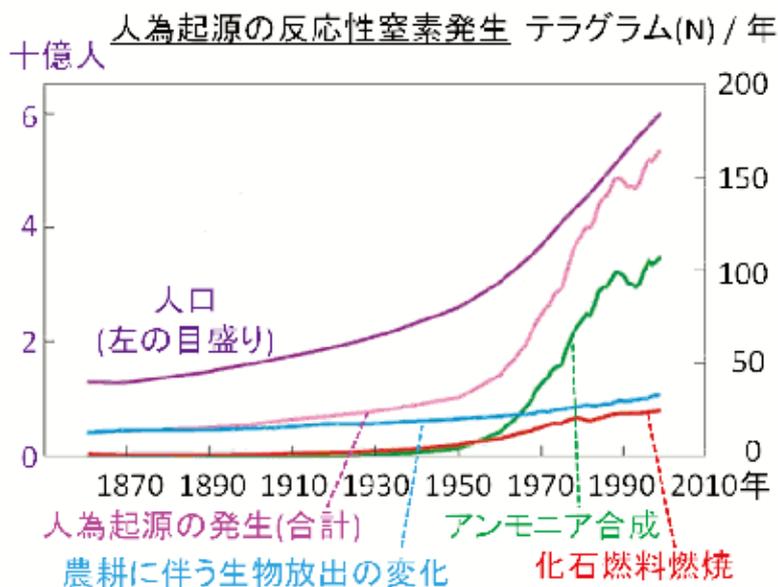


図 5. 世界の人口および反応性窒素発生量の変遷 (Galloway ほか 2003)

窒素循環改変が起こす環境問題

人間活動による窒素循環の改変は、次のような環境問題を引き起こしている。それは、一つの畜舎の付近の強い汚染から、全地球規模で現われる温室効果まで、さまざまな空間規模をもっている。

- 農地に与えられた窒素肥料の一部、および、作物消費による反応性窒素を含む畜産廃物や生活排水が環境中に出ることによって、地下水・河川水等が汚染される。また、湖沼や沿岸海洋水域の富栄養化が起き、その結果として特定種生物の大発生（赤潮・緑潮）、無酸素水塊の形成などが起きる。
- 燃焼によって大気へ窒素酸化物（NO_x）が排出される。NO_x は健康上有害であり、また対流圏オゾンの主成分とする光化学スモッグの原因物質ともなるが、一部は大気によって運ばれそこで降下沈着する。沈着には降水に伴う湿性沈着（酸性雨の一部）と、気体分子あるいはエアロゾル粒子として地表に達する乾性沈着の両方がある。これは陸上植生への害をもたらすこともあり、また水域への反応性窒素負荷に加わる。
- 農地に与えられた窒素肥料は、条件によっては、大気への一酸化二窒素（N₂O）排出を増加させる。これは温室効果を強化し気候変動に寄与する。
- アンモニア合成に使われる化石燃料により大気へ CO₂ が排出され、温室効果を強化し気候変動に寄与する。

日本の窒素循環改変の状況

日本は、食料や飼料の自給率が低いために、人口が多いにもかかわらず直接の窒素負荷は小さいが、野菜等の栽培のための化学肥料や畜産廃物等からの窒素負荷の大きいところで地下水に飲用不可とされる濃度の硝酸イオンを含むことがある。また、まだ規制はないが、野菜等に含まれる硝酸も懸念されることがある。

都市下水は、日本では高次処理が普及しているので、反応性窒素の多くは脱窒されて窒

素分子として大気に出る。一部の窒素は汚泥に残るが、これはカドミウムなどの有害物を含むため、脱水のうえ埋め立てられる。持続性の観点からは、肥料の窒素が使い捨てになっていることに加えて、排水の高次処理のエネルギーコストが大きいという問題がある。

また、河川上流域の森林で、大気降下物による反応性窒素の供給が森林にとって適切な量を上回る「窒素飽和」と呼ばれる現象が起きている。これにより、渓流水の硝酸イオン濃度上昇という水質上の問題が起きている。窒素の供給源は、北関東では南関東の大都市域、日本海側では他のアジア諸国からの広域大気汚染が主と推定される（古米ほか 2012）。

日本海におけるエチゼンクラゲの大発生の要因は不明な点が多いが、中国沿岸海域の水温上昇、海岸の改変、魚の過剰漁獲とともに、富栄養化と栄養塩の窒素への偏りが一因と考えられている（Uye 2011; 柳・植田 2011）。

ただし、湖沼や沿岸海洋では、流れこむ河川等の水質改善に伴う反応性窒素の濃度低下が水産資源の減少につながっている（貧栄養化）ことも指摘される（Nixon, 2009）。

なお、日本は食料・飼料を輸入しているので、輸入元の国における窒素負荷の責任の一端があると考えられる。日本人の消費する食品などはそれ自体が含む窒素よりも大きな窒素フットプリント（Box 3）を負っている。

Box 3. 窒素フットプリント

窒素フットプリント (nitrogen footprint) は広い意味のエコロジカルフットプリントの一種であり、カーボン・フットプリントやウォーター・フットプリント（沖, 2012）と類似のものである。食品や肥料などの商品が生産される過程で投入された反応性窒素の量を背負っていると考える。そのうち商品が含まれている分は消費地で、その他は生産地での環境負荷と考えられる。Galloway をはじめとする有志によりこの概念の普及をめざす「N-Print」^[注6] という活動では、食品の窒素フットプリントを計算できるツール「N-Calculator」(Leach ほか 2012) も開発されている。この活動は国際窒素イニシアティブ (INI、本文 2-1 節「国際的な状況」の項を参照) の一環とされているが、今のところ参加者は北アメリカとヨーロッパに限られているようである。

東アジアにおける窒素循環改変の重要性

国連食料農業機関 (FAO) のデータ (図 6) によれば、アジアの窒素肥料消費は世界の 63% を占める。この比率は世界の人口にしめる比率とほぼ同じだが、耕地面積あるいは穀物生産量にしめる比率に比べて大きい。そのうちでも東アジア (FAO の定義による) が世界の窒素肥料消費の 34% を占めている。東アジアの耕地面積あたりの窒素肥料消費は 299 kgN/ha (1 ha あたり窒素として 299 kg) であり、世界平均の 77、ヨーロッパの 48、北アメリカの 65 に比べて大きい。(なお、東南アジアは 103、南アジアは 99、東アジアの一部である日本は 106)。

[注6] <http://www.n-print.org>

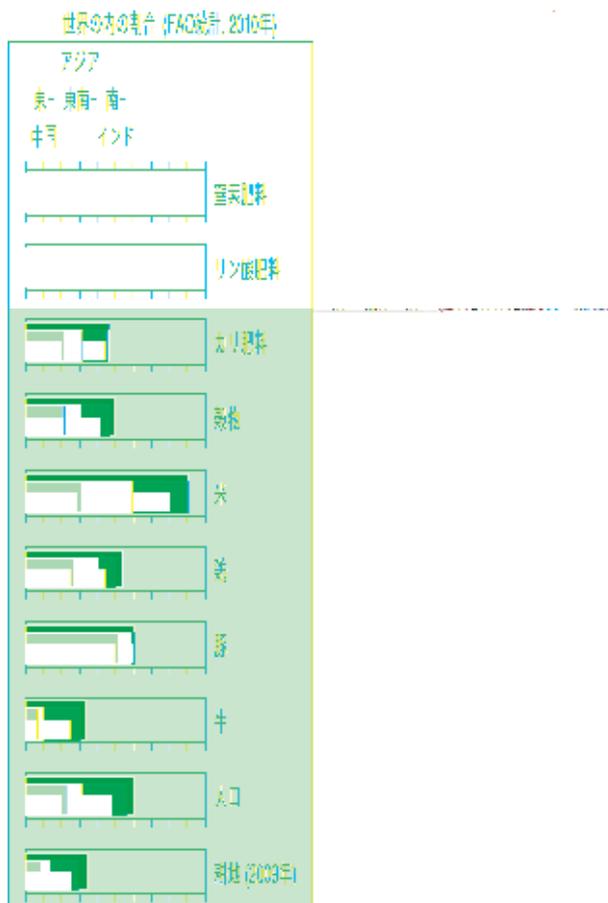


図 6: 世界の肥料の使用、農作物・家畜生産高、人口、耕地面積にしめるアジア、東アジア、中国の割合。国連食糧農業機関（FAO）の統計（2010 年）によって作図。図中の地域区分は FAO のもの。本プロポーザルで想定する東アジアはほぼ FAO の東アジアと東南アジアを合わせたものに相当する。

中でも中国は耕地面積あたりの窒素肥料消費が 319 kgN/ha に及び、また燃焼起源の窒素酸化物の排出量も多いため、窒素負荷が特に大きい。地域によっては、大気降下物の窒素によって森林からの渓流水が pH 4 まで酸性化しており（Fang ほか 2010）、土壌中の塩基の溶脱が進行していることが示唆される（楊, 2008）。

「日本の窒素循環変化の状況」の節で述べたように、東アジアの広域の大気・海洋汚染の影響は日本にも及び始めている。また、Box 3 で述べたように、外国の環境負荷には、日本の消費需要に応じた生産活動によるものが含まれる。

なお、東アジアにはヨーロッパ・北アメリカと違った自然と社会の特徴がある。気候は夏に湿潤となるので、乾燥する北アメリカ等よりも土壌中の硝酸が流出しやすい（大手, 2011）。農地のうちで水田が大きな割合をしめる。海岸に面して巨大都市（メガシティ）が多数出現している。したがって欧米での知見がそのまま東アジアの実情に適合するとは限らず、世界の窒素循環の課題解決には東アジアでの取り組みが必要である。

持続的窒素循環達成のための技術的課題

人間活動によって環境中に排出される反応性窒素は 1 年あたり 105 Tg（Tg はテラグラ

ム、10の12乗グラム)に及ぶ(2005年現在)。それは肥料起源と燃焼起源に分けられる。肥料起源はさらに農地から直接環境中に出るものと人や家畜を経て出るものに分けられる。これらの反応性窒素をコントロールすることが課題であり、そのために地域の窒素循環の実態を把握しその管理を行うことが必要である。

このうち、燃焼起源のものは、火力発電所や工場などの固定排出源と、自動車などの移動排出源とからの窒素酸化物があるが、いずれについても除去技術はすでに開発され普及が進みつつあるので、本研究開発イニシアティブではこれらを課題として取り上げない。ただし地域の窒素循環の把握・管理の対象としては考慮する必要がある。

具体的な研究開発課題は第3章で述べる。

日本の施策の現状

研究開発(付録2も参照)

日本の科学技術政策の中では、第3期科学技術基本計画では重点4分野中の「環境」、第4期では主要課題中の「グリーンイノベーション」が関連分野と言えるが、窒素循環が明示的にとりあげられてはいない(Box 4)。

また、これまでの研究開発事業にも窒素循環が主題として明示されているものはまれである。数少ない例として、科学技術振興機構(JST)と中国国家自然科学基金(NSFC)との戦略的国際科学技術協力推進事業では「日本と中国の農業生態系流域における窒素循環およびその水質に及ぼす影響に関する比較研究」(2010-2013年度)が進行中である。

また、総合科学技術会議のもとで2011年度から推進されている最先端・次世代研究開発支援プログラム(NEXT)のグリーンイノベーションに関する研究課題141件のうち窒素循環と関連するものが4件ある(付録2参照)。

過去には、環境省環境研究総合推進費に「東アジアにおける生態系の酸性化・窒素流出の集水域モデルによる予測に関する研究」(2008-2010年度)があった。

このほか窒素循環の各局面は、大気汚染、水質、水域生態系、地球温暖化の緩和策・適応策など、さまざまな主題のもとで研究されている(環境省、農林水産省、文部科学省など)(付録2参照)。

なお、地球観測に関する府省横断的連携拠点として、気候変動研究に関しては地球温暖化観測推進事務局(環境省・気象庁が共同で国立環境研究所に設置)があるが、物質循環研究に関するものは未着手である。

Box 4. 科学技術基本計画の中の窒素循環の位置

第3期科学技術基本計画のもとでは、「分野別推進戦略」（2006年3月28日）^[注7]の重点4分野のうち「環境」分野の「水・物質循環と流域圏」研究領域の内容が窒素循環の問題と最も関連が深い、「窒素」という用語は見当たらない。また「気候変動」研究領域に一酸化二窒素の排出削減が含まれ、「生態系管理」、「3R技術」研究領域にも関係しうるものがある。「ライフサイエンス」分野には「よりよく食べる・よりよく暮らす」領域に「微生物、動植物を活用した環境対応技術開発」がある。

第3期科学技術基本計画のフォローアップのうちの「分野別推進戦略総括的フォローアップ（平成18～22[2006-2010]年度）の取りまとめ結果」^[注8]の「環境」分野では、一酸化二窒素排出削減関係のほか「水・物質循環と流域圏」研究領域の「第3期の主要施策に係る成果」に「水処理技術開発研究では、微生物を用いる新たな脱窒技術であるアナモックス反応を利用した窒素除去プロセスの実証試験を実施し…」という記述がある。また、窒素への直接の言及はないが、「今後（H23[2011]～）の取組」の中にある次の指摘が注目される。「水・物質循環領域の研究は、気候変動や生態系管理など環境分野の他の領域や、災害など他の分野と重なるものが多い。また、行政的管轄が異なるため、山地から海域に至る統一的なアプローチが難しい分野である。こうした分野や担当府省の壁を越えて、総合的なアプローチを可能とする仕組みをどう作るか、維持するかが課題である。」

第4期科学技術基本計画では、主要課題の一つである「グリーンイノベーション」の説明中に「循環型社会」は出てくる。しかし、4つの「重要施策」のうち炭素以外の物質循環に関係しうるのは「社会インフラのグリーン化」だけである。窒素循環は明示されていない。関係しうるキーワードとしては「自然環境や生物多様性の保全」「森林系における自然循環の維持」「持続可能な循環型食料生産の実現」がある。

第4期科学技術基本計画のもとでの平成24[2012]年度アクションプラン^[注9]では、政策課題「社会インフラのグリーン化」の重点的取組「地域特性に応じた自然共生型のまちづくり」の中に「循環型の食料生産等」という文言が含まれるものの、窒素循環を含む物質循環には明確には言及されていない。施策としては農水省の「気候変動に対応した循環型食料生産等の確立のための技術開発」がこれに対応するものであり、その中に窒素循環に関連する内容が含まれてはいるが、「平成24年度科学技術重要施策アクションプランの対象施策について」の本文では言及されておらず、別添資料の図中に「化学肥料の投入量2割削減」が言及されているだけである。

環境政策

持続可能社会をめざす日本政府の原則としては「21世紀環境立国戦略」（2007年閣議決定）^[注10]があり、低炭素社会、自然共生社会とともに循環型社会が柱とされている。そして2012年4月27日に閣議決定された第4次環境基本計画^[注11]では、持続可能な社会を「低炭素」・「循環」・「自然共生」の統合により達成することに加え、その基盤として「安全」の確保もめざすこととしている。「21世紀環境立国戦略」の立案に関わった武内和彦氏は「循環型社会」を「自然生態系と人工循環系の統合」として構想していた（武内，2007，167ページ）。しかしその後も政府の「循環型社会」の柱のもとの施策は産業あるいは消費から出る廃物の資源リサイクルがほとんどであり、窒素を含む自然の物質循環の人為的改変は注目されていない。

大気に関する環境基準項目には二酸化窒素が含まれており、地方自治体の観測点で毎時

[注7] <http://www8.cao.go.jp/cstp/kihon3/bunyabetu.html>

[注8] <http://www8.cao.go.jp/cstp/project/bunyabetu2006/followup.html>

[注9] <http://www8.cao.go.jp/cstp/budget/h24ap/h24action.html>

[注10] http://www.env.go.jp/guide/info/21c_ens/index.html

[注11] http://www.env.go.jp/policy/kihon_keikaku/plan/plan_4.html

の計測が行われ、その結果は環境省の大気汚染物質広域監視システム^[注12]にまとめられる。水質に関しては、健康に関する環境基準項目に「硝酸性窒素及び亜硝酸性窒素」、湖沼・海域の生活環境に関する環境基準項目に「全窒素」があり、それに伴う水質測定データは環境省の水環境総合情報サイト^[注13]にまとめられている。

農業政策

1999年に「持続性の高い農業生産方式の導入の促進に関する法律」が成立した。これに基づいて、「エコファーマー認定制度」がある。これは、堆肥等の有機質素材による土づくりと化学肥料・農薬の使用低減をする農業者の計画を都道府県が認定し農業改良資金の貸し付けの形で支援するものである。化学肥料の低減の文脈では窒素施肥量の適正化が意図されており、土壌診断の項目に都道府県や作物の種類によっては硝酸性窒素が含まれることがある。また、2012年度から「環境保全型農業直接支援対策」が開始された。これは直接資金供与であるが、その条件はエコファーマーと同様な条件を含む。これらは、窒素循環の環境負荷軽減と部分的に目標が重なる施策と言える。

また2007年度に開始された「農地・水・環境保全向上対策」は、2011年度から「農地・水保管理支払交付金」制度となっている。このうち水質保全の部分に窒素循環に関する項目を含む。これを支援するため農業環境技術研究所では、「水環境保全のための農業環境モニタリングマニュアル」（1999年）の改訂版（農業環境技術研究所，2006）を出した。

国際的な状況

窒素循環に関する研究者の連合組織

国際窒素イニシアティブ（International Nitrogen Initiative, INI）^[注14]がある。Scientific Committee on Problems of the Environment（SCOPE）と International Geosphere Biosphere Programme（IGBP）のそれぞれ一環とされている。5つの地域プロジェクト（アフリカ、東アジア、ヨーロッパ、ラテンアメリカ、北アメリカ、南アジア）がある。東アジアの代表は中国のYAN Xiaoyuan（顔曉元）教授（中国科学院南京土壤研究所）である。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ーなどが継続的に参加している。

国際的政策決定への科学的助言に向けて、INIは次に述べる窒素循環アセスメントを推進するほか、2012年の国連の持続的発展に関する会議（Rio+20）に向けて、UNEPほかのGlobal Partnership on Nutrient Managementと共同で、栄養塩による環境負荷を減らすことに向けた政策をとるよう提言している（Suttonほか，2012）。

窒素循環アセスメント

国際的政策への活用を想定して、窒素循環の現状・対策技術・各対策技術に応じた将来見通し等の科学的知見を総括する活動が始まっている。これは気候変動枠組条約に対するIPCCの役割と類似で、科学研究および行政等の報告をレビューするものである。汚染による損失と対策費用の比較などの経済面のアセスメントも含む。

ヨーロッパでは、ヨーロッパ窒素循環アセスメント（European Nitrogen Assessment,

[注12] <http://soramame.taiki.go.jp>

[注13] <https://www2.env.go.jp/water-pub/mizu-site/>

[注14] <http://www.initrogen.net>

ENA) が行われ、その結果が出版されている (Sutton ほか 2011)。(詳しくは付録 2 参照)。编者である Mark Sutton エジンバラ大学教授は、INI のヨーロッパ地域の代表でもある。

INI では全地球規模の窒素循環アセスメントを構想している。陸源海洋汚染防止条約 (GPA) あるいは生物多様性条約 (CBD) への貢献を想定している。

INI の北アメリカ地域センターでは、アメリカ合衆国の窒素循環の環境や健康への影響と気候変動との関係に関する評価報告書 (Suddick and Davidson, 2012) を出した。

中国では、INI の東アジア地域センター代表でもある中国科学院南京土壤研究所の YAN Xiaoyuan (顔晓元) 教授をはじめ、南京師範大学の CAI Zucong (蔡祖聡) 教授、中国農業大学の ZHANG Fusuo (張福鎖) 教授、LIU Xuejun (劉学軍) 教授らが、中国の窒素アセスメントを構想している。その主要課題は次のとおり。

1. 反応性窒素の流れの量の水準と変化傾向
2. 反応性窒素の変化を起こす諸要因
3. 反応性窒素の食料安全保障、環境、健康、気候への影響
4. 反応性窒素に関連する経済・政策を含む将来シナリオ

また Yan 教授らは東アジア多国間の連携も模索している。(Yan and Ti (2012) および 2012 年 8 月に Yan 教授から得た情報)。

酸性雨・広域大気汚染関係

1979 年に調印された長距離越境大気汚染条約 (CLRTAP) のもとで、1990 年代にヨーロッパの硫黄酸化物の排出削減が進んだが、これには当事国間でモデルとデータが共有され、ともに信頼する科学的アセスメントが行われたことが重要であった (石井 2005)。

アジア諸国はロシアを別として CLRTAP に加盟しておらず国際的な規制はまだ行われていないが、13 か国が参加した政府間の情報共有の枠組みである東アジア酸性雨モニタリングネットワーク (EANET) が 1998 年に発足した。EANET の事務局はタイのバンコクにある国連環境計画アジア太平洋地域資源センターに、ネットワークセンターが新潟にあるアジア大気汚染研究センターに置かれている。

IPCC による N₂O 排出量評価

天然にも存在し大気中で長寿命の温室効果気体のうちで、N₂O は CO₂、メタンについて重要であり、その収支は国際的な気候変動に関する取り組みの課題に含まれている。

IPCC (気候変動に関する政府間パネル) のインベントリータスクフォース (事務局は日本の地球環境戦略研究機関にある) が、気候変動枠組み条約に対して各国が排出量を報告するためのガイドラインを作成しており、それを検討するための専門家会合 (IPCC, 2011) には日本の農業環境技術研究所・大学等の研究者が参加している。

国際研究プログラムの再編成

ICSU (国際科学会議) の傘下の地球環境関係の国際研究プログラム IGBP、IHDP 等が Future Earth^[注 15] の名のもとに再編成されようとしている (付録 2 の「関連する国際研究プログラム」参照)。その趣旨説明では、持続可能性への課題解決と、政策決定者への知見提供が重視されている。

[注 15] <http://www.icsu.org/future-earth>

中国の政策動向

中国は2011年に「国家経済・社会発展第12次5年計画」期に入った。この中で環境拘束目標として、第11次から引き継がれた二酸化硫黄排出量（大気）と化学的酸素要求量（水質）に、単位GDPあたり二酸化炭素排出量、アンモニア性窒素排出量（水質）、窒素酸化物排出量（大気）が加えられた。アンモニア性窒素と窒素酸化物はいずれも2015年までに2010年比で10%削減するという拘束目標を立てている。

また、これまでの水質汚染の規制は固定排出源からのものに限られていたが、2010年の全国汚染源調査で農業・畜産・生活排水等の分散した（面的）排出源が汚染の半分以上を占めることが明らかになった。特に、農業が総窒素排出のうち67.4%を占める。第12期の排出削減では面的排出源が重視されることになった（JST CRC 2011; その農業の数値に関する情報源は「中国環境報」2011年3月11日）。

持続的窒素循環をめざす研究開発に関わる問題点

(1) 政策的な重点課題とされていないこと。窒素循環の人為的改変は、持続可能性の問題の主要部分の一つであるにもかかわらず、気候変動、生物多様性喪失、枯渇性資源循環と比べて、環境政策上も、科学技術政策上も、焦点とされることが少ない。そのようになった原因の解明も今後の課題となりうるが、推測としては、環境問題を空間規模によって「地球環境問題」と「地域環境問題」とに整理して対応したために、その中間の規模への関心がおろそかになった可能性がある。

(2) 国際的な推進体制が十分でないこと。窒素循環は大気・公海的环境にもかかわり、また貿易にもかかわるため、多国間で目標を共有した研究推進が必要である。特に資金提供を伴う協力体制について、ヨーロッパにはEU Framework ProgramやEuropean Science Foundationがあるが、アジアでは、「アジア太平洋地球変動研究ネットワーク（APN）」があり、動き始めたばかりの「東アジアサイエンス・イノベーション・エリア構想共同研究プログラム（e-Asia JRP）」[付録2参照]が将来役立つ可能性はあるものの、まだ弱体である。

(3) 窒素循環の現状把握が進んでいないこと。窒素循環に関わる物理量の中で特に流れの量が直接的に把握されていない。例えば、河川による硝酸態窒素の輸送に関しては、河川流量が連続観測されていても硝酸濃度の観測は間欠的であり、洪水時の流出が的確に反映されない。また最近日本では自治体の環境モニタリング能力は予算削減などにより低下している。普及可能な価格、十分な精度で連続計測が可能な技術が望まれる。また、社会統計の存在や質は国によって異なるが、既存の資料の収集も各研究者の個別努力の範囲にとどまることが多い。日本国内の窒素負荷の現状把握は、工場や下水処理場などの集中した排出源についてはよく行われているが、農地・市街地・大気降下物などの分散した排出源（面源、ノンポイント汚染源、非特定汚染源などと呼ばれる）については不確かさが大きく、最近ようやく既存データの再解析が行われた（日本水環境学会，2012）。比較的検討が進んでいる土壌から大気への N_2O 排出についても、施肥量からのボトムアップアプローチと、大気中の濃度からのトップダウンアプローチ（Crutzenほか2008）の間に約2倍以上の食い違いがある（IPCC, 2011）。

(4) 現状把握、状況改善のための科学技術的ツールが十分でないこと。広域の窒素循環のモデルとしては、定常モデルと、対象プロセスをしぼった動的モデルがすでにあるが、

将来の変化のシナリオを考えるためには包括的な動的モデルの開発が望まれる。モデルのパラメータの較正・検証のためにも野外実験、環境モニタリング、社会統計の整備が望まれる。

(5) 学際コミュニティ形成の機会がなかったこと。持続的窒素循環研究開発に関与する学問領域は理学・工学・農学等の多数の専門分科にまたがっている。例えば、下記が関係する（これは例示であり網羅ではない）。

- 窒素循環の実態およびメカニズムの解明には地球科学・生態学など、
- 計測には分析化学・同位体物理学・計測工学・システム設計工学など、
- 育種には植物科学・ゲノム科学など、
- 肥料の開発や施肥の改善には合成化学・植物栄養学（肥料学）・微生物学など、
- 水処理には水理学・化学工学・微生物学など。

水質汚染・水域環境対策、大気汚染対策、地球温暖化対策、肥料の有効利用等の課題は認識されており、地球惑星科学連合、生態学会、土壤肥料学会、水環境学会などの学会でも、いくらか学問領域を越えた議論も行われている。しかし、持続的窒素循環研究開発イニシアティブに関わりうるすべての分野の研究者が出会う機会はない。そのため、科学技術政策の立案側も、窒素循環に関する問題の全体像を把握できず、その一部を前述のような課題のプロジェクトのうちで周辺的問題として扱うことが多かった。個々の研究者も、たとえ持続的窒素循環が重要であることを認識していても、プロジェクトの期待する側面に限った成果を示す必要にせまられた。そこで、プロジェクトあるいは専門分科を越えた知見や技術の有益な共有は進まず、炭素循環の場合と比べても体系的な取り組みが育っていない。

2-2. 社会・経済的效果

本研究開発イニシアティブの実施により、次のような社会的効果が期待される。

- 人々が窒素循環に関する知識をもつとともに、その持続可能性に関する問題意識が高まり、政策課題としての位置づけも明確になる。
- 窒素肥料を使用する食料生産を続けながら、窒素循環の改変による地球環境へのインパクトを小さくすることができる。
- 越境汚染を減らし、また貿易交渉の際に環境負荷を適切に考慮に入れる手段を提供することによって、国際関係の改善に貢献する。

特に、東アジア域での食料生産を中心とする経済活動において、人々が窒素循環を把握して環境負荷軽減をはかる能力をもつことができる。これは日本の先導的国際貢献となる。

世界規模の窒素循環の環境負荷軽減の見通しとして、Galloway ら (2008) によれば、世界全体で適切な対策を講じれば、農地から 15 Tg (テラグラム)、畜産から 15 Tg、下水から 5 Tg、また (本研究開発イニシアティブの主な対象ではないが) 燃焼から 18 Tg の軽減が見こめるとされる。ただしその実現の時間スケールはまだ明示されていない。そこには本研究開発イニシアティブのような対策技術の構築と適用が暗黙に想定されている。

経済的観点の主な効果は、窒素負荷由来の環境問題 (地球温暖化への寄与を含む) の軽減と、それに伴う社会的費用の軽減である。

- ヨーロッパ共同体についての試算結果によると、窒素に関する環境問題に伴う社会的費用は、窒素の施肥を通じて食料生産から得られる収益のおよそ 2 倍である^[注 16]。
- アメリカ合衆国農務省の調査によれば、合衆国内での飲用水道からの硝酸除去コストは年間 48 億ドルを超え、そのうち農業に起因するものは年間約 17 億ドルと推計される。排出源からの排水中の硝酸濃度を 1% 減らすと、合衆国の水処理コストを年間 1 億 2000 万ドル減らせると指摘している (Ribaudo ほか, 2011)。
- 世界規模の見積もりはまだ不確実であるが、沿岸海洋の窒素とリンによる汚染による漁業への影響を含めた世界の生態系サービスの損失が世界で年あたり 2 千億ドルに達するという試算もある (Sutton ほか, 2012)。

第 4 期科学技術基本計画では、「科学技術イノベーション」とは、「科学的な発見や発明等による新たな知識を基にした知的・文化的価値の創造と、それらの知識を発展させて経済的、社会的・公共的価値の創造に結びつける革新」と定義されている。持続的窒素循環研究開発イニシアティブは、人間社会を支える食料生産と環境の持続性という社会経済的・公共的価値の創造をめざす科学技術イノベーションのもととなる技術的オプションを提供するものである。特に普及の見込まれる技術的オプションについては、ステークホルダー有志の参加した社会実験により効果を検証し、その知見を広く国内外のステークホルダーに向けて提供することによって、イノベーションを促進する。

なお、このイノベーションは産業構造の変化ももたらすであろう。例えば窒素利用効率

[注 16] ヨーロッパ窒素アセスメント報告 (Sutton ほか, 2011) の政策決定者向け要約第 52 段落 (xxxi ページ) によると、前者が 200-1500 億ユーロ、後者が 100-1000 億ユーロと見積もられている。

のよい肥料や作物品種、広く普及可能な窒素循環計測機器などを作る産業が成長することが期待される。特に作物品種の開発は、国際的競争の観点からも重要と考えられる^[注17]。

本研究開発イニシアティブは、窒素循環の国際的なアセスメントの基礎となることも意図している。それによって、国際的な政策決定を、科学的助言に裏づけられたものに行うことができる。日本がアセスメントの根拠となる研究を推進することによって、国際的な合意において日本の国益を保つことができ、また交渉の際の優位性を高めることができる。特に今後窒素フットプリント等の負荷指標に基づく規制・課税等が提案される可能性があり、その場合は指標の国際標準化策定に積極的に関与する必要が生じるであろう^[注18]。

2-3. 科学技術上の効果

この研究開発イニシアティブを実施することによって、東アジア、流域圏、農場のそれぞれのスケールにおいて、窒素循環の実態とメカニズムが解明されるとともに、環境負荷軽減を可能にする対策技術の開発とその効果の評価が行われる。

また、スケールを超えて持続的窒素循環という課題を共有する研究者コミュニティが形成され、対象を解明する観察型科学と対策を設計する構成型科学が密接に結びついた形で発達する。さらに大きな視点では、全地球から微生物までの多様なスケールが複合した物質の流れに注目した自然環境の理解の進展が期待できる。

窒素循環の実態とメカニズムを解明する科学に関しては、次のような進展が期待される。

- 各スケールでの観測・モニタリング技術が開発される。これには、例えば微生物群集中の各個体の窒素代謝動態を可視化する技術、窒素を含む化学種ごとに窒素・酸素・炭素等の同位体を分析する技術などの、主に試験研究機関で使われる精密な計測技術も含み、また、途上国の地方行政・農業者等に広く普及可能でそれなりの精度が保証されたモニタリング観測技術も含む。
- 観測・モニタリングおよび社会統計などの基礎データに裏づけられたモデルが構築され、それを使って対策技術の効果を含めて将来の窒素循環に関する見通しを得るシミュレーションを行えるような、アセスメントの基盤が構築される。
- 窒素循環のプロセスに関する理解が深まる。例えば、土壤に供給される反応性窒素の供給源を肥料起源・大気起源などに分離して把握することや、硝化菌・脱窒菌・アナモックス菌それぞれの窒素代謝の理解などが含まれる。
- 炭素循環研究と連携し、気候変動予測に必要となる窒素に関するデータを提供する。

対策を構成する科学技術に関しては、各スケールで対策に適用可能な技術的オプションが得られる。例えば次のようなものが開発されることが期待される。

- 東アジアの実情に合った窒素フットプリント指標。
- エネルギー資源節約型で衛生的弊害のない人・家畜排泄物の肥料化技術。

[注17] 例えば、アメリカ合衆国の大手種苗会社である DuPont (事業名 Pioneer)、Syngenta、Monsanto は、トウモロコシの品種改良に関する主要な目標形質に「窒素利用効率」を挙げており、いずれも 2010 年現在、候補遺伝子の絞り込み・最適化、試験用の作物品種への形質転換、品種の選抜などを推進する第 1 フェーズにあった (CRDS, 2010b)。

[注18] 窒素フットプリントと類似の概念である水フットプリントについてはすでにヨーロッパ主導で国際標準化の動きがあり、日本の研究者も対応を迫られている (沖, 2012)。水フットプリントは財の生産に使用された水の量を集計したものであり、もしこれに基づく規制を行うと、水を多く使用しながらも環境に不可逆な負荷を与えない生産活動まで罰するものになるという難点もある。

- 窒素利用効率のよい作物品種。
- 作物に利用される効率が高く、硝酸イオン流出や N_2O 発生が少ない肥料。
- 広く普及可能な窒素循環計測機器。

3. 具体的な研究開発課題

本研究開発イニシアティブでは、対策技術の効果を評価して改善につなげるループを含む研究プロジェクトを、(1)東アジア、(2)流域圏、(3)農場の3つの空間スケールで推進するとともに、(4)それらに貢献する共通基礎研究を推進する。

なお、その背景として、持続的窒素循環という課題を共有する開かれた研究開発コミュニティを育成することも必要である。これについては推進方法とあわせて4-1節で述べる。

また本研究開発イニシアティブは、国際アセスメント等を通じて国際的政策決定に対して科学的助言の役割を担うことも意図している。これについては4-2節で述べる。

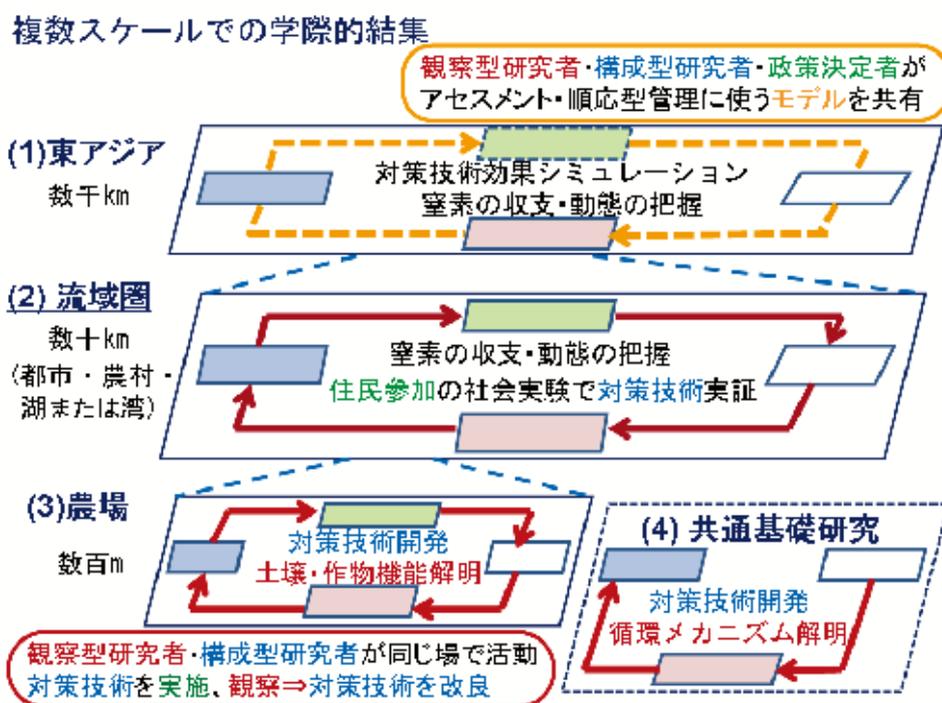


図7. 持続的窒素循環研究開発イニシアティブにおける複数スケールでの学際的結集。小四角形は図1の(白)社会・自然、(赤)観察型研究者、(青)構成型研究者、(緑)行動者に対応。

(1) 東アジア域窒素循環研究

東アジアスケールの窒素循環を1年以下の刻みで数十年の時間変化を含めて扱えるプロセスモデルを開発することを核として、次のような研究を行う。

- 東アジアの観測値や社会統計などのデータを収集し、収支解析を行う。その過程でデータの質の評価を行う。
- モデルによる現在・近過去のシミュレーションを観測に基づく収支解析と比較し、モデルを評価する。また、直接観測困難な量の推定を行う。
- これまでの窒素循環とその変化の原因となりうる自然・社会諸要因の時空間データを整備する。そして、モデルで再現型実験や感度実験を行い、これらのデータと比較して、技術や政策が窒素循環の持続性に及ぼした効果を検討する。
- モデルを複数の将来シナリオに適用して予測型シミュレーションを行う。シナリオと

しては特定の対策技術が広く普及した場合としない場合を含め、対策技術普及の効果についての見通しを持つ。また人口や気候変動などの外部要因の効果についての見通しも持つ。

- 世界各地で開発されているプロセスモデルの研究者間の知見の共有を進める。その内には同一条件による相互比較実験と、モデルの背後に想定されたシステムの違いの考察を含む。
- モデルで得られた結果に基づき、政策決定や各生産者・消費者の意思決定を助ける指標（例えば窒素フットプリント）を提供する。

(2) 流域圏窒素循環研究

数十キロメートル規模の、都市と農村を含む地域の水を集めて湾あるいは湖に流入する河川の流域を選定し、その地上・地下・水域を含む領域にある窒素の質量の変化と出入りに注目して、それを規定するプロセス群を統合的に把握する。流域圏を採用するのは、陸域の窒素循環のうちでは水に伴って流れる過程が重要であり、農地等の分散した排出源からの反応性窒素も多くは河川の流路網に従って集まるからである（和田，2009）。また生態系に関する研究でも流域圏を単位とすることが提言されている（JST CRDS, 2010）。本研究は次のような活動を含む。

- 対象地域の窒素について、質量保存の法則を基礎として収支の枠組みを定式化し、その各項目およびそれを変化させる諸要因を、河川、上下水道、地下水、大気とのやりとり、商品や廃棄物の輸送などを含めて把握する。そのために計測を強化する。特に河川水の各種反応性窒素の濃度を水の流量とともに連続観測することによって河川による窒素輸送を精度よく把握する。また、既存の環境モニタリング記録および社会統計を収集活用する。直接の観測値が得られない項目も収支解析によって推定する。
- 産業の発展や都市開発などに伴う窒素循環の変化を解析し、窒素循環に影響を及ぼす社会要因の解明を進める。また、行政施策（下水道設備、環境規制などを含む）による窒素循環の変化を把握し、施策の効果を評価して、次の政策決定への助言材料を提供する。
- 流域の一部で、地方自治体および住民（農業者・消費者等）の協力を得て、住民が自分の窒素循環への影響を知ることによって行動がどう変わり窒素循環がどう変わるかに関する社会実験を行う。
- 対象流域圏とその他のアジアの流域圏の窒素循環に関する状況を比較し、対象流域圏で開発された対策技術を他の流域圏の問題解決に役立てるための検討を行う。
- (1)のモデル開発に対して、基礎となる自然・社会プロセスの知見を提供する。

(3) 農場窒素循環研究

数百メートル規模の、詳しい計測と保守管理が可能な農地を含む実験農場を選定して、次のような要素を含むチーム研究を行う。

- 詳細な観察や実験を行なって、作物・土壌系の窒素循環とその中で働いている土壌微生物等の各要素の機能を明らかにする。
- 施肥方法の変更や新品種の利用などの窒素循環の対策技術の実験を行い、窒素循環の変化を精密に計測し、対策技術の効果を評価する。

- 計測技術の研究開発者が参加し、土壌・植物系の窒素収支およびその状態変化を把握する方法の開発と実地試験を行う。このうちには、科学研究で使われる精密な計測技術とアジア諸国の農業者などに普及可能な簡易な計測技術が含まれる。
- (1)のモデル開発に対して、基礎となる素過程のパラメータを提供する。

(4) 共通基礎研究

(1) (2) (3)のプロジェクトに貢献する窒素循環のメカニズムの解明や対策技術の開発の研究を統合的に推進する。具体的課題として次のようなものがあげられる。

- 窒素循環にかかわるプロセスの解明
 - 土壌・水中等の微生物群集の窒素代謝、その炭素等の他元素の代謝との連関
 - 植物の窒素代謝、その二酸化炭素・水などの条件による違い
 - 土壌・地下水水文過程での窒素のふるまい
 - 大気による反応性窒素の輸送と沈着
- 農業で窒素肥料を最大限有効に利用し環境負荷を減らすための技術
 - 施肥、水管理、生物間相互作用の利用等の農業実践の手法開発
 - 適度な速さで作物に吸収され高価でない肥料の開発（化学肥料の遅効化、堆肥の即効化、メタン発酵消化液の活用等を含む）
 - 窒素肥料利用効率の高い作物の育種（ゲノム育種、特に既存の作物・野生種の遺伝子と形質の対応のサーベイに基づく選抜を含む）
 - 化石燃料を使わない窒素固定（生物による固定と、再生可能エネルギーによる合成 [Box 5 も参照] とを含む）
- 人や家畜の排泄物を含む固体廃棄物や排水の中の窒素を、衛生上の弊害なしにリサイクルするか、あるいは N_2 に脱窒する技術（エネルギーコストが低く多地域への適応が可能なものが求められる）
 - コンポスト化・液肥化の高効率化とその高度有効利用技術
 - アナモックス反応利用など、低エネルギー消費の新規技術の開発
- 社会技術
 - 農村の農地・家畜廃物・生活排水等の窒素排出の計測（「見える化」）を促し、さらに排出抑制を促すようなインセンティブ策
 - 食料・飼料等に伴う窒素フットプリントの東アジアの実態に合い実用的で国際標準となりうる定式化
- 計測技術
 - 大気中や水中の反応性窒素の各種分子・イオンの濃度や流量を連続観測する技術とその野外モニタリングに適した実装
 - アジアの農業者等に広く普及可能な反応性窒素計測技術の実装
 - 窒素・酸素・水素等を含む分子の各元素の安定同位体比を測定する技術とその野外モニタリングに適した実装
 - 土壌微生物群集を構成する微生物個体のスケールで反応性窒素の各種分子・イオンの分布を把握する技術

Box 5. アンモニアは、再生可能エネルギー貯蔵・輸送媒体としても注目されている。

再生可能エネルギーは化石燃料や原子力のように集中して得られず、特に太陽光と風力の供給は時間的に間欠的である。供給と需要の時間的・空間的なギャップを埋めるには、エネルギーの貯蔵・輸送が必要である。特に季節を越えた貯蔵や海を越えた輸送には、電力や力学的エネルギーをいったん化学的エネルギーに変え、需要があるときに需要があるところで再び電力や動力を取り出す方法が適切である。このための媒体の候補としてアンモニアがあげられる。再生可能エネルギーを使って大気中の窒素を固定してアンモニアを合成する。燃焼または燃料電池でエネルギーを取り出す。輸送に関しては、アメリカ合衆国で肥料として使われる液体アンモニアを輸送するパイプラインが1970年代から数千キロメートルの規模で使われていることは有利な実績である。変動する入力エネルギーをむだなく使って合成を行うこと、燃焼の際に反応性窒素を発生せず完全に窒素分子にすることなどの技術課題が残る。この技術の開発が成功し普及した場合、窒素肥料の原料のアンモニアもここから分岐して供給されることになるであろう。

4. 研究開発の推進方法および時間軸

4-1. 研究開発の推進方法

本研究イニシアティブの推進体制は、3章で述べた3つのプロジェクトおよび共通基礎研究と、窒素循環研究コミュニティの形成、データアーカイブの運営を含めた、府省連携体制（図8）の下で推進すべきである。

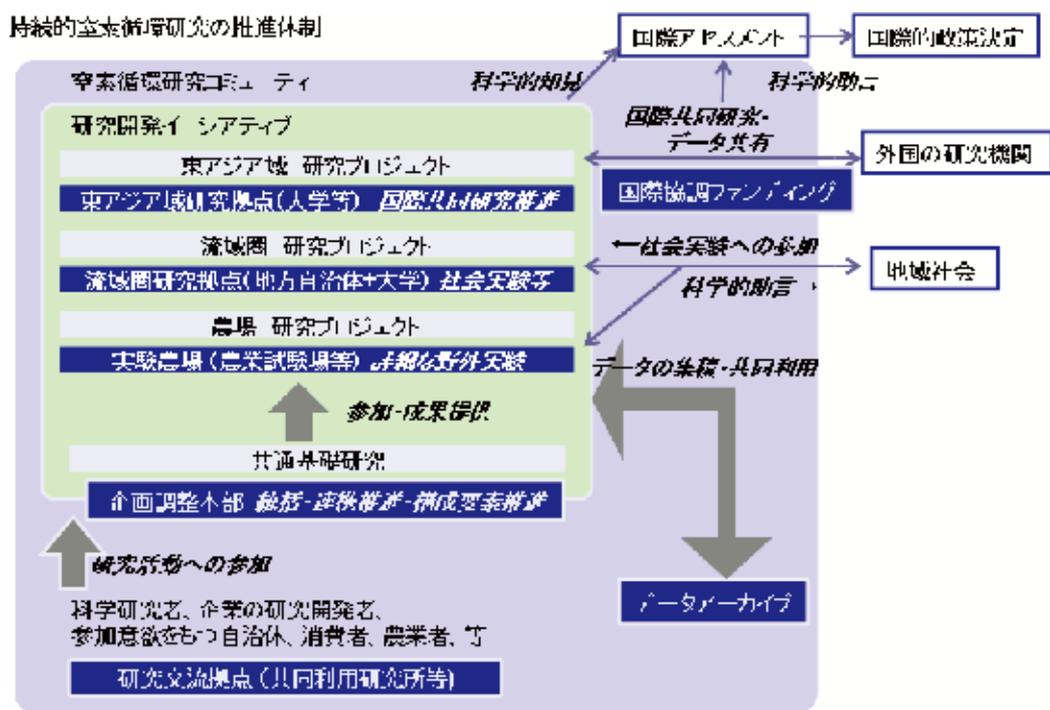


図8. 持続的窒素循環研究開発イニシアティブの推進体制。

持続的窒素循環研究コミュニティ形成

本研究開発イニシアティブの前提として、専門分野を越えて持続的窒素循環という課題を共有する研究コミュニティの形成が必要である。具体的な研究開発を本格的に開始する前に、まず、コミュニティ形成の推進を開始する。

持続的窒素循環研究には、通常の意味での科学研究者と、技術の事業化をめざす企業の研究開発者のほかに、社会での生産活動・消費活動に対する助言者として働いている専門家の関与が必要である。日本の農業分野では都道府県の農業技術センターの専門職員等がこれにあたる。また、社会実験の部分では窒素循環の課題解決に意欲をもつ自治体・農業者・消費者等の参画も必要となる。このように、狭い意味の研究者ではないが研究活動に積極的に参加する人々も研究コミュニティに含める。

対策技術が社会に普及していく際には、もっと多くのステークホルダーが関与することになり、その組織づくりも必要となるであろうが、そこまでは研究コミュニティ形成に含めない。しかし、研究コミュニティとしては、より広い社会の要請に応える必要がある。

研究コミュニティ内の人々が出会い知見を共有するための世話役をする拠点は、コミュニティ外との対話窓口の働きももつようにする。

研究コミュニティ形成と研究プロジェクト推進との関係

公的資金で推進される研究プロジェクトは、プロジェクト推進主体によって選考されたメンバーで構成される。他方、研究コミュニティは、プロジェクトに参画する研究者だけでなく、プロジェクトの計画からもれた研究者やプロジェクト発足後に関心をもった研究者も含むものである必要がある。コミュニティは定期的に知見の交換の機会をもち、その中でプロジェクトはその研究の進展を報告しそれに関する対話を行うようにする。

府省連携体制

持続的窒素循環研究は、単独の研究資金提供でまかなえる規模を越える。農林水産省・環境省・文部科学省・地方自治体・その他の主体の研究開発事業を合わせて共通の目的を達成する必要がある。また、後述のように国際協力を必要とするが、国際協力事業の枠におさめることも困難であり、国際協力事業と国内の研究開発事業とを組み合わせるべきであろう。複数の事業が相互に補い合うような構造を構築し維持する必要がある。

このためには、例えばアメリカ合衆国の Global Change Research Program^[注 19]で行われているように、あらかじめ府省間で整合性のあるように計画を調整してから各府省が概算要求するような進めかたが望ましい。現在の日本の体制では、科学技術基本計画のもとで総合科学技術会議が毎年度アクションプランを作成しそれを受けて各府省が具体的施策の概算要求をするしくみがある。科学技術基本計画の重点対象の一つである「グリーンイノベーション」に関する重点的取組の一つとして持続的窒素循環研究が取り上げられることが望ましい。その際、日本全体の課題解決の観点から概算要求前に実質的に府省間の調整が行われることが肝要である。

データアーカイブ

持続的窒素循環研究は、参加する各研究者が、その属する研究機関内あるいは研究契約を結んだプロジェクト内ばかりでなく、研究開発イニシアティブ全体にわたって共有することによって、価値の高い成果を出すことができる。必ずしも研究に使用されたすべてのデータを公開することを求めるわけではないが、研究成果から根拠にさかのぼるトレイサビリティの確保の面からも、研究コミュニティの開放的性格の確保の面からも、主要なデータは一般に公開されることが望ましい。特に国際アセスメントの基礎となるデータは国際的に共有される世界公共財となる必要がある。このため、研究開発イニシアティブ内のデータ共有、研究開発イニシアティブ外に向けたデータ発信、研究プロジェクト終了後に向けたデータ保存の機能を兼ね備えたデータアーカイブを構築する。データアーカイブは、プロジェクト終了後もデータを散逸させず保守できる機関に置き、さらにプロジェクト期間中はその分担機関としてプロジェクト予算から経費が配分されるようにする。

データが正しく使われるためには、それが何についてのどのようなにして得られた情報であるかの知識が必要である。その要点を機械可読な形で標準化された形で整理した「メタデータ」を整備する。それとともに人間の言語による記述も整備する。各学問分野や行政

[注 19] <http://www.globalchange.gov>

部署で作られたデータの説明はそのままでは他分野の人には理解困難なことが多いので再表現が必要になることもある。国際的データ交換・提供のためには言語間翻訳も必要となる。また、データ利用者が蓄積していくデータの品質や利用目的への適合性に関する知識も共有されることが望ましい。これらの知識を収集・整理・保持・提供するためには専門性をもった職員を育成しその将来キャリアも考えて雇用する必要がある。この専門性は図書館司書や博物館学芸員に近く、データベース等の情報処理技術と対象となる持続的窒素循環研究とに関する準専門家的理解をも含む。

拠点群の整備

持続的窒素循環研究開発イニシアティブの推進のためには、いくつかの拠点の整備が必要である。ここでは拠点のもつべき機能ごとに項目を立てて述べる。同じ機関が複数の拠点機能を兼ねることもありうる。

- 企画調整本部：府省にまたがる予算の申請や執行の調整、政策決定とのかかわりかたの企画をする。共通基礎研究の統括・連携推進も行う。幹事となる府省の信頼を得た研究機関の企画部門または研究推進機関が担当するのがよい。科学と政策にわたるビジョンをもつ総括リーダーを擁する態勢を整える。
- 東アジア域研究拠点：東アジア規模の共同研究を推進し、世界規模の共同研究の中での東アジアの要となる。主導的研究者を擁し国際共同研究を支援する能力をもった研究機関が担当するのがよい。
- 流域圏研究拠点：社会データ収集や社会実験を含む流域圏研究の世話役となる。社会実験に意欲をもつ自治体と、そこと協力関係にある大学とが共同で担当するのがよい。
- 実験農場：管理された野外の実験地で、窒素循環の観察と対策技術の構成に関する多様な実験を行う。研究実績のある実験農場・農業試験場等が適切であろう。ただし、それを保有する機関以外からも研究者の参加を受け入れる態勢を整える必要がある。
- 研究交流拠点：研究プロジェクト群および研究コミュニティの両方を支える集会や情報網の世話役となる。国民的知識共有のための情報発信も率先して行う。既存の国立大学共同利用研究所の共同利用機能に窒素循環の課題を追加する形、あるいは窒素循環を主要な課題に含む研究機関の研究交流機能を強化する形が考えられる。複数機関で分担してもよい。
- データアーカイブ：データの研究開発イニシアティブ内共有、対外公開、長期保存を行う。複数機関で分担してもよいがメタデータ共通化などの相互連携が必要である。そのうち中核となる機関は、計算機システムや通信ネットワークの情報基盤とその利用者支援体制が整っており、さらに、データ専門職員を将来のキャリアパスも考慮して雇うことができる場所に置く。

他の事業の拠点との連携

地球観測のうち気候変動分野の連携拠点として、国立環境研究所に地球温暖化観測推進事務局が置かれている。その課題には炭素循環が含まれている。本研究開発イニシアティブの拠点群はこことも連携関係をもつ。

4-2. 国際研究協力体制の必要性

本研究開発イニシアティブには、国際共同研究は必須である。特に「東アジア域窒素循環研究」については、東アジア規模の研究交流の場を構築し、また、世界規模のモデル相互比較などの活動に東アジアがヨーロッパ・北アメリカと対等に参加できる体制を整える必要がある。

学術研究の国際協力としては、ICSU（国際科学会議）の傘下の地球環境関係の国際研究プログラムが Future Earth の名のもとに再編成されようとしているので（付録2の「関連する国際研究プログラム」参照）、学術会議の環境学委員会等を通じてこれと連携していくべきである。また International Nitrogen Initiative にもより積極的に参加していくべきである。

ファンディング面では、国内で研究資金をまかなえる国と援助を必要とする国のどちらも参加できるように体制を整える必要がある。Belmont Forum や e-Asia JRP（付録2の「国際ファンディング体制の動き」参照）など、複数の国にまたがる研究者からの提案を公募して採択されたら各国の研究資金提供機関が自国の研究者の分について支援するような国際協調ファンディングのしくみが発達してきており、窒素循環の課題にも活用するのが適切と思われる。しかし、資金あるいは資金提供体制の整備が不足している国もあるので、APN や SATREPS（付録2の「日本の国際的取り組み」参照）など、日本からの資金が途上国に提供されるようなしくみも併用する必要がある。関連する個別課題の二国間共同研究は従来の枠組みで進めながら研究コミュニティの連携に加わるようにする。

本研究開発イニシアティブは、国際アセスメント等を通して、世界規模での政策決定への助言を提供することも意図している。そこで、科学技術外交の側面からの配慮も必要となる。国境を越えた環境保全施策に向けた国際的合意のためには、参加各国がともに信頼できるデータ・モデルおよびそれらに基づく科学的知見を共有することが必要である〔Box 1の広域大気汚染の事例参照〕（石井 2005; 米本 2011）。それを支援する体制を整える必要がある。

環境にかかわるデータに関しては、基礎科学者は無条件公開が望ましいと考えることが多いが、現実には各国の行政機関が取得したデータの利用には制限があることが多い。アクセス制限が国益にかなうという考え、データを経済財とみなす政策、行政のセクショナリズム、提供作業の費用負担などさまざまな障壁がある。各国それぞれの事情を理解しながら、公開あるいは共有が共通利益になることを理解してもらい働きを粘り強く続ける必要がある。

東アジアの窒素循環の問題解決のためには、多くの地域でそれぞれ行政・産業・住民活動等の動きが起こり、そこに適切な科学・技術の知見が提供される必要がある。この研究開発活動で得られた農業・水利用等の技術や環境モニタリング技術は、東アジアさらには世界の多くの国に移転され、その運用は現地の人々によって持続的にされるようになる必要がある。その際には現地の自然環境や社会環境に適合させるための改変が必要になることもある。日本は技術の導入・改良をめざす多くの国からの研修者を受け入れる体制を整えるべきである。これは国内の研修体制および各スケールの研究拠点とも連携して運営すべきである。

4-3. 時間軸に関する考察

科学的知見獲得から社会的効果までの時間差

環境問題とその対策の歴史に関してはたくさんの文献があるにもかかわらず、科学的知見の獲得から、技術が構成され、それが普及し、問題が解決に向かう過程にどのようなステップがあり、どのくらいの年月がかかったかに関する知識はあまりよく整理されていないようである。これを明らかにすること自体、広い意味で持続的窒素循環研究に関連する歴史学・社会科学的課題であろう。

環境の窒素負荷軽減に寄与する技術の開発の例として、水処理向けの生物学的窒素処理技術の開発（角野，2006）について見ると、有用細菌を固定化する技術の開発に着手したのが1982年、ポリエチレングリコールプレポリマーによる硝化細菌固定化技術が開発されたのが1988年である。構成型の応用研究というフェーズにかかる時間の例とみることができであろう。

技術が社会に普及していく時間スケールの例として、イノベーション論の古典の一つであるRogersの「イノベーションの普及」（Rodgers, 2007, 43 ページ, 142 ページ）があげている農業技術の農民への普及の例では、1930-40年代の雑種トウモロコシの普及では平均9年、1950年代の除草剤の普及では平均2年であった。（なお、同じ本（161 ページ）には普及に失敗した例として1990年代の土壌窒素検査があげられている。農民の農事暦をよく理解しない研究者が策定した実施計画に無理があった。）

本研究開発イニシアティブでは、新しい知見に基づく技術開発と、既存の知見に基づく技術の社会実験とをそれぞれ生かしながら、段階的に移行しつつ進める形をとるのが適当であろう。

研究推進の継続性と順応型管理

窒素循環の持続可能性を高めるといふ社会的課題の解決には、世界の人為起源窒素変化が増加してきた1950年代以来の60年間（図5参照）に匹敵する時間をかけて取り組む必要がある。研究コミュニティは数十年の継続性をもつべきである。他方、窒素循環の実態やメカニズムに関する現在の知見の不確かさや、世界の農業・貿易を含む産業に関する不確かさのもとで、数十年にわたる研究計画をたてることは困難である。研究プロジェクトとして詳しい計画をたて一定の執行体制で推進される期間は、最近の多くの国の研究事業と同様、5年から8年程度が適当であろう。

したがって、研究推進体制も順応型管理の考えかたで進めるべきである。一つの研究事業は5年から8年程度の時限とするが、類似の事業を複数期継続することを政策的に予定しておく。もちろん漫然と継続するのではなく、每期、研究の進展や社会情勢の変化を考慮して、次期の目標を設定し、内容を入れかえるようにする。

予算執行の過程でも、新しい知見や、国際的情勢の変化、強化した研究の場である流域圏や実験農場の事情の変化などにより、研究計画を調整する必要が生じうる。府省間の調整機能は予算申請時に限らず常時動けるように態勢を整えておく。例えば、本研究イニシアティブ全体を統括するガバニングボードを設置することもその一つの方法である。

具体的な研究の開始までの準備期間

具体的な研究開発プログラムを開始する前に、少なくとも1年間の準備期間が必要である。この間に、関係しうる研究者に周知し、研究コミュニティの形成を始める。目標の明確化と共有のための一連のワークショップ等を開催する。その過程で、研究プロジェクトとして推進すべき内容について合意形成を図る。各研究プロジェクトの基本的要件が固まった段階で、拠点群の候補を募集し、選考を行う。決定された拠点に合わせて研究推進計画を調整する。研究プロジェクトのメンバーを一部は指名により残りは公募によって決定する。

農場実験は、拠点となる実験農場に他府省資金による研究者を受け入れるための制度整備が必要なので、他のプロジェクトよりも長めの準備期間が必要になるかもしれない。

4-4. 研究開発推進上の留意点

政策決定・意思決定との関連

持続的窒素循環研究開発イニシアティブの社会貢献の一つは、政策決定に向けて科学的知見を提供する助言者を介してのものである。特に、国際的な規制を伴う条約に向けては、科学的知見を集約する国際アセスメントを介してかかわることになるであろう。一国の行政とのかかわりや、地域社会とのかかわりの形は、そのつど事情に応じて決まることになるであろうが、科学的助言の信頼性と政策形成の正当性が確保されるよう、原則を明確にして臨むべきである（JST CRDS, 2012）。

持続的窒素循環の目標の設定

本研究開発イニシアティブの研究が進展して、反応性窒素の排出量と環境中の濃度の関連の理解が進んでも、不確かさを完全になくすことはできないであろう。排出量を制御するルールは順応型管理の考えに基づいて改訂を続ける必要があるであろう。また、持続的窒素循環という目標は、必ずしも窒素循環を人間活動の影響がなかった場合にできる限り近づけることではない。食料生産のため、農地に肥料を入れることは欠かせないであろう。また、公共水域で水産業が成り立っている場合、魚などの水産資源の維持に望ましい反応性窒素の濃度は、その水域の自然状態とは異なるかもしれない。このような場合、水産資源の維持をめざす人々と自然生態系の復元をめざす人々を含めたステークホルダー間での合意形成を図る努力が必要である。これには産官学民の積極的な参画が必要となる。

技術の副作用に関するアセスメント

窒素環境負荷軽減対策として開発された（あるいは開発されつつある）技術が他の面で環境あるいは社会にリスクをもたらす可能性に注意が必要である。特に、遺伝子組み換え生物を使う技術が提案される可能性があるが、その場合は、実用化に至る前に、組み換えられた遺伝子をもつ生物が野外に出た際の生態系・生物多様性への影響のアセスメントを充分に行う必要がある。

他の技術が窒素循環に及ぼす影響のアセスメント

他の社会的期待にこたえるために開発された技術が窒素循環に影響を及ぼすことが予想される場合、その評価を行い、社会に示すことも本研究開発イニシアティブの任務となるであろう。

例えば、バイオマス燃料の利用は、原料作物の栽培地で土壌中の窒素不足あるいは施肥に伴う窒素循環改変を、また燃料への加工地で環境への窒素負荷をもたらす可能性がある。施肥された土壌からの大気への N_2O 排出による温室効果強化に限っても、2-1 節の「持続的窒素循環をめざす研究開発にかかわる問題点」の項で述べたように不確かさの大きい N_2O 排出係数の大きめの見積もりに従えば、化石燃料をバイオマス燃料で代替したことによる CO_2 排出削減の効果を上回るおそれがある (Crutzen ほか 2008; 林 2011)。

また、エネルギー貯蔵・輸送媒体としてのアンモニアの利用 (Box 5) の普及を考える際には、アンモニアその他の反応性窒素が環境にもれることによるさまざまな環境負荷の評価が不可欠である。近年大型自動車の排気ガス浄化などで用いられているアンモニア脱硝や尿素脱硝においても、未反応アンモニアおよび反応性窒素が一部大気に放出されており、これらについても環境負荷の評価が必要と考えられる。

研究プロジェクトの継続性

4-3 節で述べたように、本研究開発イニシアティブは時限の研究プロジェクトをつなぐ形で推進されると想定される。このような体制で、第 1 期と第 2 期が国の事業として別ものと認識されていると、往々にして第 1 期が完全に終わったあとに第 2 期の実施が正式決定されるので、研究従事者（特にデータアーカイブ専門家や実験技術者）の雇用が中断したり、野外実験地の維持が困難になったりする。評価を計画に反映させるという観点からは理想的ではないが、各期の最終年度の初めごろには、研究従事者は次の職を探し始めるべきか、野外実験地管理者は設備撤収の準備を始めるべきかを判断できるように、次期計画の大筋、特に計画の各機関分担部分がそれぞれ次期に継続するかしないかが決まっているようにするべきである。

知見の世界公共財化と知的財産化

本研究開発イニシアティブは世界の人間社会の持続可能性を高めることを目的としており、特に国際的政策決定に使われる知見は透明性を必要とする。したがって本研究開発イニシアティブで得られる知見のうち、窒素循環に関する観察的知見は、知的公共財としてだれでもアクセスできることを原則とする。論文等の具体的著作物について著作権が設定されるのは当然であるが、それはそこに書かれた知識内容の私有を意味しない。

構成された技術に関する知見のうちで、特に民間部門の研究者による成果は、特許などの知的私有財とするのが適切である場合もある。(ただし、ライセンス供与などにより、技術は途上国でも活用されることが期待される。) 公共部門による成果も、他者による私有財産化への対抗のため、特許などの形をとったうえでライセンスを公開するのがよいこともあるかもしれない。民間部門と公共部門の両方がかかわる場合や、国際共同研究で複数の国の当事者がかかわる場合もあるので、研究プロジェクト開始にあたって、知的財産の扱いに関するルールを定め、参加者間で了解を得ておく必要がある。

データマネジメント

本研究開発イニシアティブで得られたデータも、知的公共財として世界に公開することが望ましい。特に国際的政策決定に使われるデータは公開が必要である。また、このデータは本研究開発イニシアティブ終了後も持続して利用可能であってほしい。このために、データアーカイブを本研究開発イニシアティブ終了後も継続する機関に置くとともに、他のデータマネジメント活動と連携する。

すべてのデータが公開に適しているわけではない。社会データの個人情報や、自然科学的計測値であっても位置座標等から関係する個人や企業が特定されるものは、アクセスを制限すべき場合もある。データアーカイブはこのような場合に備えてメンバー限定のデータ共有ができる態勢も整える。

研究過程で得られたデータについては、データ取得者がそれを使った知見を研究業績として示すまで公開を猶予してほしいという要請にも正当性が認められる。しかし、この猶予は無期限とせず、あらかじめ決めた条件によって取得後一定期間内にはデータアーカイブに提供してもらうようにする。その際にデータの品質チェックとメタデータの記載を行うことも取り決めておく。

地球環境に関する他のデータマネジメント活動で特に重要なのは、国際科学会議(ICSU)の世界科学データシステム(World Data System, WDS)^[注20]である。これは国際地球観測年(IGY, 1957-1958)から始まった地球物理データに関するWorld Data Center(s)の事業を引き継いで最近発足したもので、世界に分散するデータセンターからなるネットワークであり、日本の情報通信研究機構(NICT)が国際プログラムオフィスを引き受けている。本研究開発イニシアティブのデータアーカイブは、WDSとメタデータ標準などをなるべく共通化し、また相互の必要に応じてデータを交換する。

また、炭素循環に関わる大気・陸面間のCO₂交換量などの実験観測のデータをまとめたAsiaFlux(国立環境研究所ほか共同で運営)^[注21]や、長期陸域生態学研究サイトのネットワークJaLTER^[注22]とも連携する。

観測データの品質確保

持続的窒素循環研究開発イニシアティブで使われる観測データは、研究者によるもののほかに、環境モニタリングや農林水産業政策などの行政機関によるものが多く、また観測を業務としない企業や個人がとっているものも含まれる。その観測機器の保守やデータ取得の技術水準はまちまちである。特に日本の自治体の環境モニタリングは最近予算削減に伴って品質が低下する傾向が見られることがある。本研究開発イニシアティブにとっても、またそれがめざす社会のイノベーションにとっても、観測データの品質の改善が必要である。このため、本研究開発イニシアティブの内で、国内および外国の、研究者、社会実験参加者および行政機関の観測担当者をおもな相手として、観測技術の研修を行う。また、より広い範囲の人に向けて、観測データの利用に関する研修も行う。

国民的基礎知識の涵養

国民の間で、窒素循環とその環境負荷軽減の必要性および方策に関する基礎知識が、気

[注20] <http://www.icsu-wds.org>

[注21] <http://asiaflux.net>

[注22] <http://www.jalter.org>

候変動や生物多様性の問題の陰に隠れず、それらと適切に統合された形で共有され、政策決定や生産・消費行動に役立つようになる必要がある。本研究開発イニシアティブは、専門家の間や、社会実験参加者との間の知識共有の経験も生かして、広く国民が基礎知識を共有するためにも働く。

謝辞

本プロポーザルを作成するに至る過程で、極めて多くの方々のご教示とご協力を賜った。ワークショップでご講演いただいた方々、討論へ参加された方々、さらにはご参加いただきあるいはヒアリングに応じてくださった専門家の方々、資料を提供してくださった方々、学会等の情報を提供してくださった方々、これらの皆様の多様で広範な専門知識の提供なしには本プロポーザルは公表には至らなかった。CRDS 担当者一同、個々のお名前をここに記載できないことをお詫びするとともに、これらの方々から賜ったご厚情に心からの謝意を表する次第である。

付録1. 検討の経緯

スコープ検討班からチーム発足まで

CRDS では、2010 年度末の戦略スコープ検討の結果、「物質循環」に関する戦略プロポーザル作成チームの発足是非を検討する「戦略スコープ検討班」を 2011 年 4 月に発足させた。物質循環というテーマを「自然界の物質の動態（生物地球化学サイクル）」と「人間社会を中心とした物質の動態（マテリアル・フロー）」に大別してそれぞれ検討した。前者は、炭素、リン、窒素、水など、元素または分子の地球規模での循環系が対象となる。後者は、人間社会で利用される、バイオマス系資源、非金属鉱物系資源、金属系資源、化石系資源などのいわゆる 3R (Reduce, Reuse, Recycle) が対象となる。

上記の基礎調査等の結果に基づき CRDS 内で検討した結果、窒素循環をテーマとしたチームを発足させるべきとの結論に達し、2011 年 9 月 1 日に窒素循環に関するチームを発足、活動を開始した。

学会等の会合出席による情報収集

- 「土壌と環境」国際シンポジウム 2011 年 9 月 3 日、仙台（日中 JST-NSFC 事業関連）
- 植物学会シンポジウム「C/N バランスの研究を通して 植物 高 CO₂ 応答を読み解く」9 月 17 日、東京（科研費 新学術領域研究 関連）
- 環境省環境研究総合推進費 S7 シンポジウム「越境大気汚染への挑戦」10 月 28 日、東京
- MARCO 国際ワークショップ（農業環境技術研究所主催）「農業分野における温暖化緩和技術の開発」11 月 16-17 日、つくば
- JST 中国センター研究会「中国第 12 次 5 カ年計画環境分野の重点解説と日中水環境協力の総括」12 月 12 日、東京
- 流域圏シンポジウム（土木学会、水環境学会）「有機物・栄養塩動態」12 月 15 日、東京
- Belmont Forum 対応国内会合 10 月 21 日 東京、12 月 14 日 京都、12 月 19 日 東京
- Belmont Forum 会合傍聴 2012 年 1 月 18 日、京都
- 日中（JST-NSFC）シンポジウム「生物機能強化によるノンポイント汚染制御」1 月 30 日、小金井
- 水環境学会 3 月 14-16 日、東京
- 生態学会シンポジウム「東アジアの生物地球化学サイクル」3 月 19 日、大津
- Planet Under Pressure 会議 3 月 26-29 日、ロンドン
- MARCO シンポジウム（農業環境技術研究所主催）「モンスーンアジアにおける農業環境研究の課題と連携強化」9 月 25-27 日、つくば

専門家ヒアリング

- 小俣 達男（名古屋大学・生命農学研究科・教授）
- 劉 晨（名古屋大学・環境学研究科・准教授）
- 水落 元之（国立環境研・主任研究員）
- 間藤 徹（京都大学・農学研究科・教授）

- 新藤 純子（農業環境技術研究所・物質循環領域長）
- 林 健太郎（農業環境技術研究所・主任研究員）
- 小池 勲夫（琉球大・監事、CREST 海洋生物多様性総括）
- 大手 信人（東京大学・農学生命科学研究科・准教授）
- 秋元 肇（アジア大気汚染研究センター長）
- 角野 立夫（東洋大学・生命科学部・教授、元 日立プラントテクノロジー・主管研究長）
- 山室 真澄（東京大・新領域創成科学研究科・教授）
- 林 彬勲（産総研・安全科学研究部門・主任研究員）

ワークショップ開催

2012年3月23日（金）10:00～17:30 JST 東京本部別館 2階会議室 A-2

【1. 窒素循環の解明に関する研究開発課題】

- 新藤 純子（農環研）： 陸域
- 大手 信人（東大・農）： 森林・水・同位体
- 山室 真澄（東大・新領域）： 湖沼・海洋
- 秋元 肇（アジア大気汚染研究センター）： 大気

【2. 対策に関する研究開発課題】

- 間藤 徹（京大・農）： 作物・肥料
- 小俣 達男（名大・農）： 植物
- 水落 元之（国立環境研）： 水処理・水環境

【3. 対策の評価に関する研究開発課題】

- 林 健太郎（農環研）： 試験地での計測・統合解析
- 林 彬勲（産総研）： 広域モデル、リスク評価

【4. 総合討論】

- 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

ワークショップの討論

討論は結論を得ることを意図しなかったが、次のような議論が得られた。

- 窒素循環の研究で国という規模で重点的に推進すべき課題にはどのようなものがあるか？
 - ▶ 炭素循環に関しては温暖化関連の既成プロジェクトが動いており、リンの循環については大気が絡まず鉱物資源リサイクルという観点で整理できる。
 - ▶ 窒素循環に関しては（日本では）これまでのところ厳しいリスクが顕在化していない。
 - ▶ 現状を継続するとう危険になるという予測をし、予測に基づいて早めに対策を立てることが重要。
 - ▶ 日本ないしは東アジアで窒素循環関連の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。
 - ▶ 窒素飽和をどう証明するか。陸域生態系への影響や水域の富栄養化も重要と考える。
 - ▶ 海への窒素放出については影響が大きく、生態系の変化に影響を与える。
 - ▶ 生態系への影響はモニタリングが重要。

- ▶ 食糧をどう確保するのかを考える上で、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。
- ▶ 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・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リングすること、は重要。
- 科学的課題、特に国が重点を置くべき課題としてはどのようなものがあるか？
 1. モニタリング・観察型研究
 2. 対策（農業、水処理など）
 3. モデリング、評価。
- 個々の研究者が取り組むだけでは解決できない課題について。
 - ▶ 窒素肥料の生産における消費エネルギーを減らす手法。
 - ▶ 硝化菌の培養促進は工学的な視点からも重要。
 - ▶ メタン発酵は確立されているが後段のプロセスが未成熟でエネルギー多消費。
 - ▶ 環境面では、陸域での物質収支を明らかにすることが重要。
 - ▶ 海洋（水圏）での窒素循環と生態系への影響についても考える必要がある。
- 検討対象となる地域・範囲について。
 - ▶ 流域圏の検討はすでに東京湾、大阪湾、伊勢湾などについてある（例えば伊勢湾は文部科学省・JSTの科学技術システム改革事業の2006-2010年度課題）。
 - ▶ 数十 km オーダーの集水域が妥当。
 - ▶ 森林水文分野では数百平方 km オーダーが多い。
 - ▶ 土地利用ごとならば各数ヘクタールスケールで積算で考える。
 - ▶ スケール間をつなぐのはモデリングが重要。
 - ▶ ある地域の特性を反映したものをグローバルに考えることは難しい。
 - ▶ 日本や中国、タイなど典型的なポイントを重点的に考えることで対応可能。
- 国際ファンディングと、国内での取り組みについて。
 - ▶ EUには国を超えた組織の強みがある。
 - ▶ 日本の強みとしては、海に関する研究体制。海洋研究開発機構などの研究船がある。
 - ▶ 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。
 - ▶ LTER(長期陸域生態研究)やAsiaFluxなどの拠点間のネットワークを生かせないか。
 - ▶ 対象が国内だが、国立環境研に「環境GIS」というリンクサイトがある。
 - ▶ アジアのメガシティについて、日本のメガシティをモデルケースとして考えることが重要。
 - ▶ 中国とは最初からジョイントで進んでいくことが望ましい。
- 異分野連携と人材育成について
 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. 人材育成はどうか？（若手が伸びているか？）
 - ▶ コンサルティングを担当できる中堅研究者が重要。プログラムディレクター/プログラムオフィサーが必要。
 - ▶ この分野で若手が研究に飛び込んでくるが、出口の人材の受け皿が少ない。

- ▶ 文理融合の中で、特に交渉のための政策科学が重要。
- ▶ 政策科学と自然科学の分野の融合が必要。
- ▶ 評価委員などが厳しくプロジェクト進捗をモニタすることも重要。
- ▶ 科学に境界はないはずだが実質は科研費などの領域で切れている。
- ▶ ポストドクトラルフェローの先の進路が乏しい中で、博士課程に進む学生は少ない。
- ▶ 教員を増やして教育を手厚くすることも重要。
- ▶ 金の切れ目が縁の切れ目という状況を改善する必要がある。
- 学会などについて
 - ▶ わが国には AAAS のような総合学会がない。地球惑星科学連合が一番広い受け皿。
 - ▶ 土壌肥料学会や生態学会など個々の学会での議論を、より広くシェアする場が必要。
 - ▶ 生態、海洋、大気といった領域をまたぐ議論が重要。

付録2. 国内外の研究開発の状況

世界

- International Nitrogen Initiative (INI)。本文 2-1 節「国際的な状況」で述べた。
- European Nitrogen Assessment (ENA)。ヨーロッパの窒素循環の改変とその環境負荷軽減策を評価する科学的アセスメント。2007 年から 4 年間にわたって行われた。ここに述べる情報は主として Sutton ほか (2011) の 1.3 節による。
 - ▶ 中心となったのは European Science Foundation の Research Networking Program 「Nitrogen in Europe (NinE)」であった。NinE は窒素の過剰にかかわる 9 つの主要な環境問題に関する科学的知見を統合する活動をした。
 - ▶ 統合アセスメント手法の開発を含む窒素の環境影響と政策との相互作用の検討は、COST 729 Action 「Managing Nitrogen in the Atmosphere-Biosphere System in Europe」として行われた (COST は、European Cooperation in Science and Technology)。
 - ▶ 特に温室効果気体に対する窒素循環の働きについての研究は、EU の第 6 次 Framework Program の NitroEurope Integrated Project として行われた。
 - ▶ ENA は INI へのヨーロッパの貢献ともされている。
 - ▶ ENA は、長距離越境大気汚染条約 (CLRTAP)、国連気候変動枠組条約 (UNFCCC)、国連生物多様性条約 (CBD)、国際河川・国際湖沼の保護と利用に関するヘルシンキ条約、越境環境影響評価に関するエスポー条約、北大西洋と北海に関するオスロ・パリ条約、バルト海に関するヘルシンキ条約、地中海に関するバルセロナ条約などの国際条約を支援するように設計された。特に CLRTAP は反応性窒素に関するタスクフォース (TFRN) を組織し、ENA と政策決定者との間の橋渡しをした。
 - ▶ ENA は 2008-2009 年に 5 つの主要なワークショップを行い、それを基礎としてアセスメント報告書をまとめ、査読を経て Sutton ほか (2011) の本として出版した。
- Planet Under Pressure 会議^[注 23] 2012 年 3 月 26 日から 29 日まで、ロンドンで開かれた。IGBP・IHDP・DIVERSITAS・WCRP (下の「関連する国際研究プログラム」参照)、Belmont Forum (下の「国際ファンディング体制の動き」参照) 等が共催した。地球環境にかかわる科学者と研究推進機関が中心となって、政治家・実業家・環境活動家なども呼んだ。IGBP 等を再編成して Future Earth とする構想の旗揚げと、6 月の国連持続可能開発会議 (Rio+20) 向けに科学者のメッセージを出すことが意図されていた。
 - ▶ 窒素循環に関しては「Nitrogen: too much of a good thing」という分科会があった。この分科会では、ENA の中心でもあったイギリス Edinburgh 大学の Sutton 氏から全球規模の窒素循環アセスメントの構想、アメリカ合衆国 Virginia 大学の Leach 氏から窒素フットプリントの概念およびアメリカ合衆国とオランダについての計算例、ブラジリア大学の Busamante 氏からラテンアメリカの窒素循環に関する研究状況のレビュー、イギリス Rothamsted 農事試験場の Poulson 氏から中国の過剰施肥に関する報告 (中国との二国間共同研究の成果) などがあった。
- 関連する国際研究プログラム。以下は ICSU (国際科学会議) が推進している (他機関と共同のものも含む) 地球環境に関する科学研究の国際プログラム。
 - ▶ 地球圏・生物圏国際協同研究計画 (International Geosphere-Biosphere Programme,

[注 23] <http://www.planetunderpressure2012.net>

IGBP)^[注24]。

- ▶ 地球環境変化の人的側面国際研究計画 (International Human Dimension Programme on Global Environmental Change, IHDP)^[注25]。ICSUのほかISSC (国際社会科学会議) も関与する。
- ▶ 生物多様性科学国際協同計画 (International Programme on Biodiversity Science, DIVERSITAS)^[注26]。
- ▶ 世界気候研究計画 (World Climate Research Programme, WCRP)^[注27]。ICSUのほかWMO (世界気象機関) と UNESCO の IOC (政府間海洋学委員会) も関与する。
- ▶ 地球システム科学パートナーシップ (Earth System Science Partnership, ESSP)^[注28] (これは上記の4つの連携活動である。Global Carbon Project、Global Water Systems Projectはこの下にある。)
- ▶ Future Earth^[注29]。2012年新たに発足。IGBP、IHDP、DIVERSITAS、ESSPはこれに吸収される方向が示されている。
- ▶ 世界科学データシステム (World Data System, WDS)^[注30]。地球・宇宙科学データセンターの国際ネットワーク。従来の World Data Center(s) システムを吸収して発足した。日本の情報通信研究機構が国際プログラムオフィスを引き受けている。

日本学術会議では、IGBP、WCRP、DIVERSITASについては環境学委員会・地球惑星科学委員会合同分科会、IHDPについては地域研究委員会・環境学委員会・地球惑星科学委員会合同分科会、WDSについては情報学委員会国際サイエンスデータ分科会の小委員会に対応している。

日本の国際的取り組み

- 科学技術振興機構 (JST) との戦略的国際科学技術協力推進事業。日中韓3国以外は2国間事業。
 - ▶ 中国国家自然科学基金 (NSFC) との事業
 - ◇ 「農業生態系流域における窒素循環およびその水質に及ぼす影響に関する比較研究」(2010-2013年度) 齋藤雅典 (東北大学)、蔡祖聡 CAI Zucong (中国科学院南京土壤研究所 [現所属 南京師範大学])。
 - ◇ 「生物機能を強化した水環境のバイオレメディエーション」(2009-2011年度) 細見正明 (東京農工大学)、施衛明 SHI Weiming (中国科学院南京土壤研究所)。
- 科学技術振興機構 (JST) と海外協力機構 (JICA) の地球規模課題対応国際科学技術協力 (SATREPS)^[注31]。原則として日本と途上国の二国間。途上国の能力開発を意図している。相手国に中国を含まない。
- 東アジア酸性雨モニタリングネットワーク (EANET)^[注32]。ネットワークセンターが(財)日本環境衛生センターのアジア大気汚染研究センター^[注33]にある。

[注24] <http://www.igbp.net>

[注25] <http://www.ihdp.unu.edu>

[注26] <http://www.diversitas-international.org>

[注27] <http://www.wcrp-climate.org> (日本語による紹介 <http://www.jamstec.go.jp/wcrp/>)。

[注28] <http://www.essp.org>

[注29] <http://www.icsu.org/future-earth>

[注30] <http://www.icsu-wds.org/>

[注31] <http://www.jst.go.jp/global/>

[注32] <http://www.eanet.asia>

[注33] <http://www.acap.asia>

- 環境省事業の日中水環境協力（小柳，2012）（2011年12月12日のJST中国センター第47回研究会で紹介があった。）
 - 中国の水環境管理等を強化するための日中共同研究（2006-2007年度）
 - 農村地域等における分散型廃水処理モデル事業協力（2008-2011年度）
 - 水中の窒素およびリンの総量削減に関する日中共同研究（2009-2010年度）
 - 農村地域等におけるアンモニア性窒素等総量削減モデル事業協力（2011年度-）
- モンスーンアジア農業環境研究コンソーシアム（MARCO）^[注34]。日本の農業環境技術研究所の呼びかけによる、アジア諸国の農業環境（土壌・農業気象等）の研究者のネットワーク活動。
- アジア太平洋地球変動研究ネットワーク（APN）^[注35]。気候変動、生態系・生物多様性・土地利用、資源利用などに関する研究と能力開発の資金提供。日本（兵庫県、環境省）、ニュージーランド、韓国、アメリカ合衆国（NSF、USGCRP）の資金による。

日本国内の取り組み

- 環境省 環境研究総合推進費
 - S-7 東アジアにおける広域大気汚染の解明と温暖化対策との共便益を考慮した大気環境管理の推進に関する総合的研究。2009-2013年度。秋元肇（アジア大気汚染研究センター）。
 - B-0801 東アジアにおける生態系の酸性化・窒素流出の集水域モデルによる予測に関する研究。2008-2010年度（終了）。新藤純子（[当時]農業環境技術研究所）。
 - RFb-11T1 非特定汚染源からの流出負荷量の推計手法に関する研究。2011年度（終了）。日本水環境学会（研究代表者 古米弘明）。（日本水環境学会，2012）
- 環境省 閉鎖系水域対策
 - 海域の物質循環健全化計画。2010年度-。陸域と海域を含めた栄養塩類の管理方策策定を推進する。対象地域は、気仙沼湾、三河湾、播磨灘北東部、三津湾（広島）。
- 農水省 気候変動に対応した循環型食料生産等の確立のための技術開発（気候変動対策プロジェクト研究）。2010-2014年度。
 - 農林水産分野における温暖化緩和技術及び適応技術の開発「温暖化2010」。総括：八木一行（農業環境技術研究所）
 - 低投入・循環型食料生産の実現に向けた技術開発。
- 文部科学省 / 日本学術振興会 科学研究費 新学術領域研究
 - 陸上植物の高CO₂応答の包括的解明。2009年度-。寺島一郎（東京大学）。
- 科学技術振興機構 CREST
 - 水の循環系モデリングと利用システム。2001-2008年度（終了）。総括：虫明功臣。
 - ◇ 人間活動を考慮した世界水循環・水資源モデル。沖大幹。
 - ◇ 持続可能なサニテーションシステムの開発と水循環系への導入。船水尚行。
 - ◇ リスク管理型都市水循環系の構造と機能の定量化。古米弘明。
 - ◇ 各種安定同位体比に基づく流域生態系の健全性/持続可能性指標の構築。永田俊（永田・宮島2008）。

[注34] <http://www.niaes.affrc.go.jp/marco/>

[注35] <http://www.apn-gcr.org>

- ▶ 持続可能な水利用を実現する革新的な技術とシステム。2009年度 - 。総括：大垣眞一郎。
- ◇ 気候変動を考慮した農業地域の面的水管理・カスケード型資源循環システムの構築。藤原拓（高知大学）。
- 内閣府 / 日本学術振興会 最先端・次世代研究開発支援プログラム（NEXT）。2011-2013年度。2011年2月に選定された330課題のうち次の4件が窒素循環と関連がある。
 - ▶ 温室効果ガスの高精度モニタリングと環境メタゲノミクスの融合によるN₂O削減。秋山博子（農業環境技術研究所）。
 - ▶ 森林のメタボ判定：ハイスループット硝酸同位体比測定による森林窒素循環の健全性評価。木庭啓介（東京農工大学）。
 - ▶ アンモニアをエネルギー源として利用した低炭素社会を実現可能にする次世代型窒素固定法の開発。西林仁昭（東京大学）。
 - ▶ 根粒共生系の総合的理解による、低窒素肥料農業を目指した基礎的研究。林 誠（農業生物資源研究所）。

国際ファンディング体制の動き

- International Group of Funding Agencies for Global Change Research (IGFA)^[注 36]。地球環境研究に関する世界の研究資金提供機関の連合組織。
- Belmont Forum^[注 37]。IGFAのうち率先してファンディング体制を組もうとしている有志の組織。日本からは文部科学省が参加している。テーマを設定し、国際共同研究の提案を公募し、各資金提供機関は採択された提案のうち自国の研究者の分を支援する。まず Freshwater Security と Coastal Vulnerability の2テーマが開始され、研究提案が公募された（予備申請が2012年7月20日に締め切れ、本申請は2012年12月20日に締め切り）。日本では前者のテーマはJST、後者は学術振興会が業務を担当している。
- 東アジアサイエンス・イノベーション・エリア構想共同研究プログラム (e-ASIA JRP)^[注 38]
 - ▶ ASEAN諸国、日本、中国、韓国、インド、オーストラリア、ニュージーランド、アメリカ合衆国、ロシアの研究資金提供機関が参加し、そのうち、3か国以上が賛同する分野について、複数の国の研究者の共同研究の提案を公募し、各国機関が自国の研究者に資金提供するしくみ。2011年12月東アジアサミットで、日本が提案した。日本では文部科学省のもとでJSTが担当する。
 - ▶ 2012年度、第1回公募として、タイおよびベトナムと「ナノテクノロジー・材料」および「バイオマス・植物科学」に関する研究交流支援を行う。
 - ▶ 2012年度中には第2回公募（2013年2月現在、上記分野に加えて「感染症」は公募が開始され、「防災」「イノベーションのための先端融合分野」の分野について準備中）。2013年度中に研究支援開始予定。

[注 36] <http://igfagcr.org>

[注 37] <http://igfagcr.org/index.php/belmont-forum>

[注 38] <http://www.the-easia.org/jrp/>

参考文献

配列は著者名アルファベット順。本文では「(著者名, 発行年)」の形で引用。ただし著者名にあたるどころが組織名の場合は略称を使用している。

- ▶安藤 豊. 2006. "多収イネの窒素およびケイ酸の吸収利用と土壌環境". イネの生産性・品質と栄養生理. 日本土壌肥料学会 編. 博友社. p. 55-82.
- ▶Canfield, D.E; Glazer, A.N.; Falkowski, P.G. 2010. The evolution and future of earth's nitrogen cycle. *Science*, 330, p. 192-196.
- ▶Crutzen, P.J.; Mosier, A.R.; Smith, K.A.; Winiwarter, W. 2008. N₂O release from agro-biofuel production by replacing fossil fuels. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8, p. 389-395. <http://www.atmos-chem-phys.net/8/389/2008> .
- ▶Duce, R.A. et al. 2008. Impacts of atmospheric anthropogenic nitrogen on the open ocean. *Science*, 320, p. 893-897.
- ▶Fang, Y.; Yoh, M.; Koba, K.; Zhu, W.; Takebayashi, Y.; Xiao, Y.; Lei, C.; Mo, J.; Zhang, W.; Lu, X. 2011. Nitrogen deposition and forest nitrogen cycling along an urban-rural transect in southern China. *Global Change Biology*, 17, p. 872-885.
- ▶Fields, S. 2004. Global nitrogen: Cycling out of control. *Environmental Health Perspectives*, 112, p. a556-a563.
- ▶古米 弘明, 川上 智規, 酒井 憲司 編著, 河川環境管理財団 企画. 2012. 森林の窒素飽和と流域管理. 技報堂出版.
- ▶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, p. 341-356.
- ▶Galloway, J.N.; Townshend, A.R.; Erisman, J.W.; Bekunda, M.; Cai, Z.; Freney, J.R.; Martinelli, L.A.; Seitzinger S.P.; Sutton, M.A. 2008. Transformation of the nitrogen cycle: Recent trends, questions, and potential solutions. *Science*, 320, p. 889-892.
- ▶Galloway, J.N.; Cowling, E.B. 2002. Reactive nitrogen and the world: 200 years of change. *Ambio*, 31, p. 64-71.
- ▶半谷 高久, 安部 喜也. 1966. 社会地球化学. 紀伊国屋新書.
- ▶IPCC (気候変動に関する政府間パネル). 2011. IPCC Expert Meeting on HWP [harvested wood products], Wetlands and Soil N₂O (October, 2010). IGES (地球環境戦略研究機関). http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/meeting/pdfiles/1010_GenevaMeetingReport_FINAL.pdf
- ▶石井 敦. 2005. 外交の文脈を取り込む科学研究. 年報 科学・技術・社会, 14, p. 39-61.
- ▶JST CRC (科学技術振興機構 中国総合研究センター). 2011. 中国の第12次5カ年規画における緑色発展の実態と動向 (CRC-FY2011-09).
- ▶JST CRDS (科学技術振興機構 研究開発戦略センター). 2010. 戦略プロポーザル「地域環境・生態系予測モデルの統合的研究 -気候変動適応策立案を目指して-」(09SP10). <https://crds.jst.go.jp/type/proposals/201003010002>
- ▶JST CRDS (科学技術振興機構 研究開発戦略センター). 2010b. テーマ別国際比較 特定課題ベンチマーキング報告書「フィールドにおける植物の環境応答機構に基づいた植物生産技術の開発に関する国際技術力動向調査」(10GR02). <https://crds.jst.go.jp/type/>

topics/201010010000

- JST CRDS (科学技術振興機構 研究開発戦略センター). 2012. 戦略プロポーザル「政策形成における科学と政府の役割及び責任に係る原則の確立に向けて」(11SP09). <https://crds.jst.go.jp/type/proposals/201203280404>
- 小柳 秀明. 2012. 戦略的日中水環境協力. 資源環境対策, 48(6), p. 73-80.
- Leach, A.M.; Galloway, J.N.; Bleeker, A.; Erisman, J.W.; Kohn, R.; Kitzes, J. 2012. A nitrogen footprint model to help consumers understand their role in nitrogen losses to the environment. *Environmental Development*, 1, p. 40-66. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221146451100008X>
- 林 彬勸 (Lin, B.-L.). 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 34, p. 559-566.
- 日本水環境学会. 2012. 非特定汚染源からの流出負荷量の推計手法に関する研究 (平成23年度環境省環境研究総合推進費成果報告書 RFb-11T1). 日本水環境学会.
- Nixon, S.W. 2009. Eutrophication and the macroscope. *Hydrobiologia*, 629, p. 5-19.
- 農業環境技術研究所. 2006. 水環境保全のための農業環境モニタリングマニュアル (改訂版). <http://www.niaes.affrc.go.jp/techdoc/monitoring/>
- 水谷 広. 1987. 地球とうまくつきあう話. 共立出版.
- 水谷 広 編. 1999. 地球の限界. 日科技連.
- 永田 俊, 宮島 利宏 編. 2008. 流域環境評価と安定同位体. 京都大学学術出版会.
- 小川 利紘, 及川 武久, 陽 捷行 編. 2009. 地球変動研究の最前線を訪ねる. アサヒビール/清水弘文堂.
- 大竹 久夫 編著. 2011. リン資源枯渇危機とはなにか. 大阪大学出版会.
- 大手 信人. 2011. "森林の水と物質の循環からわかる生態系の変化". 地球環境と生態系の関係を解き明かす. 仲岡 雅弘 編. 文一総合出版. p. 34-45.
- 沖 大幹. 2012. 水危機、ほんとうの話. 新潮選書.
- Ribaud, M.; Delgado, J.; Hansen, L.; Livingston, M.; Mosheim R.; Williamson, J. 2011. Nitrogen in Agricultural Systems: Implications for Conservation Policy. ERR-127. U.S. Dept. of Agriculture, Economic Research Service. <http://www.ers.usda.gov/Publications/ERR127/ERR127.pdf>
- Rockström, J. et al. 2009a. A safe operating space for humanity. *Nature*, 461, p. 472-475.
- Rockström, J. et al. 2009b. Planetary boundaries: Exploring the safe operating pace for humanity. *Ecology and Society*, 14(2), 32. <http://www.ecologyandsociety.org/vol14/iss2/art32/>
- Rogers, E.M.; 三藤 利雄 訳. 2007. イノベーションの普及. 翔泳社.
- SCEP (Study of Critical Environmental Problems). 1970. Man's Impact on the Global Environment. Assessment and Recommendation for Action. MIT Press.
- Suddick, E.C.; Davidson, E.A. eds. 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. http://nitrogennorthamerica.org/pdf/NxCC_NCA_report_2012.pdf

- ▶角野 立夫. 2006. 水処理向け生物学的窒素処理技術とその展望. 日立評論, 88(12), p. 70-75.
- ▶Sutton, M.A.; Howard, C.M.; Erisman, J.W.; Billen, G.; Bleeker, A.; Grennfelt, P.; van Grinsven, H.; Grizzetti, B. eds. 2011. European Nitrogen Assessment. Cambridge University Press. 電子版は<http://www.nine-esf.org/ENA-Book> から公開.
- ▶Sutton, M.A. et al. 2012. Our Nutrient World: The challenge to produce more food & energy with less pollution. Key Messages for Rio+20. Published by the Centre for Ecology and Hydrology (UK) on behalf of the Global Partnership on Nutrient Management (GPNM) and the International Nitrogen Initiative (INI). <http://www.gpa.unep.org/gpnm.html> から公開. 経済的損失の件はR. Diazほかの投稿準備中の論文によるとある.
- ▶Svensson, B.H.; Sondelund, R. eds. 1975. Nitrogen, Phosphorus and Sulphur - Global Cycles (SCOPE 7). Wiley. 電子版は <http://www.scopenvironment.org/downloadpubs/scope7/> から公開.
- ▶武内 和彦. 2007. 地球持続学のすすめ. 岩波書店.
- ▶Uye, S. 2010. Human forcing of the copepod-fish-jellyfish triangular trophic relationship. *Hydrobiologia*, 666, p. 71-83.
- ▶Vitousek, P.M.; Mooney, H.A.; Lubchenco, J.; Melillo, J.M. 1997. Human domination of earth's ecosystems. *Science*, 277, p. 494-499.
- ▶和田 英太郎 監修, 谷内 茂雄, 脇田 健一, 原 雄一, 中野 孝教, 陀安 一郎, 田中 拓弥 編. 2009. 流域環境学. 京都大学学術出版会.
- ▶Yan, X.; Ti, C. 2012. Nitrogen budget in China: Its agronomic benefit and environmental impacts. MARCO Symposium 2012 Program and Abstracts (農業環境技術研究所), p. 26-30.
- ▶柳 哲雄, 植田 和弘. 2010. 東アジアの越境環境問題. 九州大学出版会.
- ▶楊 宗興. 2008. "中国亜熱帯林で始まっている “アジア型” の激しい酸性化". 2008酸性雪 (雨) シンポジウム (日本雪工学会ほか).
- ▶米本 昌平. 2011. 地球変動のポリティクス. 弘文堂.
- ▶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>

■戦略プロポーザル作成メンバー■

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-SP-01

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

STRATEGIC PROPOSAL

Consolidated Research Initiative for Sustainable Nitrogen Cycle

平成 25 年 2 月 February 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. Any quotations must be appropriately acknowledged.

ATTAATC A AAGA CCTAACT CTCAGACC
CT CTCGCC AATTAATA
TAA TAATC
TTGCAATTGGA CCCC
AATTCC AAAA GGCCTTAA CCTAC
ATAAGA CTCTAACT CTCGCC
AA TAATC

AAT A TCTATAAGA CTCTAACT CTAAT A TCTAT
CTCGCC AATTAATA
ATTAATC A AAGA CCTAACT CTCAGACC
AAT A TCTATAAGA CTCTAACT
CTCGCC AATTAATA

TTAATC A AAGA CCTAACT CTCAGACC
AAT A TCTATAAGA CTCTAACT
ATTAATC A AAGA CCT
GA CCTAACT CTCAGACC

0011 1110 000
00 11 001010 1
0011 1110 000
0100 11100 11100 101010000111
001100 110010
0001 0011 11110 000101

