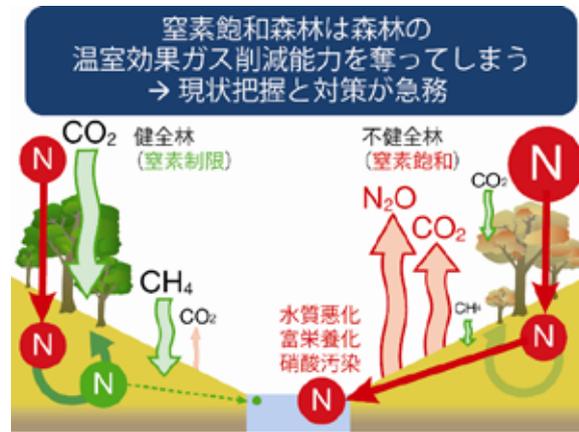


最先端・次世代研究開発支援プログラム  
事後評価書

研究課題名	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
研究機関・部局・職名	国立大学法人 東京農工大学・大学院農学研究院・准教授
氏名	木庭 啓介

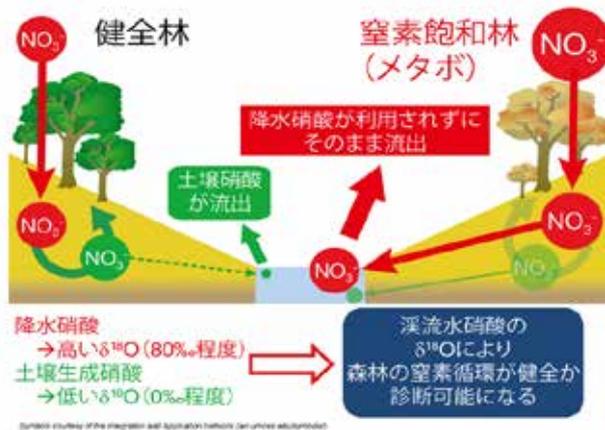
【研究目的】

都市周辺の森林から流出する渓流水に高濃度の硝酸イオン ( $\text{NO}_3^-$ ) が含まれていることがあると近年報告がなされ、森林の窒素飽和(「森林のメタボ化」)が懸念されている。酸性雨が大きな問題であった欧米では窒素飽和森林が数多く報告されており、土壌の酸性化、温室効果ガス収支の悪化( $\text{CO}_2$  吸収減少、 $\text{N}_2\text{O}$  放出増加)、下流生態系の富栄養化など、様々な問題が生じている(右図)。しかし、ある森林が窒素飽和状態であるかどうかを判定するためには、長期間にわたる詳細な窒素インプット・アウトプットモニタ



リングによる評価が必要であったため、その重要性にもかかわらず、国内でどれだけ

の森林が窒素飽和状態であるかについてはまだほとんど分かっていない。



本研究は、この状況を打破するために必要な、簡便な窒素飽和状態の一次スクリーニング指標を開発することを目的としている。もしも通常の、窒素が植物の一次生産を制限している森林(「健康」な森林)であれば、降

水でもたらされる  $\text{NO}_3^-$  (降水  $\text{NO}_3^-$ ; 左図赤) はそのほとんどが森林内の植物または微生物によって利用され(浄化され)、ほとんど森林から出て行かないと考えられる。一方、土壌中では硝化菌(硝化細菌・古細菌)により  $\text{NO}_3^-$  が生成され(土壌  $\text{NO}_3^-$ ; 左図緑), この土壌  $\text{NO}_3^-$  が少量森林から渓流水へと流出するという状況になっていると考えられている。一方で、窒素飽和状態の森林(「メタボ」な森林)では、降水  $\text{NO}_3^-$  の多くが植物や微生物によって使われることなく、溪流へと流れ出てくると考えられ

る。もちろん、土壌中の硝化も活発なので、大量の土壌  $\text{NO}_3^-$  と降水  $\text{NO}_3^-$  が混合して渓流水  $\text{NO}_3^-$  を形成することになるけれども、その渓流水  $\text{NO}_3^-$  における降水  $\text{NO}_3^-$  の割合 ( $f_{atm}$ :  $[\text{渓流水中の降水 } \text{NO}_3^-]/[\text{渓流水 } \text{NO}_3^-]$ ) は、「健康」な場合は低く、メタボであれば高いという予想ができる。

しかし、通常の  $\text{NO}_3^-$  濃度測定では、この降水  $\text{NO}_3^-$  と土壌  $\text{NO}_3^-$  とを区別し、 $f_{atm}$  を求めることは不可能である。そこで本研究では、 $\text{NO}_3^-$  の酸素同位体比 ( $^{18}\text{O}$ ) が降水  $\text{NO}_3^-$  で高く、土壌  $\text{NO}_3^-$  で低い事に着目し、 $f_{atm}$  を  $[\text{渓流水 } \text{NO}_3^- \text{ の } ^{18}\text{O} - \text{土壌 } \text{NO}_3^- \text{ の } ^{18}\text{O}]/[\text{降水 } \text{NO}_3^- \text{ の } ^{18}\text{O} - \text{土壌 } \text{NO}_3^- \text{ の } ^{18}\text{O}]$  としてさまざまな森林で求め、その窒素飽和森林判定への有効性を検討することを目的としている。しかし、この  $f_{atm}$  および  $\text{NO}_3^-$  の  $^{18}\text{O}$  のデータについては、まだ報告例が少なく、高いものから低いものまでさまざまなものが報告されており、上記の仮説が正しいかどうかについてはまだ疑問の余地がある。そこで本研究では、さまざまな集水域を対象とした  $^{18}\text{O}$  および  $f_{atm}$  測定による、渓流水  $\text{NO}_3^-$  の  $^{18}\text{O}$  そして  $f_{atm}$  の変動パターンを見いだすことにねらいを定める事としている。さらにその広域変動パターンを解析するために、いくつかの集水域において集中的なモニタリングを敢行し変動パターンの詳細を明らかにする。そしてさらに異なるパラメーター（酸素同位体異常、 $^{17}\text{O}$ ) を用いた  $f_{atm}$  測定を行い、観測された  $f_{atm}$  のクロスチェックを行う、という3本柱で  $\text{NO}_3^-$  の  $^{18}\text{O}$  および  $f_{atm}$  の有効性を議論し、これらをベースとした新たな指標 (Nitrate Retention Index; NRI) の作成へと展開することを目的とした。

**【総合評価】**

	特に優れた成果が得られている
	優れた成果が得られている
	一定の成果が得られている
	十分な成果が得られていない

**【所見】**

**総合所見**

森林における窒素循環は、森林とその森林が成立する流域の諸要因が影響するが、その評価を「森林の窒素飽和」の概念に関わる指標の作成により進めることを研究目的としている。具体的には、アジアモンスーン地域の森林の窒素飽和状態を評価するための一次スクリーニングに供する窒素飽和判定指標を作成すること、この指標を用いて、渓流水の調査を行い、国内の窒素飽和状況を把握し、窒素飽和森林への対策に不可欠な情報を提供することを目標として展開されている。

一方、本研究課題の最終的なアウトカムは NRI マップを提示し、施策に寄与することにある。研究開始時点では、 $f_{atm}$ :  $[\text{渓流水中の降水 } \text{NO}_3^-]/[\text{渓流水 } \text{NO}_3^-]$  がその指標となることを想定してデータ集積が進められた。しかし、 $f_{atm}$  は 20% 程度と高い値をしめす事が多く、さらに様々な値を取るようであり、現場で得られたデータを再現することが困難で、新指標作成という点でいうと、単純な  $f_{atm}$  という指標は有効でないことが明らか

となった。そこでさらに詳細な検討を重ね、 $f_{atm}$  を  $\delta^{18}O$  による計算で求めるのと同時に  $\Delta^{17}O$  でも求める事ができるようになり、この2つの  $f_{atm}$  の違いが、集水域中での脱窒の有無を表しているという事を発見した。そこで、 $C_{total}$  と  $\Delta^{17}O$  とから計算される  $C_{atm}$ 、さらにこれに  $\delta^{18}O$  を組み合わせ脱窒の有無を検討し、さらにその有無について  $\delta^{15}N$  で再確認するという解析の流れが有効であるという結論を導き出し、上記3つの指標を組み合わせることで、森林の窒素循環についての概略をとらえることが可能であることを示した。

本研究課題開始当初の想定とは異なる結果に遭遇しながら、集積したデータを詳細に検討し、新たな解析方法を導き出すとともに、まだ一部にとどまっているが、その有効性を実証するにいたったことは、高く評価したい。この総合新指標(というよりは新解析フローと呼ぶのが正しい)を今後多くの森林に展開して行くことで、我々の水源森林が窒素飽和状態に陥っているのかというような重要な情報を国民に提供する環境を確立して行くことが可能になると期待される。

森林の窒素循環の指標化に、雨水、渓流水中の  $^{18}O$ 、 $^{15}N$ 、 $^{17}O$  などの安定同位体情報を用いて進めることが、本研究の先進性、革新性の根幹であり、申請者により提案された「森林の窒素飽和度の簡便な評価法」は独創的で、応用性にも優れていると考えられ、今後の発展を期待したい。

### 目的の達成状況

・ 所期の目的が

( 全て達成された ・ 一部達成された ・ 達成されなかった )

本研究課題は、課題担当者がこれまでに蓄積した水サンプルの同位体分析技術とそれに基づく優位性のある知見を背景に、環境に大きな影響を及ぼす森林の「健康状態」を窒素循環に基づく指標で示すことを目指して、森林の窒素飽和状態を表示する指標の策定、簡便な窒素飽和状態の一次スクリーニング指標を開発することを目的としている。

土壌  $NO_3^-$  と降水  $NO_3^-$  が混合して渓流水  $NO_3^-$  を形成するが、その渓流水  $NO_3^-$  における降水  $NO_3^-$  の割合 ( $f_{atm}$ : [渓流水中の降水  $NO_3^-$ ] / [渓流水  $NO_3^-$ ]) は、森林が「健康」な場合は低く、メタボであれば高いという予想ができる。

本研究では、 $NO_3^-$  の酸素同位体比 ( $^{18}O$ ) が降水  $NO_3^-$  で

高く、土壌  $NO_3^-$  で低い事に着目し、 $f_{atm}$  を [渓流水  $NO_3^-$  の  $^{18}O$  - 土壌  $NO_3^-$  の  $^{18}O$ ] / [降水  $NO_3^-$  の  $^{18}O$  - 土壌  $NO_3^-$  の  $^{18}O$ ] としてさまざまな森林で求め、その窒素飽和森林判

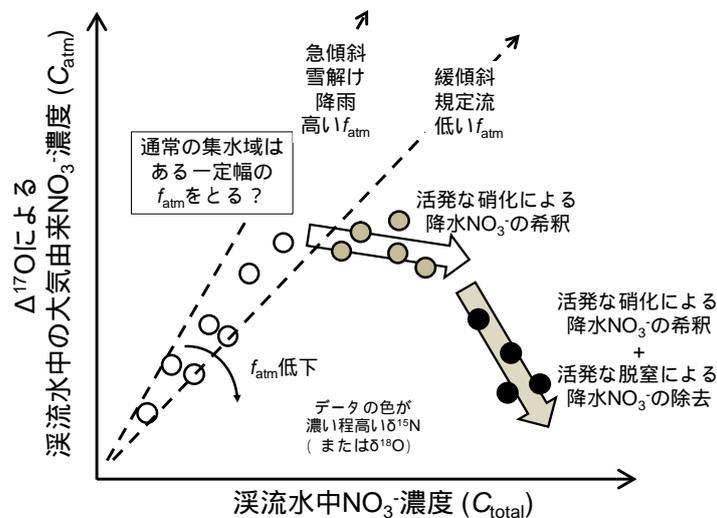


図 新指標としての  $C_{total}$ - $C_{atm}$  plot (概念図)。

定への有効性の検討を進めた。

NRI (Nitrate Retention Index) 作成に不可欠な  $f_{atm}$  そして  $\delta^{18}O$  の有効性の議論を展開するために、研究成果の欄に記述するように、さまざまな検討課題について多岐にわたって研究を行ってきた。残念ながら  $f_{atm}$  そして  $\delta^{18}O$  を組み合わせた NRI として簡単な形 (たとえば 1 つの数式) に結実しなかったが、これまでの結果をまとめた形で、上図のような森林集水域の窒素飽和状態の解析手法を提案できた (2013 年水環境学会誌)。より詳細な検討が今後必要である事は間違いないものの、渓流水  $NO_3^-$  濃度 ( $C_{total}$ ) とそこに含まれる降水  $NO_3^-$  濃度 ( $C_{atm}$ ) との関係に渓流水硝酸の  $\delta^{18}O$  および窒素同位体比 ( $\delta^{15}N$ ) を組み合わせるといふこの新たな解析手法 (上図) は今後の集水域研究に大きく貢献すると期待される。

### 研究の成果

・これまでの研究成果により判明した事実や開発した技術等に先進性・優位性が (ある ・ ない)

・ブレークスルーと呼べるような特筆すべき研究成果が (創出された ・ 創出されなかった)

・当初の目的の他に得られた成果が (ある ・ ない)

まず土壤  $NO_3^-$  と降水  $NO_3^-$  がどれだけ異なる  $\delta^{18}O$  を持つかという点について吟味した。土壤  $NO_3^-$  は土壤中の酸素ガスと水から酸素原子を受け継いでおり、この 2 つの酸素源がもつ  $\delta^{18}O$  の特徴に影響される。しかし、どのような割合で土壤酸素ガスと水が  $NO_3^-$  の  $\delta^{18}O$  に影響を及ぼすかについては明確ではなく、これまでの研究では研究によってまちまちな議論を行っていた。この点を解決しなければ、本研究で鍵を握る  $f_{atm}$  や  $\delta^{18}O$  といった指標の解析が曖昧になってしまう。そこで、課題担当者らは多摩川流域のさまざまな森林を対象として土壤を採取し、土壤中の  $NO_3^-$  について現場に存在していたもの、培養によって生成したものそれぞれの同位体比測定を行った。すると、土壤  $NO_3^-$  の  $\delta^{18}O$  はこれまで予想されたものよりも遙かに低い値をとり、土壤酸素ガスの影響よりも水の

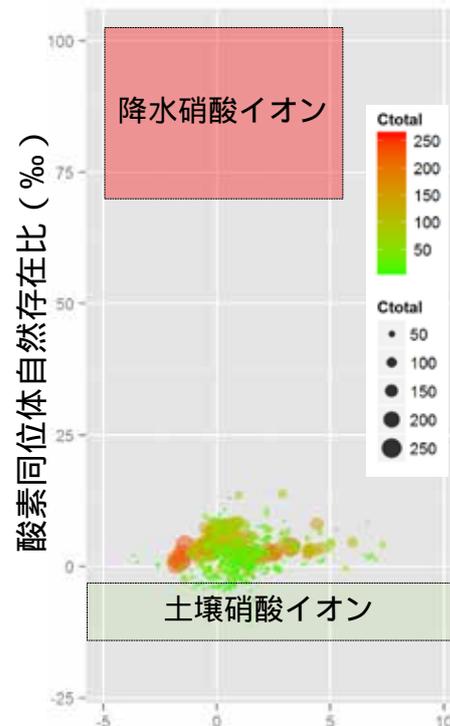


図 1: 窒素同位体自然存在比 (‰)

影響が遙かに強いことがわかった。このことはこれまでの研究での、 $f_{atm}$  そして  $C_{atm}$  の見積もりは過小評価されていることを示しており、見直しが必要であることを示唆するものである。本研究ではこの結果に基づいて、土壤  $NO_3^-$  はほぼ水の同位体比と  $\delta^{18}O$  を取るとして議論を進めている。

全国の森林集水域から得られた渓流水中の  $NO_3^-$  についてその  $\delta^{18}O$  を測定したところ

予想していたような変動は見られなかった（図1：本NEXTプログラムで得られた渓流水  $\text{NO}_3^-$  濃度と同位体比。赤四角は降水  $\text{NO}_3^-$ 、下部の薄い四角は土壌  $\text{NO}_3^-$  の取りうる同位体比を示している）。つまり、 $f_{\text{atm}}$  はどのような森林でもあまり変化がなく、数%から高くても20%程度であったという結果になった。降雨イベントや伐採という攪乱によって  $f_{\text{atm}}$  は変化を見せるものの、予想よりも遙かに小さな変動であった。いくつかの集水域において森林土壌中での

$\text{NO}_3^-$  の挙動を見てみると、降水  $\text{NO}_3^-$  が持つ高い  $\delta^{18}\text{O}$  のシグナルが低い  $\delta^{18}\text{O}$  をもつ土壌  $\text{NO}_3^-$  の供給によって薄められて行くのが確認された。つまり、窒素制限の森林では比較的少量の降水  $\text{NO}_3^-$  に比較的少量の土壌  $\text{NO}_3^-$  が付け加わることで渓流水  $\text{NO}_3^-$  が生成され、一方、窒素飽和の森林では大量の降水  $\text{NO}_3^-$  に、

大量の土壌  $\text{NO}_3^-$  が窒素飽和によって刺激を受けた微生物反応（硝化反応）によって付け加わっており、結果として  $f_{\text{atm}}$  はあまり違いがない、ということであることが明らかとなった（図2：本NEXTプログラムで得られた渓流水サンプルの  $C_{\text{total}}$  と  $C_{\text{atm}}$  ( $\delta^{18}\text{O}$  ベース) の関係図。傾きが  $f_{\text{atm}}$  となる)。なぜこのように  $f_{\text{atm}}$  が一定になるのかについては、物質循環モデルを用いたシミュレーションによる検討を継続して現在も行っている。

PnET-CN という物質循環モデルを  $f_{\text{atm}}$  を計算できるように改造しているところであるが、現在までのところ、 $f_{\text{atm}}$  は20%程度と高い値をしめす事が多く、さらに様々な値を取るようであり、現場で得られたデータを再現できていない。PnET-CN は北米で開発されたモデルであるため、日本と全く異なる水文過程を持つ欧米の森林での結果との比較を通じて検討を行う必要があると考えている。この日米の水文過程の違いと硝酸流出、硝酸生物地球化学の違いについては、日米森林水文ワークショップで基調講演を行い、その際に多くの賞賛を得た。そして、現在、米国の研究者と共著の総説を投稿中である。しかし、その総説の中でもまだ決定的な解はでておらず、今後のより詳細な日米共同研究を予定している。

詳細な観測を行った集水域の中でも、窒素飽和林である農工大 FM 多摩丘陵と窒素制限林である京大上賀茂演習林での  $f_{\text{atm}}$  が年間を通じてほぼ同等（数%）であるということが明らかとなってきたので、新指標作成という点でいうと、上記のように単純な  $f_{\text{atm}}$  という指標は有効でないことが明らかとなり、作戦を練り直した。その過程で、結局初心に戻り、 $C_{\text{total}}$  自体は今後どのような新指標を展開するにせよ必ず測定する事から、指標の一部に加える事には特段の問題が認められないという事、そして  $f_{\text{atm}}$  を  $\delta^{18}\text{O}$  による計算で求めるのと同時に  $\Delta^{17}\text{O}$  でも求める事ができるようになり、この2つの  $f_{\text{atm}}$  の違いが、集水域中での脱窒の有無を表しているという事に気づいた。そこで、現在のところ  $C_{\text{total}}$  と  $\Delta^{17}\text{O}$  とから計算される  $C_{\text{atm}}$ 、さらにこれに  $\delta^{18}\text{O}$  を組み合わせ脱窒の有無を検討し、さらにその有無について  $\delta^{15}\text{N}$  で再確認するという解析の流れが有効であるという結論に至っている（図1）。つまり  $C_{\text{total}}$  が高いかどうか、その  $C_{\text{total}}$  のちにどれだけ  $C_{\text{atm}}$  が貢献

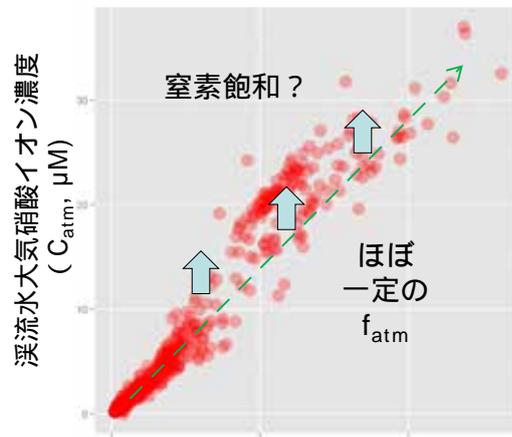


図2: 渓流水硝酸イオン濃度 ( $C_{\text{total}}$ ,  $\mu\text{M}$ )

しているか、さらには降水  $\text{NO}_3^-$  の  $\Delta^{17}\text{O}$  と  $\delta^{18}\text{O}$  の関係から予想される渓流水  $\text{NO}_3^-$  の  $\delta^{18}\text{O}$  と実測の  $\delta^{18}\text{O}$  がどれだけずれているか（これはどれだけ脱窒や吸収という  $\text{NO}_3^-$  の消費が森林内部で起きているかの指標となる）という 3 つの指標を組み合わせることで、森林の窒素循環についての概略をとらえることが可能であるという考えに至った。実際窒素飽和林である農工大 FM 多摩丘陵では詳細な土壌水、地下水の検討を加えた結果、これらの試料について脱窒による同位体比シグナルの異常をとらえることができることがわかり、現在論文投稿準備中である。また、脱窒による同位体比変動の規模（同位体分別）を文献値や実測値として与える事により、上述したように集水域での土壌硝化速度と脱窒速度を見積もる事ができると考えられることがわかってきており、これについても論文を投稿準備中である。この総合新指標（というよりは新解析フローと呼ぶのが正しい）を今後多くの森林に展開して行くことで、我々の水源森林が窒素飽和状態に陥っているのかというような重要な情報を国民に提供する環境を確立して行くことが可能になると期待される。

#### 先進性・優位性

森林の窒素循環の指標化に、雨水、渓流水中の  $^{18}\text{O}$ 、 $^{15}\text{N}$ 、 $^{17}\text{O}$  などの安定同位体情報を用いて進めることが、本研究の先進性、革新性の根幹であり、課題担当者により提案された「森林の窒素飽和度の簡便な評価法」は独創的で、応用性にも優れている

ブレイクスルーと呼ばれる成果については、提案された渓流水  $\text{NO}_3^-$  濃度 ( $C_{\text{total}}$ ) とそこに含まれる降水  $\text{NO}_3^-$  濃度 ( $C_{\text{atm}}$ ) との関係に渓流水硝酸の  $\delta^{18}\text{O}$  および窒素同位体比 ( $\delta^{15}\text{N}$ ) を組み合わせるといふ森林集水域の窒素飽和状態の新たな解析手法については、より詳細な検討が今後必要である事は間違いなく、今後の集水域研究に大きなブレイクスルーをもたらす事が期待されるものの、ブレイクスルーを果たしたと言えるまでには、なお多くの実証が必要である。

#### 研究成果の効果

・研究成果は、関連する研究分野への波及効果が  
（見込まれる ・ 見込まれない）

・社会的・経済的な課題の解決への波及効果が  
（見込まれる ・ 見込まれない）

植生の維持・発達にとって窒素成分が重要であり、山林における窒素状態を渓流水中の  $\text{NO}_3^-$  について、 $f_{\text{atm}}$  を  $\delta^{18}\text{O}$  と  $\Delta^{17}\text{O}$  で求めると、この 2 つの  $f_{\text{atm}}$  の違いが、集水域中での脱窒の有無を表していることを発見するとともに、 $C_{\text{total}}$  と  $\Delta^{17}\text{O}$  とから計算される  $C_{\text{atm}}$ 、さらにこれに  $\delta^{18}\text{O}$  を組み合わせ脱窒の有無を検討し、さらにその有無について  $\delta^{15}\text{N}$  で再確認するという解析、つまり  $C_{\text{total}}$  が高いかどうか、その  $C_{\text{total}}$  のちにどれだけ  $C_{\text{atm}}$  が貢献しているか、さらには降水  $\text{NO}_3^-$  の  $\Delta^{17}\text{O}$  と  $\delta^{18}\text{O}$  の関係から予想される渓流水  $\text{NO}_3^-$  の  $\delta^{18}\text{O}$  と実測の  $\delta^{18}\text{O}$  がどれだけずれているか（これはどれだけ脱窒や吸収という  $\text{NO}_3^-$  の消費が森林内部で起きているかの指標となる）という 3 つの指標を組み合わせることで、森林の窒素循環についての概略をとらえることが可能であること明らかにしたことは、極めて独自性の高い成果であり、森林流域の窒素動態について新規の知見を大きく

増加させている。関連研究分野への様々な寄与が期待される。上流にある森林流域から流れ出た水が辿る下流の河川、湖沼、沿岸域の窒素動態への寄与のみならず、温暖化気体であるN<sub>2</sub>Oの生態系内での生成消失の実態把握にも役立つ。研究成果の一部はすでにインパクトの高い国際誌に複数掲載されており、波及効果も高いと考えられる。実際国内外からの共同研究依頼が既に複数寄せられていることから、この分野における今後の展開が期待できる。

社会的、経済的な課題解決への波及効果としては、下記のような効果が期待できる。

自然環境としての山林の健全性を維持することは、その流域全般への直接的、間接的な利益をもたらす。現段階ではまだ準備段階であるが、窒素循環健全性マップが公表されれば、森林が持つ生態系サービス（森林行政では、「森林の多面的機能」評価）に役立ち、国・地方行政単位での対策を立てる際の具体的指針となり、大きな貢献が見込まれる。国内外の人工林管理、森林の二酸化炭素吸収のための海外大規模植林の環境影響評価などを改善するための基盤的な知見を提供することがきたされる。ただし、このような施策に直接的にも寄与する類の研究成果は一人歩きする危険もあることを十分に考慮しつつ、公表後のフィードバックによってさらなるバージョンアップを常に図るためにも積極的に公開していくべきであろう。

原子力発電所事故で放出された放射性セシウムの森林内での動態、森林流域からの流出を評価する上でも、この研究で得られた窒素動態の理解は重要な知見となることが期待される。

#### 研究実施マネジメントの状況

・適切なマネジメントが（ 行われた ・ 行われなかった）

研究マネジメントについては、計画停電やヘリウムガスの供給不足などいくつかの不安材料を乗り越えつつ、人材雇用も含め適切なマネジメントが行われている。

物品費の中で大きい部分を占める同位体分析装置等は、大震災後の電力事情など幾つかの困難を克服して、成果の蓄積に十分活用されている。

博士研究員雇用など人件費の活用も状況に応じて順調に進展している。各地の森林流域での水質資料収集は多くの他大学研究者との連携の中で進める計画であり、本研究課題の一つの特徴になっているが、円滑な連携がはかられて進んでいるなど、研究実施体制は適切なマネジメントがなされており、助成金の利活用を含め適切と判断される。

成果の公表については、学術誌への発表は適切に行われている。一方、会議発表、国民との科学・技術対話については、低調であったと指摘せざるを得ない。

雑誌論文： 合計 17 本（掲載済み査読有 14 件，掲載済み査読無 3 件）

会議発表： 合計 6 件（専門家向け 5 件，一般向け 1 件（高校生向け））

図書： 0 件

知的財産権の出願・取得： 0 件

新聞・一般雑誌等の掲載： 0 件（大学広報誌にて掲載 1 件）

国民との科学・技術対話：合計 3 件