

学位論文題名

流域レベルの窒素循環のモニタリングに基づく 窒素負荷の広域評価法の開発

学位論文内容の要旨

人間活動は地球の窒素循環を大きく変貌させ、生物に利用可能な窒素量を 100 年前の 2 倍にした。増加した窒素は反応性窒素と呼ばれ、作物生産の向上をもたらすと同時に環境負荷源となる。農業の集約化は窒素収支の不釣り合いを生じさせ、その規模は圃場から流域、地域、大陸へと拡大している。偏在する窒素は、水および大気循環を通して地球全体に影響をおよぼす。陸域における適正な窒素管理法を構築するために、窒素循環と流出の定量評価と負荷をおよぼす窒素循環の仕組みの理解が必要である。本研究の目的は、食料の生産と消費に関わる窒素循環が河川窒素流出におよぼす要因を抽出し、河川水窒素濃度の広域負荷予測を行い、地域の適正な窒素管理の提案につながる流出負荷の評価手法を提示することである。

1. 対象地域は静内研究牧場、標津川流域、北海道市町村、日本都道府県、そして、著しい経済成長により窒素負荷の懸念される中国各省とした。地域への投入窒素（化学肥料、輸入飼料、輸入食料、窒素固定、窒素降下物）と持出窒素（輸出飼料、輸出食料）の差を純窒素投入量（NNI）と定義し、河川流出と脱窒のポテンシャルとした。地域内部を農地系、人間系、家畜系、森林系に分けると、NNI は農地系の余剰窒素と脱窒、人間系の尿尿・下水窒素、家畜系の廃棄糞尿窒素、森林系の余剰窒素の和として計算される。農地余剰窒素は、農地投入窒素（化学肥料、堆肥、残渣、窒素固定、窒素降下量）と持出窒素（作物収穫物、残渣、脱窒、アンモニア揮散）の差として得られる。人間の尿尿・下水窒素は、一人あたりの排出量と人口から計算される。家畜廃棄糞尿窒素は糞尿発生量からアンモニア揮散と圃場施与糞尿を差し引いて計算される。森林余剰窒素は窒素降下量とした。流域を循環する窒素は堆肥、残渣および自給食料・飼料による。計算のために必要なデータは、対象地域毎または共通の統計資料、実数、文献資料を引用した。河川水のモニタリングは、NNI とリンクさせ広域予測へつなげるために、多点および定点観測地点を選定して行った。

2. 静内の肉牛生産牧場において、農家の窒素管理が農地余剰窒素と融雪期の河川水質へおよぼす影響を評価した。牧場への投入窒素の 58% を化学肥料が占めた（平均 $64 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ）。農地余剰窒素は平均 $58 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ で、圃場レベルでは -5 から $131 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ とばらつきがあった。循環窒素である堆肥は、0 から $102 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ （平均 $35 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ）が秋に施与された。各圃場の化学肥料施与量の変動係数 53% に対して堆肥施与量のそれは 183% であり、堆肥施与量の変動が農地余剰窒素に変動をもたらす要因であった。融雪期に生じる表面流去水中の窒素濃度は堆肥施与圃場で高かった。土壌鉱物の風化に由来するケイ素濃度と河川水中窒素（TN、 $\text{NH}_4\text{-N}$ ）濃度の間に有意な負の相関が認められた。このことから河川へ流出した窒素は圃場の表面流去水に由来すると推察され、糞尿成分の河川への流亡が示唆された。融雪期の流出負荷を低減するために、施与時期と量を考慮した堆肥管理が重要であると結論した。

3. 酪農流域の別寒辺牛川流域（BK：湿地率 15%）と標津川流域（SB：湿地率 0%）において、湿地の存在が河川水窒素濃度におよぼす影響を評価した。NO₃-N 濃度は両流域とも農地率と有意な正の相関にあり、BK 流域の回帰式の傾き 0.0146 ± 0.001 は、SB 流域の傾き 0.0161 ± 0.001 よりも有意に低かった。BK 流域では湿地率と NO₃-N 濃度に有意な負の相関が認められた。冗長性分析の結果、河川水窒素濃度は農地および市街地の影響を強く受けて上昇し、湿地は森林と同様の傾向を持つことがわかった。脱窒能は湿地＞河畔域＞草地であり、土壌の含水率、可溶性炭素含量と正の相関関係を示した。農地率が河川水 NO₃-N 濃度の主要な予測因子である一方、高い土壌水分と可溶性炭素含量によって脱窒能力を発揮する湿地や河畔域も、河川水質を規定する重要な土地利用であると結論した。

4. SB 流域において、農地率と流域面積が異なる 5 定点において窒素流出量を測定した結果、窒素流出量と NNI の間に有意な正の相関を認めた。NNI の 96%が農地余剰窒素(62%)、農地脱窒 (28%)、家畜廃棄糞尿窒素(6%)などの農業由来であり、食料消費由来は 2%にすぎなかった。河川の TN、NO₃-N 流出量はそれぞれ NNI の 27、14%に相当した。

5. SB 流域の各支流流域（n=25）の NNI は河川水 NO₃-N 濃度と高い相関があり、この回帰式を用いて過去の NO₃-N 濃度を予測し、降水量と流出率を用いて 1950 年以降の河川への NO₃-N 流出量を見積もった。1960 年代から 1980 年代にかけての草地面積と乳牛頭数の幾何級数的な増加と化学肥料、購入飼料の投入によって、現在の NNI は 1950 年代の 16 倍に増大した。NO₃-N 流出量は 1950 年代の $0.6 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ から 2000 年代の $8.6 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ に増加したと推定された。この NNI と NO₃-N 流出量の関係から、NO₃-N 流出量は NNI の 15%と見積もられ、SB 流域における実測値と差はなかった。

6. 中国と日本および北海道の NNI を推定し、河川水 TN 濃度の広域予測を試みた。その結果、それぞれ 84、43、32%の地域で TN 濃度が環境基準である 1 mg N L^{-1} 以上と見積もられた。なお、この見積りでは、河川水 TN 濃度は、既往の報告と SB 流域結果で得た TN 流出率(27%)を NNI に乗じ、地域の降水量から推定した流出水量で除して推定した。重回帰分析の結果、NNI は化学肥料、人口密度、家畜糞尿で有意に回帰され（n=290, $R^2=0.987$, $P<0.01$ ）、中国では化学肥料と人口密度、日本では人口密度と家畜糞尿、北海道では化学肥料と家畜糞尿の影響が強かった。NNI は土地利用割合によっても有意に回帰され（n=290, $R^2=0.746$, $P<0.01$ ）、農地と市街地の影響が強かった。

7. 北海道の市町村における NNI から NO₃-N 濃度を推定し、主要河川の NO₃-N 濃度の実測値（南雲と波多野、2001）と比較した結果、有意な相関（n=201, $R^2=0.41$, $P<0.01$ ）を認め予測の妥当性が示された。しかし、大きな誤差があり、特に低濃度域の予測値に著しい過小評価が認められた。その要因として森林の窒素降下量や土壌タイプによる窒素除去能の違いを考慮しなかったことが考えられた。森林の窒素降下量 $5 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ と耕地土壌の窒素除去係数を仮定し、推定値と実測値の関係の決定係数が最も高くなる係数を試行錯誤により求めた結果、決定係数は 5%向上した。森林の窒素降下量を考慮したことで低濃度域の過小評価が解消されたため、窒素降下物の NO₃-N 流出におよぼす影響は無視できないことが示唆された。窒素除去係数は湿性土壌で高く、脱窒能を表すと考えられた。

8. 以上より、窒素収支法で推定した NNI は、河川への窒素流出の支配因子であった。NNI は地域の土地利用や、糞尿発生量、化学肥料施与量および人口密度に依存し、NNI を構成する農地余剰窒素は農家の窒素管理に依存して変動した。河川水 TN 濃度が環境基準を上回ると推定された地域では、窒素管理法の改善のほか、市街地や家畜からの廃棄窒素の浄化対策が必要になるだろう。流域レベルの窒素循環と河川水質のモニタリングに基づく関係解析は、広域の窒素流出の予測を可能にし、それにより重点的にモニタリングすべき地域や、改善すべき要因を抽出することができる。今後、河畔や湿

地、土壌タイプ別の脱窒量、地域の窒素降下物量などをモニタリングすることにより、より高い精度での窒素流出の予測が可能になると考えられる。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 波多野 隆 介

副 査 教 授 長谷川 周 一

副 査 教 授 長 澤 徹 明

副 査 助教授 中 原 治

学 位 論 文 題 名

流域レベルの窒素循環のモニタリングに基づく

窒素負荷の広域評価法の開発

本論文は 12 章からなり、図 78、表 21、引用文献 205 を含む 138 ページの和文論文である。他に参考論文 3 編が添えられている。

農地への窒素投入は、植物生産を向上させるが、環境への負荷も生じさせる。適正な施肥管理のために、窒素収支の見積もりの向上が要求されている。本論文の目的は、流域の窒素循環と河川への流出のモニタリングに基づき、それらの関係を解析し、その結果に基づき広域負荷予測を行うための方法を示すことである。本論文では、静内牧場、標津川、別寒辺牛川の各流域で河川水の全窒素(TN)、硝酸態窒素($\text{NO}_3\text{-N}$)濃度および流出量の測定を行い、それら流域における特徴を述べるとともに、窒素流出量を農業統計に基づく窒素収支に関連付け、モデル化した。北海道市町村、日本都道府県、中国各省の窒素収支を計算し、モデルにより窒素濃度の推定を行った。北海道市町村では窒素濃度の実測値と推定値を比較し、モデルの改良を行った。

対象地域の農業統計と文献による窒素含有率や窒素固定、窒素降下物などを用いて、流域内の投入窒素（化学肥料、輸入飼料、輸入食料、窒素固定、窒素降下物）と持出窒素（輸出飼料、輸出食料、家畜蓄積、人間蓄積）の差を求め、純窒素投入量（NNI）と定義した。NNI は河川流出と脱窒のポテンシャルである。

静内牧場流域では、窒素管理が農地余剰窒素と河川水質へおよぼす影響を評価した。NNI を構成する農地余剰窒素の圃場間のばらつきは -5 から $131 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ と極めて大きく、秋施与堆肥量の変動がその原因だった。融雪期の表面流去水中の窒素濃度は堆肥施与圃場で高く、表面流去による河川への流出が認められた。圃場間の窒素収支の空間変動は大きかったが、河川の窒素流出量は流域全体の NNI と有意に相関した。

大流域の別寒辺牛川流域（BK：湿地率 15%）と標津川流域（SB：湿地率 0%）では、農地率と $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度に有意な相関関係が認められ、農地が負荷源であったが、BK 流域でその傾きは小さかった。両流域で測定した脱窒能は湿地＞河畔域＞草地であり、BK 流域の湿地が $\text{NO}_3\text{-N}$ 流出の抑制に寄与したと思われた。

SB 流域では TN、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度、流出量を測定したところ、NNI との間に有意な正の

相関関係が認められた。NNI と窒素流出量の関係の傾きから、TN、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 流出量は、NNI の 27%、14%に相当すると見積もられた。米国、中国、ブラジルなどの文献値のプロットもこの関係に良く一致した。残りは当該流域に蓄積しているか、脱窒されて消失していると思われた。また、1950 年以降の農業統計を用いて NNI を求め、河川水 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度との回帰式から、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の変化を推定した。NNI は 1960 年代から 1980 年代にかけての乳牛頭数の増加、化学肥料、購入飼料の投入量の増加によって増加し、現在の NNI は 1950 年代の 16 倍となっていた。 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度は、過去の文献値とよく一致し、1950 年代の 0.06mgN L^{-1} から 2000 年代の 0.8mgN L^{-1} へ 14 倍上昇した。河川の流出高から $\text{NO}_3\text{-N}$ 流出量を求めた結果 1950 年代の $0.6\text{ kg N ha}^{-1}\text{ yr}^{-1}$ から 2000 年代の $8.6\text{ kg N ha}^{-1}\text{ yr}^{-1}$ に増加したと推定され、世界でも高水準であった。

NNI と TN 流出量の関係を用いて、北海道市町村、日本都道府県、中国各省の NNI から河川水 TN 流出量を求め、地域の降水量から推定した流出水量で除して TN 濃度を予測した。その結果、それぞれ 32、43、84%の地域で環境基準の 1 mg N L^{-1} 以上となると推定された。重回帰分析の結果、NNI は化学肥料、人口密度、家畜糞尿 ($n=290$, $R^2=0.987$, $P<0.01$) により有意に回帰され、農業の集約化、都市化、家畜生産が NNI を増大させる要因であると認められた。

北海道市町村の NNI から推定した $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度は、その主要河川の実測値とよく一致した ($n=201$, $R^2=0.41$, $P<0.01$)。しかし、低濃度域の予測値に過小評価があり、その原因として、地域により異なる土壌分布が窒素除去量に影響しているためと考えた。そこで土壌の窒素除去係数を仮定し、予測と実測の回帰式の決定係数が最大となるように試行錯誤で窒素除去係数を決定したところ、台地や低地の湿性土壌群に高い除去係数を与えると決定係数が上がり、予測精度が向上することが示された。

NNI は河川窒素流出の支配因子であった。流域の窒素循環と河川水質のモニタリングに基づく関係解析は、広域の窒素流出予測を可能にし、重点的にモニタリングすべき地域や、改善すべき要因を抽出することができる。今後、予測値を検証するための実測データの整備とともに、河畔や湿地、土壌別の脱窒量のデータの整備などにより、より高い精度での流出予測が可能になると思われる。

以上のように、本論文は流域レベルの窒素循環と河川からの窒素流出を定量的に解析し、それに基づく関係式から広域負荷予測の手法を提示しており、流域や地域における適切な窒素管理の提案に貢献しうるものであり、関連学会においても高く評価されている。よって審査員一同は、早川 敦が博士(農学)の学位を受けるに十分な資格を有するものと認めた。