

学 位 論 文 題 名

食料の生産・供給に伴う地域における
窒素循環と環境負荷の評価に関する研究

学位論文内容の要旨

日本は食料と飼料の最大の輸入国であり、海外から食料や飼料として多量の窒素が持ち込まれる。そのため、人間尿尿や家畜糞尿といった廃棄物が多量に発生し、それらによる環境への窒素負荷が指摘されている。一方、窒素は植物に必須の多量要素であり、化学肥料として農地に施用されるが、その過剰施用に伴う窒素汚染がしばしば問題にされている。地域は、食料・飼料生産の場である農地と、輸入食料・飼料も含めてその消費の場である畜産、人間食生活から構成されており、窒素汚染はそれらの場における窒素循環と密接に関係していると考えられる。本研究では、農地、畜産と人間食生活における窒素収支を見積もる窒素フローモデルによって、農地の余剰窒素と、家畜飼養や人間食生活に伴う排泄窒素の廃棄量を推定し、測定した河川水の窒素濃度と比較検証することによって、河川水や地下水の窒素汚染に対する影響評価を行った。

1. 北海道の市町村レベルでの食料の生産・供給に伴う環境負荷量

1990-95年の統計データを用いて、北海道の212市町村の廃棄窒素量と農地の蓄積窒素量を見積もった。

1) 廃棄窒素量は、人口密度と有意な正の相関があり、人口密度が200人 km^{-2} 以上の都市部では、その量は $600\text{kgN km}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 以上と多かった。

2) 農地の蓄積窒素量は、糞尿発生量が多い道南の噴火湾沿岸から苫小牧周辺の市町村で $240\text{kgN ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 以上と標準施肥量の約2倍の蓄積を示し、次いで十勝～北見・網走の畜産畑作地域で $120\text{kgN ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 以上と多かった。一方、道東・道北の草地酪農地域では、農地の蓄積窒素量は、しばしば $<0\text{kgN ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ と負の値を示した。

2. 北海道の融雪期における河川水水質の特徴

北海道の島嶼部を除く208市町村の主要河川において、1998年の融雪期に全窒素濃度を測定し、全リン濃度と溶存ケイ酸濃度の地域性を、土地利用と土壌条件から特徴づけた。

1) 河川水的全窒素濃度が環境基準の 1mgN L^{-1} を越える市町村は、道南の噴火湾沿岸、十勝と北見・網走の畜産畑作地域、札幌市周辺にみられ、これらの地域では全リン濃度も高かった。

2) 廃棄窒素量および農地の蓄積窒素量と、窒素流出の大きい融雪期に測定した河

川水の全窒素濃度との関係を検討した結果、河川水の全窒素濃度は、廃棄窒素の影響をより強く受けていることが示唆された。

3) 噴火湾では、春季にホタテ貝毒や富栄養化に関与する鞭毛藻類が増殖することが示唆されている。この地域は、未風化の火山灰土地帯であり、融雪期の河川水のケイ酸濃度が低く、Si/N比およびSi/P比が鞭毛藻類の増殖を促す閾値（それぞれ2.7と64.3）を下回っていた。この地域での窒素とリンの流出は沿岸海域の富栄養化をもたらすことが懸念された。

3. 都市部における尿尿由来の廃棄窒素の行方

人口密度が200人 km^{-2} を越える都市部では、廃棄窒素量が多いにも関わらず主要な河川水の全窒素濃度は 2mgN L^{-1} 以下であった。その理由を明らかにするために、北海道内で第2の人口をもつ都市部である旭川市の7地区において、河川水の詳細な調査を行い、都市部の尿尿由来廃棄窒素の行方について検討した。

その結果、尿尿由来の廃棄窒素は、下水処理場、さらに汚泥として廃棄物処分場へと越境移動していた。下水処理場では、窒素の50%程度が除去されるにすぎず、 $24\text{--}28\text{mgN L}^{-1}$ の排水が見られた。汚泥の投棄される最終処分場でも、 100mgN L^{-1} を越える排水がみられ、それらの排水がその地域の河川水の窒素汚染の大きい点源となっていた。

4. 不適切な糞尿処理による窒素汚染

道東の大規模草地酪農地域では、農地の蓄積窒素量から見積もった浸透水の窒素濃度は $<0\text{mgN L}^{-1}$ であった。しかし、既往の報告では、家畜糞尿の野積みや素掘ラグーン貯蔵といった不適切な処理によって、地下水に最大 19mgN L^{-1} の窒素濃度が認められている。また、旭川市江丹別川での詳細な調査では、豚糞野積み場所から河川水へ流出する地下浸透水があり、その全窒素濃度が約 300mgN L^{-1} であったことも認められた。これらの問題に対しては、家畜糞尿の管理を考慮できる農場スケールでの評価を行う必要が認められた。

5. 農場スケールでの窒素フローの見積もり

1) 北海道大学農学部附属牧場（以下、附属牧場）に窒素フローモデルを適用するとともに、牧場中央を流れるケバウ川を通しての窒素流出量を測定した。その結果、林地を含めた457haの附属牧場全体では 14.6MgN yr^{-1} の余剰窒素が生じていた。河川水を通しての窒素流出量は、7か月間で余剰窒素の43%に相当する 6.3MgN であり、残りは既往の報告から融雪期に流出すると考えられた。

2) また、酸性雨の原因となる NH_3 揮散が糞尿貯蔵中に生じていると示唆され、その量は、畜舎で発生した糞尿窒素量の36%に相当する 2.0MgN yr^{-1} であった。その値は、欧米や日本における既往の報告と同程度であった。

6. 結論

地域における窒素フローの見積もりと、河川水や地下水の窒素濃度との比較検証によって、地域レベルで農地の余剰窒素と家畜飼養や人間食生活に伴う廃棄窒素が河川水や地下水の窒素汚染に及ぼす影響を定量的に評価できることを明らかにした。窒素汚染には、都市部での尿尿由来の廃棄窒素の影響や不適切な糞尿処理に起因する窒素

流出といった点源の影響が大きかった。また、同程度の負荷であっても土壌条件により水圏への影響が異なる可能性も示唆された。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 波多野 隆 介
副 査 教 授 但 野 利 秋
副 査 教 授 大久保 正 彦
副 査 教 授 長 澤 徹 明

学 位 論 文 題 名

食料の生産・供給に伴う地域における 窒素循環と環境負荷の評価に関する研究

本論文は11章からなり、図56、写真2、表13、付表18、引用文献206を含む総頁数157の和文論文である。別に参考論文が5編添えられている。

日本は世界最大の食料と飼料の輸入国であり、その輸入量は自国の生産量の2.7倍に相当する。そのため、人間と家畜から多量の有機廃棄物が生じ、それに含まれる栄養塩類の環境への負荷が懸念されている。一方、農地には化学肥料が多く施用され、野菜畑を中心に飲用水基準である硝酸態窒素10mg/L以上の農地排水が生じている。欧米各国でも家畜糞尿からのアンモニア揮散や、農地からの硝酸溶脱が問題となり、近年では降雨とともに供給されたアンモニウムが森林土壌に窒素飽和をもたらし、土壌の酸性化とともに河川への窒素流出も問題となっている。世界環境計画は、現在の地球には過去人間活動が無かった時代の2倍の窒素が巡っていると見積もり、人間活動による窒素フローを抑制する必要があることを課題としてあげている。そのためには、食料飼料を生産し輸出する場である農地系と、それらを輸入し消費する場である家畜飼養系および人間生活系からなる地域における窒素フローの実態を把握する必要がある。

本研究は、農地における窒素余剰量と、家畜と人間の排泄窒素の廃棄量を、環境へ流出可能な窒素量として推定し、河川水や地下水の窒素濃度と比較するとともに、河川水質の解析を行ない、これらを総合化して地域的な問題点を評価する方法を構築しようとしたものである。以下にその結果を要約する。

1. 北海道の市町村レベルでの食料の生産・供給に伴う環境負荷量

1990-95年の統計データを用いて、北海道212市町村の廃棄窒素量と農地の蓄積窒素量を見積もり、以下の結果を得た。

1) 廃棄窒素量は人口密度と有意な正の相関があった。人口密度が200人/km²以上の都市部の廃棄窒素量は年間600kgN/km²以上であった。

2) 農地の蓄積窒素量は、噴火湾沿岸から苫小牧周辺の畜産畑作地域では、標準施肥量の約2倍の年間240kgN/ha以上であり、次いで十勝～北見網走の畑作地域で120kgN/ha以上と見積もられた。

3)道東・道北の草地酪農地域では負の値となる市町村が多かったが、実際には地下水への硝酸汚染がスポット状におこっており、不適切な糞尿管理が問題であった。

2. 北海道の融雪期における河川水水質の特徴

北海道の島嶼部を除く 208 市町村の主要河川において、窒素流出が最も多くなる融雪期の河川水質を測定し、その地域性を土地利用と土壌条件から検討し、以下の結果を得た。

1) 河川水の全窒素濃度が環境基準の 1mgN/L を越える市町村は、噴火湾沿岸の畜産畑作地域、十勝と北見・網走の畑作地域、および石狩低地帯の人口密集地域にみられた。

2) 河川水の全窒素濃度は農地の蓄積窒素量よりも廃棄窒素量の影響をより強く受けていた。しかし人口密度が高い都市部では、廃棄窒素量が多いにも関わらず主要河川の全窒素濃度は 2mgN/L 以下と予想外に低かった。

3) 噴火湾沿岸は未風化な粗粒質火山放出物地帯であり、河川水のケイ酸濃度が十勝、北見・網走より低く、その Si/N および Si/P モル比が、赤潮につながる鞭毛藻類の増殖を促す $\text{Si/N}=2.7$ および $\text{Si/P}=64.3$ の閾値を下回っていた。

3. 都市部における尿尿由来の廃棄窒素の行方

主要河川への窒素負荷が小さかった都市部の廃棄窒素の行方を検討するため、北海道第2の人口をもつ旭川市の7地区において詳細な河川水質調査を行い、以下の結果を得た。

1)7地区の尿尿由来の廃棄窒素は、一ヶ所の下水処理場に集められ、さらにその汚泥は山林の中の廃棄物処分場へ持ち込まれていた。

2)下水処理場からは $24\text{--}28\text{mgN/L}$ の高濃度の排水があり、尿尿窒素の約 50%程度が除去されていると見積もられた。最終処分場からの排水は、 100mgN/L を越えており、山林河川への窒素負荷の 83%を占める巨大な点源となっていた。

5. 農場スケールでの窒素フローの見積もり

農場スケールでの窒素収支を検討するために、家畜糞尿管理を含む北海道大学農学部附属牧場の個々の圃場での窒素フローを見積もり、牧場中央を流れるケバウ川を通しての窒素流出量を測定し、以下の結果を得た。

1)林地を含めた 457ha の附属牧場全体で年間 14.6MgN の余剰窒素が生じていた。林地における窒素蓄積量は 12kgN/ha であった。放牧草地では放牧時の排泄が、飼料畑では化学肥料施与が主要な窒素供給源であり、それらの蓄積窒素量は 80kgN/ha 以上、最大 190kgN/ha であった。

2)河川水への窒素流出量は、植物生育期間の7か月間で余剰窒素の 43%に相当する 6.3MgN に達し、その 90%が 50mm 以上のまとまった降雨時に生じていた。また、農地の蓄積窒素量の多い圃場からの排水濃度は 10mgN/L を越える場合も認められた。

3)畜舎で発生した糞尿窒素量の 36%に相当する 2.0MgN が貯蔵中に減少しており、アンモニア揮散によるものと思われた。この量は欧米での発生率に相当するものである。

以上のように、窒素フローモデルによる窒素収支と河川水濃度をあわせて解析することにより、農地系、家畜飼養系、人間生活系におけるそれぞれの人間活動が、環境への窒素流出を起こしているという構造を、かなりの程度評価できることが示された。膨大な食料・飼料が輸入されている我が国では、これら系間の窒素循環を構築する必要があると認められ、本研究はその方針を定める根拠を得るための方法を述べたものであり、その成果は学術的にも高く評価される。よって審査員一同は、南雲 俊之は博士(農学)の学位をうけるのに十分な資格を有するものと認めた。