

学 位 論 文 題 名

Creation of an Eco-Balance model to assess environmental risks caused by nitrogen load in a basin-agroecosystem

（流域農業生態系における窒素負荷の環境影響評価のための  
エコバランスモデルの構築）

学位論文内容の要旨

近年、人間活動により生態系における窒素循環量が増加している。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っている。持続可能な窒素循環を構築するには反応性窒素のフローとその不確実性の定量的な把握が不可欠である。本研究では、農業生態系を農地、家畜、人間サブシステムに分け、システム間の窒素フローの関係をエコバランスモデルによって解析した。エコバランスモデルはフローを定量化する窒素収支と、定量化された生産量と負荷量の関係を解析するエコバランス評価に分けられる。必要なデータはシステムの状態を示すインプットデータと、管理法を示すインベントリデータである。研究対象地域は開拓時より土地利用管理法に関するデータが存在し、現在水田とタマネギ栽培による集約的土地利用が展開され、農業による環境負荷が顕在化する可能性がある三笠市を含む幾春別川流域とした。

1. 農地サブシステムにおける投入量は、化学肥料、堆肥、残渣、窒素降下物、灌漑水量、窒素固定とし、農産物の搬出、 $N_2O$  放出、 $N_2$  および  $NH_3$  揮散との差を農地余剰窒素とした。サブシステム間のフローは堆肥、残渣および自給飼料・食料の合計とし、損失フローは  $N_2O$  放出、 $N_2$  および  $NH_3$  揮散、農地余剰窒素、廃棄窒素の合計とした。主な土地利用（水田、コムギ、ダイズ、タマネギ、野菜、草地）のインプットデータは聞き取り調査より得た。インベントリデータのマメ科作物の窒素固定量は文献に従って収量の関数とし、その他の作物は固有値とした。 $N_2O$  放出量はモニタリング値に、 $N_2$  および  $NH_3$  揮散量は文献に従い窒素施与量の関数とした。その他のインプット・インベントリデータは統計資料および文献値より得た。これらの値の変動により生じる窒素収支の不確実性を、モンテカルロシミュレーション (@Risk) で評価した。結果の不確実性に及ぼすデータの変動の影響はシミュレーション結果を回帰分析することで評価した。

2. 2002/03 の農地余剰窒素が水質に影響を与える可能性が高いとされる  $50 \text{ kgN ha}^{-1}$  を超える確率は水田、コムギ、ダイズでは 15% 以下であったのに対し、タマネギ、野菜、草地では 50% を超えた。農地余剰窒素の変動係数は 51-630% の範囲で、ダイズで最も高かった。その不確実性には、ダイズでは収量に依存する窒素固定が、他の土地利用では施肥量および  $N_2$  揮散量が最も影響した。個々の窒素フローの内、化学肥料施与量が最も大きく、次いで農産物の搬出フローが最も大きかった。系全体の損失フローの不確実性にはタマネギの施肥量および人糞尿の廃棄量が最も影響していた。これら不確実性への影響が大きい因子を正確に見つかり、基準を設けなければ

ば全システムの負荷量を有意に減らすことはできない。

3. 窒素収支の精度は、計算した農地余剰窒素や廃棄窒素と、2003年に実測した河川水および暗渠水の窒素濃度の関係を解析することにより検証した。暗渠の硝酸態窒素濃度は、農地余剰窒素を余剰水量で除すことにより推定した地下浸透水窒素濃度と有意な正の相関を示し、農地余剰窒素の約20%が硝酸態窒素として溶脱していることが示唆された。農地余剰窒素量の多かったタマネギ畑の暗渠排水の硝酸態窒素濃度は収穫後に最大  $20\text{mgNO}_3\text{-N L}^{-1}$  の高い値を示した。の河川水の全窒素および硝酸態窒素濃度は支流域における農地割合および農地余剰窒素と正の相関を、特に施肥後および収穫後に示した。以上の検証により、窒素収支法から求めた農地余剰窒素や廃棄窒素は、農業生態系からの環境負荷、特に水質に対する影響を評価する上で有効な指標を与えることが示された。

4. 以上のデータを用い、農地割合を変えたシナリオと肥培管理法を変えたシナリオを作成することにより2002/03年の窒素循環の生産と環境負荷の関係を解析するエコバランス評価を行った。農地割合を10%刻みでランダムに組み合わせ、現状の生産量以上、余剰窒素量以下の生産、余剰窒素量を持つ土地利用の組み合わせを調べた。その結果は303通りあり、タマネギの面積を減らし、ダイズの面積を増やすのが有効であると示された。肥培管理法は生産量を最大にする施肥量のシナリオ(Max)と余剰窒素を最小にしたシナリオ(Min)について解析を行った。Maxでは、生産性を維持しつつ農地余剰窒素を20%削減できる可能性が示されたが、Minでは農地余剰窒素の減少分だけ生産量が減少した。生産と環境負荷のトレードオフを回避するためには、土地利用の組み合わせを変え、収量と施肥量の関係を最適化する必要があると結論づけられた。また、家畜、人間サブシステムより生じる廃棄窒素は全システムの損失フローの38%を占め、家畜、人間サブシステムのシナリオ解析も必要であることが示された。

5. エコバランスモデルは幾春別川にはほぼ含まれる三笠市の1912年から2002年までの窒素フローの変化に応用した。インプットデータは統計値を、インベントリデータは現在の文献値を用いた。窒素収支法による窒素フローの定量化の結果、農地サブシステムでは、生産性が1912年の  $31\text{ kgN ha}^{-1}$  であったのが、1950年代後半から急速に増加し2002年では3倍になっていた。施肥量は1912年で最少の  $68\text{ kgN ha}^{-1}$  であり、1950年代に最大の  $250\text{ kgN ha}^{-1}$  であった。全システムにおける窒素フローは、食料の購入が主な窒素源で、糞尿がすべて堆肥として使われた堆肥中心期(MBP、1912-1950)、人糞尿の施用が減り化学肥料の使用が増加し生産性が増加した移行期(TP、1950-1970)、化学肥料中心期(CBP、1970-2002)に分けられた。MBPの主な環境負荷源は農地余剰窒素と $\text{NH}_3$ 揮散で、CBPでは農地余剰窒素と廃棄窒素であった。MBPはコムギやダイズなど畑作物が90%近かったが、TPでは45-80%を水田が占め、CBPでは水田割合が30%に減少しタマネギの面積が20%まで増加した。1978-2002年の三笠市の下流地点での全窒素濃度は、農地割合および農地余剰窒素と廃棄窒素の合計値と正の相関を示し、求めた窒素フローの妥当性を裏付けた。

生産性と損失フローの関係をエコバランス評価によって解析したところ、先に示した3期ともに、いずれかの損失フローが生産量と正の相関を示し、トレードオフの関係にあった。生産性が増加した移行期には、農地サブシステムからの損失フローは負の関係となる場合が最も多かったが、全システムの廃棄窒素および系内の全窒素フローに対する全損失フローの比である損失係数は生産量と正の相関となり、農地サブシステムでトレードオフが回避されても、全システムにおいては回避されなかった。

6. 以上のことより、窒素収支法は圃場から流域レベルの環境負荷を推定する上で有効であることが示された。窒素フローの不確実性を定量的に把握することにより、スケールごとにその要因を解明し、モニタリング研究を重点的に行うべき分野を抽出することが可能となった。収支の結果は、窒素フローの構成要素の関係解析を行うエコバラス法により評価でき、それを通して、対象とした系の環境負荷の改善方向を提示できると結論づけられた。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 波多野 隆 介

副 査 教 授 大 崎 満

副 査 教 授 長谷川 周 一

## 学 位 論 文 題 名

### Creation of an Eco-Balance model to assess environmental risks caused by nitrogen load in a basin-agroecosystem

(流域農業生態系における窒素負荷の環境影響評価のための  
エコバランスモデルの構築)

本論文は10章からなり、図56、表20、引用文献264を含む137ページの英文論文である。他に参考論文4編が添えられている。

近年、人間活動により生態系における窒素循環量が増加している。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っている。持続可能な窒素循環を構築するには反応性窒素のフローを定量的に把握し、反応性窒素の環境と生産への影響とその要因を評価する必要がある。本研究は、農業生態系における生産と環境負荷に伴う窒素フローの関係を解析するためのエコバランスモデルの構築を通して、改善すべき要因を把握することを目的としたものである。

これまで、農業生態系を農地、家畜、人間サブシステムに分け、サブシステム間の窒素フローを見積もり、窒素収支法により、農地余剰窒素や廃棄窒素といった環境への負荷を定量化する方法が開発されてきた。本研究では窒素収支法を応用してエコバランスモデルを構築した。エコバランスモデルでは、土地利用面積、家畜頭数、人口などの状態を示すデータはインプットデータと呼ぶ。管理法にかかわる化学肥料および堆肥施与量、家畜および人間への窒素需給量、生産量と負荷量を産出するための係数をインベントリーデータと呼ぶ。インプットデータとインベントリーデータから求められる生産量と負荷量の関係解析をエコバランス評価と呼んでいる。

本研究では、過去からの統計資料によりインプットデータがそろっている三笠市、幾春別川流域農業生態系を対象にした。インベントリーデータの不確実性を評価するために、2002/03に主な土地利用(水田、コムギ、ダイズ、タマネギ、野菜、草地)の肥培管理の聞き取り調査を行い、施肥、収量を把握し、農地からの亜酸化窒素放出量の測定を行い、窒素収支法により農地余剰窒素と廃棄窒素を求めた。外部評価因子として、暗渠排水と河川水の硝酸態窒素濃度を測定した。

土地利用ごとの平均農地余剰窒素量を余剰水量で除して、排水中窒素濃度を推定した。その結果は、各土地利用で実測した暗渠排水中窒素濃度の平均値と有意な正の相関を示し

た。また、幾春別川各支流の河川水窒素濃度は各支流域の農地余剰窒素と正の相関関係を示した。これらの結果から、窒素収支の計算は十分な精度を持っていると判断した。

それぞれの土地利用の農地余剰窒素の変動係数は 51 から 630%と大きかった。窒素収支の不確実性を、モンテカルロシミュレーション(@Risk)で評価したところ、とくに窒素施与量のばらつきによるものであった。農家が同じ作物に対して窒素施与量を増減させる要素を把握し、精緻化していく必要を認めた。

2002/3 のインプットデータを用いて農地割合を変えた場合を想定し、エコバランス評価を行った。各土地利用のインベントリーデータは平均値を用いた。農地割合を変化させながらランダムに組み合わせ、生産量と農地余剰窒素量を見積もり、現状の生産量以上で、現状の農地余剰窒素量以下になる土地利用の組み合わせを抽出した。その結果、303 通りが認められ、タマネギの面積を減らし、ダイズの面積を増やすのが最も効果的であった。さらに、農地余剰窒素量を 0 にする施肥量を想定した結果、その分、生産量が低下するトレードオフが生じた。一方、それぞれの土地利用で最大収量を得る施肥量を想定した結果、農地余剰窒素量は現状と変わらなかった。したがって、生産量を増加させ農地余剰窒素量を減少させるためには、土地利用の組み合わせを最適化することが有効であると結論付けた。

さらに 1912 年から 2002 年の 90 年分のインプットデータを用い、インベントリーデータのうち家畜および人間への窒素需給量、生産量と負荷量を産出するための係数には現在のものを適用して、三笠市全体の窒素フローの変化を算出し、エコバランス評価を行った。1950 年までは、堆肥施用のみで、その後 1970 年までに化学肥料の使用量が増加し、その後化学肥料が中心になった。化学肥料中心期の農地余剰窒素量と廃棄窒素量の計算値の合計は、河川水窒素濃度と正の相関関係が認められ、解析の精度は十分であると判断された。すべての時期で生産量と負荷量にトレードオフの関係が認められた。とくに化学肥料中心期では、過去より農地余剰窒素量が少なく生産量が高いが、糞尿の廃棄窒素量が増加し、全負荷量の 38%を占めるに至った。化学肥料と堆肥施与量のバランスを設定する必要があることを認めた。

以上のように、本論文は農業生態系の窒素フローと窒素収支をエコバランスモデルに組み込み、生産量と負荷量を定量的に解析し、その改善方向を提示する手法を明らかにしたものであり、環境保全型農業の推進へ貢献するとともに、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木村園子ドロテアが博士(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。