

学位論文題名

Evaluating stream water quality through land use analysis and nitrogen budget approaches

(土地利用解析と窒素収支法による河川水質評価)

学位論文内容の要旨

産業革命以来、人間活動は地球の窒素循環を大きく変え、植物利用可能な窒素を2倍にした。このために地域レベルから地球レベルにわたって環境への深刻な影響が現れてきている。窒素は生物的形態変化により、生態系から水圏、大気圏へ他の栄養元素より素早く流出する。流出した窒素は、人間の健康、環境変動に影響し、自然および農業生態系を含む陸域および水圏生態系に影響を与える。窒素負荷はローカルレベルで生じ、大気圏や水圏に流出した窒素は大気と水の循環を通して国境を横切って移動し、その影響を世界中に広げる。農業は窒素施肥とマメ科作物の栽培を通して、人為起源の窒素の85%を地球に供給しており、発展途上国、先進国に関わらず窒素負荷の重要な原因となっている。集約的農業の多くが、とくに河川水や地下水の硝酸態窒素濃度を高め、飲用水汚染の原因となっている。今後の人口増加を考えると、窒素負荷に関連した問題を早急に緩和する必要がある。そのためには、農業流域において生じる窒素負荷の大きさとその発生原因を特定することは極めて重要である。窒素収支法は農業活動による河川水質への影響の大きさを評価する方法として検討され、土地利用の解析により河川水汚染の原因特定が試みられてきた。本研究の目的は、流域内の土地利用解析と窒素収支法を組み合わせることで農業による河川水質への影響を定量的に評価することである。

1. 集約的畜産、畑作酪農混合、軽種馬生産、酪農、水田畑作混合などさまざまな土地利用システムをもつ北海道の7地域において、土地利用割合が河川水窒素濃度へ与える影響を評価した。各地域は主要河川とその支流からなるいくつかの流域で構成されており、25000分の1地形図上でそれぞれの流域を区分し、その流域を構成する土地利用面積割合を読み取った。それぞれの地域は23から73の流域に区分され、各流域の出口の河川水の窒素濃度を測定した。調査は8月の平水時に行った。どの地域においても河川水の硝酸態窒素濃度は畑+草地面積割合と有意な正の相関関係が認められ、森林面積割合と負の相関関係があった。しかし水田面積割合とは関係がなかった。水田面積割合は有機態窒素と正の相関関係を示した。畑+草地面積割合と硝酸態窒素濃度の回帰式はほぼ原点を通り、その傾きは調査地域により異なった。そこで、この回帰式の傾きを、土地利用システムが河川水質へ与えるインパクトの指標として、インパクトファクターと定義した。インパクトファクターは集約的畜産地域で最も高く(0.040)、畑作酪農混合地域で中庸であり(0.020-0.030)、酪農地域と軽種馬生産地域および水田畑作混合地域では低かった(0.005-0.015)。

2. 集約的畜産地域における河川水硝酸態窒素濃度分布の結果には、著しく高濃度で、畑+草地面積割合との関係から大きく乖離する流域が含まれていた。1つの地点の硝酸態窒

素濃度は飲用水限界を超過する 10.9 mgN L^{-1} にも達する場合もあった。その理由を明らかにするため、当該支流域の重点調査を行った。支流源頭部からその地点までの流入水と、河川水の流量と全窒素濃度を 45 箇所 で測定した。その結果、当該流域における窒素負荷には、家畜糞尿の廃棄処理のためのラグーンからの排水が 40% 寄与していることが認められた。ラグーン排水の全窒素濃度は 63 mgN L^{-1} であり、明渠を通して支流に放出されていた。不適切な糞尿管理は点源となり河川水質の悪化に大きく寄与することを確認した。

3. 河川水質へのインパクトファクターの地域間差を定量的に明らかにするために、河川水質に影響を与える要因と考えられる、家畜密度、人口密度、化学肥料窒素施与量、堆肥窒素施与量、人間尿尿窒素の廃棄量、家畜糞尿窒素の廃棄量、農地の余剰窒素量を独立変数として回帰分析を行った。人間尿尿廃棄窒素量、家畜糞尿廃棄窒素量、農地の余剰窒素量は、地域のセンサスデータと統計データから窒素収支法を用いて求めた。本論文で算出したインパクトファクターとともに、文献値から求めた 2 地域のインパクトファクターも加えて解析した。ただし、本論文での水田畑作混合地帯の 2 地域の結果は、センサスデータが得られる行政区画が特定できないため解析から除いた。結局 7 地域の値を解析した。インパクトファクターは農地余剰窒素量、化学肥料窒素施与量、堆肥窒素施与量と有意な相関が認められた。相関係数はそれぞれ $0.93(P < 0.01)$ 、 $0.82(P < 0.05)$ 、 $0.72(P < 0.05)$ であった。このことは、インパクトファクターが農地由来の面源に強く支配されていることを示している。

4. 北海道 212 市町村の土地利用、人口および家畜飼養頭数データ、施肥、家畜飼養に関する統計データを用いて農地余剰窒素量を求め、先の回帰式から市町村単位のインパクトファクターを推定し、地理情報システムを用いて図示した。十勝、胆振、網走のような畑作酪農混合農業地帯が高いインパクトファクターを示した。予測したインパクトファクターの分布パターンは別の研究で報告されている各市町村における融雪期の主要河川の硝酸態窒素濃度分布パターンと似ていた。そこで予測したインパクトファクターと各市町村の畑+草地面積割合から、全河川の硝酸態窒素濃度を計算した結果、計算値と実測値には有意な正の相関 ($r = 0.62$, $p < 0.001$) があつた。その多くは 1 : 1 に近かつたが、実測値が計算値より極端に高い市町村も認められ、点源の影響が考えられた。

5. 1970 年から 2000 年までの北海道の支庁レベルの土地利用、人口および家畜飼養頭数の変化を評価し、食料の生産と消費に伴う窒素の発生負荷量を推定した。1970 年から 2000 年まで全道の人口は徐々に増加したが、農家人口は 64% 減少した。この間、ほとんどの支庁の畑および草地面積は増加したが、水田面積は減少した。乳牛および肉牛飼養頭数は増加していた。窒素収支の結果、家畜頭数の増加による廃棄窒素の増加が生じており、その増加率は年間 1% であつた。1970 年から 2000 年の間に農地余剰窒素量もほとんどの地区で増加していた。全道では 1970 年では農地余剰窒素量は負であつたが、1980 年には正となり、1990 年には廃棄窒素量に匹敵するほどになった。廃棄窒素量と農地余剰窒素量の増加は、河川水中硝酸態窒素濃度を上昇させてきたものと思われる。

6. 結論として、流域内の土地利用は河川水質に影響し、畑+草地面積割合が高まると河川水中の硝酸態窒素濃度が高まる。土地利用の河川水質へのインパクトの強さは面源としての農地の余剰窒素量が多いほど大きく、点源としての廃棄家畜糞尿によって影響をうける。河川水中の硝酸態窒素濃度の予測に、土地利用解析と窒素収支法は極めて有効であつた。水圏への富栄養化を生じさせない農業のために、流域内の畑+草地面積割合と農地余剰窒素量および廃棄家畜糞尿窒素量を正しく管理することが重要である。

学位論文審査の要旨

主査	教授	波多野	隆介
副査	教授	矢沢	正士
副査	教授	長澤	徹明
副査	教授	長谷川	周一
副査	助教授	中原	治

学位論文題名

Evaluating stream water quality through land use analysis and nitrogen budget approaches

(土地利用解析と窒素収支法による河川水質評価)

本論文は10章からなり、図38、表12、引用文献148を含む150ページの英文論文である。他に参考論文3編が添えられている。

産業革命以来、人間活動は地球の窒素循環を大きく変え、植物利用可能な窒素を2倍にした。しかし、同時に生態系から水圏、大気圏へ窒素が流出し、人間の健康、環境変動への影響も健在化している。今後の人口増加を考えると、窒素負荷に関連した問題を早急に緩和する必要がある、農業流域において生じる窒素負荷の大きさとその発生原因を特定しなければならない。本研究は、流域内の土地利用解析と窒素収支法を組み合わせることで農業による河川水質への影響を定量的に評価することを目的に行われたものである。

1. 集約的畜産、畑作酪農混合、軽種馬生産、酪農、水田畑作混合などさまざまな土地利用システムをもつ北海道の7地域において、土地利用割合が河川水窒素濃度へ与える影響を評価した。地域を23から73の流域にわけ、その流域を構成する土地利用面積割合を読み取り、各流域の出口の河川水の窒素濃度を測定した。いずれの地域においても河川水の硝酸態窒素濃度は畑+草地面積割合と有意な正の相関関係を認め、森林面積割合と負の相関関係を認めたが、水田面積割合との関係は認められないことを示した。畑+草地面積割合と硝酸態窒素濃度の直線関係の傾きは各地域により異なり、この回帰式の傾きを、土地利用システムが河川水質へ与えるインパクトの指標として、インパクトファクターと定義した。インパクトファクターは集約的畜産地域で最も高く(0.040)、畑作酪農混合地域で中庸であり(0.020-0.030)、酪農地域と軽種馬生産地域および水田畑作混合地域では低かった(0.005-0.015)。

2. 集約的畜産地域には、著しく高濃度の河川水硝酸態窒素濃度を示し、畑+草地面積割合との関係から大きく乖離する流域が存在した。当該支流域の重点調査の結果、当該流域における窒素負荷が、家畜糞尿の廃棄処理のためのラグーン排水が40%寄与していることを認め、ラグーンが窒素負荷の点源となっていることを示した。

3. インパクトファクターは、化学肥料窒素施与量、堆肥窒素施与量と5%水準で有意な相関が認められ、農地への施肥が河川水硝酸態窒素濃度を上昇させる要因と認められた。さらに人間尿尿廃棄窒素量、家畜糞尿廃棄窒素量、農地の余剰窒素量を、地域のセンサスデータと統計データから窒素収支法を用いて求めた結果、インパクトファクターは農地余剰窒素量と1%水準で有意な相関係数0.93の関係をもつことを認め、インパクトファクターが農地由来の面源に強く支配されていることを示した。

4. 北海道212市町村の土地利用、人口および家畜飼養頭数データ、施肥、家畜飼養に関する統計データを用いて農地余剰窒素量を求め、先の回帰式から市町村単位のインパクトファクターを推定した結果、畑作酪農混合農業地帯で高いインパクトファクターを認めた。予測したインパクトファクターと各市町村の畑+草地面積割合から、全河川の硝酸態窒素濃度を計算し、計算値と実測値には有意な正の相関($r=0.62$, $p<0.001$)があることを示した。その多くは1:1に近かったが、実測値が計算値より極端に高い市町村も認められ、点源の影響の可能性を示した。

5. 1970年から2000年までの北海道の支庁レベルの土地利用、人口および家畜飼養頭数の変化を評価し、食料の生産と消費に伴う窒素の発生負荷量を推定した。1970年から2000年まで全道の人口は徐々に増加したが、農家人口は64%減少していた。この間、ほとんどの支庁の畑および草地面積は増加したが、水田面積は減少していた。乳牛および肉牛飼養頭数は増加していた。窒素収支の結果、家畜頭数の増加による廃棄窒素の顕著な増加を認めた。1970年、農地余剰窒素は負であったが、1980年には正となり、1990年には廃棄窒素量に匹敵しており、このような廃棄窒素と農地余剰窒素の増加により、河川水中硝酸態窒素濃度の上昇が生じてきた可能性が高いことを示した。

6. 以上の結果から、土地利用の河川水質へのインパクトの強さは面源としての農地の余剰窒素量が多いほど大きく、点源としての廃棄家畜糞尿によって大きな影響をうけると要約し、水圏への富栄養化を生じさせない農業のために、流域内の畑+草地面積割合と農地余剰窒素および廃棄家畜糞尿窒素の把握が重要であると結論した。

以上のように、本論文は農業による河川水質への影響の定量的評価手法を検討し、土地利用解析と窒素収支法の有効性を示したものであり、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 Krishna P. Woli 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。