

環境税による農業汚染の軽減効果: 硝酸性窒素の表層流出における統合モデル分析

田中 勝也¹

¹正会員 広島大学助手 大学院国際協力研究科(〒739-0047 広島県東広島市鏡山1-5-1)

E-mail: katsuyat@hiroshima-u.ac.jp

本研究では環境税による農業汚染の軽減効果として、窒素肥料に対する課税(窒素税)による硝酸性窒素の表層流出量の変化を考察した。実証分析はトウモロコシ・大豆の輪作が盛んな米国アイオワ州デモイン川流域を対象とし、土地利用モデルとSWATモデルから構成される統合モデルによる政策シミュレーション分析を実施した。

統合モデルによる分析結果によれば、窒素税の導入により汚染型農業生産(トウモロコシの連作およびトウモロコシ・大豆の輪作)の面積が減少し、非汚染型の農業生産(牧草その他)の面積が増加することが確認された。土地利用の変化が顕著なのは比較的高い税率(200%以上)においてであり、窒素肥料に250%の税率を課すことにより、デモイン川流域からの硝酸性窒素流出量を約70%削減しうることが示された。

Key Words : agricultural pollution, nitrate-N, land use, hydrologic cycle, SWAT

1. はじめに

米国では1972年の水質汚染防止法(Clean Water Act)施行以来、河川・湖沼の水質改善に向けた政策が数多く実施されてきた。しかしながら農業汚染、特に農地に投入された化学肥料の表層流出による水質汚染に対する取り組みは十分とはいえない。2000年の水質目録によれば、米国における水質汚染の最大要因は農業であり、特に流出する化学肥料を主要な汚染物質の1つとしている。

農業生産で使用される多様な化学肥料の中でも、窒素肥料はもっとも一般的に使用されるものの1つである。投入された窒素肥料のすべてが作物の育成に使用されるわけではなく、その一部は硝酸性窒素($\text{NO}_3\text{-N}$)として土中に浸透するか、土壌表層より流出して表層流や地下水を汚染する原因となる。河川に流出した硝酸性窒素は乳幼児への健康被害や、河口・沿岸部での富栄養化の原因となる。特に富栄養化による赤潮(hypoxia)の発生は近年多くの海域で確認されており、漁業やレクリエーションなどの経済活動や、水界生態系への被害が問題となっている。

米国中西部は世界でも有数の農業生産地帯であり、この一帯を流れるミシシッピ川では硝酸性窒素による汚染が特に顕著である。ミシシッピ川の河口に位置するメキシコ湾沿岸部では、世界でも最大規模の約20,000平方キロの赤潮が毎年発生しているのが現状であり、米国でも

最大の農業汚染といえる。

このような農業汚染問題に対し、米国では農地保全の手段として保全地役権(conservation easement)プログラムが数多く実施されている。中でも保全回復プログラム(Conservation Reserve Program; CRP)は侵食されやすい耕地を10-15年の間休耕する場合、米国農務省(USDA)がその地代を支払うという施策である。1985年の農業法(Food Security Act of 1985)により始まったこのプログラムは、USDAの支出規模で見ると最大の環境政策となっている。

しかしながらこうした保全地役権プログラムは費用対効果の問題が指摘されており^{10) 14)}、より効率的な対策として環境税の導入が提言されている^{3) 12) 13)}。環境税にもさまざまな形態が考えられるが、硝酸性窒素による農業汚染対策としては汚染物質への直接課税、例えば窒素肥料に対する窒素税の導入が有効な可能性の一つといえる¹²⁾。米国の農業政策は伝統的に補助金が主体であり、課税に対する拒否反応は根強い。そのため窒素税の導入はアイオワ州の一部地域などに限定されており、その税率も低い水準にとどまっている。しかしながら環境税の汚染軽減効果を実証的に分析することは、農業汚染対策における保全地役権プログラム以外の代替案を検討する上で意義は大きいと考えられる。

本研究の目的は環境税としての窒素税が持つ、硝酸性窒素による農業汚染の軽減効果を実証的に考察すること

である。環境税の導入による環境負荷の軽減効果は、これまでも複数の実証研究で分析されてきた^{9, 10)}。しかしながら、既存の関連研究の多くは土地利用と環境負荷の関係性を統計的に予測しており、農地により異なる土壌・気象などの自然条件を考慮したものとはいえない。本研究では上記の関係性について自然条件を考慮した水文モデルにより予測しており、既存研究と比較してより現実的な分析が可能といえる。

実証分析の対象地域はアイオワ州デモイン(Des Moines)川流域である(図-1)。この流域は米国中西部でも農地からの硝酸性窒素流出が特に顕著であり、その主な要因として大量の化学肥料が必要とされるトウモロコシの大規模生産が挙げられる。表-1が示すようにデモイン川流域の土地利用形態は農業が主体で、トウモロコシの連作およびトウモロコシ・大豆の輪作が流域全体の70%近くを占めている。

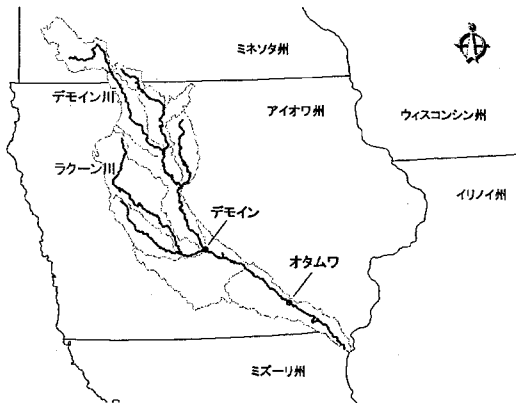


図-1 アイオワ州デモイン川流域

表-1 アイオワ州デモイン川流域の土地利用状況

土地利用	面積(ha)	シェア(%)
開放水域	42,482	1.2
湿地	66,237	1.9
森林	412,879	11.6
都市部	79,212	2.2
農業	2,951,532	83.1
トウモロコシ・大豆輪作(慣行耕起)	827,744	23.3
トウモロコシ・大豆輪作(保全耕起)	1,598,427	45.0
トウモロコシ連作(慣行耕起)	607	0.0
トウモロコシ連作(保全耕起)	1,821	0.1
牧草その他	522,933	14.7
計	3552342.688	100.0

本研究の構成は以下の通りである。まず第2章で本研究の分析手法である統合モデルについて説明する。また第2章では統合モデルを構成する(1)土地利用モデルと(2)SWATモデルについて、モデルの詳細をデータとともに説明する。次に第3章では統合モデルによる結果を提示し、本研究のシミュレーション分析の妥当性を検証する。第4章では本研究を通して得られた結果を要約し、最後に結論と今後の課題を述べる。

2. 分析手法とデータ

本研究では(1)土地利用モデル、および(2)SWATモデルから構成される統合モデルを使用して、環境税としての窒素税が硝酸性窒素流出量に与える影響の実証分析をおこなう。本章ではまず統合モデルの概要を説明し、次に各モデルと使用するデータについて述べる。

統合モデルの全体像は図-2に示すとおりである。このモデルではまず窒素税の導入による窒素肥料価格の上昇が、農地の利用形態(作物選択、耕起法選択)に与える影響を分析する。この分析にはランダム効用理論にもとづく土地利用モデルを利用する。モデルで分析された窒素税による土地利用の変化はSWATモデルに入力され、窒素税が土地利用の変化を通じて硝酸性窒素の表層流出量に与える影響をシミュレートする。以下、土地利用モデルおよびSWATモデルについて詳しく説明する。

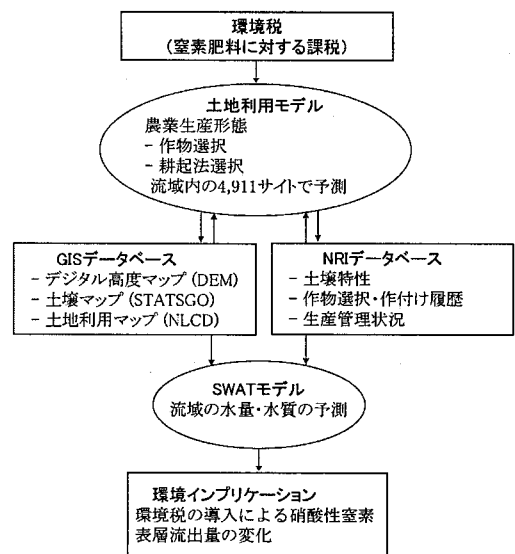


図-2 統合モデル概要

(1) 土地利用モデル

すでに触れたように、土地利用モデルの目的はデモイン川流域内の農地における(1)作物選択、(2)耕起法選択を分析することである。これらの選択は農業サイト別にロジットモデルを使用して推計する。ロジットモデルをなど離散型選択モデルによる土地利用の実証モデル化は、農業分野では耕起法選択¹⁰⁾、灌漑技術選択¹¹⁾、そして作物選択¹²⁾など多くの事例に応用されている。

ロジットモデルでは生産者が、サイト*i*で農作物*j*を選択する確率は以下のように定式化される⁹⁾：

$$\Pr(j)_i = \frac{\exp(\beta'_j x_i)}{\sum_j \exp(\beta'_j x_i)}, j = 1, 2, \dots, J \quad (1)$$

$\Pr(j)_i$ サイト*i*で作物*j*を選択する確率

x_i 独立変数(窒素肥料価格を含む)

β'_j 推計パラメータ

本研究における生産者の作物選択は、サイト*i*にトウモロコシ、大豆、牧草、その他作物のいずれかを生産することである($j = 0, 1, 2, 3$)。また生産者の耕起法選択は、サイト*i*での生産に用いる耕起法の決定であり、本研究では慣行耕起あるいは保全耕起の二者択一とする($j = 0, 1$)。よって作物選択には多項ロジットモデル、耕起法選択には二項ロジットモデルを使用する。なお慣行耕起とは収穫後の表層土における作物残渣が30%未満、保全型耕起は作物残渣が30%以上の耕起法の総称である¹⁰⁾。本研究では作物選択の予測にTanaka and Wu¹²⁾、耕起法選択の予測にWu *et al.*¹⁰⁾のモデル推計結果を利用した。

土地利用モデルで使用した主要データは自然資源目録(Natural Resource Inventory; NRI)から得た。NRIはUSDAの下部機関である自然資源保全局(Natural Resource Conservation Service; NRCS)が定期的に実施しているサイト調査の集計されたもので、全米で800万以上の土地(サイト)における土壌タイプや作付履歴、生産方法や管理状態など200以上の属性が記録されている⁹⁾。また窒素肥料価格や作物価格、農業物価指数などNRIに含まれない変数は、Agricultural Statisticsより収集した⁹⁾。

(2) SWATモデル

本研究では土地利用の変化による硝酸性窒素流出量の変化を、Soil and Water Assessment Tool (SWAT)を使用して分析する。SWATはUSDAの研究機関である農業研究局(Agricultural Research Service; ARS)により開発された水収支シミュレーションモデルである。同様の水収支モデルは数多く存在するが、SWATモデルの長所として(1)土地利用の変化による水や沈殿物、有機・無機化学物質の複雑な動きを広範囲の流域で長期間(最長で100年間)シミュレートできることが挙げられる⁹⁾。また(2)SWATエ

ンジンが物理方程式に基づいており、投入物と算出物の間に推定回帰式を使用していないことも長所といえる。

SWATにより流域モデルを作成するには、対象流域の空間データをはじめとするいくつかの詳細な情報を収集する必要がある。必要とされる代表的なデータは、

- デジタル高度マップ(DEM)
- 土壌マップ
- 土地利用マップ
- 気象情報

などである。本研究では30メートルメッシュのDEMと土地利用マップ(National Land Cover Data; NLCD)、およびポリゴンの土壌マップ(State Soil Geographic Database; STATSGO)を米国地質調査所(USGS)より入手した。またデモイン川流域の66の気象観測所から報告された1988年1月1日から1999年12月31日までの気象情報(日間最高気温、日間最低気温、日間降水量)は、Iowa Environmental Mesonetより提供を受けた。これらの空間データはGIS上で処理され、デモイン川流域のSWATモデルの作成に使用された。

3. 分析結果と考察

(1) 土地利用モデル

前節で述べたように、本研究の土地利用モデルはTanaka and Wuの推計結果を利用した。モデルで使用された主要な独立変数は肥料価格、作物生産による収益の期待値と収量の分散、過去の作付履歴、気象条件(気温および降水量)、土壌特性などである。肥料価格の推計パラメータは統計的に1%水準で有意であり、他の独立変数も1%ないし5%水準で概ね有意であった¹²⁾。モデル適合度を示す R^2 も0.73とパネルデータを使用した推計としては比較的高く、モデルの推計結果は妥当と考えられる。より詳しい推計結果はTanaka and Wuを参照されたい¹²⁾。

本研究では上述の土地利用モデルを使用し、窒素税の導入による農地の利用形態の変化について政策シミュレーションをおこなった。分析にはアイオワ州デモイン川流域の4,911の農業サイト(約360万ヘクタール)を対象とした。土地利用モデルの独立変数の1つである肥料価格は、窒素税の導入による直接的な影響を受ける「政策変数」である。本研究ではこの肥料価格を変化させることにより、窒素税を導入した場合の土地利用の変化を予測する。肥料価格は市場メカニズムより決定されるため、税率上昇により単調に変化するわけではない。しかしながら価格の予測を詳細におこなうことはデータの制約などにより困難である。よって本研究では窒素税率の変化により肥料価格が比例的に変化するものと仮定する。

窒素税の導入による農地利用形態の変化は、流域レベルで以下の通り予測する。作物 j 、耕起法 k により連作される(生産形態 n)流域全体での総面積は：

$$A_n = \sum_{i=1}^{4911} \Pr(j)_i^t \cdot \Pr(j)_i^{t+1} \cdot \Pr(k)_i^t \cdot a_i \quad (2)$$

ここで、

A_n 生産形態 n の総面積

$\Pr(j)_i^t$ t 年のサイト i での作物 j の選択確率

$\Pr(k)_i^t$ t 年のサイト i での耕起法 k の選択確率

a_i サイト i の面積

である。同様の推計をデモイン川流域で一般的な、以下の5種類の農地利用形態について実施した：

- トウモロコシ・大豆の輪作(慣行耕起)
- トウモロコシ・大豆の輪作(保全耕起)
- トウモロコシの連作(慣行耕起)
- トウモロコシの連作(保全耕起)
- 牧草その他

図-3は窒素税の導入による各種農地利用形態の総面積の変化を予測したものである。図-3では窒素肥料に課せられる税率の増加にともないトウモロコシ・大豆の輪作の作付面積が減少し、干し草その他の面積が増加していることがわかる。これはトウモロコシの育成には十分な肥料の投入が不可欠であること、また牧草には肥料の投入が一般的に不要であることから、妥当な結果といえる。また図-3によればトウモロコシ・大豆の輪作でも、保全耕起の農地の方が窒素税の導入に対する反応が大きい。税率が200%の場合慣行耕起の総面積の減少は18%だが、保全耕起の総面積は40%近い減少を示している。この耕起法による差異は土壌特性や耕起度(tillage intensity)、またその結果としての窒素肥料の利用効率の違いなどによるものと考えられる。この点は流域のさらに詳細なデータを入手し次第、検討を進めていきたい。

全体的にみると、トウモロコシ・大豆の輪作面積は窒素肥料に対する課税(と結果としての肥料価格の上昇)に対して弾力的である。よってこの政策は汚染型農業生産(トウモロコシの連作、トウモロコシ・大豆の輪作)から非汚染型農業生産(牧草その他)に切り替える有効な手段といえる。最後に、図-3が示すとおり比較的高率の課税が大規模な農地利用の変化には必要であるが、これは既存研究と比較しても妥当な結果といえる¹³⁾。高い税率が必要な理由としてWhittaker *et al.*は、窒素肥料の価格が低く、その需要が価格変化に対して非弾力的である点を指摘している¹³⁾。

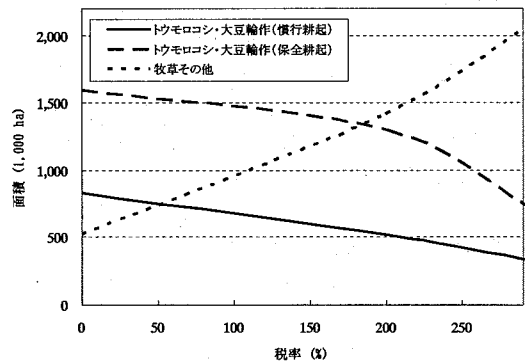


図-3 窒素税の導入による土地利用の変化

(2) SWATモデル

a) モデルの妥当性

前章で述べたデータを基にデモイン川流域のSWATモデルを構築し、1998年から1999年の2カ年に渡る水量・水質のシミュレーションをおこなった。予測された月間平均水量はUSGSの提供する観測値と比較し、本研究のSWATモデルが流域モデルとして妥当なものの検証をおこなった(図-4)。比較検証の対象とした場所はデモイン川流域の下流部に位置するアイオワ州オタムワ(Ottumwa)である(図-1)。

図-4が示すように、SWATモデルで予測された月間平均水量と実際の観測値の整合性は高く、適合度を示す R^2 は0.88である。モデルの適合性は1999年の予測においてとりわけ高く、単年度の R^2 は0.95となっている。また年間総水量の予測値と実測値の差異は約3%である。以上のことから、本研究のSWATモデルは、デモイン川流域の土壌水分移動や水流を反映した、妥当なものといえる。

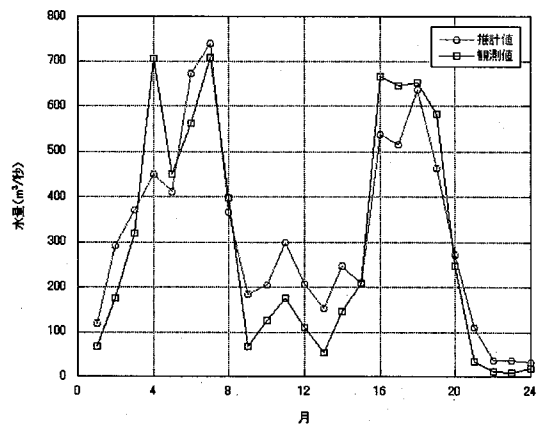


図-4 月間平均水量におけるシミュレーション値と観測値の比較(アイオワ州オタムワ, 1988-1999年)

b) 政策シミュレーション

土地利用モデルとSWATモデルの結果を統合させ、最後に窒素税の導入による硝酸性窒素の表層流出の軽減効果について政策シミュレーションを実施した(図-5)。まず図-5によれば、現状(窒素税導入前)での硝酸性窒素の表層流出量は約420万トンと推計された。

図-5が示すように、窒素肥料への課税による硝酸性窒素の表層流出量の減少は顕著である。税率が0%から120%までは硝酸性窒素の流出量減少の割合は小さく単調であるが、税率が120%から220%の間ではその減少量は著しく増大する。税率が250%の場合硝酸性窒素の流出量は1,200万トンを下回り、これは課税前の水準と比較して約70%の減少に相当する。

以上の結果から、窒素肥料に対する課税は硝酸性窒素の表層流出による農業汚染に対し、一定の効果的を持つ考えられる。表層流出量の大幅な削減には高い税率(例えば流出量を半減させるのに必要な税率は200%)が必要とされるが、この点は前項で述べた通り窒素肥料の価格が低いこと、そのため窒素肥料の需要が価格変化に対して非弾力的であることが理由として挙げられる^{9) 13)}。よって、本研究の結果は既存研究と比較しても妥当なものと考えられる。

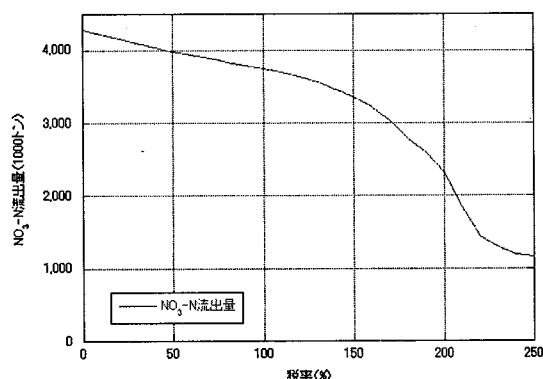


図-5 窒素税の導入による硝酸性窒素表層流出量の変化

4. まとめと結論

本研究では環境税による農業汚染の軽減効果として、窒素肥料に対する課税(窒素税)による硝酸性窒素の表層流出量の変化の分析をおこなった。実証分析はトウモロコシ・大豆の輪作が盛んな米国アイオワ州デモイン川流域を対象とし、土地利用モデルとSWATモデルから構成される統合モデルによる政策シミュレーション分析を実施した。

統合モデルによる分析結果によれば、窒素税の導入により汚染型農業生産(トウモロコシの連作およびトウモロコシ・大豆の輪作)の面積が減少し、代わって非汚染型の農業生産(牧草その他)の面積が増加することが確認された。このような土地利用の変化が顕著なのは比較的高い税率(200%以上)においてであり、窒素肥料に250%の税率を課すことにより、デモイン川流域からの硝酸性窒素流出量を約70%削減しうることが示された。

ここで本研究の限界および課題として2点挙げる。第一に、本研究では環境税導入による農業汚染の軽減効果を、窒素税率と硝酸性窒素の表層流出量との関係性予測することで分析してきた。しかしながら、政策の実効性を議論する上でより重要な点は政策の持つ費用対効果の分析である。課税による環境負荷の軽減だけでなく、同時に発生する社会的費用も推計し、それらを比較検討することでより実証的な政策分析を進めることが可能となる。第二に、本研究では環境税の影響をデモイン川流域全体で分析してきたが、流域内の地域(小流域)による空間的な変化や特徴については触れてこなかった。地域ごとに生産形態や自然条件(土壌特性・気象条件など)が異なれば、環境税による影響も地域ごとに異なってくることが考えられる。またその場合、地域ごとに異なる税率を課すことが費用対効果を高める結果につながることも予想される。これらの点については今後の検討事項としたい。

最後に、硝酸性窒素による農業汚染は米国に限った問題ではないことは留意すべきである。例えば中国では化学肥料の投入量増加が顕著であり、1980年代後半には米国を抜いて世界最大の消費国となっている。結果として窒素肥料に由来する河川・沿岸部の水質問題が深刻となっている(例えば黄河流域)。今後は本研究の統合モデル分析手法を上述の課題を踏まえ一般化し、中国をはじめ米国以外の流域における農業汚染の分析に適用することを課題としたい。

謝辞：本研究の統合モデル作成にあたり、オレゴン州立大学のJunjie Wu教授、米国環境保護局のGerald Whittaker氏、アイオワ州政府土壌保全局のJerome G. Neppel氏に多大なご助力をいただいた。神戸大学の竹内憲司助教授にはシミュレーション結果の解釈などで有益なコメントを数多くいただいた。また3人のレフェリーの方々より示唆に富んだ数多くの貴重なコメントを受けた。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) Caswell, M. and Zilberman, D. : The Choice of Irrigation Technologies in California, *American Journal of Agricultural Economics*, Vol. 67, pp. 224-235, 1985.
- 2) Ervin, C.A. and Ervin D.E. : Factors Affecting the Uses of Soil Conservation Practices: Hypotheses, Evidence, Policy Implications, *Land Economics*, Vol. 58, pp. 277-292, 1982.
- 3) Huang, W. and Lantin, R. M. : A Comparison of Farmers' Compliance Costs to Reduce Excess Nitrogen Fertilizer Use Under Alternative Policy Options, *Review of Agricultural Economics*, Vol. 15, No. 1, 1993.
- 4) Lichtenberg, E. : Land Quality, Irrigation Development, and Cropping Patterns in the Northern High Plains, *American Journal of Agricultural Economics*, Vol. 71, pp. 187-194, 1989.
- 5) Long, S. J. : Regression Models for Categorical and Limited Dependent Variables. London: Sage Publications, 1997.
- 6) Napier, T.L., Thraem, C.S., Gore, A. and Goe W.R. : Factors Affecting Adoption of Conventional and Conservation Tillage Practices in Ohio, *Journal of Soil and Water Conservation*, Vol. 39, pp. 205-208, 1984.
- 7) National Agricultural Statistics Service : *Agricultural Statistics 2000*. Washington DC: USDA, 2000.
- 8) Natural Resource Conservation Service : *Summery Report: 1997 National Resources Inventory (revised December 2000)*. Washington DC: USDA, 2000.
- 9) Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., Srinivasan R., and Williams, J. R. : *Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2000*. Temple: Blackland Research Center, 2000.
- 10) Newburn, D., Berck, P., and Merenlender, A. : Habitat and Open Space at Risk and the Prioritization of Conservation Easements, *Paper Presented at the American Agricultural Economics Association Annual Meeting*, Providence, Rhode Island, July 24-27, 2005.
- 11) Novotny, V. : *Water Quality Second Edition: Diffuse Pollution and Watershed Management*. New York: John Wiley and Sons, 2003.
- 12) Tanaka, K. and Wu, J. : Evaluating the Effect of Conservation Policies on Agricultural Land Use: A Site-specific Modeling Approach, *Canadian Journal of Agricultural Economics*, Vol. 52, pp.217-235, 2004.
- 13) Whittaker, G., Fare, R., Srinivasan, R., and Scott, D. W.: Spatial Evaluation of Alternative Nonpoint Nutrient Regulatory Instruments, *Water Resources Research*, Vol. 39, pp. 1079-1088, 2004.
- 14) Wu, J. and Tanaka, K. : Reducing Nitrogen Runoff from the Upper Mississippi River Basin to Control Hypoxia in the Gulf of Mexico: Easements or Taxes?, *Marine Resource Economics*, Vol. 20, pp. 121-144, 2005.
- 15) Wu, J., Adams, R. M., Kling, C. L., and Tanaka, K. : From Micro-Level Decisions to Landscape Changes: An Assessment of Agricultural Conservation Policies, *American Journal of Agricultural Economics*, Vol. 86, pp. 26-41, 2004.

THE EFFECT OF ENVIRONMENTAL TAX ON AGRICULTURAL POLLUTION: AN INTEGRATED MODELING FRAMEWORK APPROACH TO NITRATE-N RUNOFF FROM THE DES MOINES WATERSHED, IOWA

Katsuya TANAKA

This study evaluates the effect of nitrogen fertilizer-use tax on nitrate-N runoff from the Des Moines Watershed in Iowa. This objective is achieved by developing the integrated modeling framework consisting of the land use and SWAT models. The land use model predicts farmers' crop choice, crop rotation, and conservation tillage adoption in the watershed. Predicted land use changes under the fertilizer-use tax are then integrated into the SWAT model to assess the level of nitrate-N runoff from the watershed. This study finds that the nitrogen fertilizer-use tax reduces "polluting" agricultural acreage and promotes "non-polluting" cropping practices. Although high tax rates are needed for significant land use changes, 250% tax rate is shown to reduce the aggregate nitrate-N runoff by 70% from the watershed.