

食料生産効率と環境改善のための総合的な  
窒素資源管理のシミュレーション分析

2016年1月

金 彬

食料生産効率と環境改善のための総合的な  
窒素資源管理のシミュレーション分析

筑波大学大学院  
生命環境科学研究科  
生命産業科学専攻  
博士（学術）学位論文

金 彬

# 目次

|                                       |    |
|---------------------------------------|----|
| 第1章 序論 .....                          | 1  |
| 1.1 研究背景 .....                        | 1  |
| 1.1.1 窒素循環の重要性 .....                  | 1  |
| 1.1.2 自然界の窒素循環 .....                  | 1  |
| 1.1.3 人為的影響下の窒素循環 .....               | 3  |
| 1.1.4 社会経済活動により発生された窒素負荷による環境問題 ..... | 7  |
| 1.2 循環型社会の重要性 .....                   | 10 |
| 1.3 既存研究 .....                        | 12 |
| 1.4 研究目的 .....                        | 14 |
| 1.5 研究手法 .....                        | 14 |
| 1.6 研究の流れ .....                       | 16 |
| 第2章 研究対象地域及び技術の概要 .....               | 18 |
| 2.1 松原市の概要 .....                      | 18 |
| 2.1.1 地理と気候 .....                     | 18 |
| 2.1.2 人口構成 .....                      | 20 |
| 2.1.3 資源状況 .....                      | 20 |
| 2.1.4 松原市の環境 .....                    | 21 |
| 2.1.5 水環境の状況 .....                    | 21 |
| 2.1.6 大気環境の状況 .....                   | 22 |
| 2.2 中国の環境基準と分類 .....                  | 25 |

|                                   |                    |           |
|-----------------------------------|--------------------|-----------|
| 2.2.1                             | 中国水環境基準            | 25        |
| 2.2.2                             | 中国の河川の水質分類         | 25        |
| 2.2.3                             | 中国大気環境基準           | 25        |
| 2.3                               | 中国政府の過去の対応及び新政策の動向 | 30        |
| 2.3.1                             | 過去の対応              | 30        |
| 2.3.2                             | 過去の政策の教訓           | 30        |
| 2.3.3                             | 新政策の動向             | 31        |
| 2.4                               | 松原市の肥料の使用状況        | 32        |
| 2.5                               | 肥料について             | 33        |
| 2.5.1                             | 肥料とは               | 33        |
| 2.5.2                             | 肥料の分類              | 33        |
| 2.6                               | バイオマスメタン発酵・発電技術の概要 | 37        |
| <b>第3章 環境・経済・窒素循環を視野に入れた総合的評価</b> |                    | <b>38</b> |
| 3.1                               | 研究内容               | 38        |
| 3.2                               | 松原市の窒素循環の現状        | 38        |
| 3.2.1                             | 松原市の主要窒素収支バランス     | 38        |
| 3.2.2                             | 松原市の農業の窒素収支バランス    | 40        |
| 3.2.3                             | 松原市の畜産業の窒素収支バランス   | 41        |
| 3.2.4                             | 松原市の製造業の窒素収支バランス   | 41        |
| 3.2.5                             | 松原市の生活消費の窒素収支バランス  | 42        |
| 3.3                               | シミュレーションモデル        | 42        |

|   |           |
|---|-----------|
| 3.4 環境・社会経済インタラクション・モデル .....               | 46        |
| 3.4.1 松原市の窒素負荷量 .....                       | 46        |
| 3.4.2 農業の窒素収支バランス .....                     | 47        |
| 3.4.3 畜産業の窒素収支バランス .....                    | 51        |
| 3.4.4 農業生産において作物などに固定される窒素量 .....           | 54        |
| 3.4.5 製造業の窒素収支バランス .....                    | 56        |
| 3.4.6 家庭の窒素収支バランス .....                     | 58        |
| 3.4.7 バイオマスエネルギー変換技術の導入による窒素環境負荷物質の削減量 .... | 61        |
| 3.4.8 通常財のフロー条件式 .....                      | 63        |
| 3.4.9 環境効率改善指標 (EEII) .....                 | 68        |
| 3.4.10 シミュレーションケース別の制約 .....                | 68        |
| 3.4.11 目的関数 .....                           | 69        |
| <b>第4章 シミュレーションの結果と分析 .....</b>             | <b>71</b> |
| 4.1 モデルの整合性 .....                           | 71        |
| 4.2 シミュレーションケースの設定 .....                    | 71        |
| 4.3 シミュレーション結果 .....                        | 73        |
| 4.3.1 目的関数 .....                            | 75        |
| 4.3.2 望ましい政策の経済的効果 .....                    | 76        |
| 4.3.3 社会的窒素排出量削減費用 .....                    | 78        |
| 4.3.4 環境改善効率 (EEII) .....                   | 79        |
| 4.3.5 肥料別の有効利用量 .....                       | 80        |
| 4.3.6 窒素排出量削減の化学肥料制御への依存度 .....             | 81        |

|          |                                 |    |
|----------|---------------------------------|----|
| 4.4      | バイオマスメタン発酵・発電技術の評価 .....        | 82 |
| 4.4.1    | バイオマスメタン発酵・発電技術の投入量の比較 .....    | 82 |
| 4.4.2    | バイオマスメタン発酵・発電技術のエネルギーの生産性 ..... | 83 |
| 4.4.3    | バイオマスメタン発酵・発電技術の収益 .....        | 84 |
| 4.4.4    | バイオマスメタン発酵・発電技術の窒素排出量削減効果 ..... | 85 |
| 第5章      | 結論 .....                        | 86 |
| 論文要旨     | .....                           | 88 |
| 謝辞       | .....                           | 90 |
| 参考文献     | .....                           | 91 |
| APPENDIX | .....                           | 97 |

## 表目次

|          |                      |    |
|----------|----------------------|----|
| 表 1 - 1  | 地球システムの限界値 .....     | 11 |
| 表 2 - 1  | 松原市の人口及び面積 .....     | 20 |
| 表 2 - 2  | 松原市の大気指標の経年変化 .....  | 24 |
| 表 2 - 3  | 中華人民共和国地表水環境基準 ..... | 26 |
| 表 2 - 4  | 中国における河川の水質分類 .....  | 27 |
| 表 2 - 5  | 旧大気環境質基準 .....       | 28 |
| 表 2 - 6  | 新大気環境質基準 .....       | 29 |
| 表 2 - 7  | 形態・手段による分類 .....     | 34 |
| 表 2 - 8  | 性状・製法による分類 .....     | 35 |
| 表 2 - 9  | 反応から見た分類 .....       | 35 |
| 表 2 - 10 | 成分による分類 .....        | 36 |
| 表 2 - 11 | 特殊肥料の分類 .....        | 36 |
| 表 3 - 1  | 主要窒素の収支バランス .....    | 39 |
| 表 3 - 2  | 農業窒素収支バランス .....     | 40 |
| 表 3 - 3  | 畜産業窒素収支バランス .....    | 41 |
| 表 3 - 4  | 製造業窒素収支バランス .....    | 41 |
| 表 3 - 5  | 生活消費窒素収支バランス .....   | 42 |

|          |                             |     |
|----------|-----------------------------|-----|
| 表 4 - 1  | シミュレーションケース .....           | 72  |
| 表 4 - 2  | Case1 の結果.....              | 73  |
| 表 4 - 3  | Case2 の結果.....              | 74  |
| 表 4 - 4  | Case3 の結果.....              | 74  |
| 表 4 - 5  | 各 Case の窒素削減コスト及び経済効果 ..... | 78  |
| 表 A - 1  | 2010 年松原市産業別生産額.....        | 97  |
| 表 A - 2  | 投入係数行列 .....                | 97  |
| 表 A - 3  | 産業別付加価値率 .....              | 98  |
| 表 A - 4  | 産業別直接・間接税率 .....            | 98  |
| 表 A - 5  | 産業別所得割引率 .....              | 98  |
| 表 A - 6  | 産業別補助割引率 .....              | 99  |
| 表 A - 7  | 産業別減価償却率 .....              | 99  |
| 表 A - 8  | 消費性向 .....                  | 99  |
| 表 A - 9  | 産業別 NOx 排出係数 .....          | 100 |
| 表 A - 10 | 生活エネルギー消費 NOx 排出係数 .....    | 100 |
| 表 A - 11 | 畜産系バイオマス利用のパラメータ .....      | 101 |
| 表 A - 12 | 生活系バイオマス利用のパラメータ .....      | 101 |
| 表 A - 13 | 品目別堆肥施用の窒素損失率と有効利用率.....    | 102 |



|          |                           |     |
|----------|---------------------------|-----|
| 表 A - 14 | メタン発酵・発電技術 .....          | 103 |
| 表 A - 15 | メタン発酵・発電技術の経済・環境評価係数..... | 104 |
| 表 A - 16 | パラメータ (1) .....           | 105 |
| 表 A - 17 | パラメータ (2) .....           | 106 |
| 表 A - 18 | パラメータ (3) .....           | 107 |
| 表 A - 19 | パラメータ (4) .....           | 108 |
| 表 A - 20 | パラメータ (5) .....           | 109 |
| 表 A - 21 | 窒素投入パラメータ (6) .....       | 109 |

## 図目次

|         |                            |    |
|---------|----------------------------|----|
| 図 1 - 1 | 自然界の窒素循環 .....             | 2  |
| 図 1 - 2 | 人為的影響下の窒素循環 .....          | 3  |
| 図 1 - 3 | 世界の一次エネルギー消費量 .....        | 4  |
| 図 1 - 4 | 世界の穀物生産量 .....             | 5  |
| 図 1 - 5 | 世界の窒素肥料消費量 .....           | 6  |
| 図 1 - 6 | 世界の単位面積あたりの窒素負荷量 .....     | 7  |
| 図 1 - 7 | 社会経済活動による環境問題 .....        | 8  |
| 図 1 - 8 | 人類のエネルギー消費量 .....          | 10 |
| 図 1 - 9 | 研究の流れ .....                | 17 |
|         |                            |    |
| 図 2 - 1 | 吉林省地図 .....                | 19 |
| 図 2 - 2 | 松原市地図 .....                | 19 |
| 図 2 - 3 | 2011 年吉林省各地域の二酸化硫黄濃度 ..... | 23 |
| 図 2 - 4 | 2011 年吉林省各地域二酸化窒素濃度 .....  | 23 |
| 図 2 - 5 | 2011 年吉林省各地域 PM 値濃度 .....  | 24 |
| 図 2 - 6 | 松原市の肥料使用状況 .....           | 32 |
| 図 2 - 7 | 松原市の窒素肥料使用状況 .....         | 33 |
| 図 2 - 8 | バイオマスエネルギー化システム .....      | 37 |

|          |                                |    |
|----------|--------------------------------|----|
| 図 3 - 1  | 松原市の窒素フロー概要 .....              | 44 |
| 図 3 - 2  | シミュレーションモデルの概念図 .....          | 45 |
| 図 4 - 1  | 窒素負荷低減策と GRP のトレードオフ.....      | 75 |
| 図 4 - 2  | 政策別の経済的効果 (1) .....            | 77 |
| 図 4 - 3  | 政策別の経済的効果 (2) .....            | 77 |
| 図 4 - 4  | 政策別環境改善効率のトレードオフ .....         | 79 |
| 図 4 - 5  | 肥料別有効利用のトレードオフ .....           | 80 |
| 図 4 - 6  | 窒素排出量低減の化学肥料制御への依存度.....       | 81 |
| 図 4 - 7  | バイオマスエネルギー変換技術の投入量のトレードオフ..... | 82 |
| 図 4 - 8  | バイオマスエネルギー供給量 .....            | 83 |
| 図 4 - 9  | バイオマス技術の収益性 .....              | 84 |
| 図 4 - 10 | バイオマスエネルギー代替による窒素削減量.....      | 85 |

## 第5章 結論

本研究では、まず公的な統計年鑑、学術論文、報告書などをもとに窒素循環の重要性及び中国松原市における窒素環境負荷の現状を把握し、その問題点を導出した。次に、社会経済活動と窒素の物質収支を考慮した産業連関モデルを構築し、生産や消費活動から排出される窒素環境負荷量を削減する三つの改善シナリオを用いて、政策評価シミュレーションを行った。その分析結果から、以下のような知見を得た。

Case 1（化学肥料の施肥量の制御政策）において、シミュレーションの結果、化学肥料施用量は10%まで低減可能で、全地域窒素環境負荷排出量の1.32%に相当し、10%以上の削減は解が得られなかった。また、化学肥料施用量5%低減の場合、すなわち、全地域窒素環境負荷排出量の0.66%低減までは基準年（2010）の経済水準を維持した。Case 1の分析結果より、松原市のような地域では、10%以上の化学肥料施用量の低減は経済的に成り立たないことと、5%以上の化学肥料施用量の低減は経済的にマイナス成長につながる事が明らかになった。Case 2（堆肥による化学肥料代替のケース）では、化学肥料の施肥量を減らすために、畜産由来の家畜糞尿や家庭の消費活動から排出される生ごみなどを利用した堆肥の供給を増加した。その結果、有機肥料と化学肥料の混合利用による窒素環境負荷物質の限界削減率は10%であった。しかし、堆肥による化学肥料の代替効果は低く、削減率が4%を超えると基準年（2010）の経済水準を下回る結果になっていて、窒素環境負荷物質の排出量の削減には限界があった。Case 2の場合、窒素環境負荷物質の削減に一定の効果があると言えるが、堆肥の品質保証、生産性、実質供給可能量などを考慮すると、環境改善政策として提案するのは現実的ではないと考えられる。Case 3で導入するバイオマスエネルギー変換技術は畜産糞尿や家庭の消費活動から排出する生ごみのようなバイオマス資源をクリーンエネルギーに転換する技術である。技術の導入による窒素環境負荷物質の限界削減率は13%で、削減率7%まで基準年（2010）の経済指標値を維持していた。上述した、各ケースの最大削減率に対する経済効果はそれぞれCase 1が255百万元、Case 2が780百万元、Case 3が625百万元となっていた。これにより、窒素環境負荷物質削減率はCase 3が一番大きく、経済効果をみると、Case 2がCase 3を上回っていることがわかった。そこで、公平性、合理性を保つうえで、環境改善と社会経済の両立の視点から、窒素環境負荷物質排出量の削減と経済効果を総合的に考慮し、最大削減率ではなく、社会的窒素削減コストより最適な削減率を算出した。その結果、Case 3の窒素環境負荷物質削減率5%の場合が一番効率よくて、経済効果は2162百万元にも達した。Case 3の新技术の導入により、他のケースに比べてより厳しい制約をかけても経済が成り立つことが明らかとなった。また、松原市における窒素の物質収支の現状を分析した結果、人為的窒素固定及び化学肥料による窒素過剰の状態であることがわかった。産業部門からの窒素酸化物の排出量が極めて多いことや畜産業や農業、生活系の廃棄物から環境中への窒素流出量が圧倒的に多いことも問題点として挙げられる。

本研究では、静学的シミュレーションによる分析を行い、2010年の吉林省松原市の農業、畜産業、製造業、生活などから発生した窒素負荷量を把握し、窒素環境負荷物質削減と経済の両立を考慮したうえで、分析及び評価を行った。農業由来の窒素問題に焦点を当て、重点的に分析することにより、短時間で限られた資源を効率的に利用し、問題解決に有効な政策の提案が可能になった。

しかし、動学的最適化モデルを行ってないことにより、長期にわたる窒素削減効果やGRPの変化を把握できないデメリットも存在する。ただし、動学的モデルによる分析は長期間にわたる効果を見極める点では有効であるが、急速に変化する中国にとって経済的、政治的不安要素と一人っ子政策の廃止のような中国政府による政策、規制の不確定要素が多数存在し、いままでのデータに基づいた計算は予知不可能な将来を十分に反映しきれない恐れがあり、大きな誤差が生じかねない。特に、農業生産においては、政府の農業政策や天候・災害の影響を受けやすく、動学分析は必要ではあるが、それには困難を伴う。政策を提言するうえで、短期的な効果と長期的な評価を兼ねた総合的分析ができてこそ有効な提案だと言える。このような問題を解決するのは今後の課題である。

また、本研究では、農業生産を中心とした窒素循環の在り方について検討した。農業関連から発生する窒素環境負荷物質は人為的要因が主要な発生源であり、この問題の解決は窒素環境負荷物質の削減に大きく貢献できる。しかし、農業以外のほかの産業から発生する窒素環境負荷物質を考慮しなかったことにより、窒素問題全般の解決までには視野を向けられなかった。今後、窒素循環に関連したすべての要素を取り込んだ総合的な分析による窒素問題の解決策を見出すべきである。

## 論文要旨

本研究は、循環型社会の実現に向けて、窒素循環の視点からバイオマス廃棄物利用によるエネルギー変換技術の普及を促進する環境政策の効果に関する研究である。

将来、中国の安定した食料生産と環境保護のためには、食料生産・消費に伴う窒素循環の形態、バイオマス利用効率を把握することに重要な意味がある。また、温室効果ガスの削減、エネルギー自給率の向上、水質改善、土壌の改良、化学肥料・化石燃料調達に伴う資金流出の抑制、雇用の創出、地域の活性化、非常時のエネルギーの確保のための効率的な窒素資源管理は緊急な課題である。

そこで本研究では、窒素過剰国である中国の循環型社会を見据えた窒素循環システムのあり方を模索するため、中国の食料生産基地である吉林省松原市を例にして農業・畜産の窒素循環の形態を把握し、窒素利用効率強化のためのバイオマス利活用の方策を模索し、松原市の窒素環境負荷物質を削減するための経済的、技術的な実現可能性と社会的受容性の高い政策の提案を目的とした。

本研究では既往研究で使用された研究手法を総合的に参考、改良したうえで、ライフサイクル環境分析を考慮した社会環境経済システムを構築し、コンピューターシミュレーション分析を行った。産業連関分析手法と線形計画法を用いて、環境側面だけでなく経済・社会側面をも考慮した統合的な窒素資源管理政策をデザインし、その評価を行うため、窒素の物質収支を包括した環境経済統合型双対拡大産業連関モデルを構築した。

効率的な窒素資源管理は農村経済の活性化へ貢献できるだけでなく、生産効率の改善効果も期待できる。主要な分析結果は以下の通りである。

Case 1 の化学肥料の施肥量の制御政策において、化学肥料施用量は最大 10%まで低減可能であった。しかし、5%以上の化学肥料の低減は経済的にマイナス成長につながる事が分かった。化学肥料の 5%低減、実質的全地域窒素環境負荷排出量の 0.66%削減までは基準年 2010 の経済水準を維持し、その経済効果は 255 百万元であった。Case1 の分析結果により、2020 年から肥料使用量ゼロ成長を目指す中国にとって、松原市のような地域では、化学肥料の有効利用率をあげる余地があると言える。一方、Case2 は堆肥による化学肥料代替のケースで、化学肥料の施肥量の減量と同時に、畜産糞尿や生活ごみを利用した有機肥料を積極的に利用することにより、最大 10%まで窒素環境負荷物質の削減が可能だった。そして、削減率 4%まで基準年の経済水準を上回っていて、780 百万元の付加価値の創出が可能だった。しかし、現地の天候などを考慮すると松原市は堆肥に不向きな地域で、かつ小規模畜産農家が多数であるため、大量に畜産廃棄物を利用することは事実上不可能である。そして、堆肥を増やすことによる新たな環境問題も懸念され、代替効果は限定されていると考えられる。一方、Case3 は畜産糞尿や家庭の消費活動から排出する生ごみのようなバイオマス資源をクリーンエネルギーに転換するケースで、この技術導入による経済効果と削減効率とともにほかのケースより優れていた。Case3 の限界削減率は 13%に達

し、削減率7%まで基準年の経済指標値を維持していた。そして、削減率5%で最適な解が得られ、2162百萬元の付加価値の創出が可能だった。つまり、今回の分析結果によると吉林省松原市地域ではCase3の窒素環境負荷物質削減率5%が地域経済及び環境改善を両立するうえで、一番相応しい選択であることが明らかになった。ただし、Case3の技術の普及には資金の投入が必要であり、資金問題を解決するのが政策提案の実現のカギとなる。

シミュレーション結果により、中国吉林省松原地域において、バイオメタン発酵・発電技術を導入し、畜産廃棄物を有効利用することで、農業から畜産業、農業・畜産業から消費活動、畜産業・消費活動から農業という地域内における小規模な循環ではあるが、窒素の循環利用を人為的に行うことが可能であると言える。このような社会経済システムこそ、循環型社会と相まった窒素循環のあり方であると結論づける。

## 謝辞

本研究にあたり、筑波大学大学院生命環境科学研究科持続環境専攻教授の氷鉋揚四郎先生に終始ご指導を頂き、心より感謝し、御礼申し上げます。研究生から博士修了までの11年間、本当にありがとうございました。先生の一言一句はこれからも忘れずに、人生を歩んでいくと思います。

また、本論文をまとめるうえで、たくさんの方々から御助言を頂きました。研究発表会では、副査の生命環境科学研究科教授である張振亜先生、水野谷剛先生、楊英男先生からも貴重な御助言を頂きました。心より感謝しております。

そして、本研究を続けていくうえで JIRCAS 研究戦略室の沈志宏からはモデルの構築からシミュレーション分析まで、たくさんのおアドバイスと協力をいただきました。その他にも多くの研究に協力していただいた皆さんに心より深く感謝申し上げます。

博士課程を含む筑波大学で積み重ねてきた人生経験、思い出は今後の自分の人生において、貴重な財産となることを確信しています。

最後に、何よりも感謝しないといけないのは、これまで経済的、精神的に私を支えてくれた自分の家族です。本当にありがとうございました。

平成 27 年 10 月

金 彬