

論文の内容の要旨

論文題目 Systemic Intensification of Agriculture and Industry
 in Plant-Derived Production
(植物資源由来生産における農業と工業のシステミックな強化)

氏 名 大内田 弘太朗

Chapter 1. 緒言

植物資源は化成品や燃料などに変換可能であり、化石資源依存からの脱却に向けた利活用が期待されている。工業分野では、これまでに、植物資源の変換及び精製技術の開発が行われてきた。しかしながら、植物資源の原料調達段階の一端を担う農業には、農家をはじめとする資源生産者の介在や、天候による影響といった、化石資源由来生産にはない特徴が存在し、原料変換段階における資源の変換効率等に影響を及ぼし得る。そのため、農業の持つ特徴を考慮したシステムの設計が求められる。既往の研究において、化学プロセスの設計手法の開発[1]や、植物資源を原料とするプロセスの設計への適用[2]などが行われてきたが、原料を定常的に調達できることを前提とした議論に留まっている。近年、農業分野では、経験則を活用して持続的に農業の生産性を高める Sustainable Agricultural Intensification[3]や、工業分野では、プラントにおける生産性の飛躍的な向上やプロセスの簡略化を実現し得る Process Intensification[4]などの方法論が提案されてきたが、農業と工業を含む植物資源由来生産全体を強化するための方法論が必要である。

本研究では、植物資源由来生産における農業と工業を相乗的に強化するための新たな方法論として“Systemic Intensification”を提案する。図 1 に博士論文の構成を示す。まず、植物資源由来生産における問題の具体例を分析し、Systemic Intensification の概念と実践に必要な要素を Chapter 2 で提案する。Chapter 3 では、サトウキビ産業に

おけるケーススタディを通して、モデリングにより農業と工業を横断的に解析する手法を開発する。ここで開発したモデルを用いることで、農工間の時定数の違いや将来に関する不確実性を考慮しながら将来シナリオを計画できることを、Chapter 4 で検証する。Chapter 3,4 で得られた知見を元に、Chapter 5 では、Systemic Intensification のために必要な作業を機能モデリング手法によりフレームワーク化し、他の事例における適用可能性を Chapter 6 で議論する。

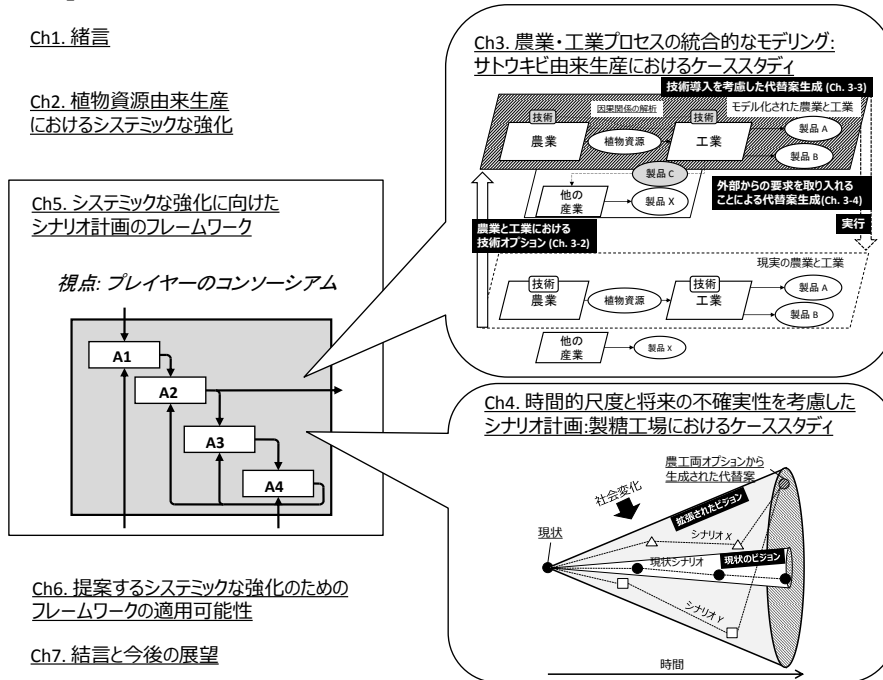


図 1 博士論文の構成

Chapter 2. 植物資源由来生産におけるシステム的な強化

植物資源由来生産におけるシステム設計に必要な概念を検討するために、具体例として、サトウキビ由来生産、米ぬか由来生産、植物工場の3ケースを取りあげ、問題の調査と論理構造の分析を行った。植物資源由来生産には、現場に問題意識がありながらも、原因の帰属先が不明瞭であり、単独の意思決定者では解決できないシステム的な問題が発生していることが分かった。原因として、農業と工業で意思決定者が異なる点や、時定数をはじめとする両産業間の性質の違いが両者のコミュニケーションを困難にしている点が挙げられる。一方で、システム的な問題を抱えるシステムは、システム内での適切なコミュニケーションにより環境の変化への適応性を高め得る[5]。そこで、コミュニケーションの欠如を克服しながら、農業と工業を強化する概念として、Systemic Intensification を提案した。この概念では、システムの設計段階において、農業と工業の間で適切なコミュニケーションを取ることで、両者を共に強化する、従来見出し得なかった代替案の探索を可能とする。そのためには、システムの設計段階において、農工間で定量的な議論を可能とするモデル、時間的尺度と将来の不確実性を考慮しながら、モデルを用いて移行の計画を行う手法、及び、上記のモデルや手法を現

場の生産者が主体的に整備し、活用できるようなフレームワークが必要となる。これらの要素を Chapter3-5 で開発する。

Chapter 3. 農業・工業プロセスの統合的なモデリング：サトウキビ由来生産におけるケーススタディ

サトウキビ由来生産におけるケーススタディを通して、モデリングに基づいた農工横断的解析手法を開発した。まず、既存の技術オプションを考慮して、現状のサトウキビ由来原料糖・エタノール製造プロセスのマス・エネルギーバランスを解析可能なモデリングを行った。モデリングにあたって、産業現場を調査し、関与するプレイヤーの特定、それらに適切な情報を与えるための評価指標やパラメタの検討、評価の対象となるシステム境界の検討、及び、実プラントやパイロットプラントのデータや現場の知識、文献などの情報収集を行った。得られた情報から、パラメタ間の関係を解析し、物理化学モデル、統計モデル、経験則の統合によってプロセスモデルを開発した。モデルを用いて、評価指標を可視化することにより、農工両オプションを同時に考慮することで、原料糖・エタノール生産量の増産、温室効果ガス排出量の削減、及び、関連資源の節約を同時に達成できる可能性が示された。

次に、製糖における新規技術[6]を取り上げ、情報収集とモデルの拡張を行い、サトウキビ由来生産への導入効果を分析した。選択品種、生産性、操作性、経済性等を考慮しながら、農工全体で技術の導入効果分析を行うことが可能であり、さらなる導入効果の向上に向けて、新たな技術開発の要件の提案が可能となることが分かった。

最後に、製糖工場を有する沖縄県の6島を対象に、既存の製糖工場でバガス発電を行うことによる地域のエネルギーセキュリティへの影響を、モデルを用いて分析した。農工両オプションを同時に考慮することにより、いずれの島においても、製糖量、売電量、売電期間を同時に増やし、島内の化石燃料消費量を削減できるような代替案が生成された。農工横断的に解析可能なモデルを整備しておくことにより、サトウキビ由来生産への外部からの要求を考慮した新たな代替案生成が可能であることが分かった。

Chapter 4. 時間的尺度と将来の不確実性を考慮したシナリオ計画：製糖工場におけるケーススタディ

Chapter 3 の手法により新たに生成された代替案は、農工両オプションの変更を含み得る。農業側のオプションの変更は工業側よりも時間をかけて漸進的に進む場合があり、その間に生じる社会変化によっては、制約条件や有効な対策の順序も変わり得る。そのため、実行に向けて、農業と工業の持つ時間的尺度の違いや将来の不確実性を考慮した計画が必要となる。本章では、種子島の製糖工場において、シナリオ計画会議を実施し、Chapter 3 で開発したモデルを用いて、農工両オプションを考慮しながらシナリオを計画できるか検証を行った。まず、事前調査を行い、将来予想される社会変化や農家と製糖工場が実行可能なオプション間の順序関係に注意しながら、モデルを用いて、時間軸を考慮したシナリオ計画案を作成した。製糖現場の生産者を交えたシナリオ計画会議を

開催し、計画案を実行する上での障壁の抽出や、それを回避するための代替案の提案を確認した。モデルを活用してシナリオを計画することで、議論を深化できることが明らかとなった。

Chapter 5. システミックな強化のためのシナリオ計画のフレームワーク

Chapter 3 と Chapter 4 で得られた結果を元に、機能モデリング手法 IDEF0 を用いて、植物資源由来生産における農業と工業のシステミックな強化のために必要な業務と、情報やツールの流れをモデル化した。主要な業務である現状の評価、代替案の生成、評価、選抜、及びシナリオ計画を、工業及びそのステークホルダーを含むコンソーシアムで管理するものとした。さらに、業務を進める上で不足するメカニズムを、開発者を交えて必要に応じて整備する形式で表現することで、プレイヤー視点で実践的に利用可能なフレームワークとして提案できることが分かった。

Chapter 6. 提案するシステミックな強化のフレームワークの適用可能性

サトウキビ由来生産のケーススタディにおいて開発したフレームワークの、他の植物資源由来生産への適用可能性を検証した。適用先として、米ぬかりファイナリと植物工場における事例を取り挙げた。これらの 2 例における検証を通して、構築したフレームワークは、他の植物資源由来生産における農業と工業の強化に向けた議論を行う上で部分的に適用可能であることを確認した。

Chapter 7. 結言と今後の展望

本研究では、植物資源由来生産において、農業と工業の特性の違いに起因するシステミックな問題の解消に向けて、システムを設計する概念として、**Systemic Intensification** を提案し、生産者が実践的に行うためのフレームワークを構築した。**Systemic Intensification** のために、システムの設計段階に必要な要素として、農工横断的な解析を可能とするモデル、代替案を達成するためのシナリオ計画手法、及びそれらを実践的に活用するためのフレームワークを提案した。サトウキビ由来生産におけるケーススタディを通して、上記の要素の検証を行い、特徴の異なる他の事例への適用可能性の検証を通して、フレームワークの汎用性を確認した。生産者は、論理的に検証された当フレームワークに沿って業務を実行することにより、これまでに見出せなかった代替案、及びそこに至るためのシナリオ計画を生成し、農業と工業の強化に向けた意思決定が可能となる。

References

- [1] Biegler LT, et al. New Jersey: Prentice Hall PTR, 1997.
- [2] Ruiz-Mercado G, et al. *Ind Eng Chem Res.* 2013;52(20):6747–6760.
- [3] SRI-Rice. New York: Cornell University, 2014.
- [4] Stankiewicz AI, Moulijn JA. *Chem. Eng. Prog.* 2000;96:22–34.
- [5] Checkland P, Scholes J. Chichester: John Wiley & Sons, 1990.
- [6] Ohara S, et al. *Biomass Bioenerg.* 2012;42:78–85.