

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 2 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25870163

研究課題名(和文) 農業・工業横断型の解析とモデル化による植物資源由来の製造システムの設計・評価

研究課題名(英文) Design and assessment of plant-derived production system based on transboundary analysis and modeling between agriculture and engineering

研究代表者

菊池 康紀(Kikuchi, Yasunori)

東京大学・「プラチナ社会」総括寄付講座・特任准教授

研究者番号：70545649

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では植物資源由来の製造システムの例として、サトウキビ由来の砂糖とエタノールの複合生産に関する設計手法を開発した。ここでは農工横断的な視点に基づき、品種改良や技術開発・導入をシミュレーションするモデルを構築することで、生産性の変化を解析できるようにした。本研究により、食料生産と化成品製造の競合を回避するために、農業側・工業側の技術オプションの組み合わせが重要であることが分かった。得られる農業側・工業側技術オプションに対するシミュレーション結果は、農家や製糖工場、エタノール工場をはじめとする利害関係者とのコミュニケーションを可能とする。

研究成果の概要(英文)：We propose a design method of sugarcane-derived combined sugar-ethanol production based on transboundary viewpoints between agriculture and engineering. New cultivar breeding and technology development are taken into account for increasing productivity per unit area and amount of sugarcane. By applying the obtained knowledge of biomass-derived production as process model, we demonstrated that the combination of newly bred cultivars and sugar-ethanol production technologies enables to increase both sugar and ethanol per unit area of land, in other words, the competition of food and chemicals can be avoided. A simulation-based scenario analysis is conducted for designing production system involving farm land, sugar mill, ethanol factory and other related stakeholders.

研究分野：プロセスシステム工学

キーワード：バイオマス 再生可能資源 サトウキビ 産業共生

1. 研究開始当初の背景

植物資源を原料とした燃料や化学物質の製造技術は持続可能なプロセスシステムの構築に向けて重要な開発要素となっている。これまでの植物資源の増産は面的な圃場の拡大によるものが世界的にも一般的であった¹⁾が、近年、農業側の技術オプションであるサトウキビの品種改良と工業側の技術開発を組み合わせることで面積あたりの食料・原料の同時増産が可能であることが確認されてきた²⁾。これに対し、農業側だけでは選択しえない技術オプションでも工業側プロセスを同時に変更することによってより高い生産性を持つ革新的なプロセスシステムにつながることを確認し、その概要をフレームワークとして提案してきた³⁾。国内外において様々な植物由来原料を利用した特定用途の個別事例に関する研究成果も蓄積されてきており⁴⁻⁶⁾、農工を横断的に解析するための研究環境が整ってきているといえる。このとき食料との競合を考慮した植物資源の供給安定性や土地改変による二次的な環境影響⁷⁾、関連資源の制約⁸⁾など従来の石油化学では想定されない波及効果を考慮したプロセスシステムの設計・評価を実行可能とする方法論の提案はプロセスシステム工学・環境学が果たすべき役割といえる。

2. 研究の目的

図1に植物資源由来の製品製造システムと本研究の構想を示す。従来の特定原料、特定用途に関する農業・工業個別プロセスの設計から脱却し、農工横断的なプロセスシステムの最適化を実施するため、農業・工業における技術を蓄積したデータベースとプロセスシステム設計・評価手法を構築する。提案した方法論から必要なモデル要件を導出し、植物資源の栽培/回収から製品製造プロセスまでをモデル化し、統合的な設計・評価を実行可能とする。また、単位製造量の評価に留まらず、農業の時定数と工業の時定数を合わせる動的解析にも耐えられる手法とモデルを構築する。

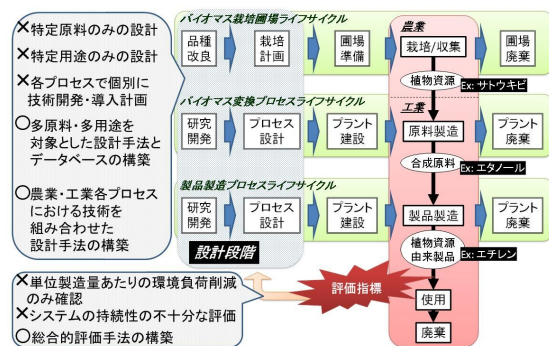


図1 植物資源由来の製品製造と研究構想

3. 研究の方法

これまでに実施してきた特定地域における農業・工業プロセスの解析事例を基にした

が、甘味資源作物、特にサトウキビに由来する製品の製造プロセスシステムの設計・評価手法と農工統合モデルを構築する。研究を進めるにあたり、植物資源の栽培、合成原料への変換技術、製品製造プロセスの設計の専門家から研究協力を得て、作物栽培における営農操作と技術、収量との関係や過去の原料変換プロセスの運転実績などの実データを収集し、解析を行うことで植物資源栽培、原料変換、製品製造の各モジュールを構築する。同時並行しながら、海外で植物資源関連研究を推進する研究者らとのディスカッションを通じて、植物資源を用いるプロセスシステムの設計・評価手法を確立させる。構築した設計・評価手法と農業・工業統合モデルを検証するためのケーススタディを実施し、特定の地域を対象にプロセスシステムの提案を行う。

4. 研究成果

(1) 農工横断プロセスシステムモデリング

サトウキビの栽培・収穫・輸送から、製糖までのプロセスシステムの概要を、構築したモデルの入出力情報の例とともに図2に示す。農業プロセス・工業プロセスにおけるプロセスパラメタを整理・体系化し、それぞれの決定メカニズムを解明した。例えば、農業プロセスにおいては、品種改良や営農操作といった技術・運転オプションがもつパラメタによって、サトウキビの成分組成(ショ糖、還元糖、ミネラル、水分、繊維分など)や反収といった結果が変わる。このときのメカニズムは、品種によって異なる気象への感応で決定されるが、過去の栽培履歴や品種の成績参考書等から地域別、作型別のサトウキビ栽培実績を収集することができる。これらのデータを統計的手法によって数理モデル化することによって、農業プロセスのモデル化を実施することができる。実際に構築した農業プロセスモジュールは、図2に示すような操作変数と条件から収穫物であるサトウキビの収量と組成を地域別に算定することができるものであり、サトウキビ由来のプロセスシステムをシミュレーションするためのモジュールとして機能できることが分かった。次に、工業側のプロセスとして、製糖工場のモデル化を行った。製糖工場では、図3に示すような流れでサトウキビから原料糖を抽出する。製糖工場は大きく、圧搾、清澄、濃縮、結晶化で構成される。圧搾で得られる搾りかす(バガス)はサトウキビの繊維分であり、バイオ燃料として熱電併給のための動力プラントで利用される。結晶化によって副産する糖蜜はエタノール原料となる。また、インペルターゼ欠損酵母による選択的発酵プロセスの導入により、ショ糖の結晶化阻害物質となる還元糖のみをエタノールに変換して取り出すことを可能にできる²⁾。これら製糖工場に含まれるユニットプロセスについて、場内で利用されている分散制御システ

ム (DCS) から稼働記録を収集し、製糖工場の数理モデル化を行った。このとき、サトウキビ成分の違いによる製糖工場の性能・挙動の違いをシミュレートすることを可能にするため、複数年のデータを用いるだけでなく、それぞれのプロセスの物理化学的、熱力学的な作用を数式化して農業側モジュールの結果に合わせた製糖工場のシミュレーションを可能とすることに成功した。

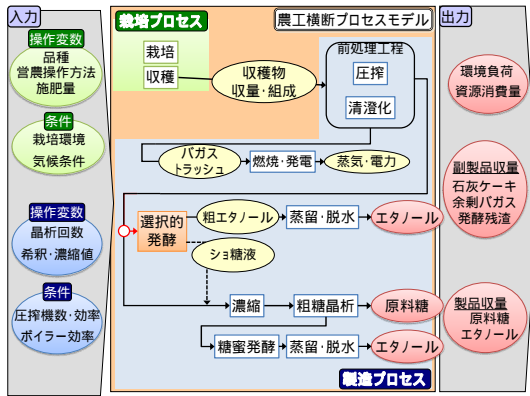


図2 サトウキビに関する農工横断プロセスシステムの概要とモデル入出力例

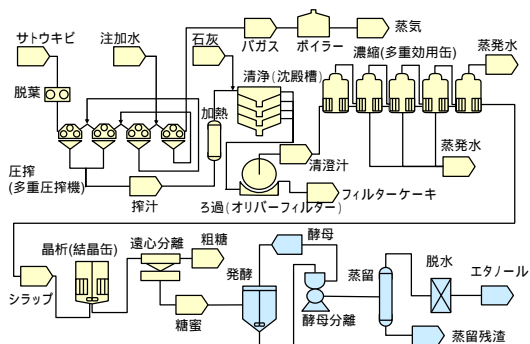


図3 一般的な製糖工場のプロセスフロー。ただし、製糖工場内における糖蜜を利用したエタノール製造は国内での導入例は2016年3月の段階で存在しない。

農業と工業、それぞれのプロセスモジュールの間には、時定数の違いがある。サトウキビ栽培では1年を掛けてサトウキビを生育し、製品を製糖工場に搬送する。このとき、製糖工場の製糖期間は、国内では通常、12月頃から4月頃であるが、この期間中は時期によってサトウキビの中の成分が異なる。冬季に入ることによってサトウキビが熟し、糖度が上昇するが、春に暖かくなると蓄えた糖が分解しはじめてしまうためである。ショ糖が最も多くなるタイミングで製糖を行うことができれば原料糖を増産させることができるが、実際には困難であり、様々な状態のサトウキビが混在して納品され、製糖されていく。そのため、本研究で構築したモデルでは、簡易化のため、製糖工場1年単位の稼働についてシミュレーションすることとし、農業側・工業側技術オプションを決定するための生産計画を立て

るためのモデルとした。

(2) 植物由来の汎用化学製品製造プロセスシステム案の生成

植物資源からの化学品合成経路の例を図4に示す。化学品には基礎化学製品や芳香族化合物製品があるが、いずれも化学産業において重要な原料となるものであり、バイオマス資源からの生産が可能になることが持続的な化学製品製造を目指したときに必須となる。ここで、サトウキビ由来の出発原料としては、上述の通りエタノールがあり、これを活用した経路により多くの化学製品を製造することが可能であることが分かった。

バイオマス原料からの化学合成を社会に実装するためには、原料の調達コスト・経路・安定性が重要になることが分かっている。バイオエタノールは世界的に液体燃料として利用され、近年はエチレンの原料として利用され始めている重要な植物資源由来の化学品である。サトウキビ産業からバイオエタノールを製造する場合、ブラジルのように広大な栽培面積を有する場合を除き、図3に示すような糖蜜発酵エタノールか、図2に示すような新規技術によるエタノールのように、主製品である原料糖の生産量に悪影響を与えない形で生産が必要である。これは、原料糖とエタノールの付加価値が大きく異なるためであり、原料糖の生産量が低下すると、その分の製造コストがエタノール価格に転嫁されてしまうためである。

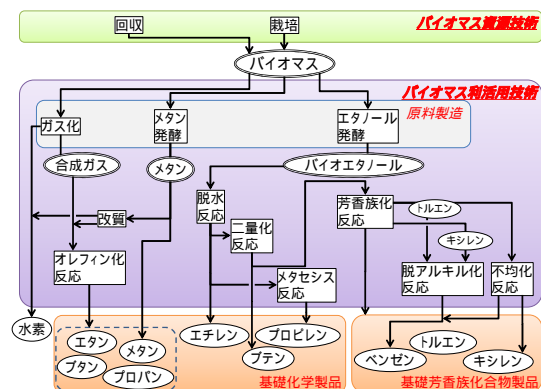


図4 植物資源由来の汎用化学製品合成経路の例

以上の化学合成経路とコスト構造の分析により、サトウキビ由来の化学製品製造のためには、サトウキビ栽培からはじめる原料糖生産を最適化していくことが重要であることが分かった。

(3) プロセスシステムの設計と評価

上述の結果から、本研究で構築したモデルをサトウキビからの原料糖生産プロセスシステムの最適化に適用し、農業側・工業側の技術オプションの選択によるプロセスシステム設計手法を考案することとした。同時に、

サトウキビと製糖工場が持つ付加価値について分析し、さらなる可能性について検討した。

モデルを用いたシミュレーション結果の例として、図5に2つのサトウキビ品種（従来から製糖用に用いられてきた農林8号と、量的にはまだ利用事例が少ない農林18号）について、製糖工場における糖抽出のために用いる温水（注加水）の量を変化させたときの結果を示す。縦軸に消費エネルギーをとっており、プロットはそれぞれの品種から得られるバガスの総発熱量である。すなわち、プロットよりも下に棒グラフが存在している場合には、すべての必要エネルギーをバガスから賅うことができることを意味する。上述の注加水を増やすと、原料糖として得られる量が増加するが、代わりに濃縮に必要なエネルギーが増大することがある。このため、農業側技術オプションである品種の選択は工業側技術オプションである注加水の量と合わせて検討することが必要である。図5の例ではすべてのケースにおいてバガスだけでエネルギーが供給できる状態となっている。

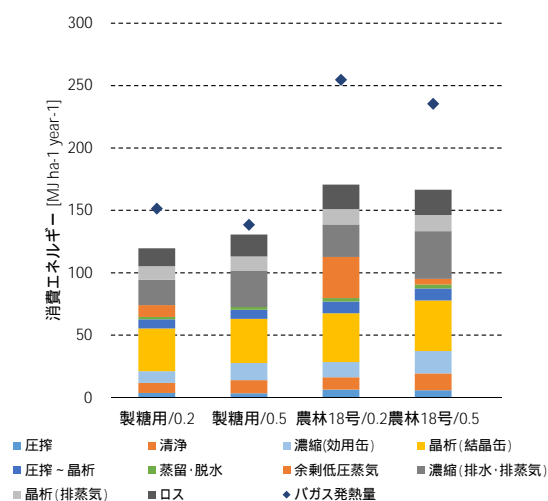


図5 構築したプロセスシステムモデルの適用例

製糖工場で発生するバガスは上述の通り製糖に必要なエネルギーを賅うことができるが、同時に、余剰バガスを発生させることができるようになれば、それをバイオ燃料、もしくは熱や電力に変換し、再生可能資源由来のエネルギーとして売熱・売電することもできるようになる。図5のグラフでは、プロットと棒グラフの間の部分が、余剰バガスとして利用可能な部分となる。この余剰生産物の有効利用によって、サトウキビが持つ価値を増大し、同時に生産コストを下げ、化学製品製造の実現に貢献しうる可能性を見出すことができた。

(4) 具体的地域における応用と展開

実際の地域として種子島を対象とし、構築してきたプロセスモデルを適用して地域へ

の波及影響を分析した。図6にその概念図を示す。現在、種子島に限らず国内の製糖工場では、余剰のバガスが出ると産業廃棄物となってしまうため、それを焼却処理するためにエネルギーを排出しながら稼働していることが分かった。そのため、低いものでは70度前後、高いものでは300度を超える、多種の排熱が大量に出ていることが分かった。これらの排熱を効率よく利用するため、例えば、地域に存在している焼酎工場やでんぷん工場といった、比較的低品位の熱を化石資源から賅っている工場に対してエネルギー融通する産業共生により、全体のコストを低減し、環境負荷削減、化石資源依存度の低下を達成しうることで、現場調査と構築した農工横断プロセスモデルによるシミュレーションにより明らかとなった。

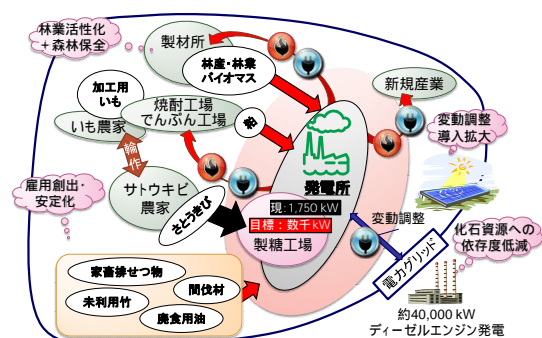


図6 製糖工場を中心とした種子島における産業共生ビジョン

(5) まとめと今後の展望

再生可能資源として物質を生産することができる植物資源の多くは農林水産地域から発生しているが、その有効利用にむけたインフラ整備、プロセスシステム設計、産業創出は不十分である。その他分野にまたがるシミュレーションを実現可能とするための農工横断型の解析とモデル化を行った。構築したモデルから得られる結果を地域の製糖工場、農協、自治体に発信することにより、地域で取り組むことができる農林工の連携の形が明確になった。今後は、サトウキビ以外の植物資源や、他の再生可能資源との組み合わせを考慮するための、地域特性を考慮したプロセスシステムの提案を実現できるモデリング手法を開発する必要がある。このとき、産業連関分析や消費者嗜好調査といった、人文社会・経済学分野で開発されている手法との親和性を高めたシミュレータの開発が必須といえる。

< 引用文献 >

- 1) BFT Rudorff et al. Remote Sensing, 2, 20, (2010)
- 2) S Ohara et al, Biomass Bioenerg, 42, 78-85
- 3) Y Kikuchi, et al., Comput-aid Chem Eng, 30, 182-186 (2012)
- 4) 例えば J Sánchez, CA Cardona, Biores

- Tech, 99, 5270-5295 (2008)
- 5) IC Macedo et al. Biomass Bioenerg, 32, 582-595, (2008)
 - 6) ETH Vink et al. Polym Degrad Stab, 80(3), 403-419, (2003)
 - 7) J Fargione et al. Science, 319(5867), 1235-1238, (2008)
 - 8) K Matsubae et al, Chemosphere, 84(6), 767-772, (2011)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 12 件)

菊池康紀, 尾下優子, 福島康裕, 帰結的ライフサイクル思考に基づく離島地域のエネルギーシステム設計, PETROTECH, 39(6) (2016) in press (査読無)

Thuy Nguyen T. H., Yasunori Kikuchi, Masaru Noda, and Masahiko Hirao, Impact of local conditions on bio-based chemical process design: selection of input feedstock and production scale and scenario, Environmental Progress & Sustainable Energy, 35(1) 174-182 (2016) (査読有) DOI: 10.1002/ep.12188

Yasunori Kikuchi, Yuichiro Kanematsu, Ryuichi Sato, Takao Nakagaki, Distributed cogeneration of power and heat within an energy management strategy for mitigating fossil fuel consumption, Journal of Industrial Ecology, 20(2) 289-303 (2016) (査読有) DOI: 10.1111/jiec.12374

Yasunori Kikuchi, Yuichiro Kanematsu, Masamichi Ugo, Yosuke Hamada, Tatsuya Okubo, Industrial Symbiosis Centered on a Regional Cogeneration Power Plant Utilizing Available Local Resources: A Case Study of Tanegashima, Journal of Industrial Ecology, 20(2) 276-288 (2016) (査読有) DOI: 10.1111/jiec.12347

杉本明, 菊池康紀, 寺島義文, 「スマートエコアイランド種子島」の中核的経済活動としてのサトウキビ産業の在り方～種子島型サトウキビ産業とその技術的基盤～, 砂糖類・でん粉情報, (2015) https://www.alic.go.jp/joho-s/joho07_001109.html (査読無)

菊池康紀, 尾下優子, 地域資源利活用のための統合的情報基盤の要件定義, 人工知能, 30(2), 157-162 (2015) (査読無)

Thuy T. H. Nguyen, Yasunori Kikuchi, Masaru Noda, and Masahiko Hirao, A new approach for design and assessment of bio-based chemical processes toward sustainability, Industrial & Engineering Chemistry Research, 54(20), 5494-5504, (2015) (査読有) DOI: 10.1021/ie503846

菊池康紀, 持続可能性を考慮したプロセス評価のアクティビティモデルとデータモデル, 化学工学論文集, 40(3) 211-223, (2014) (査読有) DOI: 10.1252/kakorobunshu.40.211

〔学会発表〕(計 18 件)

菊池康紀, 供給制約・需要制約下における地域エネルギーシステム: 種子島の事例, 応用物理学会第 63 会春季講演会, 2016 年 3 月, 東京工業大学(東京都・目黒区)

菊池康紀, 自治体、地域企業と大学が連携した共同 PJ におけるメディアへの期待, 研究者メディア懇親会, 2015 年 8 月, グランドビル(東京都・千代田区)

菊池康紀, 農林業地域における地域システム設計と知能研究の役割, ネットワークが創発する知能研究会(JWEIN2015), 2015 年 8 月, 日本大学(東京都・千代田区)

Yasunori Kikuchi, Kotaro Ouchida, Yasuhiro Fukushima, Satoshi Ohara, Akira Sugimoto and Masahiko Hirao, Modeling and Analysis of Combined Sugar and Ethanol Production Considering Agricultural and Industrial Process Alternatives, AIChE 2013 Annual Meeting, San Francisco, USA Nov/2013

菊池康紀, ライフサイクルを考慮した植物資源変換技術の評価, 第 13 回バイオマス変換触媒セミナー「バイオケミカルリファイナリーの現状と課題」, 2013 年 7 月, 宮崎観光ホテル(宮崎県・宮崎市)

〔図書〕(計 5 件)

Yasunori Kikuchi, Seiichiro Kimura, Michihisa Koyama, Present status of Japan's energy, in "Future Energy Systems Based on Feasible Technologies Beyond 2030" edited by Yukitaka Kato, Michihisa Koyama, Yasuhiro Fukushima, Takao Nakagaki, Springer: Tokyo, ISBN13: 9784431559498 in press

Kazutake Oosawa, Yuichiro Kanematsu, Yasunori Kikuchi, Forestry and Wood Industry, in "Future Energy Systems Based on Feasible Technologies Beyond 2030" edited by Yukitaka Kato, Michihisa Koyama, Yasuhiro Fukushima, Takao Nakagaki, Springer: Tokyo, ISBN13: 9784431559498 in press

Yuichiro Kanematsu, Kazutake Oosawa, Yasunori Kikuchi, Forestry and Wood Industry, in "Future Energy Systems Based on Feasible Technologies Beyond 2030" edited by Yukitaka Kato, Michihisa Koyama, Yasuhiro Fukushima, Takao Nakagaki, Springer: Tokyo, ISBN13: 9784431559498 in press

Yasunori Kikuchi, "Chapter 24 Life cycle assessment" in Kozai, T., G. Niu and M. Takagaki, Plant Factory: An Indoor Vertical Farming System for Efficient Quality Food Production, Elsevier 2015. 321-328.

堀越智, 菊池康紀, 大橋憲司 編集, 図解よくわかる環境化学工学 製造現場におけるグリーンケミストリーの基礎と実践、日刊工業新聞社 (2014年3月)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)
該当なし

取得状況(計 0件)
該当なし

〔その他〕

<アウトリーチ活動>

菊池康紀, 種子島におけるスマートエコアイランドロードマップ, 自然と共生するスマートエコアイランド種子島シンポジウム~動き始めた大学等との連携による新たな可能性~, 2016年3月, ホテルニュー種子島(鹿児島県西之表市)

菊池康紀, スマートエコアイランド構想と里山・里海管理, 種子島における里山里海セミナー, 2016年2月, 西之表市民会館(鹿児島県西之表市)

菊池康紀, 尾下優子, 福島康裕, 鹿児島県立種子島高校特別授業, 2015年3月, 種子島高校(鹿児島県西之表市)

菊池康紀, 課題解決先進国にむけた挑戦: スマートエコアイランド構想, 熊本

地区医師会学術講演会, 2015年2月, ホテルニュー種子島(鹿児島県西之表市)

菊池康紀, スマートエコアイランド, 西之表市若手職員研修, 2014年12月, 西之表市民会館(鹿児島県西之表市)

菊池康紀, エネルギーシステムにおける未利用熱利用, オープンイノベーション・ジャパン2.0 研究会: グリーンエネルギー技術 ~未利用熱エネルギーの活用~, 2013年6月, 富士フイルム(東京、港区)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

菊池 康紀 (Yasunori KIKUCHI)
東京大学 総括プロジェクト機構「プラチナ社会」総括寄付講座・特任准教授

研究者番号: 70545649

(2) 研究分担者

該当なし()

(3) 連携研究者

該当なし()