

マルチプラットフォーム生産型アグリバイオファイナリーの開発

1. 研究の背景と開発目標

研究の背景と必要性

C6糖（グルコース等）およびC5糖（キシロース等）は、次世代の化学・バイオ産業における基幹・起点物質（プラットフォーム）と期待されていますが、これらの糖を30円/kg程度の安価で安定供給できるバイオマスリファイナリーシステムはこれまで存在せず、バイオマス資源の化学・バイオ利用技術普及のボトルネックとなっていました。

技術開発目標

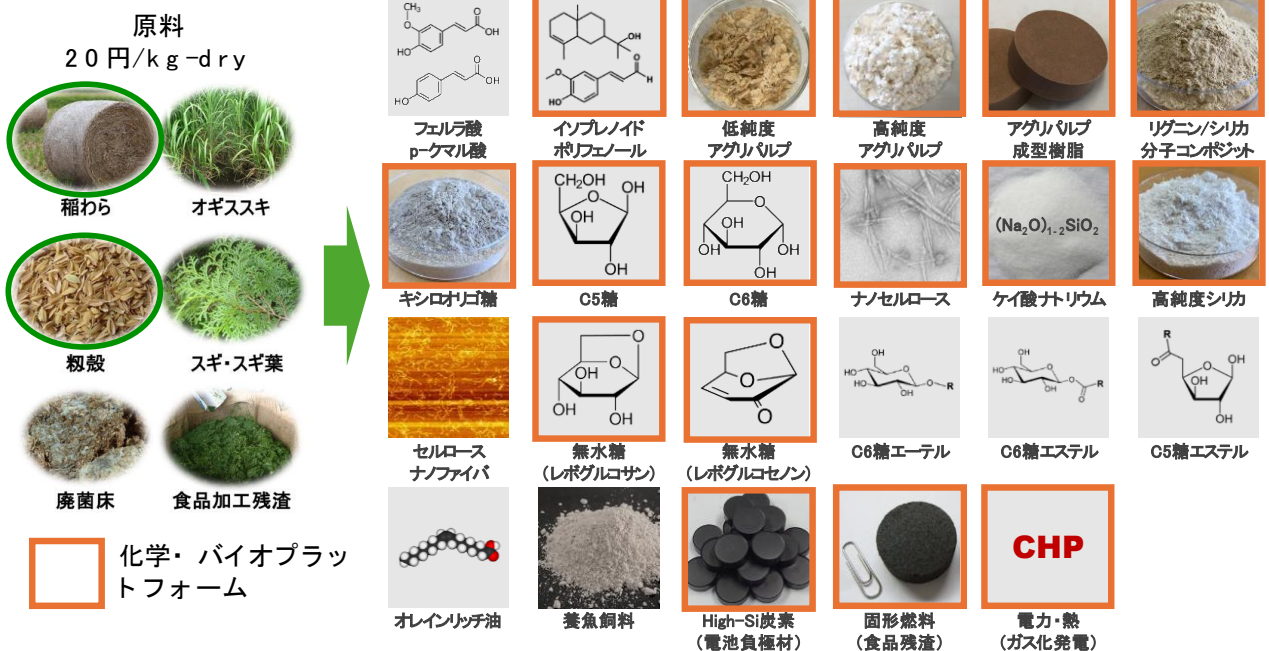
農業系バイオマス資源（とくに稲わら・もみ殻）等を原料とする高歩留りの成分分離と各成分の付加価値化を組み合わせたマルチプロダクト型の新バイオリファイナリー技術（アグリバイオ化学生産システム；ABCs）を開発し、C6糖の安価（30円/kg）・安定供給を実現する。

2. 達成した成果の概要

①稲わら・もみ殻を構成する主要三成分（C6糖、C5糖、ファイバー）、シリカおよびマイナー成分（イソプレノイド）をいずれも90%以上の歩留りで分離、回収し、さらに高機能化することに成功しました。正味の製品生産額は原料コストの10～20倍に達し、C6糖価格≈30円/kgを実現できる見通しを得ました。

②既往のバイオリファイナリーにはない製品（高純度シリカ・ケイ酸ソーダ、シリカリグニン複合体、ナノセルロース、C5/C6糖エーテル/エステル、オレインリッチ油、養魚用栄養添加剤等）が生み出され、システムの経済性が大いに強化できました。

【具体的成果】

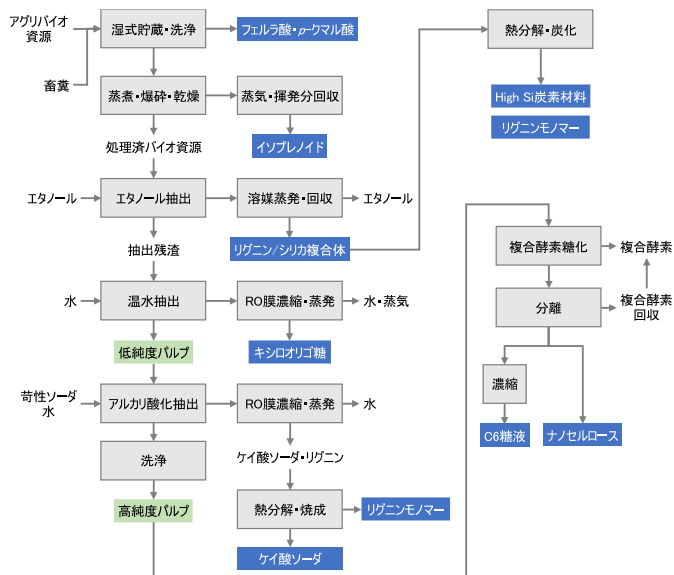


$$\frac{\sum \text{製品/原料 付加価値比}}{\text{C6糖のみを生産する従来システムの場合}} = \frac{190}{20}$$

C6糖のみを生産する従来システムの場合、
比 < 1 となり、経済的に成立しない

ABCsの原料（左側）と生み出されるプロダクト群. オレンジ色の枠をつけたプロダクトは次世代化学・バイオ産業の基幹物質・素材（プラットフォーム）。

【ABCs（最小構成）のプロセスフロー】



投入する溶剤は水、エタノール、苛性ソーダのみ。苛性ソーダはシリカとともに製品（ケイ酸ソーダ）に転換します。

3. 社会実装の展望と波及効果

想定されるユーザー（成果の受け渡し先）と活用方向

国内化学・バイオ企業と農業関係企業の共同出資による地域ベース事業体の設立がABCs実装の第一歩となります。ABCsプロダクト（C5・C6糖、ナノセルロース、低分子リグニン、シリカ、シリカ・リグニン複合体、イソプレノイド、芳香族酸等）のユーザーが事業体に参画することによって事業体の持続性がさらに高まると期待されます。

社会実装の実績

アグリバイオリファイナーは実用化に至っていないが、このシステムによって生産されるプロダクトの一部（イソプレノイドを添加した高機能アルコール消毒液）は2022年に「杉の雫」として製品化しました。

今後の発展可能性と期待される波及効果

C6糖・C5糖を原料とする化学・バイオ製品と製造技術の普及が進むことによって糖の安価・安定供給に対する需要がますます高まり、リグニンやバイオシリカの需要が大きくなるなかで、多くの国内農業地域へのABCs実装が実現すると期待されます。

研究課題名：バイオ資源循環のための化学・バイオ生産技術開発（アグリバイオ・スマート化学生産システムの開発）

実施機関：九州大学

問い合わせ先：092-583-7796（九州大学先導物質化学研究所・林潤一郎）

e-mail: junichiro_hayashi@cm.Kyushu-u.ac.jp

【ABCs（最小構成）の経済性評価事例】

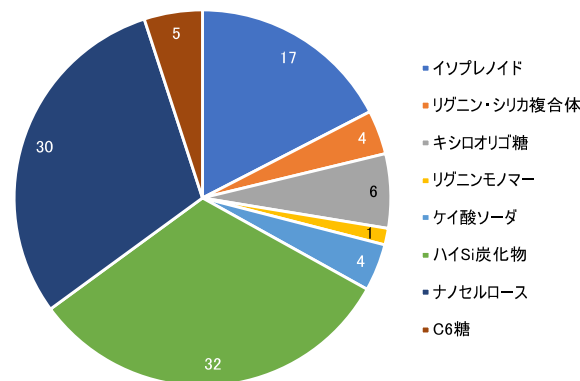
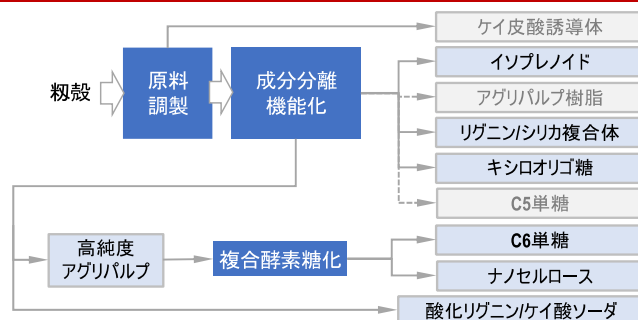
基本条件（ベストケース）

- 原料処理量：30,000 t-dry/年（規模factor = 1）
- 設備費：52 億円（設備費factor = 1）
- 年間稼働時間：8,760 h
- 原料費：20,000円/t-dry（原料費factor = 1）
- 熱投入量：10.4 MJ/kg-dry-原料（熱需要factor = 1）
- 熱コスト：3.36 円/MJ(12.1 円/kWh)
- 酵素コスト：18円/kg-糖
- 製品総乾燥重量/原料乾燥重量 = 1.03（収率factor = 1）

| 製品 | 収量 kg/100 kg-原料 | 想定単価 円/kg | 売上 円/100 kg 原料 |
|-------------|--------------------|--------------|-------------------|
| イソプレノイド | 0.52 | 6600 | 3,432 |
| 高純度パルプ | 0.00 | 45 | 0 |
| ケイ酸ソーダ | 15.95 | 50 | 797 |
| リグニン/シリカ複合体 | 12.46 | 60 | 748 |
| キシロオリゴ糖-C5糖 | 20.93 | 60 | 1,256 |
| ナノセルロース | 7.40 | 800 | 5,920 |
| C6糖 | 32.89 | 30 | 987 |
| ハイSi炭素 | 7.85 | 800 | 6,279 |
| リグニンモノマー | 3.53 | 80 | 282 |
| 合計 | 101.5 | 合計 | 19,701 |

プロダクト総生産額は、プロダクト数を最小限に絞り込んだ場合でも正味で原料（もみ殻）の10倍になります。

経済環境性能評価ツールを用いたABCs（最小構成）の事業性検討結果（例）



オギススキの栽培、収穫および貯蔵技術の開発

1. 研究の背景と開発目標

研究の背景と必要性

わが国には農業生産に活用されていない農地（耕作放棄地、荒廃農地）が42万ha以上あります。資源植物の栽培はその有効活用法のひとつであり、有効性の実証は、国産バイオマス生産、非活用農地以外の土地を利用した栽培につながると期待されます。

技術開発目標

資源植物（オギススキ）の栽培、収穫、貯蔵および高付加価値物の回収技術を冷涼地域向けに開発し、高生産性と低生産コストを実証する。

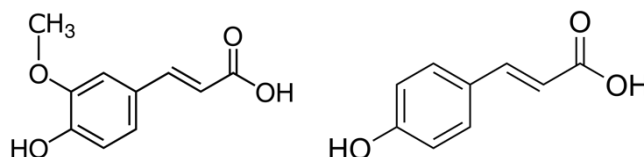
2. 達成した成果の概要

- ①オギススキが耕作放棄地や酸性粘土質圃場（秋田県）において良好に生育し、とくに株の水平方向の拡がりに優れる新品種（MB-1、MB-2の二種を品種登録出願公表済）は4年目の収穫量が最大32 t-dry/haに達することを実証しました。栽培・収穫・貯蔵の一連の工程、簡便な貯蔵によるサイレージ化も実証しました。
- ②畜糞灰の低コスト製造法を開発し、畜糞灰をアルカリ代替とするオギススキおよび稲わらの湿式貯蔵を実証しました。
- ③新品種の採用と栽培～収穫工程の最適化によって、圃場造成コストは87万円/haから23万円/haに削減できた。さらに、透湿防水シート下の簡便貯蔵によって総生産コストを21.1円から19.4円（乾物1kgあたり）に削減しました。湿式貯蔵を行った場合でも、畜糞灰利用および高付加価値のフェノール酸（フェルラ酸、*p*-クマル酸）を回収することによって、総生産コストを19.9円未満（乾物1kgあたり）に抑えることが可能になりました。

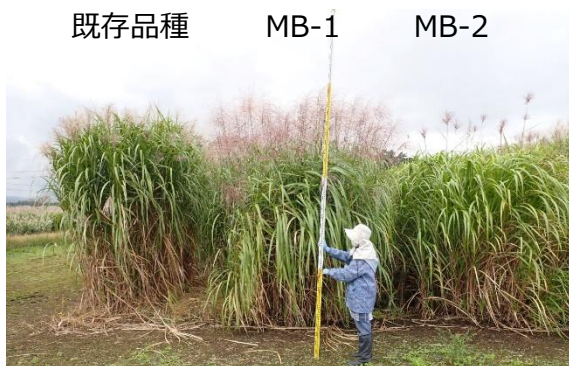
【具体的成果】



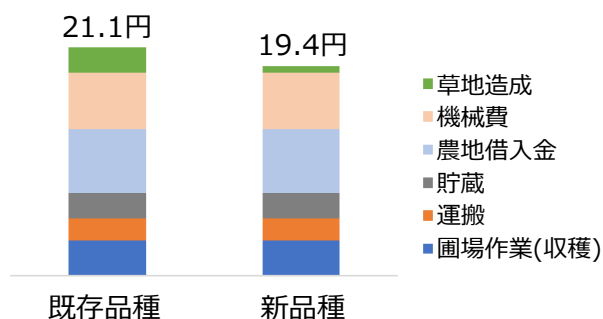
(左)オギススキ新品種（品種：MB-2、3年目）の生育状況、(中)湿式貯蔵後のオギススキ、(右)防水透湿シートを被せるだけの簡便な貯蔵とサイレージ化の様子。



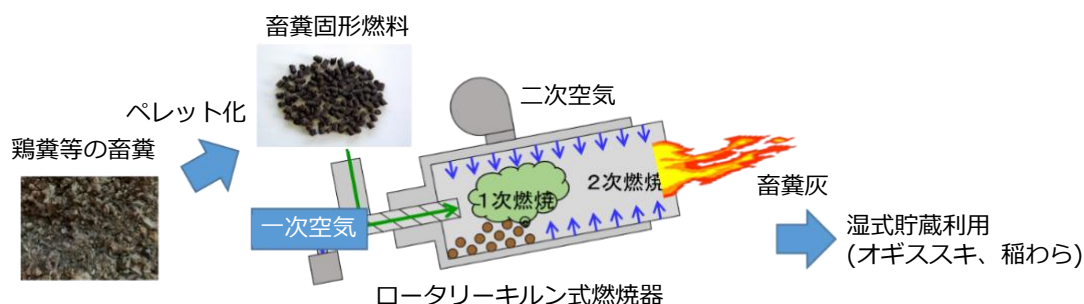
湿式貯蔵中に生成するフェルラ酸（左）および*p*-クマル酸（右）。フェルラ酸および*p*-クマル酸は、オギススキ乾燥重量の約0.9 wt%および約0.5 wt%生成するが、いずれも抗酸化作用が極めて高く、食品・ヘルスケア分野で需要が増大しています。市場価格は7,000円/kg前後。



新品種の株の拡がり(株幅)は2~3年目で既存品種の2.5倍に達する



新品種採用によるオギススキ(乾物1kgあたり)の製造コスト低減



湿式貯蔵用アルカリ代替としての畜糞灰製造法を開発

3. 社会実装の展望と波及効果

想定されるユーザー（成果の受け渡し先）と活用方向

本技術は、アグリバイオリファイナリーを社会実装する前の実装が可能です。本プロジェクトではオギススキ新品種の開発だけでなく、簡便な貯蔵によるサイレージ化が可能であることも実証済みです。サイレージの生産開始に次いでABCsへの原料供給が開始されると期待されます。

社会実装の実績

プロジェクト期間中の社会実装には至らなかったが、オギススキ品種の確定（品種登録出願公表済）、圃場における栽培～収穫、貯蔵、有用化合物の抽出・回収にいたる全工程を実証済みであり、実装readyの状態にあります。

今後の発展可能性と期待される波及効果

オギススキの生産量（収穫量、乾物）を20 t/haとし、これを全国の耕作放棄地、荒廃農地に展開すると800万t/年を超える生産が期待でき、他の適地での栽培も期待すれば1,000万t/年の生産も期待できます。この量は、オギススキを化学・バイオ産業の原料として考えると相当のインパクトがあります。

研究課題名：バイオ資源循環のための化学・バイオ生産技術開発（アグリバイオ・スマート化学生産システムの開発）

実施機関：九州大学

問い合わせ窓口：092-583-7796（九州大学先導物質化学研究所・林潤一郎）

e-mail: junichiro_hayashi@cm.Kyushu-u.ac.jp

（ご連絡をいただければ開発の主担当者に取り次ぎます）

C6糖とナノセルロースを同時につくる酵素糖化法

1. 研究の背景と開発目標

研究の背景と必要性

酵素糖化は長らくC6糖（グルコース等）を生産する技術として期待されていますが、ごく一部を除いて産業用C6糖をバイオマスから安価（たとえば30円/kg-糖）で製造する技術は未だ実装されておらず、C6糖の生産はこれをプラットフォームとする化学・バイオ生産のボトルネックとなっていました。

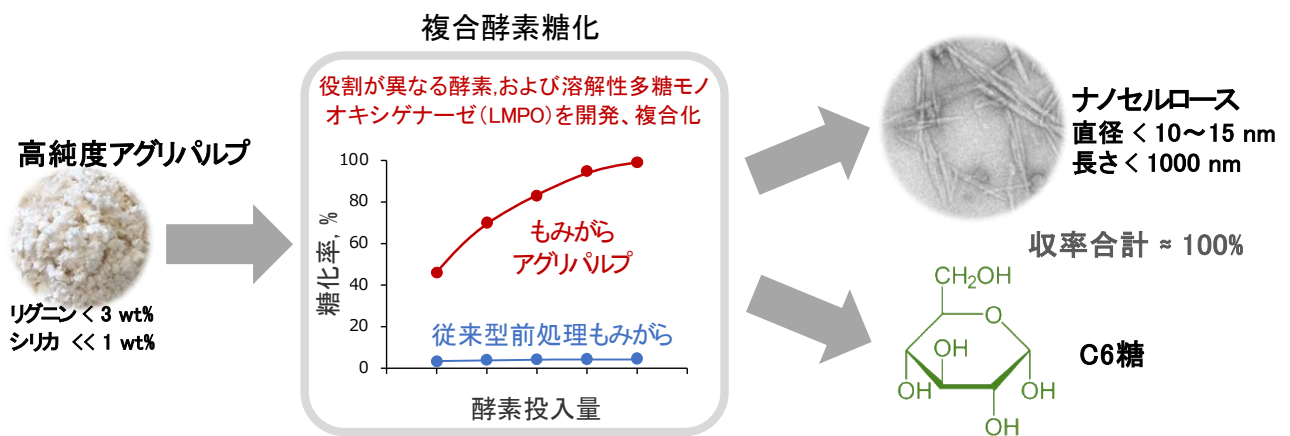
技術開発目標

純国産菌株由来の酵素の適用によって稲わら、もみ殻由来の高純度パルプ（アグリパルプ）からC6糖およびナノセルロースを併産する技術を開発する。

2. 達成した成果の概要

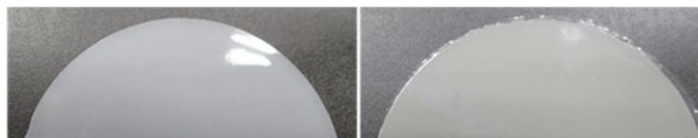
- ① 純国産菌株に由来する酵素型の酵素を開発した。これに加えて、C6糖・ナノセルロース併産に有効であることが判明した溶解性多糖モノオキシゲナーゼ（LMPO）をクローン化し、活性を明らかにしました。
- ② 新規カスタム型複合酵素を開発し、同酵素の適用によって高純度アグリパルプからC6糖およびナノセルロース（繊維径<15 nm、繊維長<1000 μm）をそれぞれ80%~および~20%の収率でパルプ残渣を発生させることなく製造する技術を開発しました。
- ③ ナノセルロースは既存製品にはないサイズとアスペクト比（繊維長/繊維幅）を有し、しかも解繊処理を経ることなくに生分解性樹脂中の高分散とこれによる樹脂物性の大幅改善が可能になりました。

【具体的成果】



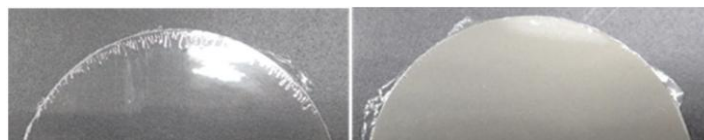
- 例えば、C6糖：ナノセルロースを7～8：3～2の比で生産
- ナノセルロース併産によってC6糖製造の経済性が飛躍的に向上
- リグニン、シリカによる強力な阻害を事前除去

複合酵素と本プロジェクトで開発した高品位パルプ（アグリパルプ）の組み合わせは、ナノセルロースとC6糖のコプロダクションに最適の組み合わせであり、安価なC6糖を製造するためのアグリバイオリファイナーの高い国際競争力のキー技術です。



樹脂A 100%

樹脂A 95% : NC 5%



樹脂B 100%

樹脂B 95% : NC 5%

複合酵素糖化によって製造したナノセルロース (NC) : 繊維長 < 1,000 nm、繊維径 < 15 nm (メジアン径 5~10 nm)。機械的解砕をせずとも分散剤添加あるいは樹脂への混合 (溶融混練) によって分散が得られます。

ナノセルロース (NC) は、機械処理等による解繊処理を施すことなく、樹脂との溶融混練によって樹脂中に分散し、凝集塊も発生しない。NCの分散による樹脂の物性の改善 (線膨張係数低下、軟化温度上昇、引張・曲げ弾性率の向上) を確認しました。

3. 社会実装の展望と波及効果

想定されるユーザー (成果の受け渡し先) と活用方向

ABCsを実装しようとする地域共同事業体 (地域農業-化学・バイオ産業連携) がまず想定されるユーザーです。ABCsにおける起点化学プロセスによって製造される高品位パルプは本酵素糖化技術に最適の中間原料を提供します。

社会実装の実績

本技術はプロジェクト期間中の社会実装には至っていませんが、革新的技術である「C6糖とナノセルロースの併産」は、ABCsの実装に合わせずとも、ナノセルロースを適切な価格で販売できれば、一般的なバイオマスを原料として単独で実装可能です。

今後の発展可能性と期待される波及効果

本技術は、ABCs が次世代化学・バイオ産業の基幹物質であるC6糖を30円/kg程度の安価で販売することを可能にするための鍵技術のひとつとして開発しました。本技術は、酵素糖化による製品の総付加価値を3~6倍に引き上げることを可能にするため、酵素糖化だけでなく、これに続くエタノール製造等のゲームチェンジャーです。

研究課題名：バイオ資源循環のための化学・バイオ生産技術開発 (アグリバイオ・スマート化学生産システムの開発)

実施機関：九州大学

問い合わせ窓口：092-583-7796 (九州大学先導物質化学研究所・林潤一郎)

e-mail: junichiro_hayashi@cm.Kyushu-u.ac.jp

(ご連絡をいただければ開発の主担当者に取り次ぎます)

熱分解を起点とするバイオマス変換技術

1. 研究の背景と開発目標

研究の背景と必要性

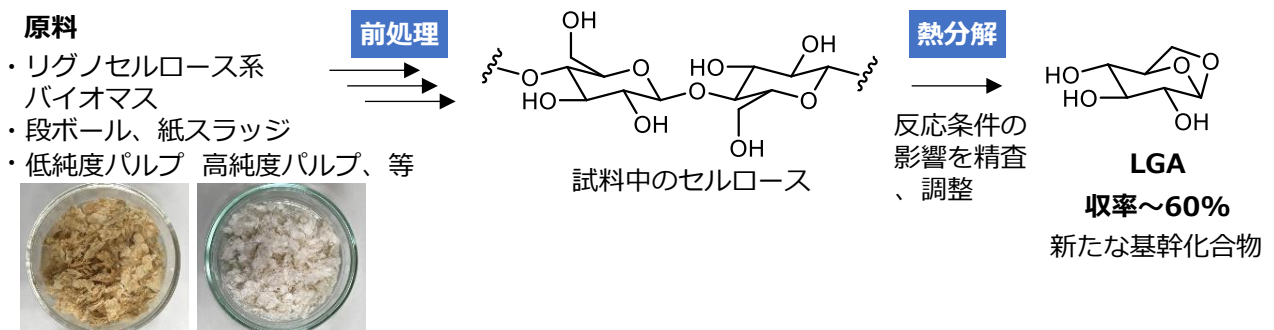
成分分離や酵素糖化等、リグノセルロース系バイオマスを化学資源化するための従来の処理は溶液中での反応が主となり、これにより目的物質の生産性が損なわれ、コストが高くなります。現行の石油化学に匹敵する化学品生産をバイオマス原料で実現するためには、それに見合う反応速度を有する処理法の開発が求められる、あるいは必須と考えられます。

技術開発目標

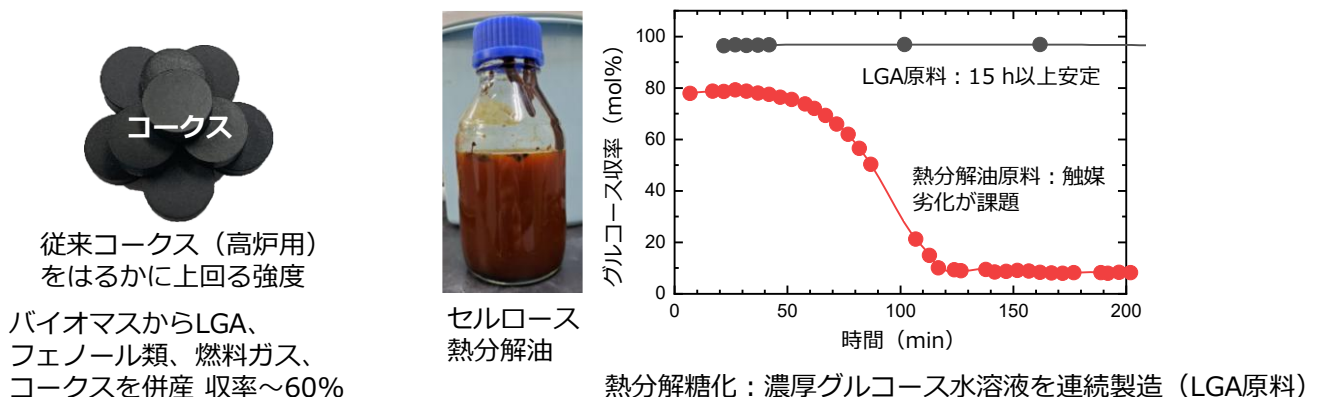
本研究では、簡便であり、かつ反応速度が速い熱分解を起点とするバイオマス変換法の開発に取り組みました。具体的には、セルロースに由来する無水糖を可能な限り高収率で、多様な原料から製造するための技術基盤を確立し、糖化と同等のグルコースに至る処理法、さらには他の有用化合物を無水糖から製造あるいは併産する技術の開発を目指しました。無水糖はグルコース起点では困難な様々な化学誘導を可能とする化合物です。

2. 達成した成果の概要

①セルロース熱分解の主成分であるレボグルコサン（LGA、無水糖）を高収率で製造するための反応条件を精査し、無水糖全体として世界最高水準である60%近くの収率を達成し、セルロースの半分以上をLGAに変換する条件を見出しました。リグノセルロース系バイオマス（木質やアグリバイオ等）や段ボール、ペーパースラッジ等の低品位セルロース系資源からでも適切な前処理をすれば同等の無水糖製造が可能でした。高強度コークスを併産することも試みました。

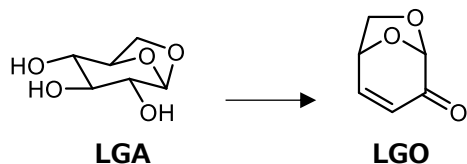


②LGAを水溶液中で酸触媒の存在下で反応させると、バイオマス化学の基幹物質であるグルコースに速やかに変換されます。ともに迅速な熱分解との組合せで、これを熱分解糖化と名付けて研究しました。本反応に有効な市販の樹脂触媒を用いて、反応速度を詳細に明らかにしたうえで、触媒層に連続的にLGA水溶液を流して高濃度のグルコース水溶液を得ることに成功しました。LGAが主成分として含まれる熱分解油を原料に用いた試験では実装に向けた課題を抽出しました。



③LGAと同じくセルロース熱分解の生成物に含まれる無水糖の一種である**レボグルコセノン (LGO)**も様々な化学物質への基幹化合物として世界中で注目されています。そこで効率的にLGOを製造する技術の開発にもいくつかのアプローチで挑戦しました。グリーン溶剤として注目される深共晶溶剤を触媒としてセルロースに添加して熱分解する方法や、LGAを非水溶剤中で変換する方法です。いずれにおいても、炭素基準でセルロースの40%近くをLGOに変換することができています。

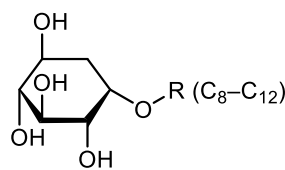
④界面活性剤等の高付加価値用途が見込まれる**糖エーテル**の原料としてLGAを主成分とするセルロース熱分解油を適用しました。市販の樹脂触媒を用いて流通式でC8アルコールと反応させる連続合成を行い、LGAを原料としてはじめて可能となる反応系であることを見出すとともに、触媒活性の低下なしに工業レベルの生産性を実現することができました。生成した糖エーテルは特異的な構造を有しており、油汚れの洗浄に有効な作用に優れること、などを明らかにしました。



取率~40%

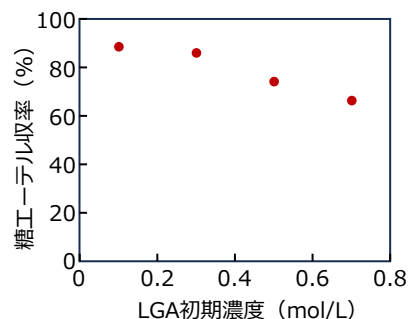
核的な基幹化合物

深共晶溶剤添加したセルロースを熱分解する方法、あるいは非水溶剤中での触媒変換で効率的にLGOを製造



糖エーテル

高付加価値用途



LGAならではの反応性を活かして工業レベルの生産性で連続的に特異的な構造をもつ糖エーテルを合成

3. 社会実装の展望と波及効果

想定されるユーザー（成果の受け渡し先）と活用方向

本事業に基づく地域ベース事業体の設立、とりわけ熱分解を含む無水糖製造技術は固体炭素系資源の熱化学変換に実績のある企業との連携を踏まえた枠組みの構築が重要と考えます。糖エーテルは市場拡大の見込みがあり現状でも乳化剤用途でユーザーからの高い需要があります。

社会実装の実績

実装には至っていません。無水糖は大規模設備を用いた試験的な製造を行った実績がありますが効率化が必要です。糖エーテルの合成技術はコスト試算や品質評価を行っており、ポテンシャルユーザー（化学系企業）からの品質に関する高評価も得ています。

今後の発展可能性と期待される波及効果

熱分解を起点とするバイオマス変換技術は、従来の経路と異なる糖製造工程の一部として発展すること、さらには無水糖であるが故に合成可能な化合物、化学品にもバイオマス化学を拡張させることが考えられ、世界的にも未踏の技術として今後の発展が期待されます。

研究課題名：バイオ資源循環のための化学・バイオ生産技術開発（アグリバイオ・スマート化学生産システムの開発）

実施機関：九州大学

問い合わせ窓口：092-583-7796（九州大学先端物質化学研究所・林潤一郎）

e-mail: junichiro_hayashi@cm.kyushu-u.ac.jp

（ご連絡をいただければ開発の主担当者に取り次ぎます）