

委託プロジェクト研究
「農林水産分野における気候変動対応のための研究開発」
平成29年度 最終年度報告書

途上国における農産廃棄物の有効活用による気候変動緩和技術の開発

研究実施期間	平成25年度～平成29年度（5年間）
代表機関	国立研究開発法人 国際農林水産業研究センター（JIRCAS）
研究開発責任者	村田善則
共同研究機関	国際再生可能エネルギー機関（IRENA）
	ナイジェリア大学
	農林水産政策研究所
普及・実用化 支援組織	
研究開発責任者 連絡先	TEL : 029-838-6642 FAX : 029-838-6643 E-mail : muratayo@affrc.go.jp

<別紙様式3．最終年度報告書>

I－1．年次計画

研究課題	研究年度					担当研究機関・研究室	
	25	26	27	28	29	機関	研究室
1 途上国における農産廃棄物の有効活用による気候変動緩和技術の開発							
1-1 農産廃棄物資源量の評価及び対象国・対象農産廃棄物の選定	←	→				IRENA, JIRCAS	
		農産廃棄物資源量・コスト評価手法の開発、対象国・対象農産廃棄物の選定					
1-2 農産廃棄物活用技術の評価及び選定	←	→				IRENA, JIRCAS	
		農産廃棄物の特性調査・バイオエタノール等への変換技術の選定					
1-3 農産廃棄物活用技術の導入支援ツールの開発	←	→				JIRCAS, ナイジェリア大学	
		農産廃棄物変換技術の導入支援ツールの開発					
1-4 対象地域で適用可能な技術の開発		←	→		→		生物資源・利用領域 微生物学科
		対象地域で適用可能なバイオエタノール等への変換技術の開発				IRENA, JIRCAS, ナイジェリア大学	
1-5 導入技術・システムのインパクト評価及びフィードバック			←	→	→		生物資源・利用領域 微生物学科
			コスト評価・導入技術・システムのインパクト評価及びフィードバック				

I-2. 実施体制

研究項目	担当研究機関・研究室		研究担当者
	機関	研究室	
研究開発責任者	国際農林水産業研究センター	生物資源領域	◎○村田 善則
1-1 農産廃棄物資源量の評価及び対象国・対象農産廃棄物の選定	国際再生可能エネルギー機関 (IRENA)		○仲田俊一(～平成27年3月)
① 農産廃棄物資源量・コスト評価手法の開発			
② 農産廃棄物資源量・コスト評価手法の開発・対象国・対象農産廃棄物の選定	国際農林水産業研究センター	島嶼拠点	○大前 英
1-2 農産廃棄物活用技術の評価及び選定	ナイジェリア大学	微生物学科	○James C. Ogbonna
① 農産廃棄物の特性調査			
② 農産廃棄物の特性調査バイオエタノール等への変換技術の選定	国際農林水産業研究センター	生物資源利用領域	○村田善則
1-3 農産廃棄物活用技術の導入支援ツールの開発	国際再生可能エネルギー機関 (IRENA)		○△仲田俊一(～平成27年3月)
① 農産廃棄物変換技術の導入支援ツールの開発	国際農林水産業研究センター	島嶼拠点	○大前 英
1-4 対象地域で適用可能な技術の開発	ナイジェリア大学	微生物学科	△James C. Ogbonna,
① 対象地域で適用可能なバイオエタノール等への変換技術の開発	国際農林水産業研究センター	生物資源利用領域	○△村田善則

1-5 導入技術・システムのインパクト評価及びフィードバック	国際再生可能エネルギー機関 (IRENA) ナイジェリア大学 国際農林水産業研究センター	微生物学科 島嶼拠点 生物資源利用領域	○△井上 泰子（平成28年4月～） James C. Ogbonna 大前 英 ○△杉野 智英（平成27年4月～平成28年3月） 村田善則
---------------------------------------	---	---------------------------------------	---

(注1) 研究開発責任者には◎、小課題責任者には○、実行課題責任者には△を付すこと。

中課題番号	13406681	研究期間	平成25～29年度
大課題名	農林水産分野における気候変動対応のための研究開発		
中課題名	途上国における農産廃棄物の有効活用による気候変動緩和技術の開発		
代表機関・研究開発責任者名	国際農林水産業研究センター・大前 英		

I－1. 研究目的 国際再生可能エネルギー機関（IRENA）と連携し、西アフリカ等の途上国に多く存在する農業廃棄物の有効活用による温室効果ガス排出削減のため、農産廃棄物を主とした資源量・コスト評価手法を開発し、農産廃棄物利用技術の導入支援ツールをカスタマイズすると共に、アフリカの2カ国以上で適用可能な農産廃棄物を有効活用した技術モデルを開発する。

（1）農産廃棄物を主とした資源量・コスト評価手法を開発し、アフリカの2ヶ国以上を対象に資源量評価を行う。

（2）2ヶ国以上の対象国で適用可能な農産廃棄物を利用した温室効果ガス排出削減技術モデルを1件以上開発する。

（3）資源開発案件を実際に導入するための支援システムであるプロジェクトナビゲーターを、農産廃棄物の観点で改良し、2ヶ国以上で適用可能か検証する。

このため、本研究では、

（1）農産廃棄物資源量の評価及び対象国・対象農産廃棄物の選定

農産廃棄物の資源量・コスト評価手法を開発し、それを用いて現地で技術開発を行うための対象国と対象農産物を選定する。

（2）農産廃棄物活用技術の評価及び選定

対象国における農産廃棄物の種類、量や特性等に応じて効率的にバイオエタノール等に変換する技術を選定する。

（3）農産廃棄物活用技術の導入支援ツールの開発

（1）（2）の結果から、IRENAで開発中の導入支援ツール（プロジェクトナビゲーター）を農産廃棄物に適用できるように改良する。

（4）対象地域で適用可能な技術の開発

選定した農産廃棄物をバイオエタノール等へ変換する技術をアフリカの現場に合う形に改良し、技術モデルとして示す。

（5）導入技術・システムのインパクト評価及びフィードバック

改良したバイオエタノール等変換技術を現場で普及する際に遭遇するコスト、環境や社会へ与えるインパクト等を評価し、よりアフリカの現場に対応した技術体系に改良する。開発・改良した支援ツールを現場に適用・検証し、フィードバックを通して、アフリカの現場に適したシステムに改良する。

以上により、選抜した農産廃棄物から分離酵母を用いたエタノール生産を行い、現地における技術モデルとして示す。また選抜した農産廃棄物からの液体燃料を生産したときの社会および環境におけるインパクトについて示すとともに、プログラムナビゲーターの作成と利用を目標とする。

その結果、

1. 西アフリカにおいて豊富に存在するキャッサバ加工からの廃棄物を対象とした。
2. キャッサバ加工工場で廃棄物が局所的に集積されること、成分がデンプンを含む成分を有することからエタノール生産技術を開発した。
3. バイオマスエネルギー利用に関する持続的指標（環境、社会、経済的に係る要素を含む）について農産廃棄物を評価するためのツールを開発した。
4. 耐熱性酵母の分離に成功し、ジャーファーメンターを用いて現地でエタノール生産が可能な技術として示した。
5. バイオエネルギーの社会環境におけるインパクトを評価し、バイオエタノール生産が社会や環境に及ぼす影響について評価した。

これより西アフリカにおける廃棄物からの燃料用エタノールの生産技術開発の普及及び利用の促進が期待される。

1-2. 研究結果

技術開発を行う対象国2ヶ国、対象農産廃棄物1件以上の選定

平成25、26年度を通して、アフリカ諸国におけるバイオマス資源量や研究体制（連携可能なパートナーの存在）などを考慮して、ナイジェリアとガーナの2ヶ国を選定した。また2ヶ国で生産規模が大きくバイオマス発生量が多いキャッサバを選定した。この利用過程において排出されてくるキャッサバ残渣（キャッサバパルプ）を選定してその化学的特性について調べ、バイオ燃料の原料としての評価を行った。

農産廃棄物を利用した変換技術を対象国2ヶ国で1件以上選定

平成25、26年度を通して、対象国ガーナ、ナイジェリアにおける農産廃棄物の種類の調査及び選抜した農産廃棄物の特性評価のため、化学成分の分析を行った。キャッサバはアフリカで代表的な農作物で、ガーナ、ナイジェリアは主要な生産国である。食品加工から排出される廃棄物も多い。賦存量とデンプンという特性及び、JIRCASの発酵技術より、キャッサバ廃棄物をエタノール変換することが望ましいと考えられる。

農産廃棄物の資源量・コスト評価手法の開発

廃棄物が存在する場所と規模の観点で廃棄物とを分類した場合、大きく分けて小規模分散型と大規模集中型（＝プランテーション型）との2種類のタイプに分類された。各国に共通して量が多いのは自給主体で広範に分布するキャッサバ、次に各国の自然条件等に応じて生産されるオイルパーム、サトウキビ等いわゆるプランテーション型の作物であった。

農産廃棄物量を推定する場合、大規模集中型については、主要工場をリストアップし、工場ごとの生産量に基づいて廃棄物発生量を推計するボトムアップ方式が適用できるが、小規模分散型については、ボトムアップ方式の適用が困難であるため、国または州の農業生産統計に基づいて廃棄物発生量を推計するトップダウン方式を採用した。上記の二通りの手法で廃棄物の潜在量を評価したが、両者の推計量には最大で10倍以上の開きが見られた。これは主要工場のリストが全体を網羅できていないこと、中小規模の工場が把握できないことによると思われる。

平成25、26年度を通してコスト分析を含むバイオマス資源量総合評価手法（IRENA）、バイオマス資源・技術評価フローを開発した。本手法を用いて、技術及び輸送コスト分析を含む農産廃棄物の資源量を評価した。

資源開発案件を導入するための支援システムであるプロジェクトナビゲーターの改良

FAOの開発した資源量・技術評価ツール（FAO-Rapid Appraisal）をベースに部分的な改良を行い、具体的には、GBEP（国際バイオマスエネルギーパートナーシップ）が開発したバイオマスエネルギー利用に関する24項目の持続性指標から農産廃棄物利用に関係する13項目を用い、この13項目を評価するためFAOの開発したBEFS-RAを活用した。

平成25、26年度を通して、IRENAが開発したプロジェクトナビゲーターを農産廃棄物に適用できるように改良した。具体的には、バイオマス利用技術の評価指標としてGBEPの24指標のうち、環境（3）、社会（5）、経済（5）にかかわる要素13項目を選定、これら13項目を評価するため、FAOの開発したツール（FAO-Rapid Appraisal）をシステム内に組み込んだ。

現地で適用できるバイオマスエタノール等への変換技術のための酵母の開発

デンプン系バイオマスは糖化後の発酵が高い温度（40℃）で実施される場合、粘性が下がることにより攪拌などのハンドリングが良くなる。40度で発酵することにより、エタノール生産速度

が早くなるので生産性が向上する。30℃から45度までの広い温度レンジを有する耐熱酵母は、バイオマスからのエタノール生産に関わるコストの削減につながることから、ナイジェリアにおいて耐熱酵母を開発する。

高いエタノール生産能を有する株の選抜

1,037株の中から耐熱性を有しながら高いエタノール生産性を示す酵母株の選抜を行ったところ96株が選抜され、更に6株の酵母に絞られた。この6株の同化糖を調べたところ、グルコースの他に、グリセリン、ガラクトース、ラフィノースを同化糖として使用できることが明らかになった。同化糖およびリボソームRNA由来のDNA配列より、本酵母はいずれも*Pichia kudriavzevii*であることが明らかになった。

選抜酵母株の適応

培地中に酢酸を50–70mM添加すると、エタノール生産が0.3–0.5%程度増加する現象の再現性を求めて実験を行った結果、いくつかの株について酢酸存在下でエタノール濃度が増加する現象がみられた。また異なる種類の酵母*P. kudriavzevii*を用いて酢酸存在下におけるエタノール濃度の上昇の現象を確認した。その現象は40度以上でも同様の結果を得ることができた。

現地でのキャッサバ廃棄物からのエタノール発酵のため、条件検討を開始した。その結果、pHをpH5付近で調整して酵母を添加したところ、エタノール生産を確認することができた。

ジャーファーマンタースケールでのエタノール生産

ジャーファーマンター（5L）を用いて、キャッサバパルプから最大6.7%のエタノール生産が確認できたことから、現地で分離開発した酵母を用いて農産廃棄物からのエタノール生産が現地において技術的に可能であることを示すことができた。

測定機器の設置などの環境整備

多数のサンプルからのエタノールを測定するため、高速液体クロマトグラフィー（HPLC）を導入し、ナイジェリア大学に設置した。また、ナイジェリアでの材料と酵母を用いて発酵がスケールアップできるようにジャーファーマンター（発酵槽）を設置した。

経済性から評価した技術の普及可能性

ナイジェリアで、キャッサバデンプン工場、農民等を対象とした聞き取り調査及び文献調査を行い、変換技術のコスト試算に必要なデータを収集した。

同国の地域レベルの生産統計データに廃棄物発生係数を掛け合わせることで得られたキャッサバ廃棄物の発生量をエネルギー換算すると、年間約120,000TJとなり、同国国民の約2%に相当する360万人の年間消費エネルギーを供給可能な資源量に相当する。キャッサバ廃棄物を原料とするエタノール生産コストを試算したところ、1リットル当たり0.54~0.95ドルとなり、ガーナにおける生産コストの約1/3~1/2の水準であることがわかった。

農産廃棄物の規模・分散別データ収集・集計方法の確立

カメルーン、ガーナでの追加調査により、ボトムアップ方式のデータ収集の拡大を試みたが、国レベルで主要な農産加工施設のデータを入手することは極めて困難であることが確認された。このためボトムアップ方式で国のデータを網羅することは断念し、統計情報をベースとして国の概況及び重点地域を確認した上で、絞り込んだ品目を対象として主要な工場を対象にバイオマスの利用可能性を評価するためのケーススタディを行うという方向性に変更して調査を継続した。

収集・輸送コストの改善

収集コスト評価についてはGISを用いた簡易分析（地域ごとに同心円方式で収集距離、コストを簡易に判定）と詳細分析（道路地図を用いて輸送経路を評価）を行うため、基礎となるGISデータを収集した。

総合評価の構築

バイオマス利用に伴う環境、経済、社会的なインパクトを技術ごとに比較検討するために、AHP法（Analytical Hierarchy Process）を用いることとして調査票を作成し、ガーナにおいて異なる関係者（中央政府、地方政府、農産物加工工場オーナー、農家）を対象に聞き取り調査を行った。現在、調査結果を取りまとめ中である。

環境・社会的インパクトの評価ツールの開発

農産廃棄物を利用したバイオエタノール生産新技術による事業導入がもたらしうる環境・社会インパクトポテンシャルの評価ツールについて、IRENAプロジェクト・ナビゲーターに組み込むことが可能な汎用性の高いツールとなるようツールの概略を検討した。

環境・社会インパクト評価ツールの検証

2016年度のナイジェリアのケースに続き、2017年度はガーナのケースについて委託調査を行い、キャッシュフローによる評価ツールの検証を行った。キャッサバ芋生産のコスト便益データ、でんぷん生産に必要なコスト便益データ、エタノール生産に必要なコスト便益データ等を収集し、それぞれを別シートで作成し、それらを農業の規模と、エタノールの価格別にケースごとにシート別にキャッシュフロー表にとりまとめ、要約表を作成し、事業ごとに数値を入れ替えて評価を行うことが可能なツールとして完成した。

環境・社会的インパクトの評価

ステークホルダーによる優先的に開発すべきバイオエネルギー変換技術とその持続可能性指標による重みづけ評価ツールの開発を行った。

I-3. 今後の課題

デンプン工場からのキャッサバパルプは強い酸性を示した。中和しても通常の酵母株では発酵ができなかったが、今回分離開発した酵母株 *P. kudriavzevii* 85-71 は強い酸耐性を示し、このようなキャッサバパルプにおいても高い発酵能が得られた。

本事業で開発されたツールについては、IRENAプロジェクト・ナビゲーターの担当者と協力し、エクセルシートの様式を作成し、バイオエネルギーの開発業者が融資を受けるために当該投資の持続可能性の検討結果として銀行等に提出できる資料として作成するためのウェブベースのフリー・ツールとして掲載する予定である（2018年5月頃）。

中課題番号	13406681	研究期間	平成25年度～26年度
小課題番号	11000	研究期間	平成25年度～26年度
中課題名	途上国における農産廃棄物の有効活用による気候変動緩和技術の開発		
小課題名	1) 農産廃棄物資源量の評価及び対象国・対象農産廃棄物の選定		
小課題責任者名・研究機関	国際農林水産業研究センター・研究戦略室・仲田俊一 国際農林水産業研究センター・熱帯・島嶼研究拠点・大前英（分担） 国際農林水産業研究センター・研究戦略室・沈志宏（特別研究員）		

1) 研究目的

- ・農産廃棄物の資源量・コスト評価手法を開発する。
- ・現地で技術開発を行うための対象国と対象農産廃棄物を選定する。

2) 研究成果

(1) 農産廃棄物に関する資源量調査の実施

アフリカ諸国はエネルギー作物に関するポテンシャルが高く、廃棄物に関するポテンシャルは低くなっていた。これは他の地域と比較した場合の相対的な人口密度の低さ（一人当たり栽培適地面積の広さ）、各種生産・経済活動規模の小ささを反映したものとなっている。他方で試算された供給コストを比較すると、農産廃棄物由来のバイオマス資源のコストはエネルギー作物、木質系バイオマスと比較してかなり低く（それぞれ2.7、16.6、17.6 USD/GJ）、短期的には農産廃棄物活用の実現性が高いものと考えられる。

ナイジェリアは、アフリカにおいて、最大の人口（1億6,475万人）を抱え、2012年のGDPは、2,626億ドルで、アフリカの第2位である。農林水産業は約30%(4%増)と高く、主食であるキャッサバ、ヤムイモ等の生産量が世界1位の農業国である。ナイジェリアのキャッサバは、最も安定的、安価的な資材で、同量のエタノールを生産するのに、最大93.5ナイラ/Lを節約できることを明らかにした（表1）。

	国名(41か国中上位11か国)	単位	農産加工 廃棄物資源量
1	Nigeria	PJ	303.81
2	Ghana	PJ	94.65
3	Egypt	PJ	75.28
4	Angola	PJ	43.32
5	United Republic of Tanzania	PJ	40.25
6	Ethiopia	PJ	38.75
7	Malawi	PJ	38.43
8	South Africa	PJ	36.61
9	Uganda	PJ	36.51
10	Morocco	PJ	31.86
11	Cameroon	PJ	31.46

表1. ナイジェリアの種々の作物におけるエタノール生産に係るコスト

上記の結果に加え、過去の当該分野の研究実績や大学ネットワークへのアクセス等を踏まえ、ナイジェリア、ガーナ、セネガル、カメルーンを対象に、現地調査を実施した。2013年12月に行った調査では、ガーナのキャッサバデンプン工場、パームオイル工場、セネガルの落花生油、サトウキビ及び精米工場、カメルーンのシェド協同組合、カメルーン開発公社、パームオイル工場、農業及び地方開発省及び精米工場を訪問し、農産廃棄物に係る現地調査を行うとともに、関係者から農産廃棄物の利活用に関する聞き取り調査を行った。これらの現地調査等で得られた知見を、(1) 国別作物別生産高、(2) 国別作物別工場の規模別の農産廃棄物の局在性とアクセスについて、(3) 作物別加工品別農産廃棄物割合と利活用の現状、の3点に注目して整理した。

(1) 農産廃棄物の資源量・コスト評価手法の開発

農産廃棄物の種類毎に比較すると、各国において共通して量が多いのはキャッサバ由来の廃棄物で、各国に7,000～25,000TJの資源が存在すると見込まれる。しかし、これらの廃棄物は大半が従業員数名程度の極めて小規模の加工業者によって分散して生産されており、廃棄物を効率的に収集・輸送するシステムは存在していないことからエネルギーとしての利用形態も小規模分散型のものを検討する必要がある。

次に多いのがいわゆるプランテーション型の作物で、カメルーンでオイルパーム、木材由来（それぞれ2,600TJ、1,300TJ）、ガーナでオイルパーム由来（5,700TJ）、ウガンダで砂糖キビ由来（26,000TJ）の農産廃棄物の存在が確認された。資源量を評価する手法として国または州の農業生産統計に基づいて廃棄物発生量を推計するトップダウン方式と、主要工場をリストアップし、工場ごとの生産量に基づいて廃棄物発生量を推計するボトムアップ方式の二通りの手法で廃棄物の潜在量を評価したが、両者の推計量には最大で10倍以上の開きが見られた（表2）。これは主要工場のリストが全体を網羅できていないこと、中小規模の工場が把握できないことによると思われる。

Region	Biomass potential (PJ) Top down (A)	Biomass potential (PJ) Bottom up (B)	Share (B/A)	Plant surveyed	Plant listed
Cameroon	81.4	4.5	5.6%	31	41
Ghana	304.5	8.7	2.9%	26	128
Uganda	57.7	44.9*	77.8%*	9	9
*: for Uganda, regional production data was used instead of data from processor since plant list was not extensive enough to capture whole nation					

表2. 異なる積算方式別農産廃棄物資源量（カメルーン、ガーナ、ウガンダ）

平成25、26年度を通してコスト分析を含むバイオマス資源量総合評価手法（IRENA）、バイオマス資源・技術評価フローを開発した。本手法を用いて、技術及び輸送コスト分析を含む農産廃棄物の資源量を評価した。更に開発した手法に加え、アフリカ諸国におけるバイオマス資源量や研究体制（連携可能なパートナーの存在）などを考慮して、ナイジェリアとガーナの2ヶ国を選定した。また2ヶ国で生産規模が大きくバイオマス発生量が多いキャッサバを選定した。

3) 成果活用における留意点

プランテーション型（大規模集中型）作物については、ボトムアップ調査を拡充し、小規模分散型作物については地域レベル（県・郡レベル）で評価を実施した。農産加工施設ベースの評価（ボトムアップ）と全国統計ベースの評価（トップダウン）の乖離がある。

4) 今後の課題

農産廃棄物資源量の正確な評価のため、統計データのアップデートが必要。

中課題番号	13406681	研究期間	平成25～26年度
小課題番号	12000	研究期間	平成25～26年度
中課題名	途上国における農産廃棄物の有効活用による気候変動緩和技術の開発		
小課題名	2) 農産廃棄物活用技術の評価及び選定		
小課題責任者名・研究機関	国際農林水産業研究センター・生物資源・利用領域・村田善則		

1) 研究目的

対象地域で農産廃棄物を有効活用するための技術を選定する。

2) 研究成果

(1) 農産廃棄物の特性評価に関するデータの収集

グローバルレベルではバイオマスをエネルギー利用する主な技術分野として、直接燃焼（伝統的薪利用、産業部門における熱利用）、ガス化およびバイオガス、液体燃料（バイオエタノール）を対象とし、各技術の特徴を整理するとともに、技術適用に伴う環境・地域経済等へのインパクトを文献調査に基づいて検証した。液体燃料（バイオエタノール）を対象とし、技術の特徴と動向を整理するとともに、技術適用に伴う環境・地域経済等へのインパクトを文献調査に基づいて比較分析を行った。成功の事例としては、ブラジル（Sugarcane bagasse）、アメリカ（Corn stover）、ヨーロッパ（Wheat straw）であり、それぞれの生産効率が41%、62%、59%で、生産コストは14.8\$/GJ、21\$/GJ、40.7\$/GJである。世界バイオエタノールの生産は、バイオ燃料の55.45%を占める。今後、先進国・途上国と共に、エタノール混合燃料の推進政策によって、世界のエタノールの消費量の増加傾向にある。

農産廃棄物活用の具体的技術については、西アフリカにおいて、キャッサバ、ヤムの生産量が世界でも有数のナイジェリアを選択し、これらの農作物の利用過程において排出されてくる残渣の中からキャッサバ加工の過程で生じる廃棄物を選定してその化学的特性について調べ、バイオ燃料の原料としての評価を行った。その他、ガーナとナイジェリアで農産廃棄物の特性評価に関するデータを収集した。

主な農作物生産高をガーナ、ナイジェリアで比較すると収穫量が多いのは、圧倒的に主食として用いられているキャッサバであった(表1)。バイオマス資源として用いるためには、1. 生産量が多いこと、2. 工場などに集積されていること、3. 物理的な強度があまり高くないこと、が重要である。また技術の普及を考慮すると広く使用されている農作物が適している。その点ではキャッサバは汎用性の高い農作物であるためバイオマス資源の候補として非常に魅力的である。

ナイジェリアのAnambra州に位置するIhiala Starch millでは一日200トンのデンプンを生産し、年間40,000トンのデンプンを生産する(図1)。規模としてはタイで最も大きなデンプン工場(3,300トン/日)には及ばないが、タイの約7割の工場の規模が200トン/日のデンプン生産である。

Country	Cassava	Oil Palm	Sugar cane	Ground nut	Cocoa
Nigeria	43,950Kt (1)	8,500Kt (4)	1,438Kt (48)	3,092Kt (3)	378Kt (4)
Ghana	12,308Kt (6)	1,939Kt (7)		451Kt (11)	668Kt (3)
Cameroon	3,340Kt (17)	1,571Kt (9)	1,248Kt (50)	502Kt (9)	243Kt (5)
Senegal	366Kt (39)	99Kt (31)	844Kt (54)	782Kt (7)	

(): World rank

表 1. 農作物の種類と生産量の比較(ガーナ、ナイジェリア、カメルーン、セネガル)



図 1. キャッサバデンプン工場でのデンプン製造工程とその過程で排出される農産廃棄物

ただし使用する水は約10m³/キャッサバ芋トンであり、タイの約2倍の水を使用している。またデンプン抽出過程では、デカンテーションによる廃液と固形分の分離を行っているため、キャッサバパルプの水分含量がほぼ100%である。このキャッサバパルプを乾燥してデンプン含量を調べたところ、76%であった（図 2）。

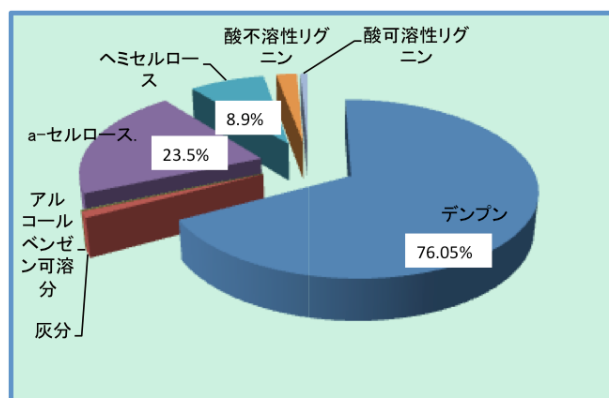


図 2. キャッサバパルプの化学成分

キャッサバパルプへのデンプン含量の高さは、食品と競合しない再生可能な資源としてはかなり魅力的である。実際には、セルロースエタノールは技術面、コスト面で超えなくてはならないハードルがまだまだ高い印象が否めない。一方、デンプン系の廃棄物は技術が確立されていることから、コスト面での改善によって商業用としてすぐ用いることができるので、キャッサバパルプをバイオマス資源としての利用を考えたい。変換技術としては、デンプンからの発酵技術としてエタノール発酵が考えられる。エタノール生産の利点としては、1. ナイジェリア政府としてエタノール生産を推進していること、2. エタノールをガソリンと混合すること政策として打ち出していること、3. これまでタイにおいてキャッサバパルプからのエタノール生産の研究実績およびパイロットスケールでの経験があることで、アフリカでのエタノール生産技術開発に貢献できる。

3) 成果活用における留意点

キャッサバ廃棄物はでんぷんを非常に多く含む反面、他の微生物の混在が懸念される。2014年には排出されたキャッサバパルプ汚染により混在する微生物発酵によって生産される有機酸がエタノール発酵に及ぼす影響について調べ、明らかにした酵母の酸ストレス応答に関する研究内容を論文として発表した。

4) 今後の課題

廃棄物が散在しているので、小規模でのエタノール発酵となる。微生物が混在している廃棄物からでもエタノール発酵できる高温や酸耐性などの発酵技術(酵母)の開発が必要。

中課題番号	13406681	研究期間	平成25～29年度
小課題番号	13000	研究期間	平成25～26年度
中課題名	途上国における農産廃棄物の有効活用による気候変動緩和技術の開発		
小課題名	3) 農産廃棄物活用技術の導入支援ツールの開発		
小課題責任者名・研究機関	国際農林水産業研究センター・研究戦略室・仲田俊一 国際農林水産業研究センター・熱帯・島嶼研究拠点・大前英（分担） 国際農林水産業研究センター・研究戦略室・沈志宏（特別研究員）		

1) 研究目的

農産廃棄物利用技術の導入支援ツール（プロジェクトナビゲーター）を開発・改良する。

2) 研究成果

農産加工の現場でバイオマスのエネルギー利用を進めるための支援ツール（農産廃棄物の潜在量の推計+利用に伴う経済・環境・地域社会へのインパクトを評価するスコアリングシステム）作成に向けて、重要な技術要素の絞り込みを行った。バイオマスのエネルギー利用に際しては、資源量やコストのみならず、食料との競合や環境への影響、地域社会への影響（雇用、エネルギーアクセス、土地所有権）など多くの要因を検討して計画を立てる必要がある。このような状況における意思決定を支援するため、FAOの開発した資源量・技術評価ツール（FAO-Rapid Appraisal）をベースに部分的な改良を行い、ガーナ、ウガンダ、カメルーンにおけるエネルギー変換技術について比較分析を行った。

表1. GBEP（Global Bioenergy Partnership）指標の絞り込み（24→13）

分野	No.	技術評価指標（GBEP No.）
環境的指標	1	ライフサイクル温室効果ガス排出(1)
	2	大気有害物を含む非GHGの排出量(4)
	3	水質(6)
社会的指標	4	所得の変化(11)
	5	バイオマスエネルギー部門の雇用(12)
	6	薪収集のための女性や子供の無償労働時間の変化(13)
	7	近代的エネルギーサービスのアクセス拡大のためのバイオマスエネルギー(14)
	8	室内煤煙による疾患と死亡数の変化(15)
経済的指標	9	生産性(17)
	10	純エネルギー収支(18)
	11	総付加価値(19)
	12	化石燃料消費量及び従来のバイオマス利用の変化(20)
	13	エネルギー多様性(22)

具体的にはGBEP（Global Bioenergy Partnership）の提唱した24の持続可能性指標に基づいて、アフリカでの農産廃棄物利用という条件を考慮し、環境的な視点からライフサイクル温室効

果ガス排出、大気汚染有害物質を含む非GHGの排出量等3指標、社会的な視点から所得の変化、バイオマスエネルギー部門の雇用等5指標、経済的な視点から生産性、純エネルギー収支等5指標、の計13指標への絞り込みを行った（表1）。

さらにこれら13の指標の整理統合を行った。つまり、絞り込まれた13指標には、コストや需給バランス等、共通の説明変数が存在しており、これらを組み合わせることで、より少ない変数で評価することが可能と考える。そこで13の指標を評価するための変数を検討した結果、エネルギー変換コスト等3つの内部変数とバイオマス資源量等3つの外部変数を組み合わせることによって評価が可能と判断した（表2）。

表2. 指標の整理統合

内部因子	エネルギー変換コスト エネルギー変換効率 環境負荷物質排出量
外部因子	バイオマス資源量 エネルギー需要 競合エネルギー価格(化石燃料/バイオ燃料)

このツールの目指すところは、有機性資源と変換技術の多様な組み合わせが存在するバイオマス利用において、それぞれの組み合わせがもたらすインパクトを環境、経済、社会の3つの側面から定量的に評価し、最適な組み合わせを選択する支援を行うものである。

変換技術については途上国で現在利用可能な技術オプションとして、直接燃焼による発電、ガス化による発電、エタノール発酵の3種類を検討した。

地域に存在する農産廃棄物資源を発電に利用した場合、資源の量に応じて国内の非電化地域の5%～19%を電化可能な規模の電力が見込まれ、この際発電施設の運営のため2,000～1万人程度の雇用創出が見込まれた。変換コストについて見てみると、廃棄物を利用していることから原料費・維持管理コストは低く、減価償却費が3割と最大のシェアを占めている（表3）。このため規模拡大による生産コストの低減が期待できるが、もともとランダムに分散している廃棄物を集約して大規模化するにはコスト増が見込まれるため、途上国の農村部に導入することを考えた場合、今回設定されている100kW程度を超えた規模拡大はあまり現実的ではないと思われる。

表3. バイオマス電力生産コスト評価（ガーナ）

Direct Combustion Power Cost (Ghana)	oil palm empty bunches	cocoa husk	wheat husk	oil palm fibre	cocoa pods	oil palm shell	cassava peel	shea butter cake
Total cost (10kW)	0.45	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46
Total cost (40kW)	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31
Total cost (100kW)	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
Raw Materials	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Labor and Miscellaneous	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
Transport and Storage	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Depreciation	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11
Other Costs	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12

Gassification Power Cost (Ghana)	oil palm empty bunches	cocoa husk	Wheat husk	oil palm fibre	cocoa Pods	oil palm shell	cassava peel	shea butter cake
Total cost (10kW)	0.56	0.57	0.59	0.56	0.56	0.57	0.57	0.58
Total cost (40kW)	0.36	0.36	0.39	0.36	0.36	0.37	0.37	0.37
Total cost (100kW)	0.24	0.24	0.27	0.24	0.24	0.25	0.25	0.25
Raw Materials	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Labor and Miscellaneous	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
Transport and Storage	0.02	0.02	0.05	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03
Depreciation	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
Other Costs	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09

エタノール生産については生産コストおよび温室効果ガスの削減インパクトについて検討した(表4)。生産コストについては原料や規模等に応じて0.8-2.0 USD/Lの範囲内に収まっている。内訳を見ると初期投資の比率が最も大きく、続いてエネルギー使用(大半が蒸留プロセス)、輸送コストという順番になる。大規模化により減価償却費用が軽減される反面、輸送コストが増大する傾向が見られる(表5)。なお、今回は輸送距離については施設の規模ごとに輸送距離を任意に設定しており、必ずしも実際の資源分布状況を考慮していない。特に加工施設が小規模で分散しているキャッサバ残渣を原料として検討する場合には、運送コストについてより詳細な分析を行うため、ツールの改良を検討する必要がある。

表4. エタノール生産コスト評価 (ウガンダ)

Country	Residue type	Ethanol production (ML)	Fuel: diesel (ton/TJ)		Fuel: Natural Gas (ton/TJ)		Fuel: Biomass (ton/TJ)	
			GHG emission	GHG reduction from Gasoline	GHG emission	GHG reduction from Gasoline	GHG emission	GHG reduction from Gasoline
Cameroon	Cassava_residue	5	12	58	12	58	11	58
		25	28	45	25	45	28	45
		50	35	35	35	35	35	35
		100	49	20	49	20	49	20
	Sugarcane_molasses	5	3	67	3	67	3	67
		25	5	65	5	65	5	65
		50	7	63	7	63	7	63
		100	10	60	10	60	10	60
Ghana	Cassava_residue	5	11	58	11	58	11	58
		25	28	45	25	45	24	45
		50	35	35	35	35	34	35
		100	49	21	49	21	49	21

蒸留プロセスにどの燃料を用いるかという点も重要な要因であり、西アフリカの農村部で広く利用されているディーゼルを用いた場合はコストが増加し、エタノール輸入価格(1.2-1.3 USD/L)を超えることになり、政策的支援がない限り普及は困難と思われる。木質資源等のエタノール発酵用の原料としては使えないバイオマスを燃料として用いることが可能であれば、輸入エタノールよりも低コストで生産が見込める可能性があることを明らかにした。

エタノールをガソリンに代替することで、20-60 t/TJのGHG削減が見込まれることが確認された。エタノールの製造工程において排出源となりうるプロセスは運搬および蒸留であるが、今回確認した結果GHG排出の大半は運搬過程で発生しており、輸送距離の大小がGHG削減効果を概ね決定するため、規模拡大に伴いGHG削減効果が縮小することを明らかにした。

表5. エタノール生産におけるGHG削減効率の比較 (ガーナ)

Ethanol production	Cassava residue				Sugarcane molasse				Unit
	5ML	25ML	50ML	100ML	5ML	25ML	50ML	100ML	
Total cost (Biomass)	1.07	0.77	0.78	0.84	1.11	0.85	1.01	1.23	USD/liter
Total cost (Diesel)	1.68	1.81	1.70	1.68	1.72	1.88	1.94	2.07	USD/liter
Cost breakdown (Biomass)									
Other Chem.Inputs	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	USD/liter
Energy	0.31	0.45	0.39	0.35	0.31	0.45	0.39	0.35	USD/liter
Labor and Miscellaneous Costs	0.02	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	USD/liter
Transport	0.03	0.06	0.18	0.31	0.07	0.14	0.43	0.71	USD/liter
Storage	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	USD/liter
Other Costs	0.07	0.06	0.05	0.05	0.07	0.05	0.04	0.04	USD/liter
Depreciation & Maintenance	0.56	0.12	0.07	0.04	0.56	0.12	0.07	0.04	USD/liter
Ethanol import price									1.22-1.3 USD/liter

3) 成果活用における留意点

特になし

4) 今後の課題

今後課題5を通じ、地域の条件に応じた評価が行えるよう検証に取り組むとともに、総合

評価指標の導入や輸送コストの詳細評価等、さらに必要な改良を加えていく必要がある。

中課題番号	13406681	研究期間	平成25～29年度
小課題番号	14000	研究期間	平成26～29年度
中課題名	途上国における農産廃棄物の有効活用による気候変動緩和技術の開発		
小課題名	4) 対象地域で適用可能な技術の開発		
小課題責任者名・研究機関	国際農林水産業研究センター・生物資源・利用領域・村田善則		

1) 研究目的

現地で適用可能な農産廃棄物を利用した技術を開発する。

2) 研究成果

実際のエタノール生産の際には、ナイジェリア国内で分離された酵母株を用いる必要がある。コストの面から温度コントロールなどができない、最適でない条件下でエタノール生産を行う必要がある。そこで温度変化などの環境ストレスに強い耐熱酵母菌の開発を目的に研究を行った。研究の環境整備として、ナイジェリアで利用できる酵母の開発のためナイジェリアを訪問した際に、果物市場より古い果物をサンプリングし、そこから耐熱酵母の分離を行った。これまで1,037株の耐熱酵母が分離されたので、一度に多数の酵母を選抜できる方法を開発した。本法はPMS(Phenazine Methosulfate)とNBT(Nitroblue Tetrazolium), ADH(Alcohol Dehydrogenase), NADHを用いた酸化還元反応によりエタノールを酸化し、最終的にNBTを還元して青紫色の色素を作る方法で、青紫色の濃淡によりエタノール濃度を見積って発酵活性の高い酵母を選抜することができる。この方法のメリットは、測定器がなくても視覚的な判断で酵母を選抜できることと、選抜には96穴プレートが使用できるので、一度に多数(200-300株)の酵母を選抜することができる点である。この方法により1,037株から96株が選抜された。そこから更に6株の酵母に絞られた。この6株はグルコースの他に、グリセリン、ガラクトース、ラフィノースを同化糖として使用できる。同化糖およびリボソームRNA由来のDNA配列より、本酵母はいずれも*Pichia kudriavzevii*であることが明らかになった。この酵母は耐熱性を示し、酸性の条件でも生育及び発酵することができる。実際に本酵母は、50mMから70mMの酢酸存在下で発酵することができ、驚くことに、いくつかの株において酢酸を含まない場合よりもエタノール濃度が高くなる傾向があった(図1)。

現地においてキャッサバ残渣(パルプやキャッサバ皮)からエタノール生産を実施した。まずキャッサバ残渣の糖化及び発酵の条件検討を行った。キャッサバパルプ及びキャッサバ皮に α アミラーゼを加えて加熱処理し、デンプンを液化した。50度まで冷却後、セルラーゼ、ペクチナーゼ、グルコアミラーゼを加えて糖化させた。このとき糖化と発酵を同時に行う平行複発酵のため、耐熱酵母*P. kudriavzevii* 85-71も加えて40度以上でインキュベーションした。

平行複発酵の条件検討として、1.温度変化(30度、40度、42度)、2.基質濃度(5%, 10%, 15%, 20%)、3.pH変化(pH 3, 4, 5, 6, 7)、4.窒素源(酵母エキス、ペプトン、無機窒素(硝酸

アンモニウム))の検討を行った。その結果、糖化したグルコース濃度の違いに応じて、キャッサバ皮よりもキャッサバパルプの方が高い濃度のエタノールを産出した。エタノール濃度から糖化と発酵を同時に行う平行複発酵のほうが高い濃度のエタノールを生産できる事を確認した。温度依存性については、30度よりも40度、42度でインキュベーションしたほうが高い濃度のエタノールを生産することが明らかになった。これにより現地の温度に適した条件、高温無冷却で発酵ができることを示す事ができた。またキャッサバパルプの添加量を変化させたところ、基質の濃度変化（5%、10%、15%、20%）に応じたエタノールの産出を示した。pHの変化についてはpH 5, 6のときがもっともエタノール濃度が高かったことから最適pHは5-6である事が明らかになった(図1)。窒素源は硝酸アンモニアなどの無機窒素や尿素よりも、ペプトンや酵母エキスにおいて高いエタノール濃度が観測された事から、*P. kudriavzevii*85-71はエタノール発酵時には有機体窒素の要求が高いことが考えられた(図2)。

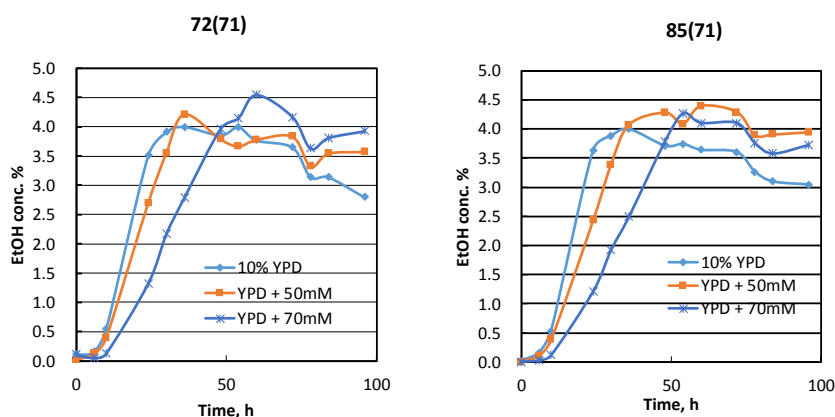


図1 改良株（72、85）を用いたYPDでのエタノール発酵。発酵温度は40度に固定。50mM、70mM酢酸の存在下で、エタノール濃度が最大0.5%上昇した。

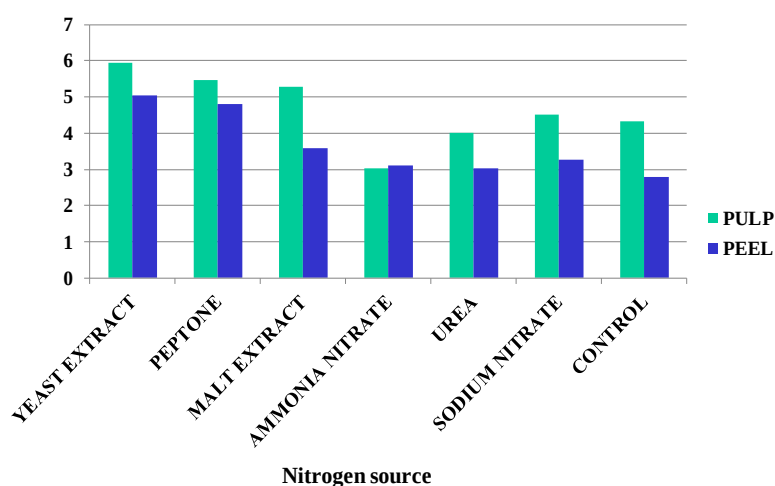


図2 エタノール発酵における窒素源の効果。酵母抽出残渣、ペプトン、モルツ抽出残渣のような有機体窒素で高い濃度のエタノールが生産できた。

ナイジェリア大学にて、5Lのジャーファーマンターを用いてキャッサバパルプからのエタノール生産を実施したところ、最大6.7%のエタノール生産が確認できた。これよりナイジェリアで分離開発した酵母を用いた農産廃棄物からのエタノール生産を現地において実施したことを示す(図3)。

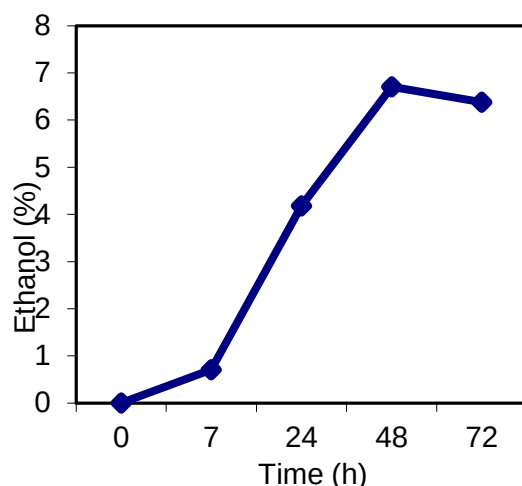


図3. キャッサバパルプからエタノール生産 (5Lジャーファーマンター使用)

本プロジェクトにおいて *S.cerevisiae* LC269108株を取得した。この酵母は *S.cerevisiae* であるが、高い耐熱性 (40度) と酸耐性 (60mM acetic acid) と高いエタノール収率90%以上を示した。新たな耐熱性酵母LC269108の特性の評価を行ったところ、耐熱性のほか、酸耐性やエタノール耐性など多様なストレス耐性を示した。酸耐性について調べるため、異なる酢酸濃度 (60mM, 70mM, 100mM) を添加したYPDプレート上に、 10^{-1} から 10^{-4} まで希釈した酵母を4uLずつスポットした。40度で24時間インキュベーションした結果、もっとも高い酸耐性を示す酵母は *P. kudriavzevii* 85-71であり、*S.cerevisiae* LC269108は二番目に高い酸耐性を示した(図4)。これらの株における酸耐性については、*K.marxianus*株や *S. cerevisiae*株よりも高いことが示された。

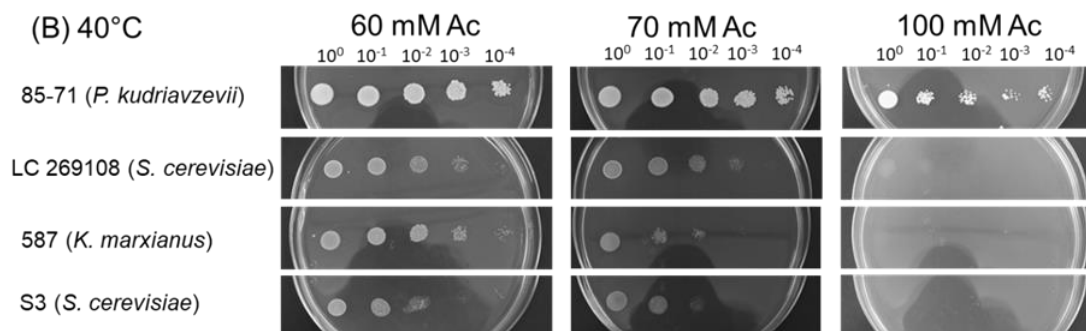


図4. 分離株LC269108株と *P. kudriavzevii* 85-71、*K. marxianus* 587、*S. cerevisiae* S3との酸耐性の比較。

高い酸耐性と耐熱性を有する二つの酵母、*S.cerevisiae* LC269108と *P. kudriavzevii* 85-71を用いて、ヤム芋廃棄物からのエタノール生産を行った。ヤム芋廃棄物に糖化酵素と酵母を混合して平行複発酵を40度で行ったところ、LC269108株は *P.kudriavzevii* 85-71よりも高いエタノール生産能をしめした。ヤム芋廃棄物に50mM 酢酸を加えた際のエタノール生産能は酸無添加のときと比べて変化が無かったが、LC269108株が *P.kudriavzevii* 85-71株よりも高いエタノール生産能をしめした(図5)。これより、キャッサバパルプ以外のヤム芋廃棄物では、LC269108は *P.kudriavzevii* よりも有効であることが明らかになった。本研究成果については、*Process Biochemistry*に投稿し受理された。

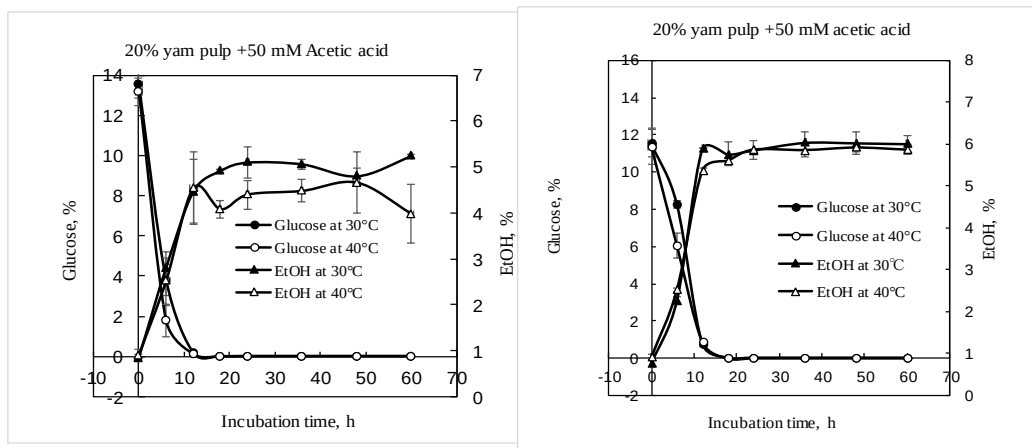


図5. ヤム廃棄物における分離株LC269108株と *P.kudriavzevii* 85-71株のエタノール生産能の比較。

(3) 測定機器の設置などの環境整備

現地で適応できるバイオエタノールへの変換技術を開発するための実験器具の環境を整備した。これまでは比色法による濃度の同定を行っていたが、多数のサンプルになるとヒューマンエラーが増加する。今年度は多数のサンプルからのエタノールを正確に測定するため、高速液体クロマトグラフィー(HPLC)を導入し、ナイジェリア大学に設置した(図6)。



図6. ナイジェリア大学微生物学科オボンナ教授の部屋に設置されたHPLCとその動作確認。

(4) ナイジェリア大学との関係強化

昨年11月にナイジェリア大学より、副学長イボクウィ教授とナイジェリア大学生物工学研究所所長オボンナ教授がJIRCASを訪問された。岩永理事長との面談を行い、今後も更なる関係強化に向けて努力することをお互いに確認することができた(図7)。同時に、本プロジェクトについての推進会議を行いプロジェクトの内容と目的について説明し、副学長に理解を求めた。



図7.ナイジェリア大学副学長および生物工学研究所所長のJIRCAS訪問。

JIRCAS岩永勝理事長(写真中央)とナイジェリア大学副学長イボクウィ教授（岩永理事長右側）とナイジェリア大学生物工学研究所所長オボンナ教授（岩永理事長左側）。

3) 成果活用における留意点

ナイジェリア国内で分離した酵母なので、現地でのエタノール発酵に利用できる。

本酵母株 *Pichia kudriavzevii* 85-71 は耐熱性ととも高い酸耐性を有することから、酸性の高いキャッサバパルプを発酵させる場合には本酵母は適しているが、エタノール収率が8割くらいでエタノールの濃度が少し低めである。

本酵母とともに *Saccharomyces cerevisiae* LC269108 株の取得にも成功した。本酵母は酸耐性及び耐熱性を有する酵母であることから、ヤム芋やキャッサバ皮の残渣からの無冷却エタノール生産には適している酵母である。キャッサバ皮からのエタノール収率は *P. kudriavzevii* と比べて高いので、異なるバイオマス資源(例、キャッサバパルプかヤム芋残渣)によって用いる酵母を選ぶ必要がある。

4) 今後の課題

デンプン工場からのキャッサバパルプは強い酸性を示した。この理由として異なるpHのもとでデンプンを抽出するため、デンプン抽出の過程で酸を加えている事が判明した。中和しても通常の酵母株では発酵ができなかった。今回分離開発した酵母株 *P. kudriavzevii* 85-71 は強い酸耐性を示す事から、このようなキャッサバパルプにおいても高い発酵能が得られた。

中課題番号	13406681	研究期間	平成25～29年度
小課題番号	15000	研究期間	平成27～29年度
中課題名	途上国における農産廃棄物の有効活用による気候変動緩和技術の開発		
小課題名	5) 導入技術・システムのインパクト評価及びフィードバック		
小課題責任者名・研究機関	国際農林水産業研究センター・研究戦略室・井上泰子 国際農林水産業研究センター・研究戦略室・杉野智英 国際農林水産業研究センター・研究戦略室・仲田俊一（分担） 国際農林水産業研究センター・生物資源・利用領域・村田善則（分担） 農林水産政策研究所・林岳		

1) 研究目的

技術の導入が現地の環境・社会へ与えるインパクトを明らかにする。
 農産廃棄物利用技術の導入支援ツールを適用・検証する。

2) 研究成果

1) 経済性から評価した技術の普及可能性

ナイジェリアで、キャッサバデンプン工場、農民等を対象とした聞き取り調査及び文献調査を行い、変換技術のコスト試算に必要なデータを収集した。同国の地域レベルの生産統計データに廃棄物発生係数を掛け合わせることで得られたキャッサバ廃棄物の発生量をエネルギー換算すると、年間約120,000TJとなり、同国国民の約2%に相当する360万人の年間消費エネルギーを供給可能な資源量に相当する。また、キャッサバ廃棄物を原料とするエタノール生産コストを試算したところ、1リットル当たり0.53～0.93ドルとなり、同国のガソリン市場価格1.10ドルを下回ることがわかった。

2) 環境・社会インパクト評価ツールの検証と改善

、課題4で開発されたバイオエタノール変換技術の導入に関する経済的・社会的・環境的側面の分析・評価手法について、キャッサバ芋の多様な利用を勘案したケースでインパクト評価を行い、フィードバック等を通して、よりアフリカの現場に対応したシステム及び技術体系に改良した。

具体的には、以下の2つのツールの開発とその試行・評価・分析を行った。

[1] 環境・社会インパクト評価ツールの検証

「エタノール生産にかかる総合的なバリューチェーン収益についてのキャッシュフロー分析による評価ツール」の検証

[2] 環境・社会インパクト評価の改善

「ステークホルダーによる優先的に開発すべきバイオエネルギー変換技術とその持続可能性指標による重みづけ評価ツール」の改良と評価の改善

3) 「エタノール生産にかかる総合的なバリューチェーン収益についてのキャッシュフロー分析による評価ツール」の検証

キャッサバパルプを用いてバイオエタノールに変換する技術を、実際にナイジェリアで事業化することを想定し、現地での請負調査によるコスト等の情報を踏まえ、キャッシュフロー分析を行った。FAOのバイオマスエネルギー利用の評価ツール：BEFS-RAでは、年間5MLから100MLエタノールを生産するような大規模なケースしか評価できないものとなっているが、これは、さとうきび、とうもろこしやキャッサバ芋そのもの、つまり可食部分を用いることが想定されていると考えられる。今事業で開発をめざした評価ツールは、食料としての利用と競合する可食部分を使わず、キャッサバの加工廃棄物、すなわちキャッサバからでんぷんを加工する工場で廃棄物として産出されるキャッサバパルプや皮の部分などのみを利用することを想定し、地域のキャッサバ収集によるでんぷん加工場におけるコミュニティレベルでの取り組み、すなわち、年間1ML程度のエタノール生産量を想定するものを開発することをめざした。

環境、食糧安全保障、雇用、ジェンダーへのインパクトを評価するため、政策方針等の情報も同時に収集するとともに、エタノール生産事業に伴う原料供給までを含めた食料・食品産業を含めたバリューチェーン全体における雇用や利益の増加を想定されるいくつかのケースに分けてキャッシュフロー手法で検討することとした。

経済的効果については、CBOTのエタノール先物取引価格について、Nasdaqのサイトを参照し過去10年の最高値、最安値、平均および最新価格のそれぞれのケースについて検討することとした。さらに、エタノール生産においては、エタノール販売額の他に副産物として発酵残渣（Fermented Cassava pulp以下、FCP）が生産されるが、これは家畜の飼料として配合して用いることにより、乳房炎の解消効果があるため重用される（村田 2016）。そのため、このFCPの販売価格も収入として計上した。

表1. では、まず、年間エタノール生産量を1.22MLと想定すると、この量の生産に必要なキャッサバパルプ+皮の量は4万トンとなる。また、この4万トンの生産キャッサバパルプ+皮をキャッサバでんぷん工場からの廃棄物を買上げる形で確保するために必要な、キャッサバでんぷん工場に納入すべきキャッサバの量は、57,143トンとなる。このキャッサバの量を確保するために必要なキャッサバ農地面積は、4,192ヘクタールとなる。これは、1家族経営農家あたり1.8ヘクタールであることから換算し、2,329家族農家による生産量となる。

表2. にまとめたように、2007年—2016年のエタノール価格から、平均値を勘案すると、エタノール生産がない場合よりも6%地域の総収入が増加することとなる。最低値の場合でも3%の増、最高値で販売可能であれば、12%増加することが試算できた。

しかし、エタノール生産コストはUS\$776,000となっており、最高値につけた場合には収支はプラスとなるが、もし、平均価格であればエタノールの売り上げはUS\$627,979となり、FCPの販売と併せなければ純収益をプラスにするのは困難であることが試算された。

表1. エタノール生産にかかる総合的なバリューチェーン収益についてのキャッシュフロー分析
集約表

		エタノール 価格最高値	エタノール 価格平均	エタノール 価格最安値
エタノール生産 (FCP含む)				
1	エタノール生産工場数	1	1	1
2	年間エタノール生産量 (Kilo litter)	1,220	1,220	1,220
3	キャッサバパルプ+皮必要量(Ton)	40,000	40,000	40,000
4	エタノール生産コスト (US\$) (機材、原料、 人件費含)	776,000	776,000	776,000
5	エタノール価格 (US\$/litter) (2007-2016)	US\$ 0.94/litter	US\$0.51/litter	US\$0.34/litter
6	エタノール販売額 (US\$)	1,149,368	627,979	414,158
7	FCP販売額 (US\$)	367,548	367,548	367,548
8	収益(エタノール+FCP販売額－生産コスト)	740,316	218,927	5,106
9	年間雇用人数	62	62	62
キャッサバでんぷん生産 (RCP+皮含む)				
10	でんぷん生産工場数	190	190	190
11	キャッサバ消費量 (Ton)	57,143	57,143	57,143
12	でんぷん生産量 (Ton)	17,143	17,143	17,143
13	でんぷん販売額 (US\$)	13,714,286	13,714,286	13,714,286
14	キャッサバパルプ (RCP) +皮販売額 (US\$)	322,581	322,581	322,581
15	でんぷん生産コスト	9,626,063	9,626,063	9,626,063
16	収益 (でんぷん+RCP+皮－生産コスト)	4,410,804	4,410,804	4,410,804
17	年間雇用人数	2,460	2,460	2,460
キャッサバ生産 (キャッサバ幹含む)				
18	キャッサバ生産面積 (ha)	4,192	4,192	4,192
19	ヘクタール当たりキャッサバ生産量 (Ton) (FAO)	13.63	13.63	13.63
20	キャッサバ生産コスト (US\$)	2,079,447	2,079,447	2,079,447
21	キャッサバ生産売り上げ高 (US\$)	6,399,340	6,399,340	6,399,340
22	キャッサバ幹売上高 (US\$)	146,720	146,720	146,720
23	収益	4,466,613	4,466,613	4,466,613
24	キャッサバ生産農業従事者数	11,645	11,645	11,645

表2. バイオエタノール生産の有無による経済・社会的インパクト評価

	エタノール生産がある場合 (キャッサバ販売、幹販売、でんぷん販売、RCP+皮販売、エタノール販売、FCP販売)	エタノール生産がない場合 (キャッサバ販売、幹販売、でんぷん販売)	エタノール生産による効果
総収益(Nasdaq平均) US\$	9,096,344	8,554,836	106.33%
総収益(Nasdaq高値) US\$	9,617,733	8,554,836	112.42%
総収益(Nasdaq低値) US\$	8,882,523	8,554,836	103.83%
総雇用者数	14,167	14,106	100.44%
うち女性	7,083	7,052	100.44%

4) 「ステークホルダーによる優先的に開発すべきバイオエネルギー変換技術とその持続可能性指標による重みづけ評価ツール」の改良と評価の改善

平成27年度に、バイオマス利用に伴う社会、環境、経済的なインパクトを技術ごとに比較検討するために、AHP法 (Analytical Hierarchy Process) を用いることとして調査票を作成し、ガーナでバイオエネルギーに関連する各ステークホルダー (中央政府、地方政府、農産物加工工場オーナー、農家) の65名を対象に聞き取り調査を行い、結果を分析した。この試行結果を踏まえ、平成29年度はナイジェリアでWSM法 (Weighted Summation Method) によるツールに改良を行い、キャッサバ生産地域におけるステークホルダーによる優先的に開発すべきバイオエネルギー変換技術とその持続可能性評価について、245名を対象に調査を試行して分析を行い、調査手順も含め、ツールとして開発を完成させた。

「ステークホルダーによる優先的に開発すべきバイオエネルギー変換技術とその持続可能性指標による重みづけ評価ツール」の手順は以下のとおりとすべきことが検討された。

- [1] 対象地域における主要なバイオエネルギー原料 (バイオマス) の特定
- [2] 特定された原料の実現性の高いエネルギー変換方式の特定
- [3] 特定されたバイオエネルギー原料と変換技術の組み合わせ毎に資源的持続可能性を評価
- [4] 持続可能性評価のための指標の選択
- [5] 主要ステークホルダーを対象に [3] と [4] の重みづけ評価調査を実施
- [6] 総合評価及びジェンダー、ステークホルダー毎の評価結果を分析。これにより、持続可能性の高いバイオエネルギー開発投資となるよう役立てる。

改良点の一つは、持続可能性指標について、より社会、環境、経済の持続性についてバランスがとれた視座を確保することとした (図8)。国際的に高く認知されているGlobal Bioenergy Partnership (GBEP)が2011年に発表した持続可能性指標 (Sustainability Indicator) の24指標から社会、環境、経済のそれぞれについて同数の2指標ずつ、社会 (食糧供給と価格、雇用)、環境 (水資源利用と効率、土地利用変化)、経済 (生産性、インフラとロジスティクス) の合計6指標をナイジェリアの専門家、IRENA担当者、農林水産政策研究

所の専門家と相談して本調査の対象指標として選定した（図8）。ステークホルダーへのインタビュー調査においては、それぞれの指標の定義について曖昧な解釈を避けるため、GBEPの持続可能性指標（GBEP 2011）にある定義を調査者が理解し、面談調査を行うこととした。

ナイジェリアでの調査結果として、持続可能性指標そのものの重要性評価については、全ステークホルダーの回答の集計結果として、雇用機会と生産性が最も重要でインフラとロジスティクスが最も重要性が低いとの結果が得られた。男女間の視座の違いについては、重要性の1位、2位は変わらなかったが3位については女性は土地利用変化、男性は食糧価格が重要であると考えられていることが分析された。次に、各持続可能性指標からみた場合の4種類のエネルギー変換技術の重要性の相対評価については、男、女、総合ともエタノールが水利用、土地利用変化、食料供給と価格、雇用、生産性に関して特に重要性が高いと評価されており、バイオガスが次点との結果となったが、バイオガスに関しては、女性及び総合でインフラ及びロジスティクスについてはエタノールよりも重要性が高いと評価されていることがわかった。これらの評価を掛け合わせ、最終的な重みづけ調査の評価結果としては、エタノールが男女、総合共に最も持続可能性指標の配点が高く総合的に高く評価されており、改良かまどといった身近な改善に関する持続可能性の評価は男女ともに相対的に低いということがわかる結果となった（表3）。

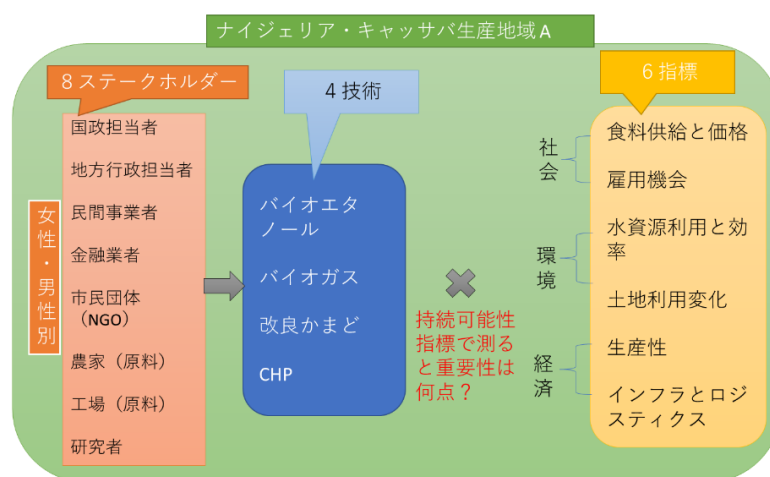


図8. ナイジェリアのキャッサバ生産地域におけるステークホルダーによる優先的に開発すべきバイオエネルギー変換技術とその持続可能性指標による重みづけ評価調査概念図

表3. エネルギー変換技術ごとの持続可能性指標への貢献度（評価結果）・ナイジェリア

バイオエネルギー 変換技術	持続可能性指標配点		
	男性	女性	総合
バイオエタノール	0.267	0.262	0.265
バイオガス	0.258	0.259	0.258
改良かまど	0.236	0.235	0.235
CHP	0.240	0.243	0.241

3) 成果活用における留意点

本事業で開発されたツールについては、IRENAプロジェクト・ナビゲーターの担当者と協力し、バイオエネルギーの開発業者が融資を受けるために当該投資の持続可能性の検討結果と

して銀行等に提出できる資料として作成するためのウェブベースのフリー・ツールとして掲載する予定である（2018年5月頃）。

4）今後の課題

〔※プロジェクト・ナビゲーターとは〕

・再生可能エネルギー政策担当者や、再生可能エネルギー開発を行う事業者が、資金計画等を決定するためのガイダンス・システムである。例えば風力発電所を作りたいと考える国や企業が、風力発電所設置事業実施のために銀行などから融資を受ける際に、融資に必要な条件を満たした提案書を自分で作成することができるようなオンラインベースの様式を含めたガイダンスであり、ガイダンスに沿って必要なデータや情報を入手し、執筆していくと提案書ができあがる、というものである。これまで、風力や太陽光などのプロジェクト・ナビゲーターが作成されてきており、バイオエネルギー関係では木質エネルギーからの熱発電システムについて作成が進められているが、バイオエタノール等のその他のバイオエネルギーに関連するプロジェクト・ナビゲーターも今後随時作成される予定であり、将来的に本事業の成果を活用させることが期待されている。

これまでの5年間の協力の総括及び今後の計画を検討するため、2018年2月2日にドイツ・ボン市のIRENA革新的技術センターにおいてIRENA職員を招いてセミナーを開催した（図9）。



図9 IRENAにおける5年間の協力の総括セミナー（2018年2月2日）

成果等の集計数

課題番号	学術論文		学会等発表(口頭またはポスター)		出版図書	国内特許権等		国際特許権等		報道件数	普及しうる成果	発表会の主催(シンポジウム・セミナー等)	アウトリーチ活動
	和文	欧文	国内	国際		出願	取得	出願	取得				
13406681	0	10	5	5	1	1	0	0	0	0	0	8	6

(1)学術論文

区分: ①原著論文、②その他論文

整理番号	区分	機関名	タイトル	著者	掲載誌	巻(号)	掲載ページ	発行年	発行月
1	①	国際農林水産業研究センター	Development of sap compressing systems from oil palm trunk.doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.12.007	Yoshinori Murata, Ryohei Tanaka,	Biomass & Bioenergy	51	p.8-16.	2013	2
2	①	国際農林水産業研究センター	Ethanol production from cassava pulp by a newly isolated Kluyveromyces marxianus TISTR 5925 strain at high temperature. DOI: 10.3934/energy.2013.1.3	Apiwatanapiwat W, Vaithanomsat P, Rugthaworn P, Murata Y.	AIMS Energy	1	p.3-16.	2013	10
3	①	国際農林水産業研究センター	Growth Inhibition of Thermotolerant Yeast, Kluyveromyces marxianus, in Hydrolysates from Cassava Pulp. (DOI 10.1007/s12010-014-0906-2)	Prapassorn Rugthaworn, Yoshinori Murata, Masashi Machida,	Appl Biochem Biotechnol	7	p1197-1208	2014	4
4	①	IRENA	Global Bioenergy – Supply and Demand Projections: A Working Paper for Remap 2030	Shunichi Nakada, Degar Saygin, Dolf Gielen	IRENA報告書		pp78	2014	9
5	①	国際農林水産業研究センター	Detection of vascular bundles using cell wall birefringence on exposure to polarized light. DOI:10.1016/j.indcrop.2014.11.055	Yoshinori Murata, Satoshi Kubo, Eiji Togawa, Sitti Fatimah Binti Mhd Ramle	Industrial Crops and Products.	65	p.190-197	2014	11
6	②	国際農林水産業研究センター	オイルパーム幹からの搾汁液の利活用技術開発について	村田善則	第10回バイオマス科学会議発表論文集		p.23-24	2015	1
7	①	国際農林水産業研究センター	Ethanol fermentation by the thermotolerant yeast, Kluyveromyces marxianus TISTR5925, of extracted sap from old oil palm trunk. AIMS journal 3(2), 201-213 (DOI: 10.3934/energy.2015.2.201)	Yoshinori Murata, Hatairat Danjarean, Kiyohiko Fujimoto,	AIMS Energy	3(2)	p.201-213	2015	3

8	②	IRENA	Biofuel potential in Southeast Asia: Raising food yields, reducing food waste and utilising residues	Jeffery Skeer、仲田俊一、井上泰子	IRENA報告書		pp80	2017	6
9	②	IRENA	Biofuel Potential in Sub Saharan Africa – Raising Food Yield, Reducing Waste and Utilizing Residues	Jeffery Skeer、Rodrigo Leme、井上泰子、	IRENA報告書		pp78	2017	11
10	①	国際農林水産業研究センター	Bioethanol production under multiple stress condition by a new acid and temperature tolerant <i>Saccharomyces cerevisiae</i> strain LC 269108 isolated from rotten fruits (https://doi.org/10.1016/j.procbio.2018.01.016)	Charles O. Nwuche, Yoshinori Murata, Julius E. Nweze, Ifeanyi A. Ndubuisi, Hide Ohmae, Masayoshi Saito, and James C. Ogbonna	Process Biochemistry			2018	2

(2) 学会等発表(口頭またはポスター)

整理番号	タイトル	発表者名	機関名	学会等名	発行年	発行月
1	高温条件下における阻害剤に対する耐熱酵母の検討	村田善則	東北大 川北キャンパス	日本農芸化学会 2013年度大会	2013	3
2	オイルパーム幹からの搾汁液の利活用技術開発について	Yoshinori MURATA*	産業技術総合研究所	第10回バイオマス 科学会議	2015	1
3	オイルパーム古木から生産されるエタノールのエネルギー収率に関する研究	村田 善則	岡山大学	農芸化学会2015年 度大会	2015	3
4	キャッサバパルプ発酵残渣の飼料化への検討	村田善則	日本獣医生命科学大学	日本畜産学会	2016	3
5	Resources Assessment, Options and Strategies. ECOWAS-GBEP 5th Bioenergy Week	Yasuko Inoue	ガーナ共和国アクラ	Addressing Food and Energy Security Through	2017	6

6	優れた不良環境適応性と栄養特性をもつキヌアの種子から分離した共生微生物の同定	村田善則	筑波大学	第一回共生微生物学会	2017	11
7	Effective Use of Agro-Residues – Renewable Energy Solutions for Forest Conservation and REDD+. UNFCCC COP23 Side Event on “Effective Use of Agro-Residues –	Yasuko Inoue.	ドイツ連邦共和国ボン市	UNFCCC COP23	2017	11
8	Bioenergy sustainability assessment tool with GBEP indicators for IRENA Project Navigator. Sustainable Rural Bioenergy Solutions in Africa.	Takashi Hayashi and Yasuko Inoue.	ケニア共和国ナイロビ市	Sustainable Rural Bioenergy Solutions in Africa	2018	1
9	Production of Ethanol from Cassava Processing Wastes in Nigeria	James C. Ogbonna, Yoshinori Murata, and Hide Omae	ケニア共和国ナイロビ市	Sustainable Rural Bioenergy Solutions in Africa	2018	1
10	Biomass Research Project at JIRCAS – Outcome of the 5 Years Collaboration Between IRENA and JIRCAS.	Masayoshi Saito and Yasuko Inoue	ドイツ連邦共和国ボン	IRENA	2018	2

(3) 出版図書

区分: ①出版著書、②雑誌、③年報、④広報誌、⑤その他

整理番号	区分	著書名(タイトル)	著者名	機関名	出版社	発行年	発行月
1	①	Sustainable rural bioenergy solutions in sub-Saharan Africa: A collection of good practices	Yasuko Inoue, Joaquin Macuacua, and Miyuki Iiyama (ed.)	IRENA	IRENA	2019	1

(4) 国内特許権等

整理番号	特許権等の名称	発明者	権利者(出願人等)	機関名	特許権等の種類	番号	出願年月日	取得年月日
1	動物又は魚類用飼料の製造方法及び動物又は魚類用飼料	村田善則、杉田毅	国際農林水産業研究センター、カセサート大学	国際農林水産業研究センター	特許権	特願2015-156515	2015.8.6	

(8)発表会の主催の状況
(シンポジウム・セミナー等を記載する。)

整理番号	発表会の名称	年月日			開催場所	参加者数	機関名	備考
1	1stInternational Symposium on Microbial Technology for Food and Energy Security	2013	11	25-27	タイ・バンコク	200	国際農林水産業研究センター	微生物を用いた食品加工およびエネルギー安全保障に参加。学会発表
2	Evaluation and selection of conversion technology for utilization of crop residues in Africa	2014	9	26	ガーナ大学	30	ガーナ大学、ナイジェリア大学、国際農林水産業研究センター	アフリカにおける農産廃棄物利用のため、ガーナとナイジェリアにおけるバイオマス資源の活用およびエネルギー生産について研究発表を行った。アフリカにおける再生エネルギー開発について討論を行った。
3	第10回バイオマス科学会議	2015	1	14-15	産業技術総合研究所	200	広島大、産業技術総合研究所、国際農林水産業研究センター	オイルパーム搾汁液からのエタノール生産技術についてLCAも含めて口頭発表する。本会議は、バイオマス利用による地域活性化、最新のエネルギー変換技術から、従来のバイオマス発電など多岐にわたる分野において議論を展開。
4	岐阜大学応用生物学科 集中講義	2016	8	24-26	岐阜大学応用生物学科	40	岐阜大学	応用生命科学特論Ⅲ・海外のバイオマス資源の利用及びエネルギーの多様について講義
5	気候変動枠組条約第23回締約国会合(COP23)サイドイベント: Effective Use of Agro-Residues – Renewable Energy Solutions for Forest Conservation and REDD+	2017	11	14	ドイツ・ボン、COP23ボンゾーン・Japan Pavilion	100	国際農林水産業研究センター、IRENA	農産廃棄物の有効活用による再生可能エネルギーによる森林保全とREDD+に資する解決策について、ガーナ、トーゴ、モザンビーク、インドネシアの事例発表とともにJIRCASの本事業研究成果も含め発表。
6	気候変動枠組条約第23回締約国会合(COP23)サイドイベント: Effective Use of Agro-Residues – Renewable Energy Solutions for Forest Conservation and REDD+	2017	11	14	ドイツ・ボン、COP23ボンゾーン・IRENA Pavilion	25	国際農林水産業研究センター、IRENA	農産廃棄物の有効活用による再生可能エネルギーによる森林保全とREDD+に資する解決策について、ガーナ、トーゴ、モザンビーク、インドネシアの事例発表とともに、JIRCASの本事業研究成果も含め発表。

7	International Workshop: Sustainable Rural Bioenergy Solutions in Africa	2018	1	19	ケニア・ナイロビ、世界アグ ロフォレストリーセンター (ICRAF)	110	国際農林水産業研 究センター、ICRAF、 IRENA	アフリカにおける持続可能なバイオエネルギー の解決に資する以下の3点に関する情報を33名 の登壇者が発表・共有し、様々な革新的な取り 組みのスケールアップをどのように図るべきか について議論を行った。 [1]持続可能なバイオエネルギー供給 [2]バイオマスからの革新的なエネルギー生産 技術 [3]バイオエネルギーの持続性を増大するた めのツール 本事業の成果である、ナイジェリアにおけるエタ ノール発酵技術の開発や、IRENAプロジェクト・ ナビゲーターのツールについても発表。
8	Outcome of the 5 Years Collaboration Between IRENA and JIRCAS – Biomass Research Project at JIRCAS	2018	2	2	ドイツ・ボン、IRENA革新的 技術センター	20	国際農林水産業研 究センター、IRENA	本事業の成果を含め、5年間のJIRCASとIRENA の協力とJIRCASの農産廃棄物に関する研究に ついて発表。

(9)アウトリーチ活動の状況

当事業の研究課題におけるアウトリーチ活動の内容は以下のとおり。

区分； ①一般市民向けのシンポジウム、講演会及び公開講座、サイエンスカフェ等、 ②展示会及びフェアへの出展、大学及び研究所等の一般公開への参画、

③その他(子供向け出前授業等)

整理番 号	区分	アウトリーチ活動	年月日			開催場所	参加者 数	主な参加者	機関名	備考
1	②	バイオマスエキスポ	2013	5	30	日本、東京ビックサイト	44,049	企業、研究機関、大 学、行政等	(一社)太陽経済の 会	
2	①	一般公開(ミニ公演)	2014	4	19	国際農林水産業研究セン ター	1,049	一般市民、学生、研 究機関	国際農林水産業研 究センター	
3	②	スマートコミュニティ2014	2015	6	13	日本、東京ビックサイト	39,879	企業、研究機関、大 学、行政等	NEDO	
4	②	バイオマスエキスポ	2017	6	8	日本、東京ビックサイト	40,072	企業、研究機関、大 学、行政等	日刊工業新聞社	
5	②	Effective Use of Agro-Residues – Renewable Energy Solutions for Forest Conservation and REDD+	2017	11	14	ドイツ・ボン、COP23ボンゾ ン・IRENA Pavilion及びJapan Pavilion	19,115	各国行政機関、企 業、研究機関、NGO 等	IRENA	関連資料展示

6	②	Climate Youth Japan (CYJ)	2017	11	17	ドイツ・ボン、IRENA	1,347	学生、行政機関等	IRENA	CYJ学生メンバーによる IRENA訪問と本事業含む紹介についてメンバーがSNS で紹介
---	---	---------------------------	------	----	----	--------------	-------	----------	-------	--