公開資料

国際科学技術共同研究推進事業
地球規模課題対応国際科学技術協力プログラム（SATREPS）

研究領域「低炭素社会の実現に向けた高度エネルギーシステムに関する研究」

研究課題名「ボツワナの乾燥冷害地域におけるヤトロファ・バイオエネルギー生産のシステム開発」

採択年度：平成２３年度/研究期間：５年/

相手国名：ボツワナ共和国

終 了 報 告 書

国際共同研究期間*1
平成２４年４月１２日から平成２９年４月１１日まで
JST 側研究期間*2
平成２３年６月１日から平成２９年３月３１日まで
（正式契約移行日　平成２４年４月１日）

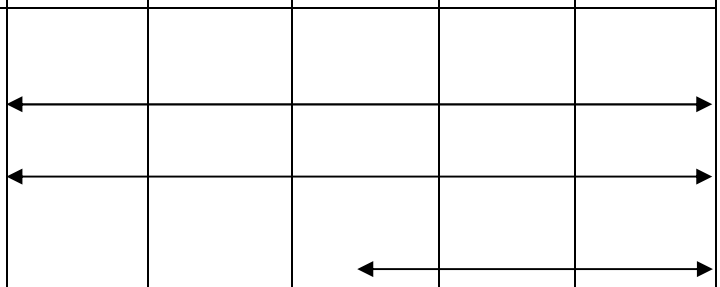
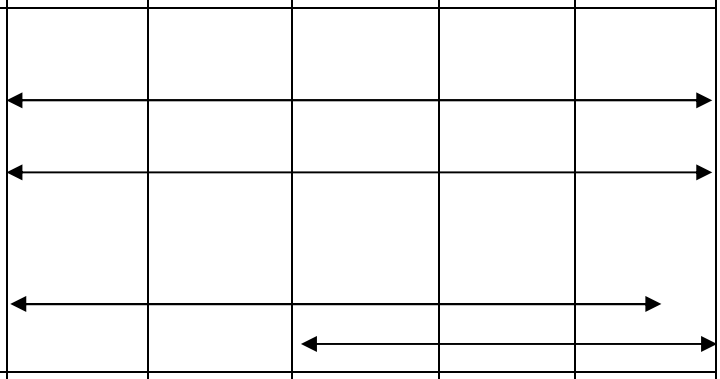
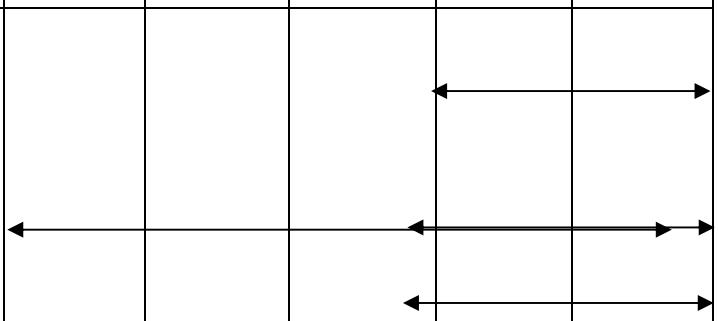
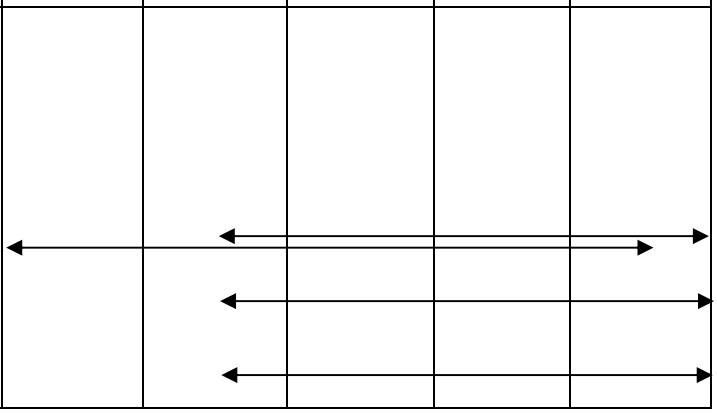
*1 R/D に記載の協力期間（JICA ナレッジサイト等参照）
*2 開始日=暫定契約開始日、終了日=R/D に記載の協力期間終了日又は当該年度末

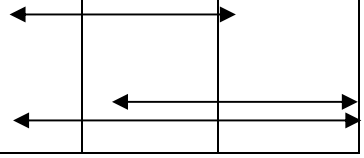
研究代表者： 明石　欣也
鳥取大学　農学部　生物資源環境学科　教授

Ⅰ．国際共同研究の内容（公開）

１．当初の研究計画に対する進捗状況

(1)研究の主なスケジュール(実績)

項目	H24年度	H25年度	H26年度	H27年度	H28年度 (12ヶ月)
１．ボツワナ気候に適合したヤトロファ栽培方法の確立 ・冬季前の収穫を可能とする技術の開発 ・ボツワナ向け栽培プロトコールの開発 ・ヤトロファ子実収量80粒/木の達成					
２．多収およびストレス耐性のヤトロファ開発基盤の構築 ・ボツワナのヤトロファ系統の収量およびストレス耐性評価 ・ボツワナのヤトロファ系統の分子マーカー開発 ・多収およびストレス耐性遺伝子のヤトロファへの導入 ・形質転換ヤトロファのストレス耐性評価					
３．ヤトロファ油脂産物の解析 ・ボツワナのヤトロファ系統の油脂データベース開発 ・ヤトロファ種子および油脂の毒性物質の分析 ・ヤトロファ粗油およびバイオディーゼルの燃焼特性の解析 ・ヤトロファバイオディーゼルの収率の解析					
４．ヤトロファ非油脂バイオマスの利用技術の開発 ・非油脂バイオマスの収量、組成およびバイオマス由来産物(バイオ炭)の分析 ・バイオ炭による土壌保水性の改善 ・バイオ炭による水利用効率の改善 ・非油脂バイオマスの利用技術の開発					

５．ヤトロファ生産利用の環境、社会、経済評価 **・ヤトロファ事業におけるGHG算出方法の開発** **・ヤトロファ事業のLCA解析** **・ヤトロファ事業による石油燃料代替効果の評価**					

(2)中間評価での指摘事項への対応

中間評価報告書の第５項「今後の課題」で指摘された５点について、以下に記載する。

「i. ボツワナとの共同研究実施体制を強化すべき」

中間評価において、ボツワナ側の予算処置の状況が協議され、財務省から予算確保への提言を受けた。これによって、プロジェクト活動に使用できる予算をエネルギー省内に確保できた。予算が確保できたことにより、UB での学生確保が可能になり、プロジェクト目標の指標の一つである６人のリサーチャーが修士、博士課程の学位を取るという成果に向けて、学生の入学が実施された。また、こうした学生が積極的にプロジェクト活動に参加するようになった。加えて、同予算を活用し、エネルギー省が積極的に定例会議、研修旅行等を実施するようになり、活動に積極的に取り組むようになった。これらボツワナ側のオーナーシップの発揮によって、様々な研究が提案され促進されるとともに、プロジェクト後も継続した研究活動の実施が期待できるようになった。

上記の予算化と並行して、両国の研究者による共著の論文作成を促進させるべく、種々の働きかけを行った。その結果、遺伝解析、病虫害調査、形質調査、栽培手法、バイオディーゼル変換、非油脂バイオマス利用、LCA 解析などの諸分野において、共同執筆の枠組みが出来上がり、データ取得および論文執筆が進行した。

また、相互の意思疎通を更に強化するために、中間評価時にボツワナ側に調整役(coordinator)を求め、関係三機関に三名の調整役が正式に任命された。この三名の調整役には、実務能力の高い中堅を任命させることができ、日本側とボツワナ側の連携は強化され、活動における調整などが効果的に行われるようになった。更には、圃場管理をメイン業務とするカウンターパートとカウンターパートの活動を支援する技術者が任命され、圃場管理にかかる技術移転が進んだ。

「ii. ボツワナ国での、本プロジェクトの位置づけ明確化」

本共同研究は間もなく研究期間終了時期を迎えるが、プロジェクト終了後の展開について、月例セミナーなどの機会における議論を複数回にわたり行った。これらを経て、ヤトロファ・エネルギーを地産地消型の形で村落開発に活用する実証プロジェクトが計画された。このプロジェクトは積極的に再生利用可能エネルギーの促進を目指すボツワナ資源省から、技術協力プロジェクトとして日本政府に正式に申請された。本プランは本共同研究で開発された技術を元に持続的・経済的な社会実装を指向したものであり、ボツワナ国の再生可能エネルギー開発戦略の中に、本事業の成果として位置付けることができるものである。本構想を実現させるため、資源省エネルギー局では候補村落のリストアップが進められ、農務省研究部でも候補村落の絞り込みのための現地調査が行われるなど、ボツワナ政府の省庁

が主導し将来設計を議論する場面が見られた。
本共同研究の活動は大統領を始めとする政府関係者にも注目されており、本共同研究の活動についてはボツワナの中期国家計画である National Development Plan 11 (2017-2022)のドラフト版に明記された。国家計画の中で特定のプロジェクトが明記されることは特筆すべきことであり、本共同研究が、ボツワナ側のエネルギー政策の重要項目の一つとして位置付けられ、期待されていることの現れと言える。更に、ヤトロファ利用を含めた再生利用可能エネルギーの開発は、長期国家計画である Vision 2036 にも記載された。
また、本共同研究はヤトロファをボツワナで活用するための基礎となったが、実用化までには更なる研究と開発が必要である。ボツワナ政府は収量の増加や社会での実証活動についても日本の研究者に協力を期待している。それは、ボツワナ資源省が、更なる研究活動を実施する SATREPS 案件を日本政府に申請したことからも伺える。

「iii. プロジェクトの目標値をさらに検証をすべき」

収量の目標値については、中間評価においてその指標に変更があった。この変更は目標値を現実的挑戦可能な数値とするものであった。現実的達成可能な数値に変更したとは言え、未だ達成には厳しい数値であったが、様々な試行錯誤が実を結び、最終年の雨期にはこの数値を上回る収量を得る事ができた。
この収量は経済性や便益性の検証に利用された。加えて、ボツワナを含めた南部アフリカ地域におけるヤトロファ事業の費用便益解析が、ボツワナ大学の研究者を主軸に進められた。その結果として、上述の地産地消型の村落開発モデルと、プランテーション型の栽培生産の双方に関して、その特性や収益性、社会や環境に与えるインパクトについての提言がなされた。
プロジェクトのアウトプットにかかる指標はほぼ全て達成できた。プロジェクト目標の指標の一つである「Technology protocols」はまとめられ、ボツワナ政府に本共同研究の成果として、また、ヤトロファを気象条件の厳しい南部ボツワナで栽培しバイオマスを利用するためのマニュアルとして、ボツワナ政府へ提出された。この Technology protocols はヤトロファ栽培と利用の基礎情報として活用されることが期待される。

「iv. ゲノム育種の研究についての方針を示すべき」

本研究期間では、ボツワナ固有のヤトロファ系統の探索・保存と、形質の調査、分子マーカー開発を研究事項として、優良形質を持つ系統を見出すに至った。次の段階として、ゲノム育種による優良品種の開発が有効と考えられる。この方向性のスキームについては、日本国内におけるゲノム育種の第一人者である東京大学の岩田グループとの連携を進めており、ヤトロファのゲノム育種のロードマップを策定し、ボツワナ側研究者にも提示している。また、育種交配にあたり、本研究で用いているボツワナおよびガーナ系統に加えて、新規な遺伝資源の導入が有効である。この方向に向け、鳥取大学ではメキシコ農務省(INIFAP)と共同研究協定を締結し、メキシコのヤトロファ系統に関する共同研究を開始した。また、インドにおいて多収ヤトロファの育種に成功している JNKVV (Jawaharlal Nehru Agricultural University)との連携を深めており、これまでに 8 名のボツワナ研究者を JNKVV 大学へ派遣しており、また日本側研究代表者である鳥取大学の明石も JNKVV を訪問し共同事業の協議を始めている。国際機関としては、ICRISAT (International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics)が関与するヤトロファ諸活動があり、ICRISAT との連携を視野に、関係者との接触を開始している。ヤトロファ交配育種については、既に鳥取大学で交配を始めている。

「v.　他の SATREPS プロジェクトとの連携を進めるべき」

SATREPS 事業における他のヤトロファ・プロジェクトと共同で、2016 年 3 月に、国際シンポジウムを開催し、様々な分野での連携について協議を行った。この協議の成果として、本ボツワナ・プロジェクトにおけるボツワナ人研究者の本邦研修において、JIRCAS 石垣島の研究所(SATREPS ベトナム案件：大阪府立大学、前田教授代表)の見学が織り込まれ、ヤトロファ研究に関する具体的な情報共有を始めている。また、ヤトロファ・バイオディーゼル油の内燃機関における燃焼特性について、金沢工業大学グループ(SATREPS モザンビーク案件：東京大学、芋生教授代表)から、本プロジェクトのボツワナ大学研究者へ研究上の助言を頂いた。特にこのモザンビーク案件のモザンビーク側研究者とボツワナ側の研究者は、相互にシンポジウムに参加して意見交換するだけでなく、金沢工大の研究者がボツワナ側研究者に技術指導するなど、連携が深化しており、広く南部アフリカ地域のヤトロファ研究における連携が強化された。

(3)プロジェクト開始時の構想からの変更点(該当する場合)

プロジェクト当初では想定しなかった雹嵐に見舞われ実験農場が被害を受けた。この自然災害のため、研究スケジュールを一部変更した。また，昨夏期は 40℃以上の熱波に見舞われ，開花後の受粉過程がダメージを受け，小果が枯死したため果実収穫に至らず，バイオディーゼル製造が大幅に遅れた.

その他の変更点については、中間評価での指摘事項への対応とも重複する部分があるので、上記(2)も参照頂きたい。

２．プロジェクト成果目標の達成状況とインパクト（公開）

(1) プロジェクト全体

化石燃料から循環的エネルギーへの代替を進める上で、植物バイオマス・エネルギーは、小さな初期投資と運用コストで、大気 CO_2 を直接吸収しエネルギー利用することのできる唯一の選択肢である。この時、食糧生産が行われない乾燥地でのバイオマス生産および利用のための技術が発展すれば、低炭素社会の構築のための Game-changing な技術となり得る。本共同研究では、乾燥耐性を有するヤトロファに着目し、アフリカ・ボツワナの乾燥冷害地域における生産および利用の総合研究開発を行い、当地におけるヤトロファ生産に初めて成功した。これは、世界におけるヤトロファの栽培域を実質的に拡大し得たことを示しており、乾燥冷害地でのバイオマス事業の基盤技術として重要である。さらに、ボツワナ現地でのヤトロファ・バイオマス利用に資する多くの新規技術を開発した。以下に、本研究プロジェクトの 5 つの研究題目ごとに、その成果の概要を記載する。

研究題目１「ボツワナ気候に適合したヤトロファ栽培法の確立」では，2011 年 12 月にボツワナ固有 77 系統およびガーナ系統をセベレ地区 DAR 実験圃場に植え付け，灌漑設備は 2012 年 10 月以降に設置し，潅水を開始した．気象観測装置は 2013 年 5 月に設置し，10 分間隔でデータを取得し，2 時間毎にサーバーにアップデートされ，日本からも閲覧できるようになった．ヤトロファの花芽の開花時期は植え付け後３～５年目の樹では 11 月から始まり 4 月頃まで継続するが，開花後 60～70 日で収穫可能である．５年間の気象データを解析したところ，寒波は６月上旬に発生しヤトロファを襲う．従って，３月以降に開花したものは収穫には至らず，枯死する場合もある．8 から 11 月に土壌水分をモニターしながら週

2 回の頻度で潅水すれば樹体は成長し，花芽分化が促進され，冬季前に種子を収穫し得ることを示した「(PDM 指標 1-1)」.

2013 年にはマウン，カーン，セロエ，セベレにキャンベルの気象観測装置を設置し，10 分間隔で気象データを取得した．４地区とも冬季に氷点下になるが，セベレ実験圃場の栽培方法を応用すればヤトロファの栽培は可能である．また，栽培マニュアル「Jatropha Cultivation in Botswana」の第 1 版を改訂し，改訂版（第２版）を出版した「(PDM 指標 1-2)」.

冬季到来前の 6 月上旬に 1 年樹は地際から，２年樹は 40cm 高，3 年樹以降は 100cm 高でプルーニングし，8 月以降週 2 回の頻度で潅水を行い樹勢を高め分枝数を確保することで，4 年樹以降は種子数 80 粒以上/株を確保できること、また優良系統では平均で 200 粒以上/株を生産できることを示した.「(PDM 指標 1-3)」.

研究題目２「多収およびストレス耐性のヤトロファ品種開発」では、ボツワナ国内で見いだされた 80 以上のヤトロファ固有系統について、実験圃場における形質調査を進め、生長特性、バイオマス生産量、開花結実頻度、病虫害ストレス感受性などの複数項目において、ヤトロファ固有系統間に大きな形質の多様性が存在すること、またこれらのコレクションの中に生産性等において優良な系統候補が存在することを明らかにした(PDM 指標 2-1)。これらヤトロファ固有系統のうち代表的なものを選びゲノム解析を行った結果、各系統にユニークな SNP（single nucleotide polymorphism)がゲノム当たり約 70 万か所存在することが示され、ボツワナのヤトロファ自生系統が、当初予想よりも遺伝的に多様であることが示唆された。これらのゲノム情報に基づき、SNP 分子マーカーを作出し、ボツワナ固有ヤトロファ 86 系統の全てを用いて遺伝子解析を進めた結果、これら系統の遺伝的関係を系統樹として表すことに成功し、ボツワナ固有系統を相互に判別する分子マーカーの作出に成功した(PDM 指標 2-2)。これら分子マーカーは、今後のゲノム育種による育種を迅速化するにあたり有用なツールである。さらに、分子育種によりヤトロファのストレス耐性を向上させるために、まず遺伝子組換え技術の改良を行い、減圧処理とろ紙培地を組み合わせた新手法により、ヤトロファの遺伝子組み換え効率を顕著に高めることに成功した。本方法を用いて、ボツワナ由来のヤトロファ優良系統候補である JK-01 系統を親植物として、トレハロース生合成遺伝子 *OtsAB*、野生種スイカ由来転写因子 *CLZFB1*、細胞保護遺伝子 DHN の遺伝子導入作業を行い、これら遺伝子を導入したヤトロファ形質転換個体を作出した(PDM 指標 2-3)。これら組換えヤトロファのストレス耐性の評価を進めた結果、OtsAB 組換えヤトロファについて、リーフディスクを用いた低温耐性評価試験の結果、コントロール株に比べ低温耐性が向上していることを示す結果が得られた(PDM 指標 2-4)。以上のように、多収及びストレス耐性のヤトロファ品種を開発するための基盤技術を確立することができた。

研究題目３「ヤトロファ油脂分析および利用法の開発」では、ほぼ全ての系統のボツワナ固有ヤトロファの種子について、系統ごとに油脂含量および油脂組成を分析する実験系を構築し、種子重量当たりの油脂含量や、脂肪酸組成において系統間に顕著な多様性が存在することを明らかとした(PDM 指標 3-1)。また、ヤトロファの主要な毒性物質であるホルボールエステル(PE)について、種子における含有量を調査し、ボツワナ固有系統間に顕著な差異が存在することを明らかとし、PDM 指標 3-1 データと合わせ、ボツワナ固有系統の化合物データベースを構築すると共に、粗油およびバイオディーゼルにおける PE 含量を測定し、バイオディーゼル油における PE が消失することをしめした(PDM 指標 3-2)。これらの情報は、ヤトロファバイオマス利用の安全性を図るうえで重要な情報である。

ヤトロファ粗油から作製したバイオディーゼルを用いて、エンジン性能試験装置および小型発電機を用いて燃焼特性の解明を行った(PDM 指標 3-3)。この結果に基づいて、小型発電機と小型搾油器機をベースとするバイオディーゼル製造・電力供給システムを開発し、無電化村における電力供給シミュレーションを行った。加えて、バイオディーゼルを用いた実車試験を継続している(PDM 指標 3-3)。種子の搾油効率は、産地によって 22.2-41.0%と大きな差が見られた。熱量（MJ/kg）は 39.32- 39.61 となり、バイオディーゼルとしては典型的

な値となった。引火点（flash point：℃）は 146.5～177.5、曇天(cloud point：℃)：0-1.67、粘性（40℃：mm²/s）は 2.7～3.2 であった。これらはヤトロファバイオディーゼルは燃料規格に適合し、一般バイオディーゼルと変わらないことを示した。ヤトロファバイオディーゼル（B100)、石油ディーゼル 50ppm、石油ディーゼル 500ppm を供試したエンジン性能特性を比較し、B100 は石油ディーゼルと同等の性能を発揮することがわかった。小型発電機（粗油対応、発電能力 2.8 kVA）による発電試験では、バイオディーゼル 30%混合すなわち B30 までは、石油ディーゼルと同等の発電出力を得た。これらのデータに基づいて、ボツワナ国内の無電化村を対象に 1 日 4 時間、365 日電力供給システムを想定して簡単なシミュレーションを行い、必要な種子量とヤトロファ樹木本数を求めた。さらに、2016 年 12 月より実車によるオンロード試験を開始しており、2017 年 3 月以降も引き続きを継続する予定である(PDM 指標 3-3)。

従来法を用いたバイオディーゼルの収率を求めた(PDM 指標 3-4)。加えて、ヤトロファ炭および灰を触媒として、メタノールに代わりエタノールを用いてエチルエステル（FAEE）を作製する新法を開発してバイオディーゼルの収率などの評価を行った(PDM 指標 3-4)。バイオディーゼル収率は炭で 40%と低い値であったが、灰を用いて 70%まで向上させたが、さらなる改善が必要である(PDM 指標 3-4)。この技術によって、劇薬物質を用いずにバイオディーゼルを作製でき、主に農村部での安全なエネルギー自給の可能性があり、インパクトは大きい。

研究題目 4「ヤトロファ非油脂バイオマスの利用技術の開発」では、外熱式および自燃式の 2 種類の炭化装置を用いヤトロファの各部位を炭化し、製造物の特性評価とそれらの利用を行った。ヤトロファのバイオマス活用において、バイオ炭を前面に打ち出した研究は本プロジェクトが初めてである。バイオマス利用を効果的に組み合わせるとヤトロファの普及に新たな可能性が生じる（研究題目 5 と関連)。一部地域を除いて半乾燥地で水資源に乏しいボツワナで、バイオ炭による土壌改良・肥料利用ができれば、食料の安定確保に貢献できる。農村部では未だに薪を利用しているが、その一部がバイオ炭等の固形燃料に置き換われば環境保全に大きく貢献できる。一般にバイオ燃料による化石燃料の代替においてバイオマスの「カーボンニュートラル」性は評価されるが、薪や炭（森林を伐採して製造）との代替というバイオマスの種類および利用法による環境影響効果も大きい。ヤトロファからのバイオ炭や炭を触媒とするバイオディーゼル製造は、農村部でエネルギーの地産地消・自産自消システムを確立する際に、安全面と資材確保の面で大きな意義をもっている。

PDM 指標 4-1 に関連して、ヤトロファ・バイオマスの収量を測定し、2D-HSQC, 2D-HSQC-TOCSY および 2D-HSQC-NOESY 等の NMR 手法を用い、ヤトロファ各組織の物理化学の基本特性の解析手法を確立した。その結果、ヤトロファ各組織はそれぞれ特徴的なリグノセルロース成分を有していることが判明した。バイオ炭の炭化条件およびバイオマスの種類別に理化学性を詳細に明らかにした。葉や枝、果肉の炭化物は特に高い値を示し、含有量の多い K, P(重量比で各 5, 1%)は肥料としての利用が可能である。セルロースを残しつつリグノセルロースの高次構造を崩壊させるバイオ炭の製造プロセスを各種高分子分析法で評価した(PDM 指標 4-1)。

バイオ炭施用土壌の保水性の向上ならびにヤトロファ苗の成長および初期成育において蒸散量/蒸発量比、水利用効率の増加が認められた。さらに、施用量と植物の生長と収量の関係ならびにヤトロファの吸収成分の変化に加え、土壌中の代謝プロファイルおよび微生物プロファイルに顕著な改善が認められた（PDM 指標 4-2 および 4-3)。

バイオ炭に焦点をあて、土壌改良資材、固形燃料（グリーン燃料)、固形肥料（グリーン肥料)、バイオディーゼル製造の固形アルカリ触媒の 4 技術を開発した(PDM 指標 4-4)。土壌改良資材としての効果は上述の通りである。固形燃料は、バイオ炭に乾燥牛糞を 80%と 20%の割合で混合し、ブリケットに成型し、基本物性と燃焼試験による燃焼特性を把握した。牛糞はバインダーとして利用したが、牧畜業が盛んなボツワナを代表する地域資源で、ユニークな固形燃料（グリーン燃料）となった(PDM 指標 4-2 および 4-3)。バイオ炭と牛糞の混合物は、固形肥料としての効果も大きく、野菜栽培において化学肥料に劣らない増収効果を

示した。研究題目３で述べたように、ヤトロファから油脂および触媒と，搾油残差やソルガムを発酵させ得られるエタノールを原料とすれば，ヤトロファなど地域資源のみで完結する(ボツワナ国内で自給可能な)循環型システムの確立に繋がる極めて有益な手法が得られる。

研究題目 5「ヤトロファ生産および利用の環境、社会、経済評価」では、ボツワナ調査地のヤトロファ事業における温室効果ガス（以下、GHG）排出量および削減（吸収）量を LCA にて検証した。まず、試験圃場の投入データに基づき、栽培に関わる GHG 収支を分析し、それ以外のステージ（搾油、精製、流通、利用）の GHG 排出量および削減量を文献データ等に基づいて算出し、生産されたバイオマスエネルギーと副産物による GHG 削減量を試算した。その結果、ヤトロファエネルギー生産・消費プロセスにおいて、削減量が排出量よりも 63.4%、上回ることが明らかとなった。

次に、石油燃料代替に関する試算を、大規模農園（プランテーション）モデル、及び、垣根栽培（ヘッジ）モデルにおいて行った。垣根栽培モデルとは、農村部において小規模農民の耕地、彼らの敷地の境界にヤトロファを栽培し、基本的に農地の削減を伴わないモデルである。各モデルにおいてヤトロファの石油代替燃料生産による石油燃料（軽油）削減量を試算した。また、木質代替燃料生産による木質燃料（薪）削減量を算出し、木質代替燃料により 1 年分の薪を供給可能な世帯数を試算した。大規模農園モデルにおける軽油削減量は 82.5 x 10^6 L/年、薪削減量は薪の削減量は 42.9 x 10^3ton/年（ボツワナ農村世帯 6.9%の消費する薪 1 年間分にあたる)、垣根栽培モデルにおける軽油削減量 20.2 x 10^6 L/年、薪削減量は 10.5x 10^3ton/年（ボツワナ農村世帯 1.7%の消費する薪 1 年間分にあたる）と試算された。

さらに、実験圃場の栽培活動における支出および収入を算出し、それに基づき、大規模農園モデル、垣根栽培モデルにおいて、利益を創出するためのシナリオを構築し、ヤトロファ事業の費用便益分析を行った。その結果、大規模農園モデルにおいて黒字化を達成するためには、栽培活動における諸活動の経費削減と、初期投資への公的補助に加え、育種および栽培技術などの進展によるヤトロファ収量の増大が必要であることが示唆された。一方、垣根栽培モデルにおいては、現状のヤトロファ品種を用いても黒字化が可能であり、また採算性の評価に当たっては、非油脂バイオマス利用がカギを握ることが示唆された。

なお、サハラ以南の南部アフリカにおける先行ヤトロファ事業の文献調査結果は以上の分析結果を裏付けるものであった。

アウトプット１（栽培）

アウトプット１の目標：

アウトプット目標：

1. Jatropha farming protocol suitable for climate of Botswana is established. (ボツワナの気候に適合したヤトロファの栽培方法が確立される)。

客観的な指標 (Objectively-verifiable indicators)、およびそれらの達成状況の要約：

1-1) Jatropha seed harvesting is completed before frost season in experiment farm. (実験農場において、冬季の前にヤトロファ種子の収穫が終了する)。

達成状況：花芽の開花時期は植え付け後３～５年目の樹では 11 月から始まり 4 月頃まで継続するが，開花後 60～70 日で収穫可能である．５年間の気象データを解析したところ，寒波は６月上旬に発生しヤトロファを襲う．従って，３月以降に開花したものは

収穫には至らず，枯死する場合もある．8 から 11 月に土壌水分をモニターしながら週 2 回の頻度で潅水すれば樹体は成長し，花芽分化が促進され，冬季前に種子は収穫できる．

1-2) Farming protocol including water management and pruning is documented based on databases of four (4) different sites. (国内 4 か所のデータに基づき、水管理および剪定を含む栽培プロトコールが編集される)。

達成状況：マウン，カーン，セロエ，セベレに気象観測装置を設置し，10 分間隔で気象データを取得した．4 地区とも冬季に氷点下になるが，セベレ実験圃場の栽培方法を応用すればヤトロファの栽培は可能である．また，栽培マニュアル「Jatropha Cultivation in Botswana」の第１版を改訂し，改訂版（第２版）を出版した．

1-3) Jatropha seeds production in experiment farm exceeds 80 seeds/tree.* (*Trsnsgenic Jatropha trees are not included.) (実験農場におけるヤトロファ種子収量が、一木当たり 80 粒を超える)。

達成状況：冬季到来前の 6 月上旬に 1 年樹は地際から，２年樹は 40cm 高，3 年樹以降は 100cm 高でプルーニングし，8 月以降週 2 回の頻度で潅水を行い樹勢を高め分枝数を確保することで，4 年樹以降は種子数 80 粒/株以上を確保できる．

<u>活動項目：</u>

1-1. Establish automated weather stations and field servers.（自動気象ステーションおよび圃場サーバーを整備する）
1-2. Develop cultivation method of jatropha.（ヤトロファ栽培法を開発する）
1-3. Develop irrigation system for jatropha cultivation.（ヤトロファ栽培のための灌漑システムを開発する）
1-4. Conduct soil and water analyses.（土壌および水の分析を行う）

<u>① アウトプット１の研究のねらい</u>

本題目は，情報（データ）に基づく的確な管理を実施する ICT 農法の適用によって，厳しい低温乾燥地においてヤトロファの成長を管理する栽培システムの確立が主要な課題である。設置したデータ収集システムによって蓄積された詳細な気象観測データおよび土壌物理特性データにヤトロファ生体データを合わせてデータベースとし，節水潅水を行うシステムを開発する．またヤトロファ栽培上問題となる気象要因も絞られ，被害軽減に向けた気象予測と対策技術の確立を行う．成長，乾物生産，種子収量のデータから優良系統を選抜するとともに，画像データと組み合わせて解析することで生育と収量予測モデルを構築する．

<u>② アウトプット１の研究実施方法</u>

気象観測システムを中心とする情報収集システムを設置し，データベースの構築と得られたビッグデータの解析を行う。水ストレスに対するヤトロファの葉のガス交換速度の反応から，水ストレス症状を早期に診断できるパラメーターの選定を行う．また，DAR 土壌の土壌物理的特性と根の分布を詳細に調べ，植物の生体情報をベースとした新たな灌水制御システムへの応用を検討する．

過去５年間の気象データの解析により寒波予測が可能になり，事前の対策技術と合わせてヤトロファ栽培スケジュールを作成する．定期的な生育調査と子実収量調査に加え，乾物調査を行うことでヤトロファのボツワナにおける乾物生産能を定量的に評価するとともに，子実収量のみならずバイオマス収量に優れる系統の選抜を行う．

ヤトロファの成長を総合的に分析して ICT 農法を確立するために，ヤトロファ個体（樹体）のデータを個別に管理する「樹体管理 GIS」の開発を行う。ヤトロファの成長および生理学的状態を評価するために，定点カメラなどで取得した画像の解析方法を開発する。さら

に，ICT 農法の評価手法として LCA（温室効果ガスの排出と吸収）の有効性を検証する。

③ アウトプット１の当初の計画（全体計画）に対する達成状況の詳細とインパクト

1-1）冬季前の収穫を可能とする技術の開発

ICT 農法に必要なヤトロファ圃場の気象，土壌，画像データは継続的に収集が進み，データベースが構築できた（図 1-1～1-4）。特に，CO_2 濃度の日変化を 5 年間にわたってトレースできたことは特筆すべきことである（図 1-3）。当初，CO_2 濃度は半乾燥地において大きな日変化は少ないと考えていたが，ボツワナ国の環境政策に重大な影響を与えるデータとなることが判明した。また，CO_2 濃度の日変化や季節変化に与えるヤトロファの効果も認められ，エネルギー問題解消のためのヤトロファ栽培以上の意義をもっていることを明らかにした。

ボツワナ，セベレ地区の気象の特徴は，冬季６月上旬に数日間，朝方寒気が襲い，降霜がある（図 1-2）．2014 年 6 月には-8℃を記録した．しかし，その後，日の出とともに温度は急速に上昇し，日中は 25℃に達した．この降霜とその後の気温の上昇に伴う空気湿度の低下は葉面飽差を上昇させ，葉は枯死に至る．

この寒波対策として剪定(プルーニング)，ラッピング，葉除去，トレハロース葉面散布および寒冷紗によるトンネル被覆を試みた．2016 年の冬は寒波が比較的弱かったが，枝先の枯死や落葉が見られた．トンネル区は被害枝の割合，被害強度ともに最も低く，寒波対策として有用な方法であるとともに，翌春(9～10 月)の早い時期から着花を開始し，ほぼすべての株で着花が確認された．剪定の結果と合わせると頂芽への被害軽減が早期着花に繋がると考えられる．以上より，トンネルは耐寒波，早期着花のいずれにも有効であると考えられる．剪定で得た残差は圃場で炭化し，その炭を土壌に混和することで保水性向上および地面蒸発量抑制効果が期待できる．処理区は細粒炭混和，粗粒炭混和，炭マルチ，土中施用および無処理を設定したが，いずれの区においても土壌の圃場容水量を高めた．地表面からの蒸発速度は無処理と比べて微粉炭，粗粒炭混和ではやや遅く，炭マルチでは顕著に蒸発を抑制した．これは地表面と外気が炭マルチによって隔たれ，炭の表面が乾いても下の土壌では水分が保たれたためだと考えられる．

供与機材である光合成蒸散測定装置（Li-6400）を用いてヤトロファの光合成ガス交換速度を測定したところ，水ストレスの程度によってヤトロファの気孔開度は制限され，CO_2 の取りこみが減少することが明らかとなった．ガス交換測定は早期水ストレス症状を診断できる一方，既存の装置では圃場での長期間モニタリングは難しい．そこで，気孔開度に代替可能なパラメーターとして葉内 CO_2 濃度（Ci）に着目した．Ci は気孔開度と CO_2 の取りこみのバランスが反映されており，その上昇は光合成代謝の低下を意味する．Ci はガス交換測定でルーチン的に計算されているが，シンプルに実測できる方法を開発した．さらに，水ストレス等で気孔が閉じるとガス交換法よりも実測法でもとめた Ci の方がより精度が高いことを世界で初めて証明した．シンプルな実測法では Ci を長期間モニタリングできる為，圃場での早期水ストレス診断ツールとして有望である．

灌漑計画策定のため，ヤトロファ栽培土壌の透水性および保水性の試験を行った．具体的にはインテークレート試験および各深度の透水試験，また保水性を評価するため加圧板法をおこない水分特性曲線を求めた．三相分布試験の結果，気相，固相は適性値にあり，液相においては灌水を行った区では適性値に入ることから，気相は発達した土壌であり土壌中のガスおよび熱交換などは容易であるが，液相においては適性値から外れ乾燥土壌であることが確認できた．さらに，土壌水分動態のシミュレーションを行うための下層部の境界条件およびヤトロファの作土層および根の分布の調査を行った．DAR 圃場は土層分布に偏りがあることが示唆され，一番掘削が容易な場所であっても下層の岩盤が深さ 60cm で表出した．0 から 60cm までの深さごとの土壌の粒径の違いなどは特に見られず均質な乾燥地の土壌であるといえる．また土壌深さごとの土壌体積含水率についてはいずれも 10%以下と低

かったが，土壌色では深さ 30cm で薄暗色となり，水分は保持されていた．また乾燥地特有の塩類集積などはみられなかった．ヤトロファの根は岩盤より上に存在し，2～3 年樹においても根は特に深さ 30cm までに集中しており，横は 1m 以上の広がりがある．従って圃場のヤトロファは深さ 30cm 付近の土壌水分を利用していると考えられる（図 1-5）．

以上の結果より，土壌水分測定センサーは深さ 30cm に埋設し，モニターすることが望ましい．また，ヤトロファの根を垂直に伸ばそうとした場合，灌水方法を変化させた場合でも著しい変化は難しく，遺伝子操作による根の特性改変の有用性が示唆される．また，初期生育では，根が浅く日中蒸発の卓越した表層付近に根が集中することから，灌水は夜間に行うか蒸発を抑えるため炭化物資材を施用する．生育ステージによって灌水の量や方法を検討する必要があり，特に気象データより初期生育時の冬場に降雨がなく 2014 年時には連続干天日数が 184 日も続くことから，初期生育期間は灌水が極めて重要である（図 1-3, 1-5）．

2016 年度は，これまでに蓄積された圃場のヤトロファの画像データより生育ステージごとの LAI を算出し，蒸発散量の推定および，各生育ステージおよび対応する季節ごとの灌水量･タイミングを決定した．また TDR によって計測された年次の土壌水分動態を解析し，上記とあわせ pF 値による灌水制御の確立のためのターゲットを決定した．

冬季前の収穫を可能にするため，植物成長調節剤を用いた栽培管理技術の開発を行い，BA(6-Benzyladenine)や IBA(3-Indolebutyric acid)を適切に用いる事で，種子発芽率や挿し木の発根率の上昇，数の増加，花房あたり雌性花数や果実数の増加による収量増加などの手法が確立された．また矮化剤の使用によるヤトロファの矮化も圃場試験で成功しており，これらの手法は栽培管理の様々な面で利用が可能である．

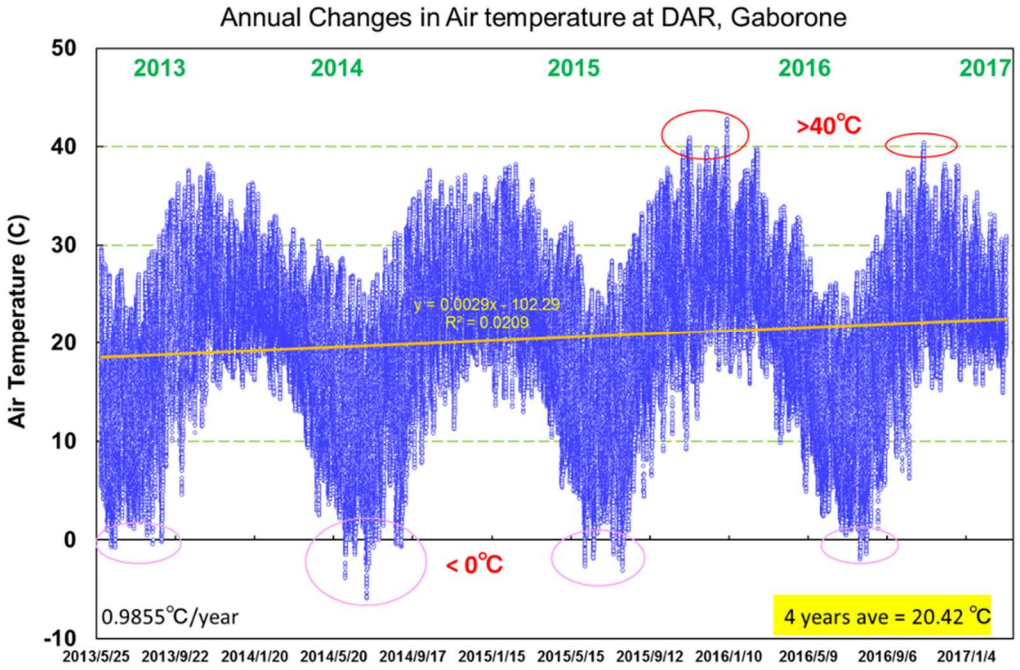


図 1-1. ヤトロファ実験圃場における気温の日変化と季節変動．冬季に氷点下となる日が数日観察された．また，2016 年と 2017 年には最高気温が 40℃を超える日も観察された．回帰曲線の傾きは右上がりであり，5年間のデータではあるが温暖化が進行している．（データ記録は 10 分間隔）．

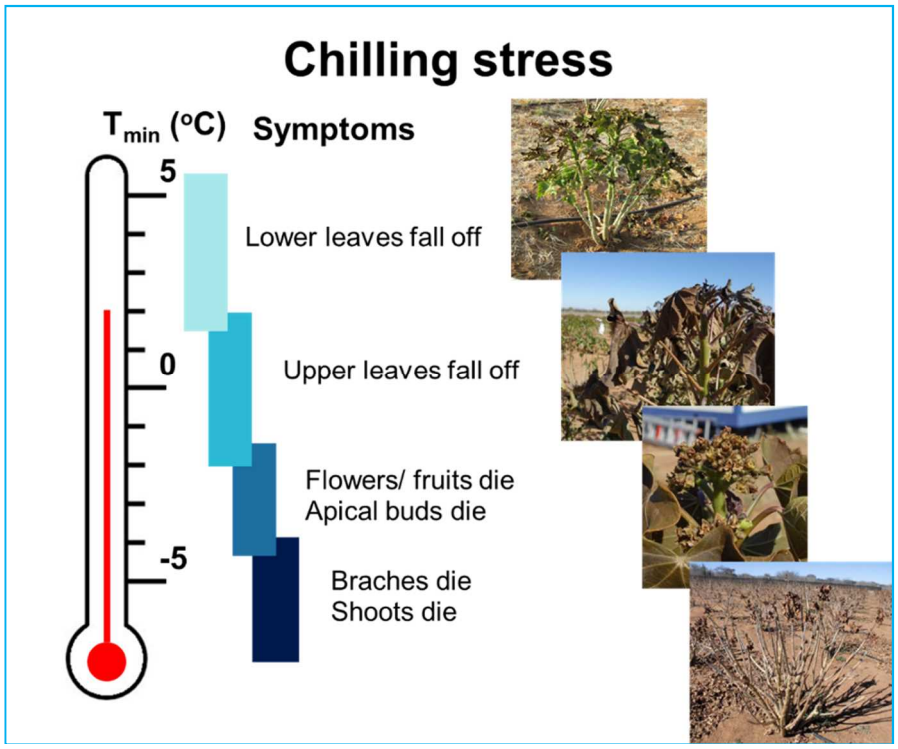


図 1-2. ヤトロファ樹における氷点下後の葉の枯死の様子.

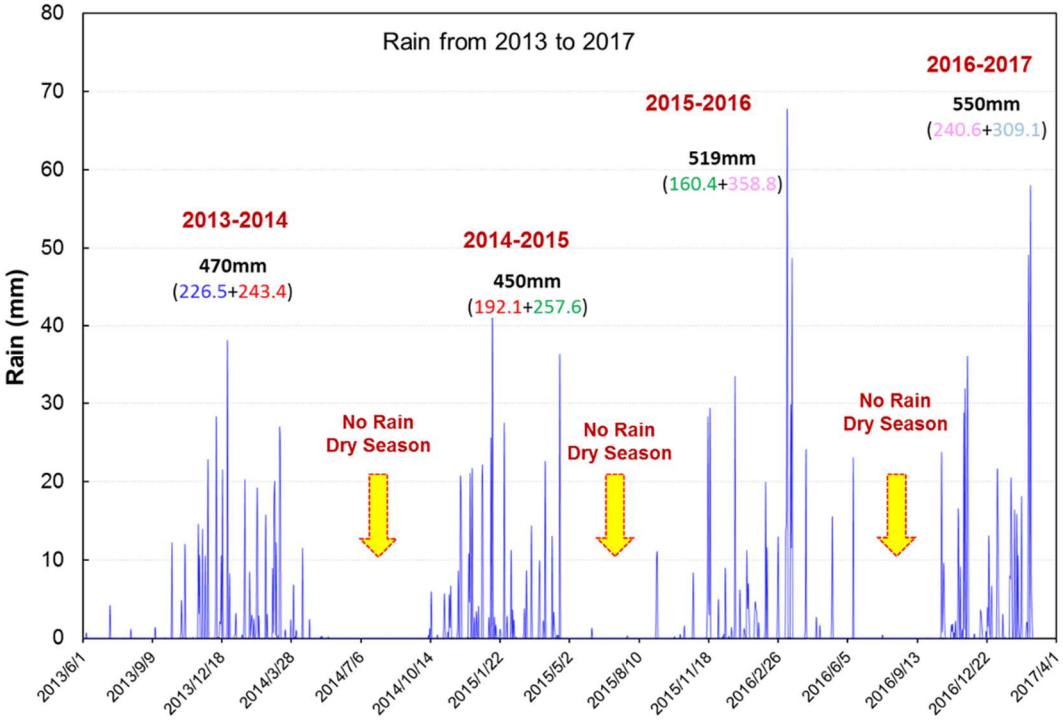


図 1-3. ヤトロファ実験圃場における降水量. 雨季に 470～550mm の降水量があり, 乾季はほぼゼロである. 毎年, 降水量が増える傾向にあるが, 2017 年 3 月の段階でハボローネダムが 16 年ぶりにオーバーフローした.

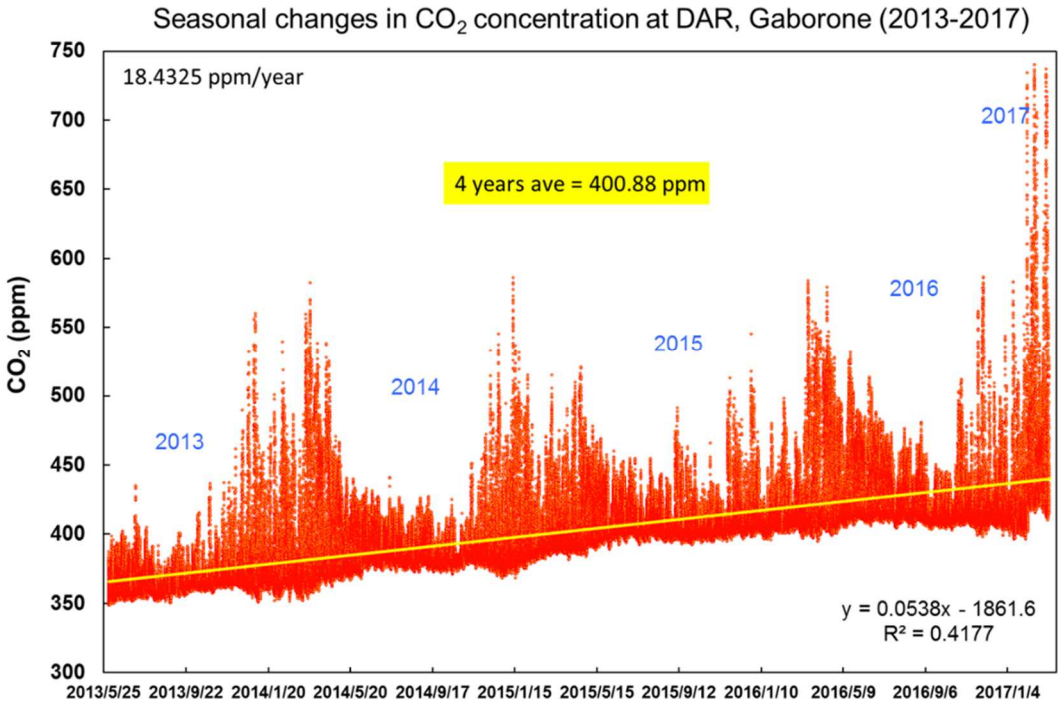


図 1-4. ヤトロファ実験圃場における CO_2 濃度の日変化．5年間の平均 CO_2 濃度は 400.9ppm で，世界の平均値と一致するが，ハボローネにおける上昇率は著しい（18.4ppm/year）．

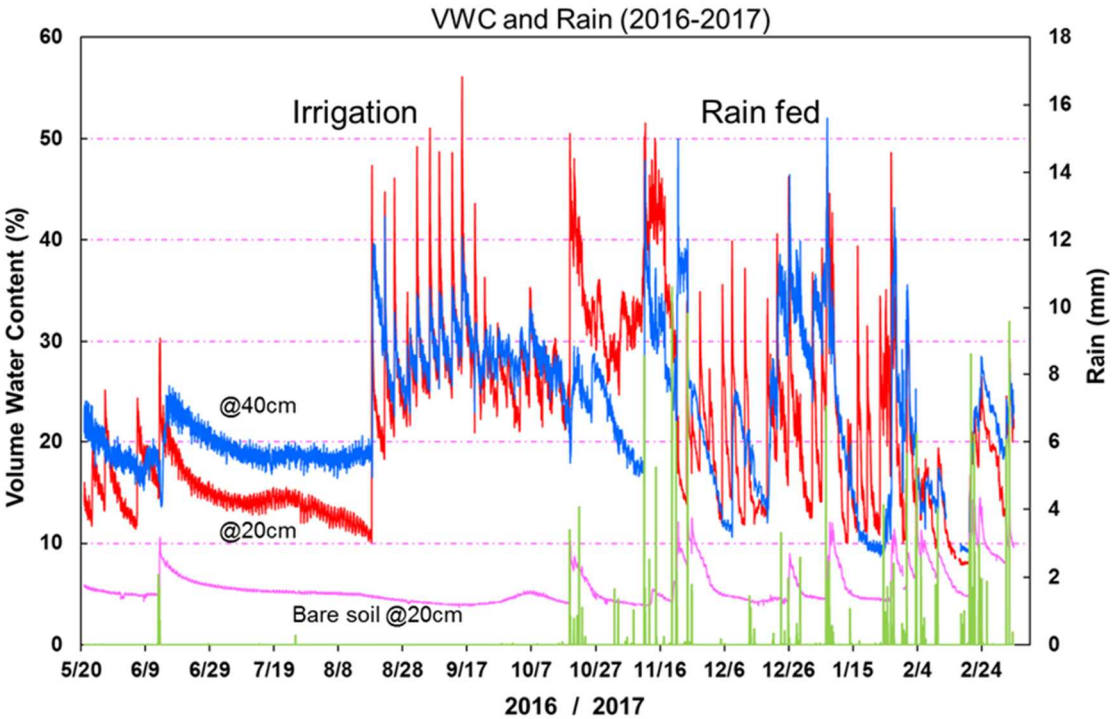


図 1-5. ヤトロファ実験圃場における体積含水率（VWC）の日変化．センサーは植物体近傍の深さ 20cm（赤），40cm（青），および裸地 20cm（ピンク）に設置した．雨量のデータは緑で示してある．潅水の結果や降雨の後，土壌含水率が大きく変化しているが，裸地は 5%で推移している．

1-2) ボツワナ向け栽培プロトコールの開発

栽培プロトコール（栽培暦）は，樹の成長に応じて１，２年目（図 1-7），と３～６年目と

７年目以降（図 1-8）に分けて作成した．１年目は冬季の寒波を避けるためプルーニングを行い，また，土壌蒸発を防ぐためマルチを行う．プルーニングは次年度の分枝数を確保する上でも極めて重要な栽培管理法の一つである（図 1-6）．

図 1-6. ヤトロファ 1 年目の若木は冬季前にプルーニングを行い越冬させる．また，蒸発散抑制のためのマルチングも行い，節水に努める．

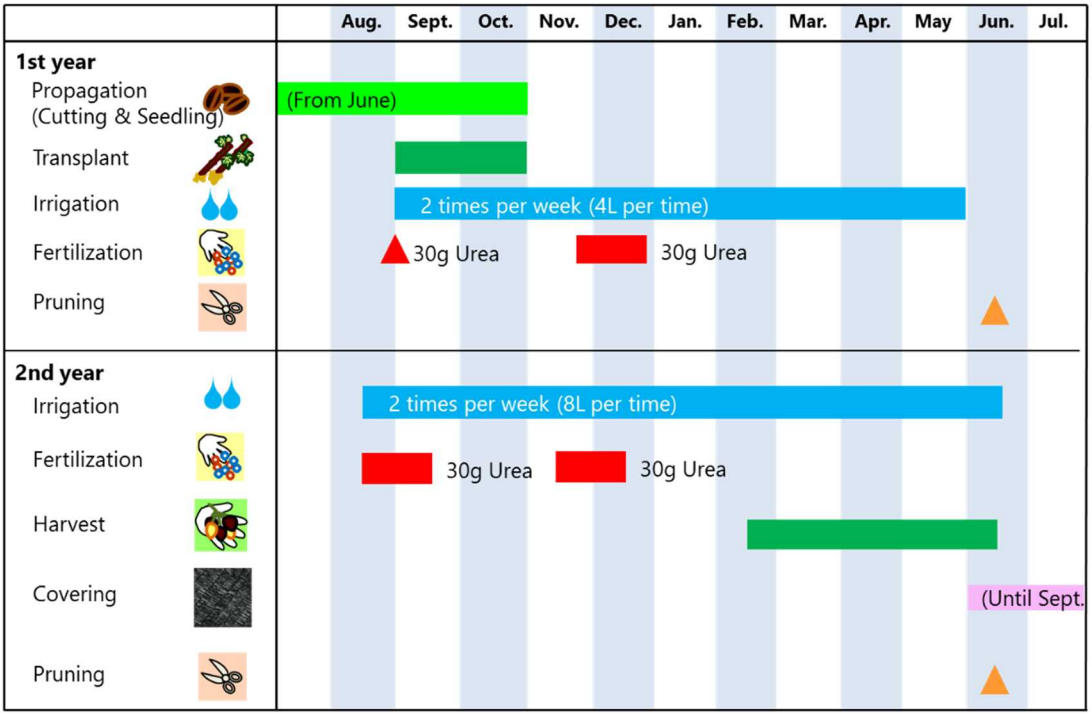


図 1-6. ヤトロファ栽培カレンダー（1年目，2年目）．

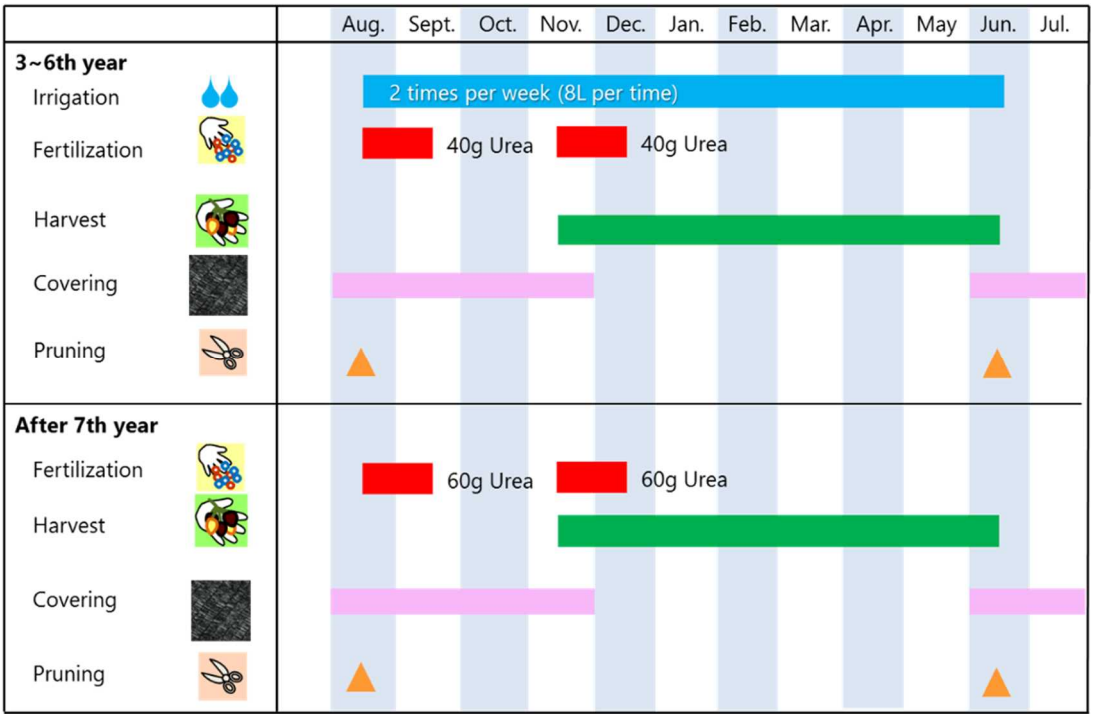


図 1-7. ヤトロファ栽培カレンダー（3～6年目，7年目以降）.

本プロジェクトでは，圃場における樹体管理 GIS の開発を行った。すなわち，ヤトロファの木を一本ずつ管理することを狙いとして，データベースの構築を進めた。データの表示機能はボツワナの研究員が容易に使える Excel を用いた。これは，Excel のセルをヤトロファ１本と見なし，データの量や強度を色によって表示する。大半のデータは Excel に格納できるので，セルによる表示機能と合わせれば十分に GIS として機能する。ある程度の演算は，Excel 付属の VBA を活用することによって実施できる。これによって，だれでも安価に活用できる GIS を提供でき，さらに，ArcGIS のような市販の GIS への移設も容易に行える。2016 年度は，この樹体管理 GIS に気象データなどのデータベースを組み合わせたビッグデータの解析を行った（図 1-8)。

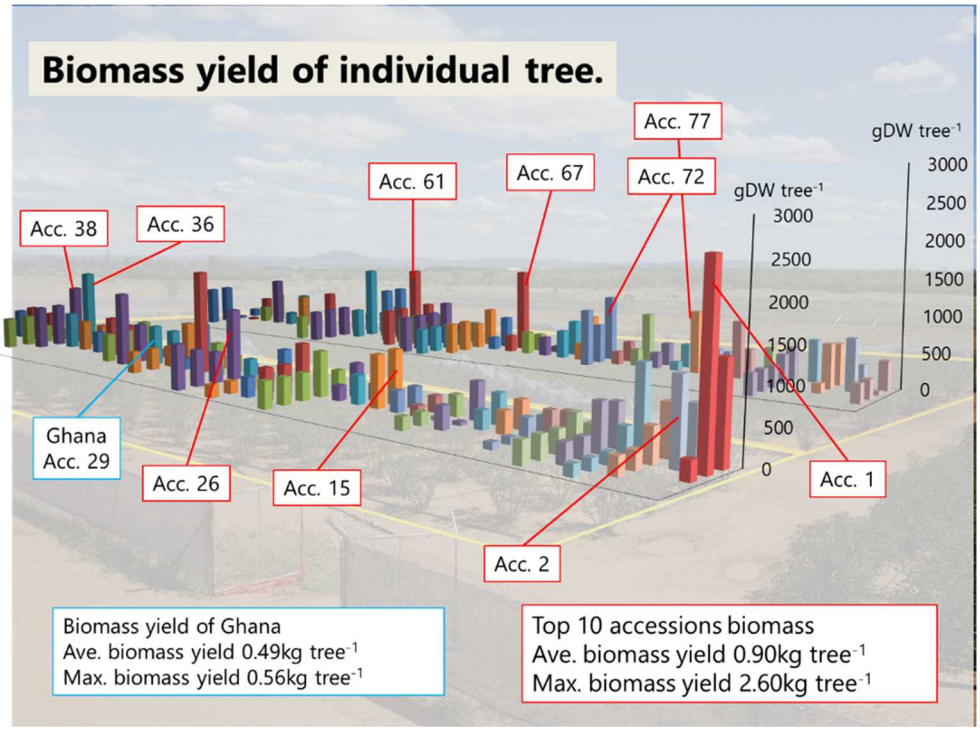


図 1-8. ヤトロファ実験圃場における各系統のバイオマス生産量. トップ10の平均は 0.9kg/tree で，最高値は 2.6kg/tree に達している.

将来，ボツワナにおけるヤトロファ栽培を展開する方法として，セベレ圃場で開発した 2 ヘクタールの配管とタンクを 1 ユニットとする ICT 農法を提案する（セベレシステム）。灌漑は冬季の生き残りに不可欠であるが，コスト面および GHG 排出（LCA）面から負担が大きいのは否めない。まず，潅水のタイミングと量を精密に評価する節水潅水の徹底を図る。植え付け後，最低 2 年間は潅水を行うとするシステムを基本とすると，1 ユニットの潅水システムによって，１ブロック（2ha），２ブロック（4ha），４ブロック(8ha)を同時に栽培できる。2 年後には潅水ユニットを移動させ，最大 8ha を同時に拡張できる。これによって，無理なくヤトロファの栽培面積を拡張できる。

2014 年に出版した栽培マニュアル「Jatropha Cultivation in Botswana」を改訂し，2016 年には第 2 版を印刷し，既に配布を開始している。

1-3）ヤトロファ子実収量 80 粒/木の達成

ヤトロファは一般に不良土壌への適応性や乾燥耐性が強いとされているが，高い種子収量を得るためには優良品種・系統の選定と栽培管理が不可欠である．特に作物栽培で一般的な施肥，潅水，除草，病害虫防除などの管理作業に加え，ボツワナ，セベレ地域においては降雹，寒波，熱波，乾燥への対策が必要である．その内，最も重要と考えられるのが潅水であるが，年降水量が 500mm の同地域において，乾燥は「供給される水が少ない」と「葉または土壌表面と大気の飽差が大きく水が失われやすい」という 2 つの意味をもつ．

夏季の乾燥が著しい 2～3 月に潅水処理を行ったヤトロファの光合成速度を比較すると，無潅水区は日の出とともに気孔を開き光合成を開始するものの，午前 9 時以降は急速に気孔を閉じ，ガス交換速度は低下する(図 1-9)．一方，潅水区では光合成速度は高く，また午前 9 時の低下も緩やかであった．沖縄など亜熱帯地域における光合成速度の日変化は正午頃最大値に達し，午後，徐々に低下する．この，ボツワナにおける光合成速度の低下には葉面飽差の著しい増大が影響を及ぼしていた．DAR 圃場のヤトロファの気孔は葉面飽差が 2kPa 以上で急激に閉鎖させることが明らかとなった(図 1-10)．潅水すると気孔コンダクタ

ンスと光合成速度は増加するものの，葉面飽差 2kPa 以上でみられる気孔コンダクタンスの低下は潅水の有無にかかわらず認められた．葉面飽差が 8kPa にも達する極乾燥条件において，この気孔閉鎖は光合成よりも体内水分の維持を優先させた結果と考えられ，気孔を閉じ光合成ができない状態にあっても，過剰な光エネルギーを熱として消散させることで強光ストレスを回避していると考えられ，ボツワナの極乾燥環境に適応した植物と考えられる．

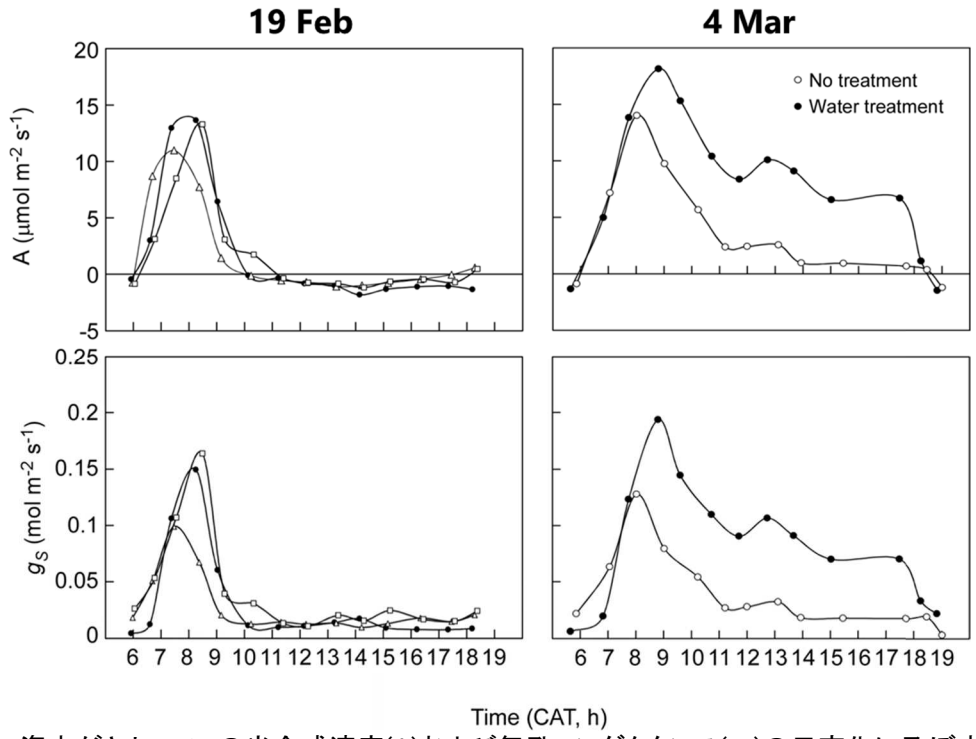


図 1-9　潅水がヤトロファの光合成速度(A)および気孔コンダクタンス(gs)の日変化に及ぼす影響.

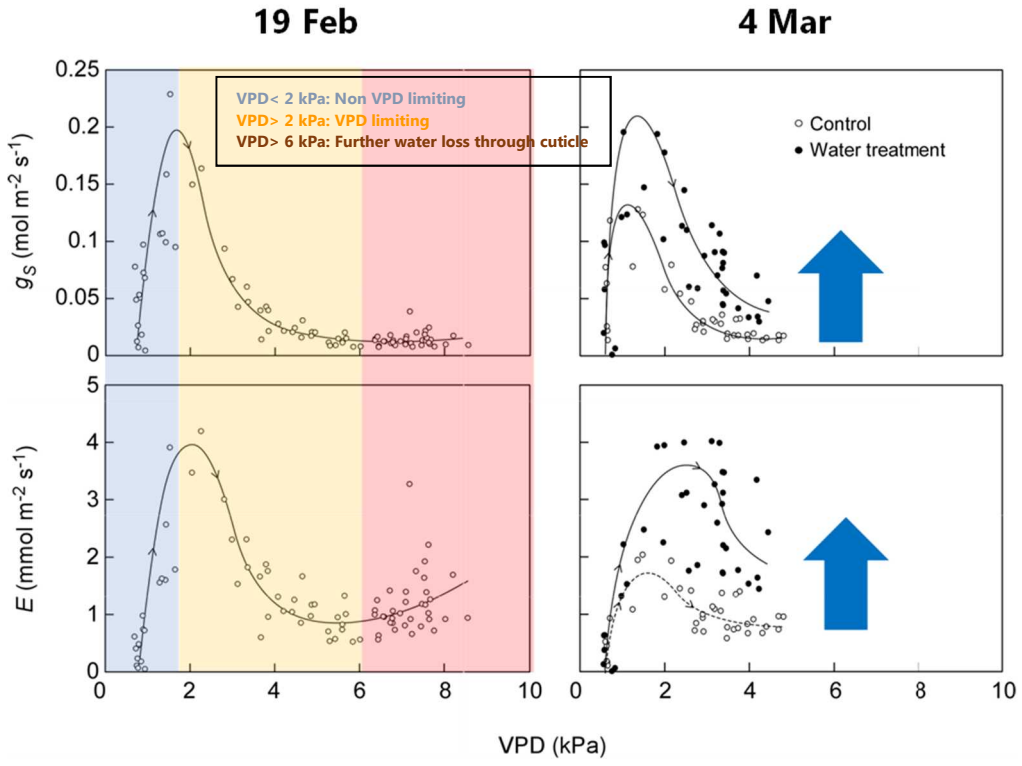


図 1-10　葉面飽差(VPD)と気孔コンダクタンス(gs)，蒸散速度(E)の関係.
○，●はそれぞれ無潅水，潅水を示す.

潅水は苗の生存率にも効果が認められた．定植後 2 年目のヤトロファ苗の枯死率は潅水区では 5.6%であるのに対し，無潅水区では 75%に達し，降水量の年変動が著しいボツワナにおいて無潅水での栽培は生育初期に枯死する可能性が高く非常に困難であると考えられる．また，6～7 月は気温が低く，新葉の展開や花芽分化が停止するため潅水は不要であるが，8 月下旬ごろから気温の上昇と共に萌芽を開始するものの，8 月下旬から 10 月下旬までは降雨が少ない期間が続くため，潅水を行う事で萌芽と新梢の伸長が促進される(図 1-11).

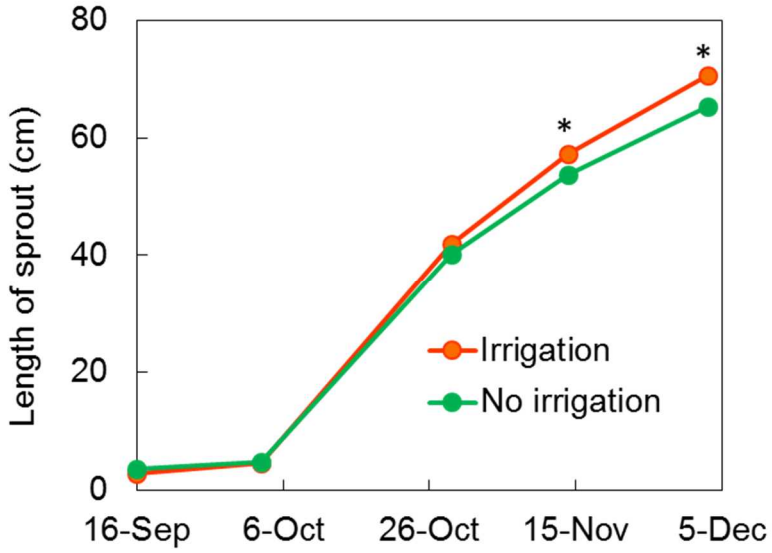


図 1-11　ヤトロファの新梢伸長におよぼす潅水の効果.
＊:2 群間に 5%水準で有意差あり(T-test).

寒波は乾期の 6～8 月に襲来し，早朝の最低気温が氷点下 5℃に達する事がある（図 1-1）．ヤトロファは寒波の頻度や最低温度に応じて下位葉の落下，上位葉の落下，頂芽の枯死，枝と幹の枯死と段階的な被害を受けるが，頂芽の枯死が始まる 0℃以下が寒波の指標となる(図 1-2)．気温が上昇する 8 月下旬以降，新葉の展開や花芽分化が起こる頂芽の枯死は花芽分化の遅延，ひいては収穫開始の遅延に繋がり，低収の原因となる．日本では凍霜害対策として煤煙や送風，散水が利用されるが，いずれも安全性や電力，水資源に乏しいボツワナでは困難であるため，遮光ネットを用いた直接被覆を試みた．被覆による低温害軽減効果は枝被害度と乾期後の果実および種子収量の 2 つの観点で見ると，低温害を受けた枝の本数と被害の大きさはどちらも被覆により低下し(図 1-12)，無被害の枝で着花が順調に行われた結果，株あたり種子収量の増加が認められた(表 1-1).

ボツワナの降雹は 11 月に発生し，新葉や頂芽，花芽，果実へ被害を与える．発生が不規則であり，全く被害を受けない年もあるが，被害が雹との衝突という物理的なものであるため軽減は困難であるが，被覆は有効である．また被害発生後の回復を促進する方法として葉面散布による施肥があげられる．施肥は萌芽と再成長の促進のために 8 月下旬と花房と果実の充実のために 11～12 月の 2 度行っているが，降雹害が発生した場合，速やかに尿素を主とする葉面散布を行う事で樹体の回復と種子収量の増加が見込める(表 1-1).

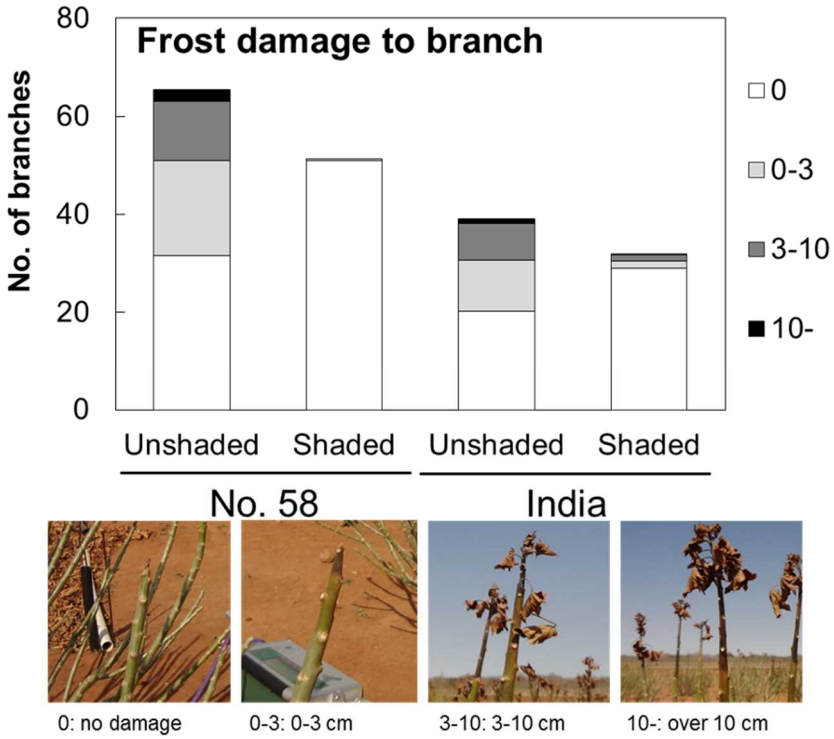


図 1-12　枝先端における段階別低温害の発生に対する被覆の効果.

表 1-1　被覆および液肥の施肥が種子収量および収量構成要素におよぼす影響.

Accession	Treatment	No. of sample	Harvested tree ratio (%)	Fruit yield (no. tree^{-1})	No. of seed per fruit (no. tree^{-1})	Seed yield (no. tree^{-1})
58 (Field A)	Control	4	100	15.8	2.33	36.8
	Shade	5	100	37.2	2.40	89.4
MMEWR (Field B)	Control	5	100	39.4	2.37	93.4
	Shade	4	100	130.8	2.52	329.0
	Row cover	4	100	142.8	2.61	373.3
	Liquid fertilizer	6	100	55.7	2.51	139.8
Mix (Field A)	Control	598	71.6	18.6	2.43	45.1
	Shade	68	76.5	32.8	2.51	82.3
	Liquid fertilizer	54	79.6	32.3	2.49	80.6
Ghana (Field B)	Control	353	19.7	4.8	2.70	13.1
	Shade	18	55.6	4.7	2.66	12.5

Shade:トンネル栽培　Row cover:べた掛け栽培　Liquid fertilizer: 尿素の葉面散布

以上，潅水を主とした栽培管理および被覆による降雹と低温害の軽減に加え，着花および種子生産の優良な系統を選ぶことも重要である．詳細は Output 2 に記載するが，系統 71 や MMEWR など優良系統は株あたり種子収量が 200 粒を超えており，MMEWR は被覆と組み合わせることで 370 粒 株$^{-1}$ に達し(表 1-1)，ボツワナにおいてもヤトロファのポテンシャルを引き出すことでさらなる多収が可能である事が示唆された.

④ アウトプット１のカウンターパートへの技術移転の状況

栽培管理全般に関し，C/P への技術移転は済んでいる．栽培試験，光合成測定法，土壌試験においても C/P との技術協力および三相分布測定などの技術移転を行った．電熱式・バッチ式炭化装置の運用開始にあたり，使用法並びに炭化条件が生産物の特性に与える影響に

ついてセミナーを行った．横河気象観測装置，キャンベル気象観測装置の使用方法に関するセミナーを行った．また，本邦研修の際，ボツワナの研究員に対しドローンの活用法に対する講習を実施した。

⑤ アウトプット１の当初計画では想定されていなかった新たな展開

GIS は今後ボツワナにおいてヤトロファプロジェクトを展開していく上で重要なツールとなるが，気象情報・土壌情報と融合することによって，地域生態や群落生体さらには植物生理の分析においても有効であることがわかった。

ヤトロファ生育情報の取得は，人手による測定に頼っていたが，圃場に設置した固定カメラやドローン（無人飛行体）による画像の活用も有効であることを示した。固定カメラの画像によって，樹高と樹冠幅を継続的に測定し，成長曲線が得られることを示した。また，疑似ドローンを用いた圃場画像の取得を行い，樹冠幅の測定に有効であることを示した。ボツワナの研究員に沖縄においてドローンの活用法に対する講習を実施した。この研究員はすでにドローンを入手しており，今後，データ取得と解析が進むと期待している。

2016 年は冬期被害から新しく葉をつけ始める 8～11 月に潅水を実施したことから 12 月までに成長を促進することに成功した．ただ，樹を中心とした点滴灌漑ポイント付近での灌水チューブ側とその反対側での土壌調査を行ったところ，水分は土壌中に不均一に拡散しており，チューブがある側は充分湿っていて根毛も多く生えているがその反対側は乾燥しまたしまった土壌であり，根の発達もあまり見られないという結果だった．点滴灌漑を行うにあたりその設置場所を注意する．

2015 年は寒波が弱く地上部が枯死せず越冬したが，11 月に襲来した 2 度の降雹により葉がほぼ全て落ちる被害を受けた．肥料の葉面散布などにより成長が回復したものの，12～1 月には 42.7℃を超える熱波が襲来し，発達中の花芽および肥大途中の果実が落ちる被害を受けた．高温と強日射により葉の黄化が見られたものの，継続的な潅水により落葉には至らず植物体への被害は限定的にとどめる事が出来た．2016 年 1 月 26～27 日に圃場のコンテナハウスにて盗難事件が発生した．フェンスや扉などが壊された他，電動ドリルや工具などが盗まれた他，通報装置と勘違いされたのか圃場に設置されている気象観測装置の配線も一部切断されていた．研究題目に関わらないが，PJ メンバーの移動が頻繁に起き，それへの補充がない状況は PJ 遂行に当たり大きな問題だと思われる．

アウトプット２（育種）

アウトプット２の目標：

Bases for developing high yield and stress tolerant-jatropha varieties are established.
（多収およびストレス耐性のヤトロファ品種を開発するための基礎が構築される）

客観的な指標 (Objectively-verifiable indicators)、およびその達成状況の要約：

2-1) All available jatropha accessions in Botswana are assessed for yield and stress tolerance.（入手可能なボツワナの全てのヤトロファ系統において、その収量とストレス耐性が評価される）
達成状況：ボツワナ，ハボローネ，セベレ地区 DAR 実験圃場に植栽された 79 系統のバイオマス生産性および種子生産性を調査し，それぞれの形質が高い系統を選抜した．またバイオマスおよび種子生産性を基準に環境ストレス耐性を評価した．

2-2) Database for characterizing molecular markers of all available jatropha accessions in Botswana is developed.（入手可能なボツワナの全てのヤトロファ系統を特徴づける分子マーカーのデータベースが開発される）
達成状況：ボツワナの代表的なヤトロファの 5 系統についてゲノム解析を行いデータベー

ス化を行い、それらの塩基配列多型(SNP)が顕著に高いことを見出した。これらの情報を基に SNP 分子マーカーを開発し、ボツワナの全ての系統の遺伝型を分析し、分子系統樹として分類することに成功した。

2-3) At least three (3) different genes associated with high yield and stress tolerance are introduced into jatropha.（多収とストレス耐性に関与する少なくとも３種の遺伝子がヤトロファに導入される）
達成状況 : ヤトロファへ高効率で遺伝子を導入する技術を開発するために、減圧処理や filter paper 培養等からなる新規な形質転換法を開発した。この手法を用い、乾燥・低温などの環境ストレス下での収量増大に関与する 3 遺伝子を導入した形質転換ヤトロファを作製した。

2-4) Stress tolerance of transgenic jatropha is evaluated.（形質転換ヤトロファのストレス耐性が評価される）
達成状況 : 上記(2-3)で作製した形質転換ヤトロファを用い、環境ストレス耐性評価試験を行い、OtsAB トレハロース生合成遺伝子を導入した形質転換ヤトロファにおいて、低温ストレスに対する耐性が向上したことが示唆された。

アウトプット２の研究成果の詳細

①　アウトプット２の研究のねらい

これまでボツワナでは、インド系統など海外のヤトロファ系統を導入し生産が試みられていた。しかし乾燥と冬季の冷害により十分な生産が得られておらず、これらの環境ストレスに対して耐性を持つヤトロファ品種の開発が望まれていた。一方、ボツワナ国内の調査により、ヤトロファ固有系統が各地に点在していることが報告され、現地環境に適応したヤトロファ遺伝資源として期待されていた。そこでこれらのボツワナ・ヤトロファ固有系統の収集と，生産性およびストレス耐性の評価を通じて、乾燥冷害耐性に優れる系統の育種資源の探索を行うと共に、以降の選抜育種や交配育種を迅速に行うため、DNA 分子マーカーの整備を行う。また，乾燥または低温ストレスに対して優れた耐性を示す野生植物および微生物遺伝子資源を活用して、それらのストレス耐性遺伝子を導入した形質転換ヤトロファを作出し、乾燥冷害ストレス下での生産性を強化したヤトロファ品種を創出する。

②　アウトプット２の研究実施方法

ボツワナ国内のヤトロファ固有系統資源の蒐集・保存およびデータベース化を進めると共に，ハボローネ，セベレ地区，DAR 実験圃場において形質比較試験を行う．

特に，成長特性，乾物生産特性，種子生産性について調査を行い，各系統間の比較と高い生産性を有する有望系統の選抜を行う．またこれらの調査結果は高温や強日射，乾燥など種々のストレス耐性の評価にも繋がる．

次に，ヤトロファ固有系統を分別し育種に役立てるための DNA 分子マーカーを探索するために，収集したヤトロファ固有系統からゲノム DNA を抽出し，次世代シーケンサー等の技法を用いてヤトロファ・ゲノム遺伝子情報を包括的に取得し，集団内の遺伝的多様性についてデータ取得する．さらに RAPD (random amplification of polymorphic DNA), SNP (single nucleotide polymorphism)等の DNA タイピング技術をボツワナ現地に導入し，乾燥冷害下での生産性に寄与する遺伝因子を探索し，系統選抜を効率化するための技術基盤の確立を図る．さらに，アグロバクテリウム法によるヤトロファへの遺伝子導入手法を開発しその効率化を図ると共に，砂漠植物の野生種スイカに由来する根伸長促進遺伝子や、微生物の乾燥・低温耐性遺伝子など，ヤトロファの生産性増強遺伝子の導入を行い，それらの機能評価を行う．

③　アウトプット２の当初の計画（全体計画）に対する成果目標の達成状況とインパクト

2-1）ボツワナ・ヤトロファ系統の収量およびストレス耐性

国内のヤトロファ遺伝資源を包括的に調査するために、ボツワナ農務省研究部が主体となり住民への聞き取り調査と、これらの情報を元にボツワナ固有系統を種子または苗木の形で蒐集した。蒐集は北部から東部地域に多く，一方、最も乾燥の著しい南西部からは得られなかった(図 2-1、非公開)．これらの蒐集系統に関して，採種地点の GPS 情報も記録され，また同地域における利用形態もヒヤリング調査され(表 2-1、非公開)，ヤトロファデータベースを構築した．これら固有系統に加え，JICA 長期専門家赴任後はボツワナ研究者との共同探索により収集された多収系統も含まれる(図 2-2、非公開)．プロジェクトの前半では、これらの系統の中から 86 系統を選び，系統あたり 10 反復で種子繁殖を経て実験圃場に植樹し，また後半では、主だった自生ヤトロファ系統の母木から挿し木繁殖を経て植樹し、ヤトロファ実験圃場において，栽培および形質比較試験を開始した。

実験圃場におけるヤトロファ栽培管理法の確立に関しては，試行錯誤を経て越冬のための栽培管理と花芽分化促進に成功し、その体系化も進められた。栽培プロトコールの作成と並行して、固有ヤトロファ系統群の農業的，植物学的形質についても評価し、多岐にわたる系統間差異差が観察された。

生育調査ならびに乾物生産特性の解析　(2014 年)

2014 年 7,8 月の大寒波後，全ヤトロファ樹は地上部が枯死したため，地上部を切除した．そのため地上部はゼロからの再成長となり，樹勢が揃った後，2014 年 10 月から 2015 年 5 月までの乾物生産性について調査した(図 2-3)．生育調査は樹高，樹冠幅，枝数および枝の太さを各系統から 3 株選び，毎月調査した．その結果，系統間に大きな差が認められた(図 2-4)．また，樹高と枝数は調査期間を通して増加を続けたが，樹冠幅と枝の太さは 10 月から 12 月に増加し，1，2 月には停滞するなど，各項目の増加速度には季節的変化が認められた．これらの成長パラメータが最終的なバイオマス生産にどの様に影響するかを明らかとするために，2015 年 6 月に地上部乾物調査を行った．寒波対策として低温に弱い枝先端を取り除く剪定（80cm 高）を行い，剪定残差を収集し，枝葉に分けて重量を測定した．それらに別途の調査で求めた枝，葉の乾物率を乗じる事で乾物生産量を算出し系統間で比較を行った．生育調査の結果と同様に地上部乾物重は系統間に大きな差が認められた．全系統平均が 444 g 株$^{-1}$ であるのに対し，上位 10 系統は 615～1409 g 株$^{-1}$ と大きく，最大は 3.5 t ha^{-1} のバイオマス収量が得られた(表 2-2)．これら系統は乾燥や強日射等のストレスに晒される試験圃場において，高いバイオマス生産性を発揮できるストレス耐性も備えていると考えられる．また調査時の最大葉面積指数は 2.3 程度と低く，条間，株間共に植物に覆われず地表が露出している箇所が散見されたことから，地上部の乾物生産にはまだ増加の余地があると考えられる．2015 年は地上 80cm 以上のバイオマスを調査対象としたが，2016 年は全地上部を対象に地上 0～80cm，と地上 80cm 以上の 2 層に分けてバイオマスの調査を行った．その結果，地上 80cm 以上のバイオマスは全体の 22.8%で，この結果を 2015 年の系統 1 に当てはめると，バイオマス収量が 3.5 t ha^{-1} の場合，12.0 t ha^{-1} のバイオマスが圃場に蓄積されると推計された．

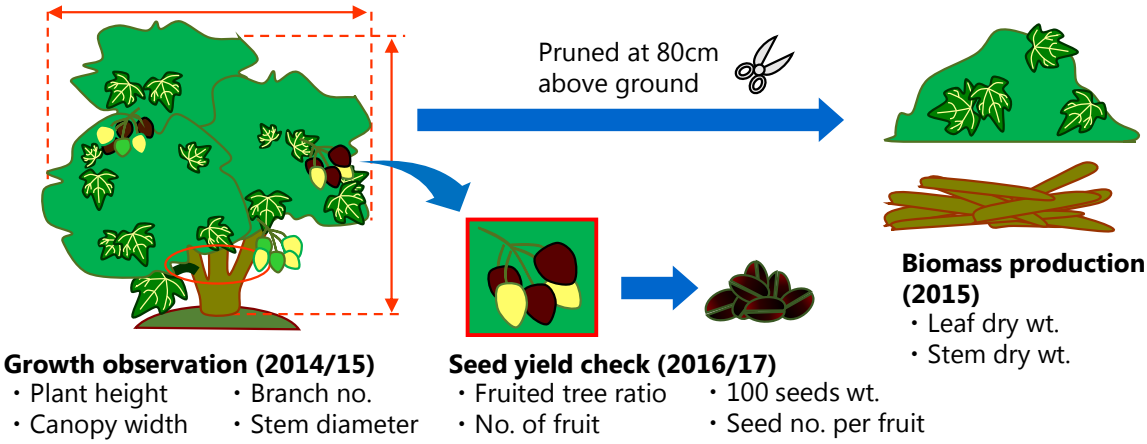


図 2-3　ヤトロファの乾物生産および種子生産性調査の模式図.

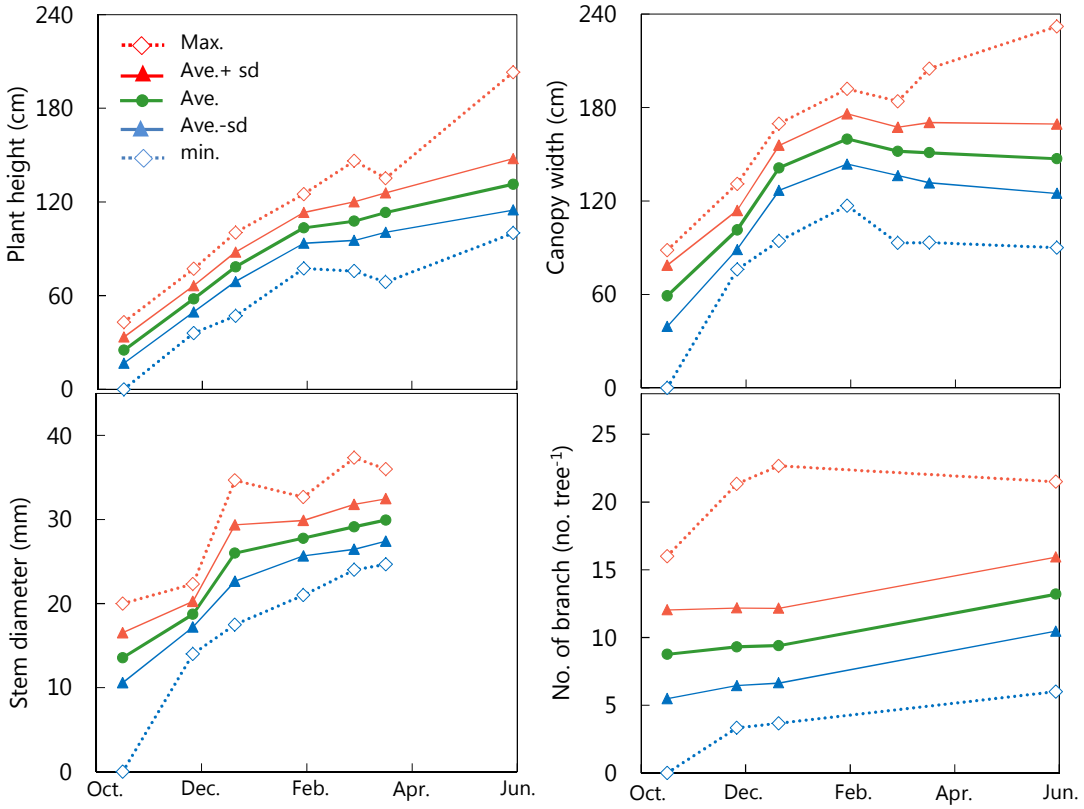


図 2-4　ヤトロファの樹高および樹冠幅，枝数，枝直径の推移.

表 2-2　ヤトロファバイオマス収量の系統間比較.

Accession no.	Plant height (cm)	Canopy width (cm)	Branch no.	Total flesh weight (gFW tree^{-1})	Total dry weight[1)] (gDW tree^{-1})	Biomass yield[2)] (t ha^{-1})	Biomass potential quantity[3)] (t ha^{-1})
1	203	232	21.5	6250	1409	3.52	12.0
2	164	179	14.5	4215	950	2.38	8.1
36	146	189	16.0	3850	874	2.19	7.4
77	146	178	15.5	3555	806	2.01	6.8
15	141	163	12.5	3475	780	1.95	6.6
72	146	189	17.0	3353	762	1.91	6.5
38	150	181	16.0	3263	740	1.85	6.3
67	125	148	17.0	3195	725	1.81	6.1
61	188	163	8.0	3093	692	1.73	5.9
58	138	172	15.5	2703	615	1.54	5.2
Ave. of field A	131	147	13.2	1964	444	1.11	3.8

1)　Total flesh weight に乾物率 22.6%を乗じて算出.

2)　2500 株 ha^{-1} で算出.

3)　80cm 剪定時の収穫率を 22.8%として算出.

着花株率および 1 株あたり花房数の推移と種子収量の解析

ヤトロファは経済的収穫に至るまで最低 3 年を要するが，ボツワナにおいても着花は樹体の充実が進み，2015 年以降に認められた．2015 年 10～11 月では 44.5～45.9%の株に着花が見られたが，11 月下旬の雹，12～1 月には熱波が襲来し，その結果，落花・落果が多発し着花株率は 10%まで落ち込んだ(図 2-5)．4～5 月には樹勢が回復し再度着花が認められたものの，冬季前の収穫には至らなかった．2016 年は厳しい寒波もなく 10～11 月の着花株率は 74.4～75.7%と前年に比べ高く，花(果)房数は株当たり 12.6 と前年の 2.4 を大きく上回った．2016 年 11 月にも降雹害が見られたが，新葉の展開が速やかに行われ，新たに発生した果房と残った果房は収穫可能となった．種子収量はバイオマス収量と同様に系統間に大きな差があり，16 系統で目標収量 80 粒 株$^{-1}$ を達成し，7 系統では収量がゼロであった(図 2-6)．A 圃場の平均収穫株率は 68%，果実あたり種子数は 2.53 個 株$^{-1}$，平均株あたりの果実および種子収量はそれぞれ 26.4，64.7 個 株$^{-1}$ で，上述した 16 系統と比較すると収穫株は 80～100%，果実収量は 34.7～85.5 個 株$^{-1}$ と高く，果実あたり種子数は 2.29～2.71 個 株$^{-1}$ と A 圃場平均よりも低い系統もあった(表 2-3)．果実収量が高い系統 71 と MMEWR の種子収量は 200 粒を超え，ボツワナ在来系統のポテンシャルの高さが示唆された.

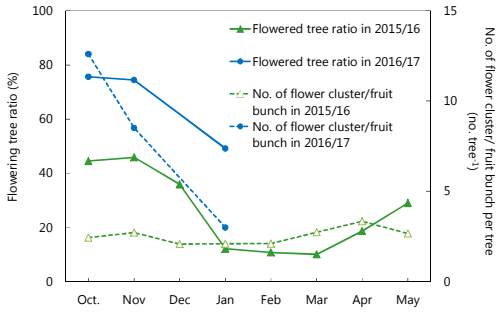


図 2−5　着果株率および株あたり花(果)房数の推移.

表 2−3　高種子収量系統の種子収量と収量構成要素.

Accession no.	Harvested tree ratio (%)	Fruit yield (no. tree^{-1})	No. of seed per fruit (no. tree^{-1})	Seed yield (no. tree^{-1})
71	**100**	79.9	2.53	**201.8**
68	**100**	63.9	2.54	**162.1**
70	**100**	54.2	**2.77**	**150.1**
75	**100**	51.8	2.38	123.1
73	**100**	50.8	2.40	122.1
63	88	52.9	**2.64**	139.3
66	90	50.6	2.52	127.6
61	**100**	40.6	2.58	104.7
65	**100**	40.3	2.50	100.5
10	**100**	39.2	2.50	97.9
Ave. of field A	68	26.4	2.45	64.7
MMEWR	95	85.5	2.53	**216.6**
JKL	80	38.9	2.50	97.3
Ghana	19	5.5	-	-

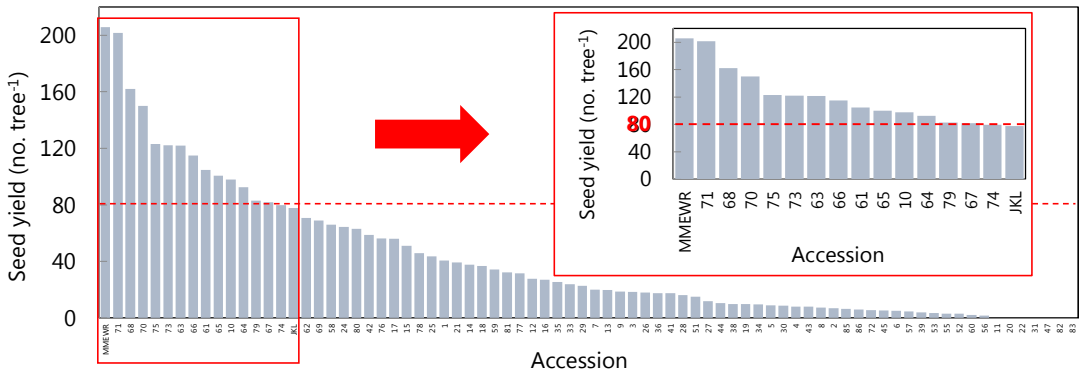


図 2－6　全系統の平均株あたり種子収量.

バイオマスおよび種子生産を基にした系統評価

バイオマス収量および着花株あたり種子収量のデータを平均値と分散で正規化しスコアとして評価を行った．種子スコア 0.6 以上の 21 系統を選出し，それらを種子およびバイオマススコアで分類すると 4 群に分ける事ができた(図 2-7)．MMEWR，系統 63，68，70，71 のバイオマススコアは圃場平均を示す 0 程度であったが，種子スコアは 1.86～3.47 と高い値を示した．一方，系統 1 の種子スコアは 0.65 とやや低いものの，バイオマススコアは最も高い 4.59 であった．系統 24，61，67，79 はバイオマススコア，種子スコアの両方ともが 0.68～1.37 の範囲にあり，最大値ではないものの良好な値を示した．これらの解析からボツワナ在来ヤトロファ系統の種子生産と乾物生産の特徴が明らかとなり，また系統間の差異に富んでいることから，ボツワナ国内の遺伝資源を用いた経済栽培や育種の可能性が示唆された．

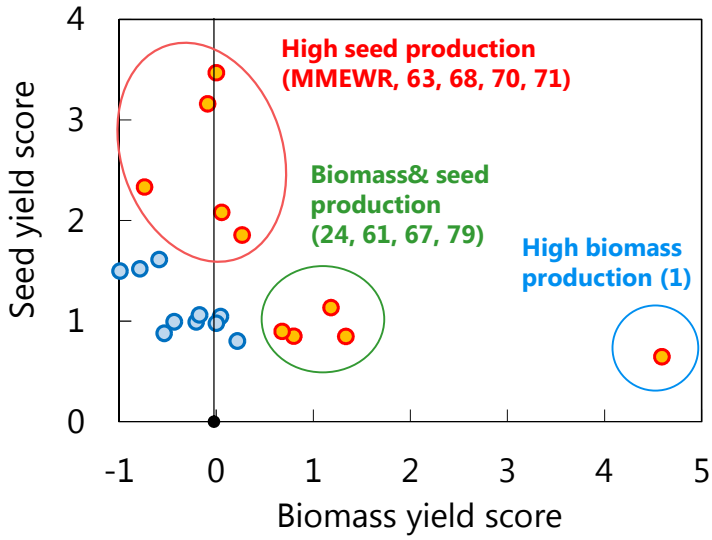


図 2－7　正規化得点を用いた高バイオマスおよび種子収量系統の選抜.

また本研究では、各系統当たり 10 木を用いて形質評価をしているが、これらはボツワナ国内の母木から得られた種子を播種したものであり、下記のゲノム解析(表 2-4)から考察されるように、遺伝的にはヘレロな母木から自家交配を経て分離した次世代集団と考えるのが妥当である。すなわち、同じ系統の中においても、農業的な形質において顕著な差異が生まれ，これらから優良形質を持つヤトロファ個体が生まれる可能性が、理論的に考えられる。この予想と一致して、本研究において、ヤトロファの種子生産量を一樹木の個体ごとに調査

した結果、系統内の個体間での収量における多様性が高いことが観察された。一部のヤトロファ個体においては、年間の種子収量が顕著に高く、最大で一木当たり 739 粒の収量を挙げる個体が存在し、他の複数の個体においても 400-500 粒を超える個体が見られる一方、種子収量が著しく低い個体も見られた(図 2-8)。この結果は、優良木を選抜することが極めて重要であること、また、今後に集団育種を展開することにより、収量のさらなる増大が予想されることを示しており、今後が期待される。

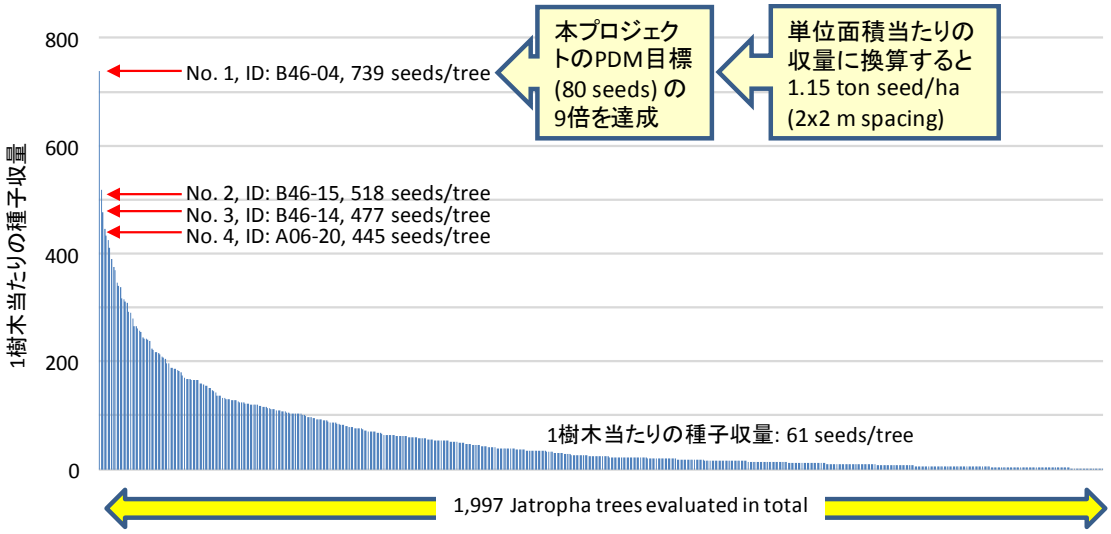


図 2-8.　ボツワナ由来のヤトロファにおける一木当たりの年間種子収量の多様性

また、病虫害に対するヤトロファ系統の感受性を３か年にわたり定量調査した結果、害虫に関しては *S. rufa* (Golden flea beetle), (B) *G. tubiformans* (desert termite), (C) *P. morosalis* (webbing worm)の 3 種が主たる害虫として同定されたが、これら病虫害に対する感受性に対しても、ヤトロファ間で著しい系統間差異が見いだされ、病虫害抵抗性においてヤトロファ固有系統に優劣が存在することが示唆された(図 2-9、非公開)。このように、ボツワナに自生するヤトロファ系統は、地上部のバイオマス生産性、着花特性、病虫害感受性等の形質に多様性が見られ、今後のヤトロファ油脂およびバイオマス生産に有用な優良系統候補として、またさらなる育種の素材として有用な系統が含まれると判断された。これら一連の候補株についてさらに継続して形質を調査する必要があると考えられる.

2-2) ボツワナ・ヤトロファ系統を特徴づける分子マーカーの開発

これらのボツワナ固有系統の遺伝的系統関係を理解し, また選抜・ゲノム育種に資する DNA 分子マーカーを作出するため, また当該技術の技術移転の第一歩として, ヤトロファからのゲノム DNA 調整および技術指導を行った. 従来の典型的な DNA 調整法では現地では高い純度のサンプルが得られなかったため, urea を抽出成分とする改良法を導入し, 現地において高純度の DNA 調整を行う体制を整えた. 次に, RAPD (Random amplification of polymorphic DNA)および SSR (Simple sequence repeat)-PCR 法による系統判別および分子マーカー作出を試みたが、分子多型の検出が非効率であったため, 研究戦略を切り替え, 代表的なヤトロファ固有系統を 5 系統選び,

次世代シーケンサーにより全ゲノム配列の解読を行った．その結果，それぞれの系統にユニークな一塩基多型 (SNP: single nucleotide polymorphism)が、系統ごとにゲノム当たり 71-84 万か所に存在しており(表 2-4、非公開)、ボツワナ固有のヤトロファ系統が、当初の予想より大きい遺伝的多様性を有していることが判明した。

そこで上記の知見を活用して、ヤトロファ系統判別の分子マーカーとして、各染色体あたり3-5箇所、合計 45 か所の SNP 分子マーカーをデザインし、ボツワナ固有ヤトロファの全 86 系統について、簡略 SNP-PCR 法による系統分類を試みた。その結果、35 種の SNP プライマーについて、ヤトロファ系統間の遺伝的多型を安定して検出することに成功し、作成した分子マーカーが有効に機能することが確認され、PDM 指標の 2-3 を達成することができた。またこれらの分子マーカーを用いて、ボツワナ固有系統の遺伝的関係に関する系統樹データを取得することができた(図 2-10)。この結果、ボツワナ固有系統間の遺伝的距離は、その繁殖地の地理的距離とある程度の相関を有することが示唆された。また上述したように、ボツワナ固有ヤトロファ系統間には、開花結実頻度、バイオマス生産性や病虫害感受性に顕著な多様性が観察されていることから、これら形質多様性と遺伝的多様性との相関について現在解析している。これらの相関を解明することは、今回見いだされたヤトロファ優良系統候補の形質をさらに改善する上で、今後重要なカギを握るものと思われる。

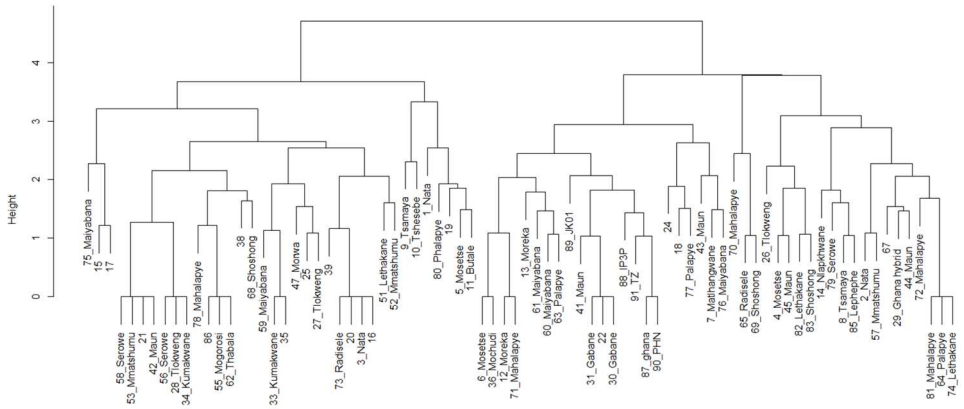


図 2-10. ボツワナのヤトロファ固有系統の分子系統樹

2-3) 多収・ストレス耐性遺伝子を導入した形質転換ヤトロファの作出、および 2-4) 形質転換ヤトロファのストレス耐性評価

上述(2-1)(2-2)のヤトロファ優良系統の選抜は、生産性の高いヤトロファを確立する上で画期的な前進であるが、これに加えて、組換え育種によりヤトロファのストレス耐性を向上させることができれば、悪環境下でのヤトロファ・バイオ燃料の安定生産に資するところが大きい。そこでまず第一に、ヤトロファ遺伝子導入の確立と選抜効率の最適化を行った．従来のヤトロファの形質転換実験では，外来遺伝子の導入効率が 5%程度と低く問題となっていた．そこで，ヤトロファへの遺伝子導入に新規な技術を試行することとし、アグロバクテリアの感染時にヤトロファ組織に減圧処理を施し組織浸潤効率の改善を図ると共に、共存培養時に寒天に代わりろ紙(filter paper)を培地支持体に用いることで、共存培養細胞を一時的な飢餓状態に暴露しアグロバクテリアの過剰増殖を抑制させて形質転換効率を高めることを試みた．その結果，ヤトロファ遺伝子導入及び組換えヤトロファ個体の選抜効率を 23%まで飛躍的に改善することに成功した(図 2-

11)(表 2-5)．また、外来遺伝子の可視化マーカーである GFP 遺伝子は、形質転換体において植物個体のほぼ全身で発現することが示され、また開花個体から自家受粉により得られた T_1 世代においても､外来遺伝子が安定して保持され発現することが確認された(図 2-12)。本技術を発表した学術論文は、米国組織培養学会(The Society for In Vitro Biology)の HP 上において、2015 年第 4 四半期の Journal Highlights として紹介され高評価を受けた(https://www.sivb.org/InVitroReport /issue-49-4-october-december-2015/journal-highlights-2/)．これら一連の技術改善により、ヤトロファの分子育種技術を実用に資するレベルに飛躍的に向上させることができたと判断できた.

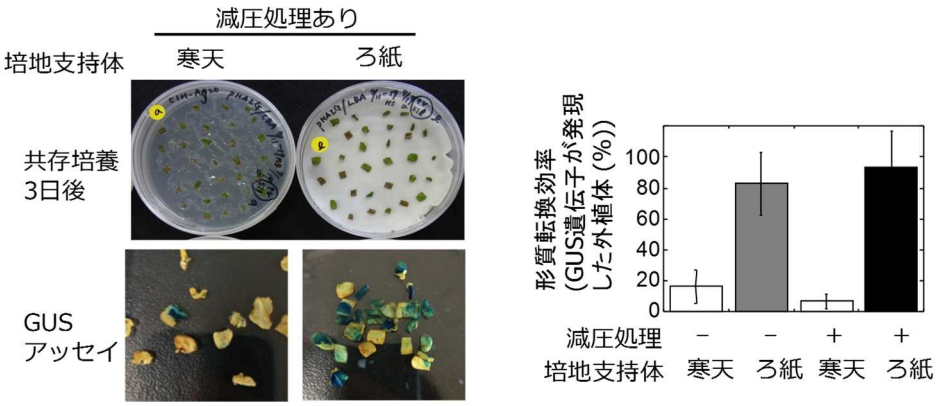


図 2-11. 減圧処理および filter paper 培養による
ヤトロファへの遺伝子導入効率の改善

表 2-5. 減圧処理および Filter paper 法によるヤトロファ形質転換効率の改善

Vacuum treatment	Culture support	Total no. of explants	Total no. of explants with Venus-posi calluses	Total no. shoots	Total no. of PCR-posi shoots	Efficiency (%)[b]
−	Agar	91	17	92	3	3.3
+	Agar	90	17	30	1	1.1
−	Filter paper	89	100	56	12	13.5
+	Filter paper	90	64	69	21	23.3

[a]Total no. of two independence experiments.

[a]Transgenic shoots = number of shoots with a positive PCR result for *Venus*.

[b]Efficiency = (total no. of explants with PCR-posi / No. of explants) × 100%

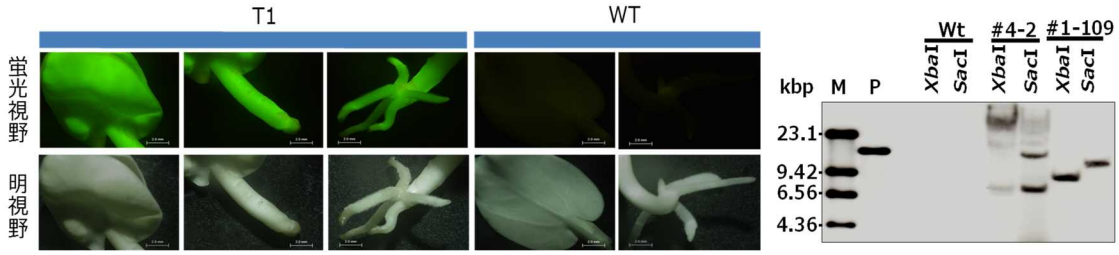


図 2-12. ヤトロファ形質転換体における GFP 可視化マーカーと、ゲノムサザン法による導入遺伝子のゲノム挿入の確認

この遺伝子組換え手法を用いて，ヤトロファにストレス耐性遺伝子として、根伸長遺伝子 CLZFB1，低温耐性遺伝子 OtsAB，細胞保護遺伝子 DHN の 3 遺伝子の導入を行った．CLZFB1 遺伝子は，ボツワナのカラハリ砂漠に自生する野生種スイカから，オミクス技法の 1 つである DNA マイクロアレー解析により探索同定された遺伝子であり，本遺伝子を導入した形質転換シロイヌナズナ，スイカおよびイネにおいて，根の伸長が促進される結果が得られている．また OtsAB 遺伝子は，低温に対する細胞保護能を有する二糖類であるトレハロースを生合成する酵素遺伝子であり，本遺伝子を導入した形質転換シロイヌナズナやイネにおいて、低温耐性が向上した報告がされている．DHN 遺伝子は，構造可塑性に富む防御タンパク質をコードし細胞膜構造を保護する機能を持ち、乾燥や低温などの悪環境に対する耐性を高める効果を持つことが報告されている．これら遺伝子のそれぞれを含むアグロバクテリアをヤトロファ外植片に感染させ，形質転換候補株の選抜を行った．

その結果，これまでに，根伸長遺伝子 CLZFB1 とトレハロース生合成 OtsAB 遺伝子についてはそれぞれ 5 系統，DHN 遺伝子については 3 系統の形質転換植物個体を得た．トレハロース OtsAB 形質転換体のヤトロファ個体(T_0 個体)については、土上げ後の個体から調製したリーフディスクを用いた 4℃低温ストレス暴露実験において、コントロール植物の葉が障害を受け黄化が進行するのに対し、形質転換体の葉では葉緑素を高いレベルで維持し、低温ストレス耐性が向上したことを示す結果が得られた(図 2-13)。また CLZFB1 遺伝子を導入した T_0 個体では、旺盛な根系発達が観察されている。これらの結果は、遺伝子導入によるヤトロファ分子育種が環境ストレス付与に有効であることを示唆する。これらの実験は、日本での実験室内での閉鎖環境において行われたものであり、今後、これらの形質転換系統のストレス耐性やその他の形質を、さらに詳細に試験することが重要であり、そのためには、より自然環境を模した環境下の試験が必要となる。一方、ボツワナ共和国においては、遺伝子組換え生物を用いた実験の取り扱いを定めた国内法が未整備であるため、組換えヤトロファ個体のボツワナへの輸送はプロジェクト期間はなされなかった。この国内法については、現在ボツワナの国会の審議待ちとなっており、今後、実験を行うための環境整備が期待される．

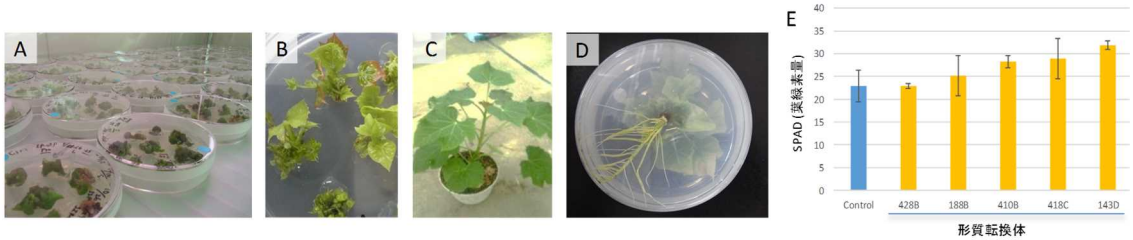


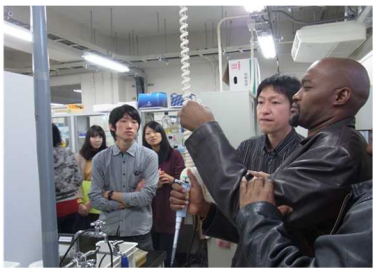
図 2-13. ストレス耐性遺伝子を導入したヤトロファ形質転換体と、そのストレス耐性評価。(A) シュート選抜、(B) 形質転換シュートの形成、(C) トレハロース生合成酵素遺伝子 OtsAB 導入株、(D) CLZFB1 導入株における発根、(E) OtsAB 導入株のリーフディスクによる低温耐性試験、4℃に 1 週間暴露した後に残存した葉内クロロフィル含量を示しており、値が高いほど低温耐性が高いことを示唆する。

④　アウトプット２のカウンターパートへの技術移転の状況

圃場における形質評価に関して，日本側研究者によってボツワナ農務省の研究員または UB の研究員へ伝授され，ボツワナ側研究者の研究論文として投稿準備中の段階である．特に，非破壊方法でヤトロファ樹全体の葉面積を測定する方法は，供与機材の葉面積計が活躍し，実測値と推定値の相関関係の式から算出する方法を生み出している．

ボツワナのヤトロファ自生系統を選別する SNP 等の分子マーカーの開発については、日本側研究者および学生が、ボツワナ農務省の研究員とともにボツワナ現地にて行っているものであり、これらの結果は共同論文投稿に加え、ボツワナ側研究員の修士論文として発表される予定である。これに合わせ，ボツワナ現地において遺伝分析を行うため諸実験環境を整備し，現地のテクニシャンに対して技術指導を行った．その結果，PCR をベースとした諸解析については現地スタッフのみでデータが出せる程度に技術移転が進んでいる．

また，これまで 4 度の日本での研修において，のべ 7 名のボツワナ研究者に対し，組織培養法およびヤトロファ形質転換法について技術指導を行った(図 2-14)．しかし形質転換技術については，上述したように組換え実験の取り扱いを定める国内法が未整備であり，ボツワナ側において未だ専属スタッフが配置されていないため，技術移転の効果は限定的となっている． さらに，次世代シーケンス・プロテオーム解析等オミクス技術指導をボツワナ研修生に対して行っている．前者については実験機材が大変高額であり、ボツワナ側に対応可能な実験機材は存在しないため，今後はサンプル調整をボツワナ側で，分析を日本側と分担するイメージを想定している．



⑤　アウトプット２の当初計画では想定されていなかった新たな展開

上述の遺伝解析については，ボツワナ農務省においてヤトロファ以外の育種研究(マメ科作物や肉牛など)や，野生生物資源の評価研究へ、本研究で日本側から供与した技術を活用する波及効果が見られている．

本共同研究では、これまで多くのボツワナ研究者を日本に招聘し本邦研修を開催してきたが、その参加者の一人で、本研究題目１においてボツワナ固有系統の病虫害感受性の比較分析を担当していたボツワナ農務省の中堅研究者が、プロジェクト半ばに農務省を離任し、ボツワナ大学の教員として抜擢され、新たに微生物学の研究室を主宰することとなった。ボツワナ大学はボツワナの政界に対する影響力が強く、同国の将来を担う主要な高等教育機関である。このように、プロジェクト参画したボツワナ人研究者が要職に転職する例がみられ、短期的にはプロジェクト進捗の遅延をもたらしたが、長期的には、本プロジェクトがボツワナ側での人材育成に大いに貢献していると考える。

アウトプット３（油脂利用）

アウトプット３の目標：

Characteristics of jatropha oil products become clear.（ヤトロファ油脂産物の性質が明らかになる）

客観的な指標 (Objectively-verifiable indicators)、およびその達成状況：

3-1) Database on oil content, composition and calorie of all available jatropha accessions in Botswana is developed. （入手可能な全てのボツワナ由来のヤトロファ系統において、油脂含量、油脂組成および熱量に関するデータベースが開発される）

達成状況：ボツワナ固有ヤトロファ系統のうち収穫に至った 61 系統について、その種子の油脂含量および油脂組成を分析し、また代表的な系統について熱量データを取得し、データベースを構築した。

3-2) Toxic compounds of jatropha seeds, crude oil and biodiesel are analyzed.
（ヤトロファ種子、粗油およびバイオディーゼルの毒性物質が分析される）

達成状況 : 毒性物質のうち、発がん性が報告されまた急性毒性を示すホルボールエステルについて、ボツワナ固有ヤトロファ系統の種子における含量が系統ごとに大きく異なることを明らかにした。また、粗油およびバイオディーゼルに含まれるホルボールエステル含量についても明らかにした。

3-3) Combustion characteristics of jatropha crude oil and biodiesel are established.
（ヤトロファ粗油およびバイオディーゼルの燃焼特性が明らかになる）

達成状況 : ヤトロファ種子より製造した粗油およびバイオディーゼルの熱量、粘性などの燃料規格に関連する基本的な燃料物性を測定し、小型発電機およびエンジン性能試験装置を使用して燃焼特性を明らかにした。小型発電機による無電化村の電化に関するシミュレーションを行った。さらに、バイオディーゼル専用車を使用して実車走行試験を継続している。

3-4) Yield efficiency of jatropha biodiesel is calculated.
（ヤトロファバイオディーゼルの収率が計算される）

達成状況 : 3-1 で求めた種子の油脂含量に対して、搾油率およびエステル化における転換率よりヤトロファバイオディーゼルの収率を求めた。新たな試みとして、ヤトロファ炭および灰をアルカリ触媒として使用して、その可能性と収率を求めた。

アウトプット３の研究成果の詳細

3-1）ボツワナ・ヤトロファ系統の油脂データベース開発

ボツワナ自生のヤトロファ系統の諸性質を理解する一環として、首都ハボローネ近郊の実験農場で収穫された多系統のボツワナ自生系統について、収穫に至った 61 系統のヤトロファの種子の化学組成を分析した。

ヤトロファ種子よりソックスレー抽出法により全油脂を抽出し、単位種子重当たりの油脂含量を測定した。その結果、系統間で油脂含量に顕著な差異が見いだされ、ボツワナ南東部の Mahalapye 由来の系統である 58 番で 45%(w/w)と最も高く、また他の複数の系統でも 40%を超える高油脂含量の系統が見いだされた(図 3-1)。世界各地におけるヤトロファの油脂量は 35%前後であることを考えると、ボツワナで見いだされたこれら高油脂含量のヤトロファ系統は、バイオ燃料生産に好適な形質として期待される。全系統の平均値は約 32%であった。一方、油脂含量が 10-20%と低い系統も見いだされた。多収系統の一つである JKL 系統の油脂含量は約 31%であり、全系統で比較を行うとやや含量が低いが、JKL 系統は一木当たりの一粒当たりの重量が重く、結果として一粒当たりの油脂含有量としては 61 系統中で 10 番目に高くやや上位であることが示された。これらの結果は、バイオ燃料生産に当たり、ヤトロファ品種の選抜が非常に重要であることを示唆している。

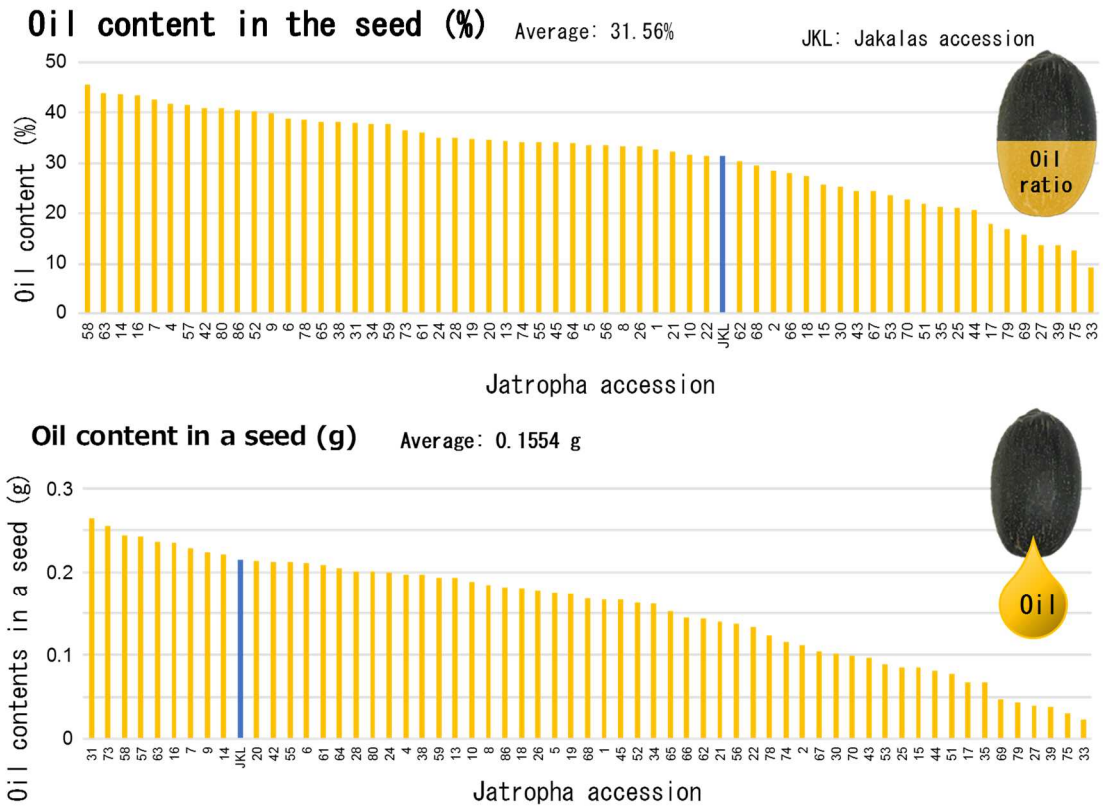


図３－１．ボツワナ由来のヤトロファ系統の種子における単位重量当たりの油脂含量（上）と、一粒当たりの油脂量（下）。参照系統であるJKL系統のデータを青色のバーで示す。

次に、ヤトロファ各系統の種子に含まれる脂肪酸の組成をガスクロマトグラフィーにより解析したところ、組成比についても系統間で多様性が存在することが示された（図３－２）。セタン価が高く融点が低いことからバイオディーゼル燃料の組成として好適なオレイン酸については、その含量に 37.8-61.5%の系統間差異があり、70 番系統において最も高含量であった。一方、多価不飽和脂肪酸のリノール酸については、セタン価が低く抗酸化安定性が低いことから好まれないが、19.8-56.3%の系統間差異が見いだされた。不飽和結合を 3 個持つリノレン酸については、EN14103 などの国際基準においてバイオディーゼルにおけるリノレン酸メチルエステル含量は 12%を上限とすることが定められているが、ボツワナ系統の種子においては 1%以下であり、これら国際基準を十分に満たし得ることが示唆された。興味深いことに、1 番系統や 27 番系統では、リノール酸やリノレン酸などの多価不飽和脂肪酸がほとんど検出されなかった。多価不飽和脂肪酸をほとんど含まない粗油は常温で固化しやすく、取り扱いに難がある。これらの結果は、ボツワナ自生系統がその種子内の油脂組成において多様性を有していることを示唆し、これらのうちいくつかについては育種素材やバイオマス利用源として潜在的価値が高いこと、また目的に合わせて系統を選別することが重要であることを示している。

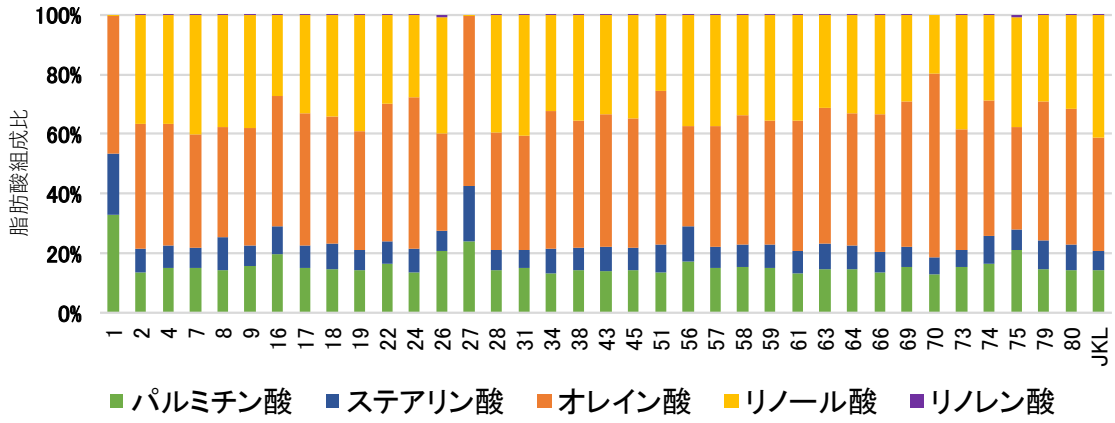


図３－２．ボツワナ由来のヤトロファ系統の種子における脂肪酸組成。

3-2）ヤトロファ種子および油脂の毒性物質

ヤトロファに含まれる主要な毒性物質としてホルボールエステル（PEs）があり、ジテルペン骨格を有し高い疎水性を示す。人間が摂取すると吐き気・下痢・嘔吐などの急性中毒症例を示すほか、発がんプロモーター作用を示すことが報告されている。ボツワナ固有のヤトロファ系統について、種核における PEs を HPLC により測定したところ、少なくとも 4 分子種の PEs が認められ、PEs 総量は 1 g 種子当たり 85.7-537.0 μg の系統間差異が見いだされた(図 3-3)。特に、68 番系統は PEs 含量が低く、ヤトロファ油脂の安全利用および種子搾りかすの多目的利用（家畜飼料等）を図るうえで有利である。これらの結果は、今後の交配育種により優良形質を集積させたヤトロファ品種を選抜することが必要であることを示唆する。

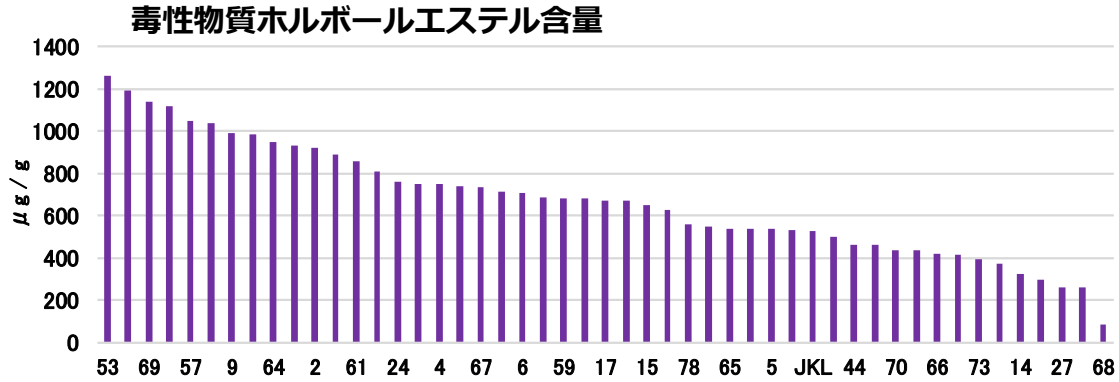


図３－３．ボツワナ由来のヤトロファ系統の種子における毒性物質ホルボールエステル含量。

上記の PEs 含量データは、有機溶媒を用いて化学抽出により PEs を完全抽出したサンプルを用いた結果である。一方、バイオディーゼルの作製に際しては、機械法により種子から搾油し、エステル化や精製工程等を経て、バイオディーゼル燃料を作製する。これらの過程における PEs の消長を理解する一助として、搾油直後の粗油(Crude Jatropha Oil)と、バイオディーゼルに含まれる PEs 量を測定した。その結果、粗油中の PEs 含量は 0.03～0.20(mg/g)で、バイオディーゼル油に含まれる含量は検出できなかった（表３－１）。

バイオディーゼルに含まれる PEs については、完全燃焼すれば排気ガスにおける含量が検出限界以下となることが、他グループの研究により報告されているが、ボツワナでのバイオディーゼル利用における PEs の消長については改めて分析する必要があり、今後の課題である。

No.	Jatropha Curcas crude oil (mg/g)	Jatropha Curcas Cake (mg/g)	Jatropha Curcas Biodiesel (mg/g)	Location	Authors
1	-	0.3281 - 0.9295	-	Thailand	(Punsuvon, Nokkaew, & Karnasuta, 2012)
2	-	0.02 - 0.11 [a]	-		(Nunes, Bezerra, Cone, & Guilhermina, 2011)
3	0.27	-	-	Mexico	(Goel, Makkar, Francis, & Becker, 2007)
4	2.49	-	-	N/A	(Goel et al., 2007)
5	0.13 - 0.24[b]	-	-	Thailand	(Saetae & Suntornsuk, 2010)
6	0.09 - 0.23[c]	-	-	Thailand	(Saetae & Suntornsuk, 2010)
7	2.80[d]	-	-	India	(Pradhan, Naik, Ashhar, Khan, & Sahoo, 2011)
8	2.10[e]	-	-	India	(Pradhan et al., 2011)
9	2.12 ± 0.02	-	Nil	India	(Prasad, Pradhan, Das, & Naik, 2012)
10	-	0.6 ± 0.01	-	India	(Prasad et al., 2012)
11	3.10	-	-	Nicaragua	(Haas & Mittelbach, 2000)
12	**0.03**	-	**Nil**	**Serowe**	
13	**0.26**	-	**Nil**	**Paje**	
14	**0.06**	-	**Nil**	**Mmadinare**	
15	**0.12**	-	**Nil**	**Tsamaya**	

[a] Seed kernel
[b] Whole seed oil
[c] Seed kernel oil
[d] Solvent extracted oil
[e] Expeller oil

表３－１　ヤトロファ粗油およびバイオディーゼル油の PEs 含量

3-3）ヤトロファ粗油およびバイオディーゼルの燃焼特性

ヤトロファ粗油からバイオディーゼルへの変換については、水酸化ナトリウムや水酸化カリウムをアルカリ触媒としてメチルエステル(FAME)を作製し、ボツワナ大学に導入したエンジン性能試験装置および小型発電機を用いて燃焼特性の解明を行った。さらに、小型発電機と小型搾油器機をベースとするバイオディーゼル製造・電力供給システムを開発して無電化村における電力供給シミュレーションを行った。加えて、バイオディーゼルを用いた実車試験を継続している。

a） 基本的な燃料特性・燃料規格（ボツワナ大学）

ボツワナ大学における従来法でのバイオディーゼル変換では、Mmadinare、Paje、Tsamaya の３か所から収集した種子を用いた。これら３か所の種子から粗油を機械法により搾油したところ、その搾油効率は、産地によって 22.2-41.0%の大きな差が見られた。メチルエステル化して調製したバイオディーゼルの燃料特性は次のようになった。

メチルエステル熱量（MJ/kg）：３種のバイオディーゼルにおいて 39.32- 39.61
　化石燃料由来のディーゼル油よりは低いが、バイオディーゼルとしては典型的な値となった。
引火点（flash point：℃）：Mmadinare で 177.3、Paje で 177.5、Tsamaya で 146.5
曇天(cloud point：℃)：0- 1.67
　これもバイオディーゼルとして一般的な値を示した。
粘性（40℃：mm^2/s）：３種類のバイオディーゼルにおいて 2.7-3.2 の値
　ASTM 6751-02 の基準値である 1.9 - 6 mm^2/s の範囲内であった。

これより、ヤトロファからのバイオディーゼルは燃料規格に適合した一般バイオディーゼルと変わらない燃料特性を有している。

b） エンジン性能試験によるバイオディーゼルの燃焼特性（ボツワナ大学）

ボツワナ大学において、ヤトロファバイオディーゼル（B100)、石油ディーゼル 50ppm、石油ディーゼル500ppmをIC(内燃式)ディーゼルエンジン試験装置(TD200:TecQuipment、JICA供与）に供試してエンジン性能特性（比燃料消費量（SFC)、エンジントルク、エンジンブレーキパワー、熱効率、排ガス温度など）を比較検討した。石油ディーゼル50ppmおよび500ppmは、ハボローネ市内の充填ステーションから入手した。バイオディーゼルは、Mmadinare 村から得られたヤトロファ原油を使用しエステル化した。試験されたディーゼル燃料およびバイオディーゼルの物理化学的特性の主要な差異は粘度および発熱値であった。得られた結果は次の通りである（図３－４、非公開)。

○すべての燃料のエンジントルクは、エンジン回転数の上昇に伴って最大値まで増加し、その後、エンジン回転数の増加に伴って低下した。この傾向は３種の燃料とも同じ傾向を示したが、石油ディーゼル 500ppm は他より低く、バイオディーゼルと石油ディーゼル50ppmはほぼ同等の値を示した。
○SFC と熱効率に関して、バイオディーゼルは他の石油ディーゼルとはまったく異なる傾向を示した。 低速では、バイオディーゼルのSFCは高く、最高速度ではSFCは石油ディーゼル燃料よりも低かった。 熱効率に関しては、低速では石油ディーゼルよりも低く、高速では石油ディーゼルよりも高い値を示した。
○すべての燃料のエンジンパワーはエンジン回転数に係わらずほぼ同等であった。
○排ガス温度に関しては、バイオディーゼルはディーゼル50ppmとほぼ同じで、石油ディーゼル500ppmは高い値を示した。

この結果、ヤトロファバイオディーゼルは石油ディーゼルと同等のエンジン性能を発揮することがわかった。

c） 農村部での利用を目的とした小型発電機への使用における燃焼特性（ボツワナ大学）

無電化村もしくは主要施設のみに電力が供給されている地域に、バイオディーゼルで発電して電力を供給するシミュレーションを行った。使用した小型発電機は粗油（SVO）にも対応できる発電能力 2.8 kVA の発電機である。バイオディーゼルの製造能力不足やエンジン出力の関係で、B100 （バイオディーゼルのみ）ではなく、石油ディーゼルとの混合油を使用し、石油ディーゼルと同等の発電能力を発揮する混合率を検討した。その結果、B30（バイオディーゼル 30%混合）では、石油ディーゼルと出力が同等であることがわかった（図３－５、非公開)。B40 になると 2kW まで低下したので、B30 が適正混合率であると判断した。

d） 農村部でのヤトロファバイオディーゼルの利用（ボツワナ大学）

これらのデータに基づいて、Mmadinare Village を対象に簡単なシミュレーションを行った。この村ではヤトロファの大木４本から50kgの種子を採集した実績がある。図３－５に示した可変速度電気駆動搾油機（オイルエキスペラ）は、種子40kg/時（オイル12L/時）の搾油能力をもっている。種子油の収量を30%とすると、種子1kgより原油0.3Lを産出できる。種子50kgを単位とするとバイオディーゼル15L（原油とほぼ同じ）となる。B30を使用する場合は、石油ディーゼル35Lを混合してB30 50Lを得る。この発電機のエンジン

の燃料消費量は 0.723L/h であるので、68.3 時間稼働でき、発電量は 170.75 kWh となる。これは、4W の省電力電球なら 623 個使用できる電力である。1 日の電力使用時間を 4 時間とすれば、1 週間では 20.34L（0.623L/h×4h/d×7d）の B30 を消費する。年間 365 日の利用を想定すれば

0.723h×4h×365d= 1055.58L/y (B3)

= 316.67L（バイオディーゼル）+ 738.91L (石油ディーゼル)

となる。

316.67L のバイオディーゼル製造には、50kg 入りヤトロファ種子 21 袋が必要であるので、ヤトロファの大木が 84 本あれば、小型発電機の周年稼働が可能になる。

このシミュレーションに基づいて、ボツワナ大学 Output-3 チームは Mmadinare Village はじめ、いくつかの村で普及活動を行う事業（図３－６）を計画し、日本側にも協力を求めている。

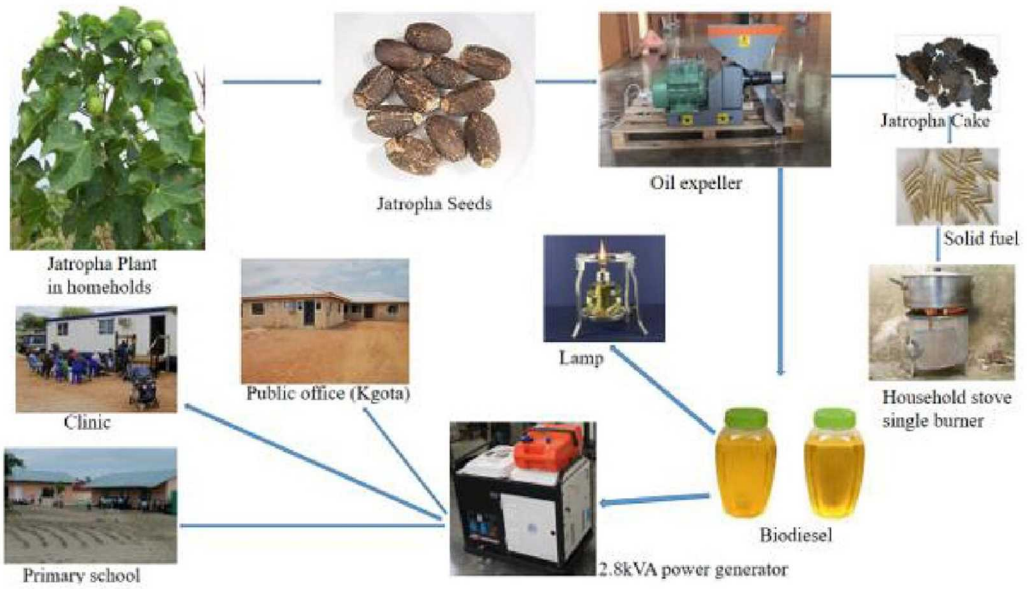
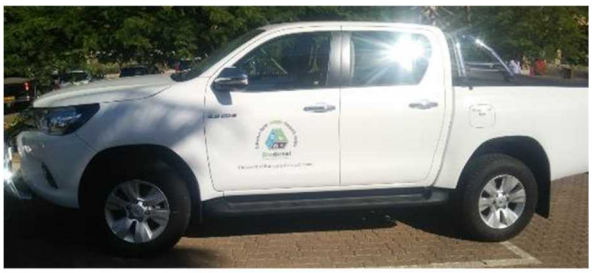


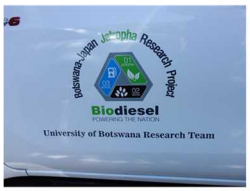
図３－６　Mmadinare Village におけるヤトロファバイオディーゼル利用計画

デモンストレーションの期間中、受益者は研究チームの監督の下でプロセスを自ら実行する仕組みを採用する。手動の搾油器と、電力の使用を必要としない単純なバイオディーゼル製造法をセットアップして、搾油およびバイオディーゼル変換方法を体験して習得させる方法を開発・実証する予定である。デモンストレーションでは B100 を搭載した 2.8 kVA の発電機を運用する。

e） ヤトロファバイオディーゼルを利用した実車走行試験（ボツワナ大学）

研究プロジェクトは 2017 年 3 月に終了する予定であるが、2016 年 12 月に実車によるオンロード試験を開始した（図３－７）。バイオディーゼルの調達が現段階では難しいことから、2017 年 3 月までの試験完了は難しい。この部分は長期的な研究であり、適切な分析を行うのに十分なデータを得て、普及における課題を探るために研究チームは 2017 年 3 月以降も引き続きを継続する予定である。2017 年 3 月時点でトラブルは発生していない。





搾油機、発電機などデモ用機器を積載

図３－７　実車によるオンロード走行試験

3-4）ヤトロファバイオディーゼルの収率

従来法を用いたバイオディーゼルの収率を求めた。加えて、ヤトロファ炭および灰を触媒として、メタノールの代わりにエタノールを用いてエチルエステル（FAEE）を作製する新法を用いてバイオディーゼルを作製し収率などの評価を行った。これはは、劇薬物質を用いずにバイオディーゼルを作製することを主眼として、主に農村部での安全なエネルギー自給の可能性を検討した。

a） 一般的な FAME（遊離脂肪酸メチルエステル）

種子の油脂含量は指標 3-1 に示し、指標 3-3 に搾油収率を示した。メタノールとアルカリ触媒 KOH を使用した場合、収率は 90%以上となった。ヤトロファバイオディーゼル(B100)の総エステル含量は 98.00%（ヨーロッパ規格；96.00%）となった。B10 では石油ディーゼルの炭化水素含量が増えるので 62.50%まで低下した（ボツワナ大学)。琉球大学で測定した場合でも同程度の総エステル含量を示した。

b） ヤトロファ炭および灰をアルカリ触媒とした FAME および FAEE（琉球大学）

農村地域で安全にバイオディーゼルを製造・利用するために、入手・貯蔵・廃棄に細心の注意が必要なアルカリ触媒（KOH、NaOH）に代えてヤトロファ炭およびヤトロファ灰を使用する方法を開発した。さらに、劇薬であるメタノールを安全なエタノールに代える方法についても検討を行った。触媒 3 種類とアルコール 2 種類で組み合わせが６通りと多く、ヤトロファ油が入手しにくい状態であったので、試験の一部に市販の植物油を用いた。

ヤトロファ炭の場合、炭化温度を 400℃、600℃、800℃に設定して炭を製造した。ｐＨはそれぞれ 9.2、9.2、9.7 であった。800℃以上ではｐＨは 10 前後と安定した値を示した。これに対してヤトロファ灰（枝）のｐＨは 12 と非常に強いアルカリ性を示した。炭および灰ともにカリウムの含量が高いのが特徴である（表３－２）。

表３－２　ヤトロファ炭中の陽イオンと陰イオンの濃度

Table 1. Cation content of Jatropha char

	mg / g					
	Li^+	Na^+	NH_4^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}
Jatropha char	0.0	7.6	0.3	43	0.1	0.1

Table 2. Anion content of Jatropha char

	mg / g						
	F^-	Cl^-	NO_2^-	Br^-	NO_3^-	PO_4^{3-}	SO_4^{2-}
Jatropha char	0.1	1.8	0.0	0.0	0.0	1.0	0.2

c）ヤトロファ炭とFAME

ヤトロファ炭を用いてFAMEを製造できた（表３－３、図３－８）が、ヤトロファ炭と油の混合・攪拌およびエステル化反応後の濾過に問題が残されている。炭をアルカリ触媒とするにはかなりの量が必要で、その炭がFAMEを強く吸着するために、簡単な分離法では収率は40%程度しか得られなかった。この問題を解決するには1000℃程度の炭化温度で高温炭を得て、アルカリ強度を高めるとともに、効率のよい分離法を検討する必要がある。エステル化によって得られたオイルはバイオディーゼルとしての成分を含有していた（表３－３）。

表３－３　ヤトロファ炭によるFAMEの成分

FAMEs of Jatropha BDF suggested from result of GC-MS analysis. (GCMS-QP2010 PLUS, Column：GC-WAX)

FAME	Similarity(%)
Palmitic acid methyl ester	95
Stearic acid methyl ester	95
Oleic acid methyl ester	96
Linolenic acid methyl ester	96

[Method of FAME from Jatropha oil]

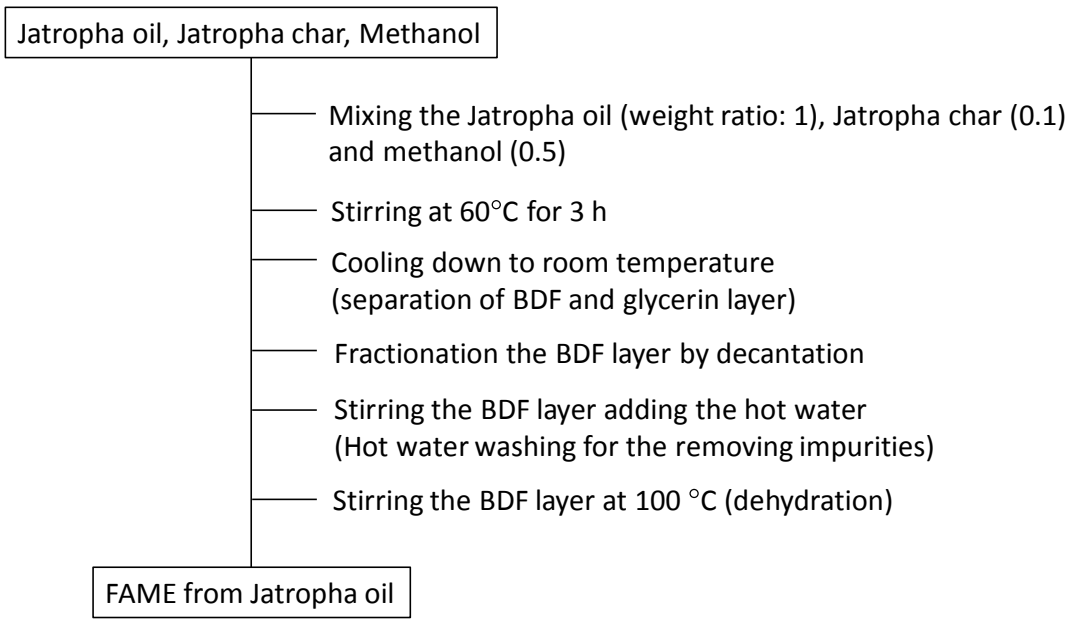


図３－８　ヤトロファ炭から FAME 製造のフロー図

製造したバイオディーゼルの性状分析については、粘性試験に必要なサンプル量を満たすのは、800℃で製造した炭を用いたバイオディーゼル（JBDF800）のみであったため、JBDF800 の粘性試験を現地担当者とともに行った。その結果、40℃における YBDF800 の粘性は 3.72 cst となり、欧州規格（EN14214）および JIS 規格（JIS K2390）である 3.50-5.00 cst の範囲内であった。熱量測定試験は、試験機の付属機器に不備があり、測定は行えなかった。

d) ヤトロファ炭と FAEE

ヤトロファ炭とエタノールを利用した FAEE の製造を行った。そのフロー図を図３－９に示す。

[Method of FAEE from Jatropha oil]

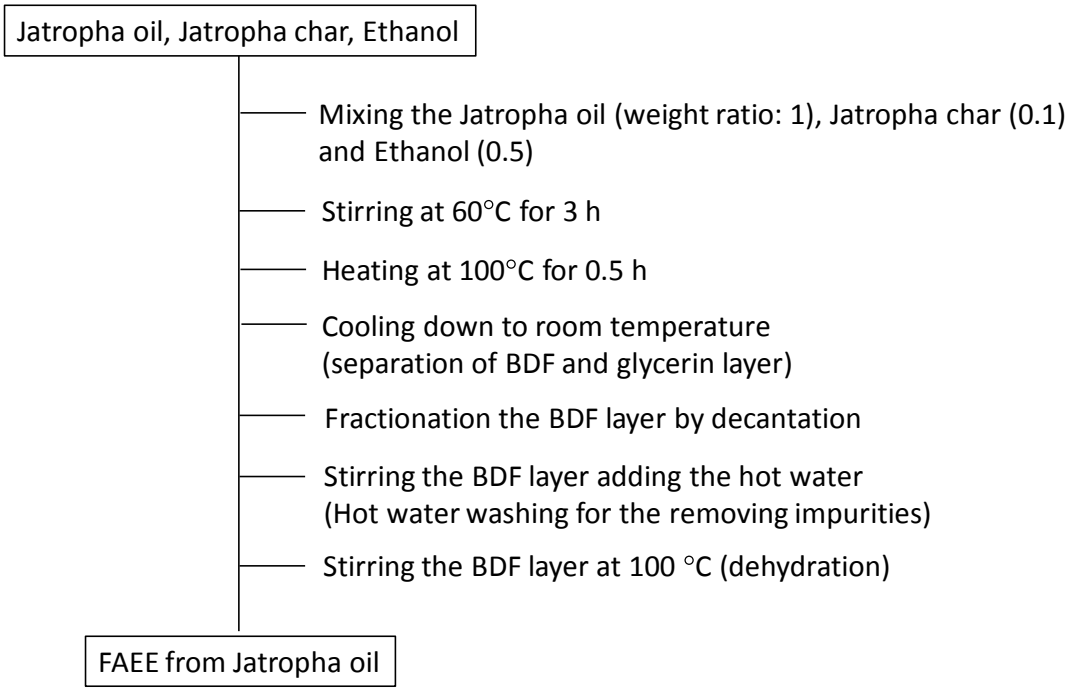


図３－９　ヤトロファ炭から FAEE 製造のフロー図

エタノールを使用してエステル化を行うと、グリセリンが残留エタノールに溶解して FAEE と分離しないことがわかった。そこで、エステル化後に加熱してエタノールを蒸留することによってグリセリンの分離が可能になった（図３－１０）。図３－８と図３－９のフロー図の相違点はこの加熱処理である。

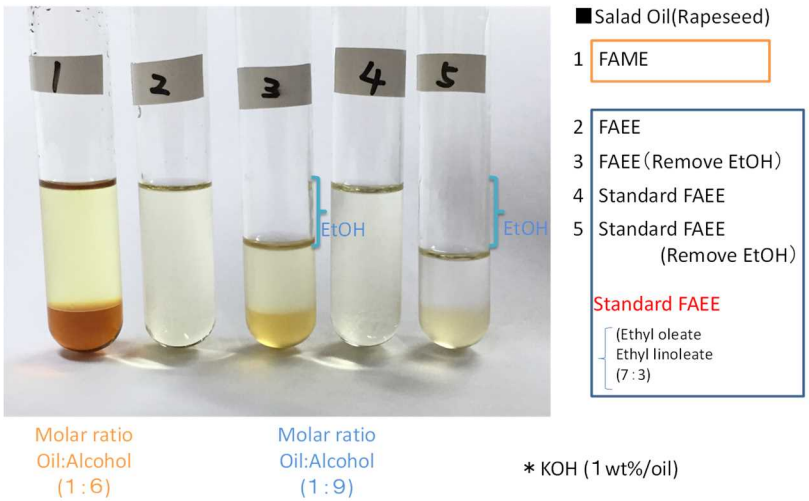


図３－１０　FAME と FAEE のグリセリンの分離
１：FAME、２・３：加熱処理前後の FAEE とグリセリンの分離状況、４・５：FAEE の標品の場合

e) ヤトロファ灰と FAME および FAEE

ヤトロファ炭によるエステル化では収率が低いので、アルカリ強度が高く（pH12)、容積も小さいヤトロファ灰をアルカリ触媒として用いた。その結果、収率は 70%まで改善した。ヤトロファ炭も同様であるが、濾過法の改善によって、より高い収率を目指す必要がある。ヤトロファ灰とヤトロファ炭の必要は１：３程度の比率となった。FAEE についてもエステル化によってバイオディーゼルが得られたが、灰触媒の量についてはさらに検討が必要である。

f) まとめ

一般的に、化学試薬をアルカリ触媒とした場合には、バイオディーゼル収率は 70-90%程度と報告されている。ヤトロファ炭をアルカリ触媒とするバイオディーゼル製造では収率の低さが問題点として挙げられた。炭は体積および表面積が大きいため、エステル化反応時の撹拌効率の悪さと炭へのバイオディーゼルの吸着がその原因である。そこで、琉球大学において、体積および表面積が炭より小さく、アルカリ強度は同程度もしくは高いヤトロファ灰をアルカリ触媒として利用した結果，バイオディーゼルの収率は 70%程度に改善された。GC-MS 分析の結果からパルミチン酸、ステアリン酸、レイン酸そしてリノール酸のメチルエステルが含まれることが示された。

これらの収率はラボにおける手作業による値であるので、製造プロセスを機械化すれば大きく改善できる可能性も期待される。

この結果より、ヤトロファ炭をまず燃料として用い、その後、灰をアルカリ触媒とした方がより効率的であることが確認できた。すなわち、ヤトロファ炭を燃料として使用し、その灰をアルカリ触媒として利用するカスケード利用も考えられる（図３－１１)。さらに、種子を搾油した残渣（ケーキ）を発酵させてバイオエタノールを得ることができれば、ヤトロファのみでバイオディーゼルが得られることになり、農村部でのヤトロファの利用に新たな展望が拓けるものと期待される。

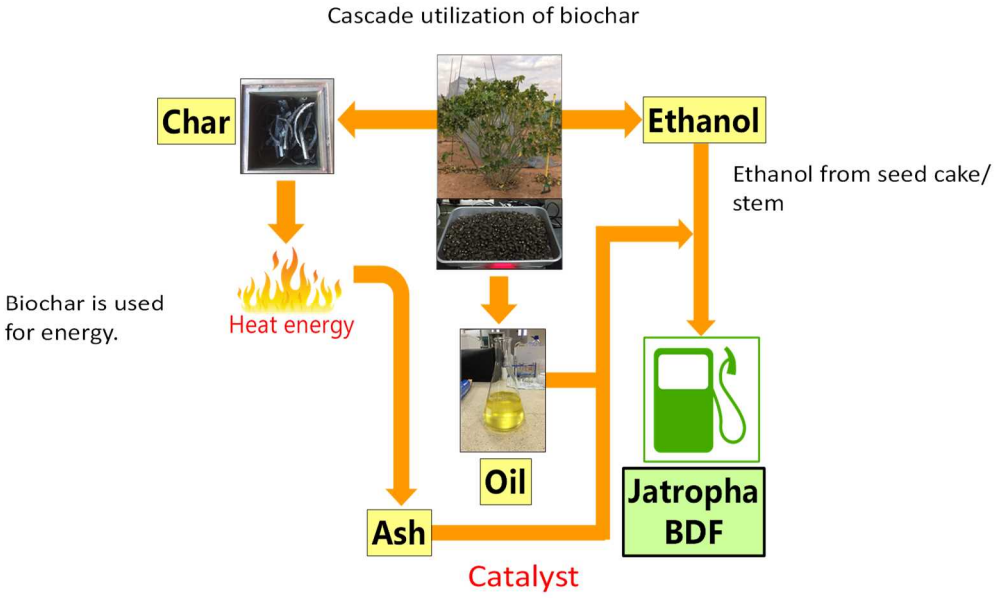


図３－１１　ヤトロファ炭と灰のカスケード利用よるバイオディーゼルの製造

アウトプット４（非油脂の利用）

アウトプット４の目標

Technologies to utilize non-oil jatropha biomass are developed.
(ヤトロファ非油脂バイオマスを利用する技術が開発される。

客観的な指標 (Objectively-verifiable indicators)、およびその達成状況の要約：

4-1) Weight and composition of non-seed biomass and its characteristics for co-product (char) production is analyzed (非油脂バイオマスの収量と組成、及びこれらに由来する産物(バイオ炭)の性質が分析される).
達成状況：ヤトロファの非油脂系バイオマスの収量とその理化学特性を明らかにした。ヤトロファ・バイオマスの各部位をそれぞれ炭化・半炭化し、バイオ炭の化学的性質などを明らかにした。

4-2) Water holding capacity of plot treated with char exceeds that of control plot by 1 %. (バイオ炭を施用した試験区の保水能が、対照区に比べ1%以上高くなる)。
達成状況：ヤトロファのバイオ炭を施用したポット試験および圃場試験を実施し、重量比 2%のバイオ炭施用で圃場容水量が 14%(ボツワナ畑地土壌)～27%(沖縄畑地土壌)増加し、土壌微生物叢の変化、作物の成長および収量への施用効果を明らかにした。

4-3) Water use efficiency of plot treated with char exceeds that of control plot by 0.5 %. (バイオ炭を施用した試験区における水利用効率が、対照区に比べ 0.5%以上高くなる)。
達成状況：4-2 と関連して、ヤトロファおよび野菜の成長あるいは収量から水の利用効率を求めた。ヤトロファ葉炭を主とした固形肥料を施用すると野菜栽培において対照区（圃場土）に比べて大幅に増収し、化学肥料区より高いことを示した。

4-4) At least 4 technologies to utilize non-oil jatropha biomass, for example as soil conditioner and fuel, are evaluated. (ヤトロファ非油脂バイオマスを利用する少なくとも４種の技術、例えば土壌改良剤と燃料、が評価される)。
達成状況：ヤトロファの非油脂バイオマスの利用法としてバイオ炭に限定して、土壌改良材、固形燃料、固形肥料およびバイオディーゼル製造の固体触媒としての用途を開発した。

アウトプット４の研究成果の詳細

① アウトプット４の研究のねらい

ヤトロファの栽培過程では、バイオディーゼル原料としての油脂成分以外に、莫大量の搾油残渣（ケーキ）に加えて葉や剪定枝などのバイオマスが産出される。これらのバイオマスの内、搾油残渣（ケーキ）を肥料または家畜の飼料として利用する方法が試みられている。特に、飼料製造においては発酵などによって毒素成分を減らす方法が研究されている。また、バイオガス発酵の原料としての利用も検討されている。また、搾油したオイルのエステル化で発生するグリセリンは一定価格で取引されている。これらは油脂系バイオマスであるが、非油脂系バイオマスに関してもいくつかの活用法が検討されている。本プロジェクトを構成する琉球大学チームおよび理研チームは、バイオマスの炭化物を長年扱ってきた実績を活かして、非油脂系バイオマスの炭化利用に着目してアウトプット4の研究を行った（図4－1）。図4－2は、ヤトロファの枝、葉、種子、搾油残渣（ケーキ）および果肉（乾燥）と小型炭化装置を用いたそれぞれの炭化物を示す。これらを用いて基本的な物性

を求めた(指標 4-1)。

ボツワナの農地は日本と比較して有機物が 1/10 程度と貧栄養であり、また半乾燥地のために水資源が貴重でその供給・利用における制約は大きい。そこでヤトロファ残渣バイオマスを土壌に施用することで、保水能向上や貧栄養状態を改善し、土壌生態が豊かになることで宿主の遺伝要因のみならず、環境要因からの生産制御が可能となるか調査を行った（指標 4-2 および 4-3)。

このような土壌改良材としての利用も含めて、ヤトロファ炭（バイオ炭）の活用によって付加価値を付ける方法を開発した（指標 4-4)。

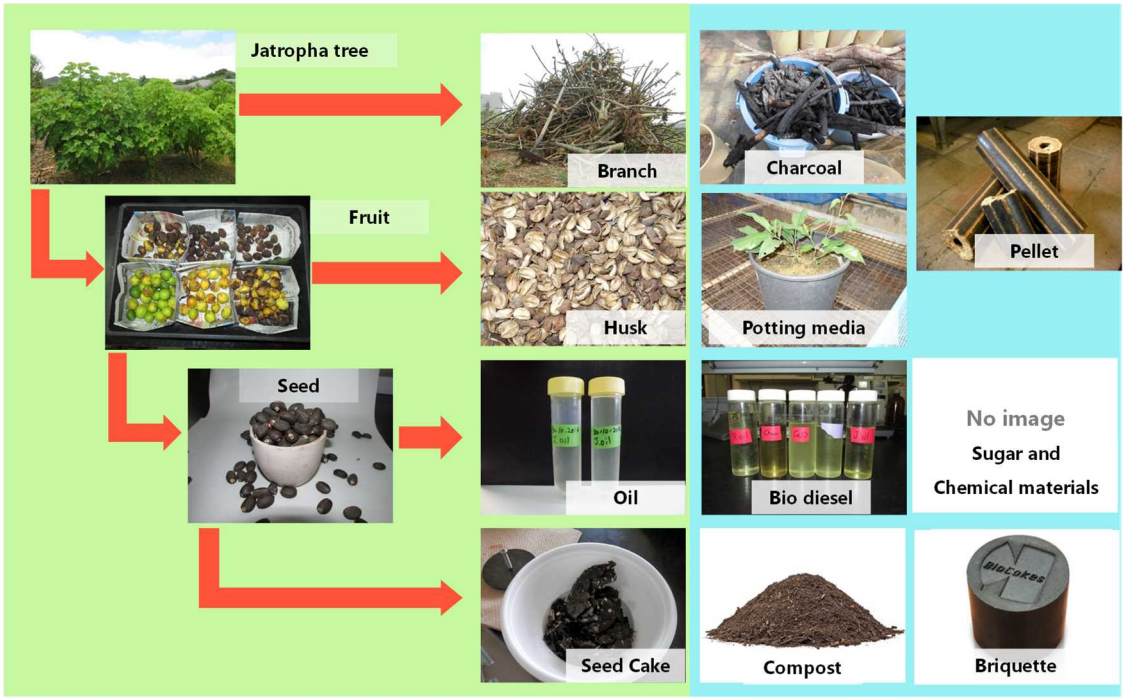


図４－１　バイオ炭を中心としたヤトロファ・バイオマスの利用

図４－２　ヤトロファのバイオマスとその炭化物

② アウトプット４の研究実施方法

バイオマス量の多い剪定枝や、冬季になると落葉して大量に発生するヤトロファ葉を炭化して、その基本特性と土壌改良材を中心とする複数の用途開発を行った。

炭化は、温度設定が可能な実験用小型炭化装置とボツワナでの量産のためにドラム缶などで自作した簡易炭化炉を使用した。研究方法は次の通りである（必要に応じて各活動項目でも述べる）。炭化は、無酸素もしくは低炭素雰囲気でバイオマスを加熱し、熱分解させる熱化学変換プロセスであり、炭化温度によって分解する物質が異なる。このため、残存質量は炭化温度によって変化するが、特に 300℃～400℃付近で、急激に減少して、500℃以上ではほぼ一定の値に収束する（図4－3）。300℃～400℃付近で作られる低温炭はバイオ炭（バイオチャー）または半炭化バイオマス（トレファクション）と呼ばれ、農業利用やエネルギー利用で興味深い性質を発揮する。したがって、炭の用途によって炭化温度を調節して炭化するのが望ましい。バイオ炭は農業分野、トレファクションはエネルギー分野で使用される用語であるが、ここではこだわらずに併用した。

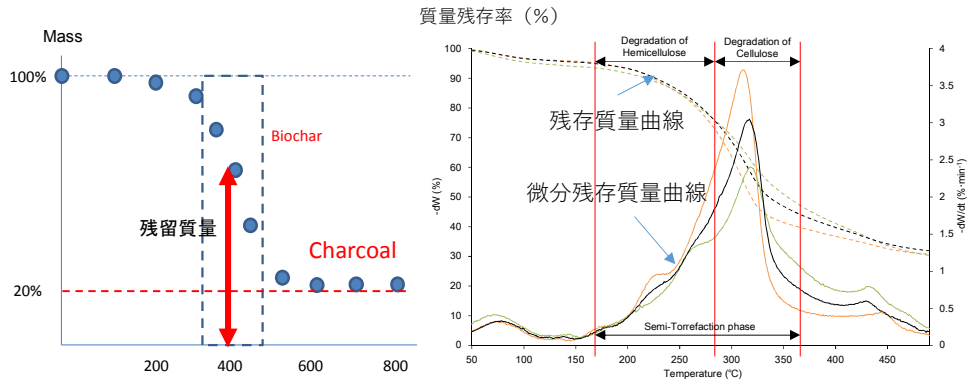


図4－3 炭化温度と質量残存率の概念と実測例

a） バイオ炭の性質（指標 4-1）:

ヤトロファ炭の有効利用を推進するため、本プロジェクトでは 2D-HSQC，2D-HSQC-TOCSY および 2D-HSQC-NOESY 等の NMR 手法を用い、ヤトロファ各組織の物理化学の基本特性について解析を行った。さらに、非油脂系バイオマスおよびそのバイオ炭の熱量などの測定も行った。

b） バイオ炭による保水能、水利用効率の向上（指標 4-2、4-3）:

ヤトロファ・バイオマスの有効利用法として、セルロースを残した半炭化処理に着目した。適度な熱処理温度を選ぶことで、リグノセルロースの高次構造を壊しつつ、セルロース成分を残すことができる。すると、あたかも綿（主成分はセルロース）のように吸水力を持ちつつ、土壌微生物群集の餌ともなるので貧栄養なボツワナ土壌の改良が可能となるのではと着目した。ボツワナ土壌に半炭化バイオマスを添加した際、その土壌の物理化学的特性や、複合微生物叢ならびにヤトロファの生育がどのように影響されるかを、実験室レベルで調査することとした。この目的のためにボツワナ農務省および植物検疫の許可を得てヤトロファ圃場の土壌試料を輸入し、1月の半炭化バイオマス添加で熟成処理を行った。土壌の力学的特性をオートグラフで、水分量および水の運動状態を水分量計と NMR 法の緩和時間から、有機物組成を NMR 代謝プロファイリングで評価した。加えて、ボツワナにおいてバイオ炭の施用を行って、土壌成分の理化学性の変化、ヤトロファおよび野菜の生育に与える影響を調査した。

c） バイオマス（バイオ炭）の活用方法の開発（指標 4-4）:

バイオ炭の活用法として、土壌改良材、固形燃料（グリーン燃料）、固形肥料（グリーン肥料）およびバイオディーゼル製造の触媒とする技術開発を行った。

③ アウトプット４の当初の計画（全体計画）に対する成果目標の達成状況とインパクト

達成状況：活動指標 4-1～4-4 の当初計画はすべて達成した。
インパクト：
ヤトロファのバイオマス活用において、バイオ炭を前面に打ち出した研究は本プロジェクトが初めてである。アウトプット４の成果が普及すれば次のインパクトを発揮する。
◎ヤトロファのバイオディーゼルは単独で採算をとることは現状ではかなり難しいが、バイオマス利用を効果的に組み合わせるとヤトロファの普及に新たな可能性が生じる（アウトプット５）。
◎一部地域を除いて、半乾燥地で水資源に乏しいボツワナでバイオ炭による土壌改良および肥料利用ができれば、食料の安定確保に貢献でき、その意義は極めて大きい。
◎農村部では未だに薪を利用しているが、その一部がバイオ炭等の固形燃料に置き換われば環境保全に大きく貢献できる。一般にバイオ燃料による化石燃料の代替においてバイオマスの「カーボンニュートラル」性は評価されるが、薪や炭（森林を伐採して製造）との代替というバイオマスの種類および利用法による環境影響効果も大きいと考える。
◎ヤトロファからのバイオ炭や炭を触媒とするバイオディーゼル製造は、農村部でエネルギーの地産地消・自産自消システムを確立する際に、安全面と資材確保の面で大きな意義をもっている。
◎2D-HSQC, 2D-HSQC-TOCSY および 2D-HSQC-NOESY 等の NMR 手法を用い、ヤトロファ各組織の物理化学の基本特性の解析手法を確立した。

4-1）非油脂バイオマスの収量・組成およびバイオマス由来産物（バイオ炭）の性質

a） バイオマスの収量・組成
定植後 3 年目のヤトロファの地上部バイオマス賦存量は 3.81 kg tree^{-1}(9.5tDW ha^{-1})、80cm 高さで剪定した際に得られるバイオマス収量は 1.36kg tree^{-1}(3.1tDW ha^{-1})で賦存量の約 35%に相当し、バイオマスとして毎年収穫できることが明らかとなった(図４－４，表４－１)。バイオマス収量の内，枝と葉はそれぞれ 0.76，0.59kg tree^{-1} と葉乾物重が占める割合が高いことが特徴であった(43.8%)。

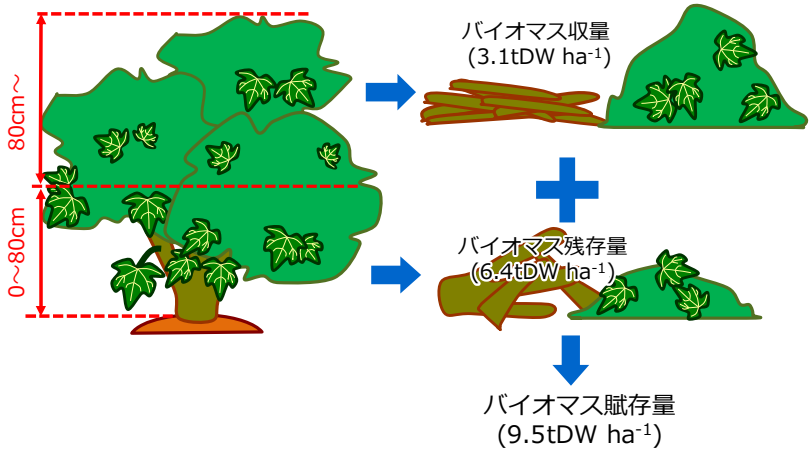


図４－４　ヤトロファのバイオマス収量と賦存量推定の模式図

表４－１　１株当たり葉および枝乾物重とその分配（2016 年 5 月計測）

layer	Dry weight (kg tree^{-1})		
	Leaf	Stem	Total
Upper (80cm~)	0.59	0.76	1.36 (35.6%)
Lower (0~80cm)	0.27	2.18	2.45 (64.8%)

括弧内の数値は全乾物重に占める層別の乾物重を示す.

次に、ヤトロファの栽搾油残渣や剪定枝などの非油脂バイオマスの有効利用を推進するため、本プロジェクトでは 2D-HSQC，2D-HSQC-TOCSY および 2D-HSQC-NOESY 等の NMR 手法を用い、ヤトロファ各組織の物理化学の基本特性について解析を行った。その結果、ヤトロファ各組織はそれぞれ特徴的なリグノセルロース成分を有していることが判明した（図４－４）。本技術は学術論文(Plant Biotechnology 誌)に投稿し受理されており、ヤトロファ・バイオマス組成を包括的に解析する基礎技術として、その後の共同研究において汎用していくことができた。

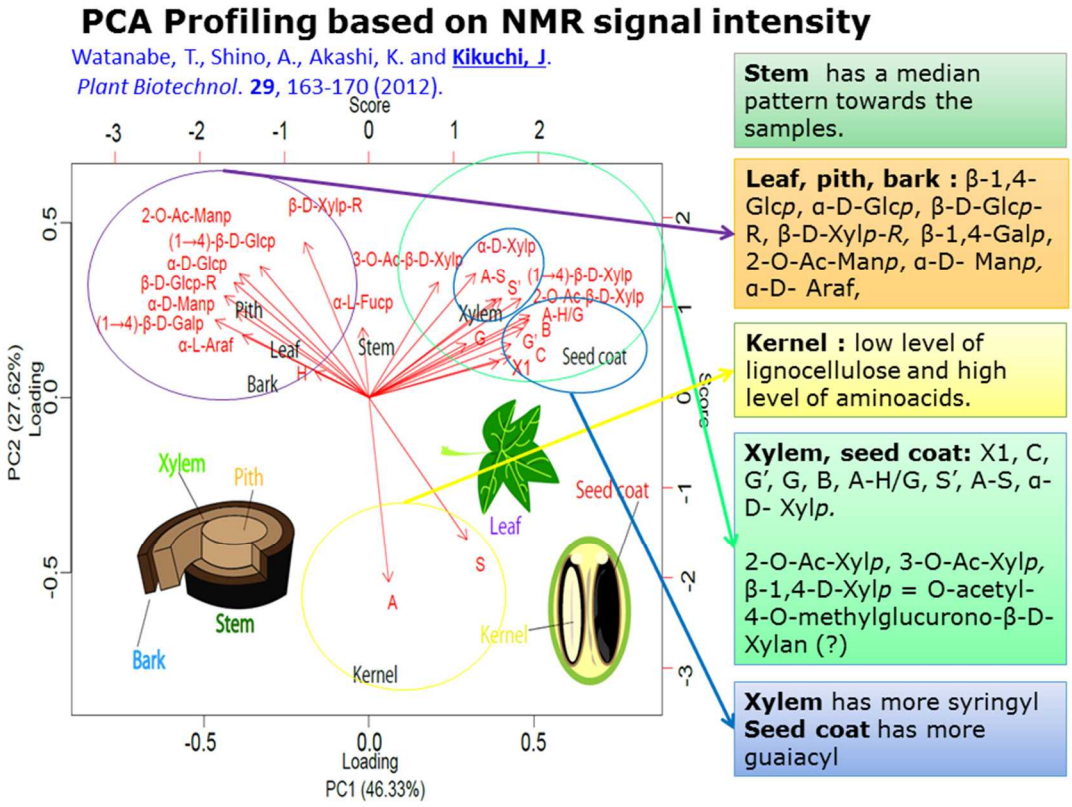


図４－５　ヤトロファ各部位の組成

b）バイオ炭の性質

図４－２に示したヤトロファ各部位を小型炭化装置で炭化して、それぞれの収率と熱量を測定した（図４－６）。比較のために、ソルガムの葉、茎および搾り滓を炭化した。

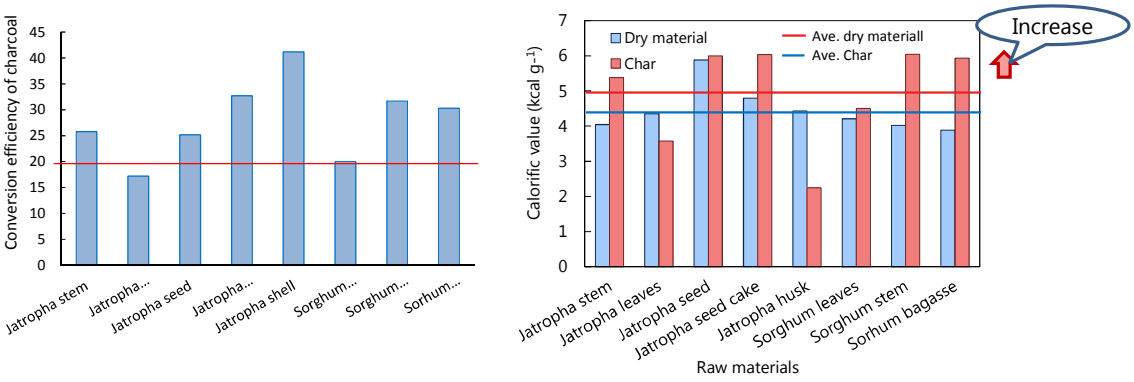


図４－６　ヤトロファ部位の炭化収率（左）および熱量（右）
それぞれ左より、ヤトロファ茎、葉、種子、ケーキ、種皮殻、ソルガム葉、茎、搾り滓を示す。

ヤトロファの茎、葉、種子は収率 20%前後で木炭などの値と類似している。種皮殻はその組成上高い値を示している。また、ここで用いたケーキは種皮殻を含むために高い値となった。茎およびケーキの熱量は炭化によって上昇しているが、葉と種皮殻は減少している。
炭化温度がバイオ炭の収率および化学成分に与える影響を表４－２および４－３に示す。

表４－２　炭化収率に与える炭化温度の影響

Carbonization temp. (oC)	Char yield (%)			
	Jatropha seed cake	Jatropha stem	Jatropha seed husk	Sorghum stem
400	40.1	35.5	38.7	41.1
500	50.7	22.9	36.9	40.3
600	31.5	23.8	34.5	28.4
700	31.8	25.9	24.1	27.9

Char yield (%) = wt. of char / wt. of raw material *100

表４－３　ヤトロファ茎の炭化温度と化学成分

Charbonization temp. (°C)	Ion compornent (mg 100g^{-1})									pH	EC (mS cm^{-1})
	Cl	NO3	**PO_4**	SO_4	Na	NH4	**K**	Mg	Ca		
300	567	--	**1003**	92.7	379	33.4	**2400**	12.8	19.2	8.00	1.59
500	810	14.6	**650**	163	311	24.8	**3568**	7.1	16.1	10.85	2.25
700	991	--	**1144**	82.0	459	28.0	**5465**	--	9.5	10.60	3.15

Raw material is jatropha branch.
Extracted by 50 times weight of extra pure water.

ヤトロファの枝葉に加え、果皮、種子、搾油残差をそれぞれ炭化しその性質を見ると、いずれも高い pH と EC を示した(表４－４)。多量に含まれる元素としては葉、種子、搾油残差炭化物には窒素が多く含まれ、リン酸は種子と搾油残差、カリウムは葉、茎、種皮に多く含まれていた。各バイオ炭中の元素含有量は単一部位では不足があるものの、組合せと比率を

調整することで代替肥料としての利用が可能である。注意する点としてはボツワナの土壌のように有機質に乏しい土壌に施用する際には pH と EC が上昇するので、それらを防ぐために有機物（コンポストなど）との混用が有効と考えられる。葉や果皮の炭化物は、元素含入は高いものの熱量が小さく、燃料として用いるには収量から見ても枝が最も優れている。

表４－４　ヤトロファ部位別炭化物の特徴.

Low material of char	pH	EC	N	P	K	calific value	Bulk density
		mS cm^{-1}	%	mg g^{-1}		kcal g^{-1}	g cm^{-3}
Leaf	10.2	4.3	2.05	10.6	71.9	3.58	-
Stem	10.1	3.6	0.94	11.4	54.7	5.37	0.076
Husk	11.0	14.6	0.75	3.4	140.2	2.25	-
Seed	9.2	0.78	3.57	26.3	41.3	5.99	-
Seed cake	10.5	1.13	4.63	43.0	47.9	6.03	-

4-2, 4-3）バイオ炭による土壌保水性および水利用効率の改善効果

ヤトロファ残渣バイオマスの新たな利用法として、セルロースを残しつつリグノセルロースの高次構造は崩壊させる半炭化処理プロセスを各種高分子分析法で評価した（図４－７）。また、有毒物質として知られるホルボールエステルも僅か 250℃の低温で化学構造を分解させることを見出すことが出来たため、土壌改良剤としての圃場散布から、将来的にセルロースやリグニン資源を利活用するバイオリファイナリー原料とできる可能性を論じた(PLoS One 2014)。

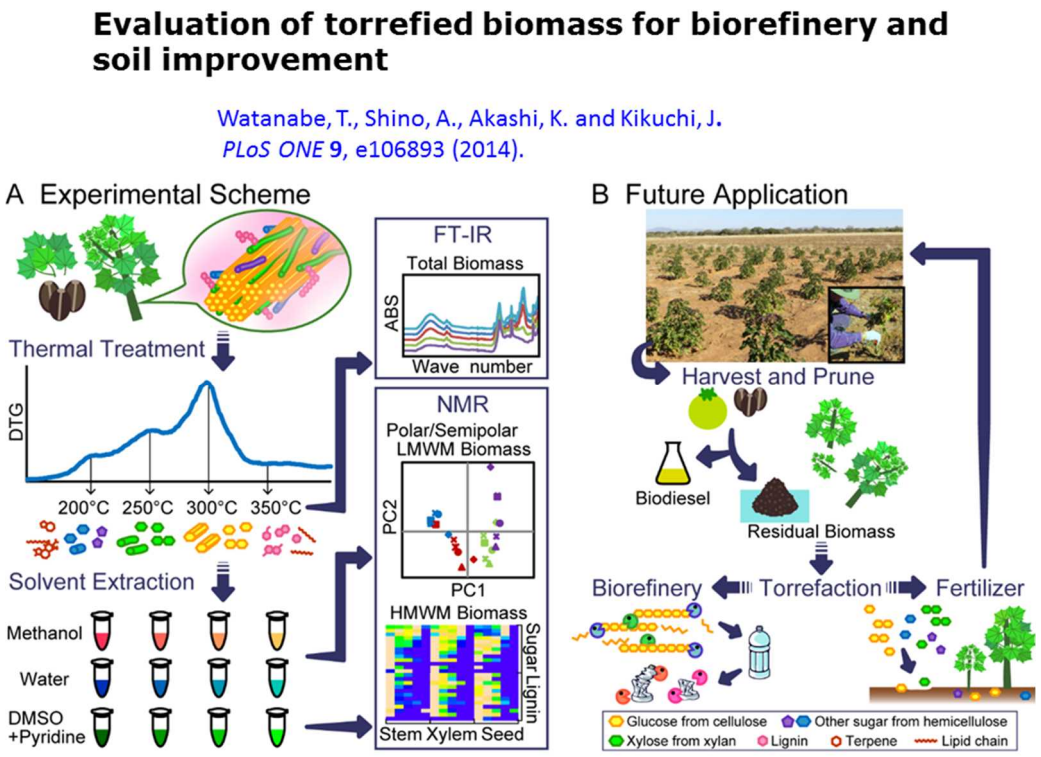


図4－7　バイオリファイナリーのためのバイオ炭および土壌改良効果の評価

この研究の更なる展開として、ボツワナ土壌に半炭化バイオマス（バイオ炭）を添加した際、その土壌の理化学性や、複合微生物叢ならびにヤトロファ生育特性がどのように影響されるかを、実験

室レベルで調査した。この目的のためにボツワナ農務省および植物検疫の許可を得てヤトロファ圃場の土壌試料を輸入し、1月の半炭化バイオマス添加で熟成処理を行った。さらにヤトロファ苗を植えて、コントロール（未添加）区との比較解析を行った。半炭化バイオマスの添加により土壌の物理化学的特性、微生物叢特性が変化し、特に保水性が向上し硬度が低くなる特徴を有していた（図4－8）。対照区とバイオ炭施用 1%、3%、5%の間には、含水率および最大耐圧性に有意差が認められた。土壌の構造安定性の形成を促進し、より高い含水率および保持能力をもたらすとみなし得る。さらに、改良された土壌保水性で土壌の物理的性質を大きく変えることがわかる（図４－９）。

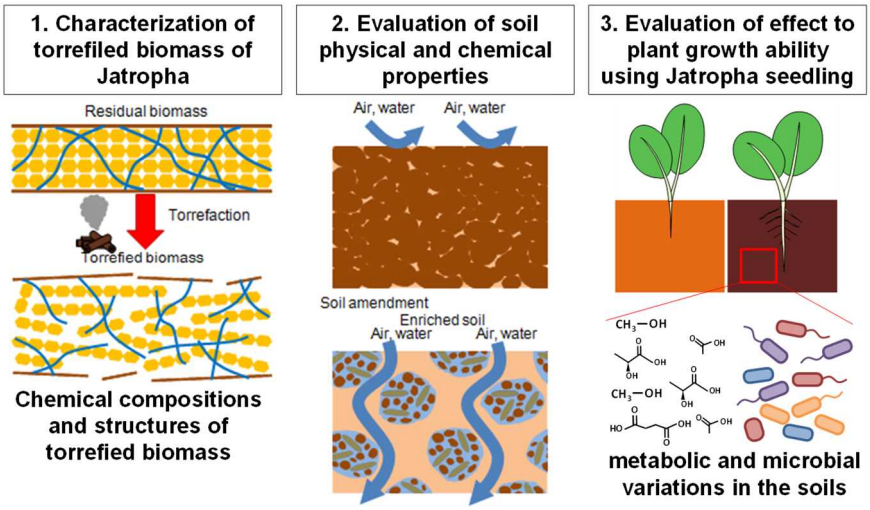


図４－８　バイオ炭施用による土壌物理性と生物叢の改善

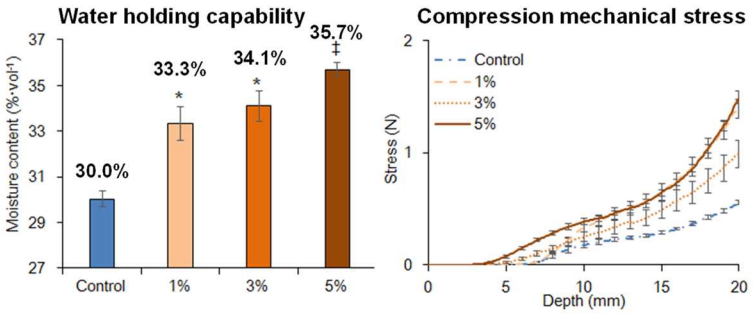


図４－９　バイオ炭施用による土壌の保水能および耐圧性の向上

また、バイオマスの混入が団粒構造形成を促し、好気性が上昇することから土壌微生物叢が変化することで代謝特性にも影響を及ぼし、酢酸や乳酸等の有機酸がより多く産生されることから、土壌 pH の上昇を抑える効果も期待できる（図4－10）。更に、ヤトロファ根毛が発達し茎が太くなる傾向が見られたことから、乾燥化が顕著な問題であるボツワナにおいて、土壌改良の1手法として潜在力があると考え、Scientific Reports 誌に投稿したところ受理させることができた（Sci. Rep. 2016）。

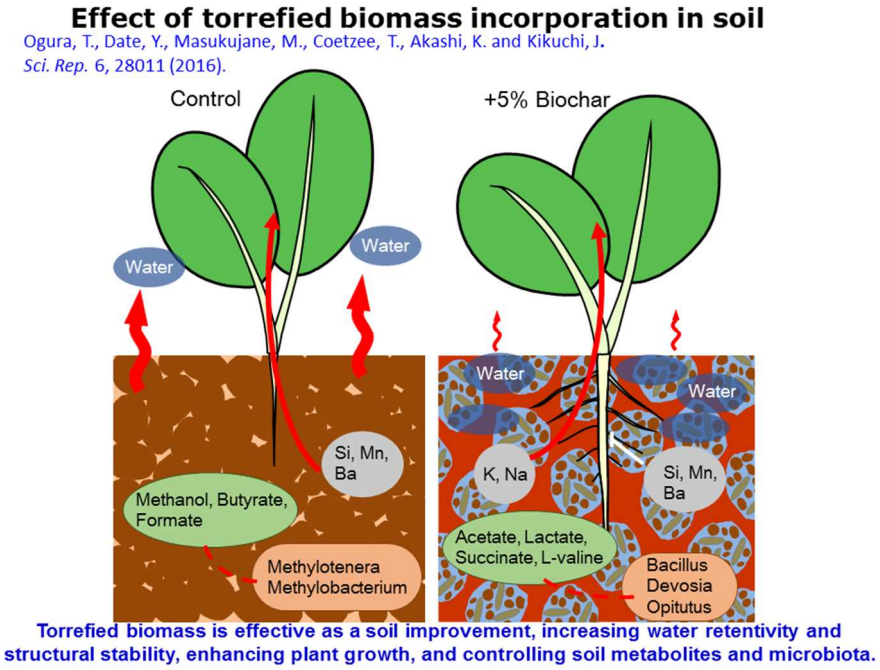


図４－１０　バイオ炭施用による土壌改善と植物成長への影響

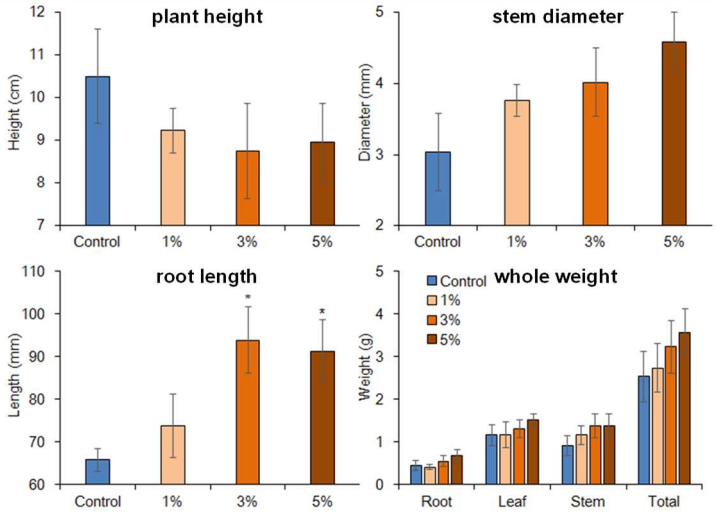


図４－１１　バイオ炭の施用がヤトロファの初期生育に与える影響

バイオ炭の施用がヤトロファの初期生育に与える影響を図４－１０に示す。総乾物量は施用量の増加に伴って増加しており、ヤトロファの生育に大きな効果が見られる。この時のヤトロファの内部成分、すなわち土壌中より吸収した成分を測定した（図４－１２）。K および Na は、対照区よりもバイオ炭による改質土壌で生育したヤトロファの方がより多く吸収している。Na が特異的に増加する傾向が認められた。Si、Mn は変化せず、Ba は減少した。結果は、バイオ炭が K.Thus のような有益な鉱物を提供する能力を有することを示し、土壌改良剤として利用することができることを明らかにした。

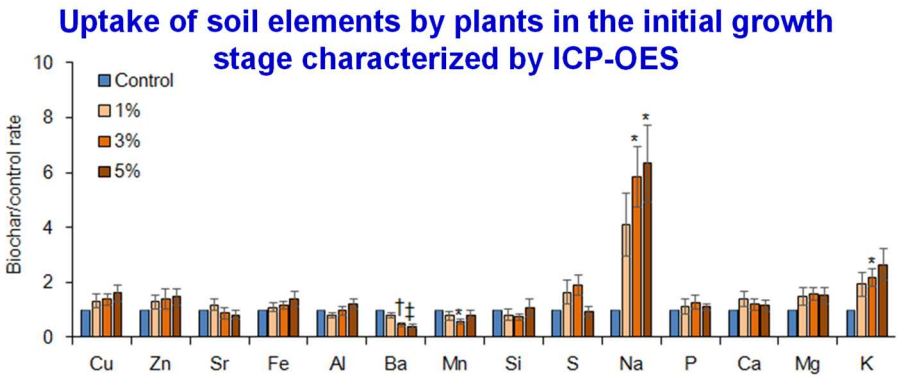


図４－１２　バイオ炭施用土壌からのヤトロファの吸収成分

図４－１３に初期成長時の土壌中の代謝プロファイルを、図４－１４に初期成長時の土壌中の微生物プロファイルを示す。

代謝プロファイルは、対照区土壌とバイオ炭施用土壌の間の相違に基づいて分類された。バイオ炭施用土壌に寄与した主因子は、バリン、乳酸塩、酢酸塩、およびコハク酸塩であった。嫌気性微生物によって生産された有機酸は植物生長促進物質として働くことが知られており、肥料化されたバイオマスは土壌肥沃化効果を有し、植物の成長を促進すると考えられた。

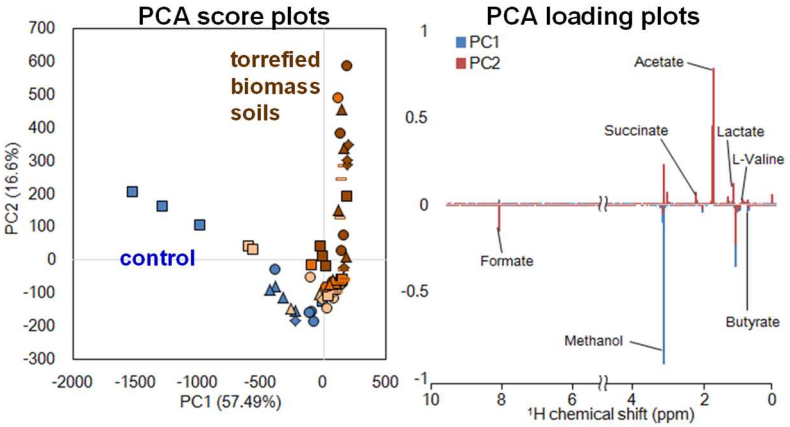


図４－１３　初期成長時の土壌中の代謝プロファイル

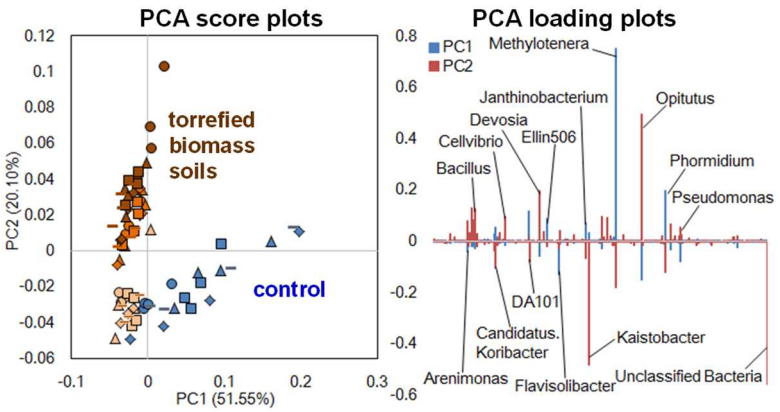


図４－１４　初期成長時の土壌中の微生物プロファイル

主要な微生物は対照区土壌で Methylotenera sp.、バイオ炭施用土壌で Opitutus sp. および Devosia sp.を含むいくつかの微生物が存在する。これらの微生物は、検出された有機酸の代謝に関連すると推測された。したがって、これらの微生物は、バイオ炭施用土壌の環境調整による成長促進の主要な役割を果たすと考えられる。

以上は、ボツワナの土壌とヤトロファを用いて国内で実施した研究である（理研）。次に、ボツワナにおいて、ヤトロファ枝の炭化物を粒径と施用法を変えた実験を実施した。いずれの処理によってもボツワナ畑地土壌の圃場容水量が増加した（第 2 図）。また潅水後の土壌水分の減少も緩やかとなった。

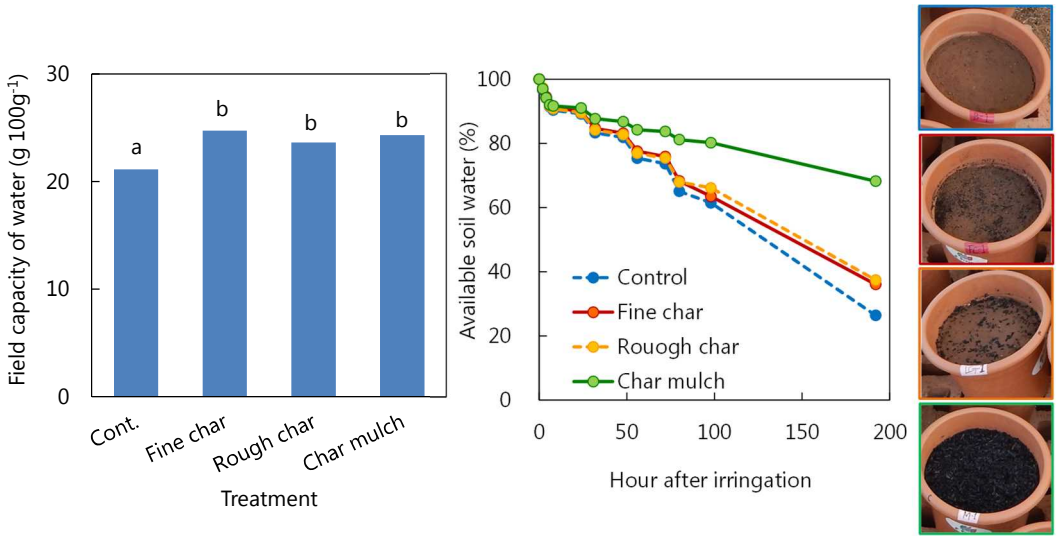


図４－１５　圃場容水量と潅水後の土壌含水率に及ぼす炭施用の影響

バイオ炭の土壌施用により土壌の圃場容水量を増加した結果、ヤトロファが利用できる水分が増加し、ヤトロファによる蒸散量の増加、および、葉と茎および全乾物重の増加が認められた（表４－５）。一方、指標 4-2 で認められた程の地面蒸発量の抑制は認められず、積算蒸発量も増加した。その結果、乾物生産における水利用効率は炭施用区で高い傾向を示したものの、有意差は認められなかった。しかし、炭施用区では蒸散量/蒸発量比も高い傾向が見られたことから、条件によっては明確な効果が表れることが期待される。

表４－５　圃場容水量と潅水後の土壌含水率に及ぼす炭施用法の影響.

Soil type	Total Evaporation (g pot^{-1})	Total Transpiration (g pot^{-1})	Tra/Eva ratio	Dry weight (g plant^{-1})				WUE (%)
				Leaf	Stem	Root	Total	
Plain soil	1495	1499	1.004	1.69	2.53	1.08	5.47	0.146
Char mixed soil	1633	1801	1.103	2.16	2.92	1.14	6.29	0.152
t-test	**	**	ns	**	*	ns	*	ns

Tra/Eva ratio は蒸散量/蒸発量比を示す.

最後に、ヤトロファの葉のバイオ炭と牛糞を施用して一連の野菜栽培（スピナッチ、カラシナなど）を行って、その施用効果を調査した（図４－１６、非公開)。ヤトロファ栽培を行っている試験圃場の土壌を対照区(Field soil)とし､牛糞のみ(CD)､ヤトロファ葉炭(JC)、ヤトロファ葉炭＋牛糞（CD＋JC)、化学肥料（NPK)、培養土（PS：Potting soil）を用いてそれぞれ表４－６(非公開)のような試験区を設けた。

圃場土壌に対して、JC（ヤトロファ葉炭）区は乾物量および葉面積ともに大きく増加している（図４－１７、非公開)。培養土（PS）には達しないものの、化学肥料区(NPK)よりも良好な成績を示しており、固形肥料として有望と言える。JC+CD 区（牛糞混合）では 5%施用しないと効果が表れていない。CD（牛糞）区はコントロールより低下しているので成長を阻害する要素があるようである。本試験では、各ポットに毎日 500mL ずつ潅水を行ったので、試験結果は水利用効率を反映している。化学肥料区(NPK)に対しても大きく増えているので水利用効率は大きく改善されたと言える。

4-4）非油脂バイオマスの利用技術

a） 開発した４技術

非油脂バイオマスの利用技術として、バイオ炭を中心に次の４技術を開発した。

○土壌改良資材
　バイオ炭、炭
○固形燃料（グリーン燃料）
　バイオ炭のブリケット、ペレット
　枝の薪利用、ペレット、チップ
○固形肥料（グリーン肥料）
　牛糞、コンポスト、山羊糞混合バイオ炭（粉体もしくはペレット）
　ヤトロファ葉バイオ炭の単独利用（粉体もしくはペレット）
○バイオディーゼル製造の固形アルカリ触媒
　ヤトロファ炭、ヤトロファ灰

b） 土壌改良資材

指標 4-2 および 4-3 で説明済み。

c） 固形燃料（グリーン燃料）

バイオ炭は炭に比べて炭化収率が高い。これを粉末状にしてブリケットもしくはペレットにすると燃料としての取り扱い性が大きく向上する。バイオ炭（トレファクション）のペレットは通常の木質ペレットに比べて湿度による崩壊が起こりにくく、その有用性が評価されている。ここでは、ブリケット製造機やペレット製造機がなかったので、手作りの器具でブリケットを製造した。ヤトロファ葉炭に乾燥牛糞を 80%と 20%の割合で混合したものを用いた。牛糞はバインダとして利用したが、牧畜業が盛んなボツワナを代表する地域資源で、ユニークな固形燃料（グリーン燃料）となった。この混合物はそのまま固形肥料としても利用できる（指標 4-3 の野菜栽培試験ではこれを使用した)。

ブリケットの成型は、

牛糞とバイオ炭の混合＝＞水を加えて十分に攪拌＝＞中空円筒のモールドに充填＝＞加圧棒を挿入＝＞加圧（打撃など）＝＞モールドを上下反転してフランジに軽く載荷＝＞フランジの上部から取り出し

の手順で実施できる（図４－１８)。

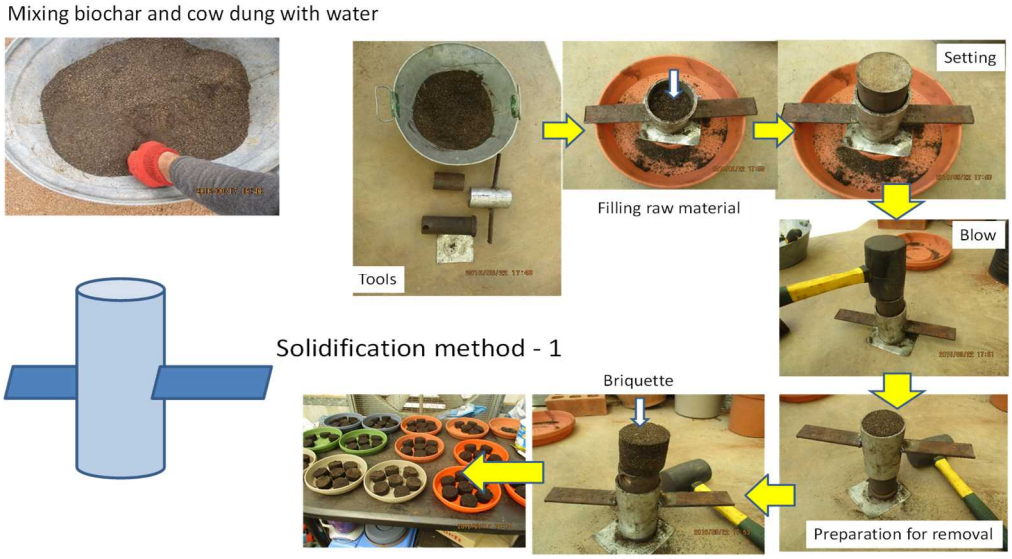


図４－１８　固形燃料（グリーン燃料）のブリケット成型

モールドを複数並べて成型すればある程度の量産も可能である。加圧力を高めるために油圧ジャッキを使用する方法も検討した（図４－１９）。バインダとしてスターチやバイオディーゼル製造過程で発生するグリセリンなども使用できる。表４－７に製造したブリケットの熱量などの基本データを示す。図４－２０および図４－２１にブリケットの燃焼試験の様子とその結果を示す。

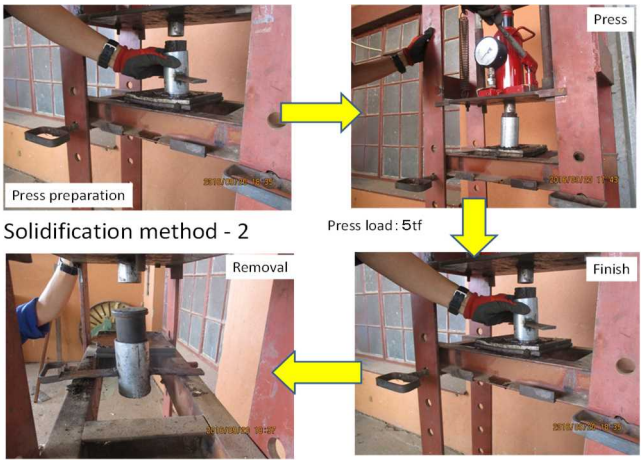


図４－１９　固形燃料（グリーン燃料）のブリケット成型（２）

表４－７　ブリケットの基本物性

Heating value
Briquette: 9,364kJ/kg
Jatropha leaf: 15,087kJ/kg
Biochar of Jatropha leaf: 8,909kJ/kg
Cow dung : 13,720kJ/kg

Blending ratio (mass)
Biochar of Jatropha leaf : 79.20%
Cow dung : 20.80%

Briquette volume, mass, density（Average of 27）
Volume 63.68cm3
Mass 30.96g
Density 0.49 g/cm3

Estimated calorific value (per briquette)
9364*30.96= 290 kJ

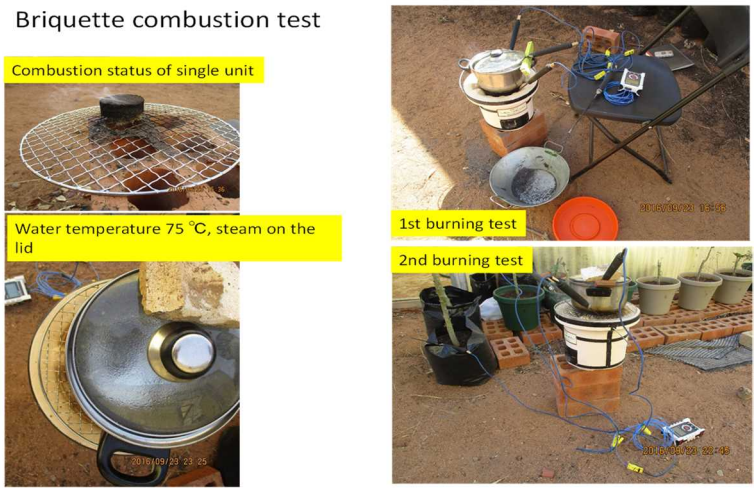
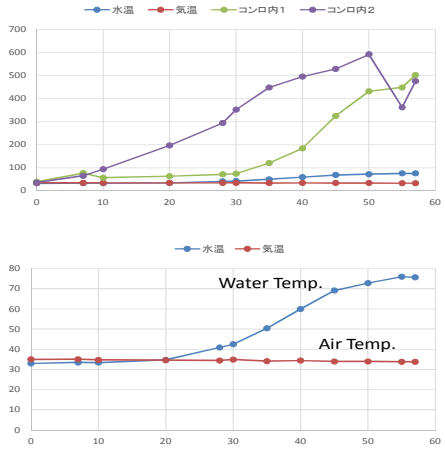


図４－２０　ブリケットの燃焼試験

Results（2nd test）



Briquettes used
Number: 12 pieces
Weight: 373 g
Density: 0.47 g / cm 3
Estimated total heat quantity: 3493 kJ

Stove: Stove for charcoal

Water temperature rise
Water volume 500 mL
Maximum temperature: 76 ° C

Heat utilization
(calculated by 12 pieces)
Briquette calorie: 3493 kJ
Temperature: 76 ° C
Required heat quantity: 90.3 kJ
Heat Utilization Rate: 2.59%

図４－２１　燃焼試験結果

この形態のブリケットは家庭の調理用燃料の他に、ボイラー用燃料などとして石炭との混焼も可能である。ヤトロファ葉炭は熱量が小さい反面、肥料としての効果が大きいので、茎と葉はそれぞれ別個に炭化して、使い分けるのが望ましい。

d) 固形肥料（グリーン肥料）
指標 4-2 および 4-3 で説明済み。

e) バイオディーゼル製造の固形アルカリ触媒
アウトプット３で説明済み

f) ヤトロファ葉炭の製造
ボツワナ南部では冬季になるとヤトロファのすべての葉が落葉する。そこで葉のみの炭を効率的に製造できるかどうか検討した。図４－２２はドラム缶を利用した簡易炭化炉で、農村などで簡単に自作できる。この炭化炉は、構造は単純であるが、内部で炭化がどのように進行するかは、まったく不明であった。このため、空気の流入を止めるタイミングを間違うと灰になるなど安定性に難点がある。そこで、炭化炉内部に温度センサーを設置して、炭化中の温度変化を調べ、炭化の進行プロセスの解析を行った。乾燥したヤトロファの葉を密詰め、緩詰、中詰めして、炭化を行った。温度センサーのセッティングと炭化の流れを図４－２２に示す。また、炭化中の炉上部および下部の温度変化を図４－２３に示す。密詰めでは炭化に長い時間を要することがわかった。これは、充填する原料の密度によって伝熱に大きな違いがあることによるものと思われる。

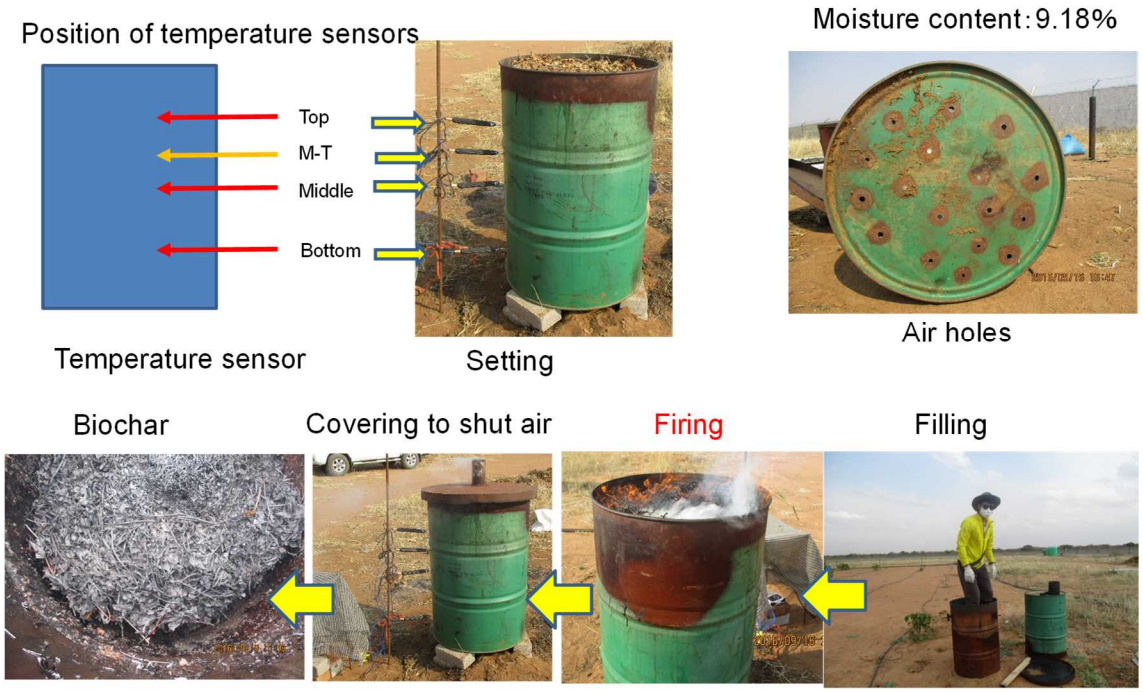


図４－２２　温度センサーのセッティングと炭化の流れ

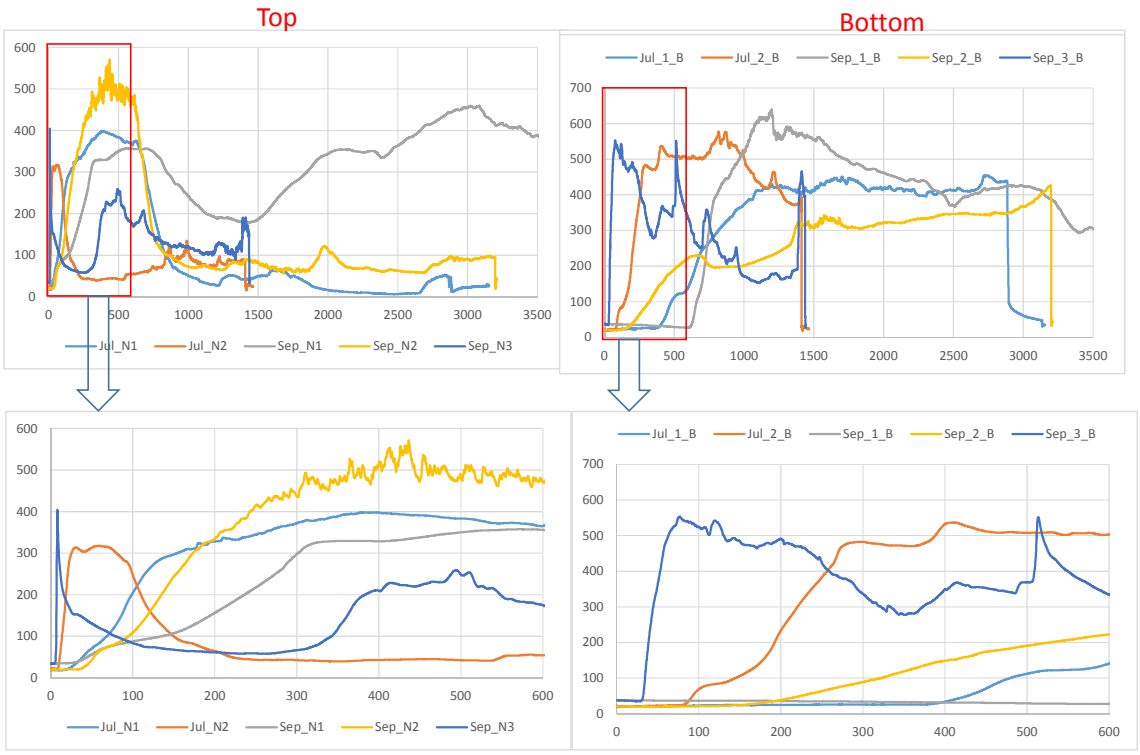


図４－２３　炭化炉内上部および下部の温度変化

④ アウトプット４のカウンターパートへの技術移転の状況

理研:H28 年３月にボツワナを訪問し、土壌サンプリングと土壌微生物叢からの DNA 抽出法、PCR 条件検討およびそのデータ確認法、DGGE 装置の基本的な操作法について、３度目の研修を行った。

琉大：非油脂バイオマスの炭化、施用技術と効果の評価法、固形燃料利用、固形肥料利用の技術および研究手法については DAR の研究員に伝えてある。現在、DAR 研究員の内、２名がボツワナ大学の博士課程に進学し、これらの研究課題に取り組んでいる。また、琉球大学で実施しているバイオマス利用関連の JICA 研修コースに延べ８名のカウンターパートが参加して技術研修を受けている。また、ボツワナ大学のカウンターパートには炭および灰の利用技術を伝え、共同研究として進めている。

⑤ アウトプット４の当初計画では想定されていなかった新たな展開

理研：第一段階として、日本に輸入したボツワナ土壌を用いた実験室レベルでの解析に注力したが、毎年現地での土壌サンプリングも継続している。本プロジェクトは最終的に、現地の気象データと組み合わせた統合解析手法を構築することを以前から目論んでいる。最終年度は他の研究グループと活発な意見交換を行い、この方向性に向けて邁進していきたい。

琉大：ヤトロファ・バイオマスのバイオ炭をひとまとめのものと考えていたが、今回注目した葉炭のように、エネルギー利用と土壌改良・肥料利用では個別に炭化したバイオ炭を活用するのが望ましいことがわかった。また、ヤトロファ炭および灰をバイオディーゼル製造時のアルカリ触媒として活用する技術は、プロジェクトの進行過程でててきたもので、将来、ケーキなどからのバイオエタノール製造も含めて、ヤトロファのみからバイオディーゼルを製造するシステムとして新たな展開が期待できる。

アウトプット５　（環境・社会・経済評価）

アウトプット５の目標

Impact of jatropha production and biomass use is evaluated environmentally, socially and economically.
(ヤトロファ生産とバイオマス利用の影響が環境面、社会面及び経済面から評価される)

客観的な指標 (Objectively-verifiable indicators)、およびその達成状況：

5-1) Methodology for GHG allocation between biodiesel, co-product production and soilenhancements is determined (バイオディーゼル、副産物生産および土壌改良における、温室効果ガスの収支の算出方法が開発される).

達成状況：　ボツワナにおいてヤトロファ・バイオディーゼル事業の諸要素について、それらの GHG ガス収支を計算するためのデータベースを構築し、LCA 解析のための基盤を構築した。

5-2) Preliminary life cycle assessment of jatropha biodiesel is carried out. (ヤトロファ・バイオディーゼル事業の予備的な LCA が実施される).

達成状況：　半乾燥･寒冷地であるボツワナにおけるヤトロファ事業すなわち栽培、搾油、精製の過程における温室効果ガス（以下、GHG）の排出量および吸収量が LCA で算出され、生産されたバイオマスエネルギーと副産物利用による GHG 削減量を含めて GHG 収支が試算された。潅水と剪定を特徴的な基本技術とするセベレ栽培体系に関する LCA に関する論文が作成され、国際誌に投稿された。

5-3) Possible petroleum energy displacement based on an assessment of seed yield, biodiesel process efficiency and available acreage for planting is estimated. (種子収量、バイオディーゼル工程効率、およびヤトロファ植栽の可能な土地面積に基づく、石油燃料代替効果が評価される).

達成状況：　ボツワナでのヤトロファ事業の経済性分析を行うため、気象条件を加味した栽培可能性を想定した導入シナリオに基づいて支出および収入が算出され、費用便益分析が行われた。ヤトロファのバイオディーゼル生産による石油燃料（軽油）削減量が試算され、またバイオマス由来の代替燃料生産による木質燃料（薪）削減量が算出され、1 年分の薪を代替可能な世帯数が試算された。加えて、サハラ以南アフリカに先行導入されたプロジェクトに関する文献調査が行われ、ボツワナにおける事業導入に関する分析が行われた。

アウトプット５の研究成果の詳細

5-1）ヤトロファ事業における GHG 算出手法の開発、および
5-2）ヤトロファ事業の LCA 解析

ヤトロファ事業における GHG 排出量および削減量の算出を行うため LCA を実施した。具体的には、栽培、搾油、バイオディーゼル精製、流通、消費の各プロセスにおける GHG 排出量および吸収量の算出を行い、生産されたバイオマスエネルギーと副産物による GHG 削減量の試算を行った。

ヤトロファ事業において栽培は一般に排出量が大きいが、本プロジェクトでは潅水と剪定が基本技術として加わるので、栽培に関する実績値およびそれ以外のステージにおけるシミュレーションに基づいて GHG 収支を求めた。

栽培による GHG 排出量：　ここでは、栽培 1 年目から 4 年目までの投入データの平均を基

に、1 年間で 1ha あたりの排出量を算出した。ただし、10 年は事業を継続すると想定し、初期整備に関しては 10 分の 1 を計上した。

栽培による排出量（kg CO_2-eq/ha/year）の内訳は、初期整備としての整地 63.5、灌漑設備設置 507.8、栽培活動としての育苗 16.4、農作業 273.6、収穫 13.3、運搬 3.2、剪定 7.8、潅水 1862.3、潅漑補修 501.3、補植（育苗・移植）41.3 であり、合計で 3290.6 と算出された。

栽培による GHG 吸収量： ここでは、栽培 4 年目までの炭素固定量を基に、1 年間で 1ha あたりの吸収量を算出した。ただし、バイオディーゼル利用を想定する種子や、非油脂燃料利用を想定した葉および剪定枝はここから除外した。地上部（剪定枝を除外した枝）による固定量は 2447.5 kg CO_2-eq/ha/year、地下部（根）による固定量は 1400.0 kg CO_2-eq/ha/year であり、栽培による吸収量は合計 3847.5 kg CO_2-eq/ha/year となった。

搾油および精製による GHG 排出量： ここでは、種子収穫量としてプロジェクト期間での最多収量 739 粒／木を採用し、種子重 1155kg/ha/year と想定し、1 年間で 1ha あたりの排出量を算出した。搾油および精製による排出量にかかわる要素として、搾油率 31.9%(Kumar et al. 2012)、バイオディーゼル精製率 95.2% (Kumar et al. 2012)、バイオディーゼル熱量 37.3 MJ/kg(Kumar et al. 2012)、熱量あたり GHG 排出量(搾油 3.74±0.07 g CO2-eq/MJ、バイオディーゼル精製 13.34±0.77 (Achten et al. 2010)) がある。以上より、GHG 排出量（kg CO_2-eq/ha/year）は、搾油 48.9±0.9、精製 174.5±10.1 と算出された。

流通及び消費による GHG 排出量： 給油所を 15km の地点と想定し、バイオディーゼル運搬車両のための軽油からの排出量を 2.70kg CO2-eq/L、車両燃費を 7.5km/L とした。また、搾油率を 31.9%(Kumar et al. 2012)、バイオディーゼル精製率を 95.2% (Kumar et al. 2012) とした。種子 1155kg/ha からは 351kg/ha のバイオディーゼルが精製され、これは 1 回で運搬可能であり、流通からの排出量は 5.4kg CO_2-eq/ha/year と算出された。また、バイオディーゼルの消費による GHG 排出量は 0 と考えられた。

バイオマスエネルギーと副産物による GHG 削減量： ここでは、種子収穫量を 1155kg/ha/year と想定し、種子搾りかすはその値を基に、それ以外のバイオマスは 1 年目から 4 年目の平均とし、1 年間で 1ha あたりの排出量を算出した。

バイオディーゼルによる削減量にかかわる要素として、搾油率 31.9%(Kumar et al. 2012)、バイオディーゼル精製率 95.2% (Kumar et al. 2012)、軽油比重 0.85kg/L (Pandey et al. 2011)、軽油 GHG 排出量 2.70 kg CO2-eq/L (ecoinvent3 2013) がある。そこで、バイオディーゼル利用による軽油削減量を求め、次にバイオディーゼル生産による GHG 削減量として軽油 GHG 削減量を算出した。バイオディーゼル生産による GHG 削減量は 1114.2kg CO_2-eq/ha/year と算出された。

非油脂燃料（薪、葉、ハスク）を炭化して試用した場合の薪の節約による GHG 削減量にかかわる要素として、収穫量（枝 668kg、葉 1655kg、ハスク 398kg のうち各 5 割)、炭化の際の歩留まり 2 割、炭素含有率（枝 43%、葉 42%)、熱量（ハスクの量を枝に換算するために使用：枝 4.043kcal/g、ハスク 4.431kcal/g)、分子量炭素 12、二酸化炭素 44 がある。以上より、非油脂燃料生産による GHG 削減量は 429.0kg CO_2-eq/ha/year と算出された。非油脂燃料の運搬先を 15km の地点と想定し、バイオディーゼル運搬車両のための軽油からの排出量を 2.70kg CO2-eq/L、車両燃費を 7.5km/L とする。バイオマスは計 1360.5kg で、これは 2 回で運搬可能であり、非燃料利用による排出量は 10.8kg CO_2-eq/ha/year と算出された。

副産物のうち、種子搾りかす肥料による削減量にかかわる要素として、搾りかす収穫量 786.6kg、搾りかすが供給する栄養素の量（複合肥料の 4 分の 1 とみなす。搾りかす成分：4.4-6.5 N%, 2.1-3.0 P%, 0.9-1.7 K%, 0.6-0.7 Ca%, 1.3-1.4 Mg% (Achten et al. 2008))、複合肥料 GHG 排出量 1.96 kg CO2-eq/kg がある。以上より種子搾りかす利用による複合肥

料利用削減量を求めた結果、種子搾りかす肥料生産による GHG 削減量は 385.4kg CO_2-eq/ha/year と算出された。種子搾りかす肥料の運搬先を 15km の地点と想定し、BDF 運搬車両のための軽油からの排出量を 2.70kg CO2-eq/L、車両燃費を 7.5km/L とした。種子搾りかす肥料は 786.6kg で、これは 1 回で運搬可能であり、非燃料利用による排出量は 5.4kg CO_2-eq/ha/year と算出された。

GHG 収支： ヤトロファ事業の各プロセスにおける GHG 排出量（kg CO_2-eq/ha/year）は、栽培 3290.6、搾油 48.9±0.9、精製 174.5±10.1、流通 5.4、消費 0、非油脂燃料運搬 10.8、種子搾りかす肥料運搬 5.4 であった。GHG 吸収量（kg CO_2-eq/ha/year）は栽培 3847.5 であり、生産されたバイオマスエネルギーと副産物による GHG 削減量（kg CO_2-eq/ha/year）はバイオディーゼル 1114.2、非油脂燃料 429.0、種子搾りかす肥料 385.4 であった。ha あたり年間での GHG 総収支は、吸収量および削減量が 2240.5±11.0（63.4%）上回っていた（図 5-1）。

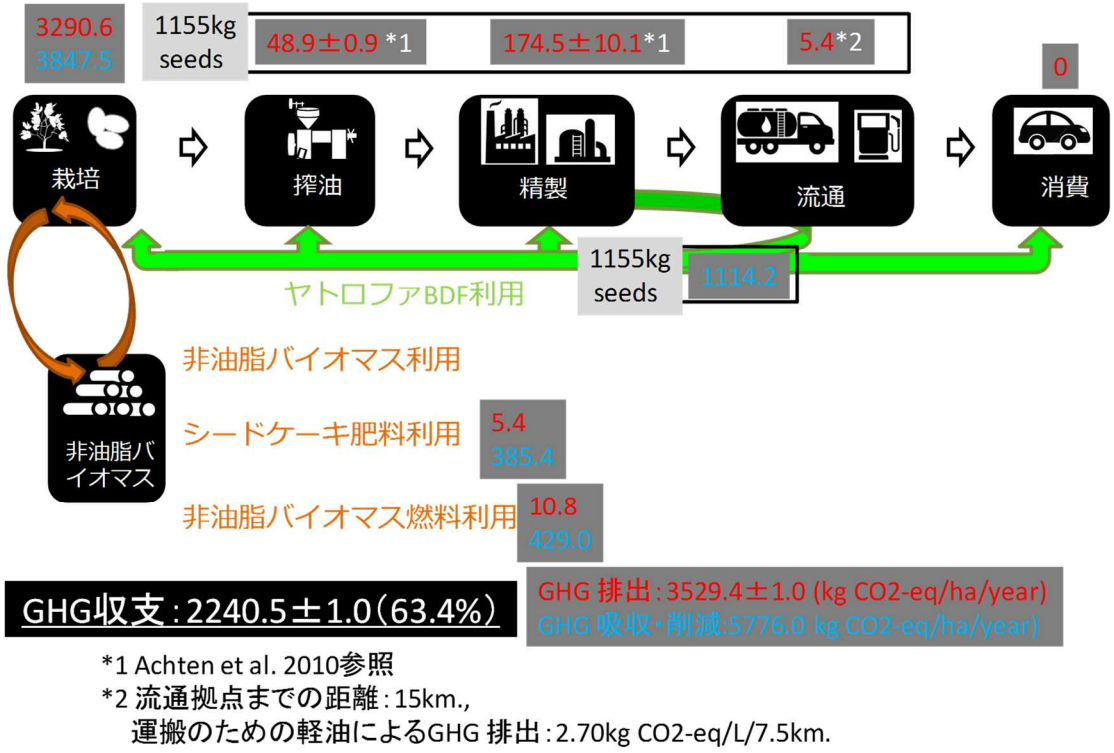


図 5-1. ヤトロファエネルギー生産における GHG 収支

5-3）ヤトロファ事業による循環的エネルギーへの代替効果

本研究項目の元の指標では、”petroleum energy displacement”、すなわち「石油代替燃料」のみを記載している。しかし、ボツワナの電力供給は大半が石炭火力発電により賄われていること、また家庭用燃料として森林伐採に由来する薪が用いられていることを踏まえ、石油代替に限定するのではなく、ボツワナで利用されているエネルギー全般を、ヤトロファ事業による循環的エネルギーへ代替することの効果について、以下に検証することとした。

＜石油燃料および木質燃料削減量＞

―大規模農園モデル―

石油代替燃料：　大規模農園におけるヤトロファ石油代替燃料生産による石油燃料削減にかかわる要素として、種子生産、搾油、バイオディーゼル精製、バイオディーゼルと石油系軽油（以下、軽油）との熱量が挙げられた。また、種子生産の要素として、種子収量、種子重、植栽密度、耕地面積があった。これらの値を手がかりに、代替燃料生産による 1 年間当たり石油燃料削減量を試算した。

ここでは、種子収穫量としてプロジェクト 5 年目に記録された、プロジェクト期間での最多収量 739 粒／木を採用し、種子重 0.625g/seed、植栽密度 2500trees/ha より、種子重 1155kg/ha/year と想定した。

また 2009 年時点、ボツワナ東部では可耕地全体のうち農耕適地は 71%を占め、農耕限界地は 200,000 ha で、可耕地のうち 29%であった(Kgathi et al 2012)。本稿では、この農耕限界地をヤトロファ栽培に活用する土地と仮定した。また、搾油率、つまり種子重量に占めるクルードオイルの重量比は 31.9%、BDF 精製（エステル化）率は 95.2%と考える(Kumar et al. 2012)。加えて熱量は、バイオディーゼル 37.3 MJ/kg、軽油熱 55.6 MJ/kg とし(Kumar et al. 2012)、軽油の比重を 0.85kg/L とした（Pandey et al. 2011 ）。

以上より，バイオ燃料生産量は 82.5 x 10^6 L/年と算出された（図 5-2)。

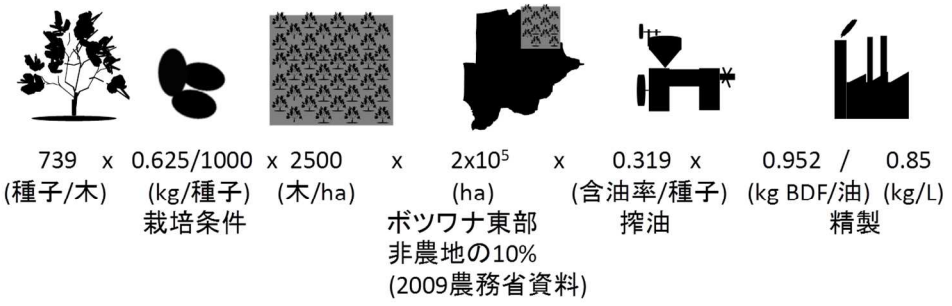


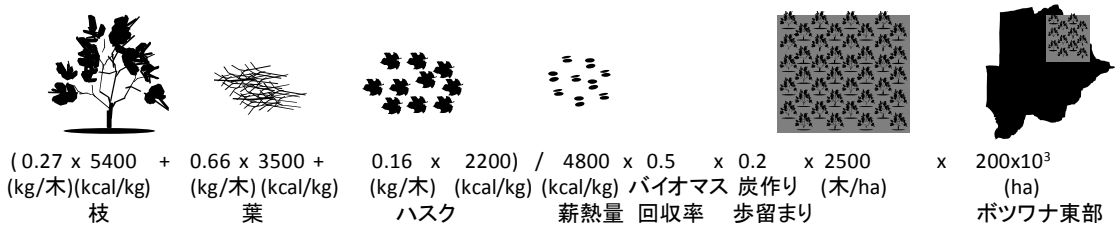
図 5-2. 大規模農園モデルにおける石油燃料代替量

木質代替燃料：　大規模農園におけるヤトロファ木質代替燃料生産による木質燃料削減にかかわる要素として、バイオマス生産、熱量が挙げられた。また、バイオマス生産の要素として、枝・葉・ハスク生産量、栽植密度、耕地面積があった。これらの値を手がかりに、代替燃料（ヤトロファ炭）生産による 1 年当たり木質燃料削減量を試算した。1 年当たりの削減量を求めるため、開始当初から 4 年目までの平均値を用いた。

ヤトロファバイオマスは、利用運搬を考慮し、バイオチャー（ヤトロファ炭）に変換しての利用を想定した。枝、葉、ハスクの生産量は 1 木あたり 0.27kg 、0.66kg、0.16kg であり、収穫率は 1/2 と、バイオチャー作成時の歩留まりは 1/5 と考えた。栽植密度は 2500 個体/ha と想定した。

また耕地面積も石油代替燃料と同様に、ボツワナ東部において 200,000 ha と考えた。加えてヤトロファバイオチャーの熱量は、枝 5.4 kcal/g、葉 3.5 kcal/g、ハスク 2.2 kcal/g とした。薪の熱量は、*Acacia nilotica* の白木質で 4.8kcal/g であった （Ruskin, F. R. 1980)。

以上より，薪の削減量は 42.9 x 10^3 ton/年と算出された。1 世帯（7 から 8 名）の薪消費量は 7.8kg/日 (Makhado et al. 2014)であり、ヤトロファ 木質代替燃料は、およそ 15074 世帯の 1 年分の薪を削減することが可能と算出された（図 5-3)。これは、ボツワナ農村部に居住する世帯の 6.9%に当たる。



ヤトロファ炭によるアカシア薪代替: 42.9 x 10^3ton/年

ヤトロファ生産が代替する薪は 15074世帯分
(ボツワナ内の農村世帯の6.9%)
※ 1世帯(7～8名)は 7.8kg/日を消費(Makhado et al. 2014).

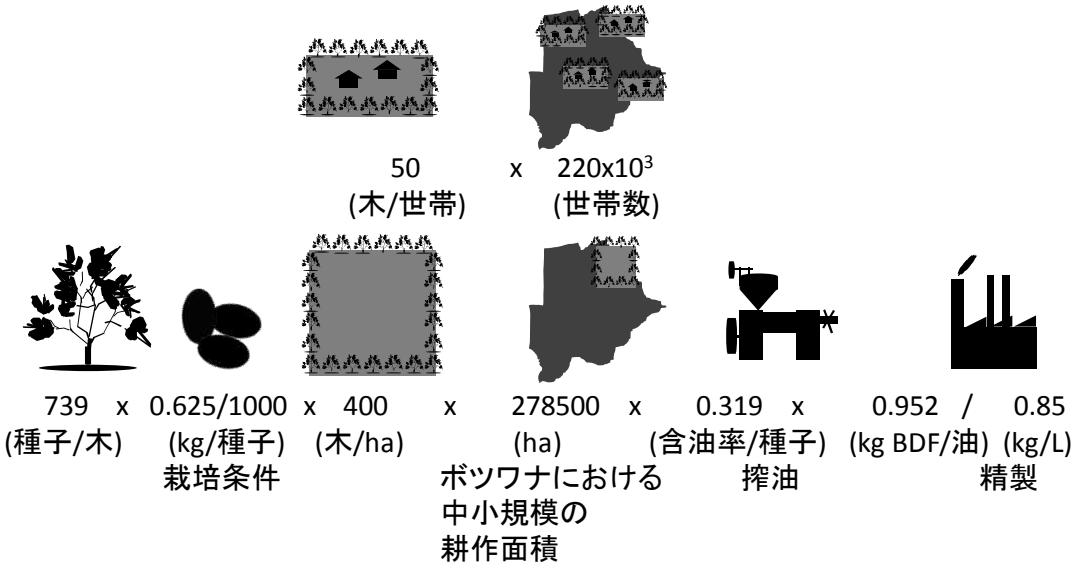
図 5-3. 大規模農園モデルにおける木質燃料代替量

―垣根栽培モデルー（小規模モデル）

石油代替燃料： 垣根栽培モデルではヤトロファは耕地や家屋の境界に柵として栽培されることを想定し、基本的に農地の削減は伴わないモデルである。

ここでは種子収穫量として、プロジェクト 5 年目に記録された、プロジェクト期間中の最多収量 739 粒／木を採用し、種子重 0.625g/seed を想定した。また、小規模農家が耕地 1 筆（4ha）の境界に 0.5m 間隔で柵としてヤトロファを栽培した場合、栽培本数は 400 trees/ha となった。2009 年時点、ボツワナ全体で小規模農家による耕作面積は 278,500ha であった（Government of Botswana 2016）。加えて、小規模農民は家屋周りに庭木を植える慣習があり、ヤトロファを植栽する世帯も多い。そこで、農村部住民が（22 万世帯）ヤトロファを生垣として採用する状況も想定した。搾油率、つまり種子重量に占めるクルードオイルの重量比は 31.9%、バイオディーゼル精製（エステル化）率は 95.2%と考えた（Kumar et al. 2012）。

以上より，バイオディーゼル生産量は 20.2 x 10^6 L/年と算出された（図 5-4）。



バイオディーゼル生産: 20.2 x 10^6L/年
*資源省FS(2007)のバイオディーゼル生産目標値: 50 x 10^6L/年

図 5-4. 垣根栽培モデルにおける石油燃料代替量

木質代替燃料： 小規模農業におけるヤトロファ木質代替燃料生産による木質燃料削減にかかわる要素として、バイオマス生産、熱量が挙げられた。また、バイオマス生産の要素として、枝・葉・ハスク生産量、栽植密度、耕地面積があった。これらの値を手がかりに、代替燃料（ヤトロファ炭）生産による 1 年当たり木質燃料削減量を試算した。1 年当たりの削減量を求めるため、開始当初から 4 年目までの平均値を用いた。

ヤトロファバイオマスは、利用運搬を考慮し、バイオチャー（ヤトロファ炭）に変換し、利用した。枝、葉、ハスクの生産量は 1 木あたり 0.27kg 、0.66kg、0.16kg であり、収穫率は 1/2 と、バイオチャー作成時の歩留まりは 1/5 と考えた。また、小規模農家が耕地 1 筆（4ha）の境界に 0.5m 間隔で柵としてヤトロファを栽培する状況を想定した。その場合、栽培本数は 400 trees/ha となる。2009 年時点、ボツワナ全体で小規模農家による耕作面積は 278,500ha であった（Government of Botswana 2016）。加えて、小規模農民は家屋周りに庭木を植える慣習があり、ヤトロファを植栽する世帯も多い。そこで、農村部住民が（22 万世帯）ヤトロファを生垣として採用する状況も想定した。

ヤトロファバイオチャーの熱量は、枝 5.4 kcal/g、葉 3.5 kcal/g、ハスク 2.2 kcal/g と算出された。薪の熱量は、*Acacia nilotica* の白木質で 4.8kcal/g であった（Ruskin, F. R. 1980）。

以上より，薪の削減量は 10.5 x 10^6 kg/年と算出された。1 世帯（7 から 8 名）の薪消費量は 7.8kg/日 (Makhado et al. 2014)であり、ヤトロファ 木質代替燃料は、およそ 3690 世帯の 1 年分の薪を削減することができると試算された（図 5-5）。これは、ボツワナ農村部に居住する世帯の 1.7%に当たる値であった。

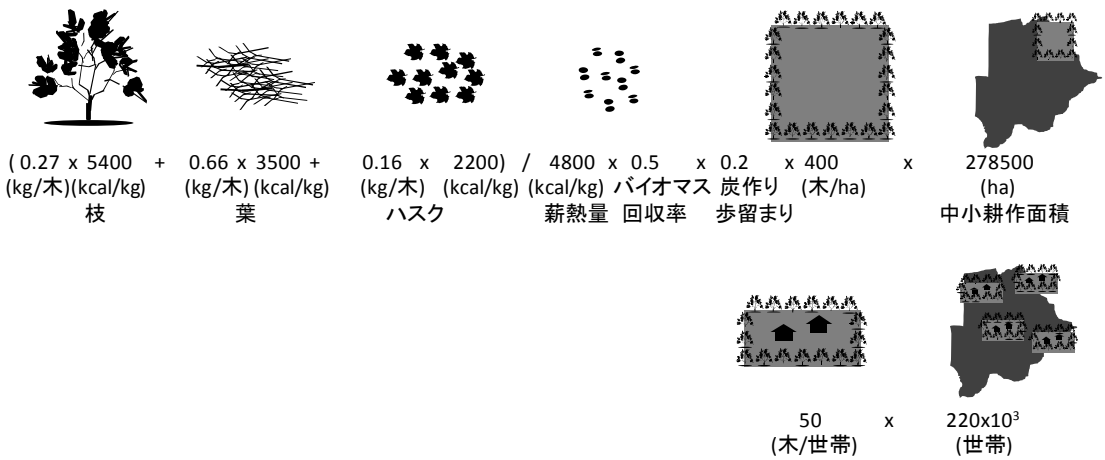


図 5-5. 垣根モデルにおける木質燃料代替量

＜費用便益分析＞

ヤトロファ事業の費用便益分析を行うため、支出および収入の算出を行い、それらの比較検討を行った。

調査地域及び農村部におけるヤトロファ事業の費用便益分析を行うため、15 年間事業を行った場合に関して栽培、搾油、精製、肥料製造・運搬、非油脂燃料製造・運搬の費用、および、BDF 生産、肥料製造、非油脂燃料製造による便益の試算を行い、それらの費用便益の検討を行った。栽培費用では、1 年目から 4 年目の値は、研究ベースで実際に投入された資材の量・単価に基づき算出され、5 年目以降の値は、それ以前の 4 年間のデータを基に試算された。それ以外の費用と便益は、原料生産については本プロジェクトの結果に基づき、そ

れ以外の情報は先行研究に基づき試算した。本項では、商業化を目指し、各活動の費用を削減した際の収支を把握するため、研究ベースで実際に投入された費用を基本に、複数のシナリオについて分析した。

シナリオ設定：　ここではヤトロファを、耕地に 2m 間隔に植栽する大規模農園モデル、小規模農民の耕地、彼らの敷地の境界にヤトロファが既に植え付けられ、十分な大きさのヤトロファ個体が確保できる 1 農村を対象とした垣根栽培（ヘッジ）モデルに、栽培費用や収量の条件を変え、それぞれ３つ、２つのシナリオを設定した。

設定した条件は、初期費用、潅漑費用、除草費用、収量であった。初期費用とは、土地整備（ユンボ燃料、労賃）および潅漑設備設置（灌漑設備費、労賃）に関わる費用であった。潅漑費用とは潅水（揚水・送水ポンプ燃料、労賃）および潅漑補修（灌漑設備費、労賃）に関わる費用であった。除草費用とは、基本的に労賃のことを指すが、除草剤を使用する際には、除草剤と労賃を含む。収量は、遺伝子組み換えヤトロファを導入した際、増収を見込む。以下に各シナリオを示した（表 5-1）。

表 5-1. 本研究の費用便益分析で検討したシナリオ設定

	大規模農園モデル (Plantation model)			垣根モデル (Hedge model)	
	シナリオ 1	シナリオ 2	シナリオ 3	シナリオ 4	シナリオ 5
	基本	北部多雨地域	北部多雨地域および多収ヤトロファ導入	基本	北部多雨地域および多収ヤトロファ導入
初期設備投資	1	0	0	0	0
灌漑費	1	0	0	0	0
除草費	1	除草剤利用1/7 6年目以降更に1/3	除草剤利用1/7 6年目以降更に1/3	0	0
収量	1	1	4	1	4

・シナリオ１：これを大規模農園モデルの基本シナリオとする。本研究圃場での実測値（相対基準値として 1 と定義）を基に経済収支を算出した。
・シナリオ２：雨量の多い北部地域における費用改善シナリオとする。潅漑費を 0 とする。初期費用の政府補助を想定する。除草費は、除草剤の使用で人件費を削減し、1/7 に削減する。かつ、6 年目以降には、除草剤の使用を雨季初旬の 11 月～12 月のみ行い、期間を通して除草剤を使用した際と比べ、費用を 1/3 と設定する。
・シナリオ３：多収性ヤトロファ導入により収量を 4 倍とし、それ以外をシナリオ２と同一と設定する。
・シナリオ４：これを垣根栽培モデルの基本シナリオとする。1 農村で種子収量を計 1050kg と設定し、費用および便益を算出した。
・シナリオ５：多収性ヤトロファ導入により収量を 4 倍とし、それ以外をシナリオ４と同一と設定する。

栽培費用（シナリオ 1）：まず、最も経費のかかる栽培経費の内訳を見るため、表 5-2 にシナリオ１の栽培費用を示す。1 年目から 4 年目の値は、研究ベースで実際に投入された資材の量・単価に基づき算出され、5 年目以降の値は、それ以前の 4 年間のデータを基に試算された。この値に基づき、各活動の条件を変えた。各シナリオの栽培費用を試算した。1ha あたりの出費を、現地通貨プラ（１プラ=10.94 円、2017 年 3 月時点）で示した。

表 5-2. シナリオ１における栽培費用の年次別一覧

		年次 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
初期整備	土地整備	107.6	107.6	107.6	107.6	107.6	107.6	107.6	107.6	107.6	107.6	107.6	107.6	107.6	107.6	107.6
初期整備	潅漑設置	5781.5	5781.5	5781.5	5781.5	5781.5	5781.5	5781.5	5781.5	5781.5	5781.5	5781.5	5781.5	5781.5	5781.5	5781.5
育苗	種子・枝採取、植え付け、潅水、施肥	1793.3	311.0	851.9	1043.9	735.6	735.6	735.6	735.6	735.6	735.6	735.6	735.6	735.6	735.6	735.6
農作業	移植：初回	1373.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
農作業	移植：補植	0.0	258.3	258.3	868.3	461.6	461.6	461.6	461.6	461.6	461.6	461.6	461.6	461.6	461.6	461.6
農作業	元肥	188.9	216.9	216.9	216.9	209.9	209.9	209.9	209.9	209.9	209.9	209.9	209.9	209.9	209.9	209.9
農作業	追肥	427.1	559.2	171.4	930.4	522.0	522.0	522.0	522.0	522.0	522.0	522.0	522.0	522.0	522.0	522.0
農作業	除草	2716.3	10657.5	7269.6	6718.4	6840.4	6840.4	6840.4	6840.4	6840.4	6840.4	6840.4	6840.4	6840.4	6840.4	6840.4
農作業	病虫害防除	1039.6	1835.3	4549.9	6353.7	3444.6	3444.6	3444.6	3444.6	3444.6	3444.6	3444.6	3444.6	3444.6	3444.6	3444.6
農作業	その他	639.1	1653.8	23.0	771.9	771.9	771.9	771.9	771.9	771.9	771.9	771.9	771.9	771.9	771.9	771.9
収穫	果実収穫	0.0	0.0	153.1	161.5	1335.1	2122.6	2961.2	3303.6	3407.0	3435.2	3442.6	3444.6	3444.6	3444.6	3444.6
収穫	乾燥	0.0	0.0	28.7	32.3	267.0	424.5	592.2	660.7	681.4	687.0	688.5	688.9	688.9	688.9	688.9
収穫	ハスク(果皮)除去	0.0	0.0	27.6	29.1	240.3	382.1	533.0	594.6	613.3	618.3	619.7	620.0	620.0	620.0	620.0
運搬	種子運搬	0.0	0.0	23.1	19.1	157.9	251.0	350.2	390.7	402.9	406.2	407.1	407.4	407.4	407.4	407.4
寒波対策	剪定	239.7	344.5	1122.6	1769.1	2130.0	2265.7	2309.0	2322.0	2325.9	2327.0	2327.3	2327.4	2327.5	2327.5	2327.5
潅漑	潅水	6679.6	9359.9	2041.6	6223.3	6076.1	6076.1	6076.1	6076.1	6076.1	6076.1	6076.1	6076.1	6076.1	6076.1	6076.1
潅漑補修	灌漑設備補修	0.0	7553.0	7553.0	7553.0	7553.0	7553.0	7553.0	7553.0	7553.0	7553.0	7553.0	7553.0	7553.0	7553.0	7553.0
	総費用	20986.5	38638.5	30179.7	38579.9	36634.6	37950.3	39249.9	39776.0	39934.7	39978.1	39989.7	39992.7	39992.7	39992.7	39992.7

※ 1ヘクタール当たりの算出。単位：プラ

費用便益分析（収支のシナリオ間での比較）：図 5-6 において、シナリオ間で費用、便益、収支の比較を行った。この図は、各シナリオの 15 年目の値を示す。大規模農園モデルのシナリオ（1 から 3）は ha、1 年間あたりの値を、垣根栽培モデルのシナリオ（4 および 5）は村、1 年あたりの現地通貨プラの値を示した。縦軸の正の値として、栽培、搾油、精製、肥料製造、非油脂燃料製造に関わる費用を棒グラフで示した。縦軸の負の値として、BDF、肥料、非油脂燃料の便益を同じく棒グラフで示した。また、費用から便益を減じた値（収支）を赤丸により示した。この赤丸が正の値であれば赤字を、負の値であれば黒字化を意味した。

大規模農園モデルにおいて、シナリオ１では費用が便益を上回っており、収支は赤字を示した。これは、シナリオ１費用は、研究で投入された値に基づくためであり、改善シナリオであるシナリオ２はわずかに費用が便益を下回り、シナリオ３では黒字化が達成された。

垣根モデルでは、シナリオ４、シナリオ５とも費用が便益を下回っており、多収性でない、現状のヤトロファ品種を用いても黒字化が可能であることが示唆された。

また、両モデルとも肥料や非油脂燃料など、非油脂バイオマスからの便益が大きな割合を占めた。

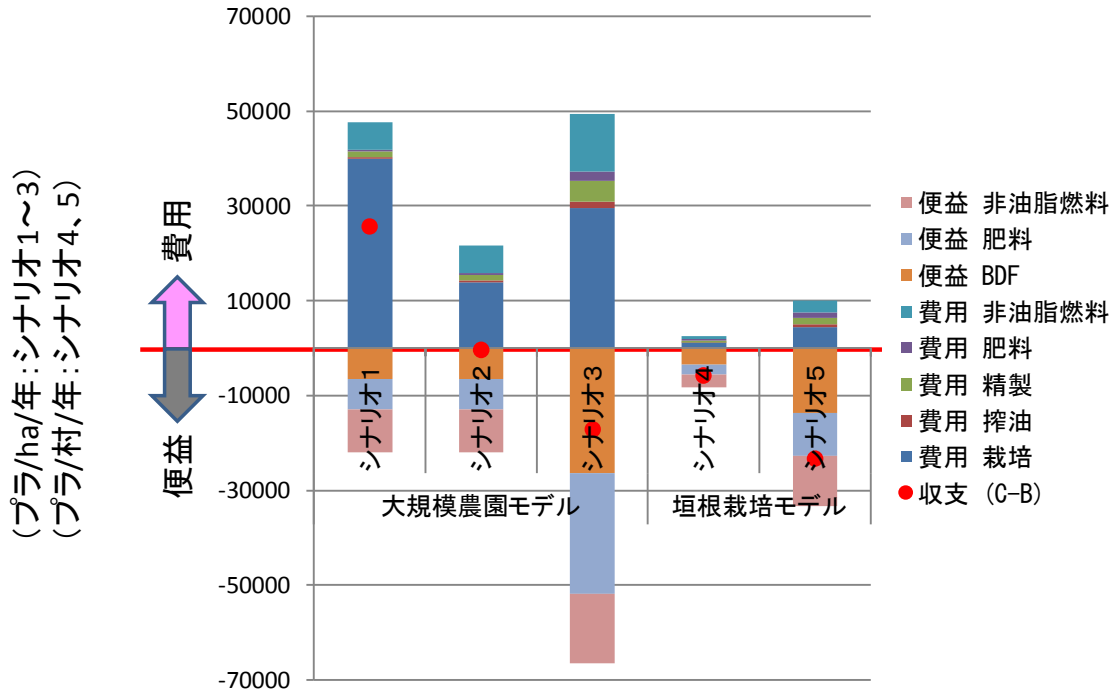


図 5-6 費用便益分析（15 年目）

考察： 大規模農園モデルにおいて黒字化を達成するためには、栽培活動における諸活動の経費削減、初期投資への公的補助に加え、育種及び栽培技術革新によるヤトロファ種子収量の増大が必要であることが示唆された。また、今回は議論の対象としなかった、収穫・ハスク取りなどの栽培活動、搾油、精製経費についても削減の方策を模索すべきであろう。

垣根栽培モデルにおいては、現状のヤトロファ品種を用いる基本シナリオ（シナリオ４）であっても黒字化が可能であることが明らかとなった。このモデルは、農村部の小規模農家が手間をかけずにヤトロファ・バイオマスエネルギー利用することを想定したモデルである。彼らにとって、当然、バイオディーゼルやクルードオイルへのイセンティブが最も高いと考えられるが、非油脂燃料・肥料など利用法の提示が十分になされれば、日常的な薪炭材や化学肥料の利用に代わる多角的なヤトロファ・バイオマスエネルギー普及の実現性が高いと考えられる。これは石油燃料、木質燃料利用の削減に直結し、温室効果ガス排出や砂漠化の抑制などの環境保全効果を発揮する。さらに、このモデルは農地以外の土地利用が基本であるので、食料生産との競合はもとより、土地利用の変化における環境影響、社会影響などが回避できる。

また、両モデルとも、非油脂バイオマスからの便益が占める割合は大きく、非油脂バイオマスの利用が採算性を改善する上で鍵となることが示唆された。

＜文献調査による事業導入の影響および要件の解析＞

ボツワナ大学のチームは、サハラ以南アフリカに先行導入されたプロジェクトに関する文献調査を行い、経済持続可能性、エネルギー政策、社会経済影響の観点から、ボツワナでの事業導入要件および問題点に関する分析を行った。その結果は次の４編の論文としてまとめられ、投稿された（一部受理）。

Economic Sustainability of Jatropha Production: Lessons from southern Africa
G. Mmopelwa, R. Chanda, D.L Kgathi, K. Kashe
A review of the sustainability of Jatropha projects for biodiesel production in southern Africa: Implications for energy policy in Botswana
Donald L Kgathi, G Mmopelwa, Raban Chanda, K Kashe and M Murray-Hudson.
Assessment of benefits and risks of growing Jatropha (*Jatropha curcas* L.) as a biofuel crop in sub-Saharan Africa: A contribution to agronomic and socio-economic policies
Keotshephile Kashe, Donald Kgathi, Mike Murray-Hudson, Kelebogile Mfundisi
The social impacts of Jatropha cultivation: literature-based lessons for Botswana
Chanda, R. Mmopelwa, G. &Kgathi, D.L.

a) Economic Sustainability of Jatropha Production: Lessons from southern Africa

南部アフリカ諸国におけるヤトロファの導入は新たな試みである。ヤトロファが耕作不適地で成長する能力、複数の利益、エネルギー安全保障を高める可能性、気候変動を緩和する可能性があるという主張は、いくつかの政府、民間団体、個々の農家に様々なビジネスモデル下で生産に投資するよう動機づけている。ボツワナで想定されているヤトロファのバイオディーゼル生産に教訓を提供する観点から、栽培の経済的影響に関する南アフリカ諸国の経験に関する文献をレビューした。生産に投資することによる経済的影響は国やプロジェクトによって異なるものの、ほとんどのプロジェクト特に商用プランテーションは、一部の国で放棄されている実態より、経済的に魅力的ではないことが明らかになった。本研究の結論として、危険性の大きい大規模な商業生産に着手する前に、作物の生産可能性を完全に理解するための研究を推薦する。

b） A review of the sustainability of Jatropha projects for biodiesel production in southern Africa: Implications for energy policy in Botswana

ヤトロファ・バイオ燃料の開発は、エネルギー安全保障、気候変動緩和、外貨節約、経済発展を達成するための戦略と考えられている。本稿では、ボツワナのバイオ燃料の開発政策の教訓を提供するために、南部アフリカのいくつかの国々を対象にヤトロファ・バイオ燃料開発が持続可能性に及ぼす影響を検討した。この文献レビューでは、低い種子収量、高い生産コスト、生産の遅れ、競争力のない原材料価格が原因で、自家消費もしくは販売用種子の生産を計画した大規模な商業農園のほとんどが、経済的に実行できないことが示された。一方、小規模ヤトロファ・バイオ燃料プロジェクトは、投入コストが低いために経済的に実行可能であることが明らかになった。社会的影響については、ヤトロファ栽培は土地の権利の喪失とその低い報酬と関連しており、土地や他の生産投入資材が食用作物からヤトロファに転用されると、食料安全保障が損なわれることが示された。プラスの社会的影響には、一部の国で雇用機会と所得の増加が含まれていた。ヤトロファ栽培は、環境的に土地利用転換に起因する生物多様性の喪失、水需要の増加および高炭素負荷などの影響に関連している。西部アフリカの一部の研究で明らかになったように、環境への積極的な影響には、放棄された農地でのヤトロファ栽培における投資に対する高いエネルギー回収率と高いGHG貯蓄が含まれる。本論文では、ボツワナ政府の政策について次の事項を要検討課題と結論付けた。

○初期段階ではバイオ燃料の研究開発プロジェクトを支援し、ボツワナの研究が高種子量品種を産出する時期まで大規模なプランテーションビジネスモデルを控える。
○生物多様性と気候変動に悪影響を及ぼし、土地利用の変化と高炭素負荷の削減を確実にするために、地域社会の土地権利の保護のための法的保護を導入する。

c) Assessment of benefits and risks of growing Jatropha (*Jatropha curcas* L.) as a biofuel crop in sub-Saharan Africa: A contribution to agronomic and socio-economic policies

2000 年代には、世界的にバイオ燃料への関心が強く再浮上または更新された。これは主に、エネルギー安全保障上の理由から、化石エネルギー源への依存を減らすための国家の必要性によって推進された。化石燃料の消費と人為的な気候変動との強い関連性もバイオ燃料がグリーンな代替エネルギーのひとつとして注目されている。しかし、バイオ燃料原料の栽培の促進には論争がつきまとっている。本論文は、ボツワナ政府が促進したいと望んでいるバイオエネルギー植物ヤトロファの栽培による社会的影響を取り巻く議論と証拠に着目した。この論文は、一般的なバイオ燃料栽培の影響に関する国際的な文献のレビュー、そして特にボツワナのための教訓（予防的およびその他の方法）と勧告を示すために、ヤトロファ栽培のレビューに基づいている。このレビューから現れた構図は、その栽培は、社会、特に農村社会のためのチャンスと課題が混在していることである。持続可能な発展の 3 底点の枠組みの中で、社会的約束とバイオ燃料生産の欠点のバランスの取れた処理が必要である。

ヤトロファは限られた水分と低い土壌肥沃度を持つ限界耕作地でも栽培でき、非食用の油を生産し、乾燥に強い植物である。しかし、これらは一方では、雑草および侵襲的な植物種を代表する属性でもある。これらの懸念に加えて、バイオ燃料生産が実際に GHG 排出を削減するかどうか一般的な疑問がある。現在、多くのバイオ燃料作物の潜在的な侵襲性、特にヤトロファ栽培の潜在的なリスクに関する情報は限られている。本論文は、バイオディーゼル用ヤトロファ栽培のリスクに重点を置いて、利益とリスクを評価することを目的とした。自然に発生しないような、生態系への植物の導入には、固有のリスクがある。大規模な商業栽培のために土地を開放する前に、侵襲的な危険性を予測するために、科学に基づくリスクアセスメント手順によってスクリーニングすべきである。純粋な GHG 貯蓄は、ヤトロファ栽培において、土地利用を変更せず（ヘッジモデルなど）化学肥料を使用しない作物管理の 2 つの主な要因を考慮すれば達成できる。

Ⅱ．国際共同研究実施上の課題とそれを克服するための工夫、教訓など（公開）

(1)プロジェクト全体

・プロジェクト全体の現状と課題、相手国側研究機関の状況と問題点、プロジェクト関連分野の現状と課題。

本国際共同研究プロジェクト発足時の合意事項として、日本側の JICA-JST からの予算支援に加え、ボツワナ政府からのプロジェクト予算措置を行い、後者はヤトロファ・プロジェクトに関連した修士・博士研究の奨学金に充当することが、PDM において合意されていた。しかしこの後者のボツワナ政府内の予算措置において遅れが生じ、5年間の研究期間のうち前半において、諸活動に遅れが生じた。しかし現在は、ボツワナ側において予算処置が行われ、ボツワナ側の活動への積極的な関与が実施されるようになった。これにより、プロジェクトに好影響を及ぼしている。ヤトロファ研究に関連した修士・博士課程へのボツワナ側研究者の進学が行われた状況であり、今後が楽しみである。

・各種課題を踏まえ、研究プロジェクトの妥当性・有効性・効率性・インパクト・持続性を高めるために実際に行った工夫。

上述のボツワナ政府予算の執行開始と大学院生の配置に伴い、本 SATREPS プロジェクト

の終了後の活動内容についても、前向きな議論がボツワナ研究者間で行われ、研究状況が好転した。

・プロジェクトの自立発展性向上のために、今後相手国（研究機関・研究者）が取り組む必要のある事項。

ボツワナ側と日本側では、事業を行う上でのスピード感に隔たりがある現状である。研究を企画し，成果を論文として纏める訓練を重要視した取り組みが必要と考える。
バイオ燃料事業は総合分野としての性格が強く、そのプロジェクトの計画策定及び運営については、幅広い情報収集と慎重かつ本質的な計画策定が重要と考えらえれる。ボツワナ政府側ではこれらの点でまだ人材育成が弱い点があるので、これらの点についてさらに人材育成が進展することが望まれる。
相手国においてバイオ燃料事業が持続するためには、国民の目に見える成果取り組みが大変重要である。下記の社会実装の項に記した、ボツワナ北東部のモデル村における地産地消型のヤトロファ・エネルギー利用の実証事業は、次段階として重要と考えられる。

・諸手続の遅延や実施に関する交渉の難航など、進捗の遅れた事例があれば、その内容、解決プロセス、結果。

上述のボツワナ政府内における予算措置の遅れを克服することについては、プロジェクト前半は交渉が難航した。プロジェクト中盤の中間評価のプロセスにおいて、この問題解決は大きく前進した。カギになった事項は、中間評価団におけるボツワナ側の評価団員の選定において、大変良い人選が行われたことであり、中立的かつ実効性のある働きかけが行われたことが、非常に大きかった。

(2)アウトプット１(栽培)

・ 相手国側研究機関との共同研究実施状況と問題点、その問題点を克服するための工夫、今後への活用。

2015 年 8 月以降、週 2 回の潅水を実施したところ，ヤトロファは順調に成長し，11月以降，花芽分化が見られた．しかし、温暖化の影響か40℃を超える猛暑に見舞われ、開花後、結実せず、枯死した。猛暑を避けるため、遮光などの工夫が必要であった。
ボツワナ農務省側では人材の入れ替わりが頻繁なため、技術移転をシンプルなレベルに限定する場面があった。微生物プロファイリングも現地では DGGE 装置を活用し、より高次元のデータ解析は輸入した土壌の日本で次世代シーケンサー計測を行うこととした。

・ 類似プロジェクト、類似分野への今後の協力実施にあたっての教訓、提言等。

雷対策が必要である．

(3) アウトプット２(育種)

・ 相手国側研究機関との共同研究実施状況と問題点、その問題点を克服するための工

夫、今後への活用。

ヤトロファ改良品種を育種するためには、乾燥冷害地域に適応しているボツワナ固有系統と、異なる形質を持つ第３国のヤトロファとの交配育種の推進が重要と考えている。生物資源のアクセスに係る諸問題があり、多国間でのヤトロファ生物資源の交換はまだ実現していないが、ボツワナ固有系統ヤトロファの諸性質の解明はこれら相互交換の第一歩であるため、論文等での公開を積極的に行うこととしている。

・ 類似プロジェクト、類似分野への今後の協力実施にあたっての教訓、提言等。

現地スタッフの意識や機器を正常に動かすためのインフラは、当初の想定以上に日本のそれとギャップがある。日本人の懸命さを実感してもらうためには、日本での長期生活経験をできる機会を増やしていくことが得策と考える。
SATREPS プロジェクトにおける学生の参画は非常に効果的である。ボツワナ現地への派遣において、日本側学生の中長期派遣が及ぼす好影響は大きく、その影響は交流分野のみならず、実際の研究成果の創出やプロジェクトの進展にも大きな影響を及ぼしている。学生をより積極的に派遣しやすくなるよう、JICA 短期ボランティア派遣との連携など、仕組みをさらに整えていくことが有効と思う。

(4) アウトプット 3(油脂利用)

・ 相手国側研究機関との共同研究実施状況と問題点、その問題点を克服するための工夫、今後への活用。

アウトプット 3 は、機材の関係よりボツワナ大学の機械工学科が中心になって日本側がサポートする形で研究の推進に当たった。主要機材であるエンジン性能試験機の購入が大幅に遅れたことと、搾油機が破損して搾油できない状態に陥ったこと、実験要員の配置が遅れたことなどによって、計画通りに進まない状態が長く続いた。そこでまず、種子から搾油した油を持ち込み、導入したものの稼働していなかった簡易バイオディーゼル製造キットを修士学生に指導して実際にバイオディーゼルを製造した。これが JICA ボツワナ事務所で高い評価を得て、モチベーションの向上につながった。また、日本側の短期専門家が数日間ボツワナ大学でカウンターパートと一緒に実験を行い、さらに、アウトプット 3 のリーダーと密に連絡をとった。また、JCC の圃場訪問などで小型発電機のデモ、ラボ見学が組まれ、次第に周囲の関心が高まった。JICA の最終評価前後に機材がすべて揃い、バイオディーゼルの製造も軌道に乗ったことより、一気に研究が進展した。また、ヤトロファ系統ごとの種子の分析は、日本で測定することに切り替えた。最終的には、ボツワナ大学がバイオディーゼル走行実験車両を購入し、研究継続の目途が立ったことと、無電化村における実証試験の計画ができるまでに、意欲が向上している。

・ 類似プロジェクト、類似分野への今後の協力実施にあたっての教訓、提言等。

現地では、機材導入に長い時間を要し、さらに、部品ひとつにとっても取り寄せるのに長い時間がかかって、計画の遅延や中断を余儀なくされることが多い。このような事態に迅速に対応できる体制を構築しておく必要がある。また、代替案を常に準備しておき、中断中も他の手段を使うか、他の実験を遂行するなどの工夫が必要である。すなわ

ち、状況に応じた柔軟な対応が必要である。いうまでもないことであるが、相互の信頼性構築が重要であるので、定期的に意見交換を行うことが重要である。

(4) アウトプット４(非油脂利用)

・ 相手国側研究機関との共同研究実施状況と問題点、その問題点を克服するための工夫、今後への活用。

アウトプット４は、ボツワナでの共同実験、および、日本側での実験の２本立ての体制で進めた。日本側でのバイオ炭施用効果に関する研究は、比較的早い時期にスムーズに進んだ。一方、ボツワナ側ではバイオ炭の簡易炭化炉の製造から進めざるを得ず、勢い遅れがちとなった。このような状況でカウンターパートの本邦研修が始まり、研修員として２か月間のバイオマス等の研修を受ける機会を得た。これによって、モチベーションが高まり、独自の炭化炉の開発、固形燃料の製造が試みられた。それに合わせて、必要な器具（油圧ジャッキや七輪など）を短期専門家の渡航の折に持ち込み、体制を整備した。

・ 類似プロジェクト、類似分野への今後の協力実施にあたっての教訓、提言等。

カウンターパートの本邦研修はモチベーション向上に大きく寄与する。研修を受けたカウンターパートのうち、２名がすでに博士課程に入学し、一人が待っている状態である。他にも予備軍がおり、本邦研修の効果は非常に大きい。これは、日本側の仕事への取組みなどにある程度の理解が深まることが起因していると思われ、現地での会議や共同作業などでは難しい面があると感じられた。

(5) アウトプット５(環境・社会・経済評価)

・ 相手国側研究機関との共同研究実施状況と問題点、その問題点を克服するための工夫、今後への活用。

ボツワナ側研究者５名の所属機関はボツワナ大学であったが、彼らの所属先は理学部とオカバンゴ研究所と２つに分かれており、所在地も首都ハボロネおよびマウンと600kmほど離れていた。また、当初のリードリサーチャーはマウンに位置するオカバンゴ研究所であった。プロジェクトの主な研究サイトのハボロネから距離があり、プロジェクト開始から３ヶ年は研究活動が停滞していたが、推進は困難であった。

そこで、リードリサーチャーをハボロネキャンパスの理学部に所属する研究者へと変更するよう働きかけ、実現した。ちなみに変更後のリードリサーチャーは数年前までオカバンゴキャンパスに所属していたこともあり、変更後にはオカバンゴキャンパスの研究者との密なコミュニケーションが可能となった。

頻繁な研究会合が可能となり、４年目、５年目には顕著な進展が見られ、最終的にはボツワナ側研究者を筆頭著者とする論文が４本、日本側研究者を筆頭著者と刷る論文が１本国際誌に投稿された（うち１本 accepted, 他４本は査読中)。

・ 類似プロジェクト、類似分野への今後の協力実施にあたっての教訓、提言等。

共同研究機関の所在地が主活動地と近距離であり、かつ、1機関であることが理想ではないか。

Ⅲ．社会実装（研究成果の社会還元）（公開）

(1)成果展開事例

・本共同研究の活動については、ボツワナの中期国家計画である National Development Plan 11 (2017-2022)のドラフト版に明記された。国家計画の中で特定のプロジェクトが明記されることは特筆すべきことであり、本共同研究が、ボツワナ側のエネルギー政策の重要項目の一つとして位置付けられ、期待されていることの現れと言える。更に、ヤトロファ利用を含めた再生利用可能エネルギーの開発は、長期国家計画である Vision 2036 にも記載された。
・共同共同研究機関である相手国資源省に対して本事業で得られた成果を提供し、大統領府主催の政策審議会合における資料として使用された。

(2)社会実装に向けた取り組み

・ボツワナにおいてヤトロファ栽培を効率的に拡大するために，本プロジェクトで開発した栽培システムを「セベレシステム」として取りまとめ，コミュニティベースの小規模栽培から大規模プランテーションまでに適用できるようにした。
・本研究開発における成果を活用して、ボツワナ北東部のモデル村において地産地消型のヤトロファ・エネルギー利用の実証事業を行うことについて、準備調査が進められている。
・ヤトロファ油脂の化成品利用に関して、新たに化学系日系企業との共同研究策定について契約準備中である。

Ⅳ．日本のプレゼンスの向上（公開）

2014年には、ボツワナの新聞（Sunday Standard紙）に、常駐する石本長期専門家および小中調整員の顔写真と共に、SATREPS事業が紹介された。

2015度には、ボツワナのマスメディアによる取材（テレビ・ラジオ局3社、新聞4社）が2016年2月2日に、石本長期専門家およびボツワナ共同研究者に対して行われた。2月3日、Radio Botswana 2の18時英語ニュース、Botswana Televisionの19時の英語ニュースにおいて（両社とも政府系）、Mmegi紙2月5日号11、12面に、Botswana GUARDIAN紙2月5日号7、9面に、Weekendpost 紙2月6日～12日号15面、Botswana Daily News紙2月8日8面に（Botswana Daily News紙のみ政府系、他紙は民間）、SATREPS事業が紹介された。実験圃場、実験機器、実験風景、インタビュー等、大々的に扱われ、当事業への関心、期待の高さが伺われた。

2016年度には、石本長期専門家およびボツワナ共同研究者への取材記事が、Air Botswana機内誌（Peolwane誌）に掲載された。実験圃場での活動、共同研究の取り組み、本事業の今後の展望に関する特集が組まれた。Air Botswanaは、政策や経済活動に影響力のある政府関係者、ビジネスマンなどが利用する交通機関である。

Ⅴ．成果発表等【研究開始～現在の全期間】（公開）

Ⅵ. 投入実績【研究開始～現在の全期間】（非公開）

Ⅶ. その他（非公開）

Ⅵ. 成果発表等

（1）論文発表等【研究開始～現在の全期間】（公開）

①原著論文（相手国側研究チームとの共著）

年度	著者名,論文名,掲載誌名,出版年,巻数,号数,はじめ－おわりのページ	DOIコード	国内誌/国際誌の別	発表済/in press/acceptedの別	特記事項（分野トップレベル雑誌への掲載など、特筆すべき論文の場合、ここに明記ください。）
2013	Inafuku-Teramoto, S., Mazereku, C., Coetzee, T., Gwafila, C., Lekgari, LA., Ketumile D., Fukuzawa, Y., Yabuta, S., Masukujane, M., George DGM., Chite, SM., Ueno, M., Kawamitsu, Y., Akashi, K. (2013) Production approaches to establish effective cultivation methods for Jatropha (Jatropha cruces L.) under cold and semi-arid climate conditions. International J. of Agronomy and Plant Production, 4(S), 3804-3815.		国際誌	発表済	
2014	Tominaga, J., Inafuku, S., Coetzee, T. and Kawamitsu, Y. "Diurnal regulation of photosynthesis in Jatropha curcas under drought during summer in a semi-arid region" (2014) Biomass and Bioenergy 67: 279-287.		国際誌	発表済	
2016	Ogura, T., Date, Y., Masukujane, M., Coetzee, T., Akashi, K. and Kikuchi, J. "Improvement of physical, chemical, and biological properties of aridisol from Botswana by incorporation of torrefied biomass" Sci. Rep. 6, 28011 (2016).		国際誌	発表済	Scientific Reports誌はNature, Science等では掲載されない多様な分野を扱う一般誌で、オープンアクセスなためアフリカ諸国でも無料ダウンロードして読むことができる。
2017	Kashe, K., Kgathi, D., Hudson, M. M., Mfundisi, K. "Assessment of benefits and risks of growing Jatropha (Jatropha curcas L.) as a biofuel crop in sub-Saharan Africa: A contribution to agronomic and socio-economic policies"Journal of Forestry Research		国際誌	accepted	

論文数	4	件
うち国内誌	0	件
うち国際誌	4	件
公開すべきでない論文		件

②原著論文（上記①以外）

年度	著者名,論文名,掲載誌名,出版年,巻数,号数,はじめ－おわりのページ	DOIコード	国内誌/国際誌の別	発表済/in press/acceptedの別	特記事項（分野トップレベル雑誌への掲載など、特筆すべき論文の場合、ここに明記ください。）
2011	Boyer, J.S., Kawamitsu, Y. (2011) Photosynthesis gas exchange system with internal CO2 directly measured. Environ. Control Biol. 49, 193-207.		国際誌	発表済	
2012	Fukuzawa, Y., Tominaga, J., Akashi, K., Yabuta, S., Ueno, M., Kawamitsu, Y. (2012) Photosynthetic Gas Exchange Characteristics in Jatropha curcas L. Plant Biotechnol., 29, 155-162.		国際誌	発表済	

2012	Sano, R., Ara, T., Akimoto, N., Sakurai, N., Suzuki, H., Fukuzawa, Y., Kawamitsu, Y., Ueno, M., Shibata, D. (2012). Dynamic metabolic changes during fruit maturation in Jatropha curcas L. Plant Biotechnol. 29, 175–178.		国際誌	発表済	
2012	Watanabe, T., Shino, A., Akashi, K., Kikuchi, J. (2012) Spectroscopic investigation of tissue-specific biomass profiling for Jatropha curcas L. Plant Biotechnol., 29, 163–170.		国際誌	発表済	
2012	Sakurai, N., Ogata, Y., Ara, T., Sano, R., Akimoto, N., Hiruta, A., Suzuki, H., Kajikawa, M., Widyastuti, U., Suharsono, S., Yokota, A., Akashi, K., Kikuchi, J., Shibata D. (2012) Development of KaPPA-View4 for omics studies on Jatropha and a database system KaPPA-Loader for construction of local omics databases. Plant Biotechnol., 29, 131–135.		国際誌	発表済	
2012	Kajikawa, M., Morikawa, K., Inoue, M., Widyastuti, U., Suharsono, S., Yokota, A., Akashi, K. (2012) Establishment of bispyribac selection protocols for Agrobacterium tumefaciens- and Agrobacterium rhizogenes-mediated transformation of the oil seed plant Jatropha curcas L. Plant Biotechnol., 145–153.		国際誌	発表済	
2012	Maroušek, J., Itoh, S., Higa, O., Kondo, Y., Ueno, M., Suwa, R., Komiya, Y., Tominaga, J., and Kawamitsu, Y. (2012) The use of underwater high-voltage discharges to improve the efficiency of Jatropha curcas L. biodiesel production. Biotechnology and Applied Biochemistry, 9, 451–456.		国際誌	発表済	
2012	Kondo, Y., Fukuzawa, Y., Kawamitsu, Y., Ueno, M., Tsutsumi, J., Takemoto, T., and Kawasaki, S. (2012) A new application of bagasse char as a solar energy absorption and accumulation material. Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh, 103, 1–8.		国際誌	発表済	
2013	Hoshiyasu, S., Kohzuma, K., Yoshida, K., Fujiwara, M., Fukao, Y., Yokota, A., Akashi, K. (2013) Potential involvement of N-terminal acetylation in the quantitative regulation of the ε subunit of chloroplast ATP synthase under drought stress. Biosci. Biotechnol. Biochem., 77, 998–1007.		国際誌	発表済	
2013	Maroušek, J., Itoh, S., Higa, O., Kondo, Y., Ueno, M., Suwa, R., Komiya, Y., Tominaga J., and Kawamitsu Y. (2013) Pressure shockwaves to enhance oil extraction from Jatropha curcas L. Biotechnol. & Biotechnol. Eq. 2013, 27(2), 3654–3658.		国際誌	発表済	

2013	Maroušek, J., Itoh, S., Higa, O., Kondo, Y., Ueno, M., Suwa, R., Tominaga J., and Kawamitsu Y. (2013) Enzymatic hydrolysis enhanced by pressure shockwaves opening new possibilities in Jatropha curcas L. processing. Journal of Chemical Technology & Biotechnology, Volume 88, issue 9 (September), p. 1650–1653. ISSN: 0268–2575 DOI: 10.1002/jctb.4014. John Wiley & Sons, Ltd		国際誌	発表済	
2013	Marou š ek, J., Kondo, Y., Ueno, M., and Kawamitsu, Y. (2013) Commercial–scale utilization of greenhouse residues. Biotechnology and Applied Biochemistry Vol. 60(2): 253–258, March/April.		国際誌	発表済	
2013	Ogura, T., Date, Y. and Kikuchi, J. (2013) Differences in cellulosic supramolecular structure of compositionally similar rice straw affect biomass metabolism by paddy soil microbiota. PLoS ONE 8, e66919.		国際誌	発表済	
2014	Yamazawa, A., Date, Y., Ito, K. and Kikuchi, J. (2014) Visualizing microbial dechlorination processes in underground ecosystem by statistical correlation and network analysis approach. J. Biosci. Bioeng. 117, 305–309.		国際誌	発表済	
2014	Watanabe, T., Shino, A., Akashi, K. and Kikuchi, J.* " Chemical profiling of Jatropha tissues under different torrefaction conditions: application to biomass waste recovery" PLoS ONE 9, e106893 (2014)	doi:10.1371/journal.pone.0106893	国際誌	発表済	PLoS ONE誌はNature, Science等では掲載されない多様な分野を扱う一般誌で、オープンアクセスなためアフリカ諸国でも無料ダウンロードして読むことができる。
2014	Komatsu, T., Oishi, R., Shino, A. Akashi, K. and Kikuchi, J.* "Multi–spectroscopic analysis of seed quality and 13C–stable–isotopologue monitoring in initial growth metabolism of Jatropha curcas L. using stable–isotope labeling" Metabolites 4, 1018–1033 (2014).	doi:10.3390/metabo4041018	国際誌	発表済	
2015	薮田伸・箱山晋・稲福さゆり・福澤康典・川満芳信 "出葉転換点および幼穂形成始期により分画したイネの成長相における感光性評価". (2015) 日作紀. 84(1):64–68.		国内誌	発表済	
2015	Tominaga J. & Kawamitsu Y. 2015. Cuticle affects calculations of internal CO_2 in leaves closing their stomata. Plant and Cell Physiology 56:1900–1908.		国際誌	発表済	

2015	Kawasaki S., Tominaga J., Yabuta S., Watanabe K., Jaiphong T., Ueno M. & Kawamitsu Y. 2015. Responses of growth, photosynthesis, and associated components to hypoxia at different light intensities in red leaf lettuce. Scientia Horticulturae 193:330–336.		国際誌	発表済	
2015	Tominaga J. & Kawamitsu Y. 2015. Tracing photosynthetic response curves with internal CO_2 measured directly. Environmental Control in Biology 53:27–34.		国際誌	発表済	
2015	Kawasaki S., Tominaga J., Uehara N., Ueno M. & Kawamitsu Y. 2015. Effects of long-term exposure to different O_2 concentrations on growth and phytochemical content in red leaf lettuce. Environmental Control in Biology 53:117–122.		国際誌	発表済	
2015	Tominaga J., Yabuta S., Fukuzawa Y., Kawasaki S., Jaiphong T., Suwa R. & Kawamitsu Y. 2015. Effects of vertical gradient of leaf nitrogen content on canopy photosynthesis in tall and dwarf cultivars of sorghum. Plant Production Science 18:336–343.		国際誌	発表済	
2015	Nanasato, Y., Kido, M., Kato, A., Ueda, T., Suharsono, S., Widyastuti, U., Tsujimoto H., Akashi, K. (2015) Efficient genetic transformation of Jatropha curcas L. by means of vacuum infiltration combined with filter-paper wicks. In Vitro Cellular and Developmental Biology – Plant, 51, 399–406.		国際誌	発表済	本技術を発表した学術論文は、ヤトロファの分子育種技術を実用に資するレベルに飛躍的に向上させたとして、米国組織培養学会(The Society for In Vitro Biology)のHP上において、2015年第4四半期のJournal Highlightsとして紹介され高評価を受けた (https://www.sivb.org/InVitroReport/issue-49-4-october-december-2015/journal-highlights-2/).
2015	Ogura, T., Date, Y., Tsuboi, Y. and Kikuchi, J.* "Metabolic dynamics analysis by massive data integration: application to tsunami-affected field soils in Japan" *ACS Chem. Biol.* 10, 1908–1915 (2015)	DOI: 10.1021/cb500609p	国際誌	発表済	
2015	Ogura, T., Hoshino, R., Date, Y. and Kikuchi, J.* "Visualization of microfloral metabolism for marine waste recycling" *Metabolites* 6, 7 (2016).	doi:10.3390/metabo6010007	国際誌	発表済	
2016	Akashi, K., Yoshimura, K., Kajikawa, M., Hanada, K., Kosaka, R., Kato, A., Nanasato, Y., Tsujimoto, H., Yokota, A. (2016) Potential involvement of drought-induced Ran GTPase CLRan1 in root growth enhancement in a xerophyte wild watermelon. Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry, 80, 1907–1916.		国際誌	発表済	

2017	Akashi, K., Mifune, Y., Morita, K., Ishitsuka, S., Tsujimoto, H., Ishihara, T. (2017) Spatial accumulation pattern of citrulline and other nutrients in immature and mature watermelon fruits.Journal of the Science of Food and Agriculture. 97(2), 479-487		国際誌	発表済	
2017	藪田 伸・冨永 淳・河崎俊一郎・Thanankorn JAIPHONG・渡邊健太・上野 正実・川 満 芳 信 "BA (6-Benzyladenine) 剤 散 布 が ヤトロファ (Jatropha curcas L.)の子実収量およびその構成要素へ与える影響" 熱帯農業研究		国内誌	accepted	

論文数 28 件
うち国内誌 2 件
うち国際誌 26 件
公開すべきでない論文 件

③その他の著作物(相手国側研究チームとの共著)(総説、書籍など)

年度	著者名,タイトル,掲載誌名,巻数,号数,頁,年		出版物の種類	発表済 /in press /acceptedの別	特記事項
2016	Jatropha Cultivation in Botswana /A guideline for researchers / technicians second edition		冊子	発表済	

著作物数 1 件
公開すべきでない著作物 件

④その他の著作物(上記③以外)(総説、書籍など)

年度	著者名,論文名,掲載誌名,出版年,巻数,号数,はじめ－おわりのページ		出版物の種類	発表済 /in press /acceptedの別	特記事項
2011	明石　欣也 (2011)「アフリカにおけるバイオ燃料開発状況」。バイオサイエンスとインダストリー, vol 69, pp 60-64, 財団法人バイオインダストリー協会		総説	発表済	
2012	Akashi, K.: Jatropha research: A new frontier for biofuel development. Plant Biotechnol. 29, 121.		総説	発表済	
2012	明石　欣也、橋詰　利治 (2012)「注目されるスイカの遺伝子」。In: 池谷和信監修、ボツワナを知るための52章、明石書店、pp 35-40.		総説	発表済	

2012	川満芳信・上野正実・近藤義和・今井勝 （2012） 琉球大学における亜熱帯型植物工場。In:野口伸・橋本康・村瀬治比古 編著 太陽光植物工場の新展開 pp. 267-279.		総説	発表済	
2012	菊地淳 (2012)“微生物のもつ基本的な代謝を理解する” 微生物機能学—微生物リソースと遺伝子リソースの利用— （森田英俊編）、三共出版.		総説	発表済	
2012	菊地淳 (2012)“糖質の分析 核磁気共鳴法” 植物細胞壁 ー基礎と応用— （西谷和彦、梅澤俊明編）、講談社.		総説	発表済	
2013	Proceeding: 1st Jatropha Symposium in Botswana (2013).pp1-48.		冊子	発表済	
2014	菊地淳 “分子複雑系” NMR 5, 78-82 (2014).		総説	発表済	
2014	菊地淳 “NMRにおけるイノベーション” 生物工学会誌 92, 561 (2014).		総説	発表済	
2014	小松功典、菊地淳 “複雑系高分子群に挑むバイオマスNMRの世界” 細胞工学 33, 843-849 (2014).		総説	発表済	
2014	Dr. Sayuri Inafuku、Jatropha Cultivation in Botswana		冊子	発表済	
2015	Akashi, K., Nanasato, Y.: Recent progress in the genetic engineering of biofuel crops. In: Kumar, A., Probst, P., Ogita, S. (eds), Biofuels: Green house gas mitigation and global warming next generation biofuels and role of biotechnology – A Perspective. Springer, in print		総説	in press	

著作物数 12 件

公開すべきでない著作物 1 件

⑤研修コースや開発されたマニュアル等

年度	研修コース概要（コース目的、対象、参加資格等）、研修実施数と修了者数	開発したテキスト・マニュアル類	特記事項
2014	Jatropha Omics course（ヤトロファを実験対象にオミクス解析技法を習得、ボツワナ研究者対象）、研修実施数1、2名	Jatropha Omics Manual	プロテオーム解析およびRNAseq解析
2015	本邦研修（BDFに関する知識，ヤトロファ栽培技術と生長計測技術の移転，ボツワナ農務省作物部門女性若手研究者），2か月，2名	Biodisel	日本でのBDF作成と利用例の紹介，ラボレベルでの製作・注意点について

2016	Plant Molecular Biology(ヤトロファを実験対象に遺伝子解析および遺伝子組換え手法を取得、ヤトロファ研究者対象、研修実施数1、２名）		
2016	Sustainable Rural Development by Biomass(ヤトロファを実験対象にバイオマス変換及び利用法を習得、ヤトロファ研究者対象、研修実施数1、２名）		

Ⅵ. 成果発表等

（2）学会発表【研究開始～現在の全期間】（公開）

①学会発表（相手国側研究チームと連名）（国際会議発表及び主要な国内学会発表）

年度	国内/国際の別	発表者（所属）、タイトル、学会名、場所、月日等	招待講演/口頭発表/ポスター発表の別
2014	国内学会	伊達 康博, 渡邊 太二, 小倉 立己, Masego Masukujane, 坂田 研二, Stephen M. Chite, 明石 欣也, 菊地 淳 "ボツワナ共和国のヤトロファ栽培土壌における有機物・無機物・微生物群プロファイリング" 第66回日本生物工学会年次大会、札幌 2014年9月11日	ポスター発表
2015	国際学会	石本雄大、Ms. Tidimalo Coetzee、information-Based Optimization of Jatropha Biomass Energy Production in the Frost and Drought-Prone Regions of Botswana	招待講演
2015	国内学会	冨永淳, 藪田伸, Radikgomo M., Kgokong S. B., 福澤康典, 稲福(寺本)さゆり, 石本雄大, 中原麻衣, 菊池淳, 明石欣也, 上野正実, 川満芳信. ボツワナで実施中のSATREPSの紹介. 生物環境工学会九州支部会, 沖縄, 2015年11月	ポスター発表
2015	国内学会	藪田ら(琉大農), ボツワナ共和国内で栽培したヤトロファ4年生株の成長とバイオマス収量について, 沖縄農業研究会, 沖縄, 8月7日	ポスター発表
2015	国内学会	中原麻衣, 冨永 淳, 藪田 伸, マリア R., シルビア K., 石本雄大, 上野正実, 川満芳信. ボツワナ共和国において2013～2015年に取得した気象観測データの解析	ポスター発表
2016	国内学会	中原麻衣, 藪田伸, 冨永淳, マリア R, 上野正実, 川満芳信. 乾燥冷地ボツワナにおける気象データの解析およびヤトロファ栽培土壌の特性. 沖縄農業研究会, 沖縄, 2016年8月12日	ポスター発表
2016	国内学会	上野正実・平良英三・川満芳信・藪田伸 ボツワナのヤトロファ圃場に設置した定点カメラによる生育情報の解析. 沖縄農業研究会, 沖縄, 2016年8月12日	ポスター発表
2016	国内学会	上野正実・川満芳信・藪田伸・渡辺健太・城間・小中隆文 簡易炭化炉によるヤトロファ・バイオチャーの安定製造技術に関する研究. 沖縄農業研究会, 沖縄, 2016年8月12日	ポスター発表
2016	国内学会	藪田伸・冨永淳・石本雄大4,5)・コッツェー T・シルビア B・川満芳信 ボツワナ共和国在来ヤトロファからの優良系統の選抜 . 沖縄農業研究会, 沖縄, 2016年8月12日	ポスター発表

招待講演 1 件

口頭発表　0 件
ポスター発表　8 件

②学会発表（上記①以外）（国際会議発表及び主要な国内学会発表）

年度	国内/国際の別	発表者（所属）、タイトル、学会名、場所、月日等	招待講演/口頭発表/ポスター発表の別
2011	国際学会	Kato, A., Kajikawa, M., Yokota, A. and Akashi, K. (2011) Functional analysis of drought-induced transcriptional regulatory factors in the roots of wild watermelon. The 7th Asian Crop Science Association Conference. September 27, Bogor, Indonesia.	ポスター発表
2011	国内学会	Akashi, K. (2011) Citrullus and Jatropha: Harnessing plant genetic resources for biomass production in Botswana. 28th IPSR International Symposium (co-sponsored by JSPS-AASPP). “Crop Production in East Africa and Innovative Plant Stress Science”. Oct 7, Kurashiki, Okayama.	招待講演
2011	国内学会	梶川昌孝・尾形善之・Sony Suharsono・Utut Widyastuti Suharsono・足立直樹・近藤伸二・菊地淳・横田明穂・明石欣也: バイオ燃料植物ヤトロファの登熟期果実における代謝制御. 日本植物細胞分子生物学会本大会, 福岡. 2011.9.6.	口頭発表
2011	国内学会	星安紗希・吉田和生・上妻馨梨・藤原正幸・深尾陽一朗・横田明穂・明石欣也: 強光・乾燥ストレス下における葉緑体ATP合成酵素 ε サブユニットの量的制御. 日本植物細胞分子生物学会本大会, 福岡. 2011.9.6.	口頭発表
2012	国内学会	明石欣也 (2012)「アジア・アフリカの海外パートナーと連携したバイオ・ディーゼル植物ヤトロファの研究開発」、第二回熱帯人工林フラッグシップシンポジウム（第203回生存圏シンポジウム）3月21日、京都	招待講演
2012	国内学会	川満芳信・上野正実 (2012)「熱帯におけるサトウキビ由来のバイオ燃料の持続的生産と利用」、第二回熱帯人工林フラッグシップシンポジウム（第203回生存圏シンポジウム）3月21日、京都	招待講演
2012	国際学会	Kikuchi, J. ″Multivariate analysis of biomolecular complexties measured by solution and solid-state NMR″ 41st Korean Korean Magnetic Resonance Society, June 29, Jeju, Korea	招待講演
2012	国内学会	明石欣也 (2012) 「バイオ・ディーゼル植物ヤトロファのオミクス解析と脂質代謝工学」、日本植物細胞分子生物学会シンポジウム「植物バイオマス増産と高機能化に向けた多角的な技術開発アプローチ」。8月4日、奈良。	招待講演

2012	国内学会	明石欣也 (2012)「バイオ燃料植物の生産性強化を目指した栽培・育種研究－ボツワナ乾燥冷害地域におけるヤトロファ・バイオエネルギー生産のシステム開発」、JST/JICA/AISTシンポジウム「バイオマス燃料の事業化に向けた国際戦略シンポジウム」。9月4日、東京。	招待講演
2012	国内学会	明石欣也 (2012) 「油脂バイオマス作物ヤトロファの研究開発の現状と展望」、日本育種学会2012年秋季大会シンポジウム「我が国におけるバイオマス資源作物の現状と今後の展望」。9月14日、京都。	招待講演
2012	国内学会	渡辺 太二、篠 阿弥宇、明石 欣也、菊地 淳 (2012) ヤトロファ栽培・収穫時未利用バイオマスの資源化を目指した物理化学特性解析、日本農芸化学会本大会、3月、京都	口頭発表
2012	国内学会	大石梨沙、渡邊太二、篠阿弥宇、菊地淳(2012) 植物代謝活性の評価技術高度化の試み 第51回NMR討論会、11月８日、名古屋	ポスター発表
2012	国内学会	明石欣也・梶川昌孝・尾形善之・Sony Suharsono・Utut Widyastuti・足立直樹・近藤伸二・菊地淳・横田明穂: バイオ燃料植物ジャトロファの脂肪酸代謝遺伝子群の転写制御. 日本植物生理学会本大会, 京都. 2012.3.	口頭発表
2012	国内学会	明石欣也・梶川昌孝・尾形善之・Sony Suharsono・Utut Widyastuti・足立直樹・近藤伸二・菊地淳・横田明穂: バイオ・ディーゼル植物ヤトロファの登熟期果実における脂質代謝の転写制御. 日本農芸化学会本大会, 京都. 2012.3.	口頭発表
2012	国内学会	星安紗希・吉田和生・藤原正幸・深尾陽一朗・横田明穂・明石欣也: N末端アセチル化修飾による葉緑体ATP合成酵素 ε サブユニットの量的制御, 日本農芸化学会本大会,京都. 2012.3.	口頭発表
2012	国内学会	渡辺太二・篠阿弥宇・明石欣也・菊地淳: ヤトロファ残渣バイオマスの半炭化特性. 日本生物工学会本大会, 神戸. 2012.10.25.	ポスター発表
2012	国内学会	明石欣也: アジア・アフリカの海外パートナーと連携したバイオ・ディーゼル植物ジャトロファの研究開発. 日本生物工学会大会シンポジウム, 多様なバイオディーゼル燃料がポスト化石燃料時代の地球に果たす役割, 神戸. 2012.10.25.	招待講演
2012	国内学会	明石欣也: 野生植物の遺伝子資源を利用したバイオ燃料植物ヤトロファの分子育種.日本農芸化学会中部支部ミニシンポジウム, 日本発、商業化をめざす遺伝子組換え作物, 名古屋. 2012.10.27.	招待講演
2013	国内学会	Akashi, K. (2013) The SATREPS project for the information-based optimization of Jatropha biomass energy production in the frost- and drought-regions around Kalahari Desert in Botswana. The 6th international symposium on green biotechnology for global sustainability. Osaka, 2013.1.10.	招待講演

2013	国際学会	Akashi, K. (2013) Exploring genetic resources of drought-resistant wild watermelon from the Kalahari Desert of Africa for the molecular breeding of Jatropha curcas. Institut Pertanian Bogor Seminar, Bogor, Indonesia, 2013.3.27.	招待講演
2013	国内学会	明石欣也: ボツワナ乾燥冷害地域におけるヤトロファ・バイオエネルギー生産のシステム開発－アフリカ・ボツワナの乾燥地植物に秘められたエネルギーの利用－. 食品産業懇談会 (二木会)招待講演会, 東京. 2013.5.9.	招待講演
2013	国内学会	明石欣也: 野生種スイカとバイオ燃料植物ジャトロファ:乾燥地植物の環境耐性メカニズムの理解と応用. 農芸化学の未来開拓セミナー, 中四国支部若手シンポジウム, 岡山. 2013.5.10.	招待講演
2013	国内学会	明石欣也・菊地淳・川満芳信:ボツワナ乾燥冷害地域におけるヤトロファ・バイオエネルギー生産のシステム開発—アフリカ・ボツワナの乾燥地植物に秘められたエネルギーの利用—. バイオマス・エキスポ2013, 東京. 2013.5.29.	招待講演
2013	国内学会	明石欣也: バイオ燃料植物ジャトロファの分子生物学・代謝工学と育種. 農業生物資源研究所, ガンマ・フィールドシンポジウム, 水戸. 2013.7.17.	招待講演
2013	国内学会	冨永淳・稲福(寺本)さゆり・薮田伸・Jaiphong Thanankorn・上野正実・川満芳信(2013) 夏季乾燥地におけるヤトロファ(Jatropha curcus)光合成日変化の気孔および非気孔制御、日本作物学会。9月10日、鹿児島。	口頭発表
2013	国内学会	薮田 伸・箱山 晋・稲福さゆり・福澤康典・川満芳信 (2013) 出葉転換点および幼穂形成始期により分画したイネの生長相における感光性評価、日本作物学会。9月10日、鹿児島。	口頭発表
2013	国内学会	七里 吉彦、木戸 真史、明石 欣也 (2013)「バイオ燃料植物ヤトロファ (Jatropha curcas L.) の形質転換系の改良」、日本植物細胞分子生物学会、9月9-13日、北海道	口頭発表
2013	国際学会	Tominaga, J., Inafuku, S., Jaiphong, T., Ueno, M. and Kawamitsu, Y. (2013) Diurnal photosynthesis in Jatropha (Jatropha curcas L.) during winter in subtropics and semi-arid region. The 10th Biomass Asia Workshop. Aug 5-6, Bangkok, Thailand.	ポスター発表
2013	国際学会	Jaiphong, T., Fukuzawa, Y, Tominaga, J., Kawasaki, S., Yabuta, S., Kawamitsu, Y., Ueno, M., Chinawong, S., Sathuwijarn, S. and Kumpeangkeaw, A. (2013) Production System and Possibility to Utilize Jatropha (Jatropha curcas L.) for Biomass Energy. The 10th Biomass Asia Workshop. Aug 5-6, Bangkok, Thailand.	ポスター発表
2013	国内学会	冨永淳・河崎俊一郎・薮田伸・上原直子・上野正実・川満芳信 (2013)「ボツワナにおけるヤトロファの葉の光合成速度の日変化」、日沖縄農業研究会。8月9日、沖縄。	ポスター発表

2013	国内学会	T. J. ・河崎俊一郎・冨永淳・藪田伸・上野正実・川満芳信 (2013)「ヤトロファーのバイオマス生産とエネルギー利用に関する研究」、日沖縄農業研究会。8月9日、沖縄。	ポスター発表
2013	国内学会	藪田伸・冨永淳・稲福さゆり・福澤康典・上野正実・川満芳信(2013)「JST/JICA SATREPS事業:ボツワナ国ヤトロファプロジェクト」、沖縄農業研究会。8月9日、沖縄。	ポスター発表
2013	国際学会	Kato, A., Kajikawa, M., Yokota, A., Akashi, K.: Exploring useful genetic resources in Botswana watermelon, Jatropha Research and Production in Southern Africa, Gaborone, Botswana. 2013.8.8.	ポスター発表
2013	国際学会	Nanasato, Y., Kido, M., Akashi, K.: Improvement of Agrobacterium-mediated transformation of Jatropha curcas L., Gaborone, Botswana. 2013.8.8.	ポスター発表
2013	国内学会	植田朋樹、七里吉彦、明石欣也 (2013)「ヤトロファ (Jatropha curcas L.) 種子における脂質生合成酵素DGATの機能解析」、日本植物細胞分子生物学会、9月9-13日、北海道	ポスター発表
2014	国内学会	明石欣也: 熱帯・亜熱帯・乾燥帯における植物バイオマス生産と多様性:ジャトロァ非油脂バイオマスの開発事例. 第4回 生存圏熱帯人工林フラッグシップシンポジウム, 京都. 2014.2.27.	招待講演
2014	国内学会	Nanasato, Y. Akashi, K.: Optimization of Agrobacterium-mediated genetic transformation of Jatropha (Jatropha curcas L.). The 7th Meeting of International Society for Environmental Bio-Resources, Effective Use of Bioresources in Arid Lands, Osaka, 2014.3.18.	招待講演
2014	国内学会	明石欣也: 油脂植物ジャトロファ:育種、生産、利用に関する海外動向. NPO法人近畿バイオインダストリー振興会議、バイオマス研究会, 大阪. 2014.3.26.	招待講演
2014	国内学会	七里 吉彦、木戸 真史、明石 欣也 (2014)「バイオディーゼル燃料植物ヤトロファの遺伝子導入系の最適化」、日本農芸化学会本大会、3月28-30日、東京	口頭発表
2014	国内学会	藪田伸・冨永淳・稲福さゆり・上野正実・川満芳信"BA (6-Benzylaminopurine) 剤散布がヤトロファの子実収量およびその構成要素へ与える影響" 沖縄農業研究会第53回講演会. 2014年8月1日.	ポスター発表
2014	国内学会	冨永淳・藪田伸・稲福さゆり・河崎俊一郎・上野正実・川満芳信 "ボツワナにおけるヤトロファの光合成特性" 沖縄農業研究会第53回講演会. 2014年8月1日.	ポスター発表
2014	国内学会	小倉 立己, 伊達康博, 菊地 淳 "動植物の残渣バイオマス入力によるボツワナ土壌のプロファイリング変動" 第66回日本生物工学会年次大会、札幌 2014年9月11日	ポスター発表

2014	国内学会	明石欣也: バイオ燃料植物ジャトロファの種子における脂質生合成制御. 日本脂質生化学会シンポジウム, 植物脂質研究の新展開, 大阪. 2014.6.6.	招待講演
2014	国内学会	加藤敦司・梶川昌孝・七里吉彦・辻本壽・横田明穂・明石欣也: 野生種スイカの根において乾燥時に誘導される転写因子CLMYB1の機能解析. 日本植物細胞分子生物学会, 盛岡. 2014.8.21.	口頭発表
2014	国内学会	明石欣也: カラハリ砂漠植物資源とジャトロファ・バイオマス開発. 近畿バイオインダストリー振興会議, バイオマス研究会, 公開セミナー, 大阪. 2014.10.1	招待講演
2014	国内学会	植田朋樹・七里吉彦、明石欣也: 油糧植物ジャトロファにおける脂質生合成酵素 diacylglycerol acyltransferase の機能解析. 日本生化学会, 京都. 2014.10.18.	ポスター発表
2014	国内学会	内田美音・Utut Widyastuti・Sony Suharsono・明石欣也: 乾燥ストレス下のジャトロファにおける分子生理応答の解析. 日本生化学会, 京都. 2014.10.18.	ポスター発表
2014	国内学会	明石欣也: 油糧作物ヤトロファ:実用化の世界動向. びわ湖環境ビジネスメッセ2014共催セミナー, バイオマスエネルギーとバイオマスリファイナリーの現状とその展開, 滋賀. 2014.10.24.	招待講演
2014	国内学会	七里良彦・木戸真史・加藤敦司・植田朋樹・辻本壽・明石欣也: 遺伝子導入の最適化と可視化マーカーによるジャトロファ形質転換体の迅速スクリーニング系の確立. 日本植物生理学会, 東京. 2015.3.16.	ポスター発表
2014	国内学会	伊達康博・渡邊太二・小倉立己・坂田研二・明石欣也・菊地淳: ボツワナ共和国のヤトロファ栽培土壌における有機物・無機物・微生物群プロファイリング. 生物工学会、札幌. 2014.9.11.	ポスター発表
2015	国内学会	林亜友未, 冨永淳, 川満芳信. 植物工場導入を目指したパッションフルーツの最適栽培環境の確立, 神奈川, 日本作物学会, 2015年3月	口頭発表
2015	国内学会	冨永淳, 川満芳信. 葉内CO_2実測によるA-Ciカーブ測定, 日本作物学会, 神奈川, 2015年3月	ポスター発表
2015	国内学会	Thanankorn Jaiphong, 冨永淳, 渡辺健太, 寶川拓生, 諏訪竜一, 上野正実, 川満芳信. Leaf Photosynthesis, growth, yield and quality of sugarcane cultivar NiF8 which growing under flood and drought condition during grand growth phase, 日本作物学会, 神奈川, 2015年3月	口頭発表
2015	国内学会	冨永淳, 川満芳信. 葉内CO_2濃度の実測:気孔が閉じるとクチクラが葉内CO_2濃度計算に影響する, 日本光合成学会年会, 岡山, 2015年5月	ポスター発表
2015	国内学会	冨永淳, 前川武蔵, Thanankorn Jaiphong, 渡辺健太, 上野正実, 川満芳信. グルタチオン施用がサトウキビの生長と水ストレス応答に与える影響, 沖縄農業研究会, 沖縄, 2015年8月	ポスター発表

2015	国内学会	冨永淳, 川満芳信. 携帯型光合成装置への葉内CO_2実測システム導入, 沖縄農業研究会, 沖縄, 2015	ポスター発表
2015	国内学会	冨永淳, 川満芳信. 葉内CO_2直接測定による光合成ガス交換モデルの再検討, 生物環境工学会, 宮崎, 2015年9月	ポスター発表
2015	国内学会	薮田伸・冨永淳・川満芳信, 炭化物施用および遮光がヤトロファ実生苗の成長および水利用効率におよぼす影響. 日本熱帯農業学会 , 茨城, 3月14-15日	口頭発表
2015	国際学会	Shin Yabuta, Jun Tominaga, Masami Ueno and Yoshinobu Kawamitsu, Effect of soil application of bio-char on Jatropha growth and water use efficiency. 国際東南アジア農業学会 , 東京, 11月7-9日	口頭発表
2015	国際学会	Mai Nakabaru, Shin Yabuta, Jun Tominaga and Yoshinobu Kawamitsu, The environmental characteristic analysis for effective cultication of Jatropha in Botswana as semi arid and cold area. 国際東南アジア農業学会 , 東京, 11月7-9日	ポスター発表
2015	国際学会	Hiroo Takaragaw, Shin Yabuta and Yoshinobu Kawamitsu, Effect of bio-char application on soil properties and Sunflower growth. 国際東南アジア農業学会, 東京, 11月7-9日	口頭発表
2015	国内学会	七里良彦・木戸真史・加藤敦司・植田朋樹・辻本壽・明石欣也: 遺伝子導入の最適化と可視化マーカーによるジャトロファ形質転換体の迅速スクリーニング系の確立. 日本植物生理学会, 東京. 2015.3.15.	ポスター発表
2015	国内学会	上野山遼・七里吉彦・木戸真史・加藤敦司・辻本壽・明石欣也: 可視化マーカーを用いたバイオ燃料植物ジャトロファの形質転換. 日本植物細胞分子生物学会, 東京. 2015.8.10.	ポスター発表
2015	国内学会	山田みな美・山田智・辻本壽・明石欣也: 重金属に対するジャトロファの生理応答の解析. 日本植物細胞分子生物学会, 東京. 2015.8.10.	ポスター発表
2015	国内学会	Kinya Akashi: Xerophytes in the arid regions: Molecular biology, breeding and utilization of wild watermelon and Jatropha. Japan-Korean Joint Symposium, Tottori. 2015.11.4.	招待講演
2016	国内学会	山田みな美・山田智・辻本壽・明石欣也: 油糧系バイオ燃料植物ジャトロファの重金属応答の解析. 日本農芸化学会大会, 札幌. 2016.3.28.	ポスター発表

2016	国内学会	伊達康博・篠阿弥宇・菊地淳，化学プロファイリングによる植物ー土壌生態系の共代謝システム評価. 日本農芸化学学会，札幌，3月28-30日	ポスター発表
2016	国内学会	冨永淳，川満芳信．気孔が閉じるとクチクラが細胞間隙CO_2濃度計算に影響する，日本植物生理学会，岩手，2016年3月	口頭発表
2016	国内学会	山田みな美・Malambane Goitseone・山田智・辻本壽・明石欣也: 重金属に対するバイオ燃料植物ジャトロファの生理・生長応答の解析. 日本農芸化学会中四国支部第45回講演会，香川. 2016.6.11.	口頭発表
2016	国内学会	山田みな美・山田智・辻本壽・Malambane Goitseone・明石欣也: ジャトロファにおける重金属応答の解析. 日本植物細胞分子生物学会，長野. 2016.9.1.	ポスター発表
2016	国内学会	中原麻衣，藪田伸，冨永淳，マリア R，上野正実，川満芳信．乾燥冷地ボツワナにおける気象データの解析およびヤトロファ栽培土壌の特性．沖縄農業研究会，沖縄，2016年8月12日	ポスター発表
2016	国内学会	上野正実・平良英三・川満芳信・藪田伸 ボツワナのヤトロファ圃場に設置した定点カメラによる生育情報の解析．沖縄農業研究会，沖縄，2016年8月12日	ポスター発表
2016	国内学会	上野正実・川満芳信・藪田伸・渡辺健太・城間力・小中隆文　簡易炭化炉によるヤトロファ・バイオチャーの安定製造技術に関する研究．沖縄農業研究会，沖縄，2016年8月12日	ポスター発表
2016	国内学会	城間力・比嘉謙太・上野正実・川満芳信・渡辺健太　ヤトロファ炭をアルカリ触媒としたヤトロファBDF(バイオディーゼル燃料；FAME)の製造．沖縄農業研究会，沖縄，2016年8月12日	ポスター発表
2016	国内学会	藪田伸・冨永淳・石本雄大4,5)・コッツェー T・シルビア B・川満芳信　ボツワナ共和国在来ヤトロファからの優良系統の選抜．沖縄農業研究会，沖縄，2016年8月12日	ポスター発表
2016	国際学会	藪田伸・冨永淳・石本雄大・コッツェー T・シルビア B・川満芳信　Jatropha biomass energy production under the different climate condition − in case of Okinawa and Botswana −.第3回ミャンマー・日本シンポジウム，ミャンマー，2016年12月3日	口頭発表
2016	国内学会	川満芳信・上野正実・中原麻衣・冨永　淳・藪田　伸 半乾燥地ボツワナにおけるヤトロファ栽培と気象データの解析．　日本熱帯農業研究会，鹿児島，2016年10月8日	ポスター発表

2016	国内学会	薮田伸・冨永淳・石本雄大・コッツェー Ｔ ・シルビア Ｂ ・川満芳信 冬期前の高さ別剪定がヤトロファの成長と着花に及ぼす影響.　日本熱帯農業研究会, 鹿児島, 2016年10月8日	ポスター発表
2016	国内学会	中原麻衣・冨永淳・薮田伸・Dinh Thai　Hoang・川満芳信　急激な土壌水分ストレスに対するヤトロファの葉のガス交換速度の応答. 鹿児島, 日本農業気象学会・日本生物環境工学会九州支部会, 2016年11月25日	口頭発表
2016	国際学会	Kinya Akashi: Wild watermelon and Jatropha: Molecular biology, breeding and utilization of xerophytes in the arid regions. The 6th Indonesian Biotechnology Conference, Solo, Indonesia. 2016.9.7.	招待講演
2016	国内学会	上野山遼、七里吉彦、Gwafila Chiyapo、甲斐政親、足立香織、難波栄二、Charles Mazereku、明石欣也: SNPマーカーを用いたボツワナのジャトロファの系統解析. 日本育種学会, 鳥取. 2016.9.24.	ポスター発表
2016	国内学会	只野翔大、石本雄大、Charles Mazereku、明石欣也: ボツワナ自生ジャトロファ種子の化学組成の系統間差異. 日本生化学会, 仙台. 2016.9.27.	ポスター発表
2017	国内学会	上野山遼、只野翔大、Gwafila Chiyapo、石本雄大、七里吉彦、甲斐政親、足立香織、藤本高明、難波栄二、Charles Mazereku、明石　欣也: アフリカ・ボツワナにおける自生ジャトロファ種子の化学組成および遺伝的多様性の解析. 日本農芸化学会中四国支部講演会, 松江, 2017.1.28	口頭発表

招待講演	23 件
口頭発表	21 件
ポスター発表	39 件

Ⅵ. 成果発表等

（3）特許出願【研究開始～現在の全期間】（公開）

①国内出願

	出願番号	出願日	発明の名称	出願人	知的財産権の種類、出願国等	相手国側研究メンバーの共同発明者への参加の有無	その他（出願取り下げ等についても、こちらに記載して下さい）	関連する論文のDOI	発明者	発明者所属機関	関連する外国出願※
No.1											
No.2											
No.3											

国内特許出願数　　件

公開すべきでない特許出願数　　件

②外国出願

	出願番号	出願日	発明の名称	出願人	知的財産権の種類、出願国等	相手国側研究メンバーの共同発明者への参加の有無	その他（出願取り下げ等についても、こちらに記載して下さい）	関連する論文のDOI	発明者	発明者所属機関	関連する国内出願※
No.1											
No.2											
No.3											

外国特許出願数　　件

公開すべきでない特許出願数　　件

Ⅵ. 成果発表等
（4）受賞等【研究開始～現在の全期間】（公開）

①受賞

年度	受賞日	賞の名称	業績名等（「○○の開発」など）	受賞者	主催団体	プロジェクトとの関係（選択）	特記事項
2016	2016/9/13	論文賞	葉内CO2濃度の直接測定法の開発	冨永淳，川満芳信	日本生物環境工学会	3.一部当課題研究の成果が含まれる	

1 件

②マスコミ（新聞・TV等）報道

年度	掲載日	掲載媒体名	タイトル/見出し等	掲載面	プロジェクトとの関係（選択）	特記事項
2014	2014年11月9日～15日号	Sunday Standard	Jatropha Research Project on course despite challenges	18面、32面	2.主要部分が当課題研究の成果である	プロジェクト活動紹介
2015	2016年2月3日	Radio Botswana	English News full bulletin	18:00-18:10	3.一部当課題研究の成果が含まれる	日本大使館によるJICAボツワナの活動紹介の一部
2015	2016年2月3日	Botswana Television	BTV News	19:00-19:30	3.一部当課題研究の成果が含まれる	日本大使館によるJICAボツワナの活動紹介の一部
2015	2016年2月5日	Mmegi	Moment of truth for pioneering biofuel project	11面、12面	1.当課題研究の成果である	プロジェクト活動紹介
2015	2016年2月5日	Botswana Guardian	Japan, Botswana development cooperation Solid: Bio-diesel project holds promise for commercial	7面、9面	1.当課題研究の成果である	日本大使館によるJICAボツワナの活動紹介の一部

2015	2016年2月6日 ～12日号	Weekend post	Botswana to produce biodiesel	15面	1.当課題研究の成果である	日本大使館による JICAボツワナの活動 紹介の一部
2015	2016年2月8日	Botswana Daily News	Embassy takes media on energy production tour	8面	1.当課題研究の成果である	日本大使館による JICAボツワナの活動 紹介の一部
2016	2016年5月	Peolwane (Air Botswana 機内誌)	Fuel for the future?	pp.32-38	1.当課題研究の成果である	プロジェクト活動紹介

8 件

Ⅵ. 成果発表等

（5）ワークショップ・セミナー・シンポジウム・アウトリーチ等の活動【研究開始～現在の全期間】（公開）

①ワークショップ・セミナー・シンポジウム・アウトリーチ等

年度	開催日	名称	場所	参加人数	概要
2011	6月24日	SATREPS project for Jatropha R&D in Botswana. Workshop on Jatropha Development Project.	Tlotlo Conference Centre, Gaborone（ボツワナ）	約50名	
2012	5月23日	Biotechnology of Jatropha with useful genetic resources in the arid land. Special seminar on Jatropha and biomass research,	ボツワナ	約20名	
2013	1月24日	Report Session and Project Planning Workshop 2013	ボツワナ	約27名	
2014	8月8日	2nd Symposium in Botswana Jatropha Reseearch / Production in Southern Africa	ボツワナ	約22名	
2015	3月22-23日	SATREPS Special International Conference on Biomass Energy	大阪(日本)	約100名	
2016	2017年3月7日	Botswana –Japan Jatropha Research Project Final Symposium 2017	Cresta Lodge Hotel Gaborone(ボツワナ)	約100名	

6 件

②合同調整委員会(JCC)開催記録（開催日、出席者、議題、協議概要等）

年度	開催日	出席者	議題	概要
2012	8月9日	JCC：エネルギー局局長、JICA支所長、プロジェクト専門家、UB、DAR、エネルギー局カウンターパート、JICA南ア事務所員、日本大使館書記官、JST職員等	プロジェクト進捗確認、投入実績確認、問題点等協議、今後に向けての方針協議等	活動進捗確認、昨年度投入実績確認、問題点等協議、PDM改定等

2013	5月21日	JCC:エネルギー局局長、JICA支所長、プロジェクト専門家、UB、DAR、エネルギー局カウンターパート、JICA南ア事務所員、日本大使館書記官等	プロジェクト進捗確認、投入実績確認、問題点等協議、今後に向けての方針協議等	活動進捗確認、昨年度投入実績確認、問題点等協議、PDM改定等
2014	5月20日	JCC:エネルギー局局長、JICA支所長、プロジェクト専門家、UB、DAR、エネルギー局カウンターパート、JICA南ア事務所員、日本大使館書記官等	プロジェクト進捗確認、投入実績確認、問題点等協議、今後に向けての方針協議等	活動進捗確認、昨年度投入実績確認、問題点等協議、PDM改定等
2014	9月5日	JCC(中間評価):日ボ合同中間評価調査団員、エネルギー局局長、JICA支所長、プロジェクト専門家、UB、DAR、エネルギー局カウンターパート、日本大使館員等	プロジェクト進捗確認、投入実績確認、問題点等協議、今後に向けての方針協議等	活動進捗確認、中間評価結果発表及び協議、PDM改定等
2015	5月19日	JCC:日ボ合同中間評価調査団員、エネルギー局局長、JICA支所長、プロジェクト専門家、UB、DAR、エネルギー局カウンターパート、日本大使館員等	プロジェクト進捗確認、投入実績確認、問題点等協議、今後に向けての方針協議等	活動進捗確認、昨年度投入実績確認、問題点等協議、PDM改定等
2016	5月24日	JCC:エネルギー省事務次官、副事務次官,、エネルギー局局長、JICA支所長、JICA南ア事務所次長、プロジェクト専門家、UB、DAR、エネルギー局カウンターパート、日本大使館員等	プロジェクト進捗確認、投入実績確認、問題点等協議、最終評価に向けての方針協議等	活動進捗確認、昨年度投入実績確認、問題点等協議、PDM改定等
2016	11月18日	JCC(最終評価):エネルギー省事務次官、技術顧問,、エネルギー局局長、JICA支所長、、プロジェクト専門家、UB、DAR、エネルギー局カウンターパート、在ボツワナ日本国大使、日本大使館員等	最終評価に関する協議	最終評価団評価確認、プロジェクト終了までの活動確認等

7 件

研究課題名	ボツワナの乾燥冷害地域におけるヤトロファ・バイオエネルギー生産のシステム開発
研究代表者名（所属機関）	明石欣也（鳥取大学 教授）
研究期間	H23採択 H23年6月1日からH29年3月31日まで（5年間）
主要相手国研究機関	資源省（MMEWR)エネルギー局（EAD)、MOA（農務省）農業研究局（DAR）、ボツワナ大学（UB）

JST上位目標

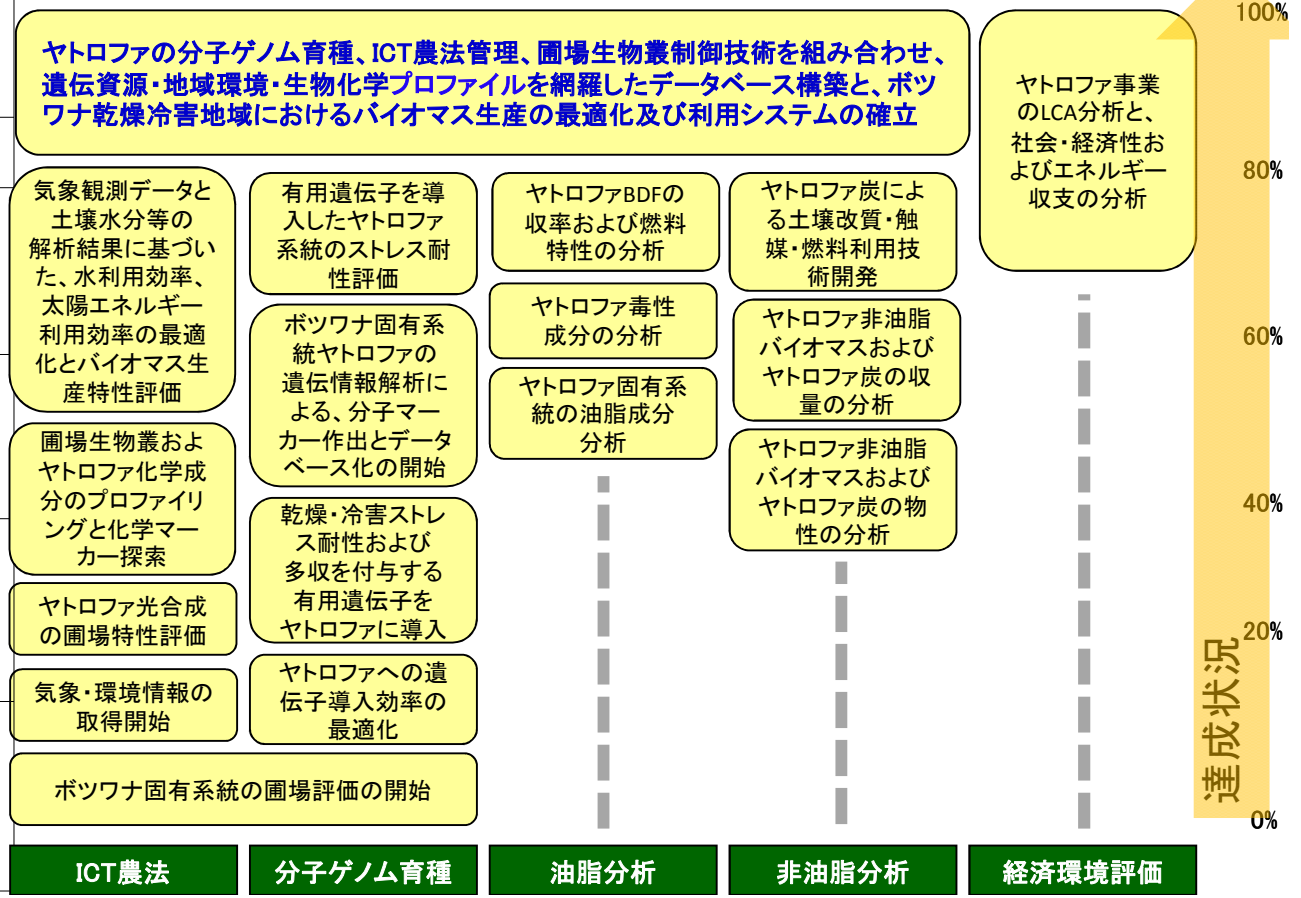
新たに開発されたヤトロファ・バイオマス生産システムが乾燥冷害地を有する他のアジア・アフリカ諸国に展開され、低炭素社会の実現に寄与する

ヤトロファ・バイオマス生産システムがボツワナ国内のヤトロファ栽培へ適用されるとともに、栽培地域が拡大される

JSTプロジェクト目標

ヤトロファ・バイオマス生産を最適化する技術パッケージをボツワナ政府に提言し、採用される。

付随的成果

日本政府、社会、産業への貢献	世界の乾燥冷害地において、バイオマス生産および多角的利用を図るための、ICT農法・分子ゲノム育種・バイオマス利用技術の開発
科学技術の発展	国際シンポジウムを6回開催。
知財の獲得、国際標準化の推進、生物資源へのアクセス等	ボツワナ・ヤトロファ固有系統の探索と育種利用。圃場生物叢の統合データベースの構築
世界で活躍できる日本人人材の育成	日本人若手人材（博士研究員および博士・修士・学士学生）をのべ30名派遣し、現場での実務経験を積ませ国際研究リーダーを育成。
技術及び人的ネットワーク構築	ボツワナ側10人が修士/博士号をボツワナ大学等で取得または修学し、日本側研究者が副指導教員として参加。モザンビーク等の域内ヤトロファ生産国と連携。
成果物（提言書、論文、プログラム、マニュアル、データなど）	学術論文32報。総説・書籍等13編。ボツワナにおけるヤトロファ栽培マニュアル。圃場気象データベース。ヤトロファ固有系統データベース。ヤトロファ技術パッケージ。

ヤトロファの分子ゲノム育種、ICT農法管理、圃場生物叢制御技術を組み合わせ、遺伝資源・地域環境・生物化学プロファイルを網羅したデータベース構築と、ボツワナ乾燥冷害地域におけるバイオマス生産の最適化及び利用システムの確立