

地球規模課題対応国際協力プログラム (SATREPS) 研究課題別追跡調査報告書

I. 序文

SATREPS 追跡評価実施要領 (<https://www.jst.go.jp/global/hyouka/pdf/follow-up-evaluation-procedure.pdf>) に基づき、追跡調査を実施した。具体的には、プロジェクト終了後の各研究課題の国際共同研究の成果の発展状況や活用状況を明らかにするために、対象課題の研究者に対し質問票による基礎データ調査を行い、その結果を踏まえた研究者インタビュー調査を経て得られた情報を整理しまとめた¹。

今般の研究課題別追跡調査にあたっては、以下の方にご協力頂き厚く御礼申し上げます。

明石 欣也 (鳥取大学 農学部 生命環境農学科 教授)

II. プロジェクト基本情報

1. 課題名

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

2. 日本側研究代表者名

明石 欣也 (鳥取大学 農学部 生命環境農学科 教授)

3. 相手国側研究代表者名

Kenneth Kerekang (ボツワナ資源省 エネルギー局 (DOE) 局長)

¹ 2021年11月から2022年3月に各種調査および報告書のとりまとめを実施した。

4. 国際共同研究期間

2012年4月～2017年4月

5. 研究概要

(1) 目的

ボツワナが有する野生生物資源と、気象/遺伝情報/圃場生物叢/植物生理に立脚した、ヤトロファ種子収量が 2.5t/ha 換算(変更前の目標値)に達するヤトロファ・バイオ燃料生産システムを、ボツワナ乾燥冷害地帯において展開するための技術基盤を確立する。

(2) 各グループの研究題目と実施体制

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：ICT 農法(琉球大学、ボツワナ農務省²)

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：ゲノム育種(鳥取大学、DAR)

研究題目 3. ヤトロファ油脂分析および利用法の開発：物理化学特性解析(琉球大学、ボツワナ大学³)

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(琉球大学、DAR)

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：バイオマス事業性評価(鳥取大学、理化学研究所、UB)

全体の取りまとめは、日本側は鳥取大学が、ボツワナ側はボツワナ資源省(DOE)が担当した。

なお、中間評価の結果、種子収量 2.5 t /ha という目標設定が熱帯地域の知見に基づくものであった為、目標を新たに 80seeds/tree(0.5 t /に相当)と変更した。

(3) SATREPS 期間中の各グループの成果

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

² ボツワナ農務省：DAR

³ ボツワナ大学：UB

2011年にボツワナ固有77系統およびガーナ系統のヤトロファをセベレ地区DAR実験圃場に植え付け、灌漑設備は2012年以降に設置し、灌漑を開始した。気象観測装置は2013年に設置し、観測データは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11月から始まり、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ため、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。8~11月に土壤水分をモニターしながら週2回の頻度で灌漑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。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」を改訂し、改訂版(第2版)を出版した。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高でブルーニングし、8月以降週2回の頻度で灌漑を行い、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。

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

ボツワナ国内で見いだされたヤトロファ固有系統について、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。これら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分子マーカを作成し、ボツワナ固有ヤトロファの全ての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、固有系統を相互に判別する分子マーカを作成できた。これら分子マーカは、今後のゲノムによる育種を迅速化するにあたり有用である。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で、遺伝子組み換え効率を顕著に高めることに成功した。この方法で、ボツワナ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 *CLZF1*、細胞保護遺伝子 *DHN* の遺伝子導入作業を行い、これらを導入したヤトロファ形質転換個体を作成した。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⁴を用いた低温耐性評価試験の結果は、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した。以上のように、多収及びストレス

⁴ リーフディスク：樹木の葉をパンチで円形に打ち抜いたもの。植物葉から出る物質が生育に及ぼす影響を寒天培地上で評価する方法をリーフデ

耐性のヤトロファ品種を開発する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

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たところ、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した。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示し、前記データと合わせ、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、バイオディーゼルの油における PE が消失することを示した。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の油を用いて、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。この結果に基づいて、小型発電機と小型搾油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、バイオディーゼルの油を用いた実車試験を継続した。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 39.32-39.6 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、曇点、粘性の値はヤトロファバイオディーゼルが燃料規格に適合し、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 間で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継続している。

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。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。この技術によって、劇薬物質(メタノール)を用いずにバイオディーゼルの作製でき、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

外熱式および自燃式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

イスク法と言う。

マス活用において、バイオ炭を前面に打ち出した研究は初めてである。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。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。農村部で未だに利用している薪の一部がバイオ炭等の固形燃料に置き換われれば環境保全に貢献できる。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)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。ヤトロファ・バイオマスの収量を測定し、各種 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、各組織はそれぞれ特徴的なリグノセルロース成分⁵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。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。

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。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となった。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⁶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循環型システムの確立に繋がる極めて有益な手法となる。

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

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で検証した。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

⁵ リグノセルロース成分：木質系バイオマスの主要構成成分。セルロース、リグニンとヘミセルロースが強固に結合している。

⁶ ソルガム：穀物の一種。タカキビ、モロコシ、サトウモロコシとも言う。

一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、大規模農園モデル、及び、垣根栽培モデルで行った。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 $82.5 \times 10^6 \text{L/年}$ 、薪削減量はボツワナ農村世帯 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 $20.2 \times 10^6 \text{L/年}$ 、薪削減量はボツワナ農村世帯 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。

III. 調査結果まとめ

1. 研究の継続・発展について

本 SATERPS 完了後、バイオ炭に関する草の根協力事業(JICA 沖縄)、別の SATREPS 案件、に応募した。両プロジェクトとも、金沢の明和工業との共同提案で、バイオ炭を使ったプロジェクトであった。SATREPS については、2018~2019 年頃に申請したが、採択はされなかった。JICA 草の根は、ジャトロファ・ディーゼルによる無電化村の発電及びバイオ炭を利用した土地改良の内容(地産地消によるジャトロファの活用)であったが、1 回目は事業計画が不十分(対象地域の検討不足)ということで採択されず、引き続き事業化に向けて調査を進めているが、コロナ禍でボツワナへの渡航が出来ず、止まっている。現地カウンターパートは、本 SATREPS と同じ、DOE、DAR、UB の 3 機関である。

プロジェクト最終年度(2017、2018 年)において、ジャトロファバイオ燃料を無電化村で実証した。ボツワナ大学工学部のケトロゲッシュ教授が、プロジェクトで購入したトヨタ車を 100%ジャトロファ燃料用に改造し、機材を積んでデモをおこなった。またボツワナ大学工

学部のガンジューレー教授が、ジャトロファに似た木のバイオ燃料を開発しデモンストレーションを行った。また、ボツワナ資源省がセミナーを主催した。ヤトロファ収穫は農務省、収穫後のプロセスはボツワナ大学が担当し、研究成果の広報は資源省が行った。

バイオ炭の研究については、琉球大学の先生と共同提案となっている。琉球大学卒業生が、その後、鹿児島大学で研究者として独立して研究提案を行ったため、鳥取大学、琉球大学、鹿児島大学の3大学の共同提案となっている。理化学研究所は、データ解析について、ボツワナ側を継続して支援していると聞いている。ボツワナ大学と農務省との共同論文執筆が多い。

琉球大の川満教授と上野教授のグループは、2020年にもヤトロファの乾燥ストレス下の生理応答についての論文を発表している。研究題目1に関連した研究成果である⁷。

2018年には川満グループによるヤトロファの低温障害についての研究報告⁸がある。

2019年には、ヤトロファのバイオ炭の研究結果を、琉球大と鳥取大と共同で発表している⁹。研究題目5に関連した研究成果である。

理研の菊池淳先生のグループは、本SATREPSプロジェクト中に手法解析した環境化学物質解析を他の分野(植物、海産物、人体など)に拡大している¹⁰。

2. 地球規模課題の解決に向けた科学技術の進展への貢献について

研究題目4(ヤトロファ非油脂バイオマスを利用するための技術が開発される)の成果として、バイオマス(動植物から生まれた、再利用可能な有機性の資源)であるバイオ炭の活用(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)方法を開発し、それに関する論文も作成した。バイオ炭と呼ばれる農業資材の開発は、土地改良などの波及効果(副産物)を生んだ。

セベレ(ハボロネ市内)に設置した気象ステーションの機材が、事業完了後、盗難にあったため、現状では使われていない。遺伝子解析装置など農務省に設置されたその他の機材は概ね使われていると思われる。

⁷ Nakabaru M. et al., *Plant Production Science*, 23 (3), 333-3422, 2020
<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/1343943X.2020.1730699>

⁸ Watanabe K. et al., *Tropical Agriculture and Development*, 62 (4), 158-166, 2018
https://www.jstage.jst.go.jp/article/jsta/62/4/62_158/_article

⁹ Konaka T. et al., *Agronomy*, 9 (5), 236, 2019
<https://www.mdpi.com/2073-4395/9/5/236>

¹⁰ <http://www.csr.s.riken.jp/jp/labs/emart/index.html>

3. 地球規模課題の解決、及び社会実装に向けての発展について

本 SATREPS が目指す社会実装としては、「ボツワナにおけるバイオマス利用に係る技術の活用・普及」、「他のアフリカ諸国へのバイオマス利用に係る技術の活用・普及」と考えていた。また、社会実装に向けた取組み(政策への反映)としてエネルギー政策、科学技術政策への反映に加えて、環境政策、循環型産業(サーキュレーションエコノミー)への反映も含めたインパクトを見てもらいたい。

農業省の4カ所の実験圃場では、本 SATREPS 完了後は、ヤトロファの品種改良等の活動は行われおらず、生物資源の保全が中心であり、利用に係る技術の活用・普及という観点では発展していると考えている。後続の SATREPS で実験圃場での活動の継続を計画していたが、後継フェーズが実現しなかったため、活動はストップしている。

また他地域への展開もない(草の根協力事業で他地域への展開を想定していた)。

4. 日本と相手国の人材育成や開発途上国の自立的な研究開発能力の向上について

一 ボツワナ側については DAR だけでなく、実際はボツワナ大学も装置面に熱心で、草の根プロジェクトは Clever Ketlogetswe 教授が農村部でヤトロファを育てて地産地消でバイオディーゼルオイルを作るといった活動を続けている。ただボツワナ大と DAR との間ではそれぞれの所掌による関係性の問題もあるようで、一方のみでヤトロファ研究を全面的に進めづらいように見受けられる。明石教授の関連ではボツワナ農業天然資源大学(BUAN)があり、PhD の学生を受け入れている。

5. 日本と開発途上国との国際科学技術協力の強化、科学技術外交への貢献について

ボツワナの第10次開発計画(2009年~2016年)に、ヤトロファ・バイオマスについて言及されている。本 SATREPS の成果品である Technological package は、各活動の成果物をパッケージとしてとりまとめたものであり、ボツワナで実施した最終シンポジウムで、全体の活動のサマリーとして日本側研究者からボツワナエネルギー省次官へハードコピーを贈呈した(電子ファイルあり)。

6. 終了時評価における要望事項に対する現状報告

要望事項：

一 3つの遺伝子を導入した転換体のストレス耐性を実験室から圃場に拡げて評価してほしい。

- ― 今後、ヤトロファの世界的な遺伝資源を対象に、ボツワナに適応する系統を選択することが望ましい。
- ― 村落での地産地消型を想定した社会実装の試みについて、資源省の主導の下で文部省とボツワナ大学が実施する村のリストアップを進めているとのこと、引き続きサポートに努めてほしい。
- ― 貴重な研究であり、今後も継続的に行われることを期待する。そのために、比較的条件の良い地域から少しずつ実証、普及してゆくことを期待する。得られた成果をボツワナで十分活用できるように、引き続きボツワナ側の大学、関連機関との連携を期待する。
- ― 相手国における遺伝子組み換え研究開発のための法整備を促進し、今回得られた育種の成果の移転・継続を図ることが望ましい。また、エネルギー政策に BDF 利用を明確に位置づけ、具体的な実用展開のシナリオを構築する必要がある。
- ― 共同研究実施体制構築が遅れた点について、プロジェクトを始動する時、相手国の体制・法規制など吟味し、プロジェクトが順調に運営・推進できる環境を整備する事の重要性が明らかになった。今後のために、今回の事例を参考事例として、問題点の分析と対策の提案を期待したい。

遺伝子組換えの圃場実験にかかる法整備に関して、ボツワナ側のカウンターパートの1つである農務省研究部の方が、2020年にボツワナ国内の当該事項の法整備の現状について、書籍を出版している¹¹。

この本の記述にあるように、ボツワナ国内の組換え作物の圃場栽培については、政策決定はなされており、運用法の草案も用意されているが、国会での法案成立には至っていない、という状態が続いている。ただし、これもこの書籍の中の記述からも見えるように、国民向けの啓蒙活動は地道に継続されている状態である。

7. プロジェクトの上位目標を踏まえた現状報告

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。」

ゲノム編集(外来遺伝子を含まないタイプ)について、ケニアやナイジェリアなど他のアフリカ諸国では、これを組換え作物と同様の法令対

¹¹ GMOs 「Botswana—Genetically Modified Organisms (GMOs) and Synthetic Biology: Their Potential Applications and the Legal Perspectives」

https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-53183-6_21

象とはしないという方向での法整備が進みつつあり、このあたりから植物バイオテクノロジーの社会受容が進む可能性が見えてきている。アフリカ諸国は政策等では足並みをそろえる傾向があるので、時間はかかっているが、ボツワナでも遺伝子組換え技術の社会受容は少しずつではあるが向かっていく方向と思われ、またその方向をさらに進めるためにも、社会発信は継続的に行っていきたい。

以上