

## 地球規模課題対応国際科学技術協力プログラム (SATREPS)

### 研究課題別終了時評価報告書

#### 1. 研究課題名

持続的食料生産のための乾燥地に適応した露地栽培結合型アクアポニックスの開発 (2014年5月～2020年3月)

#### 2. 研究代表者

2. 1. 日本側研究代表者：山田 智 (鳥取大学 農学部 教授)
2. 2. 相手国研究代表者：Dr. Ilie Racotta Dimitrov (メキシコ北西部生物学研究センター (CIBNOR) 機関管理部門 部門長)

#### 3. 研究概要

急激な人口増加に伴う食料危機と水の争奪戦が起こるとされる21世紀において、水利用効率の向上と環境保全型持続的食料生産を実現する技術開発は地球規模課題として最優先に取り組むべき課題の一つである。2000万ヘクタールの農地の約3分の1が北西部の乾燥地に存在するメキシコでは、過剰灌漑による地下水の枯渇、塩類集積による土壌劣化、砂漠化の急速な進行が起こっており、他方、近年の急激な人口増加によって食料需要が増加してきている。本プロジェクトは、乾燥地において塩分濃度の高い地下水を効率的に使用し、環境保全型持続的食料生産を可能とすることをねらいとして、1)乾燥地に適応した露地栽培結合型アクアポニックス (水産養殖と作物の水耕栽培及び露地栽培を組み合わせた食料生産システム) を開発し、それに伴う2)水利用効率の向上、3)養殖廃液を用いる水耕栽培での好塩性作物による塩分吸収を利用した除塩、4)土壌塩性化の防止、5)太陽光パネル発電を含む電力利用、6)生産物の安全性評価を実現するとともに、7)構築した技術の普及要件を明らかにすることを目指す。

研究体制としては、日本側では鳥取大学と東京海洋大学が、メキシコ側ではメキシコ北西部生物学研究センター (CIBNOR: Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste S.C.) が参画し、以下6つの研究題目で構成される。

1. 塩分を含む水を利用した養殖技術の確立
2. 塩分を含む水を利用した栽培技術 (水耕・露地) の確立
3. 養殖・農業結合システムに適した電源の最適化
4. 養殖・農業結合システムにおける衛生微生物学的安全性評価技術の確立
5. 塩分を含む水を利用した養殖と農業の結合技術の確立
6. 実証サイトでの技術的検証結果のモデルシステムへの反映と普及可能要件の把握

## 4. 評価結果

### 総合評価：A

#### (所期の計画とほぼ同等の取り組みが行われた。)

本プロジェクトは、水産養殖と農業を組み合わせた露地栽培結合型アクアポニックスシステム（以下、「本システム」）の構築を図り、その有効性や普及条件を明らかにするため、鳥取大学、CIBNOR、現地農家圃場それぞれに実証モデルを建設した。特に、現地の農家圃場に建設した実証モデル（以下、「農家実証モデル」）において、塩分濃度が高い地下水や太陽光を用いて、魚の養殖、好塩性作物の水耕栽培及び野菜の露地栽培とその販売を実証し、乾燥地における食料生産の可能性を示したことが高く評価される。

本システムの養殖、水耕・露地栽培、電力供給、安全性評価等の個別要素においては一定の成果を得たものの、社会実装の観点からは、建設・運営コストの問題や収益性の問題など、取り組むべき課題は残されている。他方、3つの実証モデルにおける実証試験の成果として、今後の参考となり得る販売価格（収益）水利用効率※等のデータが得られ、スペイン語、英語、日本語の3カ国語で「乾燥地に適応した露地栽培結合型アクアポニックスの技術マニュアル」（以下、「技術マニュアル」）が作成された。また、CIBNORに設置された実証モデル（以下、「CIBNORモデル」）及び農家実証モデルでは、プロジェクト期間中に現地州政府関係者や農家等を対象として38回の展示説明会を開催するなど積極的なアウトリーチ活動は評価できる。加えて、上述の技術マニュアルにおいて、本システムの普及条件や今後取り組むべき課題が提示されていることから、本プロジェクトの成果が今後の研究継続や技術の普及において活用されることが十分期待される。

さらに、中間評価時点においては、農家実証モデルの建設の遅延による計画変更や研究グループ間の連携不足が見受けられたが、プロジェクト後半では、それらを克服し、プロジェクト目標の達成に至ったことから、プロジェクトの運営は優れていたと評価される。

※販売価格（収益）水利用効率…生産物の販売価格（収支）に対する水の利用効率

### 4-1. 地球規模課題解決への貢献

#### 【課題の重要性とプロジェクトの成果が課題解決に与える科学的・技術的インパクト】

年間降雨量が300mm以下であるメキシコの亜熱帯の乾燥地において、塩分濃度が高い地下水を利用した露地栽培結合型アクアポニックスシステムによる食料生産の可能性を実証し、技術普及のための条件を検証して明らかにした科学的・技術的インパクトは大きい。本システムは養殖、水耕栽培、露地栽培の独立した生産技術から構成され、同じ地下水を各生産技術で順番に使用する点、及び太陽光発電を電力供給源とし、電気の通じていない地域への設置も可能とした点に、既存のアクアポニックスにはない特徴がある。このうち、水産養殖、水耕・露地栽培では、選定された魚種と作物種の養殖及び栽培技術の最適化が進められ（研究題目1, 2）、CIBNORモ

デルと農家実証モデルにおける電源システムの最適化が概ね完了し（研究題目3）、これまでよりも迅速かつ安定性の高い微生物モニタリング手法が確立されるなど（研究題目4）の成果を上げている。

また、CIBNOR モデルでは、同一地下水による養殖、水耕・露地栽培を実現するとともに、水耕栽培廃液を回収水（同モデル内で放出された蒸発水を除湿機で回収）で希釈して塩分濃度を下げた上で露地栽培を行っており、各要素技術の結合において成果が得られている。一方で、農家実証モデルにおいては、同一地下水による養殖・栽培は実現できたが、水耕栽培廃液を希釈するための回収水の量が不十分であったために、低塩分濃度の地下水を別途購入しなければならなかった。また、生産物の販売だけでは本システムの維持・運営コストの採算が得られておらず、社会実装の観点からは、収益性を見込める市場価値の高い魚類や作物の検討が残されている。

### 【国際社会における認知、活用の見通し】

メキシコのプロジェクト対象地域において、養殖業者や農家、学生を対象とした本システムのアウトリーチ活動は盛んに行われたが、メキシコ国外における広報活動は多くなく、国外における認知度は高いとは言えない。ただし、国際的な学術誌で計17報の論文発表がなされるなど、一定の成果は出ていることから、今後国際社会で認知される見通しは高い。

### 【他国、他地域への波及】

乾燥地の拡大や土壌の塩類集積などの問題を抱える国・地域は世界に多く存在し、本システムは、特に食料生産や栄養面における課題解決を希求する国々にとって、受容可能性の高い技術である。ただし、他地域への波及にあたっては、異なる自然・社会経済条件下における適応性の検討など、一層の研究進展が不可欠である。また、アクアポニックスという一連のシステムでの波及に限らず、個別技術、特に養殖や水耕栽培単独での波及の可能性も高いので、活用の幅は広いと考えられる。

その意味で、本システムの技術マニュアルが3カ国語で作成されたことは高く評価される。

### 【国内外の類似研究と比較したレベル】

本プロジェクトは、既存のアクアポニックスシステムとは構造や機能の異なるシステムの開発を目指した挑戦的な研究である。本システムは、独立した3つの生産技術（魚養殖、好塩性作物の水耕栽培及び野菜の露地栽培）から構成されているので運転技術の複雑さはあるものの、既存のシステムと比較して個別の生産技術における培養条件などの管理がしやすく、システム全体のスケールアップの可能性も高いと考えられる。このように国内外の類似研究と比較した研究のレベルや達成した成果のレベルは高いと言える。特に、農家実証モデルにおけるティラピア、アリタソウとトウガラシの生産販売の結果、販売価格（収支）に対する水の利用率1.465ペソ（約10円）/Lという数値が得られたが、この数値は今後のアクアポニックスの発展や普及において参考となりうることから、数値を算出した意義は大きい。

## 4-2. 相手国ニーズの充足

### 【課題の重要性とプロジェクトの成果が相手国ニーズの充足に与えるインパクト】

国の北部から北西部に乾燥地が広がるメキシコにおいて、乾燥地における食料の安定生産は喫緊の課題である。塩性地下水の利用というニーズ自体は、メキシコ国内で偏在すると考えられ、本システムが相手国ニーズを充足する最適解とは断言できないが、本プロジェクトの対象地域である南バハ・カリフォルニア州では、過去にも補助金を使ったアクアポニックスの導入があったことから、現地における期待度の高さが伺える。これは、CIBNOR モデルや農家実証モデルで実施された展示会に、州政府関係者や農民、養殖業者を含む多くの参加者が訪れたことや、州政府から2名の普及員が派遣されて技術研修を受けたことからも見取れる。社会実装面では運営コストの問題など、検討すべき課題は残されているが、地域住民のニーズの充足に与えるインパクトは高いと考えられる。

### 【課題解決、社会実装の見通し】

乾燥地における食料生産という課題解決のため、本システムの実用化が強く望まれるが、本プロジェクトでは、システムの採算性の検討は充分になされなかったため、実用化に向けて解決すべき課題は残されている。本システムは太陽光パネルと蓄電池を装備していることから建設費が高く、プロジェクトで実証に用いたティラピアやフダンソウといった魚種、作物種では収益性が低く、費用対効果が小さい。社会実装の実現には、この課題の解決が不可欠である。引き続き市場価値の高い魚種や作物種に関する検討を進めるなど、運用益を高めるための検討が求められる。

### 【継続的発展の見通し（人材育成、組織等）】

日本側では多くの若手研究者や大学院生、学部学生が参画し育成されたので研究継続の見通しは高い。また、メキシコ側も多数の研究者が参画し、うち25名が短期研究員として日本で研修を受け、長期研究員1名が鳥取大学で博士号を取得するなど人材育成への寄与度は高い。しかしながら、相手国研究機関の事情から若手研究者の参画が少なく、今後もその補充が期待できない状況にある。このような状況を勘案すると、メキシコ側の人材面では継続的発展の見通しは高いとは言い難い。

ただし、研究代表者は今後も継続して相手国との共同研究に関わって行く意思を表明しており、予算面においても、日本側、メキシコ側ともに新たな予算を獲得しているため継続的発展に期待したい。

#### **【成果を基とした研究・利用活動が持続的に発展していく見込み（政策等への反映、成果物の利用など）】**

本プロジェクトで作成された技術マニュアルや展示会開催などの活動は、研究・開発活動の持続的発展に繋がるものである。また、農家実証モデルについては、実証農家と CIBNOR 間の合意が更新され、プロジェクト終了後も継続して利用することが可能となった。加えて、CIBNOR が技術面の支援を続ける意思を示しており、農家実証モデルが、上述のマニュアルとともに技術普及の核として活用されていくことが期待される。

さらに、本プロジェクトが実施したアウトリーチ活動を通じて南バハ・カリフォルニア州農林水産業振興局の理解が得られたことから、今後農家実証モデルの活用に対し、州政府より経済面の支援が得られる可能性が高いと見込まれる。

### **4-3. 付随的成果**

#### **【日本政府、社会、産業への貢献】**

本システムは、乾燥地で地下水などの水資源が得られる環境であれば応用できるシステムであり、日本においても応用可能な知見を含んでいる。また、中南米諸国に限らず中東、アフリカ等の乾燥地において、食料生産の自給を希求する国々は多く、技術移転の可能性も高いと考えられ、日本の民間企業からの高い関心が期待される。

一方で、露地栽培結合型のアクアポニックスとしては、上述の水の収支など未完成の部分も残されており、技術移転や社会への貢献という観点からは、一気通貫型の技術の完成が望まれる。

#### **【科学技術の発展】**

水と塩類の流れやその収支から見た複合的なシステム化というアプローチは、当該分野における技術の基盤づくりに貢献したと言える。農家実証モデルの実証試験の結果明らかとなった課題（例：商品価値の高い魚種の養殖技術の開発とその稚魚生産の実用化、付加価値の高い好塩性作物の水耕栽培技術の開発、塩分濃度の高い地下水の浄化システムとしての機能強化など）は多く、技術の完成には道半ばと言わざるを得ない。しかしながら、これらの解決すべき課題を明らかにした意義は大きく、研究の継続によって、科学技術の発展への貢献が期待される。

#### **【世界で活躍できる日本人人材の育成（若手、グローバル化対応）】**

本プロジェクトは、4名の日本人若手研究者と延べ29名の学生がメキシコ現地における研究活動に参加し、乾燥地における農業や国際共同研究の経験を積んでおり、若手人材の育成に大きく寄与したと評価できる。乾燥地における食料生産は今後ますます必要になると予想され、世界での活躍が期待される。

#### **【知財の獲得や、国際標準化への取り組み、生物資源へのアクセスや、データ入手方法】**

知財獲得については、プロジェクト内では積極的な活動が見られない。今後は特許出願が可能な知的財産については適切に対処されることを期待したい。

なお、本プロジェクトで用いた生物資源について、相手国におけるその入手方法などは適切であったと判断される。

#### **【その他の具体的成果物（提言書、論文、プログラム、試作品、マニュアル、データなど）】**

両国の研究者の協働によって、CIBNOR モデルと農家実証モデルが構築され、実証試験が実施されたことは高く評価できる。また、プロジェクトで得られたデータに基づき、本システム全体を包含する技術マニュアルをスペイン語、英語、日本語で作成したことは、本技術の普及の根拠となり得るものであり、特筆すべき成果である。

また、上述の販売価格（収益）水利用効率（1.465 ペソ（約 10 円）/L）や養殖技術において構築された数理モデル、微生物モニタリングの結果明らかとなったシステム全体の微生物動態などは、今後の研究や技術の実用化においてレファレンスとなり得るものと評価される。

#### **【技術および人的ネットワークの構築（相手国含む）】**

組織や人的ネットワーク構築への努力は十分になされたと評価できる。鳥取大学と CIBNOR との学術交流は本プロジェクト以前から続いていたが、本プロジェクトによって養殖から作物の栽培、土壌管理、栽培施設管理、農水産業生産物のマーケティングまで交流の幅がより広がった。構築された人的ネットワークが存続し、活動が継続されて技術普及につながることを期待する。

### **4-4. プロジェクトの運営**

#### **【プロジェクト推進体制の構築（他のプロジェクト、機関などとの連携も含む）】**

研究題目ごとに日本側、メキシコ側共同で6つの研究グループが組織され、各グループにおける両国間の連携は十分に取れていたと評価される。実際の活動においては、グループ間で進捗や精粗の差は見られたものの、プロジェクト後半においてはグループ間の連携体制に改善が見られた。

加えて、プロジェクト後半では、農家実証モデルの農家圃場への設置にあたって農民と CIBNOR の合意が成立し、そのモデルを使った普及可能性の検討において CIBNOR と南バハ・カリフォルニア州農林水産業振興局との連携が構築された。このようにプロジェクトの推進体制は優れていたと判断できる。

### 【プロジェクト管理および状況変化への対処（研究チームの体制・遂行状況や研究代表者のリーダーシップ）】

農家実証モデルの建設にあたっては、メキシコの法令との関係で契約形態の見直しを余儀なくされ、実証モデル建設後も担い手の問題など様々な障壁が生じたが、CIBNORの協力も得られたことから契約・運営上の問題は解決し、農家実証モデルにおける実証試験の実施や生産物の販売まで至った。また、中間評価の時点では、グループ間の連携・統制が不十分であるように見受けられたが、プロジェクト後半では、農家実証モデルを核としたグループ間の連携が見られ、成果物としてシステム全体を包含する技術マニュアルが作成された。このように、特にプロジェクト後半における運営は優れていたと評価される。

また、研究代表者が精力的に日本側とメキシコ側の仲介を行い、プロジェクトを取り纏めたことも運営の改善に繋がったと考えられ、高く評価される。

### 【成果の活用に向けた活動】

アクアポニックスの普及のための活動として、展示会などの広報活動が多数回実施されたことや、南バハ・カリフォルニア州の2名の普及員が実際の実証試験に関わったことは高く評価できる。また、メキシコ側では、プロジェクトの成果展開にかかる新たな研究予算が獲得された。実証モデルを使った普及可能性の検討によって抽出された普及条件などにに基づき、今後の研究や普及活動が成されることを期待する。

### 【情報発信（論文、講演、シンポジウム、セミナー、マスメディアなど）】

本プロジェクトでは、原著論文33報（国際誌17報、国内誌16報）が発表され、国内外のワークショップ、セミナー、シンポジウム等における研究発表などは計35回、国内マスメディアにおける報道は11回であった。また、プロジェクトの成果の直接的なアウトリーチ活動として、現地の政府関係者や農家を対象とした展示会をCIBNORモデルで17回、農家実証サイトにおいて21回実施した。このように、プロジェクトの性質上、学術上のインパクトよりもアウトリーチ活動へより傾注したと見受けられるが、本プロジェクト中に多数のアウトリーチ活動が実施されたことは高く評価される。

### 【人材、機材、予算の活用（効率、効果）】

予算等の問題から実証試験の対象となる農家圃場が1か所に限定されたものの、選定された農家に設置した農家実証モデルはプロジェクト期間中CIBNORの研究者や日本から派遣された研究者、学生により有効に活用され、結果として実証試験を基にしたデータが得られ、技術マニュアルが完成した。今後も農家実証モデルが継続利用されることから、供与機材については、日本からの継続的な技術指導によって、相手国研究者や農家の手により、有効に活用されることが期待される。

## 5. 今後の研究に向けての要改善点及び要望事項

- (1) 露地栽培結合型アクアポニックスの普及（社会実装）のための普及条件は何れも重要な項目であるので、引き続き CIBNOR、南バハ・カリフォルニア州政府、民間企業などと交渉・協働を継続し、必要な組織化や体制を構築して実用化に向けた活動を継続していただきたい。
- (2) 今回開発されたシステムの社会実装をビジネス化（商業的利用）と捉えた場合、生産物（販売物＝商品）の選択、工夫が成否を分ける。最初からどういう商品を作れば良いか、販売価格を主に決定しておくべきだった。引き続き、商品価値（価格、機能性、栄養価、薬用効果など）の高い魚種の選定と養殖技術および稚魚生産技術の開発、機能性成分含量の高い好塩性植物の探索・選定と栽培技術の開発に取り組んでもらいたい。また、衛生管理を売りにするなど商品価値を高める方策も検討いただきたい。
- (3) 水・塩ストレス環境下に適応した生物種は、好適環境条件では見られない特異な生理的特性を持ち、その結果としてある種の体内成分の蓄積能が優れている場合がある。このような生理特性に着目し、機能性成分に富む魚介類・作物を見出し、それらを組み合わせた生産システムを開発する視点で研究を発展させてはどうか。作物生産技術では、植物体部位別（特に地上部と根）の体内成分の評価も重要であると考えられる。また、耐塩性植物では Na と Cl を分別して体内輸送・配分する能力を有しているため、両要素を分けた体内分配の機能を解析すれば、耐塩性メカニズムの研究進展にも貢献できる。
- (4) 本システムは太陽光発電の利用による地球温暖化ガスゼロエミッションが特徴であるが、生産コスト削減の観点から商業電源の代替利用の可能性もあると考えられる。システム稼働と事業の収益評価の観点から、現地の状況により適用度の高いシステムを検討することも実用化の面では重要だと思われるので、検討していただきたい。加えて、農家が受け入れられる低コストなアクアポニックスが実現できるかどうか、今一度検討されたい。
- (5) 本アクアポニックスを使った高塩濃度地下水の浄化の可能性を定量的に示すという残された研究課題について、引き続き取り組んでいただきたい。それはまた、本アクアポニックスの立地条件選定基準となり得ると期待される。

以上



## JST成果目標シート

研究課題名	持続的食料生産のための乾燥地に適応した露地栽培結合型アクアポニックスの開発
研究代表者名 (所属機関)	山田 智 (国立大学法人 鳥取大学 農学部)
研究期間	H26採択(平成26年5月1日～令和2年3月31日)
相手国名/主要 相手国研究機関	メキシコ合衆国/メキシコ北西部生物学研究センター

### 付随的成果

日本政府、社会、産業への貢献	・東日本大震災被災地での津波による塩類化土壌の修復技術への応用(塩除去作物により実現可能)・湖沼の富栄養化防止技術への応用(養分吸収力の高い作物により実現可能)・新産業「高付加価値水産物・農産物生産工場」への技術支援(水産物バナメイェビ、ホワイト・スヌーク、農産物(水耕)アリタノウ、(露地)トウガラシ(アパネロ、モロン)で実績あり)・新産業「自然エネルギーによる植物工場」への技術支援(可能;実証済)
科学技術の発展	・メキシコ乾燥地における水資源の保全・有効利用および土壌保全(可能。効率が課題)・水利用効率の高い農水産物生産システムに関する研究(可能)・塩類化土壌のファイトレメデーション(可能。効率が課題)
知財の獲得、国際標準化の推進、生物資源へのアクセス等	・乾燥地に適応した露地栽培結合型アクアポニックス(獲得準備中)・閉鎖型食料生産システムにおける衛生微生物学的安全性評価技術・農地土壌の塩類化防止技術(提案可能)・高温条件下で生育可能な作物種(ワダンソウ、スアエダ、スベリヒユ、テーブルビートについて、実証済)。
世界で活躍できる日本人人材の育成	・乾燥地における環境保全型生物生産法に精通し、国際的に活躍可能な日本側若手研究者の育成(若手研究員5名、派遣学生23名、国際誌17編)
技術及び人的ネットワークの構築	・新規技術である乾燥地に適応した露地栽培結合型アクアポニックスの構築(アクアポニックス国際シンポジウム<H27,メキシコ>)・乾燥地の持続的食料生産技術に関する世界的ネットワークの構築(国際シンポジウム水産養殖技術開発研究プロジェクト・ネットワーク<H27,品川>)
成果物(提言書、論文、プログラム、マニュアル、データなど)	・技術マニュアル;「乾燥地に適応した露地栽培結合型アクアポニックス」の出版(完了;R2年5月)・論文;「塩水を利用した養殖技術開発」、「塩水を利用した作物栽培技術開発」、「衛生微生物学的安全性評価技術開発」、「土壌塩類化防止技術開発」、「自然エネルギー利用技術開発」に関する論文投稿(国際誌17編、国内誌16編)

### 上位目標

メキシコ乾燥地に露地栽培結合型アクアポニックスが普及される。

普及体制の構築・普及プロジェクトの実施

### プロジェクト目標

塩分を含む水を利用した露地栽培結合型アクアポニックスが構築される。

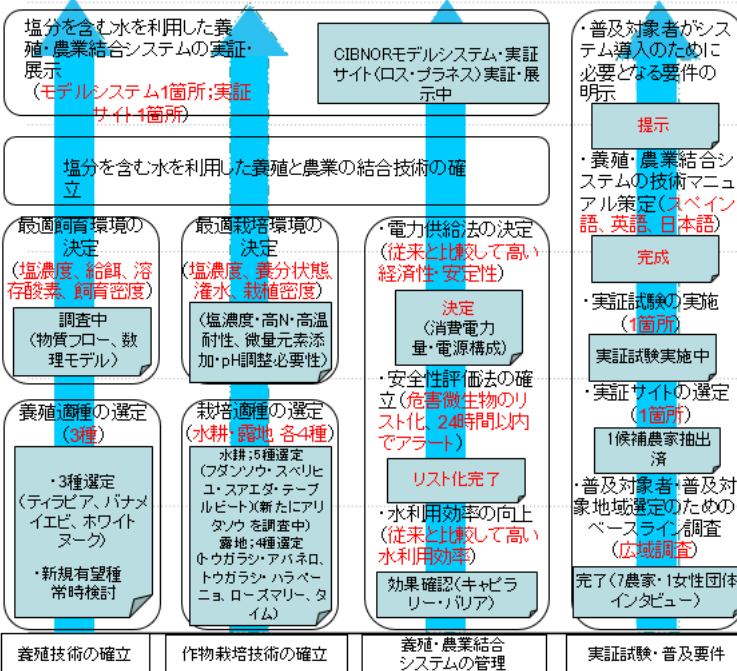


図1 成果目標シートと達成状況(2020年8月時点)