

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「環境・エネルギー（地球規模の環境課題）」

研究課題名「ジブチにおける広域緑化ポテンシャル評価に基づいた発展
的・持続可能水資源管理技術確立に関する研究」

採択年度：平成30年度（2018年）度/研究期間：5年/

相手国名：ジブチ共和国

令和2（2020）年度実施報告書

国際共同研究期間^{*1}

2019年7月1日から2024年6月30日まで

JST側研究期間^{*2}

2018年4月1日から2024年3月31日まで

（正式契約移行日2018年6月8日）

*1 R/Dに基づいた協力期間（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=JSTとの正式契約に定めた年度末

研究代表者： 島田沢彦

東京農業大学・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

世界的なコロナウイルスの蔓延により、2020年度は現地調査を進めることができず、全ての研究課題についてデータ解析の開始が遅れることになった。2021年2月より、現地調整員と博士研究員のジブチ渡航が許可され、現地での研究体制を整えている。

研究題目・活動	2018年度 (12ヶ月)	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度	2023年度	2024年度 (2ヶ月)
1. 水循環シミュレーションモデル整備							
1-1 地下水年代・水質推定のためのパラメータ把握							
1-2 水循環シミュレータモデルシステム構築							
1-3 水資源ポテンシャルマップの改善と更新技術移転							
2. 緑化・農地化ポテンシャル評価							
2-1 植生環境分布把握							
2-2 牧養力及び緑化ポテンシャルを図化							
2-3 既存農場調査と農地化ポテンシャル図化							
2-4 緑化・農地化ポテンシャル図作成手法の開発と共有							
3. 持続可能パイロットファーム営農							
3-1 節水かんがいシステムの開発							
3-2 有用植物・飼料の選定および高付加価値営農方法の開発							
4. 荒地緑化の経済的評価							
4-1 遊牧民の定住化による経済的把握							
4-2 荒地緑化による遊牧民への影響把握							
4-3 荒地緑化手法の採算性把握							
5. モデル普及・広報							
5-1 ワークショップ・研修の開催							
5-2 学術論文の投稿							
5-3 博士号授与者の輩出							

(2) プロジェクト開始時の構想からの変更点(該当する場合)

コロナ禍にあり、現地調査が出来ない状況の中、研究題目「3」「4」「5」については、1年半程度の実施後ろ倒しを検討している。

2. プロジェクト成果の達成状況とインパクト (公開)

【令和2年度実施報告書】【210531】

(1) プロジェクト全体

新型コロナウイルス（SARS-Cov-2）の世界的な蔓延の影響を受けて、2020年4月9日、本プロジェクトの業務調整員はJICAジブチ支所スタッフらと共に日本に帰国した。業務調整員の帰国後、日本側スタッフは2021年2月上旬まで渡航が出来ない状況下でのプロジェクト実施を余儀なくされた。コロナ禍の中、ジブチ国内での移動制限やジブチ大学閉鎖の影響もあり、コミュニケーションをとることが難しい状況が続いたものの、プロジェクト推進のため、新たな研究や遠隔体制を構築すること企画し、Zoomによるカウンターパート（CP）とのWeb会議の場を複数回開催した。2019年度中に整備した圃場や設置済みの調査機器、宿舎等は今年度に関しては、ジブチ側CPへ依頼して遠隔での現状維持が続けられた。

日本国内での研究においても、緊急事態宣言の発令、大学への入構制限、研究者の遠隔授業への対応などあり、日本国内でのプロジェクトに関わる研究遂行も難しい状況にあった。また、ジブチ側研究者を招聘し、多数プロジェクト関係者の参加を予定していた国際学会Desert Technology 14（4th International Conference on Arid Land, 2020年9月8日～11日、静岡）および、同学会と合わせて行う予定であった国内ワークショップとJCCは中止となった。そのような中、2020年9月17日に日本側研究者および業務調整、ジブチ側研究者、JICA職員、JST職員を交えて、Web会議を行った。そこでは、両国の新型コロナウイルスの蔓延状況の共有、第二期の予算内容、これまでの研究成果、今後の予定などが話された。

ジブチへのJICAの渡航申請の受付が再開され、2021年2月8日に現地調整員と博士研究員が渡航、圃場や設置機器のメンテナンスおよび現地CPとの打合せを行い、2021年度の研究体制構築の相談を行った。また、日本にて購入済の物品（化学分析ジブチラボ用機器、サーバー・AI解析用PC機器）の輸送手続きを行い、早急に現地の実験室整備および研究体制の強化を行う予定である。

日本側研究者を派遣しての現地調査は、2020年度に実施できなかったため、ジブチ全土の解析用ベースデータの収集を積極的に行った。研究課題「3」「4」については、現地調査活動が出来ないため進めることが出来なかったが、研究課題「1」「2」に関しては、ジブチ全土の水循環シミュレーション・地表面・植生環境把握解析のためのベースデータの収集を行った。また、前年度に収集したデータ・サンプルを解析して得られた知見・結果については、2021年9月に開催される国際沙漠学科（Desert Technology 14）において発表を予定している。

今後の現地調査は、コロナ禍にあっても日本側研究者がジブチ側研究者と協力して行えるよう、CPとのWeb会議を頻繁に行うこと、新たに参画可能なジブチ大研究者を共同研究者として取込むこと、研究遂行のためのサンプリング・実験などを遠隔で進められる体制を築くことを推し進める。

日本から輸送した資機材が現地に導入された後は、それら資機材の使用法を含めたワークショップを業務調整員と博士研究員の助力のもと遠隔で複数回開催する予定である。

【参考：2020年度実施イベント】

2021/3/1 TUA-UD ミーティング 今後の研究計画の協議、体制についての確認

2021/3/11 プロジェクトマネージング（PM）ミーティング 月一での打合せを行うことに同意

【参考：2021年度実施予定イベント】

2021/4/12 PM ミーティング

【令和2年度実施報告書】【210531】

2021/5/24 PM ミーティング
 2021/6/21 PM ミーティング
 2021/4/4 輸送物品横浜港発
 2021/5/18 輸送物品ジブチ大学研究室着
 2021/2/8-3/12 現地調整員荒井氏ジブチ渡航
 2021/2/8-3/5 博士研究員マイ氏ジブチ渡航
 2021/3/1-5/31 現地調整員齋藤氏ジブチ渡航
 2021/5/24-6/23 博士研究員マイ氏ジブチ渡航
 2021/7/7-10/6 現地調整員齋藤氏ジブチ渡航予定
 2021/9/7-9/10 国際沙漠学会 (Desert Technology 14) 参加
 2021/9/13-9/23 島田代表渡航予定

(2) 研究題目 1. 水循環シミュレーションモデル整備

1) 設置した水位計のよる地下水位のデータ収集 (島田, 荒井, 齋藤, Malow)

2019 年度に Ambouli の支流ワジ沿いに位置する Ali-Faren (A 農場) の井戸 (2008 年 USAID 援助により掘削, 61 m 深) に水位計を埋設しデータ伝送システムを設置し, 井戸水位が 10 分インターバルで計測, 毎時間サーバーにデータ転送がなされ, 日本からもデータが確認できるリアルタイム地下水位モニタリングシステムが確立された. このような自動データ伝送システムはコロナ禍のような行動制限がかかるような状況であっても有効であることが立証された. しかし, 内部蓄電バッテリーの不具合により 2020 年 8 月末にデータ送信が途絶えてしまった. そこで, 2021 年 2 月の日本人スタッフ渡航時にバッテリーを交換し, 2 月 17 日から再稼働を確認した (図 1-1) .

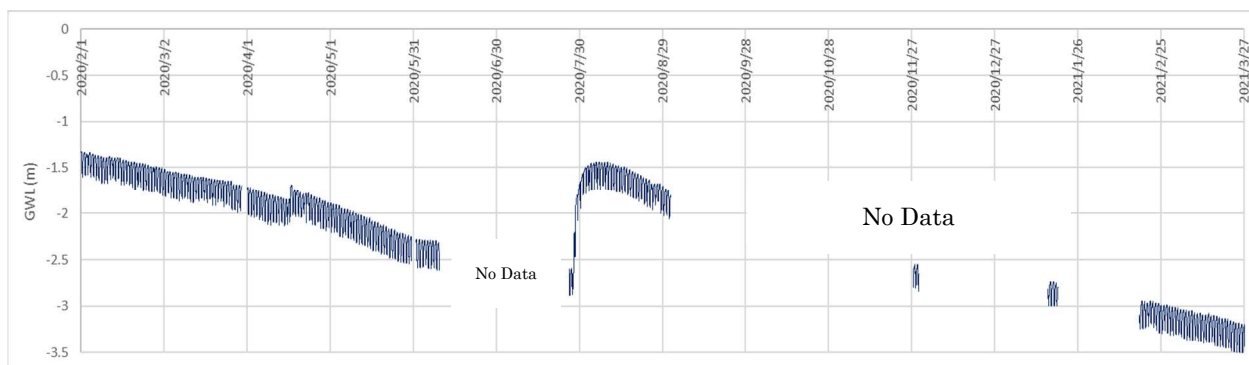


図 1-1 Ali-Faren (A 農場) の取水井戸の水位変動 (2020/2~2021/3)

地下水挙動から無降雨日におけるソーラーポンピング水使用による 30cm/day の地下水位の日変動が認められ, 無降雨期間における 6~8 mm/day の地下水低下トレンドが確認できた. A 農場に設置した雨量計によると, 2020 年 7 月 26~28 日の 3 日間に 52 mm の降雨を記録し, 7 月 28 日~8 月 3 日までに 1.4 m の水位上昇を確認した (図 1-2) .

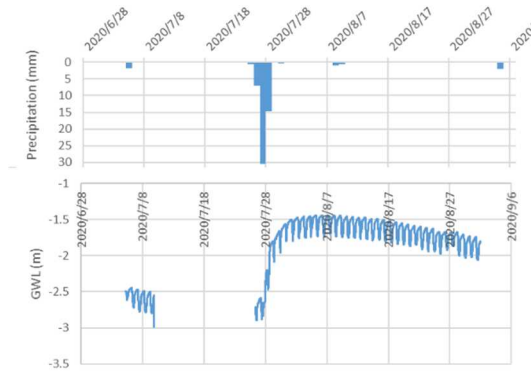


図 1-2 2021 年 7 月の Ali-Faren (A 農場) における降雨イベントに対する水位変動

2) 広域地形情報・衛星画像の入手および

PALSAR-1/2 データを用いた立体画像作成および断層解析 (島田, Yessy, May, 関山)

ジブチ全土を含有したスケールでの水循環シミュレーション (GP1) および地表面緑化・牧養力ポテンシャル評価 (GP2) 実行のため、ジブチ全土の標高図・地質図および衛星画像データの収集を行った。ジブチの 3D 地質モデル作成および断層解析を行うため、5m 解像度 ALOS World 3D (AW3D) を RESTEC (リモート・センシング技術センター)、10 万分の 1 および 20 万分の 1 の地質図を CERD (ジブチ調査研究センター) から入手した (図 1-3- (A), (B))。さらに、地表に表出している断層情報のシグナルや地表面環境の把握を行うため、RESTEC からジブチ全土の 10m 解像度のパンシャープ光学衛星画像 (ALOS Prism+AVNIR2, Band 1: 2: 3: 4 = Blue: Green, Red: NIR) および、SAR (合成開口レーダー) 画像 (ALOS PALSAR-1/2) を入手した (図 1-3- (C), (D))。地下水は断層とその周辺の母岩に流入するため、ジブチ国における断層の分布を分析することは水循環シミュレーションの精度向上に寄与する。そこで、地質図 (図 1-3- (B)) に記載されている断層位置を教師として、DEM (図 1-3- (A)) から算出される地形情報や光学衛星画像 (図 1-3- (C)), SAR 画像 (図 1-3- (D)) から得られる情報全ての情報を説明変数として深層学習をさせた断層の抽出モデルの開発を目指す。

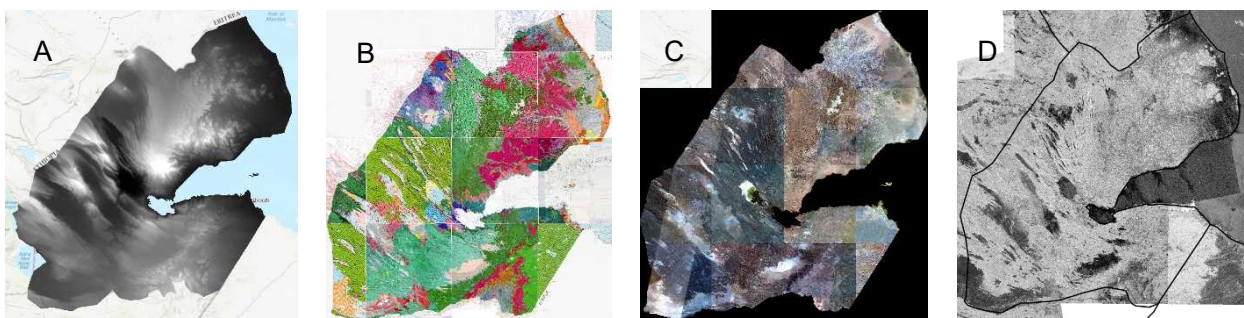


図 1-3 (A) Digital Elevation Model (AW3D 5-m resolution); (B) Scanned Geology Maps aggregated from ISERST (1983; 1986; 1987; 1995), Carte Geologique de la Republique de Djibouti a 1:100, 000 Djibouti, ISERT-ORSTOM/ BRGM, Paris, CERD (2018) Carte Geologique au 1:200, 000 de la Republique de Djibouti, Geologie de Djibouti; (C) Mosaic Pan-sharpen Satellite Imagery Data (2006-2010 ALOS Prism+AVNIR2 10-m resolution); (D) Mosaic SAR HH backscattering coefficient Satellite Imagery Data (2006-2010 ALOS-PALSAR 1-2)

3) ジブチ地下水の起源およびジブチに生育する植物の利用する水源に関する研究（中西・朝倉）

ジブチ国内に存在する深層地下水の涵養域と地下水年代を推定するため、同国内の 4 地域（Djibouti, Arta, Ari-Sabieh, Dikhil）において 2020 年 2 月～3 月に採取した計 19 の深層地下水試料を対象にイオン組成解析、ならびに水素・酸素安定同位体比とトリチウム（ ^3H ）濃度の測定を、2020 年 5 月～2021 年 3 月に行った。地下水のイオン組成については、主要イオン 14 成分（ Li^+ , Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , F^- , Cl^- , NO_2^- , Br^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , PO_4^{3-} , HCO_3^- ）の濃度を、イオンクロマトグラフ（島津製作所 HIC-SP）を用い測定し、これらと EC の測定値をパラメータとした階層クラスタ解析（ウォード法）を行った。水素・酸素安定同位体比は、国立研究法人産業技術総合研究所において酸素水素安定同位体比分析装置（PICARRO; L2140-*i*）を用いて測定し、標準海水（Standard Mean Ocean Water, SMOW）の同位体比からの千分率偏差（‰）で表した。トリチウム濃度は、（株）地球科学研究所において電解濃縮 - 低バックグラウンド法により測定した。

<地下水試料のイオン組成と EC 値によるクラスタ解析>

階層クラスタ解析の結果によると、図 1-4 に示したように対象地下水は 3 つのクラスタに分類され、それぞれを C1～C3 とした。

地下水試料の水素・酸素安定同位体比およびトリチウム濃度とそれらを用いた若干の考察

水素・酸素安定同位体比とトリチウム濃度の測定結果をまとめて表 1 に示した。また、水素安定同位体比（ δD ）と酸素安定同位体比（ $\delta^{18}\text{O}$ ）の相関関係を示す δ -ダイアグラムを図 1-5 に示した。Dikhil 地区の地点 16 は、近隣の地点 15 や 14 と比較して、水質組成のみならず同位体比も大きく異なった。また、トリチウム濃度が最高値を示したのは Dikhil 地区の地点 16（Sabbalou）の 1.76 T. U. で、地点 6, 9, 11, 12, 15 および 17 では 0.3 T. U. 以下であった。水素・酸素安定同位体比から判断すると、地点 16 は同地区の地点 14 および 15 と涵養標高が異なること、地点 15 と 17 は異なる地区に位置するものの安定同位体比とイオン組成が近いことから、涵養地域の標高が相似している可能性があることが示された。

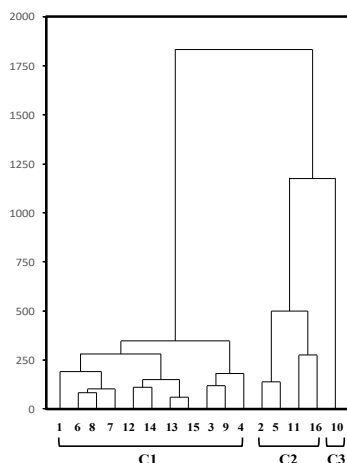


図 1-4 Classification of groundwater samples by Ward's hierarchical clustering

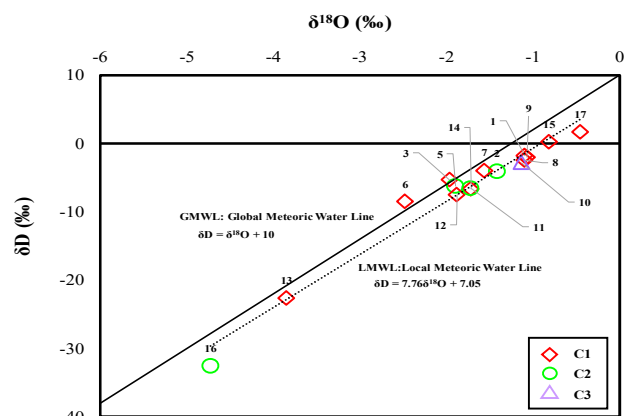


図 1-5 Relationship between $\delta^{18}\text{O}$ and δD of groundwater in Djibouti

表1 Stable and radiogenic isotopes in groundwater samples

No.	Point name	Region	Cluster	$\delta^{18}\text{O}$ δD		^3H				
				‰		T.U.			Bq/L	
1	PK46	Arta	1	-1.09	-1.78	0.68	±	0.11	0.081 ±	0.013
2	Alifaren	Arta	2	-1.41	-4.09	0.42	±	0.11	0.05 ±	0.013
3	PK30-1	Arta	1	-1.96	-5.30	1.00	±	0.12	0.119 ±	0.014
5	PK30-2	Arta	2	-1.89	-6.26	1.34	±	0.12	0.16 ±	0.014
6	PK23	Djibouti	1	-2.48	-8.52	<0.3			<0.04	
7	PK50-1	Arta	1	-1.56	-3.95	0.42	±	0.11	0.05 ±	0.013
8	PK50-2	Arta	1	-1.10	-2.44	0.36	±	0.11	0.043 ±	0.013
9	PK51	Arta	1	-1.07	-2.04	<0.3			<0.04	
10	Hambocta	Alih-Sabieh	3	-1.13	-2.80	1.00	±	0.12	0.119 ±	0.014
11	Midgarra	Alih-Sabieh	2	-1.72	-6.52	<0.3			<0.04	
12	Mindil	Dikhil	1	-1.88	-7.48	<0.3			<0.04	
13	Afka arraba	Dikhil	1	-3.85	-22.63	1.13	±	0.12	0.135 ±	0.014
14	Sek sabir	Dikhil	1	-1.72	-6.69	0.86	±	0.12	0.103 ±	0.014
15	Zina male	Dikhil	1	-0.81	0.22	<0.3			<0.04	
16	Sabbalou	Dikhil	2	-4.73	-32.59	1.76	±	0.12	0.21 ±	0.015
17	PK20	Djibouti	1	-0.45	1.70	<0.3			<0.04	
18	rainwater	Djibouti		-5.92	-38.27					
19	Sea water	Djibouti		1.11	8.32					

<トリチウム濃度を用いた地下水年代測定>

トリチウム (^3H) を用いた地下水年代の推定方法は、その半減期 (12.4 年) と 1960 年代前半に行われた水爆実験に由来する降水中のトリチウム濃度の変動特性に基づいている。水爆実験開始以前の 1950 年代における降水トリチウム濃度は 5 T.U. (Tritium Unit) とされているので、仮に同年代以前に涵養された地下水である場合、そのトリチウム濃度は初期値の 5 T.U. から 12.4 年の半減期に従い減衰し、2020 年にはおよそ 0.1 T.U. となるはずである。したがって、0.1 T.U. より高い値が検出されれば、水爆実験の始まった 1960 年代以降に涵養された地下水であると想定される。他方、本調査で用いたトリチウム分析法 (電解濃縮 - 低バックグラウンド法) の検出限界は 0.2~0.3 T.U. であることから、測定値として 0.1 T.U. という値が与えられることはない。仮に水爆実験が終了した後、すなわち 1970 年代初頭に涵養された地下水の場合、12.4 年の半減期に従うと、現在のトリチウム濃度は約 1.05 T.U. となるはずである。従って、地点 6, 11, 12, 15 および 17 の地下水トリチウム濃度は検出限界の 0.3 T.U. 以下、つまり 1.05 T.U. よりもさらに低い値であったことから、水爆実験時代以前に涵養された古い地下水 (現在より 60 年以上前) である可能性が極めて高いといえる。また、検出限界以上のトリチウム濃度が示された地点の値のみを使い、同濃度と水素・酸素安定同位体比との関係を図 1-6 に示した。その結果、両者間にはいずれも負の相関関係が示された。これは、涵養年代の古さと気温とが負の相関関係にあることを示すことが考えられる。

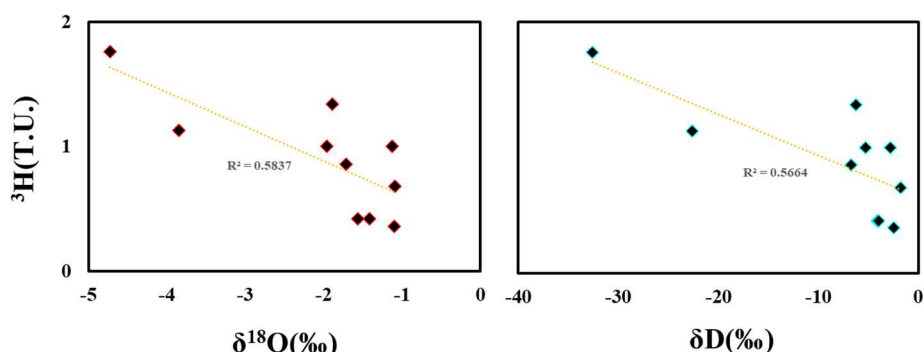


図 1-6 Relationship between tritium and $\delta^{18}\text{O}$, δD of groundwater of Djibouti.

4) Dikhil 州アロウ集水域における流域水循環と水資源管理に関する研究（鈴木，鈴木綾）

2019 年 12 月および 1 月に行った現地調査およびサンプリングで得たデータを元に，GETFLOWS を用いて Dikhil 州アロウ集水域の初期的解析を行った（鈴木綾 2021「ジブチ・アロウ集水域の水循環解析と水源管理に関する研究」東京農業大学 2020 年度修士論文）。

水資源ポテンシャルの評価において，様々な解析を行う際，行政機関や国連機関からデータを入手する必要がある。しかし，入手したデータの品質が保証されているわけではないため，整理および整合性の検証を行う必要がある（沖ら 2002：気候変動を考慮したグローバルな水資源需給の将来，第 6 回水資源に関するシンポジウム論文集，p1-6）。特にジブチにおいて，水資源開発は自国単独だけではなく，様々な国から支援を受けた背景がある。そこで，既存の水資源情報の整合性を検証するとともに，水資源ポテンシャル評価の一環として，井戸情報を基準とした地下水解析を行った。

<既存データベースの整合性>

ジブチにおいて生活用水や農業用水として地下水の利用には 3 種類に分類される。降水や地下水位上昇に伴う表流水，浅層帯水層を利用する浅井戸，深層帯水層を利用する深井戸である。これらの水資源の情報を農業省と FAO が 2017 年にデータベース化した。しかしながら，データベースには調査年の不明や項目の未記載が見受けられ，整合性検証が必要であるため現地調査を行った。その結果，座標誤差は最大約 100m の地点が存在し，複数箇所で使用されていない井戸があった。また 2017 年以前に国際支援によって設置された新しい井戸が存在したが，データベースには記載がなかった。このことより，本研究においてはデータベースのみの利用ではなく，調査した地点において検討した。

<井戸規模の地下水解析の検討>

ジブチには常流している河川は存在しなく，降雨時に水が流れるワジが主河川である。本研究では同国最大の集水域であるハンレ集水域の南部支流にあたるアロウ集水域（面積：18.9 km²）を対象とした（図 1-7）。同集水域は，現地調査した地点を複数含みかつ，13 ヶ所の小規模農園を含んだ地域である。同集水域の地形は，ワジが東から西へ横切っており，標高差は 300m 程あり，ワジ沿いは水食による急な傾斜を形成している（図 1-8-A）。土地被覆（Sentinel-2）は，ほとんどを岩と礫・砂に覆われており，点在する植生は小規模農園である（図 1-8-B）。季節的に気温が低くなるタイミングで多年生植物が成長するが，一年のうちほとんどが裸地である。地質は，集水域の大部分をダルハ玄武岩（9.0M-3.8M 年前）に覆われ，ワジ下流部起伏がなだらかな部分で新期堆積物（1.2M-現在）が広がっていることが示された（図 1-8-C）。

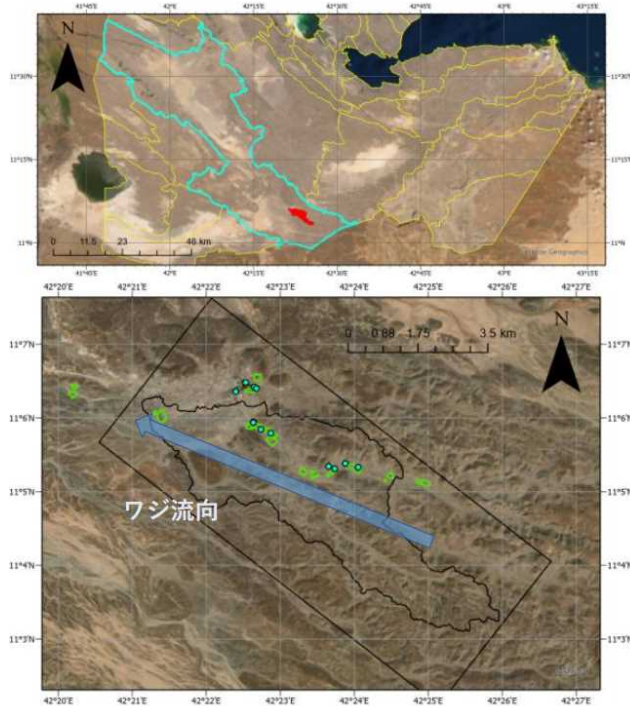


図 1-7 Location of Hanle watershed, survey points and farms in the Hallow catchment

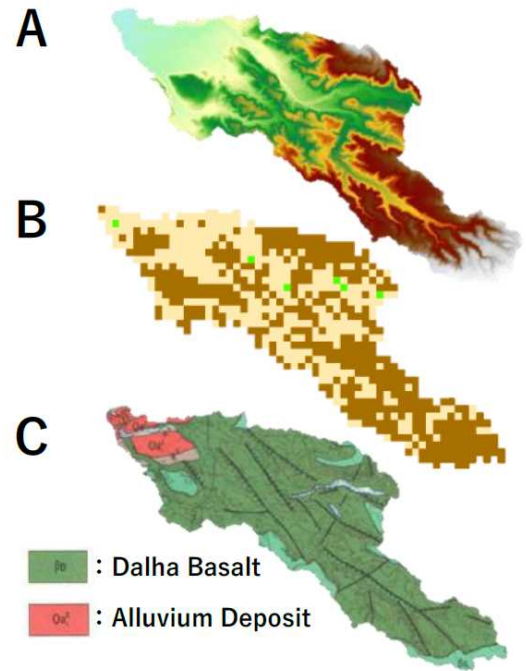


図 1-8 Surface information of Hallow catchment

限られた情報（水資源や地質情報）で地下水解析を三次元で行うために、ジブチでの水循環解析の実績のある統合型水循環シミュレーションシステム GETFLOWS を採用した。GETFLOWS は登坂ら（1996：地表流と地下水流を結合した 3 次元陸水シミュレーション手法の開発，地下水学会誌，第 38 巻第 4 号，253-267）によって開発され，支配方程式を解くために積分型有限差分法を採用することで地表システムと地下システムの両方を同時に解く物理ベースのモデルである。GETFLOWS の空気・水二相流体の支配方程式は，水・空気の質量保存式と一般化ダルシーの法則を組み合わせた次式で表される（式 1）。

$$\nabla \left(\frac{K k_{rp}}{\mu_p B_p} \nabla \psi_p \right) - q_{ps} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\Phi \frac{S_p}{B_p} \right) \quad (1)$$

$p = \text{water, air, NAPL}$

ここに， K は絶対浸透率 (m^2)， k_{rp} は相対浸透率 (-)， μ_p は粘性係数 ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)， B_p は容積係数 (m^3/m^3)， Φ は間隙率 (-)， S_p は飽和率 (-)， q_p は標準圧力における単位体積，単位時間あたりの生産圧力速度 ($\text{m}^3/\text{m}^3/\text{s}$) である。これらの式は全ての計算格子の質量収支を満足するよう同時陰的に数値解が得られ，それぞれの格子で圧力，水相飽和率が求められる。また式中の流体物性（粘性係数，容積係数）は圧力の関数，また地盤物性（毛細管圧力，相対浸透率）は不飽和領域において飽和度の非線形関数となり，Newton-Raphson 法により反復的に解かれる（登坂ら 1996）。

解析地域は，約 $30\text{m} \times 30\text{m}$ の直行格子によって二次元で空間的に離散化した。標高や地質，土地被覆は平面格子のコーナーポイント座標に割り当てを行った。次に，平面格子を深度方向に拡大し，鉛直方向に沿って再度離散化し，三次元の立体格子を作成した（図 1-9）。記録された格子総数は 291, 450 セルであった。

【令和 2 年度実施報告書】【210531】

調査によって得られた 11 地点の水位標高と地下水解析によって得られた推定水位標高の比較を図 1-10 に示す。推定水位は実際の水位よりかなり深く存在する結果となり、誤差範囲 9.43m (RMSE ; Root Mean Square Error) までの再現にとどまった。入力標高データが 5m 分解能であることを考慮して、おおよそ±5m と見込まれるが、再現の傾向として地表面に近くなるにつれて、推定値は深く見積もられることがわかった。このような誤差が発生する要因は、地盤物性における地質情報が再現できていなかったためと考えられる。本解析では浅層地下水を対象としていたため、ワジ (堆積物) の層厚が重要であり、通常は文献や微動アレイ調査等で求められるが、情報を入手することはできなかった。このことから、今後の浅層地下水を対象とした解析において、ワジの層厚を調査する必要があると考えられる。

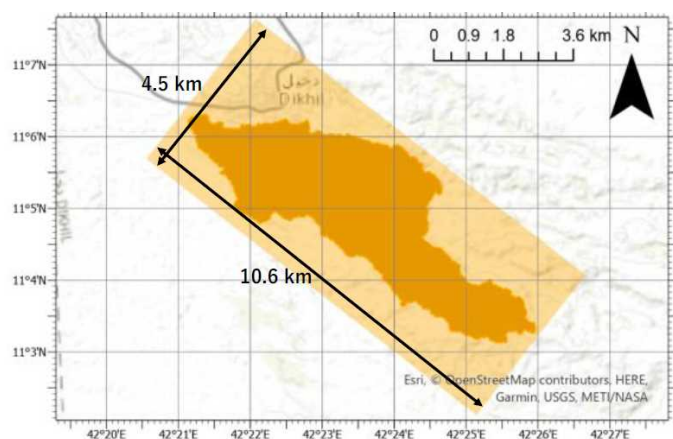


図 1-9 Discretization range of plane lattice

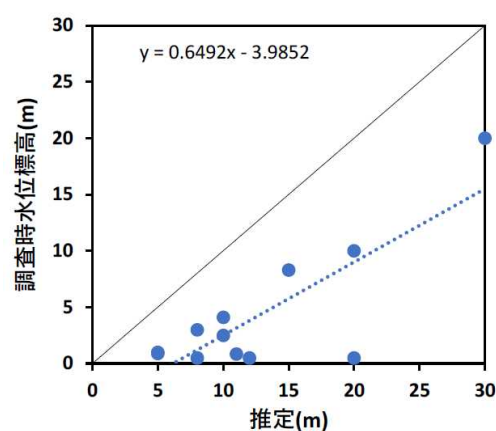


図 1-10 Result of groundwater analysis

(3) 研究題目 2. 緑化・農地化ポテンシャル評価

1) ジブチにおける農地化ポテンシャルの評価

衛星画像の深層学習によってジブチにおける農園の検出モデルの開発し、ジブチにおける農園の立地要件を地理的特徴から把握できることが示唆された (佐藤 2021 「ジブチにおける衛星画像を用いた深層学習による農園領域抽出」東京農業大学大学院 2020 年度修士論文)。

2010 年におけるジブチ全土の農園の位置および形状の抽出を 10m 解像度 ALOS パンシャープ衛星画像 (図 1-3 - (C)) を用い、2018~2020 年における農園の抽出を Google Earth Pro の衛星画像を用い、それぞれ目視によるデジタイジングで行った (図 2-1)。

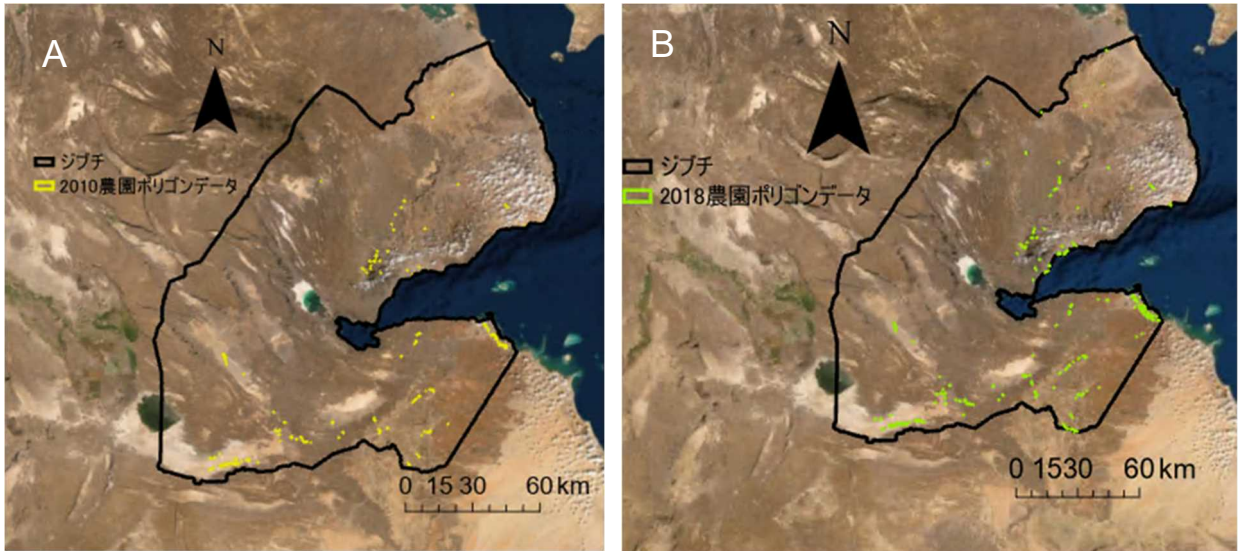


図 2-1 目視判読により抽出したジブチにおける農園の位置 (A : ALOS パンシャープン画像を用いた 2010 年の農園, B : Google Earth Pro 画像を用いた 2018~2020 年の農園)

目視で判読出来るかぎり農園の抽出を行った結果, 2010 年, 2018-2020 年の農園数は, それぞれ 339 個, 670 個, また面積は 687ha, 1090ha であることが算出できた. 各州の農園分布は表 2 および表 3 に示したとおり, Dikhil 州に多くの農園が分布 (51.6%) してきたこと, 2010 年から 10 年程度で Arta, Ali Sabieh 州や Tadjoura 州にいて設営農園面積が倍増したことが明らかになった.

表 2 2010 年におけるジブチの抽出農園分布

州名	農園面積 (ha)	農園数	州別農園面積比 (%)
Djibouti	41.1	17	6.0
Arta	130.1	60	18.9
Ali Sabieh	78.2	46	11.4
Dikhil	354.3	147	51.6
Tadjoura	68.2	54	9.9
Obock	15.4	15	2.2
Total	687	339	100

表 3 2020 年におけるジブチの抽出農園分布

州名	農園面積 (ha)	農園数	州別農園面積比 (%)
Djibouti	47.1	59	4.3
Arta	294.5	136	27.0
Ali Sabieh	193.9	107	17.8
Dikhil	388.2	211	35.6
Tadjoura	145.8	129	13.4
Obock	20.6	28	1.9
Total	1090	670	100

抽出した 2018 年のポリゴンデータを教師として, 説明変数として Sentinel-2 マルチスペクトル画像 (Band-2, 3, 4, 8, 12) を用い, Mask R-CNN 手法の深層学習による農園抽出モデルの開発を行った. モデル精度検証の結果, NDVI (NIR と Red の正規化差指数) ・NGRDI (Green と Red の正規化差指数) ・NDWI (NIR と短波長赤外線 SWIR の正規化差指数) の 3 バンドを学習に用いたモデル (ユーザ的中率 27.7%, プロデューサー的中率 21.1%) の方が, RGB (R:G:B = Band-4:3:2) 画像のモデル (ユーザ的中率 25.9%, プロデューサー的中率 11.8%) よりも高い精度を示した (図 2-2) . このモデルでは農園が密集している箇所における農園個数の検出に困難があるため高い精度での推定できなかった. このため, 単独農園のみでの学習モデルを作り, このモデルでの精度検証によって精度を向上させた (プロデューサー的中率 34.8%) .

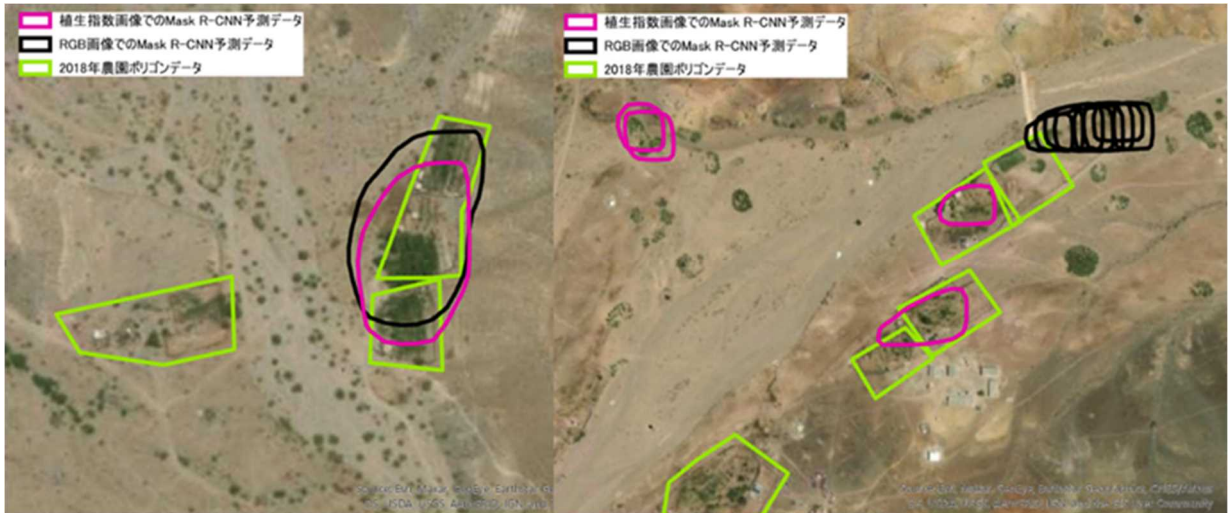


図 2-2 農園予測モデルによる推定結果の例

2) UAV 画像を用いた緑化ポテンシャルの推計（草地のバイオマスの推定による牧養力の評価）（関山，佐藤，齋藤）

2020年3月にAli Sabieh州，Arta州とDikhil州の3点ずつ計9点でUVA（ドローン）のマルチスペクトルカメラを用いて草地の撮影を行った。この9地点は牧養力を算出するためのプロテクトゲージ設置予定地である。このデータを元に草地のバイオマスの推計を行っている。

3) UAV 画像を用いた草地における優占種の同定（関山，佐藤，田中，齋藤，木村）

2020年3月にAli Sabieh州，Arta州とDikhil州の3点ずつ計9点でUVA（ドローン）のマルチスペクトルカメラを用いて草地の撮影を行った。ディープラーニングを用いて衛星画像およびUVA画像の解析を進めるため，作製したさく葉標本やGBIFのデータベース等を参考に，優占種の同定を行っている。

4) ジブチに自生する植物（*Aloe djiboutiensis*）の有用成分の解析（檜谷，橘）

本プロジェクトが開始する前から東京農業大学森林総合科学科治山緑化学研究室が保有していたアロエジブチエンシス（*Aloe djiboutiensis*）の有用成分を解析した結果，*A. djiboutiensis*から一部のアロエしか含まれない希少な薬理成分が検出された。

5) ジブチに自生する植物（*Cissus rotundifolia*）の農業資材としての利用の検討（檜谷，橘）

本プロジェクトが開始する前から東京農業大学森林総合科学科治山緑化学研究室が保有していたシッサスロツンデフォリア（*Cissus rotundifolia*）の植物体の化学性を解析した。結果，植物地上部の抽出液は強い酸性であることが明らかとなった。現在，酸性起因物質の特定を行っており，物質が同定された後に，土壌と攪拌し栽培実験を行い他の植物の生育を阻害しないか，土壌改良材としての評価を行う。

6) 遊牧民が飼育するヤギの栄養状態評価（黒澤，齋藤，ダヤ，木村）

牧養力の評価の一環として，遊牧民および市街地酪農家の飼育山羊の栄養状態を比較する目的で，アリサビエ・アンブリ地区の遊牧民（ソマリ族）が飼育する7-8ヶ月齢の雌ヤギを対象に，体躯・体重測定，管理方法の聞き取りおよび血液採取（グルコース，BHBA検査用）を行った。

【令和2年度実施報告書】【210531】

(4) 研究題目 3. 持続可能パイロットファーム営農

1) 設置済み観測装置のデータ回収とその気象データを活用した作物灌漑水量の推定(渡邊文, 鈴木)

Ali-Faren(A 農場)に設置した水位計(井戸と貯水タンク), 気象観測装置のデータ回収をジブチ大学 CP がおこなった. ジブチ国での灌漑計画の基礎データの不足を補うため, ここで観測された気象データ(2020年4月から2021年3月末までの気温, 相対湿度, 風速, 日射量, 降雨量:表4)を用いて, A 農場での10月から3月におけるトマト栽培の灌漑水量の推定をFAOのCROPWATを用いて行った.

表4 Monthly meteorological data from April 2020 - March 2021

		Altitude 448.0		Latitude 11.48 N			Longitude 42.83 E						
Year	Month	Wind Speed (m/s)		Air Temp (°C)			Relative Humidity (%)			Sunshine Hours (h)			Rainfall (mm)
		Average	Max	Average	Max	Min	Average	Max	Min	Average	Max	Min	
2020	Apr	1.8	7.0	27.2	34.0	20.6	76.7	96.7	34.9	9.8	10.7	7.3	34.9
	May	1.6	7.0	32.4	42.6	23.3	50.5	91.7	11.1	10.4	10.7	9.2	0.0
	Jun	1.7	8.1	35.1	43.7	23.3	30.0	88.1	10.1	10.1	10.7	7.8	0.0
	Jul	2.7	10.1	33.6	43.0	22.6	38.0	92.7	15.4	9.9	10.7	4.8	55.3
	Aug	2.5	8.1	33.6	42.2	24.3	40.7	78.3	19.1	10.0	10.5	8.8	1.6
	Sep	1.6	7.6	32.5	41.9	23.8	46.9	85.8	13.9	9.9	10.5	8.5	2.2
	Oct	1.7	6.0	28.6	39.5	20.5	53.3	91.9	13.7	10.1	10.3	8.8	0.2
	Nov	1.8	5.5	25.3	33.7	18.4	68.5	93.8	13.7	9.5	10.2	7.2	22.2
Dec	2.1	6.0	23.6	32.5	17.1	75.2	93.5	42.1	9.4	10.0	6.2	27.1	
2021	Jan	2.2	6.0	22.5	29.8	16.2	70.8	90.9	24.2	9.6	10.2	8.0	0.0
	Feb	2.0	6.5	23.2	31.0	16.2	71.0	91.5	24.2	9.8	10.3	7.8	7.8
	Mar	2.2	7.0	25.5	35.8	16.2	58.7	91.0	11.9	10.2	10.5	9.8	0.0

その結果, 月別の基準蒸発散量(ET₀)は年平均で5.7 mm/dayであることがわかった. とくに, ET₀は7月が最大で7.9 mm/dayを示し, 最小は12月で3.9 mm/dayを示した. 一方, 現地のトマト栽培期間である, 10月から3月における有効雨量は55.2 mmあり, またトマトの作物要求水量(表5)は2.9~4.2 mm/dayであることが明らかとなった. 今後は, これらの結果から既存井戸の地下水の湧水量から適正な灌漑面積についても検討したい.

表5 Crop Water Requirement for Tomato

Month	Decade	Stage	Kc	ETc	ETc	Effrain	Irr. Req.
			coeff	mm/day	mm/dec	mm/dec	mm/dec
Oct	1	Init	0.6	3.6	3.6	0	3.6
Oct	2	Init	0.6	3.4	34.2	0	34.2
Oct	3	Init	0.6	3.2	34.9	0.3	34.6
Nov	1	Deve	0.6	2.9	29.4	5.3	24.1
Nov	2	Deve	0.68	3.0	30.2	7.9	22.3
Nov	3	Deve	0.78	3.4	33.5	8.1	25.4
Dec	1	Deve	0.89	3.6	36.4	9.1	27.4
Dec	2	Mid	0.99	3.9	38.9	10	28.8
Dec	3	Mid	1.02	4.0	44.5	6.7	37.8
Jan	1	Mid	1.02	4.1	40.8	0.1	40.7
Jan	2	Mid	1.02	4.1	41.2	0	41.2
Jan	3	Mid	1.02	4.2	46.5	0	46.5
Feb	1	Late	0.97	4.1	41.1	2.2	38.9
Feb	2	Late	0.85	3.7	37.0	3.3	33.7
Feb	3	Late	0.74	3.5	28.1	2.2	25.9
Mar	1	Late	0.68	3.5	10.5	0	10.5
Total					530.8	55.2	475.6

2) UVA 画像を用いた農園の 3D モデルの構築および風向分析(入江, 齋藤)

2020 年 3 月に Ali-Faren(A 農場)および Damerdjog(C 農場)において, UAV を用いた撮影を行い, その画像から 3D モデルを構築し, 風向分析の予備分析を行った.

<Dikhil および Ali Faren における農地環境の気象特性と生垣樹林帯の防風効果>

農地環境の気象特性を探りパイロットファーム農園整備に役立てることを目的として調査を行い以下の結果を得た.

① Dikhil 州篤農家 Djama Guedi 氏の農場 (GPS 地点 N 11° 05.301' E 42° 24.088' 標高 521m) において, 過去に収集された気象データ (2012 年 3 月~2014 年 8 月) を解析した結果, 気温は 5, 6, 7 月に約 40°C-42°C の最高気温であり, 12, 1, 2 月に約 19-20°C の最低気温であった. 相対湿度は 5, 6, 7 月に約 22%-25% と乾燥状態を示し, 12, 1, 2 月に約 50%-60% と高かった (図 3-1). 風環境は 5 月~9 月に南風, 10 月~4 月に東北東の風が多く, 平均風速 5 月~9 月 1.4 m/s, 10 月~4 月 2.8 m/s, 平均最大風速 5 月~9 月 2.5m/s, 10 月~4 月 4.0m/s であった (図 3-2). 農園上空高さ 10m、流入風向 ENE, 風速 2.8m/s における風況解析シミュレーションより, 農園北東側に位置する樹林帯 (樹高 3m-4m ギンネム 2 列, 樹高 6m-7m ナツメヤシ農園内) の防風効果を確認できた (図 3-3). 今後は現地実測調査による防風効果の影響範囲と風況シミュレーションを実証する.

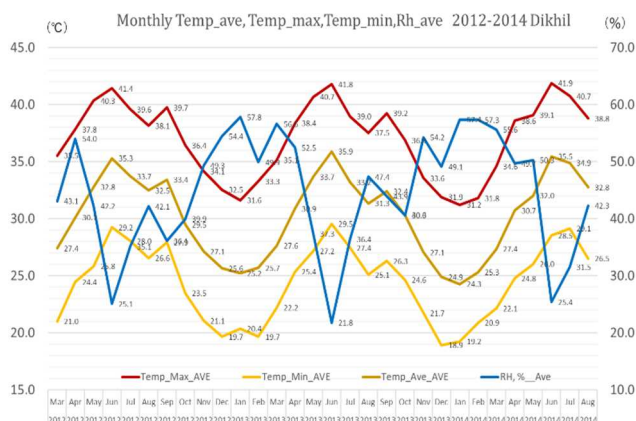


図 3-1 Dikhil 農園における月別最高・最低・平均気温および相対湿度の変化

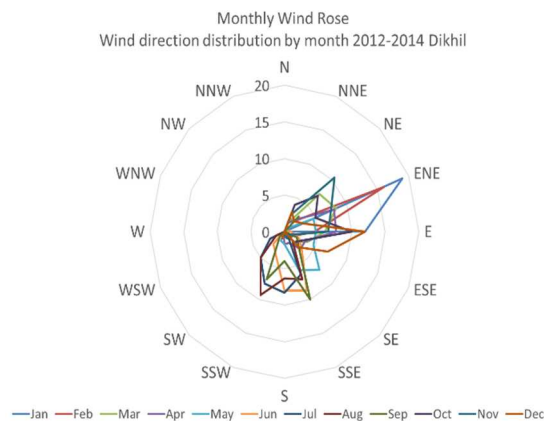


図 3-2 Dikhil 農園における月別風配図

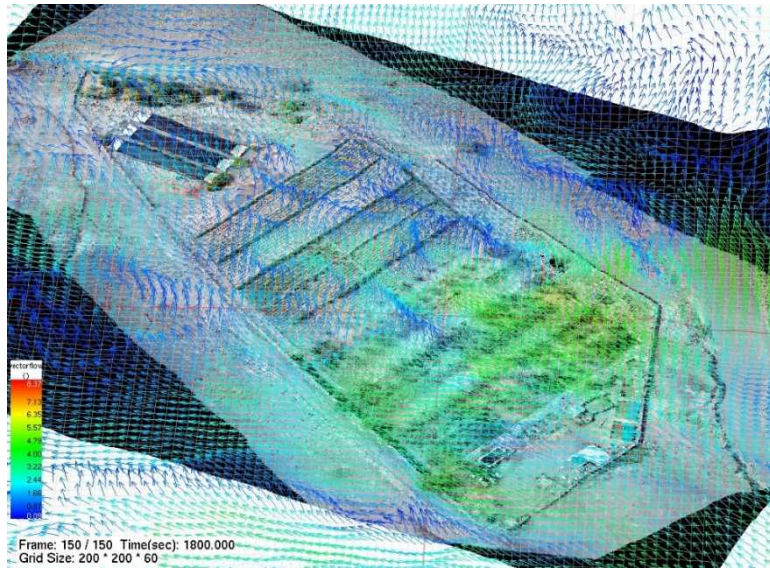


図 3-3 Dikhil 農園における高さ 10 m, 流入風向 ENE, 風速 2.8 m/s 設定での風況解析シミュレーション結果

② Ali Faren 農場において、本プロジェクトで設置した Weather station 2020 年 2 月～2021 年 3 月の気象データを解析した結果、気温は 5 月-9 月に約 39°C-42°C の最高気温、11-3 月に約 19°C-22°C の最低気温であった。相対湿度は 6 月-8 月に約 30%-40% と低くし、11 月-2 月に約 70% と高かった (図 3-4)。風環境は年間を通じて南南西、南西の風が多く、年平均風速 2.0 m/s, 平均最大風速 5.1 m/s であった (図 3-5)。農園上空高さ 10m, 流入風向 SSW, 風速 2.0 m/s における風況解析シミュレーションより、パイロットファーム農園の風の流れを可視化し確認した (図 3-6)。今後は仮想樹木による風況シミュレーションと現地実測調査による樹木やヘッジの防風効果を検証したい。

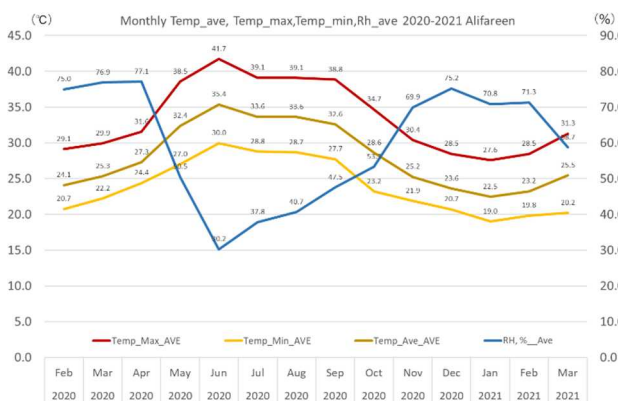


図 3-4 Ali-Faren 農場における月別最高・最低・平均気温および相対湿度の変化

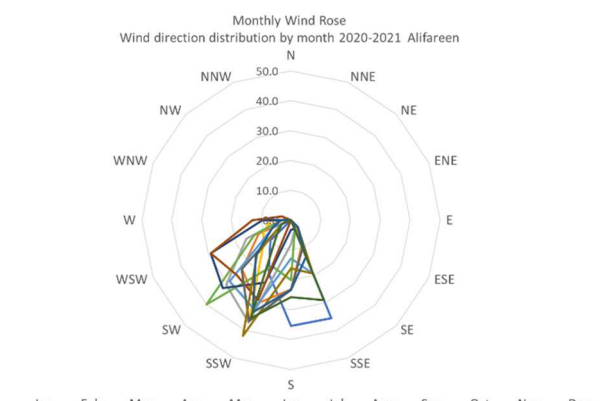


図 3-5 Ali-Faren 農場における月別風配図

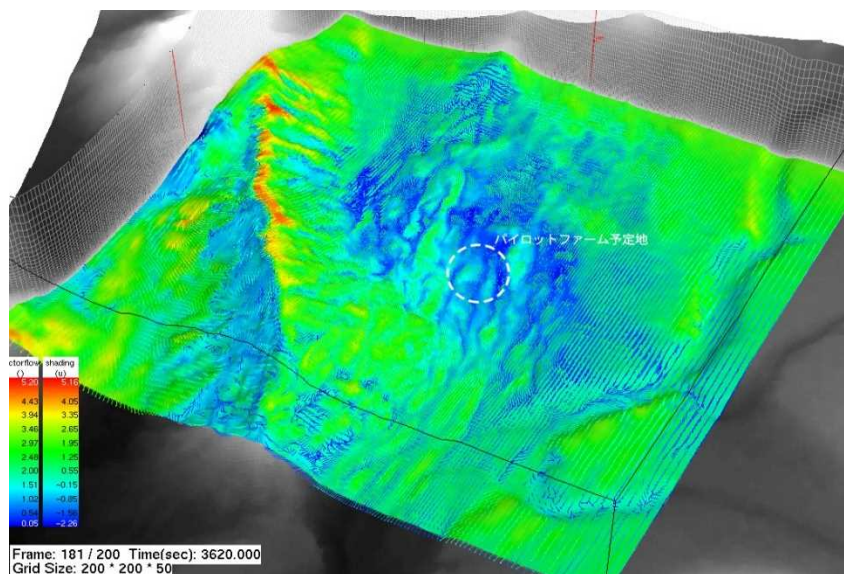


図 3-6 Ali-Faren 農場における高さ 10 m, 流入風向 SSW, 風速 2.0 m/s 設定での風況解析シミュレーション結果

3) ジブチにおける農業地土壌の化学性および物理性分析（渡辺智，渡邊文，鈴木，真田，篠原）

2020 年 1 月にサンプリングした土壌の化学性および物理性の分析を行った。試験圃場の土壌サンプル（圃場 A-C, ディキル篤農家農地）について、無機成分の分析を実施した結果、調査圃場の土壌は pH (H₂O) が 8.1~9.0, Ca 飽和度は全圃場で 300%以上と非常に高い、石灰質土壌であった。Mg と K は土壌により肥沃度が大きく異なったため、圃場毎に施肥設計を行う必要があると考えられた。土壌の高 pH 条件で欠乏が懸念させる B, Mn, Zn, Cu, Fe を DTPA 抽出により分析した結果、Mn は十分含まれていたが Fe, Zn, Cu は全圃場で低いため、補給が必要であることがわかった。B の肥沃度も圃場により大きく異なった。高 pH で有機物分解が早い可能性もあるため、休耕期間を設けることが可能ならば、緑肥を栽培して鋤き込むことで有機物の補給、肥料成分のリサイクル、さらには作物生産性の判断が可能と考えられる。土壌の化学分析結果は、パイロットファーム設営時の灌漑計画、営農計画を立てる上での重要な知見となった。

4) スピルリナを用いた土壌の保水性改善に関する予備的研究（鈴木，渡辺智）

スピルリナおよびスピルリナが分泌する細胞外高分子物質（EPS ; Extracellular Polymeric Substances）の用途を探求する一環として、これらが土壌の保水性の改善に及ぼす影響について検討した。供試土として、豊浦砂，ジブチ共和国南部の Kourtimalei および Ali-Faren から採取した土壌を用いた。これらの土壌の粒径分布を表 6 に示す。

表 6 Particle size distribution and bulk density of sample soils

	Sand	Silt	Clay	Bulk density
	g kg ⁻¹			Mg m ⁻³
Toyoura sand	941	17	42	1.67
Kourtimalei	258	620	122	1.50
Alifareen	828	120	52	1.58

スピルリナは食品用として市販されている粉末を、また EPS は実験室内にてスピルリナを培養した際に抽出し、凍結乾燥させた粉末を用いた。スピルリナ、EPS とともに添加割合を供試土に対する質量比でそれぞれ 0 (対照区), 0.5%, 1% とて供試土に均一に混ぜ、吸引法および遠心法によって易有効水分量 (マトリックポテンシャルが -63 cm と -1000 cm に相当する体積含水率の差) を測定した。その際、対照区の土壌に対して自然な状態での充填密度 (乾燥密度, 表 6) が得られるように測定容器に試料を充填し、スピルリナや EPS を添加した試料については、対照区と同様の方法で、過度な荷重がかからないよう注意して測定容器に充填した。さらに熱帯乾燥地での使用を念頭に、効果の持続性について調べるため、スピルリナと EPS の粉末を 60~70°C で 24 時間加熱したものについて豊浦砂と Ali-Faren 土壌に添加し、別途易有効水分量を測定した。

試験の結果、豊浦砂では、対照区の易有効水分量が $0.04 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ であったのに対し、スピルリナを添加したところ易有効水分量が 6 倍に、また EPS を添加したところ易有効水分量が 4 倍に増加した。スピルリナを 0.5% 添加した場合に比べ、1% 添加した場合は、易有効水分量がわずかに増加した (図 3-7)。Kourtimalei 土壌と Ali-Faren 土壌では、対照区の易有効水分量がそれぞれ 0.21 および $0.18 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ と豊浦砂の易有効水分量よりも多く、スピルリナと EPS の添加によって易有効水分量が有意ではないものの微増した (図 3-7)。スピルリナと EPS の添加による易有効水分量の増加は、添加前 (現況) の土壌の易有効水分量の多さに依存していた (図 3-8)。

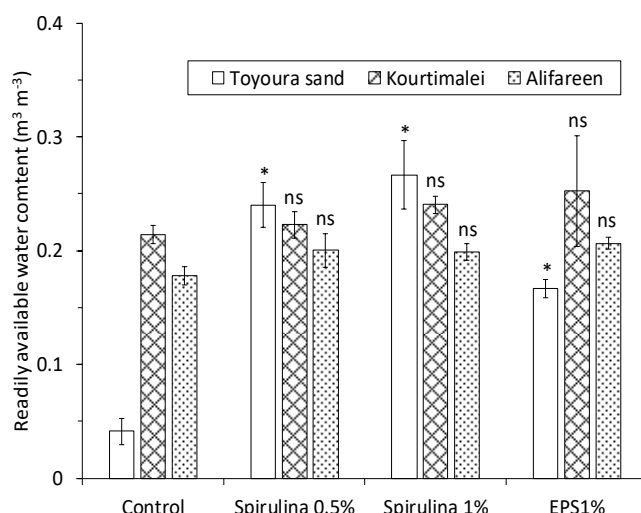


図 3-7 Changes in readily available water content with addition of Spirulina and EPS. *: $P < 0.05$, ns: not significant compared to the control.

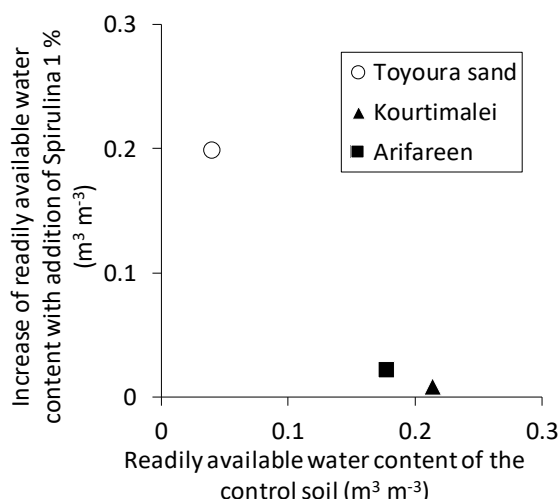


図 3-8 Relationship between initial readily available water content and its increase.

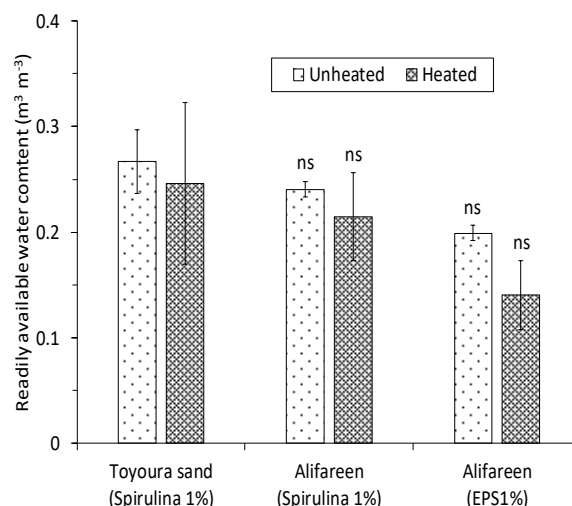


図 3-9 The impact of heating treatment (60 to 70 °C for 24 hours) on readily available water content with Spirulina and EPS. ns: not significant compared to the control.

加熱処理を施したスピルリナや EPS を添加した供試土の易有効水分量は、加熱しなかった場合よりわずかに減少したが、有意ではなかった（図 3-9）。このことから、スピルリナや EPS を熱帯乾燥地の土壤に適用した際に、効果が持続的であることが示唆された。ただし、スピルリナにくらべ、EPSの方が易有効水分量の減少が大きかったことから、スピルリナよりも EPSの方が熱によって分解されやすいことが示された（図 3-9）。スピルリナや EPS が土壤の間隙径分布の変化に及ぼすメカニズムについて、今後詳しく調べる必要がある。

5) 最適有用植物選定・飼料開発（黒澤，渡辺智）

当実験は、熱帯乾燥地帯で棲息するスピルリナの飼料原料化方法を模索した。スピルリナはタンパク質を豊富に含むことから、高タンパク質であることが期待される代用乳原料としての活用を検討した。方法として、①嗜好性の評価、②乾物摂取量増加への効果、③育成期体重増加の評価を実施した。スピルリナを代用乳原料として用いる際に、下痢誘発性を含むことを留意して、摂取量を徐々に増やしながら与えたが、本試験においては発育に対する影響はないことが示された。今後は当実験の結果を踏まえて、ジブチ国内で自生する藻類の飼料化を検証していきたい。

① 代用乳に嗜好性を損なわずに添加できる量

離乳 1 か月前の和牛 2 頭を対象に代用乳原末重量比として 1%～10%までスピルリナと置き換えたミルクを哺乳し、飲み終わりまでの時間を秒単位で計測した。代用乳は、市販の代用乳 250 g を 38℃の水 2 L で溶解して与えた。なお、哺乳瓶底に不溶解物が残らないように留意した。哺乳時間は無添加時と比べ 10%置換時まで同等であり（図 3-10）、スピルリナはミルクの嗜好性を損なわないこと、不溶解物による哺乳の阻害は起きていないと考えられた。

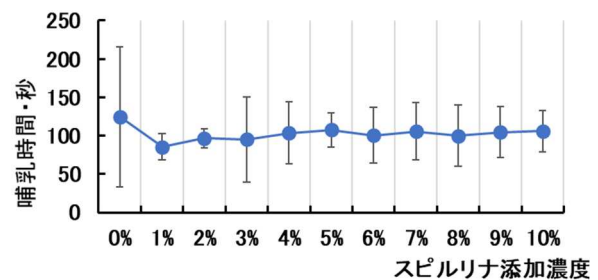


図 3-10 代用乳育成中スピルリナ置換%の哺乳時間への影響

一方、9%以上のスピルリナ置換ミルクでは子牛の糞便が緩くなることが確認されたため、健康的に給与できる濃度を 8%と決定し、以後の実験を実施した。

② 摂乾物摂取への効果

哺乳期の子牛には哺乳後に固形飼料も給与する。これは、固形摂取量が 1 kg を超えたことを離乳の目安とする慣習からで、この乾物摂取量が多いことが消化器の発育の指標とされる。本試験では、牛を群飼したため正確な摂取量を計測できないため、個体ごとに採食時間を秒単位で計測した。週ごとに集計した試験区間の比較結果を図 3-11 に示した。いずれもバラツキが大きいものの、試験区の採食時間は、少なくとも対照区に対して短くなることはないと思察された。

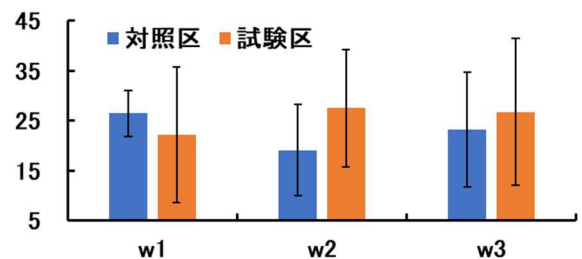


図 3-11 代用乳試験期間の採食時間の比較 (分)

③ 育成以降の体重増加への影響

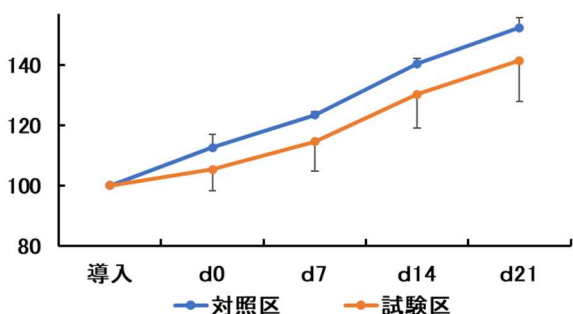


図 3-12 代用乳育成試験期間中の増体率の推移 (%)

育成初期の成長抑制後に、消化器に適度な負荷をかけて増体効果を発揮させる育成方法があり、生産現場において用いられている。育成終了時までの体重推移を確認した結果、本試験においても、試験期間中の体重増加に抑制傾向がみられた(図 3-13)。離乳後の体重も含めると、試験区において 10%弱の増体速度の向上が見られた。この結果から、少なくとも、離乳後の発育に対して悪影響はなく、むしろ育成時の発育を加速させる可能性を含ませるものと考えられる。

図 3-12 は、試験導入時の体重を 100 とした指数で示した増体率の推移である。試験区の体重が低く推移しているが、試験区では子牛は体調を崩しやすく下痢を発症すると、体重は減少し固形飼料の採食量も減少し子牛の体重推移は、不安定となった。特に子牛において未発達な消化器に対しては、負荷がかかっていると推察される。一方、牛の発育には、代償性成長という

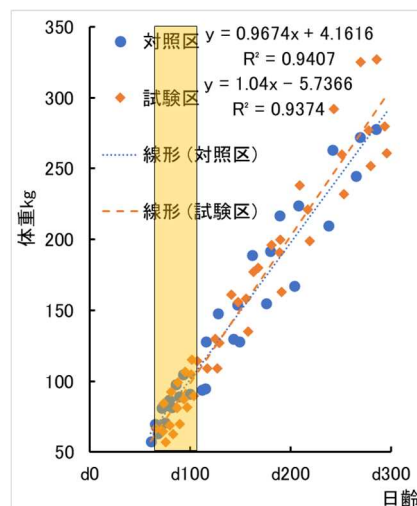


図 3-13 代用乳育成試験期間中の子牛の体重水位

6) 藍藻の環境応答メカニズムに関する研究 (渡辺智)

植物と同様の酸素発生型光合成を行う藍藻は、様々な環境に生息し太古の昔から地球環境を支えてきた。光合成により二酸化炭素を固定しながら増殖するため、近年では、ゼロエミッション型物質生産システムのホストとして期待されている。藍藻は環境ストレスに適応するために、様々な細胞応答メカニズムを有している。これまでに淡水性藍藻 (*Synechocystis* sp. PCC 6803, *Synechococcus elongatus* PCC 7942)、海洋性藍藻 (*Acaryochloris marina*)、糸状性藍藻 (*Anabaena* sp. PCC 7120) を対象として温度や光環境、栄養環境に対する応答を解析し、環境適応に関わる遺伝子発現、およびその制御機構を明らかにした。

7) 食用藍藻スピルリナが生産する細胞外高分子物質 EPS 生産に関する研究 (渡辺智)

藍藻の中には食用の種も見出されており、中央アフリカ (チャド) で食されてきたスピルリナは未来のタンパク質源として需要が高まっている。我々は、スピルリナが強光、高アルカリのストレス環境下において、細胞外高分子物質 (Extracellular polymeric substances: EPS) を生産することを見出した。EPS 形成メカニズムをより詳細に解析するために、培養方法と EPS 誘導条件を検討した。これまで 5 L スケールで培養を行っていたが 300 mL, 50 mL とスケールダウンした試験管レベルでも 1 週間の強光ストレス処理を行うことで培地のアルカリ化が起こり、スピルリナが EPS を形成することを確認した。小スケールでの培養系において、いくつかのスピルリナ種で強光応答を比較すると、スピルリナ *Arthrospira platensis* NIES39 と同様の EPS 形成が *Arthrospira platensis* NIES46, *Arthrospira platensis* NIES2308 でも確認された。この結果より、スピルリナ強光処理による EPS

形成はスピルリナに共通した現象であることが示された。

(5) 研究題目 4. 荒廃地緑化の経済的評価

G4 は現地でのフィールドワークを伴う研究なので渡航ができなかった 2020 年度は研究を推進するには厳しい状況であった。

1) ジブチの統計資料収集および整理（齋藤）

各国際機関から取得できるジブチの統計資料の収集および整理を行った。

2) Douda (B 農場) 設置の実証農場維持（大山, 荒井）

2020 年 2 月, 廃ペットボトルを利用した灌水方法によるナツメヤシの試行栽培試験を行った。その後は, 適宜, 遠隔で指示を出し, ジブチ農業省職員および現地農民により, 設立した実証農場の維持管理を行った。

3) 定住遊牧民の健康状態の把握（若菜）

2020 年 2 月に Ali Faren 地区における定住牧畜民の健康状態を把握するため, 身長・体重・上腕周囲長・上腕三頭筋部皮下脂肪厚・握力・血圧・心拍数・体温・唾液 sIgA・唾液 sIgG・唾液コルチゾール・唾液 α -アミラーゼ濃度について測定調査を行った。データは WHO が提供する健康基準指標などと比較し, 分析評価を行っている。

4) 降水の変化と遊牧民の行動変容の関連性の把握（山本・伊藤）

気候の変化に応じて遊牧民がどのように行動を変えているのかについて, 衛星から観測された夜間光と降水量データを用いて分析を実施した。現在のところ, ワジのポテンシャルを持つ地域に人々が集まっていることが観察されている。これは, 取水の可能性のある地域に人々が集まって生活していることを表している。今後は, 降水量の変化に応じてどのように人々が移動するのかについてさらに分析を行う

(6) 研究題目 5. モデル普及・広報

キャパシティ・ディベロップメントを推進するための機関は, ジブチ大学リサーチセンター (École Doctorale) とし, Director であり本プロジェクトマネージャーである Hassan Ali Barked 博士とシンポジウムや研修およびワークショップのオンラインでの開催を進めている。

ジブチ大学工学部キャンパス内の SATREPS 実験室・研究室が整備され次第, 高性能コンピュータ+GETFLOWS アカデミックライセンスの複数台を用い, ジブチ大学講師の Fadoumo Ali Malow 博士および地圏環境テクノロジーの Aurelien Hazart 氏(フランス出身)等を講師に水循環シミュレーションおよび, ディープラーニングによる画像解析の研修を Web 開催し, 多くのジブチにおける研究・教育機関の水文学者およびデータサイエンス科学者への技術移転を図る。

II. 今後のプロジェクトの進め方、および成果達成の見通し（公開）

研究題目 1. 水循環シミュレーションモデル整備

地下部の地質状況を把握するための微動アレイ探査（正三角形アレイ，探査深度 100～200 m，6 点）および，単点常時微動測定（0. 5～10 Hz 域，200 点程度）を行う．現地探査は，（有）TK 海陸調査事務所 TK ジオックスコンサルタント会社に委託する（2 週間業務，約 500 万円）．とくに Ambouli ワジ流域内の帯水層とされるワジ河道周辺の砂礫層を中心に硬質岩盤までの層厚分布を明らかにすることを目的に探査を行う．本探査時には，ジブチ側のカウンターパートを同伴させ探査技術の移転を図る．

上記探査の結果を用い，現ジブチ大学講師の Fadoumo Ali Malow 博士（GP1 CP）が既に開発している Ambouli ワジ流域における GETFLOWS を用いた 3D 水循環シミュレーションモデルの再検証・改善を行う．水循環シミュレーションは，篤農家の保有する Dikhil 農園を含んだ南 Hanle 集水域においても，モデル構築を行い集水域スケールでの水資源循環・賦存量分布推定を行う．これらと並行して，エチオピア高地を含んだスケールでの水循環モデルの構築を進める．

RESTEC との共同研究により作成した，ジブチ全土 PALSAR を用いた地形立体画像および RESTEC を通して購入したジブチ全土の 5m メッシュのデジタルサーフィスモデル（AW3D-DSM）を用い，CERD 発行の地質図に記載されている断層位置を教師として，深層学習による検出モデルを開発し，ジブチ全土の断層を抽出する．

上記，ジブチ国を含有したスケールでの水循環モデル構築にあたり，ジブチ全土における地下水の同位体の年代測定により流動モデル分布の把握を行う．年代測定にはトリチウム（³H）（産業技術総合研究所に委託）および放射性炭素（¹⁴C）（地球科学研究所に委託）を用いるとともに，東京農業大学に設置した同位体比質量分析計（JST 予算）を用いた酸素・水素安定同位体比により地下水由来の特定把握を行う．

Ali-Faren において設置した地下水位計および伝送システムを，新たに現地既存井戸（またはボーリング孔）に数セット増設設置（単価 60 万円）し，リアルタイム地下水位モニタリング範囲を広げ，2022 年以降には，リアルタイム・シミュレーションの実現可能とする．

研究題目 2. 緑化・農地化ポテンシャル評価

選定した牧養力ポテンシャル・モニタリングサイト 9 か所に，プロテクトケージ（4m×4m×4m）を設置し，放牧による負荷量を無放牧圧状態（非採食区）での植生成長量との比較から把握する．モニタリングサイトにおいて，マルチスペクトルカメラ搭載 UAV・衛星画像データによる広域適用手法を確立することにより，植生図の作成を行う．UAV・衛星画像データによる植物種の特定には，スペクトル特性の活用とともにディープラーニングの技術も用いる．ディープラーニング解析のための高性能コンピュータは既に東京農大に 3 台設置（JST 予算）しているが，2021 年度には現地導入し技術移転を図る．更に，バイオリギングによる家畜動物の遊牧範囲や行動データおよび，上記緑化ポテンシャル図との関係性から対象地域の牧養力を算出する．また，乾燥糞・家畜血液・食草の栄養価の分析から，食草内容物や牧養力の定量化を行い，糞内種子については発芽実験をグループ 3 と共に実施する．糞・血液・食草サンプルの日本への持ち込みは困難なものもあるので，ジブチ大学で基礎的分析を行える実験室を設置し現地で分析が行えるようにする．家畜行動密度および牧養力を考慮にいたした上で，植生図と研究活動 1 の成

果である水資源ポテンシャル図，更にはその他の GIS データ（デジタル標高モデル DEM から作成される地形図や CERD 所有の地質図）との関係性解析から、緑化・農地化ポテンシャルの定量評価を目指す。

また、ジブチ全土における有用植物の現地採取調査を行い、その同定および有用性分析を行う。有用性分析に関しては、ジブチ調査研究センター（CERD）・薬用植物研究室との共同研究を働きかける。

研究題目 3. 持続可能パイロットファーム営農

- A 農場については、揚水量、降雨による涵養量、地下水位変動をモニタリングし、現井戸の灌漑水源としての可能性をシミュレーションにより検討する。データの精度を上げるために 2021 年度は A 農場近隣の農場の井戸にも水位計を設置する予定である。その結果、揚水量増加が可能であることが判明した場合、風車（DIGIMAX 社製 Air-Dragon 600 W：日本において発電性能試験実施済み）とソーラーのハイブリッド化によるポンピングシステムの実装を行う。
- B 農場については、灌漑水の水源である下水処理場の処理水の水質調査および、既に土壌改良材として利用されている汚泥や圃場土壌の分析を行い、農業用水・資材としての利用妥当性について検証する。
- C 農場については、試験圃場、藻類培養試験池の設計と設置を進め、飼育家畜の購入・畜舎の設計を検討する。C 農場を将来的に農家や普及員の教育の場としたいとの農業省食糧安全保障局局長の要望に沿い、ボカシ肥ワークショップを皮切りに実務者向けワークショップを開催する。
- ジブチ大学において土壌分析ができるよう資機材の設置および講習会を開催する。
- 日本において、安価な気象観測装置、井戸水位計、自動灌水装置を起業と共同開発を行い、ジブチに設置する。また、農家へ普及できる簡易的な自動灌水装置も開発する。
- スピルリナの応用利用については、家畜への飼料としての給与試験は東京農業大学富士農場において、土壌改良剤としての試験施用は東京農業大学世田谷キャンパス内農場において引続き行う

研究題目 4. 荒廃地緑化の経済的評価

井戸設置による定住化の健康状態への影響を評価するため、ジブチでは 13 歳以上の子どもが中学校進学のため街で生活することから、比較対象として 2013 年以降に設立された井戸（Midgara や Afka Arraba など）周辺に定住した遊牧民の 12 歳以下の子どもに対する調査を実施し、定住化の健康に及ぼす効果を明らかにする。

市場の価格についての調査を更に深化させ、現地農産物に対する需要推定、購入時の選好について、ジブチ市内スーパーマーケットやローカルマーケットにおいて、産地・価格・作成方法・質などの順位を評価する。作物へのラベリングによる付加価値化の実験を見据えて、消費者に対するコンジョイント分析等を実施し、ジブチ国内のローカル作物に対する需要を明らかにする。

Douda 農場(B 農場)においては、現在メロン栽培が普及し、熱心に営農に取り組むソマリの人が増えたが、高収益を見込むことができる営農が重要であるため、土地廃棄物を使用する組合員が実践可能な低投入型のデモンストレーション・ファームを設立する。近くに存在するゴミ廃棄場で入手できる衣服・毛布、紙おむつ、ペットボトルなどの廃棄物の物性を積極的に生かした乾燥地農業の節水技術を開発する。

現地調査が行えない場合を想定して、衛星データや気象データなどの活用を行う。衛星データの加

工・分析を行い、気象データや統計データと組み合わせることで、ジブチの人々の水や緑化に対する需要の推定を行う。

研究題目 5. モデル普及・広報

キャパシティ・ディベロップメントを推進するための機関は、ジブチ大学リサーチセンター (École Doctorale) とし、Director であり本プロジェクトマネージャーである Hassan Ali Barked 博士とシンポジウムや研修およびワークショップのオンラインでの開催を進めている。

ジブチ大学工学部キャンパス内の SATREPS 実験室・研究室が整備され次第、高性能コンピュータ＋GETFLOWS アカデミックライセンスの複数台を用い、ジブチ大学講師の Fadoumo Ali Malow 博士および地圏環境テクノロジーの Aurelien Hazart 氏(フランス出身)等を講師に水循環シミュレーションおよび、ディープラーニングによる画像解析の研修を開催し、多くのジブチにおける研究・教育機関の水文学者およびデータサイエンス科学者への技術移転を図る。

Ⅲ. 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)

メインカウンターパートであるジブチ大学 (UD) は 2006 年の開学から 13 年目を迎え、2013 年に MOU が締結された東京農大 (TUA) と UD との関係において、大きな実績と言えるものは、UD 講師 1 名の国費留学制度による博士号取得 (2018 年 3 月) に留まるものであった。このように、UD の研究能力は未だに不十分との認識から、本プロジェクトは TUA と UD とのパイプラインを基軸とするものの、プロジェクトのゴールを達成するため、協力機関として日本側・ジブチ側の既申請参画機関等からのあらゆる人的・技術的資源を投入して実施することを確認し、月 1 回の Web 会議による定例ディスカッションにより UD と情報共有し、承認を受けながら進めていくこととなった。

Ⅳ. 社会実装 (研究成果の社会還元) (公開)

(1) 成果展開事例

特になし

(2) 社会実装に向けた取り組み

実装のためのモデル地区として選定した、既存パイロットファーム (A, B, C 圃場および篤農家所有 D 圃場) において、現地農家や農業省に協力いただき、研究実験活動の許諾を既に得、ドローン空撮画像による微地形把握を進めつつある。B 圃場においては、ドイツの栽培試験を開始し現地農家とのノウハウの共有を行いながら進めている。

V. 日本のプレゼンスの向上 (公開)

特になし

VI. 成果発表等【研究開始～現在の全期間】 (公開)

VII. 投入実績【研究開始～現在の全期間】 (非公開)

VIII. その他 (非公開)

以上

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。)
2020	Makoto SHINOZAKI, Sawahiko SHIMADA, Ayako SEKIYAMA, Kiyoshi TAJIMA and Hassan A. BARKAD, "Efficiency Evaluation of Solar Pumping System for Wadi Agriculture in Djibouti", International Journal of Environmental and Rural Development, 2020.12.112, pp.98-103	https://doi.org/10.32115/ijerd.112.98	国際誌	accepted	

論文数 1 件
うち国内誌 0 件
うち国際誌 1 件
公開すべきでない論文 0 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。)

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

著作物数 0 件
公開すべきでない著作物 0 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
2020	佐藤拓己, "ジブチにおける衛星画像を用いた深層学習による農園領域抽出", 令和2年度東京農業大学大学院修士論文, 2021.03	修士論文	発表済	
2020	鈴木綾太, "ジブチ・アロウ集水域における流域水循環解析と水資源管理に関する研究", 令和2年度東京農業大学大学院修士論文, 2021.03	修士論文	発表済	
2020	石塚翔, "スピルリナの子牛代用乳原料としての活用", 令和2年度東京農業大学卒業論文, 2021.03	卒業論文	発表済	
2020	海老原和真, "ジブチ共和国ワジ農場用風力・ソーラー揚水システムにおける砂鉄防除装置の開発", 令和2年度東京農業大学卒業論文, 2021.03	卒業論文	発表済	
2020	川原孝亮, "ジブチにおける農園の立地環境解析", 令和2年度東京農業大学卒業論文, 2021.03	卒業論文	発表済	
2020	阿部準太, "スピルリナの土壌への配合による植物生育への影響", 令和2年度東京農業大学卒業論文, 2021.03	卒業論文	発表済	
2020	納所大樹, "コンクリート片を使用したスピルリナ培養液のpH調整", 令和2年度東京農業大学卒業論文, 2021.03	卒業論文	発表済	
2020	浅野春輝, "スピルリナを用いた土壌の保水性の改善について", 令和2年度東京農業大学卒業論文, 2021.03	卒業論文	発表済	

著作物数 8 件
公開すべきでない著作物 0 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

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
2020	国内学会	鈴木綾太, 齋藤修平, Dayah Aden, 鈴木伸治, 渡邊文雄, ジブチ共和国、ディキル地域における水資源調査報告, 日本沙漠学会第31回学術大会, 岡山大学開催中止(要旨発表), 2020年5月30-31日	口頭発表
			招待講演 0 件
			口頭発表 1 件
			ポスター発表 0 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
2020	国内学会	鈴木伸治, 山本美帆, 鈴木淳一郎, 渡辺智, 渡邊文雄, 日本沙漠学会第31回学術大会, スピルリナを用いた土壌の保水性改善に関する予備的研究, 岡山大学開催中止(要旨発表), 2020年5月30-31日	口頭発表
			招待講演 0 件
			口頭発表 1 件
			ポスター発表 0 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	登録番号 (未登録は空欄)	登録日 (未登録は空欄)	出願特許の状況	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 0 件

公開すべきでない特許出願数 0 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	登録番号 (未登録は空欄)	登録日 (未登録は空欄)	出願特許の状況	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 0 件

公開すべきでない特許出願数 0 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 (「〇〇の開発」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

0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

0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 (開催国)	参加人数 (相手国からの招聘者数)	公開/ 非公開の別	概要

0 件

② 合同調整委員会(JCC)開催記録(開催日、議題、出席人数、協議概要等)

年度	開催日	議題	出席人数	概要
2020	2020/9/17	UD-TUAリーダーズ会議 (Zoom Meeting)	15	新型コロナによる日本およびジブチでの現状について情報共有し、コロナ禍での研究推進方法について議論した。ジブチへの研究・分析機器の輸送に関しての打合せを行った。JICAジブチ・JSTからも会議参加いただき情報共有を行った。
2020	2020/10/19	ジブチ大使館関係者との面談	12	ジブチ大使館関係者が東京農大大学長を表敬、その際にSATREPS研究内容・進捗状況について説明を行った。
2020	2021/2/3	国内リーダーズ会議 (Zoom Meeting)	8	博士研究員(Denis氏)の採用について、現地調整員業務の再開について、今後のUD-TUAオンラインミーティングについて打合せを行った。
2020	2021/3/1	UD-TUA合同会議 (Zoom Meeting)	22	各グループの研究活動の進捗状況について情報共有を行った。今後の合同研究の方法について、9月開催の国際沙漠学会への研究発表参加について確認を行った。4月から毎月UD-TUAグループリーダー会議をオンライン開催することを確認した。

4 件

成果目標シート

研究課題名	ジブチにおける広域緑化ポテンシャル評価に基づいた発展的・持続可能水資源管理技術確立に関する研究
研究代表者名 (所属機関)	島田 沢彦 (東京農業大学 地域環境科学部 教授)
研究期間	H30採択(平成30年4月1日～平成36年3月31日)
相手国名/主要相手国研究機関	ジブチ共和国 /ジブチ大学, ジブチ農業水産牧畜海洋資源省, ジブチ調査研究センター
関連するSDGs	目標2. 持続可能な農牧畜業の推進、強靱な農業の実践 目標 6. 乾燥地農業における統合水資源管理の実施、 目標 15. 砂漠化への対処、ならびに土地の劣化の阻止、ならびに生物多様性損失の阻止

上位目標

- 「アフリカの角」地域の干ばつレジリエンス強化と食料安全保障の確保
- 乾燥アフリカの持続可能な水資源管理技術と農業生産力の向上

- ジブチの緑化可能地域へ持続的農業・緑化モデルを提案
- ジブチ以外のアフリカの角地域への適用・展開を提案

プロジェクト目標

- 広域水資源ポテンシャル・緑化ポテンシャルマップの作成技術を開発・共有

成果の波及効果

日本政府、社会、産業への貢献	<ul style="list-style-type: none"> 砂漠化対処条約(UNCCD)への提言 乾燥アフリカにおける日本技術のプレゼンス向上 日本ベンダーによる水循環シミュレーションソフトのプレゼンス向上
科学技術の発展	<ul style="list-style-type: none"> 乾燥地における水循環把握モデルの確立 衛星画像データによる乾燥地環境解析の高度化 沙漠化防止技術の広域展開手法の確立
知財の獲得、国際標準化の推進、遺伝資源へのアクセス等	<ul style="list-style-type: none"> 乾燥地農業の効率化の提言 乾燥地緑化の高付加価値 GETFLOWSの水循環シミュレーションソフトとしてのスタンダード化
世界で活躍できる日本人人材の育成	<ul style="list-style-type: none"> 若手研究者の現地活動を通してのグローバル人材育成
技術及び人的ネットワークの構築	<ul style="list-style-type: none"> ジブチ大学の人材との学術的交流 キャパシティ・ディベロップメントによるGIS・水循環シミュレーション技術および緑化技術の移転
成果物(提言書、論文、プログラム、マニュアル、データなど)	<ul style="list-style-type: none"> ジブチ国内の電子地図データの完全アーカイブ化 乾燥地における汎用的水循環シミュレーションモデル 水資源ポテンシャルマップ, 緑化ポテンシャルマップ 高効率乾燥地緑化法マニュアル

