

2014 年度 修士論文

スーダン共和国カッサラ州における外来植物
メスキート (*Prosopis juliflora*) の降雨に対する
応答と家畜による種子拡散

The response to precipitation of Mesquite
(*Prosopis juliflora*) and the seeds diffusion
by livestock in Kassala state, Sudan

21331010 西村一也

指導教員 国際環境情報学 教授 星野仏方

酪農学園大学大学院酪農学研究科

目次

目次

表目次

図目次

第 1 章 序論	1
1.1 研究背景	1
1.2 メスキートの特徴と生存戦略及び分布傾向	5
1.3 研究目的	8
1.4 研究対象地概要	9
第 2 章 研究方法	11
2.1 衛星画像による解析	11
2.1.1 使用する衛星画像データ	11
2.1.2 衛星画像データ処理	13
2.2 現地調査にて取得したデータによる解析	18
2.2.1 気孔伝導度測定	18
2.2.2 分光放射測定	19
2.2.3 家畜トラッキング・ストーキング	20
2.2.4 遊牧民への聞き取り	22
2.2.5 高台に生えるメスキート	23

第 3 章 結果と考察	24
3.1 衛星画像と降雨量データ	24
3.1.1 LANDSAT 衛星画像解析によるメスキートの分布変遷	24
3.1.2 MODIS 画像によるメスキート活性と降雨の相関関係	28
3.2 現地調査にて取得したデータ	34
3.2.1 気孔伝導度測定	34
3.2.2 分光放射測定	36
3.2.3 家畜トラッキング・ストーキング	38
3.2.4 遊牧民への聞き取り	54
3.2.5 高台に生えるメスキート	56
第 4 章 まとめ	65
謝辞	67
参考文献	68
Abstract	74

表目次

Table.1 Correlation Coefficient & P-value between MSAVI2 and Precipitation at different time lag-----	30
Table.2 Correlation Coefficient & P-value between MSAVI2 and Precipitation at different time lag-----	32
Table.3 Field measurement of Stomatal Conductance & Temperature in Kassala-----	35
Table.4 NDVI by Red & NIR at 10:20-----	36
Table.5 NDVI by Red & NIR at 14:20-----	37
Table.6 Result of Camel tracking in Karari village, Sudan--	39
Table.7 MSAVI2 Max of Camel home range-----	41
Table.8 Result of Donkey tracking in Karari village, Sudan-	42
Table.9 MSAVI2 Max of Donkey home range-----	44
Table.10 Result of Goat tracking in Karari village, Sudan--	46
Table.11 MSAVI2 Max of Goat home range-----	48
Table.12 Result of Sheep tracking in Karari village, Sudan-	51
Table.13 MSAVI2 Max of Sheep home range-----	53
Table.14 Interview to the herdsman-----	54
Table.15 Altitude of points-----	56

图 目 次

Fig.1 Mesquite Tree -----	3
Fig.2 Mesquite pods -----	3
Fig.3 Grazing behavior of Mesquite pods by Camel -----	4
Fig.4 Grazing behavior of Mesquite pods by Goat -----	4
Fig.5 Axial root of Mesquite -----	7
Fig.6 Lateral root of Mesquite -----	7
Fig.7 Study site -----	10
Fig.8 Leaf Porometer SC-1 -----	18
Fig.9 FieldSpec® HandHeld 2 Portable Spectroradiometer -----	19
Fig.10 GPS Trip Recorder 747-Pro -----	20
Fig.11 GPS attached to the Camel -----	21
Fig.12 GPS attached to the Donkey -----	21
Fig.13 GPS attached to the Sheep -----	21
Fig.14 GPS attached to the Goat -----	21
Fig.15 Interview to the herdsman -----	22
Fig.16 Garmin GPSMAP 62sc -----	23
Fig.17 MSAVI2 image of Feb.11, 1986 -----	24
Fig.18 MSAVI2 image of Feb.4, 1995 -----	24
Fig.19 MSAVI2 image of Feb.23, 2005 -----	25

Fig.20 MSAVI2 image of Feb.16, 2014 -----	25
Fig.21 High density Mesquite area changes during 1986 to 2014 -----	25
Fig.22 Situation of cutting Mesquite -----	26
Fig.23 Situation of cutting Mesquite -----	27
Fig.24 After cutting Mesquite -----	27
Fig.25 Time series of MSAVI2 & Precipitation -----	28
Fig.26 Scatter plot between MSAVI2 and Precipitation at 1 month time lag-----	29
Fig.27 Scatter plot between MSAVI2 and Precipitation at 2 month time lag-----	29
Fig.28 Scatter plot between MSAVI2 and Precipitation at 3 month time lag-----	30
Fig.29 Scatter plot between MSAVI2 and Precipitation at 5 month time lag-----	31
Fig.30 Scatter plot between MSAVI2 and Precipitation at 6 month time lag-----	31
Fig.31 Scatter plot between MSAVI2 and Precipitation at 7 month time lag-----	32
Fig.32 Field measurement of Stomatal Conductance & Temperature	

in Kassala-----	34
Fig.33 Measurement of Spectrum at 10:20-----	36
Fig.34 Measurement of Spectrum at 14:20-----	37
Fig.35 GPS tracking of Camel during Dec. 5 to 7 in Kassala village -----	39
Fig.36 Result of Camel home range using LoCoH model in Dec. 5 -----	40
Fig.37 Result of Camel home range using LoCoH model in Dec. 6 -----	40
Fig.38 Result of Camel home range using LoCoH model in Dec.7 -----	41
Fig.39 GPS tracking of Donkey during Dec. 5 to 7 in Kassala village-----	42
Fig.40 Result of Donkey home range using LoCoH model in Dec. 5 -----	43
Fig.41 Result of Donkey home range using LoCoH model in Dec. 6 -----	43
Fig.42 Result of Donkey home range using LoCoH model in Dec. 7 -----	44
Fig.43 GPS tracking of Goat during Dec. 5 to 7 in Kassala village	

	-----	45
Fig. 44 GPS tracking of Goat during Dec. 5 to 7 in Kassala village		
	-----	45
Fig. 45 Result of Goat home range using LoCoH model in Dec. 5		
	-----	46
Fig. 46 Result of Goat home range using LoCoH model in Dec. 6		
	-----	47
Fig. 47 Result of Goat home range using LoCoH model in Dec. 7		
	-----	47
Fig. 48 Grazing land	-----	48
Fig. 49 Single Mesquite Tree	-----	49
Fig. 50 Single Mesquite Tree	-----	49
Fig. 51 GPS tracking of Sheep during Dec. 5 to 7 in Kassala village		
	-----	50
Fig. 52 GPS tracking of Sheep during Dec. 5 to 7 in Kassala village		
	-----	50
Fig. 53 Result of Sheep home range using LoCoH model in Dec. 5		
	-----	51
Fig. 54 Result of Sheep home range using LoCoH model in Dec. 6		
	-----	52

Fig. 55 Result of Sheep home range using LoCoH model in Dec. 7	52
Fig. 56 <i>Ziziphus spina-christi</i>	55
Fig. 57 <i>Ziziphus spina-christi</i> covered by Mesquite	55
Fig. 58 10 Mesquite points on hill	56
Fig. 59 ASTER GDEM 3D model of 10 points	57
Fig. 60 Mesquite tree on hill plot 1	58
Fig. 61 Mesquite tree on hill plot 2	58
Fig. 62 Mesquite tree on hill plot 3	59
Fig. 63 Mesquite tree on hill plot 4	59
Fig. 64 Mesquite tree on hill plot 5	60
Fig. 65 Mesquite tree on hill plot 6	60
Fig. 66 Mesquite tree on hill plot 7	61
Fig. 67 Mesquite tree on hill plot 8	61
Fig. 68 Mesquite tree on hill plot 9	62
Fig. 69 Mesquite tree on hill plot 10	62
Fig. 70 Grazing the sheep on hill	63
Fig. 71 Droppings of livestock on plot 6	63
Fig. 72 Mesquite pods & dropping included seeds	64
Fig. 73 Dropping included seeds	64

第 1 章 序論

1.1 研究背景

マメ科プロソピス属の植物の一種メスキート (*Prosopis juliflora*) (Fig. 1, Fig. 2) は中南米原産の低木、または樹木で一年を通して開花、繁殖することができる (Abdel Garbar, 1988; Pasiiecznik, 2011)。プロソピス属は 44 種類のうち 40 種類はアメリカ大陸に分布する。それ以外の 4 種のうち、*P. Aflicana* はアフリカ在来種、*P. kodziana*・*P. farcta*・*P. cineraria* の 3 種は中東とパキスタンの在来種である (Burkart, 1987; Fagg & Stewart, 1944; Pasiiecznik, 2001; Pasiiecznik *et al.*, 2004)。メスキートは西アジアとアフリカにおいて沙漠化対処と農業開発の一環として国連食糧農業機関 (FAO) など国際機関の後押しにより 1980 年代を中心に植林が推進された (Habit, 1988; Pasiiecznik, 2001)。スーダン共和国 (以下、スーダン) においては 1917 年に首都であるハルトゥームのシャムバート地区に導入され、1928 年には同じくハルトゥームの別の 2 ヶ所に植樹された (Broun & Massey, 1929)。そして、1947 年、1965 年にはスーダン東部に導入され、カッサラの町の周辺にグリーンベルトとして植林された (Abdel Barie, 1986)。1970 年以降、頻発するようになった干ばつにより、メスキートへの関心が一層高まり、風、沙漠化、砂による浸食から居住地と農地を保護するため

にスーダン東部へのさらなる導入が行われた。1974年にはカッサラの町の周辺に飛行機を用いてメスキートの種子散布が行われ、さらに保護林にも植林された(Elsidig, Abdelsalam & Abdelmagid, 1988)。メスキートがスーダンに導入されてから、沙漠化防止、乾燥地の緑化に関して一定の成功を収め(El houri, 1986)、家庭への燃材の供給、炭作りに加えて、燃料に利用してのパン焼き、レンガ作り、石炭作り、オイル作り(Elsidig *et al.*, 1998)など、燃材、薪炭、建材としてメスキートを売ることは重要な経済活動であり、収入向上や貧しい人々や難民の生活改善に役立っている。しかし、一方では人間の管理下にある農地、水路、氾濫原、道路、休閑地にまで侵入している。また、種子を採食した家畜(Fig.3, Fig.4)が消化機能に障害を引き起こし死亡するなどスーダンの中央部、北部、東部において多くの問題が発生している(縄田, 2009; Babiker, 2006; Moll & Gubb, 1989)。メスキートの旺盛な繁殖力と極乾環境での高い適応力で、導入された地域ではその分布が拡大し、コントロールが効かない状況にある。そして現在では国際自然保護連合(IUCN)の「世界の侵略的移入種ワースト 100」の一つに数えられている(縄田, 2009)。この様にメスキートを導入することで一定の効果をあげている地域、他方で多くの問題を生み出している地域では適切な管理によってこれ以上広がらないように封じ込めていかなければならない。

しかし、除去のみによる制御ではなく、有効利用を強く意識した管理を目指していく必要がある。



Fig.1 Mesquite Tree



Fig.2 Mesquite pods



Fig.3 Grazing behavior of Mesquite pods by Camel



Fig.4 Grazing behavior of Mesquite pods by Goat

1.2 メスキートの特徴と生存戦略及び分布傾向

メスキートは厳しい環境において生き残る為に、様々な生存戦略を兼ね備えている。

アレロパシー（他感作用）はその一つである。アレロパシーは植物から放出される天然化学物質が、他の植物・微生物・昆虫・動物等に阻害・促進、あるいはその他の何らかの影響を及ぼす現象あり、在来種を抑圧するなどの可能性が報告されている（藤井，2000）。また、FAOは外来種の危険性、雑草性を評価する方法を2005年に発表し、この評価方法でメスキートは極めて危険な侵略的外来植物であることが示された（FAO，2005）。

メスキートの根系は2種類の根からなることが知られており（Jenkins *et al.*，1987）、優れた根系発達能力を備えている（依田ほか，2012）。ひとつは地中深くまで伸びる垂直根（Fig.5）である。この垂直根を地下数10mにある地下水域まで伸ばすことによって、乾燥地でも水を確保することができる。メスキートの発芽後に関する人口気象室内実験で、メスキートの根の深さは地上部の10倍に達することが報告されている（Yoda *et al.*，2012）。もう一つは、地表面の近くに広がる水平根（Fig.6）である。この水平根を地表面のすぐ下に広く張り巡らし、雨を効率よく吸収することで乾燥に対する耐性を高めている。

次にメスキートの種子には強い待機特性があり、土の中に埋もれた状態で10～15年ほどは休眠状態を保つといわれている (Martin, 1948)。また、さやをヤギやウシに食べさせると脳の三叉神経運動核の神経細胞が空洞化して、よだれを流したり、顎の痙攣がおこったりという症状や食欲不振、うつ、脱水症状、下痢、反すう胃内原虫消失、血液酸性化、血中尿素増加、肝臓の壊死性病変などの障害が起こるといって報告がされている (Tabosa *et al.*, 2000, 2006; Misri *et al.*, 2003)。さらにマメ科の植物には植物エストロジェンを含むものもあり、繁殖成績に影響を与える可能性も懸念されている。

最後に日中低下現象によって、過酷な高温・乾燥環境下でメスキートが最も光強度の強い正午前後に調位運動により受光面積を減少させることで、余分な蒸散および根からの吸水を抑制している (安田ほか, 2013)。太陽放射のピーク時前後に蒸散速度、光合成速度、気孔コンダクタンスが低下する日中低下減少は各種植物で報告されている (Pathre *et al.*, 1998)。

上記の特徴と生存戦略を兼ね備えているメスキートは、カッサラ州とカダーレフ州の境界を流れるアトバラ川のカーブの内側の水の流れが緩やかな場所で堆積し、密生している。また、アトバラ川の両側100m以内で密度が最も高く、500m範囲内にとどまり、それを超えると変化は少ない。一方、雨季の季節的に流れるワジでは10m

以内に集中的に分布し、両側 40m 範囲内にとどまるとされている(矢吹ほか, 2012)。



Fig. 5 Axial root of Mesquite



Fig. 6 Lateral root of Mesquite

1.3 研究目的

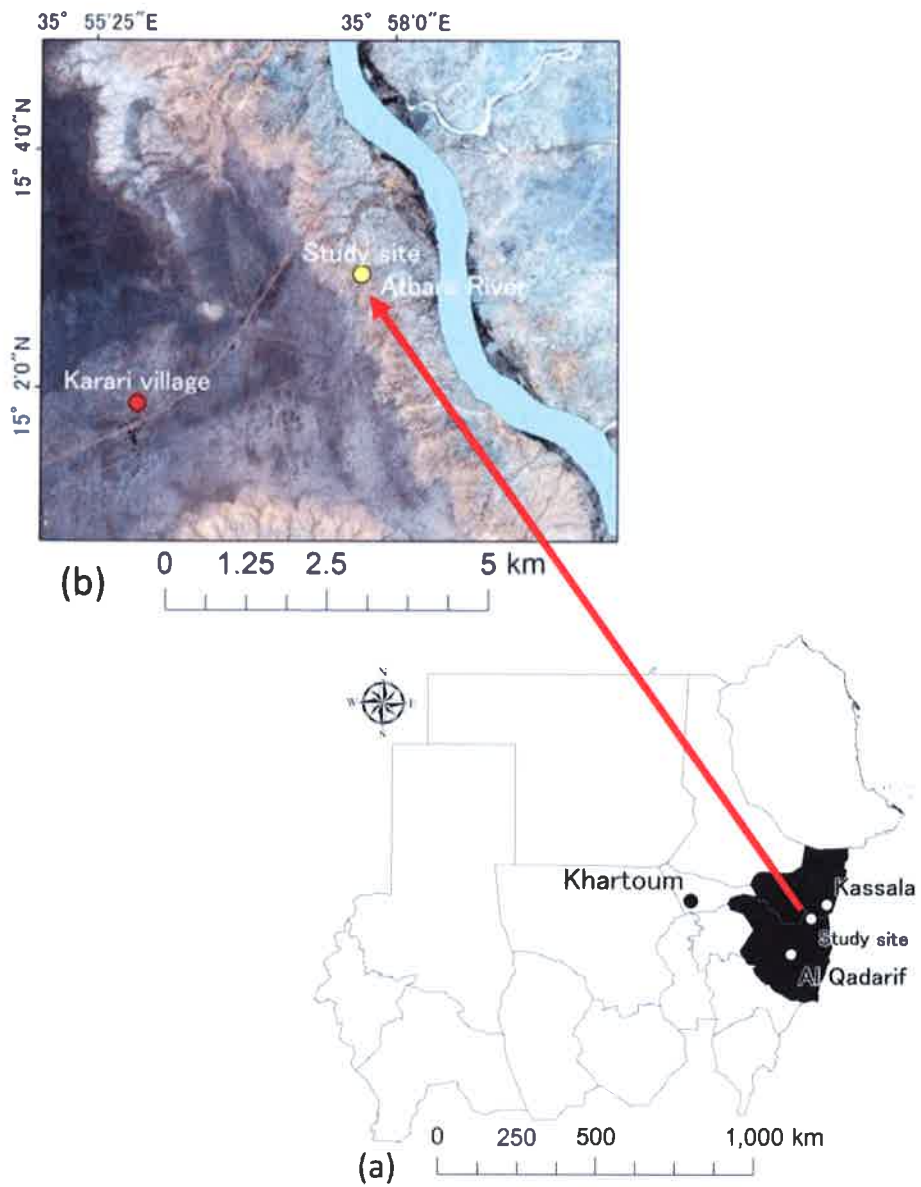
外来植物であるメスキートはスーダンの極乾環境において様々な生存戦略を兼ね備えて分布の拡大をしている。カッサラ州周辺は一般的に4月から10月が雨季、11月から3月が乾季でありケッペンの気候区分ではサバナ気候に属し、乾季の間は雨がほとんど降らない。また一年中開花し、実を付ける旺盛な繁殖力でその分布範囲を、河川水を主な媒体として拡大するだけでなく、それに加えて家畜による種子の拡散も示唆されているが、定量的には明らかにされていない。これらを踏まえ本研究では

1. 極乾環境を生き抜くメスキートの降雨に対する応答から、乾季と雨季での活性状態の違いを明らかにする；
2. 河川の影響が及ばない高台、河川から離れた場所に生えるメスキートが家畜によって種子が拡散していることを明らかにする。

以上の2点について、リモートセンシング・GIS技術、および現地調査にて取得したデータより解析を行う。そして生業の大部分を家畜飼養としている住民にとって、メスキートが分布拡大し続ける事で、将来どのような状態になる可能性があるのか、それに伴ってメスキートの管理、必要に応じて除去を進める際にどの時期に積極的に作業をすることがより効率的であるのかを提案していきたい。

1.4 研究対象地概要

アフリカ北東部サヘル地域に位置するスーダンの東部、乾燥・半乾燥地域であるカッサラ州(Kassala)とカダーレフ州(Al Qadarif)の境界にあたるアトバラ川周辺はメスキートが分布拡大をしている地域の一つである(Fig.7)。LANDSAT 衛星画像による解析の対象は中心座標(15° 3' 37.40"N、35° 58' 3.15"E)から縦約4,500m*横約2,700mとした。また、Terra MODIS 衛星画像による解析の対象は中心座標(15° 14' 30.59"N、35° 49' 44.40"E)から上流・下流にそれぞれ約30kmの全長約60kmのアトバラ川を範囲とした。また、現地調査ではカラリ村(Karari village)周辺(15° 1' 51.61"N、35° 55' 43.29"E)と中心座標(15° 3' 1.70"N、35° 57' 50.46"E)より約2km*2kmの範囲を対象地として設定した。



(a) Map of Sudan
 (b) Karari village · Study site (Atbara river basin)

Fig. 7 Study site

第 2 章 研究方法

2.1 衛星画像による解析

2.1.1 使用する衛星画像データ

① LANDSAT-5TM (Thematic Mapper)・LANDSAT-7ETM+ (Enhanced Thematic Mapper, Plus)

衛星画像をアメリカ地質調査所 (USGS) のホームページよりダウンロードして使用した。波長帯は全部で 7 つの band があり、地上分解能は 30m である。本研究では band3 と band4 を使用し、波長帯は以下の通りである。

LANDSAT-5TM

band3 赤 630-690nm

band4 近赤外 760-900nm

LANDSAT-7ETM+

band3 赤 630-690nm

band4 近赤外 750-900nm

② Terra MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)

衛星画像をアメリカ地質調査所 (USGS) のホームページよりダウンロードして使用した。波長帯は全部で 36 の band があり、地上分解能は band1 と band2 が 250m、band3 から band7 が 500m、band8 から band36 までが 1,000m である。本研究では band1 と band2 を使用し、波長帯は以下の通りである。また、雲やノイズ等の影響を 8 日間ごとにコンポジットしている MOD09Q1 のデータセットを使用した。

Band1 赤 620-670nm

Band2 近赤外 841-876nm

③ GeoEye-1

2009 年 2 月 22 日撮影された GeoEye 社製の画像を購入して使用した。波長帯は全部で 4 つの band があり、地上分解能は 1.64m である。本研究では band3 と band4 を使用し、波長帯は以下の通りである。

Band3 赤 655-690nm

Band4 近赤外 780-920nm

④ ASTER GDEM(The Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Global Digital Elevation Model)

アメリカ地質調査所 (USGS) のホームページよりダウンロードして使用した。地上分解能が 30m の標高データである。

2.1.2 衛星画像データ処理

① LANDSAT-5TM・LANDSAT-7ETM+

LANDSAT-5TM・LANDSAT-7ETM+の衛星画像は衛星画像解析ソフトウェア ENVI5.1(Exelis Visual Information Solutions 社)を使用し、calibrationを行い、band3 と band4 をレイヤースタッキングした。次に中心座標 (15° 3' 37.40"N、35° 58' 3.15"E) から縦約 4,500m*横約 2,700m の ROI (region of interest) を設定し、衛星画像にサブセットした。続いて植物の算出を行ったが、一般的に植物は NDVI (正規化植生指数: Normalized Difference Vegetation Index) を用いて算出される。NDVI はリモートセンシングの多バンドデータから求められる植物の活性度・有無を示す指標で、下記の式で求められる。NIR は近赤外バンドの反射率、R は可視の赤バンドの反射率である。NIR は植物の葉の細胞構造による反射率の高い近赤外域に対応しており、R は葉に含まれるクロロフィルによる 640~670nm 付近の強い吸収帯 (可視光の赤) に対応している。このため、画素に

対応する地表上で植物の葉が多い程、NDVIの値は高くなる。

$$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R)$$

しかし、対象地は植物より露出土壤の割合が多く、土壤の反射の影響を大きく受ける。そこで土壤の影響を考慮したSAVI(Soil Adjusted Vegetation Index)と呼ばれる植生指数も提案されており、以下の式で定義される(Huete, A. R. 1988)。

$$SAVI = (NIR - R) / (NIR + R + L) * (1 + L)$$

Lは、土壤調整ファクターであり、植物の被覆率が非常に高い場合は0、植物の被覆率が非常に低い場合は1、植物の被覆率が適当である場合は0.5を取る。

なお、本研究ではこのSAVIをさらに発展させたMSAVI2(Modified Soil Adjusted Vegetation Index2)を使用した(Qi *et al.* 1994)。この指数では異なる植物被覆率の場合でも土壤からの反射の影響を最小化するよう、Lを再帰的に計算することで修正しており、以下の式で定義される。

$$MSAVI2 = ((2 * NIR + 1) - \sqrt{(2 * NIR + 1)^2 - 8 * (NIR - R)}) / 2$$

そして、MSAVI2から植生指数を算出した後に地理情報システムソフトウェアであるArcGIS10.2(ESRI社)を用いて、各ピクセルからその値を抽出した。

使用した LANDSAT 画像の時期は以下の通りである。

1986 年 2 月 11 日 (LANDSAT-5TM)

1995 年 2 月 4 日 (LANDSAT-5TM)

2005 年 2 月 23 日 (LANDSAT-7ETM+)

2014 年 2 月 16 日 (LANDSAT-7ETM+)

約 10 年間ごと、4 時期の画像からメスキートの分布変遷を明らかにした。MSAVI2 で算出した植生指数値を高解像度衛星である GeoEye-1 の画像を用いて、目視判別により以下のように閾値を設定した。

水域 : Min ~ 0.02

土壌域 : 0.02 ~ 0.10

低密度域 : 0.10 ~ 0.15

中密度域 : 0.15 ~ 0.25

高密度域 : 0.25 ~ Max

メスキート分布変遷の解析を行うにあたって、LANDSAT 衛星の 30m 分解能の特性上、中密度以下のピクセルにはメスキート以外の影響が多く入っているミックスピクセルとなる。今回の解析ではより純粋なメスキートの分布変遷を掴む為に、高密度域に限定して解析を行った。

② Terra MODIS

MOD09Q1 のデータセット製品はすでに calibration の処理が施されているデータであり、同時にレイヤースタッキングもされている。その為、ENVI5.1 では中心座標 (15° 14' 30.59"N、35° 49' 44.40"E) から上流・下流にそれぞれ約 30km の全長約 60km のアトバラ川の範囲の ROI を設定し、さらに半径 1km バッファを作成し、衛星画像にサブセットした。その後 MSAVI2 を用いて植生指数を算出し、ArcGIS10.2 を用いて各ピクセルから値を抽出した。

使用した MODIS 画像は 2000 年 2 月 26 日から 2012 年 12 月 26 日までの計 586 時期である。各時期の最大ピクセル値をその時期のメスキート活性値、Sudan Meteorology Authority より入手した月毎の降雨データの 2 つの時系列データを作成することとした。時系列データ解析を行う際は等間隔データを扱うことが前提となる為に、比例配分による線形補間を行い、毎月 1 日に統一した。また、植生指数値と降雨量という異なった物理量の関係を解析するために、両データを以下の式を用いて標準化した。

$$Z_i = \frac{x_i - \mu}{\sigma}$$

Z_i : 標準化データ、 x_i : データ、 μ : 平均、 σ : 標準偏差

さらに降雨量は月によってデータの変化が激しく、傾向が掴みにくい。この問題を解消する為に、移動平均法を用いて平滑化を以下の式を用いて行った。

$$X_i = \text{Average}(n-1, n, n+1)$$

X_i : 移動平均データ、 n : 月データ

これらの時系列データを作成した後に、一年間を「降雨イベントを確認してから降雨ピークまで」、「降雨ピークから降雨イベントが無くなるまで」の2つのパートに分けて植生活性と降雨の相関関係を、タイムラグを考慮して解析した。

③ ASTER GDEM

ENVI5.1を用いて標高 (Elevation) を算出し、後述する高台に生えるメスキートのポイントデータと合わせて解析をした。

2.2 現地調査にて取得したデータによる解析

2012年12月5日から9日において現地調査を実施した。

2.2.1 気孔伝導度測定

中心座標 (15° 3' 3.31"N 35° 57' 58.20"E) 周辺にて、アカシア・トルティリス・ラディアーナ (*Acacia Tortlis subspecies Radianna*)、アカシア・エーレンベルギアナ (*Acacia ehrenbergiana*)、バラニテス・アエギプティアカ (*Balanites Aegyptiaca*) の在来種3種類とメスキートの気孔伝導度測定を行い、それぞれの樹種の蒸発散量を比較した。機材は Leaf Porometer :SC-1 を用いた (Fig. 8)。



Fig. 8 Leaf Porometer SC-1

2.2.2 分光放射測定

中心座標 (15° 3' 3.31"N 35° 57' 58.20"E) 周辺にて在来種 3 種類とメスキートの分光放射測定を行い、それぞれの樹種の分光放射特性の違いを比較した。機材は FieldSpec® HandHeld 2 Portable Spectroradiometer (325~1075nm)を用いた (Fig. 9)。



Fig. 9 FieldSpec® HandHeld 2 Portable Spectroradiometer

2.2.3 家畜トラッキング・ストーキング

2013年12月5日から7日までカラリ村にて飼養されているラクダ・ロバ・ヤギ・ヒツジの4種類の家畜にGPS Trip Recorder: 747-Pro(Fig.10)を取り付けて放牧中のトラッキングデータを取得した(Fig.11~14)。また、7日にヤギのストーキングも同時に行い放牧地の観察をした。取得したトラッキングデータは動物の行動圏解析に使われるLoCoH(Local Convex Hull)モデル(Getz and Wilmers, 2004)を使用し、家畜の行動軌跡ポイントから行動圏を推定した。LoCoHモデルは、点の分布に基づいてK(最近傍の数)の値を選択し、等値線(Isopleth)を作成する手法であり、等値線の値によって生息域の利用可能性をランク付けすることができる。なお、オンライン上にあるLoCoH Web Applicationを使用した。



Fig.10 GPS Trip Recorder 747-Pro



Fig.11 GPS attached to
the Camel



Fig.12 GPS attached to
the Donkey



Fig.13 GPS attached to
the Sheep



Fig.14 GPS attached to
the Goat

2.2.4 遊牧民への聞き取り

家畜のトラッキング・ストーキング調査の後に、牧夫へメスキート林の拡大から受けるメリット・デメリットやメスキートに対する印象、また家畜にどのような影響が出ているのか聞き取り調査を行った (Fig. 15)。



Fig.15 Interview to the herdsman

2.2.5 高台に生えるメスキート

中心座標 ($15^{\circ} 3' 3.31''\text{N}$ $35^{\circ} 57' 58.20''\text{E}$) 周辺にて、高台に生えるメスキートのポイント 10 ヶ所を Garmin GPSMAP 62sc (Fig. 16) を用いて取得した。取得したポイントデータは ASTER GDEM データを使用して標高 (Elevation) を算出した。



Fig. 16 Garmin GPSMAP 62sc

第 3 章 結果と考察

3.1 衛星画像と降雨量データ

3.1.1 LANDSAT 衛星画像解析によるメスキートの分布変遷

約 10 年間隔で 4 時期 (Fig. 17~20) の画像から水域・土壌・メスキートの低密度域・中密度域・高密度域に分類した。分類結果から高密度域のメスキートピクセルを抽出し、その面積を算出した (Fig. 21)。

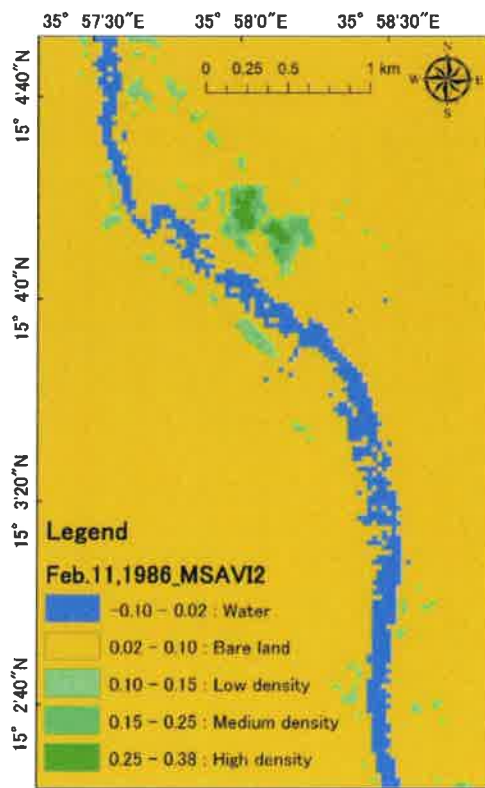


Fig. 17 MSAVI2 image of
Feb. 11, 1986

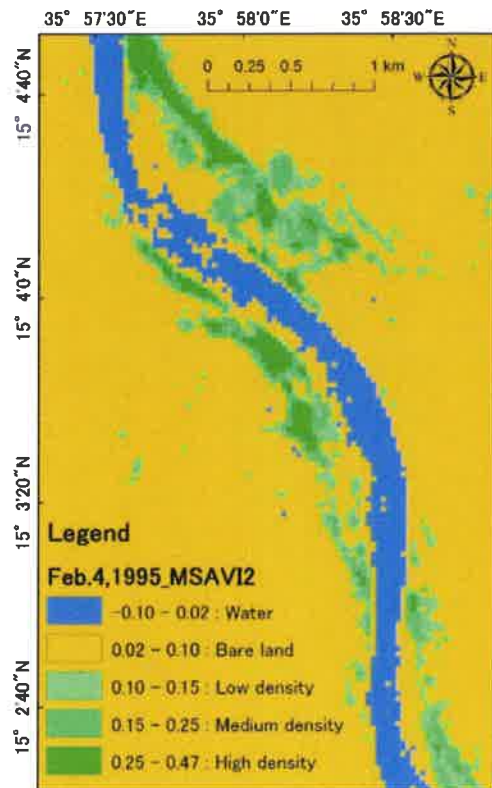


Fig. 18 MSAVI2 image of
Feb. 4, 1995

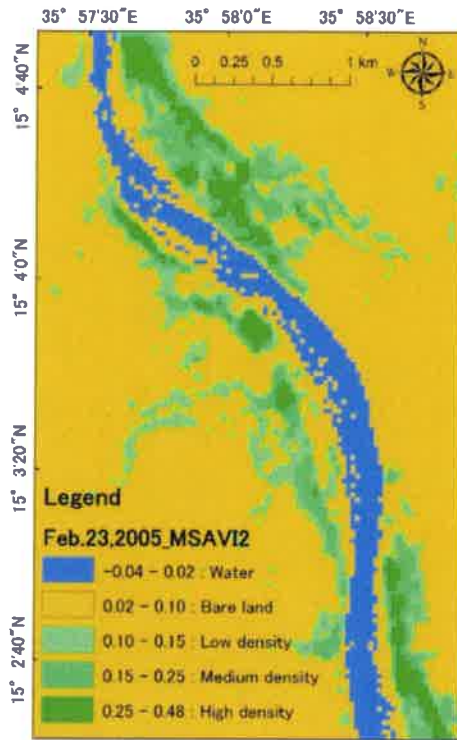


Fig.19 MSAVI2 image of Feb. 23, 2005

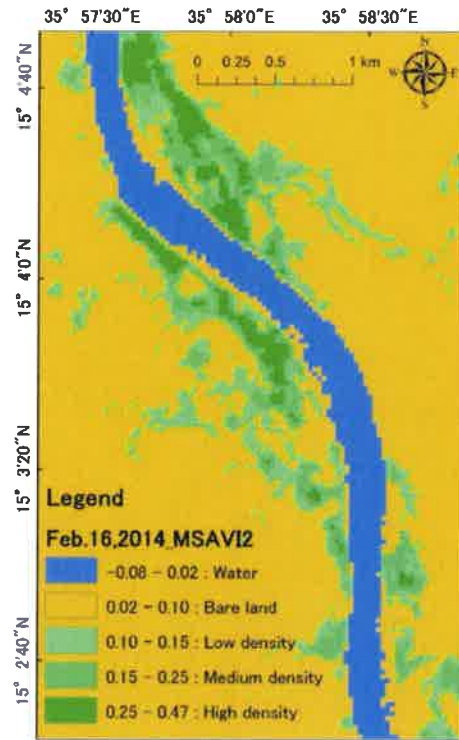


Fig. 20 MSAVI2 image of Feb. 16, 2014

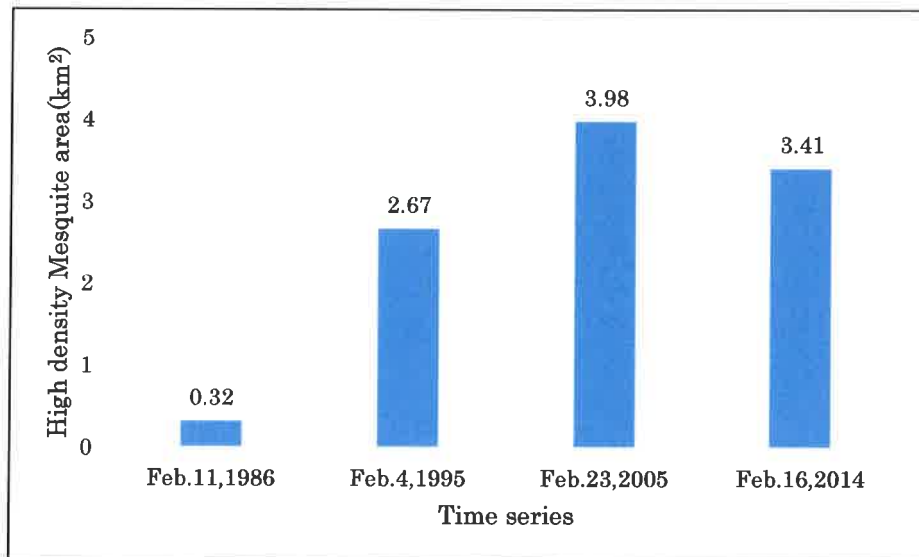


Fig. 21 High density Mesquite area changes during 1986 to 2014

1986年から2005年の間で高密度域のメスキート面積が約12.4倍と大幅に上昇し、分布が拡大していることが分かる。その中で、1986年から1995年にかけて約8.3倍と急激に上昇している。また、分布場所の傾向として、河川のカーブの内側の水の流れが緩やかな場所で密生していることが分かる。この結果は従来の研究と同様の結果を得た。2005年から2014年にかけて若干の減少があったが、これは2006年6月からスーダン政府によってメスキート除去作業が開始（SWITCH, 2006）されたことに大きく関係していると考えられる。また、2013年12月に実施した対象地の現地調査においても、住民レベルでメスキートの除去作業が実施されている様子を確認することができ、メスキート面積が減少したと考えられる（Fig. 22～24を参照）。



Fig. 22 Situation of cutting Mesquite



Fig.23 Situation of cutting Mesquite



Fig.24 After cutting Mesquite

3.1.2 MODIS 画像によるメスキート活性と降雨の相関関係

使用した計 586 時期の MODIS 衛星画像を比例配分による線形補間で毎月 1 日とする等間隔に統一し、降雨データという異なった物理量の関係を解析するため全体統計量で標準化をした。その後 3 ヶ月移動平均法を用いてデータを平滑化し、時系列データとした (Fig. 25)。

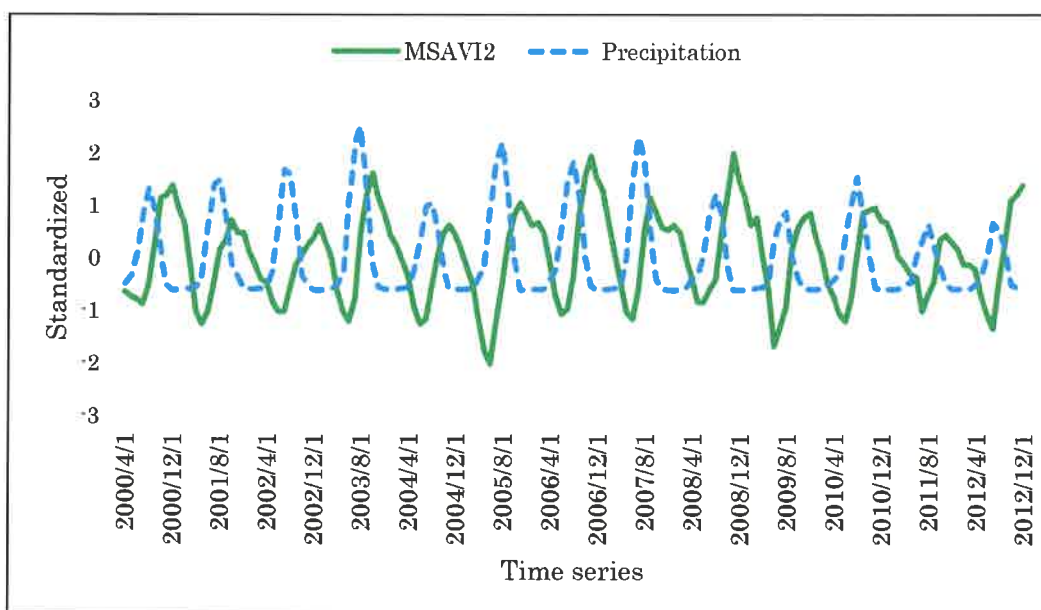


Fig. 25 Time series of MSAVI2 & Precipitation

一年間を「降雨イベントを確認してから降雨ピークまで」(Fig. 26 ~ 28, Table. 1)、「降雨ピークから降雨イベントが無くなるまで」(Fig. 29 ~ 31, Table. 2)の 2 つのパターンに分けて植生活性と降雨の相関関係を、タイムラグを考慮して解析した。

降雨イベントを確認してから降雨ピークまで

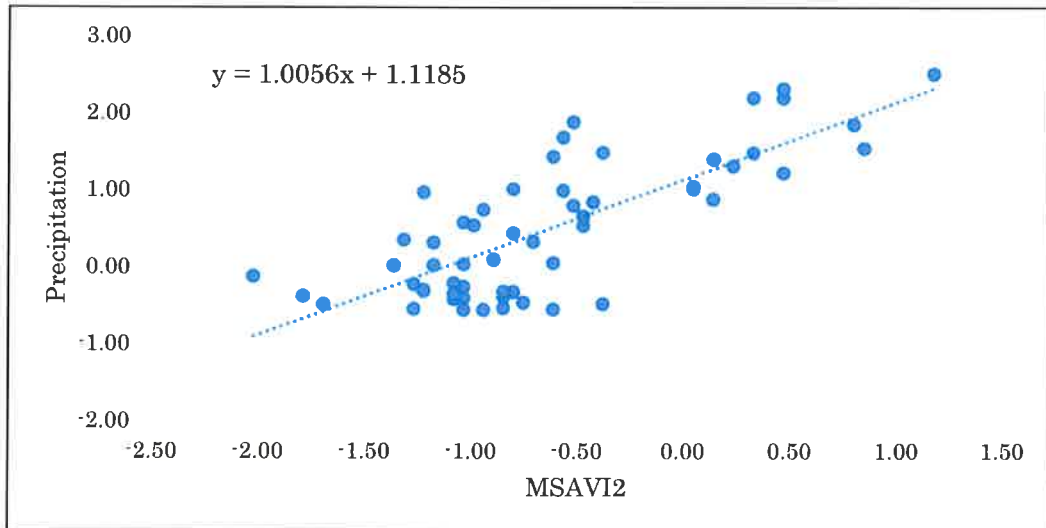


Fig. 26 Scatter plot between MSAVI2 and
Precipitation at 1 month time lag

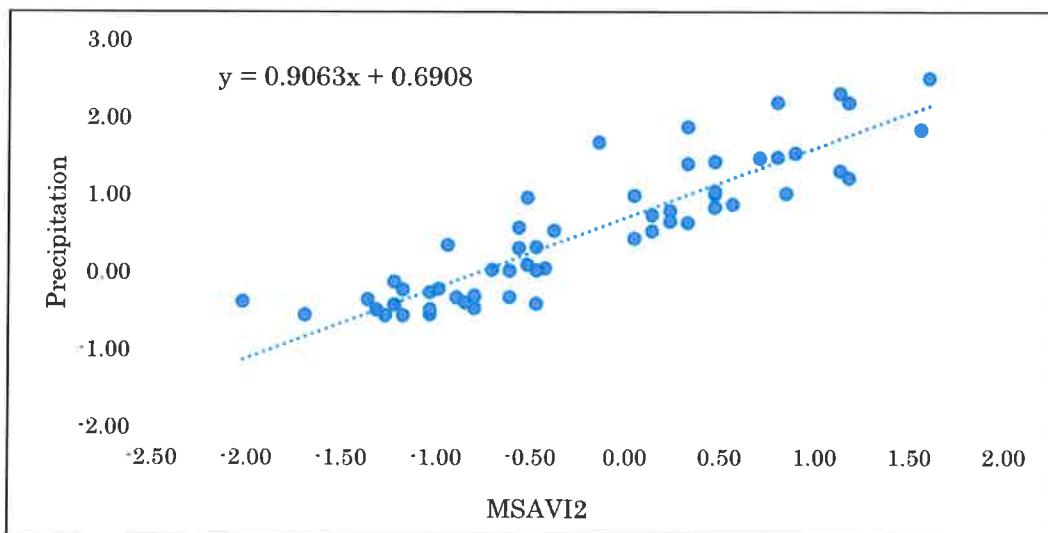


Fig. 27 Scatter plot between MSAVI2 and
Precipitation at 2 month time lag

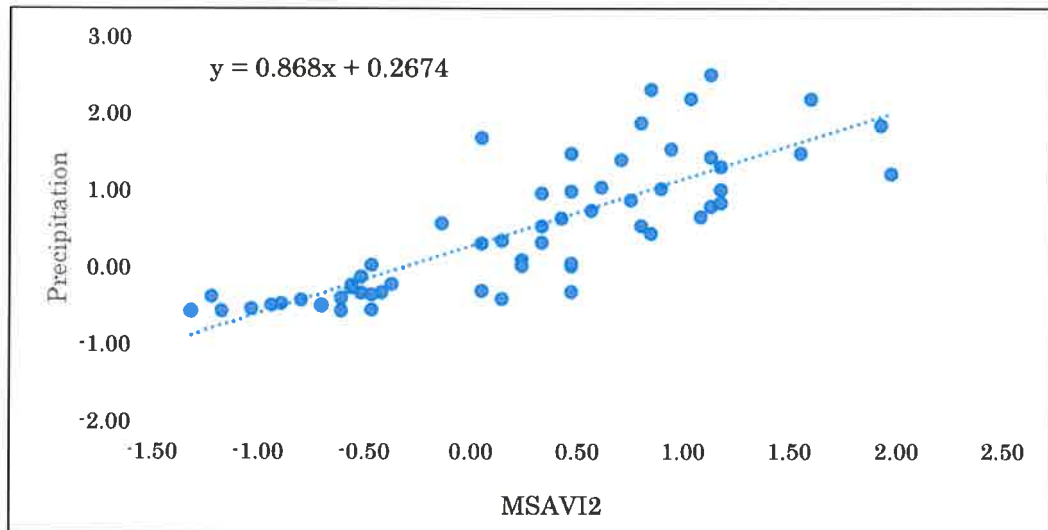


Fig.28 Scatter plot between MSAVI2 and
Precipitation at 3 month time lag

Table.1 Correlation Coefficient & P-value between
MSAVI2 and Precipitation at different time lag

Time Lag	R	P-value
0	-0.12	0.34
1	0.68	0.00
2	0.90	0.00
3	0.84	0.00
4	0.53	0.00

タイムラグ 1 から 4 ヶ月で有意差が確認された ($P < 0.01$)。そしてタイムラグ 2 から 3 ヶ月で強い正の相関となった。

降雨ピークから降雨イベントが無くなるまで

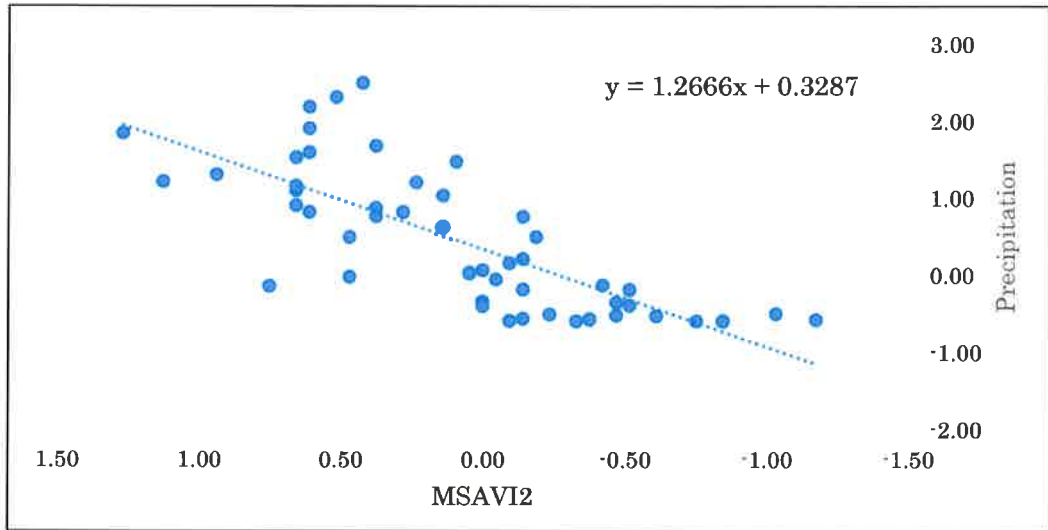


Fig. 29 Scatter plot between MSAVI2 and
Precipitation at 5 month time lag

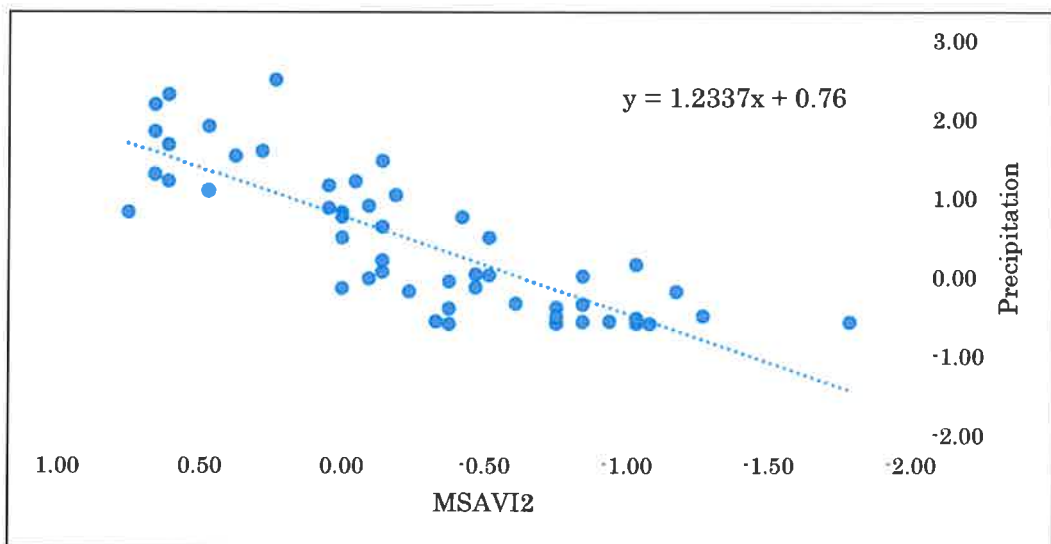


Fig. 30 Scatter plot between MSAVI2 and
Precipitation at 6 month time lag

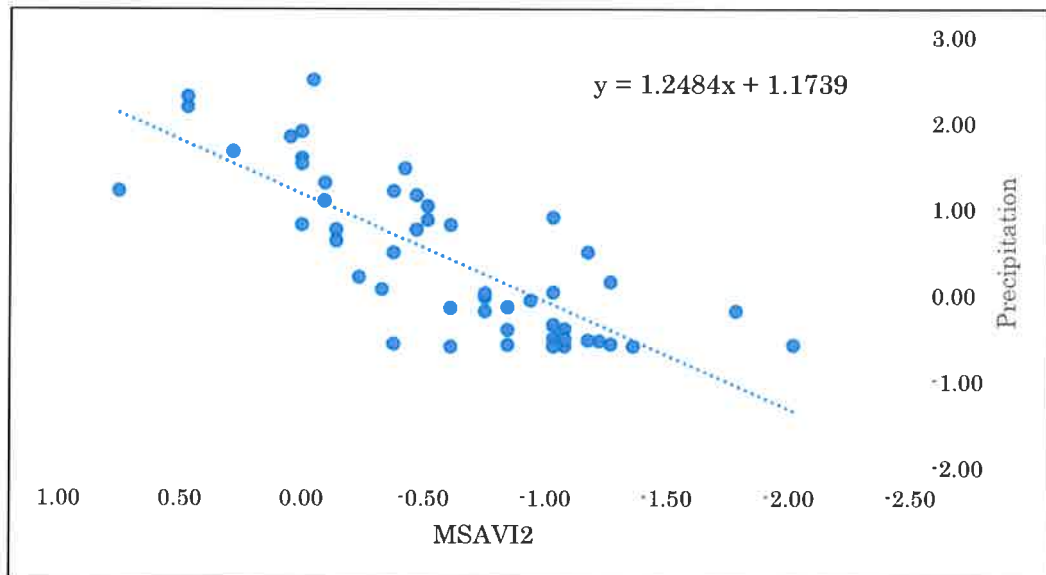


Fig. 31 Scatter plot between MSAVI2 and
Precipitation at 7 month time lag

Table. 2 Correlation Coefficient & P-value between MSAVI2
and Precipitation at different time lag

Time Lag	R	P-value
0	-0.53	0.00
1	-0.06	0.67
2	0.36	0.01
3	0.43	0.00
4	0.68	0.00
5	0.76	0.00
6	0.82	0.00
7	0.78	0.00
8	0.49	0.00

タイムラグ 1 と 2 ヶ月を除き有意差が確認された ($P < 0.01$)。そしてタイムラグ 5 から 7 ヶ月で強い正の相関となった。

植生活性と降雨の相関関係において、降雨イベントが確認されてから降雨ピークまでの間ではタイムラグ 2 から 3 ヶ月で強い正の相関となり、一方で降雨ピークから降雨イベントが無くなるまでの間においてはタイムラグ 5 から 7 ヶ月で強い正の相関となった。

これは「4月の降雨開始より 2 から 3 ヶ月後にメスキート活性が上がる」「8月の降雨ピークより 5 から 7 ヶ月後にメスキート活性が下がる」と言い換えることができる。活性の上昇は 2 から 3 ヶ月に対して、下降は 5 から 7 ヶ月と緩やかな変化を示した。この結果はメスキートが土壌直下に網の目状に張り巡らせる水平根、地下部が地上部に比べて 10 倍、垂直根が 20m とも言われている深根性植物という優れた根系であること。さらに、強い耐乾性から水を効率的に利用しているというメスキートの大きな特徴が表れたと言える。

また、重要なポイントとして「地下水」が挙げられる。極乾環境に対して様々な適応性を兼ね備えているメスキートとは言え、生存に必要な水が無ければ生きられない。乾季から雨季へ移行する間、利用されている地下水は一年で最も少ないと推測できる。この状態でメスキートは降雨を待ちわびている状態であり、この時期に活性が最も下がっている。しばらくして、雨季が始まり降雨があると水平根と垂直根で水を吸い上げ、活性を上昇させる。やがて降雨はピークを迎えて、徐々に下降していく。しかし、メスキート活

性の下降は上昇スピードとは異なり、緩やかに下がっていく。この様にしてメスキートは次の雨季まで強い耐乾性と優れた水利用効率で地下水を利用しながら、厳しいスーダンの乾燥環境に耐え忍び、活性の上昇と下降を繰り返しながら生存していると示唆された。

3.2 現地調査にて取得したデータ

3.2.1 気孔伝導度測定

2013年12月9日、現地調査にて在来種3種類とメスキートの蒸散測定を行った。8:00から2時間おきに16:00までの計5回計測した(Fig.32, Table.3)。

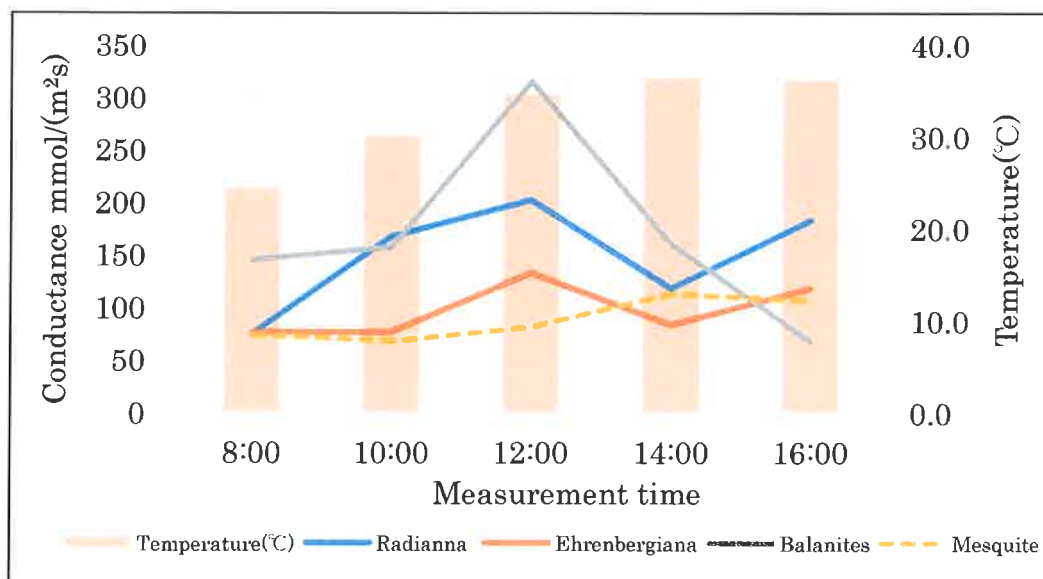


Fig.32 Field measurement of Stomatal Conductance & Temperature in Kassala

Table.3 Field measurement of Stomatal
Conductance & Temperature in Kassala

	Radianna	Ehrenbergiana	Balanites	Mesquite	Temperature(°C)
8:00	75	76	146	74	24.4
10:00	168	77	158	68	30.1
12:00	202	133	315	81	34.7
14:00	118	83	161	113	36.4
16:00	183	118	68	106	36.2
Mean	149	97	170	88	32.4

この結果より、測定開始の8:00から徐々に気温が上昇していることが分かる。気孔からの水分の損失量に関してメスキートは他の在来種と違い、蒸発散量をほぼ一定に抑えていることが読み取れる。また蒸発散量の平均においては、メスキートが一番蒸発散量が少ないという結果が得られた。

3.2.2 分光放射測定

2013年12月9日、現地調査にて在来種3種類とメスキートの分光放射測定を10:20(Fig.33, Table.4)と14:20(Fig.34, Table.5)の1日2回行った。この結果からNDVIを算出し、光合成活性の比較を行った。なお、NDVIを算出する為の赤域と近赤外域の波長はLANDSATの波長帯を用い、赤域630-690nm、近赤外域750-900nmの平均値から求めた。

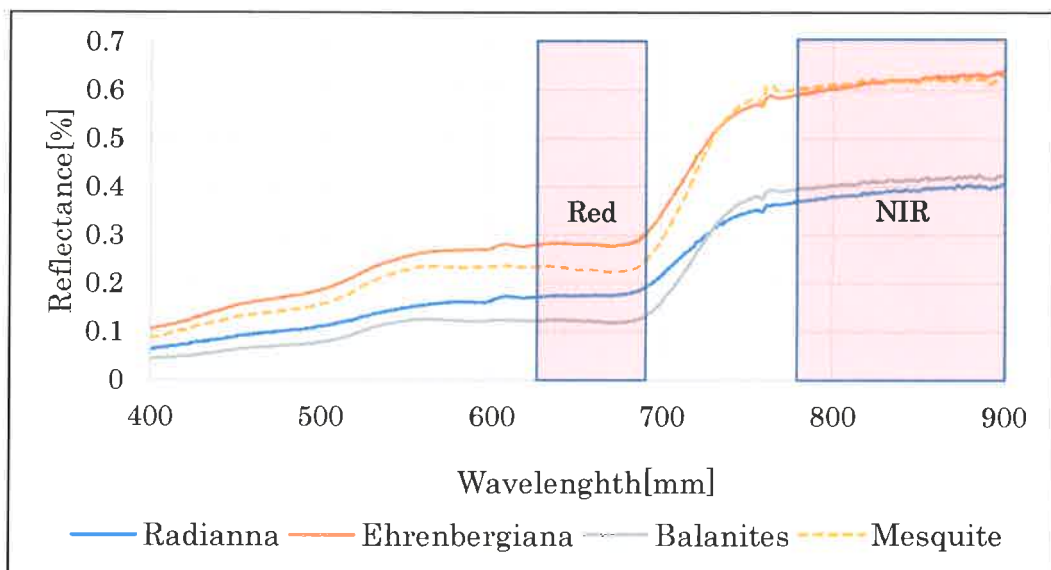


Fig.33 Measurement of Spectrum at 10:20

Table.4 NDVI by Red & NIR at 10:20

	Radianna	Ehrenbergiana	Balanites	Mesquite
Mean Red	0.22	0.36	0.19	0.32
Mean NIR	0.39	0.62	0.41	0.61
NDVI	0.28	0.27	0.38	0.31

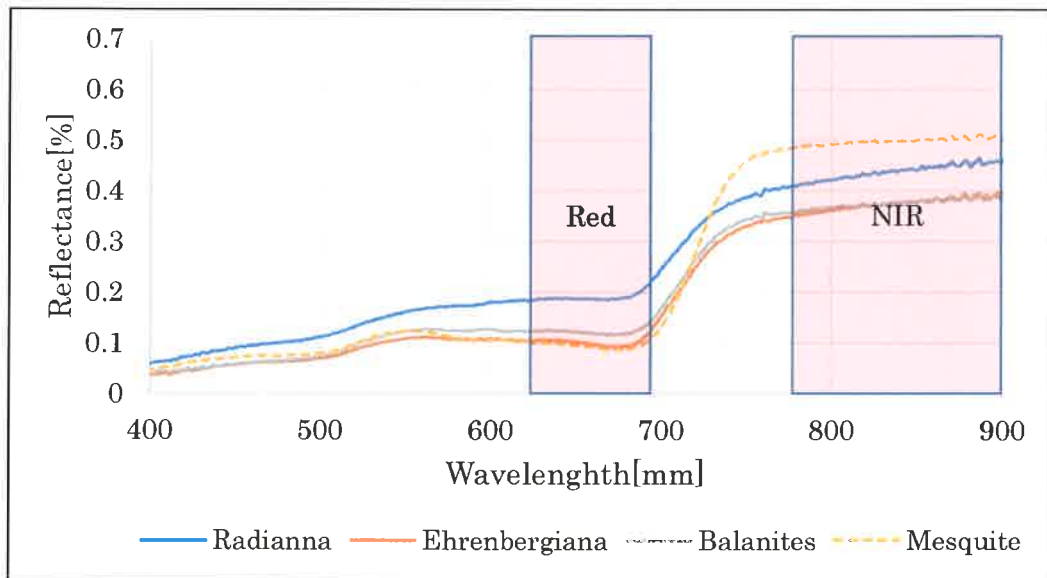


Fig.34 Measurement of Spectrum at 14:20

Table.5 NDVI by Red & NIR at 14:20

	Radianna	Ehrenbergiana	Balanites	Mesquite
Mean Red	0.25	0.16	0.18	0.18
Mean NIR	0.46	0.39	0.40	0.51
NDVI	0.31	0.41	0.37	0.48

10:20の測定結果ではメスキートのNDVIは0.31となり、バラニテスのNDVIの0.38について2番目に高い光合成活性であった。一方、14:20の測定結果においてはメスキートのNDVIが0.48と在来種3種類の中で一番高い光合成活性であった。

ここで、気孔伝導度測定と分光放射測定による結果から、メスキートは気孔からの蒸発散量を抑えつつ、高い光合成活性を維持していることが分かる。これは高温・極乾環境下にあるスーダンの自然環境に適応していると考えられる。今回得られた結果は先行研究と同様の結果を得ることができた(矢吹ほか 2012; 柴田柚香, 2013)。

3.2.3 家畜トラッキング・ストーキング

2013年12月5日から7日の3日間カラリ村で飼養されているラクダ・ロバ・ヤギ・ヒツジの4種類の家畜にGPS Trip Recorderを取り付け、10秒ごとにトラッキングデータを取得し、そのデータからLoCoHモデルを用いて行動圏の解析を行った。なお解析結果であるMSAVI2の青色は水域、茶色は土壌、緑色が濃くなるにしたがってメスキート密度が高いことを表しており、HRは黄色から赤色に移るにしたがって、滞在時間が長いということを表している。なお、放牧されている家畜は牧夫が先導をしている。

ラクダ (メス : 17 歳)

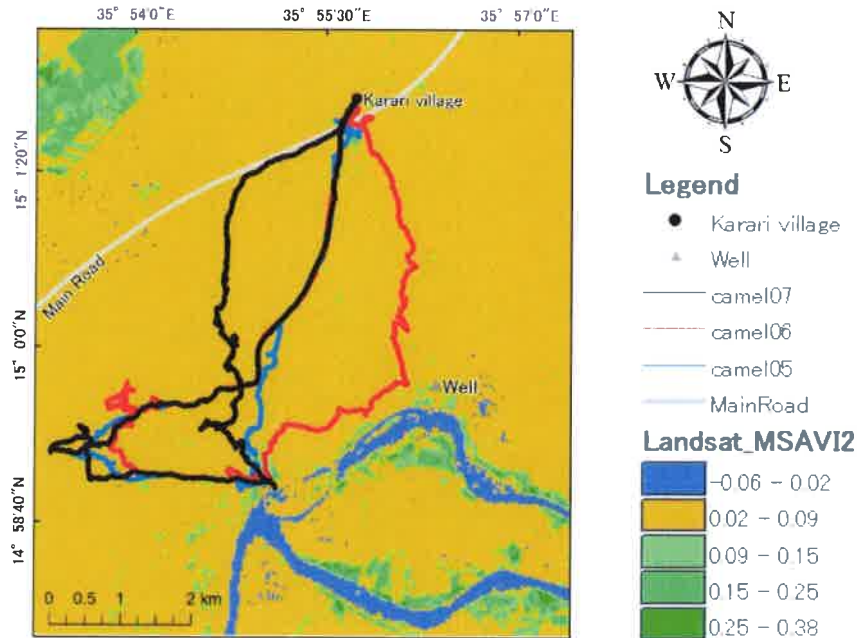


Fig. 35 GPS tracking of Camel during Dec. 5 to 7 in Kassala village

Table. 6 Result of Camel tracking in Karari village, Sudan

Camel	Distance(km)	Time(h)	Speed(km/h)
Dec.5,2013	21.80	13:00	1.68
Dec.6,2013	23.20	13:42	1.69
Dec.7,2013	22.90	13:36	1.68
Mean	22.63	13:26	1.68

平均 22km の距離を約 13 時間かけて、3 日間ほぼ一定の速度で放牧されていることがわかる。3 日間ともアトバラ川にアクセスし、メスキート密度が高い場所に近づいていることが読み取れる (Fig. 35, Table. 6 を参照)。

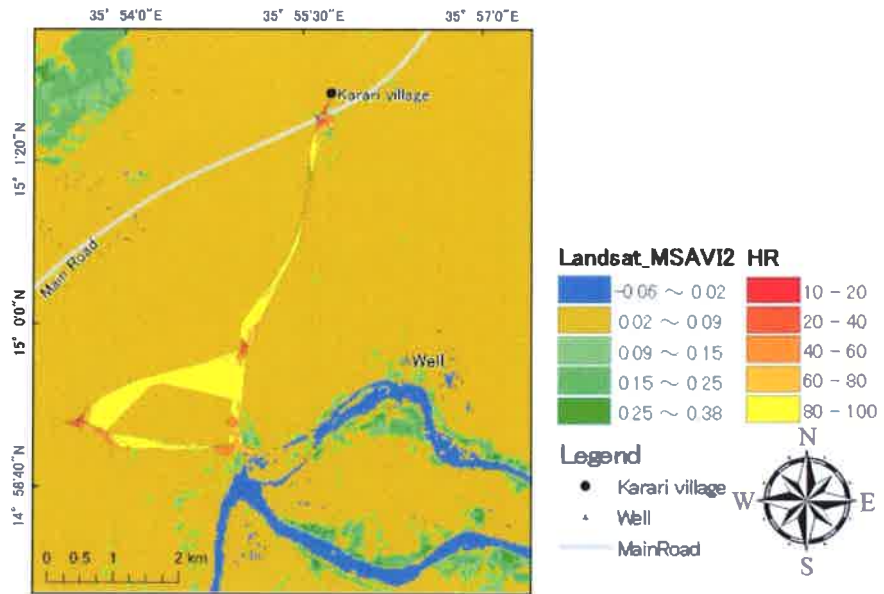


Fig.36 Result of Camel home range using LoCoH model

in Dec. 5

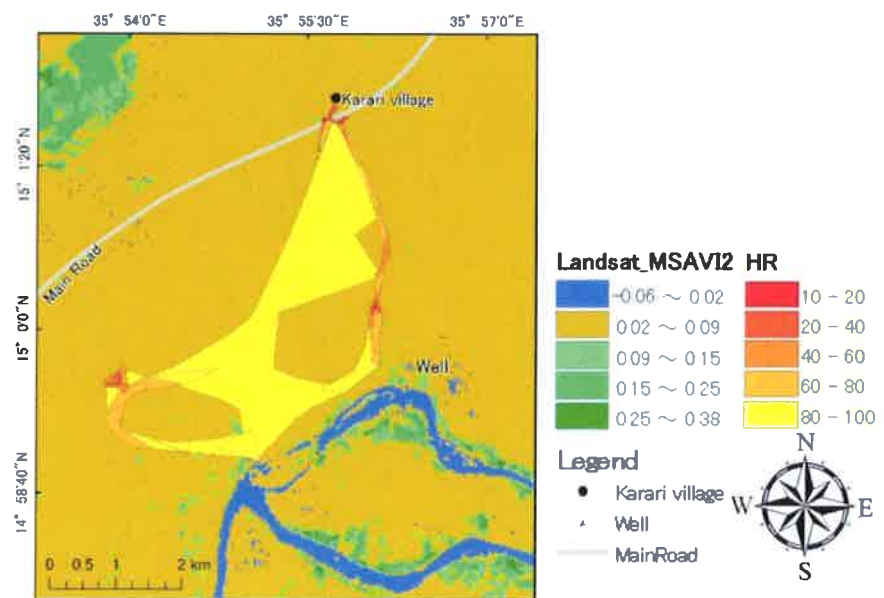


Fig.37 Result of Camel home range using LoCoH model

in Dec. 6

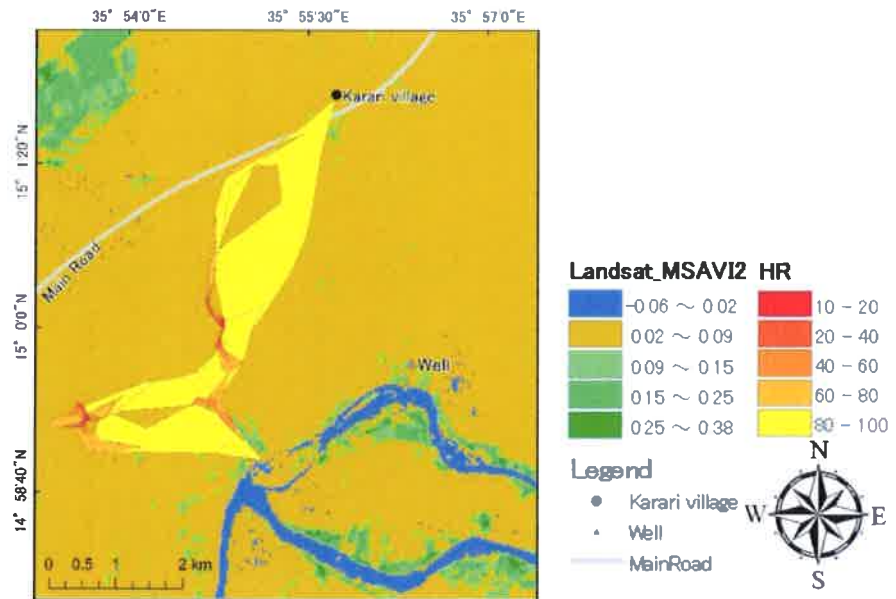


Fig.38 Result of Camel home range using LoCoH model
in Dec.7

Table.7 MSAVI2 Max of Camel home range

Camel	MSAVI2_Max
Dec.5,2013	0.28
Dec.6,2013	0.18
Dec.7,2013	0.22

ラクダの軌跡から植生活性の最大値を抽出した結果、中密度から高密度域にアクセスしていることが明らかになった。そして、河川沿い以外で滞在時間が長い場所を Google Earth をもとに解析した結果、在来種であるアカシアの木を確認することができた (Fig.36~38 & Table.7)。

ロバ (メス : 12 歳)

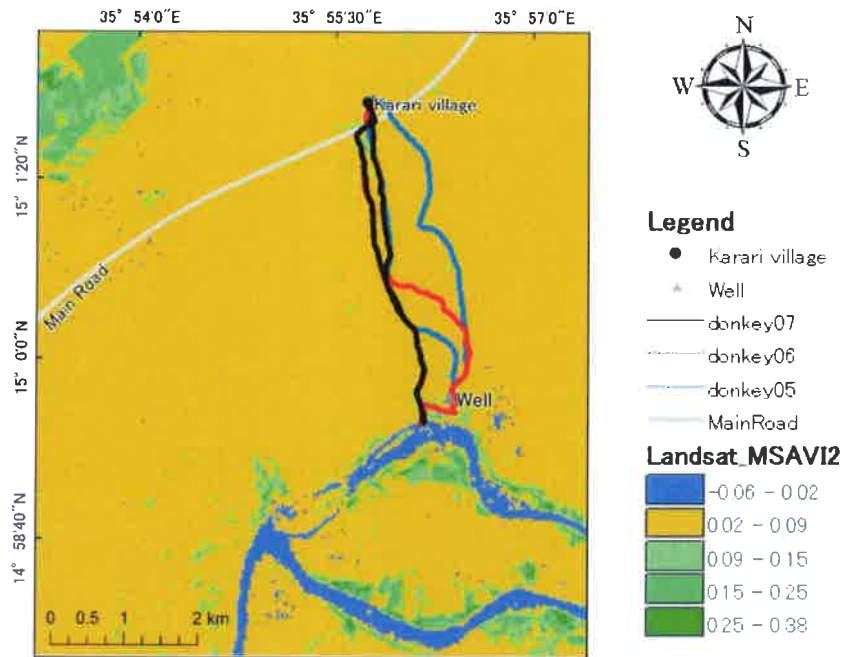


Fig. 39 GPS tracking of Donkey during Dec. 5 to 7 in Kassala village

Table.8 Result of Donkey tracking in Karari village, Sudan

Donkey	Distance(km)	Time(h)	Speed(km/h)
Dec.5,2013	9.80	3:24	2.88
Dec.6,2013	11.00	2:39	4.15
Dec.7,2013	9.60	2:48	3.43
Mean	10.13	2:57	3.49

12月5日はアトバラ川にはアクセスせず、井戸で水を汲んで帰ってきたと、後の聞き取りからも証言を得た。6と7日はアトバラ川にアクセスし、メスキート密度が高い場所に近づいていることが読み取れる (Fig. 39, Table. 8)。

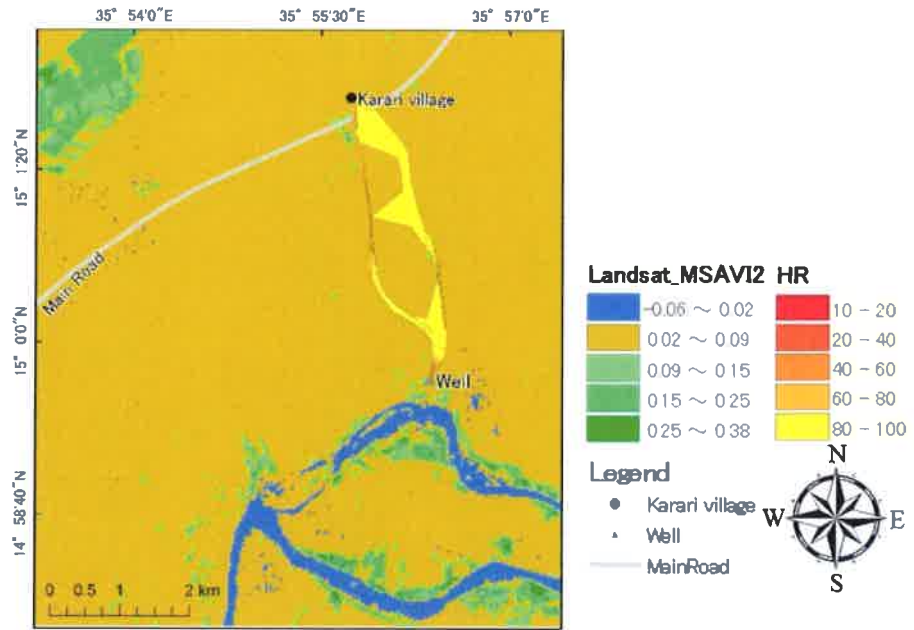


Fig. 40 Result of Donkey home range using LoCoH model
in Dec. 5

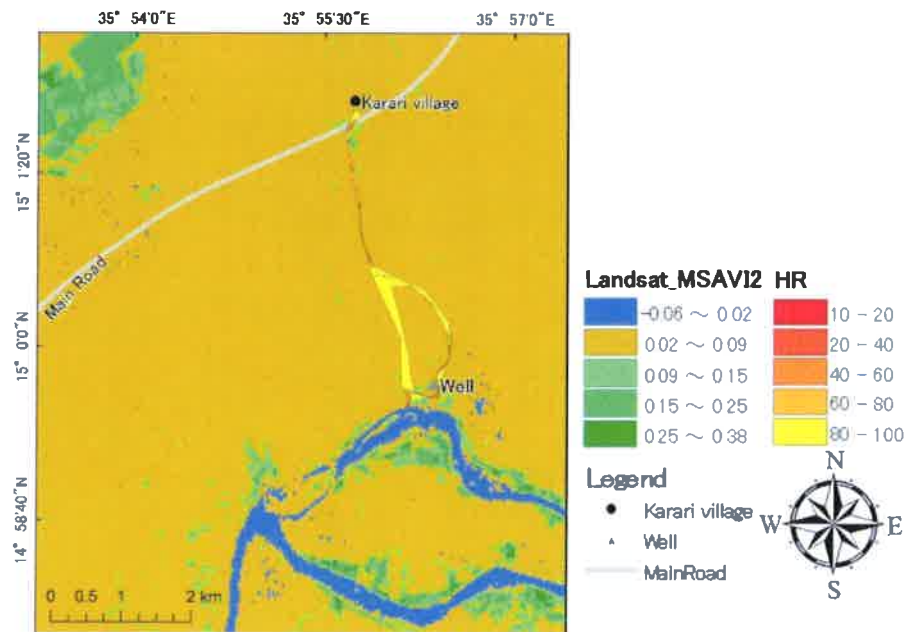


Fig. 41 Result of Donkey home range using LoCoH model
in Dec. 6

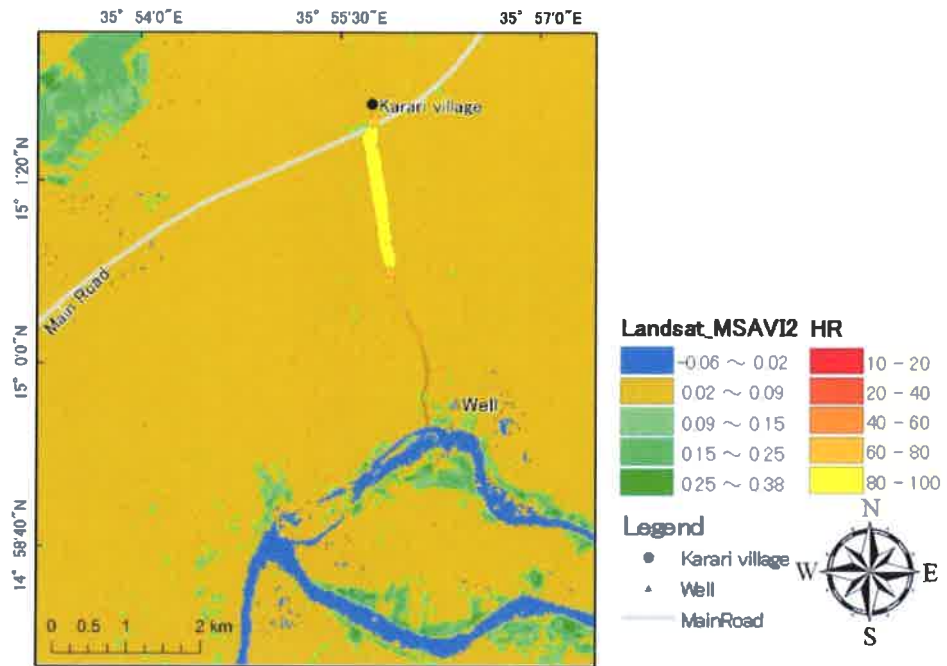


Fig. 42 Result of Donkey home range using LoCoH model
in Dec. 7

Table. 9 MSAVI2 Max of Donkey home range

Donkey	MSAVI2 Max
Dec.5,2013	0.10
Dec.6,2013	0.13
Dec.7,2013	0.14

ロバの軌跡から植生活性の最大値を抽出した結果、低密度域にアクセスしていることが明らかになった。ロバは飲み水、生活用水を汲み、運搬させる為に使われていることが多く、採食する機会は少ないと考えられる (Fig. 40~42, Table. 9)。

ヤギ (メス : 5 歳)

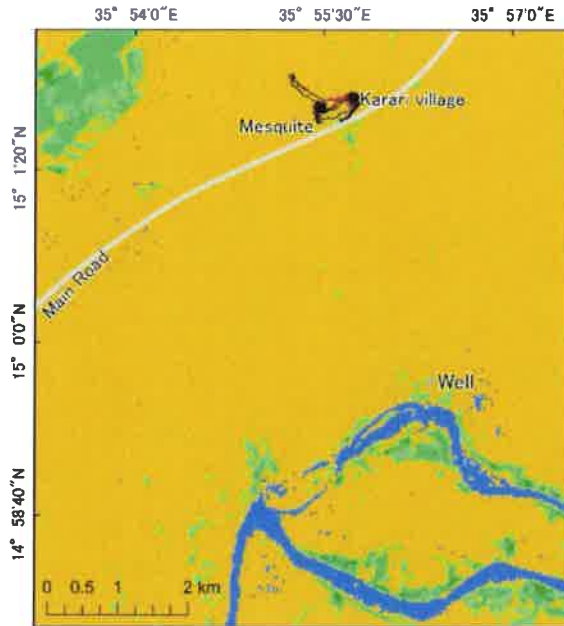


Fig. 43 GPS tracking of Goat during Dec. 5 to 7 in Kassala

village

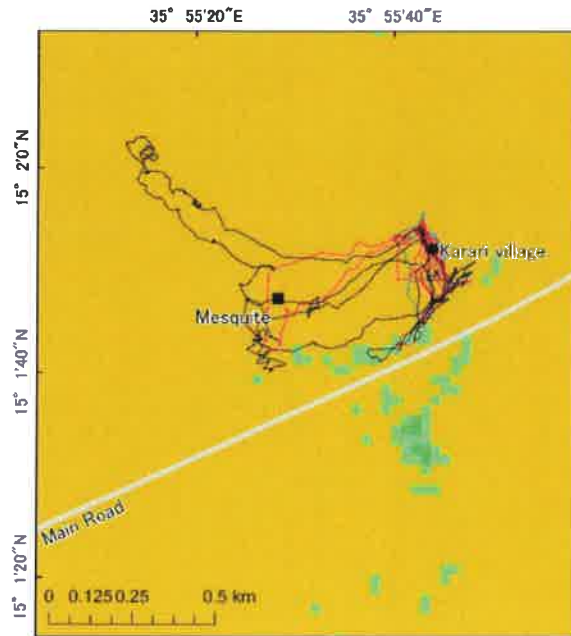
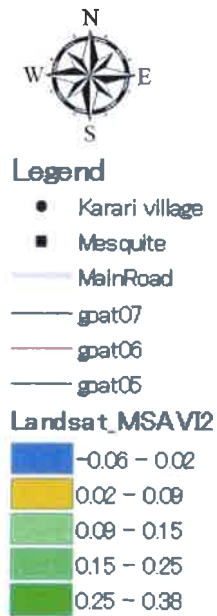


Fig. 44 GPS tracking of Goat during Dec. 5 to 7 in Kassala

village

Table.10 Result of Goat tracking in Karari village, Sudan

Goat	Distance(km)	Time(h)	Speed(km/h)
Dec.5,2013	4.30	9:48	0.44
Dec.6,2013	7.10	10:30	0.68
Dec.7,2013	9.40	9:36	0.98
Mean	6.93	9:58	0.70

ヤギはラクダやロバとは違いアトバラ川にはアクセスせずカラリ村周辺での放牧であった。移動距離も比較的短く、同じ場所を行き来している様子がうかがえる。なお、放牧を終えた後に牧夫が桶に水を汲み与えていた。また、12月7日にストーキング調査も同時に行い、放牧地の様子を観察した (Fig. 43, 44, Table. 10)。

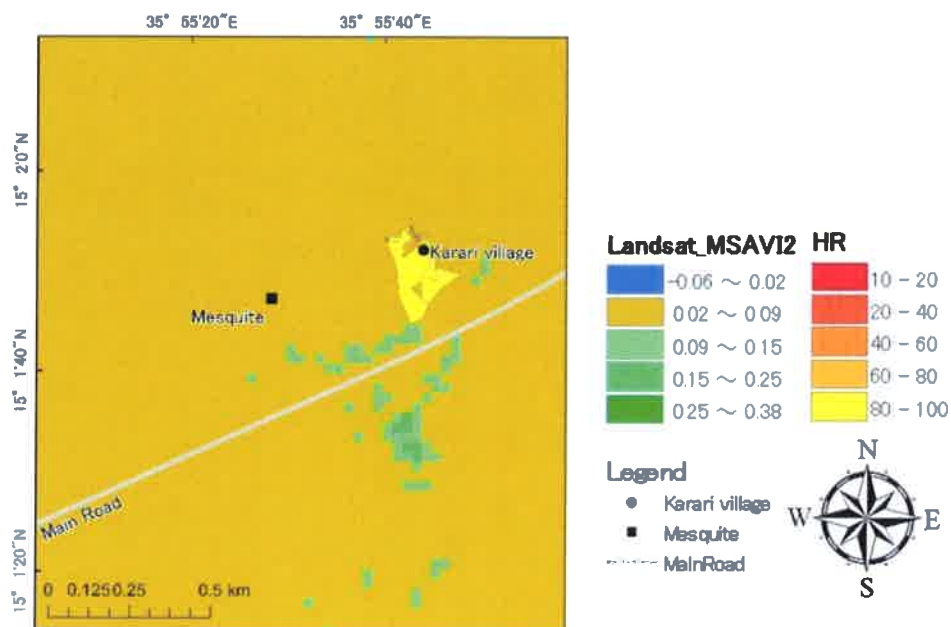


Fig. 45 Result of Goat home range using LoCoH model in Dec. 5

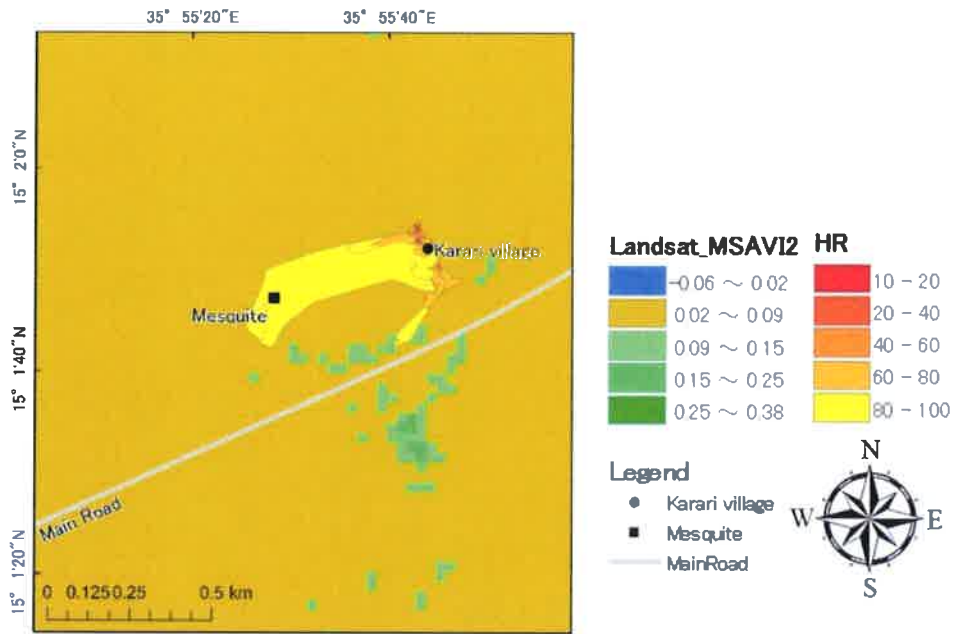


Fig.46 Result of Goat home range using LoCoH model
in Dec.6

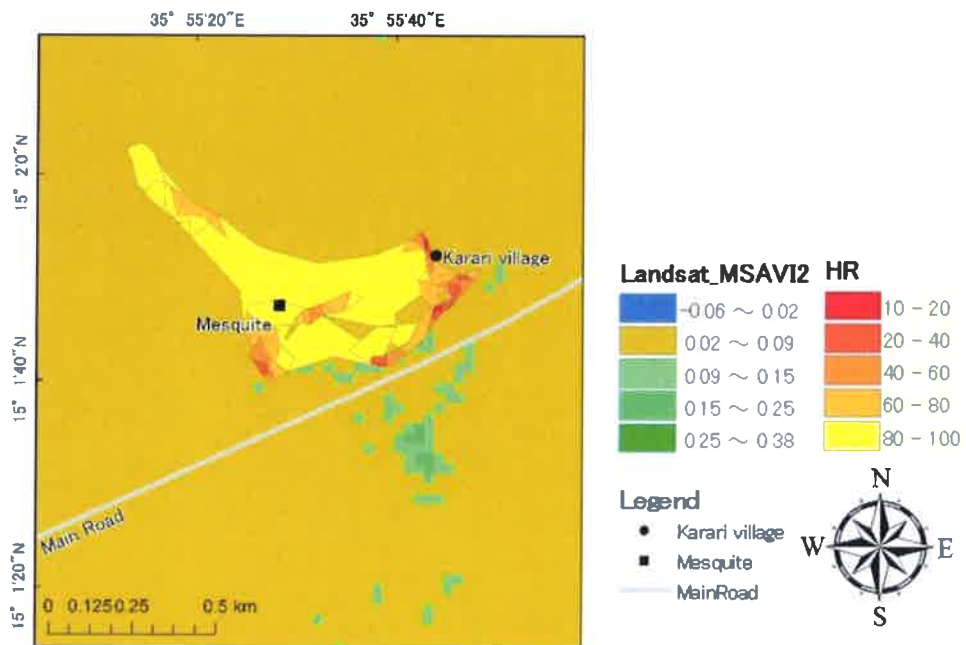


Fig.47 Result of Goat home range using LoCoH model
in Dec.7

Table.11 MSAVI2 Max of Goat home range

Goat	MSAVI2_Max
Dec.5,2013	0.09
Dec.6,2013	0.11
Dec.7,2013	0.11

放牧地は在来植物のアカシアとわずかな草本が点在しているだけで (Fig. 48)、30m 分解能である LANDSAT では土壌の影響が強すぎるため、植物がうまく抽出されなかった。滞在時間が長い場所を高解像度画像である Google Earth をもとに解析し、在来種であるアカシアの木を確認した (Fig. 45~47, Table.11)。



Fig. 48 Grazing land

また、ストーキング調査を実施した結果、在来種ばかりが生える放牧地に小さな一株のメスキートを確認することができた (Fig. 49, 50) ($15^{\circ} 1' 46.94''\text{N}$ $35^{\circ} 55' 27.62''\text{E}$)。この場所は河川水による影響を受けず、家畜によって運ばれた可能性が示唆された。



Fig. 49 Single Mesquite Tree



Fig. 50 Single Mesquite Tree

ヒツジ (メス : 5 歳)

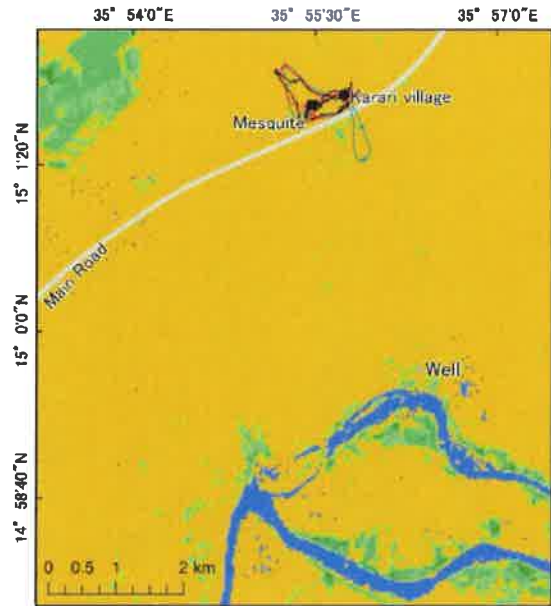


Fig.51 GPS tracking of Sheep during Dec. 5 to 7 in Kassala village

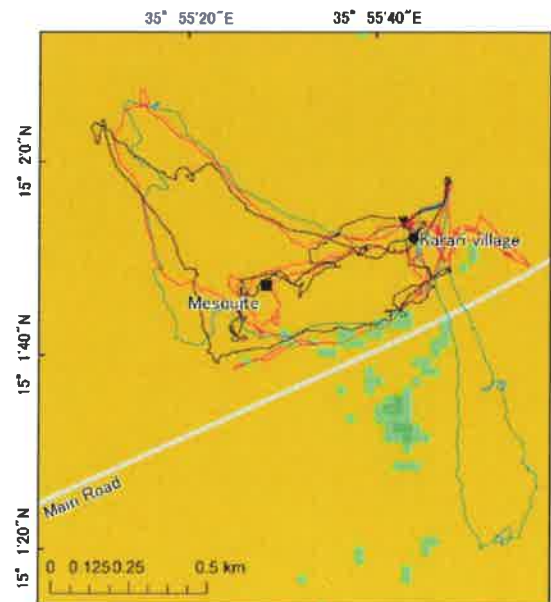


Fig.52 GPS tracking of Sheep during Dec. 5 to 7 in Kassala village

Table.12 Result of Sheep tracking in Karari village, Sudan

Sheep	Distance(km)	Time(h)	Speed(km/h)
Dec.5,2013	7.70	9:30	0.81
Dec.6,2013	9.80	10:18	0.95
Dec.7,2013	8.00	10:00	0.80
Mean	8.50	9:56	0.85

ヒツジはヤギと同じ群れで放牧され、アトバラ川にはアクセスせずカラリ村周辺だけにとどまった。12月5日においては幹線道路を越えて放牧をされていた。なお、放牧を終えた後に牧夫が桶に水を汲み与えていた (Fig. 51, 52, Table. 12)。

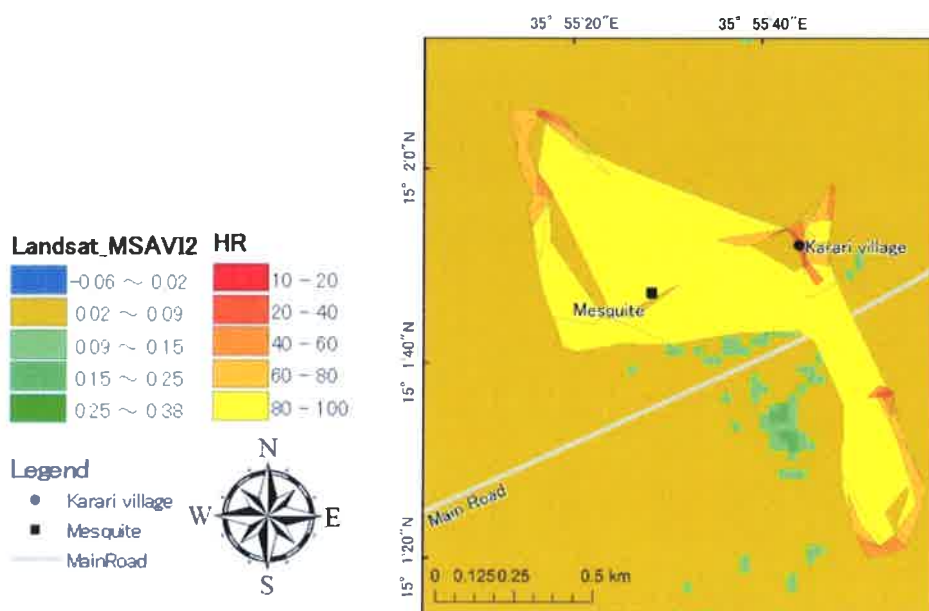


Fig. 53 Result of Sheep home range using LoCoH model in Dec. 5

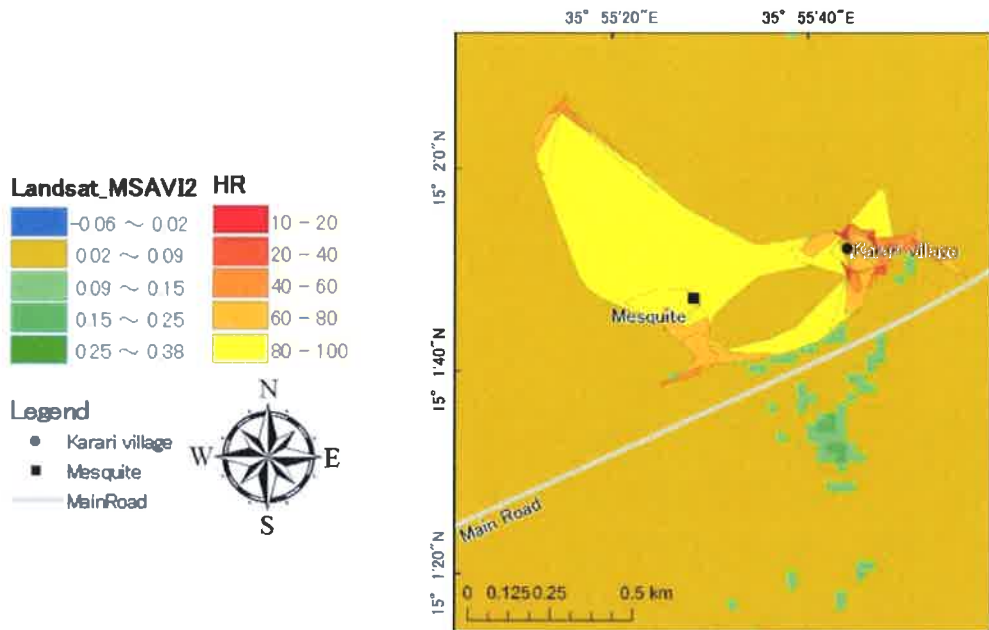


Fig.54 Result of Sheep home range using LoCoH model

in Dec. 6

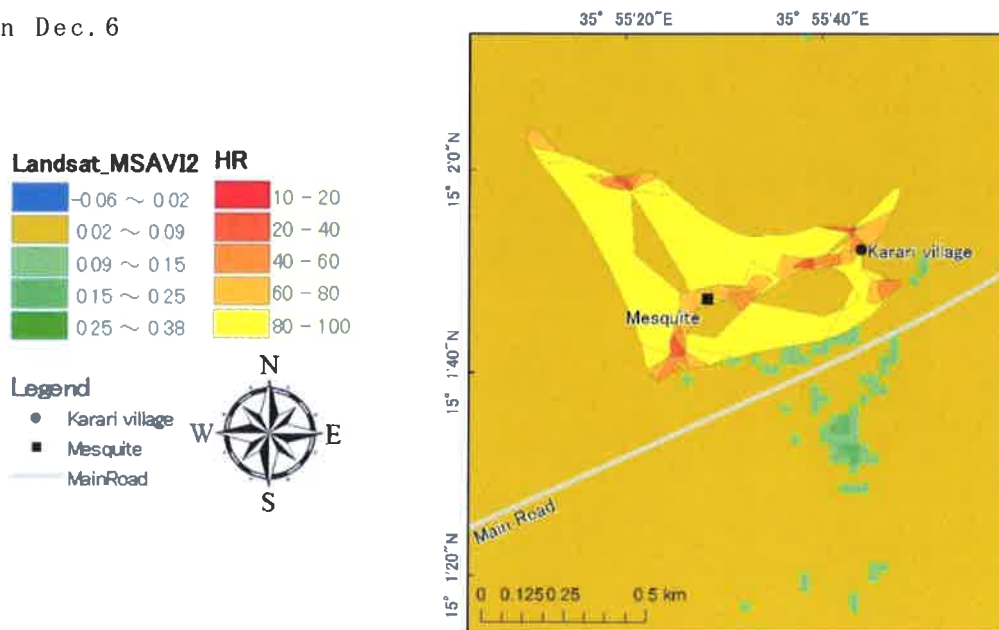


Fig.55 Result of Sheep home range using LoCoH model

in Dec. 7

Table.13 MSAVI2 Max of Sheep home range

Sheep	MSAVI2_Max
Dec.5,2013	0.10
Dec.6,2013	0.11
Dec.7,2013	0.11

ヤギと同じ放牧地で放牧されており、在来種であるアカシアや草本がわずかに生えていた。その為、土壌が大きく影響する結果となった。また、滞在時間が長い場所には在来種であるアカシアが存在していることを Google Earth より確認した (Fig. 53~55, Table. 13)。

3.2.4 遊牧民への聞き取り

家畜のトラッキングデータの取得に協力をしていただいた、牧夫へ聞き取り調査を行った。

Table.14 Interview to the herdsman

1.村名	Karari village
2.牧夫名	Mr. Mohamed gibril abdalla
3.家畜頭数	ラクダ19 ヒツジ30 ヤギ10 ロバ5
4.主な仕事・収入源	雨季は農業（綿・落花生・ソルガム） 乾季は家畜の放牧
5.メスキートの良い点	フェンス・屋根材・壁材に活用できること
6.メスキートの悪い点	家畜が種子を食べて下痢をし、顎の調子が悪くなりよだれをたらす。ロバが足を怪我することで水を運べなくなる。最悪の場合は死に至る。
7.メスキートの印象	メスキート導入前は在来種であるキリストイバラの実を収穫して売っていたがメスキートの侵入によって枯れ、実を収穫できなくなってしまった。メスキートの全てが悪いわけではないと思っている。

メスキートに対する良い印象・悪い印象について聞き取りを行った (Table.14)。良い点としては、フェンス・屋根材・壁材に使えるという回答が得られた。他の家族で実際に放牧させた後の家畜を、メスキートで作ったフェンスで囲いをし、家畜を飼養している様子も確認された。一方、悪い点としては、家畜に対する悪影響について多くの回答が得られた。下痢をしたり、顎の調子が悪くなったりであった。さらに、水の運搬をする為の大きな役割を担っているロバがメスキートのトゲで足を怪我し、役割を果たせないことや、最悪の場合は死に至るとの回答が得られた。また、在来種であるキリストイバラ (*Ziziphus spina-christi*) の実を収穫し、売っていたがメスキートの侵入で木が枯れてしまったと話してくれた

(Fig. 56, 57)。最後にメスキートに対して良い面・悪い面を踏まえた上で、印象を聞いたところメリットもあり、デメリットもある。その為、メスキートの全てが悪いとは言えず複雑な心境であると答えた。



Fig. 56 *Ziziphus spina-christi*



Fig. 57 *Ziziphus spina-christi* covered by Mesquite

3.2.5 高台に生えるメスキート

高台に生えるメスキートのポイントを10カ所確認した。取得したポイントデータを ASTER GDEM 画像に重ね、ポイントの値を抽出した (Fig. 58, Table. 15)。

Table.15 Altitude of points

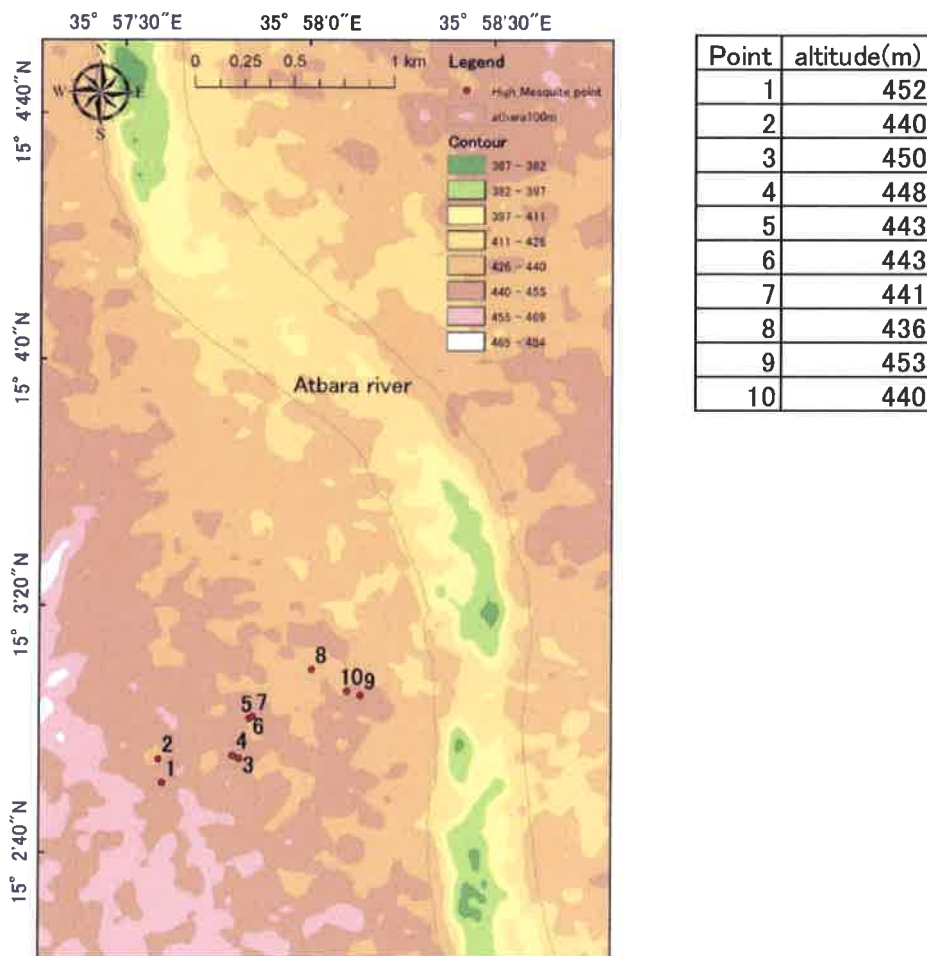


Fig. 58 10 single Mesquite trees on hill

ASTER GDEM の標高データにポイントを重ね、3D で表現した。

このデータから、対象地は凹凸がとても激しいことが見て取れる
(Fig. 59)。

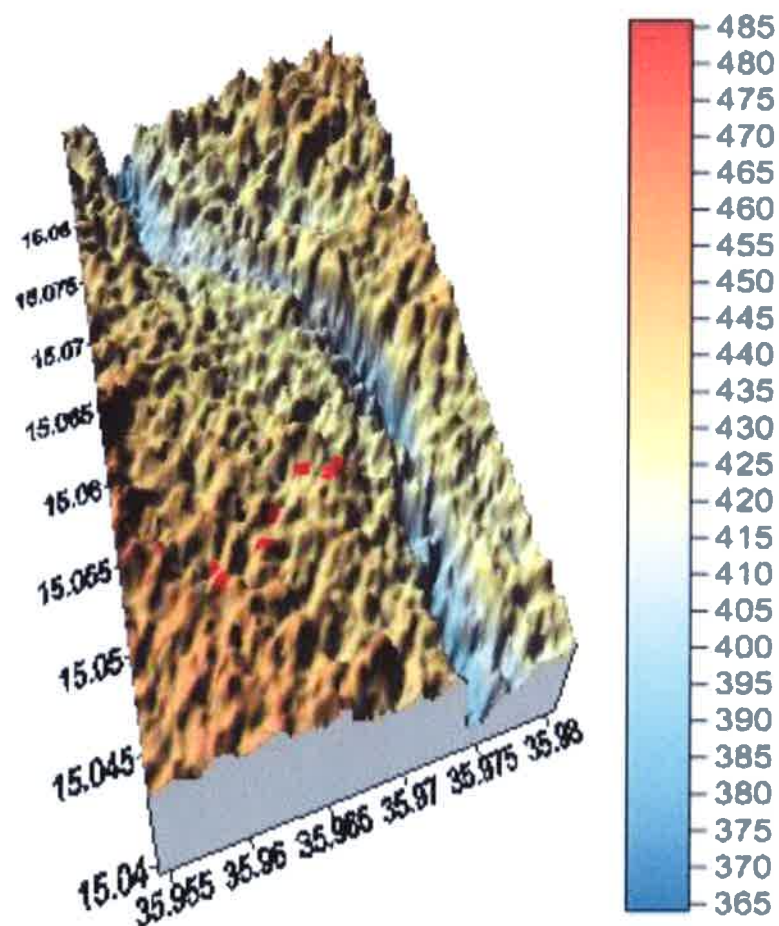


Fig. 59 ASTER GDEM 3D model of 10 points

取得した高台に生える 10 カ所のメスキート (Fig. 60～69)。



Fig. 60 Mesquite tree on hill plot 1



Fig. 61 Mesquite tree on hill plot 2



Fig. 62 Mesquite tree on hill plot 3



Fig. 63 Mesquite tree on hill plot 4



Fig.64 Mesquite tree on hill plot 5



Fig.65 Mesquite tree on hill plot 6



Fig.66 Mesquite tree on hill plot 7



Fig.67 Mesquite tree on hill plot 8



Fig.68 Mesquite tree on hill plot 9



Fig.69 Mesquite tree on hill plot 10

高台に生えるメスキートのポイントを取得している際に、高台に登り採食しているヤギを確認した。また、その高台においてメスキートの種子を含んだ家畜の糞を確認した (Fig. 70～73)。



Fig. 70 Grazing the sheep on hill



Fig. 71 Droppings of livestock on plot 6



Fig.72 Mesquite pods & droppings included seeds



Fig.73 Droppings included seeds

第4章 まとめ

メスキートはスーダンの極乾環境において蒸発散を抑えながら高い光合成活性を維持し、適応して生きている。

この生存戦略を兼ね備え 1986 年から 2005 年までメスキートの分布面積が 12.4 倍に拡大し、特に河川の内側に密生している。

また、2000 年から 2012 年にかけて降雨に対するメスキート活性の応答では「4月の降雨開始より 2 から 3 ヶ月後にメスキート活性が上がる」「8月の降雨ピークより 5 から 7 ヶ月後にメスキート活性が下がる」ということが明らかとなり、メスキートは降雨によって季節変動を繰り返していることが分かった。この結果は、地下水も大きく関係していることが示唆された。先行研究ではメスキートの除去は河川の内側から行うことが効率的であるとされており、本研究結果より得た、メスキート活性が最も低い雨季開始直前の 4 月頃に除去作業を行うことが、より効率的であると追加して提案したい。

現地調査よりアトバラ川流域にて飼養されている家畜が水場を求めてメスキートの密生地域にアクセスしていることが明らかになり、そこで家畜がメスキートの種子を採食している可能性が高い。また、高台で採食をしているヤギを確認し、その場所で落とされた糞にメスキートの種子が含まれていた。同時に高台に生えるメスキートの

ポイントを10カ所取得することもできた。さらに河川より離れた内陸においても一株のメスキートを確認した。このようにして、河川水による種子拡散だけではなく、家畜を媒体としたメカニズムで高台や、河川より離れた内陸にまで種子が拡散していると言える。

将来的に様々な生存戦略を兼ね備えているメスキートの分布が拡大を続けると、在来種の生存を脅かし、多様性が失われ、さらには家畜への悪影響も懸念される。これらは、かねてより家畜を生業の大部分として伝統的な生活を営んできた現地の人々にとって、その生活を続けることが困難となる可能性さえもある。メスキートの導入によってもたらされたメリットを最大限に活かし、リスクに対しては正しく評価をし、場合によってはコントロールをして有効的な利用をしていなければ、負のスパイラルを止めることはできない。この問題に対してスーダン政府はメスキートの除去政策を実施し、現地調査では草の根レベルではあるが、現地住民によって河川沿いに生えるメスキートの除去を行い、バナナや唐辛子といった農作物を植えている様子を観察することができた。この様子からメスキートとの共存を目指しているスーダンの姿をうかがうことが出来た。

謝辞

本研究は総合地球環境学研究所プロジェクト：アラブ社会におけるなりわい生態系の研究—ポスト石油時代に向けて（代表：縄田浩志・秋田大学・教授）

科学研究費・基盤研究（B）No.23404014（乾燥環境下における外来植種の排他的侵入特性と地下水文系のヘテロ性との関連）（代表：安田裕・鳥取大学・准教授）

一般社団法人協力隊を育てる会（公益財団法人三菱UFJ国際財団の助成）帰国隊員/青年支援プロジェクトの研究助成で行われたものである。

論文作成におきまして、終始多大なご指導ならびに助言をいただきました指導教官である星野弘方教授、鳥取大学乾燥地研究センター：安田裕准教授、さらに現地調査を実施するにあたり、秋田大学国際資源学部：縄田浩志教授、石巻専修大学理工学部生物科学科：依田清胤教授、酪農学園大学農食環境学群環境共生学類：宮木雅美教授、スーダン科学技術大学：Abdelaziz Karamalla 教授，Mahgoub Suliman 教授，Mohamed Elgamri 教授、また、様々な場面でご協力を賜りました環境リモートセンシング研究室：出村雄太様、祖父江侑紀様をはじめ同研究室の皆様にご心より感謝申し上げます。

参考文献

1. Abdel Bari, E. 1986. The Identity of the common mesquite, (Prosopis spp.), Prosopis project Pamphlet No1: 20.
2. Abdel Garbar, A. E. I. 1988. "Prosopis chilensis In Sudan: Non Conventional Animal Feed Resources" ., The Current State of Knowledge of Prosopis juliflora: 371-377.
3. Babiker, A. G. T. 2006. "Mesquite (Prosopis spp.) in Sudan: history, distribution and control" ., Problems posed by the introduction of Prosopis spp. In selected countries: 11-20.
4. Burkart, A. 1976. "A monograph of the genus Prosopis (Leguminosae subfam. Mimosoideae) (Part1 and 2)" . Journal of the Arnold Arboretum., 57: 219-249, 450-525.
5. Broun, A. F., and R.E.Massey. 1929. Flora of the Sudan. Thomas Murby and Co.. London.
6. Elfadl, M. A., and O. Luukkanen. 2003. "Effects of pruning on Prosopis juliflora: Considerations for tropical dryland agroforestry" . Journal of Arid Environments., 53(4): 441-445.
7. El houri, A. A. 1986. " Some aspects of dryland afforestation in the Sudan with special reference to Acacia tortilis

- (Forsk) Hayne, *Acacia seyal* Willd. And *Prosopis chilensis* (Molina) stunz” . *Forest Ecology and Management.*, 16 (1-4):209-221.
8. Elsidig, N.A., A. H. Abdelsalam, and T. D. Abdelmagid. 1998. Socio-Economic, Environmental and Management Aspects of Mesquite in Kassala State (Sudan) Sudanese social Forestry Society: 96.
 9. Fagg, C. W., and J. l. Stewart. 1994. “The value of *Acacia* and *Prosopis* in arid and semiarid environments” . *Journal of Arid Environment.*, 27(1): 3-25.
 10. FAO. 2005. Procedure for weed risk assessment: 1-20
 11. Getz, W. M. and Wilmers, C. C. 2004. A local nearest-neighbor convex-hull construction of home ranges and utilization distributions. *Ecography.*, 27: 489-505.
 12. Habit, M. A., and j. C. Saavedra (eds.). 1988. The Current State of Knowledge of *Prosopis juliflora*, Rome. FAO.
 13. Harris, P. J. C., N. M. Pasiecznik, M. Bradbury, and L. Ramirez. 1988. “Problems and Potential of *Prosopis* in Drylands” , In N. L. Etkin, D.R. Harris, H. D. V. Prendergast, and P. j. Houghton (eds.). *Plants for Food and medicine: Proceedings*

of the Joint Conference of the Society for Economic Botany and International Society for Ethnopharmacology 1-6 July 1996, Kew, The Royal Botanic Gardens, : 277-293.

14. Hoshino, B., A. Karamalla, M. A. M Abd Elbasit, K. Manayeva, K. Yoda, M. Suliman, M. Elgamri, H. Nawata, and H. Yasuda. 2012. "Evaluating the Invasive Strategic of Mesquite (*Prosopis juliflora*) in Eastern Sudan Using Remotely Sensed Technique" . *Journal of Arid Land studies.*, 22(1): 1-4.
15. Hoshino, B., M. Yonemori, K. Manayeva, A. Karamalla, K. Yoda, M. Suliman, M. Elgamri, H. Nawata, Y. Mori, S. Yabuki, and S. Aida. 2011. "Remote sensing methods for the evaluation of the mesquite tree (*Prosopis juliflora*) environmental adaptation to semi-arid Africa" . *IEEE IGRASS 2011.*, (1): 1910-1913.
16. Huete, A. R. 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sens. Environ.*, 25:295-309.
17. Jenkins, M.B., R.A. Virginia, and W.M. Jarrell .1987. "Rhizobial ecology of the woody legume mesquite (*Prosopis glandulosa*) in the sonoran Desert" . *Applied and Environmental Microbiology.*, 53 (1):36-40.

18. Martin, C. 1948. " Mesquite seeds remain viable after 44 years" . Ecology., 29(3):393.
19. Misri, J., V. S. Vihan, and A. kumar. 2003. "Toxicity studies on Prosopis juliflora in goats: Haematobiochemical and pathological profile" . Indian Journal of Animal Sciences., 73(4):349-352.
20. Moll, E. J., and A. A. Gubb. 1989. "Southern African Shrublands" . In C. M. Mckell(ed.). The Biology and Utilization of Shrubs, 145-175. San Diego. Academic Press.
21. Pathre, U., A.K. Sinha, P.A. Shirke, and P.V Sane. 1998. "Factors determining the midday depression of photosynthesis in trees under monsoon climate" ., Trees 12(8): 472-481.
22. Pasiiecznik, N. M. 2001. The Prosopis juliflora - Prosopis Pallida Complex: A monograph, Coventry, 1-44. UK. HDRA.
23. Pasiiecznik, N.M., P. J.C. Harris, and S. J. Smith. 2003. Identifying Tropical Prosopis Species: A Field Guide, Coventry, 1-27. UK. HDRA.
24. Qi J., Chehbouni A., Huete A.R., Kerr Y.H., 1994. Modified Soil Adjusted Vegetation Index (MSAVI). Remote Sens

- Environ., 48:119-126.
25. SWITCH. 2006. Battle with Mesquite, Khartoum, SWITCH. [in Arabic]
26. Tabosa, I. M., J. C. Souza, D. L. Graca, J. M. Barbosa-Filho, R. N. Almeida, and F. Riet-Correa. 2000. "Neuronal vacuolation of the trigeminal nuclei in goats caused by ingestion of *Prosopis juliflora* pods (mesquite beans)". *Veterinary and Human Toxicology.*, 42(3): 155-8.
27. Tabosa, I. M., F. Riet-Correa, S. S. Barros, B. A. Summers, S. V. D. Simões, R. M. T. Medeiros, and V. M. T. Nobre. 2006. "Neurohistologic and ultrastructural lesions in cattle experimentally intoxicated with the plant *Prosopis juliflora*". *Veterinary Pathology.*, 43(5):695-701.
28. Yoda, k., m. Abd Elbasit, B. Hoshino, H. Nawata, and H. Yasuda. 2012. "Root system development of *Prosopis* seedling under different soil moisture conditions". *Journal of Arid Land Studies.*, 22(1):13-16.
29. 柴田 柚香. 2013. スーダンにおける外来植物メスキート (*Prosopis juliflora*) の分布拡大と家畜のホームレンジとの関係. 酪農学園大学卒業論文: 10-12.

30. 藤井義晴. 2000. アレロパシー他感物質の作用と利用. 1-230.
農山漁村文化協会. 東京.
31. 縄田浩志. 2009. 技術移転・開発政策の見直しと伝統的知識の
応用. 225. 日本沙漠学会「沙漠の事典」. 丸善株式会社. 東
京.
32. 安田裕・ムハンマド アブドゥルバーシト・ムハンマドアフマド.
2013. アラブのなりわい生態系 4. 外来植物メスキート第 4 章.
116-117. 臨川書店. 京都.
33. 矢吹俊輔・星野仏方・依田清胤・縄田浩志・安田裕・Karamalla
ABDELAZIZ・相田樹人・森悠祐. 2012. スーダンの外来植物メ
スキート (*Prosopis juliflora*) の河川による分布の拡大. 酪
農学園大学紀要、第 37 巻第 1 号: 71-77.
34. 依田清胤・辻渉・齊藤忠臣・Elbasit M. A.・井上知恵・安田裕.
2012. マメ科低木メスキート実生の発芽・成長過程に対する浸
透圧と温度の影響評価. 鳥取大学乾燥地研究センター平成 24
年共同発表会講演要旨集、76-77.

Abstract

【Objectives】 Mesquite (*Prosopis juliflora*) is a shrub or small tree in the Fabaceae family. It is native to South America. Mesquite was introduced into Kassala state, eastern Sudan by the Food and Agriculture Organization (FAO), an international organization, for the plant's high usability as a stabilization of sand dyne, feed for livestock, and building material. However Mesquite has invaded beyond the place where it is managed artificially. Mesquite adapts to arid and semi-arid land through various living strategy, with there is hardly any precipitation in dry season. Mesquite expands to other areas through river water. Additionally it is suggested that expansion of Mesquite to other areas by livestock. Based on these situations, there are two objectives in this study.

1. To clarify the difference of Mesquite vegetation activity between rainy season and dry season;
2. To clarify Mesquite without effect of river water on hill, and the place far from the river that was expanded by livestock.

【Methods】 The study site is Atbara river basin between Kassala state and Al Qadarif state in eastern Sudan. ($15^{\circ} 3' 37.40''N$, $35^{\circ} 58' 3.15''E$) and we calculate vegetation activity by MSAVI2(The modified soil-adjusted vegetation index) from the two satellite images. The one is LANDSAT image from 1986 to 2014 for analyzing area of Mesquite. The other one is Terra MODIS image from 2000 to 2012 for analyzing response of Mesquite to precipitation. We carried out the field investigation in December 2013. In the field we measured stomatal conductance and spectral feature of Mesquite and trees of original species for comparing difference between them. We collected satellite tracking data of livestock for analyzing home range by LoCoH model. Also stocking of the livestock and interview with the herdsman regarding impression of Mesquite. Finally we collected and analyzed 10 points of Mesquite on hill by ASTER GDEM 30m elevation data.

【Result】 The Mesquite adapted to arid and semi-arid land by inhibiting stomatal conductance and maintaining high vegetation activity. The area of Mesquite expanded 12.4 times from 1986 to 2005 and grow thick at inside of the curve of river. From 2005 to 2014, the area of Mesquite decreased. This is because of the Mesquite removal policy by Sudanese government started in June 2006. We also confirmed that local people in Kassala removed Mesquite. Response of Mesquite activity by precipitation from 2000 to 2012, before precipitation peak is a positive correlation of time lag 2 months with a significance level of 1%. On the other hand after precipitation peak is positive correlation of time lag 6 months with a significance level of 1%. From this result, Mesquite is repeated seasonal variation. According to the result of the LoCoH model of livestock, they accessed to the Atbara river and stayed long. There is a possibility that the livestock graze Mesquite seeds. We confirmed that livestock graze on hill and their droppings included Mesquite seeds. Moreover there were 10 Mesquite points on hill. This is a mechanism of Mesquite expansion by livestock.