

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

矢 吹 俊 輔¹⁾・星 野 仏 方²⁾・依 田 清 胤³⁾
安 田 裕⁴⁾・縄 田 浩 志⁵⁾・Karamalla ABDELAZIZ⁶⁾
相 田 樹 人⁷⁾・森 悠 祐⁷⁾

Extraction of the alien species of Mesquite (*Prosopis juliflora*) expanding distribution
by rivers and wadi in Eastern Sudan

Shunsuke YABUKI¹⁾, Buho HOSHINO²⁾, Kiyotsugu YODA³⁾,
Hiroshi YASUDA⁴⁾, Hiroshi NAWATA⁵⁾, Karamalla ABDELAZIZ⁶⁾,
Shigeto AIDA⁷⁾ and Yusuke MORI⁷⁾
(Accepted 20 July 2012)

1. はじめに

サハラ砂漠周辺では自然的要因（気候変動）と人為的要因（過放牧、人口増加など）による土地の砂漠化と砂漠化地域の拡大が、自然生態と人間の生業を脅かす存在となっている。砂漠化拡大防止のために南アフリカでは1880年、またエジプトでは1890年に中南米から乾燥に強く、家畜の飼料や燃料になり、砂丘の固定につながる植物としてメスキート (*Prosopis juliflora*) が導入され、メスキートの植林による砂漠化防止、乾燥地の緑化に成功した。これをきっかけに国際連合食糧農業機関 (FAO) の主導でスーダンでは1917年にエジプトと南アフリカから首都のハルツーム辺りにメスキートが導入された。1978年にはさらエジプトからスーダン北部・東部の乾燥・半乾燥地域に大量に導入された¹⁾。図1で

はメスキートの原産地域と導入地域を示した。しかし、メスキートの旺盛な繁殖力と高い耐乾燥性などにより、導入された地域ではその分布が拡大し、現在スーダンではコントロールが効かない状況である。メスキートは主に河川を媒体に種子散布をして、一年を通して開花、繁殖できるし、優れた土壌水分をセンサス能力によって、水が流れ続ける河川（主要河川）と時期的に流れる季節の河川（ワジ）、及び家畜などの糞によって、道路や農地を含む管理された生活環境に侵入する。メスキートに侵略された土壌ではメスキートの効率的な土壌水分吸収システム（横と縦の根系）によって、ほかの植物が水分を奪われ表土が衰退する等の環境問題が起こっている。メスキートは常緑のマメ科の低木または樹木であり、速やかな成長と旺盛な繁殖力を持ち、新梢形成（新葉展開）と花序・豆果の発達を同時発達させる。1

-
- ¹⁾ 2011年度酪農学園大学環境システム学部生命環境学科卒業生（現、株式会社安井測量設計事務所）
Environmental Remote Sensing Laboratory, Department of Biosphere and Environmental Sciences Rakuno Gakuen University, Ebetsu, Hokkaido, 069-8501, Japan
- ²⁾ 酪農学園大学農食環境学群環境共生学類環境リモートセンシング研究室
Environmental Remote Sensing Laboratory, Department of Environmental and Symbiotic Sciences, College of Agriculture, Food and Environmental Sciences, Rakuno Gakuen University, Ebetsu, Hokkaido, 069-8501, Japan
- ³⁾ 石巻専修大学理工学部基礎理学科
Department of Basic Sciences, Faculty of Science and Engineering, Ishinomaki Senshu University, Shinmito Minamisakai Ishinomaki-shi, Miyagi 986-8580, Japan
- ⁴⁾ 鳥取大学乾燥地研究センター
The National University Corporation Arid Land Research Center, Tottori University, 1390 Hamasaka, Tottori 680-0001, Japan
- ⁵⁾ 総合地球環境学研究所
Research Institute for Humanity and Nature, 457-4 Motoyama, Kamigamo, Kita-ku, Kyoto 603-8047, Japan
- ⁶⁾ スーダン科学技術大学
College of Forestry and Rangeland Science, Sudan University of Science and Technology, P.O. Box 407, Khartoum 11113, Sudan
- ⁷⁾ 2011年度酪農学園大学環境システム学部生命環境学科卒業生
Environmental Remote Sensing Laboratory, Department of Biosphere and Environmental Sciences Rakuno Gakuen University, Ebetsu, Hokkaido, 069-8501, Japan

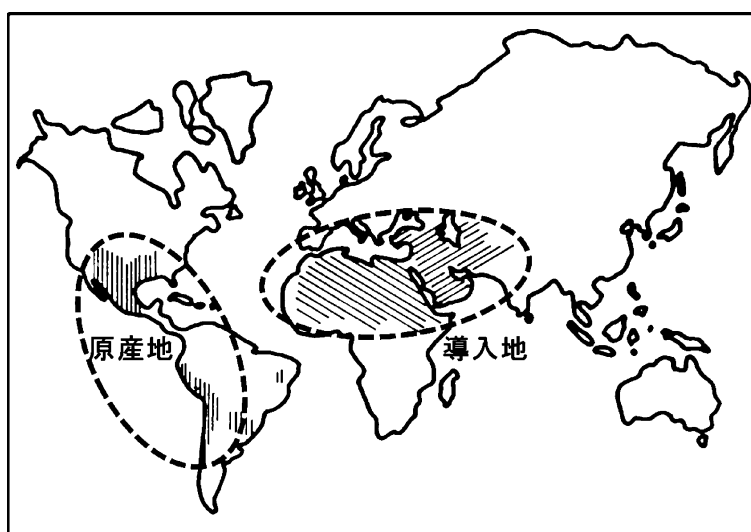


図 1. メスキートの原産地と導入地域の概要

年を通して開花・結実するし、根は土壌水分の変化によって、降水時には側根、乾燥時には縦の垂直根を成長させて、地下水面まで到達し、土壌水分と地下水を吸い上げる。在来の植物が比較にならないぐらいの優れた耐乾性を持っている。そして、メスキートの根は強いアレロパシーを持つため、身の回りのほかの植物を後退させる。メスキートの種子は、乾燥に対する残留性が強い種子であるため、家畜や流水系を通じた種子の長距離散布が可能であり、水に濡れることで発芽が促進されるため、河川周辺の土壌に大量に形成される。

以上を踏まえ、本研究はリモートセンシングの変化の抽出手法 (change detection method) を用いて、スーダン東部アトバラ流域を対象に、河川によるメスキートの分布と拡大を評価するために、衛星画像から広域におけるメスキートの分布域を特定し、約 30 年間の分布の拡大を定量化し、地方政府が現在行われているメスキートの駆除活動に科学的基礎データを提供することを目的とした。

2. 研究方法

2.1 研究対象地

調査と研究の対象地はスーダン共和国東部の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の中心座標が N 15.02, E 35.57 に位置する約 6,400 m × 8,300 m の範囲である。現地における毎木調査は図 2 で示した P 1, P 2 と P 3 の 3 地点を中心に行った。

2.2 現地調査と計測

現地調査は 2009 年～2011 年に行われ、2010 年の調査では (30 × 30 m) の区画で樹種の同定、リーフポロメーターによる蒸発散量の測定、及び分光放射計による光合成活性を測定した。また 2011 年の調査では TDR による土壌水分含有量を河川 (アトバラ川主流) から 100 m 以内で 6 カ所、100 m～200 m で 5 カ所、200 m～500 m で 8 カ所、500 m～1,000 m で 6 カ所の地点で測定した。

2.3 使用した衛星データ

使用した衛星データは Table 1 に示したとおりである。Table 1 に示したように、LANDSAT TM5 は地上分解能が 30 m であり、MSS は地上分解能が 60 m である。TM5 バンドの分布は可視光域～近赤外～中間赤外～熱赤外までカバーし 7 つのスペクトルバンドを持っているに対して、MSS は可視光域～近赤外の 4 つのスペクトルバンドを持っている。そのほかに高解像度衛星画像として Google Earth 上の GeoEye 社製の GeoEye-1 (2009 年 2 月 22 日撮影) を参考して毎木調査を行った。1 m 解像度を持つ Geo Eye の衛星画像からメスキートを目視判別し、葉の色の違いを利用して他の植物との判別を行い、研究対象地のメスキートの詳細分布図を作成した。

2.4 データ解析

1985 年、1994 年、1999 年、2009 年、及び 2011 年の LANDSAT の MSS と TM5 の衛星データに大気補正、幾何補正を行い、研究対象地の正規植生指数 (NDVI) を計算した。正規化植生指数 (Normal-

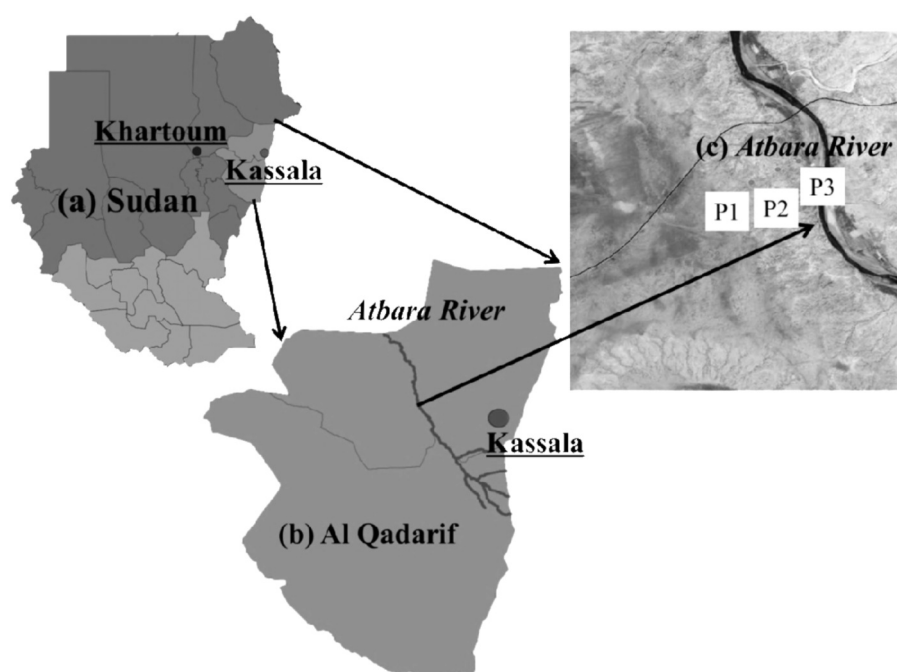


図 2. 研究対象地の概要（但し、(a) はスーダン全体（南スーダンを含む）；(b) はカッサラ地域（カッサラ州、カダーレフ州）；(c) はアトバラ川の現地調査地点である）。

Table 1 使用した衛星画像データ

日付	衛星画像
1985 年 12 月 9 日	LANDSAT MSS
1985 年 12 月 9 日	LAMDSAT TM5
1994 年 12 月 2 日	LANDSAT TM5
1999 年 1 月 30 日	LANDSAT TM5
2009 年 11 月 9 日	LANDSAT TM5
2011 年 1 月 15 日	LANDSAT TM5

ized Difference Vegetation Index, NDVI) とは、リモートセンシングのマルチバンドのデータから求められる植生の光合成の活性を示す指標で、下記の式(1)で求められる。IR は近赤外バンドの反射率、R は可視光域の赤バンドの反射率である。IR 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 $0.64 \sim 0.67 \mu\text{m}$ 付近の強い吸収帯に対応している。このため、画素に対応する地表上で植物の葉が多い程 NDVI の値が高くなる。

$$\text{NDVI} = (\text{IR} - \text{R}) / (\text{IR} + \text{R}) \quad (1)$$

また砂漠地域では植物は稀にしか分布していないから NDVI に植物の背景となる土壌の強い反射の影響を配慮した植生指数である SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index) と呼ばれる植生指数が提案されており²⁾、下記の式(2)で計算される。

$$\text{SAVI} = (\text{IR} - \text{R}) / (\text{IR} + \text{R} + \text{L}) * (1 + \text{L}) \quad (2)$$

ここで、L は、土壌の反射を調整するパラメーターであり、植生の被覆率が非常に高い場合は 0、植生の被覆率が非常に低い場合は 1、植生の被覆率が適当である場合は 0.5 を取る。本研究では 4 分の 1 ほど植生が入っている場所であるため、L を 0.25 と定義した。

現地調査のデータを参考に、メスキートの分布を NDVI 値が 0.3 以上の地域を高密度域とし、NDVI 値が 0.2~0.3 の地域を中密度域、NDVI 値が 0.1~0.2 の地域を低密度域、NDVI 値が 0.0~0.1 の地域が裸地とし、また NDVI 値がマイナスな河川などを水域と定義する。

時系列衛星データを用いて 1985 年、1994 年、1999 年、2009 年、及び 2011 年の衛星データからメスキートの分布の拡大を抽出する。その手法はメスキートがほかの植物より高い NDVI 値を示す特性を利用し、時系列の NDVI のマップを作成し、三原色の RGB カラー合成画像の原理を生かして、R (赤) に過去のデータ、G (緑) に最近のデータ、また B (青) には R と全く同じ過去のデータを入れる。すると合成結果は必ず図 3 に示した 4 つの色(紫色(赤+青)、緑色、白と黒色)しか現れない。

ここで、紫色はネガティブ的な変化を示し、植物の減少地域を示す；緑色はポジティブ的な変化を示し、メスキートなどの拡大地域を示す；白は変化なし地域を示して、黒は水域を示す。

また、メスキートが主要河川と季節的に流れるワジでどこまで分布を拡大しているかを定量化するために、GISの手法を用いて、河川、ワジ周辺でバッファを作成した。高解像度のGeo Eyeの衛星画像を使用し、河川とワジにそれぞれ作成したポリゴン(多边形)とポリライン(曲線または直線)から、河川周辺には100 m, 200 m, 500 m, 及び1,000 mのバッファ、ワジ周辺には10 m, 20 m, 30 m, 40 m, 50 m, 及び60 mのバッファを作成し、衛星データからバッファ毎にメスキートの分布を算出し、河川とワジ周辺のメスキートの空間的広がりを評価した。

3. 結 果

3.1 メスキートの拡大傾向

時系列衛星データの解析から得られたメスキートの拡大傾向は図4で示した。図4に示したように、メスキートは1985年から1994年にかけて河川周辺

で主に分布を拡大し、1994年から1999年にかけてはさらに河川周辺で高密度域が現れ、ワジ周辺へも侵入し、分布の拡大が見られた。しかし、1999年から2009年にかけてメスキートは河川やワジ周辺で減少傾向を示した。2009年から2011年にかけてはワジ周辺のメスキートの中密度域が減少し、河川周辺ではメスキートの高密度域の増加が見られた。これは2006年頃現地政府が実施したメスキート撲滅計画と深い関係あることが後の現地における聞き取り調査で明らかになった。そして、どの年代もメスキートの分布が河川のカーブの内側に密集しているという特徴が見られた。このことから、マメ科の常緑樹であるメスキートの種子は水の流れが緩やかな河川のカーブで発芽しやすいことが明らかになった。

メスキートの主要河川及びワジにおける分布の拡大は図5(a, b, c, d)で示した。図5(a)のグラフから、河川周辺におけるメスキート分布の高密度地域はどの年代でも河川からの距離が500 m以内の範囲だけで面積の増加が見られ、河川から500 m以上離れた場所では変化がほとんど見られなかった。

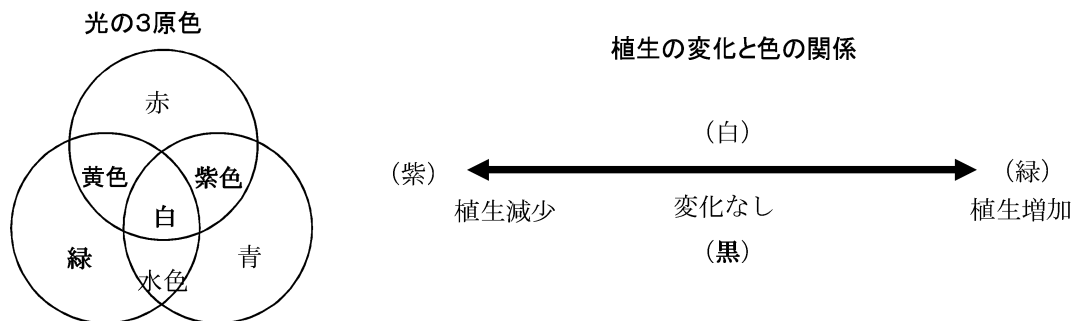


図3. 光の三原色を生かした変化の抽出手法（ここで、(黄色+紫色+水色)は黒になる）

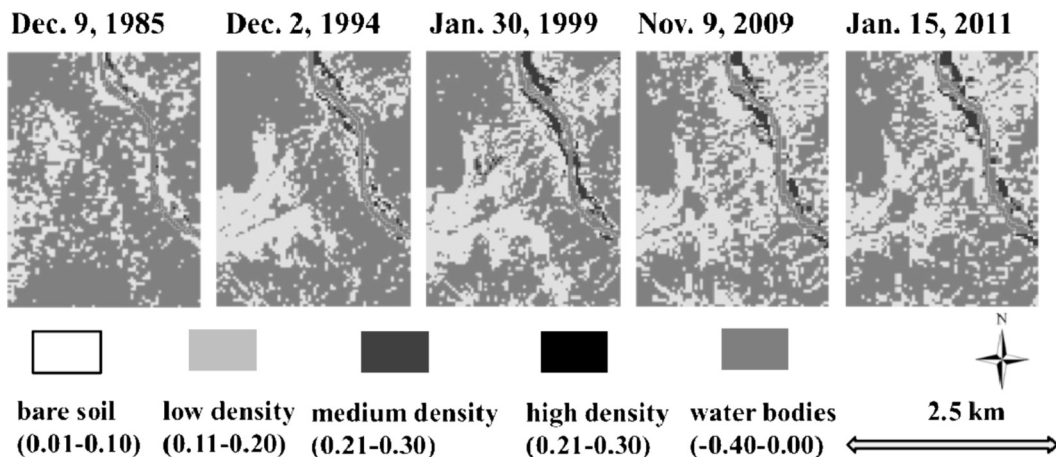


図4. メスキート分布密度の経年変化

た。そして、1985 年では河川から 200 m 以内では他の年代と同じような増加が見られたが、200 m から 500 m の間では少しだけの増加しか見られなかった。これはメスキートの河川による種子散布範囲は 500 m 以内であり、最も分布の拡大する範囲は河川から 100 m 範囲であることが明らかとなった。ここでメスキートの分布の拡大は 1999 年でピークに達し、その後減少傾向に陥ったことがはっきり現れた。また図 5 (b) のグラフから、河川から離れるほどメスキートの分布面積が減少し、200 m と 500 m の間にはもう一つの小さなピークが現れた。これは主要河川から 200–500 m 範囲内のワジの密度による影響、及び家畜等による種子散布の影響が考えられる。

図 5 (c) と図 5 (d) ではワジ周辺のメスキートの経年変化と拡大範囲を示した。図 5 (c) のグラフから、1985 年ではメスキート分布高密度域が見られなかったが、1985 年を除き他のどの年代でも 20 m 範

囲内でメスキートの増加が見られた。また図 5 (d) では、ワジ周辺でもワジから離れるにつれてメスキートの分布が減少傾向を示した。これは主要河川と同じ傾向を示しているが、拡大範囲はほぼ 50 m 範囲内であることが明らかとなった。

図 5 (c) と図 5 (d) を比べると、図 5 (c) ではメスキート高密度域が 20 m 範囲内で増加が見られ、図 5 (d) ではメスキートが 10 m 範囲内に多く分布していた。これは、図 5 (c) は解像度 60 m の衛星画像、図 5 (d) は解像度 30 m の衛星画像の解像度の異なる 2 つの衛星画像を使用したためである。

3.2 メスキート拡大域における土壌水分含有量

スーダン東部の河川より遠い離れた平野、あるいは砂丘ではメスキート密生地域において表面土壌（深度 0–12 cm）の乾燥化が顕著であると報告されている³⁾。但しアトバラ川より近いところではそれ

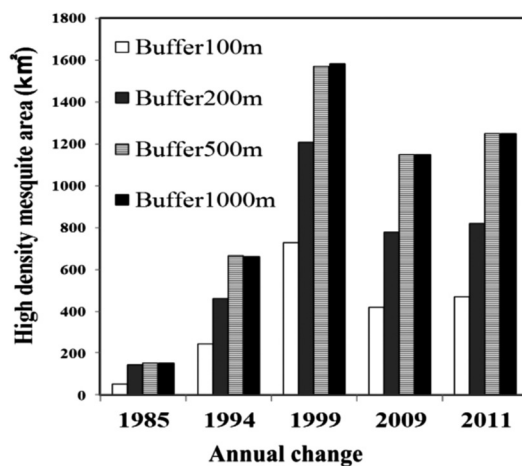


図 5(a). アトバラ川周辺におけるバッファ毎のメスキート高密度地域面積の経年変化

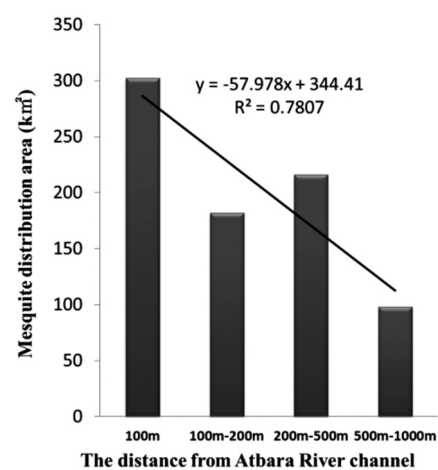


図 5(b). アトバラ川周辺のバッファ毎のメスキートの分布面積 (2009 年当時)

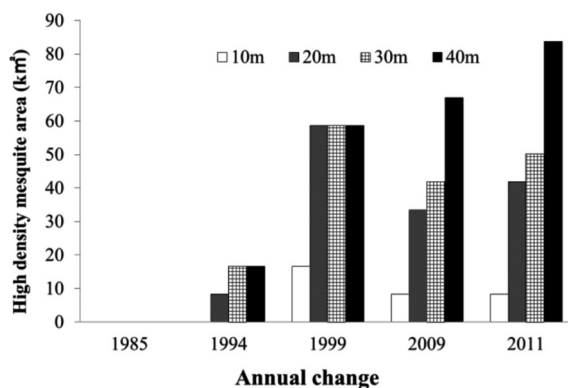


図 5(c). ワジ周辺のバッファ毎のメスキート高密度地域面積の経年変化

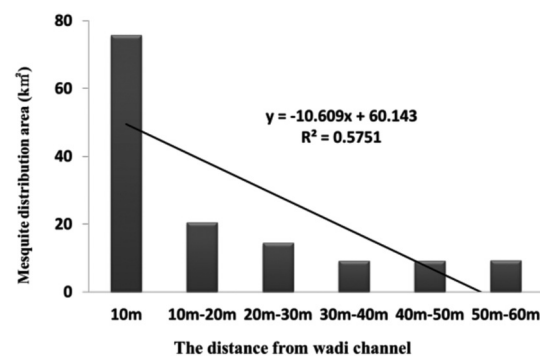


図 5(d). ワジ周辺のバッファ毎のメスキートの分布面積 (2009 年当時)

と異なる結果を得られた。図 6 (a, b) は TDR 土壌水分計 (©Hydrosense 社) を用いた河川とワジ周辺の土壌水分含有量の計測結果である。図 6 (a) から分かるように、河川から 500 m 以内地域では河川に近づくほど土壌水分が増加し、500 m 以外地域では河川から離れるほど土壌水分の変化が少ないという結果を得られた。これは恐らく河川水により地下水位の影響であると考えられる。河川より近い域ではメスキートが密生しているが、メスキートは発達した地下根系を使って深層水あるいは地下水を吸い上げていていると考えられる。また図 6 (a) のグラフでは、ワジ周辺の 10 m 地点で最も土壌水分量が低く、10 m から 20 m の間で最も高い値を示したことが分かる。これは、調査した地点はちょうどワジのドライチャンネル内であり、ワジのチャンネルの裸地の影響と考えられる。それは乾季に調査したため、ワジには水がなく乾燥しており、裸地の状態であったため、蒸発散によって表土の土壌水分が低かったと考えられる。ワジから 10–20 m の範囲では、植生が密生しており、植生密生地域では蒸発散をある程度抑える効果もあり、また植物の根系によって吸い上げられた水分の影響で高い値を示したと考えられる。

マイクロ波衛星の後方散乱係数を用いて広域における土壌水分の推定は可能である³⁾。本研究は日本の人工衛星 ALOS PALSAR の HH と HV の二偏波の後方散乱係数を用いて、アトバラ川周辺広域における土壌水分の推定を行った。その結果を図 7 で示した。図 7 でから分かるように河川から 100 m 以内の範囲では土壌水分の高いエリアを確認することができたが、密生しているメスキートの森の樹冠層が後方散乱光を干渉する可能性がある。即ち、PALSAR L-band 後方散乱光が密生しているメスキートの森の樹冠層を通過できない可能性がある。もし通過できない場合、後方散乱係数のシグナルは土壌水分を示すものではなく、樹冠からのシグナルになってしまうので補正が必要である。但し、時期が同じではないが、図 7 から現地調査結果と同じ結果を得ていることからメスキート密生域でも L-band の後方散乱係数を用いてある程度土壌水分を推定することが可能であると考えられる。

4. 考 察

メスキートは主要な河川の周辺では 500 m 以内範囲で、またワジ周辺では 20 m 以内の範囲に分布を拡大させており、これは現地調査の結果と一致した。その原因は河川に近い場所で土壌水分が高く、

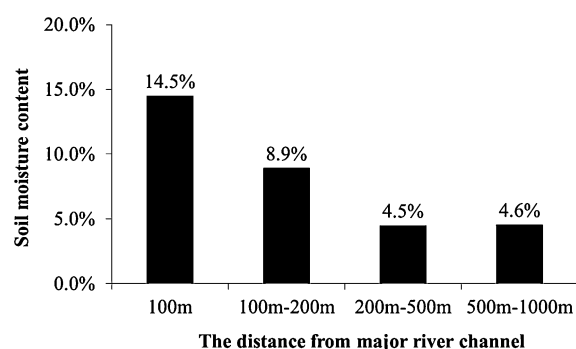


図 6(a). 河川周辺の土壌水分量

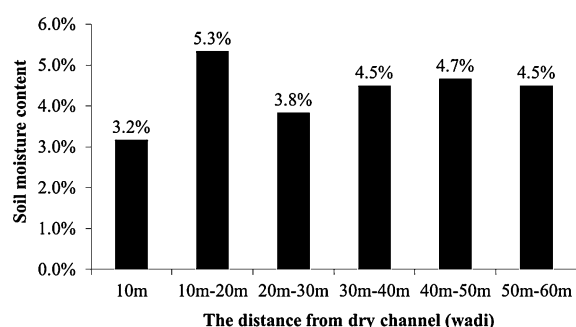


図 6(b). ワジ周辺の土壌水分量

メスキートの木は優れた土壌水分をセンサスできる能力を持っているという従来の研究結果とも一致している。

多くのメスキートが河川のカーブの内側に密集して分布しているのは、カーブの内側では水の流れが遅くなり、メスキートの種子は堆積・発芽し、成長しやすいと考えられる。1999 年から 2009 年にかけてメスキートが減少した原因として、2006 年に研究対象地の流域である New Halfa で行われたメスキートの撲滅計画が影響していると考えられる。今後さらに調査範囲を広げ、土壌水分の現地測定とマイクロ衛星受信の同時観測が必要であると考えられる。

謝 辞

本研究は総合地球環境学研究所縄田プロジェクト「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」の助成で行われた成果である。現地調査に協力して頂きました総合地球環境学研究所 (RIHN)、スーダン科学技術大学 (SUST)、及び酪農学園大学環境システム学部生命環境学科環境リモートセンシング研究室の関係者に深く感謝を申し上げます。

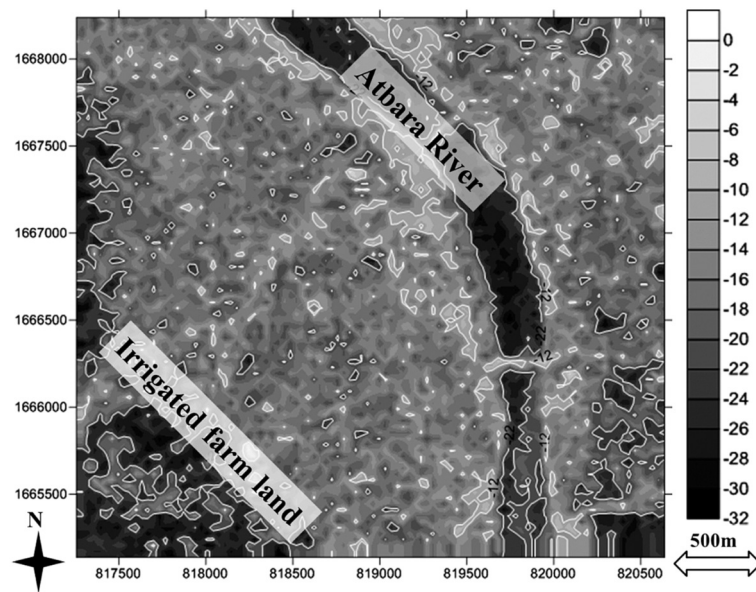


図 7. ALOS PALSAR 後方散乱係数を用いた
アトバラ川周辺の土壌水分の推定

要 約

スーダンではメスキートが砂漠の緑化を目的で導入され、河川を主な種子散布の媒体として、その分布を拡大させている。メスキートの旺盛な繁殖力と高い耐乾性などの特性により、分布拡大のコントロールが利かなくなっている。そこで、本研究では一年中水が流れ続ける河川（河川）と時期によって水が流れる河川（ワジ）における、1985 年～2011 年の時系列画像を用いて解析しその結果、メスキートの分布・拡大の傾向は、河川のカーブの内側に密集して分布し、河川から 500 m 以内、ワジからは 20 m 以内の範囲で最も集中分布と拡大していることを明らかにした。そして、メスキートによる他の植物への影響は、メスキートの密集地域周辺で、他の植物を減少させることを明らかにした。

参考文献・引用文献

- 1) G.T. Babiker (2007) Mesquite (*Prosopis* spp.) in Sudan: history, distribution and control.
- 2) Huete, A.R (1988) A soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI) Remote Sensing of Environment, 25: 295-309.
- 3) Buho Hoshino, Maino Yonemori, Karina Manayeva, Abdelaziz Karamalla, Kiyotsugu Yoda, Mahgoub Suliman, Mohamed Elgamri, Hiroshi Nawata, Yusuke Mori, Shunsuke Yabuki, Shigeto Aida. (2011) Remote sensing methods for the evaluation of the mesquite tree (*Prosopis juliflora*) environmental adaptation to semi-arid Africa. *IEEE IGARSS*, 2011(1), pp. 1910-1913.

Abstract

Mesquite (*Prosopis juliflora*) is ever green leguminous tree or shrub. Mesquite was introduced into Sudan in 1917 from South Africa and Egypt and planted in Khartoum, while Nile and Eastern Sudan. It has spread along the major Rivers sand wadies in Eastern Sudan. In this study, the time series satellite imagery for the period 1985 to 2011 was used, to extract and classify the Mesquite trees expansion areas. The results showed that mesquite was expanded inside of the curves of the major rivers, within 500m from the river channel. It also showed that the mesquite expanded within 20m from the bottom of the wadies.