

タンザニア乾燥地における植生変化の初期解析

小野 朗子*

Initial analysis of vegetation changes in the semi-Arid regions of Tanzania

Akiko ONO*

In this study, we analyzed the vegetation changes in the semi-arid regions of Tanzania in Africa using a normalized difference vegetation index (NDVI) and a normalized difference water index (NDWI) calculated from Terra/MODIS satellite data. NDVI and NDWI are the most widely used vegetation index. They have a relatively higher value in the wet season between November and April and represent the change and spread of land cover (vegetation coverage). From 2009 onwards, during drought conditions, the NDVI and NDWI time series have shown a gradual decrease.

Keyword vegetation index, annual variation, seasonal variation, drought

1. はじめに

サハラ以南アフリカのなかで広大な面積をしめる乾燥地・半乾燥地は、干ばつや飢饉の常襲地であり、世界で最も貧しい脆弱な地域のひとつとされている¹⁾。環境省(2013)では、乾燥地は年間降水量がほぼ200~300 mm未満、半乾燥地はそれ以上かつ500~800 mm未満と定義しているが²⁾、乾燥地では一般に天水での耕種農業が行えないため、大多数の住民は牧畜(遊牧)を中心とした生計が、また、半乾燥地では天水農業または季節河川の水を利用した灌漑農業、および牧畜と農業を組み合わせた生計が主流となっている¹⁾。乾燥地・半乾燥地では年間降水量の年変動が大きい^{1,2)}ので水不足に陥りやすい。本研究では、経済のグローバル化のなかで急激な変動にさらされ、最貧困地域に属するアフリカのタンザニアを半乾燥地の事例地として取り上げることにする。

タンザニアはアフリカ大陸の東部に位置し、国土の大部分は標高1,000~1,400 mの台地で、西側に行くほど次第に標高が高くなっている。海岸から内陸部にかけては平野、内陸部は丘陵のサバンナや砂漠状の乾燥高原が続いている³⁻⁵⁾。気候は国土の大半が熱帯性気候に属し、中央部がステップ気候であるが、南部と北部の高原地帯は標高によって温度が低い。降水量は年変動が大きく、年間平均降水量は400~2,500 mmである。また地域差があり、海

岸部や北部高地帯は年間1,000 mmを超えるが、北部や内陸部は500~700 mm程度と少ない⁵⁾。雨期は地域によって異なり、3~5月までの大雨期(Masika)と10~12月までの小雨期(Vuli)の2回雨期がある地域と、11~4月(Msimu)の雨期が1回の地域とに分かれる。穀物などの農作物はこれらの雨期を利用して作付けされるが、バナナやキャッサバは年中生産・収穫が可能である⁵⁾。

タンザニアは度々干ばつ被害に見舞われ、雨が少ない北部と内陸部が最も被害を受けやすい。2009~2011年にアフリカの角全体で起きた干ばつは過去60年間で最悪と言われ、タンザニアでも大雨期に降雨が不足し、特に北部が食料不足に陥った。さらに、2011年以降も干ばつ被害は続いている⁵⁾。したがって、半乾燥地のタンザニアの植生変化や干ばつ状態を把握することは、地球温暖化の影響を知る上で重要である。本研究ではリモートセンシング技術を活用し、半乾燥地のタンザニアの植生の変化や干ばつ被害の状態を把握することを研究目的とし、解析を行った。この論文はその初期報告である。

2. リモートセンシングとは

人工衛星や航空機に搭載されたセンサは、地球上の大気や海洋、陸、雪氷などの観測を行うので、地球温暖化や地球環境の変化などを監視するのに大変有用なデータが取得できる。リモートセンシングとは、人工衛星や航空機などに搭載されたセンサによって、対象物に直接触れる

* 近畿大学工業高等専門学校
総合システム工学科 制御情報コース

ことなく、物体が反射・放射する電磁波を遠隔からセンサで計測したデータを用いて、物体の形状や性質などを識別する技術のことである。この技術は広い範囲で迅速に調査でき、植生分布の把握や地表面形状の計測、水域における水質・温度の推定、山岳地域の積雪量の推定、雲や雨などの気象状況の観測など、幅広い分野に適用することができる。

3. 解析手法

リモートセンシングでは各種の原理が開発されていて、植物の生育調査のリモートセンシングでは、植物の光の反射率が植物の状態によって異なる特性を利用した原理が多く用いられている。植物は一般に太陽光の中で赤色波長領域 (620～690 nm) を吸収し、近赤外波長領域 (720～1200 nm) を強く反射する。この2つの波長領域の反射率の変化によって植物の生育状態を判定することが可能である。この植物の反射特性に着目した、(1) 式に示す正規化植生指数 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) が開発され、多用されている^{6,7)}。NDVI は植生被覆率や光合成量との関係が実験的に認められており、NDVI が大きいほど植生の量および植生の生育度・活性度が高いことが知られている^{6,9)}。

$$NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red) \quad (1)$$

NIR: 近赤外域 (720～1200 nm) の反射率

Red: 赤域 (620～690 nm) の反射率

短波長赤外域は、地表面の水分状態を定量的に把握するのに有効であることが報告されている^{7,10,11)}。水や雪などによる光の反射は可視光帯で最も大きく、短波長赤外で最小の値を持つことが知られている。この波長特性を活かし、Gao (1996) は、地表面における水域 (雪を含む) や、植生に含まれる水分量の存在を示す指数として、正規化水指数 NDWI (Normalized Difference Water Index) を開発した。NDWI は、近赤外域と短波長赤外域の反射率を用いて、(2) 式から算出される¹¹⁾。

$$NDWI = (NIR - SWIR) / (NIR + SWIR) \quad (2)$$

NIR: 近赤外域 (720～1200 nm) の反射率

SWIR: 短波長赤外域 (1300～2500 nm) の反射率

4. 解析データ

本研究では、米国航空宇宙局 NASA (National Aeronautics and Space Administration) の地球観測衛星 Terra に搭載される中分解能撮像分光放射計 MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) から取得されたデータを利用し、“NASA LPDAAC (Land Process Distributed Active Archive Center)” で無料配布されている

日値の地上解像度 5km の地表面反射率データ

(MOD09CMG プロダクト) をダウンロードして用いた。

Terra 衛星は 1999 年 12 月 18 日に打ち上げられ、これまでに約 20 年間のデータが蓄積されている。Terra 衛星は、日中と夜間の一日二回、午前・午後 10 時半頃に観測を行っている。MODIS は、400～14,400 nm の波長帯の間に 36 の観測バンドを持ち、それぞれの波長帯における地表面の反射率を計測している。

本研究では、代表的な 2 つの植生指数 NDVI と NDWI を用いて、タンザニアの植生変化の解析を行うため、MODIS NDVI は、赤色波長域のバンド 1 (620～670 nm) と近赤外波長域のバンド 2 (841～876 nm) の反射率の値を用い、(1) 式から、MODIS NDWI は、近赤外波長域のバンド 2 (841～876 nm) と短波長赤外波長域のバンド 6 (1628～1652 nm) の反射率の値を用い、(2) 式から算出した。

5. 解析領域

近畿大学農学部鶴田教授らの研究チームは、タンザニア中央部のドドマ州中部の半乾燥地で 2010 年から現地調査を行っている¹²⁻¹⁶⁾。ドドマ州は大型の家畜 (ウシ) を有する典型的な農牧民が住む地域として知られている。なかでも調査地は、ドドマ州が抱える最大の民族集団、ゴゴ (wagogo) が居住するドドマ州中部の Majeleko 村周辺およびドドマ州北部の Itiso 地区の二地区で、年間降水量が 600 mm 以下で、雨の降り方も極めて不安定な、干ばつに起因する食料不足や飢饉に常に悩まされている場所である。

本研究では、Table 1 に示す二地区 2 サイトについて調べることにした。Majeleko 地区の point1 のサイトは Majeleko 村の中心部近くの場所、point2 のサイトは 1990 年代以降に主に森林が開かれ農耕地が広がった新開地である。一方、Itiso 地区の point1 は本来森林保護区であったが、近年、農民や牧畜民が侵入して森林がかなり減っている場所、point2 は季節湿地で牧草地として保護されているが、一部農耕地になっている場所である。

Table 1. タンザニアの解析領域の緯度、経度、標高¹²⁻¹⁶⁾

Area	Latitude	Longitude	Elevation (m)
Majeleko point1	S 6.0763	E 36.18636	942.69
Majeleko point2	S 6.0597	E 36.23827	977.06
Itiso point1	S 5.67695	E 35.92588	1284.68
Itiso point2	S 5.48342	E 36.23641	1277.23

6. 解析結果

2000 年 2 月から 2019 年 12 月までの約 20 年間に観測された Terra/MODIS データから正規化植生指数 NDVI と正規化水指数 NDWI を算出し、以下の解析を行った。

6. 1 タンザニア全域における植生指数の値

タンザニアの全領域における NDVI と NDWI の値を概観するため、2000 年から 2019 年までの 20 年平均値を算出した。結果を Fig. 1 に示す。

Fig. 1 では、白色に近づくほど NDVI と NDWI の値が高く、黒色に近づくほど NDVI と NDWI の値が低いことを示している。両指数とも既に数多くの研究が行われていて、植生被覆率や植生の生育度・活性度が高いほど NDVI の値が高くなり（1 に近づき）、被覆物の含水量が高いほど NDWI の値が高くなる（1 に近づく）ことが報告されている^{6,9)}。Fig. 1 より、北西部の森林草原が広がっている領域では NDVI と NDWI の値が他の領域より高めである。一方、内陸部は年間降水量も少なく、干ばつの影響を受け易い領域であり、年間を通して NDVI と NDWI の値は低めである。東南部の草原は年間平均降水量も多く、年間を通して他の領域に比べ高めの NDVI と NDWI の値が分布している。

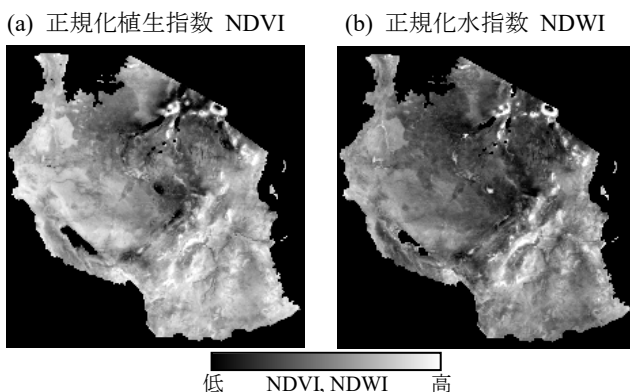


Fig. 1. 2000 年から 2019 年までに Terra/MODIS で観測されたタンザニア全域の (a) NDVI と (b) NDWI の 20 年平均値

6. 2 植生指数の時系列変化

Table 1 の二地区 2 サイトについて、2000 年 2 月から 2019 年 12 月までに観測された Terra/MODIS データから算出した各年月の NDVI と NDWI の時系列変化を Fig. 2 に示す。

まず、Majeleko 地区について見ると、point1 と point2 の両サイトで、NDVI の季節変化は 1～3 月に最大、10～11 月に最小の値となる季節変化を繰り返しながら、NDVI 値の経年変化は 2007～2008 年に一時的に回復（増加）するが、緩やかな減少傾向が見られる。Majeleko 地区は 1990 年以降に森林から農耕地に変わり始めた新開地である。2000 年代後半から頻発する干ばつの被害を受け、農作地の土壌の状態が悪くなり、農作物も育ちにくくなって、2008 年以降、NDVI の値が徐々に減少していると考えられる。

一方、Itiso 地区の point1 のサイトは 1～4 月に最大、9～11 月に最小の値になる季節変化を繰り返しながら、NDVI 値の経年変化は 2015 年に一時的に回復（増加）したが、2009 年以降、徐々に減少している。point1 のサイトは森林保護区であるが、近年になり森林が減り始めており、2007 年以降の NDVI の減少は森林減少（植生被覆率の減少）を捉えている可能性が考えられる。point2 のサイトは 3～5 月に最大、10～12 月に最小の値になる季節変化を繰り返しながら、NDVI 値の経年変化は干ばつ被害が大きかった年に大きく減少するが、2007 年以降、減少傾向にある。point2 のサイトは季節湿地なので、他のサイトに比べ、継続的な変化ではなく、年ごとの降水量の違いなど干ばつの被害状況の影響を受けて、NDVI の値が変化しやすいと考えられる。

NDWI の時系列変化は NDVI と大変似た波形パターンを示し、NDVI が高い時期は NDWI も高く、NDVI が低い時期は NDWI の値も低くなっている。タンザニアは 11～4 月頃が雨期にあたり、穀物などの農作物は雨期を利用して作付けされる⁵⁾。雨期の時期と NDVI と NDWI の

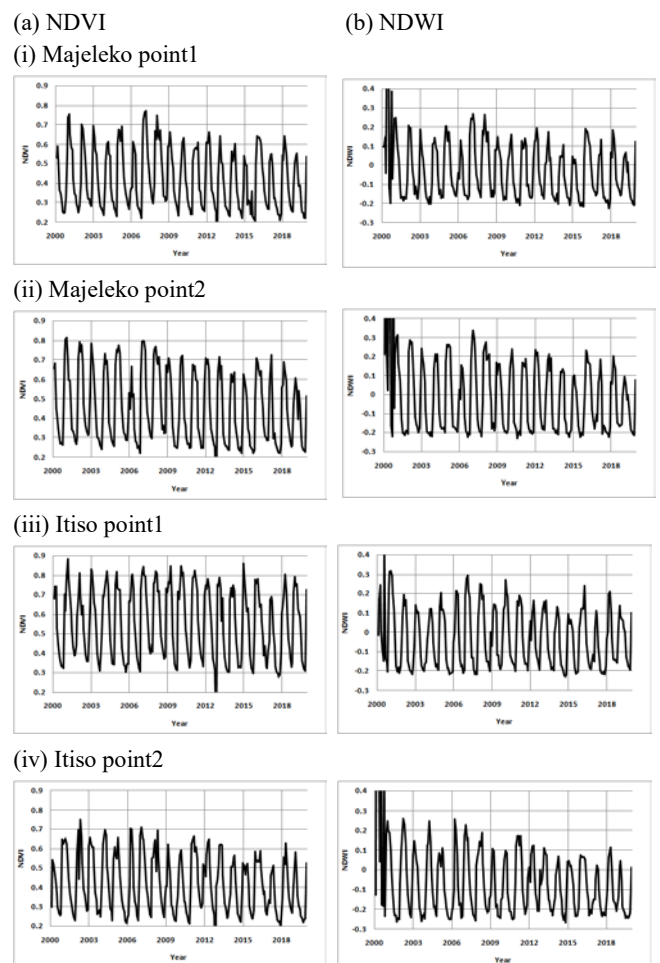


Fig. 2. Majeleko 地区と Itiso 地区の 2 サイト、point1 と point2 における (a) NDVI と (b) NDWI の時系列変化

値が高い時期が一致しており、人工衛星で観測されたデータから算出した NDVI と NDWI の値から、雨期に作付けした農作物が十分な水分を含む土地で順調に生長し、植生被覆率が高くなっていく様子が把握できる。

6. 3 NDVI と NDWI の比較

Fig. 2 より、タンザニアの二地区 2 サイトで NDVI と NDWI の時系列変化はよく似た波形パターンを示すことがわかる。二指数の関係を明確にするため、2002 年 2 月から 2019 年 12 月までに観測された各年月の NDVI と NDWI の値を用い、散布図を作成してみた。プロットの色の違いが月の違いを表している。Fig. 3 から明らかなように、二指数は強い正の相関関係にある。

サイト毎に比較すると、NDVI と NDWI の相関が最も良いのは Itiso point1 で、Majeleko point1、Majeleko point2 の順で続き、相関が最も良くないのは Itiso point2 である。植生タイプで見ると、森林は相関が高く、農耕地、湿地の順で相関が悪くなっている。

月別にプロットを見ると雨期前の 10 月は相関が悪く、2 月と 12 月は相関が良い。年別にプロットを見ると干ばつ被害のあった 2012 年は相関が悪く、2005-2007 年は相関が良い。したがって、干ばつの様に土地に十分な水分が保たれていない場合に両指数の関係が悪く、土地に十分な水分が保たれている場合は両指数の関係も良く、植物は順調に生長している。

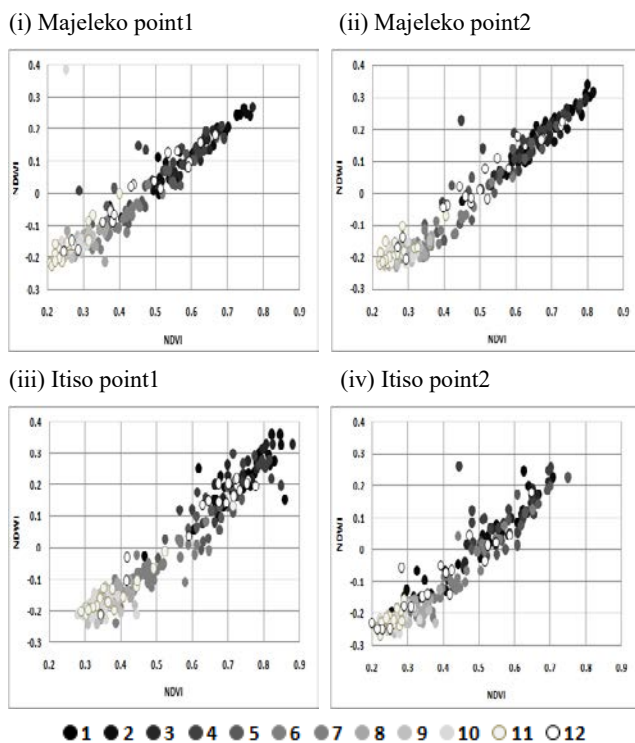


Fig. 3. Majeleko 地区と Itiso 地区の 2 サイト, point1 と point2 における NDVI と NDWI の月毎の散布図

7. まとめと今後

本研究では、半乾燥地のタンザニアの植生変化を把握するため、人工衛星 Terra/MODIS データから算出された 2 種類の植生指数、すなわち、正規化植生指数 NDVI と正規化水指数 NDWI を用いて解析を行った。はじめに、タンザニア全域で NDVI と NDWI の分布を調べたところ、NDVI の値は植生被覆率と相関していること、NDWI の値は植生の生長に必要な水分がある様子（土地の水分量）や植生内の含水量を捉えていることがわかった。次に、現地調査が行われている Majeleko 地区と Itiso 地区の二地区 2 サイトで、NDVI と NDWI の時系列変化を調べた。土地被覆の違いによって、各サイトの NDVI と NDWI の値は異なるが、両指数とも 1 月から 5 月に高い値を、8 月から 11 月に低い値を示し、11 月から 4 月の雨期の時期に農作物が成長すること、土地被覆物（植生の種類）の違いによって、NDVI の値が、また土地の水分状態の違いによって、NDWI の値が異なることがわかった。また、経年変化は全般的に 2009 年以降から NDVI の値は徐々に減少する傾向が見られ、2000 年代に較べて 2010 年代の方が NDVI の値が小さい。この NDVI の減少には 2000 年後半から頻発する干ばつが影響していると考えられる。

今後、現地調査を行っているグループと意見交換を行いながら、現地の詳細資料・情報を集め、本解析の結果について吟味していきたい。

参考文献

- 1) 北中真人, 2016. サブサハラ・アフリカ乾燥地・半乾燥地における農業・農村開発協力の課題と展望, 砂漠研究, Vol. 25, No. 4, pp. 279-282.
- 2) 環境省, 2013. 人々の暮らしと砂漠化対処, pp. 2-5, Available at: <https://www.env.go.jp/nature/shinrin/sabaku/download/panph.pdf> [Accessed 2020.10.10].
- 3) JICA, 1997. タンザニア国別援助研究会報告書 現状分析編 (http://open_jicareport.jica.go.jp/pdf/11399532.pdf) [Accessed 2020.10.10].
- 4) JAICAF, 2010. ODA と農産物貿易に関する政策一貫性に関する基礎調査 報告書 (http://www.jaicaf.or.jp/news/oda_trade10.pdf) [Accessed 2020.10.10].
- 5) 農林水産省, 2011. 平成 23 年度アフリカ支援のための農林水産情報整備事業、タンザニアの農林水産業、農林水産省補助事業報告書.
- 6) Tucker C. J., 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation, Remote Sensing of Environment, Vol. 8, pp. 127-150.

- 7) Tucker C. J., 1980. Remote sensing of leaf water content in the near infrared, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 10, pp. 23-32.
- 8) Carlson, T.N., Ripley, D.A., 1997. On the relation between Normalized Differential Vegetation Index, fractional vegetation cover, and leaf area index, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 62, pp. 241-252.
- 9) Huete A., 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 83, No. 1-2, pp. 195-213.
- 10) Cibula, W. G., et al., 1992. Response of thematic bands to plant water stress. *Int. J. Remote Sens.*, 31, 1869-1880.
- 11) Gao, B. C., 1996. NDWI - A Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water From Space. *Remote Sens. Environ.*, 58, 257-266.
- 12) Maghimbi, S., Sugimura, K., Mwamfupe, D., 2016. Endogenous Development, Moral Economy and Globalization in Agro-pastoral Communities in Central Tanzania, Dar es Salaam University Press.
- 13) Sugimura, K. (ed.), 2014. Rural Development and Moral Economy in Globalizing Africa: From Comparative Perspectives, Fukui Prefectural University, pp. 1-287.
- 14) Sugimura, K. (ed.), 2013. Endogenous Development, Moral Economy in Agro-pastoral Communities in Central Tanzania, Fukui Prefectural University, pp. 1-99.
- 15) Sugimura K., Mwanmfupe, D., Tsuruta, T. (eds.), 2012. Rural Development Policy and Agro-pastoralism in East Africa, Fukui Prefectural University, pp. 1-204.
- 16) Woodhouse, P., Hulme, D., Bernstein, H., 2000. African Enclosures?: The Social Dynamics of Wetlands in Drylands, Oxford, James Currey, pp.1-28.