

# 西アフリカ・サヘル地域における草本植生劣化指標としての 空間的ばらつきの可能性

## Spatial heterogeneity as a possible indicator of herbaceous degradation in the Sahel, West Africa

伊ヶ崎健大<sup>1</sup>・真常仁志<sup>2</sup>・田中樹<sup>3</sup>・岩井香泳子<sup>1</sup>・小崎隆<sup>1</sup>

Kenta Ikazaki, Hitoshi Shinjo, Ueru Tanaka, Kaeko Iwai, Takashi Kosaki

### 摘 要

乾燥地・半乾燥地はその性格上干ばつの被害を受けやすく、また土壌侵食に対する受食性も高いため、植生が劣化しやすい環境である。草本植生の劣化指標としては、これまで植被率、地上部バイオマス量、草丈、種数、多様性指数などが広く用いられてきたが、これらの指標はある年に劣化した場所と劣化を免れている場所を比較する際には有用であるものの、定点を経時的にモニタリングする際には降水量の多寡などの影響を受けるため必ずしも適切ではない。そこで本研究では、砂漠化の最前線である西アフリカ・サヘル地域で植生調査を実施し、定点を経時的にモニタリングする際の指標として、より降水量の影響を受けにくい「植生量の空間的ばらつき」の可能性を検討した。具体的な指標としては、植被率の空間依存距離および植被率と地上部バイオマス量の変動係数（標準偏差を平均値で除した値）を用いた。対照区と砂漠化により植被率、地上部バイオマス量、種数、多様性指数が有意に低下した植生劣化区でそれらの指標値を求めたところ、植生劣化区で対照区に比べ植被率の空間依存距離は低下し、また植被率および地上部バイオマス量は平均値が低下（即ち砂漠化による草本植生の劣化）するにつれ変動係数が増加した。これらの結果は、サヘル地域で草本植生が劣化する際には、植生がパッチ状になる（つまり土地はランダムには裸地化せず、パッチ状に裸地化する）こと、また地上部バイオマス量が肥沃度の低い土地から選択的に減少することを示しており、ここに新たな草本植生の劣化指標として植被率の空間依存距離および植被率・地上部バイオマス量の変動係数を利用できる可能性が示された。本研究の成果は、草原植生を観光の対象としている地域においても、草原の劣化を定点で経時的にモニタリングする際に有用であると期待される。

### I. 背景および目的

砂漠化対処条約（UNCCD）の定義によれば、砂漠化とは「乾燥・半乾燥・ならびに乾燥半湿潤地域における、気候変動や人間活動を含む様々な要因から引き起こされる土地の劣化」であり、土地の劣化とは「降雨依存農地、灌漑農地、放牧地、牧草地、森林、疎開林の生物的または経済的生産性と複雑性の低下ないしは損失」を意味する。乾燥地・半乾燥地はその性格上干ばつの被害を受けやすく、また土壌侵食に対する受食性も高いため、砂漠化の危険度が高い（UNEP, 1997）。中でもサハラ砂漠南縁に位置し、年平均降水量が 200

～600 mm のサヘル地域（南北約 400 km、東西約 4000 km の地域）は砂漠化の最前線として知られている（図 1）。このサヘル地域での砂漠化に伴う草本植生の劣化については、Hiernaux らによる一連の研究（例えば Hiernaux and Ayantunde, 2004 など）に詳しいが、それらは草本植生の劣化を植被率、草丈、地上部バイオマス量、種数（あるいは多様性指数）などの指標で評価してきた。これらの指標は、ある時間における劣化した場所と劣化を免れている場所を比較する際には有用であるものの、定点を経時的にモニタリングする際には、変動が大きいと必ずしも適切ではない。例えば、乾燥地では降水量の年変動が大きい（ニジェール共和国の国際半乾燥熱帯作物研究所（ICRISAT）西・中央アフリカ支所では、1983 年～2009 年の年平均降水量が 530 mm ± 120 mm（標準偏差）である）が、地上部

<sup>1</sup> 首都大学東京大学院都市環境科学研究科観光科学域  
〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1 (9 号館)

<sup>2</sup> 京都大学大学院農学研究科地域環境科学専攻  
〒606-8502 京都府京都市左京区北白川追分町

<sup>3</sup> 総合地球環境学研究所  
〒603-8047 京都市北区上賀茂本山 457 番地 4

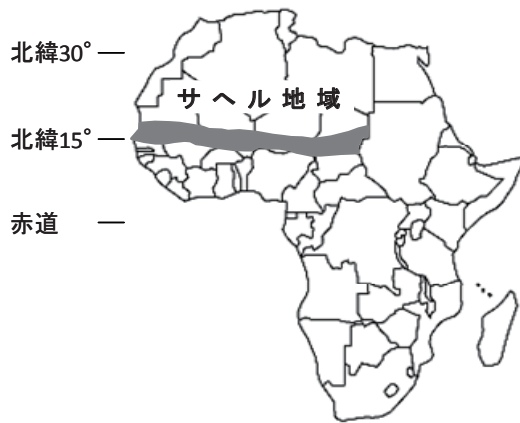


図1 サヘル地域の位置

バイオマス量もその年の降水量の多寡などに影響を受けるため年変動が大きく (Hiernaux *et al.*, 2009), ある年に地上部バイオマス量が低下したからといって, それが砂漠化による植生の劣化とは限らない (Hein *et al.* (2011) によれば, サヘル地域の純一次生産量は年降水量の一次関数で表現できる)。また, Wezel and Schlecht (2004) によれば, サヘル地域では同じ土地でも年によって優占する植物種や出現する種数が異なるため, 種数や多様性指数も定点を経時的にモニタリングする際の指標としては必ずしも適切ではない。

その一方で, Schlesinger *et al.* (1990, 1996) は砂漠化の進行に伴い草原に灌木が侵入すると, 土壌水分および土壌養分の空間的なばらつき (不均一性) が増加し, その結果として植生の空間的なばらつきも増加することを示した。これにより, 降水量の影響を受けやすい「植生量それ自体」ではなく, 降水量の影響を比較的受けにくい「植生量の空間的なばらつき」を新たな草本植生の劣化指標にする可能性が開かれた。この場合, 草本植生の劣化は植生量の空間的なばらつきの増加と表現できる可能性がある。そこで本研究では, 砂漠化の最前線であるサヘル地域において, 草本植生の新たな劣化指標として植生量の空間的なばらつきを検討した。

## II. 方法

### 2.1 調査地の概要

調査地はサヘル地域に特徴的な古砂丘帯 (1万8千年~1万2千年前の最終氷期の最寒冷期に現在のサハラ砂漠から移動して来た砂丘がその後の温暖期に固定された古砂丘が連なる地域, 詳しくは今川 (1992) を参照されたい) に位置するブルキナファソ国サヘル州ウダラン県マルコイ郡タカバング村 (図2: 北緯 14° 38', 東経 00° 09', 標高 240~280 m) である。タカバング村は基本的には農耕と牧畜 (農牧混交のサヘル

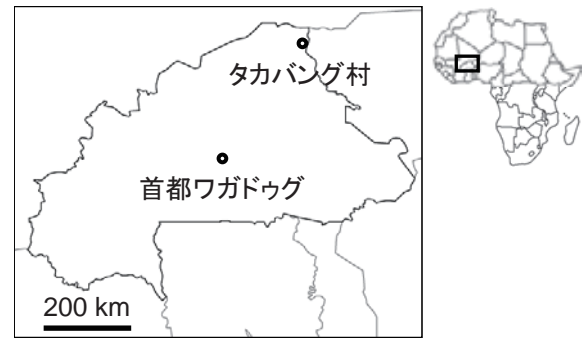


図2 調査地の位置

型農耕) を生業とするソンガイ族の集落であるが, 村内には遊牧民であるプル族 (フルベ族, フラニ族) や同じくサヘル型農耕を生業とするベラ族 (ケルタマシエック族) も居住している (詳細は石本 (2011) および瀬戸 (2004) を参照されたい)。主要な作物はトウジンビエ (Pearl millet: *Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) とササゲ (Cowpea: *Vigna unguiculata* (L.) Walp.) で, 涸れ川の河畔近くの畑ではモロコシ (*Sorghum: Sorghum bicolor* (L.) Moench) も見られるが, これらは天水のみで栽培されている。主要な家畜はウシ, ヒツジ, ヤギ, ニワトリである。

タカバング村の年平均降水量は, トウジンビエの栽培限界 300mm をやや上回る 331 mm (2000年~2002年の平均値) である (タカバング村の西約 13km に位置するマルコイ村の 1960年~1990年の年平均降水量は 342mm)。サヘル地域の他の場所同様, ITCZ (熱帯収束帯) が最も北上する 7月~9月にスコール性の降雨が見られ, ITCZ が南下する 11月~3月には降雨は見られない (篠田, 1992)。気候区分については, UNCCD (砂漠化対処条約) の区分では乾燥 ( $0.05 \leq \text{降水量} / \text{最大蒸発散量} < 0.20$ ), FAO の農業生態区分 (Agroecological Zone) では Warm arid tropics, ケツペンの気候区分では BWh (年平均気温が 18 °C 以上の砂漠気候) に属する。

植生は刺性かん木のステップであり, 乾季に葉をつける *Faidherbia albida* (Del.) Chev. (*Acacia albida* Del.) やアラビアゴムが採れる *Acacia senegal* (L.) Willd. などのアカシア属のかん木と *Andropogon* 属, *Aristida* 属, *Cenchrus* 属, *Eragrostis* 属などのイネ科の短茎草本が特徴的である (今川, 1992)。

地形的特徴については, 第三紀以前の堆積岩が開析されてできた面に第四紀の砂層 (最終氷期末の最寒冷期前後に現在のサハラ砂漠から風によって運ばれてきた風成堆積物) が乗った構造になっており, 土壌はその構造を反映し, ほとんどが WRB (2006) の分類で

は Arenosols に、また Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 2010) では Psamments に分類されると考えられる。

## 2.2 植生調査の方法

砂漠化による草本植生の劣化が顕著に見られる放牧地（以下「植生劣化区」とする）および劣化が顕著ではない休閑地（以下「対照区」とする）において2003年10月（雨季末）に植生調査を実施した。植生劣化区と対照区間の距離は約2.5 kmである。調査項目は既往の研究でしばしば草本植生の劣化指標として用いられている植被率、地上部バイオマス量、種数、多様性指数である。まず、図3のように30 m間隔で810 mのライントランセクトを3本引き（ライントランセクト a, b, c）、それぞれのトランセクト上で0.5 m～5 m毎にランダムに植生の有無および出現した植物種を記載した（合計記載数は植生劣化区で n=2108, 対照区 n=2430）。次に、図3の様子30 mを小区画とみなし、小区画ごとに植被率、種数、多様性指数を算出した。多様性指数は Shannon-Wiener の H' を log の底を e で算出した。また、小区画の中央に1 m<sup>2</sup>の枠を設置し地上部バイオマス量を測定した（各処理区で n=81）。具体的には、枠内に存在する植物体の地上部を刈り取り、70℃で48時間乾燥させた後、重量を測定した。

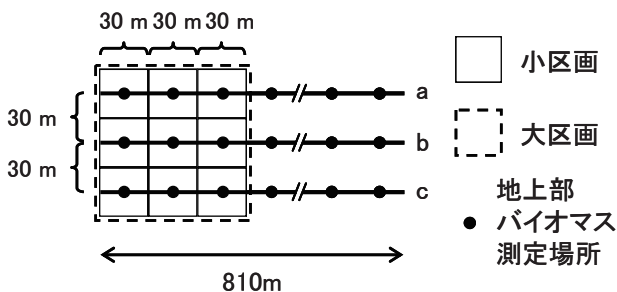


図3 植生調査に用いた3本のライントランセクト

なお、植被率、種数、多様性指数、地上部バイオマス量は3×3の小区画を大区画とみなし、大区画で平均値を算出した。この大区画を1反復と考えることで、各処理区で9反復を得た（810 m/90 m=9反復）。

## 2.3 空間的ばらつきの指標

空間的ばらつきの指標として、本研究では植被率の空間依存距離および植被率と地上部バイオマス量の変動係数（標準偏差を平均値で除した値）を用いた。植被率の空間依存距離については、ジオスタティスティクス（空間統計学）の手法を用いて GS+ 9.0 (Gamma Design Software, LLC, Plainwell, MI, USA)で算出した。Schlesinger *et al.* (1990) によれば、砂漠化の進行に伴

い草原に灌木が侵入すると植生がパッチ状になる、即ち植被率の空間依存距離が低下する。本研究の調査地では砂漠化の進行に伴う灌木の侵入は見られないが、灌木の侵入が見られない場合でも砂漠化の進行に伴い植生がパッチ状になる（逆の言い方をすればランダムには裸地化せず、パッチ状に裸地化する）と仮定し、草本植生の劣化を植被率の空間依存距離の低下と表現できるかその可能性を検討した。具体的には、トランセクト上に植被が有る場合を1、無い場合を0として、大区画毎にラグの間隔を1 m、ラグの最大値を60 mとしてセミバリオグラム（後述）を作成し、球状モデル（図6のaのモデル）を当てはめることでレンジを求めた（n=9）。

植被率および地上部バイオマス量の変動係数については、大区画毎に平均値および変動係数を算出した後、両処理区のデータを合わせ（n=18）、平均値と変動係数の関係を調べた。本来ならば、同一地点で複数年（例えば18年間）植被率および地上部バイオマス量を測定し、その平均値と変動係数の関係を調べるべきではあるが、本研究ではそのような方法を採れなかったことから、異なる地点（両区合わせて18つの大区画）で植被率および地上部バイオマス量を測定し、その平均値と変動係数の関係を調べた（つまり時間的に検証できなかったため、空間的に検証した）。その際、平均値の低下を便宜的に砂漠化の進行に伴う草本植生の劣化と捉えた。砂漠化が進行した際に、土地がランダムに裸地化する、もしくは斉一的に地上部バイオマス量が減少する場合には、それぞれの変動係数は平均値の大小に依存しない（図4）。例えば、地上部バイオマス量が降水量の一次関数で表現できる場合には、少雨年に地上部バイオマス量の平均値は低下するが、変動係数は変化しない。しかし、砂漠化の進行に伴い植生がパッチ状になる、あるいは地上部バイオマス量が肥沃度の低い土地から選択的に減少する場合には、それぞれの平均値の低下（つまり草本植生の劣化）に伴い、変動係数は増加する。本研究では砂漠化の進行に伴い植生はパッチ状になり、また地上部バイオマス量は肥沃度の低い土地から選択的に減少すると仮定し、草本植生の劣化を植被率もしくは地上部バイオマス量の変動係数の増加と表現できるかその可能性を検討した。



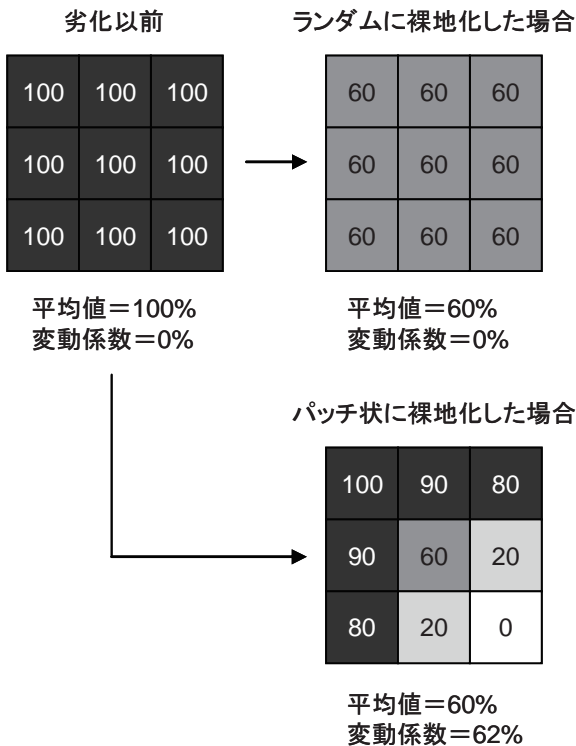


図 4 土地がランダムもしくはパッチ状に裸地化した場合の植被率に関する模式図

## 2.4 ジオスタティスティクスの概説

ここではジオスタティスティクスの手法を矢内・小崎 (2000) を参考に概説したい。

測定値の空間依存性の解析には、一般的にセミバリオグラムを用いる。これは横軸にラグ ( $h$ : サンプル間隔)、縦軸にセミバリアンس  $\gamma(h)$  をとり、それらの関係を表すものである。ラグ  $h$  の時のセミバリアンス  $\gamma(h)$  は、距離  $h$  だけ離れた全ての組み合わせ  $N(h)$  の分析値の差の二乗平均から求められ、その距離での分析値間のばらつきの程度を表す。例えば、直線上で一次元的に  $n$  点等間隔にサンプリングを行い、地点  $x_i$ ,  $x_{i+h}$  での分析値が  $Z(x_i)$ ,  $Z(x_{i+h})$  である場合、

$$\gamma(h) = \frac{1}{2(n-h)} \sum_{i=1}^{n-h} [Z(x_i) - Z(x_{i+h})]^2$$

となる。ここで、参考までに  $h = 1, 2, 3$  の  $\gamma(h)$  を求める際に計算すべき 2 地点の組み合わせは図 5 の通りである。

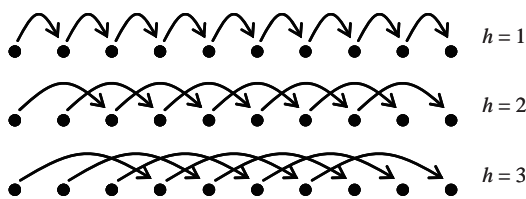


図 5 セミバリアンスを計算する際の組み合わせ

通常この手法では、いかなる 2 地点のセミバリアンスも、その地点自体の地理的位置にはよらず、地点間の距離と方向のみに依存する有限値をとり、セミバリオグラムは図 6 のような形状になる ( $\gamma(h)$  の精度を保つため、通常ラグは最大サンプリング間隔の 50% 程度とする)。ラグの増加とともにセミバリアンスは増加し、ある距離で最大値に達することが多いが (図 6 の a), そのまま無限に増加する場合や (図 6 の c) 空間依存性を持たない場合もある (図 6 の b)。図 6 の a におけるセミバリアンスの最大値をシルといい、これは得られた全データの内在的なばらつきを表す。また、シルに達した時のラグをレンジという。レンジは空間依存性の限界 (空間依存距離) を示し、データの内挿が可能な範囲を示す重要な値である。

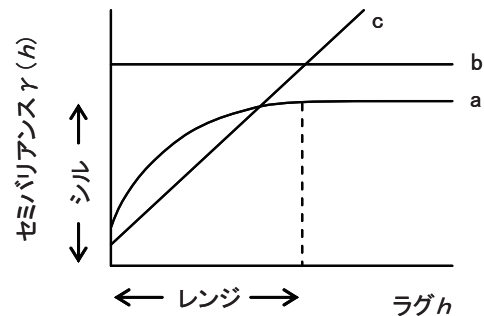


図 6 セミバリオグラムの例

## 2.5 統計解析

本研究では反復が 9 であり、正規性の検定を実施するには不十分であるため、各群の正規性および群間の等分散性を仮定した。群間で平均値に差があるかどうかを Student の  $t$  検定にて調べた。用いた統計ソフトは SYSTAT 11.0 (Systat Software, Inc., Chicago, IL, USA) である。また、有意水準は  $p < 0.05$  とした。

## III. 結果と考察

### 3.1 植被率, 地上部バイオマス量, 種数, 多様性指数および優占種

植生劣化区では対照区に比べ、植被率, 地上部バイオマス量, 種数, 多様性指数が有意に低かった (図 7)。多くの既往の研究同様、砂漠化が進行し植生が劣化すると、植被率, 地上部バイオマス量, 種数, 多様性指数が低下することが示された。また、2003 年が多雨年であったことを反映し (各処理区から約 3 km 離れたタカバング村の中心部の降水量は、2000 年~2002 年の平均値が 331 mm であったのに対し、2003 年は 553 mm であった)、対照区では地上部バイオマス量が 2.4 Mg

ha<sup>-1</sup>と高い値であった。優占種については、植生劣化区では *Schoenefeldia gracilis* Kunth (イネ科の一年生草本：ソングアイ語名 *subu kara*) の出現割合 (裸地を除く) が  $77.3 \pm 3.8\%$  (平均値  $\pm$  標準誤差) と非常に高い値を示し、次いで *Aristida mutabilis* Trin. et Rupr. (イネ科の一年生草本：ソングアイ語名 *bonda*) の出現割合が  $17.5 \pm 4.3\%$  (平均値  $\pm$  標準誤差) であった。*S. gracilis* は Turner (1999) がマリで実施した調査でも非常に高い出現割合を示しており (場所によっては 90%以上)、単一種の群落を形成する草本の一つであると考えられる。ただし、Hiernaux *et al.* (2009)によれば *S. gracilis* は休閑年数の増加 (つまり土壌肥沃度の回復) とともに出現割合を増加させる種であることから、本調査地で植生劣化区とした場所は、過去に砂漠化により植生が劣化したものの、現在は植生が回復している途上かもしれない (Hiernaux *et al.* (2009) での *S. gracilis* の出現割合は数%程度に過ぎないが)。一方対照区では、*S. gracilis* の出現割合が  $4.5 \pm 0.8\%$  (平均値  $\pm$  標準誤差) と植生劣化区に比べて有意に低かった。対照区で優占したのは *Cenchrus biflorus* Roxb. (イネ科の一年生草本：ソングアイ語名 *daano*)、*A. mutabilis* (先述)、*Eragrostis tremula* Hochst. ex Steud. (イネ科の一年生草本：ソングアイ語名 *haabilgo*)、*Zornia glochidiata* Reichb. ex DC. (マメ科の一年生草本：ソングアイ語名 *dangumana*) であり、それぞれの出現割合は  $53.0 \pm 4.4\%$ 、 $14.7 \pm 4.1\%$ 、 $11.5 \pm 1.6\%$ 、 $10.2 \pm 1.3\%$  (平均値  $\pm$  標準誤差) であった。対照区での放牧圧の低さを反映し、飼料価値の高い *C. biflorus* (Hiernaux, 1998) が優占していた。

### 3.2 植生量の空間的ばらつき

上記の様な植被率、地上部バイオマス量、種数、多様性指数および優占種の特徴を有する植生劣化区および対照区でレンジを比較したところ、対照区では 60 m の範囲内でレンジが見られなかった (図 8a：つまりレンジが 60 m 以上であった) のに対して、植生劣化区では 60 m の範囲内でレンジが見られた (図 8b： $37.1 \pm 11.0$  m (平均値  $\pm$  標準誤差) にレンジが低下した)。この結果は、灌木の侵入が見られない場合でも、砂漠化で植生が劣化する際には植生がパッチ状になる (つまり土地はランダムには裸地化しない) ことを示しており、ここに草本植生の劣化指標として植被率の空間依存距離を利用できる可能性が示された。

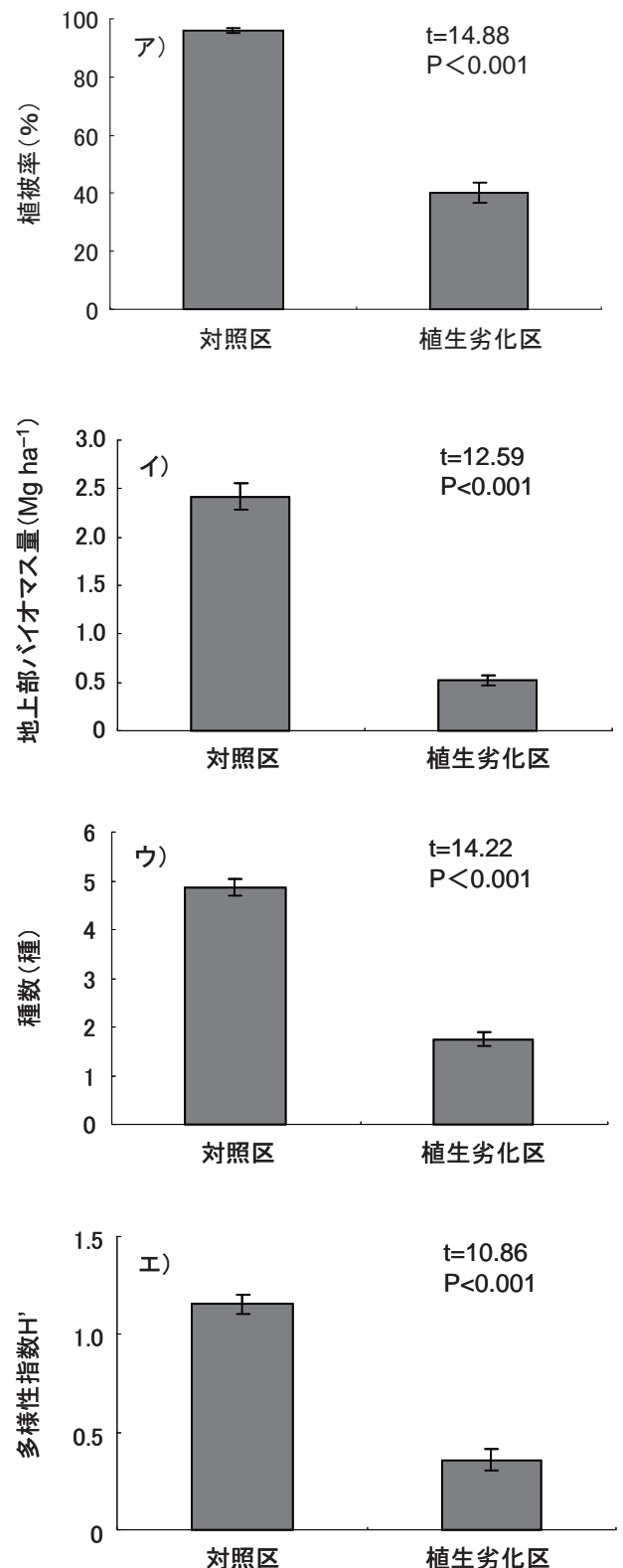


図7 各処理区における植被率 (ア)、地上部バイオマス量 (イ)、種数 (ウ)、多様性指数 (エ) 誤差棒は標準誤差を示す。

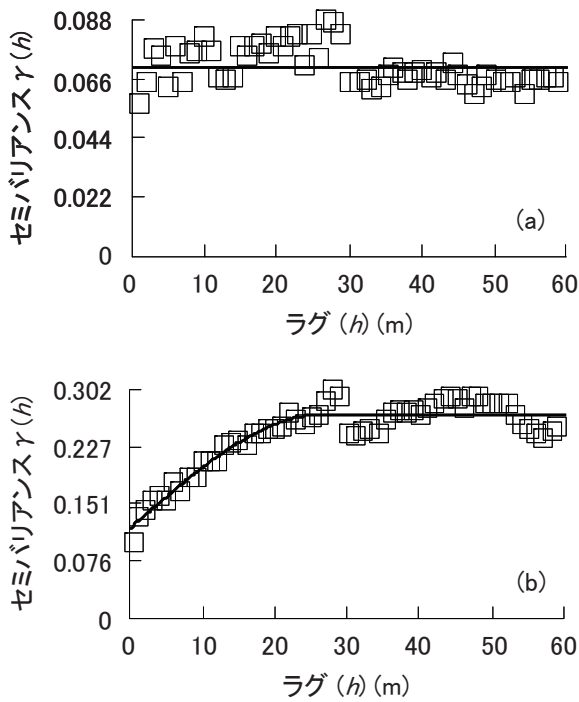


図8 対照区 (a) および植生劣化区 (b) におけるセミバリオグラムの例

また植被率および地上部バイオマス量の変動係数については、それぞれの平均値が低下すると（つまり砂漠化による草本植生の劣化が進行すると）、変動係数が増加することが示された（図9, 10）。植被率、地上部バイオマス量ともに正規分布をしていないため、必ずしも統計的に最適な解析にはなっていないものの、これらの結果は、砂漠化による草本植生の劣化に伴い植生はパッチ状になること、また地上部バイオマス量は肥沃度の低い土地から選択的に減少することを示しており、草本植生の劣化指標として植被率あるいは地上部バイオマス量の変動係数を利用できる可能性が示された。

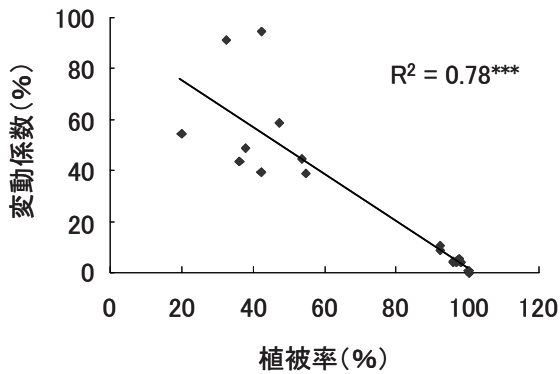


図9 植被率とその変動係数の関係

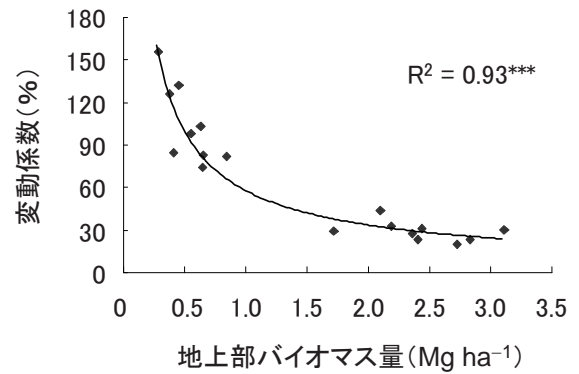


図10 地上部バイオマス量とその変動係数の関係

#### IV. 結論

本研究では草本植生の劣化指標として「空間的ばらつき」が利用できるか、その可能性を検討した。具体的には、対照区と砂漠化により植被率、地上部バイオマス量、種数、多様性指数が有意に低下した植生劣化区において、植被率の空間依存距離および植被率・地上部バイオマス量の変動係数を求めた。その結果、植生劣化区で植被率の空間依存距離は低下し、また植被率および地上部バイオマス量は平均値の低下（即ち砂漠化による草本植生の劣化）に伴いそれぞれの変動係数は増加した。これらの結果は、サヘル地域で草本植生が劣化する際には、植生がパッチ状になること（つまり土地はランダムには裸地化しないこと）、また地上部バイオマス量は肥沃度の低い土地から選択的に減少することを示しており、草本植生の劣化指標として植被率の空間依存距離および植被率・地上部バイオマス量の変動係数を利用できる可能性が示された。本研究の成果は、草原植生を観光の対象としている地域においても、草原の劣化を定点で経時的にモニタリングする際に有用であると期待される。

#### 謝辞

本研究はトヨタ財団研究助成プロジェクト「西アフリカ半乾燥熱帯圏の農牧混交地域における『等身大』の砂漠化研究」（平成14～15年度）、科学研究費補助金（06J03341, 20405005, 22405020, 22880018）、総合地球環境学研究所研究プロジェクト「サハラ以南アフリカ砂漠化地域における生業動態と生存戦略の展望」（平成22年度～）の一部として実施された。また、植物種は三浦励一氏（京都大学農学研究科）に同定して頂いた。本稿の執筆に際しては、宮寄英寿氏（総合地球環境学研究所）および瀬戸進一氏（財団法人地球・人間環境フォーラム）に貴重な助言を頂いた。ここに記し

て深く感謝の意を表します。

## 参考文献

- Hein, L., de Ridder, N., Hiernaux, P., Leemans, R., de Wit, A. and Schaeppman, M. 2011. Desertification in the Sahel: Towards better accounting for ecosystem dynamics in the interpretation of remote sensing images. *Journal of Arid Environments* 75:1164–1172.
- Hiernaux, P. 1998. Effects of grazing on plant species composition and spatial distribution in rangelands of the Sahel. *Plant Ecology* 138: 191–202.
- Hiernaux, P. and Ayantunde, A. 2004. The Fakara: a semi-arid agro-ecosystems under stress. Report of research activities of International Livestock Research Institute (ILRI). [http://eclis.get.obs-mip.fr/index.php/content/download/562/3570/file/Hiernaux\\_Ayantunde\\_Fakara\\_2004.pdf](http://eclis.get.obs-mip.fr/index.php/content/download/562/3570/file/Hiernaux_Ayantunde_Fakara_2004.pdf) (アクセス日 2011. 12. 21)
- Hiernaux, P., Mougin, E., Diarra, L., Soumaguel, N., Lavenu, F., Tracol, Y. and Diawara, M. 2009. Sahelian rangeland response to changes in rainfall over two decades in the Gourma region, Mali. *Journal of Hydrology* 375(1-2): 114–127.
- 今川俊明. サヘルの土地と水. 門村浩・勝俣誠(編) 1992. 「サハラのはとり」(東京: TOTO 出版): 154–171.
- 石本雄大. 2011. ブルキナファソの半乾燥地域における生計維持システムの研究-旱魃や虫害への適応および対処行動に関する統合的分析-. 京都大学アジア・アフリカ地域研究研究科博士論文.
- Schlesinger, W.H., Raikes, J.A., Hartley, A.E. and Cross, A.F. 1996. On the spatial pattern of soil nutrients in desert ecosystems. *Ecology* 77: 364–374.
- Schlesinger, W.H., Reynolds, J.F., Cunningham, G.L., Huenneke, L.F., Jarrell, W.M., Virginia, R.A. and Whitford, W.G. 1990. Biological feedbacks in global desertification. *Science* 247: 1043–1048.
- 瀬戸進一. 2004. 住民視点における環境変化と生業動態～サヘル地域タカバングウ村における砂漠化防止活動を事例にして～. 京都大学地球環境学堂修士論文.
- 篠田雅人. サヘルの気候. 門村浩・勝俣誠(編) 1992. 「サハラのはとり」(東京: TOTO 出版): 142–153.
- Soil Survey Staff. 2010. Keys to Soil Taxonomy 11th edition. USDA, Washington DC.
- Turner, M.D. 1999. Spatial and temporal scaling of grazing impact on the species composition and productivity of Sahelian annual grasslands. *Journal of Arid Environments* 41: 277–297.
- UNEP. 1997. World Atlas of Desertification 2nd edition. Arnold, London.
- Wezel, A. and Schlecht, E. 2004. Inter-annual variation of species composition of fallow vegetation in semi-arid Niger. *Journal of Arid Environments*. 56: 265–282.
- 矢内純太・小崎 隆 2000. ペドメトリックスーその理論と応用- 1. 等値線図はどのようにしてつくるの? : ジオスタティスティクス. *日本土壤肥科学雑誌*, 71(5): 726–732.