中国内蒙古自治区における 1982-1999 年の植生変化についての NOAA/AVHRR データを用いた検討

額尔德尼¹⁾・堀田紀文¹⁾・鈴木雅一^{*1)}

1) 東京大学大学院農学生命科学研究科 Graduate School of Agricultural and Life Sciences,
The University of Tokyo

摘要: 内蒙古自治区全域における砂漠化と緑化事業がもたらした植生変化の実態を把握するために、NOAA/AVHRR の衛星リモートセンシングデータから求めた NDVI (正規化植生指数) を用いた検討を行った。まず、文献から植生変化の実態が明らかな地域において、NDVI の変化と植生変化について比較し、1982~1999 年までの約 18 年間における植生の変動を調べた。植生変化が少ない地域での NDVI の変動から、植生増減を判断する NDVI 変化の閾値を検討し、1982~1986 年と 1995~1999 年の夏季 NDVI の差を Δ NDVI とし、植生の増減を 8 km 分解能のピクセル毎に求めた。そして、 Δ NDVI により植生が変化した地域を抽出して図化した。その結果、内蒙古自治区全体としては、NDVI が増加した地域の割合が減少した地域の割合を大きく上回り、植生増加の傾向が示された。赤峰市 (特に敖漢旗) の植生増加が顕著であり、次いでシリント盟、フフホト市、バヤンヌール市の一部にまとまった NDVI 増加が示され、内蒙古全域において NDVI が増加した面積が約 20 万 km² 程度見られた。北半球の高緯度地域では温暖化による NDVI の増加が報告されているが、行政区毎に求めた NDVI が増加した地域の面積と、統計資料に基づいて集計した造林面積と耕地化された面積の合計に良好な比例関係が見られ、内蒙古自治区における夏季の NDVI 増加は主に緑化と農耕地の拡大という人為的な要因による植生増加である。一方で、NDVI 減少が抽出された内蒙古自治区西部 (アラシャ盟)、東北ホルチン砂地周辺などでは、もともと植生が乏しい地域であり、これらの地域では砂漠化による植生減少が指摘された。

キーワード: 緑化, 砂漠化, 内蒙古自治区, 土地利用変化, NDVI, 植生変化

EERDENI, HOTTA, Norifumi and SUZUKI, Masakazu: **Vegetation-change detection in Inner Mongolia using NOAA/AVHRR images between 1982 and 1999**

Abstract: The land-cover change caused by desertification and re-vegetation in Inner Mongolia from 1982 to 1999 was analyzed using a time series dataset of the normalized difference vegetation index (NDVI) derived from NOAA/AVHRR images. Comparison of the long-term change in NDVI with the actual reported vegetation change for four areas with typical vegetation cover showed good correlations. The areas consisted of stable forest cover at Daxing'anlin Diqu, in Heilongjiang Province, a large increase in vegetation cover at Aohan Banner in the city of Chifeng, a relative increase in vegetation cover at Yijinhuoluo Banner in the city of Ordos, and a decrease in sparse vegetation cover around the arid area at Ejina Banner, in Alxa League. After considering threshold values for identifying vegetation change, we concluded that the area of increased vegetation is much wider than the area of decreased vegetation in Inner Mongolia based on a map showing land-cover change using Δ NDVI, which is the difference in NDVI between 1982-1986 and 1995-1999. Aohan Banner in Chifeng showed the largest increase in vegetation cover, and parts of Xilingol League, Hohhot, and Bayannur also showed distinct increases. The total area in which vegetation increased was about 200,000 km² in Inner Mongolia. The area of vegetation increase according to Δ NDVI in each prefecture-level municipality in Inner Mongolia was proportional to the sum of the re-vegetated and newly developed cultivated areas given in yearbooks. A constant increasing trend in NDVI, caused by global warming, has been reported in the higher latitudes of the northern hemisphere. The trend toward increased vegetation cover in Inner Mongolia is mainly attributed to the expansion of cultivated and re-vegetated areas. By contrast, areas with decreased vegetation cover are widely distributed in Horqin desert and in the western arid area around Alxa League, despite a slightly negative NDVI change; this has ensued from the progress of desertification.

Key word: Afforestation, desertification, Inner Mongolia, land-use change, NDVI, vegetation change

1. はじめに

中国内蒙古自治区は、半乾燥地が主体となる地域で、生態

系が脆弱なため環境の変化や攪乱などによって土地の荒廃が生じやすく、砂漠化、草地と耕地の劣化が憂慮される地域である。その一方で、農地開発と植林活動も活発で、人為の影

* 連絡先著者 (Corresponding author): E-mail: suzuki@fr.a.u-tokyo.ac.jp
〒113-8657 東京都文京区弥生 1-1-1 1-1-1 Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8657, Japan

響によって、長期間にわたる様々な植生の変化が生じている。このため、内蒙古自治区全域を対象に緑化の効果や砂漠化の実態を広域にわたって統一的な基準で示すことが望まれる。しかし、既往の報告（その主要な内容を文末の注釈に記載）では、植生変化の十分な理解になかなか到達しない。その理由は、内蒙古はその東北部の森林地帯から西部の砂漠地帯まで地域的に大きく異なる自然環境があり、自治区を一括した植生増減の集計では地域毎の植生変化の差異が埋没するからである。また、緑化事業地など個別地域における植生変化の記述の集積で、内蒙古全域を網羅的に理解することも対象地域の広さゆえに困難である。

近年、リモートセンシングを用いた解析により広域の植生変化を論ずる試みが進展し、特に約 18 年間ほぼ同じ精度で全球をカバーするリモートセンシングデータである NOAA/AVHRR データから求められた正規化植生指標 (NDVI: Normalized Difference Vegetation Index) の経年変化によって、全球の陸面植生変化の解析¹⁾とシベリア地域²⁾などの地域毎での解析がなされている。これらの研究は、「夏期の NDVI 増減から植生変化が生じた地域を抽出する研究³⁾」と、1980 年代以降に特に北緯 45 度以北の北半球高緯度地域において NDVI が増加していることを示し、地球温暖化に対応した植物活性の増加が顕著であることを指摘した研究¹⁾に代表される「気候変化と対比して近年の植物活性の変化を論ずる研究」に区分される。しかし、内蒙古全域を対象とした解析はいずれの視点の研究も報告されていない。

そこで本研究では、1980 年代から 1999 年にかけての内蒙古自治区全域における植生変化の実態を推定することを目的として、NOAA/AVHRR データによる NDVI の経年変化と、資料に基づく現地での植生変化の実態との比較を行い、NDVI に含まれる情報をもつ植生が増減した場所とその変化の程度について論ずることとした。

NDVI は近赤外域と可視光赤色域の分光反射率から算出される指標であり、NDVI 値が高いほど植生が多い状態に対応する⁴⁾。NDVI を用いた研究では植生図の作成を始めとして植生の実態評価がなされ、その有効性が示されてきた。内蒙古地域を対象に NDVI を用いて植生の分類、季節変化や気象との相関を示す研究事例が多くあり⁵⁻⁹⁾、バイオマスの生産量を推測した事例がある^{10,11)}。本研究では、これらの研究をふまえて、内蒙古自治区の東北部森林地帯から西部の砂漠地帯までの異なる植生地で既往資料が豊富な 4 地域 (4,000 ~ 8,000 km² のスケール) を選んで NDVI の変化を調べ、植生増減を判断する NDVI 変化の閾値を検討した上で、内蒙古自治区全域 (約 120 万 km² のスケール) を対象に植生変化が抽出された地域を示した。

なお、NDVI の増加した地域について、地球温暖化などによる NDVI 増加の可能性と植林などの緑化事業や農地開発による耕地増加の可能性を持つので、どちらの要因の影響であるかを論ずる必要がある。そこで、行政区 (2 万 ~ 20 万 km² のスケール) での NDVI 増加面積と造林面積、耕地化面積の統計データを対比し、「両者の相関が高ければ人為的

な植生増加の影響が大きく、相関が低ければ気候変化など他の影響が大きい」との仮説を設け、検討を加えた。

2. 研究対象地

対象地は中国内蒙古自治区全域とし、境界付近の状況が理解できるように内蒙古の周囲も併せて検討する (図-1)。内蒙古自治区の土地面積は 118.3 万 km² である。内蒙古は大部分が標高 1,000 m 以上で、概略的には東部から西部へ降水量が減少するのに対応して、森林から砂漠へと異なった植

図-1 研究対象地の位置図。

NDVI の変化と文献資料による植生の変化傾向について比較を行った 4 地域 (黒龍江省大興安嶺地区、敖漢旗、エジンホロ旗、エジナ旗) を黒塗りで示している。

Fig. 1 The study area.

The four regions where the relationship between NDVI changes and actual reported vegetation changes was examined are darker.

図-2 内蒙古自治区とその周辺の土地被覆図 (GLC 2000¹⁵⁾ より作成)。

Fig. 2 Land cover map of Inner Mongolia extracted and modified from the Global Land Cover 2000 map (GLC 2000¹⁵⁾).

生と土地利用が存在している。内蒙古東北部のフルンベル（呼倫貝爾）市東部は大興安嶺山地であり、年降水量が300～500 mmで、森林に覆われている。内蒙古西部のアラシャ（阿拉善）盟は、大部分の地域で年降水量が100 mm以下で、砂漠が広がっている。両者の間にある地域は、年降水量が100～400 mmの地域が多く、草原、農地及び中国で「沙地」と呼ばれる植生が少なく、一部に流動砂丘が見られる土地である。内蒙古は中国全土の草原の73.3%、森林の15.8%を有している^{12,13)}。ここでは植生分布を示すために、GLC 2000のデータセット¹⁴⁾（Global vegetation Monitoring (GVM)のwebサイト¹⁵⁾による）を用いて図-2に示す。

3. 使用データと解析方法

3.1 NDVIのデータセット

本研究では全球をカバーするAVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) データセット^{16,17)}のNDVIをNASA/GSFCのwebサイト、ftpサイトより入手した¹⁸⁾。このデータセットは、雲の影響を最小限にするために、ピクセル毎に毎日のデータから最大のNDVIを選び出したものであり、10日間毎及び月データとして公開されている。本研究で用いるデータは1982～1999年の月データ（元のデータセットには1981年1月から6月と1994年9月から12月にデータ欠落があるため本研究においてはその年間のデータを除いた）で、データの地上分解能は約8 kmである。本データセットのNDVI (scaled NDVI) は0～255の整数値で格納されている。本研究では変換式 (NDVI = (scaled NDVI - 128) * 0.008) により、NDVIに換算した値を用いる。

3.2 植生増加、減少地域の抽出法

一般に北半球温帯の植生地のNDVIは、植物の活性度と被度を反映して夏に大きく、冬に小さい値となる。本研究では、7～9月の3ヶ月間の最大値を各年のNDVI_{max}値とし、1982～1986年を前期、1995～1999年を後期として5年平均を求め、それぞれの期間のNDVI_{max}値とした。また、前期から後へのNDVI_{max}値の変化量をΔNDVIとして植生被覆の増減を調べる。

なお、NDVIの値は、植生の変化以外に、火山活動や森林火災によるエアロゾルの増加などさまざまな要因の影響を受けて変動するため¹⁹⁾、ΔNDVIだけで単純に植生の増減を結論づけることはできない。そこで、植生変化の実態について現地資料などに記録が残されている4つの地域において、1982～1999年のNDVIの長期変化と植生変化の実態との対応について検討を行い、ΔNDVIに基づいて植生の増減を判別するための閾値³⁾について検討する。

また、植生が変化した地域を検討するうえで内蒙古自治区全域における各行政区域での造林面積、耕地化面積の統計データとNDVIが増加した地域の面積を対比し、植生変化が抽出された地域とその面積について、緑化と農耕地の拡大という人為的な要因による植生増加であるか否かについて検討する。

3.3 植生変化面積検討に用いる集計法

NDVIが増減した地点がもともとどのような植生であったかを調べるため、ピクセル毎のNDVIとΔNDVIの値の分布関係を検討する必要がある。

まず、前期の植生分布を示すために前期NDVI_{max}の面積率を(1)式を用いて求める。

$$\alpha_i = A_i / A_{all} \quad \cdots \cdots (1)$$

ここに、 A_{all} は対象地域（内蒙古自治区）全域の面積、 A_i はNDVIが該当する範囲に含まれる面積、 α_i は、1980年代前半（1982～1986年）のNDVI_{max}の面積分布である。

次に、植生変化を示すためにΔNDVIの面積率 β_j を(2)式で求める。

$$\beta_j = B_j / A_{all} \quad \cdots \cdots (2)$$

ここに、 B_j はΔNDVIが該当する範囲に含まれる面積である。 β_j が示すΔNDVIの分布が元の植生によってどのように異なるかを比較するために1980年代前半のNDVI別にΔNDVIの面積率 $\beta'_{i,j}$ を(3)式で求める。

$$\beta'_{i,j} = B'_{i,j} / A_i \quad \cdots \cdots (3)$$

ここに、 $B'_{i,j}$ はNDVIが該当する範囲*i*の地域においてΔNDVIが該当する範囲*j*に含まれる面積である。

また、ΔNDVIに閾値を設けて集計した植生の増加地域・減少地域の特徴を元の植生と対比して論ずるために、植生の増加地域・減少地域の面積を1980年代前半のNDVIの大きさに別集計する。このとき、NDVIの増加地域（または減少地域）の全面積に対するΔNDVIの面積率 γ_i とNDVIが該当する範囲に含まれる面積に対するΔNDVIの面積率 δ_i の2指標を用いる。

$$\gamma_i = C_i / A_{all} \quad \cdots \cdots (4)$$

ここに、 C_i はNDVIが該当する範囲*i*の地域でNDVIが閾値を越えて増加（または減少）した面積である。

$$\delta_i = C_i / A_i \quad \cdots \cdots (5)$$

γ_i と δ_i はともに、1980年代前半のNDVI毎のNDVI変化が生じた地域の面積分布であるが、 δ_i は1980年代前半のNDVIの面積割合を考慮した指標であり、NDVI増減地域の検討で両者ともに用いることとする。

4. 結果及び考察

4.1 内蒙古におけるNDVIの分布

ΔNDVIにより植生変化を論ずる前提として、本研究で植生変化を求める対象期間において前期となる1982～1986年のNDVI_{max}の5年間平均値を図-3に示す。図-3のNDVI_{max}の分布は、全体として東部から西部へと値が減少する分布となっている。また、一見して図-2の植生分布との対応が指摘できる。図-3でNDVI_{max}が「0.20以下である地域」、「0.60以上である地域」の分布は、図-2で「砂漠及び砂漠ステップ」、「森林」と表示された地域とそれぞれ類似した分布である。

内蒙古内でのNDVI_{max}の値を0.05きざみで集計した面積率（3.3における α_i ）を図-4に示す。図-4から、内蒙古においては、NDVI_{max}が0.05以下の植生が極めて乏しい地域は

図-3 内蒙古自治区とその周辺の前期 $NDVI_{max}$ の分布。
前期 $NDVI_{max}$ は 1982~1986 年の NDVI 最大値の平均値である。

Fig. 3 Distribution of $NDVI_{max}$ (averaged value of the maximum annual NDVI between 1982 and 1986) in Inner Mongolia.

図-4 内蒙古自治区における前期 $NDVI_{max}$ の面積率。
前期 $NDVI_{max}$ は 1982~1986 年の NDVI 最大値の平均値である。

α_i : $NDVI_{max}$ の面積率 ((1)式参照)。

Fig. 4 Ratio of each $NDVI_{max}$ area in Inner Mongolia.

Frequency distribution of $NDVI_{max}$ (averaged value of the maximum annual NDVI between 1982 and 1986).

α_i : Ratio of each $NDVI_{max}$ area. See eq. (1) for α_i .

内蒙古の約 20% ともっとも高い面積率を占めるが、図-3 によりそれは西部のアラシャ盟に集中していることが分かる。2 番目に高い面積率のクラスは、 $NDVI_{max}$ が 0.65~0.70 の森林地域であり、大部分は大興安嶺地域周辺に位置する。 $NDVI_{max}$ が 0.15~0.60 程度の階級は、比較的均一な割合で存在していることが分かる。これらの階級は、草地や耕地を中心とした植生からなり、植生の分布としては、これらを合計した草地や耕地がもっとも広く分布していることになる。そのような植生分類の地域においては、NDVI がとる値が幅広いことから、植生量などには地域により比較的疎らな植生から密な植生まで各種が含まれると考えられる。

4.2 植生変化の実態と NDVI の変化の比較

現地情報及び既往研究成果に基づいて植生変化の実態が把握可能な大興安嶺地区、敖漢旗、エジンホロ (伊金霍洛) 旗、

エジナ (額濟納) 旗の 4 地域を選定し、NDVI の長期変化との対応を比較した。各地の位置 (本節で NDVI を検討した範囲) は図-1 に示した。研究対象期間である 1982 年~1999 年における各地の NDVI 経年変化、季節変化、同期間の NDVI 月毎の経年変化及び $\Delta NDVI$ を検討する。また、選定地域から得られた NDVI 変動を参照して、内蒙古自治区の全域における $\Delta NDVI$ を検討する。

4.2.1 選定した 4 地域の概略

大興安嶺地区 (黒龍江省): 内蒙古自治区の外側で、北東方向に位置する黒龍江省最北部にある、中国最大の国有森林区域である。大興安嶺山脈は内蒙古自治区から黒龍江省の境界を越えて存在し、内蒙古内の森林状況の検討に用いられるものとして資料の多い黒龍江省内から選定した。大興安嶺地区の面積は約 4 万 km^2 あり、一部には耕地も存在し、耕地面積は 1989 年に 53 km^2 から 1999 年の 1,000 km^2 になっているが、全域の約 2% の面積率である。また、大興安嶺地区の年平均気温は $-2^\circ C$ 以下、年降水量が 450~500 mm である²⁰⁾。ほとんど全域が森林に覆われている。樹種は主に興安落葉松 (*Larix gmelinii* var. *olgensis* O. et S.) で、次に樟子松 (*Pinus sylvestris* var. *mongolica* Litv.) と雲杉 (*Picea koraiensis* Nakai.) も見られる。落葉樹林は白樺 (*Betula platyphylla* Sukatchev var. *japonica* Hara.)、山楊 (*Populus davidiana* Dode.) などから構成される^{20,21)}。本研究では、図-1 に示す黒龍江省大興安嶺地区内の北部となる約 4,160 km^2 (65 ピクセル: 北緯 $52^\circ 54' \sim 53^\circ 34'$ 東経 $122^\circ 08' \sim 124^\circ 48'$) の森林地を対象として NDVI を検討した。

敖漢旗: 敖漢旗 (日本語読み 'ごうかんき') は赤峰市の南東部に位置し、面積は 8,294 km^2 あり、内蒙古のホルチン砂地の南端となり、温帯大陸性乾燥気候帯に属する。年平均気温は $5 \sim 7^\circ C$ 、年降水量は 350~460 mm である²²⁾。耕地面積は 1989 年には 1,260 km^2 (15%) であったが、1999 年には 1,810 km^2 (21.8%) に増加している²³⁾。穀類、野菜などの生産量は 1970 年代と比べて 8 倍に増加しており、GDP は 10 倍に、住民の平均年収は 16 倍に増加している²⁴⁾。また、1970 年代以降、敖漢旗では植林や草本植栽などの大規模な緑化活動が展開され、約 380 km^2 (4.6%) だった砂丘が現在では 60 km^2 (0.7%) まで縮小した²⁴⁾。結果として、建国初期 (1949 年~) には 1% 程度だった敖漢旗の森林被覆率は現在では 43.5% に達している。なお、敖漢旗は緑化による砂漠化の防止によって、2002 年に国連環境計画 (United Nations Environment Programme) により、世界環境ベスト 500 (Global 500) に指定されている。本研究では、敖漢旗全域 (113 ピクセル: 北緯 $41^\circ 42' \sim 43^\circ 01'$ 東経 $119^\circ 30' \sim 120^\circ 54'$) を対象とした。

エジンホロ旗: オルドス市 (元・伊克昭盟) のエジンホロ旗は北京から西北におよそ 800 km にあり、面積は 5,955 km^2 ある。三方を黄河に囲まれたオルドス高原にある。東部は黄土高原と接し浸食谷が連なり、南部は毛烏素砂地と接し砂漠地帯が広がる。主に 7~9 月に降雨量が集中する温帯大陸性乾燥気候帯に属し、年平均気温は $6.0 \sim 6.3^\circ C$ 、年降水量

が340~420 mmである。エジンホ旗においては、1949年の時点で耕地面積は全域の13.8%を占め、森林被覆率は0.24%であり²⁵⁾、1950年代末から大規模な開墾と、過剰な放牧といった主に人為的要因によって一時的に急速な砂漠化が進行した²⁶⁾。一方、1949年から砂漠化防止対策として植林植草対策が継続的に取られたことによって1980年代後半から1990年後半にかけて植生は回復しており、2007年には森林被覆率が32.6%に達している²⁷⁾。それに伴い、農地利用も制限され²⁸⁾、耕地面積は1989年に4%になり、1999年には1%足らずの面積率へと減少傾向であった²³⁾。1999年の時点においては、森林面積が1,644 km²で総面積の27.6%を占め、草原面積が3,414 km²で総面積の57.3%を占める。植生は主に沙蒿 (*Artemisia sphaerocephala* Krasch.)、檸条 (*Caragana korshinskii* Kom.) などの低木類からなる²⁹⁾。なお、エジンホ旗はこれらの緑化事業の成果によって、中国国内において「全国緑化先進旗」、「全国緑化百佳県」、「全国退耕還林繼續産先進旗」などの指定を受けている。本研究では、その全域 (91 ピクセル: 北緯 52°54'~53°34' 東経 122°08'~124°48') を対象とした。

エジン旗: エジン旗は内蒙古最西端のアラ善 (阿拉善) 盟に属し、面積は114,606 km²である。典型的な温帯大陸性乾燥気候帯に属し、年平均気温は8.3℃、年降水量は37 mmである^{22,30)}。1960年代以降、降水量の減少によってエジン旗オアシスに流入する黒河の河川水が断流し、開発などの人的要因も合わさってエジン旗オアシスは消滅しつつある³⁰⁾。黒河流域における森林の衰退は1950年代から生じていたが、特に下流域で顕著である。黒河下流域においては、胡楊 (*Populus euphratica* Oliv.)・沙枣 (*Elaeagnus angustifolia* L.)・柽柳 (*Tamarix chinensis* Lour.) 林の面積が1958~1982年において573 km²減少し、1983~1994年にさらに1,924 km²減少し、2001年に1,000 km²となり、全域のわずか0.9%となった^{24,30~32)}。エジン旗全体での耕地面積の割合は小さく、1989年の時点で20 km²、1999年に19 km²と大きな変化は見られない²³⁾。エジン旗においてNDVIの検討に用いた地域は、植生の減少が顕著な黒河下流域を含む6,144 km² (96 ピクセル: 北緯 41°06'~42°38' 東経 99°45'~101°21') である。

4.2.2 選定地域におけるNDVIの値

図-5は、4地域の1982~1999年のNDVIを示している。この図には、4地域の対象地域についてNDVIの最大値、最小値と全ピクセルの平均値及びその標準偏差を示した。NDVIは夏に高く、冬に低い季節変化を示しているが、各地の夏季の値は各地域内の最大値、最小値、平均値のいずれも大興安嶺地区が最も高く、敖漢旗、エジンホ旗、エジン旗の順に低くなる。

大興安嶺地区内では、1987年に森林火災が発生し、約13,300 km² (北緯 52°15'~53°34' 東経 122°18'~124°05') が焼失している^{19,33,34)}。この火災がNOAA/NDVIに与えた影響については、火災の被害が多いピクセルを特定して時系列変化を検討した Idris ら¹⁹⁾の研究がある。本研究では、対象

図-5 NDVIの1982~1999年(1994年を除く)の変化。

(a)黒龍江省大興安嶺地区、(b)敖漢旗、(c)エジンホ旗、(d)エジン旗。

太線: 地域平均値, 点線: 地域最大値と最小値, 実線: 地域標準偏差

Fig. 5 Time series of the area-averaged value (solid line), maximum and minimum value (broken line), and standard deviation (bold line) of NDVI in (a) Daxing'anlin Diqu, (b) Aohan Banner, (c) Yijinhuoluo Banner, and (d) Ejina Banner between 1982 and 1999 (excluding 1994).

地の全ピクセルを平均した値を用いるので、火災によって1987年にはNDVIが例年より低い値を示すという影響があるものの、以後の年において影響はほとんど見られない。

また、図-5 aに示したNDVIの経年変化から、冬期に0.1~0.2程度に低下したNDVIは、夏期においては0.7を越える値となり、夏季に他の3地域に比較して顕著に高いNDVIを示していることが分かる。

赤峰市敖漢旗 (図-5 b) では、夏期において、NDVIの最大値と最小値の差が大きく、対象地域内にさまざまな状態の植生が存在していることが示唆される。また、前述したように約20%以上の農耕地が存在するため、冬季におけるNDVI平均値が他の地域より比較的大きいことが示されている。

エジンホ旗 (図-5 c) においては、NDVIは最大値でも夏期に0.4に到達せず、草地や疎な植生しか存在していないことを示す。赤峰市敖漢旗 (図-5 b) と比較してNDVIの最大値と平均値の差が小さい。

エジン旗のNDVI平均値は夏でも0に近い値で植生が乏しい場所であることに対応している。また、最大値はNDVIが0.3前後となっており、一部には植生が存在することを示している。図-5 dのNDVI最大値の季節変化から、対象地内には草地や耕地など、植生にある程度被われる地域も存在するものの、多くの地域の植生はきわめて貧弱であることが示唆される。

図-6 4 地域の NDVI 季節変化 (1982~1999 年の平均値 (1994 年を除く))。

(a) 黒龍江省大興安嶺地区, (b) 敖漢旗, (c) エジンホロ旗, (d) エジナ旗。

Fig. 6 Seasonal variation in NDVI averaged between 1982 and 1999 (excluding 1994) for (a) Daxing'anlin Diqu, (b) Aohan Banner, (c) Yijinhuluo Banner, and (d) Ejina Banner.

4.2.3 選定地域における NDVI の季節変化

選定地域における NDVI の年間季節変化を示すために 1982~1999 年の期間における月平均値を求め、図-6 に示した。選定した 4 地域の植生型に応じて、成長期には高い値を、非成長期には低い値を示すタイプ (森林、草原など)、一年を通じて低い値を示すタイプ (砂漠など) といった特徴が現れる³⁵⁻³⁸⁾。

4 地域の月毎の NDVI について経年変化で示したのが図-7

である。図-7 に示したように植生の成長がない期間 (1~3 月と 12 月) においては、NDVI の値が低く、年々変動も小さく、経年変化も認められない。一方、植生の成長期間では次第に値が大きくなる地域があり、その地域の植生変化が推測できる。

7, 8, 9 月の値は各地とも一年のうち大きい値を示し、図-5 と図-6 の季節変化で説明したように地域によりその値が異なるだけではなく、その年々変動と長期間を通じた増減は地域毎に異なる。

大興安嶺地区 (図-7 a) で、各月の NDVI の経年変化について見ると、7~9 月は長期的に変化する傾向は見られないが、4 月と 10 月に経年的に増加する傾向がある。植生状態に大きい変化はないが、温暖化等の影響で落葉樹の展葉時期 (4 月) が早くなり、落葉時期 (10 月) が遅くなっている可能性を示す結果である。

敖漢旗 (図-7 b) においては、5~9 月の NDVI 値に明確な増加傾向があり、その年々変動は比較的小さい。1982 年から 1999 年にかけて 7~9 月の NDVI は 0.2 程度増加している。

エジンホロ旗 (図-7 c) においては、7~9 月において NDVI は増加傾向を示す。しかし、敖漢旗と比較してその上昇は小さく、1982~1999 年の NDVI の増加は 0.1 程度である。

エジナ旗 (図-7 d) においては、どの月の NDVI にも明確な経年的増減の傾向は見られない。地域全体での植生劣化が進行しているとされるが、元々の NDVI 値が小さく図-7 の表示ではその減少が検出されにくいと考えられる。

敖漢旗とエジンホロ旗の 7~9 月に見られる明確な増加傾

図-7 4 地域の各月 NDVI 平均値の経年変化

(a) 黒龍江省大興安嶺地区, (b) 敖漢旗, (c) エジンホロ旗, (d) エジナ旗。

Fig. 7 Monthly variation in the time series data for the averaged NDVI for (a) Daxing'anlin Diqu, (b) Aohan Banner, (c) Yijinhuluo Banner, and (d) Ejina Banner.

向は、年々の変動が小さい単調増加であるので、これらの地域では1982～1999年に継続して植生増加が生じていたと判断される。

4.2.4 選定地域内の定点におけるNDVI増減の特徴

上記4地域の前期NDVI_{max}と Δ NDVIとの各ピクセルにおける関係を図-8に示す。NDVI_{max}が0.6～0.7の大興安嶺地区では Δ NDVIが0.05程度のばらつきを伴うものの0近傍に分布が集中しており、前期から後期にかけて森林植生が大きな変化なく維持されているという実態と対応している。NDVI_{max}が0.25～0.6の敖漢旗及び0.1～0.3のエジンホロ旗では、両地域のNDVI経年変化で明確な増加傾向が検出された(図-7b, c)という結果を反映し、敖漢旗の Δ NDVIはほぼ0.05以上の正側に分布しており、4.2.1に記した敖漢旗での耕地の増加と森林被覆率の増加^{23, 24)}との対応が示された。またエジンホロ旗の Δ NDVI分布のばらつきは大興安嶺地区と同程度であるが、敖漢旗については、前期NDVI_{max}も Δ NDVIも幅広く分布している。そして、前期NDVI_{max}が高い地域においては、 Δ NDVIが小さい傾向がある。

エジン旗においては、前期NDVI_{max}が0～0.25の分布を持つが、前期NDVI_{max}が0.05以下の範囲では Δ NDVIが0近傍に集中して分布しており、前期NDVI_{max}が0.05～0.25の範囲では Δ NDVIが他の3地域に比較して明瞭に負側に偏りがあることが示された。

図-7では、エジン旗の植生長期変化は不明瞭であるが、図-8より、NDVIが0.05以下のもともとほとんど植生のない地点はその状態に変化が少ない一方で、NDVIが0.05～0.25のある程度植生が存在する地点では植生減少を示す地点がかなり存在していると解釈される。

4.3 内蒙古自治区全域におけるNDVIの変化

内蒙古自治区全体での Δ NDVIを、図-8と同様の方法で前期NDVI_{max}と対比させた散布図を図-9に示す。図-9には右側に、 Δ NDVIの面積率(3.3で示した β_j の分布)も併せて示している。図-9から、図-4において前期NDVI_{max}の面積率が最も高かった0.0～0.05の領域においては、 Δ NDVIは0付近に集中して分布し、大きな変化が見られない。また、前期NDVI_{max}が二番目に高かった0.65～0.70の領域についても Δ NDVIの分布は集中しているが、 Δ NDVIは0.0～0.05に集中しており、正の傾向という結果である。その間の領域において、 Δ NDVIは幅広く分布しているが、分布は全体的に正側に偏っている。 Δ NDVIの面積率から、内蒙古全体では Δ NDVIは正の傾向にある。

前期NDVI_{max}をクラス毎に分けて Δ NDVIの面積率を示したのが図-10である(図-10(a)は3.3に説明する β_j 、図-10(b)～(e)は $\beta'_{i,j}$ の分布)。図-10から、前期NDVI_{max}のクラスによって、 Δ NDVIの面積率が変化していることが分かる。もともと植生が多い前期NDVI_{max}が0.6以上と最も高いクラス(図-10b)では、多くが Δ NDVI>0で増加傾向であるが Δ NDVIが0.025～0.05の割合が高く、0.05以上増加したところはむしろ少ない。前期NDVI_{max}が小さくなるにつれ(図-10c, d), Δ NDVI>0.05と Δ NDVI<-0.025の割合が

図-8 4地域における Δ NDVIと前期NDVI_{max}の関係。
(a)黒龍江省大興安嶺地区、(b)敖漢旗、(c)エジンホロ旗、(d)エジン旗

Fig. 8 Relationship between Δ NDVI and NDVI_{max} (averaged value of the maximum annual NDVI between 1982 and 1986) in (a) Daxing'anlin Diqu, (b) Aohan Banner, (c) Yijinhuoluo Banner, and (d) Ejina Banner.

図-9 内蒙古自治区内の Δ NDVIの分布と前期NDVI_{max}との関係。

右側に Δ NDVIの面積率も併せて示している。

β_j : 内蒙古自治区全域に対する Δ NDVIの面積率((2)式参照)。

Fig. 9 Relationship between Δ NDVI and NDVI_{max} (averaged value of the maximum annual NDVI between 1982 and 1986) throughout Inner Mongolia.

The frequency distributions of Δ NDVI are also shown.

β_j : Ratio of each Δ NDVI area in whole Inner Mongolia. See eq. (2) for β_j .

増え、棒グラフが示す山形の裾が広い。しかし、前期NDVI_{max}が最も低いクラス(図-10e)においては、 Δ NDVI>0.05の割合が小さく、 Δ NDVIが負の値(-0.05～0)を取る面積率が他のクラスに比較して顕著に高い。このように、 Δ NDVI>0で植生増加が、また Δ NDVI<0で植生減少が生じたと考えられる地域の出現割合には、もともとの植生状態

図-10 内蒙古自治区全域と前期 $NDVI_{max}$ で区分した $\Delta NDVI$ の面積率。

- (a) 内蒙古全域に対する $\Delta NDVI$ の面積率 (β_i , (2)式参照)
 (b) $0.6 < NDVI_{max} < 0.8$ の地域における $\Delta NDVI$ の面積率 ($\beta'_{i,1}$, (3)式参照)
 (c) $0.4 < NDVI_{max} < 0.6$ の地域における $\Delta NDVI$ の面積率 ($\beta'_{i,2}$)
 (d) $0.2 < NDVI_{max} < 0.4$ の地域における $\Delta NDVI$ の面積率 ($\beta'_{i,3}$)
 (e) $0.0 < NDVI_{max} < 0.2$ の地域における $\Delta NDVI$ の面積率 ($\beta'_{i,4}$)

Fig. 10 Ratio of each $\Delta NDVI$ area.

- (a) Ratio of each $\Delta NDVI$ area in whole Inner Mongolia; β_i ; See eq. (2) for β_i .
 (b) Ratio of each $\Delta NDVI$ area in the range of $0.6 < NDVI_{max} < 0.8$; $\beta'_{i,1}$; See eq. (3) for $\beta'_{i,1}$.
 (c) Ratio of each $\Delta NDVI$ area in the range of $0.4 < NDVI_{max} < 0.6$; $\beta'_{i,2}$.
 (d) Ratio of each $\Delta NDVI$ area in the range of $0.2 < NDVI_{max} < 0.4$; $\beta'_{i,3}$.
 (e) Ratio of each $\Delta NDVI$ area in the range of $0.0 < NDVI_{max} < 0.2$; $\beta'_{i,4}$.

による差が見られる。

図-8の結果から、現地資料によって植生がほとんど変化していないとされている大興安嶺地区でも、 $\Delta NDVI$ が ± 0.05 程度の幅をもって分布していることから、植生変化について明確なシグナルを検出するためには、 $\Delta NDVI$ についてその正負のみで論ずるのではなく、ある程度の閾値を設けて検討することが必要だと考えられる。

図-11では、設定した閾値を越えて $NDVI$ が増減した面積について、3.3で示した $NDVI$ 毎の $NDVI$ 増減面積率 γ_i を棒グラフで、 $NDVI$ が該当する範囲に含まれる面積に対する $NDVI$ 増減面積率 δ_i を折れ線グラフ図示した。まず、設定した閾値は大興安嶺林地区の $\Delta NDVI$ の範囲 (ほぼ ± 0.05) より、 ± 0.05 である。その結果、図-11の黒い棒グラフが示すように植生減少を意味する $\Delta NDVI$ が負の地域はわずかで、植生増加を意味する $\Delta NDVI$ の正の地域は $\Delta NDVI$ が負

図-11 前期 $NDVI_{max}$ と $NDVI$ が変化した面積率の関係。

(a) $NDVI$ 増加域, (b) $NDVI$ 減少域

$\Delta NDVI$: 増減域集計の閾値。

γ_i : 内蒙古自治区全域の前期 $NDVI_{max}$ 面積に対する $NDVI$ が増加 (減少) した面積割合 ((4)式参照), 棒グラフ表示。

δ_i : 前期 $NDVI_{max}$ 毎の面積に対する $NDVI$ が増加 (減少) した面積の割合 ((5)式参照), 折れ線グラフ表示。増加域判定の閾値は 0.05, 減少域の閾値は -0.005 と -0.05 の結果を表示。

Fig. 11 Frequency distributions of areas in which $NDVI$ changed with $NDVI_{max}$.

(a) area in which $NDVI$ increased. (b) area in which $NDVI$ decreased.

$\Delta NDVI$: Threshold value of $\Delta NDVI$.

γ_i : Ratio of area in which $NDVI$ increased (decreased) in whole Inner Mongolia to each $NDVI_{max}$ class.

δ_i : Ratio of each $NDVI_{max}$ class area to that in which $NDVI$ increased (decreased).

Threshold value of 0.05 identifies the area in which $NDVI$ increased, and both -0.05 and -0.005 identify that in which $NDVI$ decreased.

の地域に比べて高い面積率となった。図-11 a から、 $\Delta\text{NDVI} > 0.05$ の地域は、 γ_i と δ_i の両指標とも前期 $\text{NDVI}_{\max}$ が中程度 (0.2~0.6) の地域において出現の面積率が高いことが分かる。もともと著しく植生の乏しい所 ($\text{NDVI}_{\max}$ が 0.2 以下) や森林に覆われた所 ($\text{NDVI}_{\max}$ が 0.6 以上) ではなく、その中間の比較的疎な植生であった所で主に植生が増加したと見られる結果である。

それに対して、 $\Delta\text{NDVI} < -0.05$ の地点は少なく、前期 $\text{NDVI}_{\max}$ に対する γ_i と δ_i の分布の傾向も必ずしも明らかではない。そこで、 ΔNDVI の負側を更に検討するため -0.005 とする閾値を設定し、図-11 b にその γ_i の分布を斜線の棒グラフで示した。この閾値は、0.05 を閾値として得られた ΔNDVI が正の地域と該当面積がほぼ等しくなる水準として選択した。閾値を -0.005 として求めた NDVI の減少地点についての γ_i は、図-4 で示される内蒙古全体での前期 $\text{NDVI}_{\max}$ の面積率 α_i と一見似た分布を取っているように見える。これは、 -0.005 という負側の閾値の小ささから、ノイズなどにより NDVI 全体に現れる変動であると理解されるかもしれない。しかしながら、 NDVI 増減の面積率を示す γ_i ではなく、 δ_i に着目すると、図-11 b の -0.005 を閾値とした δ_i の値は一律ではなく、前期 $\text{NDVI}_{\max}$ が 0.05~0.1 で高く、0.65~0.75 で低いという結果である。これは閾値を小さく設定した条件での結果であり、植生増加域の特徴ほど明瞭であるとはいえないが、前期 $\text{NDVI}_{\max}$ が 0.05~0.1 のかなり植生が乏しい地域において、現存量が小さく疎な植生が更にその被度を低下させるなどの植生減少が比較的広い面積で生じた可能性が δ_i の折れ線グラフから想定される。

なお、有意な NDVI 変化を判断する閾値の設定は、ここで用いた ΔNDVI ではなく、 $\Delta\text{NDVI}/\text{NDVI}$ を用いる文献¹⁾もある。 NDVI は定義により 0 や負の値をとることもあるので、本研究では NDVI を分母とする閾値の設定を採用していないが、分数型の閾値の設定は NDVI が低いところでは ΔNDVI の閾値は NDVI に比例した小さい値を取ることに相当する。 -0.005 という小さい値の閾値の設定により

$\text{NDVI}_{\max}$ が低く植生が乏しいところにおいて植生減少が検出された結果は、分数型の閾値の設定によると単一の閾値設定で検出されるものと思われる。

4.4 内蒙古自治区における植生変化

以上の検討に基づいて ΔNDVI が正のピクセルについては 0.05、負のピクセルについては -0.005 の閾値を用いて植生が増減した地域を抽出し、図化したもの ($\Delta\text{NDVI} < -0.05$ の地域も表現) を図-12 に示す。図-12 から、 ΔNDVI が正の値を取る地域 (図-12 a) と、負の値を取る地域 (図-12 b) の分布域は明らかに異なる。図-12 a から $\Delta\text{NDVI} > 0.05$ の地域は、内蒙古の南側を東部から北東部にかけてまとまった面積で存在しており、赤峰市の敖漢旗を中心とした地域で顕著に ΔNDVI の値が大きいことが見られる。この他にまとまって ΔNDVI が正の大きい値を取る地域を具体的に記すと東から、通遼市 (元・哲里木盟)、シリンゴル (錫林郭勒) 盟、フフホト市、バヤンヌール市のそれぞれ一部となる。なお、バヤンヌール市の ΔNDVI が正の値を取る地域は、主に河套灌漑区とその周辺である。

図-12 b から内蒙古内で $\Delta\text{NDVI} < -0.05$ 、及び $-0.05 < \Delta\text{NDVI} < -0.01$ の地域は、 ΔNDVI が正の地域と比較して、個々が小さな面積であるが、内蒙古東北地域となるフルンベル砂地、シリンゴル盟の北部となる草原ステップ及びホルチン砂地の北部などに分布する。そして、 $\Delta\text{NDVI} < -0.05$ の地域は、 $-0.05 < \Delta\text{NDVI} < -0.01$ の地域がその近傍に囲むように存在していることが多く、ある程度の広がりを持ってこれらの地域で植生が減少したことが抽出されている。また、 $-0.010 < \Delta\text{NDVI} < -0.005$ の地域については、大まかな傾向として内蒙古の西部の砂漠地域周辺 (アラシャ盟) での連続した分布が目立つ。図-11 b の δ_i の結果とともに、 ΔNDVI が負の傾向がある地域がもともと植生の乏しい乾燥地に比較的多く抽出されたことは、乾燥地やもともと植生の乏しい地域における砂漠化や植生劣化の進行を示唆すると考えられる。

内蒙古自治区の周辺において、内蒙古の南西側 (甘蘇省、

図-12 ΔNDVI の (a) 正域 (閾値: $+0.05$) と (b) 負域 (閾値: -0.005) の分布。

Fig. 12 Distribution of the (a) increased ΔNDVI (>0.05) and (b) decreased ΔNDVI (<-0.005).

青海省³⁹⁾、陝西省など)に ΔNDVI が負の地域が多く示される結果となった。しかし内蒙古自治区外については、この図に示された結果と実際の植生変化の比較検討作業は今後の課題として、本研究では立ち入らない。

4.5 統計資料との比較

これまでに述べたように内蒙古自治区において、 ΔNDVI が0.05以上の地域はNDVIが0.2~0.6の草地や耕地が多い。NDVI増加は、緑化事業や草地や耕地の増加による場合に加えて Myneni et al¹⁾が指摘する地球温暖化がもたらす光合成の活発化や葉面積の増加による場合も考えられる。どちらが内蒙古自治区におけるNDVI増加をもたらした主因となっているかの検討が必要である。そこで、行政区(2万~20万 km^2 のスケール)でのNDVI増加面積と造林面積、耕地化面積の統計データを対比し、「両者の相関が高ければ、NDVI増加に与える緑化と耕地化による人為的な植生増加の影響が大きく、相関が低ければ気候変化など他の影響が大きい」との仮説を設け、検討を加えた。

内蒙古統計年鑑(1989~2000)²³⁾及び内蒙古年鑑(1999~2000)²⁴⁾に基づいて、1989~1999年の間の造林面積と耕地化面積を求め、 ΔNDVI により植生の増加($\Delta\text{NDVI}>0.05$)がみられた面積とともに各行政区毎に集計した結果が表-1である。ここで造林面積とは、各年の造林面積を期間で合計した値であり、耕地化面積は1999年時点での耕地面積から1989年時点での耕地面積を引いた値である。造林面積と耕地化面積の大小には行政区の広さも影響するので、表-1にはそれぞれの面積率も示した。

表-1における造林・耕地化面積率と $\Delta\text{NDVI}>0.05$ の値を取る面積率の関係を図-13に示す。図-13で、各行政区の造林面積率、耕地化面積率それぞれと $\Delta\text{NDVI}>0.05$ の面積率の対応関係は明瞭ではないが、造林面積率と耕地化面積率の

合計は良好な対応関係が示される。各行政区による造林面積と耕地化面積を合計した面積率と ΔNDVI により抽出された植生増加地域の面積率の間に、図-13に示す原点を通る直線関係が見られたことは、①内蒙古における植生増加は緑化活動と農地の拡大による³⁹⁻⁴²⁾、という報告に対応し、②0.05を

図-13 内蒙古自治区の行政区毎の造林・耕地化面積率と ΔNDVI の増加した面積率($\Delta\text{NDVI}=0.05$)の関係。

Fig. 13 Relationships between both the ratio of afforested and the ratio of newly cultivated areas between 1989 and 1999 to the area in which ΔNDVI increased (>0.05) in each administrative district of Inner Mongolia.
×: afforested area ratio. □: newly cultivated area ratio. ●: afforested area ratio and newly cultivated area ratio.

表-1 内蒙古自治区の各行政区における造林・耕地化面積とNDVIの増加した地域の面積

Table 1 Areas of afforestation and new cultivation between 1989 and 1999, and area of increased ΔNDVI (>0.05) in each administrative district of Inner Mongolia.

行政区名	総面積 km^2	造林面積 (1989~1999年)		耕地化面積 (1989~1999年)		造林, 耕地化 面積率の合計 %	NDVI増加 地域の面積	
		km^2	%	km^2	%		km^2	%
アラシャ(阿拉善)盟	270,200	412	0.2	94	0.0	0.2	4,539	1.7
フルンベル(呼倫貝爾)市	253,000	1,366	0.5	6,722	2.5	3.1	26,003	9.8
シリングル(錫林郭勒)盟	202,600	1,049	0.5	1,022	0.5	1.0	30,088	14.9
赤峰市	90,000	9,459	10.5	2,704	3.0	13.5	37,545	41.6
オルドス(鄂尔多斯)市	86,800	7,725	8.9	2,580	3.0	11.9	14,331	16.5
バヤンヌール(巴彥淖爾)市	64,400	1,929	2.9	2,896	4.4	7.3	12,969	19.7
興安盟	59,800	2,694	4.5	2,487	4.2	8.7	14,914	24.9
通遼市	59,500	7,527	12.6	2,520	4.2	16.9	34,044	57.2
ウランチャブ(烏蘭察布)市	55,000	5,045	9.3	-1,705	-3.1	6.1	18,805	34.5
包頭市	27,700	832	3.0	2,513	9.0	12.0	6,874	24.8
フフホト(呼和浩特)市	17,200	1,322	7.7	4,229	24.5	32.1	15,044	87.1
計	1,183,000	39,360	3.3	26,062	2.2	5.5	203,224	17.2

注: NDVI増加面積は、 $\Delta\text{NDVI}=0.05$ の閾値を用いて算出。造林面積及び耕地化面積は、文献^{23, 24)}による。

閾値とした NDVI 増加地域の抽出結果は、広域において緑化活動と農地の拡大が生じた行政区単位での緑化面積と耕地化面積の統計値と対応し、植生変化の実態を示すという結果である。温暖化が NDVI に与える影響は、4.2.3 で述べたように大興安嶺地区の 4 月、10 月の値の増加などに現れているが、内蒙古自治区における植生増加地域の抽出においては主要な要因となっていないと考えられる。

図-13 に示された NDVI 増加傾向と造林面積率と耕地化面積率の合計との良好な対応関係から、敖漢旗地域において顕著的な植生増加が示されたのは、造林事業及び耕地化による植生被覆率の増加であると指摘できる。この他に東から、通遼市（元・哲里木盟）、シリングル（錫林郭勒）盟、フフホト市、バヤンヌール市のそれぞれ一部で NDVI が増加しているがこれらも同様の植生変化であると判断できる。そして、バヤンヌール市で Δ NDVI が正の値を取る河套灌漑区とその周辺の地域では、黄河引水による農耕地の拡大による土地利用変化と対応していると考えられる。

また、植生減少傾向が反映されたのは、主に内蒙古東北地域となるフルンベル砂地、シリングル盟の北部となる草原ステップ及びホルチン砂地の北部などに分布する。これらの地域においては、既往研究及び統計資料に示された砂漠化の進行された地域との対応もみられた。よって、本研究の解析手法に基づいた結果、植生劣化の傾向がみられる地域は、もともと植生被覆率の低い砂漠周辺域で砂漠化が進行した結果であるという実態が示された。

なお、造林・耕地化面積率と Δ NDVI が正の値を取る面積率では、 Δ NDVI が正の値を取る面積率の方が約 3 倍である（図-13）。この差異は、 Δ NDVI が正の値を取る面積の集計が 1 ピクセル（約 8 km 分解能）毎であることによると考えられる。 Δ NDVI の集計では、8 km 分解能の領域の一部で植生が増加し NDVI の増加があるとき、その領域全体の面積が集計されるからである。両者が 3 倍異なるという結果は内蒙古において地域に関わらず平均的に 8 km 分解能のピクセルに対応する領域の約 1/3 で造林、耕地化等の植生増加が生じていると考えられ、内蒙古において 8 km 分解能の NOAA/AVHRR の NDVI から求めた植生増加地域の面積を実面積に換算する目安が得られたことを意味している。

5. まとめ

本研究では、NOAA/AVHRR による衛星データから求められた NDVI を用いて中国内蒙古自治区の半乾燥・乾燥地での砂漠化及び緑化事業や農地開発による植生変化について、以下の知見を得た。

内蒙古全域においては 1980 年代から 1990 年代にかけて NDVI が増加した地域が減少した地域より多い。また、0.05 を閾値として求めた Δ NDVI が正となる地域の面積は、統計資料に基づいて集計した行政区毎の造林地と耕地化された面積の合計と良好に対応し、内蒙古における植生増加が主に 1980 年代の前半からの緑化事業及び農耕地の拡大によって植生の被覆率の増加をもたらしたことを示した。

例えば、植林事業成果をあげたとされる敖漢旗では、NDVI が年とともに増加する明瞭な傾向が示された。総じて、植生が増加した地域は、赤峰市、中でも敖漢旗が顕著で、その他では通遼市、シリングル盟、フフホト市、バヤンヌール市の一部でまとまって増加した場所がある。

一方で、植生減少が生じたと抽出された場所は、主に内蒙古西部の砂漠地域周辺（アラシャ盟）及び東北（ホルチン砂地）地域に分布する。もともと植生が乏しい地域で 8 km 分解能の NOAA/AVHRR データで植生の減少を抽出することは植生増加域の抽出に比べ困難であるが、植生の劣化があるエジナ旗では、 Δ NDVI が -0.005 以下となる傾向がピクセル単位の集計で示されるとともに、植生減少が生じた地域として抽出された。このような地域では NDVI 変化が小さなレベルにとどまる植生減少の影響が、砂漠化に直結するという意味で注意深く解釈する必要があり、今後より詳細なモニタリングが必要である。

また、本研究では温暖化の影響による植生変化について気象記録と対比した検討を行っていないが、大興安嶺林などの森林地域では、温暖化によって植生の展葉・落葉時期に変化が生じ、生長期が長くなっている可能性が指摘できた。しかし、内蒙古自治区全体の植生変化においては、人為的な要因による植生増加が主体であることが示された。

注釈：既往文献による内蒙古の植生変化の概要

20 世紀末から 21 世紀初頭にかけての中国における砂漠化は、「三つの増加、二つの減少、一つの転化」であるとされる⁽⁴³⁾。ここで、増加とは①土壌が流失する面積の増加、②砂漠化土地の面積の増加、③劣化した草地の増加を示しており、減少は①耕地の減少、②湿潤地の減少を、転化は林地が灌木林や疎林、草地に変えられてしまったことを指している。このような状況を背景に、過去 10 年間で中国の環境保護への投資は大きく増加し、2005 年には同年 GDP の 1.31 % に相当する 2,388 億元に達した。それに応じて、植林などによる植生の増加について、中国全体では 1990 年代の年平均造林面積は 4 万 km² であり^(44,45)、中国全体の森林被覆率は 1949 年の 8.6%、1978 年の 12.7% から 2007 年には 18.2% に達し、砂漠化拡大の勢いは鈍化していると報告され^(46,47)ている。

内蒙古自治区では、植生劣化について、1950 年代以降に過耕作や過放牧、過伐採などによる砂漠化の進行が指摘され、1978 年から 1987 年にかけて耕作地面積が 15.4% 減少した⁽⁴⁸⁻⁵⁰⁾とされる。しかし、その後 1987 年から 1996 年にかけて逆に 22.1% 増加の報告⁽⁵¹⁾がある。

内蒙古自治区においては、1978 年から始まった三北保護林政策が 2000 年までに第 3 期を終え、一定の効果をあげてきたことが報告されている⁽⁵²⁾。三北保護林政策によって内蒙古における 2 万 km² の耕地、2.1 万 km² の草原が保護され、ホルチン砂地と毛烏素砂地という 2 大砂地における森林被覆率はそれぞれ 20% と 15% 以上に達した。

また、内蒙古全域の森林被覆率が 1947 年の 7.7% から

2006 年の 17.6% まで上がり、当初から 2006 年までに約 20.7 万 km² の緑化事業と造林事業を進めたと報告され⁴⁵⁾、森林面積と人工林面積が全国一位となった。しかしながら、三北保護林の造林面積に関して異論もあり、活着率がわずか 40% 程度であるとする報告もある⁵³⁾。ホルチン砂地では 1980 年代以降に 5,472 km² の緑化が行われたとされるが、逆に同期間に砂漠化したとされる土地面積はその 2.5 倍であるという報告⁵³⁾や、三北保護林政策の重点区域内における植生の状態に関しては継続的な悪化も指摘されている⁵⁴⁾。

これらの文献から、近年の緑化事業の進展は伺えるが、内蒙古自治区内で緑化が進んだ主要地域や、植生劣化が引き続き生じている地域との位置関係などの情報が乏しく、リモートセンシング情報を用いた解析を本研究で行った。

謝辞：本研究を進める上で、Muhamad Husni Idris 博士にはデータ整理などを行う上で大きな助力を頂いた。東京大学大学院農学生命科学研究科の大手信人准教授、および内蒙古自治区農業大学林学院の王林和教授には貴重な助言を頂いた。筆頭著者は東燃国際奨学財団の奨学金を得て研究を進めた。また、本研究の一部は文部科学省グローバル COE プログラム（自然共生社会を拓くアジア保全生態学）の支援を受けた。ここに記して謝意を表します。

引用文献

- 1) Myneni, R.B., Keeling, C.D., Tucker, C.J., Asrar, G. and Nemani, R.R. (1997) Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991. *Nature*, 386: 698-702.
- 2) 酒井秀孝・鈴木力英・近藤昭彦 (2008) 衛星データによる近年の東シベリアにおける植生変化のシグナル抽出, 水文・水資源学会誌, 21(1): 50-56.
- 3) Ma, M.G., Dong, L.X., and Wang, X.M. (2003) Study on the dynamically monitoring and simulating the vegetation cover in northwest China in the past 21 years. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 25(2): 232-236. (in Chinese with English abstract).
- 4) 日本リモートセンシング研究会 (1994) 図解リモートセンシング, 日本測量協会, pp. 226.
- 5) Wang, H., Li, X.B., Li, X. and Ying, G. (2007) The variability of vegetation growing season in the northern China based on NOAA NDVI and MSAVI from 1982 to 1999. *Acta Ecologica Sinica*, 27(2): 504-515. (in Chinese with English abstract).
- 6) 秋山侃・川村健介 (2003) 内蒙古草原の植生変化・土地劣化, システム農学, 19(3): 12-22.
- 7) Wang, Q., Tenhunen, J.D. (2004) Vegetation mapping with multitemporal NDVI in North Eastern China Transect (NECT). *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 6: 17-31.
- 8) Kang, M.Y., Liu, S., Huang, X.X., Dong, S.K. and Shi, P.J. (2005) Evaluation of an ecological security model in Zhaltu Banner, Inner Mongolia. *Mountain Research and Development*, 25(1): 60-67.
- 9) 巖 網林・宮坂隆文 (2005) 衛星データによる砂漠化進行の時系列分析と農業政策による影響の考察—中国内蒙古自治区ホルチン砂地を事例として—, 総合政策学ワーキングペーパーシリーズ, 65: 1-19.
- 10) Brogaard, S., Runnström, M., Seaquist, J.W. (2005) Primary production of Inner Mongolia, China, between 1982 and 1999 estimated by a satellite data-driven light use efficiency model. *Global and planetary change*, 45: 313-332.
- 11) Tan, K., Piao, S.L., Peng, C.H. and Fang, J.Y. (2007) Satellite-based estimation of biomass carbon stocks for north-east China's forests between 1982 and 1999. *Forest ecology and management*, 240: 114-121.
- 12) 馬世威・馬玉明・姚洪林・王林和・姚雲峰 (1998) 沙漠学, 内蒙古人民出版社, pp. 350-362.
- 13) Zhou, H.S., Shen, J.J., Jiang, Y. and Li, T.B. (2002) Desertification distribution, dynamic and influence on the ecological environment in western China. *Journal of desert research*, 22(2): 112-117. (in Chinese with English abstract).
- 14) Bartholome, E., Belward, A.S. (2005) GLC 2000: a new approach to global land cover mapping from Earth observation data. *International Journal of Remote Sensing*, 26(9): 1959-1977.
- 15) Global vegetation Monitoring (GVM) の web サイト, <http://www.tem.jrc.it/glc2000/defaultGLC2000.htm>
- 16) Holben, B.N. (1986) Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 7(11): 1417-1434.
- 17) James, M.E., Kalluri, S.N.V. (1994) The Pathfinder AVHRR land data set: An improved coarse resolution data set for terrestrial monitoring. *International Journal of Remote Sensing*, 15(17): 3347-3363.
- 18) NASA/GSFC の web サイト, (<http://daac.gsfc.nasa.gov/>), 及び ftp サイト, http://daac.gsfc.nasa.gov/CAMPAIGN_DOCS/LAND_BIO/GLBDST_Data.html と ftp://daac.gsfc.nasa.gov/data/avhrr/global_8km/
- 19) Idris, M.H., Kuraji, K. and Suzuki, M. (2005) Evaluating vegetation recovery following large-scale forest fires in Borneo and northeastern China using multi-temporal NOAA/AVHRR images. *Journal of Forest Research*, 10: 101-111.
- 20) Wang, J., Geng, X.M., Ji, L.Z. and Khomutova, M. (2007) Relationships between forest insect pest occurrence area and meteorological factors in Great Xing'an Mountains of Heilongjiang Province, Northeast China. *Chinese Journal of Ecology*, 26(5): 673-677. (in Chinese with English abstract).
- 21) 吉良竜夫 (2001) 森林の環境・森林と環境—地球環境問題へのアプローチ, 新思索社, pp. 204-209.
- 22) 内蒙古自治区地図制印院 (2006) 内蒙古自治区地図冊, 中国地図出版社出版社, pp. 92-171.
- 23) 内蒙古自治区統計局 (1989-2000) 内蒙古統計年鑑, 中国統計出版社.
- 24) 内蒙古自治区人民政府 (2000) 内蒙古年鑑 1999-2000, 方志出版社.
- 25) 「伊金霍洛旗志」編集委員会 (1997) 伊金霍洛旗志, 内蒙古人民出版社.
- 26) 額爾德尼・方亮 (2000) 伊金霍洛旗生態環境建設項目 2000 年度實施方案, 内蒙古農業大學卒業論文集, pp. 1-19.
- 27) 国家林業局 (2008) 中国林業与生態建設狀況公報, 国家林業局.

- 28) Borjigin, H. (2008) 持続可能な環境保護の原点とは—エジンホロ旗の環境保護を事例に—, 沙漠誌ノート, 5: 11-18.
- 29) 小長谷有紀・シンジルト・中尾正義 (2005) 中国の環境政策生態移民—緑の大地, 内モンゴルの砂漠化を防げるか?, 昭和堂, pp. 70-71.
- 30) 王 根緒・程 国棟・沈 永平 (2002) 近 50 年来河西走廊区域生態環境变化特征与綜合防治对策, 自然資源学報, 17(1): 78-86.
- 31) Taogerile (2002) Research on rehabilitation and protection of ALXA sagsaoul forest. Inner Mongolia Environmental Protection, 14(4): 24-26. (in Chinese with English abstract).
- 32) Liu, Z.L., Zhu, Z.Y. and Hao, D.Y. (2001) The study of oasis ecosystem damage and conservation in the lower reaches of Black River (Erginar River). Journal of Arid Land Resources and Environment, 15(3): 1-7. (in Chinese with English abstract).
- 33) Kong, F.H., Li, X.Z. and Yin, H.W. (2004) Landscape change on burned blanks in Daxing'an Mountains. Journal of Forestry Research, 15(1): 33-38. (in Chinese with English abstract).
- 34) 曹 春香・中根周歩・妹尾俊夫 (2000) NOAA/AVHRR データによる中国大興安嶺森林大火災跡地の植生の回復診断, 日本生態学会誌, 50: 1-11.
- 35) Ma, M.G. and Veroustraete F. (2006) Reconstructing pathfinder AVHRR land NDVI time-series data for Northwest of China. Advances in Space Research, 37: 835-840.
- 36) Tateishi, R. and Ebata, M. (2004) Analysis of phenological change patterns using 1982-2000 Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) data. International Journal of Remote Sensing, 25(12): 2287-2300.
- 37) Chen, X.W., Tateishi, R. and Wang, C.Y. (1999) Development of a 1-km landcover dataset of China using AVHRR data. ISPRS Journal of photogrammetry and Remote Sensing, 54: 305-316.
- 38) Li, X.B. and Shi, P.J. (1999) Research on regulation of NDVI change of Chinese primary vegetation types based on NOAA/AVHRR data. Acta botanica sinica., 41(3): 314-324. (in Chinese with English abstract).
- 39) Dai, J.G., Guo, W.Q. and Yang, T.B. (2006) An analysis of grassland change and human factor function in headwater region of Yellow River based on NOAA-AVHRR data. Scientific and Technological Management of Land and Resources., 1: 109-112. (in Chinese with English abstract).
- 40) 張 文明 (2004) 中国“三北”保護林体系建設総体規画, 森林与人類, 1(3): 13-14.
- 41) Song, F., Ma, G.Q. (2004) New ideas on construction of the “Three north” shelterbelt system—About the planning for the forth phase of the “Three north” shelterbelt construction programme. Forest resources management, 2(1): 1-7. (in Chinese with English abstract).
- 42) Chu, W.D. (2005) Discussion on ecological and economic benefits of the “Three north” shelterbelt system construction. Forest resources management, 3(7): 25-28. (in Chinese with English abstract).
- 43) 王 林和・三木直子・李 玉靈・楊 靈麗・吉川 賢 (2008) 中国の砂漠化防止に関する歴史及び現在, 日本緑化工学会誌, 33(4): 554-560.
- 44) Ge, Q.S., Zhao, M.C., Zhang, X.Q. and Zhen, J.Y. (2001) Statistical analysis about the changes of forest resource and precipitation in China over the past 50 years. Journal of Natural Resources, 5: 413-420. (in Chinese with English abstract).
- 45) 国家林業局 (2007) 2007 中国林業發展報告, 中国林業出版社.
- 46) 中国人民共和国国务院新聞弁公室 (2006) 中国環境保護白書 (1996-2005), 中国人民共和国国务院新聞弁公室.
- 47) 中華人民共和国年鑑編集部 (2000) 中華人民共和国年鑑 (2000 年総第 20 期下巻), 中華人民共和国年鑑社.
- 48) 根本正之・福原道一・陳 佐忠・程 心俊 (1988) 中国北部における砂漠化の現状と衛星データによる解析, 農環研報, 6: 75-97.
- 49) Zhu, Z.D., Wang, T. (1993) Trends of desertification and its rehabilitation in China. Desertification Control Bulletin., 22: 27-29.
- 50) Zha, Y., Gao, J. (1997) Characteristics of desertification and its rehabilitation in China. Journal of Arid Environments., 37(3): 419-432.
- 51) Yang, H., Li, X. (2000) Cultivated land and food supply in China. Land Use Policy., 17(2): 73-88.
- 52) 劉 建新・馬 瑞萍 (1999) 中国内蒙古における生態系環境の改善, 立命館産業社会論集, 35(3): 85-96.
- 53) Zhang, L.X., Song, Y.Q. (2003) Efficiency of the three-north forest shelterbelt program. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 39(4): 595-600. (in Chinese with English abstract).
- 54) Miao, P. (2005) The systematic defect of “Three North Project”. Protection Forest Science and Technology, 64: 48-49. (in Chinese with English abstract).

(2009. 9. 28 受理)