

衛星リモートセンシングによる中国内モンゴル自治区における 植生変動とその要因解析

布和宝音・近藤昭彦

1. はじめに

毎年の春季にユーラシア大陸を発生源として日本に飛んでくる黄砂は広く知られている。中国では黄砂発生時には周辺の大都市において呼吸器科受診者数が増加している (Chen et al., 2007)。また、黄砂の多発生時期に慢性閉塞性肺疾患の入院者数の増加が時期的に一致したことが報告されている (蘇雅拉ほか, 2010)。このように黄砂は発生源周辺で人々の健康に影響しているだけではなく、発源地から離れた地域まで運ばれ人々の健康に影響を与えている。例えば、朝鮮半島で黄砂が人々の健康に影響を及ぼしているとの報告がある (Kwon et al., 2002)。日本にも黄砂に付着した有害物質が喘息症状に悪影響を与える可能性があるとの指摘されている (渡辺, 2008)。また、田畑の破壊などにより大きな経済的な損失を被ることと、黄砂発生時の視界不良による航空機の欠航・遅延などの経済的な被害が知られている (三上, 2007; 真木, 2003)。

1950年代以降、中国では大規模な草原開墾が数回にわたって行われた (烏蘭図雅, 2000; 小長谷ほか, 2005)。特に1980年代以降は、生産責任制および土地請負制などの実施が農家の生産意欲を向上させ、過放牧・過耕作をもたらした (巴図, 2006; 梁, 2010)。額爾德尼ほか (2009) は NOAA/AVHRR データによる1980年代から1990年代にかけての NDVI (正規化差植生指数, 後述) の増加が造林地面積と耕地化された面積の合計と良く対応していることを報告している。中国では1990年代から持続可能な発展を目指し、2000年以降は沙漠化・環境問題を重視するようになった (梁, 2010)。2000年以降、内モンゴル自治区では、生態移民 (小長谷ほか, 2005)、退耕還林還草、新三牧 (巴図, 2007) などの環境保護政策が実施されているが、一方で内モンゴル自治区全域が西部大開発の対象地域ともなっている。従って、2000年以降の土地被覆変化は社会経済的要因による影響を強く受けられていると考えられる。実際に2000年以降の土地被覆変化を空間的に把握することができれば、2000年以降に実施された環境保護政策の成果を確認することができ、また今後の政策の基本資料として活用することができると考えられる。

近年の広域の土地被覆変化は衛星リモートセンシングによる植生変動解析を通して把握することが可能である。ただし、その植生変動には自然要因と人間要因の二つ要

因が含まれている。よってこれらの二つの観点を持つことが重要である (例えば近藤, 2004)。そこで本研究では衛星リモートセンシングを用いて中国内モンゴル自治区における農業的土地利用の変化を含む植生変動を、特に2000年以降について明らかにし、統計資料および気象データと組み合わせて、変動の要因を気候要因と人間要因の二つの側面から理解することを目的とする。

2. 対象地域

図1に研究対象地域の概要を示す。内モンゴル自治区はユーラシア大陸の中東部、中国の北部に位置し、北はモンゴル、ロシアと国境を接している。北東から南西方向に細長く伸び、中国の東北、華北、西北の三つの地区にまたがる。概ね東経97°10'~126°09', 北緯37°24'~53°20'の範囲に位置し、東西の直線距離はおおよそ2400 km, 南北は1700 km, 面積は118.3万 km²である。自治区の下位には盟あるいは市と呼ばれる12の地区級行政区があり、その下位に合計101の旗・県・市・区という県級行政区がある (52の旗, 17の県, 11の県級市, 21の区)。内モンゴル自治区の2011年現在の総人口は2481.7万人である (内モンゴル統計年鑑, 2012)。

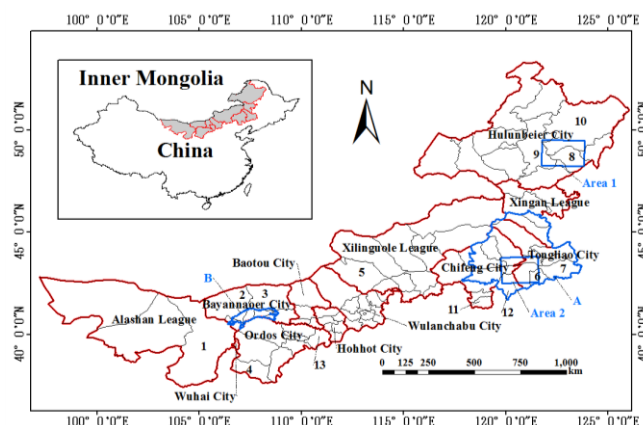


図1. 研究対象地域 1. アラ善左旗 2. 烏拉特後旗 3. 烏拉特中旗 4. 鄂托克前旗 5. 蘇尼特右旗 6. 庫倫旗 7. 科爾沁左翼後旗 8. 阿榮旗 9. 牙克石市 10. 鄂倫春自治旗 11. 寧城県 12. 敖漢旗 13. 準格爾 A. 科爾沁 (ホルチン) 地域 B. 河套平原

図2に内モンゴル自治区の植生分布を示す。植生図によると内モンゴル自治区の植生は西から東へ荒漠、ステップ、草本雑草群落、低木樹林、広葉樹林、針葉樹林の順で分布している。その中で栽培地は黄河に沿う平原である河套平原および大興安嶺山脈の南斜面の平野の比較的水資源の豊富な地域に分布していることがわかる。中部の多くの地域はステップ地域であり、ステップと草本

雑草群落地域を合わせると約半分の面積を占める。

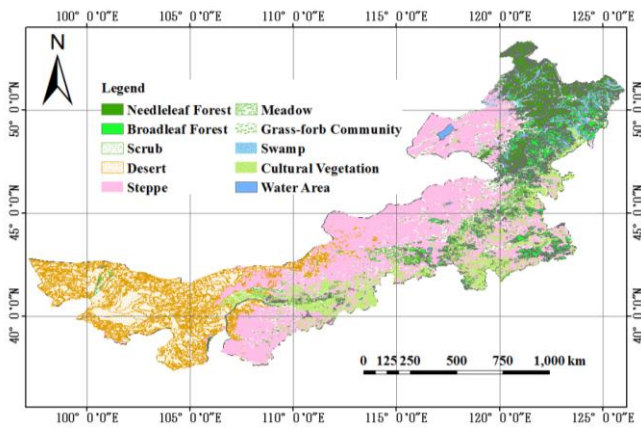


図 2. 内モンゴル自治区植生図

3. 使用データ

3.1. SPOT VEGETATION

SPOT VEGETATION はフランスが打ち上げた SPOT 衛星に搭載された地球観測センサーである。青 (B0, 0.43 μm ~ 0.47 μm), 赤 (B2, 0.61 μm ~ 0.68 μm), 近赤外 (B3, 0.78 μm ~ 0.89 μm), 短波長赤外 (SWIR, 1.58 μm ~ 1.75 μm) の 4 バンドから構成されている。本研究では 10 日間のうち正規化差植生指数 (以下 NDVI, normalized-difference vegetation index) 値が最大となる画素から合成された S10 プロダクト (10 days synthesis) の NDVI を VITO (Flemish Institute for Technological Research) が運営する WEB (<http://free.vgt.vito.be/>) からダウンロードして用いた。

3.2. LANDSAT TM, ETM+

LANDSAT TM, ETM+ は米国 NASA が打ち上げた地球観測衛星 LANDSAT に搭載されているセンサーで、観測幅は約 185 km である。LANDSAT TM は可視から熱赤外まで 7 つのバンドを有し、熱赤外 (120 m) 以外のバンドの空間分解能は 30 m である。LANDSAT ETM+ は可視から熱赤外まで 7 つのバンドとパンクロマティックバンド (15 m) を有し、熱赤外 (60 m) 以外のバンドの空間分解能は 30 m である。

3.3. 内モンゴル統計年鑑

内モンゴル統計年鑑は内モンゴル自治区統計局が編集し、中国統計出版社が毎年出版する統計書であり、内モンゴルの社会、経済および科学技術の発展状況を表す基本データが収録されている。

3.4. 世界気象資料

内モンゴル自治区には 34 の国際地点番号を持つ観測点があるが、データが存在する観測点は 30 地点であった。

3.5. 中華人民共和国植生図 (1 : 1,000,000)

中国科学院中国植生図編集委員会が作成した縮尺 100 万分の 1 の現存植生図から内モンゴル自治区の範囲を抽出して解析に用いた。編集期間は 1980 年代から 1990 年代中期である。小縮尺であるため本研究の解析期間におけるマクロな植生分布を示すことができると考えた。

4. 衛星データの解析方法

4.1. NDVI による植生変動に関わる指標抽出

4.1.1. NDVImax

NDVI とは地表面における植物の量にかかわる形質 (植被率, 葉面積指数, バイオマス, クロロフィル) や植物群落の光合成有効放射吸収率を推定するのに有効な指標である。ある年の最大の NDVI はその年の最大バイオマスに対応すると考えられる (近藤, 2004)。

4.1.2. NDVIsun

SPOT VEGETATION データセットに対して画素ごとに一年間 (36 旬) の NDVI の値が 0.2 を超えた値を加算して各年の NDVIsun 画像を作成した。NDVIsun はその地域での年間植物生産量に応答すると考えることができる (Goward *et al.*, 1985; Box *et al.*, 1989)。

4.1.3. Mann-Kendall rank statistic

指標 (NDVI) の時系列による増減のトレンド解析には、線形回帰分析が用いられる場合がある。しかし、線形回帰分析は時系列の始まりや終わり付近に傾向から大きく外れる値があると計算結果は影響を受けやすい。それに対し、Mann-Kendall rank statistic は外れ値の影響を受けにくいのでトレンドの有意性の検定によく用いられている (松山・谷本, 2005; 酒井ほか, 2008)。その有意性の検定は以下の式で行うことができる。

$$\tau = 4 \left(\frac{\sum_{i=1}^N m_i}{[N(N-1)]} \right) - 1 \quad (1)$$

$$\phi = \pm tz \left[\frac{(4N+10)}{9N(N-1)} \right]^{1/2} \quad (2)$$

ここで式 (1) の m_i は、サンプル数 N の時系列において、 i 番目の値よりも大きい値が i 番目より後にある数を示し、 τ が正 (負) の時にはその時系列は増加 (減少) 傾向にある。 τ の統計的有意性を調べるためには、 τ の値を式 (2) の ϕ と比較し、 $|\tau| > |\phi|$ の時に帰無仮説は棄却され統計的に有意になる。ここで tz は、与えられた有意水準における t 分布表の値である。本研究では有意水準を 5% に設定したので $tz = 2.160$ が代入される。

4.2. 温量指数

温量指数 (WI) は吉良 (1945) が提唱した指数で、植生の分布を温度条件から説明する指数である。温量指数 WI は以下の式で定義することができる。

$$WI = \sum_{i=1}^{12} (t_i - 5) \quad (3)$$

ここで、 i は月、 t_i は月平均気温を表し、5°C 以上の月平均気温 (°C) について上式で積算する。WI は植生変動と気候との関係を検討するために算出した。

5. 結果および考察

図 3 に NDVImax に対するトレンド解析の結果を示す。また、図 4 に NDVIsun に対するトレンド解析の結果を示す。図の赤色は Mann-Kendall rank statistic の検定による有意な増加トレンドがある地域を示し、青色は同検定による有意な減少トレンドがある地域を示す。

NDVImax のトレンドから内モンゴル自治区では $4.6 \times 10^4 \text{ km}^2$ の有意な植生減少傾向地域と $16.6 \times 10^4 \text{ km}^2$ の有意な植生増加傾向地域が算出された。また NDVIsun のトレンド解析結果から $4.9 \times 10^4 \text{ km}^2$ の有意な植生減少傾向地域と $18.6 \times 10^4 \text{ km}^2$ の有意な植生増加傾向地域が算出された。NDVImax と NDVIsun のトレンドが完全に一致する部分は植生減少傾向地域では $4.3 \times 10^4 \text{ km}^2$ であり、それぞれの減少傾向地域の 93.5%と 87.8%を占める。植生増加傾向地域で一致する部分は $9.8 \times 10^4 \text{ km}^2$ であり、それぞれの増加傾向地域の 59.0%と 52.7%を占める。NDVI の各指標は鄂爾多斯高原の東部、科爾沁の南部地域、東北の呼倫貝爾市地域の中部と鄂倫春自治旗の東部で増加トレンドを示した。

NDVImax および NDVIsun が減少トレンドを示した地域は巴彥淖爾市の烏拉特後旗と烏拉特中旗に多く分布しており、阿拉善盟東部では明瞭な減少トレンドが認められた。河套平原では NDVImax のトレンドは明瞭な増加を示すが、NDVIsun のトレンドでは明瞭な増加が見られなかった。

内モンゴル自治区全域をマクロに捉えると、NDVImax と NDVIsun のトレンド解析の結果は、一部で一致しない地域もあるが概ね類似した分布が得られた。植生減少トレンドを示す地域は内モンゴル自治区西部の荒漠からステップ地域に変わる境界領域に分布している。

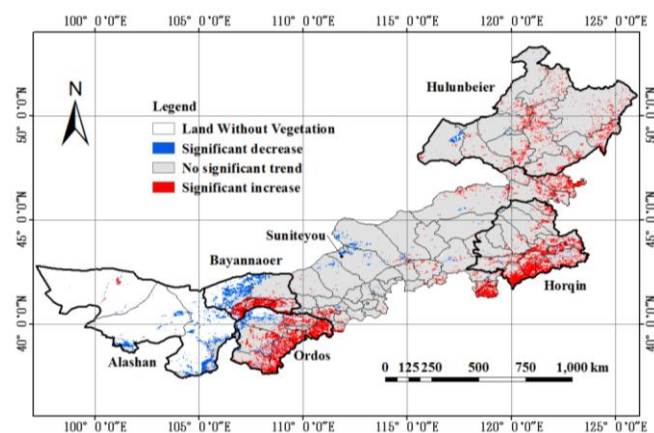


図 3. 1999~2012 年の NDVImax トレンド分布

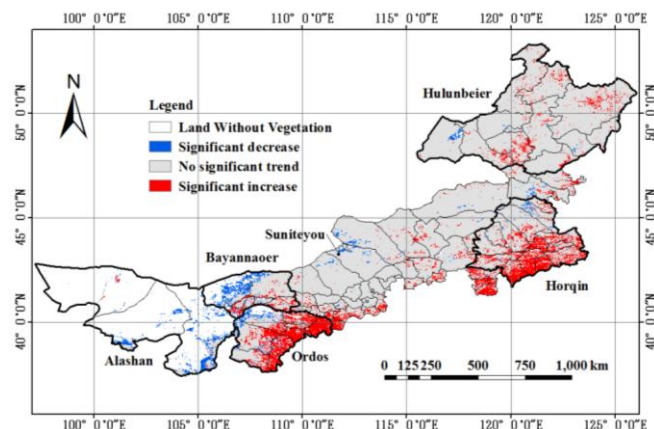


図 4. 1999~2012 年の NDVIsun トレンド分布

図 5 に NDVImax と 温量指数の二変数の相関係数をシンボルで示す。両者の相関係数は多くの地点では負であり、温量指数の増加に伴い、NDVImax (および NDVIsun) は減少する。図 6 に NDVImax と 4 月から 9 月の降水量の二変数の相関係数をシンボルで示す。ほとんどの地点が正の相関を示すが、西部の降水量が極端に少ない阿拉善地域と東部の通遼市では相関が 0.1 より小さいことが確認できる。その要因として、阿拉善地域ではもともと降水量が少ないこと、通遼市では人間活動が植生変動に大きな影響を与えていることを示唆していると考えられる。

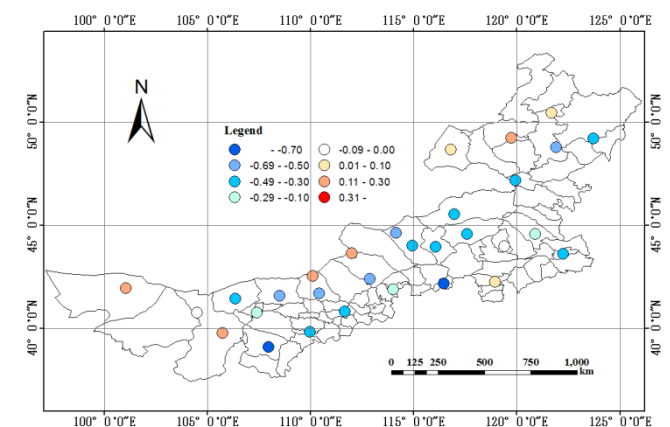


図 5. NDVImax と 温量指数の相関

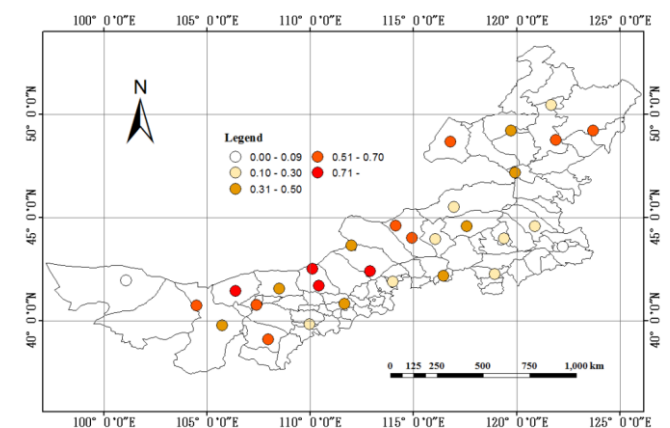


図 6. NDVImax と 降水量の相関

図 7 には近年の耕地面積の空間的変化を示す。2009 年～2011 年の県ごとの耕地面積の平均値から 1999 年～2001 年の耕地面積の平均値を引いて作成した。図 7 から東部の科爾沁周辺地域から東北地域において耕地面積が増加した地域が多いことがわかる。図 8 には 2009 年～2011 年の県ごとの灌漑面積の平均値から 1999 年～2001 年の灌漑面積の平均値を引いて作成した灌漑面積の空間的変化を示す。耕地面積の空間変化と同じく、科爾沁地域では灌漑面積の増加が明瞭であることがわかる。また、河套平野の下流域と鄂爾多斯地域に増加が見られる。

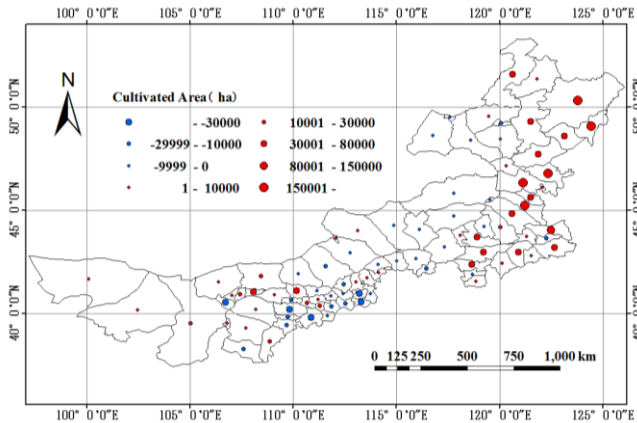


図 7. 耕地面積の空間変化

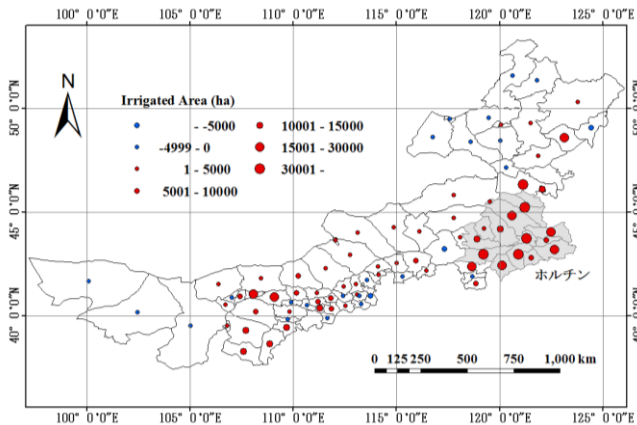


図 8. 灌漑面積の空間変化

図 9 には行政区ごとの植林面積の時系列変化を示す。時系列変化を見ると植林面積は 2002 年と 2009 年の二つのピークがある。それぞれ退耕還林プロジェクトの 2003 年まで短期目標があったのと 2007 年頃から見直しがあったことが関連している。地域で見ると鄂爾多斯地域、ウランチャブ、ウランハダとトンリョウ市である。

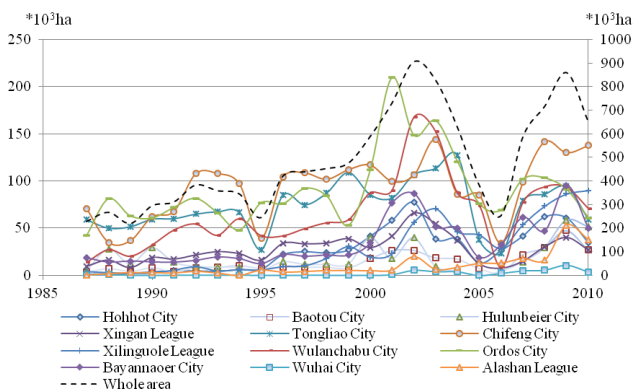


図 9. 各行政区植林面積増加量

図 10 に 12 の地区級行政区に対する植生増加面積率と灌漑面積増加率の関係を示す。横軸はトレンド解析から算出された植生増加面積率、縦軸は灌漑面積の増加率である。12 の地区級行政区に対する相関係数は 0.58 である。しかし、三角で示す鄂爾多斯では植生増加面積率は大きい、灌漑面積増加率が小さいことが読み取れる。鄂爾

多斯地域では植林が非常に活発であることがわかっている。よって鄂爾多斯地域を除外して残りの 11 の地区級行政区で回帰分析を行った結果、相関係数は 0.83 が得られた。内モンゴル自治区における植生増加傾向は灌漑面積の増加と関連していることを表している。

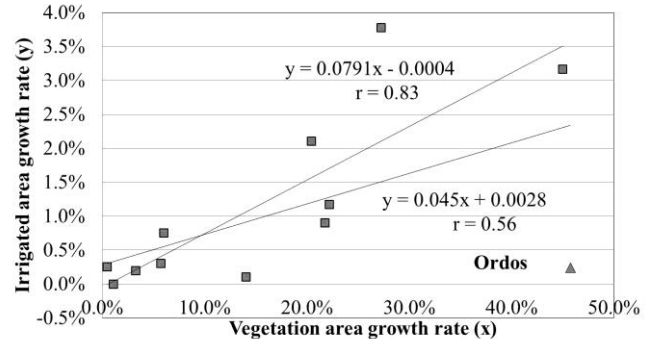


図 10. 植生増加面積率と有効灌漑面積増加率の相関

6. まとめ

本研究では、衛星リモートセンシングを用いて内モンゴル自治区における植生変動について検討し、変動要因について気候要因と人間要因の側面から説明を試みた。

NDVI_{max} と NDVI_{sum} のトレンド分布は空間的に概ね類似しているが、一致しない地域もあった。一部の地域の違ったトレンドは作付け作物の変化により説明できた。また、内モンゴル自治区における 2000 年以降の植生変動は温度指数と明瞭な空間的規則性が見られず、降水量と灌漑面積と明瞭な正の相関があった。

植生減少傾向を示す地域は荒漠からステップに変わるエコトーン地域であった。エコトーン地域においては本研究で得られた植生減少を示す地域の一部は沙漠化による可能性がある。また一部は潜在的な沙漠化地域であると考えられるが、今後の検討課題である。

人間活動も植生変動に大きな影響を及ぼしていた。科爾沁周辺地域における植生増加トレンドは耕地面積の増加、灌漑面積の増加、また植林面積の増加と対応しており、人間活動による植生変動として捉えることができる。呼倫貝爾地域では一部の森林域で NDVI_{sum} が増加傾向トレンドを示したが、それは気温上昇による樹木の生育期間の伸長が植生増加トレンドをもたらしたと考えられる。一方、湿地であった地域では植生活動が活発となっている。統計年鑑データによるとこれらの地域では耕地面積が増加しているが、湿地の水田への転換が報告されていることから、湿地の開発が進んでいる可能性がある。鄂爾多斯高原では植生増加傾向が認められた。これは主に退耕還林還草などによる政策との時期の一致から、植林、草原回復と考えることができる。鄂爾多斯高原では東部で植生増加傾向が顕著であったが、東部では西部より降水量が多いこと、地形的に西部より低いため地下水が豊富であること、また東部中心に開発を進めている地域があること、等の理由が考えられる。