

G-1 砂漠化防止対策適用効果の評価手法の開発に関する研究

(1) 砂漠化防止対策効果の環境立地的評価手法の開発に関する研究

研究代表者 農業環境技術研究所 環境管理部 環境立地研究室 今川 俊明

農林水産省農業環境技術研究所

環境管理部 資源・生態管理科	環境立地研究室	今川 俊明・藤原 英司
環境資源部 土壌管理科	土壌保全研究室	谷山 一郎・白戸 康人
環境生物部 植生管理科	保全植生研究室	根本 正之・大黒 俊哉
(委託先) 東京大学 農学部		武内 和彦
筑波大学 農林学系		田中 洋介・石 敏俊

平成7～9年度合計予算額 45,315千円
(平成9年度予算額 14,579千円)

〔要旨〕中国内モンゴル自治区奈曼旗を対象として、砂漠化防止の対策技術選択と土地利用配置を適正に行うために、地域の砂漠化インパクトに対する許容量（環境容量）を明らかにし、砂漠化防止対策の適用効果を環境立地的視点から評価した。その結果、

①植生、土壌、地形は相互に関連しており、砂漠化進行の様式や程度の違いを植生や土壌を指標として把握することができた。②放牧試験により、対象地域の放牧草地においては、緬羊4頭以下が適正な放牧圧であることがわかった。しかし環境容量を上回る放牧圧が継続して加わると、低飼料価草種の割合が次第に増加し、緬羊の体重も減少していく。したがって、禁牧を含めたローテーション利用も同時に取り入れていくことが、砂漠化防止及び生産性維持の両面からみて望ましい。③ランドサットTMデータの赤バンド（TM3）と草地の現存量の間には高い相関があり、奈曼旗全体の草地の現存量が推定できた。また、現存量と家畜に食べられる草の割合（負荷率）から放牧圧を求めたところ、中部～北部の多くの地区（郷鎮）で4頭/ha以上の放牧圧がかかっていることがわかった。④対象地域の草地改良には、窒素肥料の施肥が有効であることがわかった。また、禁牧による効果も大きいことが明らかになった。また、砂丘固定を中心とした対策技術がある程度有効であることが明らかになったが、流動砂丘を効率的に固定し、植生回復を促進するためには、砂丘の地形的位置に応じて対策技術を複合的に適用していくことが望ましい。⑤2つの村を対象に、舎飼導入にともなう放牧圧の軽減可能性を検証した結果、舎飼畜産の導入・拡大を前提にした土地利用の適正化によって、砂漠化の防止と農家経済の改善とは両立することが明らかとなった。⑥奈曼旗における自然・社会・経済条件による砂漠化プロセス、砂漠化防止・回復技術の効果のちがいをとりまとめた。

〔キーワード〕中国、砂漠化、対策技術、環境容量、土地利用

1. 序

中国における砂漠化・土地荒廃地域は北西部のタクラマカン砂漠、ゴビ砂漠周辺に限らず国土の広範囲で顕在化しており、砂漠化・土地荒廃地域は148万km²（国土の約15%）と見積もられている¹⁾。また、1997年5月に林業省から発表された「中国荒漠化報告」によると砂漠や凍結地、塩害地など「荒漠地」と区分される面積は262万km²（国土の27.3%）に達し、最近20年間に平均2,460km²/年の速度で砂漠化が進行している。一方、91年から95年までの5か年間で4.3万km²の面積で、緑化などの対策が取られたと報告されている。

われわれは中国における砂漠化の特徴とその動向についてはこれまでにすでに研究してきており、リモートセンシングを用いた砂漠化の動態解明では、砂漠化は一方的に拡大しているのではなく、主要な集落や道路、鉄道の周辺では回復傾向にあるが、その外側では拡大傾向にあることを解明してきた²⁾。

このように、中国の砂漠化・土地荒廃は一部の地域で対策はとられているものの、依然として拡大傾向にあることは確かであり、いかに砂漠化を防止し、砂漠化した土地を回復させるかが重要な課題となっている。その反面、砂漠化が進行している地域の大部分は、経済基盤が脆弱なうえ、増加する人口と地域開発が複雑に絡んで砂漠化の問題解決を一層難しくしている。このような砂漠化問題を解決するためには、現地の生産活動を理解した上で、持続的な生産のための合理的な土地利用と現地で導入可能な砂漠化対策の適用効果を明らかにする必要がある。そこで、砂漠化の動態解明の研究を実施してきた内モンゴル自治区奈曼旗を対象に、砂漠化防止対策効果に関する実証的な研究を行うこととした。

2. 研究目的

中国内モンゴル自治区奈曼旗を対象に、砂漠化防止の対策技術選択と土地利用配置を適正に行うために、植生・土壌・生産に関する現地調査、放牧・再生対策試験及び衛星データ解析によって、地域の砂漠化インパクトに対する許容量（環境容量）を明らかにしたうえで、砂漠化防止対策の適用効果を環境立地的視点から評価した。

3. 研究方法

（1）研究地域の概要

奈曼旗は北京の北東約500km、ホルチン沙地南部に位置し（図1）、南北180km、東西100kmの細長の形状を持つ。面積は約8,000km²である。中央やや南側で、東西に走る比高20mほどの明瞭な断層によって大きく二分されている。このため南は黄土高原に類似した丘陵となっている一方、北は低地となっており、大小の砂丘が広く発達している。特に奈曼旗の西側北半分と北側を限る西遼河沿いは低湿地となっている。この地域は年平均気温6.4℃、年平均降水量372mmの半乾燥気候に属する。特に、降水量は夏季(6～8月)に集中し、11月から3月までの月降水量は10mm以下である。また、春季には8m/秒以上の強風が25～40日記録されている。このように、春先風が強く、雨が少ない乾燥する気候条件に加えて、地表面は裸地状態となっているため、風食を受けやすいばかりか降雨の始まりには水食の危険性も高い。

（2）砂漠化変遷の解明

農業史³⁾やこれまでの地学調査報告⁴⁾をもとに、この地域の土地利用の歴史的展開と砂漠化進行

の関係を明らかにするとともに、現地調査で得た砂丘中の貝殻などの放射性炭素年代を測定し、その整合性を検討した。また、最近40～50年間の砂漠化面積の変遷を奈曼旗中央部の砂丘地帯を対象に既存の砂漠化地図、ランドサット衛星写真をもとに明らかにした。

(3) 環境立地条件と砂漠化プロセスの把握

奈曼旗全域を対象として、植生、土壌、地形、砂漠化プロセスに関する調査を行った。植生調査は合計163地点の草地で行った。得られた調査試料については、多変量解析手法であるTWINSPAN⁷⁾及びDCA⁸⁾によって分類・序列化を行った。また、土壌特性とその分布を把握するための踏査を行い、代表的な14地点で土壌断面調査と試料を採取し、その理化学性を分析した。また、1/100,000土壌図と付属の土壌化学性データベース⁹⁾および物理性の分析値をコンピュータに入力し、理化学性の各項目を2ないし4段階に分けて評点を与え、すべての評点をかけあわせたものを総合点として各土壌を5段階に評価し、土壌生産力評価図を作成した。同時に、既存の地図データと衛星データを重ね合わせるために、地球測位システム(GPS)を用いて約50地点で緯度、経度の測定を行った。GPSで測定した道路の交差点、橋、踏切などを基準に奈曼旗の地図とランドサット画像を重ね合わせ、奈曼旗の範囲を切り出した。また、放牧試験地の四隅と周囲の防風林を指標に放牧試験地の位置を1ピクセル(30m)以下の精度で確定した。

(4) 環境容量及び放牧圧の推定

① 放牧試験

放牧インパクトに対する環境容量及び適正放牧圧を解明するため、1992年から1996年まで放牧試験を行った。すなわち、奈曼旗のほぼ平坦な放牧草地において、緬羊の放牧強度の異なる4段階の処理区(6頭/ha、4頭/ha、2頭/ha、禁牧区)を設定し、植生、土壌及び地形、緬羊体重の経時的变化を調査した。

② 放牧圧の推定

放牧試験の結果を用いて奈曼旗全域の現存量の推定を行うとともに、郷鎮単位での放牧圧の推定を行った。放牧試験中に観測されたランドサットデータのうち、現存量測定日前後の7時期のデータを使い、放牧試験地の現存量と赤バンド(TM3)や正規化植生指数との相関を求めた。また、1992年の6月と8月のランドサットデータを使って教師付き土地被覆分類を行い、草地を抽出した。抽出された草地を対象に、最も相関が高かった赤バンドとの関係から現存量を推定した。さらに、この現存量と郷鎮別統計データの家畜飼育頭数から放牧圧を推定した。

(5) 砂漠化防止対策の適用効果

① 草地改良及び植生回復試験

砂漠化防止対策技術の適用効果を評価するため、以下の2つの現地試験を実施した。草地改良試験は放牧草地を対象に、施肥、灌漑、マメ科牧草の播種などの処理を行い、草地植生への改善効果を評価した。植生回復試験は流動化した砂丘をフェンスで囲み、砂丘固定植物の播種・植栽、草方格(藁を砂丘の表面に格子状に配置したもの)などの処理区を設定し、植生回復の程度を比較したうえで、砂丘固定技術の適用効果を検討した。

② 砂漠化防止対策が土壌特性に及ぼす効果

南部の水食地域では、テラスによる水食対策の効果を評価するため隣接したテラス畑(10年以上経過)と非テラス畑で調査を行い、土壌特性を比較した。中・北部の風食地域では、防風林2ヶ所、禁牧と植林を組み合わせた地区1ヶ所、計3ヶ所で調査を行った。以上の各調査地点にお

いて、土壌断面調査と試料採取を行い、理化学性を分析した。

③ 地域農業経営に対する効果

砂漠化防止と農家経済との相互関連の視点から、これまで蓄積された砂漠化防止対策技術を地域農業経営に組み入れた場合の適用効果を評価し、砂漠化防止と農家経済の改善を一体的に進める土地利用の適正配置を検討するため、郷鎮単位の世界・経済データの収集と2つの集落を対象に142戸の農家に対する聞き取り調査を実施した。舎飼畜産の導入・拡大と禁牧による砂漠化防止を組み込んだ放牧圧関係式を設定し、現状の家畜頭数を維持しながら、放牧圧を軽減する土地利用の適正配置の可能性を検証した。

4. 結果及び考察

(1) 砂漠化変遷の解明

奈曼旗を含むホルチン砂地における土地利用の歴史的展開を解明した³⁾。奈曼旗における人間活動の歴史は約7,200年前まで遡ることができる。当該地域におけるこれまでの土地利用は、表1に示すように「原始的牧畜業と原始的農業の併存」→「放牧」→「農耕」→「放牧」→「農耕と放牧の兼営」という歴史的変遷をたどり、放牧畜産と畑作を兼営する現段階をむかえている。中国科学院奈曼ステーションが解明した土壌形成年代⁴⁾をもとにした砂漠化の展開プロセスと土地利用の歴史的変遷を重ね合わせてみると、畑作を中心とした土地利用に対しては砂漠化が進行し、放牧を中心とした土地利用に対しては草原生態系が回復し安定するという関連がみられた。原始的農業である草原切替畑農法が砂漠化を引き起こす原因としては、この農法が草原土壌の自然生産力だけを利用する掠奪的農法であることによる。すなわち、草原を開墾し、播種した後は、施肥、除草などは行わず収穫をするだけであり、3年ほど耕作をして地力が落ちた土地は休閑し、新たな土地を開墾して再生産を維持するためである。このような粗放的な土地利用は不施肥、不秋耕、不灌水、不鋤地の「四不農業」と呼ばれ、開墾→砂漠化の悪循環を作ったと考えられる。また同時に、開墾の拡大が牧野面積の縮小をもたらし、過放牧を引き起こし、草原の劣化さらには砂漠化を加速させた。

一方、この地域に発達する砂丘を地史的に調査によると、砂が活発に動いた乾燥期と植物が繁茂し土壌層が発達した湿潤期があったことが知られている。土壌層が発達した湿潤期はB.C. 3100~2850年、A.D.625~825年、1300~1700年とされ、現在は1700年以降の乾燥期と考えられている。これらの年代は農業史から編まれた環境変遷とほぼ対応している。また、本研究の中で採取した奈曼ステーション西方の砂丘地の砂壤土中の動物の骨片は放射性炭素年代測定の結果、 $1470 \pm 80 \text{yrB.P.}$ を示し、章古台郷の川辺の露頭の砂壤土中の貝殻は $4100 \pm 220 \text{yrB.P.}$ であった。双方とも農業史から推定された農牧兼営で局部で砂漠化が進行していた時期にあたり、砂層がやや土壌化した部分からそれらの採取されたことは地質学的証拠も復元された農業史と矛盾しない。

1947年5月に内モンゴル自治区が成立した後50年足らずの間に、奈曼旗の人口が17万人から40万人へと2.4倍に達している。一方、土地利用は草原切替畑農業から施肥の導入、保水農法の普及、灌漑面積の拡大、秋耕及び中耕除草の普及による集約化が進行した。この結果、奈曼旗の総耕地面積は1949年の130,186haから1992年の91,740haに減少した。減少した耕地の大部分は砂漠化に迫られて、牧草地や防風林地に転用されたものである。しかし、草原切替農法は依然として残っており、特に1960年代には固定砂丘の開墾が大規模に行われた。55~65年には8,848haが開墾

されており、これが最近の砂漠化に少なからず寄与していることが考えられている。また、同時に家畜頭数も増大しており、特に羊は1947年の2.5万頭足らずから1994年には34万頭余りへ約14倍にも増加している。牛、馬、ロバ、ヤギを含めた総数は1960年までに急激に伸び、それ以降は平衡状態である。したがって、この時期は固定砂丘の開墾が進んだ時期でもあり、開墾による牧野面積の減少と放牧家畜頭数の伸びが重なり合い、本来放牧は草原生態系の回復、安定といわれていたにもかかわらず、過度な放牧によって砂漠化の進行を加速させる結果となったことが推定された。

このような変化は、砂漠化面積にも反映されており、奈曼旗の土地総面積に占める砂漠化した土地の割合は1950年代末期には40%であったが、1970年代末には69%まで拡大した。そして、1980年代には66%に若干減少した⁷⁾。この間を含めた変化を奈曼旗中央部を対象に中国科学院蘭州沙漠研究所が作成した1958年と1974年の砂漠化地図^{8), 9)}とそれ以降の変化を1985年と1992年のランドサットTM画像の目視判読で把握した結果、1958年と1974年の間に固定砂丘の面積が30%減少し砂漠化が顕著に進行したことが明らかとなったが、その後は流動砂丘、半流動砂丘の面積が漸増しているにとどまっており、上述のことと一致している。

(2) 環境立地条件と砂漠化プロセスの把握

土壌は地形、地質の違いにより①南部の黄土丘陵（タイプA）、②中・北部のホルチン砂地（タイプB）、③河川沿いの沖積地（タイプC）の3つに大きく分けられた（図1）。さらに、土壌は生成要因、断面形態と理化学性から次の5タイプに細分類した。

Type A：南部の黄土丘陵地帯に分布するレス由来のシルト～細砂質の土壌。

Type B-1：中・北部のホルチン砂地に分布する砂質土のうち流動砂丘の未熟な土壌。

Type B-2：砂質土のうちB-1よりも断面が発達し土性が細かい固定・半固定砂丘の土壌。

Type C-1：塩類化していない沖積地や砂丘間低地の土壌。

Type C-2：粘質で塩類化している沖積土壌。

Type-Aは粗砂をほとんど含まず粘土は約10%で、主に細砂とシルトからなり、保水性、透水性などの物理性は良好であるが有機物含量は低く、特に可給態リン酸が非常に低いなど、化学性には問題がある。B-1は80%以上の粗砂を含み粗粒で、有効水分が少なく、有機物にも乏しいなど、物理性、化学性ともに劣悪な土壌である。B-2はB-1に比べ細粒で、理化学性も各項目でB-1よりは良好である。CはA,Bに比べて粘土含量や有機物含量が高く、概ねC-1よりもC-2では細粒で、アルカリ化のためpHが10を超え、EC（電気伝導率）も高く、透水性も悪いが、C-1ではこれらの問題が無いため土壌の肥沃度は高い。

各タイプの砂漠化の原因としては、Aでは傾斜地で畑地利用が多いために水食が、Bでは砂質で植物生産力が低いために風食が、Cの一部では地下水からの塩類の供給による塩類化が考えられた。

土壌図(1/100,000)と付属の土壌化学性データベース¹⁰⁾、および物理性の分析値をコンピュータに入力し、理化学性の各項目を2ないし4段階に分けて評点を与え、すべての評点をかけあわせたものを総合点として各土壌を5段階に評価し、土壌生産力評価図を作成した（図2）。これより、河川沿いの沖積地や砂丘間低地では粘土や有機物含量が高く養水分に富むため生産力が高い土壌が、中北部の砂質平原、特に流動砂丘では粗粒で有機物が少なく有効水分や養分が乏しいため生産力が低い土壌が分布していることが明らかになった。

植生調査によって得られたサンプルを、TWINSPAN及びDCAによって解析した結果、奈曼旗の植生タイプは、土壤、地形タイプなどに対応して区分でき、それらは上記の3つの土壤タイプの地域とほぼ対応づけられることがわかった。Type-A（南部：黄土丘陵）地域では、ホルチン草原の成帯性植生である*Stipa bungeana*、*Thymus mongolicus*などの優占草種が分布する。また、Type-B（中～北部：砂丘地）地域では、*Setaria viridis*や*Chloris virgata*などのイネ科一年草を中心とする群落が見られる。さらにType-C（中～北部：河川沿いや砂丘間低地などの沖積地）地域では、*Phragmites australis*や*Carex duriuscula*などの優占する湿性群落が成立し、塩性化が進むと、*Iris lactea*などの塩生植物が分布するようになる。

（3）環境容量及び放牧圧の推定

① 放牧に対する環境容量

まず、家畜生産の視点から最も重要と考えられる植物バイオマスの変動を明らかにするため、移動ケージ法によって生産量の推移を把握した。

最大現存量は、6頭/ha区で著しく低い値で推移し、4頭/ha区でも次第に減少する傾向を示した。これに対し生産量は、6頭/ha区でもある程度の量が維持されており、現存量のような急激な低下は認められなかった（図3）。生産された草種の構成をみると、禁牧区や2頭/ha区では、*Pennisetum centrasiatricum*などのイネ科多年草など、粗タンパク含量などからみた飼料価値が中～高程度の草種がほとんどを占めた。しかし、放牧圧の増加にともなって*Artemisia scoparia*や*Aristida adscensionis*などの飼料価値の低い草種の割合が増加し、6頭/ha区では80%を占めるに至った（図4）。

綿羊体重の推移を調べた結果、4頭/ha区までは毎年1頭あたり5～10kgの増加が見られた。また、単位面積あたりで見ると、4頭/ha区が最も高い値で推移した。一方、6頭/ha区では試験3年目以降は体重が減少へと転じたことから、植生の質的な変化が、綿羊の生産性にも大きな影響を及ぼしていることが示唆された。以上の結果から、対象地域の放牧草地においては、綿羊4頭以下が適正な放牧圧であることがわかった。

また、トランセクト法による植生、土壤、地形調査に基づき、とくに微地形条件の違いに着目して、植生被覆量、土壤、地形の変化を解析した。その結果、放牧が土地・植生に及ぼす影響は微地形タイプによって大きく異なることが明らかになった。小起伏砂丘のなかでも平坦部では放牧圧の増加にともなって土壤のち密化が進行するが、踏圧耐性種が表層を被覆するため、4頭/ha程度の放牧圧までは風食の影響がある程度抑制されることがわかった。しかし、6頭/haの放牧圧になると植生被覆量が急激に低下し、また一年生植物の割合が増加するため、風食の危険性が次第に高まることが示唆された。一方、起伏のある凸部では、土壤のち密化が平坦部ほどは進まず、むしろ表層の攪乱によって、4頭/haの放牧圧でも植生被覆量が顕著に減少した。さらに6頭/haの放牧密度になると、風食による侵食活動が顕在化することが明らかになった。また*Agriophyllum squarrosum*などの砂地植物は平坦部ではほとんどみられなかったのに対し、凸部では高頻度で出現した。

これら2つの退行プロセスを比較すると、平坦部での土壤ち密化をとまなう変化は、種組成や土壤物理性を中心とした変化であり、重放牧区で徐々に顕在化するという比較的緩やかなプロセスであるのに対して、凸部での変化は、表層の剝削という地形変化をとまなうものであり、加速的な砂丘再活動に発展する危険性がきわめて高いプロセスと考えられた。

② 放牧圧の推定

1992年6月5日のTM3、TM5バンドおよび92年8月24日のTM1、TM3、TM4、TM5バンドを用い土地被覆分類を行った。分類後トレーニングエリアの再現性を調べたところ、平均判別率は92.5%で草地は93.9%と高い値が得られた。この方法で草地のみを抽出し、草地分布図を作成した。次に、92年から96年までのすべてのデータを用い放牧試験地内の各試験区の平均輝度値と現存量との関係を検討したところ、TM3バンドの輝度値と現存量との間に決定係数0.62の有意な相関が認められたが、正規化植生指数（NDVI）と現存量との間に関係は認められなかった。また92年のデータを除き93年および96年のデータのみを用いて同様に検討したところ、TM3バンドでは決定係数0.79、NDVIでは決定係数0.67の有意な相関が認められた。92年は放牧試験の開始年であり試験区内の植生の分布が不均一であったため、サンプリングの際に誤差を生じ現存量が正しく測定されなかったと推定された。そこで回帰式の決定には93年および96年のデータを用いることとした（図5）。現存量はNDVIよりもTM3バンドと関係が強かったことから、TM3バンドの輝度値を用いることとした。以上の結果から、次の回帰式で現存量図を作成した。

$$\text{現存量} = -3.39 \times \text{TM3} + 388.47$$

推定した現存量は各観測時の各放牧試験区の現存量に対応させ、重放牧区、中放牧区、軽放牧区、禁牧区に区分し、表示した。

そして、次の式から放牧による植生への負荷を見積もった。

$$\text{被食量 (g/m}^2\text{)} = \text{放牧家畜頭数} \times 1500\text{g} \times \text{日数}$$

$$\text{生産量 (g/m}^2\text{)} = \text{夏季の現存量} - \text{春季の現存量} + \text{被食量}$$

$$\text{放牧による負荷率 (\%)} = \text{被食量} / \text{生産量} \times 100$$

被食量はある地域において放牧期間に家畜が食べた草の総量である。放牧試験結果から羊が1日に食べる草量を1,500gとし、牛については1頭を羊5頭に換算し被食量を算出した。一方、草量は夏季に最大になることから、夏季の現存量から春季の現存量を差し引いて増加量を求め、これに被食量を加え生産量とした。生産量に占める被食量の割合を放牧による草地への負荷率とした。今回用いた家畜頭数統計データは郷・鎮単位の集計であったため、すべての計算はこの行政区ごとに行った。その結果は25%から50%まで段階分けし表示した（図6）。

負荷率は中部から北部で35%以上を示し、特に都市部やその周辺の草地面積が小さい地域では負荷率が50%以上と高かった。これに対し、南部の黄土高原では30%程度と低かった。ところで、奈曼旗の一般の草地と近い状態であったと見なされる放牧試験開始時(1992年)の負荷率を試験区で求めてみると、重放牧区(6頭/ha)では84%、中～軽放牧区(4～2頭/ha)では30～35%であり、中部から北部の郷鎮ではこの値を上回っているところが多く、上述したこの地域の適正な放牧圧である4ないし2頭/haを上回っている。

（4）砂漠化防止対策の効果

① 草地改良及び植生回復試験

ア 草地改良試験

草地改良試験区では、1996年及び1997年に①施肥試験、②灌漑試験、③マメ科牧草の播種試験

を行った。窒素、リンの量を変えた施肥試験では有意な施肥効果がみられ（分散分析、 $P<0.05$ ）、とくに、アカザ科の一年草（*Salsola collina*）の成長が顕著であった（図7）。また、施肥量及び窒素、リンの割合を変えた処理を行った結果、量（ $P<0.001$ ）、割合（ $P=0.05$ ）ともに有意な効果がみられ、窒素の割合が大きくなるにつれて乾重も増加する傾向を示した。しかし、交互作用は認められなかった。これに対し灌漑試験では灌水量による差異は認められなかった（ $P=0.89$ ）。これは、灌漑の時期が不適當であったこと、砂地であるため地下浸透してしまい、処理区内で十分水分を保持できなかったことなどが理由として考えられた。一方、マメ科の播種試験では、鼠害のためにほとんど発芽がみられなかった。なお、本試験区は周囲を牧柵で囲って行ったが、禁牧による効果もかなり大きかったことから、同地域では放牧管理が草地改良に関しても重要な手段のひとつであることが確認された。

イ 植生回復試験

植生回復試験区は1996年7月に設置し、同年及び1997年に光波式測距儀による砂丘の地形測量及び植生調査を行った。

地形測量の結果、対策技術が施された砂丘ではほぼ固定されているのに対し、砂丘固定化技術を全く施していない隣接した砂丘は数メートル移動していたことから、砂丘固定化技術の効果があることは明らかであった。

② 砂漠化防止対策が土壌特性に及ぼす効果

奈曼南部の水食地域において、テラスによる水食防止効果を評価するため、隣接するテラス畑と非テラス畑で土壌特性の比較を行った。テラス畑の土壌では表層と下層の間で粒径組成や有機物含量の差がほとんどなかったのに対し、非テラス畑の土壌では表層で下層よりも粒径が粗く、有機物含量が少なかった。このことから、非テラス畑では細粒画分や有機物の選択的な水食が起きており、テラス畑にすることによりこの選択的な水食が防止されていると推察された。

奈曼中・北部の風食地域における防風林や禁牧の効果を評価するため、3ヶ所で調査を行った。調査地1は、流動砂丘地域に約20年前に植林された幅300mのポプラ防風林で、風上の流動砂丘、防風林内の周縁部と中央部、および風下の固定砂丘において、微地形の違いを考慮するためそれぞれ凸部と凹部、計8地点で調査を行った。その結果、風上に比べて林内や風下では表層土の粘土+シルト含量および炭素含量が高くなっていた（図8）。下層土の理化学性には地点間の差がほとんど無くいずれも粒径が粗く有機物に乏しいため、表層土の土壌特性の違いは植林後に生じたものと考えられた。防風林内や風下では風速の低減によって風上から運ばれた細粒画分が堆積するとともに有機物に富む細粒画分の飛散が抑えられ、また植生の発達により有機物の集積が促進されたと考えられた。さらに、表層の有効水分、CEC、可給態リン酸なども林内や風下では風上よりも高く、土壌の生産力が林内や風下で向上していることが明らかとなった。なお、各地点とも凹部では凸部よりも細粒画分や有機物の集積が進んでおり、微地形が土壌特性に大きな影響を及ぼしていることも確認された。

調査地2は、砂丘から風下の畑地を守るために約40年前に植栽された幅40mのポプラ防風林で、風上、防風林内、風下の畑地および松林の4地点で調査を行った。風下では風上よりも土性が細かく有機物含量が高くなっており、防風林により風上からの粗い砂の堆積による風下の土壌の劣化が防止されていた。

調査地3は、牧柵により約10年間禁牧され、その一部に植林されている地区で、牧柵の外側2

地点、内側の禁牧地域2地点およびポプラ植林地、松植林地各1地点の計6地点で調査を行った。禁牧や植林の行われた牧柵の内側では、外側に比べて土壌の細粒画分や有機物が増加しており、禁牧の効果が土壌特性に反映されていた。牧柵の外側では、凸地と凹地の土壌特性の差が非常に大きいのに対して、禁牧10年の牧柵の内側では、凸地と凹地の違いがあまりなく、禁牧により、特に荒廃が激しかった凸部の土壌の回復が進んだためと考えられた。また、禁牧に加えて植林も行ったところでは禁牧のみのところよりも粘土、シルトなどの細粒画分や有機物含量が増加しており、禁牧に加え植林も実施することで土壌の回復が促進されることが明らかとなった。

以上のように、防風林の植栽や禁牧、あるいはそれらの組み合わせにより風食が防止され、その効果は土壌の理化学性にも表れていることが明らかになった。

③ 農業経営・農家経済の特徴と砂漠化防止との関係

中国内モンゴル自治区奈曼旗の堯勒甸子村および沙日塔拉村において、現地農家調査を実施し、当該地域における農業経営・農家経済の実態を解明した。漢民族地域の堯勒甸子村では畑作に重点をおいた農耕・放牧の経営方式を展開しており、モンゴル族地域の沙日塔拉村では放牧畜産に重点をおいた放牧・農耕の複合経営方式を営んでいる。堯勒甸子村では畑作を補完する畜産は欠落ないしは低位にとどまっているため、集約作物の導入・拡大に制約を与えており、沙日塔拉村では畑作が低位にとどまっているため、畜産から供給される養分が経済的に有効に活用されていない。農家の主食消費が従来のトウモロコシを主とした構成から、小麦と米を主とした構成に移行してきたことに関連して、トウモロコシの仕向は農家の自給食用向けから、飼料と販売向けに変わってきており、トウモロコシはすでに換金作物または飼料作物に変身したものと考えられるので、用途別に対応したトウモロコシの品種、栽培法の分化を進めていくのが今後の課題となっている。

砂漠化防止と農家経済との相互関連の視点から、これまでの砂漠化防止対策技術の評価を行った。輪牧方式では、放牧圧を分散させ、草地の保全を図りながら、草地生産力を最大限に利用しようとしているが、家畜頭数が草地の放牧容量を上回った場合、放牧圧を軽減するためには、いずれも放牧禁止区を設けるか、または家畜頭数を縮小・制限することが必要とされ、家畜頭数の縮小は、農家の生活・経済にマイナスの影響を及ぼすので、これらの砂漠化防止対策では、砂漠化防止と農家経済との関係はトレード・オフの状態におかれてきた。

堯勒甸子村では現状の放牧圧は 緬羊4頭/haであることを、沙日塔拉村では作物の茎葉を冬季の補充飼料として利用しているので、利用可能な草地面積に対する実質放牧圧は3.69頭/haであることを推計した。これらの放牧圧と試験の結果を比較すると、地形起伏の大きい地域では植生の劣化をもたらす可能性があるため、草地に対する放牧圧をさらに軽減することが望まれる。

そこで、現状の家畜頭数を維持しながら、放牧圧を軽減する土地利用の適正化の方策をたてるために、舎飼畜産の導入・拡大と禁牧による砂漠化防止を組み込んだ放牧圧関係式を設定し、上記2地区を対象に、舎飼導入にともなう放牧圧の軽減可能性を検証した(表2)。堯勒甸子村ではトウモロコシなど作物の茎葉を舎飼飼料として利用した場合、放牧圧は2.85頭/haとなり、上記の放牧圧試験の結果によると、植生の退行や草地の劣化は抑制されるようになるが、さらに、トウモロコシおよびコウリヤンの穀実を飼料として利用した場合、現在の家畜をすべて畑作産出の飼料で飼養することが可能となる。または家畜頭数を増加することが可能となる。沙日塔拉村では作物茎葉のほかに、トウモロコシ及びコウリヤンの穀実をも舎飼飼料として利用した場合、

放牧圧は2.25頭/haとなり、植生の退行や草地の劣化は抑制され、草地の改善が見込まれる。舍飼畜産の導入・拡大を前提にした土地利用の適正化によって、砂漠化の防止と農家経済の改善とは競合の関係から、補合の関係へ、さらに補完の関係へシフトする展望が開かれる。

(5) 砂漠化プロセスと砂漠化防止対策効果の評価

奈曼旗の砂漠化プロセスを環境立地的にみれば、南部のシルト質土壌の丘陵地帯では畑地の過耕作を引き金とする降雨に伴う水食が主要因であり、中北部の粗粒質土壌の平坦地では草地における過放牧が風食を激化させている。砂丘間低地や河川沿いの沖積地では塩類濃度の高い地下水位が、植生の破壊によって上昇し、土壌の塩性化が顕在化した。この、砂漠化の原因および環境立地的条件によってさまざまな砂漠化防止・回復対策があるが、風食による草地の砂漠化防止・回復対策を図9に示した。

家畜需要の増加が圧力となり、環境容量を越えた過放牧状態の草地では、植生が衰退するとともに、土壌構造の密化などの土壌の破壊が進行する。そのため、地表の風食が激化し、生産力の高い表層土が失われることによって、植生の衰退が加速される。この段階での砂漠化を防止するには、放牧圧を軽減することが効果がある。しかし、飼育頭数を減らすことは農家経営に影響を及ぼすため、畑地における飼料作物生産を主体とする舍飼畜産の導入が効果的と予測した。また、牧草生産力を増大させるため、施肥や飼料価値の高い牧草の導入なども効果があった。これらの対策技術の導入には、農家の経済的条件や作物生産のための気象・土壌条件との関係をさらに検討する必要がある。

さらに砂漠化が進行し、流動砂丘が形成されるようになると、まず砂丘を固定するために、大規模な防砂・防風林の設置、灌木や草生の植栽、草方格などの設置、禁牧などを組み合わせた大がかりな対策が必要である。それによって、土壌の細粒化や有機物・養分含量の増加が起これ、土壌生産力が向上することを明らかにした。ただし、その回復程度も微地形によって異なることも明確となった。今後は奈曼旗周辺における環境立地的条件と対策効果の関係について調査・分析することによって、この評価手法の普遍化を図ることが必要である。

5. 本研究により得られた成果

① 植生、土壌、地形は相互に関連しており、砂漠化進行の様式や程度の違いを植生や土壌を指標として把握することができた。

② 対象地域の放牧草地においては、緬羊4頭/ha程度が最も土地生産性の高い放牧圧であることがわかった。しかし試験の継続にともない、4頭/ha区においても低飼料価草種の割合が漸増するとともに、緬羊体重の増加量も漸減し、草地に対するインパクトが次第に強まっていることが示唆された。したがって、禁牧を含めたローテーション利用も同時に取り入れていくことが、砂漠化防止及び生産性維持の両面から望ましい。

③ ランドサットTMデータの赤バンドと現存量の間には高い相関があり、奈曼旗の草地の現存量が推定できた。また、放牧によって家畜に食べられる草の割合(負荷率)を求めたところ、中部～北部の多くの郷鎮で4頭/ha以上の放牧圧がかかっていることがわかった。

④ 対象地域の草地改良には、窒素肥料の施肥が有効であることがわかった。また、禁牧による効果も大きいことが明らかになった。また、砂丘固定を中心とした対策技術がある程度有効であることが明らかになったが、流動砂丘を効率的に固定し、植生回復を促進するためには、砂丘の

地形的位置に応じて対策技術を複合的に適用していくことが望ましい。

⑤ 2つの村をを対象に、舎飼導入にともなう放牧圧の軽減可能性を検証した結果、舎飼畜産の導入・拡大を前提にした土地利用の適正化によって、沙漠化の防止と農家経済の改善が両立できることが明らかとなった。

⑥ 奈曼旗における自然・社会・経済条件による沙漠化プロセス、沙漠化防止・回復技術の効果のちがいをとりまとめた。

本研究で使用したランドサットTMデータは米国政府が所有し、EOSAT/宇宙開発事業団によって提供されたものである。また、データの購入に際しては財団法人リモートセンシング技術センターの協力を得た。ここに記して感謝申し上げる。

6. 参考文献

- 1) Zhu, Z., Wang, X., Wu, W., Kang, G., Zhu, C., Yao, F., & Wang, T.(1992):China: Desertification mapping and desert reclamation. In "World Atlas of Desertification", UNEP: 46-49.
- 2) 今川俊明 (1996) : 宇宙から見た中国東部の沙漠化, 土壌の物理性, 74、29-37.
- 3) 衣保中 (1993) : 「東北農業史」, 吉林文史出版社, 108pp.
- 4) 劉新民・趙哈林・徐斌(1993):「科爾沁草原生態系統破壞与回復机制」, 劉新民・趙哈林主編『科爾沁沙地生態環境綜合整治研究』, 甘肅科学技術出版社, pp.12-26.
- 5) Hill, M.O.(1979a) : TWINSpan — A FORTRAN program for arranging multivariate data in an ordered two-way table by classification of the individuals and attributes. Cornell University Press, Ithaca, New York, 60pp.
- 6) Hill, M.O.(1979b) : DECORANA — A FORTRAN program for Detrend Correspondence Analysis and Reciprocal Averaging. Cornell University Press, Ithaca, New York, 36pp.
- 7) Zhu, Z., Zou, B., Di, X., Wang, K., Chen, G. & Zhang J.(1988):Desertification and Rehabilitation -Case Study in Horqin Sandy Land: Institute of Desert Research Academia Sinica, Lanzhou, 113p.
- 8)中国科学院蘭州沙漠研究所(1958): 大沁他拉沙漠化發展程度図—1:100000.
- 9)中国科学院蘭州沙漠研究所(1975): 大沁他拉沙漠化發展程度図—1:100000
- 10)内蒙古奈曼旗農業局土壤普查隊(1984): 内蒙古奈曼旗第二次土壤普查報告, 125pp

国際共同研究などの状況

国際共同研究名：日中環境保護協定「砂漠化防止対策の適用効果の評価手法の開発に関する研究」及び「農耕地の荒廃防止のための土地利用システムに関する研究」

カウンターパート：朱 震達 中国国家環境保護局研究員
趙 哈林 中国科学院沙漠研究所教授
鄭 度 中国科学院地理研究所教授

参加・連携状況など：参画機関 《日本側》

農林水産省農業環境技術研究所

筑波大学

東京大学

《中国側》

中国科学院蘭州沙漠研究所

地理研究所

研究成果の発表状況

(1) 口頭発表

- ① Imagawa, T., M. Fukhara, T. Wang and Z. Zhu : CEReS International Symposium on the Role of Remote Sensing for the Environmental Issues in Arid and Semi-Arid Regions, Chiba, Japan, 1997
"A monitoring method of desertification in Naiman, Inner Mongolia, China"
- ② Ohkuro, T., M. Nemoto, S. Li and H. Zhao : CEReS International Symposium on the Role of Remote Sensing for the Environmental Issues in Arid and Semi-Arid Regions, Chiba, Japan, 1997
"Vegetation distribution in Naiman, Inner Mongolia, China"
- ③ 大黒俊哉, 根本正之, 徐斌, 趙哈林 : 日本生態学会第43回大会 (1996)
「中国東部半乾燥地域における過放牧による植生退行過程」
- ④ 大黒俊哉, 根本正之, 李勝功, 趙哈林 : 日本生態学会第44回大会 (1997)
「中国北東部半乾燥地域の荒廃した砂地草原における植生回復および改良試験」
- ⑤ Ohkuro, T., M. Nemoto, S. Li and H. Zhao : Japan-China Workshop on Land Evaluation of Prevention and Remedies for Desertification, Tsukuba, Japan, 1998
"Vegetation degradation, restoration and improvement in grazing pasture in Kerqin Sandy Land, China"
- ⑥ 大黒俊哉, 根本正之, 李勝功, 趙哈林 : 日本生態学会第45回大会 (1998)
「中国・カルチン砂地における過放牧による土地・植生退行プロセスの立地間差異」
- ⑦ 石敏俊 : 平成9年度日本農業経営学会大会 (1997)

「ホルチン砂地における砂漠化防止のための土地利用配置の適正化－中国内モンゴル自治区奈曼旗の事例－」

- ⑧ Shi, M., Y. Tanaka and H. Zhao : Japan-China Workshop on Land Evaluation of Prevention and Remedies for Desertification, Tsukuba, Japan, 1998
"Sustainable development of land use and farming system for combating desertification in Horqin Sandy Land : A case study on Naiman Banner, Inner Mongolia, North China"
- ⑨ Shirato, Y., I. Taniyama, T. Zhang and H. Zhao : CEReS International Symposium on the Role of Remote Sensing for the Environmental Issues in Arid and Semi-Arid Regions, Chiba, Japan, 1997
"Geology, topography and soils in Naiman, Inner Mongolia, China"
- ⑩ Shirato, Y., I. Taniyama, T. Zhang and H. Zhao : Japan-China Workshop on Land Evaluation of Prevention and Remedies for Desertification, Tsukuba, Japan, 1998
"Land degradation and soil properties in Naiman, Inner Mongolia, China"
- ⑪ 白戸康人, 谷山一郎, 張銅会, 趙哈林 : 第43回日本土壤肥料学会大会 (1997)
「中国内モンゴル奈曼旗における土地荒廃と土壤特性」
- ⑫ 白戸康人, 谷山一郎, 張銅会, 趙哈林 : 第44回日本土壤肥料学会大会 (1998)
「中国北東部の風食地域における防風林植栽が土壤特性に及ぼす影響」
- ⑬ 白戸康人, 谷山一郎, 張銅会, 趙哈林 : 第8回日本沙漠学会大会 (1997)
「中国内モンゴル奈曼旗における砂漠化防止対策が土壤特性に及ぼす影響」
- ⑭ 白戸康人, 谷山一郎, 張銅会, 趙哈林 : 第9回日本沙漠学会大会 (1998)
「中国内モンゴル奈曼旗における風食対策と土壤特性の変化」
- ⑮ Tachiiri, K., K. Takeuchi and A. Tsunekawa : CEReS International Symposium on the Role of Remote Sensing for the Environmental Issues in Arid and Semi-Arid Regions, Chiba, Japan, 1997
"The present status, potential and limits of simulation models of desertification in the world"
- ⑯ Tachiiri, K., K. Takeuchi, T. Wang and H. Zhao : Japan-China Workshop on Land Evaluation of Prevention and Remedies for Desertification, Tsukuba, Japan, 1998
"Desertification monitoring over semi-long and short periods in Naiman, Inner Mongolia, China"
- ⑰ Zhang, T., T. Ohkuro, S. Li, H. Zhao and Y. Shirato : Japan-China Workshop on Land Evaluation of Prevention and Remedies for Desertification, Tsukuba, Japan, 1998
"Effect of fertilizing and watering on grass biomass of sandy grassland in the Horqin Sandy Land, China"
- ⑱ Zhao, H., S. Li, T. Zhang, M. Nemoto and T. Ohkuro : Japan-China Workshop on Land Evaluation of Prevention and Remedies for Desertification, Tsukuba, Japan, 1998
"Productivity changes and the evaluation of its rational utilization under different grazing intensities in Horqin Sandy Grassland, China"

(2) 論文発表

- ① 今川俊明 : 土壤の物理性, 74 (1996)

「宇宙から観た中国東部の砂漠化」

- ② Imagawa, T., M. Fukuhara and T. Watanabe : JARQ, 31(3), 163-169 (1997)
"A monitoring method of land cover / land use change in Naiman, Inner Mongolia autonomous region, China using Landsat data"
- ③ Nemoto, M., T. Ohkuro and B. Xu : Ecological Research, 12, 325-336 (1997)
"The role of weed invasion in controlling sand dune reactivation in abandoned fields in semi-arid Inner Mongolia, China"
- ④ 大黒俊哉, 根本正之 : 第10回環境情報科学論文集, 31-36 (1996)
「中国北東部半乾燥地域の砂地草原における過放牧による植生退行過程」
- ⑤ 大黒俊哉, 根本正之 : ランドスケープ研究, 60(5), 495-500 (1997)
「中国北東部半乾燥地域の砂地草原における放牧管理による植生・土壌の回復過程」
- ⑥ 石敏俊 : 日本農業経営学会報告論文, 農業経営研究, 37(1), 印刷中 (1998)
「農牧地域における砂漠化防止のための土地利用の適正化－中国内モンゴル自治区奈曼旗の事例－」
- ⑦ 立入郁, 武内和彦 : ランドスケープ研究, 61(5), 581-584 (1998)
「中国内モンゴル・砂地草原における土地的要因が流動砂丘の拡大に及ぼす影響」
- ⑧ 谷山一郎 : 沙漠研究, 6(1), 1-2 (1997)
「中国内モンゴル自治区奈曼旗の土地荒廃」
- ⑨ Imagawa, T. : Farming Japan, 30, 13-17 (1996)
"Recent trends of desertification and its monitoring"
- ⑩ 大黒俊哉 : 緑地環境科学, 朝倉書店, 70-81 (1997)
「中国における土地荒廃の現状と回復技術」
- ⑪ 大黒俊哉 : 農業技術, 52(6), 12-16 (1997)
「中国における土地荒廃の現状と過放牧による砂地草原の砂漠化」
- ⑫ 大黒俊哉 : 地理の研究, 157, 23-25 (1998)
「世界の草原と現状」
- ⑬ 石敏俊 : 筑波大学農林社会経済研究, 14, 41-114 (1997)
「中国における立体農業開発に関する研究－華北畑作地域の事例」
- ⑭ 石敏俊, 田中洋介, 趙哈林 : 筑波大学農林社会経済研究, 15, 1-26 (1998)
「農牧地域における土地利用の展開と砂漠化問題－中国・ホルチン砂地の事例－」

表1 ホルチン砂地における土地利用の歴史的展開と砂漠化進行の関連

時 期	王 朝	支配民族	土地利用	砂漠化関連	沙 丘 断 面 土 壤 層	形 成 時 期
B. C. 4000年～ B. C. 475年	紅山文化・ 夏・商・周	山戎族	農業と牧畜 業の兼営	局部沙漠化	第1古土壤層 第1沙層	B. C. 3100～2850年 B. C. 2850～625年
B. C. 475年～ 907年	戦国・秦・ 漢・魏晉・ 隋・唐	東胡族 鮮卑族 契丹族	遊牧中心	回復	第2古土壤層	625年～825年
907年～ 1270年	遼・宋・金	契丹族 女真族	農耕中心	沙漠化進行	第2沙層	825年～1300年
1270年～ 1902年	元・明・清	モンゴル族	遊牧中心	回復	第3古土壤層	1300年～1700年
1902年～ 1947年	清末・民国	モンゴル族 漢族	放牧と農耕 の兼営	沙漠化進行	第3沙層	1700年～現在

表2 舍飼導入による放牧圧軽減可能性の推計

		1996年	
村		尧勒甸子	沙日塔拉
放牧地面積(G)		1,010	1,387
放牧禁止区面積(G×K)		700	467
放牧家畜頭数(A)	羊単位	1,248	3,636
現在の放牧圧(A/(G×(1-K)))	羊単位/ha	4.02	3.95
舍飼飼料(R) 作物茎葉のみ	kg飼料単位	132,851	88,777
トウモロコシと コウリヤンの穀実	kg飼料単位	623,102	481,250
作物の穀実と茎葉の合計	kg飼料単位	755,953	570,027
舍飼導入した場合の放牧圧(D)			
作物茎葉のみ	羊単位/ha	2.85	3.69
作物の穀実と茎葉の合計	羊単位/ha	0	2.25

資料) 農家聞き取り調査

備考) 1) Dの計算式は $A \times (1-F) / (G \times (1-K))$ とする。Fは舍飼割合で $R / (S \times A \times 365)$ とする。

2) Sは家畜必要飼料量で、1 kg 飼料単位/羊単位×日とする。

3) 飼料単位の換算率は、穀実はトウモロコシが1.28、コウリヤンが1.05、茎葉はトウモロコシ及びコウリヤンが0.34、小麦が0.19、稲わらが0.33である。

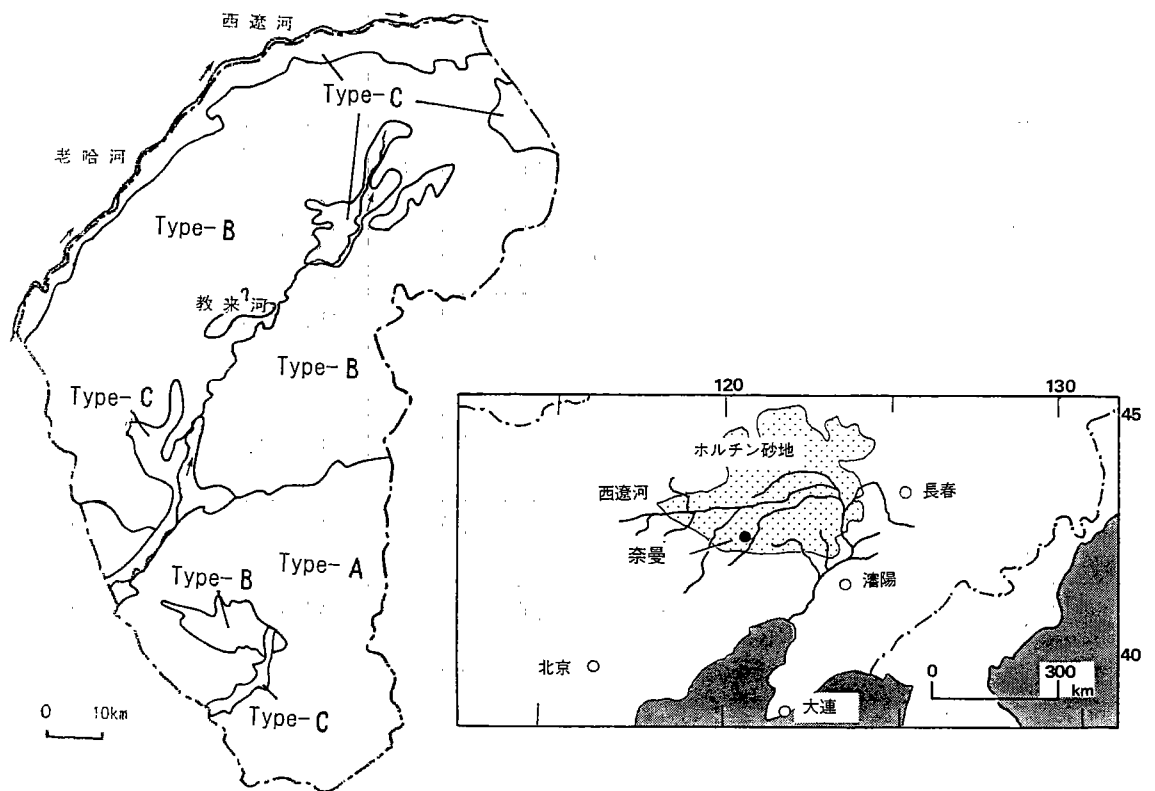


図1 内蒙古自治区奈曼旗の位置と土壌タイプ

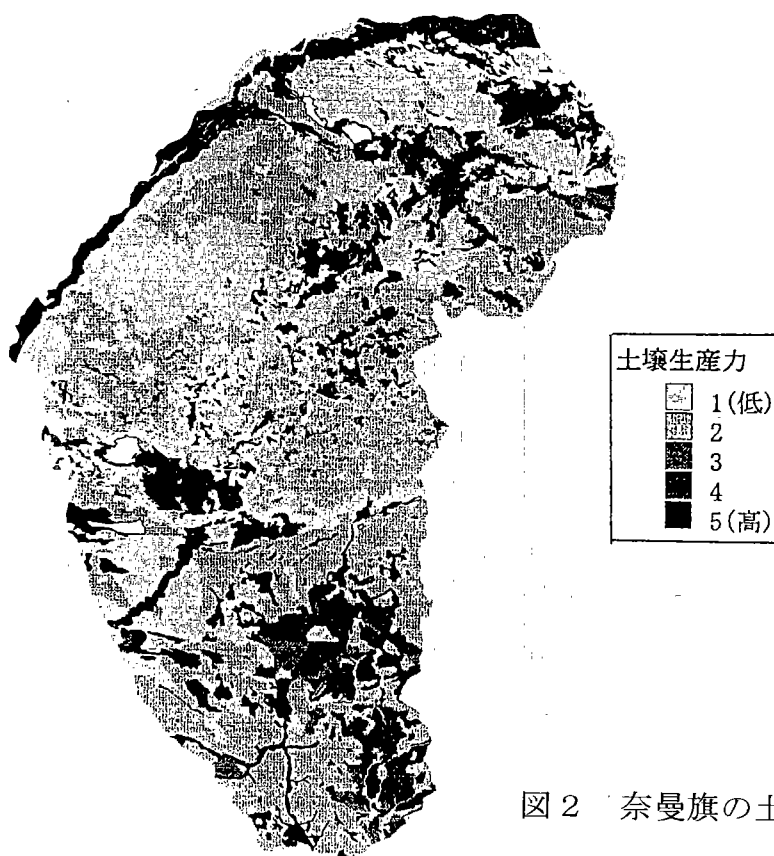


図2 奈曼旗の土壌生産力評価図

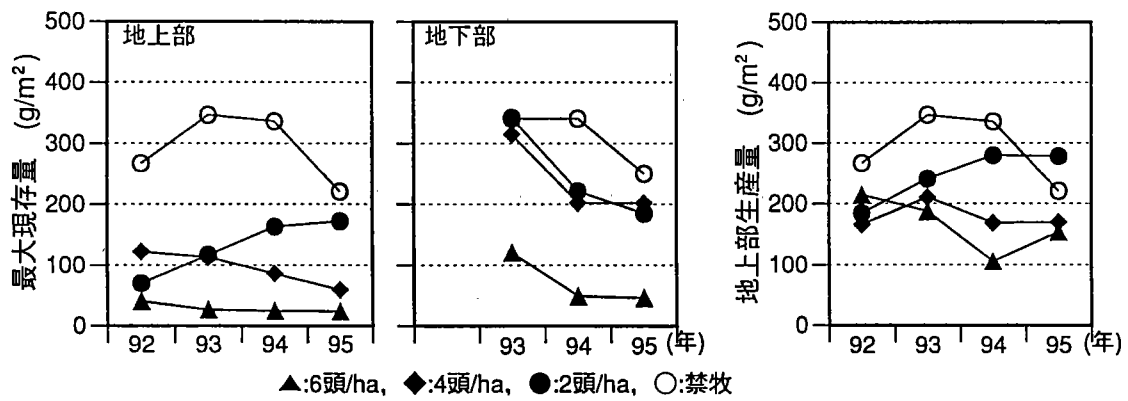


図3 最大現存量及び地上部生産量の推移

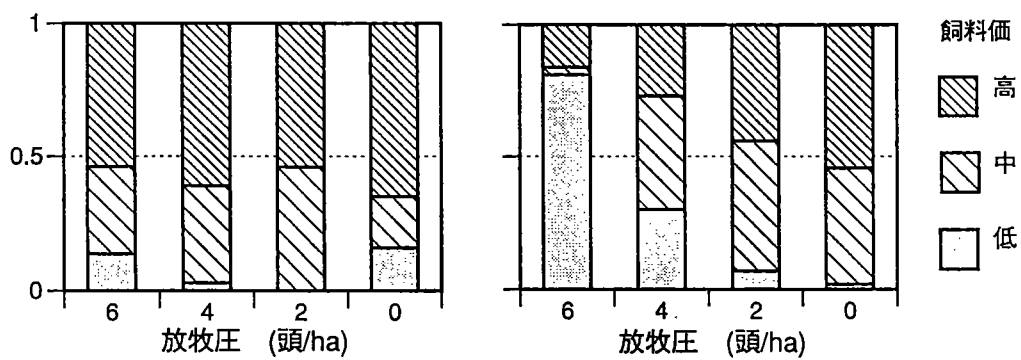


図4 飼料価の割合からみた地上部生産量の推移 (左: 92年, 右: 95年)

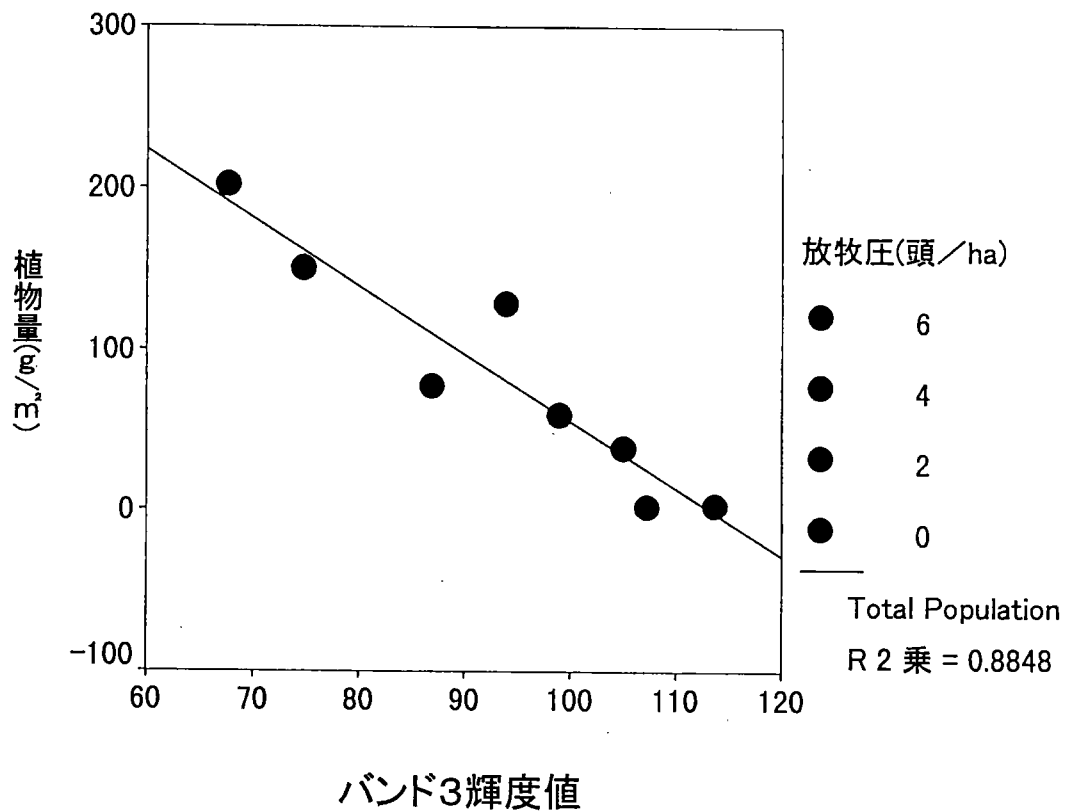


図5 植物現存量とランドサット TM3 バンドの輝度値の関係

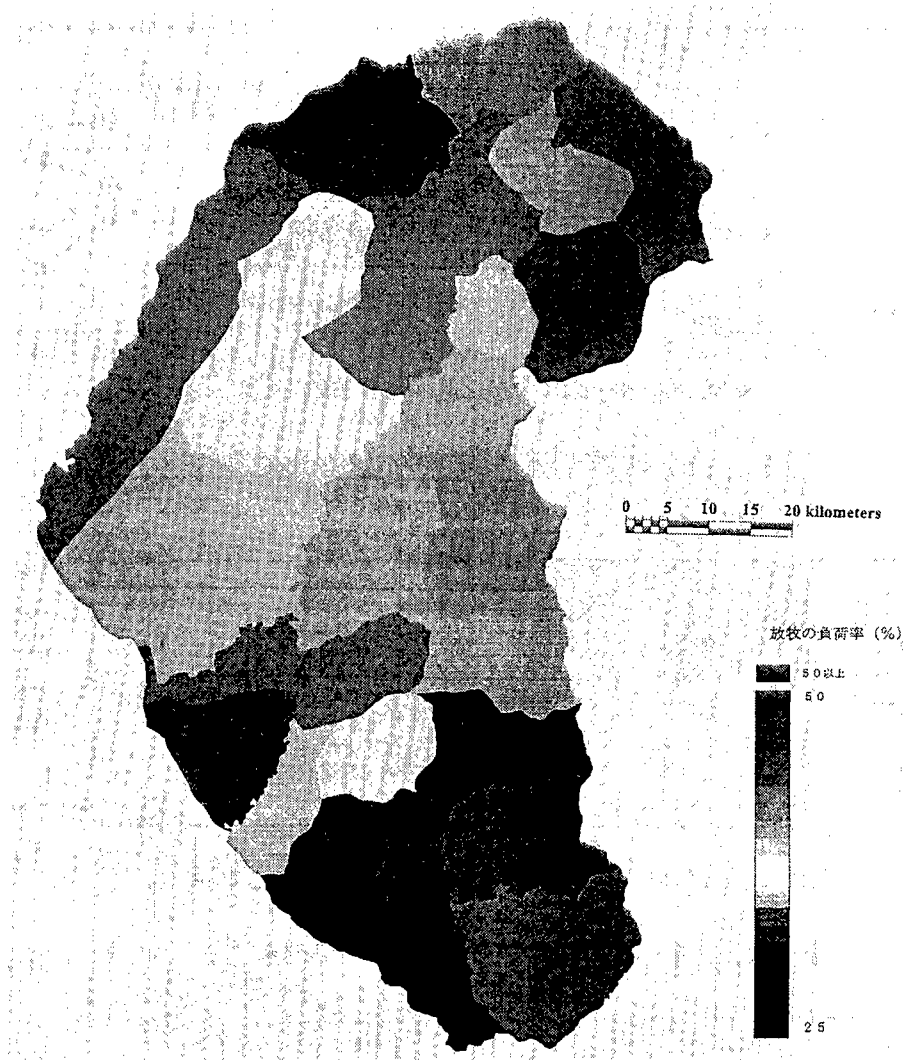


図6 放牧による草地への負荷率 (1996 年)

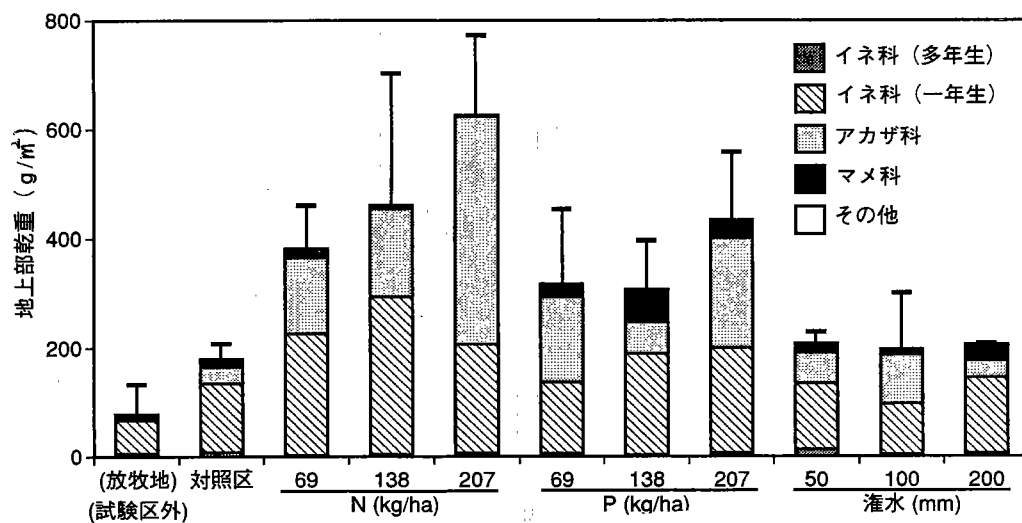


図7 草地改良試験における各処理区間の地上部乾重の比較

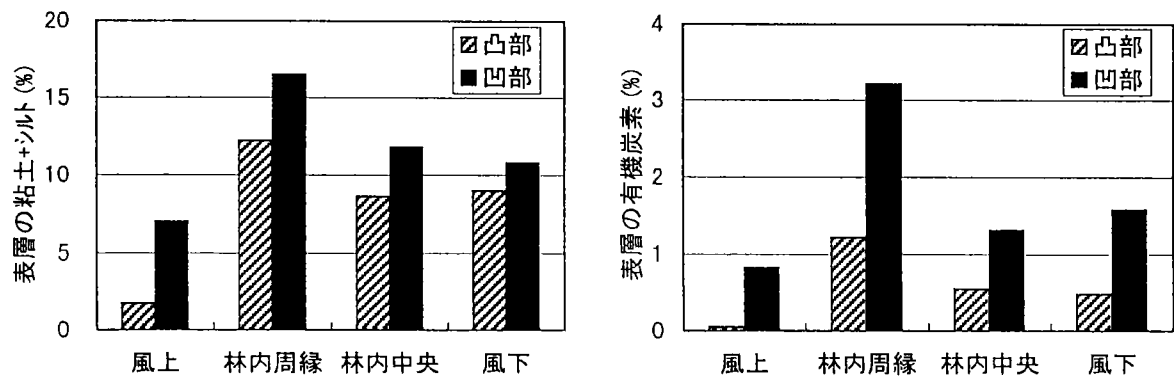


図8 防風林植栽が土壌特性に及ぼす影響

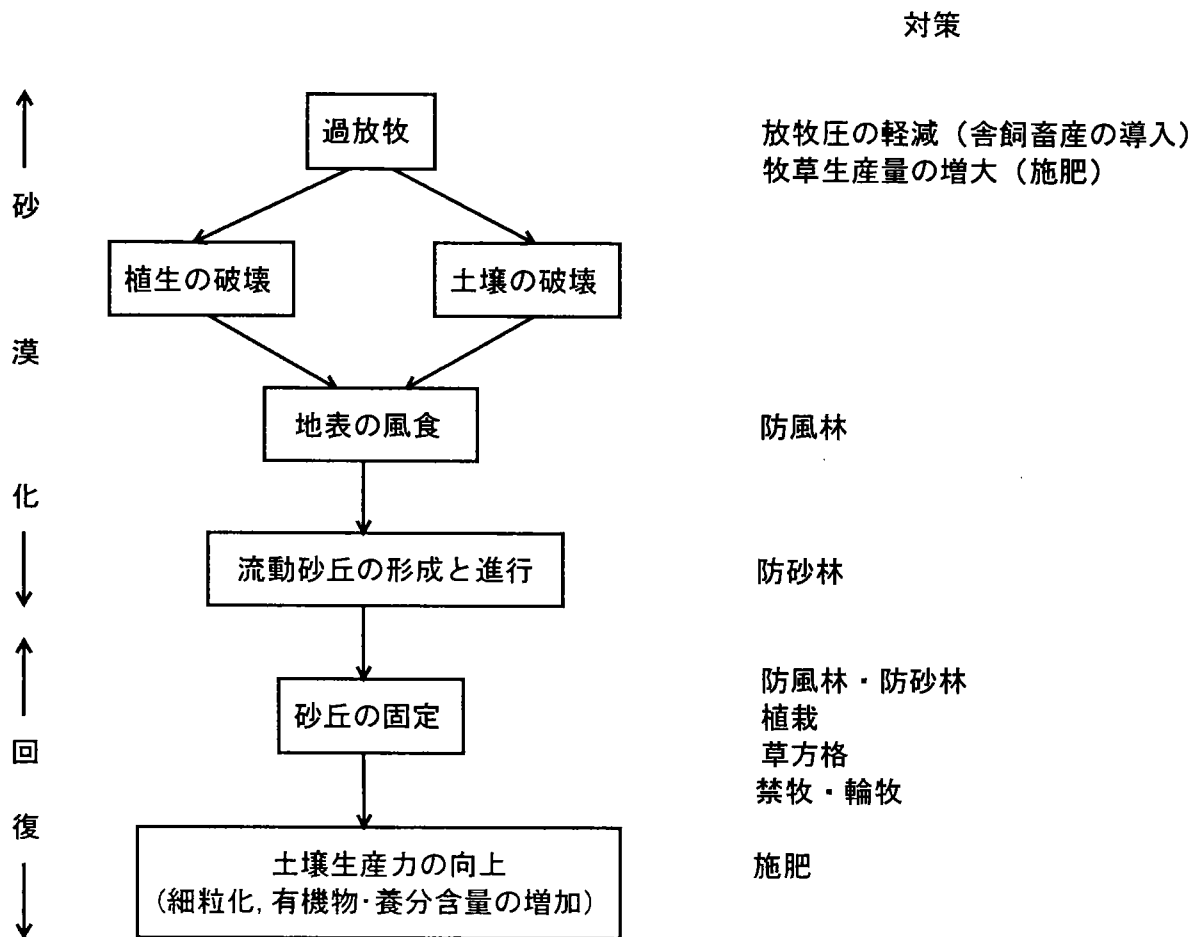


図9 奈曼旗における草地の風食による砂漠化プロセスと防止・回復対策