

中国北東部乾燥地における環境情報を用いた  
砂漠化のモニタリングとモデル化

立 入 部

①

中国北東部乾燥地における環境情報を用いた砂漠化のモニタリングとモデル化

Monitoring and modeling desertification using environmental  
information in drylands of Northeast China

東京大学大学院農学生命科学研究科  
生産・環境生物学専攻  
1996年度博士課程入学  
立入 郁  
指導教官：東京大学教授 武内和彦

## はじめに

1998年9月11日、日本の砂漠化対処条約受諾が閣議決定され、90日後の12月10日に日本について発効した。これによってセネガルで開催中だった第2回締約国会議(COP2)の最終日のみ、締約国としての参加となった。今後は砂漠を持たない日本もまた、砂漠化問題へ深く関わることを義務づけられ、資金などの支援、技術の移転などの貢献を求められる。これからますます、多様な手法により日本の砂漠化研究は発展していくことと期待される。

地球環境問題は、人類が自分の生まれた地球という惑星の生物圏に対し、影響を及ぼすものになってしまったということに起因する。人間が物質的自己拡張への欲求を抑えられるか否かについては現在ではまだ否定的な議論が主導権を握っている。しかしこのような地球環境問題の時代も、本論文における私の指導教官であった武内和彦教授の言葉では、「わくわくするような知的冒険のフィールドがそこにはある」ということになる。太古の昔には哲学者によって世界の全てが知的好奇心の対象であった。それはその後の職業細分化の波の中でまず自然科学と人文科学にわかれた後、さらに加速的に細分化していってしまい、現在では学問の名前を全て覚えることすら不可能な状況になっている。地球環境問題はしかし否応なく学際的な研究の必要性を研究者に突きつけている。そしてそのような状況だからこそ、伝統的な手法にとられない新しい手法の可能性が広がりつつあるのではないだろうか。

私が砂漠化研究に携わることになったのは一冊の本が原因である。「環境変動と地球砂漠化」というその本は、サヘルやオーストラリアなどの事例研究、文献レビューなどがおりこまれ、砂漠化に対する地理学的研究アプローチが詰まった非常に興味深い一冊であった。その後幸運なことに著者の一人である武内教授の下で学ぶ機会を得、さらに環境庁地球環境研究総合推進費研究プロジェクト(1996-1998年度)「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」に加わることができた。本研究は、このプロジェクトに加わらせていただければ、決して進められなかった。参加できたことを心から幸せに思っている。

本論文をまとめるにあたり、多くの方々にお世話になった。東京大学大学院農学生命科学研究科武内和彦教授には、研究の方針をたてる段階から細部の表現まで、非常に熱意あるご指導を賜った。博士課程から農学生命科学を学び始めた私に対し土地条件と人間活動の関わり合いについて基本的な考え方、調査方法、解析手法などについてもご教授をうけた。また同研究科恒川篤史助教授には、衛星画像解析や統計的手法、モデル化手法に関する問題について貴重な助言を賜った。

論文の審査の際は、東京大学大学院農学生命科学研究科石井龍一教授、東京大学大学院農学生命科学研究科佐藤洋平教授、東京大学空間情報科学センター柴崎亮介教授より、それぞれのご専門の立場から、示唆に富むご指摘を賜った。これらのご指摘に対しては、今後の研究の中に生かしていきたいと考えている。

とくに不慣れな海外調査においては、多くの方々にお世話になることになった。農林水産省農業環境技術研究所福原道一氏、同研究所環境立地研究室今川俊明室長、土壤保全研究室谷山一郎室長、白戸康人氏、保全植生研究室大黒敏哉氏には中国での現地調査を進めるに於いてあらゆる意味でご協力をいただくとともに、共同研究に関わるさまざまな作法に関する理解の至らなから、多大なご迷惑をかけることになった。ここに感謝の意を表するとともに深くお詫び申し上げたい。さらに中国側では、中国科学院蘭州砂漠研究所王濤副所長、同研究所奈曼ステーション趙哈林所長、同ステーション常学礼氏、張銅会氏には現地調査において非常にお世話になった。厚く御礼申し上げたい。その他現地で悪路を遅い時間まで進んでくれたドライバーの方や調査に協力していただいた農家の方々にも深く感謝したい。また地下水位調査に関しては東京大学大学院農学生命科学研究科森林利水及び砂防工学研究室鈴木雅一教授から貴重な助言をいただいた。私の力不足から、賜った助言を完全には調査に反映することができなかったため、これからの研究の中でひとつひとつ実現していきたいと思う。

緑地学研究室で事務を担当されていた岡本洋子氏、それを引き継がれた近藤智子氏、前農学部研究協力係長高見沢光子氏、生産・環境生物学専攻羽生良子氏には平素より煩雑な事務手続きを処理していただいた。私が研究に専念できたのもこれらの方々のおかげである。また東京大学アジア生物資源環境研究センター研究協力員北川淑子氏にも乾燥地の植物に関して貴重なお話を多く聞くことができた。

このほか、東京大学大学院農学生命科学研究科の緑地学研究室のみならず、平素からさまざまな刺激的な議論をすることができた。感謝の意を示したい。とくに同研究室の

安部和子さんには校正でも助けていただいた。

本研究を進めるにあたり、多くの人々とのつながりによって助けられているということを強く感じた。自然を理解し、有効に利用しようとする動きに対して少しでも貢献できるよう、これからも真摯に探求を続けたい。

1999年2月

立入 郁

目次

第1章 研究の背景と目的.....	1
第1節 研究の背景.....	1
1-1 地球環境問題における砂漠化の位置づけ.....	1
(1) 砂漠化問題をめぐる世界の取り組み.....	1
(2) 砂漠化に関する定義と諸概念.....	2
(3) 世界の「砂漠化」の現状.....	5
(4) 砂漠化の要因.....	6
(5) これまでの砂漠化研究の手法.....	9
1-2 環境情報の利用とモデル化手法の現状、可能性、限界.....	12
(1) 環境情報を用いた研究手法の現状、可能性、限界.....	12
(2) モデル化を用いた研究手法の現状、可能性、限界.....	13
第2節 研究の目的と意義.....	15
2-1 研究の目的.....	15
2-2 研究の意義.....	16
(1) 環境情報の統計的解析による客観性の保持.....	16
(2) 将来予測と計画への応用.....	18
第3節 研究の方法と構成.....	18
第2章 アジアの砂漠化地域の環境条件.....	21
第1節 アジアの砂漠化と環境特性.....	23
1-1 アジアにおける「砂漠化」の現象.....	23
1-2 アジアの環境特性.....	23
第2節 アジアの土地環境区分.....	26
2-1 既往の土地環境区分.....	26
2-2 用いたデータセットの概要と配布元.....	27
2-3 土地環境区分のアルゴリズム.....	29
2-4 土地環境区分結果.....	31
第3節 土地環境区分と土地利用、土壌荒廃の関連.....	33
3-1 アジアの土地利用と土地環境区の関連性.....	33
(1) 環境情報にみるアジアの土地利用の空間分布.....	33

(2) 土地環境区分結果と土地利用の関係	35
3-2 アジアの土壤荒廃の空間分布と土地環境区・土地利用との関連性	37
(1) アジアの土壤荒廃の空間分布	37
(2) アジアの土壤荒廃と土地環境区・土地利用の関連性	37
3-3 補足	41
(1) 統計手法について	41
(2) 土壤荒廃と環境条件の関連について	43
第4節 小括	46
第3章 奈曼旗の砂漠化モニタリングとモデル化	48
第1節 対象地の概要	52
(1) 地理的条件	52
(2) クルチン砂地の土地発達史	61
第2節 奈曼旗の砂漠化モニタリング	62
2-1 砂漠化モニタリングにおける時間スケールの重要性とモニタリング手法	62
2-2 中期変動(50年スケール)	63
(1) 解析に用いたデータ	63
(2) 結果	67
(3) 考察	68
2-3 短期変動(20年スケール)	70
(1) 手法	70
(2) 結果	75
(3) 考察	76
2-4 季節変動	80
(1) 解析に用いたデータ	80
(2) 結果	80
(3) 考察	82
第3節 砂漠化モデルとその応用	82
3-1 奈曼砂漠化モデルの構築	82
(1) 自然的要因の考慮	82
(2) 社会的要因の考慮	85
(3) 統合	90
3-2 モデルを用いた予測と計画	93
(1) 将来予測	93
(2) 土地利用の空間配置	94

(3) 奈曼旗全体の計画.....	95
3-3 考察.....	96
第4節小括.....	97
第4章 総合考察と今後の課題.....	99
第1節 総合的な砂漠化モニタリングに関する考察.....	99
(1) 乾燥地以外の土地荒廃現象との関係.....	99
(2) 複数の時間スケールを用いた砂漠化モニタリング.....	100
(3) 複数の要因に関する関係式の統合.....	102
第2節 環境情報を用いた手法の他地域への一般化へ向けての課題.....	103
(1) モニタリングについて.....	103
(2) モデルを用いた予測と対処について.....	104
摘要.....	107
Summary.....	111
引用文献.....	115



## 第1章 研究の背景と目的

### 第1節 研究の背景

#### 1-1 地球環境問題における砂漠化の位置づけ

##### (1) 砂漠化問題をめぐる世界の取り組み

1968年から1973年にアフリカ・サヘル地域を襲った干ばつはそこに住む人々に重大な被害をもたらし、乾燥地における人間の生活に対する世界的な関心の引き金になった。1972年の国連人間環境会議(ストックホルム会議)では砂漠化ということばは使われなかったが、土壌劣化の要因として自然的要因だけではなく経済社会的な要因も関係していることを考慮する必要があることが勧告された。

国連機関ではじめて砂漠化(desertification)という言葉が使われたのは1973年の第1回UNEP管理理事会であったと思われ、翌1974年の第29回国連総会で「砂漠化防止のための国際協力」に関する決議が採択されて以降「砂漠化」という名称を用いて世界的な取り組みがはじまっていく。1974年の決議を受けて1977年にUNEPの主催で国連砂漠化防止会議(UNCOD)が開催された。UNCODにおいて砂漠化防止行動計画(PACD)が採択され、各国および各国際機関がとるべき行動についての26項目の勧告がなされた。この時UNEP内に砂漠化防止計画活動センター(DCPAC)が設立され、以降の砂漠化防止対策の中心となった。その後1984年のUNEP第12回管理理事会で、砂漠化防止行動計画の成果についての評価がおこなわれた。1990年にはUNEPの主催によりナイロビで「砂漠化の評価:現状と方法についての国際会議(GLASOD)」が開催され、ISRIC(International Soil Reference and Information Centre)が人間による土壌荒廃現状図(UNEP & ISRIC 1990)の作成を任された。この現状図は翌1991年4月に完成し、グローバルスケールの土壌荒廃の分布に関する貴重なデータとなっている。なおこの年のUNEPの報告によって、砂漠化は依然として進行しつつあるとされた。

1992年の開発と環境に関する国連会議(UNCED=いわゆる「地球サミット」)ではアフリカ諸国の提案により第47回国連総会に対し、94年6月までを目途に、深刻な干ばつ又は砂漠化の影響を受けている国を対象とした国際的な砂漠化防止条約の策定のための政府間交渉委員会を設立することを要請することが合意された。UNCEDではまた気候変動枠組み条約や生物多様性条約に日本を含む多くの国が署名し、さらに「環境と開発

に関するリオ宣言」,そしてその実施のための課題集ともいえる「アジェンダ 21」などが採択された。1994年6月に採択された砂漠化対処条約(United Nations 1994)は、96年9月末までに発効に必要な50ヶ国が批准し、90日後の同年末(正確には12月26日)に発効した。同条約で「砂漠化」、「土地荒廃」など多くの関連するキーワードが再定義された。日本については、1998年9月11日に同条約受諾について閣議決定され、受諾書を国連事務総長に寄託した。その結果90日後の12月10日に日本について発効した。同条約受諾によって日本にも、先進国として、砂漠化の影響を受ける発展途上国が砂漠化に対処し干ばつの影響を緩和するために計画・戦略を策定・実施することを援助するため、資金その他の支援を提供する義務を負うことになるほか、適切な技術の移転を促進するなどの貢献が求められる(環境庁 1998a,b)。

## (2) 砂漠化に関する定義と諸概念

「砂漠化」ということばは、砂漠化対処条約で「乾燥、半乾燥、乾性半湿潤地域における種々の要素(気候変動および人間の活動を含む)に起因する土地荒廃(land degradation)」だと定義された(United Nations 1994)。ここで乾燥地域とは年降水量と年可能蒸発散量との比(P/PET, Arid Index ともいわれる)が0.05-0.20の地域であり、半乾燥地、乾性半湿潤地域はP/PETが0.20-0.50, 0.50-0.65の地域である。ただし、この閾値をこえたとおこる現象が変わるわけではなく、あくまで人為的に線が引かれたにすぎない。そこで、ここでは現象の変化に注目して本論文中における砂漠化を再定義する。

砂漠化は、1977年の国連砂漠会議においては「生物の潜在的生産力が低下するか破壊され、最終的には砂漠のような状態(desert-like conditions)にみちびく現象である」(U.N. Secretariat of the Conference on Desertification 1977)とされていた。砂漠とは「生物の活動をほとんど維持し得ない不毛の地」(遠藤 1981)である。時期を同じくして Le Houérou(1977)が狭義の砂漠化現象を言い表す語として「desertisation」(英 desertization)を提唱した。彼の desertisation は「風成作用が卓越して、砂漠に特徴的な地形が形成され、拡大していくプロセスを指す言葉」として提案されたのである(門村 1988)。砂漠に特徴的な地形である砂丘の発達は、土地の生産性を著しく減少させる。また、風によって砂丘から吹き上げられた砂粒が風下側の植生などにも大きなダメージを与える。表層付近の砂の流動性が土壌の発達を妨げる、など一旦砂丘が形成されてしまうと土地の生産性の回復は非常に困難になる。土地生産性の減少に関するこれらの正のフィードバック作

用が、土地荒廃現象の中で砂漠化に特殊性を与えている。

これらに基づき、ここでは砂漠化を「土地荒廃の結果、乾燥に起因する正のフィードバック作用がおこり土地の生産性が回復困難な状態へ変化するプロセス」と定義する。ここで「土地荒廃」(land degradation)は United Nations (1994)の定義を参考に、「生物生産に用いられている土地の生物学的な生産性と複雑性の減少」と定義する。前述の通り、この定義においては風の作用が大きく働いている。以下ではとくに述べない限りここで述べた定義を砂漠化、United Nations (1994)の定義は「砂漠化」と括弧をつけて表記することとする。

ここで述べた定義と本研究で用いた既存のデータベースのカテゴリとの対応は以下のようになる。本研究では、土壌荒廃の標準的データベースとして UNEP/ISRIC の「人間による土壌荒廃現状図」(UNEP & ISRIC 1990)を用いた。このデータには土壌荒廃程度、

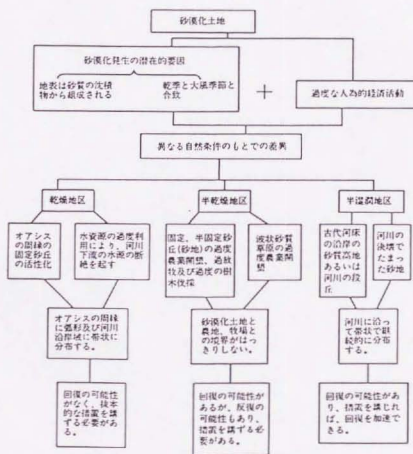


図 1-1 砂漠化の地域差とその特徴のフローチャート  
(朱ら 1989, 真木 1996)

荒廃の種類、被害地域の面積率、原因、最近の土壤荒廃進行度などが含まれている。土壤荒廃の種類では大きく水食、風食、化学的劣化、物理的劣化にわけられ、それぞれさらに3-4種類へと細分されている。砂漠化においては、風の作用が重要であったため、風食地域とくに注目することにした。

砂漠化の要因のうち人間活動がしめる部分の大きさは、Aridity index と関連があると考えられる。すなわち、Aridity index が小さい乾燥地域では自然条件の占める部分が大きく、半乾燥地、乾性半湿润地と変化するにしたがって、人間活動の占める部分が大きくなる。とくに植生被覆の下に古砂丘が存在している場合には、人間の土地利用によって回復を困難にする閾値を越えてしまう典型的な例としてよく用いられる。

中国においては、上述のような乾燥度と砂漠化の関係についてとくに整理された研究例が少なくない。たとえば朱ら(1989)によるフローチャート(図1-1)では、乾燥地区では

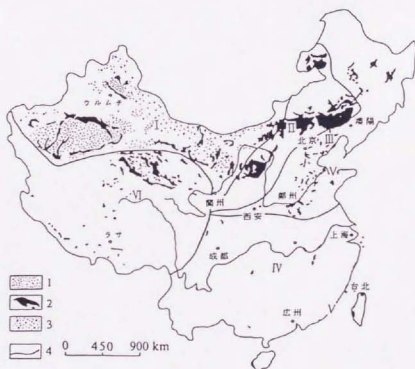


図 1-2 中国の砂漠化地域の類型区分 (朱ら 1994, 真木 1996)

- 1. 砂砂漠、2. 砂漠化・風砂化、3. ゴビ砂漠、4. 境界線
- I. 西北部の乾燥オアシス周辺の砂漠化地域
- II. 内モンゴル・万里の長城沿いの半乾燥草原の砂漠化地域
- III. 東北部の半湿润地の風砂(風食・砂化)化地域
- IV. 南部の湿润地の風砂化地域
- V. 沿岸部の風砂化地域
- VI. チベット高原の寒冷地の砂漠化地域

砂漠周辺のオアシスについて、半乾燥地区では固定砂丘の再活動について、半湿潤地区では河川沿いの砂地についての記述がある。なお、ここでいう乾燥度は中国でよく用いられる分類であり、UNEP の式とは異なるが、中国北部においては、おおまかにには対応が見られる。すなわち、中国分類の乾燥地区は UNEP 分類の乾燥地域と、前者の半乾燥地区は後者の半乾燥地域+乾性半湿潤地域と、前者の半湿潤地区は後者の湿潤地域にほぼ対応している(図 1-2, 2-2)。

これらから、制御可能な、おもに人間活動に起因する砂漠化は、UNEP の分類に即していえば、半乾燥地域、乾性半湿潤地域、湿潤地域の風食にほぼあたると考えられる。

なお、本論文では乾燥地(drylands)とは乾燥、半乾燥、乾性半湿潤地域の総称であるとする。また、砂丘再活動で動き出した砂丘は中国においては流動砂丘という。以下では流動砂丘を用いる。

### (3) 世界の「砂漠化」の現状

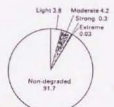
前項で述べたように本研究ではとくに狭義の砂漠化ということで、乾燥地の風食に注目する。UNEP(1992)の報告では地球上の全乾燥地 5369.2 万 km<sup>2</sup>のうち 19.3%にあたる 1035.2 万 km<sup>2</sup>で土壤荒廃が起きているとされている。うち風食は 432.4 万 km<sup>2</sup>でおこっている。強さによるうちわけは重度 1.8 万 km<sup>2</sup>、強度 18.0 万 km<sup>2</sup>、中度 215.4 万 km<sup>2</sup>、軽度 197.2 万 km<sup>2</sup>である(表 1-1)。重度、強度、中度、軽度の指す意味は以下のとおりである。重度とは土地利用が不能で、修復も不可能な状態である。もとの生物的機能は完全に破壊されている状態である。強度とは農業的には修復が不可能で、地形的な修復にも大規模な技術が必要である。生物的な機能もかなり破壊されている。中度とは持続

表 1-1 大陸別の風食による被害のようす

(UNEP 1992 より転載)

単位は 10<sup>6</sup>ha

Degree	Africa	Asia	Australasia	Europe	North America	South America	Total
Light	78.1	80.5	15.9	1.3	2.5	18.8	197.2
Moderate	74.2	62.9	0.0	36.6	33.6	8.1	215.4
Strong	8.6	9.7	0.1	0.0	1.6	0.0	18.0
Extreme	1.9	0.1	0.0	0.7	0.0	0.0	1.8
Total	159.9	153.2	16.0	38.6	37.8	26.9	432.4



Global susceptible drylands degraded by wind erosion (%)

可能な農業的土地利用が可能であるが、農業生産高はかなり低くなっている状態である。排水設備や堤防などの技術の導入が望まれる。当初の生物学的機能は一部破壊されている。軽度とは持続可能な農業生産が可能であり、農業生産高がいくらか低くなっている状態である。管理の仕方によっては生産高を戻せ、生物学的機能もそこなわれていない。

乾燥地の風食を大陸別にみても、被害地域はアフリカとアジアに集中しており、2大陸だけで世界の72%強が集中している。

また、世界の土地荒廃による被害額423億ドルのうち約1/2の209億ドルがアジアでのものであるという報告(Dregne *et al.* 1991, 表1-2)もある。またDregne *et al.* (1991)はさらに灌漑地、天水農地、放牧地にわけて被害面積を算出した(表1-3)。大陸別の人口増加率をみるとアジアの方がアフリカを上回っており(総務庁統計局 1990)、将来的には質量ともアジアは世界的に見ても主たる砂漠化被害地域になることが予想される。この図に表されていない「長期にわたる植生の消失」については、International Center for Arid and Semi-arid Land Studies (ICASALS) of Texas Technical University, U.S.A. の作成したデータによって被害面積を推定できる。このタイプの土地荒廃はオーストラリアや中央アジアのアラル海・カスピ海周辺部などでおこっており、GLASODの現状図に含まれているものの2倍以上の2,556万km<sup>2</sup>とされている。なお、このタイプの土地荒廃は放牧地でおこっている(Dregne *et al.* 1991)。

#### (4) 砂漠化の要因

砂漠化は自然的要因と人為的要因が合わさった結果だとされ、砂漠化対処条約においても気候変動もしくは人間の活動を含む種々の要素による結果だと定義された。

自然的要因としては小雨もしくは強風がとりあげられてきた。降水量の減少は1年ないしは数年の変動をさす場合から、ときに数万年スケールの気候変動をさす場合まであり、タイムスケールに十分注意する必要がある。アフリカ北部の数万年スケールの研究が、門村(1991a)によってまとめられている。とりあげられた研究はおもに放射性炭素を用いた年代測定によってなされ、完新世後期である4500年前ごろから熱帯アフリカでは顕著な乾燥化が進み、3500-3000年前に一旦回復した他は一貫して砂漠化が進行したとしている。数十年スケールの小雨が砂漠化の要因となった例は、サヘル地域の他オーストラリア(大森・武内 1991)などでも見られる。また、数年スケールの小雨が砂漠化の要因となる

表 1-2 年平均所得損失 (Dregne *et al.* 1991 より転載)

単位は 10<sup>6</sup>US \$

Continent	Irrigated land	Rainfed cropland	Rangeland	Total
Africa	475	1,855	6,966	9,296
Asia	7,953	4,647	8,313	20,913
Australia	63	544	2,529	3,136
Europe	474	450	564	1,488
N. America	1,465	441	2,878	4,784
S. America	355	252	2,084	2,691
Total	10,785	8,189	23,234	42,308

表 1-3 農業利用される乾燥地における砂漠化土地荒廃 (Dregne *et al.* 1991 より転載)

Continent	Irrigated Lands			Rainfed Cropland			Rangeland			Total Agriculturally Used Drylands		
	Total	Degraded		Total	Degraded		Total	Degraded		Total	Degraded	
	m.ha	m.ha	%	m.ha	m.ha	%	m.ha	m.ha	%	m.ha	m.ha	%
Africa	10.42	1.90	18	79.82	48.86	61	1,342.35	995.08	74	1,432.59	1,045.84	73.0
Asia	92.02	31.81	35	218.17	122.28	56	1,571.24	1,187.61	76	1,881.43	1,311.70	69.7
Australia	1.87	0.25	13	42.12	14.32	34	657.22	361.35	55	701.21	375.92	53.6
Europe	11.90	1.91	16	22.11	11.85	54	111.57	80.52	72	145.58	94.28	64.8
N. America	20.87	5.86	28	74.17	11.61	16	483.14	411.15	85	578.18	428.62	74.1
S. America	8.42	1.42	17	21.35	6.64	31	390.90	297.75	76	420.67	305.81	72.7
Total	145.50	43.15	30	457.74	215.56	47	4,556.42	3,333.46	73	5,159.66	3,562.17	69.0

例はサヘルの干ばつによる被害がその好例である。強風によって砂が移動し、砂丘進入に至る例は降水量の場合に比べてモニタリングが難しい。本研究の事例対象地でもあるホルチン砂地など、中国の砂地においていくつかそのような研究例がある(たとえば、Zhu *et al.* 1988)。

人為的要因は、UNEP(1992)によって伐採、過放牧、過耕作、開拓、工業(industrial activity)と分類された。アジアの乾燥地では、伐採 111.5 万 km<sup>2</sup>、過放牧 118.8 万 km<sup>2</sup>、過耕作 96.7 万 km<sup>2</sup>、開拓 42.3 万 km<sup>2</sup>、工業 1.0 万 km<sup>2</sup>であった。また 1984 年の UNEP 第 12 回管理理事会においては、①砂丘の進入、②放牧地の荒廃、③乾地農業の生産高もしくは生産ポテンシャルの低下、④灌漑農地の浸水もしくは塩性化、⑤伐採もしくは植生の荒廃、⑥表流水もしくは地下水の質的・量的低下、が砂漠化の指標として挙げられている。

中国においては、朱・劉(1981)によって①農畜産業の経営方針の変化、②乾燥農業限界地の過耕作、③過開墾、過放牧、過伐採、過採薪、④上・中流河川水の過消費、⑤下流・末端河川水の過消費、⑥灌漑・排水不良と湛水、⑦土壌・水質の強度汚染、⑧戦争破壊

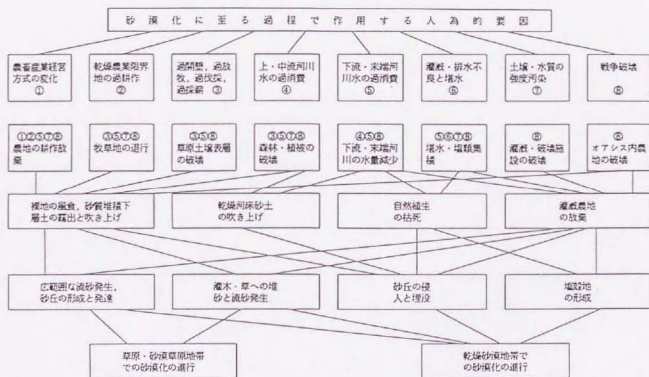


図 1-3 砂漠化する過程で影響を及ぼす人為的要因のフローチャート (朱・劉 1981, 真木 1996)



破壊などを起点としたフローチャートが描かれた(図 1-3)。

#### (5) これまでの砂漠化研究の手法

本研究ではおもに環境情報の利用によって議論を進めていくが、ここでは環境情報が本格的に利用できるようになった 1980 年代までの砂漠化関連の研究の流れを概観した。

砂漠化に関する研究は、今世紀初めに 1890 年代半ばから 1910 年代半ばまで続く断続的な小雨年の影響をうけて、フランスやイギリスの研究者によってサハラ砂漠南縁地域を研究対象地として始まったとされている(門村 1988)。黎明期の研究はおもに視察の結果と短期の降水量変動を関連づけたもの(たとえば、Hubert 1920; Stebbing 1935)であった。これらの研究成果の妥当性をめぐる議論は、Jones (1938)によって一応の決着を見る。彼はこの論争を決着させるために英仏森林委員会によってなされた調査結果と、それまでの地理学分野の知見を整理し、乾燥化が進んでいるとはいえない、とした。この論文においては森林委員会の調査結果は①砂の移動、②植生の退行、③降水量の減少、④地下水位の低下、⑤井戸の枯渇、⑥川や湖の収縮、⑦人口の移入という項目別にまとめられているが、既存の文献の整理にページがさかれ、実証的なデータが新たに提出されたわけではない。

その後 1960 年代半ばまでは気候が安定したこともあり、研究の方も目立った動きが見られなくなる。

1968 年から始まったサヘル地域の干ばつは、国際社会の目を地球環境問題としての「砂漠化」に向けさせたが、研究者達の目をもまた再びこの問題に向けさせた。この干ばつがまだ続いていた 1973 年にロンドン大学で「アフリカの干ばつ」シンポジウムが開かれた。このシンポジウムに提出された論文は、各セッションの議長の総括とともに一冊の本にまとめられた(Dalby & Church 1973)。文献を見る限り実証的データが少ない総論的な議論ではあるが、自然(気候が中心)と人文(経済、交通など)を含む学際的なものである。このころから、国連の動きとも相互に影響を与え合いながら、自然的要因と人為的要因が複雑に絡み合うという砂漠化像が研究者の間にも定着していき、さまざまなアプローチが砂漠化研究に試みられるようになる。

もともと伝統のある分野とも言える気候については、当初は降水量の単純な変動をあつかうものが主であったが、これはその後残差と平均など長期の降水量を考慮したもの(岩崎 1984、大森・武内 1991)へと発展した。さらに降水の原因の解明へと進み(たとえば、

Otomosho 1985)、さらに近年はアルベドの変化などから気候の変動を予測したモデルの構築も出始めている(Charney *et al.* 1975, Franchito & Rao 1992 など)。また微気象については風洞を用いた実験などもおこなわれ、砂の粒径とそれを移動させる風速の閾値についての興味深い関係もえられている(Zhu *et al.* 1988 など)。数万年スケールの気候変化は、地形・地質といった土地の基本的環境の発達史に大きな影響を与え、研究もまた古環境の復元を通じてなされることが多い(たとえば、大森・1990、大森ら 1987)。最近になって第四紀の研究が進んだことで気候変化についてもかなりあきらかにされてきた。手法は<sup>14</sup>Cを用いた年代測定が主体である。<sup>14</sup>Cは半減期約5,600年で<sup>14</sup>Nに崩壊するため、3年以上前の年代測定は難しいとされているが、<sup>14</sup>Cによる年代測定は観測結果と矛盾しないストーリーを考える層序学的研究において定量的な基礎を与え、これによって2-3万年という時間スケールを対象とした地理学的研究に大きな貢献を果たした。関連したものとしては核実験に用いられたセシウムの同位体を用いた研究(Shirato *et al.* 1998)があり、砂丘を形成する砂の起源を知るのに役立っている。砂漠化地域の土壌に関する研究は、有機物含量、有効窒素(リン、カリウム)含有率などを用いた生産力の推定・分級(Shirato *et al.* 1998 など)や、少ない降水が土壌水分の分布にどう影響を与えるか、といった研究が主体である。植生については、コドラートを設定して被度や大きさなどを計測し解析する手法をそのまま乾燥地に適用した例(根本ら 1992、大黒・根本 1997)の他、埋土種子の発芽機構に関する研究(Wang *et al.* 1998 など)や花粉分析を用いた古環境の推定(たとえば、Sowunmi 1981)も進んでいる。これら伝統的な砂漠化研究の1980年代までの成果は、Mainguet(1991)によって膨大な研究をカバーしたレビューがされている。

社会科学については、以下の通りである。乾燥地の生活についての知見は当初、サハラ周辺におけるヨーロッパの研究者の人類学的研究によってもたらされた。現在もこうした研究はつづいており、日本においても田中(Tanaka 1987 など)や、その後継者である佐藤(Satoh 1984 など)らによる成果がある。これらは、遊牧民との生活を通じて彼らの民俗を知るといふ、伝統的な人類学的手法によっておこなわれている。また、嶋田(1992)は乾燥化が第一次産業に携わる人々の生活に与える影響を各種統計を用いて調べた。乾燥地に住む人々の生活が砂漠化を促進した例や逆に砂漠化によって被害を受けたり、移動を余儀なくされた例などが報告されている。乾燥地における経済学は、とくに水資源の利用を対象にしたものが多く、とくに脆弱な土地が多い砂漠化地域においては、近年

注目を浴びている「持続可能な開発」に関する研究の事例対象地としてもしばしば取りあげられる。研究手法も総論的なもの (Kessler 1994 など) から実証的なもの (MacBryde 1998 など) へと発展しつつある。

近年、技術の発達によって測定される量の可能性が広がったことで、砂漠化研究のアプローチが急速に多様性を帯びることになった。航空機から撮影された空中写真の判読による研究として、古砂丘を復元した例 (Grove & Warren 1968) や継続的なモニタリングをおこない、時間を説明変数としてモデル化した例 (Vinogradov 1995) などがある。1970年代に入って衛星画像の利用が可能になり、砂漠化研究に新たな手法が加わることになった。乾燥地においては、①雲がかかりにくいということ、②植生の量的差異の重要性が高い、という特徴がリモートセンシングに適していることもあり、以後砂漠化モニタリング衛星画像解析がよく用いられるようになる。伝統的な視察による報告結果が衛星画像解析によって批判された例として Lamprey (1975; 1988) に対する Helldén (1988) の批判がある。1975年の現地視察の結果 1958-75年の間に(サハラ)砂漠の南縁は90-100km南進した、とした Lamprey の報告は、Landsat/MSS を用いた衛星画像解析などを用いたスウェーデンのルンド大学のグループによって検討され、批判された (Helldén 1988)。その他 Landsat 衛星の MSS センサーを利用したもの (Pickup *et al.* 1993, Peck *et al.* 1986 など)、1982年打ち上げの Landsat4 号から搭載されるようになった TM センサーを用いたもの (Dwivedi *et al.* 1993, Raina *et al.* 1993 など) の他、1973年打ち上げの NOAA 衛星の AVHRR センサーを用いたもの (Rasmussen 1992, Potdar *et al.* 1993) もある。NOAA/AVHRR のデータから純一次生産量 (NPP) の推定をおこなった例 (Goward *et al.* 1985) も重要である。20m (バンクローでは 10m) という高解像度を持つ SPOT 衛星の画像を用いた例としては Tengberg (1995) や Miller *et al.* (1994) のものなどがある。また、しばしば2種類以上の衛星の画像が同時に用いられる (Marsh *et al.* 1992, Kalra & Joshi 1996 など) こともある。これらは可視域赤色と近赤外の輝度を用いて算出される植生指数というスカラ量によって利用されることが多くなった。衛星画像のセンサーは、高解像度化あるいは多バンド化が進んでおり、空間解像度 1m の衛星に近い将来稼働予定である。乾燥地に限らず、将来環境モニタリングにおける衛星画像の重要性はさらに高まっていくことが予想される。また、GIS (Geographical Information Systems) を用いて土地生産力の推定をおこなう試み (Machin & Navas 1995 など) も出た。

近年では計算機の発展もあって、さまざまな解像度、観測頻度をもつ衛星の画像や整

備されたデータベースを巧みに組み合わせた研究や後述するモデリングを用いた研究が出てきている。また、自然的要因と人為的要因の両方をあつかった研究例もでてきている。しかし、砂漠化研究に係るあらゆる会議で両者の統合が必要といわれるのに対してまだまだ実行例が少ないのが現状であり、研究グループやシンポジウムにおいて自然科学者と人文・社会学者が同席するという事態にとどまっている。

これは一つには自然的要因に関するデータと社会的要因に関するデータが持つ空間解像度の違いが原因として挙げられる。衛星画像の利用やデータセットの利用などにより自然的要素は比較的高い空間解像度を得られやすいのに対し、社会的なデータは行政区分を単位としてくられてしまっていることが多い。土地利用図などを媒介とした社会データの空間性の向上、あるいは小スケールで実際にデータをとって外挿する、などによってこの障壁を克服することが必要であろう。1つの研究の内部に自然的要因と社会的要因を同時に含むような試みが今後に残された大きな課題であるといえる。

## 1-2 環境情報の利用とモデル化手法の現状、可能性、限界

### (1) 環境情報を用いた研究手法の現状、可能性、限界

本論文においては、環境情報とは「客観的な形で保管され、再利用可能な環境に関するデータのセット」と定義する。例えば植生や気候に関する既存のデータベースや、衛星画像はもちろん、自らの測定に基づき土壌図などを作成した場合も含まれる。

1980年代以降、計算機の発展と呼応するように、デジタルデータベースの整備がさまざまな形で進んでいった。当初は国家ごとにまとめられていたそれらのデータは、地球規模での環境問題が国際社会の大きな議題となるにつれ、統合されてグローバルなデータベースに発展する例が増えていった。Matthews(1983)は既往の研究に衛星画像による補正を加えてグローバルな植生図を描いたが、これは標準的な植生データベースとして現在もよく用いられる。さらにFAO/UNESCOの土壌分類や米国地球物理データセンターの標高に関するデータベースなどが整備されている。

1970年代の半ばに打ち上げられた地球観測衛星の画像を用いた地表面の観測は、このような流れに拍車をかけた。NOAA/AVHRRのデータから計算されるNDVIのデータは今日でもよく用いられる。グローバルスケール、あるいは大陸スケールの環境問題を論じる際には、研究者があらたに全域をカバーするような一次データを取得することは不可能であるため、既存のデータベースの利用は必然となる。また、環境情報を用いた統計

的な研究の利点としては、主観に基づく偏った論理の展開を防ぐことができる、ということも挙げられる。

将来さらに高解像度、あるいは多バンドのセンサを搭載した地球観測衛星の打ち上げが予定される現在、リモートセンシングによる地表面の観測はさまざまな可能性が考えられ、各方面から期待が寄せられている。

一方、環境情報を用いた研究の問題点として、主として二次的なデータを用いることに起因する以下のような問題点が生ずる。ひとつはデータセットの背後に潜む因果関係が隠され、表面的な情報として処理されてしまう危険性がある、ということである。とくにラスタ化されたデータを数量化してあつかう際には注意が必要である。今一つの問題点は、既存のデータを用いる際のものであるが、データ取得の際のさまざまな条件の違いが表に現れないということである。

第一の問題点は、利用者がよく注意して用いること、あるいはデータセットの一部を自ら取ったデータとつきあわせることなどで乗り越えられる問題であろうが、第二の問題点は個人の知覚可能な量を超えたデータ量を用いた研究に本質的に不可分なものであり、とくに広範囲を扱う研究の場合は取り除くことは不可能である。このことが、環境情報を利用した研究に限界があることを示している。

## (2)モデル化を用いた研究手法の現状、可能性、限界

砂漠化という現象は、自然的要因と社会的要因が複雑に組合わさった現象だという見方が近年コンセンサスを得ていることは前述のとおりである。それでは、どのような要素が実際に砂漠化に影響を与え、それぞれはどのようなシエアで寄与しているのだろうか。それを明らかにし、さらに将来の予測をおこない、そして有効な土地利用策定のツールにもなりうるのがモデルである。本節では、モデルを用いた研究の現状をレビューし、その可能性と限界についても議論する。

地球環境問題に関連する分野でもっとも進んだモデルが提出されているのは温暖化の分野である。この分野ではすでに社会経済活動、気候変化とその社会へのフィードバックを詳細に分析する大規模な統合モデル(たとえば、Matsuoka *et al.* 1995)が稼働し、実際の政策決定の場で議論の材料として使われている。統合評価モデルの専門誌「*International Journal of Environmental Modeling and Assessment*」が日々刊行予定といわれ、批判論文も出始めており、一つの研究分野として確立されつつある。

森田・松岡(1996)は、統合評価モデルの発展方向として3つの動きに注目した。1つめはさらに包括的な地球環境変動モデルへの拡張、2つめはエネルギー・汚染物質から農業、土地利用、陸域生態系、生物多様性、水資源といった分野への移行であり、3つめは先進国を対象とした分析から途上国を中心にした分析への移行である。砂漠化モデルによる土地被覆の予測はこの3つの全てに関連する、きわめて重要性の高い研究課題である。

つぎに、砂漠化に関する既往のモデルを挙げておく。土地荒廃一般にまで話を広めた広義の砂漠化では土壌侵食に関する USLE モデル、EPIC モデル、CREAMS モデルなどのモデルがあるが、土地の裸地化を伴う狭義の砂漠化となると、その例は数が少なく、普遍性も小さい。

Vinogradov (1995)は、土地利用の変化を数学的なシミュレーションで記述することを試み、黒海周辺の砂地の増大を経過年数の指数関数で表したほか、アムダリア川のデルタの土地被覆の変化を、経過年数のべき関数の和で表し、さらに後者についてはマルコフモデルによる土地被覆の変化の予測をおこなっている。これは、砂漠化の内部に存在する複雑な事象を考慮に入れていない、また用いたデータが5年、あるいは8年おきのものを2〜3回分のものであり、それらの点で物足りないものの、砂漠化モデルの出発点としては意味がある。

もう少し実際のプロセスを考慮に入れたものとしては、Grunblatt *et al.*(1992)の試みがある。これは、降水量、傾斜、土地被覆などをパラメータとして土壌の水食可能性、同風食可能性などを推定し、それらを人口密度などのデータと重ね合わせることによって砂漠化の危険度を判定したものであるが、これを応用すれば予測モデルを作ることができる。

Hanan *et al.*(1991)は、井戸の周りの植生退行のようすを、NDVIを解析することによって考察した。回帰モデルを用いているが、ダイナミクスは陽には考慮されていない。

Proctor(1990)は、空中写真、フィールド調査などの結果を踏まえて、2000年までの土地利用の変化を予測した。薪の使用量や家畜の頭数など、様々な要素が考慮されているものの、予測は基本的には線形の外挿である。

Ive *et al.*(1992)は、対象地を1/8度四方のグリッドで分割し、塩類集積が広がるようすをモデル化した。潜在的な危険性を表すため、現在の観測値との整合性は高くないが、格子を用いるモデルは複雑な挙動をシミュレートすることが可能であり、興味深

い。同様に危険度マップを作成した例に Mouat *et al.* (1997)がある。これは侵食の潜在可能性、放牧圧、干ばつ強度、植生量、雑草の侵入などを考慮したもののだが、このうち干ばつ強度の項を変化させることで降水量が少ない場合と多い場合についてシミュレーションをおこなっている。

これら砂漠化モデルの一つの方向性として、温暖化研究で用いられる統合評価モデルのような、多くのパラメータを用いた巨大なモデルが考えられる。植生データ、土壌データ、気象データ、そして衛星データ、統計的データ(人口、家畜数など)をできる限り盛り込み、それらを数式で結び付け何層にもなる階層構造をもち、物理・化学的過程に社会的・経済的過程を結びつけた数学モデルである。現在のところ、このようなタイプの砂漠化モデルの例はまだないが、大陸スケールの土地利用モデル(大坪 1997)などがあり、今後の発展が期待される。しかし、もちろんこのようなアプローチにも限界がある。取得可能な全てのデータを考慮に入れても、やはり現地で起こる全ての現象を取り込むことはできないからである。モデルの中に入っていない要素が大きな働きをしていないという保証はないし、そのような場合にはモデルの精度は悪くなってしまう。また、現象の地域性も問題である。地球上の様々な場所で起こる砂漠化は、共通項もあるが、地域特有の現象もある。一つの地域でのデータから作られたモデルを他の地域にも適用しようとする場合、その精度は大きな問題になると思われる。ある場合には、元の地域での精度が、汎用性の犠牲になることもあるに違いない。こうした問題はしかし、さまざまなモデルが考案され、批判されるというプロセスを経て、少しずつ改善されていくべきものだと考える。

## 第2節 研究の目的と意義

### 2-1 研究の目的

前節で述べたような背景のなかで、特に重要な項目についてもういちどまとめた上で、本研究の目的について述べる。

・United Nations(1994)の「砂漠化」の定義は、起こっている現象の異同に注目していない。「砂漠のような景観にちかづく」という狭義の砂漠化を考えると、乾燥地に特化した土地荒廃である風食に注目する必要がある。

・風食がおこっている地域のうち降水量の大きい地域ほど人間の生産活動の寄与の度合いが大きい。このため、制御可能性を考えると半乾燥地域、乾性半湿潤地域、湿潤地域に注目すべきである。

・砂漠化は人間の歴史とともに進行、回復を繰り返してきた現象であり、短期のモニタリングだけではわからないことも多い。すくなくとも数十年以上のタイムスケールを考慮に入れるべきである。

・とくに乾燥地の土地荒廃現象である砂漠化においては、降水量の変動が土地条件に大きな影響を与える。このためある2時点間の土地条件の差をとったとき、それが可逆的な変動なのか、それとも一方向的な砂漠化傾向をもつ不可逆なものなのかは綿密に議論する必要がある。

・砂漠化には自然的要因と社会的要因を含むさまざまな要因が含まれているといわれる。しかし、個々の要素がどれくらい重要なかを客観的に議論した研究例は非常に少ない。また、定量的に予測した例もほとんどない。

・被害地域としてはとくにアフリカに注目が集まっているが、アジアもまたアフリカに匹敵する被害地域である。

本研究では、以上のような点を考慮し、次のような目的でおこなわれた。

まず、大陸スケールで基本的な環境条件を用いて土地環境区分をおこない、人間の生産活動の寄与が大きい砂漠化がどのような地域でおこるか調べた。その際、基本的な環境条件を用いて土地環境区分をおこなったが、区分者の主観はできるだけ取り除き、客観性を重要視して統計的なプロセスでおこなった。そのうえで、おもに人間の生産活動が原因で砂漠化が進行する地域に事例地域を設け、複数の時間スケールで裸地面積の変動をモニタリングした。つぎに自然的ならびに社会的要因について重回帰分析をおこなって、裸地面積変動に大きな影響を与える要因を決定した。さらに、それらの式を組み合わせてることによってモデルを構築し、将来予測をおこなった。

## 2-2 研究の意義

### (1) 環境情報の統計的解析による客観性の保持

1970年代以降、砂漠化は自然的要因と社会的要因がくみ合わさった複雑な現象だという認識が一般的になったが、それを実証的なデータをもとにして確認した例は非常に少ない。そのため各要因が砂漠化にどれくらい寄与するかということには言及されず、定量的な議論のないままフロー図が描かれることが多かった。本研究では環境情報を主とする大量のデータを統計的にあつかうことで定量的かつ客観的な議論を可能にした。事例地におけるフィールドワークを用いた研究においては、そこに拡がる自然から濃度の



高い情報を引き出すことが要求されるため、少なくとも現地においての行動には厳密な意味での客観性が要求されない。むしろ、「この地域の特徴は…であり、そのためにはこの場所で、この量を測定すべきである」という「妥当性の高い主観＝意志」が前提となる。ここの目的は特徴抽出型のフィールドワークを批判することではなく、人間の時間的、体力的、経済的限界によってフィールドワークはそのような限界を本質的に持っているということを確認しておくことである。そのようなことを前提にすると、実際にフィールドにおいて調査をおこなうまでに、その地域の特徴についての明確な意見を客観的な議論をふまえて持っていることが要求される。そのようなとき、環境情報(＝過去の他者によるフィールドワーク、衛星画像解析、または他の環境情報の解析などの集成)の利用が考えられる。そしてそれは、地球環境問題として土地の問題を考えていく以上、グローバルスケールもしくは大陸スケールの解析から出発すべきであろう。さらに小さい空間スケールにおいても衛星画像などの利用によってそのような準備が可能になる。

本研究においては、まず基本的な環境条件を用いて大陸スケールの土地環境区分をおこなった。これによって、アジア各地でおこなわれてきた事例研究を系統づけて理解することが可能になる(たとえば、恒川ら 1998)。環境条件によっておこる土壌荒廃のタイプがことなること、そのうち事例対象地とそこでおこる土壌荒廃タイプがどのような位置づけになるのかを理解できる。そのような準備の後、本研究における事例地域をもうけ、さらに詳細な研究をおこなった。これによって注目した土壌荒廃タイプについて、さらに空間スケールの小さな環境条件と土壌荒廃の強さの関連について理解することができる。

次章以降ではまず、基本的な環境条件をもちいてアジアの土地環境区分をおこない、その結果を土地利用や土壌荒廃と関連づけて論じる。従来の単一の環境要因に注目した区分や区分者の経験に基づく主観による区分と異なり、統計的手法によって客観性を高めた区分をおこなった。またさらに、区分結果と土地利用、土壌荒廃の関係の有無も統計的検定をおこなうことで確かめられた。

さらに小さい空間スケールにおいては、現地の研究機関によって作成された土壌図、地形図や旧日本軍作成の地形図などに加え、NOAA/AVHRR や Landsat/MSS の衛星画像を用いた。衛星画像を用いた砂漠化モニタリングは、さまざまな地域で例があるが、いずれも 2-3 時期の画像を比べたものである。本研究では 10 時期の画像を用い、年変動を細かく解析した。また、その結果を、重回帰式を用いて、降水量変動を説明変数としてモデル化した。構築されたモデルでは、長期にわたって精度の良い予測をし続けるこ

とは難しいとしても、たつき台的な意味も大きい。修正すべき点などを議論し、足りないデータは補い、そしてモデルの構造自体も変化させていくことで徐々に良いモデルに近づいていくことと思われる。

## (2) 将来予測と計画への応用

ここでは本研究の実用的意義について述べる。有効で持続可能な土地利用計画の策定には少なくとも近未来の予測が不可欠である。シミュレーションモデルはその近未来像を定量的な形で提示する。そして、変数をさまざまに変えることをつうじてどの施策が最も有効か、を定量的に示すことができる。また、対立する意見を持つものどうしの意見が分かれたときには、モデルについての信頼性が双方から得られていれば、どちらの意見をとるべきか、の決定にも役立てることができるのである。

本研究では、放牧されている家畜の一部を屋内で飼える家畜で代用した場合(石ら1998)や放牧を土地条件のよい地域に集中させた場合の、砂漠化の軽減についてシミュレーションをおこなった。シミュレーションモデルが提示する定量的な未来像が具体的な施策の転換の可能性につながることを示せたと思う。

## 第3節 研究の方法と構成

本論文は、図 1-4 に示すように本章を含み4つの章から構成される。本章では、国際社会や研究者の砂漠化へのこれまでの取り組みを考察した上で、本研究における砂漠化の定義をおこない、「砂漠化」の現状を示し、本研究の位置づけを示した。第 2 章では、既存のデータベースを用いた統計的手法により狭義の砂漠化がおこっている地域の環境特性と、土地利用や土壌荒廃との関連を示した。第 3 章では、アジアでも有数の砂漠化進行地域といわれる中国内モンゴル自治区奈曼旗を取りあげた事例研究をおこなった。ここでは異なる時間スケールについて砂漠化モニタリングをおこない、その結果を用いて、20 年スケールの砂漠化のモデル化をおこなった。第 4 章では、前章までの結果に基づき、複数の空間・時間スケールからみた砂漠化モニタリングに関する考察をおこない、モデル化を用いた土地利用計画策定の妥当性と可能性を検討した。

第 2 章以降の各章の内容と構成は以下の通りである。

第 2 章では、アジア地域を緯度経度 1 度のメッシュを単位とし、年平均気温、年降水量、土壌、植生、標高のデータベースを用いて 10 の土地環境区に区分した。区分の際は、

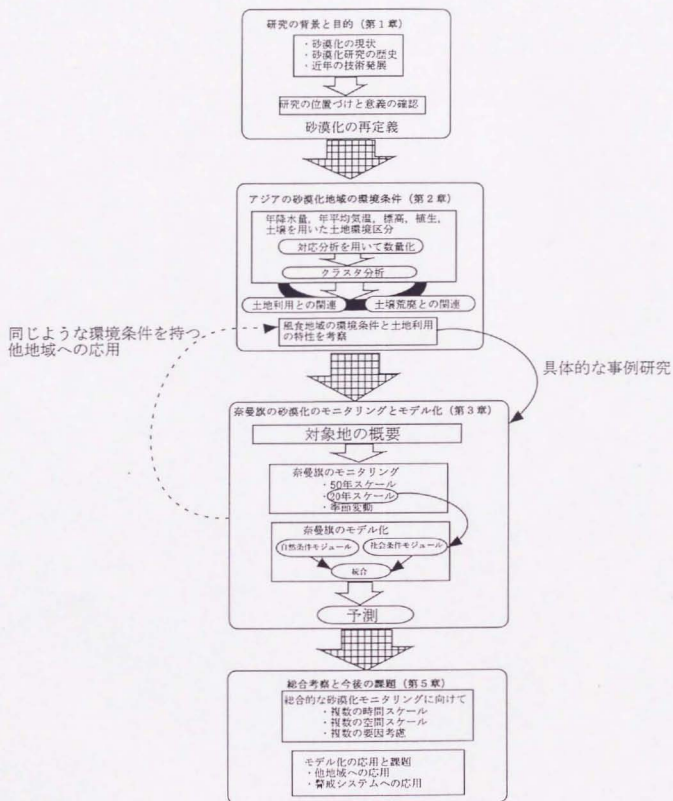


図1-4 本研究の構成

correspondence analysis(対応分析)を用いて数量化・低次元化をおこなった後、cluster分析を用いた。区分の結果をその後耕作強度や家畜によるメタン濃度のデータベースや、UNEP & ISRIC(1990)が作った「人間による土壤荒廃現状図」のデジタル版とオーバレイをおこなって、環境特性と土地利用、土壤荒廃の関連性を調べた。

第3章は3つの節に分かれる。第1節では、事例対象地域の概要について述べた。地理的条件について述べた後、数千年スケールのこの地域の土地環境変遷史を、おもに既往の文献を整理することで確認した。また、地形・土壤などの現在の分布についても概説した。

第2節では、奈曼旗の砂漠化のモニタリング結果について報告する。モニタリングは50年スケール、20年スケール、季節変動の3つのタイムスケールでおこなった。50年スケールでは1930年代の旧日本陸軍作成の地形図を用い、1980年代に作られた砂漠化類型図と比較し、砂丘の拡がりを確認した。20年スケールではLandsat/MSSの衛星画像解析をおこない、植生指数として土壤による反射を考慮したTSAVI(transformed soil adjusted vegetation index)を用いて1975年から1994年までの裸地面積変動のようすをモニタリングした。この解析には10時期の画像を用いた。季節変動では、NOAA/AVHRRの画像から計算されたNDVIのデータベースを用いて解析をおこなった。

第3節では、前節の20年スケールのモニタリングの結果を用いて砂漠化モデルを構築した。モデルは自然条件モジュールと社会条件モジュールに分けられる。自然条件モジュールでは降水量変動による裸地面積変動を考慮した。式の算出は、さまざまな時期の降水量を説明変数としてステップワイズ法で重回帰式を決定した。社会条件モジュールでは、放牧圧と土地の牧養力の比である牧養率という量を定義し、その変化と風積砂土面積率、街道沿線か否かを表現する項を用いて重回帰式を求めた。社会条件モジュールでは、20年間の間に単位面積当たりどれだけ裸地面積が拡大したかを被説明変数とした。20年後の植生被覆は、自然条件の式と社会条件の式の積をとることで決定する。つぎにこのモデルを用いてことなる条件の下で将来予測をおこなった。

第4章では、前章までの結果をふまえ、大陸スケールの環境変化のなかでの位置づけやことなる時間スケールでのモニタリング、モデルの構築による各要因の統合について、本研究で達成できたことと、残された課題について述べた。最後に本研究で試みられたモニタリングとモデル化手法の他地域への応用の際の課題についても議論した。

## 第2章 アジアの砂漠化地域の環境条件

第1章では、砂漠化を狭義の「砂漠のような景観になる」という意味だととらえ、本論文における定義を定め、その定義を用いた場合には砂漠化地域としてはとくに風食がおこっている地域に注目する必要があることを述べた。さらに、風食地域の中では乾燥した地域ほど気候的要因が卓越し、湿潤な地域ほど社会的要因が卓越すると考えられることを述べた。

そこで本章では、被害程度に比較して研究が進んでいないアジアにおいて、風食地域の中の比較的湿潤な地域は具体的にどのように分布しているのかを明らかにする。また、当該地域でどの程度の土地利用がおこなわれているのかもあわせて考察した。

砂漠化あるいは土地荒廃一般の被害を決定する要因としては、気候的要因、土壌タイプ、植生タイプ、土地利用などが考えられる。これらのうち土地利用を社会的要因として他と区別し、残りを自然的要因とする。自然的要因のうち土壌タイプは気候に、植生タイプは気候や土壌に影響を受けると考えられるため、大きなスケールにおいては気候的要因が土地環境の最大の規定要因になると予想される。ここで気団の移動限界などによって急激に気候が変化する地域が存在することや、気候条件の連続的な変化が土壌や植生の質的な変化に現れることがあることから、土地環境はいくつかの等質性の高いグループに区分できると考え、自然条件によってアジアを区分した。区分の際は、従来の区分と異なり、区分者の主観はできる限り排除し、統計的手法により客観性を保持することに重きを置いたことが特徴である。第1節ではまず、アジア地域の土壌荒廃の現状と環境特性について述べ、この地域の土地環境区分をおこなう

表2-1 アジアの各種土壌荒廃 (UNEP 1992より作成)

単位は $10^4\text{km}^2$

	water erosion	wind erosion	chemical deterioration	physical deterioration
light	49.6	80.5	22.2	4.4
moderate	91.2	62.9	11.1	5.0
severe	16.7	9.7	16.5	0.2
extreme	0.0	0.1	0.4	0.0
total	157.5	153.2	50.2	9.6

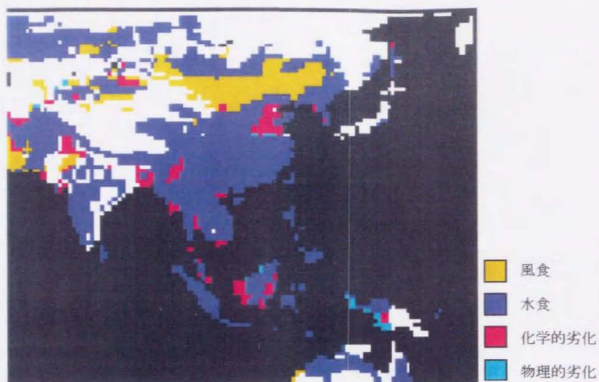


図 2-1 アジアの土壌荒廃の分布  
(UNEP & ISRIC 1990より作成)

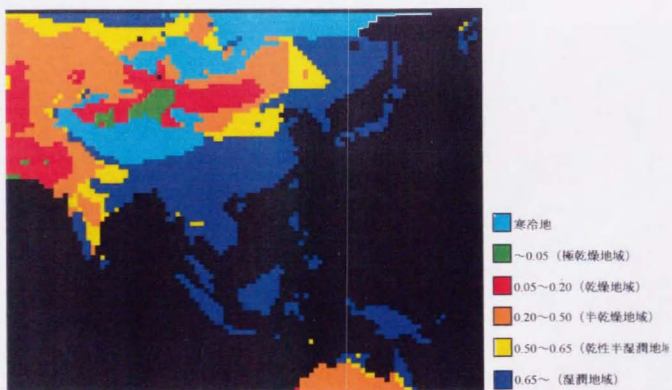


図 2-2 アジアのARID INDEXの分布  
(UNEP 1992より作成)

この重要性を確認した。第2節では、統計的手法を用いた客観的な土地環境区分の手法とその結果を述べた。第3節では土地環境区と人間による土地利用や土壤荒廃との関連性を調べ、比較的湿潤でありながら風食が盛んにおこっている土地環境区を抽出した。

なお、ここでは区分の行為を土地環境区分、その結果生じたカテゴリを土地環境区とよぶことにする。

## 第1節 アジアの砂漠化と環境特性

### 1-1 アジアにおける「砂漠化」の現状

国連砂漠化対処条約(United Nations 1994)は「とくにアフリカの国」という注釈が付き、アフリカ諸国の重要性の高さを認めた形となったがこれは同条約採択までのアフリカ諸国の貢献を表したものであって、必ずしも地球上の土壤荒廃の大半がアフリカで起きているということをさすものではない。被害の調査結果からみれば明らかのようにアジアもまた、アフリカに勝るとも劣らない土壤荒廃地域である。UNEP(1992)によれば、土壤荒廃の種類は大きく水食、風食、化学的劣化、物理的劣化に分けられる。最大のものである水食は、アジアの乾燥地で全大陸中最大の157.5万 $\text{km}^2$ で被害を出しており、強度16.7万 $\text{km}^2$ 、中度91.2万 $\text{km}^2$ 、軽度49.6万 $\text{km}^2$ であった。強度の説明は4頁で述べた。風食は153.2万 $\text{km}^2$ でおこっており、アフリカに次いで2番目の被害地域となっている。強度のうちわけは重度0.1万 $\text{km}^2$ 、強度9.7万 $\text{km}^2$ 、中度62.9万 $\text{km}^2$ 、軽度80.5万 $\text{km}^2$ であった。化学的劣化はアジアの乾燥地のうち50.2万 $\text{km}^2$ で起きている。これはこのタイプの地球上の全乾燥地の被害面積の約半分であり、アジアが最大の被害地域である。強度は重度0.4万 $\text{km}^2$ 、強度16.5万 $\text{km}^2$ 、中度11.1万 $\text{km}^2$ 、軽度22.2万 $\text{km}^2$ である。化学的劣化には養分・有機質の損失、塩性化、酸性化、汚染が含まれる。物理的劣化はアジアの乾燥地のうち9.6万 $\text{km}^2$ でおこっている。強度別では強度0.2万 $\text{km}^2$ 、中度5.0万 $\text{km}^2$ 、軽度4.4万 $\text{km}^2$ であった。物理的劣化には硬化、浸水、有機質の沈下が含まれる(表2-1、図2-1)。土壤荒廃の種類分布は降水量と深く関連があると考えられている。

### 1-2 アジアの環境特性

アジア地域はどのような環境要素をとってみても、世界で他に類を見ないほど多様な環境特性を含む地域である。気温は赤道付近では1年を通じて30℃

近くをさすのに対し、シベリアでは冬には氷点下 20℃を下回ることがある。降水量は 2,000mm を越す地域からほとんど降水がない地域まで分布している。これらに対応して土壌、植生もあらゆる種類のものがみられる。とくにユーラシア大陸東岸は地球上で唯一熱帯から寒帯まで海や砂漠に分断されずに温度が連続的に変化する地域として知られている。また、標高は世界の屋根と呼ばれる 8,000m 級のヒマラヤ山脈を抱えている。

個々の要素についてももう少し詳しく見ていく。気温はもっとも内陸のチベット高原東部で年平均で氷点下と非常に低くなっているほかは、南から北へとほぼ緯度に応じて低くなっている。降水量はチベット高原で年降水量 100mm を下回っており、そこから海に近づくにしたがって同心円状に降水量が大きくなっていく。ただし、南方はヒマラヤ山脈をこえると急激に降水量が増し、北緯 30 度線がほぼ年降水量 1,000mm のラインと対応している。マレー半島やインドネシアの一部では降水量が 2,000mm を越える。乾燥の度合いを示す Arid Index の分布(図 2-2)をみると、寒冷地に分類されるチベット高原を中心に、南東方向を除く周囲に乾燥地が広がっている。このうち黄河流域を中心とする中国華北地方や内蒙古自治区東部などでは、乾燥地の東への張り出しが大きくなっている。標高はヒマラヤ・カラコルム山脈で 8,000m をこえ、その北方に広がるチベット高原は 5,000m の標高を持つ。チベット高原からモンゴル共和国を経てバイカル湖北東まで、標高 1,000m をこえる地域が広がっている。その他インド

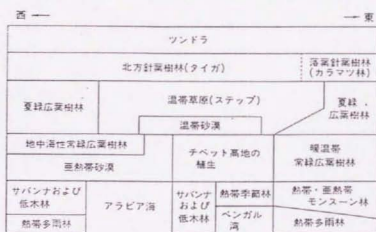
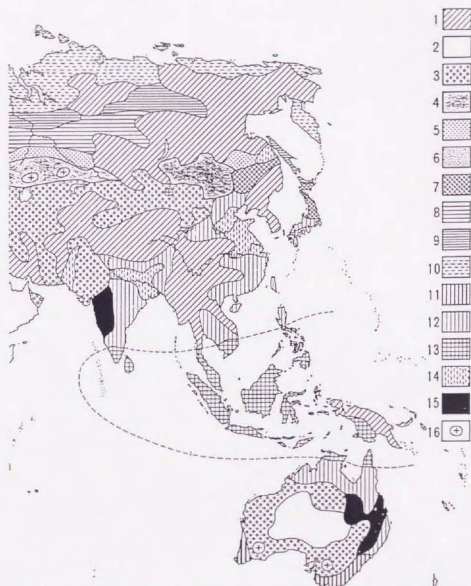


図 2-3 ユーラシア大陸および北アフリカの植生配置の概念図  
(林 1990 より転載)





1. 山地：様々な土壌型が高度系列をつくって分布する；2. 砂漠；3. 砂漠周辺地帯：寒冷（シロゼム）；温域（灰色土と亜乾燥褐色土、肉桂色土、熱帯均等樹植質土など）；4. まばらなステップ地帯（栗色土、褐色土）；5. 密なステップ地帯（チェルノーゼム）；6. プレリー地帯（アルニゼム）；7. 温帯：落葉樹林（褐色化土壌とレシベ土壌）；8. 亜寒帯：混交林および落葉樹林（ポドゾル性土と北方レシベ土壌、灰色森林土）；9. 寒帯：針葉樹林（ポドゾル）；10. ツンドラおよび寒帯の泥炭質土壌；11. 乾季のある亜熱帯および地中海地域（主として鉄珪酸アルミナ質土壌）；12. 湿润亜熱帯（アルティソル）と乾季のある熱帯（鉄質土壌、フェリソル）；13. 湿润赤道帯：密林（鉄アルミナ質土壌とフェリソルが優占）；14. 成帯内性の水成土壌：沖積土壌、グライ、プランソル；15. ヴァーティソル的な成因による成帯内性土壌；16. 成帯内性土壌：塩類・ナトリウム質土壌（またはナトリウム質土壌）

図 2-4 アジアの成帯性土壌およびおもな成帯内性土壌の分布  
(Duchaufour 1976 の邦訳より転載)

シナ半島の北部やアフガニスタン北東部、イラン高原などで標高 1,000m をこえ、その他は小規模の山地がある程度である。この地域の植生の分布はおおむね図 2-3 のようなものである。東西方向に東部、中部、西部の 3 つに分けて論じる。中心に位置する温帯砂漠より北の地域ではほぼ東西に対称になっており、東部と西部では北からツンドラ、タイガ(もしくはカラマツ林)、夏緑広葉樹林と移り変わる。中部は夏緑広葉樹林のかわりにステップが広がる。温帯砂漠以南では東西の対称性が崩れる。東部では暖温帯常緑広葉樹林、モンスーン林、熱帯多雨林と変化し、西部は地中海性常緑広葉樹林、亜熱帯砂漠、サバンナおよび低木林、熱帯多雨林と変化する。また、中部はチベット高地の植生、サバンナおよび低木林または熱帯季節林と変化する(林 1990)。土壌は、降水量の極端に少ないところでは砂漠土が、その周辺では栗色土や褐色土が広がる。さらにその周辺ではチェルノゾームが分布する。また標高の高いところでは山地土壌が広がり、タイガ分布域にはポドゾルが、中国華中地方には褐色森林土が広がる。また、降水量が極端に多い地域には赤黄色土やラトゾルが分布する(松井 1988, Duchaufour 1976, 図 2-4)。以上は気候や植生の影響がとくにおおきい成帯性土壌であるが、このほかに小地形、水文条件などの影響をもうける成帯内性土壌や、土壌化が十分でなく母岩の性質が大きく残る非成帯性土壌などがあるが、次節以降の土地環境区分においては緯度経度 1 度を単位としているのでおもに成帯性土壌について考慮することになる。

## 第 2 節 アジアの土地環境区分

### 2-1 既往の土地環境区分

地理学において地域区分は地域的考察の前提であるとともにその重要な成果であり、その最初の例は紀元前 4 世紀ごろのアリストテレスの気候帯だといわれている(田中 1973)。これは回帰線と極圏によって地球の表面を一つの熱帯、二つの温帯、二つの寒帯に分けたとされている。気候区分による地表の区分は 19 世紀の後半にもドイツの研究者らによる区分がおこなわれた。このようなころみの集大成が Köppen (1918) によるものである。これは植物の分布をもとに、最寒月平均気温や最暖月平均気温、降水量などを指標として区分した

ものである。ほぼ時を同じくして Herbertson(1905)もまた気候に注目して世界の大自然地域をまとめた。これは気温、降水量など気候的因子を基本に、さらに低地、高地、山地などの地形要素を組み合わせている。James(1935)による区分は、自然植生を指標にして地域区分をおこなったものである。

日本における同様の自然地域区分の例としては、Yoshino(1980)の例がある。これは地質、地形、土壌、気候、水文、植生などをもとに日本列島を区分したものであるが、区分者の従来の知見にもとづいた主観によっておこなわれている。統計的におこなわれた例としては、Takeuchi *et al.*(1990)がある。これは気候、土地(土壌と岩質を統合)、植生のそれぞれについて区分した後、自然地域区分として統合したものである。区分の過程で因子分析やクラスター分析、数量化Ⅲ類などの統計的手法が用いられており、区分者の主観は可能な限り取り除かれ、再現性が確保されている。

## 2-2 用いたデータセットの概要と配布元

1980年代以降、以下で用いたような基本的な環境要素に関するグローバルスケールのデータベースが急速に整備された。その2大供給元は UNEP/GRID とアメリカ政府系機関である。現在はインターネットで各種データベースが無料で検索・取得可能で、ネットワークにつながっているパソコンがあれば世界中どこからでも誰でもこれらのデータを取得し利用できる(一部磁気テープなどによって供給されるものもある。また利潤目的の場合は利用を制限される場合もある)。また、日本国内については国土地理院が整備した国土数値情報(有料)、さらに首都圏には細密数値情報(有料)とよばれる非常に詳細な情報が整備されている。GIS 解析用ソフトウェアの使用や簡単なプログラミングを通じてこれらのデータ間の関係性を考察する学術研究も数多く試みられており、本研究もその一例である。

GRID は 1985 年以降 UNEP によって整備されたデータ供給機関で、97 年 4 月現在ナイロビ、筑波など世界 14ヶ所に拠点を持っており、植生、土壌など各種データベースが取得可能である。またアメリカ政府系機関には NCAR、USGS/GLIS、EROS データセンター(USGS、NASA などが関与)などがあり、気温、降水量、土地被覆の他、気象衛星 NOAA の画像などが取得できる。ま

た、EROS データセンターでは Landsat などの衛星画像も購入できる。

土地環境区分には、①植生、②土壌、③標高、④降水量そして⑤気温という5つのデータを用いた。それぞれのデータの概要と配布元は、以下のとおりである。

#### ① Matthews の植生分類

1°×1°メッシュのデータで、優占植生を 32 に分類したものである。100 を越える文献をもとに、衛星画像解析による補正をおこなって分類されている (Matthews 1983)。

#### ② Zobler の全球気候モデルのための土壌分類

優占土壌ユニット(土壌タイプのクラス分け)、傾斜区分、土壌質の区分、土壌相といったデータを含む、土壌タイプの全球的分布を表す。FAO の世界土壌図と Matthews の植生データから緯度 1°×経度 1°のグリッドセルへ変換することにより作成された。ここで用いた 26 のいわゆる「土壌大分類」に「氷」を加えた、27 のカテゴリによる土壌ユニットの普及版のほか、106 土壌分類による土壌ユニットの完全版、7つの傾斜カテゴリによる優占的土壌傾斜、8つの土質カテゴリによる優占的土壌質、18 土壌相カテゴリによる優占的土壌相が UNEP/GRID から提供されている。

#### ③ ETOPOS

米国地球物理データセンター (NGDC) が原データを作成したものであり、5分 および 10 分のデジタルデータを統合したもので、緯度経度 5分 (1グリッドあたり 12×12 ビクセル) で区切って 1m 単位で標高値が与えられている。標高値は海拔約 8,000m の高さまで及ぶ一方、このデータセットには水深も含まれ、水深約 10,000m までのデータが含まれている。

#### ④ 年降水量および⑤年平均気温

1920-1980 年の観測データにもとづいている。これらは NCAR(National Center for Atmospheric Research) の ホーム ページ (<http://www.ncar.ucar.edu/>) で入手可能である。④、⑤とも 0.5°×0.5°の解像度を持つ。

ここでおこなった土地環境区分には用いられなかったデータベースで、とくに興味深いものとしては以下のようなものがある。GRID では、上で挙げたもの

外に、土壌水分容量、可能蒸発散量、Aridity Index とその変化、NOAA/AVHRR のデータから計算された NDVI などのデータセットが整備されている (<http://www-cger.nies.go.jp/grid-j/index.html>)。世界各地の GRID にはグローバルなデータセットの他その地域をカバーするデータセットを整備しているところもある。また、アフリカに関してはヨーロッパやアメリカ合衆国に位置する GRID にもいくつかデータが整備されている。USGS の整備した GLIS (Global land information system) のホームページ (<http://edcwww.cr.usgs.gov/webglis>) には水文条件に関するものや土地被覆に関するデータが整備されている。ここではその他に空中写真や衛星写真の検索と購入ができる。

### 2-3 土地環境区分のアルゴリズム

本区分の対象領域は、東西が東経 60°から同 160°(幅 100°)、南北は南緯 20°から北緯 60°(幅 80°)の範囲であり、区分単位は  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  とした。つまり赤道直下で1辺約 111km の正方形、北緯 60°では南北の長さはかわらず、東西の長さがちょうど半分の約 55km となる。また今回あつかった範囲の中には 100 × 80 の 8,000 グリッドが含まれているが、そのうち約 62%にあたる 4,972 グリッドが海であった。ここではそれらは解析から除外し、残った 3028 のサンプルを分類することとした。まず、取得したデータにより、メッシュの大きさが違うためその大きさをそろえる作業が必要であった。具体的には、①と②は 1°メッシュ、それ以外ではさらに細かいメッシュであったので、後者については複数のメッシュの平均をとることにより 1°メッシュのデータに変換した。

また各データをそれぞれ 10 のカテゴリに分類した。①と②については、生成過程などに関する従来の知見をもとに、各カテゴリに含まれるサンプルの数の偏りがあまり大きくならないように考慮して再分類した。また定量的なデータである③～⑤については、おもにサンプル数の偏りをなくすことに配慮して分割し、これらもそれぞれ 10 のカテゴリにふりわけた。統合された後のカテゴリを表 2-2 に示した。なお、ここではカテゴリの数をあまり多くしないこと、カテゴリ間のサンプル数にあまり差をつけないことに配慮してふりわけたため、例えば降水量が 1,000mm 以上にはカテゴリが2つしかないなどの問題が残った。

表 2-2 各環境要因についての統合後のカテゴリスコア

ELEVATION	1軸	2軸	3軸
①<100m	(-0.65, -0.50, -0.25)		
②<200m	(-0.18, -0.09, -0.75)		
③<300m	(-0.38, -0.09, -0.75)		
④<450m	(-0.50, -0.35, -0.13)		
⑤<500m	(-0.55, -0.23, 0.35)		
⑥<800m	(-0.07, 0.23, 0.44)		
⑦<1000m	(0.12, -0.33, 0.74)		
⑧<1500m	(0.48, 0.31, 0.05)		
⑨<3000m	(0.54, 0.38, 0.05)		
⑩3000m~	(0.91, 0.38, 0.88)		

VEGETATION	1軸	2軸	3軸
①森林林 (Matthews's 2, 4, 5)	(-1.90, 0.37, -0.43)		
②季節森林 (3, 6)	(-1.54, 0.63, 0.70)		
③常緑針葉樹林 (8, 9)	(0.11, -1.05, 0.22)		
④闊葉林 (10)	(-1.66, 0.01, -0.78)		
⑤豆科林 (11, 12)	(0.26, -0.97, 0.96)		
⑥疎開林 (13~17)	(-0.93, -0.06, -0.09)		
⑦柱木林 (18~22)	(0.52, 1.08, -1.14)		
⑧草原 (23~28)	(0.48, -0.31, -0.84)		
⑨植生地 (29)	(0.12, 0.03, -0.09)		
⑩砂漠 (31)	(0.89, 1.48, 0.67)		

SOIL	1軸	2軸	3軸
①赤黄色土、ラテライト性土 (Zolbers's 1, 8, 14)	(-1.72, 0.57, 0.35)		
②灰色・褐色森林土 (2, 13)	(-0.52, -0.08, 0.12)		
③ポドソル性土 (4, 12, 16)	(-0.75, -0.88, -0.22)		
④褐色土・豆科土 (5, 8, 11)	(0.69, -1.05, -1.24)		
⑤塩成土、アルカリ土 (19, 26)	(0.72, 0.75, -0.14)		
⑥半砂漠・砂漠土 (17, 24, 25)	(0.55, 1.11, -1.04)		
⑦沖積土 (10)	(-0.44, 0.07, -0.08)		
⑧グライ土、珪砂土 (7, 15, 23)	(-0.40, -0.51, 0.24)		
⑨岩質土・珪質土 (9, 18, 21)	(0.58, -0.12, 0.73)		
⑩母材が支配的な土壌 (5, 20, 22)	(-1.31, -0.10, -0.45)		

TEMPERATURE	1軸	2軸	3軸
①<-4℃	(0.54, -1.06, 1.43)		
②<-1℃	(0.35, -1.03, 0.24)		
③<1℃	(0.36, -1.03, -0.50)		
④<3℃	(0.56, -0.86, -1.09)		
⑤<7℃	(0.77, 0.47, -0.59)		
⑥<10℃	(0.89, 1.03, 0.24)		
⑦<15℃	(0.66, 0.91, 0.68)		
⑧<22℃	(-0.94, 0.57, 0.53)		
⑨<25℃	(-1.44, 0.49, 0.03)		
⑩25℃~	(-1.26, 0.14, -0.57)		

ANNUAL PRECIPITATION	1軸	2軸	3軸
①<100mm	(1.02, 1.73, 0.87)		
②<200mm	(0.74, 1.28, -0.72)		
③<300mm	(0.66, 0.56, -0.97)		
④<400mm	(0.61, -0.54, 0.20)		
⑤<500mm	(0.51, -0.77, -0.10)		
⑥<600mm	(0.27, -0.96, -0.20)		
⑦<700mm	(0.19, -0.74, 0.43)		
⑧<1000mm	(-0.32, -0.36, 0.27)		
⑨<1700mm	(-1.40, 0.32, 0.28)		
⑩1700mm~	(-1.80, 0.47, -0.67)		

このようにして得られたデータセットを用いて次のように区分を進めた。まず correspondence analysis (対応分析) 中の等質性分析とよばれる手法を用いて多次元空間上に各サンプルをプロットし、つぎにその座標を用いてクラスター分析をおこなった。数量化の方法や空間スケールの点で相違があるが、基本的には Takeuchi *et al.* (1990) の方法に近い。correspondence analysis は、数量化Ⅲ類と同じく質的なデータを数量化するための手法であるが、1-0 のダミー変数によるデータのみならず頻度の概念をもつ一般のクロス集計表を処理できる点ですぐれている (Hill 1974)。プロットの際の次元数は一意的には決められないが、ここでは3次元とした。また最後のステップにおいてのカテゴリー数は、入力データと同じ10とした。

本研究でおこなった土地環境区分は二段階にわけられ、第一段階はサンプルを多次元空間にプロットするものであり、第二段階はその多次元空間上の座標を用いて各サンプルを分類するものである。第一段階では質的データの数量化とその低次元化がおこなわれている。質的データの数量化は、内的整合性の原理とよばれる条件を加えることとすめられる。これはカテゴリの数量化得点とそれに属するサンプルの数量化得点の相関係数を最大にするという形で定式化される。この条件を加えることで問題は最適化問題に帰着され、方程式の解として数量化得点を要素とする行列が得られる。この際、解析を容易にするためしばしば低次元化がおこなわれ、2次元あるいは3次元が用いられることが多い。第二段階では分類手法の中でもっとも一般的であるクラスタ分析を用いた。クラスタ分析はクラスタ内の平方和の和（各クラスタの全サンプルと重心との距離の2乗の和をたしたもの）を最小にするという条件（これはクラスタ間の平方和の和を最大にするということと同値である）のもとで進められることが多いが、すべての場合について調べることは一般的には困難なため、その実行アルゴリズムは探索的となり、さまざまなものがある。ここではもっとも基本的な k-means 法とよばれる手法を用いた。これは、まず仮の分類をしておき、つぎにいずれかのサンプルを異なったクラスタに移動することによってクラスタ内の平方和の和がより小さくならないか、を順に見ていき、小さくなる場合は実際に移動するという手法である。このプロセスは局所的な平衡点に収束することが証明されており、そこでプロセスは打ち切られる。

なお、計算は東京大学大型計算機センターの日立 HITAC M-880/310 およびワークステーション富士通 F4/20H を用いておこない、ソフトは等質性分析が SPSS/HOMALS, クラスター分析は SPSS/QUICK CLUSTER, クロス表作成には SPSS/CROSSTABS, を用いた。また、計算の際のデータの整形・加工には必要に応じて Fortran77 を用いてプログラムを作成した。

#### 2-4 土地環境区分結果

Correspondence analysis を用いたプロットでは、各サンプルがプロットされる空間と同じ空間に、各カテゴリーもプロットされる(表 2-2)。表 2-2 にみられる各カテゴリーのスコアにおいて、左から順に第一軸成分、第二軸成分、第三軸成

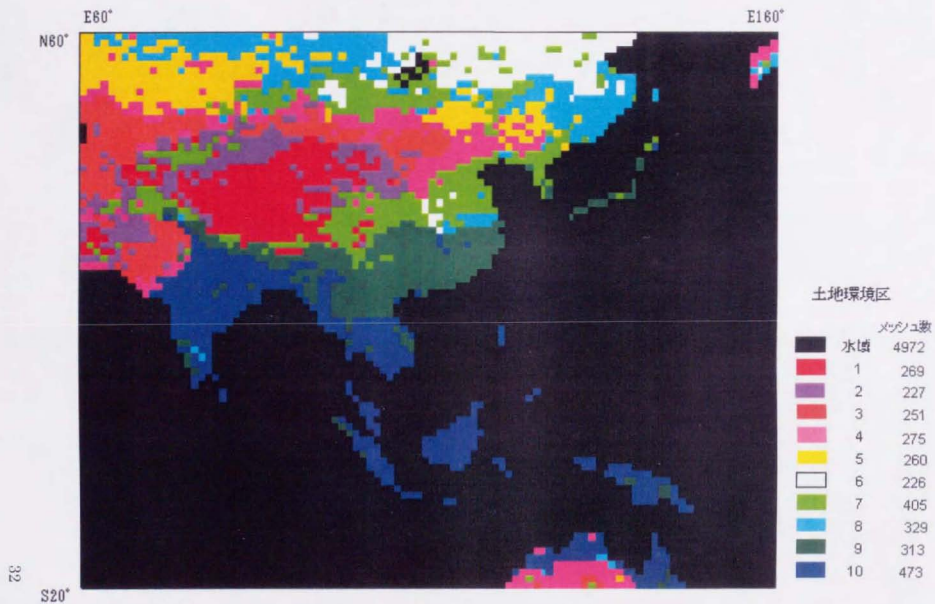


図2-5 アジアの土地環境区分図



分のスコアとなっている。カテゴリごとにこれらの成分をみていくと、第一軸は降水量の小から大への変化と符号こそ異なるが非常によく一致している。このことから第一軸は、とくに降水量に関連の深い性質を表す軸であると判断される。また、第二軸は、温度と降水量について、顕著な極値を持つ凸なカーブになっている。このことから、これら2つのファクタに何らかの関連のある軸だといえる。第三軸は、標高において450m未満で負それ以上で正となっているが、他のどのファクタとも明確な対応を示しておらず、前述の2つの軸に対する補完的な軸であるといえる。以上の事実から、今回の土地環境区分においては、第一に降水量、続いて温度が、大きく寄与していると結論できる。植生や土壤についても、乾燥地域にみられるものから多雨地域にみられるものへとスコアが変化している。なお、第1軸の説明率は44.8%、第二軸のそれは26.6%、第三軸では16.8%であり、三軸までの合計では88.2%であった。

ひき続いてこの3次元座標を用いてクラスタ分析をおこない、図2-5の土地環境区分を得た。チベット高原を中心として同心円上に広がる乾燥→湿潤という構造と、特に東海岸で顕著な、低緯度から高緯度に向かう温暖→寒冷という構造が顕著に見て取れる。

### 第3節 土地環境区と土地利用，土壤荒廃の関連

#### 3-1 アジアの土地利用と土地環境区の関連性

##### (1) 環境情報にみるアジアの土地利用の空間分布

ここでは UNEP/GRID で公開されている2つのグローバルデータベースを用いてアジアの土地利用の空間分布について述べる。ここで用いたのは耕作強度データベースと家畜による年間メタン排出量データベースである。耕作強度は2.2の①、②などと同じく GRID つくばで入手可能な Matthews の耕作強度データセットを用いた。これは1960-79年に出版された国ごとの報告に衛星画像解析を統合して推定したものである。これも緯度1°×経度1°のグリッドを単位とするデータであり、耕作強度の1から5はそれぞれ耕作面積率0%、20%、50%、75%、100%の5段階に対応している。家畜による年間メタン排出量データベースも同じく GRID つくばで入手可能である。これは、9種の動物(肉牛、乳牛、水牛、羊、山羊、ラクダ、豚、馬、トナカイ)の頭数密度をもとに NASA/

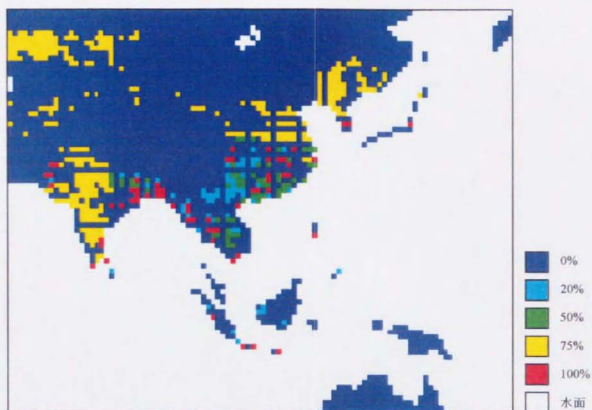


図 2-6 アジアの耕作強度分布 (GRID/つくばのデータをもとに作成)



図 2-7 アジアにおける家畜起源のメタン濃度分布  
(GRID/つくばのデータをもとに作成)

ゴダード宇宙科学研究所 (GISS) でまとめられた。動物の頭数の統計は、国連食糧農業機関 (FAO) などの情報源から得られた。オーストラリア、ブラジル、カナダ、中国、インド、アメリカ、旧ソビエトにおいては国・州境界の緯度経度1度グリッドに、動物が配分されている。このデータベースでは、頭数に各種の動物からのメタン発生量の推定値として既に発表された値を乗じて求めた年間に発生する  $\text{CH}_4$  ( $\text{kg}/\text{km}^2$ ) の世界的分布をしめすものである。

耕作強度は、華中から華南にかけての地域の一部とベンガル湾周辺部で100%、デカン高原西部と華北から中国北東部で75%、華中、華南の大部分で20%ないし50%、その他地域では0%を示している(図2-6)。また、家畜によるメタン排出量では、ガンジス河沿いでもっとも高く、 $4,000\text{kg}/\text{km}^2$  から  $10,000\text{kg}/\text{km}^2$  以上、ついでデカン高原で  $2000\text{--}4000\text{kg}/\text{km}^2$ 、インダス川沿いと華北の一部で  $1,750\text{--}2,000\text{kg}/\text{km}^2$ 、華北から華南の大部分で  $750\text{--}1,750\text{kg}/\text{km}^2$ 、中国北東部で  $1\text{--}750\text{kg}/\text{km}^2$  であった(図2-7)。

## (2) 土地環境区分結果と土地利用の関係

土地環境区分の結果と、耕作強度および家畜起源のメタン濃度の分布の関係について調べた。土地荒廃の原因とされる人間活動は耕作や放牧だけではなく、伐採なども考慮すべきであろうが、データ取得が困難であることなどから、ここでは人間活動の代表として耕作と放牧を取りあげるのにとどめた。

表 2-3 土地環境区分と耕作強度の関係  
 枠内の数字はメッシュ数、耕作強度  
 1~5はそれぞれ耕作面積率0%、20%、50%、  
 75%、100%の5段階に対応する

	耕作強度					計	耕作率(%)
	1	2	3	4	5		
1	262	0	0	7	0	269	2.0
2	211	0	0	16	0	227	5.2
3	222	1	0	23	5	251	8.9
4	233	0	0	41	0	274	11.2
5	173	0	0	87	0	260	25.1
6	223	0	0	2	1	226	1.1
7	349	1	5	47	3	405	10.1
8	308	0	3	16	2	329	4.7
9	214	36	30	13	19	312	16.3
10	333	21	23	59	31	467	19.5
計	2528	59	61	311	61	3020	11.3

ここでは土地環境区分と耕作強度、家畜によるメタン濃度とのそれぞれのクロス表を作成した。さらにそれらに $\chi^2$ 検定を適用することにより、関連の有無を検証した。

土地環境区分と、耕作強度との関連を表 2-3 に示す。縦に並ぶ 10 のカテゴリが本区分で得られた土地環境区、横に並ぶ 5 つのカテゴリは耕作強度であり、1 から順にそれぞれ耕作面積率 0%、20%、50%、75%、100% を示す。また耕作率は、総耕作面積(=0.2×n<sub>20</sub>+0.5×n<sub>50</sub>+0.75×n<sub>75</sub>+1.00×n<sub>100</sub>)；但し n<sub>x</sub> は x% 耕作されているサンプル数)をサンプル数で割った値で、1 グリッドあたりの平均耕作面積率を示す。土地環境区と家畜によるメタン濃度の関係を表 2-4 に示す。土地環境区 9, 10 でとくに大きな値をとるグリッドが多いが目立つ。

中央アジアの肥沃な地域である土地環境区 5 や沿岸の多雨地域の土地環境区 9 や 10 の土地環境区ではこの値が非常に高く、砂漠またはその周辺に広がる土地環境区 1 や 6 ではほとんど耕作はおこなわれていない。また、この 2 元クロス表に $\chi^2$ 検定を適用した結果、土地環境区と耕作強度の関連性は 1% 水準で統計的に有意であった。

つぎに土地環境区と耕作強度および家畜によるメタン濃度の平均値の関連を図 2-8 に示す。土地環境区 5 で比較的少なく、土地環境区 10 で非常に多いほかは、耕作強度の違いと非常に似た傾向を示した。耕作強度 5% が家畜によるメタン 250 kg/km<sup>2</sup> とほぼ対応している。

表 2-4 土地環境区分と家畜起源のメタン濃度の関係  
枠内の数字はメッシュ数

		家畜起源のメタン濃度 (kg/km <sup>2</sup> )											
		0	1001 -1000	2001 -2000	3001 -3000	4001 -4000	5001 -5000	6001 -6000	7001 -7000	8001 -8000	9001 -9000	10000 -10000	計
土 地 環 境 区	1	190	66	8	5	0	0	0	0	0	0	0	269
	2	107	98	17	5	2	1	0	0	0	0	0	230
	3	163	41	39	1	4	1	2	0	0	0	0	251
	4	110	151	9	0	5	0	0	0	0	0	0	275
	5	109	90	61	0	0	0	0	0	0	0	0	260
	6	216	8	2	0	0	0	0	0	0	0	0	226
	7	190	166	43	4	1	1	0	0	0	0	0	405
	8	270	25	31	1	2	0	0	0	0	0	0	329
	9	126	74	85	5	9	6	1	0	5	0	2	313
	10	178	65	53	46	66	24	8	2	22	0	9	473
計		1659	784	348	67	89	33	11	2	27	0	11	3031

### 3-2 アジアの土壤荒廃の空間分布と土地環境区・土地利用との関連性

#### (1) アジアの土壤荒廃の空間分布

ここでいう「土壤荒廃」は、国連砂漠化対処条約 (United Nations 1994) で「土地荒廃」が定義された際、その例として挙げられたもののうち i) 風又は水による土壤侵食, ii) 土壤の物理的, 化学的及び生物学的又は経済的特質の悪化, をさすものとする。データは、UNEP が GLASOD の一環として製作した地図 (UNEP & ISRIC 1990) のデジタルデータ版 (これも GRID つくばで入手可能) を用い、GIS 解析用ソフトウェアである ARC/INFO を用いてラスターデータに変換して解析をおこなった。

この「人間による土壤荒廃図」に見るアジアの土壤荒廃の空間分布はつぎのとおりである。中国の華北西部, 華中, 華南からインドシナ半島にかけてとデカン高原西部やヒマラヤの南側などでは強い水食がみられる。また, 内蒙古自治区東部やモンゴル共和国南部, チベット高原西方では風食がみられる。華北東部, マレー半島の沿岸部, ベンガル湾周辺では化学的劣化がみられ, ボルネオ島東岸部やニューギニア島西部では物理的劣化がみられる (図 2-1)。

#### (2) アジアの土壤荒廃と土地環境区・土地利用の関連性

表 2-5 土地環境区分と土壤荒廃タイプの関係

枠内の数字はメッシュ数、hは重度または強度、wは中度または軽度をさす  
Wtは水食、Wdは風食、Cは化学的劣化、Pは物理的劣化、wasteは不毛の土地  
stableは土壤荒廃の見られない土地をさす。複数の土壤荒廃をもつメッシュもある。  
特化度1以上のセルに網掛けをほどこした。特化度は、セルへの偏りを示す指標で、  
以下の式で与えられる。

$$\text{特化度} = \frac{\text{観測度数} / \text{期待度数} = (\text{そのセルの度数}) \times (\text{表全体の度数}) / (\text{そのセルを含む行全体の度数}) \times (\text{そのセルを含む列全体の度数})}{\text{メッシュ数}}$$

土壤荒廃タイプ (数字はメッシュ数)

	waste	h/Wd	w/Wd	h/Wt	w/Wt	h/C	w/C	h/P	w/P	stable
1	83	8	3	1	39	0	3	0	1	100
2	42	20	33	13	78	2	9	0	1	21
3	120	10	62	2	22	7	11	0	0	16
4	30	36	45	24	86	3	2	1	0	43
5	14	20	24	24	131	0	0	0	0	46
6	0	0	0	7	5	0	0	0	0	214
7	8	12	10	73	151	2	23	0	1	117
8	2	3	4	30	72	0	2	0	3	212
9	0	1	0	151	126	1	8	0	0	23
10	0	0	1	183	113	17	23	2	7	104

つぎに、土壤荒廃の様子との関連を見ていく(表 2-5)。土壤荒廃タイプの分類は UNEP & ISRIC (1990)のものをもとに加工した。この表からいくつかの重要な特徴が見て取れる。たとえば、土地環境区 5,7,9,10 は、水による土壤荒廃が深刻な地域で、その中でもとくに土地環境区 9 と 10 は荒廃の程度が強い。また、土地環境区 7 と 10 は化学的劣化も無視できない地域である。これらは、さきに述べた耕作強度の高い地域ともよく一致している。また、土地環境区 2,3,4,5 では風による土壤荒廃が顕著であり、土地環境区 6 と 8、とくに土地環境区 6 は重大な土壤荒廃要因がなく、土壤の安定した地域となっている。土地環境区 1 と 3 は、利用されない不毛の地が多く分布している。

ここでも、表 2-5 について  $\chi^2$  検定をおこない、1%水準で土地環境区と土壤荒廃パターンとの統計的に有意な関連性が示された。

つぎに、個々の土壤荒廃タイプごとの分布を細かく見ていくことにする(表 2-6,2-7)。1 から 10 は土地環境区を、横に並ぶ 0 から4の数字は土壤荒廃の程度を表している。土壤荒廃の程度には UNEP & ISRIC(1990)の凡例にある severity をそのまま用いた。表 2-6,2-7 にそのまま  $\chi^2$  検定をおこなったところ、いずれも 1%水準で統計的に有意な関連性が示された。また、このほかの、化学的劣化および物理的劣化についても同様の検定をおこなったところ、化学的劣化については同様に 1%水準で土地環境区との統計的に有意な関連性が示されたが、物理的劣化については土地環境区との統計的に有意な関連

表 2-6 土地環境区分と風食の深刻度(0~4)の関連  
 枠内の数字はメッシュ数、風食の深刻さ(severity)  
 は風食の強度と被害面積を考慮したもの  
 (UNEP & ISRIC 1990)。特化度1以上を太字にした。  
 風食の深刻度

	0	1	2	3	4	計
1	258	1	2	8	0	269
2	174	6	27	17	3	227
3	179	7	55	4	6	251
4	194	5	40	26	10	275
5	216	4	20	18	2	260
6	226	0	0	0	0	226
7	383	0	10	10	2	405
8	322	0	4	1	2	329
9	312	0	0	0	1	313
10	472	1	0	0	0	473
計	2736	24	158	84	26	3028

表 2-7 土地環境区分と水食の深刻度(0~4)の関連  
 枠内の数字はメッシュ数、水食の深刻さ(severity)  
 は水食の強度と被害面積を考慮したもの  
 (UNEP & ISRIC 1990)。特化度1以上を太字にした。

		水食の深刻度					
		0	1	2	3	4	計
土 地 環 境 区	1	229	1	38	1	0	269
	2	136	29	49	11	2	227
	3	227	4	18	2	0	251
	4	165	19	67	20	4	275
	5	105	57	74	24	0	260
	6	214	2	3	0	7	226
	7	181	51	100	32	41	405
	8	227	26	46	29	1	329
	9	36	33	93	102	49	313
	10	177	42	71	146	37	473
計		1697	264	559	367	141	3028

はなかった。なお、表 2-6,2-7 とも、縦(1-10)は土地環境区、横(1-4)は被害の度合いを示す(数が多いほど被害大)。

すでに見たように、耕地面積率は土地環境区 5 で、家畜によるメタン濃度は土地環境区 10 で非常に大きくなっている。土地環境区 5 は生産力の高い栗色土地域をその主な構成要素としており、土地環境区 10 は赤道を挟む熱帯多雨地域である。まとめると、①土地利用が盛んなほど土壤荒廃が進んでいる、②水食は土地環境区 9,10 をのぞき降水量に関係なく起こる、③風食は降水量が少ないほど進んでいる、という3点があきらかになった。

最後に土地環境区ごとに土地利用と土壤荒廃をみていく。ここで土地利用としては耕地面積率と家畜によるメタン排出量、土壤荒廃としては被害のとくに大きい水食と風食に注目した(表 2-8)。土地環境区 1 と 6 では、土地利用・土壤荒廃ともに少ない。ただし土地環境区 1 では土地利用との相関がそれほど顕著でないのに対し、土地環境区 6 では、土地利用と土壤荒廃の間に正の相関がみられた。土地環境区 2 は風食と水食が同程度おこっており、わずかも土地利用があれば土壤荒廃がみられるようになる。土地環境区 3 は土地利用があまり進んでおらず、土地利用も小さいものであれば土地利用圧がゼロの場合と土壤荒廃が変わらない。土地環境区 4,5 では、風食は土地利用が少しでも加わると土壤荒廃の度合いがかなり大きくなるのに対し、水食は土地利用がほぼゼロのところでもおこっている。土地環境区 7 と 8 は土地利用強度





と土壤荒廃の度合いは異なるが、土地利用がなくても水食がある程度おこっていること、風食はほとんどおこらないことなどが共通している。土地環境区 9,10 では激しい土壤荒廃が進んでおり、そのほとんどは水食によるものである。平均降水量の少ない土地環境区 9 の方が土地環境区 10 よりも水食の被害が大きいのは、気温・降水量の季節変化が土地環境区 10 ではほとんどみられないため、植生が多層にわたる熱帯林が成立しており、降水による土壤荒廃を和らげることなどが原因だと考えられる。以上から土地利用の有無によって土壤荒廃の度合いが急激に大きくなるのは水食では土地環境区 2,3 であり、風食については土地環境区 2,3,4,5 であるといえる。

### 3-3 補足

#### (1) 統計手法について

ここでは①データの統合によるカテゴリ数の調整→②各カテゴリの数量化・低次元化→③数量化スコアを用いた分類、という手順で解析を進めた。各段階について少し議論しておく。一般にデータは、そのとりうる値と値のもつ意味を用いて9つに分類される(表 2-9)。とりうる値が連続的なもの、離散的なもの、

表 2-9 尺度と変域を用いた変数の分類 (Anderberg 1973 の邦訳より転載)

測定尺度	変域の大きさ		
	連続変数：非可算無限の取値を取る	離散変数：有限(またはせいぜい可算無限)の取値を取る	二値変数：二つの値しか取らない
比率尺度： $x_A > x_B$ ならば、 $A$ は $B$ より $x_A/x_B$ 倍大きく、また $x_A - x_B$ 単位だけ大きい	*K: の温度、重さ、高さ、年齢	子供や病院や車の数のような数え方	自動販売機のソフトドリンクの単価—瓶入りか缶入りか、10セント罐か15セント罐か
間隔尺度： $x_A > x_B$ ならば、 $A$ は $B$ より $x_A - x_B$ 単位だけ大きい	*C: の温度、比重	連載小説の回数、テレビのチャンネル数	妻の人数 (法定数であれば0人が1人か)
順序尺度： $x_A > x_B$ 、 $x_A = x_B$ か、または $x_A < x_B$	人の感情、明るさ、音の強さ	軍隊の階級、大型中型小型という車(フォード、マーキュリー、リンコンなど)の型	背が高い—背が低い、良い—悪い、大きい—小さい、幅が広い—幅が狭い
名義尺度： $x_A = x_B$ か、または $x_A \neq x_B$	無意味である一個数が高可算無限の明確な階級が必要になる	目の色、出生地、好きな俳優	はい—いいえ、出席—欠席、死んでいる—生きている、電燈を入れる—電燈を切る、真—偽

二値のみのもの、をそれぞれ連続型データ、離散型データ、離散型データとよぶ。また値の意味によって比尺度、間隔尺度、順序尺度、名義尺度に分類される。比尺度は、 $X_A > X_B$  のとき  $X_A$  は  $X_B$  より  $X_A/X_B$  倍大きく、 $X_A - X_B$  単位だけ大きい。間隔尺度は  $X_A > X_B$  のとき  $X_A$  は  $X_B$  の  $X_A - X_B$  単位だけ大きい。順序尺度では  $X_A > X_B$  または  $X_A < X_B$  または  $X_A = X_B$  の 3 通りの意味しかなく、名義尺度では  $X_A = X_B$  または  $X_A \neq X_B$  の区別しかない。これらによって分類すると、データを配布元からダウンロードした段階では測定機器や記憶媒体による桁数の制限を無視すると、年降水量は比尺度・連続型データ、年平均気温(°C)と標高は間隔尺度・連続型データ、土壌と植生は(順序と名義の混合)尺度・離散型データであった。これらを 10 のカテゴリに再配分した段階で、これらは間隔尺度・離散型データ(年降水量、年平均気温、標高)と(順序と名義の混合)尺度・離散型データ(土壌、植生)に変換されている。各カテゴリはここでは Correspondence analysis によって数量化(厳密には比尺度・連続型データ化)がおこなわれた。Correspondence analysis のアルゴリズムについてはすでに述べた。同じような手法はさまざまな研究者によって別々に考案され、似通った方法にいくつもの異なった名称が与えられてきた(reciprocal analysis または交互平均法, dual scaling または双対尺度法, 林の数量化法など)。これらをさらに発展させたものとして DCA (detrended correspondence analysis 除歪対応分析)なども考案されている。クラスタ分析は大きく階層型と非階層型にわかれ、階層型には連結法, セントロイド法, Ward 法が, 非階層型のほとんどは最近隣法であり、ここで用いた MacQueen の k-means 法の他、さらに精巧な ISODATA 法といわれるものなどがある。その他にも多くの手法が提案されており、時には手法により結果が異なることがある。つまり、クラスタ分析による分類は一意的ではなく、分類結果を絶対的な真理と考えることはできないのである。重要なことは、分類のアルゴリズムと結果が客観的に記述でき、他者によってそれが検証される、ということである。また、全てのデータに対して同じアルゴリズムで分類がおこなわれること、アルゴリズムの決定の際にはまだ結果が得られていないので、結果をみながら手法を操作することができないのも特長である。Anderberg (1973) は「クラスタ分析法が役に立つのは、生み出された分割が十分に分類原理を表していて、分析者がその原理を発見する場合である」とし

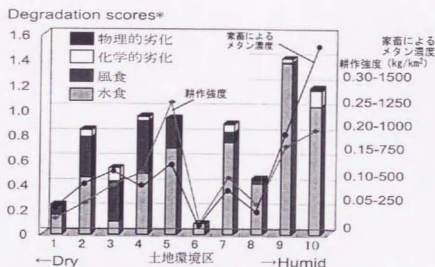


図 2-8 各土地環境区分の土壤荒廃のようす

\*Degradation scoreは $2 \times (\text{重度と強度の面積率}) + (\text{中度と軽度の面積率})$ で算出される (UNEP&ISRIC 1990を用いて作成)

ている。

## (2) 土壤荒廃と環境条件の関連について

図 2-8 から、水食は降水量が極端に多い地域をのぞくと、降水量との関連が明確でないのに対し、風食は降水量が少ないところで多く起こっていることがあきらかになった。このことは WMO(1983)による報告(図 2-9, 2-10)とも一致する。図 2-9, 2-10 から風食の曲線は夏雨か冬雨かによって異なり、図 2-9 中で、冬雨では C のように、夏雨だと D のようになる。両者を考慮すると、250-300mm のところでもっとも水食が激しくなる(Mainguet 1991)。植被が少なければ降水量が多いほど水食が激しいが、植被が十分にあるところでは、降水量が 400mm 前後で水食が最大になる。

本章でおこなった土地環境区分結果と土地利用、土壤荒廃の関連を表 2-10 に示す。風食による被害が顕著であった地域は、降水量 100-400mm 程度の草原で、降水量が少ない割には高い耕作地面積率になっている。また、被害の大きさは土地利用圧と明確な正の相関をもつ。長期にわたる植生の消失をのぞく砂漠化地域について要因別に見ると(表 2-11)、水食では伐採、化学的劣化・物理的劣化では過耕作が特徴的であったのに対し、風食では過放牧がめだっている。おなじく降水量との関連に注目してみると(表 2-12)、

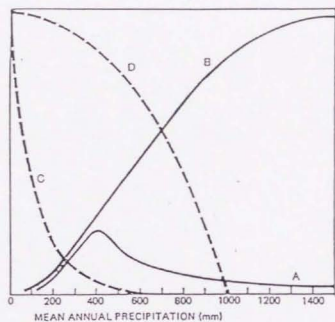


図 2-9 水食および風食に対する降水量・植被の効果  
(WMO 1983)

Aは植被が多いとき、Bは植被が少ない時の水食量を、  
Cは植被が多いとき、Dは植被が少ない時の風食量を示す

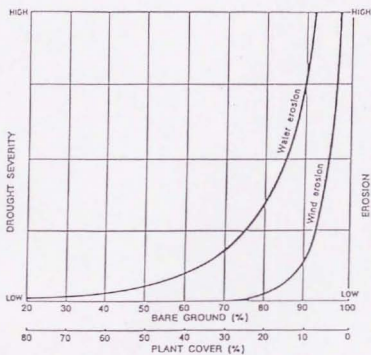


図 2-10 水食および風食による旱ばつの被害と植被率の関係  
(WMO 1983, Mainguet 1991)

表 2-10 土地環境区分・耕作強度・土壌荒廃の関連表

土地環境区	主な分布域	自然条件	平均耕作面積率 (%)	土壌荒廃
1	チベット高原	ほとんどが砂漠地域 平分以上が標高3000m 以上の高原	2.0	弱い水食と 安定もしくは荒廃した土地
2	チベット周辺部	低木林・砂漠の半乾燥/ 乾燥地帯標高1000m以上 ~400m	5.2	弱い水食、強い風食および 荒廃地
3	アラブ海周辺	半砂漠・草原上の 低木林・草原が特徴 降水量100~300mm	8.9	弱い風食と 荒廃地
4	華北- 内モン中部	草原上の半乾燥地 降水量200~600mm 陸行はびこる	11.2	弱い水食と強い風食 サブグループ有り?
5	中央アジア北部	タイガから草原への 移行帯。栗色土・草原土 1~3℃、300~600mm	25.1	弱い水食、強い風食および 荒廃地
6	シベリア東部	草原・牧畜土上の夏緑林 降水量 300~700mm	1.1	ほぼ安定
7	中国中部	草原土と1000mを 越える標高が特徴	10.1	強い水食と 弱い化学的劣化
8	シベリア中部	低地でやや乾燥 夏緑針葉樹林と 夏緑林が特徴	4.7	弱い水食があるものの ほぼ安定
9	中国・華南	季節風を特徴とする 低緯度の半シモン草原 栗色土・ステップ牧土、 灰色土・森林土が特徴的	16.3	ほぼ全域で水食 (程度も深刻)
10	インドシナ南部 インド インドネシア	地帯的式以上 降水量1000mm以上の 高温多湿地域	19.5	強い水食と 強い化学的/物理的劣化

表 2-11 アジアの砂漠化タイプとその要因(UNEP & ISRIC 1990より作成)

1度メッシュを単位にしたときのメッシュ数 (乾燥地のみを対象)

	過耕作	開発	伐採	過放牧	合計
水食	118	5	293	182	598
風食	65	21	33	157	276
化学的劣化	58	0	1	7	66
物理的劣化	3	0	0	0	3
合計	244	26	327	346	943

表 2-12 アジアの砂漠化タイプと降水量の関係(UNEP & ISRIC 1990より作成)

(数字はメッシュ数)

	降水量(mm)										合計	
	-100	100-200	200-300	300-400	400-500	500-600	600-700	700-800	800-900	900-1000		1000-
不毛地	33	96	69	46	7	10	0	0	0	0	0	261
安定地	3	14	22	76	52	15	14	7	5	7	42	257
水食	2	47	140	166	87	40	29	20	23	15	37	606
風食	11	72	83	69	26	10	7	0	0	0	0	278
化学的劣化	3	9	18	4	10	9	8	1	2	1	3	68
物理的劣化	0	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	3
合計	52	238	333	363	182	84	58	28	30	23	82	1473

100mm から 400mm で風食が顕著であった。これは土地環境区でいえば 2 から 5 までということになる。このうち、土地環境区 2 と 3 は降水量が少なく(図 2-11)、UNEP の分類でも乾燥地域に分類されることが多い。とくに抽出したいのは半乾燥地域および乾性半湿潤地域における風食であった。土地環境区 4 および 5 がそれにあたる。

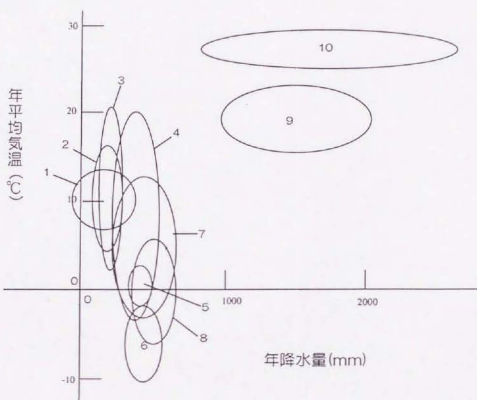


図 2-11 各土地環境区の気候特性  
各楕円の中心点は各土地環境区ごとの年平均気温および年降水量の平均値を、半径の大きさはその標準偏差をあらわす。

#### 第4節 小括

本章の結果から、アジアにおける環境条件と土地利用、土壌荒廃の関連性をまとめる。アジアの環境特性には降水量の寄与がもともと大きく、ついで気温の寄与が大きかった。また、土地環境区ごとに土地利用圧が大きく異なっている。土壌荒廃は、図 2-9 のような特性と土地利用圧を用いて説明することが可

能であった。水食は降水量と顕著な関連が無く、乾燥地でも少なからぬ土地で被害を引き起こしている。

アジアにおいて、本研究で焦点をあてる砂漠化の典型的なタイプとして、降水量 100-400mm の草原地域で、過度の放牧によって起こる風食が抽出された。過度の土地利用が引き起こす風食に注目するためには土地環境区 4,5 を詳しくみていく必要がある。

次章では、土地環境区 4,5 に含まれる地域を事例対象地域として詳細なモニタリングをおこなう。

### 第3章 奈曼旗の砂漠化のモニタリングとモデル化

第2章で大陸スケールの環境条件の分布を用いて土地環境区分をおこない、砂漠化の起きている地域の環境条件について明らかにした。アジアの中でも中国は、世界最大の人口を養うために土地利用圧が高くなっており、そのためにチベット高原をのぞくほぼ全域でなんらかの土壤荒廃がおこっている(UNEP & ISRIC 1990)。中国における土壤荒廃の種類は、気候特性を反映して地域的な偏りを見せており、華南地方では水食、そして内蒙古の中部のオルドス高原・モース砂地や内蒙古東部のオチンダグ砂地やクルチン砂地では風食が起きている(UNEP & ISRIC 1990, Zhu *et al.* 1992)。風食地域は砂漠化地域とほぼ重なっており、砂漠化進行地域と、それを囲む潜在的砂漠化地域が分布する。とくにオチンダグ砂地からクルチン砂地へとつづく地域には潜在的砂漠化地域が多く残されており(Zhu *et al.* 1992)、これからの土地利用によっては、さらに広大な土地が砂漠化するとみられる。また、最近進んだ砂漠化の要因別では採薪、過放牧、過耕作が大半を占めている(Zhu 1984, 表 3-1)。本章では、クルチン砂地のなかでもとくに砂漠化の進行が著しいとされる奈曼旗を事例地域に設定し、さらに詳細な分析をおこなった。

第2章の区分結果の、奈曼旗周辺の様子を図3-1に示す。北部は、第2章で比較的湿潤でありながら風食が盛んにおこっている地域のおもな分布域として抽出された土地環境区4.5に区分された。本章では奈曼旗北部を中心に議論する。

なお、20年スケールのモニタリングが対象とした1970年代後半から1990年代にかけては、1978年の農村改革から始まる中国の急激な経済発展の時期であった。内蒙古自

表 3-1 現代(最近50年間)に砂漠化した土地の成因(Zhu 1984)

現代に砂漠化した土地の成因	全体に占める割合(%)
1. 過度の耕作によるもの	23.3
2. 過放牧によるもの	29.4
3. 薪の採取によるもの	32.4
4. 鉱工業、交通施設、都市建設によるもの	0.8
5. 水資源の誤用によるもの	8.6
6. 砂丘が前進、進入したもの	5.5



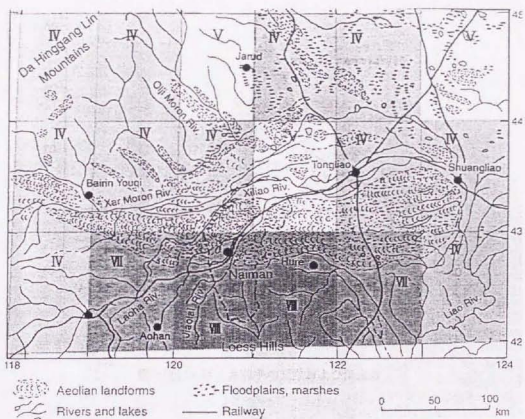


図 3-1 対象地周辺の土地環境区  
ローマ数字が第 2 章の土地環境区分の結果を示す  
(地形概要図は大黒 1997 のものを使用)

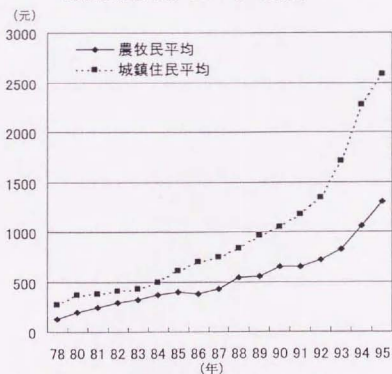


図 3-2 内モン自治区の平均所得の推移  
(内モン自治区統計局 1996より作成)

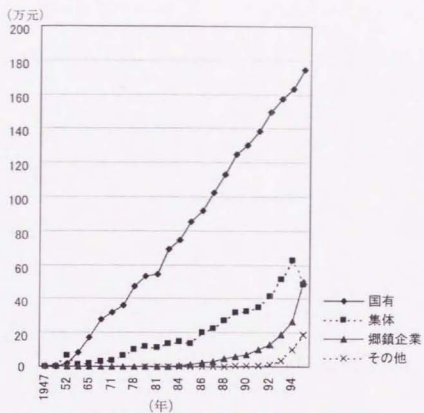


図 3-3 内蒙古自治区における各種企業の生産高の推移  
(内蒙古自治区統計局 1996より作成)

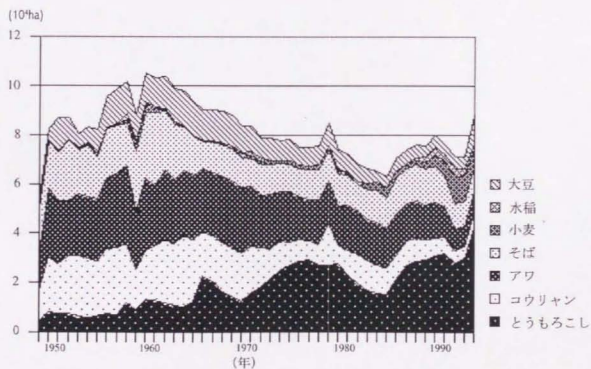


図 3-4 奈曼旗における作付け面積の推移 (石ら 1998より)

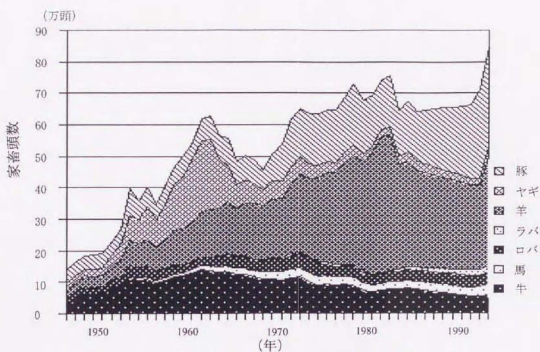


図 3-5 奈曼旗における家畜頭数の推移  
石ら 1998より(1987-91は内挿)

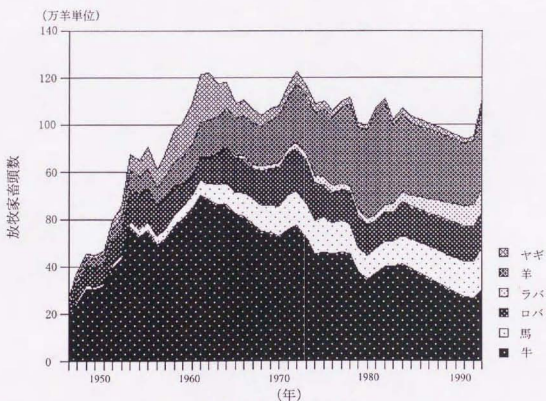


図 3-6 奈曼旗における放牧家畜(羊単位)の推移  
石ら 1998より(1987-91は内挿)

治区においても 1978 年から 1996 年までに住民の所得が約 10 倍となり(図 3-2)、郷鎮企業の生産額も飛躍的にのびている(図 3-3)。これに対し、奈曼旗内の作付け面積は 1960 年代をピークにその後はあまり増加していない(図 3-4)。家畜頭数はやや増えているものの(図 3-5)、羊単位になおした家畜数(図 3-6)は横ばいである。つまりこの間の経済発展は、奈曼旗の場合、土地利用圧の増大には結びつかなかったということにも注意したい。

## 第1節 対象地の概要

### (1) 地理的条件

中国北東部は、乾燥地が西側から張り出したかたちになっており(図 2-2)、土地荒廃もそれを反映した分布を見せている(図 2-1, 図 3-7)。内蒙古自治区東部から渤海にかけては北西から南東へ向けて気温(図 3-8)や降水量(図 3-9)をみても環境傾度がおおきい地域である。中国北部では歴史時代(50 年以上前)に 12 万 km<sup>2</sup>が、最近 50 年で 5 万 km<sup>2</sup>が砂漠化した(Zhu & Liu 1983, 表 3-2)。

本章で対象地とした中国内蒙古自治区哲里木盟奈曼旗は、東経 120°30'~121°30'、北緯 42°30'~43°30'に位置し(図 3-10)、その面積は 8,232.7km<sup>2</sup>である(Zhu *et al.* 1988)。この一帯はクルチン砂地と呼ばれる面積約 43,000km<sup>2</sup>の砂地草原を形成している。クルチン砂地は中国でもっとも大きな砂地草原の一つであり、また砂漠化が特に進んでいる地域でもある。奈曼旗の中心部に近い測定点で年平均気温は 6~7°C、年平均降水量は約 370mm であり、その大半は 6~9 月に集中している(図 3-11)(Zhu *et al.* 1988)。

奈曼旗北部の大部分は風積砂土におおわれている。風積砂土は、沖積もしくは風成堆積物を砂の給源とし、それらが風により再堆積したものを母材とする土壤である。これは植生の発達に伴って流動風積砂土→半固定風積砂土→固定風積砂土と順次土壌化が進み、やがて成帯性土壤へと発展する。この地域の成帯性土壤は、栗色土もしくは砂漠(灰色)土と考えられる。北部のうち、地下水位が高く土壤水分が十分な地域では、半成帯性土壤である湿草地土が発達している。土壤の性質には地下水位が大きく影響する(中国科学院南京土壤研究所 1983)。なお、近年は灌漑などによって塩類土などもみられるようになった(森・古川 1992)。一方、南部には、おもに、レスを母材とする半乾燥地の成帯性土壤である栗色土と肉桂色土が分布する。これらの分布は降水量に依存し、年降水量およそ 400mm 以下の地域では栗色土ないし栗



図 3-7 中国における荒漠地の分布 (大黒 1997 より転載)

表 3-2 中国北部の砂漠化土地のうちわけ (Zhu & Liu 1983)

歴史時代 (近年50年以前) に砂漠化した土地	120.000km <sup>2</sup>
最近の50年で砂漠化した土地	50.000km <sup>2</sup>
砂漠化の危険性のある土地	158.000km <sup>2</sup>
合計	328.000km <sup>2</sup> (3.4%)*

\* 中国全土に占める割合

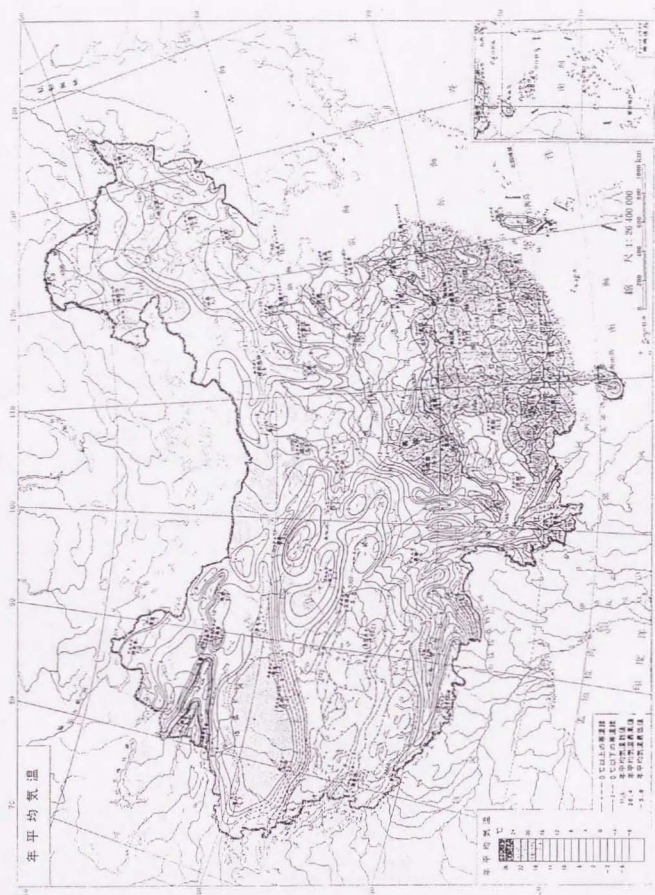
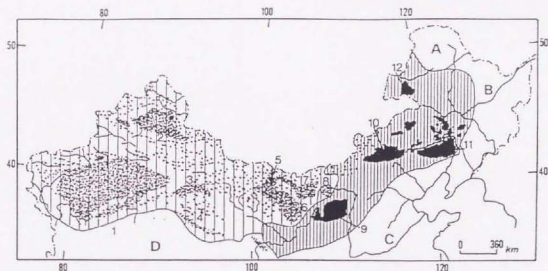


図 3-8 中国の気温分布 (中国地図出版社 1987 より転載)



图 3-9 中国の降水量分布 (中国地图出版社 1987 より転載)



**Desert type**

- Rock or Gravel Desert (Gobi)
- Sand desert
- Sandy land

**Vegetation type**

- Temperate steppe
- Temperate desert
- A. Subarctic coniferous forest
- B. Temperate mixed forest
- C. Cool temperate deciduous forest
- D. Cold desert

- 1. Taklimalan Desert
- 2. Gurbang Tunggut Desert
- 3. Kumtag Desert
- 4. Deserts in Qaidam Basin
- 5. Badain Juran Desert
- 6. Tengger Desert
- 7. Ulan Buh Desert
- 8. Qubqi Desert
- 9. Mu Us Sandy land
- 10. Otindag Sandy land
- 11. Kerqin Sandy land
- 12. Hulun Buir Sandyland

図 3-10 中国北部地域における草原と砂地の分布 (大黒 1997 より転載)

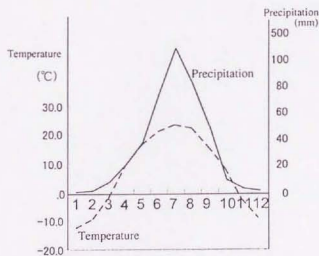


図 3-11 奈曼の気候ダイアグラム  
(データは蘭州沙漠研究所による)





図 3-12 奈曼旗の土地区分結果

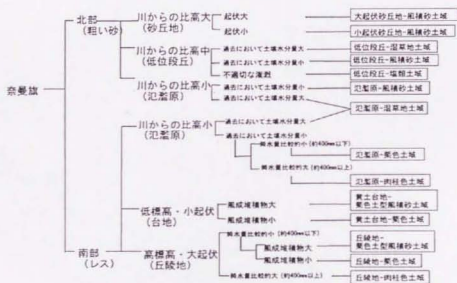


図 3-13 奈曼旗の土地区分の関連図

色土型風積砂土が、年降水量がそれ以上の地域では肉桂色土が分布する。つまり寄与がそれほど大きくないと思われた気候条件がこのような間接的な形で土地の環境条件に影響をおよぼしている。なお氾濫原に風積砂土地域があるのは、①川の流れが後が変わった、②飛砂が氾濫原の一部をおおった、などの理由によると考えられる。土壌図と地形図の精度の差などにも注意してこれらを統合(井手・武内 1985)して得た土地環境区分の結果を図 3-12 に、各土地環境区の関連図を図 3-13 に示した。

また、乾燥した地域においては水の供給量が生産性の決定条件になることが多いため、土地条件を規定する要素として水に関する条件を考慮する必要がある。奈曼旗北部はクルチン砂地とよばれる大きな砂地に含まれており、更新世中期の河成ないし湖成堆積物の厚い層に覆われている。ここでは透水性の高い砂に西方から流れ込む大河川や南方の降水量が多く標高の高い黄土台地からの十分な水分供給があるため、地下水位が高く水の供給量の多い良質の帯水層を形成している。このため地下水が重要な水分供給源となっている。増田ら(1988)によれば砂丘地において地下水位が土壤水分に顕著な影響をおよぼすのは地下水面から 1m 程度までであるが、3m 程度まではわずかに影響が残る。この地域では、蘭州沙漠研の観測や大黒・根本(1997)の報告から地下水位がその閾値付近であることがわかっている。このことから、奈曼旗北部では、場所によってこの閾値より地下水位の高いところと低いところが存在し、それぞれ土地の条件が大きく異なることが予想される。また、サイトレベルでは、地下水位が低ければ生育できる植物種が限られ(山本 1983)、生育できる種も地下水位が低いときには地上部の面積が減少する(根本ら 1995)などの報告がなされている。以上のような理由から、ここでは地形・土壌にくわえて、土地条件の決定要因として地下水位に注目する。さらに、とくに奈曼旗北部については地下水位が土地条件の決定に大きな要因になっていると思われたので、現地調査において地下水位を測定した(図 3-14)。標高図(図 3-15)などを参考に、地下水位の推定図を作成し、それを考慮した土地環境区分図を図 3-16 に示す。

次節のモニタリングでは、植被に関するデータの解像度などによって単位とする区分を変え、50 年スケールでは土壌分類ごと、20 年スケールでは地下水位を考慮した土地環境区分ごと、季節変動では地形分類ごとでおこなうこととした。



図 3-14 奈曼旗北部の地下水位の分布

観測値を考慮して等地下水深度線を記入した

\*は蘭州沙漠研奈曼ステーションのデータ

その他の観測値は1998年の著者らの測定による

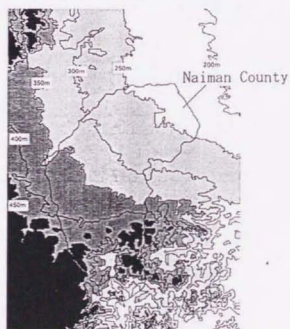


図 3-15 奈曼旗とその周辺の標高図  
(USGSのETOPO30データセットより作成)



図 3-16 奈曼旗北部における地下水位を考慮した土地分類図

■ : 水域

## (2)クルチン砂地の土地発達史

この地域の砂漠化は、大きく分けて①西北部で顕著な、第四紀の湖沼堆積物からなる砂丘が、植被が消失することによって再活動し流動砂丘となるもの(森・古川 1992 など)、②南部のレス地域で顕著な水による侵食(Zhu *et al.* 1988 など)、③最近見られ始めた土壌の塩性化(森・古川 1992 など)、の3種類が見られる。

ここでは、文献などを用いて、研究対象地であるクルチン砂地の土地条件の変遷をたどる。奈曼旗が含まれる西遼河の平原は、第三紀の後期に断層が生じた地域であり、奈曼旗の土地条件は、その断層の北側と南側とで大きく異なる。北部では、第三紀の堆積物の上を更新世中期の沖積ないし湖成堆積物が厚く覆い、さらに更新世後期の沖積堆積物や完新世の沖積もしくは風成堆積物である粗い砂が覆っている。南部では、第三紀の堆積物の上に更新世中後期の風成堆積物であるレスがおおっている(Zhu *et al.* 1988)。層序学的研究によるこの地域の植被の変動は、以下のようなものである。対象地域の砂漠化は、表層土壌層が喪失することにより、第四紀の湖沼堆積物である砂土が現れることで起こるとされている(Zhu *et al.* 1988)。隣接する遼寧省では 10,000-8,000B.P.、8,000-5,000B.P.、5,000-2,500B.P. がそれぞれ寒冷・乾燥、温暖・湿潤、温暖・乾燥の時期で、2,500B.P.以降は気温・降水量とも小さく変動しながら温暖・乾燥から寒冷・湿潤へ変化した(Wang 1984)。これらは、藤(1975)による日本の北陸地方の気候条件の変化とも符合する。また、B.C.4000 以降の砂漠化とその回復の様子は石ら(1998)によれば B.C.4000-

表 3-3 ク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  
(石ら 1998 より転載)

時 期	王 朝	支配民族	土地利用	砂漠化関連	砂 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	局部砂漠化	第1古土壌層 第1砂層	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古土壌層	625年～825年
907年～ 1270年	遼・宋・金	契丹族 女真族	農耕中心	砂漠化進行	第2砂層	825年～1300年
1270年～ 1902年	元・明・清	モンゴル族	遊牧中心	回復	第3古土壌層	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	砂漠化進行	第3砂層	1700年～現在

B.C.475 は農業と牧畜業の兼営により局部砂漠化、その後 A.D.907-1290 は農耕中心で砂漠化進行、1907 以降では放牧と農耕の兼営で砂漠化進行、その他は遊牧中心で回復期であった(石ら 1998, 表 3-3)。劉ら(1993)によれば奈曼付近では B.C.3,100~2850, A.D. 625-825, 1,300-1,700 には植生が回復した時期とされ、現在は 1,700 年から始まる砂漠化が進行する時期にあたる。クルチン砂地西部のウランホトでの調査(Takeuchi *et al.* 1995)では、B.C.1300 年に古土壤層が発達したことが示された。著者らによる測定では、1470±80 B. P.(TH-1871)および 4100±220 B. P.(TH-1872)で古土壤の発達がみられた。前者は気候が擾乱期、後者は気候が温暖・乾燥で、土地利用は双方とも農牧兼営で局部で砂漠化が進行していた時期である。

## 第2節 奈曼旗の砂漠化モニタリング

### 2-1 砂漠化モニタリングにおける時間スケールの重要性とモニタリング手法

砂漠化した土地の面積変化を論じるときに注意しなければならないのは、砂漠化した土地の面積変動はタイムスケールの違うさまざまな変動の組合わさったものであるということである。サヘルにおける初期の研究にみられたように、砂漠化が進行しているか否か、あるいはどの程度進行しているのかを理解するには、常時おこっている“振動”とあきらかなトレンドをもった“変化”を分離することが必要であろうし、砂漠化の進行を防止するための適正な土地利用を考える上でもそのような、さまざまな周期の振動が土地条件によってどのようにおこるのかを理解しておく必要がある。

当然、注目する時間スケールによって研究の手法も異なってくる。数万年スケールの気候変動をあつかうときには  $^{14}\text{C}$  を用いた年代測定などが用いられ、数百年から数十年スケールをあつかうときは古文書や古地図が用いられる。数十年スケールの研究には対象地によっては空中写真なども使用できる。10-20 年スケールのモニタリングをあつかうものとしても有効なものには衛星画像解析である。近年とくに Landsat 衛星や SPOT 衛星が利用可能なり、1970 年代以後の砂漠化のようすを衛星画像解析を用いて報告する例(奈曼では、今川 1996 など)が増えている。また、季節変動や降水直後の一時的な植生の回復に関しては NOAA/AVHRR の衛星画像が利用できる。

## 2-2 中期変動(50年スケール)

### (1) 解析に用いたデータ

本研究では、旧大日本帝国陸地測量部(1933;1935)が製作した地形図(以下地形図)と中国科学院編集の砂漠化類型図(中国科学院沙漠研究所 1984)(以下砂漠化類型図)を用いた。このうち地形図の一部を図 3-17 に示す。ドットであらわされた部分は凡例では「通過困難ノ部」とされているが、十〜数十 m の起伏をとまうこと、その中の底部にはドットがなく頂部で特にドットの密度が高いこと、ドットで覆われた部分の形状が典型的なパラボリック(放物線状)な砂丘の形に近いことなどから流動砂丘の分布域を示すと推定される。また、図 3-17 の右端部のシート状のドットは、河辺の砂堆を示す。なお、この地図を含み旧満州一帯をカバーする「満州十万分の一図」は 1904 年に編成された第二次臨時測図部が測図した 5 万分の 1 の地形図をもとに、シベリア出兵(1918 年)の際にロシアから接收した 8 万 4 千分の 1 の地形図や満州事変(1931 年)の際に中国側から接收した地形図を用いて補強し、さらに不完全な部分は再調査して完成されたものである(建設省国土地理院 1970)。本研究で取りあげる地域は旧満州の中でも南部にあたるた

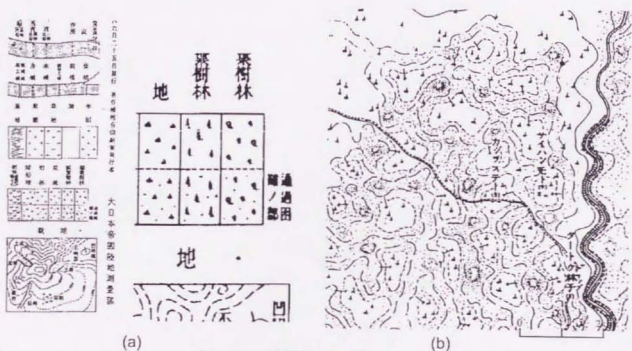


図 3-17 旧日本軍作成の地形図  
(a) 凡例、(b) 本図

めロシアからではなく中国から接收した地図が使われていると推測されるが、中国側から接收された地図のうち内外蒙古に関するもの 474 枚のうち 455 枚が 10 万分の 1 のものであり、それらは 1931 年の日中戦争の開戦の直前からつくられたものである(建設省国土地理院 1970)。また、第二次臨時測図部の測図は 1904 年から始まっているが、満州国の成立(1932 年)以前のものは見取り図程度のものにすぎず(藤原 1992)、おもな部位はそれ以降のものだと思われる。以上のことからこの地形図はおもに 1930 年代の情報にもとづいていると思われる。この地形図は図 3-17 にみられるように丘間低地と砂丘部の区別が可能であり、100m 前後もしくはそれ以下で地形の識別が可能であろうと思われた。

一方、砂漠化類型図には調査年度の記載がないが、関係者などの話から 1981-1982 年の調査だと推定される。砂漠化類型図は裸地の面積率によって重度砂漠化地域(裸地 50%以上)、強度砂漠化進行地域(同 25-50%)、砂漠化進行地域(同 5-25%)、潜在砂漠化地域(同 5%以下)、非砂漠化地域の5段階の区分をおこなっている。

流動砂丘の拡大に関する現在までの研究は、層序学的方法によって数千～数万年オーダーの変化を考察したもの(大森ら 1987 など)と、衛星画像解析によって 10～20 年の変化を追ったもの(今川 1996 など)がほとんどであり、ここでこころみような 50 年程度の変化を対象とした研究は少ない。それは一つには上に挙げた2つの方法のように世界のどこでも適用できる普遍的方法が確立されていないからであり、そのためこのタイムスケールをあつかうことができるのは空中写真、古地図、古文書などが残っている地域にほぼ限られる。またこれまでは対象区域全体の砂漠化地域拡大率に力点を置いた研究が多く(今川 1996, Takeuchi *et al.* 1995 など)、その中の、①どのような条件の土地で、②どのくらい拡大したのか、の2点に踏み込んだ報告はほとんどない。一方、空間変化を考慮した定量的な砂漠化危険度の推定の例には、オーストラリアのビクトリア州の塩類集積を降水量、森林面積などで表わしたもの(Ive *et al.* 1992)、砂漠化を水食、風食などのサブモジュールに分け、そこで降水量、地形などを考慮して評価したもの(Grunblatt *et al.* 1992)などがある。ここではそれらをふまえ、50 年スケールでの砂漠化地域の拡大を土地条件と関連づけた解析を試みたい。

中期変動の解析手順は以下のとおりである。まず、地形図と類型図をラスタ化した。ラスタ化はともに、まず数十 m の解像度でスキャナによって解析システムに取り込み、カテゴリごとに色をつけたのち出力することをおこなった。地図のラスタ化の際は、類型図に



ならい丘間低地もあわせて砂漠化地域とした。なお解析段階では、約 1km 四方のメッシュを単位とし、もっとも大きい面積を占めるカテゴリでそのメッシュを代表させた。つぎに重度砂漠化地域、強度砂漠化進行地域、砂漠化進行地域の面積の和を砂漠化地域面積とし、地形図の砂漠化地域の面積と比較することによってこの間の砂漠化地域の増加を把握した。さらに 1980 年代の砂漠化程度と、地形、土壌との関連性を調べた。その際、1930 年代に砂漠化地域であったところと、そうでなかったところを分けて調べた。地形、土壌図は現地機関によってつくられたものをラスタ化したものを用いた。

なお、本研究においては地形、土壌の分類は調査者のものをそのまま用いたが、理解を簡単にするためカテゴリ名はできるかぎり日本語になおして用いた。

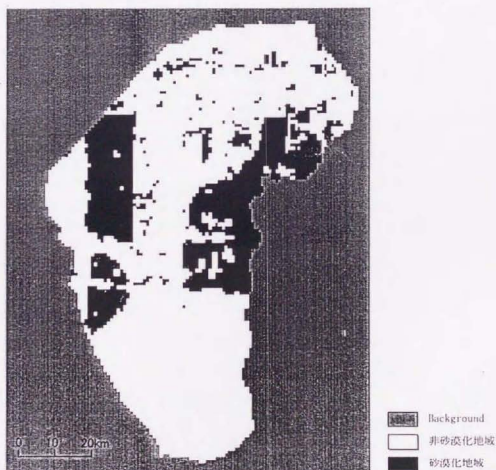


図 3-18 1930年代の奈曼旗における砂漠化地域の分布

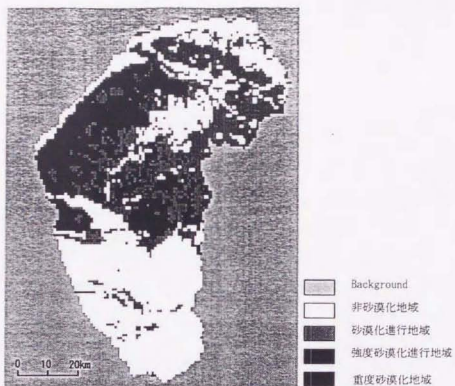


図 3-19 1980年代の奈曼旗における砂漠化地域の分布  
(中国科学院沙漠研究所<sup>γ</sup> 1984をもとに作成)

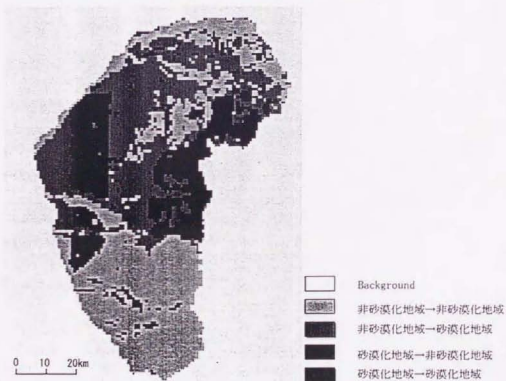


図 3-20 1930年代から1980年代までの奈曼旗における砂漠化地域の分布の変化  
1980年代の砂漠化地域は、砂漠化進行地域、強度砂漠化地域、  
重度砂漠化地域をあわせたものとした。

(2) 結果

1930年代では奈曼旗全体で、砂漠化地域が2,398.8km<sup>2</sup>であり、また、1980年代には重度砂漠化地域が700.8km<sup>2</sup>、強度砂漠化進行地域が1,825.7km<sup>2</sup>、砂漠化進行地域が1,779.9km<sup>2</sup>であり、合計で砂漠化地域の面積は4,306.4km<sup>2</sup>であった。この間に砂漠化地域は約1.8倍に拡大していた(図3-18, 3-19, 3-20)。

各地形区分の砂漠化程度の分布を表3-4に示す。1930年代の非砂漠化地域(以下旧非砂漠化地域)と1930年代の砂漠化地域(以下旧砂漠化地域)の裸地率を比べるとそれぞれ0.16, 0.27で、大きな差が見られた。裸地率とは、砂漠化の度合いをあらわすために本論文で導入した指標で、重度砂漠化地域、強度砂漠化地域、砂漠化進行地域をそれぞれ重みづけして和をとり、総面積で除したものである。重みづけの係数は、重度砂漠化地域については裸地の割合が50%から100%であるから、その中点である0.75を、以下同様強度砂漠化地域については0.375、砂漠化進行地域には0.15を用いた。

各地形区分ごとにとみると、おもに南部に分布する低山・丘陵地、黄土台地では砂漠化地域があまり見られず、おもに北部に分布する砂丘、低位段丘、氾濫原は、この順に裸地率が高く、それぞれ0.33, 0.20, 0.08であった。

砂丘、低位段丘を砂丘の大きさによってさらに細かく分類すると、砂丘が大きいくほど裸地率が高かった。また、旧非砂漠化地域と旧砂漠化地域を比較すると、どのカテゴリでも旧砂漠化地域の方がそれぞれ0.05もしくはそれ以上大きかった。ただし、砂丘の大きさ

表3-4 各地形区分における1980年代の砂漠化程度

地形区分	1930年代の非砂漠化地域					1930年代の砂漠化地域					合計	裸地率		
	d0	d1	d2	d3	小計	裸地率	d0	d1	d2	d3			小計	裸地率
低山・丘陵地	907	74	18	19	1018	0.03	4	5	6	6	21	0.36	1039	0.04
黄土台地	605	51	10	1	667	0.02	96	43	3	11	153	0.10	820	0.03
砂丘地	108	314	431	141	994	0.32	29	97	286	77	489	0.37	1483	0.33
うち(大起伏砂丘)	39	80	411	137	667	0.40	20	72	285	76	453	0.39	1120	0.40
(小起伏砂丘)	69	234	20	4	327	0.14	9	25	1	1	36	0.14	363	0.14
低位段丘	898	512	432	236	2078	0.20	181	476	315	107	1079	0.25	3157	0.22
うち(大起伏砂丘を伴うもの)	13	47	67	53	180	0.40	27	140	71	13	251	0.23	431	0.30
(小起伏砂丘を伴うもの)	518	427	343	164	1452	0.22	122	330	242	89	783	0.26	2235	0.23
(砂丘を伴わないもの)	367	38	22	19	446	0.06	32	6	2	5	45	0.12	491	0.07
氾濫原	202	64	19	6	291	0.07	31	8	1	5	45	0.12	336	0.08
沼沢地	24	13	8	1	46	0.12	9	16	17	0	42	0.21	88	0.17
合計	2744	1028	918	404	5094	0.16	350	645	628	206	1829	0.27	6923	0.19

表中、d0, d1, d2, d3はそれぞれ1980年代における非砂漠化地域、砂漠化進行地域、強度砂漠化進行地域、重度砂漠化進行地域のメッシュ数を示し、裸地率は(0.15d1+0.375d2+0.75d3)をメッシュ数で除したものである。

表 3-5 地形・土壌タイプと裸地率  
 旧非砂漠化地域の値 / 旧砂漠化地域の値を示す。  
 ---は該当メッシュなし。

	風積砂土	湿草地土	その他
砂丘地	0.32 / 0.37	0.25 / 0.32	0.33/---
低位段丘	0.25 / 0.27	0.06 / 0.11	0.23 / 0.18
氾濫原	0.15 / 0.18	0.03 / 0.05	0.02 / 0.10

に注目してさらに細かく分けた場合は、大起伏砂丘を伴う低位段丘においては、旧非砂漠化地域の方がはるかに値が大きく、0.40 というその裸地率は、大起伏砂丘のそれと等しく、全てのカテゴリ中で最大である。

つぎに砂丘、低位段丘、氾濫原について、土壌タイプごとの考察をおこなった。奈曼旗の土壌は、南部に分布する成帯性土壌の栗色土や肉桂色土と、北部の湖沼堆積物起源の風積砂土、ならびに良好な水条件の下で発達した成帯内性土壌である湿草地土がおもなものであるが、このうち栗色土と肉桂色土の分布域では砂丘再活動はほとんど起こらない。そこで、ここでは風積砂土と湿草地土に注目して砂丘再活動のようすを調べた(表 3-5)。その結果、砂丘—風積砂土の組み合わせでもっとも裸地率が高く、続いて砂丘—湿草地土、低位段丘—風積砂土の組み合わせがほぼ同じ値で続いた。以下、地形では砂丘 > 低位段丘 > 氾濫原、土壌では風積砂土 > 湿草地土という明確な値の差が得られた。

### (3) 考察

流動砂丘の拡大率に関しては、奈曼など7つの旗からなる哲里木盟においては空中写真の解析によれば1950年代末から1970年代末までに約2.7倍に増加したこと(Zhu *et al.* 1988)、クルチン砂地西部(奈曼旗は含まれない)では1935年から1985年までに砂地が2.3倍に拡大したこと(Takeuchi *et al.* 1995)などの報告があり、奈曼旗とその周辺の砂漠化地域が1930年代から1980年代に1.8倍程度増加したとする今回の推定結果は妥当性が高いといえる。

奈曼旗の砂漠化地域のほとんどが分布する同旗北部は、第四紀の湖沼堆積物によって、数mから最大数十mの厚い砂の層に覆われている(中国科学院南京土壤研究所1990など)が、その厚さは場所によって異なる。砂丘ならびに低位段丘といった地形カテ



图 3-21 奈曼旗内の郷の位置図

ゴリ内で砂丘の大きさによって裸地率が変化するのは、もちろん砂丘再活動の結果砂丘が大きく発達するという面もあるだろうが、もともと砂の厚さが大きいところほど起伏が大きくなりやすく、裸地化もそのようなところでより進む、という面も考えられる。

湿草地土の形成には、①湿草地草本類植被が成長し土壤有機物の集積がおこること、②地下水が比較的浅く土層下部が地下水の浸潤を直接受けること、が必要である(中国科学院南京土壤研究所 1990)が、このような条件は奈曼旗では川沿いの低地に集中している。つまり、湿草地土の分布は地形と密接に関わっている。その他の地域は、大きな人為的攪乱がなければ植被との相互作用でゆっくりと土壤生成作用が進み、半固定砂丘風積砂土を経て固定砂丘風積砂土へ、さらに成帯性の土壤へと変化していくはずであった。その過程でその時点の土地の容量を越える土地利用圧がかかれば再び裸地化することになるが、その際起伏が大きく水分条件が悪いところほど裸地化しやすく、また裸地化することによって地表が風の作用を受けやすくなり起伏が大きくなっていく。このようなことが、1980年代の砂漠化地域が起伏の大きな土地へ集中していること、その大半が風積砂土地域に集中していることの原因だと思われる。

また、大起伏砂丘を伴う低位段丘において非砂漠化地域のほうが裸地率が大きくなった原因は、1930年代以降に土地の容量をはるかにこえる利用圧が一度にかかったことだと考えられる。このカテゴリ最大の重度砂漠化地域は、八仙筒という郷(郷は旗の下の行政単位、図 3-21)であるが、ここは農業地域に区分されている。この土地利用圧は放牧ではなく農地拡大によるものであった可能性もある。

奈曼旗北部においては、河川の両側に氾濫原—湿草地土の組み合わせによる肥沃な土地がひろがり、川から離れ比高が大きくなるにしたがって地形は氾濫原から低位段丘を経て砂丘へと、土壤は湿草地土から風積砂土へと変化し、生産のための条件が悪くなっていく。つまり、土地利用は川を中心に考え、概念的には川と平行なラインで区切られるように配置するのが望ましいと思われた。

## 2-3 短期変動(20年スケール)

### (1) 手法

20年スケールのモニタリングは、衛星画像から計算された植生指数を用いておこなった。ここで用いた衛星画像はアメリカ航空宇宙局(NASA)が打ち上げた Landsat 衛星の Multispectral Scanner(MSS)によるものである。画像の選択に際しては植生被覆の観測に

表 3-6 解析に用いた衛星画像の観測年月日

1975.09.06
1979.09.21
1981.09.10
1983.08.24
1984.09.03
1985.09.06
1986.09.09
1992.08.24
1993.08.27
1994.08.30

適切な時期のうち、ほぼおなじ時期でもっとも多くの年次が取得可能な時期を選んだ(雲量の多いものはカウントせず)。その結果、解析には、表 3-6 に示されたような年月日に観測されたデータが用いられた。データは幾何補正の後、絶対輝度へ変換し、さらに Transformed Soil Adjusted Vegetation Index (TSAVI) をもとめて植生指数とした。TSAVI は、土壤自体の反射(の時間・空間変化)による影響を取り除くのに十分な数の変数をもっている (Baret & Guyot 1991, Qi *et al.* 1994)。算出式は下記のとおりである。

$$TSAVI = a(NIR - aR - b) / \{aNIR + R - ab + X(1 + a^2)\} \quad (3-1)$$

ここで NIR, R は、それぞれ近赤外、可視域赤色の輝度、a と b はそれぞれ soil line(土壤の反射を示す)の傾きと NIR 軸切片である。Soil line は可視域を横軸、近赤外をたて軸にしたとき、サンプルの分布の集中する領域を示す三角形のうち左下から右上にのびる直線である(図 3-22)。X は植生量の実測データが十分ある場合は、もっとも適した値を代入するが、ここでは Baret & Guyot (1991)が用いた X=0.08 をそのまま用いた。TSAVI は裸地の場合は0となり、高密度な樹林に覆われている場合は0.7に近づく(Baret & Guyot 1991, 図 3-23, 3-24)。

TSAVI を用いて砂漠化モニタリングをおこなうため、中国科学院沙漠研究所(1984)による砂漠化類型図のカテゴリと TSAVI の値を対応させて閾値を定めた。図 3-25a に、砂漠化類型図の元になったデータが得られた時期に近い 1981 年の画像における TSAVI の値の分布スペクトルを示す。4 つのカーブは、それぞれ砂漠化類型図中の重度砂漠化地域(裸地面積率 50-100%)、強度砂漠化進行地域(同 25-50%)、砂漠化進行地域(同 5-25%)、非砂漠化地域の分布スペクトルを示している。以下の解析では、TSAVI が 0 以上 0.12 未満の地域を重度砂漠化地域、0.12 以上 0.17 未満の地域を強度砂漠化進行地域、0.17 以上 0.24 未満の地域を砂漠化進行地域、0.24 以上の地域を非砂漠化地域とした。

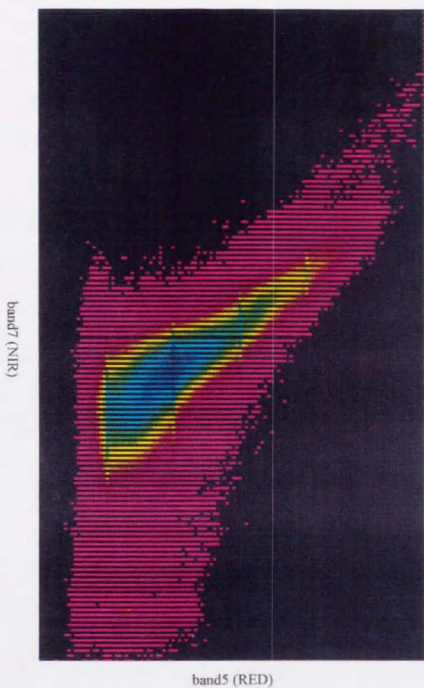


図 3-22 Landsat/MSSのband5とband7の輝度の関係の例  
 色の違いは分布の頻度の違いをあらわし、  
 頻度は青>水色>緑>黄色>赤>紫>黒=0



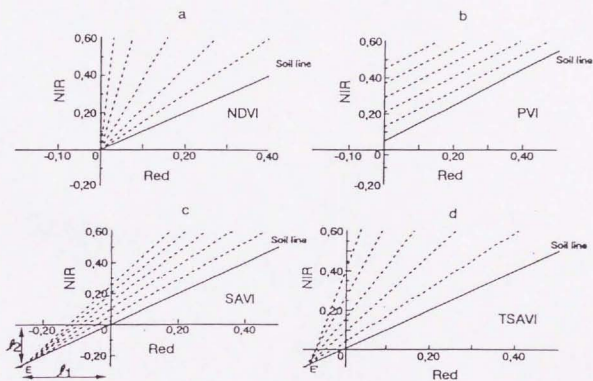


図 3-23 さまざまな植生指数における等植生量線の位置 (Qi et al. 1994 より転載)

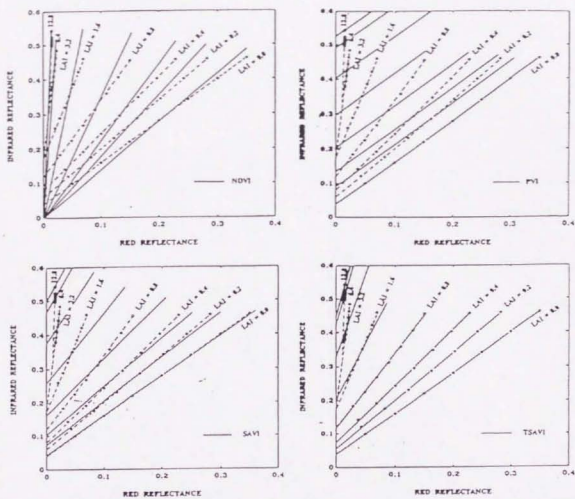


図 3-24 さまざまな植生指数と LAI (葉面積指数) の対応 (Baret & Gyotot 1991 より転載)

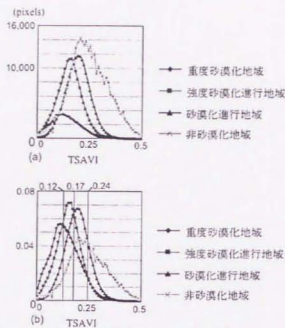


図 3-25 砂漠化類型図と1981年のLandsat/MSSの画像から計算されたTSAVIの対応  
 (a) 元データ  
 (b) 比率の分布  
 凡例は中国科学院沙漠研究所(1984)にもとづく

これらの閾値は、各カテゴリの頻度分布を正規化した場合に、ある TSAVI に対応する正規化頻度が4つのカテゴリ中最大になるものをその TSAVI に対応するカテゴリとすることで決定した(図 3-25b)。このように決定された TSAVI、および砂漠化地域の土地環境区分ごとの変動を以下に報告する。なお、本研究では砂漠化地域の広がり进行评估する際、指標として TSAVI の平均値、重度砂漠化地域面積率および裸地率を用いた。裸地率は、裸地面積を全面積で除したものであり、裸地面積は砂漠化類型図中の各カテゴリの裸地面積率の中間値を用いて  $0.75 \times \text{重度砂漠化地域} + 0.375 \times \text{強度砂漠化進行地域} + 0.15 \times \text{砂漠化進行地域}$  で計算した。

なお、以下では各土地環境区の名称は「低位段丘—風積砂土域」のように～域と記し、地形的もしくは土壌的特徴を共有する土地環境区分の集合を「低位段丘地域」(図 3-12 の 1a, 1b, 1c の総称)「風積砂土域」(同じく 1b, 4b, 5b の総称)のように～地域と記す。

## (2) 結果

土地環境区ごとの 10 年間の平均値を比べると、大起伏砂丘—風積砂土域において TSAVI の平均値が 0.138 ともともと小さく、ついでその他の風積砂土域など

で 0.20 弱と小さかった。逆に TSAVI の平均値が大きかったのは、黄土台地地域あるいは湿草地土地域で、値は 0.24 から 0.25 であった。また、裸地率や重度砂漠化面積率でみても、大起伏砂丘—風積砂土域がひととき大きな値をとり、ついでその他の風積砂土域で大きな値となった。その他では、低位段丘—塩類土域や氾濫原—肉桂色土域などで大きな値となった(表 3-7)。

つぎに、1970 年代から 1990 年代までの砂漠化の進行をみるため、1993 年(1994 年は雲の影響が大きいカテゴリがあるため)の値と 1975 年の値の差を算出した。その結果 TSAVI、重度砂漠化面積率、裸地率のいずれの指標をとっても、風積砂土域と低位段丘地域で砂漠化の進行が顕著だった。一方、その他の地域では今回用いた指標からみるかぎり、顕著な砂漠化の進行はみられなかった。また、砂漠化の度合いが比較的小さい砂漠化進行地域の面積率は、軒並み低下しているが、逆に重度砂漠化地域の面積率はほとんどの土地環境区で増大しているという特徴もみられる(表 3-8)。つぎに、土地環境区ごとの年次変動をみた(図 3-26a,b)。1979 年および 1994 年は南部の一部地域に雲がかかっており、また 1986 年は小起伏砂丘—風積砂土域が雲に覆われている。これらでは実際よりも裸地率が大きく評価されているため、そうしたデータのあつかいには注意が必要である。裸地率の変動を概観すると、ほとんどの区分において、1981 年までは細かく振動するが、1983-84 年にはピークをむかえ、その後 1986 年に極小となる。1990 年代に入ってから、1992 年が最大で、1993-94 年は漸減という結果になっている(雲がかかっている地域は除く)。土地環境区ごとにみると、大起伏砂丘—風積砂土域をはじめ風積砂土域や肉桂色土地域で比較的年ごとの変動が大きく、湿草地土地域や黄土台地地域では変動が比較的小さかった。なお、小起伏砂丘—風積砂土域では大規模な開発が原因となって、1990 年代の裸地率の大幅な減少がひきおこされた。

### (3) 考察

ここで用いた手法は、地表の反射率を用いるため、砂丘再活動にともなう植生の後退をモニタリングするのにとくに適している。そのため各指標をみると北部の砂漠化が南部のそれに比べて著しく進んでいるようにみえるが、実際には南部では水食による別のタイプの砂漠化が進んでいることが蘭州沙漠研究所などから報告されている。水食による土地荒廃を効果的に把握するためにはさらなる工夫が必要である

表 3-7 各土地環境区における10カ年の指標の平均値

土地環境区	平均[SAVI]	軽度砂漠化地域率(%)	中度砂漠化地域率(%)	砂漠化進行地域率(%)	非砂漠化地域率(%)	裸地率(%)
低位段丘-灌草地土壌	0.243	14.8	12.6	21.1	51.5	18.9
低位段丘-礫積砂土壌	0.197	22.4	18.3	26.1	33.2	27.6
低位段丘-塩類土壌	0.204	23.7	14.0	18.1	44.2	25.7
丘陵地-栗色土型礫積砂土壌	0.211	13.0	17.9	33.8	35.4	21.5
丘陵地-栗色土壌	0.207	12.5	18.5	32.6	36.4	21.2
丘陵地-肉桂色土壌	0.209	16.1	18.5	28.6	36.7	23.3
黄土地-栗色土型礫積砂土壌	0.258	6.4	10.1	26.1	57.4	12.5
黄土地-栗色土壌	0.246	9.2	12.3	27.1	51.4	15.6
大起伏砂丘地-礫積砂土壌	0.138	41.5	22.4	22.0	14.0	42.9
小起伏砂丘地-礫積砂土壌	0.193	17.4	23.3	31.0	28.3	26.4
沼澤原-礫積砂土壌	0.236	15.0	11.5	20.0	53.5	18.6
沼澤原-礫積砂土壌	0.193	18.7	15.9	24.0	41.5	23.5
沼澤原-栗色土壌	0.199	11.1	18.5	33.2	37.3	20.2
沼澤原-肉桂色土壌	0.198	18.4	17.8	27.4	36.4	24.6

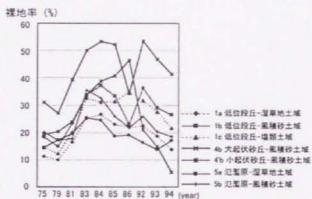
表中、重度砂漠化地域面積率、強度砂漠化地域面積率、砂漠化進行地域面積率は図4のように[SAVI]の分布から決められた。また、裸地率は $0.75 \times$ 重度砂漠化地域面積率 $+0.375 \times$ 強度砂漠化地域面積率 $+0.15 \times$ 砂漠化進行地域面積率で計算された。

表 3-8 各土地環境区における指標の1975年の値から1993年の値への変化  
(正の値は増加、負の値は減少したことを示す)

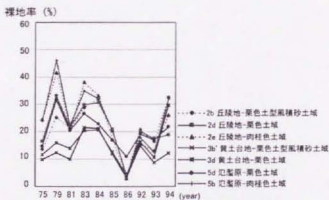
土地環境区	平均[SAVI]	軽度砂漠化地域率(%)	中度砂漠化地域率(%)	砂漠化進行地域率(%)	非砂漠化地域率(%)	裸地率(%)
低位段丘-灌草地土壌	-0.003	9.1	3.5	-4.8	-7.7	7.4
低位段丘-礫積砂土壌	-0.015	14.4	3.5	-10.2	-7.7	10.6
低位段丘-塩類土壌	-0.053	14.6	4.9	2.0	-21.4	13.1
丘陵地-栗色土型礫積砂土壌	0.039	6.9	1.7	-19.6	11.1	2.8
丘陵地-栗色土壌	0.061	6.0	-1.1	-20.0	15.1	1.1
丘陵地-肉桂色土壌	0.074	-4.4	-13.4	-20.0	37.8	-11.3
黄土地-栗色土型礫積砂土壌	0.057	2.2	-0.4	-17.9	16.0	-1.2
黄土地-栗色土壌	0.041	2.1	-0.2	-15.9	14.1	-0.9
大起伏砂丘地-礫積砂土壌	-0.042	26.4	-3.8	-17.4	-5.1	15.7
小起伏砂丘地-礫積砂土壌	0.037	0.5	-4.6	-19.6	23.6	-4.3
沼澤原-礫積砂土壌	0.017	0.3	0.2	-6.5	6.1	-0.7
沼澤原-礫積砂土壌	-0.012	1.6	0.8	-8.7	6.3	0.2
沼澤原-栗色土壌	0.003	-4.1	5.3	-18.4	8.9	2.3
沼澤原-肉桂色土壌	0.113	-6.9	-9.3	-17.4	33.7	-11.3

重度砂漠化地域面積率、強度砂漠化地域面積率、砂漠化進行地域面積率は図4のように[SAVI]の分布から決められた。また、裸地率は $0.75 \times$ 重度砂漠化地域面積率 $+0.375 \times$ 強度砂漠化地域面積率 $+0.15 \times$ 砂漠化進行地域面積率で計算された。

表中の値はそれらについて1994年の値から1975年の値を減じたものである。



(a) おもに北部に分布する土地環境区の裸地率の変動



(b) おもに南部に分布する土地環境区の裸地率の変動

図 3-26 各土地環境区の裸地率の経年変化

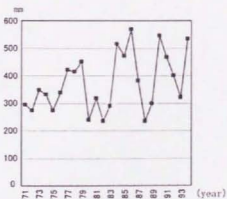


図 3-27 奈曼旗の年降水量の変化  
(データは中国科学院蘭州沙漠研究所による)

ことが示唆されている。北部では湿草地地域と風積砂土地域の差、あるいは氾濫原地域、低位段丘地域、砂丘地域の差がそれぞれ顕著であり、それらの組み合わせとして土地条件による砂漠化の度合いの違いを整理することができる。一方南部では黄土台地地域では砂漠化の被害が小さく、他の地形域と大きく異なる。肉桂色土地域は、栗色土地域と比べて有機物を多く含んでいるのにも関わらず植生が疎であった。これは、水食による土壌荒廃がとくにこの地域で進んでいることを示唆する。

とくに北部の土地環境区ごとの砂漠化面積の年次変化のようす(図 3-26a)はこの間の降水量の変化(図 3-27)と対応させて論ずることができる。すなわち、1975年から79年までの比較的降水量が多い時期のあと、80年から83年までは非常に降水量が少なかった。これを受けてどの土地環境区でもこの間に裸地面積が増加している。その後84年から86年までは再び降水量の多い時期となり、裸地率も低下するが、70年代の水準までは回復していない。さらに90年代は比較的雨の多い年が続いており、それに伴って裸地率も徐々に低下した。土地環境区分ごとにもみると、一般に裸地率の大きい土地環境区ほど年ごとの差が大きく、その結果乾燥期では湿潤期に比べて土地環境区ごとの裸地率の差が大きくなる。また、大起伏砂丘—風積砂土域と低位段丘—風積砂土域は値は異なるが年変動の傾向は非常に似かよっている。その他でも、年変動の傾向は土壌区分に、値の大きさ(定数項)は地形区分により大きく依存することが示唆された。

これに対し南部では(図 3-26b)、各土地環境区とも年変動のようすが似かよっていた。土地環境区ごとでは、肉桂色土地域では栗色土地域に比べて裸地率が高かった。

また、ここでは土地利用圧に関する定量的考察をおこなっていないため、本研究の結果がそのまま生物生産に対する土地のポテンシャルを表している訳ではない。しかし、経済に関する統計資料や現地調査の結果から、本研究で植被がより豊かであると結論された土地環境区が、そうでない土地環境区に比べて土地利用圧が低かったとは考えにくく、むしろ逆により高い土地利用圧をうけてきたと考えられる。そのため、土地環境区ごとのポテンシャルは、順序は基本的に本研究の結果のとおりであり、それぞれの差は本研究の結果よりさらに大きいことが予想される。

## 2-4 季節変動

### (1) 解析に用いたデータ

季節変動もまた、衛星画像を用いてモニタリングした。衛星画像データは NOAA, USGS, NASA などの合同による Global Land 1-KM AVHRR Project 作成の Global AVHRR 10-day composite data を用いた。これは毎日 NOAA 衛星から送られてくるデータの、各月上旬・中旬・下旬について最大値をとることによって雲などの影響を極力取り除いたものとなっている。このデータはインターネット上のサイト <http://edcwww.cr.usgs.gov/1KM/> で取得できる。このサイトでは 1992 年 4-12 月, 93 年 4-9 月, 95 年 2-9 月, 96 年 1-3 月の各月上旬・中旬・下旬について、band 1-5 に加えて NDVI (正規化差植生指数) が配布されている。本研究ではこの NDVI を用いた。

ここでは、奈曼旗の砂丘再活動に注目するため、おもに北部について解析をおこなった。まず、地形分類を用いて奈曼旗北部を 3 つの地域に区分した。それらは川に近い方から氾濫原、低位段丘、砂丘地である。Gtopo30 から得た標高のデータ (図 3-15) を見ればわかるように、この“砂丘地”は南西部からのびる尾根状地形の一部である。また、土壤図にあるように、奈曼旗北部は基本的には風積砂土が分布しており、川沿いの水条件のよいところにだけ湿草地土が発達している。これらから、ここで用いた地形分類が、この地域の基本的な土地条件の基本的な相違を表現できていると考える。

つぎにこれらについてそれぞれ NOAA/AVHRR のデータから計算された NDVI の値 (10 日ごとの最大値) の平均値を計算した。また各地形区分について期間中の NDVI の積算値を計算した。

### (2) 結果

NDVI の変動は 92, 93, 95 年の各年とも、ほぼ同じような変動をみせ (図 3-28a,b,c), 4 月から 6 月末まではゆっくりと増大し、それ以降降水量の増加とともに急激に大きくなる。その後 8 月の中旬・下旬ではいったん値を下げ、ふたたび 9 月上旬にピークを迎えた後徐々に低下する。地形区分別では、氾濫原の NDVI が 3 カ年の平均が 5.8 ともっとも大きく、低位段丘 (5.6) でつづき、砂丘地 (4.8) の値がもっとも小さい。また低位段丘では 3 年とも、5 月中旬頃までは砂丘地の値を下回っていたが、それ以降は 9 月末まで砂丘地の値を上回った。

4-9 月の NDVI の積算値 (図 3-29) は、低位段丘と砂丘地では 93 年がもっとも大きく、



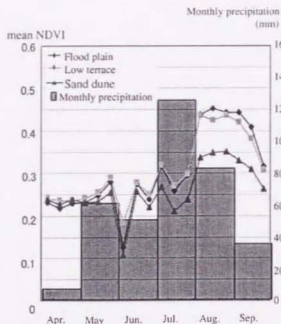


图 3-28a 季节性 NDVI 变化及每月降水量在 1992 年奈曼县各土地形式

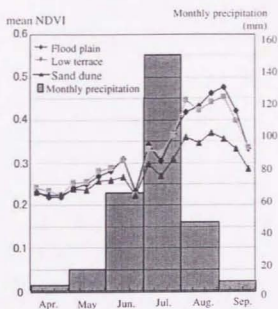


图 3-28b 季节性 NDVI 变化及每月降水量在 1993 年奈曼县各土地形式

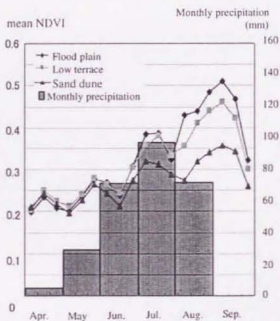


图 3-28c 季节性 NDVI 变化及每月降水量在 1995 年奈曼县各土地形式

(There is no available data of monthly precipitation in Sep.)

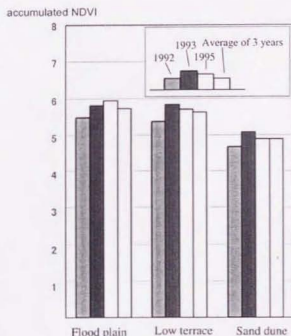


图 3-29 各年份各土地形式 NDVI 的累积值

ついで95年、92年の順になったが、氾濫原では95、93、92年の順になった。各年の降水量は92年400.6mm、93年319.8mm、95年は8月までで293.2mmであり、年降水量とは明確な相関がなかった。

### (3) 考察

季節変動のモニタリング結果から、川からの比高によって分けられた地形区分ごとに、植被の変化が特徴を持つことがわかった。また、現地機関の土壌調査結果から、土壌の分布も地形からかなりの程度説明されると思われる。つまり、奈曼旗北部においては地形が土地条件を規定する大きな要因であり、基本的に風積砂土土壌に覆われた同地域で、川沿いの水条件のよいところのみ湿草地土が発達したといえる。図3-28a,b,cにみられる氾濫原の顕著な植被の豊かさはこの湿草地土に負うところが大きであろう。また、奈曼旗において中国科学院沙漠研究所(1984)が砂漠化程度の調査をおこなっているが、その際報告された砂漠化程度の分布は地形区分ごとにかたよりがみられ、本研究では顕著な差がでなかった氾濫原と低位段丘についても被害程度には顕著な差がみられる。

以上から、土地荒廃を抑えるための持続可能な土地利用を考えるためには、地形条件を考える必要があると結論できる。おおまかには川からの高度差が大きくなるにつれて土地利用圧が小さくなるようにし、さらにミクロなスケールでは微地形の他、地下水深度や土壌の細かな分類などを考慮するべきであろう。

また、降水量と植被の関係では、年降水量とNDVIの積算値には明確な相関はなかった。1年のみの降水量ではなく複数年の積み重ねが効いている可能性があるので、さらなる考察が必要であろう。

## 第3節 砂漠化モデルとその応用

### 3-1 奈曼砂漠化モデルの構築

#### (1) 自然的要因の考慮

本節では、前節でおこなわれたモニタリングの結果のうち、短期スケールのもを用いて砂漠化モデルを構築した。まず、自然的要因について考慮する。自然条件としては土地条件と気候条件がある。土地条件としては地形、土壌、地下水位を用いておこなった土地環境区(図3-16)を単位として見ていくことで考慮した。気候条件としてはモニタリングの際、裸地面積の変動に影響与え

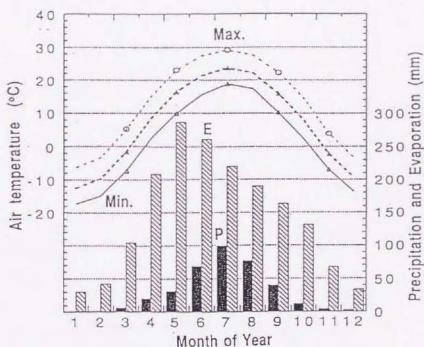


図 3-30 奈曼の気温、降水量、蒸発量の年変化 (1979-1988 年平均)  
(根本ら 1995 より転載)

ることが示唆された降水量をまず考慮した。さまざまな期間の降水量(表 3-9 参照)、時間に比例する項、増加率一定の項を説明変数の候補、初秋の裸地面積率が被説明変数としてステップワイズ重回帰分析により変数とその係数を決定した。その際の各ステップの閾値は  $F=4.0$  であり、 $F$  の値がそれ以下の場合は次のステップには進まないこととした。 $F$  値は変数の説明力に比例するとされる値である。なお、ステップ数が 3 をこえるものについては 3 番目のステップで打ち切った。多くの土地環境区では正の係数をもつ項として夏季の降水量、負の係数をもつ項として春季の降水量が因数として採用された(表 3-10)。その際相関係数が極めて高かった(ほとんどで  $R^2 > 0.7$ )ことから、この地域の裸地面積変動においては降水量が支配的な気候条件だと考えられたため、これを自然条件モジュールとした。

このようにして求められた被説明変数とその係数、統計的有意性について表 3-10 に示す。基本的にはどの土地環境区でも、夏季の降水量が多いほど秋口の裸地面積が小さくなり、春季の降水量が多いほど秋口の裸地面積が増大するという結果が得られた。このことを説明する実証的な材料はないが、つぎの 2 点はこの現象の要因に関係している可能性がある。まず、この地域の蒸発散量の月変化(図 3-30)をみると、5 月がもっとも大きいということ。さらに、植物のある地域では毎年の乾燥季に流砂地区に比べて砂層が非常に乾燥する

表 3-9 ステップワイズ重回帰で変数の候補に含まれた降水期間

年	月	記号	年	月	記号
当年	3月	mar0	長期*	当年	total0
当年	4月	apr0	長期*	前年	total1
当年	5月	may0	長期*	2年間	two
当年	6月	jun0	長期*	3年間	three
当年	7月	jul0	長期*	5年間	five
当年	8月	aug0	長期*	10年間	ten
当年	9月	sep0	長期*	15年間	fteen
当年	春 (3-5月)	spr0			
当年	夏 (6-8月)	sum0			
前年	夏 (6-8月)	sum1			
前年	秋 (9-11月)	aut1			
前年	冬 (12-当年2月)	win1			
前年+当年	春 (3-5月)	spr2			
前年+当年	夏 (6-8月)	sum2			

すべて、平均値との比を入力した。

\*9月から翌年8月までを基準とした年間降水量

たとえば、当年は前年9月から当年8月までの降水量をさす

表 3-10 ステップワイズ法で決定された重回帰式

地形タイプ <sup>1)</sup>	土壌タイプ <sup>2)</sup>	地下水位	回帰式	第1項F値	第2項F値	第3項F値	R <sup>2</sup>	P値	自由度
1	a	3m-	0.246spr2-0.309sum2-0.235	17.4**	12.4**	12.6**	0.829	0.0021	9
1	b	3m-	0.288spr2-0.274sum2+0.280	14.1**	5.71*	10.5*	0.761	0.0066	9
4	b	0-3m	0.452spr2-0.126spr0+0.181	41.9**	19.0**	13.3**	0.864	0.0009	9
1	a	0-3m	0.186spr2-0.051may0+0.099	20.6**	18.4**	9.93*	0.817	0.0026	9
1	b	0-3m	0.254spr2-0.039may0+0.104	21.1**	5.93*	5.93*	0.766	0.0062	9
1	c	-----	0.254	82.6**	-----	-----	0	-----	9
2	b'	-----	0.008t-0.194jul0+0.297	7.61*	34.1**	79.7**	0.872	0.0058	7
2	d	-----	0.006t-0.194jul0+0.315	9.54*	62.0**	162**	0.926	0.0015	7
2	e	-----	0.026apr0-0.162jul0+0.324	41.4**	118**	307**	0.988	<0.001	7
3	b'	-----	0.041apr0+0.050spr0+0.061	47.6**	7.24*	1.65	0.895	0.0011	7
3	d	-----	0.014apr0+0.050spr0+0.061	5.74*	8.99*	11.2*	0.849	0.0034	8
4	b	3m-	0.302spr2+0.210	11.1**	9.00*	-----	0.581	0.0104	9
4'	b	-----	0.100aug0-0.680five-0.802	8.81*	20.2**	29.3**	0.812	0.067	8
5	a	-----	0.121spr2-0.053may0+0.163	7.04*	15.8**	21.6**	0.728	0.0104	9
5	b	-----	0.033apr0+0.197	12.3**	115**	-----	0.605	0.0081	9
5	d	-----	0.014apr0+0.046spr0+0.115	8.79*	12.2**	66.5**	0.908	0.0026	7
5	e	-----	0.018apr0-0.156jul0+0.332	19.0**	99.3**	289**	0.983	<0.001	7

1) 1: 低位段丘, 2: 丘陵地, 3: 黄土地, 4: 大起伏砂丘地, 4': 小起伏砂丘地, 5: 氈原

2) a: 湿草地土, b: 風積砂土, b': 栗色土型風積砂土, c: 塩類土, d: 栗色土, e: 樹皮土

\*: 5%水準有意

\*\* : 1%水準有意

という報告がある(中国科学院南京土壤研究所 1983)。砂丘地の表層付近の水分量は植物がないときには十分な量が保持されているが、植物が生育することで蒸発散量が急激に増し、土壌水分量が急減し、甚だしい場合には広い範囲にわたって乾燥・枯死する(中国科学院南京土壤研究所 1983)。

重回帰分析の結果は、もっとも蒸発散量の多い5月以前と以後の降水量が植物の生長に逆の影響を与えるということを示している。これらから春季の降水によって芽吹いたものが、土壌中の水分を奪った上で、一旦5月に淘汰され、その後6月以降は蒸散量が下がり、同時期の降雨によって植物は生長していくという仮説を立てることができる。

## (2) 社会的要因の考慮

社会条件モジュールは、モニタリングの際に放牧地域の砂漠化進行と農業地域の回復という顕著な結果を得たため、それを考慮した。定式化の際の単位は旗の下部の行政組織である郷を用いた。放牧地域における砂漠化の進行は、砂質土壌の表面の植被に過度の放牧圧がかげられたために裸地が露出したと考えられるため、社会経済条件として1975年から1994年までの放牧圧の変化を考慮した。なお、ここで風積砂土土壌地域の面積率も同時に考慮した。ここで放牧圧の変化は、単位面積あたりではなく単位牧養力あたりで計算した。これによって家畜数の上昇がひどい場合は条件の悪い地域ほど土地へ与えるインパクトの上昇が大きいということを考慮できる。単位面積あたりの牧養力は、現地の土地分類基準および土壌に関する資料、ならびに既往の土地生産力分類図を用いて推定した。ここで郷ごとの耕地面積を、面積あたり生産力の大きい土地へ優先的に配分し、残った土地が放牧地になると仮定した。また、家畜数は近似羊単位をもちいてスカラ量におおした。つぎに農業地域、とくに鉄道や幹線道路に近い地域で人間による砂漠化防止対策の効果が顕著に見られたためこれを考慮する項を導入し、社会基盤項となづけた。各郷について単位牧養力あたりの放牧圧変化、風積砂土土壌面積率および社会基盤項を説明変数、1975-94年までの単位面積あたり裸地増加を被説明変数として一本の重回帰式を決定し、社会条件モジュールとした。

すでにみてきたように1978年の3中総会以降、生産請負制が導入され、それ以後中国経済は急激な発展を遂げた。ここで取りあげた1975年から1994

年までの土地被覆の変化は、この未曾有の経済発展の時期とほぼ重なっている。しかし、耕作地面積や家畜数(羊単位)でみると、この間の変動はさほど多くない(図 3-4,3-5,3-6)。この時期の奈曼旗住民の急速な所得拡大の大部分は、他の多くの中国農村と同じく、郷鎮企業の発展によってもたらされたと考えられ、土地利用圧が高まったことがおこな原因ではない。

また、この地域は過放牧による砂漠化が問題になっている地域である。これは、農地が氾濫原地形の地域や湿草地土壌の地域に集中し、砂丘再活動による砂漠化の進行のおこな出現地域である風積砂土壌地域においては、放牧がおこな土地利用であることが直接的な原因であると思われる。不適地での耕作の試みが失敗に終わり、放棄された後そこが裸地化するという現象もみられるが、過放牧による裸地化とくらべて例は少ないとされている。このような理由で、社会的条件として放牧圧を考慮した。

まず、つぎのように牧養率を定義した。

$$\text{牧養率} = (\text{有効家畜数}) / (\text{牧養力}) \quad (3-2)$$

ただしここで有効家畜数は、 $5 \times (\text{大家畜の数}) + 1 \times (\text{小家畜の数})$ で計算される。大家畜とは牛、馬、ロバ、ラバ、ラクダをさし、小家畜とは綿羊、ヤギである。中国で通常放牧圧を計算する際に用いる羊単位は、ロバが4、ヤギが0.9羊単位であり、ここでもこの値を用いるのが理想的であるが、奈曼旗統計局(1968-75,76,80,82-87,93-95)の資料では大家畜の数と小家畜の数とに統合されて書かれており、ここでの有効家畜数で代用することとする。牧養力とは生産力の土地条件ごとの違いを考慮して重み付けして和をとったものである。各土地条件ごとの面積当たり牧養力は以下の文献を参考に求められた。大黒(1997)は、奈曼旗の低位段丘—風積砂土壌に含まれる地域において精密な放牧実験をおこない、以下の値を得た。実験地においては6頭/haという放牧圧は2年が限界であり、持続的な利用を考える際の放牧圧は、平坦部では4頭/ha、小丘部では2~3頭/haにすべきであるとした。適正放牧圧であるとされた4頭/haの試験区では、綿羊一頭あたり200-300kg/頭・年の牧草の消費があった(大黒 1997)。劉ら(1996)によれば、奈曼旗を含む哲里木盟の分類

表 3-11 哲里木盟\*土地分級と評価 (劉ら 1996 より転載)

分級	面積 (万 hm <sup>2</sup> )	占总面积 (%)	土 壤 類 型	有機質含量 (%)	用 途	産 量 (kg/hm <sup>2</sup> )
1	30.0	5.1	草甸土	2以上	農 田	9 000
2	101.3	17.4	栗鈣土、栗鈣土	1.5以上	农林牧	3 000—4 500
3	70.5	12.1	栗鈣土、草甸土、沼澤土	1左右	农林牧	2 250—3 000
4	79.8	13.7	栗鈣土、草甸土	1左右	林 牧	1 500—2 250
5	138.0	23.7	褐土、風砂土	1以下	林 牧	750—1 500
6	104.6	17.9	風砂土	1以下	林 牧	750—1 500
7	12.6	2.1	粗骨土、新積土	1以下	林 地	4 750
8	34.7	6	風砂土、鹽碱土等	0.1—1.0	雑利用	0 或 300—500

産量は作物もしくは植物生産量

\* 哲里木盟は奈曼旗など8つの旗を含む上位の行政区分

と生産力評価として表 3-11 のようなものももちいられる。また, Shirato *et al.* (1998)による, 有機質含量, 有効窒素濃度, 有効カリウム濃度などを用いた奈曼旗の土地生産力分布図を用いて土壤分類ごとの土壤による牧養力を決定した。現地機関の土壤調査から各土壌タイプごとの有機質含量などの代表値が得られるため, 表に当てはめて, ①湿草地土のうち有機質含量が2%以上のものは表 3-11 中のタイプ1に対応させ, 生産力 9000kg/ha とする。②肉桂色土はタイプ5に対応させる。生産力は750-1500kg/ha とあるが, 中間値をとって1125kg/ha とする。③風積砂土は, 流動風砂土がタイプ8に, その他がタイプ5 または 6 に分類されると考える。生産力は流動風砂土について300kg/ha, その他については褐土と同じく1125kg/ha とする。④有機質含量が1.5%以上の栗色土は奈曼旗にはみられないため, 全ての栗色土と湿草地土はタイプ3ないし4に分類される。この分類には面積率を考慮して, Shirato *et al.* (1998)によってもっとも生産力の大きいカテゴリに分類されたものをタイプ3に, それ以外をタイプ4にふりわけた。生産力はタイプ3のものを2625kg/ha, タイプ4のものを1875kg/ha とした。

これらの生産量は, 大黒(1997)による羊1頭あたりの採草量300kg/yearで除することにより, 牧養力がもとめられる。

なお, NOAA/AVHRRの衛星画像を用いて, 地形および地下水位による積

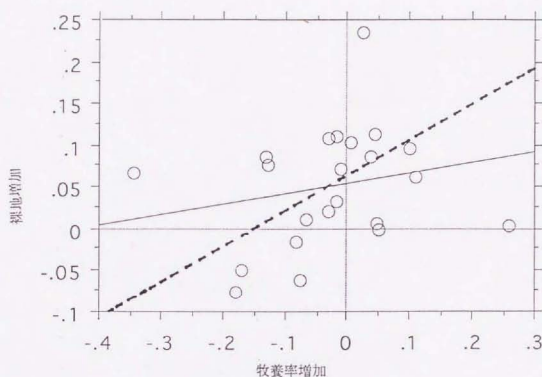


図 3-31 牧養率増加と裸地増加の関係

回帰直線は  $Y=0.054+0.124X$ ;  $R^2=0.046$

破線は例外的な値を示した 2つの郷を除いた場合の回帰直線

$Y=0.063+0.44X$ ;  $R^2=0.243$  (5%水準で有意)

算 NDVI の違いを調べた結果、地下水位 3m 以浅の地域では 3m 以深の地域とくらべて 1.1 倍の値となった。このことから、地下水位 3m 以深のものは 1.1 で除し、最終的な土地の単位面積当たり牧養力を決定した。つぎに 1994 年の牧養率から 1975 年の牧養率を減じた値を求め、牧養率増分とした。図 3-31 に牧養率増分と裸地増率の関係を示す。牧養率増分が最大の郷と最小の郷で他の郷とのズレが大きい。牧養率最大の郷は、近年になって成立したものであり名称も郷ではなく六号農場と呼ばれる。これは 1975 年の段階で牧養率 0.178 とその他の郷に比べて異常な小ささであった。1994 年の牧養率は 0.4 を越えているが 1975-94 年の平均だと 0.26 とかなり低い。一方牧養率増分最小の郷は、奈曼旗の西北部に位置し、氾濫原から砂丘まで急激に環境条件を変える。ここは 1986 年までは牧養率 0.25 前後であったのが 1992 年に 0.13



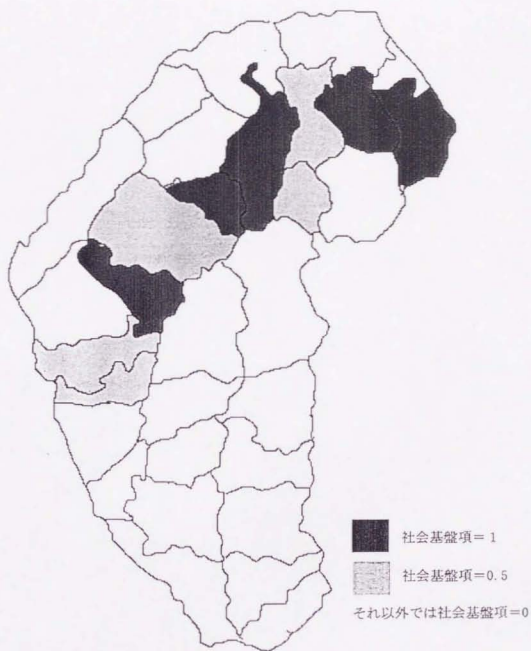


図 3-32 各都府の社会基盤項の値

と急激に下がっている。つまり数年間の放牧圧ではなくもう少し長いタームの放牧圧の変化が効いていることが示唆される。ここでは 20 年スケールのトレンドをもった牧養率の減少に焦点をあてることにし、これら 2 つの郷についてはその他の 20 郷から得られる回帰式に裸地増分を代入し、数式上の牧養率増分をもとめ、以下の解析に利用した。

その他に各郷の裸地面積の増加に関係の深そうなものとして、風積砂土の面積率と人為の回復を考慮した。風積砂土面積率は、社会的要因ではないが、郷ごとの裸地面積率を被説明変数として設定する以上、考慮せざるを得ない。奈曼旗北部の裸地の拡大は、基本的には風積砂土上の植被がはがれて砂が露出する、といったものが多いからである。人為による回復効果は、鉄道あるいは幹線道路のまわりで進んでいる。そこで街道に面しているか、を表す項を加えた。この項は、郷のほぼ中央を街道が通っているときには 1 を、端を通っている場合には 0.5 を、通っていないときには 0 となる。この数の分布を図 3-32 に示す。

これらの 3 項と定数項を用いて 20 年間の単位面積当たり裸地増加(裸地増率)は、式(3-3)であらわされた。

$$\begin{aligned} \text{裸地増率} \\ = 0.204 \times (\text{牧養率増分}) + 0.144 \times (\text{風積砂土面積率}) - 0.065h - 0.004 \end{aligned} \quad (3-3) (R^2=0.525, P=0.0066)$$

ただし  $h$  は街道沿いに位置するかどうかを表す項。街道が中央部をとる郷については 1、端をとる郷については 0.5、それ以外では 0 をとる関数。項ごとの  $P$  値は第 1 項から順に 0.257(牧養率増分項)、0.023(風積砂土面積率項)、0.060( $h$  項)、0.920(定数項)であった。

### (3) 統合

前二節の結果を統合し、砂漠化モデルを構築する。放牧圧を考慮に入れた前節の結果を用いるためには、モデルは 20 年間を基本的な時間単位として用いることになる。このモデルのフロー図を図 3-33 に示す。

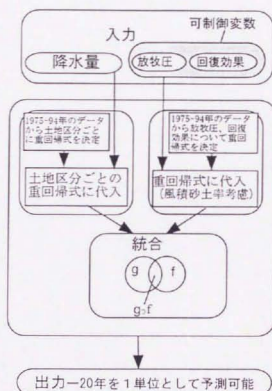


図 3-33 奈曼砂漠化モデルの概要

今、前々節の結果を、

$$bd = f(r) \quad (3-4)$$

(ただし、 $bd$  は裸地面積、 $r$  は降水量)とあわせ、前節の結果を、

$$\Delta bd / bd = g(d) \quad (3-5)$$

(ただし  $bd$  は裸地面積、 $d$  は牧養率増分)とする。(3-4)式と(3-5)式の積を取ると、

$$\Delta bd = f(r) \cdot g(d) \quad (3-6)$$

(3-4)式および(3-6)式の両辺について和をとると、(3-7)式が成り立つ。

$$bd + \Delta bd = f(r) \cdot (1 + g(d)) \quad (3-7)$$

ただし、ここで注意すべきことは  $f(r)$  は土地環境区ごと、 $g(d)$  は郷ごとに決まる、ということである。ここではつぎのように統合する。

ある郷  $p$  ( $p=1,2,\dots,22$ ) の社会的要因モジュールによる裸地増加率予測値が  $a_p$  であったとする。土地環境区  $q$  ( $q=1,2,\dots,17$ ) の自然的要因モジュールによる裸地面積率予測値が  $b_q$  であったとすると、郷  $p$  内の土地環境区  $q$  の裸地面積率の予測値  $c_{pq}$  をそれらの積の形であらわすことにする。このとき、考える土地環境区が風積砂土域か否かで係数を変える必要がある。いま、風積砂土域以外の社会モジュールの式を、

$$\text{裸地増率} = 0.204 \times (\text{牧養率増分}) - 0.065h - 0.004 \quad (3-8)$$

と仮定し、風積砂土域の式を

$$\text{裸地増率} = 0.204 \times (\text{牧養率増分}) + 0.144 \times X - 0.065h - 0.004 \quad (3-9)$$

とおいて式(3-3)、(3-8)、(3-9)から  $X$  を求めると、

$$X = (\beta_{p1} + \beta_{p2}) / \beta_1 \quad (3-10)$$

となる。ただし、 $\beta_{p1}$ 、 $\beta_{p2}$  はそれぞれ郷  $p$  内の風積砂土域、非風積砂土域の初期状態(裸地増加前)の裸地面積である。まとめると統合の際に社会モジュールの式は、以下のように変化させる必要がある。

$$a_p = 0.204 \times (\text{牧養率増分}) + 0.144 \times X - 0.065h - 0.004 \quad (3-11)$$

風積砂土域では  $X = (\beta_{p1} + \beta_{p2}) / \beta_{p1}$ 、非風積砂土域では  $X=0$ 、ただし  $\beta_{p1}$ 、 $\beta_{p2}$  は式(3-10)参照。

これによって式(3-7)から、奈曼旗北部の郷の数が 22、土地環境区分は 17 あることに注意して、以下のような積の形に統合できる。

$$c_{pq} = b_q(a_p + 1) \quad (p=1,2,\dots,22; q=1,2,\dots,17) \quad (3-12)$$

郷  $p$  内の土地環境区  $q$  の面積  $s_{pq}$  に  $c_{pq}$  を乗じたものが、郷  $p$  内の土地環境区  $q$  の予測裸地面積  $C_{pq}$  になる。ここで  $C_{pq} \leq 0$  なら  $C_{pq} = 0$ 、 $C_{pq} \geq s_{pq}$  なら  $C_{pq} = s_{pq}$  とする。

$$C_{pq} = s_{pq} c_{pq} \quad (\text{ただし } 0 \leq C_{pq} \leq s_{pq}) \quad (3-13)$$

これを用いて、郷  $p$  全体の裸地面積予測値  $A_p$ 、土地環境区  $q$  全体の裸地面積予測値  $B_q$ 、奈曼旗北部全体の裸地面積予測値  $C$  はそれぞれ、

$$A_p = \sum_{q=1}^{17} C_{pq} \quad (p=1,2,\dots,22) \quad (3-14)$$

$$B_q = \sum_{p=1}^{22} C_{pq} \quad (q=1,2,\dots,17) \quad (3-15)$$

$$C = \sum_{p=1}^{22} \sum_{q=1}^{17} C_{pq} \quad (3-16)$$

で表される。

### 3-2 モデルを用いた予測と計画

#### (1) 将来予測

(3-16)式を用いて将来予測をおこなった。まず、放牧圧が変わらないとし、降水量は全ての月において 1975 年から 1994 年までの平均値をとるとし、20 年後の奈曼旗北部の裸地面積がどのようになるかを予測した。モデルによる予測結果は奈曼旗北部全域で  $1604.8\text{km}^2$  となった。この値は、1994 年の値  $1548.5\text{km}^2$  より大きく、1993 年の値  $1732.0\text{km}^2$  より小さい。モニタリングの際に取りあげた 10 ヶ年の中では 5 番目と 6 番目の間にあたる平均的な面積にあ

たる。郷別では東明郷、浩特郷で94年比2倍以上と予測され、固日班花郷、章古台郷では約0.6倍と小さかった。また、夏季の降水量が1.2倍になると奈曼旗全体の裸地面積は1529.5km<sup>2</sup>、1.5倍になると1416.5km<sup>2</sup>へと減少することが予測された。反対に夏季の降水量が0.8倍、0.5倍になると裸地面積が1680.1km<sup>2</sup>、1793.1km<sup>2</sup>へと増大する(図3-34)。

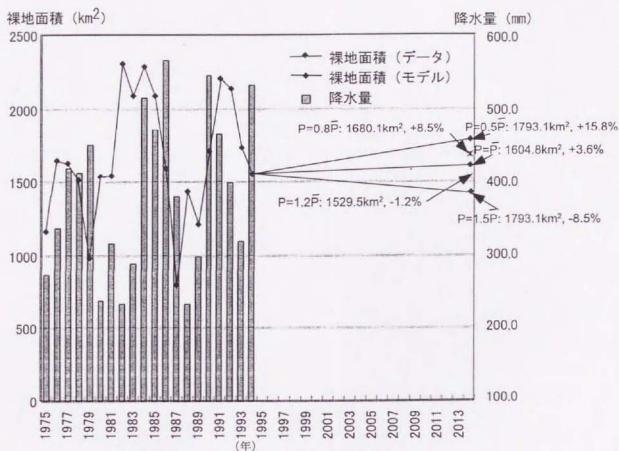


図 3-34 奈曼砂漠化モデルを用いた予測

夏季の降水量を平均から変化させた場合の裸地面積の予測値の違い。たとえば、 $P=P$ は平均と同じ降水量が、 $P=0.5P$ は平均の半分の降水量が続いた場合をさす。また、1994年以前のデータの無い年については自然条件モジュールのみを用いて内挿した。

折れ線が裸地面積、棒グラフが年降水量を示す。また、裸地面積については1994年からの増加率をパーセント表示した。

## (2) 土地利用の空間配置

つぎに土地利用の空間配分について調べる。土地条件によって裸地化しやすいところとそうでないところがある。つまり、裸地化しにくいところに土地利用を集中することで裸地化という点から見た土地荒廃を防ぐのが目的である。式(3-11)の決定の際は、同一郷で

は牧養率が一定であることを仮定したが、実際には単位面積あたりの牧養力が大きいところで放牧圧をあげた方が有効家畜圧の単位量増加あたりの土地への圧力の増加が小さくなる。

たとえば、風積砂土上の放牧圧を一律 10%減少させ、その分をより牧養力の高い地域に分散させた場合、牧養力に応じて分配すると、予測値は 1598.5km<sup>2</sup> となり、30%だと 1586.0km<sup>2</sup> になった。

### (3) 奈曼旗全体の計画

奈曼旗全体の家畜数(羊単位)はほぼ一定である(図 3-6)のに対し、1975 年から 1994 年までは、人為の回復によって裸地の増加がどうか抑えられているという状態であった。これから、奈曼旗全体の家畜数は、増加が見られないことは好ましいことであるが、それでも capacity より少し多めであることが示唆される。前項のように配分を最適にしたとしても、全体として capacity を越えていけばゆっくりと旗全体が砂漠化していくことになる。

このような現状を鑑み、石ら(1998)は家畜の一部を舎飼いにするというものを提案している。石ら(1998)は 2 つの村について飼料作物の量などを考慮した詳細な研究をおこない、舎飼いに転換可能な家畜数を算出し、北部の堯勒甸子村、南部の沙日塔拉村それぞれで現在 4.02su(羊単位)/ha、3.95su/ha である放牧圧が、作物茎葉を飼料として用いることで 2.85su/ha、3.69su/ha に、さらにトウモロコシとコウリヤンの穀実をももちいることで 0su/ha、2.25su/ha まで減らせるとした。ひとつひとつの村について同様の考察をおこなうのは不可能であるので、北部にある堯勒甸子村に合わせて①30%減(茎葉)、②65%減(穀実半分)、③100%減の場合について予測した。牧養率を一律 30%削減した場合は 1506.0km<sup>2</sup>、65%削減では 1391.2km<sup>2</sup>、100%削減では 1276.9km<sup>2</sup> という値が得られた。逆に放牧圧が増してしまった場合についても計算した。30%増、65%増、100%増では 1703.9km<sup>2</sup>、1820.0km<sup>2</sup>、1936.6km<sup>2</sup> という結果が得られた。

人為による回復効果が無いと仮定すると予測値は 26.5km<sup>2</sup> 大きくなって 1631.3km<sup>2</sup> となり、全ての郷で街道が中央を通る郷並みの効果があると仮定すると、予測値は 1533.5km<sup>2</sup> となる。

### 3-3 考察

本節で構築したモデル(以下奈曼砂漠化モデル)では、自然条件モジュールと社会条件モジュールに分け、それぞれ重回帰分析を用いて変数やその係数を決定した。それぞれの解析の際の単位は、自然条件モジュールでは地形、土壌、地下水位を考慮した土地環境区であり、社会条件モジュールでは郷という行政単位であった。ここで社会条件モジュールの中に風積砂土率という自然条件が入り込んでいる。これは、さまざまな自然条件が混在する郷においても、社会条件だけでは裸地率変動を説明しきれないことを示す。このことは、さまざまな社会条件が混在する各土地環境区において、降水量だけで裸地変動のほとんどを説明し切れてしまったことと対照的である。また、自然的要因モジュールが1年ごとに解析できたのに対し、社会条件モジュールでは20年を1単位とせざるを得なかった。これらから、本節で構築したモデルにおいては、社会的要因よりも、気候条件、土地条件を含む自然条件の方が精度良く考慮できたといえる。

自然条件モジュールではさまざまな時期の降水量との間で重回帰式を求めたが、その際秋口の裸地面積と当年春季の降水量との間に正の相関があり、当年夏季の降水量との間には負の相関があった。このことを説明するのに十分な材料は現時点ではあつまつていないため、本研究では仮説を述べるにとどめ、予測の際には春季の降水量を変化させての予測値の値は言及せず、夏季の降水量のみ変化させて予測をおこなった。

奈曼砂漠化モデルは、結果から重回帰で関係式を求める帰納型モデルであるため、構築の際に用いたデータの範囲内の変動は精度良く予測できても、そこから離れるような条件の下での精度は保証できない。したがって、たとえば降水量を変化させたときの精度は、特殊な状況を設定するほど悪化することが予想される。それゆえ、これまでのデータから決められた構造が最終的な結果ではなく、毎年データと照らし合わせながら、逐次構造や係数を修正していくことが求められる。

さらに、ここで構築したモデルでは、郷ごとの放牧圧はどのような土地条件でも牧養率を等しくするように加えらるゝとして計算されている。これは現段階ではデータの空間解像度の都合上やむを得ないことであるが、実際には風積砂土域と湿草土域では利用のされかたが異なっていることが予想される。この土地利用圧の格差をどのように把握し、モデルに取り込むか、という問題を解決するには、対象地域が狭い場合には実地調査などが有効であろうが対象地域が広い場合にはやはりリモートセンシングなどに頼らざるを



得ない。高解像度のものや多バンドのものを組み合わせることによって土地利用圧の空間分布を視測することがこの種のモデルの精度の向上に大きく貢献することが予想される。

また、ここでは裸地の増加は牧養率の増加に対して線形の反応を示すこと、牧養率に対する反応特性が土地環境区によって変化しないことを仮定した。実際には、ある閾値を超えると急激に土地条件が悪くなり、不可逆あるいは回復困難な状態へと落ち込んでいくといわれている(たとえば、Milton *et al.* 1994, 武内・大森 1988)し、もちろん土地条件によって閾値なども異なってくる。水分条件の変化による生産性の変化も含めて、精度の高いモデルの構築には現地の土の性質に対するきめ細かい研究が必要であろう。

奈曼砂漠化モデルでは北部に見られる、砂丘再活動による裸地面積変動を予測対象とした。奈曼旗で他に見られる、南部の水食による土壤侵食や土壤の塩性化による被害については今回はあつかわなかった。そういった別のタイプの砂漠化をもカバーした一般的な砂漠化モデルの構築のためにはそれぞれのタイプを対象とした別モジュールを付加する必要があると考えられる。ただしその場合にも本節で構築したモデルが砂丘再活動モジュールの原型になるとと思われる。

#### 第4節 小括

以上の結果とこれまでの報告から、中国内モン自治区奈曼旗における砂漠化のモニタリングとモデル化から得られたことをまとめる。

2-3 万年という時間スケールの中では、奈曼旗の砂漠化は、日本の北陸地方などと同じく、東アジア全体の気候の変化に強く影響を受けている。東アジアの気候は、10,000 B.P.から 2,000 - 3,000 年を周期として、寒冷乾燥、温暖湿潤、温暖乾燥と移り変わり、2,500 B.P.から温暖乾燥から小刻みに振動しながら寒冷湿潤へと移行しているところである(Wang 1984, 藤 1975)。タイムスケールを短くしてみると、6 世紀から 9 世紀には植生が回復し、9 世紀から 13 世紀までは農耕中心で砂漠化進行、14~17 世紀にはふたたび回復、その後は農耕と牧畜の兼営で砂漠化進行とされている(劉ら 1993, 石ら 1998)。降水量と蒸発散量の比を考えると、温暖乾燥から寒冷湿潤への移行は植被の回復へのトレンドだといってよいが、その中でとくに人間による土地利用圧が高まったときに砂漠化が進行している。とくに 18 世紀以降は人間活動の質的・量的増加のために砂漠化へ向かう傾向が続いている。本章第2節で報告した 1930 年代から 1980 年代までの拡大もま

た、そのような流れの中で認識すべきものであろう。ところがその間の砂地の拡大に危機感を抱いた政府によって、奈曼旗では大規模な植林などの砂漠化防止策が積極的に採られるようになる。1970年代から1990年代までに、とくに鉄道・道路沿いの地域周辺では拡大傾向が見られないことはそうした努力のあらわれである。ただし、この間も防止策があまりとられなかった放牧地域では裸地の増加傾向が見られ、土地利用形態だけでは砂漠化をおさえきれず、植林その他の土木的手法によってようやく平衡を保っている状態であると言ってよい。

もちろん、植生量は季節によって大きく変化するため、年次変動を見るためには、どの時期を選ぶのがよいかを季節変動を理解した上で選択する必要がある。

そのような背景のなか、経時的で空間解像度も高いデータの得られた20年スケールのモニタリングをもとに、裸地面積の変動を予測するモデルを構築した。自然条件モジュールと社会条件モジュールにわけて関係式を導出した後、統合した。構築したモデルに、さまざまな条件を代入することで、ことなった条件の下で20年後の予測をおこなうことができた。

## 第4章 総合考察と今後の課題

本章では、前章までの結果をふまえ、本研究で注目した砂漠化＝比較的湿潤な地域の風食のモニタリングについて総合的な考察をおこなうとともに今後の課題を議論する。すでに述べたとおり、従来の土地荒廃に関する研究は、注目する時間スケールや要因、土地条件においてバラバラにおこなわれてきたため、①環境条件の違う地域を系統づけて理解し土地荒廃一般のなか位置づけること、②複数の時間スケールで考察し、周期的変動と拡大への一方的な変動を分別すること、③複数の要因を同時に考慮し、それらを定量的に統合すること、などが課題になっていた。第1節では本研究の結果をもとに、上述の3点について議論した。第2節では、土地利用計画策定の際のモデル利用の可能性について、他地域への応用を含めて検討し、今後の課題を挙げた。

### 第1節 総合的な砂漠化モニタリングに関する考察

#### (1) 乾燥地以外の土地荒廃現象との関係

第1章で述べたように、UNEPの「砂漠化」の定義にはいくつかの問題点があったため、本研究では砂漠化および土地荒廃という言葉を再定義した。本研究ではその中で人間の土地利用がおもな原因となっておこる砂漠化として「半乾燥・乾性半湿潤地域における風食」で代表させた。第2章でおこなった土地環境区分において、環境条件と土地利用あるいはそれらと土壤荒廃が密接な関係にあることがあきらかになった。つまり、砂漠化がおこる地域は、「風食がおこる程度には降水量が少ないが、人間が生産活動をおこなえるほどには降水量が多い地域」であった。言いかえると、土地利用が土壤荒廃を引き起こすが、そのタイプは乾燥地では風食と水食が同時に起こり、湿潤な地域では水食だけがおこるのである。また、降水量が多い地域では土地利用がない場合でも水食がおこることも確認しておきたい。

さらに、乾燥地域の分布に関しても、大陸スケールでの考察から多くの知見が得られる。世界の砂漠の分布は、地形に影響を受けた気候分布から説明される(鈴木 1977)し、砂漠化が進む地域もその周辺の乾燥地に集中しているため、気候的条件からうける影響はおおきい。本論文の第2章でおこなった大陸スケールの総合的な土地環境区分においても、年平均気温、年降水量といった気候に関する量がもっとも重要であった。また、

土壌分布を論じる際にも、気候の影響を受けた成帯性土壌が、もつとも大きな空間スケールをもっているし、植生もまた直接的に気候の影響を受ける。さらには、第2章で見たように、風食、水食といった土壌荒廃の種類もまた、成帯性の分布を見せている。第2章で、土地利用が主要因となって風食が進む地域として土地環境区 4,5 を抽出したが、これは数十から百 km を単位とした、成帯性の現象を対象にしたものであったといえる。

事例対象地における研究をおこなう場合はもちろん、気候よりも空間スケールの小さな要素が効いてくる。代表的なものは地形、岩質であり、本研究に即して言えば、砂質土壌の堆積がなされたクルチン砂地がそのような単位である。内蒙古自治区東部は気候に関する環境傾度が非常に高い地域でありクルチン砂地内部においても、北西から南東へ向かうにつれ寒冷乾燥から温暖湿润へと急激に変化する(Zhu *et al.* 1988)。また、南部に見られる黄土台地などもそういったスケールの単位であると言ってよい。これらに対応し、土壌荒廃タイプも、奈曼旗北部で砂丘再活動がおもなものであるのに対し、南部では水食が盛んである。気候条件に影響を受けつつも、それ以外の比較的空間スケールの小さな環境要因に影響を受けた土壌を成帯内性土壌というが、第3章の第2節でおこなったモニタリングは、降水量、蒸発散量といった成帯的な要因に強く影響を受けつつ、地形などの少し空間スケールの小さい要因によっても影響を受ける砂漠化の成帯内的側面に注目したものであった。このほかに影響を及ぼす因子としては水文条件と(小スケールの)土地利用が挙げられる。水文条件は地下水位が最も重要である。また、関連して氾濫原・低位段丘・砂丘地といった地形レベルも重要である。さらにこれに対応した形でおこなわれている土地利用傾向もこのレベルの空間スケールで記述されるべき量である。あるスケールの現象にはさらに上位の(大きな)空間スケールの影響を受けるため、さまざまな空間スケールでのモニタリングが重要になるのである。研究の手法もやはり注目する空間スケールによって異なるが、比較のおおきな空間スケールにおいてはリモートセンシングが重要な位置を占める。大陸スケールにおいては、1km 解像度の NOAA/AVHRR のデータが数日の時間間隔で得られているし、数百 km スケールでは Landsat 衛星がよく用いられる。Landsat の解像度は 30m ないし 80m なので、集落単位のスケールには不向きである。県スケールから集落スケールをカバーするのは植生調査、土壌調査、地質調査などの従来の地理学的調査である。

## (2) 複数の時間スケールを用いた砂漠化モニタリング

1930-1940年代のサヘルを舞台にした、数十年スケールの降水量と砂漠化の拡大に関する英仏の研究者達の議論が、第四紀後半の気候変動を論じた James(1938)の報告書で一応の幕を閉じたように、複数の時間スケールで砂漠化を見ることが、現象の本質に迫る上で必要であることが少なくない。

第3章で小括したように、本研究で事例地域としてとりあげた中国内蒙古自治区奈曼旗では、砂漠化の進行と回復はこれまで現地でも得られている知見では、もっとも大きい時間スケールは1万年スケールである。このスケールでおこっている2,000-3,000年周期の気候変動に注目すると、温暖・乾燥から寒冷・湿潤へと向かっている。これは降水量の増大と蒸発量の減少をとまなうわけであるから、回復へ向かう傾向である。これに対し、数百年という時間スケールでは人間の土地利用圧の増大にともなって砂漠化進行へとむかっている。歴史的には、放牧がおもにおこなわれていたときは回復、農耕が盛んになると砂漠化が進行するというサイクルで回復と進行が交互にやってきた(石ら1998)。そのサイクルの中では、近年は農耕と牧畜の兼営により砂漠化進行の最中にあるという。中国北部では、最近50年間に奈曼旗の約6倍に相当する5万km<sup>2</sup>が砂漠化したとされ(Zhu & Liu 1983)、それ以前に砂漠化した面積は12万km<sup>2</sup>とされている。つまり、50年から数百年というスケールで見れば、農耕と牧畜を兼営する人間の土地利用圧によって砂漠化が進行していると言える。衛星画像解析が使用できる1970年代後半以降の20年間は、中国農村で生産請負制が始まり、劇的な経済発展を遂げた時期とささなる。この間、人間による交通網・集落保護の努力がみられ、とくに街道沿いでは砂漠化の進行がとまっている(今川1996など)。つまり、このスケールで見ると、人為の回復手段の導入によって回復過程にある。もちろん、さらに短い時間スケールのできごととして、気温、降水量、蒸発散量の変化にともなう植生の季節変動も毎年起っている。

このように、おなじ対象地で砂漠化という現象を研究したとしても、注目する時間スケールによってみえてくるものとそれにおもに影響を与えているものが全くことなってくる。これに加えて、ことなる時間スケールでの砂漠化モニタリングが重要な理由は、長い時間のなかで作られた環境条件が、短いスケールの現象に影響を与えることがしばしばあるからである。たとえば、砂漠化研究においては、通常設定されるもっとも長い時間スケールは、放射性炭素をもちいた年代測定が可能な2-3万年である。このような時間スケールは、クルチン砂地では堆積による砂質土壌の集積まで遡ることができる。クルチン砂地に砂質土壌が堆積したのは第三紀後半から第四紀であるし、地形や土壌の発達にも同じ時期の

気候条件などが影響を与えている。また、街道沿いに人口が集中し、鉄道がひかれ、道路が舗装されたことがさらなる人口の集中をひきおこし、それが 1970 年以降の回復手段導入の空間的不均一性に影響を及ぼしている。

さらに、歴史時代の回復と進行のようすを理解することは、その地において土地利用が適切である場合とそうでない場合の、引き起こされる現象を推測する重大なヒントを与える。武内(1996)は文明論的な視点から土地荒廃を根本的にとらえなおし、100 年の将来(土地利用のグランドデザイン)を考えるために 100 年オーダの考察が有効だとしている。

### (3) 複数の要因に関する関係式の統合

すでに述べたように、従来の研究は砂漠化の一つの要因に注目し、その要因と結果(砂漠化)の相関関係について研究されたものが多かった。もちろん、そういった基礎的データの集積は全ての議論の基本となる重要なものであるが、地球環境問題への対処が危急の課題となっている昨今、そういった事象が組合わさってどのように結果(砂漠化、さらには土地荒廃)を引き起こしているのか、をあきらかにすることが求められている。こんにち砂漠化・土地荒廃に関するあらゆる討論の場で、複数の要因の統合ということがいわれ、また定性的なフローチャートも多く描かれてきた(たとえば、朱・劉 1981)。そのなかでもとくに自然的要因と社会的要因の統合については声高にその必要が叫ばれている。しかし、実際に自然的要因と社会的要因とを結合させ、それらの寄与度を定量的に論じた上で、制御可能な変数を変化させた場合に未来においてどのような結果が得られるのか、を論じた例はほとんどない。

自然的要因とは通常第一に降水量、第二に土地条件(地形、土壌、水文など)、さらに蒸発散量、風などが考えられる。社会的要因は人間の生産活動であり、この 2 つは土地利用をつうじてつながっている。第一次的には、社会的要因は土地利用の必要を、自然的要因は土地利用の結果を出力する。これらの統合を考える際に最大のネックになるのはデータの空間解像度の違いである。これは、人間や家畜が土壌や植物に比べて空間移動性が高く、ある1点に帰属して生活しているわけではない、という根本的な問題をはらんでいる。運用が予定されている解像度 1m のオーダまで判読可能になるといわれているセンサーは、それに対する突破口になる可能性がある。人家などの構造物はもちろん一軒一軒判読可能になるだろうし、家畜も大きなものは1頭ずつ識別することができるようになる可能性がある。

モデルは、因果関係の統合によって現象の構造を理解するのに役立つと同時に予測、対処することができるツールであり、大きく分けて経験モデルと理論モデルがある。経験モデルは本研究でおこなったように、要因と結果を結ぶ関係式がよくわかっていないときに、相関関係があるものを数式で結びつけるものである。重回帰分析による係数の決定はそのもともと基本的な手法であり、大坪ら(1998)などでも本研究と同じくステップワイズ法によって変数と係数を選択・決定している。理論モデルは、一般均衡モデル(たとえば、Fischer *et al.* 1996)や大気循環モデル(たとえば、Matsuoka *et al.* 1995)のように、すでに確立されている理論式からスタートするものである。これは、結果を引き起こす要因が何で、それがどのような関係式で結びついているのかに関する議論がすでに十分おこなわれている場合にはその関係式からスタートすることができる。この場合の自由度は、係数の決定に限られる。理論式は数学、物理学、化学、経済学分野の等式が用いられることが多い。

## 第2節 環境情報を用いた手法の他地域への一般化へ向けての課題

### (1) モニタリングについて

本研究の事例対象地は、内蒙古の草原地帯であったが、すでに述べたように、①雲がかかりにくい(あるいは空気中の湿度が低いレベルで安定している)、②植被の量的モニタリングの重要性が高い、といった、衛星画像を用いた環境モニタリングに適した特性をいくつか備えている。マイナス面としては土壌による反射が場所によって大きくことなる場合にはその影響が少なからず反映されてしまうことなどがあるが、総じて乾燥地は衛星画像解析に適しているといえる。

雨の多い地域や、植生の質的モニタリングをおこなう必要が出てきた場合は、雲を透過するマイクロ波などの波長域をカバーする衛星・センサーを利用する必要がある。また、植生指数としてここでもちいたような一次元のものでは足りない面も出てくるかもしれない。しかしそのような不便になる点を考慮しても、衛星画像利用の有利な点を生かしていくべきだと考える。人的資源を大量に投入することなく、大量のデータを経時的に供給できるという点で優れているし、特に重要な点は、あとから遡ってデータを探索するという点である。

衛星画像は、近年まで 1970 年代以降の解析にしか使えなかった。最近になって CORONA といわれるアメリカの軍事衛星の写真が公開されるようになったとは言え、これ

も 1960 年代のものになる。このため、総合的な理解のためには単独で用いられるべきものではなく、対象時間スケールのことなる放射性炭素年代測定などや、その他の現地調査などと組み合わせて用いることが望ましい。

(2) モデルを用いた予測と対処について

本研究でおこなったように、モデルに考慮された要因に関する条件をいろいろと変えて、その条件の下で将来どのようなことが起こるのかを予測することによって、政策を選択することができる。

第 3 章 3 節で構築したモデルはどの範囲まで適用することができるか、を議論する上で重要なのが、第 2 章でおこなった土地環境区分である。第 2 章では、基本的な環境特



図 4-1 奈曼旗北部と同じ土地環境条件をもつ地域の分布  
④、⑤は 2 章の土地環境区分で生まれた土地環境区名。



性を用いて土地を区分したが、その際土地利用や土壌荒廃も各土地環境区ごとにある程度の特徴をもっていた。とくに本研究で注目した土地利用によっておこる風食に関しては、よく起こっている地域は土地環境区 4 および 5、地域でいえば内蒙古東部の他中央アジア北部やオーストラリアの一部などであった。これらの土地環境区に含まれる地域は、降水量 200-600mm ぐらいの半乾燥地域もしくは乾性半湿潤地域であり、草原性の植生が卓越している。このような環境特性を持ち、過去において何らかの理由で砂層が形成された地域あれば、ここで構築したモデルとおなじような構造をもつモデルを持ち込み、係数を変えるだけで、砂丘再活動についてある程度の精度で予測をおこなうことができると考えられる(図 4-1)。

以下、モデル化手法の利用についての課題を議論する。精度の高いモデルの構築には量的・質的に多くのデータが必要になる。とくに経験的なモデルの場合はその色合いがつよい。いったん構築された後も、新しいデータが手に入る都度、精度の検証、そして係数への取り込みをおこない、さらにモデルを洗練していかねばならない。そしてなお、そのようにしてもなお、想定外の突発的な事柄に対しては多くの場合考慮不能であると言ふことを理解しておかなければならない。

奈曼砂漠化モデルでは、気候条件、土地条件と言った自然条件の寄与が社会条件に比べて大きかったが、これはこの地域の砂漠化の特徴をそのまま表しているとは言い難い。なぜなら、①1970年代から1990年代までの間に、耕地面積あるいは家畜数にみる限り土地利用圧は大きく変動していない、②自然条件と社会条件ではデータの空間解像度に大きな差があり、これがモデル構築の際に決定的な役割を果たした可能性がある、の2点を考慮する必要があるからである。このような問題点が克服されれば、モデル構築の際に、どの条件が支配的でどの条件が従属的かを把握することもできる。また他の地域でもおなじような試みがなされれば、本研究のモデルと比較することによってさまざまな知見が得られる。たとえば、自然的要因と社会的要因の寄与のようすはある程度普遍的なものなのかあるいは地域差がおおきいのか、降水量は他の場所でも夏季の雨は裸地面積と負の相関をもち、春季の雨は裸地面積と正の相関をもつのか、土壌・地形といった要因はおなじくらい寄与するのか、地下水位の寄与はどうか、などである。

モデル構築の際に必要なデータについて確認しておく。モデル構築の際には土地の生産力の推定が不可欠になるとと思われるので、土地条件に関するデータとして、土壌・地形・水文(地下水位など)などが不可欠であろう。さらに、気候条件に関するデータとしては降

水量が必要である。また社会条件に関するデータとしては、卓越する土地利用が何であるかによるが、耕地面積、家畜数などはどの場合でも不可欠であると考えられる。また本論文では取りあげなかったが、牧畜民族と農耕民族が混在している状況は砂漠化地域によくみられる。土地利用形態が歴史的に幾度も交代したか否か、もモデルに含まれる要因の候補として興味深い。

時間スケールについては、本研究では、20年を一単位として予測をおこなった。土地利用ということから見れば時間スケールとして適当と考えられるが、さらにデータが集まるようなところであればより短い時間スケールで予測をおこなうモデルも構築することができる。たとえば、数ヶ月オーダの気象予報から収量を予測するモデルや、作物の市場価格を予測するモデルも考えられる。このようなモデルは、サヘル地域などで稼働する干ばつ早期警戒システムのような、災害に対処する際にも効果を発揮するだろうと思われる。

空間スケールについては、現時点では、おなじような環境特性を持つ地域を単位とするべきだろう。モデル自体の数が増え、データが蓄積されていけば、ことなる環境条件でのことなる土地荒廃を考慮できるモデルの構築が試みられるべきであるが、今はまだその段階には達していない。奈曼旗においても北部は土地環境区4と5なのに対し、南部では土地環境区8で、水食が卓越しており、ことなった種類の土地荒廃がおこっているため、ここではとりあげなかった。

衛星画像の利用がはじまって20年～30年で、年次変動を高い精度でモデル化するにはまだデータが十分とはいえないが、こうした問題は、モデルの構築→精度の評価→改良点の議論→モデルの再構築といったプロセスを経て、改善されていくべき問題である。ここで構築したモデルがその第1歩になることを願う。

## 摘要

人間の生産活動の増大などに起因する土地荒廃は世界各地で起こっているが、乾燥地で起こる砂漠化は土地の生産性がほぼゼロになること、景観的にも不毛の裸地になってしまうこと、などからとくに重要性が高く、注目を集めている。現在一般的な砂漠化の定義では、対象地域を降水量と可能蒸発散量の比から限定しているが、現象の中味に関しては言及がなく、土地荒廃全体を対象にしている。この定義の対象地域は乾燥地域、半乾燥地域、乾性半湿润地域と呼ばれる。本研究ではこれらを合わせて乾燥地と呼ぶ。乾燥地でとくに顕著な土地荒廃は水食と風食であるが、このうち本研究では乾燥地により特徴的な風食に焦点をあてる。

風食は乾燥地の中ではもっとも降水量の少ない乾燥地域よりも、半乾燥地域および乾性半湿润地域の方が被害が顕著である。これは、農耕がある程度可能になる年降水量 300mm 以上の地域では土地利用圧が飛躍的に高まることに起因している。降水量の少ない地域ではその変化率が大きいことが多いため、こうした地域の土地荒廃を論ずる際にまず考慮すべきは降水量の変動である。一般に降水量の変動などの自然的要因と土地利用圧の変化などの社会的要因がからみあって砂漠化がおけるといわれているが、この両者をモデルの形に統合した例は非常に少ない。

本研究では以上の点を考慮して、半乾燥・乾性半湿润地域において、いったんは植生がおおっていた古砂丘が土地利用圧の高まりによって再活動した結果、風食が顕著に見られる地域において、砂漠化のモニタリングとモデル化をおこなった。対象地域としては、現状でもアフリカと並ぶ被害地域であり、今後とも被害の拡大が予測されるアジアの乾燥地に注目した。モニタリングに先立ち、アジアにおいて環境情報を用いた解析をおこない、環境条件と土地荒廃の関連性を把握することで乾燥地における風食の卓越性を確認した。モニタリングの際は、中国でもっとも砂漠化が進行したといわれる 50 年スケールと、衛星画像が利用可能になって高密度なデータが得られるようになった 20 年スケールを採用した。モデル化では、20 年スケールのモニタリングの結果を用いて自然条件と社会条件を統合したモデルを構築し、将来予測を試みた。

### 1. アジアの土地環境区分

まず、砂漠化および砂漠化地域を位置づけるためにアジアの土地荒廃と環境条件や土地利用圧との関連について調べた。アジアは他に例を見ない自然条件の多様性を持ち、また非常に土地利用圧の大きい地域を抱えており、さまざまな土地荒廃がみられる。ここでは自然条件、土地利用、土地荒廃について既存のデータセットを用いてそれらの関連を調べた。まず、気候、植生、標高、土壌タイプに関するデータセットを用い、緯度 1 度×経度 1 度を単位としてアジア地域の土地環境区分をおこなった。土地環境区分は対応分析とよばれる数量化手法を用いて 3 次元空間に各グリッドをプロッ

トし、クラスタ分類にかけることでおこなった。最終的に 10 の土地環境区に区分されたが、それには降水量と気温の分布が大きく反映された。また、環境条件と土地利用、土地荒廃の間には明確な関連があった。10 の土地環境区に年降水量の少ない順に①～⑩と番号をつけたとき、風食がおもにおこっているのは乾燥地に対応する②から⑤までの土地環境区であり、これらの地域では①や⑥と比較して土地利用圧が顕著に高かった。また、乾燥地の中では降水量、耕作面積率がともに大きい④、⑤と、ともに小さい②、③の間には明確な違いがあった。以下では集約的な土地利用がおこなわれていた④、⑤に注目した。

## 2. 奈曼旗における砂漠化のモニタリングとモデル化

つぎに土地環境区④、⑤に含まれる事例対象地を設定し、砂漠化のモニタリングとモデル化をおこなった。アジア地域の砂漠化のなかでも、中国北東部の砂地草原における砂丘再活動による被害は典型的な例である。砂地とは植物の生長に十分な降水量がありながら、なんらかの理由で砂が露出している地域であり、表層の下には堆積などによって砂質土壌が多量に存在する。過度の土地利用が表面の植被をはがしてしまい砂地が露出する現象は、不適切な土地利用が土地の回復困難な荒廃を招く例として近年注目を集めている。ここではとくにこのような種類の砂漠化の進行が激しいとされる内蒙古自治区奈曼旗を対象地域として選び、異なる時間スケールでの砂漠化地域の面積変動のようすを調べた。モニタリングの際には、土地条件によって奈曼旗を区分し、得られた土地環境区ごとに時間変化を調べた。土地環境区分においては、地形図・土壌図に合わせて、現地調査によって得た推定地下水位分布図を使用した。

### (1) 奈曼旗の砂漠化モニタリング

1930 年代の旧日本軍作成の地形図を用いたモニタリングの結果、砂漠化の被害を受ける地域は 1980 年代までの 50 年間にあきらかに広がっていた。1980 年代に中国科学院が作成した砂漠化類型図の砂漠化進行地域、強度砂漠化進行地域、重度砂漠化地域をあわせると 1930 年代の地形図の砂地面積から約 1.8 倍に拡大していた。20 年スケールのモニタリングでは、Landsat/MSS の衛星画像を用いて 1975 年から 1994 年までのうち 10 年間のデータから算出した植生指数の変化を追った。その結果、降水量の変動に影響を受けながら初秋の推定裸地面積が大きく変動していた。その変動のようすは土地条件ごとに大きく異なっていた。また農業地域では植被の回復がみられたが、放牧地域では砂漠化の進行が見られた。もっとも短い期間のモニタリングとして、NOAA/AVHRR の衛星画像を用いて植生量の季節変動を地形区分ごとに調べて調べた。その結果、5 月から徐々に植生量が増え、8 月末から 9 月初めにピークを迎えその後急激に落ち込むようすがみられた。

### (2) 砂漠化モデルの構築とモデルを用いた予測

モデルの構築の際に用いるデータとしては土地利用圧が大きく変化しと思われる 50 年スケールのものを使用するのが妥当であるが、このスケールでは定量的で経時的なデータが得られなかったた

め、そのようなデータが得られた 20 年スケールのモニタリング結果を用いた。モデルは自然条件と社会条件を別途考慮して重回帰式を決定し、最後に統合した。自然条件としては降水量変動と土地条件を用いた。土地条件は地形、土壌、地下水位を考慮した。社会条件は放牧圧の変化と人為の回復効果を考慮した。その際、風積砂土面積率も同時に考慮した。1975 年から 1994 までの間には土地利用圧の変化があまり大きくなかったため、モデルにもそれが反映され、自然条件モジュールに比べて社会条件モジュールの決定係数が小さかった。

得られたモデルを用いて、20 年を一つの単位として予測をおこなった。変数を操作することによって、降水量、放牧圧、回復手段の分布などの条件を変化させた場合の裸地面積の予測をおこなうことができた。放牧圧が同じで降水量が平均値であったとすると、2014 年の奈曼旗北部の裸地面積は 1994 年比で+3.6%となった。また、夏季の降水量が平均の 0.8 倍および 1.2 倍だとそれぞれ同+8.5%、-1.2%となる。また降水量は平均値で放牧圧-30%および+30%変化させるとそれぞれ-6.2%および+6.2%となった。

### 3. 総合考察

本研究でおこなった砂漠化のモニタリングとモデル化の結果は以下のようにまとめることができる。

- (1)降水量が少ない地域に特有の土地荒廃現象として風食が挙げられる。風食は降水量 100-400mm の乾燥地において顕著であり、その強度には人間による土地利用の強度が深く関わっている。降水量 200mm 前後の地域と 300-400mm の地域では集約的な農業的土地利用の比重に明確な違いがあり、後者が高かった。
- (2)1930 年代から 1980 年代までの 50 年間に奈曼旗の砂漠化は急激に進み、砂地の面積は約 1.8 倍に拡大した。
- (3)1975 年から 1994 年までの 20 年間の奈曼旗の裸地面積の変動は、主として降水量の変動によって説明される。この間に砂漠化進行のトレンドがあったかどうかは判別が困難であった。
- (4)アジアの土地環境区分の際に土地環境区②、③と比較して農業的土地利用が進んでいた土地環境区④、⑤においても、砂漠化は放牧地域でおこっていた。
- (5)植被の季節変動も土地条件ごとに異なるが、春から初秋までかなり大きな増加を示しその後急激に減少していた。
- (6)どの時間スケールにおいても、砂漠化面積変動のようすは土地条件によって大きく異なる。
- (7)自然的要因と社会的要因のそれぞれで別個に重回帰分析をおこない、積の形で統合することでモデルを構築することが可能であった。現段階では自然条件モジュールに比べて社会条件モジュールでデータ量が少なく、関係式の決定係数も低い。
- (8)モデルを用いた予測の結果、2014 年の奈曼旗北部の裸地面積は 1994 年比で+3.6%となった。また、夏季の降水量が変化した場合や放牧圧を変化させた場合について裸地面積の定量的な予測を

おこなうことができた。

これらの結果から以下のような考察が得られた。

- (1)乾燥地の現象である砂漠化を、他の土地荒廃現象と同列に分析することで、グローバルな土地荒廃現象のなかに位置づけることができる。
- (2)複数の時間スケールでモニタリングをおこなうことで砂漠化現象の長期的・短期的動向をより客観的に把握することができる。これによってたとえば短期で変化した要因のみに砂漠化の要因を限定するという判断ミスをなくすことができる。
- (3)モデルの入力変数を変化させて将来予測をおこなうことで、土地利用の妥当性を定量的に議論することができる。
- (4)精度の高いモデルの構築にはデータの蓄積が不可欠である。とくに土地の生産力や土地利用圧の分布の推定を可能にするデータを現地で観測することが重要である。また、衛星画像の質的・量的蓄積もモデルの向上に寄与すると思われる。
- (5)本研究で構築したモデルでは、考慮した期間の土地利用圧の変化が大きくなかったため、降水量に比べて土地利用による影響がでにくい。この問題を克服するためには衛星画像の利用できる1970年代から1990年代までに土地利用圧が急激に高まった結果砂漠化が進行した地域で同様の試みをおこなう必要がある。
- (6)モデル全体の精度を向上させるのは社会条件モジュールの精度の向上が不可欠である。また、政策の妥当性を予測・評価するためにも、土地利用など操作可能な変数に関する感度の高いモデルを構築する必要がある。

## Monitoring and modeling desertification using environmental information in drylands of Northeast China

### Summary

Land degradation induced by human activity can be seen everywhere in the world. However, desertification, seen in drylands, is especially notable because land productivity becomes almost zero and the landscape changes into bare land. In the definition agreed to by UNEP, desertification was not regulated in the meaning of phenomena whereas the affected area was clearly defined. The word "drylands" in this study covers the affected area in UNEP's definition, that is, an arid, semi-arid and dry sub-humid area. This study focuses on wind erosion, one of the dominant types of degradation in drylands.

It was found that though wind erosion generally weakened with an increase in precipitation, in the semi-arid and dry-sub-humid area wind erosion was similar to that in the arid region. This is caused by an increase in cultivated land in the relatively humid area. In the dry area, there is a marked fluctuation in rainfall and this must be primary consideration when land degradation is discussed. It is generally a combination of natural factors such as fluctuation of precipitation and social factors such as landuse change that determine the rate of desertification. So far there have been few integrated modeling studies that have included these two factors.

In this study, monitoring and modeling desertification were conducted in the semi-arid and dry sub-humid area where remobilization of ancient sand dune is observed. Drylands in Asia were focused on because this area is expected to be the most severely damaged by desertification in the near future. Land classification was attempted in Asia before monitoring to place desertification in the context of general land degradation. A fifty year time scale during which severe desertification proceeded in the study area, and a twenty-year scale during which satellite images have been available, were adopted as time scales. The result of the twenty-year scale monitoring was available for developing a model to predict desertification in the near future.

#### 1. Land classification of Asia

The relationship of soil degradation, environmental condition and landuse was analyzed for defining desertification and desertified areas in Asia. Both the natural condition of land and the degree to which it has been affected by degradation varies

widely across Asia. In this study, relationships between natural condition, land use and land degradation are studied using the existing data set. First, Asian land was classified. Units are grids of 1 by 1 degree and available data sets include annual mean temperature, annual precipitation, elevation, soil type and vegetation type. Land classification was conducted using correspondence analysis and cluster analysis. Ten land-units were produced as a result. Precipitation and temperature were shown to be the dominant factors for explaining degradation. A distinct relationship was observed between environmental condition, landuse and soil degradation. The affected area of wind erosion is mainly on land-units corresponding to drylands, where landuse were intensive. In drylands, land-units were divided into two types, one is of high precipitation/landuse and the other of low precipitation/landuse.

## **2. Monitoring and modelling desertification in Naiman County, Inner Mongolia, China**

Desertification was monitored and modeled in Naiman County, Inner Mongolia, China. Naiman County is included in a dry land-unit of high precipitation/landuse. Sand dune remobilization in sandy land of Northeast China is a typical instance of desertification in Asia. Sandy land is defined as land covered with sand but one that receives enough precipitation for plants to grow. In sandy land, under the top soil, lots of sandy soil with sediments is generally observed. The process induced by excessive landuse with vegetation cover becoming detached and then sand dunes being remobilized, has been noted recently as an instance of irreversible land degradation. This study attempted desertification monitoring using three different time scales, fifty years, twenty years and one year. As the base for monitoring, Naiman County was classified according to its land condition and the area of bare land was estimated for each land unit. A map of the ground water table produced by field survey was available in addition to landform and soil maps for land classification.

### **2-1 Monitoring desertification in Naiman County**

The monitoring using a topographical map published by the former Japanese Army clarified that the desertified area expanded remarkably from 1930s to 1980s. The total of the on-going desertified area, severely desertified area and most severely desertified area was 1.8 times greater than that measured using the topographic map of the 1930s. Monitoring over 20-year scale analyzed the fluctuations in vegetation index using ten Landsat/MSS images from 1975 to 1994. An estimated area of bare land fluctuated drastically under the influence of precipitation change. Each land unit fluctuated individually. Grazed areas were affected more severely than cultivated area. The annual fluctuation in the vegetation index for each type of landform was monitored



using NOAA/AVHRR images. The vegetation index increased from May to the end of August or the beginning of September and decreased rapidly after that.

#### 2-2 Model development of desertification and its application for prediction

It is advisable to use the data from the 50-year scale, in which landuse changed drastically, for developing a desertification model. Quantitative and time sequential data, however, are not available for this scale. Therefore, in 20-year data was used to model development. Natural-condition module and social-condition module were constructed individually using multiple regression analysis and integrated finally in the model developed here. Fluctuation in precipitation and land condition were considered as the natural condition. Land condition includes landform, soil type and ground water table. A change in grazing pressure and the effects of remedies were considered as social factors. The share in area of aeolian sandy soils was considered simultaneously using the same formula. The coefficients of determination were higher for the natural-condition module than for the social one.

Predictions over the 20-year scale were attempted using the model developed here. Changing the variables of precipitation, grazing pressure and distribution of remedies enabled the predictions to be made. For mean precipitation and equivalent livestock number as in 1994, the prediction of bare land area in northern part of Naiman County in 2014 shows an increase of 3.6% over 1994. For changes of summer rainfall of 0.8 times and 1.2 times of mean value, the estimated area of bare land shows +8.5% and -1.2% over 1994 respectively. For changes in grazing pressure of 0.7 times and 1.3 times of that in 1994 with mean rainfall, the prediction shows -6.2% and +6.2% over 1994.

### 3 Conclusion

The results of this study are as follows:

- (1) Wind erosion is peculiar to drylands. That is remarkable in a region where annual precipitation is between 100 mm and 400 mm. Intensity of human landuse is closely related to the extent of wind erosion. Intensive agricultural landuse is higher in the area with a rainfall of 300-400 mm than in the area with one of around 200mm.
- (2) Desertification in Naiman County proceeded rapidly from 1930s to 1980s. The area of sand dune expanded 1.8 times during those 50 years.
- (3) Fluctuation in the area of bare land can be explained largely by changes in precipitation. Therefore from the available data, it was impossible to say if desertified land expanded during considered term.
- (4) In drylands, desertification proceeded in the grazed area, even with extensive cultivation.

- (5) Seasonal fluctuation in vegetation cover is distinct for each land condition. The fluctuation increased rapidly from spring to early autumn and decreased after that.
- (6) For any of the time scales, fluctuation in area affected by desertification is closely related to land condition.
- (7) A model was developed by integrating in the shape of the product of natural-condition module and social-condition module. Both modules were developed using multiple regression analysis. The social-condition module currently has less available data and a lower coefficient of determinant.
- (8) Prediction by the model shows an increase of 3.6% over 1994. It become possible to predict the bare area quantitatively as precipitation and grazing pressure change.

The following insights were obtained from the above results:

- (1) Desertification, the phenomenon in drylands, can be placed into the context of land degradation which is observed everywhere in the world.
- (2) Monitoring in plural time scales enables us to understand more objectively the trend in the long-term and short-term of desertification. This avoids the mistake of overlooking the implicit factors of desertification in one time scale.
- (3) Operation of input variables enables quantitative discussion on suitability of landuse.
- (4) Accumulation of data is indispensable for developing an accurate model. Field survey results are particularly important for estimating land productivity and landuse pressure. The quality and quantity of data from satellite images also contributes to the workmanship of a model.
- (5) Precipitation is a more explicit factor than landuse in the model developed here because changes in landuse were not marked over the selected time scale. To improve this problem, a similar study was needed of an area where desertification had been caused by an increase in the-intensity of landuse after 1970s.
- (6) An improvement in the accuracy of the social-condition module is indispensable for enhancing the value of the integrated model. A model appropriate for operational factors such as landuse is required for evaluating suitability of policy.

## 引用文献

- Anderberg, M., R. (1973): Cluster analysis for applications : academic press, 1973: (邦訳) 西田英郎 監訳 (1988) 「クラスター分析とその応用」, 内田老鶴圃, 東京, 442pp.
- Baret, F. & Guyot, G. (1991): Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment: *Remote sens. environ.* **35**, 161-173.
- Charney, J. G., Stone, P. H. and Quirk, W. J. (1975): Drought in the Sahara -a biogeophysical feedback mechanism:- *Science* **187**, 434-435.
- Dalby, D. & Church, R. J. H. (ed.)(1973): *Drought in Africa*: Bowman press limited, London, 124pp.
- Dregne, H., Kassas, M. and Rozanov, B.(1991): A new assessment of the world status of desertification: *Desertification control bull.* **20**, 6-18.
- Duchauffour, P. (1976): Atlas ecologique des sols du monde: Masson, Paris: (邦訳) 長塚鎮男・小野有五 訳 (1986) 「世界土壌生態図鑑」: 古今書院, 東京, 388pp.
- Dwivedi, R. S., Sankar, T. R. Venkataratnam, L. and Rao, D. P. (1993): Detection and delineation of various desert terrain features using Landsat-TM derived image transforms: *J. Arid environ.* **25** (1), 151-162.
- Fischer, G., Ermoliev, Y., Keyzer, M., A. and Rosenzweig, C. (1996): Simulating the socio-economic and biogeophysical driving forces of land-use and land-cover change -The IIASA land-use change model- : working paper WP-96-010, IIASA, Laxenburg 83pp.
- Franchito, S. H. & Rao, V. B. (1992): Climatic change due to land surface alterations : *Climatic change* **22** 1-34.
- Goward, S. N., Tucker, C. J. and Dye, G. D. (1985): North American vegetation patterns observed with the NOAA-7 advanced very high resolution radiometer: *Vegetatio* **64**, 3-14.
- Grove, A. T. & Warren, A.(1968): Quaternary landforms and climate on the south side of the Sahara: *Geogr. J.* **134**, 194-208.
- Grunblatt, J., Otlichilo, W. K. and Sinange, R. K. (1992): A GIS approach to desertification assessment and mapping : *J. Arid environ.* **23**, 81-102.
- Hanan, N. P., Prevost, Y., Diouf, A. and Diallo, O. (1991): Assessment of desertification around deep wells in the Sahel using satellite imagery: *J. Appl. ecol.* **28** (1), 173-186.
- Hell  n, U. (1988): Desertification monitoring -Is the desert encroaching?:- *Desertification control bull.* **17**, 8-12.
- Herbertson, A. J. (1905): The major natural regions -an essay in systematic geography:- *Geogr. J.* **25**, 300-312.
- Hill, M. O. (1974): Correspondence analysis -a neglected multivariate method:- *Appl. statist.* **23** (3), 340-354.
- Hubert, H. (1920): Le dess  chement progressif en Afrique occidentale fran  aise: *Bull. Com. Etud.*

*Hist. Et Sci. A. O. F.*, 401-467.

- Ive, J. R., Walker, P. A. and Cocks, K. D. (1992) : Spatial modeling of dryland salinization potential in Victoria, Australia : *Land degrad. & rehabil.* **3**, 27-36.
- James, P. E. (1935) : *An outline of geography*: Ginn and Company, Boston, 475pp.
- Jones, B. (1938) : Dessication and the West African colonies : *Geogr. J.* **91**, 401-423.
- Kalra, N. K. & Joshi, D. C. (1996) : Potentiality of Landsat, SPOT and IRS satellite imagery, for recognition of salt affected soils in Indian Arid Zone : *Int. J. Remote sens.* **17** (15), 3001-3014.
- Kessler, J. J. (1994) : Usefulness of the human carrying capacity concept in assessing ecological sustainability of land-use in semi-arid regions : *Agricul. ecosystems and environ.* **48**, 273-284.
- Köppen, W. (1918) : Klassifikation der Klimate nach Temperatur, Niederschlag und Jahreslauf: *Pet. Mitt.* **64**, 193-203, 243-248.
- Lamprey, H. F. (1975) : Report of the desert encroachment reconnaissance in Northern Sudan: 21 Oct.-10 Nov., 1975, UNESCO/UNEP, 16p. (mineogr.) Reprinted in *Desertification control bull.* **17** (1988), 1-7.
- Le Houérou, H. N. (1977) : The nature and causes of desertification: Grantz, M. H. ed. *Desertification: environmental degradation in and around arid lands*: Westview Press, Boulder, 17-38.
- MacBryde, G. (1998) : Effects of range management on the lower Rio Grande watershed : *J. Arid environ.* **40**, 217-233.
- Machin, J. & Navas, A. (1995) : Land evaluation and conservation of semiarid agrosystems in Zaragosa (NE Spain) using an expert evaluation system and GIS : *Land degrad. & rehabil.* **6**, 203-214.
- Matthews, E. (1983) : Global vegetation and land use -new high resolution data bases for climate studies-: *J. Clim. and appl. meteorol.* **22**, 474-487.
- Mainguet, M. (1991) : *Desertification*: Spriger-Verlag, Paris, 306pp.
- Marsh, S. E., Walsh, J. L., Lee, C. T., Beck, L. R. and Hutchinson, C. F. (1992) : Comparison of multi-temporal NOAA-AVHRR and SPOT-XS satellite data for mapping land-cover dynamics in the west African Sahel : *Int. J. Remote sens.* **13** (16), 2997-3016.
- Matsuoka, Y., Kainuma, M. and Morita, T. (1995) : Scenario analysis of global warming using the Asian-Pacific Integrated Model (AIM) : *Energy policy* **23** (4/5), 357-371.
- Miller, S. T., Brinn, P. J., Fry, G. T. and Harris, D. (1994) : Microtopography and agriculture in semi-arid Botsuwana -I. Soil variability-: *Agricul. water management* **26** (1-2), 107-131.
- Milton, S. J., Dean, W. R. J., du Plessis, M. A. and Siegfried, W. R. (1994) : A conceptual model of arid rangeland degradation -the escalation cost of declining productivity- : *BioScience* **44**

(2), 70-76.

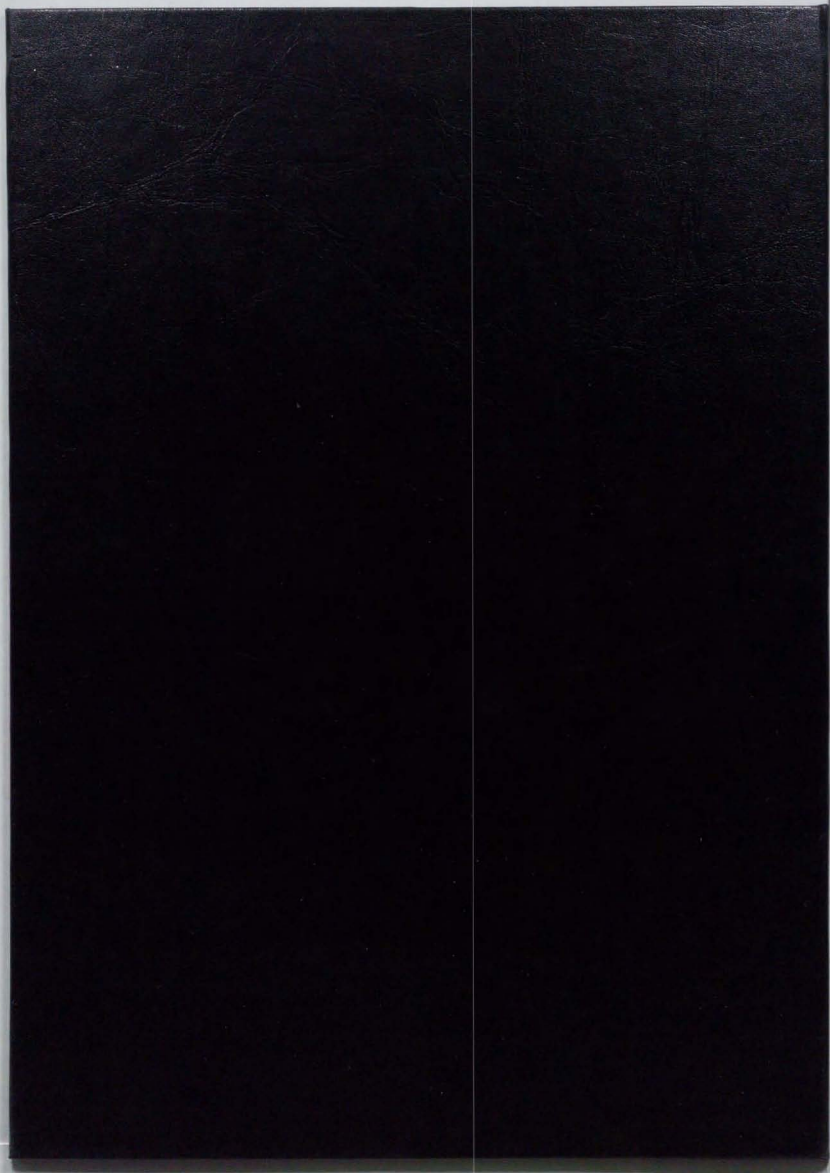
- Mouat, D., Lancaster, J., Wade, T., Wickham, J., Fox, C., Kepner, W. and Ball, T. (1997): Desertification evaluated using an integrated environmental assessment model: *Environ. Monit. Assess.* **48**, 139-156
- Otomoshio, J. B. (1985): The separate contribution of line squalls, thunderstorms and the monsoon to the total rainfall in Nigeria: *J. Climatology* **5**, 543-552.
- Pech, R. P., Davis, A. W., Lamacraft, R. R. and Graetz, R. D. (1986): Calibration of Landsat data for sparsely vegetated semi-arid rangelands: *Int. J. Remote sens.* **7** (12), 1729-1750.
- Pickup G., Chewings V. H. and Nelson D. J. (1993): Estimating changes in vegetation cover over time in arid rangelands using Landsat MSS data: *Remote sens. environ.* **43**, 243-263.
- Potdar, M. B., Pokharna, S. S. and Sridhar, V. N. (1993): Response of vegetation in the Thar Desert to monsoon rainfall—an investigation using NOAA AVHRR and meteorological data: *J. Arid environ.* **25**, 19-26.
- Proctor, I. D. (1990): The limits to growth debate and future crisis in Africa—A case-study from Swadiland: *Land degrad. & rehabil.* **2**, 135-155.
- Qi, J., Chehbouni, A., Huete, A. R., Kerr, Y. H. and Sorooshian, S. (1994) : A modified soil adjusted vegetation index : *Remote sens. environ.* **48**, 119-126.
- Rasmussen, M. S. (1992): Assessment of millet yields and production in northern Burkina Faso using integrated NDVI from the AVHRR: *Int. J. Remote sens.* **13** (18), 3431-3442.
- Raina, P. Joshi, D. C. and Kolarkar, A. S. (1993): Mapping of soil degradation by using remote sensing on alluvial, Rajasthan, India: *Arid soil res. & rehabil.* **7** (2), 145-161.
- Satoh, S. (1984): The Rendille subsistence groups based on age-system: *African study monographs*, Supplementary Issue **3**, 45-57.
- Shirato, Y., Taniyama, I., Zhang, T. and Zhao, H. (1998): Land degradation and soil properties in Naiman, Inner Mongolia, China: *Proc. Japan-China Workshop on land evaluation of prevention remedies for desertification*, 24-25 Feb. 1998, Tsukuba, Japan.
- Sowunmi, M. A. (1981): Aspects of late Quaternary vegetational changes in West Africa: *J. Biogeogr.* **8**, 457-474.
- Stebbing, E. P. (1935): The encroaching Sahara: *Geogr. J.* **85**, 506-524.
- Takeuchi K., Katoh K., Nan Y. and Kou Z. (1995): Vegetation cover change in desertified Kerqin Sandy Lands, Inner Mongolia: *Geogr. Rep. Tokyo Metropol. Univ.* **30**, 1-24.
- Takeuchi, K., Tsunekawa, A. and Ikeguchi, H. (1990): Numerical classification of natural regions of Japan: *Geogr. Rep. Tokyo Metropol. Univ.* **25**, 269-287.
- Tanaka, J. (1987) : The recent changes in the life and society of the Central Kalahari San : *African study monographs* **7**, 37-51.
- Tengberg, A. (1995) : Nebkha dunes as indicators of wind erosion and land degradation in the Sahel

- zone of Burkina Faso : *J. Arid environ.* **30** (3), 265-282.
- UNEP (1992): *World atlas of desertification*: Edward Arnold, London, 69pp.
- UNEP & ISRIC (1990): *World map on status of human-induced soil degradation*: Boom-Ruygrok, Haarlem, The Netherlands.
- United Nations (1994): United Nations Convention to Combat Desertification in Those Countries Experiencing Serious Drought and/or Desertification, Particularly in Africa: Final Text A/AC.241: 12 September 1994. 外務省 (仮訳)「深刻な干ばつ又は砂漠化に直面している国 (特にアフリカの国) における砂漠化防止のための国際連合条約」99pp.
- U. N. Secretariat of the Conference on Desertification (1977): An overview desertification -Its causes and Consequence: Pergamon Press, New York, 1-61.
- Vinogradov, B. V. (1995): Aerospace monitoring of desertification dynamics: *Desertification control bull.* **27**, 35-44.
- Wang, P. (1984): Progress in Late Cenozoic palaeoclimatology of China: a brief review. Whyte, R. O. (ed.): *The evolution of East Asian environment Vol. 1: geology and Palaeoclimatology*, Center of Asian Studies, University of Hong Kong, 165-187.
- Wang, Z. L., Wang G. & Liu, X. M. (1998): Germination strategy of the temperate sandy desert annual chenopod *Agriophyllum squarrosum* : *J. Arid environ.* **40** (1) 69-76.
- WMO (1983): Meteorological aspects of certain process affecting soil degradation -especially erosion-: Tech. Note No. 178.
- Yoshino, M. M. (1980): Natural regions of Japan: *GeoJournal* **4**, 161-172.
- Zhu, Z. (1984): Desertification processes and their reversing in arid and semi-arid lands in China: *Proc. International Symposium on Integrated Control of Land Desertification MAB.* (China) 19-26.
- Zhu, Z. & Liu S. (1983): *Combating desertification in arid and semi-arid zones in China*: Institute of Desert Research, Academia Sinica Lanzhou China 69pp.
- Zhu, Z., Wand, X., Wu, W., Kang, G., Zhu, C., Yao, F. and Wang, T. (1992): China -Desertification mapping and desert reclamation. In UNEP: *World atlas of desertification*, Edward Arnold, 46-49.
- Zhu., Z., Zou., B., Di., X., Wang., K., Chen, G. and Zhang, J. (1988): *Desertification and rehabilitation -case study in Horqin Sandy Land* : Institute of desert research academia sinica. Lanzhou, 113pp.
- 中国地图出版社 (1987) : 「中国国勢地図」: 帝国書院, 東京, 135pp.
- 中国科学院沙漠研究所 (1984) : 奈曼旗・庫倫旗・科尔沁左翼后旗沙漠化類型圖
- 中国科学院南京土壤研究所主編 川瀬金次郎・菅野一郎訳 (1983) : 中国土壤 —改良・性質・肥沃度・成分分類— : 博友社, 1020pp.
- 大日本帝国陸地測量部 (1933) : 地形図 1 0 万分の1 「開魯」「チェルト王府」「ホル

- スタイ「周 營子」「朝哈拉哈王府」「阜新」「東土默特王府」  
大日本帝國陸地測量部 (1935) : 地形図 10 万分の 1 「メンチカスーム」「ネエム營子」  
「閩包營子」「梧桐好懶」「興隆地」「宝国」 「高家梁」  
遠藤邦彦 (1981) : 砂漠: 町田貞・井口正男・貝塚爽平・佐藤正・樞根勇・小野有五編: 「地  
形学辞典」, 二宮書店, 215p.  
井手久登・武内和彦 (1985) : 「自然立地的土地利用計画」: 東京大学出版会, 東京 227pp.  
藤 則雄 (1975) : 北陸の海岸砂丘: 第四紀研究 14, 195-220.  
藤原 彰 編 (1992) : 満州および関東州: 十五年戦争秘録資料集第 30 集 外邦兵要地図  
整備誌: 不二出版, p465-478.  
今川俊明 (1996) : 宇宙から見た中国東部の砂漠化: 土壌の物理性 74, 29-37.  
岩崎一孝 (1984) : オーストラリアにおける降水量変動の長期傾向の地域差: 地学雑誌, 93  
(1), 15-29.  
林 一六 (1990) : 「植生地理学」: 大明堂, 東京, 269pp.  
門村 浩 (1988) : 砂漠化研究の系譜と課題: 地理学評論 61 (A) 2, 205-228.  
門村 浩 (1991a) : 過去 2 万年の環境変動: 門村浩・武内和彦・大森博雄・田村俊和 編「環  
境変動と地球砂漠化」: 朝倉書店, 東京, 54-63.  
門村 浩 (1991b) : サハラ南縁地帯における歴史時代の干ばつと砂漠化: 門村浩・武内和  
彦・大森博雄・田村俊和 編「環境変動と地球砂漠化」: 朝倉書店, 東京, 64-80.  
環境庁 (1998a) : 「砂漠化に対処するための国連条約」の受諾について: Web サイト  
<http://www.eic.or.jp/kisha/199809/46204.html> (1998.12.8 アクセス)  
環境庁 (1998b) : 砂漠化に対処するための国連条約第 2 回締約国会議について: Web サイ  
ト <http://www.eic.or.jp/kisha/199811/53496.html> (1998.12.8 アクセス)  
建設省国土地理院 (1970) : 測量地図百年史: (社) 日本測量協会, p37, p223-230.  
劉新民・趙哈林・徐 (1983) : 科尔沁草原生態系統破壞与恢復机制: 劉新民・趙哈林 主編  
「科尔沁沙地生態環境綜合整治研究」: 甘肅科學技術出版社, 蘭州, 302pp.  
真木太一 (1996) : 「中国の砂漠化・緑化と食糧危機」: 信山社, 東京, 191pp.  
増田拓朗・小林達明・吉川 賢・森本幸裕・小橋澄治 (1988) : 毛烏素沙地における土壌水  
分条件: 緑化研究 10, 30-41.  
松井 健 (1988) : 「土壌地理学序説」: 築地書館, 東京, 316pp.  
森昌弘・古川郁夫 (1992) : 中国北東部科尔沁沙地の砂漠化動態の解析: 日本砂丘学会誌 39  
(2), 12-19.  
森田恒幸・松岡讓 (1996) : 地球環境研究の総合化に向けたモデリングの動向 - 科学と政  
策をつなぐプラットフォームづくりの試み - : 地球環境 1 (1) 63-71.  
奈曼旗統計局 (1968-1976, 1980, 1982-1987, 1993-1995) : 奈曼旗国民経済統計資料摘要  
根本正之・魯曉雲・李勝功・姜銘・劉新民 (1992) : 内蒙古東部半乾燥地の砂丘植生にお  
よぼす放牧の影響: 日本草地学会誌 38 (1), 44-52.

- 根本正之・大黒敏哉・原崗芳信・宮田明 (1995): 植物群落での微気象及び植物生理・生態機能に関する実験及び調査: 科学技術振興調整費, 砂漠化機構の解明に関する国際共同研究 第Ⅱ期成果報告書, 303-357.
- 大黒敏哉 (1997): 「中国北東部の草原地域における放牧活動が土地・植生の退行および回復に及ぼす影響」: 東京大学大学院農学生命科学研究科博士論文 193pp.
- 大黒敏哉・根本正之 (1997): 中国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: ランドスケープ研究 60 (5), 495-500.
- 大森博雄・遠藤邦彦・上杉陽・堀越増興 (1987): サウスオーストラリア州南東部ミリセント付近の海岸における完新世砂丘の層序と地形発達史: 地学雑誌 96 (1), 1-22.
- 大森博雄・恒又 (1990): 中国黄土高原清水河上流域の黒色腐食質土層の形成期と更新世末期以降の環境変化: 地学雑誌 99 (4), 307-329.
- 大森博雄・武内和彦 (1991): 降水量変動と砂丘の再活動: 門村浩・武内和彦・大森博雄・田村俊和 編「環境変動と地球砂漠化」: 朝倉書店, 東京, 179-190.
- 大坪国順 編 (1997): LU/GEC プロジェクト報告書—アジア・太平洋地域の土地利用・被覆変化の長期予測 (Ⅱ): 環境庁国立環境研究所 地球環境研究センター, つくば, 319pp.
- 石敏俊・田中洋介・趙哈林 (1998): 農牧地域における土地利用の展開と砂漠化問題—中国・ホルチン沙地の事例—: 筑波大学農林社会経済研究 15, 1-26.
- 嶋田義仁 (1992): 人間の生産活動から見たサハラ南緯地帯の乾燥化—マリ国の事例—: 砂漠研究 2, 1-17.
- 総務庁統計局編 (1990): 国際統計要覧 1990: 大蔵省印刷局, 東京, 2-7.
- 鈴木秀夫 (1977): 地理学の風土: 地理 22 (11), 11-18.
- 武内和彦 (1996): 東アジアの土地荒廃と持続的土地利用システムの確立: 農村計画学会誌 14 (4), 3-6.
- 武内和彦・大森博雄 (1988): 植生から見たオーストラリア半乾燥地域の「砂漠化」現象: 地理学評論 61 A (2), 124-142.
- 田中真吾 (1973): 自然地域区分: 「世界の自然環境」: 大明堂, 東京, 61-65.
- 恒川篤史・武内和彦・立入 郁 (1998): 土地荒廃と生物資源の持続的利用: 武内和彦・田中 学 編「講座 地球環境学 6 生物資源の持続的利用」: 岩波書店, 東京, 59-95.
- 内蒙古自治区統計局編 (1996): 内蒙古統計年鑑: 中国統計出版社, 北京, 647pp.
- 山本荘毅 (1983): 「地下水調査法」: 古今書院, 東京, 490pp.
- 朱 震達・劉恕 (1981): 「中国北方地区の砂漠化過程及其地理区劃」: 林業出版社, 83pp.
- 朱 震達・劉恕・鄧醒民 (1989): 「中国的砂漠化及其地理」: 科学出版社, 北京, 126pp.
- 朱 震達・陳広場 (1994) 「中国土地沙質荒漠化」: 科学出版社, 北京, 250PP.

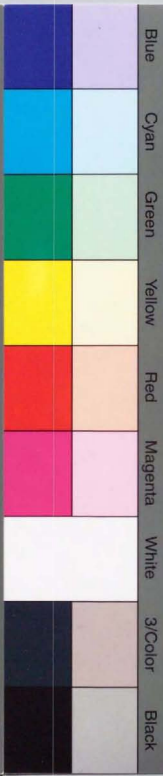




Kodak  
cm  
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19

# Kodak Color Control Patches

© Kodak, 2007 TM Kodak



# Kodak Gray Scale



© Kodak, 2007 TM Kodak

A 1 2 3 4 5 6 M 8 9 10 11 12 13 14 15 B 17 18 19

