

G-2 砂漠化指標による砂漠化の評価とモニタリングに関する総合的研究

(4) 中国における砂漠化に伴う環境資源変動評価のための指標開発に関する研究

独立行政法人農業環境技術研究所

地球環境部 食料生産予測チーム

谷山一郎・白戸康人

生物環境安全部 植生研究グループ 景観生態ユニット

大黒俊哉

環境化学分析センター 放射性同位体分析研究室

藤原英司

筑波大学 農林学系

石 敏俊

〈研究協力者〉独立行政法人国立環境研究所国際室

清水英幸

東京大学大学院農学生命科学研究科

恒川篤史

平成 13～15 年度合計予算額 35,029 千円

(うち、平成 15 年度予算額 7,966 千円)

上記の予算額には、間接経費 8,084 千円(1,839 千円)を含む

[要旨]

内蒙古東部ホルチン沙地ナイマン旗における植生、土壌のモニタリングから退行、回復の各ステージでの土壌と植生の指標を抽出し、それらの相互関係を解析した。退行過程と回復過程をあらわす指標は、植生では種組成、土壌特性では有機炭素と細粒質があげられ、これらは相互に関連しながら退行、回復することが示された。内蒙古東部の広域調査により、植生タイプの差異は土壌タイプおよび降水量により説明でき、脆弱性が高いとされる砂地域の植生は、地理的に多少隔離していても組成的な類似性が高いことを明らかにした。一方、土壌肥沃度を規定する最も重要な制限因子は可給態 N、ついで可給態 P と陽イオン交換容量(CEC)であり、いずれも植生との相関が有意に高いことから、植生指標の情報と補完することにより、土壌タイプごとの土壌肥沃度評価が可能と考えられた。また、100 万分の 1 スケールの植生図および土壌図を用いたオーバーレイによる解析により、上記現地調査の結果が広域に適用可能であることが示唆され、ナイマンで抽出された植生では種組成、土壌では有機炭素と細粒質という指標は、潜在的な土地条件が異なる比較的広い地域においても適用できることが示唆された。

従来土壌侵食量測定に用いられてきた ^{137}Cs 法は、地表の侵食や攪乱が大きい砂漠化域では核実験等に由来する ^{137}Cs が土壌に残存しておらず、適用が困難な場合が多かったが、 ^{210}Pb は核爆発由来の ^{137}Cs とは異なり天然の降下物であるため、侵食により一度土壌表層部から失われても、新たに集積するという利点があり、土壌中の降下 ^{210}Pb を指標とする方法は、 ^{137}Cs が残存していない砂漠化域土壌に対しても適用可能であることが示された。

内蒙古中部・東部の村落での社会経済調査と農家経済モデルの解析結果から、土壌侵食防止対策として退耕還林還草政策の効果、特に退耕還林還草地の補助金付加に伴う土壌侵食防止効果をモデルから推測した。また、貧困そのものより貧困から脱却するための農家行動が環境劣化の一因となっていること、砂漠化防止と草原保全のため、放牧圧や家畜頭数を制限する環境政策と、技術進歩や信用供与を促進する農村開発政策を連携して実施する必要があること、農村の都市化による非農業就業機会の増加が環境負荷軽減・環境保全促進に効果的なこと、などが推測された。

[キーワード] 環境資源、砂漠化、社会経済、中国、モニタリング

1. はじめに

中国では、主として人間の生産活動によって、風食、水食および塩類集積が引き起こされ、特に、北部の半乾燥地では広範囲に砂漠化が進行している。砂漠化に直面した地域の保全や、砂漠化した土地の修復に際しては、地域に特有の砂漠化プロセスの解明とともに、適切な砂漠化評価指標に基づいたモニタリングが不可欠である。砂漠化のモニタリングはこれまで、主として植物生産力の量的な変動を指標として行われてきた。しかし、砂漠化は、植生構造、土壌特性等の質的な変化を伴うことが明らかにされつつある。そこで、砂漠化に関わる植生・土壌等の自然環境資源の質的指標を抽出することが精度の高いモニタリングを行う上で急務の課題となっている。また、砂漠化の進行にはこうした自然的土地条件とともに、社会経済条件が深く関与しているため、社会経済的条件・政策と環境資源変動との関係を定量的に解明することが課題となっている。

2. 研究目的

本サブテーマは、中国内蒙古地域を対象として、生物生産力による広域評価を補完する環境資源指標およびその変動に関わる社会経済指標を開発することを目的とする。このため、自然的土地条件、社会経済条件、土地利用等に関する現地調査を行い、①砂漠化に伴う植生、土壌等の環境資源変動の実態とメカニズムを長期モニタリングにより把握するとともに、周辺域の調査により砂漠化、回復程度を示す指標の抽出、提示を行う。②砂漠化の進行に伴い、土壌の一般理化学性の変化では検出できない風食のごく初期段階で起こる土壌中の微細粒子の移動を検知するための指標として、天然に空中降下し微細粒子に吸着する放射性核種 ^{210}Pb を活用することの有効性を検討する。③土壌および植生等の環境資源変動と社会経済・政策との関係解明を行い、砂漠化防止のための有効な対策と自然、社会的条件の関係を明らかにする。

なお、サブテーマ1の広域モニタリング手法構築・検証のために必要な生物生産力(NPP)などの現地のモニタリング情報を提供し、砂漠化統合モデル開発のために必要な自然資源・社会経済データを共有すると共に、モデルの出力結果から砂漠化防止対策に対する農家の評価および評価に影響を与える要因について解析した。また、サブテーマ2との間では砂漠化植生指標に関する情報交換を行った。

3. 土壌・植生指標に基づく砂漠化評価

(1) 目的

中国内蒙古中部の半乾燥地域(フフホト周辺)および東部乾性半湿潤地域(ホルチン沙地周辺)を対象に、砂漠化による植生、土壌等の変動を把握し、砂漠化程度およびその回復程度を表す指標を抽出することにより、NPPなどの量的指標による砂漠化の広域評価を補完する質的指標を開発する。このうちホルチン沙地のナイマンにおいては、現地に設けた試験区内でのモニタリングにより、植生、土壌の荒廃や回復過程の実



図1 モニタリングサイト地点

態とメカニズムの解明を行った上で荒廃、退行程度をあらわす指標を抽出する。また、フフホト周辺域における調査により、ナイマンで抽出した指標の適用を検討する。

(2) 研究方法

①内蒙古東部ナイマンにおけるモニタリング調査：

内蒙古東部乾性半湿潤地域のナイマン(図1)で長期間継続して実施している旧放牧試験区、および砂丘植生回復試験区において、荒廃化した放牧地や固定化した流動砂丘における植生・土壌の回復過程や、畑地化による土壌劣化過程の把握のための植生、地形、土壌モニタリング調査を継続した。

流動砂丘上に設置した砂丘植生回復試験区においては、約2 haの面積の中に含まれる大小の砂丘を1996年に牧柵で囲い、さらに草方格(コムギのわらを格子状に埋設)、砂丘固定植物の植栽(ヨモギ属の灌木、*Artemisia Halodendron*を列状に植栽)など、現地で開発され普及している砂丘固定対策技術を適用した。そこでの地形、土壌、植生の回復過程モニタリングを継続した。

平坦な沙地草原に設置した旧放牧試験区では1992年から1996年まで綿羊の放牧密度を変えて放牧を行い、土壌、植生の退行過程を調査していたが、放牧により荒廃した草地を1997年から禁牧に切り替えた後の土壌、植生の回復過程モニタリングを継続した。

さらに、上記旧放牧試験区に隣接する草地が開墾された後の畑地化による地形、土壌の変化をモニタリングした。

地形調査については、光波式測量機械を用いて3次元座標測量を行った。土壌は深度別にサンプルを採取し、一般理化学性を分析した。植生については、種組成、群落高、植被率を調査した。

②内蒙古中部フフホト周辺における広域調査：

13年度に、内蒙古中部地域の踏査を行い、28地点において土壌、植生を調査した。植生については、種組成・群落高・植被率・優占種個体群(低木)の分散構造に関する調査を行った。土壌については、断面記載を行い、層位ごとにコア試料と攪乱試料を採取し、一般理化学性(粒径組成、有機炭素、全窒素、可給態窒素、可給態リン酸、交換性カリウム、CEC等)を分析した。さらに、指標開発および地域モデル構築のためのデータベース構築に必要な資料・文献を収集した。これらの結果に基づき、対象地域を内蒙古高原域、砂地域、黄土高原域に区分し、内蒙古中部における重点調査地域を、オールドス高原准格爾旗(ジュンガル)、内蒙古高原蘇尼特右旗(ソニド)に設定した(図1)。ジュンガルは黄土高原域、ソニドは内蒙古高原域を代表する地点として設定した。

14、15年度に、上記の各地域区分ごとの退行・回復のパターンと植生、土壌指標に関する詳細な調査を、上記の重点調査地域を中心に行った。植生については、各調査地点ごとに1 m×1 mの方形区を数カ所設定し、種組成・群落高・植被率、分光放射、刈り取りによる地上部乾重を測定した。土壌は、断面記載を行い、層位ごとに試料を採取し、一般理化学性を分析した。

(3) 結果・考察

①内蒙古東部ナイマンにおけるモニタリング調査：

内蒙古東部(ホルチン沙地ナイマン旗)における回復試験地では、草方格、固砂植物の植栽などの対策を行うことにより砂丘は速やかに固定され表層にはクラストが形成されること、クラスト

部分は下層に比べて有機物や細粒質に富んでいること、が明らかになった(図2)。植生ではアカザ科の一年生植物優先から多年生植物を中心とする植物群落に移行し、回復が進んでいることが確認された(図3)。これらの結果から、禁牧と砂丘固定技術の適用により土壌と植生がともに回復する過程が明らかになり、土壌では表層への有機物と細粒質の蓄積が、植生では種組成の変化が、それぞれ回復程度の指標となることが示された。また、過去に毎年約10 mずつ移動していた隣接する流動砂丘が、2000年以降ほとんど移動しなかったのは、2000年春からの禁牧政策により付近一帯の植生が回復したためと考えられる(図4)。よって、草方格や砂丘固定植物の植栽と組み合わせない禁牧単独でも、砂丘固定と土壌、植生の回復に一定の効果があることが示唆された。

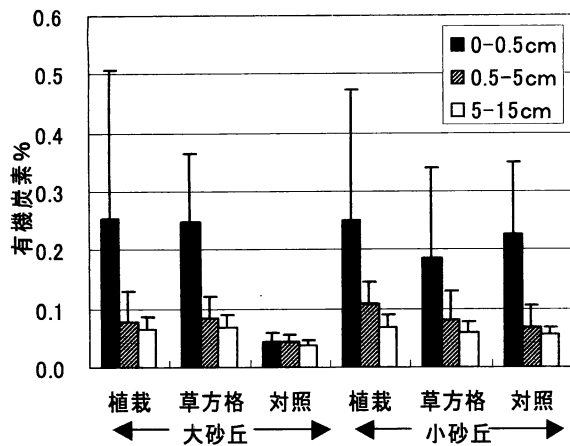


図2 回復試験区における有機炭素含量
流動砂丘において砂丘固定技術を適用後6年目の状態を示す。

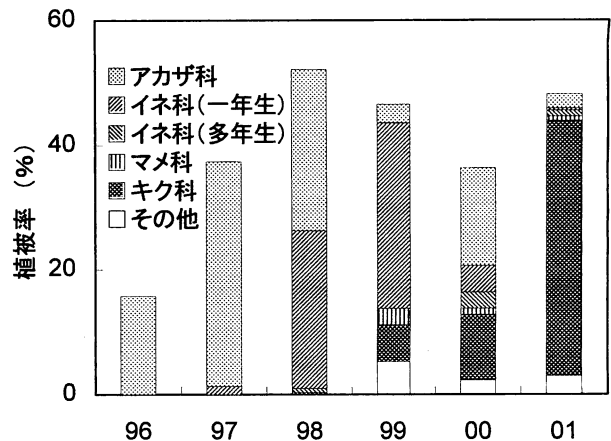


図3 奈曼旗流動砂丘地・草方格処理区における種構成の変化

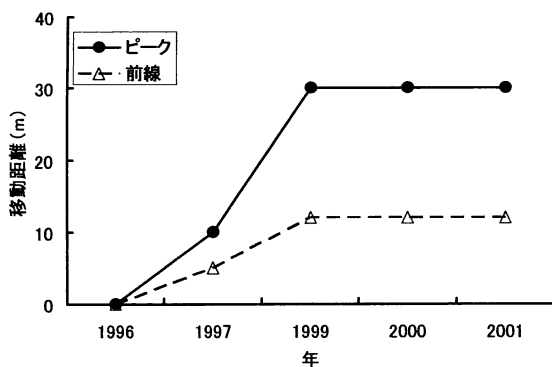


図4 奈曼旗砂丘植生回復試験区に隣接する流動砂丘のピークおよび前線の移動距離

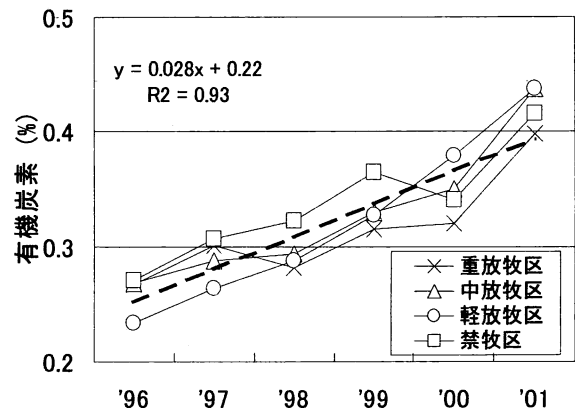


図5 放牧草地における有機炭素含量
荒廃草地を禁牧(97年~)とした後の推移を示す。

旧放牧試験地では、禁牧によって荒廃草地が4年目にほぼ回復し、草地の炭素集積速度が年間約0.03%であることが確認されたが、これには微細粒子の捕捉による炭素付加があると推定され

た(図5)。よって、土壌の回復程度は、有機炭素と細粒質の増加を指標として評価できることが明らかとなった。植生については、上記の砂丘植生回復試験区と同様、回復に伴い、アカザ科の一年生植物優先から多年生植物を中心とする植物群落に移行することがすでに報告されている。また、この旧放牧試験区に隣接する草地が開墾され、畑地に変化した後の地形と土壌の調査により、畑地化が風食を促進させ、土壌表層の有機炭素が減少することが示された。さらに、過去にナイマン周辺の植林地において植林後の年数と土壌特性の関係を調査した結果、年数とともに土壌表層の有機物と細粒質が増加し、可給態窒素などの土壌肥沃度指標が増加することも報告されている。以上の結果から、退行過程と回復過程をあらわす指標は、植生では種組成、土壌特性では有機炭素と細粒質があげられ、これらは相互に関連しながら退行、回復することが示された。

②内蒙古中部周辺域における調査：

内蒙古中部の草原地域は、主として降水量等の気候的条件によっていくつかの植生タイプに区分された(表1)。温性草原域から温性荒漠草原域にかけての植生タイプは、主にイネ科 *Stipa* 属およびマメ科 *Caragana* 属の出現・優占程度によって特徴づけられるが、最も乾燥した温性草原化荒漠域では、アカザ科の灌木(*Reaumuria* sp., *Salsola* sp.)が優占種となることが確認された。一方、黄土高原域の植生は、*Thymus serpyllum* や、暖地性のイネ科である *Stipa bungeana* によって特徴づけられることが確認された。さらに、クブチ沙漠やムウス沙地などの風積砂土の分布域では、キク科ヨモギ属の *Artemisia ordosica*、*Caragana* spp.の優占する灌木タイプが大半を占めるとともに、砂丘間低地では *Carex duriuscula* を主体とする湿性の植生タイプが認められた。また、黄河流域の沖積低地では、草甸とよばれる湿性草地在りみられ、本来はイネ科の多年生高茎草本が優占するが、一部では塩類集積が進み、アカザ科の *Suaeda* spp.やハマビシ科の *Nitraria* spp.等の耐塩性植物がみられた。以上から、内蒙古中部地域の植生分布パターンは、気候的条件とともに、黄土や風積砂土のような土地的条件を組み合わせた要因によってほぼ説明できると判断された。

表1 内蒙古中部地域の区分と諸属性

草原タイプ	降水量 (mm)	主な出現種			土壌
		<i>Stipa</i> spp.	<i>Caragana</i> spp.	その他の指標種	
I-a 温性草原	300~400	<i>S. krylovii</i> <i>S. grandis</i>	<i>C. microphylla</i>	<i>Leymus chinensis</i>	栗石灰土
I-b 温性草原 (黄土高原)	300~400	<i>S. bungeana</i>	<i>C. microphylla</i>	<i>Thymus serpyllum</i>	栗褐土
I-c 温性草原(砂地)	300~400	—	<i>C. korshinskii</i>	<i>Artemisia ordosica</i>	風積砂土
II 温性荒漠草原	150~300	<i>S. klemenzii</i>	<i>C. stenophylla</i> <i>C. pygmea</i> <i>C. intermedia</i>	<i>Allium polyrrhizum</i> <i>Asparagus gobicus</i> <i>Lagochilus ilicifolius</i>	栗石灰土 ~ 棕石灰土
III 温性草原化荒漠	100~150	—	—	<i>Reaumuria soongorica</i> <i>Salsola passerina</i>	棕石灰土
IV 低地草甸	150~400	—	—	<i>Achnatherum splendens</i> <i>Nitraria</i> spp.	潮土 ~塩土

植生調査で得られたデータを用いて、Detrended correspondence analysis とよばれる統計的方法(反復平均法を改良し、主成分分析で問題となる arch effect 等の歪みを除去した序列化手法)により序列化を行い、種組成からみた調査地点間の類似性を解析した。その結果、植生タイプの差異は、土壌タイプおよび気温・降水量により説明できることが分かった。また、TWINSpan とよばれる統計的方法(区分種を利用して二分割によって階層的分類を行う方法)により調査地点の分類を行った結果、脆弱性が高いとされる砂地域の植生は、地理的に多少隔離していても組成的な類似性が高いことが分かった。このことから、同グループの区分種である *Artemisia* spp. (*A. halodendron*、*A. intramongolica*、*A. ordosica*)およびアカザ科一年草は、砂地域の砂漠化(砂丘再活動)を指標する比較的広いスケールでの種群と考えられた(図6)。一方、砂地域以外のステップ草原での植生退行指標としては、バイオマスの減少、*Artemisia frigida* および *Caragana* spp.の出現が適切と考えられた。

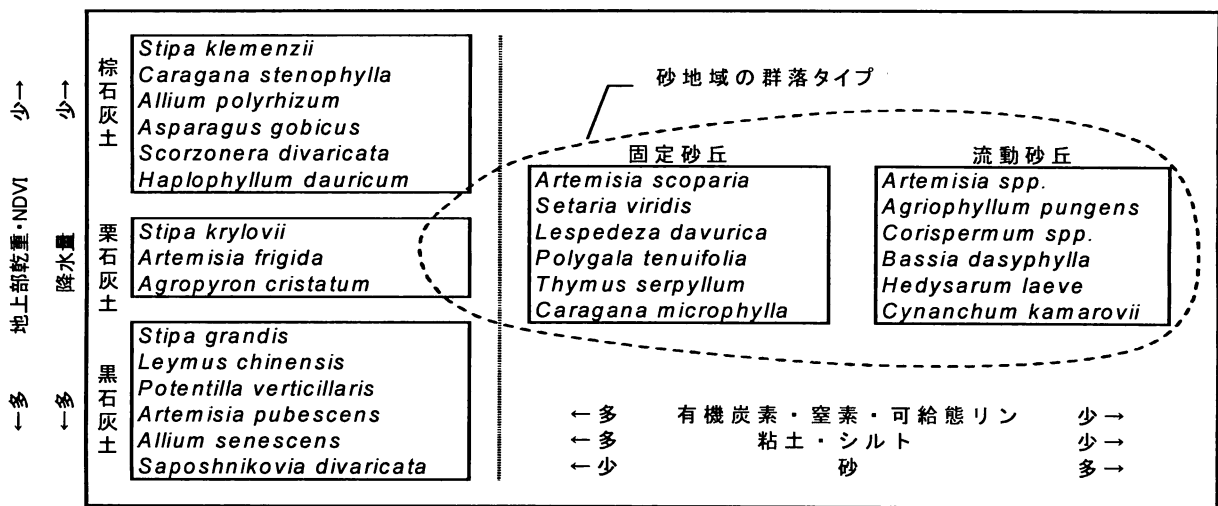


図6 指標種解析(Indicator species analysis)により抽出された指標種群および対応する土壌・土地タイプ クラスター分析により区分された5群落タイプごとに、DCA序列化による座標平面上に模式的に示した。矢印とともに示した項目は、各軸と相関の高い(p<0.01)要因を示す。

表2 内蒙古中部の土壌タイプ別表層の主な理化学性の平均値

中国 土壌名	粒径組成 %				有効水 vol.% pF1.8-4.2	pH H ₂ O	有機 炭素 %	可給態 N mg/kg	可給態P P ₂ O ₅ mg/kg	交換性K K ₂ O mg/kg	CEC cmol/kg
	粘土	シルト	細砂	粗砂							
棕石灰土	17	11	51	22	23.5	8.4	0.40	16.4	173.1	366.1	16.2
栗石灰土	13	9	47	31	25.6	8.2	0.69	18.9	114.8	274.4	10.4
栗褐土	5	7	75	13	29.5	8.4	0.26	19.8	50.6	137.1	8.4
風積砂土	5	3	55	38	19.5	8.2	0.27	16.9	72.3	113.8	4.3
潮土	6	11	81	1	32.0	9.5	0.14	16.3	43.5	96.4	5.1

土壌は、降水量と植生タイプに対応した成帯性の栗石灰土と棕石灰土、黄土および砂質堆積物などの特徴的な母材からなる栗褐土、風積砂土および黄河の沖積性堆積物からなる潮土が分布し

ていた。この中で最も肥沃度が高い栗石灰土でも、表層の有機炭素含量は1%以下のところがほとんどであり、この地域の土壤肥沃度は総じて低いといえる(表2)。

これらの特性のうち、土壤肥沃度を規定する最も重要な制限因子は可給態Nであり、ついで可給態Pと陽イオン交換容量(CEC)であった。これらの3因子とそれらを規定する細粒質と有機物の含量が、砂漠化程度を評価する土壤特性指標と考えられた。なお、砂漠化/回復程度を評価する際の基準値は土壤タイプごとに設定する必要があるが、これらの土壤因子はいずれも、上記DCA序列化における1軸との相関が有意に高いことから、植生指標の情報と補完することにより、土壤タイプごとの土壤肥沃度評価が可能と考えられた。

植生指標および土壤指標の関連性を検討するために、100万分の1スケールの植生図(中国草地資源図)および土壤図(中国土壤図)をデジタル化し、オーバーレイによる解析を行った。その結果、土壤タイプ・土壤劣化の程度ごとに特定の優占種群との強い結びつきが認められた。したがって、植生-土壤の関係を用いることにより、比較的広いスケールでの砂漠化/回復の総合的評価が可能であると考えられた(表3)。

結論として、ナイマンで抽出された植生では種組成、土壤では有機炭素と細粒質という指標は、潜在的な土地条件が異なる地域でも適用できることが示された。今後は、これらの指標(Indicators)の、各地域(同一、あるいは類似の潜在的な土地条件をもつ地理的区分)における基準(Benchmark)の設定を行うことにより、砂漠化程度、あるいは回復程度を定量的に評価できると考えられる。

表3 植生(優占種)と土壤タイプの関連性

	栗石灰土	棕石灰土	石質土 粗骨土	灰褐土	低地土	潮土	レス由来 土壤	風沙土	
<i>Leymus chinensis</i>	+2	-2	-	-	+1	+2	+	-	
<i>Achnatherum splendens</i>	+2	-	-	-1	+1	+1	-	-	成帯性の土壤との結びつきが強い種群 それ以外の種群
<i>Stipa grandis</i>	+1	-	-	-	-	+	-	-	
<i>Stipa krylovii</i>	+2	-2	+2	+2	-	-	-	-1	
<i>Stipa klemenzii</i>	+2	+3	-1	-2	-1	-1	-1	-2	
<i>Stipa breviflora</i>	+	+2	-	-1	-	-	-	-	
<i>Stipa gobica</i>	+	-	+2	-	-	-	-	-	
<i>Stipa bungeana</i>	-	-1	+	+	-	+	+2	+	
<i>Artemisia frigida</i>	+3	-2	-	-1	-	-	+	-2	→ 栗石灰土域の退行指標種
<i>Cleistogenes squarrosa</i>	+1	-	+	-	-	-	-	-	
<i>Artemisia intramongolica</i>	-1	-2	-	-	-	-	-	+2	→ 風沙土域の退行指標種
<i>Artemisia ordosica</i>	-2	-2	-1	-1	+	+1	-	+3	
<i>Psammochloa villosa</i>	-	+	-	-	-	-	-	+2	
<i>Caragana tibetica</i>	-2	+2	-	-1	-	-	-	-1	
<i>Iris bunge</i>	-1	+2	-	-	-	-	-	-	
<i>Kalidium foliatum</i>	-1	+2	-	-	+	-	-	-	乾燥地土壤との結びつきが強い種群
<i>Reaumuria soongorica</i>	-1	+2	-	-	-	-	-	-	
<i>Salsola laricifolia</i>	-1	+2	+	-	-	-	-	-	
<i>Salsola passerina</i>	-1	+2	-	-	-	-	-	-	
<i>Nitraria tangutorum</i>	-	+1	-	-	-	-	-	-	
<i>Artemisia gmelinii</i>	-1	-2	+2	+2	-	-	+2	-	地形要因(山地性・低地性)との結びつきが強い種群
<i>Carex lanceolata</i>	-	-1	+	+2	-	-	+1	-	
<i>Suaeda spp.</i>	-1	-1	-	-	+2	+2	+	-	
<i>saline forb</i>	-1	-1	-	-	+2	+2	-	+	

表中の数字は四分点相関係数(ϕ)の階級値を示す。 $\pm 3: |\phi| \geq 0.5$ 、 $\pm 2: |\phi| \geq 0.1$ 、 $\pm 1: |\phi| \geq 0.05$ 、 $\pm: |\phi| < 0.05$

4. 土壌の放射性核種を指標とする砂漠化評価

(1) 目的

過度の放牧や耕作による砂漠化が進む中国北部の草原を対象に、降下放射性核種の土壌における賦存量を侵食強度の指標として利用できるかどうか検討する。 ^{137}Cs および ^{210}Pb は大気中のダストに由来し、降雨にともない地表に降下して土壌に蓄積される。蓄積量は風食による粗粒化(細粒質の減少)が進む土壌では少ないと考えられ、この性質をもとに砂漠化進行程度や防止・修復技術の施用効果を評価できる可能性がある。従来侵食量測定に用いられてきた ^{137}Cs 法は、地表の侵食や攪乱が大きい砂漠化域では核実験等に由来する ^{137}Cs が土壌に残存しておらず、適用が困難な場合があると予想されるため、土壌中 ^{137}Cs の分布調査と併せて、天然由来の放射性核種 ^{210}Pb を用いる手法の有効性を検討する。

(2) 研究方法

① 内蒙古東部ナイマン旗研究ステーションの近傍に草原を牧柵で囲った試験区を複数設置し、各区で放牧密度を変えて 1992 年から 1996 年まで綿羊の飼育を行った。2001 年に各区内の複数地点において、地表から深さ 5 cm までの土壌を一括採取し試料とした。これらの試料を乾燥後ゲルマニウム半導体検出器により ^{137}Cs および降下 ^{210}Pb の放射能を測定し、放牧圧や地形条件との関係を検討した。

② 2002 年 8 月に内蒙古中部、シリングロ盟南部の草原(N41~44°、E113~117°)を中心に現地調査を実施した。平均年間降水量がほぼ同等に 350 mm である複数の地点を選定し、各地点において地表から 2 cm または 5 cm おきに深さ 20 cm までの土壌を採取し深度別試料とした。また調査範囲内に分布する砂丘において同様に試料を採取した。これらの試料の放射能を測定し、深度別濃度および各地点における地表面積当たり蓄積量に換算した。

③ 農林水産研究情報センター(MAFFIN、SIDaB)より、NOAA 衛星による地球観測にもとづく NDVI(正規化植生指数)データの提供を受けた。これは約 1.1 km×1.1 km のメッシュから構成される地図情報であり、シリングロ盟南部の範囲を含んでいる。各メッシュの NDVI 年間最大値を 1994 年から 2002 年までの 9 年間について計算し、さらにこれら年間最大値の平均を求めた。草原の各地点について ^{137}Cs および降下 ^{210}Pb の蓄積量とこの平均値を比較した。

(3) 結果・考察

① ナイマン試験地の各放牧実施区を比較すると、放牧密度が高く植生の退行が進んだと考えられる区ほど、土壌中 ^{210}Pb 放射能濃度の低い地点が多く出現した(図 7、8)。また試験地南寄りの標高が大きい小丘部において裸地化が認められたが、濃度の低い地点もこの小丘部を中心に分布していた。これらのことから ^{210}Pb 放射能濃度と放牧密度や地形との関連が示唆された。 ^{137}Cs 放射能濃度については ND~3 Bq/kg 乾土と非常に低かった。このことから、強い侵食を受けた履歴のある砂漠化域土壌においては、核実験時に降下した ^{137}Cs がほとんど残存しておらず、 ^{137}Cs にもとづく評価が難しい場合が多いことが予想される。

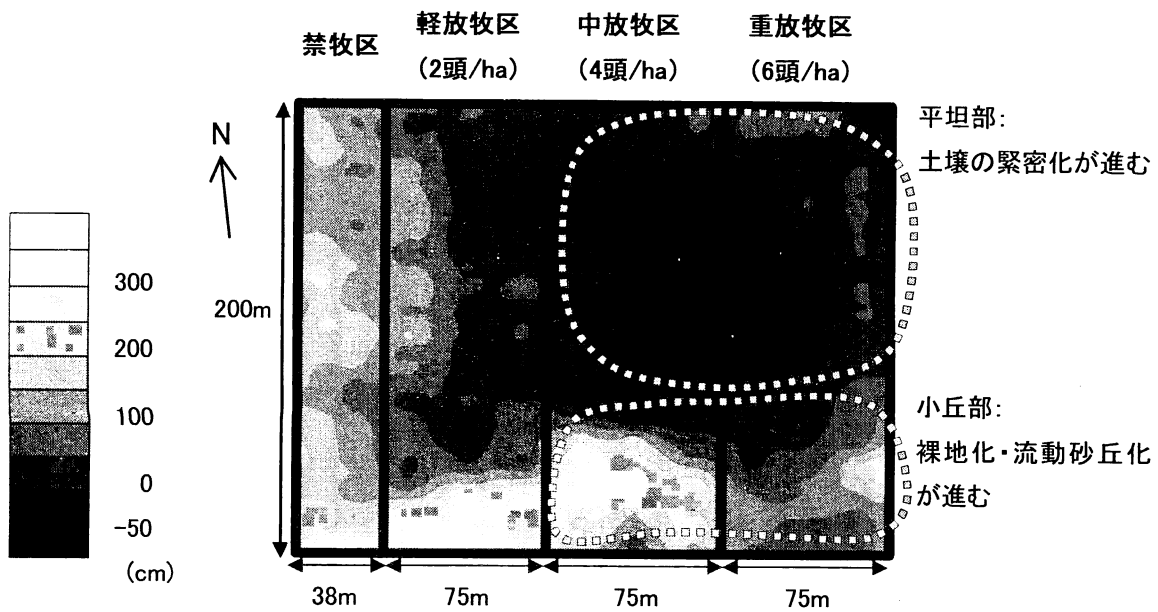


図7 放牧試験地の地形図(1996年に測量した標高分布)

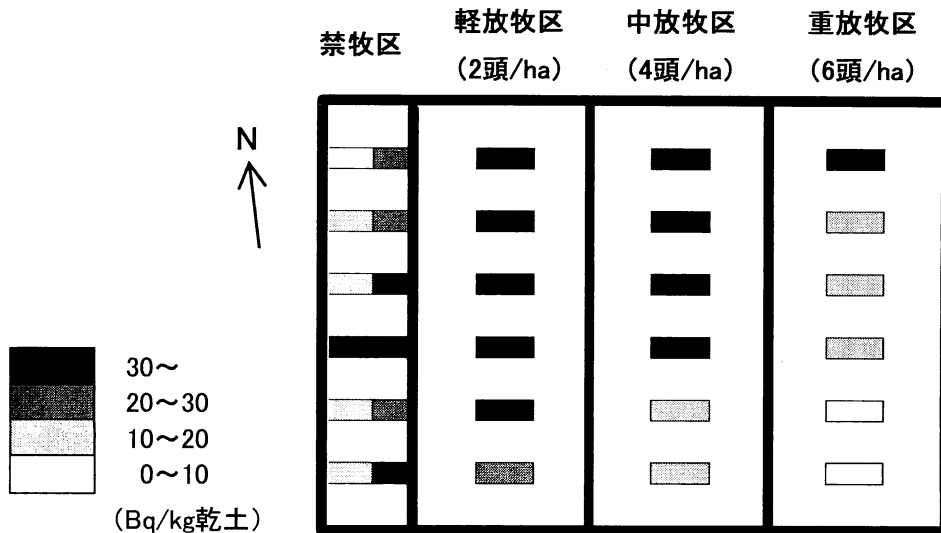


図8 放牧試験地における土壌の降下²¹⁰Pb放射能濃度分布

② シリンゴロ盟南部の草原の全地点で¹³⁷Csおよび降下²¹⁰Pbが土壌から検出され、ともに濃度は地表付近で高い傾向を示し、蓄積量の約90%以上を占める部分が地表から10cm以内に分布していた。蓄積量は¹³⁷Csで23.7~417.9 mBq/cm²、降下²¹⁰Pbで349.6~1037.2 mBq/cm²であり、両者の関係を検討したところ相関が認められ、決定係数(R²)は0.91であった。従来土壌侵食の評価には¹³⁷Csが用いられることが多く降下²¹⁰Pbを用いた例は少ないが、この結果から半乾燥地草原においては¹³⁷Csと同様に降下²¹⁰Pbを利用できる可能性が認められた。一方、砂丘において降下²¹⁰Pb蓄積量は77.6 mBq/cm²と少なく、¹³⁷Csは検出されなかった。

③ ^{137}Cs および降下 ^{210}Pb の蓄積量と NDVI 平均値の関係を検討したところ相関が認められ、 ^{137}Cs について決定係数は 0.78、降下 ^{210}Pb については 0.63 であった。この結果から降下放射性核種の蓄積量と植生による地表の被覆程度との関連が示唆された。

④ 結論として、地表の侵食や攪乱が大きい砂漠化地域では、従来侵食量測定に用いられてきた核実験等に由来する ^{137}Cs が土壌に残存していないため適用が困難な場合がある一方、風食を示す新しい指標として、天然由来の放射性核種である ^{210}Pb が有効であることが明らかになった。これは、砂漠化の進行に伴い、土壌の一般理化学性の変化では検出できない風食のごく初期段階で起こる土壌中の微細粒子の移動を検知するための指標として有効であると考えられる。

5. 社会・経済的条件・政策と環境資源変動の関係の検討

(1) 目的

中国内蒙古自治区中部～東部の土地荒廃地域における村落レベルの社会経済調査を実施し、社会経済的条件・政策と環境資源変動との関係を解明し、環境資源変動の評価指標を開発するために資する。

(2) 研究方法

土壌侵食地域の内蒙古自治区ジュンガル旗と砂漠化地域の内蒙古自治区ナイマン旗において、農家調査を行い、収集した農家経済データを用いて、サブテーマ 1 で開発した、農家経済モデルを用いて、社会経済条件の変動・政策の変化が引き起こした農家経済行動の変化が、環境資源変動に及ぼす影響を解明する。ジュンガル旗海子塔郷 Ge-Zhen-Yan 村において 21 戸農家、ナイマン旗では農耕地域の Yao-Le-Dian-Zi 村の 84 戸と放牧地域の Sha-Ri-Ta-La 村の 37 戸の農家を対象にアンケート調査を行った。

項目は、人口、家族構成、土地利用、農産物作付面積と生産量、家畜頭数、所得、灌漑面積、化学肥料使用量、電気使用量、草原建設状況、植林面積、農産物価格と畜産物価格、農産物流通と畜産物流通、道路、消費支出と消費構成(食料と燃料)、砂漠化防止対策の実施状況、砂漠化防止対策の実施状況に対する意向、農業政策(農地、家畜、草地)、農業政策(農地、家畜、草地)に対する意向、今後の農業経営に対する意向、である。

(3) 結果・考察

① 土壌侵食地域の中国内蒙古自治区ジュンガル旗海子塔郷 Ge-Zhen-Yan 村において、21 戸の農家経済のデータをサブテーマ 1 に供給し、農家経済モデルを試行した(サブテーマ 1 参照)。砂漠化地域の中国内蒙古自治区ナイマン旗では、農耕地域の Yao-Le-Dian-Zi 村と放牧地域の Sha-Ri-Ta-La 村において、84 戸と 37 戸の農家経済の調査データを用いて、同様にサブテーマ 1 で開発した農家経済モデルを試行した。

② 土壌侵食が深刻なジュンガル旗地域では、WTO 加盟に伴う農産物価格変動、退耕還林還草政策の実施および補助金の変動、非農業就業機会の変動による土壌侵食防止への影響をシミュレーションした。

表4 対象地域における農家階層の所得と土地利用

Village	Household group	Households		Average income per capita (yuan)	Cultivated land (ha)	#Irrigable upland (ha)	Grazing animal (sheep equivalent)	Grazing pressure (sheep equivalent/ha)
		Count	%					
Yaoledianzi	A	10	11.9	669	1.08	0.66		
	B	40	47.6	1,515	1.23	0.75		
	C	20	23.8	2,414	1.56	0.95		
	D	8	9.5	3,547	2.12	1.14		
	E	6	7.1	4,708	2.70	1.30		
	Total	84	100	2,050	1.46	0.86		
Sharitala	A	12	32.4	440	1.04	0.72	21.01	1.16
	B	9	24.3	1,093	1.74	0.76	32.11	1.30
	C	4	10.8	2,790	1.30	0.80	68.75	4.21
	D	5	13.5	3,569	1.79	1.17	50.50	2.71
	E	7	18.9	5,665	1.68	1.17	67.71	5.14
	Total	37	100	2,264	1.46	0.89	41.69	2.03

表5 放牧禁止政策 および代替策が農家所得に及ぼす影響

Scenario	Yaoledianzi			Sharitala		
	Income (Yuan)	Grazing pressure (sheep equivalent /ha)	Reclaimed land (ha)	Income (Yuan)	Grazing pressure (sheep equivalent /ha)	Reclaimed land (ha)
A-0	654,122	0.00	0	153,107	0.00	0
B-0	736,992	1.58	0	283,918	1.68	0
D-0	764,472	2.25	0	338,766	2.41	0
E-0	1,036,350	2.41	85.13	371,290	2.41	34.93
C1-0	694,749	1.00	0	229,114	1.00	0
C2-0	735,376	2.00	0	305,121	2.00	0
C(5)-0	760,579	2.25	0	236,750	1.10	0
C10-0	764,472	2.25	0	320,393	2.20	0

Note: 1) Environmental regulations: A: To prohibit grazing completely and reclamation is prohibited; B: To prohibit grazing for half year, and reclamation is prohibited; C: To restrict number of herds or keep a reasonable grazing pressure, and reclamation is prohibited; C1: To keep grazing pressure less than 1 sheep equivalent/ha; C2: To keep grazing pressure less than 2 sheep equivalent/ha; C (5): To restrict number of herds less than 5 sheep equivalent per capita; C(10): To restrict number of herds less than 10 sheep equivalent per capita; D: No restriction to grazing, but reclamation is prohibited; E: No prohibition on grazing or reclamation.

2) New technologies: 0: Using existing farming techniques; 1: Introducing sedentary beef cattle.

表6 信用供与が貧困農家の所得と放牧圧に及ぼす影響

Village	Scenario	Credit supporting Available		Own capital only	
		Income (Yuan)	Grazing pressure (sheep equivalent/ha)	Income (Yuan)	Grazing pressure (sheep equivalent/ha)
Yaoledianzi	A-0	4,364	0.00	4,364	0.00
	C1-0	4,903	1.00	4,903	1.00
	A-1	5,692	0.00	5,659	0.00
	C1-1	8,569	1.00	5,686	0.19
Sharitala	B-0	6,261	1.64	1,501	0.22
	C1-0	4,242	1.00	1,501	0.22
	B-1	9,681	1.65	1,501	0.22
	C1-1	7,744	1.00	1,501	0.22

ア：ジュンガル旗地域では、トウモロコシと商品作物のナタネおよび向日葵の栽培と、トウモロコシを飼料として利用する畜産を組み合わせた農業経営が主流の形態である。畜産物価格の変動に伴い、土壤侵食量には顕著な変動がみられないが、商品作物のナタネと向日葵の価格変動に伴い、土壤侵食量が変動することが推測された。

イ：退耕還林還草政策の実施について、退耕還林還草政策が実施されない場合に比較し、土壤侵食が大幅に抑制されることが推測された(サブテーマ1参照)。

ウ：退耕還林還草政策を強制せず、補助金を政策手段として導入する場合、退耕還林還草政策の実施に対する補助金を畝(1畝=0.67ha)当たり160元以上付加する場合、農家は傾斜地の耕作を止め、土壤侵食量が減少し、補助金が増えるにつれて、退耕還林還草地の面積が次第に拡大し、土壤侵食量が減少することが推測された(サブテーマ1参照)。

エ：恒常的非農業就業機会の増加につれて、農家は次第に傾斜地の耕作を止め、土壤侵食量が減少する可能性が推測された。

③ 砂漠化が進行するナイマン旗では、貧困からの脱却、持続的農業開発のための技術進歩と外部支援策としての信用サービスの供与が砂漠化防止に及ぼす影響について検討した。

ア：農家の階層分化が進行している中、放牧地域では家畜頭数、農耕地域では耕地面積が農家階層分化の主要な要因となっていることが示唆された。

イ：裕福な農家は貧困農家より放牧地域では放牧圧が高く、農耕地域では耕地面積が多く、所得の高い農家が草原生態系により重い環境負荷を与えている。また、貧困そのものではなく、貧困から脱却するための農家行動が環境劣化の一因となっていることが示唆された(表4)。

ウ：現在実施されている放牧禁止政策は大幅な農家所得の減収をもたらしており、代替策として合理的放牧圧を維持する必要がある。または一人当たりの家畜頭数を制限する方策が考えられる。合理的放牧圧をha当たり1羊単位(C1)、または一人当たり5羊単位(C(5))が基準値として考えられた(表5)。

エ：肉牛を中心とする舎飼畜産技術の導入は農家所得の増加と放牧圧軽減を同時に促進すること

が可能である。しかし、貧困農家にとっては初期資金不足の制約を受けており、舎飼畜産技術が所得増につながらないことが推測された。

オ：貧困農家を対象に信用サービスの供与を行うことにより、放牧庄または家畜頭数の制限の下で、舎飼畜産技術の導入に伴う所得増を実現する可能性が示された(表6)。

6. 本研究により得られた成果

中国内蒙古自治区の東部および中部における、自然資源、社会経済調査から、サブテーマ1やサブテーマ2へのデータ提供、情報提供以外に、以下のような成果が得られた。

①内蒙古東部、ホルチン沙地ナイマン旗における植生回復試験地でのモニタリングから、退行過程と回復過程をあらわす指標は、植生では種組成、土壌特性では有機炭素と細粒質があげられ、これらは相互に関連しながら退行、回復することが示された。②内蒙古中部・東部地域における周辺調査から、植生タイプの差異は土壌タイプおよび降水量により説明でき、脆弱性が高いとされる砂地域の植生は、地理的に多少隔離していても、組成的な類似性が高いことを明らかにした。③一方、土壌肥沃度を規定する最も重要な制限因子は可給態 N、ついで可給態 P と陽イオン交換容量(CEC)であり、いずれも植生との相関が有意に高いことから、植生指標の情報と補完することにより、土壌タイプごとの土壌肥沃度評価が可能と考えられた。④また、100 万分の1スケールの植生図および土壌図を用いたオーバーレイによる解析により、上記現地調査の結果がより広い地域に適用可能であることが示唆され、ナイマンで抽出された植生では種組成、土壌では有機炭素と細粒質という指標は、潜在的な土地条件が異なる地域でも適用できることが示唆された。

⑤¹³⁷Cs、²¹⁰Pb 等降下放射性核種の土壌中濃度や蓄積量を、砂漠化進行程度や防止・修復技術の施用効果を評価するための土壌特性指標として利用できる可能性が認められた。

⑥サブテーマ1で開発した、農家経済モデルに、社会・経済データを当てはめることにより、経済条件の変動や政策の実施による農家収入や土壌侵食量の変動が予測可能となった。⑦土壌侵食防止対策として退耕還林還草政策の効果、特に退耕還林還草地の補助金の付加に伴う土壌侵食防止効果をモデルから推測した。⑧また、貧困そのものではなく、貧困から脱却するための農家行動が環境劣化の一因となっていること、砂漠化防止と草原保全のため、放牧庄や家畜頭数を制限する環境政策と、技術進歩や信用供与を促進する農村開発政策とを連携して実施する必要があること、および農村の都市化による非農業就業機会の増加が環境負荷軽減・環境保全促進に効果的なこと、などが推測された。

7. 引用文献

なし

8. 国際共同研究等の状況

本研究は、中国林業科学研究院、内蒙古林業科学研究院、オルドス沙地草地生態研究所、内蒙古大学生命科学学院、中国科学院寒区旱区環境与工程研究所など、多くの中国研究機関との共同研究として実施した。特に定期的な現地調査に当たっては、中国側研究者に実質的な作業の協力を得た。

9. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表 (学術誌・書籍)

<学術誌 (査読あり) >

- ① F.R. Li, H. Zhang, Y. Shirato and T.H. Zhang: *Catena*, 53, 255-272 (2003) “Variations of sand transportation rates in sandy grasslands along a desertification gradient in northern China.”
- ② F.R. Li, H. Zhang, L.Y. Zhao, Y. Shirato and X.Z. Wang: *Plant and Soil*, 256, 431-442 (2003) “Pedoecological effects of a sand-fixing poplar (*Populus simonii* Carr.) forest in a desertified sandy land of Inner Mongolia, China.”
- ③ T.H. Zhang, H.L. Zhao, T. Ohkuro, Y. Shirato: *Grassland of China*, 25, 9-12 (2003) “Variations of soil characteristics after successive grazing in Kerqin Sandy Land, Inner Mongolia.”
- ④ T.H. Zhang, H.L. Zhao, T. Ohkuro, Y. Shirato: *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 17, 117-121 (2003) “Soil characteristics and spatial pattern of vegetation after successive grazing in Horqin Sandy Land, Inner Mongolia.”
- ⑤ H. Zhang, F.R. Li, T.H. Zhang, L.Y. Zhao, Y. Shirato: *Chinese Journal of Applied Ecology*, 14, 1591-1596 (2003) “Evaluation of ecological services of *Populus simonii* forest on Heerqin sandy land.”
- ⑥ F.R. Li, H. Zhang, T.H. Zhang and Y. Shirato: *Soil and Tillage Research*, 75, 121-130 (2004) “Wind erosion and airborne dust deposition in farmland during spring in the Horqin sandy land of eastern Inner Mongolia.”
- ⑦ T.H. Zhang, H.L. Zhao, F.R. Li, Y. Shirato, T. Ohkuro and I. Taniyama: *Journal of Arid Environment* 58, 202-213 (2004) “Comparison of different measures for stabilising moving sand dunes in the Horqin Sandy Land of Inner Mongolia, China.”
- ⑧ Y. Shirato, I. Taniyama and T.H. Zhang: *Soil Science and Plant Nutrition* (2004) “Changes in soil properties after afforestation in Horqin sandy land, north China.” (in press)
- ⑨ M. Shi and Q. Zhang: *開発学研究 (Journal of Agricultural Development Studies)*, 15 (2004) “Environmental Policy and Alternative Technologies for Sustainable Agricultural Development in Horqin Sandy Area.” (in press)
- ⑩ M. Shi and K. Chen: *Agricultural Economics* (2004) “Land Degradation, Government Subsidy, and Smallholders' Conservation Decision: the Case of the Loess Plateau in China.” (in press)

<学術誌 (査読なし) >

- ① I. Taniyama, T. Imagawa, T. Ohkuro, Y. Shirato, E. Fujiwara, T. Zhang, H. Zhao and T. Wang: *Integrated Land Management in Dry Areas*, UNU Desertification series No.4, (Z. Adeel, ed.) United Nations University, p.79-92 (2001) “Evaluation of Management for Combating Desertification in Horqin Sandy Land, China.”
- ② 大黒俊哉、白戸康人：農業環境技術研究所年報(平成12年度), 72-75 (2002) 「中国北東部半乾燥地域の砂地草原における砂漠化防止対策が植生回復に及ぼす効果。」
- ③ T. Ohkuro, Y. Shirato, X. Chang and H. Zhao: *Integration and Regional Researches to Combat*

Desertification -Present Status and Future Prospect- The 16th Global Environment Tsukuba, (H. Shimizu, ed.) Center for Global Environmental Research, National Institute for Environmental Studies, p. 58-61 (2002) “Effects of conventional remedies for desertification on land and vegetation restoration in Horqin Sandy Land, China.”

- ④ M. Shi: Integration and Regional Researches to Combat Desertification -Present Status and Future Prospect- The 16th Global Environment Tsukuba, (H. Shimizu, ed.) Center for Global Environmental Research, National Institute for Environmental Studies, p. 211-218 (2002) “Sustainable Development of regional agriculture for combating desertification. —a case study in Horqin area, Inner Mongolia—”
- ⑤ Y. Shirato, T. Ohkuro, I. Taniyama, T. Zhang and H. Zhao: Integration and Regional Researches to Combat Desertification -Present Status and Future Prospect- The 16th Global Environment Tsukuba, (H. Shimizu, ed.) Center for Global Environmental Research, National Institute for Environmental Studies, p. 219-224 (2002) “Soil property changes affected by desertification control measures in Horqin Sandy Land, China.”
- ⑥ T. Zhang, H. Zhao, F. Li, Y. Shirato, T. Ohkuro and I. Taniyama: Integration and Regional Researches to Combat Desertification -Present Status and Future Prospect- The 16th Global Environment Tsukuba, (H. Shimizu, ed.) Center for Global Environmental Research, National Institute for Environmental Studies, p. 225-230 (2002) “A comparison of different measures for preventing moving sand dunes in the Horqin Sandy Land, Inner Mongolia, China”

<書籍>

- ① 藤原英司：内蒙古草原荒漠化問題及其防治対策研究（エルドンブホ、恩和、双喜編）内蒙古大学出版社, 49-57 (2002) 「根据土壤中放射性核素的浓度对沙漠化程度的评价」

<報告書類等>

- ① 大黒俊哉、白戸康人：農業環境技術研究所年報(平成12年度), 72-75 (2002) 「中国北東部半乾燥地域の砂地草原における砂漠化防止対策が植生回復に及ぼす効果。」

(2) 口頭発表

- ① 白戸康人、谷山一郎、張銅会、趙哈林：第12回日本沙漠学会(2001) 「中国ホルチン沙地における砂漠化程度と土壤生産力の評価。」
- ② 大黒俊哉、常学礼、趙哈林：日本生態学会第49回大会(2002) 「中国ホルチン沙地における過放牧草地の植生回復過程。」
- ③ 大黒俊哉、白戸康人、今川俊明、谷山一郎、藤原英司、常学礼、張銅会、趙哈林：植生学会第7回大会(2002) 「中国北東部ホルチン草地における植生分布と砂質土壤の関係。」
- ④ 藤原英司、白戸康人、大黒俊哉、木方展治、今川俊明：日本沙漠学会第13回学術大会(2002) 「放射性核種濃度を指標とする半乾燥地における土壤侵食強度の見積り。」
- ⑤ 白戸康人、谷山一郎、烏云娜、李政海：日本沙漠学会第13回学術大会(2002) 「中国内蒙古中部フフホト周辺の土壤特性と土地荒廃。」

- ⑥ 藤原英司、白戸康人、大黒俊哉、木方展治：第 39 回理工学における同位元素・放射線研究発表会（2002）「土壤中の ^{210}Pb を指標とする半乾燥地における地表安定度の評価。」
- ⑦ 藤原英司、大黒俊哉、白戸康人：中日共同シンポジウム「中国内モンゴルの草原荒漠化とその防止対策」（2002）「内モンゴル草原における土壤中放射性核種濃度にもとづく侵食強度の推定。」
- ⑧ 朴鍾杰、須崎純一、安田嘉純、原慶太郎、大黒俊哉：日本写真測量学会平成 15 年度年次学術講演会（2003）「中国内モンゴルのバイオマス量の推定に関する研究。」
- ⑨ J.G. Park, Y. Yasuda and T. Ohkuro: 24th Asian Conference on Remote Sensing & 2003 International Symposium on Remote Sensing (2003) “Estimation of Net Primary Production (NPP) of Inner Mongol in China by MODIS Data.”
- ⑩ 藤原英司、白戸康人、大黒俊哉：第 40 回理工学における同位元素・放射線研究発表会（2003）「半乾燥地草原における降下放射性核種の土壤中濃度。」
- ⑪ M. Shi and Q. Zhang: 日本国際地域開発学会 2003 年秋季大会（2003）“Environmental Policy and Alternative Technologies for Sustainable Agricultural Development in Horqin Sandy Area.”
- ⑫ Y. Shirato, I. Taniyama, T. Ohkuro, H. Fujiwara, T. Imagawa, Wuyunna, Z. Li, J. Yang, T.H. Zhang and X.Y. Zhao: International symposium: Evaluation and monitoring of desertification – Synthetic activities for the contribution to UNCCD. Tsukuba, Japan (February, 2004) “General soil properties in Central- to Eastern- Inner Mongolia, China.”
- ⑬ T. Ohkuro, Y. Shirato, H. Fujiwara, I. Taniyama, M. Shi, Wuyunna, J. Yang and X.Y. Zhao: International symposium: Evaluation and monitoring of desertification – Synthetic activities for the contribution to UNCCD. Tsukuba, Japan (February, 2004) “Development of Indicators for the Evaluation of the Changes in Environmental Resources caused by Desertification in China.”
- ⑭ H. Fujiwara, T. Ohkuro, Y. Shirato: International symposium: Evaluation and monitoring of desertification – Synthetic activities for the contribution to UNCCD. Tsukuba, Japan (February, 2004) “Assessment of desertification from soil concentrations of radioactive nuclides.”
- ⑮ M. Shi, Q. Zhang, T. Ohkuro and H. Shimizu: International symposium: Evaluation and monitoring of desertification – Synthetic activities for the contribution to UNCCD. Tsukuba, Japan (February, 2004) “Modeling effects of environmental policy and technological innovation on rangeland conservation: A case study in Horqin sandy areas of China.”
- ⑯ M. Shi and K. Chen: International symposium: Evaluation and monitoring of desertification – Synthetic activities for the contribution to UNCCD. Tsukuba, Japan (February, 2004) “Land Degradation, Government Subsidy, and Smallholders' Conservation Decision: the Case of the Loess Plateau in China.”

(3) 出願特許
なし

(4) 受賞等
なし

(5) 一般への公表・報道等
なし

10. 成果の政策的な寄与・貢献について

今後も本研究の成果である自然資源・社会経済指標を、NPP などの量的指標による砂漠化の広域評価を補完する質的指標として、国連砂漠化対処条約(UNCCD)の科学技術委員会(CST)および砂漠化対処条約アジア地域テーマ別プログラムネットワーク 1 (TPN1)の活動に貢献する。また、中国砂漠化対処条約実施委員会(CCICCD)の活動や中国の砂漠化問題に関連する日本の活動、特に砂漠化モニタリング・アセスメント分野に貢献する。