

課題名	G-071 北東アジアの草原地域における砂漠化防止と生態系サービスの回復に関する研究		
課題代表者名	大黒俊哉（東京大学大学院農学生命科学研究科緑地創成学研究室）		
研究期間	平成19－21年度	合計予算額	111,189千円（うち21年度 35,958千円） ※予算額は、間接経費を含む。
研究体制	<p>(1) 植生回復ポテンシャル評価および生態系再生予測モデルの構築（東京大学）</p> <p>(2) 荒廃した草原の回復にかかわるkey speciesの環境適応性の解明 （独立行政法人国立環境研究所）</p> <p>(3) 植生回復過程における環境修復効果と種間相互作用の解明（岡山大学）</p> <p>(4) 半乾燥砂漠化地域に生育するkey species－ecotypeの生理生態特性の比較解析 （独立行政法人国立環境研究所）</p>		
研究概要	<p>1. はじめに</p> <p>乾燥・半乾燥地における砂漠化の防止と持続的開発は、現在の国際社会が解決すべき最重要課題のひとつである。砂漠化防止と持続的な生産活動を両立させるためには、生態系サービス（食料・家畜飼料の供給、土壌保全、水資源の供給等）を安定的に供給することが必要であり、荒廃した草原の生態系機能を再生させ、持続的管理を行わなければならない。</p> <p>草原への人間活動のインパクトが強まると一般に、イネ科草原（grassland）から灌木草原（shrubland）への移行（shrub encroachment）に代表されるように、不連続な植生退行が生じることが知られている。この退行遷移は、環境容量（牧養力）の急激な低下と受食性（土壌侵食の受けやすさ）の著しい増大を引き起こし、回復が困難となる。したがって、乾燥地において持続的な土地利用を行うためには、砂漠化早期警戒体制（EWS）に代表される、脆弱性評価に基づく被害の未然防止対策を進めるとともに、利用可能な状態への速やかな植生回復をはかることが必要である。これまでの研究により、不連続な退行のメカニズムや牧畜に及ぼす影響などは明らかにされてきた。また、個別の緑化技術等、環境修復技術の開発も進められている。しかし、回復プロセスの詳細な理解に基づく最適な環境修復技術の選択や、持続的土地利用の再構築までを視野に入れた研究は少なく、とくに北東アジアのステップ地域においては未着手の課題である。</p> <p>国連砂漠化対処条約（UNCCD）においても、実際の具体的対策と密接に関連した「持続的な土地利用管理」は科学技術委員会の重要課題である。しかしその取り組みは、モニタリング・アセスメントや基準・指標等、これまでの先行課題にくらべて立ち後れており、早急な対応が必要である。</p> <p>2. 研究目的</p> <p>以上の背景を受け、本研究は北東アジアのステップ地域を対象に、砂漠化した土地の生態系再生と持続的な生物資源利用の両立が可能となるような環境修復の指針を提示することをめざす。そのためにまず、①植生の回復力が高い（低い）場所はどのような規則性で分布しているのか？②環境修復の鍵となる植物はどのような環境適応力を持っているのか？③さまざまな緑化技術は、どのようなメカニズムで環境修復を促進するのか？ということ、リモートセンシング、環境制御実験、野外実験などによって明らかにする。そして、これらの成果を組み合わせることで生態系モデルを開発し、さまざまな緑化や環境修復技術の適用効果を予測する。とくに本研究では、既往の早期警戒体制構築の際に提案された生態系モデルのフレーム、すなわち、広域モニタリングによる指標とフィールド調査による砂漠化プロセスと基準、さらに立地条件を加味した砂漠化評価モデルを基礎としつつ、回復プロセスに関わるモジュールを強化した生態系モデルの構築をめざす。これにより、「どの場所に、どのような技術の組み合わせ（技術パッケージ）をどの程度重点的に適用すれば最大の効果と持続性が得られるか」についての科学的な根拠を示すことができる。</p> <p>本研究の成果は、UNCCDにおける議論の進展に技術的側面から支援するとともに、砂漠化対処と持続的土地利用のための具体的処方箋として砂漠化被災地域へ還元されることが期待できる。</p>		

### 3. 研究の方法

本研究では、上述した3つの課題に対応した4サブテーマより構成され、それぞれが衛星画像解析、環境制御実験、野外実験という異なるアプローチから生態系モデルの構築を目指して研究を進める。最終的な目標は、植生回復を予測する生態系モデルを作成し、最適かつ効果的な緑化・環境修復のための技術パッケージを提示することである。モデル構築にあたっての相互連携を図1に示した。サブテーマ2および4では、個体レベルでの生理生態的特性を把握したうえで、サブテーマ1に対し、様々な外部環境での回復の鍵となる種（key species）の基本的生理生態的パラメータを提供する。サブテーマ3では、野外調査・実験により回復の鍵となるプロセス（key process）を特定したうえで、サブテーマ1に対し、生態系モデルにおいて再現対象となるkey processおよび砂漠化対処シナリオ（各種環境修復技術の適用効果）の提供を行う。サブテーマ1では、回復

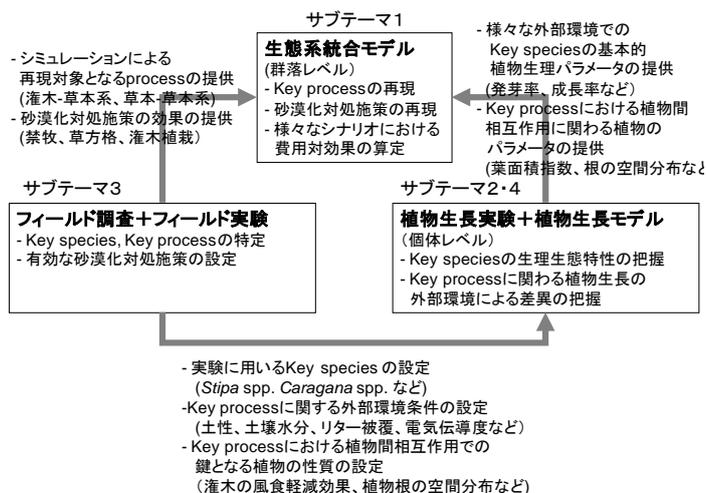


図1 本課題の概要とサブテーマ間の連携

ポテンシャルおよび自然立地・土地利用等にかかわる空間情報を整備し、ベースマップを作成したうえで、サブテーマ2～4からの情報を組み入れ、生態系モデルによるkey process、砂漠化対処施策の再現を行うとともに、様々なシナリオにおける費用対効果の算定を行う。

#### (1) 植生回復ポテンシャル評価および生態系再生予測モデルの構築

本サブテーマでは、①植生分布の空間配置および自然立地条件から、植生回復ポテンシャルを面的に評価し地図化する手法を開発すること、②植生回復を予測する生態系モデルを作成し、最適かつ効果的な緑化・環境修復のための技術パッケージを検討することを目的とする。①については、代表的なkey processである灌木→イネ科草本、広葉草本→イネ科草本への回復における植生機能タイプの変動をリモートセンシングにより抽出し、図化する方法を検討するとともに、key speciesの供給源となるコアエリア等、種供給ポテンシャルの空間分布をフィールドスケールで明らかにするための野外調査を実施した。また、②については、生態系モデルと風食モデルあるいは水分・熱・溶質移動モデルを組み合わせた統合モデルを構築し、質的变化を伴うkey processの再現を試みるとともに、費用便益算出手法を用いたシナリオアセスメントを行い、最大の費用対効果をもたらす砂漠化対処技術選択の組み合わせを空間明示的に予測する手法を検討した。

#### (2) 荒廃した草原の回復にかかわるkey speciesの環境適応性の解明

本サブテーマでは、北東アジアの放牧草地を対象に、生態系サービスの回復を評価するために必要な基盤的情報として、①植生回復の鍵となるkey speciesの環境適応に係わる生理生態特性を環境制御実験により解明すること、また②key speciesの環境適応能の差異に基づいた、形態的・機能的特性を併せ持つ植物生長モデルを構築することを目的とする。まず、key speciesを中心に多様な植物の種子を、中国・モンゴルの荒廃/回復草原から収集し、砂漠化地域の重要な環境要因である土壤水分環境に対するkey speciesの生理生態特性を比較検討した。つぎに、形態構造的な特性パラメータを計測するとともに、L-systemの言語特性をベースとした三次元植物生長モデル「機能-構造生長モデル」の開発を行った。

#### (3) 植生回復過程における環境修復効果と種間相互作用の解明

本サブテーマでは、各種環境修復技術（植栽、草方格等）の適用効果を把握するとともに、植生回復過程（Key process）における種間相互作用を野外条件下で解明することを目的とする。そのため、北東アジアのステップ地域を代表する事例地域において、緑化等（禁牧を含む）環境修復履歴の明確な地点を調査区として設定し、植生および土壤調査を行ったうえで植生・土壤回復のパターンの定性的・定量的把握を行い、key processの現地での把握および、key speciesの移行に関わる環境修復効果および制限要因の推定を行った。また、同地域の優占灌木である*Caragana microphylla*について、同種の分布と放牧圧の関係、土壤化学性との関係等について調査を行った。さらに、木本植物の導入試験により定着条件および効果的な修復手法を検討するとともに、高木・灌木植栽による看護効果や環境修復効果の差異を比較検討した。

#### (4) 半乾燥砂漠化地域に生育するkey species-ecotypeの生理生態特性の比較解析

砂漠化地域における緑化事業を成功させるためには、各砂漠化地域の環境条件、および各環境要因に対する各key speciesの環境応答特性に係わる情報を蓄積、統合することが重要である。しかし、同一種が広範囲に生育する場合、各ecotypeの環境反応特性に差異があるかどうかを考慮する必要がある。本サブテーマではまず、ecotypeに係わるこれまでの研究成果をレビューしたうえで、中国・モンゴルの9地域から様々なkey speciesの種子を採取し、産地毎に整理した。つぎに、本地域の代表的key species（灌木種）である*Caragana microphylla*、*Artemisia halodendron*、*Stipa grandis*のecotypeを材料として、温度と水ストレス複合環境実験を行い、これらの環境要因に対する各ecotypeの応答特性について、比較・検討した。

#### 4. 結果及び考察

##### (1) 植生回復ポテンシャル評価および生態系再生予測モデルの構築

###### 1) 植生マッピング手法の開発および生態系モデル構築のためのベースマップ作成

灌木から草本へのプロセスについては、中国内モンゴル・奈曼旗をテストサイトとした。ここは砂地（Sandyland）域に位置し、植生タイプが地形タイプと強く関連していることが特徴としてあげられる。そこで、ALOS/AVNIR-2を用いた土地利用分類による放牧地の抽出およびALOS/PRISMステレオ画像を用いた地形分類を行ったうえで、これらを重ね合わせて、地形タイプごとに異なる放牧地植生タイプを抽出し、生態系予測モデルのためのベースマップを作成した。その結果、テクスチャや幾何学的な情報を加えたオブジェクト指向型分類手法による土地利用区分とデジタル写真測量による地形分類を組み合わせることにより、灌木などの機能タイプの動態を精度よく推定できることが明らかになった。

一方、広葉草本からイネ科草本へのプロセスについては、モンゴル・フスタイ国立公園周辺をテストサイトとし、ALOS/AVNIR-2のマルチスペクトル画像を用いた手法を検討した。移動標準偏差を空間的不均質性の指標として植生分類を行った結果、土地荒廃の程度を指標とする草本植生の優占種を明瞭に判別できることが明らかになり、移動標準偏差の閾値を境界とすることで、当該地域の砂漠化地図を作成可能であることが示された。

###### 2) フィールド調査による植生回復ポテンシャルの把握

key speciesの供給源となるコアエリア等、種供給ポテンシャルの空間分布をフィールドスケールで明らかにするため、中国内モンゴル・奈曼旗（砂地）およびモンゴル・マンダルゴビ（ゴビステップ）の長期禁牧プロットを対象に、植生・土壌・地形調査を行った。奈曼旗においては、植生回復のポテンシャルが、key speciesの供給源となるコアエリアの空間分布と密接に関連し、とくに砂地の場合、植生回復が砂丘間低地を起点とした種の定着・分散により進行することを明らかにした。一方、ゴビステップにおいては、牧柵の設置によりkey speciesである*Stipa* spp.が増加し、禁牧が回復コアエリアの形成に有効であることが示唆された。しかし、同地域では降雨変動性が植生回復に強く影響を及ぼし、長期間禁牧の植生への効果を改変しうることが示唆された。したがって、種供給ポテンシャルの評価に際しても、降水量の変動要因を考慮する必要があると考えられた。

###### 3) 生態系モデルの構築によるkey processの再現

砂質（sandy）土壌域を対象とした生態系モデルとしては、Mosaic Arid Land Simulator (MALS)とWind Erosion Assessment Model (WEAM)を統合したモデルを構築した。MALSは、植物の成長や競争をシミュレートするための生態系モデル、WEAMは風食量を算定するモデルであり、MALSにカップリングされている。本研究では、フィールド調査の結果から、回復を規定する要因が種子散布であることに着目して、モデルに空間次元を導入した。すなわち、これまで定数だった種子の流入定数を、隣接する場所のバイオマスの関数として設定した。また、植物の成長にかかる主要なモデルパラメータについては、サブテーマ2および4で実施した発芽・成長等の環境制御実験および植物形態シミュレーションの結果から取得した。つぎにこのモデルを用いて、回復プロセスの再現を試みた。砂地においては、砂丘間低地から砂丘上部に向かって、灌木のフェーズから多年草のフェーズに置き換わってくる、という回復パターンが確認されているが、シミュレーションの結果、それぞれの年数に対応したフェーズがフィールド調査の結果とおおむねよく対応しており、本モデルが回復プロセスをよく再現できることが確認された。とくに、種子給源である砂丘間低地からの回復、砂漠化対処による回復速度の増加、といった定性的な回復のプロセスに加え、機能タイプごとの相対被度の変化についての定量的な変動についても再現することができた。

一方モンゴル草原の大部分を占める壤土質（loamy）土壌域においては、サブテーマ3の結果から、塩類の集積によるイネ科多年草へのストレスが回復を阻害していることが明らかとなった。そ

ここで、MALSモデルの簡易的な土壌水分モデルを土壌中塩類の移動を扱うことができるWASH-1Dモデルによって置き換えることで、モデルが塩類集積による土地荒廃および回復プロセスを再現できるようにした。本モデルによるプロセスの再現については、2008年7月24～8月8日に現地で測定した土壌水分データとの比較を行った。その結果、深さ5cmおよび15cmにおいて、高い精度で土壌中の水分の推定ができることが確認された。

#### 4) シナリオアセスメント

以上の結果に基づき、「どの場所に、どのような技術を適用することで最大の効果と持続性が得られるか」についての科学的な根拠を示すため、上記の生態系モデルおよびベースマップを用いてシナリオアセスメントを行った。

砂質土壌域においては、以下のようなシナリオを設定した。①砂丘間低地、周辺の放牧地を種子の給源とする、②種子の給源からの距離ごとに、どのような砂漠化対処を行うかを設定する、③組み合わせの要素（パターン）としては、種子給源に対する位置関係（近接／遠方／ランダム）、種子給源に対する植栽の順番（灌木→高木／高木→灌木）、植栽割合（0／10％／20％・・・90％／100％）、植栽する木本（高木／灌木／両方）を設定する、④効果はベースラインから増加した多年草バイオマス量を家畜売却益に換算する、⑤50年後の費用対効果から評価する。最大の費用対効果と最適な植栽計画を同時に示すために、以上のシナリオについて、ベースマップ上ですべての組み合わせについて計算し、ある一定の費用範囲のもとで、最も費用対効果の高い組み合わせを抽出した。その結果、費用対効果が最大となったのは、全費用範囲において、①種子給源に隣接させて②高木→灌木の順で植栽する、という植栽設計であることが明らかになった。とくに、ある費用範囲のなかでは、灌木・高木の植栽面積が増加しないことがシナリオアセスメントの結果明らかになった（図2）。このことは、高木・灌木の順で植栽する場合、たとえばある一定の距離を離れた場所で灌木を植栽しても、そのコストに見合った利益が期待できない、ということを示唆している。高木→灌木→禁牧の順番で費用対効果が

高い理由および、一定距離離れた場所での植栽には効果がない理由については、モデルの前提条件を考慮すると下記のように解釈することができた。すなわち、①種子給源の近傍では、すぐに多年草が侵入できる環境を作り出せる高木が有利である、②灌木は環境改善に時間がかかるが、多年草が広がってゆくのに時間もかかるので、遠方なら灌木でも間に合う、③さらに遠方になると、禁牧のみでの遅い環境改善でも、多年草の分布域が到達するまでに十分に間に合う。

一方、壤土質土壌域については、種子給源を中心とした、塩類除去のための散水範囲をシナリオとして設定した。費用対効果の計算は砂地と同様、対処を行った場合と対処を行わなかった場合での多年草の生産量を家畜売却益に換算したものをを用いた。その結果、あらゆる組み合わせに対して費用対効果はプラスにならなかった（図3）。これは、単位面積あたりの散水という砂漠化対処手法にかかる費用が高額すぎて、回復が早まっても、その分得られる経済効果が費用を超えられなかったことを示す。当該地域においては、砂漠化した土地

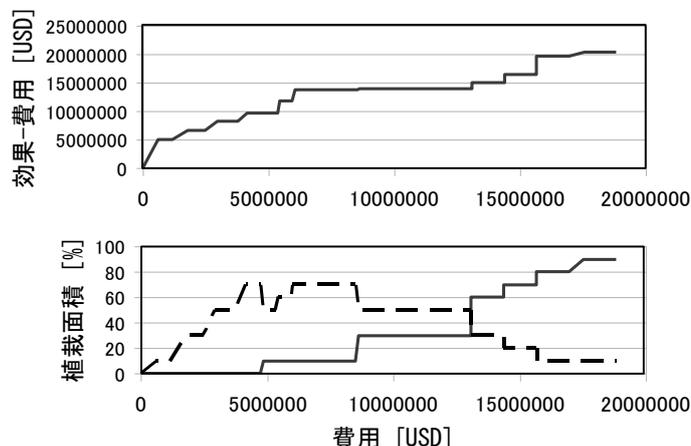


図2 砂質土壌域（奈曼旗周辺）での、様々な利用可能な費用段階に対する、（上）効果と（下）砂漠化対処の組み合わせ。下図破線が灌木植栽割合、実線が高木植栽割合を示す。

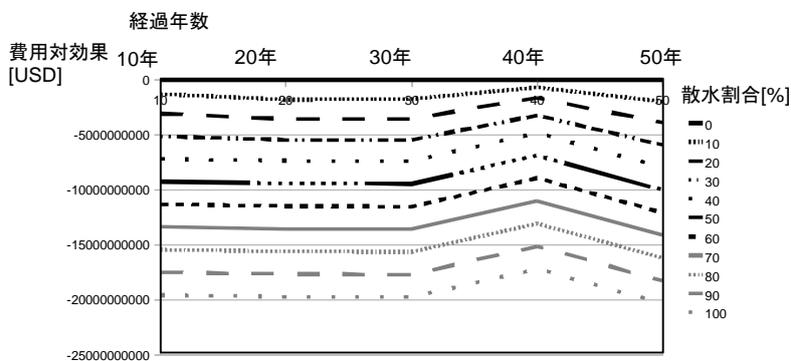


図3 壤土質土壌域（フスタイ国立公園周辺）での、散水割合ごとの費用対効果の10年ごとの変化

その結果、あらゆる組み合わせに対して費用対効果はプラスにならなかった（図3）。これは、単位面積あたりの散水という砂漠化対処手法にかかる費用が高額すぎて、回復が早まっても、その分得られる経済効果が費用を超えられなかったことを示す。当該地域においては、砂漠化した土地

の技術的な回復は有効な手段ではなく、いかに砂漠化させないかについてのより社会的な防止策や予防的管理手法の確立が急がれる。

## (2) 荒廃した草原の回復にかかわるkey speciesの環境適応性の解明

### 1) key speciesの生理生態特性の解明—植物の栄養生長に及ぼす水ストレスの影響

key speciesを中心に、灌木種5種 (*Artemisia halodendron*, *Artemisia frigida*, *Caragana microphylla*等)、イネ科草本6種 (*Cleistogenes squarrosa*, *Leymus chinensis*, *Stipa krylovii*等)、広葉草本5種 (*Peganum nigellastrum*, *Chenopodium album*, *Salsola collina*等)の16種について、降水量の変化による水ストレスに対する適応性を検討した。各植物種の生長を解析したところ、全種とも水ストレスの増加によって葉面積や個体乾重量は抑制されが、その生理生態的反応には差異が認められた。灌木の*A. ordosica*、イネ科草本の*Clynelymus dahuricus*、*L. chinensis*、*S. krylovii*、広葉草本の*C. album*、*M. suaveolens*は、水ストレスの増大に伴って相対生長率 (RGR) が急激に減少し、その他の種はやや緩やかに減少した。これらのRGRの減少はほぼ純同化率 (NAR) の減少に起因していた。

比葉面積 (SLA) の比較から、イネ科草本の*C. squarrosa*、*L. chinensis*、*S. krylovii*、*Achnatherum splendens*、*C. squarrosa*、広葉草本の*C. album*は、水ストレスの増大に伴い葉を厚くする傾向を示した。灌木の*A. Ordosica*、広葉草本の*C. album*、*Medicago sativa*、*P. nigellastrum*、*S. collina*は、根/茎葉 (R/S) 比を増加させ、同化産物を根へ投資する傾向を示した。以上の実験結果から、水ストレスへの生理生態的応答は、灌木やイネ科草本、広葉草本といったグループで一様ではなく、種それぞれに反応が異なることが明らかとなった。

### 2) 三次元植物生長モデル「機能—構造生長モデル」の開発

モデル開発に関して、自己相似形などの幾何学的立体構造を記述する形式言語Lindenmayer system (L-system)を用いて、多種多様な植物体の地上部・地下部の立体構造をシミュレーションするための、植物立体構造シミュレーションプログラムを検討した。また、オブジェクト指向プログラミングの特徴を活用し、三次元空間上の環境因子と植物間の相互作用、個体および各器官の発生・生長・消失など、植物の生長に関わる各種事象をシミュレーションする機能を実装したモデル基礎骨格 (C++クラス群と生長サブモデル群) を設計した。そして、これらを統合し、植物個体を基本単位として周辺環境からの影響を考慮しながら空間上で植物体構造の時系列的発達を含む生長をシミュレーションする、三次元植物生長モデルを開発し、実際の植物と比較した。

機能—構造生長モデルの開発に向けて、形態構造パラメータの取得を行った。上述した様々な植物を材料として、生育地域の標準的な気候条件で環境制御実験を行い、葉数、葉長、葉面積、茎長、分枝状態、根の鉛直分布および走出角度分布等のパラメータを計測した。次に、key speciesの*A. halodendron*と*C. squarrosa*等を材料として、水ストレスへの地上部/地下部の形態構造の応答パターンを解析した。乾燥条件では、*C. squarrosa*の不定根の発達、茎長および個体あたりの茎数 (分蘖数) が顕著に抑制された。*A. halodendron*では、側根の発達および主根の深部への伸長が抑制された。根の走出角度に関する傾向は水分条件に拘わらずほぼ同様であった。

地上部/地下部の立体構造計測の結果を用いてモデルパラメータを決定し、標準的な気候における数種key speciesの「機能—構造生長モデル」を開発した。さらに、環境制御実験から得られた生理生態特性解析の結果を用いて、本モデルが水分条件に反応するように改良した。*A. halodendron*について実測値と比較したところ、ほぼ類似の傾向を示し、本モデルを用いることで、基部の伸長生長・肥大生長に伴う末端部の三次元空間上での位置と向きの変更 (平行移動および回転) や、新しい茎の発生と分枝の発達を的確にシミュレートすることが可能であった。また、実験結果と同様に、水分ストレス状態では、側根の発達、根の深部への伸長、茎長が抑制された。以上の結果から、本モデルを用いることで、形態のみならず水分条件の違いによる生長抑制を的確に再現することが可能であることが明らかになった。

## (3) 植生回復過程における環境修復効果と種間相互作用の解明

### 1) 砂地におけるkey process (灌木→イネ科草本) の把握

砂地については、中国内モン古・奈曼旗において、1996年に設置された植生回復試験区を対象に植生および土壌調査を実施した。処理区は、*Artemisia halodendron*灌木植栽区、草方格設置区および対照区である。調査の結果、12年間の処理によって、一年生広葉草本→灌木 (*A. halodendron*) →多年生草本ステージへの推移が認められた。一部の処理区では灌木優占ステージにとどまっていたが、パッチの成長にともない、土壌有機炭素、窒素およびシルト以下の細粒物質の集積が進むとともに、パッチ内に生育する種数も増加していることが明らかになった。以上から、灌木パッチの成長にともない看護効果が高まり、種の侵入・定着が促進されることが示唆された。さらに、禁牧後40年経過したサイトや、灌木植栽後20年以上経過したサイト等、遷移がさらに進んだと思われる

試験区外の灌木草地で調査を行った結果、丘間低地に接する固定砂丘や灌木パッチ内に回復key speciesである*Cleistogenes squarrosa*が偏在していることが確認され、灌木ステージからイネ科草本ステージへ移行しつつあることが示唆された。以上のように、砂地においては、灌木からイネ科草本へ移行するkey processが把握された。また、緑化技術の適用が種の侵入・定着を促進すること、灌木の看護効果が成長段階によって異なること等が明らかになった。回復プロセスに関わる要因として、灌木の植栽年数および、シードソースからの距離が示唆された。

## 2) ゴビステップにおけるkey process(灌木/広葉草本→イネ科草本)の把握

ゴビステップについては、マンダゴビおよびブルガンにおいて、2005年に設置された牧柵内外で調査を行った結果、禁牧による現存量回復の効果が認められた。とくに、冬季キャンプから遠い軽放牧地点では多年生草本および高嗜好性グループの回復量が大きく、禁牧の効果が顕著であることがわかった。しかし、禁牧後5年間の経年変化をみると、禁牧初期の回復速度は緩慢であることがわかった。また、同地域の優占灌木である*Caragana microphylla*に注目し、同種の分布と放牧圧の関係、土壌化学性との関係等について調査を行った結果、灌木によるマウンド形成が土壌化学性の空間的不均質性の増大に寄与していることが明らかになった。

## 3) 森林～典型ステップにおけるkey process(広葉草本→イネ科草本)の把握

森林・典型ステップについては、1992年以降土地利用が制限されているモンゴル・フスタイ国立公園内で、放牧地および耕作放棄地を対象に調査を行った。その結果、キャンプ中心から周辺部に向かって、一年生広葉草本からイネ科草本へ移行するkey processが確認された。また、イネ科草本は、キャンプ中心に近い位置ではまず*Leymus chinensis*が分布し、*Stipa krylovii*に移行するという配列が認められ、*L. chinensis*はイネ科草本の中でも先駆性が高いことがわかった。また、土壌理化学性の分析結果から、同地域における植生退行および回復は、家畜の糞尿等に起因する栄養塩の蓄積および溶脱速度と密接に関連することが示唆された。そこで、現在の土壌条件下で溶脱に要する期間を数値解析により推定したところ、最も荒廃したキャンプ地中心付近(50mまで)では、10年後でも塩類の溶脱が不十分であること、降雨イベントによる溶脱が生じるためには48mm/dayの降雨が必要であることが推定され、塩類溶脱に対する禁牧の効果は気象条件に依存することが示唆された。

## 4) 木本植物の導入(植林)による、効果的な環境修復手法の検討

木本植物の導入試験により定着条件および効果的な修復手法を明らかにするとともに、高木・灌木植栽による看護効果の差異を比較した。その結果、高木植栽は灌木植栽に比べ看護効果を広範囲

に発揮するため、高木種植栽区を長期間維持することが周囲も含めて下層植生の質・量の回復に効果的であることが明らかになった。一方、灌木種植栽区では同じだけの期間を経ても周囲の回復におよぼす効果は薄い

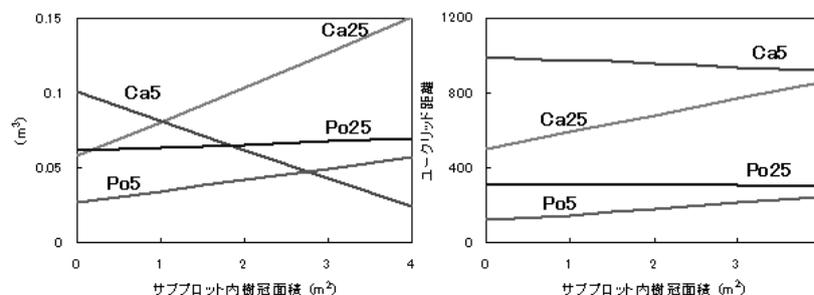


図4 一般化線形混合モデルによる、高木・灌木の樹冠面積と下層植生の植生量(右)および樹冠内外の植生非類似度(右)との関係。Ca: 灌木(*Caragana* sp.) 植栽区、Po: 高木(*Populus* sp.) 植栽区、5, 25: 植栽後の期間(年)を示す。

が、樹冠下に着目すると質・量の回復に効果をもたらすことが示された(図4)。こうした特徴は植栽種の違いによる環境条件の差異に起因するものであると考えられる。一方、植生遷移の観点での評価と嗜好性を用いた放牧利用の観点での評価は一致しないことも示された。環境改善後の利用形態(放牧地としての再利用等)を加味した生態系修復をより効果的に行うためには、今後もこうした知見を蓄積する必要がある。

## (4) 半乾燥砂漠化地域に生育するkey species-ecotypeの生理生態特性の比較解析

2週間の環境制御実験の結果、水ストレスは、*C. microphylla*の両ecotypeの生長を抑制した。特に、高温時にその影響は大きく、低温時に差が小さくなった。生育地間の比較では、基本的な生長速度に差異が認められ、また、温度に対する適応特性が異なる等、ecotypeの分化が示唆された。

より長期(4週間)の環境制御実験を、*S. grandis*と*A. halodendron*のecotypeを用いて実施し、生長解析を行った。*S. grandis*においては、水ストレスの増加は、NARを抑制したことによってRGRを顕著に低下させた。また、LAR、LWR、SLAを微減させ、R/S比を増加させた。温度上昇は、RGR、NAR、R/S比を低下させ、またLAR、LWRを微増させ、SLAにはほとんど影響を与えなかった。*A. halodendron*

の場合でも、水ストレスの増加は、NARを抑制したことによってRGRを顕著に低下させた。また、LAR、LWRを微減させ、SLAへは影響を与えず、R/S比を顕著に増加させた。温度上昇は、RGR、NAR、R/S比を微減させ、LAR、LWR、SLAを微増させた。*A. halodendron*は水ストレス条件下で同化産物を根に多く分配した。即ち全温度処理区で水ストレス条件下の植物のR/S比は増加した。一方、*S. grandis*が水ストレスによってR/S比を増加させたのは低温処理の場合であった。これらのR/S比の応答は、水不足が頻発する半乾燥地域での適応反応の一つであると思われる。この観点からは、高温と水不足状態の多い砂地では、*A. halodendron*が*S. grandis*より適応していると考えられた。また、*S. grandis*と*A. halodendron*の生長速度や生長パラメータを産地間で比較検討した結果、*S. grandis*では既に異なる生態型が分化していることが示唆された。一方、*A. halodendron*では明瞭な生態型の分化はまだ認められないと思われる。

以上の生長解析に加え、環境制御実験で使用したecotypeの生化学/遺伝学的な解析を現在行っている。このような成果を纏めて、ecotypeの環境反応特性/環境適応の違いを明らかにする必要がある。また、北東アジアに広がる多くのkey speciesのecotypeを収集して、同様な比較実験を行い、植生回復（緑化）に有効な「key species－ecotypeデータベース」を構築する重要性が示された。

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

#### 1) 詳細な回復プロセスの解明

信頼性の高い野外観測データにより、回復の鍵となるプロセス（key process）を解明し、それを制御する要因を抽出するとともに、緑化や禁牧等の環境修復技術の適用がどの程度回復を促進する効果があるのか、技術間で効果にどの程度違いがあるのかを明らかにした。荒廃した草原から生産性の高い草原への詳細な回復プロセスを把握するためには、適正に管理された野外サイトでの長期モニタリングが必要である。本研究ではこれまでの研究蓄積や研究協力体制を最大限に生かし、北東アジアを代表する草原タイプごとに、長期観測プロット等を活用してkey processを抽出することができた。この成果は、長期モニタリングデータの不足している北東アジアにおいてはとりわけ貴重であり、生態系モデルの基盤情報として重要であるばかりでなく、信頼性の高い参照データとして、広域モニタリングや生産力推定等に広く活用可能である。

#### 2) 植生マッピング手法の開発

生態系モデルの適用を考慮した詳細スケールにおいて、地理情報システムおよびリモートセンシングにより、これまで困難であった、空間的に不均質な植生の質的差異や回復ポテンシャルの差異を精度よく検出する手法を開発した。本結果は、これまでリモートセンシングによる観測が困難とされてきた灌木－草本、草本－草本という植生変化を検出可能としたものであり、北東アジア特有の砂漠化・回復プロセスをモニタリング・モデリングするうえできわめて重要な科学的成果である。さらに、本研究手法は、精度検証のために一部高解像度衛星画像を利用したが、基本的には既存の比較的安価に入手できる衛星画像から植生荒廃の判別を可能とするものであり、途上国でも運用可能な砂漠化モニタリングシステム手法として、その応用的・実践的意義もきわめて大きい。

#### 3) 植生回復ポテンシャルの評価

植生回復のポテンシャルが回復key speciesの供給源となるコアエリアの空間分布と密接に関連していることを明らかにした。本成果は、植生回復促進のための植栽計画や耕地－草地間の土地利用調整を支援するうえで重要な資料となる。一方、禁牧は回復コアエリアの形成に有効であるものの、植生回復に及ぼす効果は降雨変動性の影響を受け、とくに乾燥度が高まるにつれて顕著に現れることがわかった。降雨変動性が乾燥地における植生回復の制限要因であることはしばしば指摘されてきたが、世界的にも実証例は少なく、とくに北東アジアでは未解明であった。本研究の成果は、非平衡環境における降雨変動性の影響を定量的に実証したものであり、きわめて高い学術的価値有するとともに、予防的管理の重要性を科学的に明らかにしたという点で応用的な意義も大きい。

#### 4) 生態系モデルの構築

生態系モデルと風食モデルあるいは水分・熱・溶質移動モデルを組み合わせた統合モデルを構築することで、質的变化を伴うキープロセスを精度よく再現できることを明らかにした。これまでの生態系モデルの精度は、野外観測データの制約等により、広域スケールでの退行プロセスを定性的に再現する段階にとどまっていた。しかし本研究では、信頼性の高い野外観測（サブテーマ3）や環境制御実験（サブテーマ2、4）の成果に基づき詳細な退行・回復プロセスを明らかにすることで、定性的な回復のプロセスに加え、機能タイプごとの相対被度の変化についての定量的な変動についても再現することが可能となり、より精度の高い実用的なモデルに改善された。さらに、モデ

ルに空間次元を導入することにより、回復プロセスを空間明示的に再現することが可能となり、実際の空間計画策定のための実用的ツールとして活用できるなど、その応用的価値は極めて高い。

#### 5) シナリオアセスメント手法の開発

上記で開発・作成したベースマップおよび統合モデルを適用し、費用便益算出手法により、最大の費用対効果をもたらす砂漠化対処技術の適用手法について検討を行い、最適な技術選択の組み合わせを空間明示的に予測する手法を開発した。これまでのシナリオアセスメントの結果は、広域モニタリング・アセスメントに基づく長期的な対処方針への示唆にとどまっていた。しかもその内容は、必ずしも現況を十分反映した将来予測とはなっていなかった。しかし、本サブテーマで開発したシナリオアセスメント手法では、砂漠化対処施策について、詳細な現況地図をベースマップとして将来予測を行うことにより、その経済的効果および具体的な指針をセットで同時に示すことが可能になった。これは、これまでの砂漠化対処におけるシナリオアセスメントの問題点を克服する成果であり、しかも、現場レベルで求められている具体的な砂漠化対処の手順や指針を空間明示的に示すことができるという点で非常に画期的かつ有用なアセスメントツールである。

以上のように、本研究課題では多数の学術的知見が得られただけでなく、それらを統合し、政策決定者や土地管理者に直接利用できる情報を示し、砂漠化対処政策に貢献しうる具体的な対処手法を提示することができた。

#### (2) 環境政策への貢献

日中韓三カ国による黄砂共同研究（平成20年度開始）における日本のワークプラン作成に際し本研究成果からインプットを行った。とくにワークグループⅡ（黄砂発生源対策）については、黄砂共同研究運営委員会等において、有効な対策技術のリストアップ等の作業を通じて本研究成果のインプットを行った。

本研究成果は、中国・モンゴルにおけるアウトリーチ活動等を通じ、現地での効果的な砂漠化対処の推進に直接貢献するだけでなく、北東アジアでの砂漠化対処技術支援事業の効率的展開や、モデルの一部修正によるアフリカ等他地域への適用等、わが国の技術支援事業の費用対効果の最大化に貢献できる。

また、将来的には本研究の成果は、国連砂漠化対処条約（UNCCD）科学技術委員会（CST）において重要課題とされている「持続的な土地利用管理（Sustainable land use management）」における議論の進展に技術的側面から支援するとともに、生物多様性条約における作業プログラム「乾燥地・半湿潤地における生物多様性」にも貢献することが期待できる。すなわち、乾燥地における生物資源の保全と持続的利用に着目した本研究の成果は、環境関連条約間で協議が進められている連携強化（promotion and strengthening of synergies; 第7回砂漠化対処条約締約国会議）におけるモデルケースとして位置づけられるものであり、CSTへのインプット等を通じ、成果の広報・普及に努める予定である。

## 6. 研究者略歴

課題代表者：大黒俊哉

1965年生まれ、東京大学大学院農学系研究科修士課程修了、現在 東京大学大学院農学生命科学研究科准教授

主要参画研究者

(1) : 大黒俊哉 (同上)

(2) : 清水英幸

1954生まれ、東京大学理学部卒業、現在 独立行政法人国立環境研究所アジア自然共生研究グループ主席研究員

(3) : 吉川 賢

1949生まれ、京都大学大学院農学研究科林学専攻修了、現在 岡山大学大学院環境学研究科教授

(4) : 清水英幸 (同上)

## 7. 成果発表状況（本研究課題に係る論文発表状況。）

(1) 査読付き論文

1) Zheng Y.R., G.M., Rimmington, L. Zhang, P. An, G.S. Zhou, X.J. Li, Y.J. Yu, L.J. Chen and H. Shimizu: Journal of Plant Research, 121(5), 473-482 (2008)

“Growth responses of four dominant species on sand dune of central Inner Mongolia to air temperature and soil moisture”

- 2) Zou C.J., C. Zhang, H. Shimizu, Q. Song, M.D. Jin, Y.L. Ma and W.D. Xu: Israel Journal of Ecology & Evolution, 54, 193-204 (2008)  
“Growth responses of *Picea mongolica* saplings to goat browsing”
- 3) Yang, L., N. Miki, N. Harada, M. Hirobe, K. Sakamoto and K. Yoshikawa: Journal of Environmental Sciences and Sustainable Society, 2, 27-34 (2008)  
“Response of water-use properties and growth of *Sabina vulgaris* Ant. in different water conditions”
- 4) Monda, Y., N. Miki and K. Yoshikawa: Landscape and Ecological Engineering, 4, 115-124 (2008)  
“Stand structure and regeneration of *Populus euphratica* forest in the lower reaches of the Heihe River, NW China”
- 5) 大藪崇司・戸田健太郎・水野由芽・吉永祥平・堀川真弘・張国盛・三木直子・王林和・吉川賢：日本緑化工学会誌 34, 33-38 (2008)  
「中国内モンゴル毛烏素沙地における過放牧指標植物である牛心朴子 (*Cynanchum komarovii* Al. Iljinski)の分布と地下水位の関係」
- 6) 田中あゆみ・福田健二・増田寛子・田中憲藏・吉川賢：関東森林研究 59, 159-162 (2008)  
「中国内モンゴル自治区に生育する臭柏 (*Sabina vulgaris* Ant.)の地下水面からの距離と光合成・蒸散速度の関係」
- 7) Yoshihara, Y., T. Okuro, B. Bayanbaatar and K. Takeuchi: Grassland Science, 55, 89-95 (2009)  
“Effects of disturbance by Siberian marmots (*Marmota sibirica*) on spatial heterogeneity of vegetation at multiple spatial scales”
- 8) Yoshihara, Y., T. Okuro, U. Jamsran, T. Sasaki and K. Takeuchi: Journal of Arid Environments, 73, 364-368 (2009)  
“Are small rodents key promoters of ecosystem restoration in harsh environments?”
- 9) Sasaki, T., S. Okubo, T. Okayasu, U. Jamsran, T. Ohkuro and K. Takeuchi: Ecological Applications, 19, 423-432 (2009)  
“Management applicability of the intermediate disturbance hypothesis across Mongolian rangeland ecosystems”
- 10) Sasaki, T., T. Okayasu, T. Ohkuro, Y. Shirato, U. Jamsran and K. Takeuchi: Journal of Arid Environments, 73, 949-954 (2009)  
“Rainfall variability may modify the effects of long-term enclosure on vegetation in Mandalgobi, Mongolia”
- 11) Sasaki, T., S. Okubo, T. Okayasu, U. Jamsran, T. Ohkuro and K. Takeuchi: Ecology, 90, 2598-2608 (2009)  
“Two-phase functional redundancy in plant communities along a grazing gradient in Mongolian rangelands”
- 12) Hoshino, A., Y. Yoshihara, T. Sasaki, T. Okayasu, U. Jamsran, T. Okuro and K. Takeuchi: Journal of Arid Environments, 73, 687-690 (2009)  
“Comparison of vegetation changes along grazing gradients with different numbers of livestock”
- 13) Hoshino, A., Y. Yoshihara, U. Jamsran, T. Okuro and K. Takeuchi: Sand Dune Research 56(2), 29-38 (2009)  
“Effects of vegetation gap on subsequent species richness and cover on abandoned cropland in semi-arid grasslands of Mongolia”
- 14) Xu Z.Z., G.S. Zhou and H. Shimizu: Crop Science, 49, 1843-1851 (2009)  
“Effects of soil drought with nocturnal warming on leaf stomatal traits and mesophyll cell ultrastructure of a perennial grass”
- 15) Zou C.J., Y. Zhou, W.D. Xu and H. Shimizu: Chinese Journal of Ecology, 28(2), 188-196 (2009)  
“Flora in Songshu Mountains in Inner Mongolia and Community characteristics of *Pinus tabulaeformis* forest”
- 16) Xu Z.Z., G.S. Zhou and H. Shimizu: Journal of Experimental Botany, 60(13), 3737-3749 (2009)  
“Are plant growth and photosynthesis limited by pre-drought following rewatering in grass?”
- 17) Monda, Y., N. Miki and K. Yoshikawa: Journal of Arid Land Studies, 19, 133-136 (2009)

- “Potential of photosynthetic characteristics in polymorphic leaves of *Populus euphratica* Olivier”
- 18) Yamada, Y., Y. Yamaguchi, J. Undarmaa, M. Hirobe and K. Yoshikawa: Journal of Arid Land Studies, 19, 137-140 (2009)
- “Environmental factors controlling leaf emergence in *Caragana microphylla*, a deciduous shrub of the mongolian steppe”
- 19) 田中あゆみ・福田健二・増田寛子・田中憲藏・吉川 賢：関東森林研究 60, 157-160 (2009)  
「中国内蒙古自治区に生育する臭柏 (*Sabina vulgaris* Ant) の地下水面からの距離と種子充実率」
- 20) 大藪崇司・張国盛・渡邊英一・吉永祥平・戸田健太郎・水野由芽・王林和・吉川 賢：日本緑化工学会誌 35, 39-44 (2009)  
「毛烏素沙地における地下水面からの比高による *Agriphylum squarrosus* の分布の違い」
- 21) Okayasu, T., T. Okuro, J. Undarmaa and K. Takeuchi: Agricultural Systems, 103, 180-186 (2010)
- “An intrinsic mechanism for the co-existence of different survival strategies within mobile pastoralist communities”
- 22) 星野亜季・藤巻晴行・大黒俊哉・武内和彦：土壤の物理性, 114, 23-25 (2010)  
「土壤水分センサーの動作不良発生状況およびロガー依存出力値について」
- 23) Yoshihara, Y., T. Okuro, B. Buuveibaatar, J. Undarmaa and K. Takeuchi: Agriculture, Ecosystems & Environment, 135, 155-159 (2010)
- “Complementary effects of disturbance by livestock and marmots on the spatial heterogeneity of vegetation and soil in a Mongolian steppe ecosystem”
- 24) Yoshihara, Y., T. Ohkuro, B. Buuveibaatar, J. Undarmaa and K. Takeuchi: Journal of Arid Environments, 74, 159-163 (2010)
- “Pollinators are attracted to mounds created by burrowing animals (marmots) in a Mongolian grassland”
- 25) Yoshihara Y., T. Ohkuro, B. Buuveibaatar, J. Undarmaa and K. Takeuchi: Oecologia, 162, 427-434 (2010)
- “Spatial pattern of grazing affects influence of herbivores on spatial heterogeneity of plants and soils”
- 26) Yoshihara Y., T. Ohkuro, B. Buuveibaatar, J. Undarmaa and K. Takeuchi: Plant Ecology, 206, 211-224 (2010)
- “Clustered animal burrows yield higher spatial heterogeneity”
- 27) Yoshihara Y, T. Okuro, B. Buuveibaatar, J. Undarmaa and K. Takeuchi: Grassland Science, 56, 42-50 (2010)
- “Responses of vegetation to soil disturbance by Sibirian marmots within a landscape and between landscape positions in Hustai National Park, Mongolia”
- 28) Zheng Y.R., Z.X. Xie, G.M. Rimmington, Y.J. Yu, Y. Gao, G.S. Zhou, P. An, X.J. Li, W. Tsuji and H. Shimizu: Environmental and Experimental Botany, 68(1), 31-36 (2010)  
“Elevated CO<sub>2</sub> accelerates net assimilation rate and enhance growth of dominant shrub species in a sand dune in central Inner Mongolia”
- 29) Tanaka-Oda, A., K. Tanaka, S. Kashimura, I. Ninomiya, H.H. Wang, K. Yoshikawa and K. Fukuda: Journal of Arid Environments, 74, 43-48 (2010)
- “Physiological and morphological differences in the heterophylly of *Sabina vulgaris* Ant. In the semi-arid environment of Mu Us Desert, Inner Mongolia, China”
- 30) Okayasu, T., T. Okuro, J. Undarmaa and K. Takeuchi: Land Degradation and Development, 21, 248-259 (2010)
- “Impact of the spatial and temporal arrangement of pastoral use on desertification around animal concentration points”
- 31) Sasaki, T., Y. Yoshihara, J. Undarmaa and T. Okuro: Ecological Engineering, 36, 1070-1075 (2010)
- “Ecological stoichiometry explains larger-scale facilitation processes by shrubs on species coexistence among understory plants”
- 32) Okuro, T.: Global Environmental Research, 14, 3-10 (2010)
- “Current status of desertification issues with special reference to sustainable provision of ecosystem services in Northeast Asia” ほか6編
- (2) 査読付論文に準ずる成果発表 (社会科学系の課題のみ記載可) なし

## G-071 北東アジアの草原地域における砂漠化防止と生態系サービスの回復に関する研究

## (1) 植生回復ポテンシャル評価および生態系再生予測モデルの構築

東京大学大学院農学生命科学研究科 〈研究協力者〉	大黒俊哉・武内和彦・大久保悟・岡安智生
東京大学大学院農学生命科学研究科	佐々木雄大・吉原佑・星野亜季・宮坂隆文・ 宮森映理子
モンゴル農業大学	Undarmaa Jamsran

平成19～21年度合計予算額	56,461千円
(うち、平成21年度予算額)	17,683千円)

※予算額は、間接経費を含む。

[要旨] 本サブテーマでは、(1)植生分布の空間配置および自然立地条件から、植生回復ポテンシャルを面的に評価し地図化する手法を開発すること、(2)植生回復を予測する生態系モデルを作成し、最適かつ効果的な緑化・環境修復のための技術パッケージを検討することを目的とする。

生態系モデルの適用を考慮した詳細スケールにおいて、オブジェクト指向型分類手法による土地利用区分とデジタル写真測量による地形分類の統合や、移動標準偏差の指標化などにより、空間的に不均質な植生の質的差異や回復ポテンシャルの差異を地理情報システム・リモートセンシングにより精度よく検出する手法を開発した。

植生回復のポテンシャルが、key speciesの供給源となるコアエリアの空間分布と密接に関連し、とくに砂地においては、植生回復が砂丘間低地を起点とした種の定着・分散により進行することを明らかにした。一方、禁牧は回復コアエリアの形成に有効であるものの、植生回復に及ぼす効果は降雨変動性の影響を受け、とくに乾燥度が高まるにつれて顕著にあらわれることを明らかにし、非平衡環境における降雨変動性の影響を実証した。

生態系モデルと風食モデルあるいは水分・熱・溶質移動モデルを組み合わせた統合モデルを構築することで、質的变化を伴うkey processを精度よく再現できることを明らかにした。以上の結果に基づき、本研究で開発・作成したベースマップおよび統合モデルを適用し、費用便益算出手法により、最大の費用対効果をもたらす砂漠化対処技術の適用手法について検討を行い、最適な技術選択の組み合わせを空間明示的に予測する手法を開発した。これにより、砂漠化対処の経済的効果および具体的な指針を同時かつ空間明示的に示すことが可能になった。

以上のように、多数の学術的知見を統合することにより、政策決定者や土地管理者に直接利用できる情報を示し、砂漠化対処政策に貢献しうる具体的な対処手法を提示することができた。

[キーワード] リモートセンシング、植生回復ポテンシャル、生態系モデル、シナリオアセスメント、費用対効果

## 1. はじめに

草原への放牧等のインパクトが強まると一般に、イネ科草原 (grassland) から灌木草原 (shrubland) への移行 (shrub encroachment) に代表されるように、不連続な植生退行が生じることが知られている。この退行遷移は、環境容量 (牧養力) の急激な低下と受食性 (土壌侵食の受けやすさ) の著しい増大を引き起こし、回復が困難となる。したがって、乾燥地において持続的な土地利用を行うためには、砂漠化早期警戒体制 (EWS) に代表される、脆弱性評価に基づく被害の未然防止対策を進めるとともに、利用可能な状態への速やかな植生回復をはかることが、乾燥地における最大の生態系サービスである飼料生産と土地保全の維持という両方の観点からみて、最も重要な生態学上および土地利用上の課題である。これまでの研究により、不連続な退行のメカニズムや牧畜に及ぼす影響などは明らかにされてきた (Zhao et al. 2005)<sup>1)</sup>。また、個別の緑化技術等、環境修復技術の開発も進められている。しかし、回復プロセスの詳細な理解に基づく最適な環境修復技術の選択や、持続的土地利用の再構築までを視野に入れた研究は少なく、とくに北東アジアのステップ地域においては未着手の課題である。

## 2. 研究目的

以上の背景を受け、本研究は北東アジアのステップ地域を対象に、退行プロセスとともに回復プロセスを組み入れた生態系再生予測モデルを開発し、砂漠化した土地の生態系再生と持続的な生物資源利用の両立が可能となるような環境修復の指針を提示することをめざす。本サブテーマではこのうち、(1)植生分布の空間配置から、植生回復ポテンシャルを面的に評価する手法を開発すること、(2)植生回復を予測する生態系モデルを作成し、最適かつ効果的な緑化・環境修復のための技術パッケージを検討することを目的とする。とくに(2)については、既往の早期警戒体制構築の際に提案された生態系モデルのフレーム、すなわち、広域モニタリングによる指標とフィールド調査による砂漠化プロセスと基準、さらに立地条件を加味した砂漠化評価モデルを基礎としつつ、回復プロセスに関わるモジュールを強化した生態系モデル (環境制御実験によるパラメータの提供を含む) を構築し、「どの場所に、どのような技術の組み合わせ (技術パッケージ) をどの程度重点的に適用すれば最大の効果と持続性が得られるか」についての科学的な根拠を提示することを目指す。

## 3. 研究方法

### (1) 研究対象地の概要と事例地域の設定

放牧インパクト等人間活動の増加にともなうイネ科草原から灌木草原や広葉草本草原への退行は、北東アジアのステップ草原でも広くみられる現象である。同地域ではさらに、砂地 (sandyland) における砂丘再活動がパッチ状にみられ、一旦流動化した砂丘では灌木主体の群落が形成され、イネ科草原への回復は著しく抑制される。本研究では、これらの典型的な植生タイプが分布する地域として、中国内モンゴルのホルチン砂地～ムウス砂地および、モンゴル国フスタイ～南ゴビ県を事例地域として設定し、集中的な調査を行うこととした。これまでの研究実績 (環境省地球環境研究総合推進費「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 (2001～2003年度)」および「北東アジアにおける砂漠化アセスメント及び早期警戒体制 (EWS) 構築のためのパイロットスタディ (2004～2006年度)」) により、同地域での成果は北東アジアのステップ植生

に広く適用可能であることが確認されている。

## (2) 鍵となるプロセス (key process) および鍵となる種群 (key species) の設定

つぎに、上記地域におけるこれまでの研究をレビューし、北東アジアのステップ地域において生態系サービス回復の鍵となる回復プロセス (key process) を検討し、下記の2つのプロセスを重点研究対象として選定した。

- ・ 灌木→イネ科草本への回復：中国内蒙古の砂地、モンゴル南部のゴビステップ等
- ・ 広葉草本→イネ科草本への回復：モンゴル中部の森林～典型ステップ、ゴビステップの一部

また、上記プロセスの荒廃・回復ステージにおいて鍵となる種群 (key species) を検討し、下記の種群を重点研究対象候補として選定した。

- ・ 荒廃ステージのkey species：*Chenopodium album*、*Artemisia adamsii*、*A. halodendron*、*Peganum nigellastrum*、*Caragana microphylla*等
- ・ 回復ステージのkey species：*Leymus chinensis*、*Stipa krylovii*、*Stipa gobica*、*Cleistogenes squarrosa*等

本研究では、これらのkey processおよびkey speciesを全サブテーマ共通の重点研究対象として設定した。

## (3) 植生マッピング手法の開発および生態系モデル構築のためのベースマップ作成

これまでの砂漠化モニタリングやモデリングにおいては、主として降水量のような気候指標とNDVI等のバイオマス推定量が指標として用いられてきた。しかし、これらの指標のみでは多様な砂漠化のプロセスを表現できないということが多くの研究によって指摘されている。これに対し、地形・地質・土壌などによる地理的区分ごとに基準・指標を設定して砂漠化のシミュレーション等を行うという方法は、この問題を克服する手法として一定の成果をあげつつある。しかし、脆弱性評価や砂漠化・回復シミュレーションの結果に基づいて、実際に対策技術を適用し、土地利用計画に展開していくためには、より詳細な「現場スケール」での回復ポテンシャル評価や退行・回復の予測が必要となる。

ここで重要となるのが、生態系モデル構築の基礎となる基準・指標の精度が、リモートセンシング等による広域モニタリングとフィールド調査の間で整合性を持つ必要がある、という点である。つまり、フィールド調査により明らかになった退行・回復のプロセスとその指標は、リモートセンシングによって抽出可能でなければならない。本研究では、上記で設定したkey processおよびkey speciesの特性をふまえ、広域モニタリングと現場における現象解明という2つのアプローチを統合する単位として、植物機能タイプ (plant functional type、PFT) に着目し、PFTの変化を基準 (ベンチマーク) とした退行・回復の評価モデルを構築するという戦略をとった。とくに本研究においては、上述した2つのkey process、すなわち、①灌木→(イネ科)草本への回復 (中国内蒙古の砂地、モンゴル南部のゴビステップ等) および、②(広葉)草本→(イネ科)草本への回復 (モンゴル中部の森林～典型ステップ、ゴビステップの一部等) に関わるPFTの変化を抽出可能な手法の開発を目指した。

### 1) 灌木-草本プロセスのマッピング手法の開発

世界の暖温帯草原では、イネ科多年生の草本に灌木が侵入する形の砂漠化が普遍的に起きる。高解像度衛星によって、灌木の形を捉える手法が2000年代に入って多数研究され、小さい灌木の検出が難しいといった問題点があるが、一定の精度で検出できることがわかっている。地中海性

気候である地中海沿岸の砂漠化については、初夏の高温多湿期には草本も灌木も成長するが、夏の後半には高温乾燥になり、灌木のみが成長できる環境にあり、これらの季節を観測し、灌木および草本のバイオマスを推定することが可能になっている。しかし、降水量と植物の成長期がほぼ一致する冷温帯乾燥地においては、灌木・草本の抽出に関する研究はほとんどなされていない。

本研究では、テストサイトとして、中国内モンゴル・奈曼旗における shrub steppe を対象とした。同地域は典型的な農牧交錯地帯に位置しており、放牧草地と農地が混在して分布している。また、砂地域 (Sandyland) に位置し、植生タイプが地形タイプと強く関連していることが特徴としてあげられる。そこで、衛星データを用いた土地利用分類による放牧地の抽出および地形分類を行ったうえで、これらを重ね合わせて、地形タイプごとに異なる放牧地植生タイプを抽出し、生態系予測モデルのためのベースマップを作成した。具体的な手順は以下の通りである。

まず、夏季のALOS/AVNIR-2 (分解能10m、観測幅70km、可視・近赤外域観測のマルチバンドセンサ) 画像とALOS/PRISM (分解能2.5m、観測幅35-70km、可視域を3方向同時観測する単バンドセンサ) 画像を用いて土地利用を分類した。分類には、ALOS/PRISMの解像度の高さおよび耕作地と放牧地のスペクトル特徴の類似性を考慮して、従来のスペクトル情報のみを用いた最尤法によるピクセルベースの分類手法とともに、形状・テクスチャ情報を加えたオブジェクト指向型の分類手法の適用を試みた。すなわち、スペクトル特徴量と形状特徴量を基準に画像分割を行った後、スペクトル特徴量、形状特徴量、およびテクスチャ特徴量を用いて最短距離法による教師付き分類を行った。分類項目は、放牧地、採草地、トウモロコシ畑、その他の畑、未利用地 (荒廃地)、河川、人工面とした。

つぎに、冬季のALOS/PRISMのステレオ画像等およびGPSデータを用いて、デジタル写真測量の手法によりDSM (数値地表モデル) を作成した。対象地域の地形は主に風成作用により形成された砂丘地と沖積作用により形成された低平地に大別され、前者の中でとくに固定化の進んだ緩起伏の平坦面は平砂地と呼ばれる。平砂地は砂丘地の中で比較的生産性が高いといわれており、土地利用の面でも重要視されている。そこで、本研究では平砂地を砂丘地と区別しそれぞれを一地形タイプとしてとらえ、現地の地形測量結果をもとに画像分割手法や近傍解析などによりDSMを低平地、平砂地、砂丘地に分類した。さらに、高解像度衛星QuickBirdを用いて主としてテクスチャ情報から地形タイプごとの灌木植生の特性を評価したうえで、土地利用分類図と地形分類図を重ね合わせ、放牧地植生の分布パターンを広域で把握した。

## 2) 草本-草本プロセスのマッピング手法の開発

本研究で対象とするkey processのうち、草本-草本プロセスについては、広域観測の事例はほとんどなく、観測手法の確立が求められている。テストサイトとして選定したモンゴル・フスタイ国立公園周辺は、幹線道路が近く家畜の集中による土地荒廃が起こる現在のモンゴル国の砂漠化の典型的な場所になっており、一方で放牧が禁止されている国立公園内は良質の草原が広がっているため、荒廃側、回復側双方の観測コントロールを十分とることができる。ここでは、家畜の喫食が植生の空間異質性を変化させることに着目し、フスタイ国立公園周辺における草本→草本型の植生劣化・回復の判別を試みる。本研究手法は近年利用可能になった高空間解像度や高スペクトル解像度衛星を利用する必要がなく、既往の比較的安価に入手できる衛星画像から植生荒廃を判別可能にすることで、途上国でも運用可能な砂漠化モニタリングシステムの手法を提供する。以下のように、衛星画像解析による結果を、フィールド調査の結果と組み合わせることで、手法

の評価を行った。

#### a. 衛星画像解析

ALOS AVNIR-2のマルチスペクトル画像（2007/8/16撮影；10m 解像度）を用いた。まず、SRTM DEM（デジタル標高情報）より、地形分類を行い、低地およびペディメント部分を抽出した。センサー補正、大気補正（Chavetz, 1998）<sup>2)</sup>を行い、反射率に変換した。その画像に、5m x 5mの移動窓を発生させ、スペクトルバンドごとに、それぞれの窓で輝度の標準偏差を計算した。バンド2, 3, 4の移動標準偏差をそれぞれ青、緑、赤色により重ねあわせたものを図1に示す。当該地域は画像中央より少し上を走るウランバートルに通じる幹線道路を挟んで土地荒廃の程度が大きく異なることがグランドトゥールースで明らかになっている。耕作放棄地を除くと、北部の土地荒廃が激しいと想定される場所は白～灰色が強く出ており、一方で南部の良質な草原は地形による異質性を除くとほぼ黒色で示された。

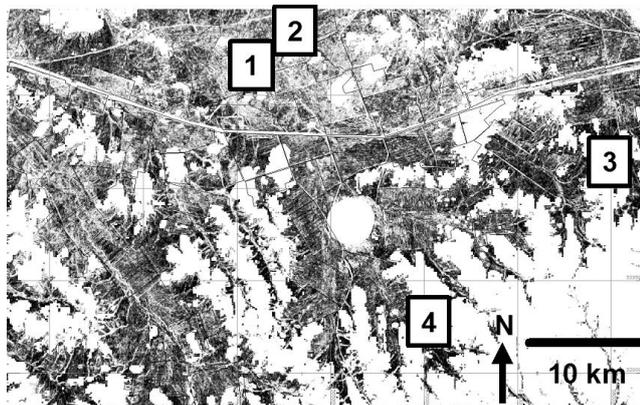


図1 フスタイ国立公園周辺における移動標準偏差。バンド2の輝度値が高いほど白く表現されている。真っ白の部分は山岳や雲などの解析対象外部分。

#### b. フィールド調査

図1より、白色～黒色が強く出ている順に、図1中の1、2、3の3地点をフィールド調査地点として選定した。1はほぼ白色、2は灰色、3はほぼ黒色の地点である。一方、フィールド調査開始時の広域予備調査を行った結果、上記の1、2、3の地点は最も良好な草原の状態を含んでいないことがわかったため、国立公園との位置関係や喫食跡などの植生の状態から、ほぼ放牧の影響を受けていない地点を探索し、図1中の地点4を追加した。フィールド調査はこの4地点で行った。それぞれの地点において、3本のトランセクトを設定した。トランセクトの長さは500mとし、それぞれのトランセクトを50m離れた。それぞれのトランセクトにおいて、5mおきに、1mx1mの調査プロットを設定し、それぞれのプロットで植物の種名、被度、高さを記述する植生調査を行った。

#### （4）フィールド調査による植生回復ポテンシャルの把握に関する検討

植生回復ポテンシャルを把握するためには、上記のリモートセンシングによる、機能タイプの空間分布およびその変動解明に加え、key speciesの供給源となるコアエリア等、種供給ポテンシャルの空間分布をフィールドスケールで明らかにしたうえで、両者を統合したポテンシャル評価を行う必要がある。そこで、中国内蒙古・奈曼旗およびモンゴル・マンダルゴビの長期禁牧プロットを対象に、植生・土壌・地形調査を行った。奈曼旗が位置する砂地では、丘間低地が生物多様性保全のためのコアエリアとして重要と指摘されており、回復key speciesの供給源となっている可能性が高い。そこで、禁牧年数の異なる砂丘地において、丘間低地から砂丘上部にかけてトランセクトを設定して得られた調査データを解析した。一方、マンダルゴビの位置するゴビステップでは、特定の地形立地等と結びついたコアエリアの分布は認められないため、長期禁牧柵（約

25年)内外のコントラストを対象に、禁牧によるコアエリア形成効果を把握することを目的として調査を行った。

#### 1) 中国・内蒙古における調査

まず、現地の住民および研究者(中国科学院奈曼砂漠化研究ステーション研究員)に対し聞き取りを行い、異なる砂漠化対策技術を短・長期的に適用した回復サイト、および対照サイトとして流動砂丘地(各回復サイトの初期状態)と普通放牧地(放牧地として長期間維持されている草地)を選定し、計10サイトで調査を行った(禁牧5年(EX-5)、禁牧35年(EX-35)、灌木植栽(*Caragana microphylla*と*Salix gordejvii*の混植)5年(SH-5)、灌木植栽25年(SH-25)、松(*Pinus sylvestris*)植栽25年(PI-25)、松植栽35年(PI-35)、ポプラ(*Populus simonii*)植栽5年(P0-5)、ポプラ植栽25年(P0-25)、流動砂丘地(SS)、普通放牧地(GP))。対象とした禁牧、灌木植栽、高木(松およびポプラ)植栽は、禁牧、退牧還草、退耕還林という砂漠化関連政策に基づいた、中国における主要な対策技術である。

つぎに、各サイト内において地形傾度に沿ったラインを3本設定し、ライン上の4つの地形タイプ(砂丘間低地(IL)、砂丘下部(LS)、砂丘中部(MS)、砂丘上部(US))ごとに3つのコードラート(1×1m)を設置した。各コードラートで全出現種の平均高と被度を測定し、表層5cmの土壤試料を5つ採取し混合した。地形タイプごとに得られた3つの土壤試料をさらに混合し1サンプルとして、理化学分析に供した。

回復遷移系列を特定するため、各サイトの地形タイプごとの種組成データを用いてDetrended Correspondence Analysis(DCA)を行った。回復遷移系列における各サイトの回復段階および地形効果を調べるため、遷移系列を反映していると考えられたDCA1軸のスコアを応答変数、サイトと地形タイプを説明変数として回帰樹木による解析を行った。10-foldクロスバリデーションを行い(10回試行の平均値を採用)、1-SE法を用いてモデル選択を行った。また、回帰樹木の解析により得られた各サイトの回復段階ごとにIndicator Species Analysis(ISA)を算出し、回復遷移系列に沿った種組成変化の解釈に用いた。

#### 2) モンゴル・マンダルゴビにおける調査

モンゴル・ゴビステップでは、緩傾斜面に沿って2つの群落タイプ(*Allium polyrrhizum*優占タイプ、*Achnatherum splendens*優占タイプ)を含む、禁牧約25年を経過した牧柵の内外計40地点に永久調査区を設置し、植生調査および土壤調査を3年間繰り返し行った。各群落タイプ別に、各植生機能タイプの被度に対する禁牧(2水準)および年(降水量変動要因;3水準)の影響を比較するため、繰り返し測定分散分析を行った(全ての要因を固定効果とした)。また、柵内外の全窒素(TN)と有機炭素(SOC)の違いをt検定で比較した。

#### (5) 生態系モデルの構築によるkey processの再現

本研究の調査結果を統合し、砂漠化対処施策を提示するための生態系モデルについて、モデル構造の検討を行った。砂地においては、サブテーマ1およびサブテーマ3の結果から、木本の看護作用および砂丘間低地からの種子供給が回復のKey processとして確認されている。まず木本の看護作用を介した牧草の回復の再現のために、既往モデルのレビューから、それらを考慮した再現を行うポテンシャルを持つMosaic Arid Land Simulator(MALS)モデルを用いることとした。MALSは、温度、湿度、土壤水分といった外部環境条件から、植物の各部位(根、葉、茎、種子)のバイオマス増減を推定するモデルである。更に、風食に対する看護効果が認められたため、MALS

にWind Erosion Assessment Model (WEAM) を統合し、風食量の推定と、その植物との相互作用による影響の推定も同時に行うこととした。WEAMは外部環境条件(主なものとして風速、土壌水分、土壌粒子の粒径、植物による被覆)を一旦大気動力学の変数(摩擦速度、限界摩擦速度)に変換した後、地上から舞い上がる土壌の量を算定するものである。そして、砂丘間低地からの距離に応じた回復速度の差異についての再現のために、MALSに空間次元を導入し、サブテーマ1の結果および文献調査により、丘間低地からの距離による種子供給の差異を導入した(図2)<sup>3)</sup>。

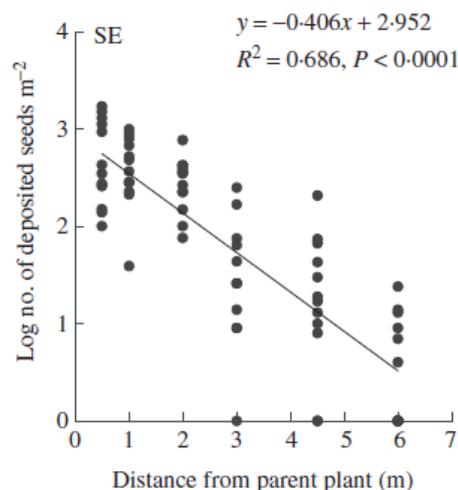


図2 *Artemisia halodendron*の種子の散布距離 (Li et al., 2005)<sup>3)</sup>

一方モンゴル草原の大部分を占める壤土質土壌の地域においては、荒廃地点からのトランセクト調査によって、当該地域では塩類の集積によるイネ科多年草へのストレスが回復を阻害していることが明らかとなった(サブテーマ3)。そのため、MALSモデルの簡易的な土壌水分モデルを土壌中塩類の移動を扱うことができるWASH-1Dモデルによって置き換えることで、モデルが塩類集積による土地荒廃および回復プロセスを再現できるようにした。WASH-1Dモデルは土壌温度、水分および塩類の移動についての基本方程式を数値計算によって解くもので、土壌1mまでを50層に分割して計算する極めて詳細なモデルである。

表1 サブテーマ2より得られたパラメータ

モデルパラメータはサブテーマ2との連携によって得た。主要なパラメータを表1に示す。

発芽・成長実験から得られたパラメータ
最大成長率
成長率に対する温度影響
成長率に対する土壌水分影響
植物体の各部位に対する成長配分割合
最大発芽率
発芽率に対する温度影響
植物形態シミュレーションから得られたパラメータ
SLA Specific Leaf Area (葉面積 / 葉重)
根の土壌中の垂直分布関数

(6) シナリオアセスメント

最後に、サブテーマ1で作成されたベースマップおよび、上記の生態系モデルを用いて、様々な砂漠化対処技術を入れた場合と入れない場合での費用および回復程度を予測した。

まず中国内蒙古自治区奈曼旗における、シナリオアセスメントについての設定を行った。ベースマップ中荒廃地と分類された地域をシミュレーション対象とし、放牧地、湿性草地、および荒廃地内の砂丘間低地を種子の給源と設定した。空間内に任意の砂漠化対処の適応を想定することは、計算機資源上困難である。本研究課題で用いられるモデルは種子給源からの距離に強く依存するので、最もシミュレーション結果を左右するような種子給源からの距離による砂漠化対処の適用の差異のみに限定することとした。具体的には、表2に示すような空間配置に限定した。砂漠化対処による効果については、対処を行わなかった場合と比較した多年草バイオ

表2 奈曼旗周辺でのシナリオアセスメントにおける、本シミュレーションで想定する砂漠化対処シナリオの空間的配置

組み合わせの要素	組み合わせパターン
種子給源に対する位置関係	近接 / 遠方 / ランダム
種子給源に対する植栽の順番	灌木→高木 / 高木→灌木
植栽割合	10~100%を10%ごとに
植栽する木本	高木 / 灌木 / 両方

マスの増加量を、家畜売却益に換算した金額から、対処のために必要な費用を差し引くことで計測した。砂漠化対処の費用については、様々な砂漠化対処について、材料などの直接費用と、人件費などの間接費用について網羅的に整理したYao *et al.* (1992)<sup>4)</sup>を参照し、消費者価格指数によって補正した。シナリオアセスメントは、利用可能な費用を0から、徐々に増やしてゆき、その範囲内で最も効果の高い砂漠化対処の組み合わせを選択し、その効果と砂漠化対処の組み合わせを抽出していく形で行った。

一方、フスタイ国立公園周辺の壤土質土壌の草原については、サブテーマ1で作成されたベースマップにおいて、バンド2の反射率の移動標準偏差を値2で荒廃と良質草原の2値に分類し、良質草原を種子給源とした。塩類除去のために散水を行うこととし、塩類を十分に除去できる散水量についてはシミュレーション試行および文献などから30mm相当と設定した。散水をどのような空間配置について行うかについては、上記の砂地におけるシミュレーション結果から、種子給源に隣接する形で行うことが最大の費用対効果を生むことが分かったので（後述）、本対象地域については、種子給源に隣接させ、そこから何メートルの範囲で散水するかを、荒廃草原の10～100%を覆うような距離ごとに設定した。費用対効果の計算は砂地で行った計算と同様、対処を行った場合と対処を行わなかった場合での多年草の生産量を家畜売却益に換算したものを用いた。散水の費用については、当該地域に最も近いトル川から運搬すると仮定し、必要な散水車のレンタル費、ガソリン代、運転手代を想定した。金額については、モンゴル農業大学の共同研究者を通して現地の会社に聞き取りを行った。

#### 4. 結果・考察

##### (1) 植生マッピング手法の開発および生態系モデル構築のためのベースマップ作成

###### 1) 灌木-草本プロセスのマッピング手法の開発

テストサイトである中国内モンゴル・奈曼旗を対象に、まず、比較的高解像度であるALOS/AVNIR-2を用いて土地利用分類を行った。分類手法としては、従来用いられてきた最尤法によるピクセルベースの教師付分類に加え、オブジェクト指向型の手法を用いた。オブジェクト指向型分類とは、解析対象画像から均質なイメージオブジェクト（ポリゴン）を抽出したうえで、各イメージオブジェクトが持つ属性（スペクトル・形状・大きさ・テクスチャなど）の情報と、イメージオブジェクトが持つ相互関係から得られる情報を用いて画像分類を行う手法であり、森林の樹冠抽出や樹種判別などにも適用されている。

画像解析の結果、3つの放牧草地タイプを含む土地利用を広域で抽出できた。精度を比較すると、オブジェクト分類の全体精度は87%（ $\kappa$ 係数：0.83）となり、ピクセルベースの分類精度77%（ $\kappa$ 係数：0.71）に比べ高い値を示した。とくに、トウモロコシ畑と草甸、輪作畑と放牧地の区分においてオブジェクト分類の精度の高さが示され、草地抽出における有用性が認められた。

つぎに、冬季のALOS/PRISMのステレオ画像（地上分解能2.5m）を用いて、デジタル写真測量の手法によりDigital Surface Model（DSM）を作成したうえで、GPSデータを参照して画像分割および近傍解析等を行い、DSMから対象地域の代表的な地形タイプ（低平地、平砂地、砂丘地）の分類を行った。作成したDSMの高さ精度は2.8mであり、その後の処理を実行する上で十分な精度が得られた。地形分類の全体精度は88%（ $\kappa$ 係数：0.8）となり、良好な結果が得られた。そこで、地形分類図に土地利用分類図を重ね合わせ、3つの放牧草地タイプを地形タイプごとに、9タイプに

細分類した。ただし、テストサイト内の低平地では自由放牧はあまり行われておらず、2つの分類図の重ね合わせの結果からも低平地の放牧草地の面積割合は非常に小さかったことから、その後の解析では低平地を除いた6タイプの放牧草地を対象とした。

抽出された放牧草地を対象に、タイプごとに灌木の侵入程度が異なるかについて検証するため、灌木パッチを判読可能な解像度をもつQuickBirdのPanchromatic画像（地上分解能：0.6m）を利用し、画像上における放牧草地のテクスチャの違いによって灌木の侵入程度の違いを評価した。また、比較のためALOS/PRISM画像を用いて同様の解析を行った。

QuickBird画像を用いた解析の結果、植生量の多い固定砂丘地の放牧草地では地形タイプ間でテクスチャに違いが認められなかったが、半固定・流動砂丘地における放牧草地では

地形タイプによる違いがみられ、とくに砂丘地のContrastの値が平砂地と比較して顕著に高かった（図3）。一方、PRISM画像を用いた解析では、ContrastやCorrelationの値で同様の傾向がわずかにみられたものの、全体的に違いが明確ではなかった。これは、QuickBird画像でとらえられている灌木パッチがPRISM画像では不明瞭であることから、空間解像度で劣るPRISM画像の解析ではテクスチャの違いを検出できなかったためと考えられた。以上の結果から、空間解像度を向上させることにより、植生量が低下している放牧草地において、地形タイプの違いによる灌木の侵入程度をテクスチャの特性によって推定できることが示された。

2) 草本-草本プロセスのマッピング手法の開発

つぎに、モンゴル・フスタイ国立公園周辺における解析結果を示す。図4は、最も荒廃の程度を示していると考えられたバンド2の反射率の移動標準偏差（VSDI）を、フィールド調査を行った範囲内のピクセルの値の分布について比較したものである。分布についてPairwise wilcox test (Bonferroni)による多重比較(p<0.001)を行った結果、サイト3と4は区別できなかったが、それ以外の組み合わせは有意に違いが見られた。

一方で植生調査の結果から整理したそれぞれの地点での優占種を表3に示す。本研究課題のフィールド調査から得られた、荒廃程度と出現種の関連性の結果から、サイト1は重度荒廃、サイト2は重度荒廃だが回復兆候が見られる、サイト3は荒廃とは認められない、サイト4はほぼ最良の放牧地、と解釈された。

以上から、本手法によって、当該地域で見られる土地荒廃を明瞭に判別できることがわかった。一方

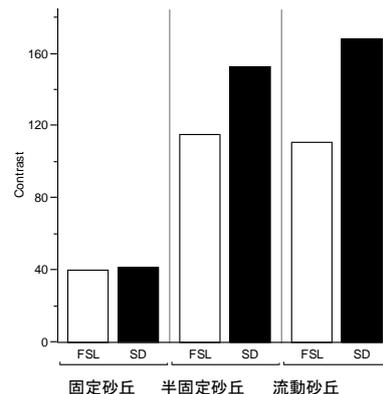


図3 異なる放牧地タイプ（固定砂丘、半固定砂丘、流動砂丘）・地形タイプ（FSL：平砂地、SD：砂丘地）間でのContrast値の比較

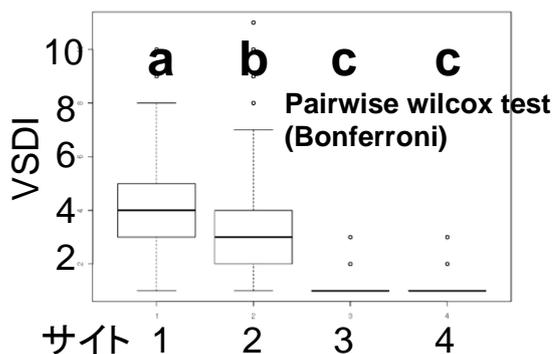


図4 それぞれのサイトでの移動標準偏差

表3 各サイト地点での優占種

サイト	優占種
1	<i>Artemisia adamsii</i>
2	<i>Artemisia adamsii</i> , <i>Elymus chinensis</i>
3	<i>Stipa krylovii</i> , <i>Artemisia frigida</i>
4	<i>Stipa krylovii</i>

で荒廃と認められない範囲(サイト3・4)での植生の違いについては判別することができなかった。図4から、移動標準偏差が2程度を境界とすることで、当該地域の砂漠化地図を作成可能であることが示された。

## (2) フィールド調査による植生回復ポテンシャルの把握に関する検討

### 1) 中国・内蒙古における調査

植生調査によって得られた各サイトの地形タイプごとの種組成データをDCAにより解析した結果、SSからEX-35まで適用年数に沿って全サイトが一軸上(eigenvalue=0.67, gradient length=5.20)に序列化された。これより、DCA一軸は回復遷移系列を反映していると解釈した。回帰樹木による解析の結果、遷移系列に沿って全サイトが4分類され(以下、フェーズ1-4)、地形効果も検出された。

表4 ISAによって抽出されたフェーズごとの指標種群

フェーズ	指標種 (Indicator species, $p < 0.01$ )
1	<i>Artemisia halodendron</i> , <i>Bassia dasyphylla</i> , <i>Corispermum elongatum</i> , <i>Cynanchumthesioides</i> , <i>Hedysarum leave</i> , <i>Lepedeza hedysaroides</i> , <i>Pennisetum centrasiaticum</i>
2	<i>Ixeris denticulate</i> , <i>Corispermum candelabrum</i> , <i>Melissitus ruthenicus</i>
3	<i>Chenopodium acuminatum</i> , <i>Tribulus terrestris</i>
4	<i>Cleistogenes squarrosa</i> , <i>Artemisia scoparia</i> , <i>Chloris virgata</i> , <i>Ferula bungeana</i> , <i>Portulaca oleracea</i>

ISAの結果、表4に示す種が各フェーズの指標種として抽出された(Monte Carlo test with 1000 permutations,  $P < 0.01$ )。各フェーズの指標種群の地形タイプ別相対被度を回復遷移系列に沿って見ると(図6上)、地形傾度に沿って連続的に指標種群が入れ替わっていることがわかった。

当該地域におけるこれまでの関連研究では、単一の対策技術適用による植生や土壌の回復効果を検討したものが多く(例えばKato et al. 1998)<sup>5)</sup>、Shirato et al. (2004)<sup>6)</sup>は異なる技術による植生回復効果の違いを明らかにする必要があると述べている。本研究では、DCAの結果から禁牧、灌木および高木植栽による植生回復過程が一つの遷移系列に従うことを示し、回帰樹木による解析の結果から、適用年数5年では禁牧や灌木植栽に比べ高木植栽の効果が高く、25年でも灌木植栽に比べ高木植栽の効果が高いことを明らかにした。禁牧25年による効果は直接観測できなかったものの、Zhang et al. (2005)<sup>7)</sup>は禁牧18年で*Artemisia halodendron*(回復ステージ1の指標種)が優占すると報告しており、仮に禁牧25年サイトがあった場合ステージ1もしくは2に分類されると推測できる。Liu (1985)<sup>8)</sup>は、流動砂丘地から固定砂丘地までの植生回復過程を*A. halodendron*の優占する前・後の段階(後の段階では*Setaria viridis*が優占)、*Artemisia scoparia*が優占する固定砂丘地の段階に分類しており、それぞれ本研究におけるフェーズ1、2-3、3-4に対応している(表4)。さらに、Li et al. (2009)<sup>9)</sup>は野外実験の結果から、8年間の禁牧および灌木植栽による回復程度が上記*A. halodendron*優占の前段階(ステージ1)までだったことを報告しており、本研究の結果とほぼ一致している。これらより、上記外挿には妥当性があると考えられ、25年という期間で見ても高木植栽による効果が灌木植栽だけでなく禁牧と比べても高いことが示唆された。ただし、適用35年では禁牧でも高木植栽と同程度まで回復が進んでいたことから、25年以降の回復速度は禁牧の方が高い可能性も考えられた。この点については、より時間解像度の高い研究による検証が必要である。

上記関連研究の多くは、対策技術適用により植生・土壌状態がどう変化するのかという点に注目していたが、砂漠化管理における一つのゴールは流動砂丘地を固定砂丘地に変えることであり

(Li et al. 2009)<sup>9)</sup>、望ましい状態になるまでの速度は最も考慮すべき項目の一つである。本研究では、25年程度の高木植栽により、普通放牧草地 (GP) と同程度の植生状態まで回復することを明らかにした。逆にいえば、放牧地利用という観点から見ると、禁牧や灌木植栽では25年程度の適用でも不十分であるといえることができる。Zhang et al. (2005)<sup>7)</sup>は、*Cleistogenes squarrosa* が30 cm深の強力な根系をもつ乾生植物であり、この地域の極相における優占種であると述べている。さらに、*C. squarrosa*が優占してくることで徐々に種多様性は減少すると指摘している。本研究において、回復ステージ4で*A. scoparia* や*C. squarrosa*が地形タイプによらず優占し始めることや(表4および図6上)、多様度指数がステージ4をピークにその後減少することから、ステージ4は極相に近い状態まで達しているといえることができる。したがって、種組成の観点から見れば、対策技術により25年間で普通放牧地程度、35年間でほぼ極相状態まで回復させることが可能であると考えられた。

砂丘地では風食や砂の堆積といった独特の動的環境が形成されており、砂丘地形における立地の違いは植生分布に影響を与える(Katoh et al. 1998)<sup>5)</sup>。わずかな高度差でさえ土壤水分など環境条件の違いをもたらし、植物の定着・再生に最も影響する因子となりうる(Titus 1990)<sup>10)</sup>。本研究でも、回帰樹木の解析により回復ステージ2および3において地形タイプごとに回復状態が異なることが示され、砂丘間低地から砂丘上部に向かう地形傾度に沿って連続的な種のターンオーバーが起こっていることも確認された(図6上)。植生回復は繁殖体の供給量によって制限され(Poschlod et al. 1998)<sup>11)</sup>、埋土種子集団は重要な供給源とされているが(Bakker and Berendse 1999)<sup>12)</sup>、この地域では立地の違いによらず地上部と地下部の種組成がほとんど対応せず埋土種子の効果は限定的という報告がある(Yan et al. 2005)<sup>13)</sup>。この場合、植生回復は主に近隣からの散布体に依存していると考えられ(Matus et al. 2003)<sup>14)</sup>、良好な水分条件や受食性の低い立地特性(砂丘に囲まれた平坦地)をもつ砂丘間低地に、外部からの侵入種がまず定着するものと推測される。地形傾度に沿った種のターンオーバーは、新たな種が砂丘間低地にまず定着し、その後砂丘上部に向かって分散していく過程を反映していると考えられた。また、ステージ4で地形タイプ間の種組成に違いが見られず地形効果が認められなかったことは、新たな種の侵入がなくなり種組成が安定してきている状態を示すものと考えられ、ステージ4が極相に近い植生状態にあるという上述の結果を支持している。

## 2) モンゴル・マンダルゴビにおける調査

禁牧柵内外の永久調査区で行った植生調査の結果、イネ科草本の被度は概して両群落タイプ(*Allium polyrrhizum*優占タイプ、*Achnatherum splendens*優占タイプ)とも柵内で高くなったが、*Allium*タイプでは禁牧と年の交互作用があり、これはイネ科草本の被度の増加が生育時期にある程度の降水量があった場合に限られることに起因すると考えられた。多年生広葉草本、一年生広葉草本についても同様に、概して柵内の被度が高かったが、先行研究と合致しない交互作用も検出された(図5)。一方、TNとSOCは柵内で高く、禁牧の土壤回復に及ぼす効果が認められた。以上から、牧柵の設置によりkey speciesである*Stipa* spp.が増加し、回復のコアエリアが形成されており、禁牧柵からの距離により種供給ポテンシャルが把握できると考えられた。しかし、禁牧と年(降水量)の間で交互作用が検出されたという結果は、乾燥地の放牧地における降雨変動性の高さが長期間禁牧の植生への効果を改変しうることを示唆しており、種供給ポテンシャルの評価に際しても、降水量の変動要因を考慮する必要があると考えられた。

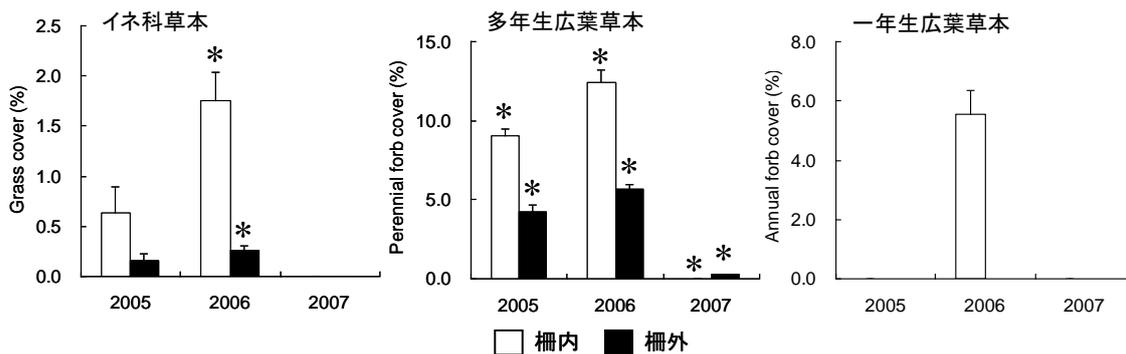


図5 マンダラゴビの牧柵内外における植生機能タイプごとの被度変化 (*Allium* 優占タイプの例)

(3) 生態系モデルの構築によるkey processの再現

検証のために、まずサブテーマ1およびサブテーマ3によって得られた砂地における様々な砂漠化対処施策ごとの空間的な回復パターンとの比較を行った(図6)。図中のPhase1~4は、上述(表4)のフェーズ1~4に対応している。結果は概ね一致しており、種子給源である砂丘間低地からの回復、砂漠化対処による回復速度の増加、といった定性的な回復のプロセスだけでなく、機能タイプごとの相対被度の変化についての定量的な変動についても再現することができた。

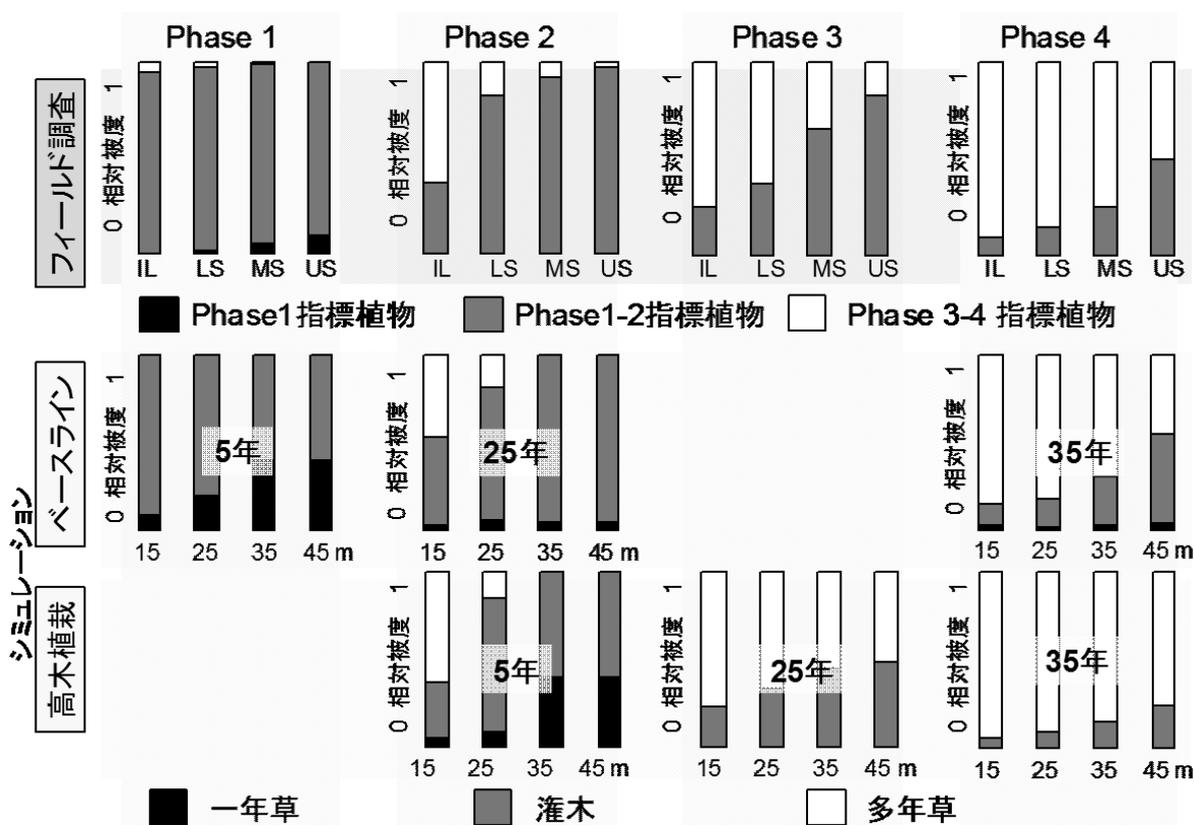


図6 砂地におけるフィールド調査結果(上)とシミュレーション結果(中:ベースライン(禁牧のみ)、下:高木植栽)の比較。IL:丘間低地、LS:砂丘下部、MS:砂丘中部、US:砂丘上部。

WASH-1Dモデルについては、2008年7月24～8月8日について現地で測定した土壌水分データとの比較を行った（図7）。深さ5cmおよび15cmにおいて、平均二乗誤差はそれぞれ0.0053と0.0181を示しており、高い精度で土壌中の水分の推定ができることが確認された。

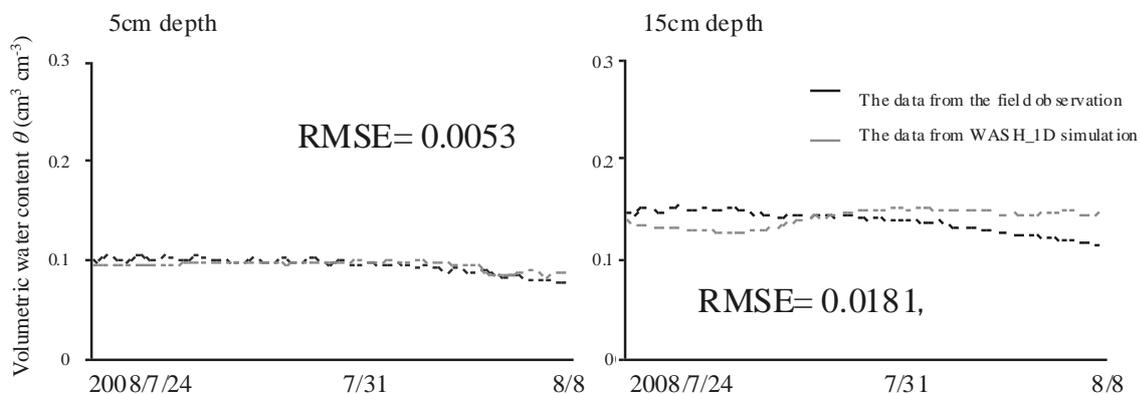


図7 WASH-1Dモデルとフィールド測定による土壌水分変動の比較

#### (4) シナリオアセスメント

図8に奈曼旗周辺の、図9にフスタイ国立公園周辺の、ベースラインと砂漠化対処を全面にわたって行った場合のシミュレーションによる回復の進行をシミュレーションの例として示す。

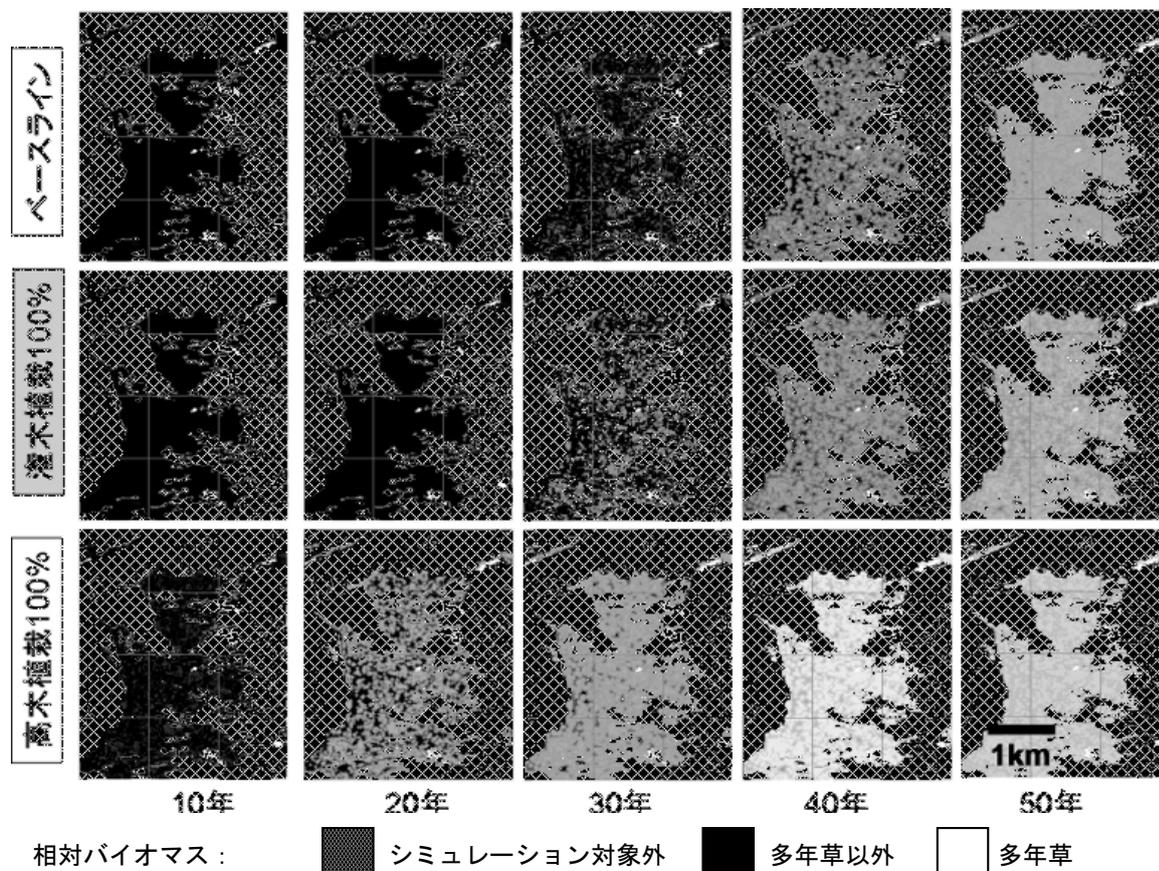


図8 奈曼旗周辺における砂漠化対処ごとの回復速度の違いの例

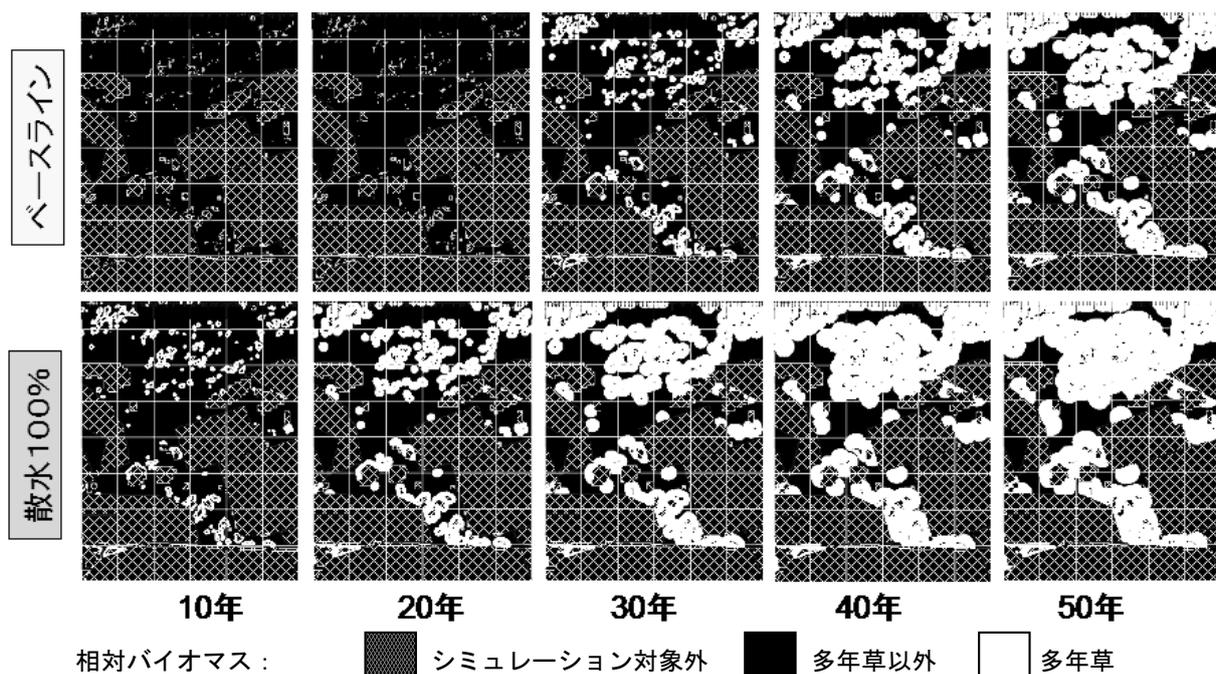


図9 フスタイ国立公園周辺における砂漠化対処ごとの回復速度の違いの例

双方共に、砂漠化対処を行った場合、早期に多年草の侵入を可能にする環境が生まれることで、多年草の広がり初期段階から始まり、結果として回復面積の大きな差異を生むことが見て取れる。このように、砂漠化対処による回復の度合いについての定量的な推定が可能になった。

様々な利用可能な費用に対する、砂漠化対処の組み合わせとその効果を奈曼旗について計算した結果を図10に示す。表2で示した空間的な配置については、どの費用段階でも例外なく、種子給源に隣接させて高木を植栽し、それに隣接させて灌木を植える形がもっとも効果が高いと選択された。効果は費用の上昇に対して一様に増加し、当該地域では費用をかけるに足る経済効果があることがわかった。ただし、詳細に見ると、かけられる費用が増えても植栽が増加しない(=植栽に効果がない)とされる部分が見られた。灌木は70%を超えて選択されず、費用範囲の限界で図4からは判然としないものの、高木も100%が選択されることはなかった。費用範囲の最大まで、10%は灌木が選択されていた。

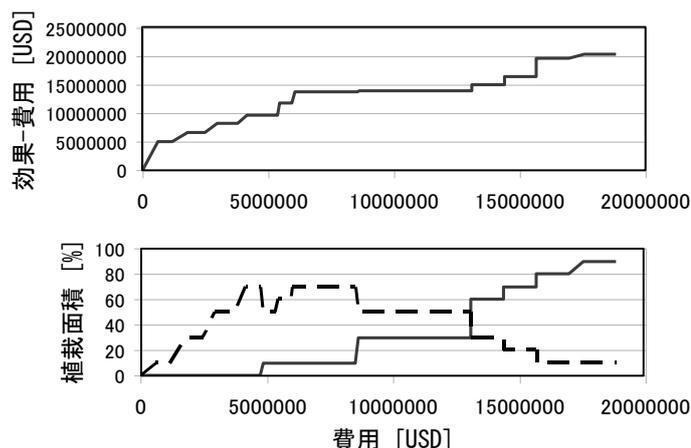


図10 奈曼旗周辺での、様々な利用可能な費用段階に対する、(上)効果と(下)砂漠化対処の組み合わせ。下図破線が灌木植栽割合、実線が高木植栽割合を示す。

このような結果になった理由は以下のように考えられる。まず種子給源のそばでは、すぐに多年草が侵入でき

る環境を生み出せるような高木植栽の効果が高い。一方灌木は環境改善に時間がかかるものの、多年草が広がってゆくにも時間がかかるために、遠方なら灌木による回復速でも十分に合う。灌木植栽の方がコストが低いために、種子給源の遠方は灌木植栽が費用対効果を高める。更に、今回のシミュレーション範囲では比較的種子給源が蜜に存在したため利用可能な費用が高い場合は高木と灌木の植栽面積は100%となったが、より種子給源より遠い地域があった場合、植栽をしない禁牧のみでの遅い環境改善でも間に合う地点の存在が推察される。このように、本研究のシミュレーション結果から、費用対効果を高めるような植栽計画の具体的な指針を得ることができた。

一方、フスタイ国立公園周辺については、あらゆる組み合わせに対して費用対効果がプラスになることがなかった(図11)。これは、単位面積あたりの散水という砂漠化対処手法にかかる費用が高額すぎて、回復が早まっても、その分得られる経済効果が費用を超えられなかったことを示す。当該地域にお

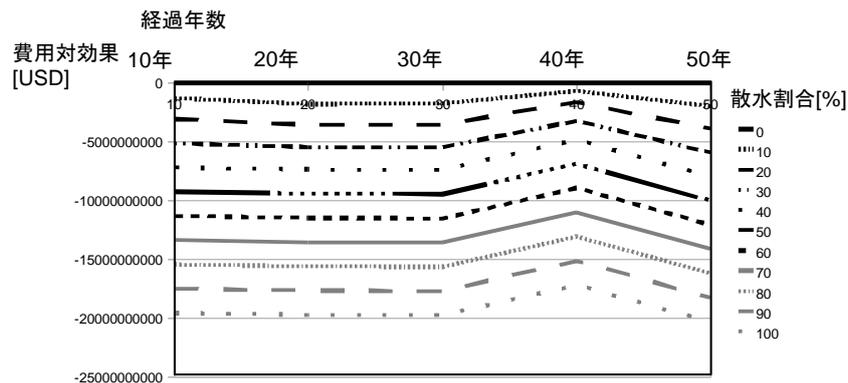


図11 フスタイ国立公園周辺での、散水割合ごとの費用対効果の10年ごとの変化

いては、砂漠化した土地の技術的な回復は有効な手段ではなく、いかに砂漠化させないかについてのより社会的な防止策や予防的管理手法の確立が急がれる。

以上のように、本研究課題で行ったシナリオアセスメントにより、砂漠化対処施策について、その経済的効果および具体的な指針をセットで示した。本研究課題は多数の学術的知見を得られただけでなく、それらを統合し、政策決定者や土地管理者に直接利用できる情報を示し、砂漠化対処政策に貢献しうる具体的な対処手法を提示することができた。

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

#### 1) 植生マッピング手法の開発

生態系モデルの適用を考慮した詳細スケールにおいて、地理情報システムおよびリモートセンシングにより、これまで困難であった、空間的に不均質な植生の質的差異や回復ポテンシャルの差異を精度よく検出する手法を開発した。すなわち、①テクスチャや幾何学的な情報を加えたオブジェクト指向型分類手法による土地利用区分とデジタル写真測量による地形分類を組み合わせることにより、灌木などの機能タイプの動態を精度よく推定できることを明らかにし、また、②移動標準偏差を空間的不均質性の指標とした分類手法を開発し、土地荒廃の程度を指標する草本植生の優占種を明瞭に判別できることを明らかにした。本結果は、これまでリモートセンシングによる観測が困難とされてきた灌木-草本、草本-草本という植生変化を検出可能としたものであり、北東アジア特有の砂漠化・回復プロセスをモニタリング・モデリングするうえできわめて重要な科学的成果である。さらに、本研究手法は、精度検証のために一部高解像度衛星画像を

利用したが、基本的には既存の比較的安価に入手できる衛星画像から植生荒廃の判別を可能とするものであり、途上国でも運用可能な砂漠化モニタリングシステム手法として、その応用的・実践的意義もきわめて大きい。

## 2) 植生回復ポテンシャルの評価

植生回復のポテンシャルが回復key speciesの供給源となるコアエリアの空間分布と密接に関連していることを明らかにした。とくに砂地においては、植生回復が砂丘間低地を起点とした種の定着・分散により進行することを明らかにした。本成果は、植生回復促進のための植栽計画や耕地－草地間の土地利用調整を支援するうえで重要な資料となる。

一方、禁牧は回復コアエリアの形成に有効であるものの、植生回復に及ぼす効果は降雨変動性の影響を受け、とくに乾燥度が高まるにつれて顕著にあらわれることがわかった。降雨変動性が乾燥地における植生回復の制限要因であることはしばしば指摘されてきたものの、世界的にも実証例は少なく、とくに北東アジアでは未解明であった。本研究の成果は、長期モニタリングサイトにおける信頼性の高いデータを解析することにより、非平衡環境における降雨変動性の影響を定量的に実証したものであり、きわめて高い学術的価値有するとともに、予防的管理の重要性を科学的に明らかにしたという点で応用的な意義も大きい。

## 3) 生態系モデルの構築

生態系モデルと風食モデルあるいは水分・熱・溶質移動モデルを組み合わせた統合モデルを構築することで、質的变化を伴うkey processを精度よく再現できることを明らかにした。これまでの生態系モデルの精度は、野外観測データの制約等により、広域スケールでの逆行プロセスを定性的に再現する段階にとどまっていた。しかし本研究では、信頼性の高い野外観測（サブテーマ3）や環境制御実験（サブテーマ2）の成果に基づき詳細な逆行・回復プロセスを明らかにすることで、種子給源である砂丘間低地からの回復や、砂漠化対処による回復速度の増加といった定性的な回復のプロセスに加え、機能タイプごとの相対被度の変化についての定量的な変動についても再現することが可能となり、より精度の高い実用的なモデルに改善された。さらに、モデルに空間次元を導入することにより、回復プロセスを空間明示的に再現することが可能となり、実際の空間計画策定のための実用的ツールに活用できるなど、その応用的価値は極めて高い。

## 4) シナリオアセスメント手法の開発

上記で開発・作成したベースマップおよび統合モデルを適用し、費用便益算出手法により、最大の費用対効果をもたらす砂漠化対処技術の適用手法について検討を行い、最適な技術選択の組み合わせを空間明示的に予測する手法を開発した。これまでのシナリオアセスメントの結果は、広域モニタリング・アセスメントに基づく長期的な対処方針への示唆にとどまっていた。しかもその内容は、必ずしも現況を十分反映した将来予測とはなっていなかった。しかし、本サブテーマで開発したシナリオアセスメント手法では、砂漠化対処施策について、詳細な現況地図をベースマップとして将来予測を行うことにより、その経済的効果および具体的な指針をセットで示すことが可能になった。これは、これまでの砂漠化対処におけるシナリオアセスメントの問題点を克服する成果であり、しかも、現場レベルで求められている具体的な砂漠化対処の手順や指針を空間明示的に示すことができるという点で非常に画期的かつ有用なアセスメントツールである。

以上のように、本研究課題では多数の学術的知見が得られただけでなく、それらを統合し、政策決定者や土地管理者に直接利用できる情報を示し、砂漠化対処政策に貢献しうる具体的な対処

手法を提示することができた。

## (2) 地球環境政策への貢献

日中韓三カ国による黄砂共同研究（平成20年度開始）における日本のワークプラン作成に際し本研究成果からインプットを行った。とくにワークグループⅡ（黄砂発生源対策）については、黄砂共同研究運営委員会等において、有効な対策技術のリストアップ等の作業を通じて本研究成果のインプットを行った。

本研究成果は、中国・モンゴルにおけるアウトリーチ活動等を通じ、現地での効果的な砂漠化対処の推進に直接貢献するだけでなく、北東アジアでの砂漠化対処技術支援事業の効率的展開や、モデルの一部修正によるアフリカ等他地域への適用等、わが国の技術支援事業の費用対効果の最大化に貢献できる。

また、将来的には本研究の成果は、国連砂漠化対処条約（UNCCD）科学技術委員会（CST）において重要課題とされている「持続的な土地利用管理（Sustainable land use management）」における議論の進展に技術的側面から支援するとともに、生物多様性条約における作業プログラム「乾燥地・半湿潤地における生物多様性」にも貢献することが期待できる。すなわち、乾燥地における生物資源の保全と持続的利用に着目した本研究の成果は、環境関連条約間で協議が進められている連携強化（promotion and strengthening of synergies；第7回砂漠化対処条約締約国会議）におけるモデルケースとして位置づけられるものであり、CSTへのインプット等を通じ、成果の広報・普及に努める予定である。

## 6. 引用文献

- 1) Zhao, H. L., X. Y. Zao, R. L. Zhou, T. H. Zhang and S. Drake (2005) Desertification processes due to heavy grazing in sandy rangeland, Inner Mongolia. *Journal of Arid Environments* 62: 309-319.
- 2) Chavez, P. S. Jr. (1988) An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. *Remote Sensing of Environment* 24: 459-479.
- 3) Li, F. R., T. Wang, A. S. Zhang, L. Y. Zhao, L. F. Kang and W. Chen (2005) Wind-dispersed Seed Deposition Patterns and Seedling Recruitment of *Artemisia halodendron* in a Moving Sandy Land. *Annals of Botany* 96: 69-80.
- 4) Yao, H. L., M. C. Liao, C. Y. Jin and S. Kobashi (1992) Studies on the technique of drift sand comprehensive control for highway. In: Uchimouko-Sabaku-Kaihatsu-Kenkyu-Kai eds.: *Analysis of Mechanism and Movement of Desertification in the Arid Land Areas in China*. Uchimouko-Sabaku-Kaihatsu-Kenkyuu-Kai, Tottori, 219-226.
- 5) Katoh, K., K. Takeuchi, D. M. Jiang, Y. H. Nan, and Z. W. Kou (1998) Vegetation restoration by seasonal enclosure in the Kerqin Sandy Land, Inner Mongolia. *Plant Ecology* 139: 133-144.
- 6) Shirato, Y., I. Taniyama, and T. H. Zhang (2004) Changes in soil properties after afforestation in Horqin Sandy Land, North China. *Soil Science and Plant Nutrition* 50: 537-543.

- 7) Zhang, J., H. Zhao, T. Zhang, X. Zhao, and S. Drake (2005) Community succession along a chronosequence of vegetation restoration on sand dunes in Horqin Sandy Land. *Journal of Arid Environments* 62: 555-566.
- 8) Liu, S.E. (1985) Natural Forest and Afforestation on Sand Dunes at Zhanggutai. Science Press, Beijing, 136-144.
- 9) Li, Y. L., J.Y. Cui, T.H. Zhang, T. Okuro and S. Drake (2009) Effectiveness of sand-fixing measures on desert land restoration in Kerqin Sandy Land, northern China. *Ecological Engineering* 35: 118-127.
- 10) Titus, J.H. (1990) Microtopography and woody plant regeneration in a hardwood floodplain swamp in Florida. *Bulletin of the Torrey Botanical Club* 117: 429-437.
- 11) Poschlod, P., S. Kiefer, U. Tränkle, S. Fischer, and S. Bonn (1998) Plant species richness in calcareous grasslands as affected by dispersability in space and time. *Applied Vegetation Science* 1: 75-90.
- 12) Bakker, J.P. and F. Berendse (1999) Constraints in the restoration of ecological diversity in grassland and heathland communities. *Trends in Ecology and Evolution* 13: 63-68.
- 13) Yan, Q.L., Z.M. Liu, J.J. Zhu, Y.M. Luo, H.M. Wang, and D.M. Jiang (2005) Structure, pattern and mechanisms of formation of seed banks in sand dune systems in northeastern Inner Mongolia, China. *Plant and Soil* 277: 175-184.
- 14) Matus, G., B. Tóthmérész, and M. Papp (2003) Restoration prospects of abandoned species-rich sandy grassland in Hungary. *Applied Vegetation Science* 6: 169-178.

## 7. 国際共同研究等の状況

モンゴルにおいては、モンゴル国立農業大学（学長：Prof. Badarch Byambaa）と東京大学大学院農学生命科学研究科の間で国際学術交流協定を締結し、現地調査を共同で実施するとともに、モデル構築についての知見を取り交わした。また、フスタイ国立公園管理事務所（所長：Prof. Namkhai BANDI）と東京大学大学院農学生命科学研究科の間で共同研究に関する協定を締結し、同事務所の協力のもと現地調査を実施した。

中国においては、中国科学院寒区旱区環境工程研究所・奈曼砂漠化研究ステーション（場長：Prof. Zhao Xueyong）と共同で現地調査を実施した。

## 8. 研究成果の発表状況

### （1）誌上発表

<論文（査読あり）>

- 1) Yoshihara, Y., T. Okuro, B. Bayanbaatar and K. Takeuchi: *Grassland Science*, 55, 89-95 (2009)  
“Effects of disturbance by Siberian marmots (*Marmota sibirica*) on spatial heterogeneity of vegetation at multiple spatial scales”
- 2) Yoshihara, Y., T. Okuro, U. Jamsran, T. Sasaki and K. Takeuchi: *Journal of Arid*

- Environments, 73, 364-368 (2009)
- “Are small rodents key promoters of ecosystem restoration in harsh environments?”
- 3) Sasaki, T., S. Okubo, T. Okayasu, U. Jamsran, T. Ohkuro and K. Takeuchi: Ecological Applications, 19, 423-432 (2009)
- “Management applicability of the intermediate disturbance hypothesis across Mongolian rangeland ecosystems”
- 4) Sasaki, T., T. Okayasu, T. Ohkuro, Y. Shirato, U. Jamsran and K. Takeuchi: Journal of Arid Environments, 73, 949-954 (2009)
- “Rainfall variability may modify the effects of long-term exclosure on vegetation in Mandalgobi, Mongolia”
- 5) Sasaki, T., S. Okubo, T. Okayasu, U. Jamsran, T. Ohkuro and K. Takeuchi: Ecology, 90, 2598-2608 (2009)
- “Two-phase functional redundancy in plant communities along a grazing gradient in Mongolian rangelands”
- 6) Hoshino, A., Y. Yoshihara, T. Sasaki, T. Okayasu, U. Jamsran, T. Okuro and K. Takeuchi: Journal of Arid Environments, 73, 687-690 (2009)
- “Comparison of vegetation changes along grazing gradients with different numbers of livestock”
- 7) Hoshino, A., Y. Yoshihara, U. Jamsran, T. Okuro and K. Takeuchi: Sand Dune Research 56(2), 29-38 (2009)
- “Effects of vegetation gap on subsequent species richness and cover on abandoned cropland in semi-arid grasslands of Mongolia”
- 8) Okayasu, T., T. Okuro, J. Undarmaa and K. Takeuchi: Agricultural Systems, 103, 180-186 (2010)
- “An intrinsic mechanism for the co-existence of different survival strategies within mobile pastoralist communities”
- 9) 星野亜季・藤巻晴行・大黒俊哉・武内和彦: 土壌の物理性, 114, 23-25 (2010)
- 「土壌水分センサーの動作不良発生状況およびロガー依存出力値について」
- 10) Yoshihara, Y., T. Okuro, B. Buuveibaatar, J. Undarmaa and K. Takeuchi: Agriculture, Ecosystems & Environment, 135, 155-159 (2010)
- “Complementary effects of disturbance by livestock and marmots on the spatial heterogeneity of vegetation and soil in a Mongolian steppe ecosystem”
- 11) Yoshihara, Y., T. Ohkuro, B. Buuveibaatar, J. Undarmaa and K. Takeuchi: Journal of Arid Environments, 74, 159-163 (2010)
- “Pollinators are attracted to mounds created by burrowing animals (marmots) in a Mongolian grassland”
- 12) Yoshihara, Y., T. Ohkuro, B. Buuveibaatar, J. Undarmaa and K. Takeuchi: Oecologia, 162, 427-434 (2010)
- “Spatial pattern of grazing affects influence of herbivores on spatial heterogeneity

of plants and soils”

- 13) Yoshihara, Y., T. Okuro, B. Buuveibaatar, J. Undarmaa and K. Takeuchi: *Plant Ecology*, 206, 211-224 (2010)

“Clustered animal burrows yield higher spatial heterogeneity”

- 14) Yoshihara Y, T. Okuro, B. Buuveibaatar, J. Undarmaa and K. Takeuchi: *Grassland Science*, 56, 42-50 (2010)

“Responses of vegetation to soil disturbance by Sibirian marmots within a landscape and between landscape positions in Hustai National Park, Mongolia”

- 15) Okayasu, T., T. Okuro, J. Undarmaa and K. Takeuchi: *Land Degradation and Development*, 21, 248-259 (2010)

“Impact of the spatial and temporal arrangement of pastoral use on desertification around animal concentration points”

- 16) Sasaki, T., Y. Yoshihara, J. Undarmaa and T. Okuro: *Ecological Engineering*, 36, 1070-1075 (2010)

“Ecological stoichiometry explains larger-scale facilitation processes by shrubs on species coexistence among understory plants”

- 17) Okuro, T.: *Global Environmental Research*, 14, 3-10 (2010)

“Current status of desertification issues with special reference to sustainable provision of ecosystem services in Northeast Asia”

- 18) Sasaki, T.: *Global Environmental Research*, 14, 17-22 (2010)

“Paradigm integration between equilibrium and non-equilibrium concepts for evaluating vegetation dynamics in rangeland ecosystems”

- 19) Hoshino, A.: *Global Environmental Research*, 14, 23-28 (2010)

“Recent trends in soil degradation research in drylands: Soil organic carbon, temperature, and water as affected by land use and climate change”

- 20) Yoshihara, Y.: *Global Environmental Research*, 14, 55-62 (2010)

“Integrating ecosystem engineering and spatial heterogeneity concepts: toward biologically diverse Mongolian steppe”

- 21) Okayasu, T., T. Okuro, J. Undarmaa and K. Takeuchi: *Global Environmental Research*, 14, 71-77 (2010)

“Desertification emerges through cross-scale interaction”

<その他誌上発表（査読なし）>

- 1) 星野亜季・藤巻晴行・大黒俊哉・ジャムスラン ウンダルマ・武内和彦：2008土壤水分ワークショップ論文集，6-8（2008）

「放牧傾度にそった塩類の集積とその溶脱の数値予測に関する事例研究」

- 2) Hoshino, A., H. Fujimaki, T. Okuro, U. Jamsran and K. Takeuchi: *Proceedings of Soil Moisture Workshop 2009*, 41-45 (2009)

“Comparing drought and salinity tolerances of two dominant grass species in Mongolia”

- 3) Miyasaka, T., T. Okuro, X. Zhao, H. Zhao and K. Takeuchi: *Proceedings of the IGU/LUCC*

- North East Asia Conference “Land cover and land use changes in North East Asia: problems of sustainable nature management” , 97-101 (2009)
- “Agent-based framework of empirical land use/cover change model for simulating relationships between land degradation, household behavior and policy implementation in Northeast China”
- 4) Okayasu, T.: Proceedings of International Symposium on Mongolian Ecosystems and Desertification, 62-66 (2009)
- “Detecting human-induced desertification by remotely-sensed images”
- 5) Okuro, T.: Proceedings of International Symposium on Mongolian Ecosystems and Desertification, 9-12 (2009)
- “Combating Desertification and Restoration of Ecosystem Services in Drylands”
- 6) Kakinuma, K., U. Jamsran, T. Okuro and K. Takeuchi: Proceedings of International Symposium on Mongolian Ecosystems and Desertification, 68-70 (2009)
- “Pastoralists’ perspectives for rangeland condition in Mongolia -a preliminary result-”
- 7) Yoshihara Y, T. Okuro, B. Buuveibaatar, J. Undarmaa and K. Takeuchi: International Symposium on Mongolian Ecosystems and Desertification, 101-106 (2009)
- “Coexistence of livestock and marmots maintain spatial heterogeneity of vegetation and soil in a Mongolian steppe ecosystem”
- (2) 口頭発表 (学会)
- 1) 岡安智生・佐々木雄大・大久保悟・Jamsran Undarmaa・大黒俊哉・武内和彦：第55回日本生態学会大会 (2008)
- 「中規模攪乱仮説を拡張する：促進作用と競争のバランスによって中規模攪乱下の種の共存を説明できるか？」
- 2) 佐々木雄大・大久保悟・岡安智生・Jamsran Undarmaa・大黒俊哉・武内和彦：第55回日本生態学会大会 (2008)
- 「モンゴルの放牧地生態系における中規模攪乱仮説の一般性および土地管理への適用性」
- 3) 吉原佑・大黒俊哉・Buuveibaatar・Undarmaa jamsran・高槻成紀・武内和彦：第55回日本生態学会大会 (2008)
- 「齧歯類の巣穴の空間配置は植生と土壤栄養塩の空間的異質性に影響を与えるか？」
- 4) 星野亜季・大黒俊哉・藤巻晴行・Undarmaa Jamsran・武内和彦：第55回日本生態学会大会 (2008)
- 「放牧傾度に沿った土壤中の塩類とその移動が植生に与える影響 -モンゴル国フスタイ国立公園の事例-」
- 5) 宮坂隆文・大黒俊哉・武内和彦・趙哈林・趙学勇：第55回日本生態学会大会 (2008)
- 「中国ホルチン砂地における耕地の管理・立地・作物種の違いによる土地荒廃パターンの比較 - 土壌特性・雑草群落・作物生産性を指標として」
- 6) 宮森映理子・大黒俊哉・趙学勇：第55回日本生態学会大会 (2008)
- 「中国内モンゴルの砂丘固定技術の適用が植生・土壌の回復に及ぼす効果」
- 7) 大黒俊哉・宮森映理子・宮坂隆文・趙学勇：第55回日本生態学会大会 (2008)
- 「中国内モンゴルホルチン砂地における植生回復ポテンシャルの評価」

- 8) 佐々木雄大・岡安智生・大黒俊哉・白戸康人・Jamsran Undarmaa・武内和彦：第64回日本草地学会大会（2008）  
「降雨変動性が長期間禁牧の植生への効果を改変する」
- 9) 宮坂隆文・大黒俊哉・趙哈林・趙学勇・武内和彦：第64回日本草地学会大会（2008）  
「中国ホルチン砂地の土地荒廃における農・牧業インパクトの違い」
- 10) 宮坂隆文・大黒俊哉・趙哈林・趙学勇・武内和彦：日本リモートセンシング学会第44回学術講演会(2008)  
「ALOS/AVNIR-2およびPRISMを用いた中国ホルチン砂地の農牧業的土地利用分布の広域把握」
- 11) Yoshihara Y., T. Ohkuro and K. Takeuchi: 51st Annual Symposium of the International Association for Vegetation Science, Stellenbosch, South Africa (2008)  
“The configuration of disturbance patches modified spatial heterogeneity of vegetation and soil nutrient properties in a Mongolian grassland”
- 12) Sasaki, T., Okubo, S., Okayasu, T., Jamsran, U., Ohkuro, T. and K. Takeuchi: 51st Annual Symposium of the International Association for Vegetation Science, Stellenbosch, South Africa (2008)  
“Two-phase functional redundancy in plant communities along a grazing gradient in Mongolian rangelands”
- 13) Okuro, T.: International Conference on Sustainability Science 2009, Tokyo, Japan (2009)  
“Restoration and sustainable use of ecosystem services in arid lands of North-east Asia”
- 14) 宮坂隆文・大黒俊哉・宮森映理子・趙学勇・趙哈林・武内和彦：第56回日本生態学会大会（2009）  
「中国内蒙古の異なる砂丘固定技術による短・長期的な植生回復における砂丘間低地の役割」
- 15) 佐々木雄大・大久保悟・岡安智生・ジャムスランウングダルマ・大黒俊哉・武内和彦：第56回日本生態学会大会（2009）  
「モンゴルの放牧地生態系における植物群集に存在する二段階の機能的冗長性」
- 16) 宮坂隆文・趙哈林・趙学勇・武内和彦・大黒俊哉：第56回日本生態学会大会（2009）  
「中国ホルチン砂地における耕地の管理・立地・作物種の違いにもとづく雑草群落タイプの類型化」
- 17) 宮森映理子・宮坂隆文・大黒俊哉・武内和彦・趙哈林・趙学勇：第56回日本生態学会大会（2009）  
「中国半乾燥地における灌木・高木植栽の看護効果」
- 18) 岡安智生：第56回日本生態学会大会（2009）  
「牧民の意思決定とゲルの空間配置を考慮した持続的放牧地管理のためのマルチエージェントモデル」
- 19) Hoshino, A., Okuro, T., Jamsran, U. and Takeuchi, K. : 第56回日本生態学会大会（2009）  
“Early stages of secondary succession on abandoned cropland in semi-arid grassland, Mongolia”
- 20) 吉原佑・大黒俊哉・武内和彦：日本草地学会第65回大会（2009）

「げっ歯類によるモンゴル草地生態系への影響評価：植生と土壌の空間的異質性に注目したアプローチ」

- 21) 宮坂隆文・大黒俊哉・趙学勇・武内和彦：農村計画学会2009年度春期大会学術研究発表会 (2009)  
「中国内蒙古砂漠化地域の階層的・空間的に異質な社会構造における対策実施プロセス」
- 22) Miyasaka, T., T. Okuro, X. Zhao, H. Zhao and K. Takeuchi: IGU/LUCC North East Asia Conference “Land cover and land use changes in North East Asia: problems of sustainable nature management”, Vladivostok, Russia (2009)  
“Agent-based framework of empirical land use/cover change model for simulating relationships between land degradation, household behavior and policy implementation in Northeast China”
- 23) Hoshino, A., H. Fujimaki, T. Okuro, J. Undarmaa and K. Takeuchi: 2nd International Conference BIOHYDROLOGY 2009, Bratislava, Slovakia (2009)  
“Change of soil hydraulic properties along the trajectory after the crop abandonment at semi arid grassland in Mongolia”
- 24) Sasaki, T., S. Okubo, T. Okayasu, U. Jamsran, T. Ohkuro and K. Takeuchi: The 10th International Congress of Ecology, INTECOL, Brisbane, Australia (2009)  
“Ecological benchmarks underpinned by ecological theory: toward sustainable management of Mongolian rangeland ecosystems”
- 25) Okayasu, T.: International Symposium on Mongolian Ecosystems and Desertification, Ulanbator, Mongolia (2009)  
“Detecting human-induced desertification by remotely-sensed images”
- 26) Okuro, T.: International Symposium on Mongolian Ecosystems and Desertification, Ulanbator, Mongolia (2009)  
“Combating Desertification and Restoration of Ecosystem Services in Drylands”
- 27) Hoshino, A., T. Okuro, J. Undarmaa and K. Takeuchi: International Symposium on Mongolian Ecosystems and Desertification, Ulaanbaatar, Mongolia (2009)  
“Early stages of secondary succession on abandoned cropland in semi-arid grassland, Mongolia”
- 28) Kakinuma, K., U. Jamsran, T. Okuro and K. Takeuchi: International Symposium on Mongolian Ecosystems and Desertification, Ulanbator, Mongolia (2009)  
“Pastoralists’ perspectives for rangeland condition in Mongolia -a preliminary result-”
- 29) Okuro, T., H. Shimizu and K. Yoshikawa: International Symposium on Mongolian Ecosystems and Desertification, Ulanbator, Mongolia (2009)  
“Desertification Control and Restoration of Ecosystem Services in Grassland Regions of North-East Asia”
- 30) Yoshihara Y, T. Okuro, B. Buuveibaatar, J. Undarmaa and K. Takeuchi: International Symposium on Mongolian Ecosystems and Desertification, Ulanbator, Mongolia (2009)  
“Coexistence of livestock and marmots maintain spatial heterogeneity of vegetation and

soil in a Mongolian steppe ecosystem”

31) Okayasu, T.: International Conference on Climate Change and Adaptive Capacity Development: Combating Desertification and Sustainable Grassland Management in Govi Region, Mongolia, Ulanbator, Mongolia (2009)

“What is ‘sustainability’ in non-equilibrium rangeland?”

32) Hoshino, A., T. Sasaki, T. Okayasu, U. Jamsran, T. Okuro and K. Takeuchi: International Forum for Ecosystem Management Applying to Ecosystem Adaptivity Science, Robustness and Stability of Organisms and Ecosystems, Sendai, Japan (2010)

“Response of plant functional traits to crop abandonment and soil nutrients in rangeland”

33) 岡安智生・大黒俊哉・Undarmaa Jamsran・武内和彦：第57回日本生態学会大会（2010）  
「異なる遊牧システムの境界の位置は何で決まるのか」

34) 星野亜季・藤巻晴行・大黒俊哉・ジャムスラン・ウンダルマ・武内和彦：第57回日本生態学会大会（2010）

「半乾燥地の耕作放棄後の土壌水分移動特性に多年生草本の侵入が及ぼす影響」

35) 宮森映理子・宮坂隆文・大黒俊哉・武内和彦・趙哈林・趙学勇：第57回日本生態学会大会（2010）

「中国ホルチン沙地における、灌木・高木植栽区の下層植生の評価」

36) 柿沼薫・佐々木雄大・岡安智生・ジャムスラン・ウンダルマ・大黒俊哉・武内和彦：第57回日本生態学会大会（2010）

「モンゴルにおける牧民知識と生態学的知見の統合による放牧地管理」

37) Okayasu, T., T. Okuro, J. Undarmaa and K. Takeuchi: 農村計画学会2010年度春期大会（2010）

“An intrinsic mechanism for the co-existence of different survival strategies within mobile pastoralist communities”

(3) 出願特許

なし

(4) シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

1) 第56回日本生態学会大会企画集会「北東アジアにおける放牧地生態系の再生と持続的利用に向けて：個体群から地域スケールまで」（2009年3月18日、岩手県立大学、観客50名）

2) International Symposium on Mongolian Ecosystems and Desertification (Ulanbator, Mongolia, October 21, 2009, 観客約100名)

(5) マスコミ等への公表・報道等

なし

(6) その他

1) 佐々木雄大・大久保悟・岡安智生・Jamsran Undarmaa・大黒俊哉・武内和彦：第55回日本生態学会大会（2008）

最優秀ポスター賞受賞（分野：種多様性）「モンゴルの放牧地生態系における中規模攪乱仮説の一般性および土地管理への適用性」

- 2) 佐々木雄大：東京大学大学院農学生命科学研究科（指導教員：武内和彦）（2009）  
平成20年度研究科長賞受賞（博士課程・首席）「モンゴルの放牧地生態系における持続的土地管理のための生態学的基準の開発」
- 3) 星野亜季：東京大学大学院農学生命科学研究科（指導教員：大黒俊哉）（2010）  
平成21年度研究科長賞受賞（博士課程）「モンゴルの放牧草原における耕作放棄が植生および土壌に与える影響の解明」
- 4) 岡安智生：環境情報科学センター（2010）  
第10回環境情報科学センター賞受賞（学術論文奨励賞）「遊牧社会の変容に伴う砂漠化過程のモニタリング・モデリング及び対策適用に関する一連の研究」

## G-071 北東アジアの草原地域における砂漠化防止と生態系サービスの回復に関する研究

## (2) 荒廃した草原の回復にかかわるkey speciesの環境適応性の解明

独立行政法人国立環境研究所アジア自然共生研究グループ 清水英幸・戸部和夫・笹川裕史

&lt;研究協力者&gt;

独立行政法人国立環境研究所

伊藤祥子・鄒 春静・許 振柱

矢ヶ崎泰海

鳥取大学農学部

西原英治

中国科学院植物研究所

鄭 元潤

中国科学院瀋陽応用生態研究所

陳 利軍

中国環境科学研究院

于 云江

モンゴル農業大学

Undarmaa Jamsran

平成19～21年度合計予算額 25,234千円

(うち、平成21年度予算額 7,975千円)

※予算額は、間接経費を含む。

[要旨] 生態系サービス回復の評価に必要な基盤的情報として、key speciesの環境適応に係わる生理生態特性を環境制御実験により解明するとともに、形態的・機能的特性を併せ持つ植物生長モデルを構築した。灌木種5種 (*Artemisia halodendron*、*Artemisia frigida*、*Caragana microphylla*等)、イネ科草本6種 (*Cleistogenes squarrosa*、*Leymus chinensis*、*Stipa krylovii*等)、広葉草本5種 (*Peganum nigellastrum*、*Chenopodium album*、*Salsola collina*等)の16種について、降水量変化による水ストレスに対する適応性を検討した。全種とも水ストレスの増加によって葉面積や個体乾重量は抑制されたが、その生理生態的反応には差異が認められた。水ストレスによって、相対生長率 (RGR) や純同化率 (NAR) が顕著に減少する種群、比葉面積 (SLA) が減少し、葉を厚くする傾向を示す種群、根/茎葉 (R/S) 比を増加させ、同化産物を根へ投資する種群等のデータを纏めた結果、水ストレスへの生理生態的応答は、灌木やイネ科草本、広葉草本といった生活型で様ではなく、種毎に異なることが判った。Lindenmayer system (L-system) を用いた植物立体構造シミュレーションプログラムとオブジェクト指向プログラミングの特徴を併せたモデル基礎骨格 (C++クラス群と生長サブモデル群) を設計・統合し、植物立体構造の時系列的生長をシミュレーション可能な三次元植物生長モデルを開発した。Key speciesの *A. halodendron* と *C. squarrosa* を材料として環境制御実験を行い、葉数、葉長、葉面積、茎長、分枝状態、根の鉛直分布と走出角度分布等の形態構造パラメータの計測からモデルパラメータを決定し、標準的な気候におけるKey speciesの「機能-構造生長モデル」を開発した。さらに、水ストレスに対する地上部/地下部の形態構造の応答パターンや乾重生長・生理生態特性解析の結果を用いて、本モデルが水分条件に反応して、形態形成や乾重生長等を再現することが可能になった。これらのデータやモデルは砂漠化回復のツールとして、現地で検証する必要がある。

[キーワード] 環境制御実験、機能-構造生長モデル、砂漠化回復、生理生態、水ストレス

## 1. はじめに

北東アジアの乾燥・半乾燥地域では、近年の社会経済の変革に伴い、従来草原として維持されてきた土地の過放牧等による荒廃・砂漠化の進行が深刻な問題となっている<sup>1-5)</sup>。これまでの研究から、これらの地域における退行遷移の機構や牧畜への影響などは次第に明らかにされてきた。しかし、緑化を含む環境修復・生態系再生、さらには持続的土地利用の再構築に関する研究は少ない。東アジアの草原地域において砂漠化防止と生態系サービスの回復をはかるためには、砂漠化からの回復を解析・再現するための生態系統合モデルの開発が望まれており、砂漠化の荒廃ステージと回復ステージで鍵となる植物種 (key species) の特性を抽出し、そのプロセス (key process) を明らかにし、各種植生パラメータ等を算出する必要がある。このため、砂漠化回復現地における野外調査とともに、環境制御室を用いた生長実験等によりkey speciesの生理生態特性を把握し、key processに係わる環境要因と植物種の適応性の差異を解析し、key species毎に生長モデルを構築する必要性が指摘されてきた。土壌劣化を含む環境要因に対する現地植物種の生長特性<sup>6-9)</sup>を把握することは、砂漠化草原回復の有効性を予測するために不可欠の基盤であるが、これまで、北東アジアの乾燥・半乾燥地域に生育するkey speciesの、環境変動に対する適応性に関してはほとんど解明されていない。

## 2. 研究目的

本サブテーマでは、現地で重要な鍵となる植物種群をkey speciesとして取り上げ、イネ科草原および灌木草原におけるkey speciesの環境適応にかかわる生理生態的特性を環境制御実験により解明し、key speciesの環境適応能の差異をデータベース化すると共に、形態的・機能的特性を併せ持つ植物生長モデル<sup>10, 11)</sup>を構築することを目的とする。本研究により、各環境要因に対するkey speciesの生理生態特性等の基盤的情報が整理され、様々な砂漠化プロセスに対して適切な砂漠化回復植物を提示するために必要な情報が提供される。また、砂漠化対策の評価に重要な生態系統合モデル開発に必要な各種植生パラメータを提供することができる。

## 3. 研究方法

研究対象地域はサブテーマ1と同様とした。イネ科草原から灌木草原や広葉草本草原への退行や砂丘再活動等、北東アジア草原地域に典型的な土地荒廃現象が認められ、かつ典型的植生タイプが分布する地域として、中国内モンゴル・ホルチン砂地～ムウス砂地およびモンゴル国フスタイ～南ゴビ県を設定し、現地植物種を用いた実験やモデル化を検討した。既往の研究成果により、同地域での成果は北東アジアの草原植生に広く適用可能であることが確認されている。

### (1) key speciesの環境適応にかかわる生理生態特性解明のための環境制御実験

上記の調査対象地域を中心に、砂漠化の荒廃ステージ・回復ステージにおける主要な植物種 (key speciesを含む) の種子を収集した。これまでに、中国内モンゴルおよびモンゴルの乾燥・半乾燥地域から、イネ科草本13種、広葉草本15種、灌木10種の合計38種の植物種子を採取し、低温室に保存した(表1)。

これまでの知見や現地調査結果を踏まえ、荒廃ステージの代表的key speciesとして、*Artemisia* 属各種、*Caragana microphylla*、*Chenopodium album*、*Peganum nigellastrum*を、また、回復ステ

ージのkey speciesとして、*Cleistogenes squarrosa*、*Leymus chinensis*、*Stipa*属各種などを抽出し、研究を推進することとした。これまでに、灌木の*Artemisia halodendron*、*Artemisia ordosica*、*Artemisia frigida*、*Caragana korshinskii*、*Caragana microphylla*、イネ科草本の*Achnatherum splendens*、*Agropyron cristatum*、*Clinelymus dahuricus*、*Cleistogenes squarrosa*、*Leymus chinensis*、*Stipa krylovii*、広葉草本の*Medicago sativa*、*Melilotus suaveolens*、*Peganum nigellastrum*、*Chenopodium album*、*Salsola collina*について、土壌水分要因を制御した生長実験を行った(表2)。

表1. 北東アジアの乾燥・半乾燥地域から収集した植物種一覧

Site	Grass Species	Forb Species	Shrub Species
Baiyanaobao, China	<i>Agropyron cristatum</i> <sup>+</sup> <i>Saussurea amara</i> <sup>+</sup> <i>Stipa grandis</i> <sup>+</sup>	<i>Vicia cracca</i> <sup>+</sup>	<i>Artemisia halodendron</i> <sup>+</sup> <i>Astragalus adsurgens</i> <sup>+</sup> <i>Artemisia frigida</i> <sup>+1</sup> <i>Caragana microphylla</i> <sup>+</sup> <i>Hedysarum f ruticosum subsp. laeve</i> <i>Spiraea trilobata</i> <sup>+</sup>
Horqin sandy land, Chian	<i>Agropyron cristatum</i> <sup>+</sup> <i>Clinelymus dahuricus</i> <sup>+</sup> <i>Leymus chinensis</i> <sup>+</sup> <i>Setaria glauca</i> <sup>*</sup> <i>Setaria viridis</i> <sup>*</sup>	<i>Artemisia scoparia</i> <sup>+</sup> <i>Corispermum candelabrum</i> <i>Medicago sativa</i> <sup>+</sup> <i>Melilotus suaveolens</i> <sup>+</sup>	<i>Artemisia halodendron</i> <sup>+</sup> <i>Caragana microphylla</i> <sup>+</sup> <i>Caragana korshinskii</i> <sup>+</sup> <i>Hedysarum f ruticosum subsp. laeve</i>
Liaoning, China	<i>Agropyron cristatum</i> <sup>+</sup> <i>Saussurea amara</i> <sup>*</sup> <i>Stipa grandis</i> <sup>+</sup>		<i>Artemisia halodendron</i> <sup>+</sup> <i>Hedysarum f ruticosum subsp. laeve</i> <i>Artemisia frigida</i> <sup>+1</sup>
Mu Us sandy land, China	<i>Agropyron cristatum</i> <sup>+</sup> <i>Chloris virgata</i> <sup>*</sup> <i>Clinelymus dahuricus</i> <sup>+</sup> <i>Setaria viridis</i> <sup>*</sup>	<i>Agriophyllum squarrosum</i> <sup>*</sup> <i>Astragalus adsurgens</i> <sup>+</sup> <i>Medicago sativa</i> <sup>+</sup>	<i>Artemisia halodendron</i> <sup>+</sup> <i>Artemisia frigida</i> <sup>+1</sup> <i>Artemisia ordosica</i> <sup>+</sup> <i>Artemisia sphaerocephala</i> <sup>+</sup> <i>Caragana korshinskii</i> <sup>+</sup> <i>Caragana microphylla</i> <sup>+</sup> <i>Hedysarum f ruticosum subsp. laeve</i>
Wulanaodu, China	<i>Agropyron cristatum</i> <sup>+</sup>	<i>Vicia cracca</i> <sup>*</sup>	<i>Astragalus adsurgens</i> <sup>+</sup> <i>Caragana microphylla</i> <sup>+</sup> <i>Hedysarum f ruticosum subsp. laeve</i> <i>Spiraea trilobata</i> <sup>+</sup>
Xilinguole glass land, China	<i>Agropyron cristatum</i> <sup>+</sup> <i>Cleistogenes squarrosa</i> <sup>+</sup> <i>Clinelymus dahuricus</i> <sup>+</sup> <i>Leymus chinensis</i> <sup>+</sup> <i>Psammochloa villosa</i> <sup>+</sup> <i>Stipa grandis</i> <sup>+</sup>	<i>Medicago falcata</i> <sup>+</sup>	<i>Kochia prostrata</i> <sup>+1</sup>
Achnatherum site (Mandalgobi) Mongolia	<i>Achnatherum splendens</i> <sup>+</sup>		
Steppe, Mongolia	<i>Agropyron cristatum</i> <sup>+</sup> <i>Stipa sibirica</i> <sup>+</sup> <i>Stipa krylovii</i> <sup>+</sup>	<i>Artemisia adamsii</i> <sup>+1</sup> <i>Artemisia dracunculus</i> <sup>+</sup> <i>Artemisia spp.</i> <sup>+</sup> <i>Chenopodium album</i> <sup>*</sup> <i>Salsola collina</i> <sup>*</sup>	<i>Caragana microphylla</i> <sup>+</sup> <i>Artemisia frigida</i> <sup>+1</sup>
Stipa site (Hustai) Mongolia	<i>Stipa krylovii</i> <sup>+</sup>	<i>Allium anisopodium</i> <sup>+</sup>	
Stipa-Allium site (Bulgan Umnugobi) Mongolia		<i>Peganum nigellastrum</i> <sup>+</sup>	

\*: annual, +: perennial, 1) half shrub

各植物の種子を播種用培土(川砂)に播種し、自然光型温室(温度25℃/相対湿度70%)において発芽・育苗した。発芽後1~2週間で、実験用培土を詰めたポット(7cm φ × 11cm H)に植物を移植し、同条件下で3~4週間育成後、人工光型環境制御室(1.7m W × 2.3m L × 1.9m H; 小糸工業)に移動し、実験を行った。

表2. 水ストレス実験を実施した植物種の概要

	Species	Degraded/ Restored	Perennial/ Annual	Seed Collected Site	
China	Shurb				
		<i>Artemisia halodendron</i>	D	P	Horqin sandy land
		<i>Artemisia frigida</i>		P	Mu Us sandy land
		<i>Artemisia ordosica</i>	R	P	Mu Us sandy land
		<i>Caragana korshinskii</i>		P	Horqin sandy land
		<i>Caragana microphylla</i>	D	P	Horqin sandy land
		Forb			
		<i>Medicago sativa</i>		P	Horqin sandy land
		<i>Melilotus suaveolens</i>		P	Horqin sandy land
		Grass			
	<i>Agropyron cristatum</i>		P	Horqin sandy land	
	<i>Cleistogenes squarrosa</i>	R	P	Xilinguole glass land	
	<i>Clinelymus dahuricus</i>		P	Horqin sandy land	
	<i>Leymus chinensis</i>	R	P	Xilinguole glass land	
Mongolia	Shurb				
		<i>Caragana microphylla</i>	D	P	Steppe
		Forb			
		<i>Chenopodium album</i>	D	A	Steppe
		<i>Salsola collina</i>		A	Steppe
		<i>Peganum nigellastrum</i>	D	P	Stipa-Allium site (Bulgan)
		Grass			
	<i>Achnatherum splendens</i>		P	Achnatherum site (Mandalgobi)	
	<i>Agropyron cristatum</i>		P	Steppe	
	<i>Stipa krylovii</i>	R	P	Stipa site (Hustai)	

D: Key species of degraded, R: Key species of restored, P: Perennial, A: Annual

実験用培土としては、十分に洗浄した海砂／川砂を篩器で選別し、重量比で粒径0.05～0.25mm：45%、0.25～1.00mm：50%、となるように調整した。これに園芸培土（呉羽化学）を粉砕した粒子を5%加えて均一化し、上記のポットに充填し、生長実験を実施した。なお、園芸培土1Kgには、窒素、リン酸、加里、苦土が各々、0.4g、1.9g、0.6g、0.2g含まれている。

14時間明期/10時間暗期、明期の光量子密度：約1,000  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、気温25/15℃（明/暗）、相対湿度50/60%（明/暗）の環境条件のもとで、4週間生長実験を続けた。土壌水分環境として、降水量、30、60、90、120 mm/月に相当する灌水を、2～3日毎に行った。これらの環境条件は主としてホルチン沙地における気象データから決定した。なお、処理期間中の平均水ポテンシャルは、各々-15.2、-6.7、-3.1、-2.6 kPaであり、安定化後では-25.2、-9.7、-3.4、-2.7 kPaであった。

実験開始および終了時に、植物を収穫し、葉面積を計測後（3100型；Li-Cor. Corp. USA）、根、茎、葉に分け、通風乾燥機（90℃）で最低3日間乾燥させ、乾重を計測した（AB204-S；Mettler Instruments A. G., Switzerland）。各処理10個体を用い、Turkeyの多重比較で統計処理を行った。

## （2）key speciesの「機能－構造生長モデル」の開発

### 1）モデル開発の流れ

植物のもつ多様な立体構造は、各々の植物種の生長・生存戦略と密接に関係するが、環境問題の将来予測・対策設計のために現在用いられている生態系シミュレーションの多くでは、植物体の立体構造は大きく単純化または抽象化されている<sup>12-15</sup>。そのため、植物個体と周辺環境の複雑で多様な相互作用を精緻にシミュレーションすることは難しい。

乾燥・半乾燥地域に生育する植物の生長は、砂の飛散や堆積、あるいは時空間的に不均一で生

長律速となる土壌水分などの攪乱要因によって大きく影響される<sup>16,17)</sup>。それゆえ、砂漠化地域の植生遷移の予見には、これらの要因に密接に係る植物体の地上部や地下部の立体構造特性が、各々の植物種の生理生態特性とも関連して重要である。そこで、飛砂や土壌水分などの環境要因の植物への影響をシミュレーション可能とし、現在の植物生長モデルを精緻化・機能強化するために、以下の検討を行った。

- a. 多種多様な植物体の地上部・地下部の立体構造をシミュレーションするためのプログラム「植物立体構造シミュレーションプログラム」の検討。
- b. 植物生長モデルの開発に必要なモデル基礎骨格「オブジェクト指向型植物生長モデル基礎骨格」の設計。
- c. 「植物立体構造シミュレーションプログラム」と「オブジェクト指向型植物生長モデル基礎骨格」を統合した、植物個体を基本単位として周辺環境からの影響を考慮しながら空間上で植物体構造の時系列的発達を含む生長をシミュレーションする「三次元植物生長モデル」の検討。
- d. 実験材料の生育地域の標準的な気候条件で環境制御実験を行い、地下部に関しては根の鉛直分布および走出角度分布を、植物の地上部（茎と葉）に関しては、茎の長さ、葉数、分枝状態、さらに、葉の長さや面積など、モデルに必要な立体構造パラメータの計測・取得。
- e. 環境制御実験で得られた、生長特性・生理生態特性を再現可能とするkey speciesの「機能－構造生長モデル」の開発。

## 2) 水ストレスと地上部／地下部パラメータの計測

環境要因の植物への影響を再現すること目的に、根系の形態および伸長特性の解析に加えて、根系の鉛直分布と走出角度、地上部立体構造について、Key speciesの*A. halodendron*と*C. squarrosa*を実験材料として、土壌水分を変えた実験を複数回繰り返し、水ストレスに対する応答パターンを解析した。

### a. 根の鉛直分布解析

内側背面に寒冷紗を置いた栽培容器（39cm W×88cm L×1cm D）に前述の人工培土を詰め、気温25/15℃（昼/夜）、相対湿度50/60%（昼/夜）の自然光型環境制御室（2m W × 2m L × 2m H；小糸工業）を用いた。ホルチン沙地の平均的な夏期降水量の90mm/月と、乾燥化を想定した45mm/月に相当する灌水処理を2～3日毎に行い、土壌水分の影響を調べた。各処理に3箱を用いて反復処理とした。発芽1週間後に植物個体を栽培容器に移植し、植物を生育させ、6週間後に容器を解体し、砂を水で洗い流した後、全体を乾燥させ、寒冷紗に絡まった根の分布をスキャナーで読み取り、画像解析して根の鉛直相対分布量を算出した。

### b. 根の走出角度分布解析

川砂を詰めたポット（25cm φ × 22cm H）を用い、表層から深さ10cmの位置に大小二つのザル（20cm φ、15cm φ）を埋設し、ザルを通過する根の位置を記録した。気温25/15℃（明/暗）、相対湿度50/60%（明/暗）の人工光型環境制御室（1.2m W × 0.8m L × 1.8m H；小糸工業）を用い、降水量90mm/月と45mm/月に相当する灌水処理を2～3日毎に行った。各処理に3ポット（反復処理）を用いた。発芽数日後に植物個体を上記ポットに移植し、発芽10週間後に、根元を原点とする極座標系を想定し、根の通過位置座標の鉛直方向の角度値の分布を解析した。

### c. 地上部の立体構造解析

根の走出角度分布解析の植物試料を用いて、地上部（茎と葉）に関して、茎の長さ、葉数、分枝状態、さらに、葉の長さや面積など、地上部立体構造パラメータについて計測した。

### 3) 三次元植物生長モデル「機能－構造生長モデル」の開発

L-systemの言語特性をベースとした三次元植物生長モデル<sup>18)</sup>を検討し、モデルの形態パラメータ取得に向けて環境制御実験を行った。さらに、これらの結果を用いてシミュレーションプログラムの開発を行った。

研究の流れは以下の通りである。①これまで実施してきた地上部および地下部の立体構造計測の結果を用いてモデルパラメータを決定し、標準的な気候における「機能－構造生長モデル」を開発した。②環境制御実験から得られた生理生態特性パラメータを用いて、本モデルが水分条件に反応するように改良した。

#### a. シミュレーションプログラムの開発

カルガリー大学(カナダ)のPrusinkiewiczのグループは植物形態形成を記述するための専用言語cpfg(C-like plant and fractal generator)を開発し、Windowsで稼働するシステムL-studioを配布している<sup>19)</sup>。L-studioは、L-systemによって記述された生長ルールに、形態的特徴やその空間配置を3次元グラフィックスで表現する技術を組み合わせて、現実感のある植物形態を出力することができる<sup>20)</sup>。そこで、本研究ではL-studioを用いてモデルの開発を行った。

材料はKey speciesの*A. halodendron*と*C. microphylla*とし、実験材料の生育地域の標準的な気候条件における根系の形態、鉛直分布、走出角度、地上部立体構造を解析し、基本的な植物形態のパラメータを求めた。

モデルを過度に複雑にすることなく十分に生長が表現できるように<sup>21)</sup>、本モデルの構造単位は葉、枝、茎、根とした。生長量は日単位を基本とした。また、オブジェクトの生長を齢（成熟度）だけで制御する場合、ある段階までは現実の生育を再現するが、それを越えると多数の側枝が萌芽し、植物体構造が非現実的になる。そこで、各オブジェクトは生長開始まで一定の期間を必要とし、日数が経つにつれ生長量が減衰していく(1)式を基本に、オブジェクトに側芽抑制（頂芽優勢）の特性値を与えて、より現実に近い分枝－外観形態を再現するモデルを開発した。

$$S_{i,t} = S_{i,t-1} + G_i \times \left(1 - \left(\frac{t}{P_i}\right)\right) \quad (1)$$

ただし、 $S_i$ ：オブジェクト*i*の生長量、 $G_i$ ：オブジェクト*i*の日単位あたり生長量、 $P_i$ ：オブジェクト*i*の最大生長日数、 $t$ ：生長開始からの時間である。

#### b. 水分反応モデルへの改良

植物の生長量は環境要因に影響を受ける。したがって、シミュレーション結果を現実に近づけるためには、モデルに環境要因による生長量の制御機能を付加する必要がある。しかし、現在のモデルは周辺の環境要因からの影響は組み込まれていない。そこで、環境要因が植物に与える影響をシミュレートするため、水分条件の違いにより生長量を抑制する機能を、*A. halodendron*のモデルに組み込んだ。

#### 4. 結果・考察

##### (1) key speciesの生理生態特性の解明—植物の栄養生長に及ぼす水ストレスの影響

土壌水分処理開始4週間後の各植物種の状態を灌木、イネ科草本、広葉草本ごとに図1a~1cに示す。植物種によって程度の差はあるが、処理期間中の水ポテンシャルが低くなる（降水量が少なくなる）ほど、植物個体の生育は抑制された。

本研究に用いた各key speciesの水ストレスに対する、各器官および個体の乾重を図2a~2cに示す。一年生広葉草本の*C. album*と*S. collina*の2種のみ、実験期間中に花が認められた。ホルチン沙地における植物生長期である夏期降水量（ほぼ90mm/月）が3割ほど増加した場合、灌木5種のうち、*A. halodendron*、*A. ordosica*、*C. korshinskii*、*C. microphylla*の生長量は増加傾向を示し、*A. ordosica*では有意であった。一方、*A. frigida*の生長量は有意に低下した。イネ科植物においても、灌木と同様に降水量増加によって生長量は増加傾向を示した。特に*L. chinensis*と*S. krylovii*では有意な増加が認められた。広葉草本では、降水量増加による生長量への影響は、*P. nigellastrum*（有意に増加）以外では大きな変化が認められなかった。

一方、降水量の減少、すなわち水ストレスが強くなると、全ての植物種の生長は有意に低下した。ただし、生長抑制の割合は種によって異なっていた。例えば、降水量が3分の1（30mm/月）になった場合の個体乾重は、灌木の*A. ordosica*と*A. frigida*では85%以上減少したのに対して、*C. microphylla*では30%未満の減少を示したに過ぎなかった。イネ科草本では、*L. chinensis*と*S. krylovii*の減少率が75%以上で、他の4種に比べて著しい生長低下を示した。広葉草本では、*M. sativa*の減少率が25%程度であったのに対して、*P. nigellastrum*では減少率が80%以上と、顕著な生長抑制が認められた。各器官も同様な減少傾向を示したが、広葉一年生草本の*C. album*と*S. collina*では水ストレスが強くなると特に花の割合が減少した。

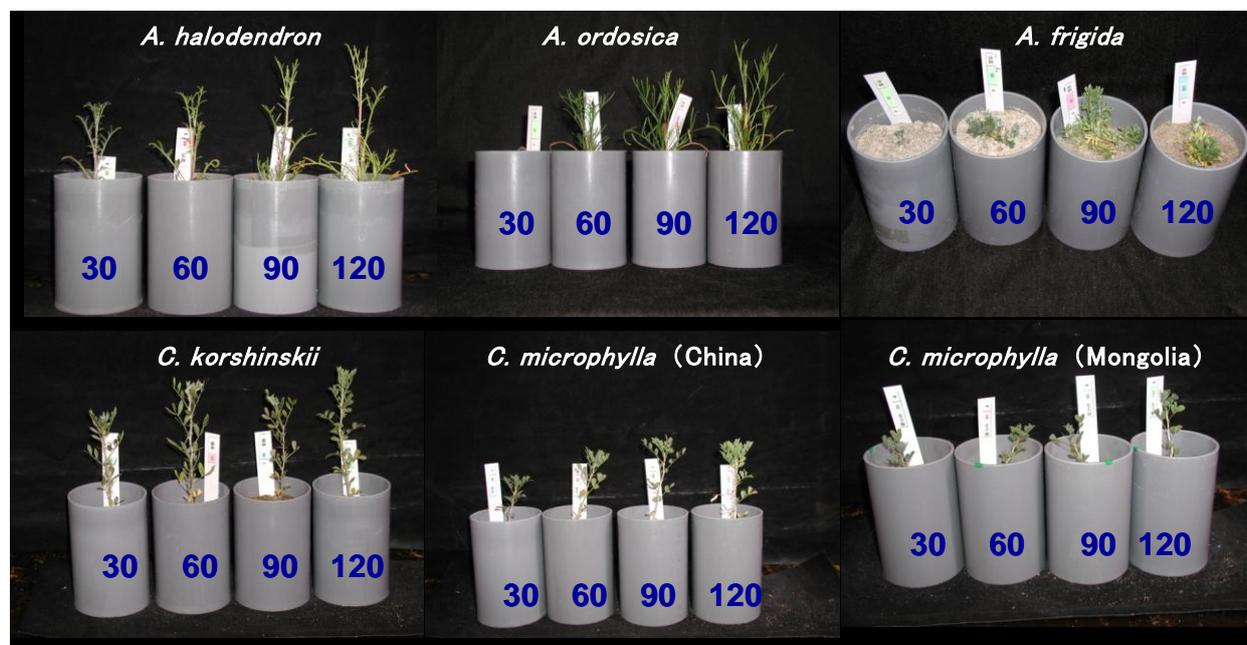


図1a. 水ストレスに対する灌木5種の生育状態。図中の数字は水処理値（降水量換算：mm/月）。

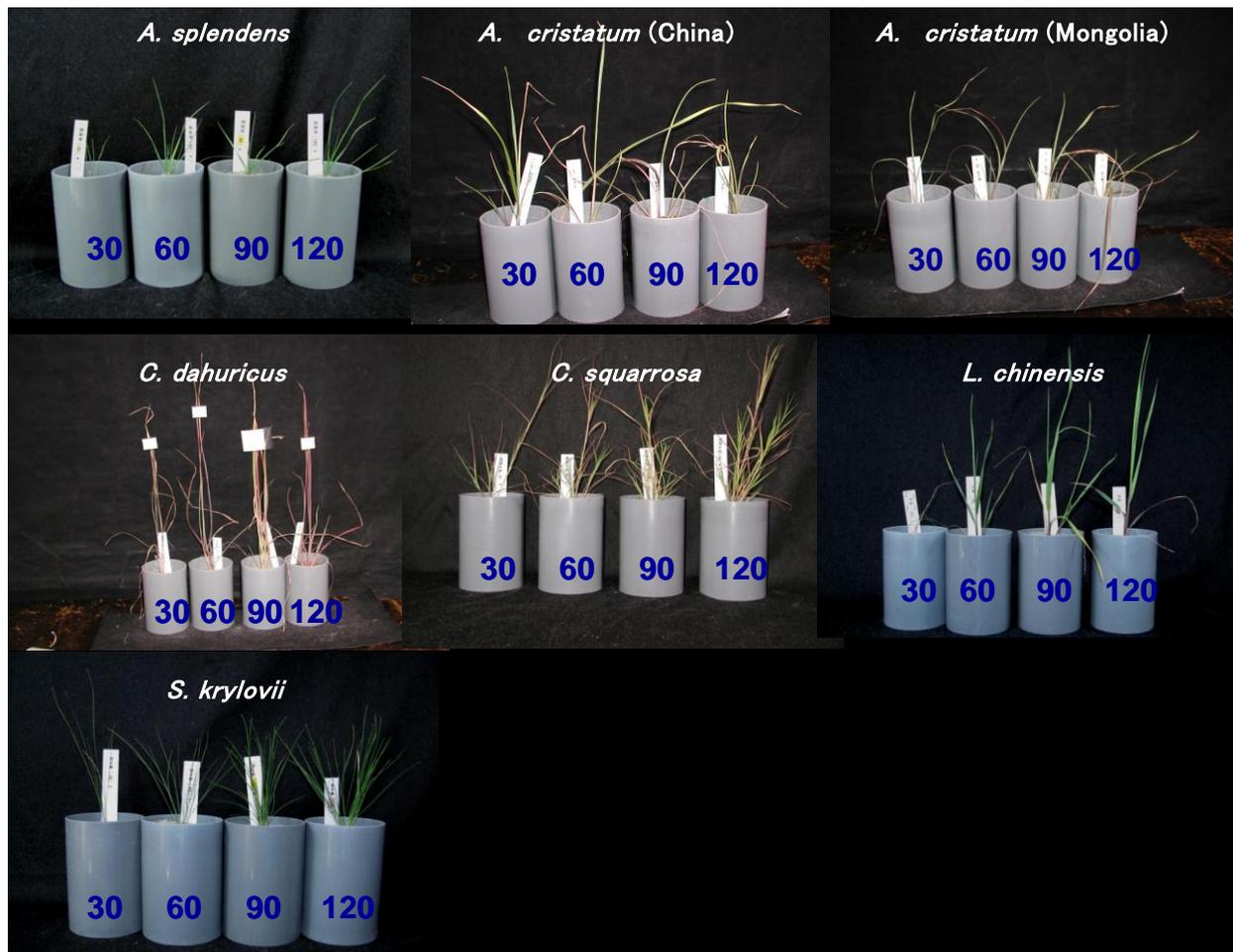


図1b. 水ストレスに対するイネ科草本6種の生育状態。図中の数字は図1Aと同じ。



図1c. 水ストレスに対する広葉草本5種の生育状態。図中の数字は図1Aと同じ。

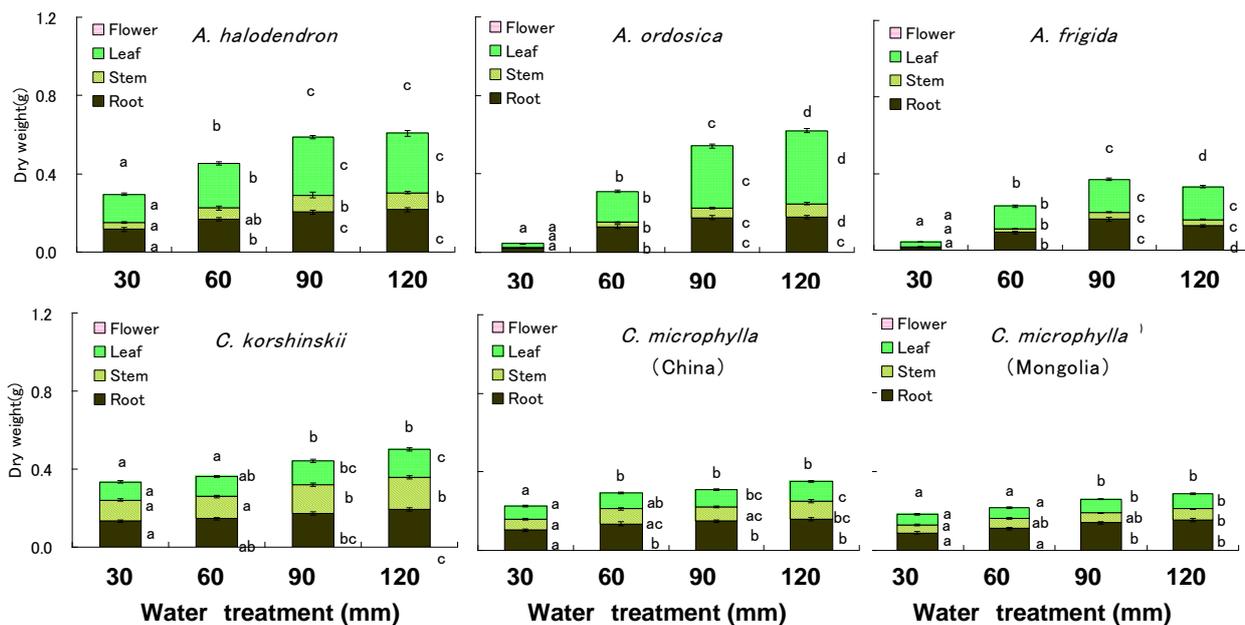


図2a. 水ストレスが灌木5種の乾重生長に及ぼす影響. 図中の異なる英字は個体および器官毎にTurkeyの多重比較検定を行った結果で有意差 (<5%) があることを示す: 上から個体, 花, 葉, 茎, 根. 縦棒は標準誤差を示す: 上から花, 葉, 茎, 根.

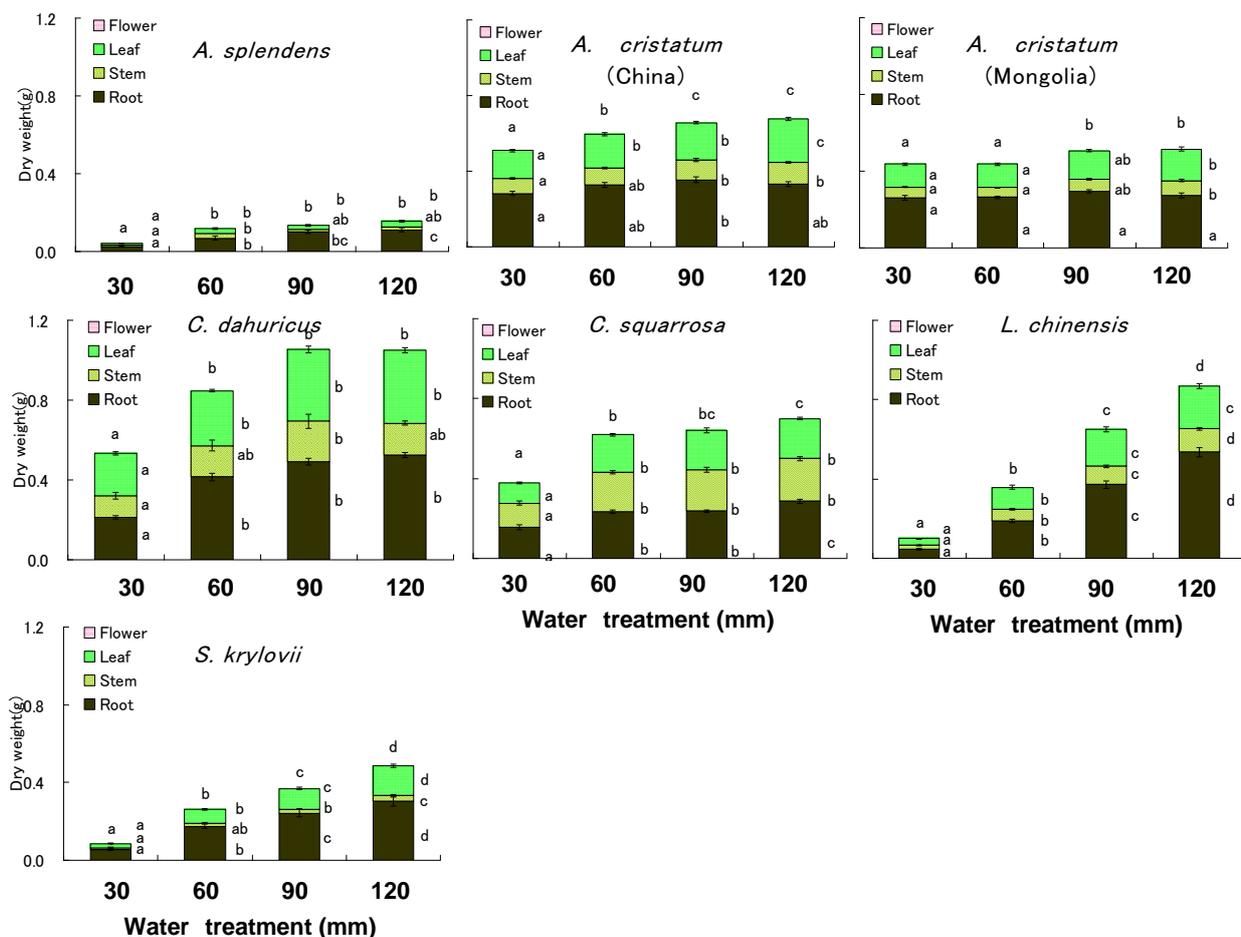


図2b. 水ストレスがイネ科草本6種の乾重生長に及ぼす影響. 図中の英字や縦棒は図2Aと同じ.

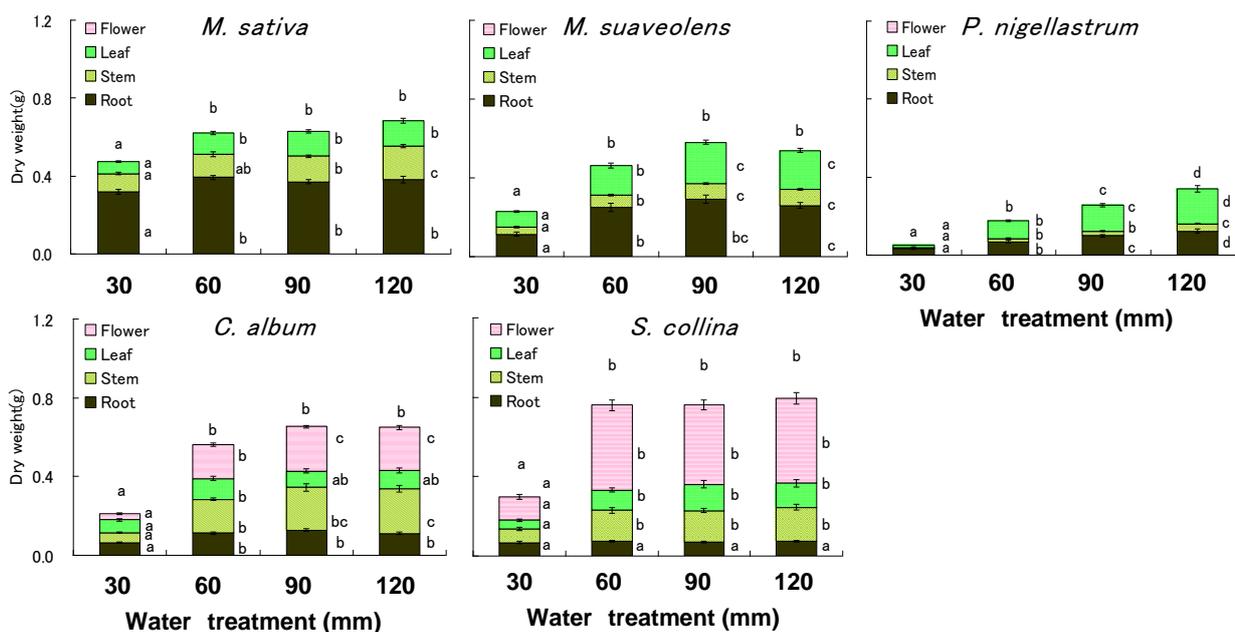


図2c. 水ストレスが広葉草本5種の乾重生長に及ぼす影響. 図中の英字や縦棒は図2Aと同じ.

今回の水ストレス処理は、降水量換算で、30、60、90、120 mm/月に相当する灌水を行ったが、土壌水分が安定化した後の平均水ポテンシャルは、 $-25.2$ 、 $-9.7$ 、 $-3.4$ 、 $-2.7$  kPaであった。図3a～3cに、この水ポテンシャルと各植物種の相対生長率 (RGR)、純同化率 (NAR)、葉面積比 (LAR)、葉重比 (LWR)、比葉面積 (SLA) および根/茎葉 (R/S) 比の関係を示す。降水量90mm/月 (水ポテンシャル $-3.4$  kPa)の処理区の値を100%とし、直線回帰を行って比較した。

今回実験を行った灌木5種、イネ科草本6種、広葉草本5種の全種において、水ストレスの増加に伴ってRGRの低下が認められたが、減少率 (図中の傾き) は種によって異なっていた (図3a～3cおよび図4)。特に灌木の*A. ordosica*、イネ科草本の*C. dahuricus*、*L. chinensis*、*S. krylovii*、広葉草本の*C. album*では、水ストレスの増大に伴ってRGRが顕著に減少したが、その他の種では比較的緩やかに減少した。RGRの変化とほぼ同様に、水ストレスに伴ってNARの減少が認められた。すなわち、これら多くの植物種の生長量の減少は、NARの低下に起因することが示された。一方、イネ科草本の*A. splendens*と広葉草本の*P. nigellastrum*においては、強い水ストレスによってNARの低下が認められず、代わってLARの顕著な減少が引き起こされていた。

RGRはNAR (生理的特性 = 光合成と関係) とLAR (構造的的特性) の積として表すことができる。さらにLARは、LWR (同化産物の分配率と関係) とSLA (葉の形態的特性 = 葉の薄さと関係) の積として表すことができる。LWRの代わりにS/R比やR/S比が分配率の変化の指標として比較されることが多い。そこで、葉の形態指標としてSLAを、分配率の指標としてR/S比を比較した (図3a～3cのE図とF図)。イネ科草本の*A. splendens*、*C. dahuricus*、*C. squarrosa*、*L. chinensis*、*S. krylovii*と広葉草本の*C. album*では、水ストレスの増大に伴ってSLAが減少しており、水欠乏状態で葉の形態的特性が変化し、葉を厚くする傾向にあった。これらは水ストレス条件下において、蒸散量の抑制を示唆する反応の1つであると考えられた。

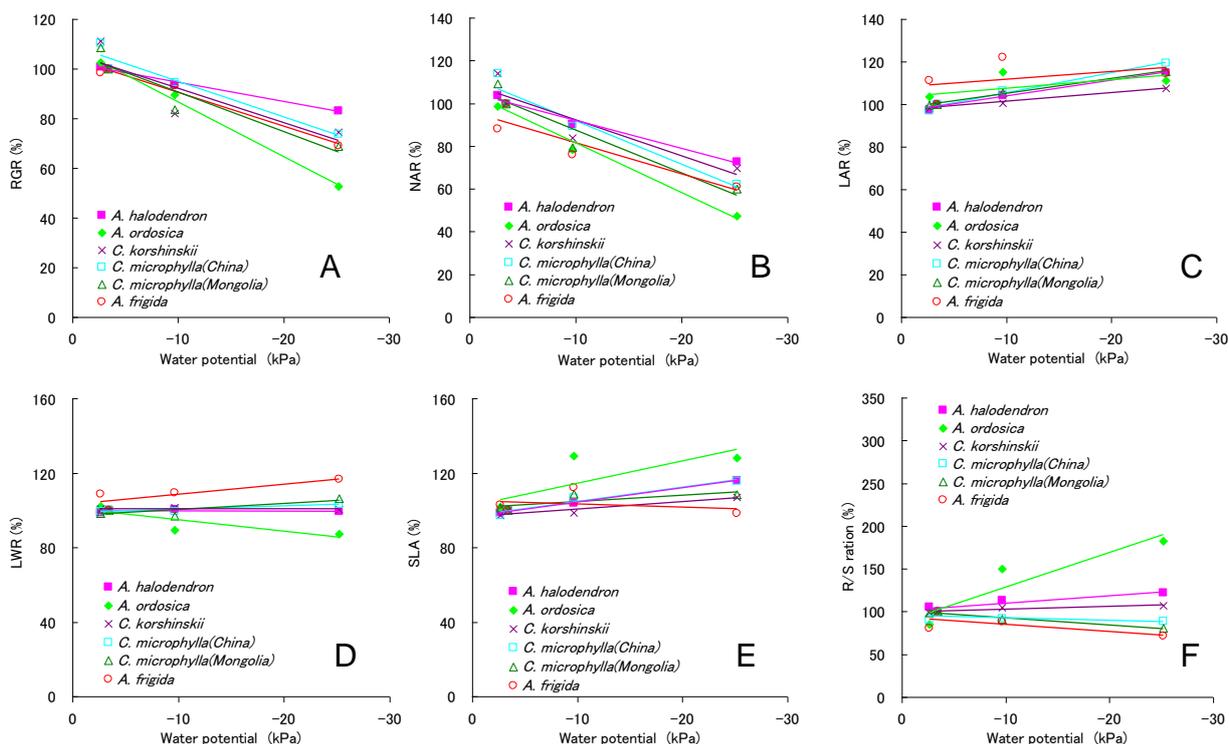


図3a. 灌木5種の生長パラメータと水ポテンシャルの関係. A: 相対生長率(RGR;  $g\ g^{-1}\ week^{-1}$ ), B: 純同化率(NAR;  $g\ cm^{-2}\ week^{-1}$ ), C: 葉面積比(LAR;  $cm^2\ g^{-1}$ ), D: 葉重比(LWR;  $g\ g^{-1}$ ), E: 比葉面積(SLA;  $cm^2\ g^{-1}$ ), F: 根/莖葉比(R/S ratio;  $g\ g^{-1}$ ).

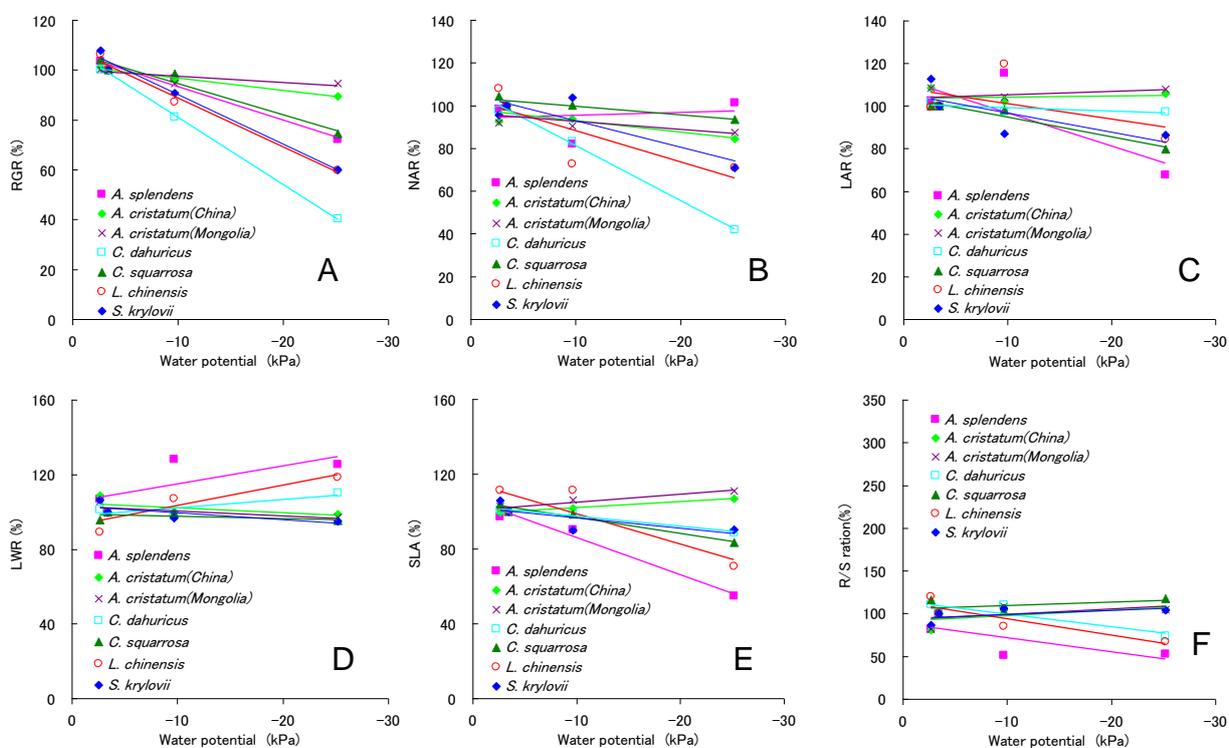


図3b. イネ科草本6種の生長パラメータと水ポテンシャルの関係. A~Fは図3aと同じ.

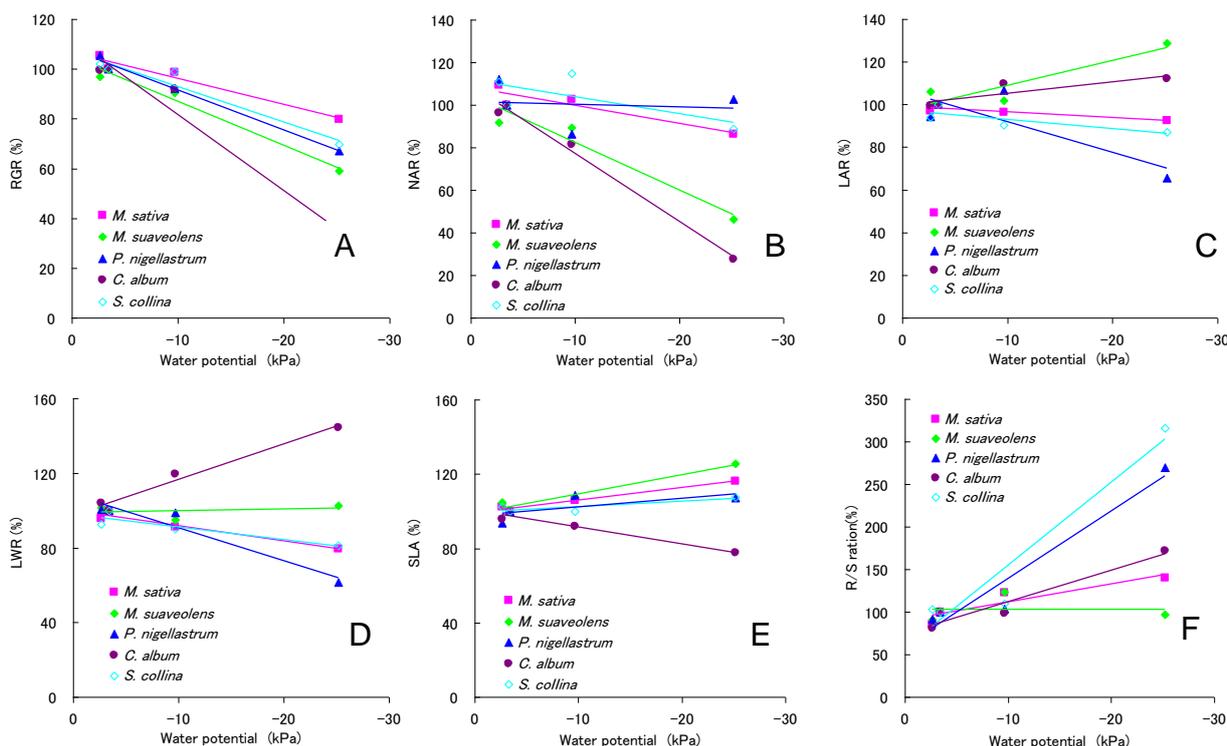


図3c. 広葉草本5種の生長パラメータと水ポテンシャルの関係. A~Fは図3aと同じ.

同化産物の分配指標のR/S比に関しては、灌木の*A. ordosica*と、広葉草本の*C. album*、*M. sativa*、*P. nigellastrum*、*S. collina*では、水ストレスの増加に伴いR/S比が増加した。つまり同化産物を地下部へ多く分配する（根への投資）傾向が認められた。これは水ストレスが頻発する乾燥・半乾燥地域に生育する植物種としての適応反応の1つであると思われた。一方、その他の灌木4種、イネ科草本の全6種および広葉草本の*M. suaveolens*においては、R/S比はほとんど変化しなかった。

今回実験を行った16種では、水ストレスに対して種によって異なる反応特性（適応特性）を示した（図4および表3）。灌木、イネ科草本、広葉草本といった生活型の区分に係わらず、どのグループ内でもこれらの生理生態特性は種によって様々であった。

荒廃ステージの代表的な植物として、*Artemisia*属や*Caragana*属および一年生広葉草本各種が、また回復ステージの代表的植物としてイネ科草本が考えられている。しかし、今回の環境制御実験から、いくつかのイネ科草本種は、*Artemisia*属や*Caragana*属あるいは一年生広葉草本各種よりも、水

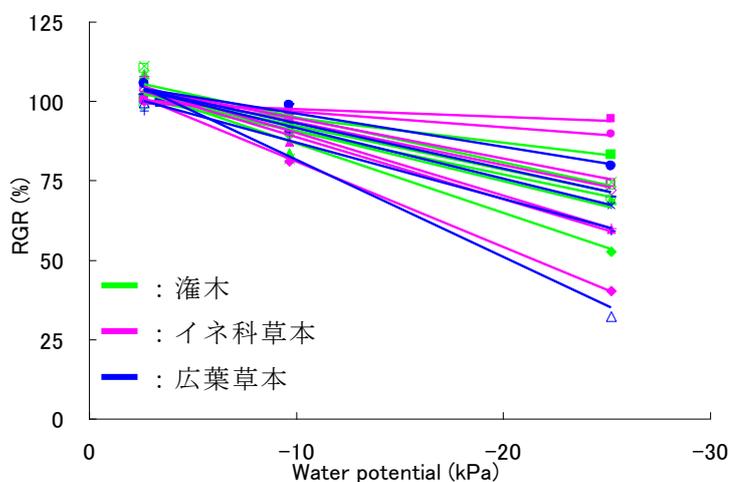


図4. 水ポテンシャルと相対生長率 (RGR ;  $g\ g^{-1}\ week^{-1}$ ) との関係. 生活型の区分別の比較.

ストレス耐性が高く（図4）、生活型の区分では一定の傾向は認められなかった（表3）。このことは、乾燥・半乾燥地域における砂漠化地域の緑化、再生・回復事業を実施するに当たって、各々の植物種の特性を把握して、適地適植を行うことの重要性を示唆している。

表3. 各植物種の生長パラメータの特性比較. 生活型での纏まりは無い.

Species	RGR		NAR			SLA		R/S	
	--	-	--	-	±	-	±	±	+
P/S <i>Artemisia ordosica</i>	○		○			○			○
P/F <i>Melilotus suaveolens</i>	○		○				○		○
P/G <i>Clinelymus dahuricus</i>	○		○			○			○
P/G <i>Stipa krylovii</i>	○		○			○			○
P/G <i>Leymus chinensis</i>	○		○			○			○
A/F <i>Chenopodium album</i>	○		○			○			○
P/S <i>Artemisia halodendron</i>		○		○			○		○
P/S <i>Artemisia frigida</i>		○		○			○		○
P/S <i>Caragana korshinskii</i>		○		○			○		○
P/S <i>Caragana microphylla</i>		○		○			○		○
P/G <i>Agropyron cristatum</i>		○		○			○		○
P/F <i>Medicago sativa</i>		○		○			○		○
A/F <i>Salsola collina</i>		○		○			○		○
P/G <i>Cleistogenes squarrosa</i>		○		○		○			○
P/G <i>Achnatherum splendens</i>		○			○	○			○
P/F <i>Peganum nigellastrum</i>		○			○		○		○

--: Decrease remarkably with decreasing water potential, -: Decrease gradually with decreasing water potential, ±: Hardly affected by water potential, +: Increase with decreasing water potential, P: Perennial, A: Annual, S: Shrub, G: Grass, F: Forb.

## (2) key speciesの「機能-構造生長モデル」の開発

### 1) 植物立体構造シミュレーションプログラムの開発

自己相似形などの幾何学的立体構造を記述する形式言語Lindenmayer system (L-system)<sup>10)</sup>は、記号の置換とその繰り返しにより、規則性のある植物体立体構造を記述することができる<sup>22)</sup>。このL-systemの機能を利用し、これに数値パラメータを導入したパラメトリックL-systemの一つであるOpen L-system<sup>11, 23)</sup>の定義を基盤として、植物体立体構造を記述することにした。このパラメータ化されたL-system（以下単にL-systemと表記）をもとに、植物体立体構造シミュレーションを行うプログラムを以下の流れで開発した。

- ・栽培した植物の立体構造と分枝パターンの解析による、全体構造の構成単位となるいくつかの基本立体構造の構造と出現様式の抽出ならびにL-systemでの記述。
- ・シミュレーションにより得られた立体構造の、栽培した植物の各要素（地上部の全体構造、地下部の部分構造）との比較によるモデル性能の検証。
- ・地下部については、典型的な主根型根系、ひげ根型根系の基本構造のL-systemによる記述、形状を支配するパラメータの選定とシミュレーション。

### 2) オブジェクト指向型植物生長モデル基盤骨格の設計

オブジェクト指向プログラミングのもつ特徴を活用し、以下の事象をシミュレーションする機能を実装することを条件としたモデル基盤骨格の設計を行った。

- ・環境因子からの植物への影響をシミュレーション可能とさせるため、環境因子（光、気温、土壌水分など）を植物体各部位オブジェクト（葉や根）から参照すること。
- ・葉、茎、根の発生と生長停止。
- ・個体を基本単位とした植物生長シミュレーション、個体の発生と生長停止。

### 3) 生育地域の標準的な気候条件での環境制御実験によるモデルパラメータの取得

根の鉛直分布解析実験により得られた根を画像解析し、根の相対的鉛直分布量を算出した(図5)。本実験から、ひげ根型根系を有する *C. squarrosa* では、土壌の比較的浅い部位に多くの冠根が分布していた。一方、主根型の根系を有する *A. halodendron* では、土壌のより深い場所に向かって主根および側根が伸び、より深層の土壌にまで根が分布していることが示され、イネ科草本と灌木との地下部の分布の差が明らかとなった(図5B, C)。

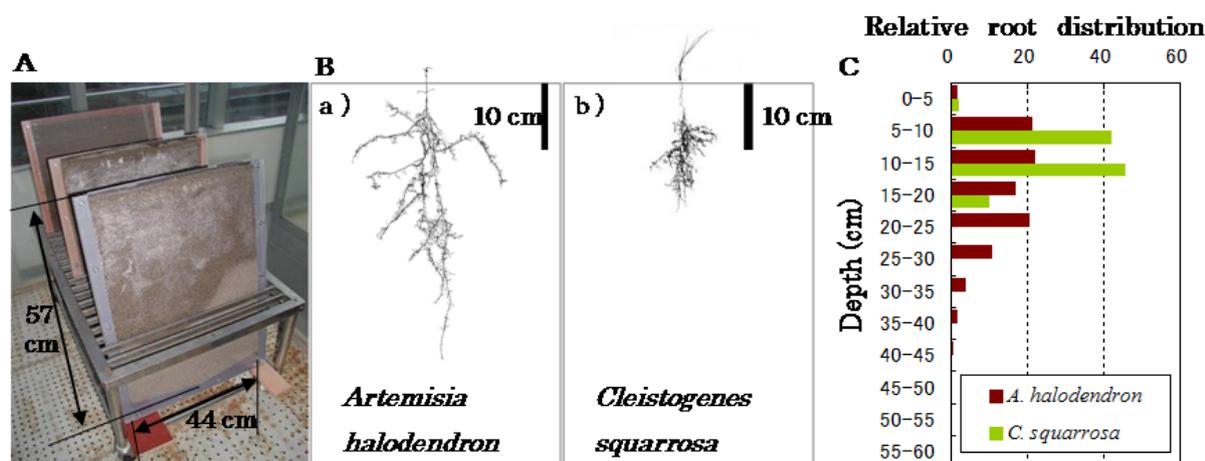


図5. 根の鉛直分布の解析. A: 実験に供した栽培容器(試作). B: 根の分布画像; a) *A. halodendron*, b) *C. squarrosa*. C: 画像解析に基づき算出した根の鉛直分布(相対分布量).

根の走出角度分布解析実験では、走出角度のほか、地上部の茎や葉の立体構造に関するパラメータについても計測し、これらのkey speciesの形態的反応が、乾重生長を計測した実験結果とも一致していることを確認した。

本研究で検討した植物体立体構造シミュレーションプログラムは、L-systemの言語特性を利用することにより、植物体地上部の複雑かつ多様な立体構造や形態が大きく異なる地下部の立体構造を、比較的小さいデータサイズ(数キロバイトのテキストファイル)で記述することが可能である。

### 4) 水ストレスと地上部/地下部の発達

#### a. 根の鉛直分布解析

図6に示すように、*C. squarrosa*の根の最大深は、乾燥条件と湿潤条件で顕著な差は認められなかった。しかし、湿潤条件に比べ乾燥条件では、不定根の発達が顕著に抑制された。一方、*A. halodendron*では、湿潤条件と比べ乾燥条件では側根の発達および主根の深部への伸長が抑制された。これからのことから、根の伸長生長や根系構造の水ストレスへの応答様式には種間差が大きい

いと考えられた。また、同種でも土壤水分環境によって生じる根の分布の差が無視できず、これらの結果をモデル設計やパラメータ値の決定へ反映させる必要があると考えられた。

一方、根系の生長による土壤水分の状態を *C. squarrosa* で観察したところ、根の分布密度が高い部分において土壤水分含量が著しく低下していた。このことから、根の吸水範囲を検証し、モデルパラメータの決定ならびにモデル性能を検証する必要があると考えられた。

#### b. 根の走出角度分布解析

根の走出角度分布解析実験では、降水量90mm/月または45mm/月に相当する灌水処理を行ったが、走出角度に関する傾向はほぼ同様であった。しかし、90mm/月処理に比べ45mm/月処理では、その頻度はかなり抑制されていた。*C. squarrosa* では、比較的太い根 ( $\phi > 1$  mm) が21

～49° に集中し、細い根はあらゆる方向に送出していた。一方、*A. halodendron* では、太さに拘わらず0～21° に送出しており、根の鉛直分布解析実験の結果とも合致していた。

#### c. 地上部の立体構造解析

*C. squarrosa* においては、現地降水量の90mm/月処理区の茎長は5.0～7.5cmをピークに、最高30cm程度まで分布していたが、45mm/月処理区では、10cm以上の長い茎は認められなかった。降水量減少によって個体あたりの茎数（分蘖数）も顕著に抑制された。しかし、一本の茎に付く葉数はそれほど影響されず、何れの処理でも3～4枚/茎の頻度が大きかった。一方、90mm/月処理区の *A. halodendron* では、主茎の他にも数本の側枝が発生していたが、45mm/月処理区では、側枝の発生は全く認められなかった。また、同処理区では主茎の伸長や総葉数も抑制されていた。

### 5) 三次元植物生長モデル「機能－構造生長モデル」の開発

#### a. シミュレーションプログラム

シミュレーションプログラムが必要とするパラメータは、葉、枝、茎、根の形状初期値（底辺、長さ等）、最大生長日数、生長開始日数、長さ生長量、厚み生長量とした。これらのパラメータを求めるため、標準的な気候条件での環境制御実験で計測した、葉数、葉幅、分枝数、茎長、母茎根元からの距離、茎直径、葉長、地下部鉛直分布解析と走出角度分布の解析結果を用いた。

これらの結果を分析して、パラメータとして値を確定したものを、図7のようにデータベースとしてまとめた。データベースには、各植物の構造単位に対する変数名、生長ルール、初期状態、最大生長日数、生長開始日数、長さ生長量、厚み生長量を入力した。*A. halodendron* と *C. microphylla* の生長ルールおよび形状を、表4で示すようにL-system表記で設定した。表4中のアルファベット大文字と数字の組み合わせ(S1、G2等)は、各構造単位をさらに円筒や三角形などの形状に分解した変数とした。その他の演算子等の説明は図8に示した。

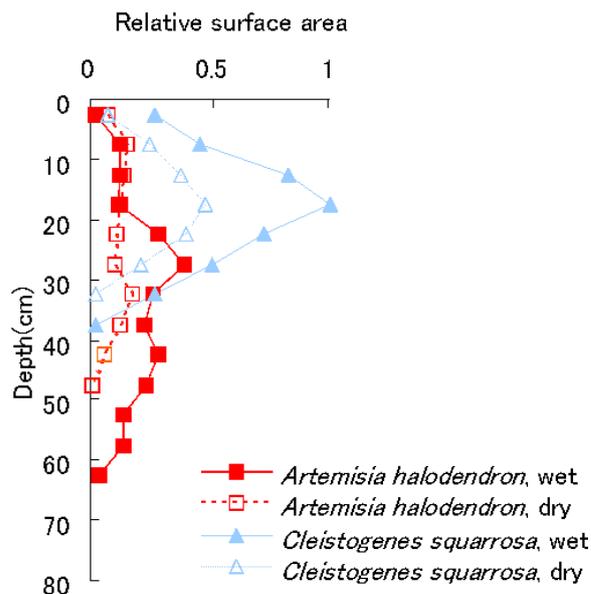


図6. *A. halodendron* と *C. squarrosa* の根系の鉛直分布. *C. squarrosa* の最大表面積を1として根の相対表面積を計算.

PLANTNAME	ECOTYPE	PSCNAME	PARENT	AXIOM	
Caragana microphylla	default	S1	SHOOT		C
Caragana microphylla	default	S2	SHOOT		C
Caragana microphylla	default	SHOOT	PLANT	S1 +(137.5) [ <(25) S2 L	
Caragana microphylla	default	L	SHOOT	S [ ^ (80) + (90) Ls ] [ &(8	
Caragana microphylla	default	S	L		C
Caragana microphylla	default	Lo	L	Ls	
Caragana microphylla	default	Ss	Lo		C
Caragana microphylla	default	Ls	Lo	S2 [ P >(45) F(0.15) <(25P	
Caragana microphylla	default	G1	PLANT	SHOOT	
Caragana microphylla	default	G2	PLANT	SHOOT	
Caragana microphylla	default	ROOT	PLANT	R1 +(137.5) [ &(42) R2 G	
Caragana microphylla	default	R1	ROOT		C
Caragana microphylla	default	R2	ROOT		C
Caragana microphylla	default	Gr1	ROOT	ROOT	
Caragana microphylla	default	Gr2	ROOT	ROOT	
Caragana microphylla	default	Gx		[ <(180) ROOT ] SHOOT	
Artemisia halodendron	fast	G		f(0.001) SHOOT	

図7. パラメータデータベースの一部.

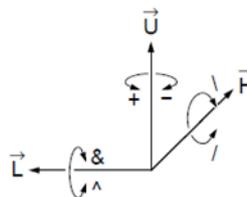


図8. L-systemの演算子の意味.

ただし,  $+(\theta)$ : U軸で $\theta$ ・反時計回りに回転,  
 $-(\theta)$ : U軸で $\theta$ ・時計回りに回転,  $\&(\theta)$ : L  
 軸で $\theta$ ・下方向に回転,  $\wedge(\theta)$ : L軸で $\theta$ ・上  
 方向に回転,  $\forall(\theta)$ : H軸で $\theta$ ・左に回転,  
 $/(\theta)$ : H軸で $\theta$ ・右に回転,  $[, ]$ : [ と ]と  
 で囲まれたルールが終了したら[”の前の状  
 態に戻る.

表4. *A. halodendron*と*C. microphylla*の生長ルール

	構造単位	上位構造	生長ルール	最大生長日数	生長開始日数
Artemisia halodendron	茎		S1 +(137.5) [ <(35) G2(2) ] [ <(25) Leaf ] G1(1)	90	1
	葉	茎	L1 L1 [ <(60) &(40) G3(2) ] [ >(60) &(40) G3(2) ] L1 [ <(60) &(40) G3(2) ] [ >(60) &(40) G3(2) ] L1 [ <(60) &(40) G3(2) ] [ >(60) &(40) G3(2) ] L2	10	
	主根		R1 +(137.5) [ <(45) Gr2(2) ] Gr1(1)	120	1
	側根	主根	R2 +(137.5) [ <(45) Gr2(2) ] Gr3(1)	20	
Caragana microphylla	茎		S1 +(137.5) [ <(25) S2 L L L L ] [ <(35) G2(2) ] G1(1)	120	1
	葉	茎	S [ ^ (80) + (90) Ls ] [ &(80) - (90) Ls ]	90	1
	根		R1 +(137.5) [ &(42) R2 Gr1(1) ] Gr2(1)	1	

L-studio-4.2.13でシミュレーションプログラムを開発した。*A. halodendron*の葉長について、実測値との比較を行ったところ、シミュレーションでは最も葉長が大きいクラスに含まれる割合が実測値よりも高く、最大生長日数を今回よりも小さく設定しなくてはならないと考えられたが、シミュレーション結果の最大クラスを除いて頻度の累積割合を求めたところ、実測値と類似の傾向を示し(図9)、最大生長日数の調整を行うことで、本モデルは形態の特徴を十分に再現することが可能であることが明らかになった。*A. halodendron*と*C. microphylla*のシミュレーション結果を図10に示す。

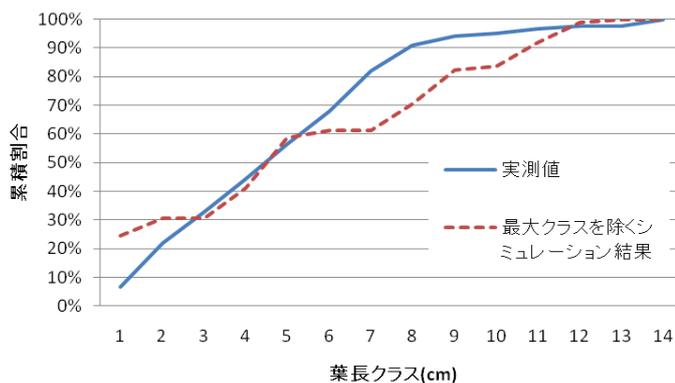


図9. *A. halodendron*における葉長の実測値とシミュレーション結果の比較. シミュレーションの最大クラスを除いた.

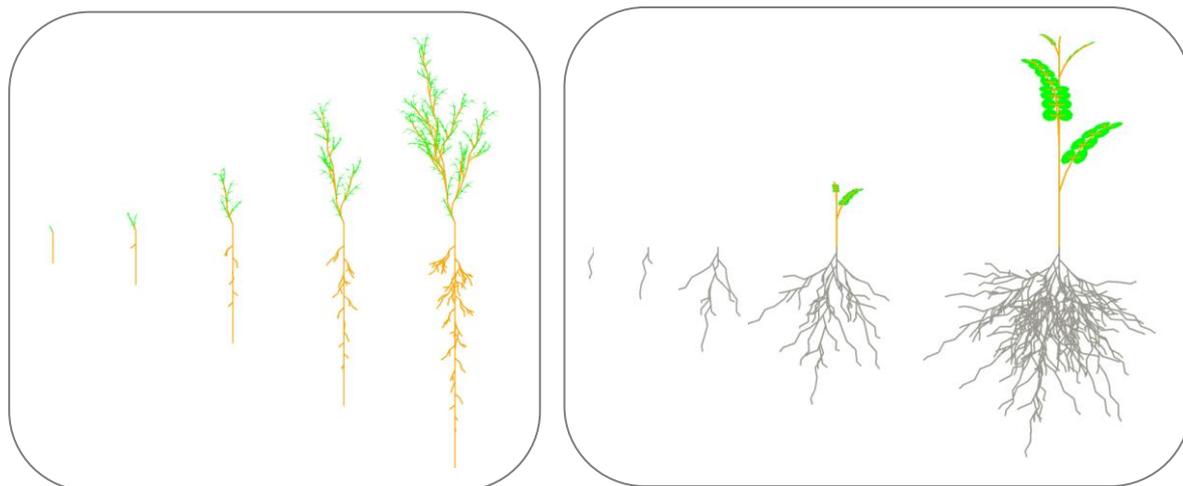


図10. *A. halodendron* (左図) と *C. microphylla* (右図) のシミュレーション結果. 両図ともに、左から5, 10, 20, 30, 40日後の形態を示す.

以上の結果から、本モデルを用いることで、(i)基部の伸長生長・肥大生長に伴う末端部の三次元空間上での位置と向きの変更（平行移動および回転）、および(ii)新しい茎の発生と分枝の発達を的確にシミュレートすることが可能であることが明らかになった。

#### b. 水分反応モデルへの改良

水ストレスへの反応を組み込むに当たっては、生長量ならびに同化産物の分配率と水分条件の関係を考慮した。乾重生長量はRGRと水分条件の関係から抑制されるものとし、環境制御実験から *A. halodendron* が生育している地域の標準的な降水量である90mmのときのRGRを1として標準化した際の水分状態との関係を求め、(1)式に組み込み、生長抑制を導くものとした((2)式)。

$$S_{i,t,p} = S_{i,t} * nr_p \quad (2)$$

ただし、 $S_{i,t,p}$  : オブジェクト  $i$ 、時間  $t$ 、降水量  $p$  の生長量、 $nr_p$  : 降水量  $p$  の標準化RGRである。標準化RGRと水分状態の関係は図11（左図）のようになり、ロジスティック関数にあてはめた。

一方、同化産物の分配率はS/R比とLWRから求めることとした。各器官のバイオマスを比で表すと、S/R比（以下、 $sr$ ）から地上部と地下部のバイオマスは  $sr : 1$  であり、LWRから根と葉のバイオマス比は  $1 : (sr+1)*LWR$  で表される。したがって、根と茎のバイオマス比は  $1 : (sr+1)*(1-LWR)-1$  で表される。ここから、S/R比は水分条件を独立変数としたロジスティック関数から求められるものとし（図11右図）、上記の比を用いて根のバイオマスを1とした場合の葉と茎のバイオマス比を求めることにした。なお、LWRは実験の結果から、水分条件にかかわらず定数とした。

以上のことから、最終的に水分反応モデルは(2)式に同化産物の分配率を組み込み、次のように表すこととした。

$$Sc_{i,t,p} = S_{i,t} * ar_{i,p} \quad (3)$$

ただし、 $Sc_{i,t,p}$  : 降水量  $p$  の同化産物の分配率を考慮に入れたオブジェクト  $i$ 、時間  $t$ 、降水量  $p$  の生長量、 $ar_{i,p}$  : オブジェクト  $i$ 、降水量  $p$  の同化産物分配率である。

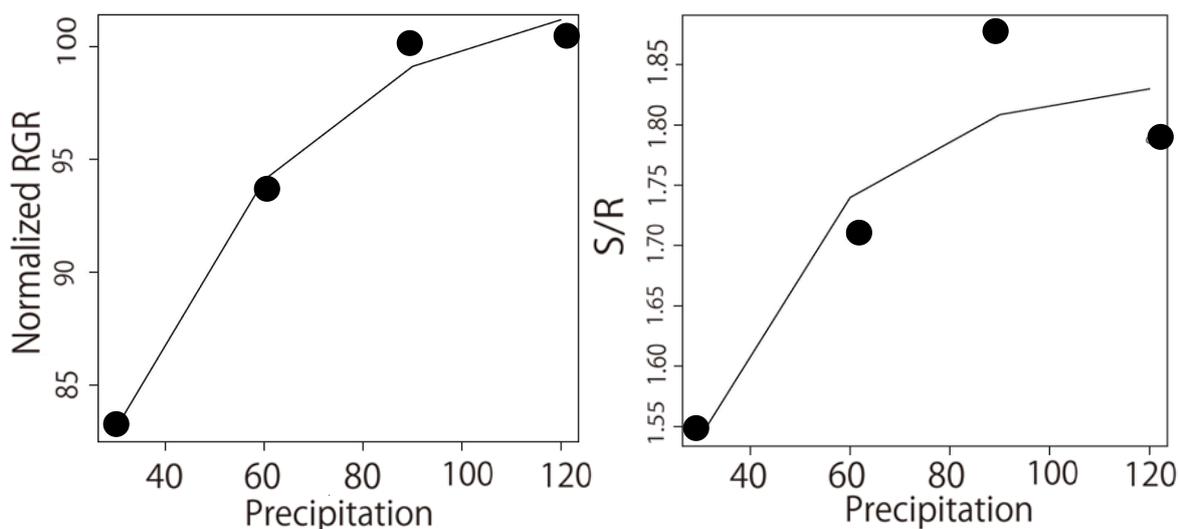


図11. 標準化RGR (左) およびS/R比 (右) と水分状態 (mm/月) との関係.

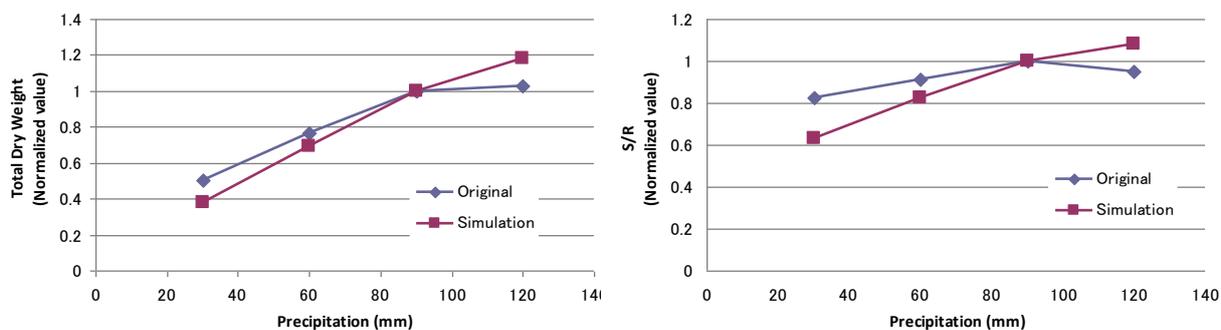


図12. 個体乾重 (左) およびS/R比 (右) の実測値と計算値の比較. 標準化 (90mm/月処理区を基準=1とした場合) 後の値を比較した.

その結果、水ストレスが掛かる個体と標準的な水分条件の個体の形態を比較すると、実験結果と同様、水分ストレスが掛かる場合、側根の発達、根の深部への伸長および頻度、莖長が抑制された。シミュレーションの結果を、実測した個体乾重およびS/R比と比較すると図12のように、ほぼ一致した。以上の結果から、本モデルを用いることで、形態のみならず水分条件の違いによる乾重生長抑制や分配率等の生理生態特性の変化をほぼ再現することが可能であることが明らかになり、本モデルが目的とした、以下のことが可能となった。

- ・環境因子からの植物への影響をシミュレーション可能とさせるため、環境因子を植物体各部位オブジェクト (葉や根) から参照すること。
- ・葉、莖、根の発生と生長停止。
- ・個体を基本単位とした植物生長シミュレーション。

生成した個々のオブジェクトは、体積、表面積、向き、高さ、などの特性値情報を計算させることができるので、これらの情報を個体単位で収集することで、個体の表面積や全体積が、さらに、密度を乗じることによりバイオマス (乾重)、葉面積指数や葉の位置や向きの分布などを出力することが可能となる。

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

北東アジアの乾燥・半乾燥地域に広がる草原の劣化、砂漠化の進行に対し、これまで個別の防止対策については検討されてきたが、生態系サービスの回復という視点から統合的に考察することはほとんどなされていない。本研究では、現地調査や実験研究から得られたパラメータと、開発しつつある生態系統合モデルによって、最適かつ効果的な緑化・環境修復のための技術パッケージを提示しようとするものである。

本サブテーマでは、環境制御実験により、砂漠化荒廃ステージと砂漠化回復ステージにおける主なkey speciesを含む、灌木5種、イネ科草本6種、広葉草本5種の合計16種について、水ストレスに対する生理生態特性・環境適応性を明らかにすることができた。これらのkey speciesの適応データは新知見であり、北東アジアの草原生態系における基盤情報であるとともに、各砂漠化地域の環境修復を実施する際に用いる緑化植物種の選定の指標となる。また、荒廃ステージでは灌木種や広葉草本種が、回復ステージではイネ科草本種が指標として考えられているが、水ストレス耐性の観点からは、生活型の区分では一定の傾向は認められなかった。このことは、乾燥・半乾燥地域における砂漠化地域の緑化、再生・回復事業を実施するに当たって、各々の植物種の特徴を把握して、適地適植を行うことの重要性を示唆している。

また、L-system やオブジェクト指向型プログラミングを統合し、環境制御実験から得られた形態構造特性値や生理生態特性値をデータベースとして組み込むことにより、砂漠化地域のいくつかのkey speciesの三次元植物生長モデル「機能－構造生長モデル」が開発できた。実測値とシミュレーション値の比較から、さらに精緻化・機能強化すると共に、現地における検証を経て、より現実的なシミュレーションが可能となる。

本研究から、緑化事業の将来予測や砂漠化対策の評価等に有用なデータベースやシミュレーションモデルというツール開発の礎を築くことができた。以上の成果はまた、サブテーマ1における生態系モデルのパラメータとして提供された。

### (2) 地球環境政策への貢献

本研究全体によって提示される技術パッケージは、対象国である中国やモンゴルの共同研究機関・地方政府等を通して地域へ還元されることが期待できる。特に各砂漠化地域の環境に適した環境修復・緑化植物種を選定するという具体的な作業に対して、本サブテーマは貴重な一次情報の提供ができた。今後、研究の進展と共に、砂漠化地域における検証実験を含め、各地域に適した緑化を実証していきたい。

なお、本研究の成果の一部については、平成19年度と平成20年度の文部科学省「国際協力イニシアティブ」教育協力拠点形成事業における「水・環境関連国際教育協力調査委員会」の活動の中で紹介した。「知的援助リソース・ニーズデータベースにもとづく水資源・環境・災害教育協力モデルの最適化とその検証」に係る中国の水資源問題に関するOJT（実施職業訓練）の中で、中国の大学院生を対象にした講演（北京，2007年10月）、また「水資源・環境・災害教育協力モデルの最適化：インドネシアおよびモンゴルを対象とした実践検証」の中で、モンゴルおよび中国の大学院生等を対象にした講演（つくば，2008年10月）を行った。また、International Symposium on “Mongolian Ecosystem and desertification”(Ulaanbaatar, 2009年10月) や、第7回環境研究機関連絡会成果発表会（東京，2009年11月）等においても、本研究成果を紹介した。

## 6. 引用文献

- 1) Zhu, Z.D., S. Liu, X.M. Di (1988) Desertification and its rehabilitation in China. Science Press.
- 2) Gao, S.W. and S.W. Zhou (1993) The desertification control in China. Beijing Science and Technology Press.
- 3) Zha, Y. and J. Gao (1997) Characteristics of desertification and its rehabilitation in China. *Journal of Arid Environments* 37: 419-432.
- 4) Guo, L.S. (1998) Theory and practice for combating desertification, Inner Mongolia. University Press.
- 5) Jiang, D., et al (eds). (2003) Desertification and Ecological Restoration of Keerqin (Horqin) Sandy Land. Chinese Environmental Science Press.
- 6) Singh, R. S., Y.S. Ramakrishna and N.L. Joshi (1996) Growth response of mustard *Brassica juncea*(L.) Czern & Coss] to irrigation levels in relation to temperature and radiation regimes. *Journal of Arid Environments* 33: 379-388.
- 7) Bennet, L.T. and M.A. Adams (2001) Response of a perennial grassland to nitrogen and phosphorus additions in sub-tropical, semi-arid Australia. *Journal of Arid Environments* 48: 289-308.
- 8) Marler, R. J., J.C. Stromberg and D.T. Patten (2001) Growth response of *Populus fremontii*, *Salix gooddingii*, and *Tamarix ramosissima* seedlings under different nitrogen and phosphorus concentrations. *Journal of Arid Environments* 48: 133-146.
- 9) Zheng Y.R., G.M. Rimmington, L. Zhang, P. An, G.S. Zhou, X.J. Li, Y.J. Yu, L.J. Chen and H. Shimizu (2008) Growth responses of four dominant species on sand dune of central Inner Mongolia to air temperature and soil moisture. *Journal of Plant Research* 121: 473-482.
- 10) Lindenmayer, A. (1968) Mathematical models for cellular interaction in development. I. Filaments with one-sided inputs. *Journal of Theoretical Biology* 18:280-289.
- 11) Mech, R. and P. Prusinkiewicz (1996) Visual models of plants interacting with their environment. In SIGGRAPH '96 Conference Proceedings, ACM Press, ACM SIGGRAPH, 397-410.
- 12) Barczi, J.F., H. Rey, Y. Caraglio et al. (2008) AmapSim: A structural whole-plant simulator based on botanical knowledge and designed to host external functional models. *Annals of Botany* 101: 1125-1138.
- 13) de Reffye, P., E. Heuvelink, D. Barthélémy and P.H. Cournède (2008) Plant Growth Models. In: Sven Erik J. and Brian F. (eds), *Encyclopedia of Ecology*. Academic Press, Oxford, 2824-2837.
- 14) Ito, A., K. Ichii, K. Tanaka, H. Sato, S. Emori and T. Oikawa (2004) Land Process Models Used in Earth - System Models : State-of-the-Art. *Tenki* 51(4): 5.
- 15) Yan, H.P., M.Z. Kang, P. De Reffye and M. Dingkuhn (2004) A dynamic, architectural plant model simulating resource-dependent growth. *Annals of Botany* 93: 591-602.
- 16) Koizumi, H., T. Okuro and S. Mariko (2000) Ecology of grassland / desert. Kyoritsu Shuppan

Co., LTD, Tokyo

- 17) Maki, T. (2008) Wind erosion prevention measures. In: Yamamoto T. (ed), Land degradation measures in arid regions, Arid region science series, 3, 1 edn. Kokin Syoin Co., LTD, Tokyo.
- 18) Prusinkiewicz, P. and A. Lindenmayer (1996) The Algorithmic Beauty of Plants. Springer-Verlag, New York,
- 19) Karwowski, R. and P. Prusinkiewicz (2004) The L-system based plant-modeling environment L-studion 4.0. In: the 4th International Workshop on Functional-Structural Plant Models, Montpellier, France.
- 20) 渡邊朋也 (2008) 仮想植物の作成. 作物の形態研究法: ミクロからマクロまで (前田栄三・三宅博・井上吉雄編), 日本作物学会事務取扱所.
- 21) Perttunen, J., R. Sievanen and E. Nikinmaa (1998) LIGNUM: a model combining the structure and the functioning of trees. Ecological Modelling 108: 189-198.
- 22) Perttunen, J. and R. Sievanen (2005) Incorporating Lindenmayer systems for architectural development in a functional-structural tree model. Ecological Modelling 181: 479-491.
- 23) Renton, M., P. Kaitaniemi and J. Hanan (2005) Functional-structural plant modelling using a combination of architectural analysis, L-systems and a canonical model of function. Ecological Modelling 184: 277-298.

## 7. 国際共同研究等の状況

本研究に必要不可欠な種子収集、気象資料等の収集や現地調査に当たっては、中国科学院植物研究所の鄭元潤教授、中国科学院瀋陽応用生態研究所の陳利軍教授、中国環境科学研究院の于云江教授、モンゴル農業大学のUndarmaa Jamsran准教授らと協力して実施した。また、JSPSフェローの中国科学院植物研究所の許振柱教授やEFフェロー（別記）の華東師範大学の鄒春静准教授、鳥取大学農学部の西原英治准教授にも種子収集等で協力していただいた。

## 8. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

<論文 (査読あり)>

- 1) Zheng, Y.R., G.M., Rimmington, L. Zhang, P. An, G.S. Zhou, X.J. Li, Y.J. Yu, L.J. Chen and H. Shimizu: Journal of Plant Research, 121, 473-482 (2008)  
“Growth responses of four dominant species on sand dune of central Inner Mongolia to air temperature and soil moisture”
- 2) Zou, C.J., C. Zhang, H. Shimizu, Q. Song, M.D. Jin, Y.L. Ma and W.D. Xu: Israel Journal of Ecology & Evolution, 54, 193-204 (2008)  
“Growth responses of *Picea mongolica* saplings to goat browsing”
- 3) Xu, Z.Z., G.S. Zhou and H. Shimizu: Crop Science, 49, 1843-1851 (2009)  
“Effects of soil drought with nocturnal warming on leaf stomatal traits and mesophyll cell ultrastructure of a perennial grass”

- 4) Zou, C. J., Y. Zhou, W.D. Xu and H. Shimizu: Chinese Journal of Ecology, 28, 188-196 (2009)  
 “Flora in Songshu Mountains in Inner Mongolia and Community characteristics of *Pinus tabulaeformis* forest”
- 5) Xu, Z. Z, G.S. Zhou and H. Shimizu: Journal of Experimental Botany, 60, 3737-3749 (2009)  
 “Are plant growth and photosynthesis limited by pre-drought following rewatering in grass?”
- 6) Zheng, Y.R., Z.X. Xie, G.M. Rimmington, Y.J. Yu, Y. Gao, G.S. Zhou, P. An, X.J. Li, W. Tsuji and H. Shimizu: Environmental and Experimental Botany, 68, 31-36 (2010)  
 “Elevated CO<sub>2</sub> accelerates net assimilation rate and enhance growth of dominant shrub species in a sand dune in central Inner Mongolia”
- 7) Shimizu, H., S. Ito, Y. Yagasaki and H. Sasakawa: Global Environmental Research, 14, 47-54 (2010)  
 “Responses to water stress and a functional-structural growth model of plant species grown in semi-arid desertified area in Northeast Asia”

<その他誌上発表（査読なし）>

- 1) 田中正・木村富士男・辻村真貴・山中勤・真木雅之・清水英幸・吉谷純一・嶋田純・開発一郎・近藤昭彦：水・環境関連国際教育協力調査委員会編著，96 pp. (2008)  
 「水資源・環境・災害教育協力モデルー中国を対象とした最適化と実践検証ー」
- 2) Tanaka, T., F. Kimura, M. Tsujimura, T. Yamanaka, H. Ohkura, M. Maki, H. Shimizu, J. Yoshitani, J. Shimada, I. Kaihotsu and A. Kondoh: Investigative Committee on IReNe-WE edit., 21 pp. (2008)  
 “IReNe in the field of water & environment”
- 3) 田中正・木村富士男・辻村真貴・山中勤・真木雅之・清水英幸・吉谷純一・嶋田純・開発一郎・近藤昭彦：水・環境関連国際教育協力調査委員会編著，59 pp. (2009)  
 「水資源・環境・災害教育協力モデルーインドネシアおよびモンゴルを対象とした最適化と実践検証ー」
- 4) Shimizu, H.; *in* Teaching Material CD of “Training Course on Sustainable Groundwater Resources Management and Related Environmental Issues” *ed by* Investigative Committee on Intellectual Resources and Needs Related to Water/Environmental Issues (2008)  
 “Plant growth affected by water deficiency and air pollution”
- 5) Ito, S., C. J. Zou, Z. Z. Xu, H. Sasakawa, U. Jamsran, L. J. Chen, Y. R. Zheng and H. Shimizu: Proceeding of the International Symposium on ‘Mongolian Ecosystem and desertification’ 78-83 (2009)  
 “Eco-physiological responses of *Agropyron cristatum* and *Caragana microphylla* grown in China and Mongolia to water stress”
- 6) Sasakawa, H., Y. Yagasaki, Z. Z. Xu, C. J. Zou, S. Ito, L. J. Chen, Y. R. Zheng and H. Shimizu: Proceeding of the International Symposium on ‘Mongolian Ecosystem and desertification’ 95-99 (2009)

“Development of a functional-structural growth model of key plant species grown in desertificated regions”

(2) 口頭発表 (学会)

- 1) 矢ヶ崎泰海・小林祥子・陳利軍・清水英幸：日本植物学会第71回大会（2007）  
「形式言語Lindenmayer system (L-System) を用いた植物体立体構造モデリング」
- 2) Shimizu, H.: “On-the-Job” Training Program for Water Resources Problem in China, Beijing (2007)  
“Lecture on water demands of plant species in dry land: Environment-controlled experiments for suitable grass field management”
- 3) Yagasaki, Y., S. Kobayashi, L. J. Chen, Z. Z. Xu and H. Shimizu: 第55回日本生態学会大会（2008）  
“Simulating three-dimensional structure of plant shoots and roots using Lindenmayer system (L-system)”
- 4) Shimizu, H., S. Kobayashi, Y. Yagasaki, Z. Z. Xu and L. J. Chen: 第55回日本生態学会大会（2008）  
“Germination and growth responses to water stress of *Agropyron cristatum* and *Caragana microphylla* grown in Horqin sandy land, Inner Mongolia, China”
- 5) 矢ヶ崎泰海・伊藤祥子・陳利軍・許振柱・清水英幸：日本土壌肥料学会2008年愛知大会（2008）  
「3次元空間上における植物体地上部・地下部構造成長シミュレーション」
- 6) Shimizu, H., S. Ito, Y. Yagasaki, Y. R. Zheng, L. J. Chen, Z. Z. Xu, C. J. Zou and J. L. Tian: Japan-China Joint Open Seminar on Combating Desertification and Development in Inland China of Year 2008, Tottori (2008)  
“Response of key plant species in North-east Asian grassland to desertificated/restored environments and developing a 3-D structure model using Lindenmayer system”
- 7) Shimizu, H.: “Training Course on Sustainable Groundwater Resources Management and Related Environmental Issues”, Tsukuba (2008)  
“Lecture on Environmental Assessment Related to Air Pollution and Drought”
- 8) 清水英幸・伊藤祥子・矢ヶ崎泰海・許振柱・鄒春静・陳利軍・鄭元潤：鳥取大学乾燥地研究センター平成20年度共同研究発表会（2008）  
「北東アジアの砂漠化した草原地域に生育する植物の環境ストレスに対する反応」
- 9) Shimizu, H., S. Ito, P. An, Y. R. Zheng, Y. J. Yu, L. J. Chen, Y. Yagasaki, Z. Z. Xu and C. J. Zou: APGC Symposium-Plant Functioning in a Changing Global Environment, Creswick, Australia (2008)  
“Effects of O<sub>3</sub> and SO<sub>2</sub> on semiarid plant species in Mu Us Sandyland, Inner Mongolia, China”
- 10) Ito, S., H. Shimizu, Y. Yagasaki, C. J. Zou, Z. Z. Xu, L. J. Chen and Y. R. Zheng: 第56回日本生態学会大会（2009）  
“Growth responses to soil water stress of some key plant species grown in desertificated grassland in North-East Asia”
- 11) Xu, Z. Z., H. Shimizu, H. Sasakawa, S. Ito and C. J. Zou: JSPS Science Dialogue Program

- (Science Immersion Camp Program), Yokohama Science Frontier High School, Yokohama (2009)  
 “Climate change and grassland ecosystem degradation”
- 12) Shimizu, H., S. Ito, H. Sasakawa, Y. Yagasaki, Z.Z. Xu, C.J. Zou, L.J. Chen, Y.R. Zheng and J.L. Tian: CAS-JSPS Core University Program, China-Japan Joint Open Seminar on Combating Desertification and Development in Inland China of Year 2008, Yangling (2009)  
 “Response of seven key plant species grown at semi-arid regions in China to water stressed environment and developing a functional-structural plant model”
- 13) Shimizu, H.: International Symposium on ‘Mongolian Ecosystem and desertification’ -Seminar in MSUA-, Ulaanbaatar (2009)  
 “Eco-physiological responses of key plant species grown in arid/semi-arid regions -Environment-controlled experiments for suitable grassland restoration-”
- 14) Ito, S., C.J. Zou, Z.Z. Xu, H. Sasakawa, U. Jamsran, L.J. Chen, Y.R. Zheng and H. Shimizu: International Symposium on ‘Mongolian Ecosystem and desertification’, Ulaanbaatar (2009)  
 “Eco-physiological responses of *Agropyron cristatum* and *Caragana microphylla* grown in China and Mongolia to water stress”
- 15) Sasakawa, H., Y. Yagasaki, Z.Z. Xu, C.J. Zou, S. Ito, L.J. Chen, Y.R. Zheng and H. Shimizu: International Symposium on “Mongolian Ecosystem and desertification”, Ulaanbaatar (2009)  
 “Development of a functional-structural growth in desertified regions”
- 16) 清水英幸・伊藤祥子・笹川裕史・許振柱・鄒春静: 第7回環境研究機関連絡会成果発表会 (2009)  
 「砂漠化した草原の回復—半乾燥地域の植物の生理生態を探る—」
- 17) 伊藤祥子・笹川裕史・許振柱・鄒春静・陳利軍・清水英幸・辻渉: 鳥取大学乾燥地研究センター平成21年度共同研究発表会 (2009)  
 「北東アジアの砂漠化した草原地域に生育する植物の環境ストレスに対する反応—中国およびモンゴルに生育する *Agropyron cristatum* と *Caragana microphylla* の水ストレス—生長反応の比較解析—」
- 18) Sasakawa, H., Y. Yagasaki, S. Ito, Z.Z. Xu, C.J. Zou, L.J. Chen, Y.R. Zheng, W. Tsuji and H. Shimizu: 第57回日本生態学会大会 (2010)  
 “Development of a functional-structural growth model of the plant grown in desertified regions using L-system”
- 19) Ito, S., C.J. Zou, H. Sasakawa, Z.Z. Xu, L.J. Chen, Y.R. Zheng, U. Jamsran, W. Tsuji and H. Shimizu: 第57回日本生態学会大会 (2010)  
 “Growth responses to soil water stress of some Poaceae species grown in desertified grassland in North-East Asia”
- (3) 出願特許  
 なし
- (4) シンポジウム、セミナーの開催 (主催のもの)  
 なし

- (5) マスコミ等への公表・報道等  
なし
- (6) その他  
なし