

応用科学としての草原生態学の役割と課題

大黒 俊哉

東京大学大学院農学生命科学研究科 教授

1. はじめに

現在、気候的極相としての「草原」の面積は約 35 億 ha、全陸地面積の約 25% を占めている。これに、人為的に維持されているもの、遷移の途中段階にあるものを含めると、その面積は 40 億 ha 以上になる。さらに、放牧地として利用されている range、高緯度地域のツンドラや高山草原などを加えると、草原は全陸地面積の半分以上に達するという。気候的極相としての草原が主に分布する乾燥地はまた、攪乱や気候変動に対する脆弱性の高い気候地域であると同時に、全人口の 3 分の 1 の人々の暮らしを支える生活の場でもある。そのため、草原生態系の保全と持続的利用は、グローバルな環境問題への対処という観点からもきわめて重要である。

一方日本では、気候的極相として森林が成立するため、草原の多くは、人為的な働きかけによって維持されてきた半自然草地である。かつては、草地農業（放牧）が行われる山地・傾斜地のみならず、平地・台地においても役畜の飼料や自給肥料等の供給地として広範に分布し、里山ランドスケープの主要な構成要素の 1 つであった。しかし、明治・大正期には国土面積の 1 割以上を占めていた草地は戦後、資源としての価値を急速に失い、現在では 3% 程度にまで減少している。その結果、草原性動植物の多くが消失の危機に瀕しており、半自然草地の保全・再生が生物多様性保全の観点から急務の課題となっている（大黒・武内, 2010）。

わが国において、草原・草地を対象とした生態学はこれまで、草地農業と密接に結びつきながら発展し、家畜生産の向上に貢献する多くの成果をあげてきた。最近では、グローバルな視点から草原生態系をとらえ、その生態系機能や環境変化との関連についての研究が進められている。とくに、ミレニアム生態系評価の実施等を通じて、生物多様性と生態系機能および生態系サービスの評価に関する研究分野は著しい進展をみせた。さらに、砂漠化と気候変動、気候変動と生物多様性、生物多様性と砂漠化など、地球環境問題間の相互作用につ

いての研究も進み、草原生態系における地球環境問題への統合的対処の重要性が認識されるに至った。本論では、グローバルな食料生産と環境保全の両面において重要な生態系である「草原」を対象に、著者らが北東アジアの草原を対象に20年以上にわたって行ってきた研究実績を土台にしつつ、砂漠化・土地荒廃、気候変動、生物多様性・生態系機能という切り口から、草原の保全と持続的利用に向けた草原生態学の役割と課題を展望したい。

2. 荒廃草地の修復と草原生態学の役割

草原が主に分布する乾燥地は全陸地の4割を占め、その多くが放牧地として利用されているが、近年、市場経済化の進展や畜産物に対する需要増加に伴い、従来の放牧システムが変容し、砂漠化に代表される草原の荒廃が急速に進行している（小泉ほか, 2000）。乾燥地での人間活動は、草原を主体とする生態系の提供する各種サービス（食料・家畜飼料の供給、土壌保全、水資源の供給等）に大きく依存している。したがって、草原の荒廃防止と持続的な生産活動を両立させるためには、生態系サービスの安定的な供給が可能となるような、生態系機能の修復・再生と、それらの持続的管理が不可欠であり、修復・管理技術の開発につながる科学的知見の集積と統合が求められている。

乾燥地において、放牧インパクトが強まり植被が減少すると、風や雨の営力が強化されてさらに荒廃が加速するといった正のフィードバックが生じる。イネ科草原（grassland）から灌木草原（shrubland）への移行（shrub encroachment）に代表されるような、不連続な植生退行が生じると、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）の著しい増大が引き起こされ、自然の回復が困難となる。そのため、こうした場所では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。その際、単なる量的な回復だけでなく、飼料価値の高い草地への回復や土壌保全機能の向上が達成できるような、持続的土地利用の再構築を視野に入れた植生回復技術の開発が必要である。灌木等のもつ促進（facilitation）効果を利用した緑化手法はその一例である。東アジアの乾燥地では個々の灌木が砂を吸着し、土壌マウンドを形成している（図1）。このマウンドは成長に応じて土壌表面の粗度を増加させ、その結果、風速、砂の移動速度や土壌温度を下げる働きがあることが報告されている（Li et al., 2002）。Yoshihara et al. (2010) は、モンゴルのステップにおいて、マメ科灌木 *Caragana microphylla* の促進効果が空間スケール依存であり、より広域スケール



図1 マメ科灌木 *Caragana microphylla* が優占するステップ。
(モンゴル・ドンドゴビ県マンダルゴビ)

でその機能が高まっていることを示した。このことは、緑化植物を植栽するには、エコシステムエンジニア (ecosystem engineer) としての機能を最適化するような植栽密度と植栽面積を設定する必要があることを示している。

飼料価値の高い草地へ回復させるためには、家畜の嗜好性や栄養価の高い草種の侵入・定着を誘導する必要がある。中国・内蒙古の砂質草原の事例では、回復目標種であるイネ科多年草 *Cleistogenes squarrosa* が、砂丘間低地やその周辺の灌木パッチ内に偏在していたことから、砂丘間低地を回復コアエリアとして優先的に保護することが、植生回復促進に貢献すると考えられた (図2)。このことは、種分布の空間的異質性を考慮した保全区域ゾーニングが、飼料価値の高い草地への速やかな回復に有効であることを示している (Miyasaka et al., 2014)。

このように、近年の研究の進展により、荒廃草地の回復に寄与する生態系機能に関する知見が蓄積されつつある。今後は実証的研究をさらに積み重ねて修復・管理技術の開発につなげていく必要がある。

一方、地域の土地自然条件や社会経済状況を踏まえた、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まだ少ない。と



図2 植生回復のコアエリアとして機能する砂丘間低地
(中国・内蒙古自治区奈曼旗)

くに北東アジアのステップ地域においてはほとんど未着手であり、今後強化すべき研究分野といえる。これに関連して著者らは、植生回復に関する実証研究と生態系モデリングを統合し、さまざまな緑化や環境修復技術の適用効果を予測・評価するためのパイロットスタディを実施した (Okuro, 2010)。まず、長期観測プロット等における野外観測データにより、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。つぎに、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た。さらに、線形計画法による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予測する手法を開発した。本研究の成果は、生態系モデルに基づくシナリオアセスメントの手法が、最適な環境修復技術の選択に関わる意思決定に際し、科学的根拠を与える有用なツールになりうることを示している。今後、こうした応用研究が進めば、砂漠化対処政策に貢献しうる具体的な対処手法を、政策決定者や土地管理者に分かりやすく提示できるようになると期待される。

3. 気候変動への適応と草原生態学の役割

乾燥地における草原生態系の動態については近年、気候変動性や空間的不均質性を前提とした非平衡モデルに基づく理解が進み、従来の平衡モデルとの統合による新たな環境修復および放牧地管理戦略の必要性が指摘されている。しかしながら、利用圧の増加とともに気候変動の影響が懸念されるなかで新たな放牧地管理の手法が求められている放牧の現場においては、平衡-非平衡概念を考慮した対策や土地利用が選択されているとはいえ、草原生態学の科学的知見、環境修復に関わる技術開発、そして現場への適用の間には依然として大きな乖離があるといわざるを得ない。そのため、気候変動性の高い環境での持続的放牧戦略の構築につながるような実証研究が必要である。同時に、こうした非平衡環境での生産活動としての牧畜、とりわけ遊牧システムの持続可能性の解明は、乾燥地の新たな持続的開発戦略（Desert Development Paradigm : Reynolds et al., 2007）を考える上でもきわめて重要である。

著者らは、降水量の変動性が高い乾燥地を対象に、遊牧民の移動戦略に関して、理論的検証と現地聞き取り調査および禁牧柵を用いた植生調査による実証的検証を実施した。既存研究では、牧民の資源利用を均一という単純化した想定をして、放牧地システムの動態および土地荒廃の可能性を議論している。一方で、先行研究により、牧民間の貧富の差は放牧形態の違いに影響することがわかっている。そこで Okayasu et al. (2010) は、干ばつ時の移動や資源利用が牧民の家畜頭数などの経済的状态によって異なるかを、マルチエージェントモデルを用いたシミュレーションにより予測した。その結果、移動コストによって生き残る移動戦略が均一な場合と多様な場合が存在することがわかった。移動コストがかからない場合は、大規模牧民のみが残ることが推測される一方で、より現実的な想定である移動コストがかかる場合は、家畜飼養頭数の多い大規模牧民と、飼養頭数の少ない小規模牧民の2極化が進み、両者は共存することがわかった（図3）。また、干ばつ年に大規模牧民は長距離移動を行い、小規模牧民はそのまま留まる傾向が推定された。以上のことから、これまで放牧地システム動態を検証する上で均一と想定されていた遊牧民の移動戦略には、異なる空間スケールを利用したパターンが存在していることが理論的に示された（Okayasu et al., 2010）。

一方 Kakinuma et al. (2013) は、変動性が高いモンゴル南部の乾燥地を対象に、牧民への聞き取り調査と草地資源の空間分布に関する調査を行った。その結果、

遊牧民は上記理論モデルで予測された2タイプの牧民、すなわち「小規模・短距離移動牧民」と「大規模・長距離移動牧民」に分けられること、同地域でキーリソース（key resource、干ばつやゾドと呼ばれる雪害時に利用される重要な資源）となる *Achnatherum splendens* 群落は主に前者の小規模・短距離移動牧民によって利用されており、放牧圧の影響を他の群落に比べ強く受けていることが明らかになった。以上から、遊牧民は貧富の差などによって異なる空間スケールの移動戦略をとり、異なる草地資源を利用していることが実証的に示されるとともに、干ばつが頻発する地域においても、キーリソース群落を中心に家畜頭数の密度依存的な変化と植生の劣化が生じることが明らかになった。この結果は、非平衡環境においても家畜頭数の制限といった放牧圧のコントロールが有効であること、小規模・短距離移動牧民のセーフティネットである key resource 群落を重点的に管理することで干ばつに対する脆弱性を低下させることができることなど、気候変動性の高い放牧地における管理のあり方を具体的に提案している点で有用性が高い（Kakinuma et al., 2013）。

今後、気候変動に伴う降雨変動性の強化（干ばつ頻度の増加）等が草原生態系に及ぼす影響について予測した上で、気候変動に適応した放牧地管理・放牧戦略を再構築していくことが期待される。また、気候変動（温暖化）についてはその他にも、凍土の融解時期の変化と土壌侵食の強化、炭素循環への影響等、多様な影響とそれらへの対策・適応について研究を進めていく必要がある。

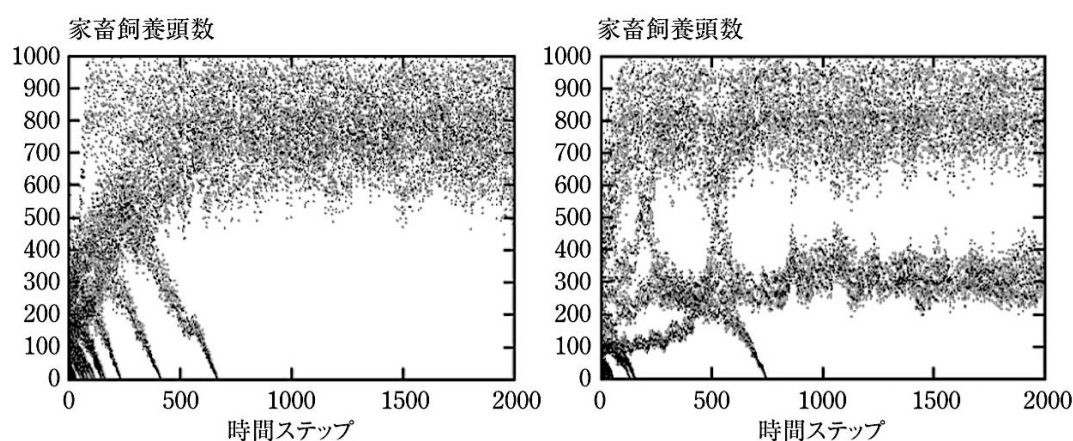


図3 マルチエージェントモデルによるシミュレーションの結果. 左：大規模牧民のみが残るケース（移動コスト0），右：大規模・小規模牧民が共存するケース（移動コスト1500）.（Okayasu et al., 2010 を改変）

4. 予防的管理アプローチによる草地資源の持続的な利用に向けて

ミレニアム生態系評価における重要な成果の1つとして、生態系管理における予防的管理の重要性が指摘されており、乾燥地の砂漠化対処シナリオにおいてもその点が強調されている (MA, 2005a; 2005b)。今後、草原生態学の成果を持続的な資源利用や環境修復等の実践的課題に反映させていくためには、予防的管理につながるような生態系機能の解明や、モニタリング・評価のための基準・指標の抽出が求められよう。なかでも、土地の脆弱性に注目した長期的なリスク管理につながる砂漠化早期警戒システム (early warning system: EWS) の確立は、砂漠化対処において最も有効な予防的アプローチとされ、砂漠化対処条約・科学技術委員会においてもしばしばその重要性が指摘されてきた。

これに関連して、土地の脆弱性評価に基づく砂漠化の EWS 構築に関するパイロットスタディが実施された (Takeuchi and Okayasu, 2005)。このプロジェクトでは、統合モデルをプラットフォームとして、広域スケールと局地スケールにまたがる砂漠化の基準・指標、砂漠化モニタリング・アセスメント、砂漠化 EWS と、これまで個別に議論されてきた課題の統合化を目指した (武内, 2006)。まず、砂漠化の基準・指標の策定においては、フィールド調査に基づく生態学的閾値の解明 (Sasaki et al., 2008) を通じて土地脆弱性の評価を行うとともに、広域観測が可能な指標と関連づけたモデリングを行い、広域スケールでのモニタリング・評価との統合化を行った。つぎに、土地脆弱性、砂漠化程度、対策手法の対費用効果等に関わるコンポーネントモデルを作成した上で、PSR (pressure-state-response) フレームワークに基づいてそれらを結びつけることで統合モデルを構築した。そして、この統合モデルによりトレンド解析とシナリオアセスメントを行った。トレンド解析では、過去数十年にわたるシミュレーションを行い、砂漠化の長期トレンドを把握した。また、シナリオアセスメントでは、まず人為圧力が生態系に及ぼす影響を評価する生態系プロセスモデルを構築し、つぎに各砂漠化対処技術の費用と生態系に与える影響を定量化し、最後に数理計画モデルを用いて、各砂漠化対処技術を組み合わせ最適な砂漠化対処の方策を、費用対効果を含め提案した。本パイロットスタディで提案された砂漠化 EWS は、乾燥地生態系の持続性に直接寄与する土地管理施策に具体的な方法と経済性を伴って貢献しうることを示している。草地管理や砂漠化対処においても、今後は災害対応型から危機管理型アプローチへの戦略転換を一層進めていく必要がある。

5. おわりに

草原・草地における生物多様性と生態系機能に関する研究は近年急速に進展し、多くのことが明らかになっている。しかしながら、こうした科学的知見と、修復・管理技術の開発や土地管理施策等の間にはまだ乖離があり、必ずしも有機的に結びついているとはいえない。今後、生態学的知見に基づく技術・施策の社会実装を目指すためには、草原生態系や乾燥地生態系における自然システムのみならず、社会・経済システムとの相互作用系という観点からその動態を捉える視点がより強く求められよう。

荒廃地の修復、気候変動に対する適応に加え、人口減少や産業構造の変化に伴う草地利用の再編なども重要な課題である。たとえば、日本における草原・草地は、利用形態の変化や経済価値の消失により減少の一途をたどっており、かつての状態に復元・再生することは困難であるが、一方で、重要な生態系サービスや生態系機能がまだ残されている。循環型社会・低炭素社会・自然共生社会の実現が求められている現在、あらたなニーズに対応した生態系サービスを社会的な価値として草原に見出し、それらを持続的に享受できるような社会システムの構築が必要である。これは乾燥地においても同様であり、「持続可能な草地資源の利用」のあるべき姿を社会で共有する必要がある。

草原生態系の解明に関わる研究が以上のような応用的視野をもって進められ、国際的に先導性の高い成果が日本・アジアから発信されることを期待したい。

引用文献

- Kakinuma, K., T. Okayasu, T. Sasaki, T. Okuro, U. Jamsran, K. Takeuchi. 2013. Rangeland management in highly variable environments: Resource variations across the landscape mediate the impact of grazing on vegetation in Mongolia. *Grassland Science*, 59:44-51.
- Li, S., Y. Harazono, H. Zhao, Z. He, X. Chang, X. Zhao, T. Zhang and T. Oikawa. 2002. Micrometeorological changes following establishment of artificially established *Artemisia* vegetation on desertified sandy land in the Horqin sandy land, China and their implication on regional environmental change. *Journal of Arid Environments*, 52:101-119.
- Millennium Ecosystem Assessment. 2005a. *Ecosystems and human Well-being: Current State and Trends: Findings of the Condition and Trends Working Group*, Island Press, Washington DC.

- Millennium Ecosystem Assessment. 2005b. Ecosystems and Human Well-being: Desertification Synthesis, World Resources Institute, Washington DC.
- Miyasaka, T., T. Okuro, E. Miyamori, X. Zhao and K. Takeuchi. 2014. Effects of different restoration measures and sand-dune topography on short- and long-term vegetation restoration in northeast China. *Journal of Arid Environments*, 111:1-6.
- Okayasu, T., T. Okuro, U. Jamsran, K. Takeuchi. 2010. An intrinsic mechanism for the co-existence of different survival strategies within mobile pastoralist communities. *Agricultural Systems*, 103:180-186.
- Okuro, T. 2010. Current status of desertification issues with special reference to sustainable provision of ecosystem services in Northeast Asia. *Global Environmental Research*, 14:3-10.
- Reynolds, J.F., D.M. S. Smith, E.F. Lambin, B.L. Turner II, M. Mortimore, S.P.J. Batterbury, T.E. Downing, H. Dowlatabadi, R.J. Fernández, J.E. Herrick, E. Huber-Sannwald, H. Jiang, R. Leemans, T. Lynam, F.T. Maestre, M. Ayarza, B. Walker. 2007. Global desertification: Building a science for dryland development. *Science*, 316:847-851.
- Sasaki, T., T. Okayasu, U. Jamsran, and K. Takeuchi. 2008. Threshold changes in vegetation along a grazing gradient in Mongolian rangelands. *Journal of Ecology*, 96:145-154.
- Takeuchi, K. and T. Okayasu. 2005. Integration of benchmarks and indicators, monitoring and assessment, and early warning systems, and its application to pilot studies for desertification EWS. In (United Nations, ed.) *Know Risk*. pp.251-253. Tudor Rose, Leicester.
- Yoshihara, Y., T. Sasaki, T. Okuro, J. Undarmaa and K. Takeuchi. 2010. Cross-spatial-scale patterns in the facilitative effect of shrubs and potential for restoration of desert steppe. *Ecological Engineering*, 36:1719-1724.
- 小泉博・大黒俊哉・鞠子茂. 2000. 草原・砂漠の生態. 共立出版, 東京.
- 大黒俊哉・武内和彦. 2010. 里地里山の生態系—生態系サービスを評価する. (小宮山宏・武内和彦・住明正・花木啓祐・三村信男, 編: サステナビリティ学第4巻 生態系と自然共生社会) pp.75-107. 東京大学出版会, 東京.
- 大黒俊哉・吉原祐・佐々木雄大. 2015. 草原生態学. 東京大学出版会, 東京.
- 武内和彦. 2006. ランドスケープエコロジー. 朝倉書店, 東京.