



環境儀

NO.83

December 2021

国立環境研究所の研究情報誌

草原との共生を目指して モンゴルにおける牧草地の脆弱性評価



国立研究開発法人

国立環境研究所

<https://www.nies.go.jp/>

草原は、乾燥・半乾燥地域の貴重な資源です。
しかし気候変動や人為的攪乱による劣化が進んでいます。
モンゴルを対象に行った、「牧草地の牧養力および脆弱性の評価」に関する
最新の研究成果を紹介します。





草原は、世界の陸地の約40%を占める乾燥・半乾燥地域の貴重な資源です。古くからこの地域の人々は草原の分布に合わせて居住地を移動する遊牧を行ってきました。しかし近年、農地、都市、鉱山開発による定住化が進み、草原が持続的に利用できない地域も出てきています。加えて、永久凍土の融解など、地球規模での気候変動の影響も顕在化しつつあります。そのため、草原の保全や持続可能な管理には、地球環境と地域環境の両者の変化による影響を定量的に評価することが必要となります。

私たちは、2006年からの5年間に中国やモンゴルの科学院の協力を得て、東アジア地域を対象に温暖化影響早期観測ネットワークを構築し、温暖化が永久凍土の融解や環境資源の劣化に及ぼす影響を解析しました。また、2012年からの3年間では、モンゴルの永久凍土地帯を対象に、永久凍土の融解が草原生態系に及ぼす影響を評価し、適応策の提言を行いました。さらに、2015年からはモンゴルの草原域を対象に、CO₂吸収量の監視と評価を行い、また、2018年からは4つの代表的地域を対象に、気候変動に加え、人為的攪乱が水資源および牧草地の利用可能量とその脆弱性に及ぼす影響を評価しました。

本号では、これら一連の研究から一部を抜粋して、特に温暖化に伴う永久凍土の融解およびその影響評価、人為的攪乱による水循環への影響評価、さらに牧草地の牧養力および脆弱性への影響評価に関する研究成果を紹介します。

CONTENTS

草原との共生を目指して

モンゴルにおける牧草地の脆弱性評価

- Interview 研究者に聞く
モンゴルの草原と
人々の生活を守るために p4 ~ 9
- Summary
気候変動および人為的攪乱による
草原生態系への影響評価 p10 ~ 11
- 研究をめぐって
草原生態系の回復力強化および
適応性向上に関する研究 p12 ~ 13
- 国立環境研究所における
「草原生態系の脆弱性評価に関する
研究」のあゆみ p14

モンゴルの草原と 人々の生活を守るために

モンゴルは東アジアの内陸部に広がる広大な国です。国土は日本の約4倍もあり、その大部分は草原です。広大な草原では、羊やヤギなどの遊牧がさかんに行われてきました。ところが、近年では経済成長や都市の発展に加え、気候変動の影響もあり、草原の砂漠化や、多様性の損失、生産性の低下など草原の劣化が進んできました。美しい草原がなくならないように、いつまでも人々が草原と共生できるように、地域環境保全領域の王勤学さん、中山忠暢さん、岡寺智大さんは、気候変動や都市開発などが草原の生態系に及ぼす影響について研究しています。また、今後どのようにその環境の変化に適応していくか、その対策を検討しています。



地域環境保全領域 主席研究員
王 勤学(おう きんがく)



地域環境保全領域(環境管理技術研究室)主幹研究員
中山 忠暢(なかやま ただのひろ)



地域環境保全領域(環境管理技術研究室)主任研究員
岡寺 智大(おかでら ともひろ)

草原と遊牧の国

Q：研究を始めたきっかけは何ですか。

王：2001年にモンゴルで行われた会議に参加したことです。どこまでも続くモンゴルの草原の風景がとてもきれいで、感激しました。ただ、その時の会議では、地球温暖化の影響や土地利用の変化によって、モンゴルの草原が砂漠化するなどの問題が起こっていることが議題になっていました。そこで、モンゴルの草原の問題について研究したいと思うようになったのです。ちょうどそのころ、地球温暖化の影響を調べるための観測ネットワークを立ち上げてモンゴルでも観測することになりました。最初は2か所の観測地点を設けて、気象要素や土壌温度プロファイルなどの項目を測定していましたが、その後、年々観測サイトを増やして、2009年までに8か所で永久凍土の観測や、さらに2015年から3か所で温室効果ガスCO₂フラックスの観測も実施しています。同時に植生調査なども行っています。

Q：CO₂フラックスとは何ですか。

王：単位面積当たり、単位時間当たりの移動炭素重量のことです。これらの科学的データをもとに、草原のCO₂吸収排出量の評価や永久凍土の融解が草原に及ぼす影響などについて調べてきました。

Q：モンゴルとはどんな国なのですか。

王：モンゴルは世界で二番目に大きな内陸国で、面積は156万km²、人口は約330万人です。西には標高4000m以上の山脈がありますが、東には1000～1500mの高原が広がっています。国土の70%以上は草原です。北の方には森林があり、南にはゴビ砂漠があり、北と南ではかなり雰囲気が違います。遊牧の国で、人々は、ゲルと呼ばれる移動式の住居に住み、家畜が食べる草や水のある遊牧に適した場

所を探して、家畜と一緒に移動して暮らしてきました。1990年代初めに社会主義から資本主義に国家の体制が移行すると、定住化が加速しました。また、食糧の自給を目的に農地の開発も行われており、遊牧の仕方も変わってきました。さらに、鉱山開発もあちこちで行われています。それとともに草原が劣化し、砂漠化が進んでいます。

岡寺：現在は、首都ウランバートルに人口の半分が集まっています。2010年にウランバートルを訪れたときには、空港から首都中心部まで片側1車線の道路しかなく、日本車を見かけることも少なかったが、3年後に行ったときは道路も広くなり、日本車だらけになっている上に、ショッピングセンターができていて、その発展の早さにはびっくりしました。

Q：どんな気候ですか。

山：1年間の気温差が大きくて、夏は40℃にもなるのに、冬は-30℃以下になることもあります。1日の寒暖差も大きく、夏でも雪が降ることがあり、1日で30℃もの温度差になることもあるのです。雨が少なく乾燥しています。年間降水量は南部ゴビ砂漠での50mmから北部山岳地域での400mmの間ですが、草原地帯では200~300mmくらいで、夏に集中して雨が降りますね。雨は少ないのですが、地下水が出るところもあり、至る所に井戸があります。現地の人はわずかな水で暮らす習慣がありますが、たくさん水を使う習慣のある日本人なら困るかもしれませんね。

岡寺：モンゴルの高原地帯では樹齢が古い木でも幹は細いです。大きくなりすぎると蒸発散量が増えて

コラム①

草原の恵みおよび伝統的な放牧による持続的な利用

乾燥または半乾燥の気候によって形成された草原は、決して生産力が高いとは言えず、かつ冬の凍害(モンゴル語:ソド)や夏の害(モンゴル語 ガン)といった自然災害の響を受けやすい地域です。このように非常に不安定な草原地域に、地球の約1/3の人々が居住し、草原の恵み(写真1)を支えに暮らしています。そのため、草原の保全と持続的利用は、地球環境・食糧問題の対処という観点からも極めて重要な課題です

草原で暮らしている人々が、様々なリスクをなるべく低減させ、厳しい環境に適応するため、千年以上にわたり営々と継承してきた放牧の方法に遊牧があります。牧とは、自然の草と水を求めて家畜の群れを連れて各地に移動しながら放牧する方法です。紀元前9~10世紀にユーラシア大陸およびアフリカの草原地帯で生まれ進化してきたもので、自然資源の

有効利用と管理形態の知恵の結晶と言われています。

牧は、無計画かつ不規則な方法ではなく、独自の畜産技術や移動方法、互扶助システム等に基づいて合理的に行われています。このような形態を遊牧民は「適地適種」の考え方に基づき、各地域の環境に適した複数の家畜種を組み合わせ、飼育してきました。例えば、羊とヤギは摂取できる植物種が多いため、広範囲で飼育されていますが、は湿潤な 壤に生える背丈の長い草を好むため、河川、溪流の近くで飼育されています。一方で、ラクダは塩性植物を好むため、乾燥草原で飼育されています。

また、牧民は、移動式住居である「ゲル」を生活拠点として周囲の草原で放牧を行い、季節や年度ごとに住居を移動することによって、草原を効率的・合理的に利用してきました。伝統的な牧は、基本的には家族単位で経営されていますが、厳しい自然条件に対処しつつ効率的合理的な牧を行うために、「ホト・アイル」(宿営地集団)という互扶助の慣習があります。その形態や規模は、共同作業の内容によって異なりますが、小さいものでは数世帯から、大きいものでは十数帯の親類や仲間によって構成される場合もあります。



写真1 原の恵み:生態系サービスの提供 遊牧民は家畜の群れを連れて共に生活し、家畜の乳からミルク、チーズなど多様な乳製品や肉を得ている。



■写真2 モンゴルの草原に設置した永久凍土・CO₂フラックスの観測システム

しまい、雨の少ないモンゴルでは樹体を維持できないためです。逆に考えれば、草くらいしか育たない土地であるため、広大な草原ができたともいえます。それで、羊やヤギ、ラクダ、牛、馬などの家畜の放牧が行われています。人々は、肉が主食で、チーズなどの乳製品もたくさん食べます。馬乳酒は日本でも有名ですね。みなさん、訪問者にはとても親切で、私たちがゲルを訪れるとどこの家庭でも必ずミルクティや自家製のチーズでもてなしてくれます。

永久凍土が融けると

Q：地球温暖化が草原にどのような影響を及ぼしているのでしょうか。

王：モンゴル草原の大部分は年平均気温0℃以下の

寒い気候帯に分布しているため、草原の下に永久凍土が存在しています。地球温暖化によって永久凍土が融解して、なくなる可能性があります。永久凍土とは、2年以上にわたって地下の温度が0℃よりも低い状態の土壌や地盤のことを言います。モンゴルでは国土の63%を永久凍土が占め、広く分布しています。私たちの調査では、温暖化の影響を受け、永久凍土の面積や深さが減少している傾向があることが明らかになりました。永久凍土が融けてしまうと、水資源の減少や草原の砂漠化などをもたらします。永久凍土の状態は草原の植生に大きな影響を及ぼしています。

Q：永久凍土は植生とどんな関わりがあるのですか。

王：永久凍土は水を通しにくいので、地表付近まで永久凍土があれば、降ってきた雨や融けた氷雪がその範囲内にとどまり、水を貯えることができます。もし永久凍土がなくなれば、雨が地下にしみ込んでしまいます。雨が少ないモンゴルでは、雨が地下にしみ込んでしまうとすぐに地面が乾燥して草が生えにくくなります。また、永久凍土がどの深さにあるかが重要で、地表から1~2mにあれば、雨水や凍土から溶けた水によって根層の土壌を湿らせ、森林や草原に安定的に水分を提供できますが、2~2.5m以上の深さだと、凍土から溶けた水が根層に届かず、土壌水分が少なくなり、植生の成長は変動の激しい雨水だけに依存することになります。そうすると、今まで草原だった場所でも草が生えなくなる可能性もあります。草が減れば、家畜が育てられなくなり、遊牧をする人々も生活できなくなってしまいます。さらに、土中に蓄積されてきた有機物が分解されて

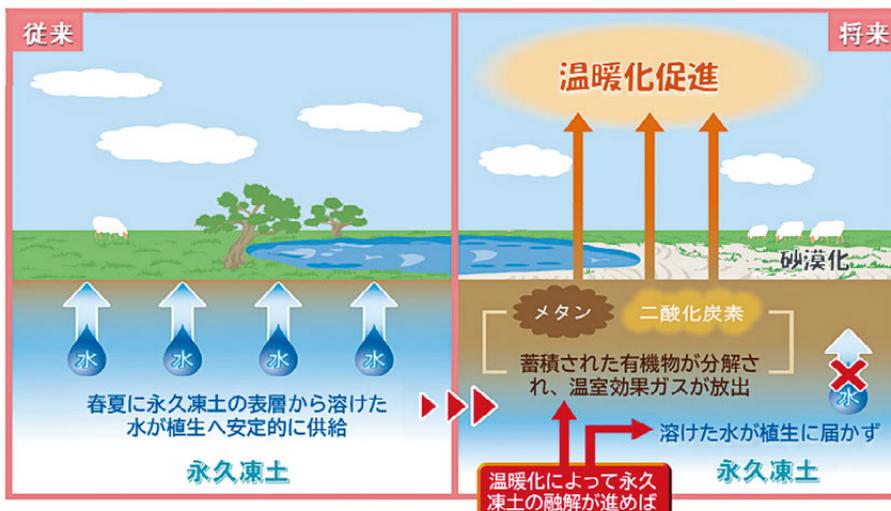
温室効果ガスが放出され、温暖化をさらに促進する恐れがあります(図1)。

中山：永久凍土が融解すれば、溶けた水が蒸発したり、川や湖に流れ込んだりと水の循環が変わってきます。そこで、永久凍土と水循環の関わりも調べています。

増える家畜

Q：草原はどのように劣化しているのでしょうか。

王：農地や鉱山開発などによって草原が直接破壊される



■図1 永久凍土の融解による草原生態系への影響

ところもあれば、放牧の仕方が変わり、草が生えなくなったり、生物多様性が失われていたりしているところもあります。以前は1㎡当たり、数十種類の草が生えていたのが、数種に減ってしまったところもありました。

Q：その原因は何ですか。

王：放牧している家畜の数が増えているからだと思えます。家畜の数が増えれば、当然食べる草の量も多くなります。近年ではヤギがほかの家畜に比べてか

なり増えています。ヤギのカシミヤは高く売れるためです。ヤギは、羊と違って草の根まで食べてしまうので、植物は再生できないほど損傷を受けます。結局、家畜が好まない草や有毒な草ばかりが残ることになります。すると、草の種類が変わり、生物多様性が失われてしまいます。

中山：2008年から2009年は雨量が少なく乾燥しましたが、2009年から雨量が増えて、草が増えていますが、ただ、植生の種類が変化しているの、増えてい

コラム②

急増する草原への攪乱 過放牧・都市化・鉱山開発

草原への人為的攪乱といえ、過放牧、農地化、都市化、鉱山開発および自動車による破壊などが挙げられます(写真3)。モンゴルでは、古来の伝統的遊牧を通じて放牧圧が空間的・時間的に分散され、広い地域の草原が適度に利用されていたことから、草原の生物多様性と高い生産性が維持されてきました。1920年代からの社会主義時代には遊牧民の定住化政策も進められましたが、一定地域内の放牧地の移動は認められており、さらに定住化政策自体があまり機能しなかったこともあって、草原への過度な圧力が生じることはありませんでした。

しかし、1992年以降、市場経済への移行や家畜の私有化政策に伴い、家畜頭数の急増と家畜種構成の変化が起りました。例えば、カシミヤ市場の拡大に伴い、ヤギの家

畜頭数が急増した結果、ヤギが草を根こそぎ食べてしまうため、草原への圧力を増大させることにつながりました。また、遊牧民は、商品の流通・販売に適した都市周辺や幹線道路沿道、井戸や湖周辺などの水資源域に集中するようになっています。こうした場所では、放牧圧が高まり、裸地化や生物多様性の低下などの問題が起っています。

また、都市・農地・鉱山開発も急拡大しました。モンゴル国家統計局によると、1993年に約60万人だった首都ウランバートル市の人口(全国人口の約28%)は、2019年には約154万人に急増し、これは全国人口(約330万人)のおよそ半数近くが首都に集中したことを意味します。さらに、産業構造も大きく変わり、中でも最も急成長した産業は鉱業でした。鉱業生産額は、2005年に初めて農林畜産業を超え、第1の産業となり、その後も急上昇を続けており、2017年には農林畜産業の生産額の2倍超となっています。

これらの人為的な攪乱は、これまでにない規模で草原に大きな影響を及ぼしています。裸地化した草原は、土壌のアルカリ化と砂漠化を招き、強風は表土を吹き飛ばしてしまうため、一度失われた植生の回復は困難になってしまいます。



■写真3 左2枚は、2005年(上)と2017年(下)に撮影したウランバートル(ウランバートル)の都市化の様子です。中2枚は、2016年に撮影したアーガラント(アールガント)とナライハ(ナライハ)で農地や道路によって草原が破壊された様子です。右2枚は、2016年に撮影したモンゴル最大の炭田タバントルゴイ(タバントルゴイ)および周辺の草原・砂漠の様子です。

る草が必ずしも家畜の好きな種類ではないのです。

岡寺：遊牧民は非常に賢くて、草を食べつくさないように、水を枯らさないようにと季節ごとに場所を変える遊牧によって、草原と共生してきました。ヤギなどの家畜が増えて、そのバランスが崩れつつある

と感じています。

王：これまでの研究で、草原の劣化には永久凍土の融解と過放牧が大きく影響していることが示されてきました。地球温暖化の影響で永久凍土の表層部が融けて回復しない上に、家畜が増えると草原の植生被覆率

コラム③

牧草地の牧養力およびその脆弱性の定量化

環境容量とは、自然の包容力と人為的な攪乱による影響との関係（環境容量＝自然の包容力／ヒトの活動の集積）を示す指標です。これまでに熱環境容量、水環境容量、生活環境容量、炭素固定容量、環境受容力、そして牧草地の牧養力など様々な指標が開発されています（大西2013）。これらの指標を活用することで、自然の包容力を定量化することにより、ライフスタイルや未来社会のあり方を探ることが可能になります。また、レーダーチャートやGISなどの図化技術を用いて比較することにより、地域が持つ様々な包容力や攪乱による影響が一目瞭然となり、政策決定者やステークホルダーに向けた情報発信が可能となります。

脆弱性とは、影響の受けやすさを示す指標であり、気候変動のみならず医療・臨床心理分野、情報セキュリティ分野など様々な分野で使用されています。環境分野の脆弱性は、気候変動や人為的攪乱の大きさや激しさ、および自然または人間社会の感受性と適応能力の関数であると定義されて

います。そのうち、感受性は、攪乱による影響の受けやすさを示し、一方、適応能力は、潜在的な影響の顕在化を抑制する力を意味します。

本号は、上述の複数ある環境容量のうち、牧草地の牧養力(式1)およびその脆弱性(式2)を取り上げています。

$$\begin{aligned} \text{牧草地の牧養力(頭/ha)} &= \\ & \text{単位面積の潜在的な飼料供給可能量(kg/ha)} \\ & \text{／家畜1頭当たりの摂取量(kg/頭)} \quad (1) \\ \text{牧草地の脆弱性} &= \text{牧草地への放牧圧(頭/ha)} \\ & \text{／牧草地の牧養力(頭/ha)} \quad (2) \end{aligned}$$

ここで、牧草地への放牧圧は「影響の受けやすさ」を、牧草地の牧養力は「適応能力」を示しています。つまり、放牧圧が小さくなるだけでなく、適応能力が大きくなればなるほど、牧養力が大きくなり、結果的に脆弱性が小さくなると考えられます。

適応策とは、脆弱性を規定する要因を解消し、適応能力を向上させる対策だと認識されています。例えば、牧草地の脆弱性を解消する対策として、人為的攪乱の緩和や家畜頭数の適正管理による放牧圧(写真4)の減少、水資源の有効利用、飼料の適時収穫と流通システムの確保による適応能力の強化などがあげられます。



■写真4 局地的に見られる過放牧の様子 この写真はモンゴルのハンボグド県で撮った井戸周辺で飲水を待っている家畜の大群です。このように、遊牧民は都市周辺や幹線道路沿道、または井戸や湖周辺などの水資源域に集中する傾向があり、こうした場所では、放牧圧が高まり、草原の裸地化や生物多様性の低下などの問題が起こっています。

が低くなります。すると、地表の熱が地下に伝わりやすくなり、永久凍土がさらに融解し、まさに悪循環です。この研究の成果がNHK、日本経済新聞など多くのメディアほか、日・モンゴル環境政策対話でも取り上げられたことがきっかけで、モンゴルの研究者や政策決定者と危機意識を共有することができました。ただ、この問題を解決するためには、モンゴルだけではどうしようもないので国際協力が必要です。また、家畜の増えすぎについても、対策が必要です。つまり、牧養力の範囲で放牧できるように、家畜頭数の適正管理が必要なのです。

中山：家畜を管理するといっても家畜の頭数や種類などのデータが少なく、正確な評価の阻害要因になっています。なにしろ、モンゴルの土地には持ち主はなく、だれでも自由に移動して、住むことができます。住所などが無いので、家畜の頭数などを正確に把握することがとても難しいのです。

進む都市化

Q：家畜の増えすぎは草原の生態系に大きな影響を与えているのですか。

王：はい。それだけではありません。市場を求めて遊牧民がウランバートル周辺に集まってきています。遊牧民の多くは、市街地の近くにゲルを立てて住んでいます。ゲルの集まっている地域では、インフラが整備されていないので、皆が石炭などを燃やすストーブを使っています。これが深刻な大気汚染を引き起こしています。

中山：家畜の放牧が増えること以外にも、人々が定住化したり、新たな産業を始めたりすると水の利用が変わります。水の循環も大きく変化し、水資源の枯渇も深刻化していますし、水質汚染の問題もでてきました。水の循環への影響が大きいのは鉱山開発です。モンゴルでは、金や銅などの鉱物資源が豊富で鉱山開発が各地で盛んに進められています。鉱山開発では、深い井戸をどんどん掘って、水を使ってしまうのです。水がなくなるとまた新しい井戸を掘るといふ具合で、さらに水資源の枯渇を引き起こし、深刻な問題になっています。一方、鉱山がごみ処理や下水などのインフラ整備をしている面があり、雇用も生み出しています。水の循環や水資源をうまく管理できるようなよいモデルを作ることができるのではないのですか。

王：モンゴルでは、さまざまな環境問題や社会問題が起こり、それが草原の生態系を脅かしているのです。経済発展と環境の両立を維持できるような適応策を考



■写真5 増え続けている家畜と進む遊牧民の定住化

えることが重要です。すでに、社会的な実験も始まっています。モンゴルは太陽光が豊富なので、それを利用して再生可能エネルギーをつくり、最新技術で管理することでスマートな放牧システムを構築できればと考えています。これらの技術が将来につながるとよいと思います。

草原は大事な資源

Q：今後、どうすればいいのでしょうか。

王：実際、モンゴルでは遊牧人口が減りつつあり、都市化が進んでいますが、今ある有限な資源を人と社会がどう使うかが重要です。

中山：バランスが大事ですね。

王：そのためには、人や物がどれくらいあって、水などの資源がどれくらいあるかを把握し、また、生活や産業に必要な量がどれくらいかを求めなければなりません。モンゴルの首都には、いま火力発電所が4か所ありますが、電気の需要が増えています。でも、発電量を増やすには、水も必要ですし、大気汚染についても考えなければならないのです。環境容量や環境復元力の範囲内で都市化などの計画が進むようにする必要があります。

岡寺：首都機能の一部を移転する計画もあるようですので、遊牧文化のある国ではそれもある有効な手段かもしれません。

王：私たちは、開発活動や気候変動の影響を評価するモデルをつくりました。今後の変化を推測するとともに、このモデルにあてはめて、家畜の管理をどうするか、飼料をどうするか、地下水をどうするかといった適応策をモンゴルの科学者などとも協力して検討しています。モンゴル人にとって草原は大事な資源ですから、草原を破壊することなく、持続的に利用できるようにこれからも取り組んでいきたいです。

気候変動および人為的攪乱による 草原生態系への影響評価

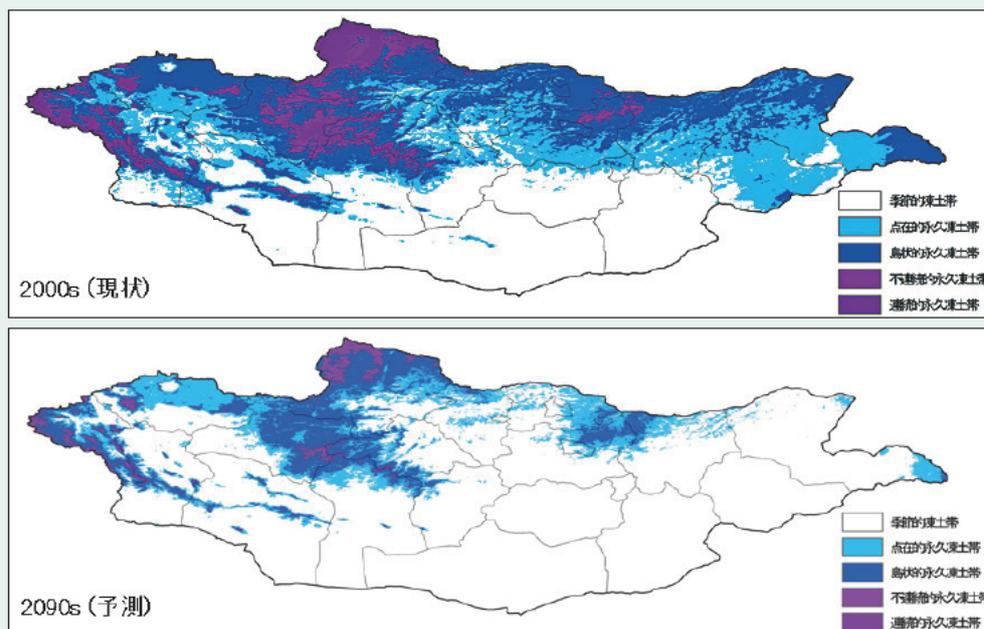
気候変動や人為的攪乱が草原生態系に及ぼす影響を評価するため、私たちは、まず典型的な草原を抱えるモンゴルを対象に、温暖化に伴う永久凍土の融解およびその影響の監視と評価を行い、また、気候変動に加え、人為的攪乱が重点地域の水資源や牧草地の利用可能量およびその脆弱性に及ぼす影響を評価しました。

温暖化に伴う永久凍土の融解および その影響の評価

モンゴルで気象観測の期間が最も長い6地点(ウランバートル(Улаанбаатар)、バルーンハラ(Баруунхараа)、チョイル(Чойр)、サインシャンド(Сайншанд)、ザミンウード(Замын-Үүд)とマンダलगビ(Мандалговь))のデータ解析によると、1945-2019年の75年間に年平均気温は約2.8℃も上昇したことがわかりました。温暖化が永久凍土の融解に及ぼす影響を検出するために、私たちは、2009年からモンゴル北部の森林、草原、湿地など様々な生態系において、深さ10mから30mの8つのボアホールを掘削し、地温プロファイルの観測を行い、永久凍土の温度や活動層の厚さなどの指標を算出し、永久凍土の融解スピードや変動幅を解析しました。その結果、永久凍土の温度は森林で

は年間約0.005~0.015℃、草原地域では0.015~0.025℃上昇したことで、活動層の厚さは、森林では年間0.0~0.2cm、草原では22.9~29.2cmも増大したことがわかりました。つまり、森林よりも草原の永久凍土がより顕著に劣化したことを意味します。また、氷が豊富で湿潤な凍土層よりも、乾いた凍土層の温度上昇が顕著であることも判明しました。

広域の永久凍土の将来予測を行うため、私たちは、NASAの地球観測衛星Terra/Aquaに搭載されているMODIS(中分解能撮像分光放射計)による地表温度データ(MOD11A2)を用いて、従来の気象観測による数十kmメッシュより遥かに精度の高い1kmメッシュの永久凍土の現状分布図を作成しました。さらに、気候変動に関する政府間パネル(IPCC)第5次評価報告書(AR5)に参加した5つの全球気候モデル(MIROC-ESM、NCAR-CCSM4、NOAA-GFDL-CM3、BCC-CSM1.1およびMPI-M-ECHAM6)のうち、現地観測データと最も相関の高いMPI-M-ECHAM6の予測結果(RCP8.5)を用いて、今世紀末(2090年代)の永久凍土分布のシナリオ予測図も作成しました。それによると、今世紀末までにモンゴル北部の海拔の高い山地以外では、永久凍土は連続・不連続的にしか残存せず、特に、点状的・島状的な永久



■ 図2 永久凍土分布の現状分布図およびシナリオ予測図 MODIS衛星観測による地表温度データ(MOD11A2)を用いて作成した永久凍土分布の現状分布図(2000~2010)、および(IPCC)第5次評価報告書(AR5)に関連する全球気候モデルの1つであるMPI-M-ECHAM6のシナリオ(RCP8.5)予測結果を用いて作成した今世紀末(2090~2099)の永久凍土分布シナリオ予測図です。因みに、永久凍土とは2年以上連続して凍結した状態の土壌を指します。その水平および垂直分布から、連続的、不連続的、島状および点状的永久凍土に分類されています。

GFDL-CM3、BCC-CSM1.1およびMPI-M-ECHAM6)のうち、現地観測データと最も相関の高いMPI-M-ECHAM6の予測結果(RCP8.5)を用いて、今世紀末(2090年代)の永久凍土分布のシナリオ予測図も作成しました。それによると、今世紀末までにモンゴル北部の海拔の高い山地以外では、永久凍土は連続・不連続的にしか残存せず、特に、点状的・島状的な永久

凍土地域の面積は現在の1/5程度に縮小すると予想されました(図2)。さらに、気候変動と人為的な攪乱が凍土融解に与える影響を解明するために、私たちは、SHAW (Simultaneous Heat And Water) モデルを用いて数値実験を行いました。その結果から、気温上昇や降水量

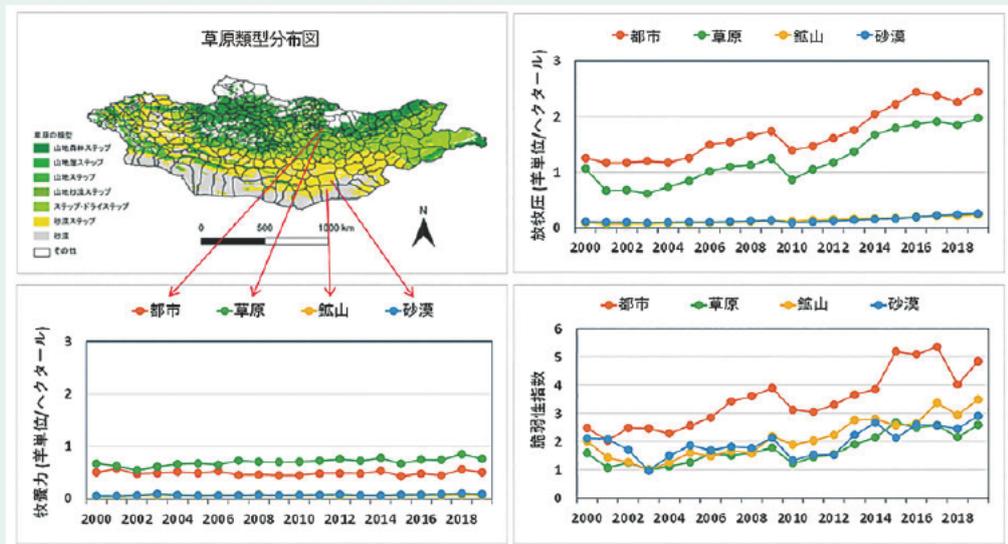
の減少による干ばつは、さらに地表面温度の上昇に拍車をかけ、永久凍土融解の一要因になると考えられました。また、干ばつと過放牧が温暖化と同時に起これば、永久凍土の融解をさらに加速させる可能性も示唆されました。

人為的攪乱による水循環への影響評価

気候変動や人為活動が水循環に及ぼす影響を評価するため、私たちは、まず水需要インベントリを作成し、地域別の水需要量を推計しました。また、地下水位の観測データの解析により、地下水利用の変動特性についての知見も得ました。さらに、入手可能な既存データを最大限に活用して、流域の水循環の変化への影響が大きいと考えられる家畜用水・都市用水・鉱業用水の経年変化(1980~2018年)をソム(市町村)ごとに算定し、モデル入力のために高解像度データを作成しました。それをベースに、経済的な中核である首都のウランバートルおよび南ゴビの鉱山の中核(オユトルゴイ鉱山:世界最大級の金と銅の埋蔵量)を含む2つの流域(トゥール川とガルバ川流域)を対象にして、これまでに開発してきた統合型水文生態系モデルNICE (National Integrated Catchment-based Eco-hydrology) を適用し、水循環への人為的影響を評価しました。その結果、都市化や鉱山開発に伴う過度な地下水汲み上げが周辺域の水循環の改変に及ぼす影響を定量的に解明しました。

人為的攪乱による牧草地の牧養力および脆弱性への影響評価

気候変動に加え、人為的攪乱が草原生態系に及ぼす



■ 図3 モンゴルの草原類型分布図および評価モデルを用いて推定された半乾燥地域の都市地域(ウランバートル)と草原地域(アーガラント)、乾燥地域の鉱山地域(ハンボグド)と砂漠地域(マンレー)など4つの対象地域の牧養力、放牧庄と脆弱性指数の経年変化を示したものです。

影響を評価するため、私たちは、水や飼料の需給バランスを考慮した牧草地の牧養力および脆弱性を評価する統合モデルを開発しました。入力データとして、モンゴル全土の地形や土地利用データ(解像度30m)、MODIS植生指数や葉面積データ(解像度1km)、そして欧州中期予報センター(ECMWF)モデルによる気温、湿度、風速、降水量、放射収支などの気象再解析データが利用されました。また、都市化や過放牧など人為的攪乱を表す指標(放牧庄)を推計するため、2000~2019年の市町村別の人口、産業、家畜頭数(牛、馬、羊、ヤギ、ラクダなど)のデータを入手し、地理情報システム(GIS)を用いて解析しました。

これらのデータを評価モデルに入力することで、半乾燥地域の都市地域(ウランバートル)と草原地域(アーガラント)、乾燥地域の鉱山地域(ハンボグド)と砂漠地域(マンレー)など4つの対象地域の飼料生産高、牧養力、放牧庄および脆弱性指数の時空間的变化を推定しました(図3)。その結果、市場経済が導入された後、特に2000年以降、都市と鉱山地域では放牧庄が牧養力を大幅に上回っており、牧草地の脆弱性が一層高まっていることが明らかになりました。そのうち、牧養力、放牧庄および脆弱性の順序は次のとおりです。

- (1) 牧養力: 草原 > 都市 > 砂漠 > 鉱山
- (2) 放牧庄: 都市 > 草原 > 鉱山 > 砂漠
- (3) 脆弱性: 都市 > 鉱山 > 砂漠 > 草原

今後は、研究成果をモンゴルおよび周辺国の研究者や政策決定者と共有し研究ネットワークを広げていきたいです。そして、開発した統合モデルを用いた家畜頭数の適正管理や、水資源と飼料供給システムの構築などの適応策の効果を評価しようと考えています。

草原生態系の回復力強化および 適応性向上に関する研究

世界では、SDGsを達成するために、乾燥地社会・生態系システムの回復力強化および持続可能な開発に向けた道筋を示す研究が推進されています。日本では、モンゴル草原植物資源の有効活用による草地回復に関する研究が実施されています。国立環境研究所では、草原地域における気候変動や人為的攪乱による影響および適応策の評価に関する研究を進めています。

世界では

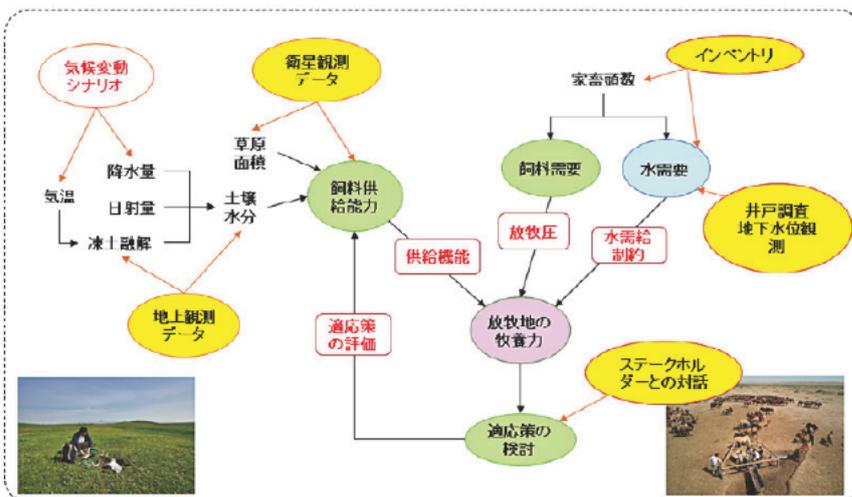
世界では、持続可能な地球社会の実現をめざす国際協働研究プラットフォームであるフューチャー・アース(Future Earth)傘下の「全球陸域研究計画(GLP:Global Land Programme)」において、「全球乾燥地社会・生態系システム(Global Dryland Social-Ecological Systems)」というワーキンググループが設置されています。このワーキンググループは、「乾燥地域の社会・生態系システムのダイナミクス、構造、機能、サービスを理解することは、SDGsにおける人間社会の脆弱性、回復力、生計、持続可能性に取り組むために重要だ」という認識の下で設置されており、全体目標は、乾燥地の社会・生態系システムが世界中で進行中の地球環境の変化にどのように対応するかについての理解を深めることにあります。また、SDGsを達成するために、乾燥地社会・生態系システムの回復力の強化と持続可能な開発に向けた道筋を示すための研究を推進することです。

これら2つの目標達成に向けた、このワーキンググループの主な実施内容は、①乾燥地生態系の感受性と方向性、および地球システムと社会システムへのフィードバックの定量化、②自然および人為的攪乱に対する乾燥地社会・生態系システムの脆弱性と回復力を制御する要因の解明、③地球環境の変化が生態系サービス、人間の幸福度、乾燥地社会・生態系システムのダイナミクスに与える影響の評価、そして、④乾燥地社会・生態系システムの持続可能な開発を目指して、乾燥地の生態系管理と政策研究に基づいて解決策を推進することです。

日本では

日本では、これまで草原生態系の崩壊と再生に関する研究が数多く実施されています。2006~2013年に総合地球環境学研究所で実施されたプロジェクト「人間活動下の生態系ネットワークの崩壊と再生」(リーダー:京都大学 酒井章子教授)では、近年顕著になってきた草原の劣化についての調査が実施され、

従来言われてきたようなカシミヤ生産のためのヤギの家畜数増加に加えて、畜産物が高値で取引される首都周辺への家畜の集中と、家畜の過密化・土地の私有化などと関連した遊牧における移動量の低下が、草原劣化の重大な一要因になっていることを明らかにし、これらの成果は「モンゴル 草原生態系ネットワークの崩壊と再生」(藤田昇ら編著、2013年 京都大学学術出版会)に収録されました。また、岡山大学の吉川賢教授が主導した「北東アジアの乾燥地生態系における生物多様性と遊牧の持続性についての研



AP-PLAT、FE、環境政策対話等を通じたステークホルダーへの科学的知見の提供

■ 図4 草原域における気候変動の影響および適応策の評価に関する研究

これまで開発してきた草原域の牧養力および脆弱性の評価モデルを活用し、飼料・水供給拡大や家畜頭数適正管理など牧畜産業の適応策を検討し、牧養力に与える効果を定量的に評価します。

究」(2011~2013年)では、遊牧生産の持続性に欠かせない草原の「key resource」を中心とした、モンゴル草原の生物多様性と遊牧の持続性について、自然科学と社会科学の両面から検討されました。さらに、鳥取大学の山中典和教授が代表を務めた「東アジア砂漠化地域における黄砂発生源対策と人間・環境への影響評価」において、発生源対策研究の一環として、『モンゴルの放牧地植物』(Munkhiin Useg 社、2015年第一版、2020年第二版)という本が出版されています。この著書の共著者である東京大学の黒俊哉教授は、長年にわたり、「砂漠化・土地荒廃プロセスの解明と植生回復技術の開発に関する研究」を実施されており、関連する著書には『草原生態学—生物多様性と生態系機能』(東京大学出版会、2015年)などがあります。

最近では、国際科学技術共同研究推進事業として、「遊牧民伝承に基づくモンゴル草原植物資源の有効活用による草地回復」(研究代表者：東京大学大学院農学生命科学研究科 浅見忠男教授)(2019~2024年)が開始されました。この研究では、主にモンゴル草原植物が①再生能、②環境ストレス耐性能、③薬理機能を高いレベルで保持できる理由についての詳細な解明研究に基づき、上記特性を有する植物ならびに植物成分の実装化を通して、荒廃するモンゴルの草原や家畜の健全な育成を目標に掲げています。

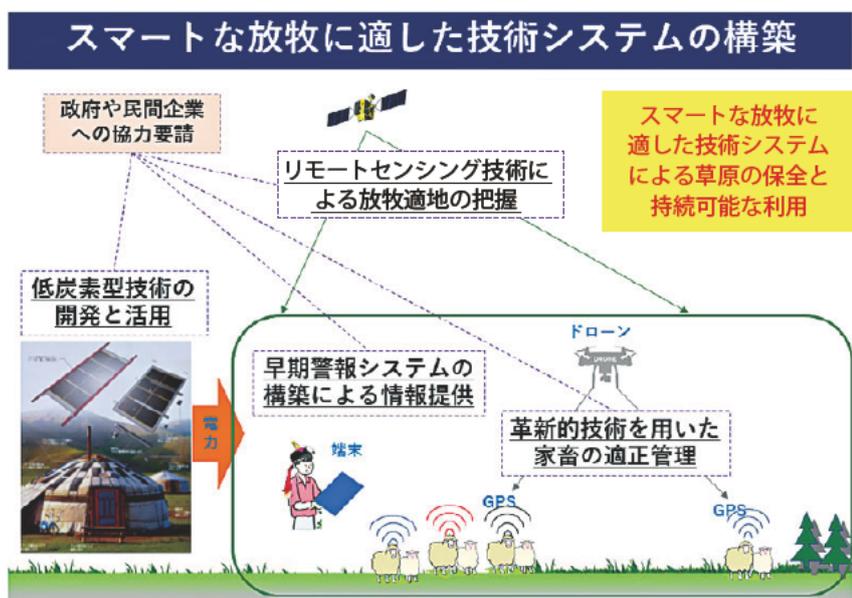
国立環境研究所では

国立環境研究所では、2006年からの5年間、「温暖化影響早期観測ネットワークの構築」を実施し、東アジア地域をカバーできる衛星観測データや代表的な生態系における地上観測データを取得し、温暖化が永久凍土の融解や環境資源の劣化に及ぼす影響を評価しました。また、2012年からの3年間、「モンゴルの永久凍土地帯における脆弱性評価及び適応策の提言に関する研究」を実施し、温暖化に伴う永久凍土の融解が草原生態系に及ぼす影響を評価しました。さらに、2015年からの5年間、中央大学、(株)日立製作所、(社)海外環境協力センター等と共同で実施した「二国間クレジット(JCM)推進のため

のMRV等関連するモンゴルにおける技術高度化事業(研究代表者：中央大学研究開発機構 渡邊正孝教授)」において、モンゴル全土の草原域における二酸化炭素吸収量の監視と評価を行いました。

2018年から3年間、「水資源量に基づく乾燥・半乾燥牧草地の利用可能量とその脆弱性の評価」を実施し、モンゴルの代表的地域を対象に、気候変動に加え、鉱山開発、都市拡大など人為的攪乱が水資源および牧草地の利用可能量とその脆弱性に及ぼす影響を明らかにしました。これら一連の研究を十数年にわたってモンゴルの研究者と共に継続したことが認められ、2019年にモンゴルで開催された「第二回環境科学と技術国際会議(EST-2019)」で、モンゴル環境大臣署名の「名誉賞」を頂くことができました。

現在は、気候変動適応研究プログラムにおいて、「草原域における気候変動による影響監視および適応評価」(図4)に関する研究を実施しています。この研究では、これまで開発してきた草原域の牧養力および脆弱性の評価モデルを活用し、飼料・水供給拡大や家畜頭数適正管理など牧畜産業の適応策を検討することで、牧養力に与える効果の定量的評価を試みています。研究成果は、AP-PLAT、Future Earth、政府間環境政策対話等を通じてステークホルダーへ科学的知見として提供し、草原域の適応計画の作成に寄与することを目指しています。最終的に、スマートな放牧に適した技術システム(図5)を構築し、草原生態系の保全と持続的な利用に貢献していきたいと考えています。



■図5 スマートな放牧に適した技術システムの構築に向けて
モンゴルの豊富な太陽光を利用した再生可能エネルギーや、衛星・ドローンなど最新の技術による家畜の適正管理によって、スマートな放牧システムを構築し、将来の草原生態系の保全と持続可能な利用につなげたいと考えています。

国立環境研究所における 「草原生態系の脆弱性評価に関する研究」のあゆみ

国立環境研究所では、「草原生態系の脆弱性評価」に関する研究を行っています。

ここでは、その中から、水資源量に基づく乾燥・半乾燥牧草地の利用可能量とその脆弱性の評価に関するものについて、そのあゆみを紹介します。

年度	課題名
2006-2010	「温暖化影響早期観測ネットワークの構築」(慶応義塾大学、中国科学院、モンゴル科学院と共同で実施)* ¹
2006-2010	「東アジアの水・物質循環評価システムの開発」(国立環境研究所中核研究プロジェクト)、長江水利委員会、中国科学院、浙江海洋大学等と共同で実施)
2011-2012	「東アジア地域における影響評価のための観測データ収集」(慶応義塾大学と共同で実施)* ¹
2012-2014	「モンゴルの永久凍土地帯における脆弱性評価及び適応策の提言に関する研究」(慶応義塾大学と共同で実施)* ²
2015-2020	「モンゴル全土の草原域の二酸化炭素吸収量の評価」(環境省委託「二国間クレジット(JCM)推進のためのMRV等関連するモンゴルにおける技術高度化事業」、中央大学、(株)日立製作所、(社)海外環境協力センター等と共同で実施)
2018-2020	「水資源量に基づく乾燥・半乾燥牧草地の利用可能量とその脆弱性の評価」(国立環境研究所所内公募型研究A、モンゴル科学院とモンゴル国立大学等と共同で実施)

*1 環境省委託請負業務

*2 環境研究推進費2E-1203

本号で紹介した研究は、以下の機関、スタッフにより実施されました(所属は当時、敬称略、順不同)。

【研究担当者】

国立環境研究所：王勤学(主席研究員)、岡寺智大(主任研究員)、中山忠暢(主幹研究員)、額尔德尼(特別研究員2014-2019)

中央大学：渡邊正孝(教授)、大場章弘(共同研究員)、斎藤陽子(共同研究員)

モンゴル科学院：Ochirbat Batkhishig(教授)、Battogtokh Dorjgotov(教授)

モンゴル国立大学：Bayarsaikhan Uudus(教授)

● 過去の「環境儀」から ●

これまでの環境儀から、アジアの環境研究を対象にしたものを紹介します。

No.74 「アジアの研究者とともに築く脱炭素社会 – 統合評価モデル AIM の開発を通じた国際協力」

気候変動によって引き起こされる洪水や干ばつなどの自然災害は、世界の社会や経済に大きな影響を与えると予測されています。国立環境研究所ではすでに 1990 年から温室効果ガス排出量の予測、対策や影響を評価するための統合評価モデル「アジア太平洋統合評価モデル (AIM: Asia-Pacific Integrated Model)」の開発に取り組み、アジアの国々とともに発展させてきました。本号では、アジアの持続可能な発展に貢献してきた研究や AIM を通じた人材育成などについて紹介しています。

No.63 「世界の屋根」から地球温暖化を探る～青海・チベット草原の炭素収支～

森林は温暖化の主要因である大気二酸化炭素の吸収源として機能することが期待されています。しかし、森林とほぼ同じ面積を占める草原では、二酸化炭素の吸収能力についてあまり把握されていませんでした。そこで、最も標高の高い青海・チベット草原に注目し、さまざまな角度から温暖化関連の研究を展開してきました。本号では、主に炭素収支に関連する研究成果、そして現在展開している温暖化長期モニタリング研究を紹介します。

No.42 「環境研究 for Asia/in Asia/with Asia – 持続可能なアジアに向けて」

国立環境研究所では、以前からアジアを対象・フィールドとした研究、そしてアジアの研究機関等を共同研究のパートナーとした環境研究を進めてきました。国立環境研究所でのこれまでのアジア研究の経緯を紹介するとともに、国境を越えた大気汚染に関する研究、アジアでの河川から海に至る水環境の研究、そしてメコン流域の生態系がもつ機能に関する研究など、アジア自然共生研究プログラムの成果を紹介します。

No.12 「東アジアの広域大気汚染 – 国境を越える酸性雨」

国立環境研究所では、1990 年から東アジアの広域大気汚染の科学的解明をめざした研究に取り組んでいます。本号ではその中から、モデルに用いる正確な大気汚染物質発生量を提供するための「東アジア地域における発生源インベントリーの構築」、そして初めて実施することができた中国での「航空機観測によるエアロゾル性状の空間分布測定」に関する研究を中心に紹介します。

環境儀 No.83

— 国立環境研究所の研究情報誌 —

2021 年 12 月 28 日発行

編集 国立環境研究所編集分科会

(担当 WG: 小野寺 崇、王 勤学、吉岡 明良、山岸 隆博、
滝村 朗、永島 達也、岩崎 一弘、今瀬 修)

発行 国立研究開発法人 国立環境研究所

〒305-8506 茨城県つくば市小野川 16-2

問合せ先 国立環境研究所情報企画室 pub@nies.go.jp

編集協力 有限会社サイテック・コミュニケーションズ

印刷製本 株式会社イセブ

無断転載を禁じます

「環境儀」既刊の紹介

No.37 2010年 7月	科学の目で見える生物多様性—空の目とミクロの目	No.60 2016年 3月	災害からの復興が未来の環境創造につながるまちづくりを目指して—福島発の社会システムイノベーション
No.38 2010年 10月	バイオアッセイによって環境をはかる—持続可能な生態系を目指して	No.61 2016年 6月	「適応」で拓く新時代!—気候変動による影響に備える
No.39 2011年 1月	「シリカ欠損仮説」と海域生態系の変質—フェリーを利用してそれらの因果関係を探る	No.62 2016年 9月	地球環境 100年モニタリング—波照間と落石岬での大気質監視
No.40 2011年 3月	VOCと地球環境—大気中揮発性有機化合物の実態解明を目指して	No.63 2016年 12月	「世界の屋根」から地球温暖化を探る—青海・チベット草原の炭素収支
No.41 2011年 7月	宇宙から地球の息吹を探る—炭素循環の解明を目指して	No.64 2017年 3月	PM _{2.5} の観測とシミュレーション—天気予報のように信頼できる予測を目指して
No.42 2011年 10月	環境研究 for Asia/In Asia/with Asia—持続可能なアジアに向けて	No.65 2017年 6月	化学物質の正確なヒト健康への影響評価を目指して—新しい発達神経毒性試験法の開発
No.43 2012年 1月	藻類の系統保存—微細藻類と絶滅が危惧される藻類	No.66 2017年 9月	土壌は温暖化を加速するのか?—アジアの森林土壌が握る膨大な炭素の将来
No.44 2012年 4月	試験管内生命で環境汚染を視る—環境毒性の <i>in vitro</i> バイオアッセイ	No.67 2017年 12月	遺伝子から植物のストレスにせまる—オゾンに対する植物の応答機構の解明
No.45 2012年 7月	干潟の生き物のはたらきを探る—浅海域の環境変動が生物に及ぼす影響	No.68 2018年 3月	スモッグの正体を追いかける—VOCからエアロソルまで
No.46 2012年 10月	ナノ粒子・ナノマテリアルの生体への影響—分子サイズにまで小さくなった超微小粒子と生体との反応	No.69 2018年 6月	宇宙と地上から温室効果ガスを捉える—太陽光による高精度観測への挑戦
No.47 2013年 1月	化学物質の形から毒性を予測する—計算化学によるアプローチ	No.70 2018年 9月	和風スマートシティづくりを目指して
No.48 2013年 4月	環境スペシメンバンキング—環境の今を封じ込め未来に伝えるバトンリレー	No.71 2018年 12月	人口分布と環境—コンパクトなまちづくり
No.49 2013年 7月	東日本大震災—環境研究者はいかに取り組むか	No.72 2019年 4月	うみの見張り番—植物プランクトンを使った海洋開発現場の水質監視
No.50 2013年 10月	環境多媒体モデル—大気・水・土壌をめぐる有害化学物質の可視化	No.73 2019年 6月	アオコの実像—シアバクテリアの遺伝子解析からわかること
No.51 2014年 1月	旅客機を使って大気を測る—国際線で世界をカバー	No.74 2019年 9月	アジアの研究者とともに築く脱炭素社会—統合評価モデルAIMの開発を通じた国際協力
No.52 2014年 4月	アオコの有毒物質を探る—構造解析と分析法の開発	No.75 2019年 12月	GMO アンダーザブリッジ—除草剤耐性ナタネの生物多様性影響調査
No.53 2014年 6月	サンゴ礁の過去・現在・未来—環境変化との関わりから保全へ	No.76 2020年 3月	社会対話「環境カフェ」—科学者と市民の相互理解と共感を目指す新たな手法
No.54 2014年 9月	環境と人々の健康との関わりを探る—環境疫学	No.77 2020年 6月	エアロソルのエイジングを研究する—大気中のエアロソル粒子はどのように変質していくのか?
No.55 2014年 12月	未来につながる都市であるために—資源とエネルギーを有効利用するしくみ	No.78 2020年 9月	正しいごみ管理で都市を水害から守る—熱帯アジアの都市型水害の原因と解決策
No.56 2015年 3月	大気環境中の化学物質の健康リスク評価—実験研究を環境行政につなげる	No.79 2020年 12月	健康のための紫外線日光浴のすすめ—最適な日光浴時間大公開!
No.57 2015年 6月	使用済み電気製品の国際資源循環—日本とアジアで目指す E-waste の適正管理	No.80 2021年 3月	災害環境研究のこれまでとこれから—ふくしまで進める地域協働の新展開
No.58 2015年 9月	被災地の環境再生をめざして—放射性物質による環境汚染からの回復研究	No.81 2021年 6月	気候変動から生き物を守る—自然生態系分野の適応研究
No.59 2015年 12月	未来に続く健康を守るために—環境化学物質の継世代影響とエピジェネティクス	No.82 2021年 9月	人が去ったそのあとに—人口減少下における里山の生態系変化とその管理に関する研究

●環境儀のバックナンバーは、国立環境研究所のホームページでご覧になれます。
<https://www.nies.go.jp/kanko/kankyogi/index.html>

「環境儀」



地球儀が地球上の自分の位置を知るための道具であるように、「環境儀」という命名には、われわれを取り巻く多様な環境問題の中で、われわれは今どこに位置するのか、どこに向かおうとしているのか、それを明確に指し示すべしという意図が込められています。「環境儀」に正確な地図・行路を書き込んでいくことが、環境研究に携わる者の任務であると考えています。

2001年7月 合志 陽一
 (環境儀第1号「発刊に当たって」より抜粋)



このロゴマークは国立環境研究所の英語文字 N.I.E.S で構成されています。N=波(大気と水)、E=木(生命)、Sで構成されるOで地球(世界)を表現しています。ロゴマーク全体が風を切ったように進む姿は、研究所の躍動性・進歩・向上・発展を表現しています。

リサイクル適性 (A)

この印刷物は、印刷用の紙へリサイクルできます。