



NIES RESEARCH BOOKLET

環境儀

NO. 63

December 2016

国立環境研究所の研究情報誌

「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



国立研究開発法人

国立環境研究所

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



青海・チベット草原は
ユーラシア大草原の中央に広がっています。
この地球上もっとも標高の高い草原から
地球温暖化を探っています。

現在も進んでいる地球温暖化は、主に人為活動に由来する大気二酸化炭素 (CO_2) 濃度の上昇によるものと考えられています。植物は光合成によって CO_2 を吸収し、有機炭素として体内に蓄積することで、大気 CO_2 濃度の上昇を緩和します。一方、植物の呼吸や土壌微生物の分解によって、有機炭素は再び CO_2 として大気中に放出され、大気 CO_2 濃度の上昇を加速することもあります。したがって、大気 CO_2 濃度の変化を予測し、地球温暖化とその対策を考えるためには、植物や土壌中の炭素蓄積量を把握するとともに、植物と大気の CO_2 のやりとりの過程を理解する必要があります。

陸域は、生育している植物の種類によって、森林、草原、農地などに分類でき、森林は温暖化の主要因である大気 CO_2 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、 CO_2 吸収能力についてあまり把握されていません。

ユーラシア大陸には、西のハンガリーから東のモンゴル、そして中国の東北部まで連なる地球上最も広大な草原が広がっています。この東西に横断する草原地帯の中央には、最も標高の高い青海・チベット草原生態系があります。私たちは2000年ごろから地上の「秘境」ともいわれている青海・チベット草原に注目し、さまざまな角度から温暖化関連研究を展開してきました。本号では、主に青海・チベット草原生態系の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。

CONTENTS

「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

- Interview 研究者に聞く
草原の炭素の動きを探る p4 ~ 9
- Summary
青海・チベット草原から
地球温暖化を探る p10 ~ 11
- 研究をめぐって
草原生態系における
温暖化研究の動向 p12 ~ 13
- 「東アジアの草原生態系に関する
温暖化研究」のこれまでの
研究プロジェクト p14

草原の炭素の動きを探る

森林や草原などの陸域生態系に蓄積されている炭素の量は、大気中に CO_2 として存在する炭素の約 3 倍と多く、わずかな変動でも大気の CO_2 に大きな影響を及ぼすと考えられています。生物・生態系環境研究センター環境ストレス機構研究室 主任研究員の唐艶鴻さんは、中国南西部にある青海・チベット草原の炭素蓄積量やその動態を調べ、地球温暖化との関連を探っています。



唐 艶鴻（たん やんほん）
生物・生態系環境研究センター
環境ストレス機構研究室 主任研究員

地球温暖化と森林

Q：草原の研究を始めたきっかけは何ですか？

唐：私の専門は植物生態学です。筑波大学大学院で岩城英夫先生のご指導で日本のススキ草原の生態を研究したことがきっかけです。

Q：博士論文がきっかけでいまの草原の生態学研究を始められたのですね。

唐：はい。1993年に国立環境研究所に入所してからは、当時の地球環境研究グループで温暖化関連の生態学の研究をしていました。日本では、当時も現在も温暖化研究は国内や周辺各国の森林生態系を対象にすることが多く、私もマレーシアの熱帯林の生態を研究していました。しかし、草原は世界の陸域の約4分の1も占めているにも関わらず、15年ほど前までは日本でもアジアでも、草原の温暖化に関する野外調査や観

コラム① 草原と草原生態系

私たちの身の回りには、松のような樹木や、庭の雑草のような草本植物があります。一般的に草原とはススキのようなイネ科の草が多いところをいいますが、草原の「原」は、広く平らな地形を意味するので、草原は広い草の土地ともいえます。広い意味では、樹木以外のすべての草が多い「原」は草原になります。このような広義的な草原には、湿原や水草地、また草が繁茂している泥炭地なども含まれます。これに対して、面積が比較的小さい草の生育する場所は、「草地」といいます。草地は、牧草地や採草地のように、農学や畜産などで使うことが多いようです。

自然草原は、乾燥した場所や低温の場所、または乾燥かつ低温の場所に生育する植生です。温帯地域では、一般的に年間降雨量が300-400mmを超えると森林になり、100mm以下では砂漠になり、森林と砂漠の間では草原植生が成立します。

また、降雨量と気温の変化によって、いろいろなタイプの草原ができます（図1.上下写真）。たとえば、温帯のステップ草原、寒帯地域のツンドラ、または熱帯のサバンナなどの草原があります。

定義の仕方にもよりますが、草原の面積は陸域面積の5分の1から4分の1と大きく変わります。最近の衛星データを調べた結果、図1中央の地図のように草原は分布し、その面積はおよそ世界陸地の24%を占めます。日本は、森林の国といわれるほど森林の面積が大きいのですが、草原の面積も国土の5%程度を占めます。アメリカ、オーストラリア、中国やモンゴルなどの国は、いずれも草原の面積が森林に比べて広く「草原の国」ともいいます。

草原は、草だけではなく低木も生えており、さまざまな動物や家畜、そして人間も生活しています。草原に生活しているすべての生物とその環境（たとえば草原土壌）を含

測研究はあまり行われていませんでした。このことが気になり、関連資料を調べたところ、草原の温暖化に関する研究への興味を抱くとともに、草原も温暖化の重要な研究対象になるのではないかと考えました。そこで上司の鷲田伸明先生に相談したところ励ましていただき、草原の温暖化の研究を始めることになりました。

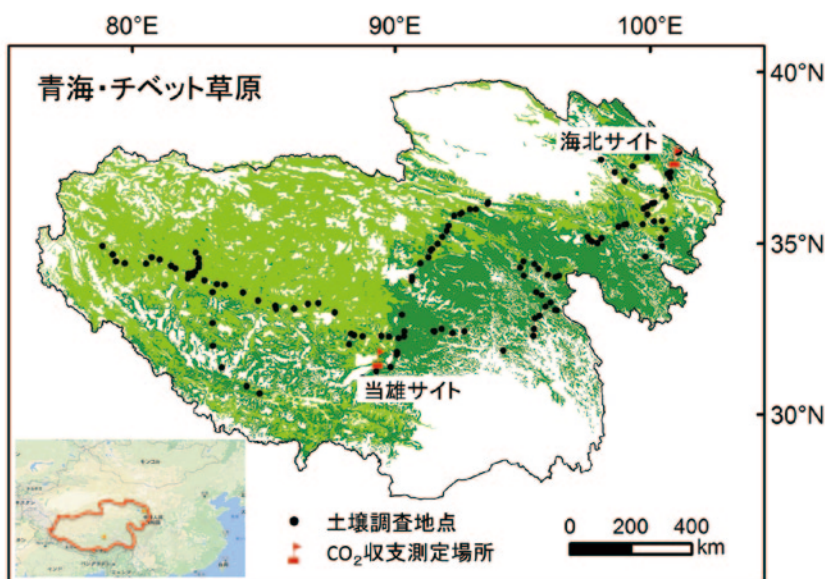
Q：これまでの温暖化研究で森林を対象にすることが多かったのはなぜですか。

唐：地球温暖化は、大気中のCO₂の濃度の上昇が主な原因と考えられています。植物は、光合成によってCO₂を吸収し、大気中のCO₂濃度の上昇を減速させるので、温暖化の進行を緩和することができます。とくに熱帯雨林などの森林は、大きな樹木で構成されており、それだけたくさんのCO₂を吸収できるのではないかと考えがありました。近年、伐採の進行が深刻なため、森林の減少により大気中のCO₂濃度が上昇することが懸念されています。そのため、地球温暖化研究では、森林の影響に関心が高いのです。

陸域炭素収支における草原の役割

Q：草原も大気中のCO₂濃度変化に影響を及ぼす可能性がありますか？樹木に比べると、草のほうがCO₂の吸収が少ないのではないですか？

唐：樹木も草も、葉が光合成によってCO₂を吸収します。樹木は草より体が大きいのでCO₂の吸収「量」



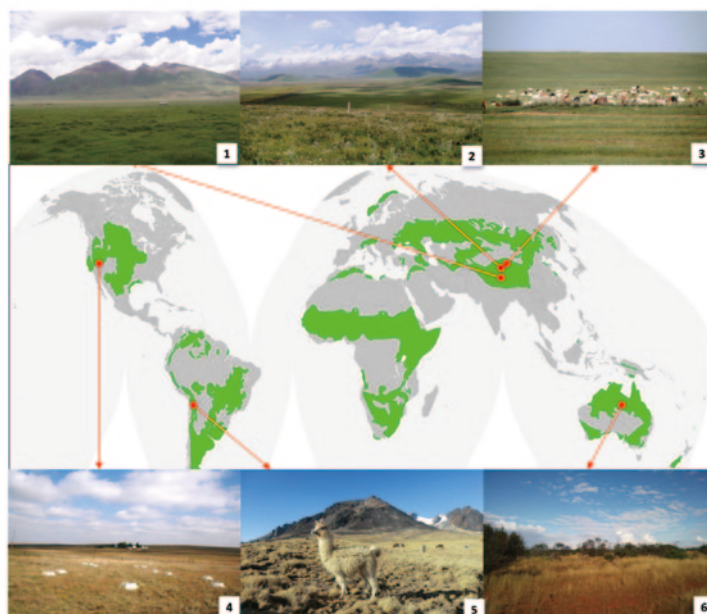
「青海・チベット草原」を指すおおよその地域（左下図の赤線囲まれた部分）及び土壌調査地点（黒丸）とCO₂収支測定場所。楊元合（中国科学院植物研究所）の原図をもとに作成。

も多いと思われがちです。葉の正味のCO₂吸収量（または速度）は、光合成によるCO₂吸収量（または速度）から呼吸によるCO₂放出量（または速度）を差し引いた分です。葉だけで考えると、単位時間、単位葉面積あたりのCO₂吸収速度は、草と樹木では大差がないか、草の方が高い場合も多いです。ただ、年間では、草に葉が着いている期間が短いため常緑樹に比べて葉による正味CO₂の吸収総量は少なくなります。一方、植物は葉以外の部分でも呼吸をしてCO₂を再び大気中に放出します。樹木は体が大きいので呼吸量も多くなりすし、一年生草のような冬に枯れる草に比べ、樹木は一年中生きているため、呼吸量が草よりさらに

めた場合、草原生態系といいます。世界中の草原生態系は、ほとんど何らかの人為的な活動があります。いわゆるまったく人為的な影響のない「自然」草原生態系は、非常に稀です。青海・チベット草原の一部の「無人」地域には、残された自然草原があると思われます。草原地域の人為活動は、牛や羊などの家畜の放牧や畜産業が多いですが、最近、農産業や観光なども多く行われるようになってい

■ 図1 世界草原の分布と青海・チベット草原の風景

上下写真：さまざまな草原 1. 青海メド草原、2. チベット湿地草原、3. モンゴルステップ草原、4. コロラドの短草草原、5. ポリビア高山草原（筑波大学 廣田充撮影）、6. オーストラリアサバンナ草原（東京農工大学 赤坂宗光撮影）中央地図：世界の草原の分布（Dixon など（2014）を改変）



多くなります。これらのことから、年間のCO₂の正味吸収量、すなわち吸収分から放出分を差し引いた炭素の収支は、樹木と草であまり変わりがありません。

Q：では、草の多い草原と樹木の多い森林では炭素収支も変わらないのでしょうか。

唐：草原と森林の炭素収支は、植物だけではなく、土壌中の有機物や微生物の働きも見なければなりません。落ち葉や枯れ枝、枯死根などを由来とする土壌中の有機物は、土壌動物や微生物によって分解され、CO₂として再び大気中に戻ります。自然草原の多くは、乾燥あるいは寒冷、または乾燥かつ寒冷な気候条件下にあり、このような気候下では、温暖で湿潤な森林環境よりも微生物による有機物の分解が遅くなります。また一部の湿地や高山草原の土壌は、森林土壌よりも炭素蓄積量ははるかに高いという報告もあります。そこで、植物、土壌と気候環境を総合的に考えれば、地球全体の草原と森林では、単位面積あたりの炭素蓄積量は大差がないと言ってよいでしょう。地球上の森林と草原の面積はほぼ同じですから、陸域の炭素収支を考える場合、草原は森林と同様に重要です。

青海・チベット草原の炭素収支に着目

Q：なぜ青海・チベット草原に着目したのですか。

唐：いろいろなデータを集めて調べた中で私たちが興味を持ったのは、1970年代に行われた中国草原の土壌炭素の調査結果です。それには、青海・チベット草原の土壌炭素の蓄積量が周辺地域の草原に比べて非常に高いことが示されていました。これが、青海・チベッ



海北観測サイトの四季（農業環境技術研究所 杜明遠氏提供）

ト草原に目を向けた理由のひとつです。また、研究を始めようとした2000年頃は、青海・チベット草原は地球上の「最後の神秘的生態系」と呼ばれるほど生態学的研究が少なかったのです。青海・チベット草原の未知の生態系にも強く惹きつけられました。

Q：青海・チベット草原の土壌炭素の蓄積がなぜ非常に高いのでしょうか。

唐：まさに私たちが当初もっとも知りたいことでした。結論を先にいうと、今でも十分にわかっているわけではありません。草原の炭素収支は人間の経済活動にたとえることができます。「貯金」をするためには、「支出」より「収入」が多くならなければいけません。青海・チベット草原の炭素の「収入」にあたるのは植物の光合成、「支出」にあたるのは主に植物や土壌微生物の呼吸です。これらのプロセスと影響要因がわかれば、なぜ青海・チベット草原の炭素の蓄積量が非常に多いのかを説明できるはずだと考えました。

青海・チベット草原は、昼間の気温が高く夜間の気温が低いことから、昼間は光合成のCO₂吸収に有利になりますが、夜は有機物の分解が遅くなります。ま

コラム② 草原の炭素収支と温暖化

草原では、草の光合成によって大気中のCO₂が吸収され、植物体の有機炭素として蓄積されます。植物は枯れてから、土壌中の有機炭素になります。一方、植物も土壌中の微生物も呼吸をするので、植物体内または土壌中の有機炭素は、呼吸によって再び大気中にCO₂として放出されます。これが草原炭素収支の主な流れです。また、多くの草原には野生動物や家畜がおり、草の一部はこれらの動物によって食べられて最終的にCO₂として大気中に放出されます。

草原は、普段私たちの目が届かない土壌中に多くの炭素を蓄積しています。これは、草の植物体の多くの部分が根や地下茎として土壌中にあることに関係しています（目安として草の地上部と地下部比は、植物体乾燥重量で1：5と考えられています）。また、多くの草原は、乾燥、寒冷な気候、またはその両方の気候条件下で成立しており、そのような気候では微生物による土壌中の有機炭素の分解が

抑制されます。多くの草原では、草の葉など地上部分は動物や家畜によって食べられてしまうので、結果的に、草原の炭素は主に土壌中に蓄積されることになります。

草原の炭素収支や土壌炭素の変化も大気中のCO₂濃度に影響を及ぼし、温暖化の進行にも関わります。これまでの研究では、草原の土壌炭素の蓄積量は場所による違いが大きいことがわかりました。将来は、植物の種類や気候条件など空間的変動のパターンを形成している要因をさらに的確に把握することで、地球全体の草原の炭素蓄積量に関する正確な評価ができるようになることが期待されます。一方、炭素収支については、草原での過放牧、農地化、または湿地草原の乾燥化によって、草原土壌中に蓄積された炭素がCO₂として大気中に放出されます。同時に、気候や人為的な要因が草原の炭素収支に及ぼす影響は、大きな時間的・空間的変動があるため、草原全体の炭素収支の予測については不確実性が非常に高いこともわかっています。今後、



チベット当雄湿地サイトで観測機器の設置作業

た、冬は寒冷で乾燥し、期間も長いこと、夏はほかの草原に比べて湿潤で気温も高くなること、いずれも生態系の炭素蓄積には有利に働きます。しかし、このような推測を実証することは、草原炭素の「吸収」と「放出」の詳しいプロセスやその影響要因を現場で観測しなければなりません。既存の土壌の調査が行われた1970年代は、青海・チベット草原の交通事情が極めて悪く、土壌調査が行われた範囲が非常に限られていました。また、当時の分析技術などを考えると、そもそも「青海・チベット草原の炭素蓄積量が高い」という報告自体を確認することが最も重要です。

青海・チベット草原のプロジェクトが立ち上がる

Q：草原生態系の「炭素収支」は、自然の経済学とも言えますね。しかし、これだけ広い草原でどうやって研究場所を決めたのでしょうか。

唐：青海・チベット草原は250万km²以上、日本の陸地面積の6倍以上にもなります。どこでどうやって

研究するかはずいぶん悩みました。そこで、現場の状況を把握するため、2000年の夏に、日本側5名の研究者から構成した調査チームを派遣し、中国の北京大学、中国科学院、内モンゴル大学などから多くの研究者の協力を得て、青海、チベットと内モンゴル草原の下見調査をしました。3つの候補地それぞれでの研究の現状や交通事情、生活環境、研究協力者などの情報を集めました。これらの調査結果を検討し、当時の筑波大学の及川武久先生や東北大学の田中正之先生をはじめ、多くの方からご指導とご協力をいただき、翌年から本格的なプロジェクトを立ち上げることができました。

Q：プロジェクトではどんな研究をしたのですか。

唐：1つは、青海草原の炭素収支を把握するための長期観測です。チベット高原の北東部にある中国科学院西北高原生物研究所の試験場、「海北定位站」という場所で、風速や風向、CO₂濃度、温度、湿度、降水量、日射量などを観測しました。これらのデータを用いると、草原と大気の間におけるCO₂のやりとりの速度を推定できます。農業環境技術研究所の杜明遠さん、川島茂人さんと筑波大学の学生だった加藤知道さんらの協力で、青海・チベット草原における生態系のCO₂交換速度の長期観測が始まりました。

もう1つは、草原の炭素蓄積量を確認するための研究です。青海・チベット草原は、広いだけではなく、場所によって植物の種類、生育状況、気象環境が大きく異なります。たとえば、降水量が少ないところは、砂漠に近い「草原」になりますが、年間降水量が500mm以上になる場所は、発達した湿地草原になり

草原炭素蓄積量変化や草原炭素収支に関する時空間的変動特性およびそれらのさまざまな環境要因との関連性を明らかにし、草原の温暖化への影響に関する不確実性を減らすための研究にさらに力を入れる必要があるでしょう。

■ 図2 草原炭素収支の模式図

大気中のCO₂は植物の光合成によって吸収され、有機炭素として植物体に蓄積します。植物体の有機炭素は、枯れると土壌中に蓄積します。一方、植物の呼吸や土壌有機物の微生物による分解によって、植物体内や土壌に蓄積した有機炭素はCO₂となって放出され、再び大気に戻ります。



ます。この草原の種類によって、炭素の蓄積量が大きく異なります。土壌炭素蓄積量の調査は、地下1mのところまで穴を掘り、異なる深さの土壌を採集します。同時に植物の種類を調査し、その乾燥重量も測定します。統計的に信頼性のあるデータを取るためには、1カ所に少なくとも3つ以上の穴を掘らなければなりません。実際には平均標高4000m以上の草原でこのような作業をすることは非常に大変です。

精度の高い調査を実施

Q：どんな場所を調査しましたか。

唐：2000年代になっても青海・チベット草原は、交通事情があまりよくなく、無人地帯や湿地など人が立ち入れないところもたくさんありました。そこで、現地に詳しい研究者に同行してもらい、さまざまな土壌タイプのデータを取れるように道路沿いを調査しました。1年目は、青海省の西寧（シーニン）からチベット自治区のラ薩（ラサ）まで約2000kmの道路沿い約60点を調査しました。

Q：調査の結果、草原には炭素が蓄積していましたか。

唐：二酸化炭素のやりとりの測定結果から、青海省海北草原は正味の炭素を吸収していることがわかりました。例えば、最初の3年間のデータでは、海北草原は冷温帯針葉樹林と同じ量の正味CO₂を吸収していました。しかし、気候の変動や放牧の影響を受けて、なかなか正確に吸収を評価することはできません。一方、広範囲の土壌調査結果から、青海・チベット草原に蓄積した炭素量は、調査が実施された1970年代に比べ



上：炭素収支観測機器の保守、下：植物群落の空間構造の調査
いずれも青海海北（筑波大学 廣田充氏提供）

てかなり値の少ない地点が多かったのですが、一方で蓄積量の多い場所もありました。大草原は、場所によって気候条件や地質、地形、植物の種類、人為的な影響など多くの要因が異なり、草原全体の炭素蓄積量を把握することは簡単ではありません。私たちのプロジェクトはこれまでに例のない高い精度の調査をすることができましたが、草原が広大なことを考えるとまだ不十分かもしれません。

コラム③ 草原の過放牧

世界中多くの草原には家畜が放牧されています。家畜放牧量や放牧様式などによって、草の成長が異なり、草原の炭素収支も変わります。家畜放牧または野生動物が非常に少ない場合、草の種間競争が起こり、成長が旺盛な種類ばかりが残るようになって、草の種類は少なくなります。草原の生物多様性が低下することは、環境の変化に対して安定性も弱くなり、草の成長も悪くなると言われています。適正な強度の家畜放牧なら、草原の生物多様性が高まるとともに炭素収支も安定します。また、土壌炭素が溜まる可能性も高く、草原を持続的に利用することができます。家畜の量がさらに増えると、草の成長が家畜の餌の量に追いつかなくなります。すると植物成長が急速に悪くなり、草原の植被（植生）が薄くなり現存量も大きく低下します。これを過放牧と言います。

過放牧をすると、植物による炭素吸収量が減少するだけでなく、植被の減少で地温が上がることで土壌中有機

炭素の分解も加速します。場合によっては、草原の砂漠化が進行します。また、生育する植物の種類が変わり、減少します。それに伴い、土壌動物や微生物の組成も変わります。その結果、草原の生物多様性が大きく低下することになります。

■ 図3 過放牧と草原の炭素収支

青海・チベット草原では、主にヤクや、羊が放牧されています。家畜の量が増えると、植物の生産量が減ります。詳しい因果関係は究明されていませんが、植物の成長または温暖化などによって、草原ではネズミなどの動物が増えます。草原土壌は土壌動物によって掘り返され、強風によって飛ばされます。極端な場合、砂地や砂漠になることもあります。このような過程に伴って、草原土壌炭素の蓄積速度と蓄積量が大きく低下することが予想されます。



上：植物現存量の調査、下：植物種多様性調査
いずれも青海海北（筑波大学 廣田充氏提供）

過酷な環境が招く苦勞

Q：調査ではどんな苦勞がありましたか。

唐：青海・チベット草原は標高が高いので、高山病にかからないように注意しなければなりません。これまで高山病に耐えられずにすぐに帰った人もいました。高山病以外にも、天候の激しい変化に慣れる必要があります。

山の天気は変わりやすく、真夏のように暑いときも

あれば、急に雹が降ってくることもあります。このような環境での作業は体力の消耗も大きいですね。

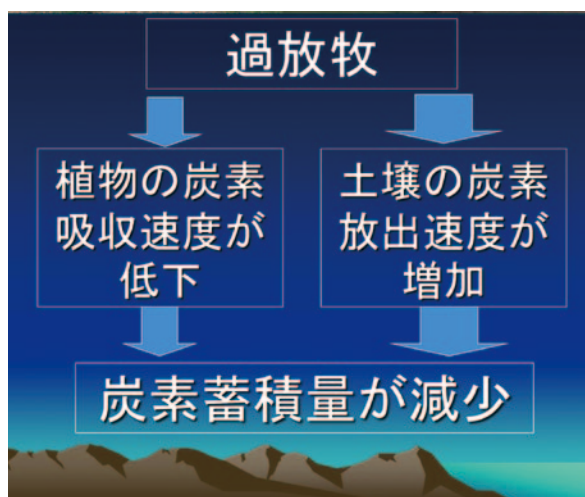
Q：どうやってそのような苦勞を乗り越えたのですか。

唐：高山病は根本的な対策がなく、慣れるしかありません。プロジェクト参加者の安全なども十分に配慮しなければなりません。土壌炭素調査は主に北京大学の学生に依頼しましたが、十分な体力をつけないと調査に参加させないと大学の先生から聞きました。学生には高山病や体力消耗に備えるため、調査する前の2カ月間は、毎日ジョギングなどのトレーニングをしてもらったそうです。夏休みに調査をしながらチベット高原の自然も楽しめるので、調査に必要な十分の人数の学生が集まってくれました。

Q：今後はどのように研究を進めたいですか。

唐：東アジアの草原の生物多様性、特に多様性と温暖化の関連についてもっと明らかにしたいです。東アジアの草原は世界のほかの草原と比べて生物多様性が非常に高いことが知られていますが、アクセスが困難なことなどから謎が多く、興味深い課題があると思っています。

さらに、人類の草原との付き合い方にも興味があります。草原生態学の研究では、草原を探ってさまざまな自然の法則を理解することはもちろんですが、人類がどのように草原を利用し、草原生態系の一員として草原と共存していくかも重要な課題になるでしょう。特に、チベット草原を含むユーラシア大草原地域の将来に対して生態学がどのように貢献できるかも考えてみたいですね。



青海・チベット草原から地球温暖化を探る

人為活動による大気中 CO_2 濃度の増加は地球温暖化の要因としてあげられています。草原の土壌中には多くの炭素が蓄積しており、微生物などの呼吸によって土壌炭素が分解され CO_2 として大気中に放出されれば、温暖化を加速させる恐れがあります。一方、地球温暖化も草原にさまざまな影響を与えます。特に、標高が高い地域では温暖化による気温の上昇幅が大きくなるため、影響も大きくなることが予想されます。

青海・チベット草原は標高が高いうえに面積も広く、土壌炭素がたくさん蓄積されていることから、温暖化による影響や温暖化への影響も大きいと予想されます。私たちは 2000 年ごろから、青海・チベット草原で土壌炭素の蓄積量や炭素収支の現状を調べています。また、温暖化の進行速度や温暖化が生態系に及ぼすさまざまな影響について長期観測をしています。

青海・チベット草原の炭素蓄積

草原では、植物が光合成によって大気 CO_2 から取り込んだ炭素は、主に土壌中に蓄積されています。したがって、草原が大気 CO_2 濃度に及ぼす影響を把握するためには、土壌炭素の蓄積量とその動態を把握する必要があります。

これまで、青海・チベット草原には、多量の土壌炭素が蓄積されている可能性があると考えられてきました。しかしながら、青海・チベット草原は標高が高く、交通事情も悪いため、現地の観測データは十分にありませんでした。この高原はおよそ 250 万 km^2 の広さの大草原で、気候や植物の種類、家畜の放牧など土地利用も多様です。そのため、土壌炭素の空間的変動も大きいことが予想されました。そこで、2001 年から 4 年間、青海・チベット草原において、広範囲の土壌炭素蓄積量を把握するため、大規模な野外調査を行いました。

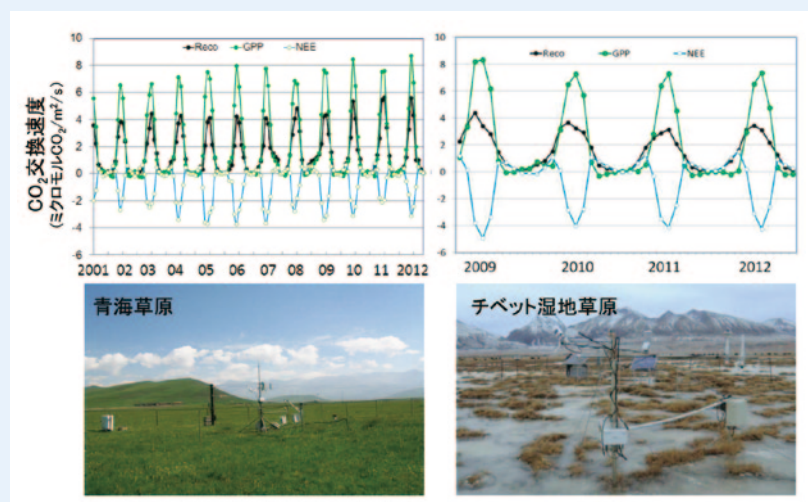
私たちが研究対象とした約 112 万 km^2 の草原では、土

壌深度 1m までに蓄積した炭素の「密度」は $6.52\text{kgC}/\text{m}^2$ と推定されました。この数値は、従来の推定値より低いものですが、一部の湿地草原においては、土壌炭素の蓄積量が非常に高いことが確認されました。また、さまざまな場所の土壌水分と土壌温度の野外測定データから、土壌水分と土壌温度が高くなると、土壌炭素の分解が加速することが明らかになるとともに、昼夜の温度差が大きい場合は土壌炭素の蓄積速度が大きくなることも示唆されました。

炭素収支の動態

草原に多くの土壌炭素が蓄積されていることは、過去の積算炭素収支がプラスであることを意味しますが、現在の土壌炭素蓄積量だけから現在の炭素の吸収量を見積ることはできません。そこで、私たちは、「渦相関法」という炭素収支測定方法で草原と大気の間での CO_2 のやりとり (CO_2 フラックスともいいます) を長期的に観測しました (図 4)。

草原と大気 CO_2 のやりとりは、中国の青海省北部の海北草原で観測しまし



■ 図 4 草原生態系と大気間の二酸化炭素交換
草原と大気 CO_2 のやりとりの速度の測定。上：青海草原とチベット草原の測定結果。下：観測場所と観測計器の（写真右：農業環境技術研究所 杜明遠氏提供）

Reco: 生態系呼吸と呼ばれ、植物呼吸と微生物呼吸を合わせた草原から大気への CO_2 放出速度；GPP: 植物による大気からの CO_2 の吸収速度；NEE: $\text{GPP}-\text{Reco}$ 、草原の CO_2 の正味交換速度、マイナス値が大きいほど、生態系による CO_2 の吸収速度が大きいことを意味します。いずれも、瞬時交換速度の月平均値です。いずれの草原も CO_2 のやりとりの速度の年変動が大きいものの、大気から CO_2 を吸収していることがわかります。

■ 図5 植物個体群動態の長期モニタリング

チベット当雄草原における温暖化長期観測結果の一例。個体群サイズの算出方法：アンドロサス属 (*Androsace tapete*) はクッション植物の丸い株の固まりの内生存株の割合；ヒゲハリスゲ属 (*Kobresia pygmae*) の場合、観測枠に占める積算植被の割合；キジムシロ属 (*Potentilla nivea*) の場合は、個体数です。植物種によって（またわずかながら標高帯によって）経年変化の傾向は異なります。

た。海北草原は、青海・チベット草原の中でも草の種類が非常に豊富です。夏は雨が集中して降るため、湿度が高く温暖ですが、冬は雪が少なく、非常に乾燥し、寒冷です。1年の降水量は、500～600mmと比較的雨量の多い草原です。

これまでの測定結果から、海北草原の年間CO₂正味吸収量は100gC/m²前後になり、冷温帯針葉樹林と同程度のCO₂吸収能力があることがわかりました。これは多くの草原に比べてやや高い値ですが、年によって大きく変動しました。

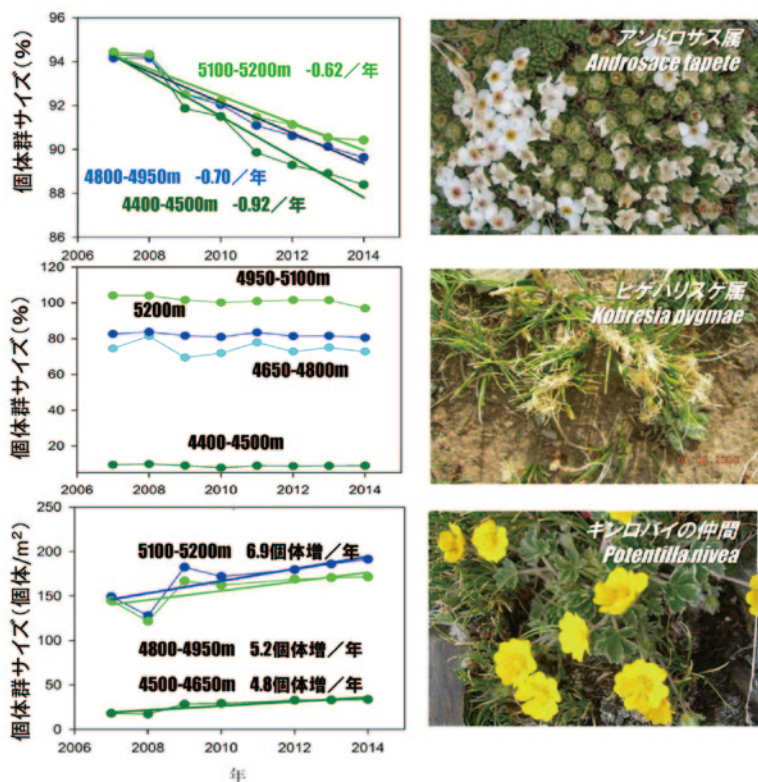
しかし、いままでの観測方法では、家畜による採食の影響を十分に評価できていないので、海北草原でもさらに詳しい観測が必要です。

青海・チベット草原は、広くて気候環境や植物の分布が大きく異なるので、海北草原1カ所だけの観測結果を広範囲の草原に適用することはできません。そこで、衛星画像を利用して、過去15年間における青海・チベット草原全体の植物成長を調べたところ、草原全体の植物量が増えていることが示唆されました。これらのことから、青海・チベット草原は、現在も大気からCO₂を正味吸収し、CO₂の1つの「シンク」になっているとも言えそうです。

温暖化影響の長期観測

草原に蓄積されている炭素や現在の炭素蓄積速度を把握することは、草原が地球温暖化に対してどのような潜在的な影響をもつかを評価することに繋がります。また、地球温暖化が草原にさまざまな影響を及ぼすこと、中でも草原の炭素収支に影響を及ぼすことも予想されています。青海・チベット草原は、標高が高いために温暖化の速度が速く、その影響も早くかつ顕著に表れる可能性があるため、青海・チベット草原における気候や土壌などの環境変化の観測結果は、地球温暖化の影響の早期予測にも役立ちます。

私たちは、2006年に青海・チベット草原の海北(カイホク)と当雄(トウユ)において、温暖化影響の長期



観測を始めました。いずれの場所でも、標高1000m以上の斜面に複数の観測場を設け、そのうち2つのところから、標高3200～5600mまでに及ぶ世界で標高差の最も大きな観測システムを作りました。それぞれの場所では、気温や降水などの気象条件、土壌温度・湿度などの土壌環境、そして植物の展葉、開花、結実から枯死に至る過程、成長速度、また土壌有機物の分解速度などを観測しています。

結果の一例として、チベットの当雄での植物の生態を長期観測した結果を紹介します。2006年から2014まで、クッション植物のチベット・アンドロサケ (*Androsace tapete*) は、4500～5200mまでの標高も個体数が減少しました(図5)。しかし、キノロバイの仲間 (*Potentilla nivea*) は、どの標高においても個体数が増加し、標高4800m以上の高い場所では特に増加の傾向が大きいことがわかりました。一方、ヒゲハリスゲ属の草 (*Kobresia pygmae*) は、どの標高でも明瞭な個体数の変化が認められませんでした。

さらに分析したところ、それぞれの種の個体数変化は、雨量と気温の変化に対する応答の違いによるものだとわかりました。ただし、ここで示した限られた期間の植物種に関する調査の結果によって、草原全体の温暖化の影響を検討できるわけではありません。草原の空間的変動の大きさや変動が年々大きくなることを考えると、草原に及ぼす温暖化影響の評価と予測をするためには、なるべく多くの場所で長期間の観測をすることが必要です。

草原生態系における 温暖化研究の動向

これまで、森林は陸域の炭素収支や生物多様性の保全などの地球環境問題に対して重要な役割を果たしているのではないかと考えられてきました。しかし、世界の陸域を見れば森林に匹敵する面積を持つ草原も地球環境に対して無視できない程の役割を果たしている可能性が高いと考えられます。とくに、地球温暖化において草原がどのように関与しているかは、大変興味深い課題ですが、関連する知見は非常に不足しています。近年では、炭素収支や生物多様性に対する草原の貢献だけでなく、生態系サービスや社会文化の多様性などの面において草原の役割に対する関心が高まっています。

世界では

草原は、地球の陸地面積の約4分の1を占めます。陸域を森林、草原、農地および砂漠・半砂漠に分けた場合、草原の面積は森林（陸域生態系の約3分の1）とほぼ同じです。

これだけ広大な面積を持つ草原は、陸域の炭素収支にどの程度の貢献をしているのでしょうか。環境モデルや観測の結果では、ヨーロッパ（1991-2010年）やアメリカ（1999-2013年）にある草原の多くは、大気CO₂を正味吸収していると報告されています。しかし、陸域全体で見れば、草原の炭素収支はほぼバランスを保っている状態にあり、大気との間には炭素の吸収も放出もないと考えられていることが多いです。このように明確な結論が出ないのは、以下に挙げるようないくつかの理由によるものと考えられます。

世界の草原の多くは、遊牧や定牧、採草や農業などの人為的な影響を受けています。とくに、発展途上国・地域、たとえばモンゴルや中国の一部では人為的な影響が大きく、その影響は多岐にわたります。また、地域や時期によって変化も大きく、草原の炭素収支を左

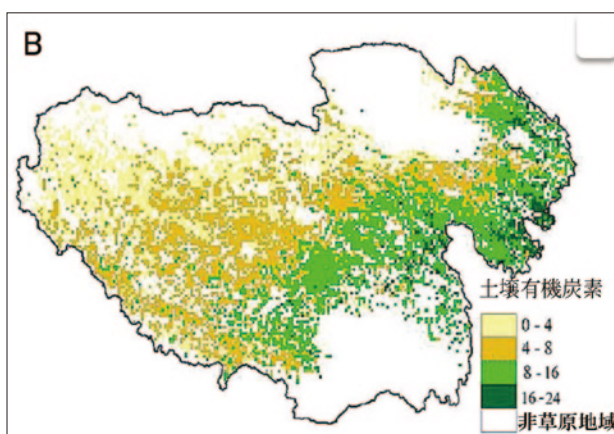
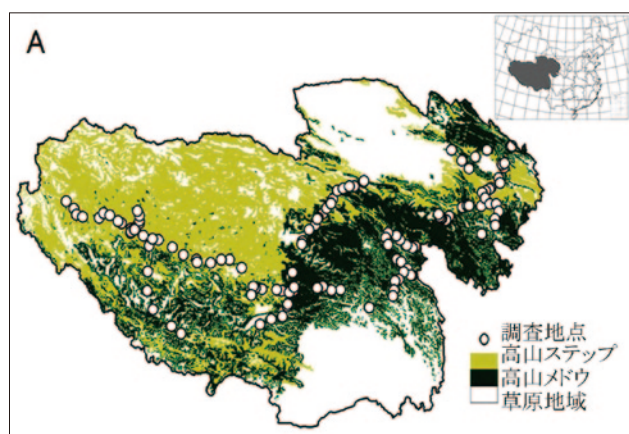
右しますが、その実態は明らかになっていません。

草原の多くは、乾燥、寒冷気候条件下にあり、地球温暖化に伴う気候の変化が相対的に大きいと考えられています。たとえば、青海・チベット草原は、周辺の標高の低い地域に比べて気温の上昇速度が大きく、また、乾燥地域では気候変化による降雨量や降雨強度の変化も大きいとの報告もあります。大気中のCO₂濃度の上昇やそれに伴う気温の上昇や降水条件の変化、大気からの窒素沈着などは、草原の炭素収支にさまざまな影響があることが予想されますが、詳しいことはまだ明らかになっていません。最近の研究によると、CO₂濃度が上昇すると、光合成の原材料のCO₂が増加して草原植物の成長がよくなり、炭素正味吸収が増える可能性が高いことが示唆されています。また、草原植物の成長がよくなると、干ばつや熱波などの極端な気象条件に対する「抵抗力」が高まり、生態系が回復しやすくなることも明らかになっています。

草原は、森林と比べて土壌炭素の割合が高く、土壌中の微生物の活動が温度変化の影響を受けやすいため、温暖化に対して「敏感」で炭素収支が変化しやすいと考えられてきました。しかし、近年の研究では、気候や土壌環境、また植物の種類によって、草原の土壌炭素が分解されにくい場合もあると示唆されています。アジアの草原は、地球の草原面積の約5分の1を占めます。中国、カザフスタン、モンゴルでは、草原植生がそれぞれの国土の40%、60%および80%を占め、合計面積は約690万km²にのぼります。多くの草原は標高の高いところに分布しており、温暖化による気温上昇の影響が大きいと予想されます。これらのことから、アジアの草原は、気候の変化に対して比較的「脆弱」であると議論されてきましたが、人為的な影響も大きいと、温暖化の影響の不確実性も大き



標高 5600m のところで調査を終えた時の喜び



■ 図6 草原土壌炭素の調査風景と調査結果

草原植物地上部の種類と現存量調査風景（左上）、土壌炭素を測定するためのサンプリング風景（右上）。国道沿いを中心に135地点（図A中の白点）を選び、各地点3か所以上で、0-10、10-20、20-30、30-50、50-70と70-100 cmの深さの土壌炭素量などを測定しました。西北部の乾燥した地域に高山ステップ草原が、東南方向に帯状に高山メドウ草原が主に分布しています。図Bは、0-100cmまでの土壌有機炭素の蓄積量の空間分布、凡例の数字単位はkgC/m²です。

くなると考えられます。さらに植物や生物の多様性も非常に大きく、このような生物多様性が高い生態系は、一般的に気候変化に対する安定性も高いと考えられています。アジアの草原における温暖化の影響に関する要因は非常に多く、さまざまな要因を加味して評価するためには、現地の観測データのさらなる蓄積が必要です。

日本では

日本は「森林の国」といわれていますが、日本全体の草原を合わせると、四国より広い面積になります。日本の草原は、雨量が多く、植物の生長量が高い一方で、高山草原や湿地草原も多いため、土壌炭素の分解速度や植物の呼吸速度も相対的に遅く、草原の炭素蓄積が高いと考えられています。最近の研究では、日本の草原は日本陸域全体の土壌炭素蓄積量の8%を占めます。平均値として、単位面積当たりの土壌有機炭素量（0-30cmの深さまで）は、1m²に11.4kgの炭素が蓄積されており、中国草原の5.3kgやロシア草原の10.1kgと比べるとはるかに高いことがわかります。しかし、多くの高山草原は、温暖化に伴って森林に変化することにより、土壌炭素量が減少することが予想されます。一方で、日本の草原は生物多様性の保

全や観光地や牧草地などの資源としても非常に重要です。

国立環境研究所では

国立環境研究所では、2000年ごろから中国やモンゴルの草原の気候変化や温暖化の影響に着目し、現地の研究者と協力しながら、研究を進めてきました。私たちは青海・チベット草原を対象に、まず炭素収支を中心に研究を始め、続いて第2段階として、高山草原生態系の炭素循環に関連する生理生態学的な研究をし、植生のフェノロジー、植物種や遺伝的な多様性、放牧の影響など多岐にわたる草原生態系の環境問題を探りました。近年は、温暖化の影響の長期的な観測を中心に研究を行っています。また、国立環境研究所は、温暖化に伴う日本の高山草原の変化にも着目し、長期モニタリングを行っています。

国立環境研究所における 「東アジアの草原生態系に関する温暖化研究」の これまでの研究プロジェクト

国立環境研究所では、アジアに関する温暖化研究を行っています。ここでは、その中から、東アジア草原生態系の炭素収支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
2000	【環境省地球環境総合推進費 FS】 東アジア草原生態系における炭素収支の推定と指標生態系の策定に関する予備的研究
2001～2003	【環境省地球環境総合推進費 B-13】 温帯高山草原生態系における炭素動態と温暖化影響の解明に関する研究
2001～2004	【文部科学省（海外研究 B）】 青海・チベット草原生態系における炭素循環のプロセスとメカニズムの解明
2002～2006	【環境省地球環境総合推進費 S1】 21 世紀の炭素管理に向けたアジア陸域生態系の統合的炭素収支研究「サブサブテーマ：温帯高山草原生態系における炭素の吸収、放出及び蓄積の総合評価と温暖影響の解明に関する研究」
2005～2008	【環境省地球環境保全試験研究費】 チベット高原を利用した温暖化の早期検出と早期予測に関する研究
2006～2010	【国立環境研究所中核研究プロジェクト 1】 温室効果ガスの長期変動メカニズムとその地域特性の解明
2009～2012	【科学技術振興機構二国間研究交流研究】 青海・チベット・モンゴル高原における草原生態系の炭素動態と気候変動に関する統合的評価と予測
2011～2015	【国立環境研究所温暖化プログラム PJ1】 温室効果ガス等の濃度変動特性の解明とその将来予測に関するプロジェクト
2011～2015	【国立環境研究所生物多様性プログラム PJ3】 人為的環境攪乱要因の生物多様性影響評価と管理手法に関する研究
2013～2017	【環境省地球環境保全試験研究費】 アジア陸域の指標生態系における温暖化影響の長期モニタリング研究
2016～2020	【国立環境研究所自然共生プログラム PJ3】 広域環境変動に対する生物生態系応答機構解明と適応戦略

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：唐艶鴻、田村正行、伊藤昭彦、小熊宏之、古松、崔驍勇、下野綾子、沈海花、李載錫、李轟、張永強、斎藤誠、曹入尹

〈共同研究者〉

農業環境技術研究所：川島茂人、杜明遠、米村正一郎、西村誠一、岸本（莫）文紅

筑波大学：鞠子茂、浅沼順、廣田充、加藤知道

茨城大学：塩見正衛、堀良通、山村靖夫、陳俊、安田泰輔、河原崎里子、大塚俊之

早稲田大学：小泉博

玉川大学：関川清広

自然環境研究センター：市河三英、光岡佳納子、松島昇

日本大学：広瀬大

北京大学：方精雲、朴世龍、賀金生、吉成均、朱彪

北京師範大学：陳晋、王聡

中国科学院：于貴瑞、張憲洲、趙新全、李英年、曹広民、師生波、周華坤、趙亮、徐世曉、羅天祥、汪詩平、沈妙根、康世昌

● 過 去 の 環 境 儀 か ら ●

これまでの環境儀から、炭素収支や炭素循環に関するものを紹介します。

No.51 旅客機を使って大気を測る

— 国際線で世界をカバー

現在、日本航空（JAL）が運航する 8 機の国際線定期旅客便を使って大気中の二酸化炭素（CO₂）濃度の全球的な観測が実施されています。このように民間の旅客機で CO₂ 濃度を常時測定する計画は世界で初めてであり、地球上の CO₂ の循環を理解する上で貴重なデータが毎日のように得られています。本号では、国立環境研究所が気象研究所などと共同で行っている、国際線定期旅客便を使った温室効果ガスの観測プロジェクト（CONTRAIL プロジェクト）の取り組みを中心に紹介しています。

NO.41 宇宙から地球の息吹を探る

— 炭素循環の解明を目指して

環境省、国立環境研究所、宇宙航空研究開発機構は、共同で衛星 GOSAT（愛称「いぶき」）を打ち上げ、二酸化炭素など大気中の温室効果ガスを宇宙から観測しています。本号では、国立環境研究所が GOSAT プロジェクトにどのように貢献してきたかを紹介しています。

NO.28 森の息づかいを測る

— 森林生態系の CO₂ フラックス観測研究

地球温暖化問題に取り組むうえで、地球レベルの炭素循環の理解は不可欠です。本号では、これまで継続的に観測することが難しかった森林全体の CO₂ 吸収・放出量の観測に取り組んだ「森林生態系炭素収支モニタリング」プロジェクトを紹介しています。

NO.6 海の呼吸

— 北太平洋海洋表層の CO₂ 吸収に関する研究

海洋の炭素循環を明らかにしようとするとき、広大な海洋をどのように観測するかが最初に突き当たる課題です。国立環境研究所では、貨物船を使って北太平洋での CO₂ 測定を行いました。本号では、その測定の実際と、延べ 38 往復の航海などにより取得した豊富なデータの解析から得られた成果を紹介しています。

環 境 儀 No.63

— 国立環境研究所の研究情報誌 —

2016 年 12 月 31 日発行

編 集 国立環境研究所編集分科会

（担当 WG：石濱史子、唐 艶鴻、石垣智基、遠嶋康德、青野光子、
滝村 朗）

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 朝日印刷株式会社 つくば支社

無断転載を禁じます

「環境儀」既刊の紹介

No.17 2005年 7月	有機スズと生殖異常—海産巻貝に及ぼす内分泌かく乱化学物質の影響	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.18 2005年 10月	外来生物による生物多様性への影響を探る	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.19 2006年 1月	最先端の気候モデルで予測する「地球温暖化」	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.20 2006年 4月	地球環境保全に向けた国際合意をめざして—温暖化対策における社会科学的アプローチ	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.21 2006年 7月	中国の都市大気汚染と健康影響	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.22 2006年 10月	微小粒子の健康影響—アレルギーと循環機能	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.23 2007年 1月	地球規模の海洋汚染—観測と実態	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.24 2007年 4月	21世紀の廃棄物最終処分場—高規格最終処分システムの研究	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.25 2007年 7月	環境知覚研究の勧め—好ましい環境をめざして	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.26 2007年 10月	成層圏オゾン層の行方—3次元化学モデルで見るオゾン層回復予測	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.27 2008年 1月	アレルギー性疾患への環境化学物質の影響	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.28 2008年 4月	森の息づかいを測る—森林生態系のCO ₂ フラックス観測研究	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.29 2008年 7月	ライダーネットワークの展開—東アジア地域のエアロゾルの挙動解明を目指して	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.30 2008年 10月	河川生態系への人為的影響に関する評価—よりよい流域環境を未来に残す	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.31 2009年 1月	有害廃棄物の処理—アスベスト、PCB処理の一翼を担う分析研究	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.32 2009年 4月	熱中症の原因を探る—救急搬送データから見るその実態と将来予測	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.33 2009年 7月	越境大気汚染の日本への影響—光化学オキシダント増加の謎	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.34 2010年 3月	セILING型洋上風力発電システム構想—海を旅するウィンドファーム	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.35 2010年 1月	環境負荷を低減する産業・生活排水の処理システム—低濃度有機性排水処理の「省」「創」エネ化—	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.36 2010年 4月	日本低炭素社会シナリオ研究—2050年温室効果ガス70%削減への道筋	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.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

●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。
<http://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)、I= 木 (生命)、E.S で構成される○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左側に進むように動かし、研究所の運動性・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。