

# 人間活動が生態系に与える影響

— CO<sub>2</sub>収支を推定するコンピュータモデルから —

国立研究開発法人 国立環境研究所 物質循環モデリング・解析研究室長

伊藤 昭彦

## 1. はじめに

温暖化をはじめとする地球環境変動が、自然の様々なシステムに及ぼす影響が顕在化しつつある。人類は農耕を開始して以来、地球の環境を改変してきたが、特に著しい影響を与えるようになったのは18世紀半ばに産業革命が始まり、化石燃料（石炭、石油、天然ガスなど）を大量に消費するようになって以降である。現在、人間活動によって消費される化石燃料は、年間90億t（炭素重）に及び、大部分が二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）となって大気に放出されている。CO<sub>2</sub>は温室効果を持ち、温暖化の最も重要な原因物質となっているが、その影響はより広く及んでいる。CO<sub>2</sub>は海水に溶解すると酸性化を引き起こし、サンゴや有孔虫などの海水中の炭酸イオンを利用する生物に悪影響を与える可能性がある。また、CO<sub>2</sub>は陸上植物の光合成で使用されるため、大気中濃度が増加することで施肥効果をもたらす、生態系のバランスを乱すことが懸念されている。このような影響は世界中で発生し、しかもその程度は条件によって異なるため、全容を把握することは容易ではない。

人間活動は生態系に、より直接的な影響を与える。森林破壊など土地利用変化は、まず温帯林、そして熱帯林の面積を大幅に減少させ、耕作地や都市に転換させてきた。それに伴い、樹木等の植物だけでなく、動物や微生物、つまり生物多様性に深刻な影響をもたらしている。現在の森林破壊は、大部分が発展途上国で進行しているが、それは木材収穫だけでなくゴムやアブラヤシを生産し、先進国に輸出するグローバリゼーションの影響と見ることもできる。土地利用変化の状況は、近年、飛躍的に分解能が高まっている人工衛星のリモートセンシング技術で監視が可能となっている。しかし、森林破壊が生態系のはたらきにどのような

影響を与えているかは、別の方法によって評価しなければならない。

本稿では、影響を評価する手法の1つとして生態系（陸域）のモデル開発とその応用について紹介する。モデルシミュレーションは、コンピュータ上で計算される仮想の世界であるが、世界全体をしかも長期間で扱えること、複雑な相互作用を含むシステムの挙動を予測できること、など他にはない特徴があり不可欠な手法となっている。

## 2. 生態系のモデル化

地球表面の約3割が陸地であり、そこには環境条件に応じて非常に多様な生態系が分布している。赤道付近の熱帯多雨林から、不毛の地に近い砂漠や極域まで大きく異なる環境のもと、植物、動物、微生物の相互作用によって構成される生態系は、人間社会にも不可欠なサービスを提供する源ともなっている。その営みを解明する学問が生態学であり、現地での観察から始まって、研究室での実験、理論化、そしてモデル化が行われる。現在では対象とする生態系や、研究目的に応じて多数の生態系モデルが開発されており、その種類も理論的解析が主目的の簡素なものから、定量的な予測を目指す複雑なものまで様々である。筆者自身はVISIT (Vegetation Integrative Simulator for Tracegases) と呼ばれる生態系モデルを開発し、主に温暖化研究に応用している。このモデルの対象は世界の陸域全体であり、特に炭素や窒素などの物質循環を定量的に扱うことを主目的としている。モデルで世界全体を扱おうとすると、真正面から複雑多様さを取りこむのは得策でなく、共通する本質的な部分に焦点を絞ったシンプルさが必要となる。一方、炭素や窒素の循環を扱うには、温度や降水などの環境条件、エネルギーや水の移動、植物や微生物の作用など複雑な要因・プロセスを考慮する必

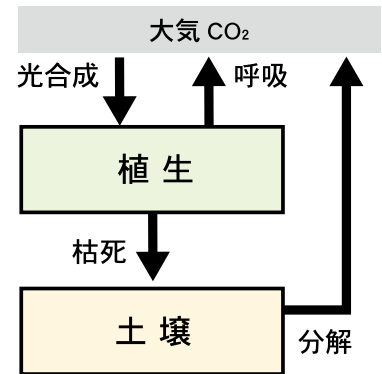


図-1 シンプルな生態系モデル

要がある。モデル研究では、このようなシンプルさと複雑さのせめぎ合いが常であり、そこから最適な配分を見出すことが研究者に求められる。

物質循環を扱うモデルでは、植物による光合成、呼吸、枯死、土壌中での微生物による分解などを計算することになる。それらは膨大な研究の上に築かれた理論や経験式によって表現され、植物などの種類ごとの特徴はパラメータと呼ばれる係数の違いによって表現される。また、樹木や動物、微生物を個体ごとに扱うことは（普通は）できないので、同じような機能を持つ部分をまとめて集団として扱う。図-1は非常に単純化した生態系モデルの構造を示しており、植物と土壌の炭素プール、光合成によるCO<sub>2</sub>固定、植物の枯死、そして植物と土壌微生物の呼吸によるCO<sub>2</sub>放出のみで構成されている。このような単純なモデルであっても、生態系の生産力、大気からの炭素吸収、長期間の炭素固定など、重要な生態系の特徴・本質を捉えることができる点に注目していただきたい。さらに、光合成や呼吸の環境条件への応答を加えることで、環境変動による生態系への影響をおおよそ推定することが可能となる。

### 3. 温暖化と生態系モデル研究

生態系のモデルは、学術的な研究だけでなく様々な環境問題に 대응するツールとして利用されている。特にCO<sub>2</sub>を扱うモデルは、温暖化研究において様々な局面で必要となっており、ここでその概要を説明する(図-2)。最初に温暖化研究で生態系モデルが使用されたのは、気候変動による影響の推定であった。大気CO<sub>2</sub>濃度が倍増した場合、温度が3℃上昇した場合、降水量が半減した場合など、比較的単純な条件を設定し、生態系モデルでシミュレーションを行うことで、生産力やバイオマスの変化などが推定された。その結果は、大気CO<sub>2</sub>による施肥効果がはたらく一方、温度や降水の変化はプラスにもマイナスにもなり得る複雑な影響を示唆していた。しかし1990年代頃の研究では、生態系の応答感度を定めるための観測・実験データが十分でないという問題点があった。温暖化研究が進むと、生態系による光合成や呼吸の変化が大気CO<sub>2</sub>濃度に影響を与えるフィードバック効果が重要であることが分かってきた。そこで2000年頃から、気候予測を行うモデルに生態系モデルを組み込んで炭素の循環をシミュレートする「地球システムモデル」が開発されている。日本では(国研)海洋研究開発機構や気象研究所において開発が行われており、そのうち1つでは筆者の開発したVISITを組み込んだ予測研究が実施されている。このような地球システムモデルは、構造が複雑なため大規模プロジェクトで開発が行われ、計算量も膨大でスーパーコンピュータ上で実行される。しかしその成果として、生態系によるフィードバック効果を考慮した、現実性を増した温暖化予測に寄与している。

生態系モデルのもう1つの重要な用途として、温室効果ガス収支の実態解明がある。温暖化の予測を行う上で、過去から現在にかけて、CO<sub>2</sub>やその他の温室効果ガスがどこでどれだけ放出され、どの程度が陸域や海洋に吸収され、大気に残っているかを把握することは基本的に重要である。大気の観測は精密に行われているが、陸域や海洋での吸収・放出量を世界全体で測定することは極めて難しい(1km<sup>2</sup>程度の範囲であれば後述する微気象学的手法でCO<sub>2</sub>の交換量を直接観測することができる)。生態系モデルには光合成や呼吸などの主要プロセスが組み

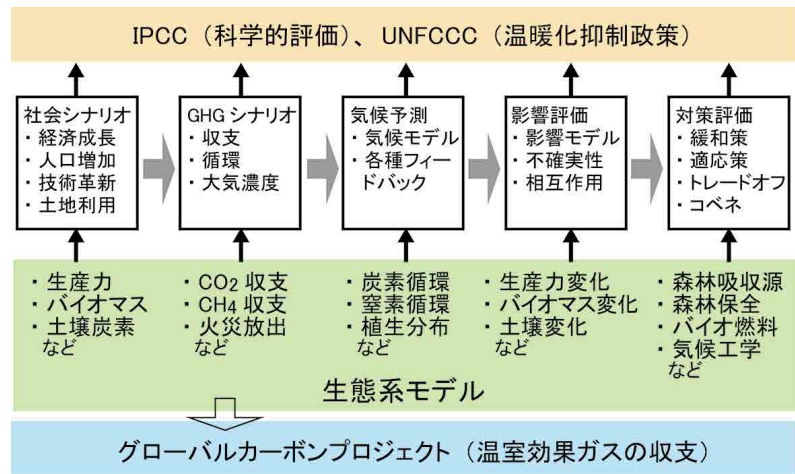


図-2 生態系モデルをめぐる研究の枠組み

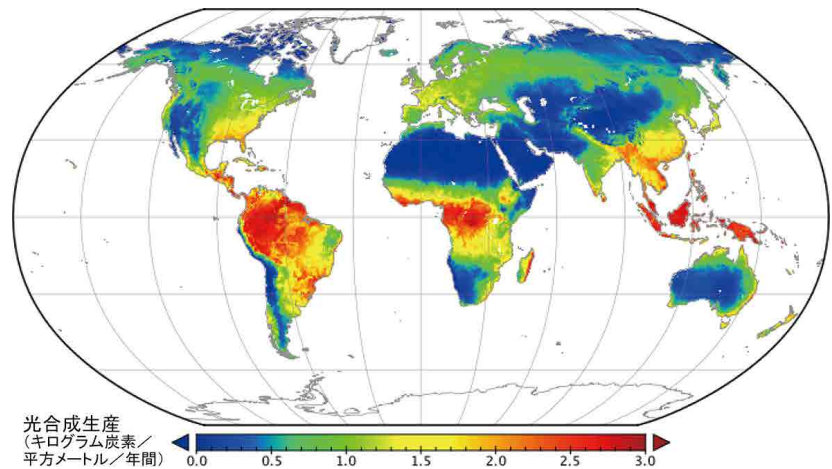


図-3 生態系モデルによる光合成生産の分布の推定例

込まれており、多くは気象条件や土地利用に対する応答も考慮されているので、陸域全体のシミュレーションを行うことでCO<sub>2</sub>収支を再現することができる。図-3に示したのは生態系モデルで推定した、現在の陸域生態系における光合成生産の分布である。このような結果は推定値ではあるが、温室効果ガス収支の分布や変動、そしてそのメカニズムに示唆を与える重要な手法となっている。

現在では、生態系モデルの用途はより社会的側面にも広がっている。将来の温暖化の進行は、人口増加、経済成長、土地利用、技術革新、対策など社会的要因に左右されるが、そのシナリオ作成では生態系の変化も考慮する必要がある。つまり、将来の生態系の生産力やバイオマスを生態系モデルで推定し、社会経済モデルへの入力値とすることで、土地利用や化石燃料消費、大気へのCO<sub>2</sub>放出量が推定される。また、温暖化対策の検討においても生態系モデルは必要である。対策の1つとして有望視される植林やバイオ燃料製造においては、大面積の土地が必要となるため、食糧生産や生物多様性

保全とのコンフリクトが問題となる。生態系モデルを用いて対策実施に伴う影響を推定しておくことで、バランスの取れた温暖化対策の選択が可能になると期待される。このような生態系モデルの用途の広がりには、温暖化研究全体の複雑化と、早急な対策実施の必要性が高まったことが背景に挙げられる。従来の、シナリオ→気候予測→影響評価→対策検討の手順では、一通りを終えるまでに10年以上を要し、社会情勢の変化に臨機応変に対応できない可能性が高い。そこで現在では、上記の作業を並行して進める戦略が採られており、かつ各作業において最新のモデルを使いスピードアップが図られている。本稿では詳しく触れないが、温暖化対策において生態系機能の活用は重要性を増しており、モデルを用いた幅広い評価への需要は高まっている。特に、大気中の温室効果ガスを減少に向かわせるには、植林による炭素固定や、バイオ燃料とCO<sub>2</sub>回収を組み合わせた手法の活用が見込まれており、そこではモデルによる事前評価が不可欠となっている。



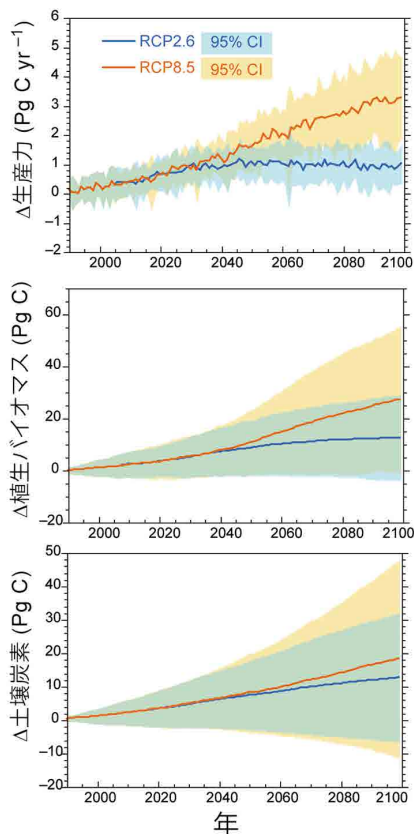


図-4 東アジアにおける生産力、バイオマス、土壌炭素の予測例<sup>1)</sup>

#### 4. 温暖化影響評価の例

実際に行われている研究例として「マルチセクターでの気候変動影響に関するモデル間相互比較プロジェクト (ISIMIP)」で行ったシミュレーションについて紹介する<sup>1)</sup>。この欧州機関が主導するプロジェクトでは、複数の大気CO<sub>2</sub>濃度予測シナリオ (4種類)、複数の気候モデルによる予測シナリオ (5種類)、そして複数の生態系モデルを組み合わせた影響評価を実施した。このように複数種類のシナリオ・モデルを使用する理由は、将来に起こりうる影響の範囲と不確実性を調べるためである。7種類の生態系モデルが参加し、多くは空間分解能が緯度経度0.5度 (赤道上で約55km) の格子約6万点で全陸域をカバーしていた。シミュレーションは、1950年から始まり2099年まで、大気CO<sub>2</sub>濃度や温度、降水量の変化を入力して計算が行われた。

図-4に示したのは、東アジア地域における生態系の生産力、植物バイオマス、土壌炭素量の予測結果である。ここでは温暖化対策を積極的に進めるケース (RCP2.6) と、対策に消極的なケース (RCP8.5) について示した。それぞれ、太線が複数気候シナリオ・モデルの平均的な結果、色の付いた領域が結果のばら

つきを示している。生産力の結果は、いずれのケースでも2040年頃まで生産力とバイオマスは同じ程度に増加するが、それ以降は温暖化対策に消極的なRCP8.5でより大幅に増加することを示している。このような増加は、主に大気CO<sub>2</sub>濃度が上昇した結果生じる施肥効果によるものと考えられる。RCP2.6のケースでは、21世紀後半に大気CO<sub>2</sub>濃度が徐々に低下し始めるため、それに応じて生産力も頭打ちになっている。

アジア地域では、温暖化時には気温が上昇するだけでなく、アジアモンスーンを介して降水量にも変化が起きると予想される。気候モデルによる予測では、気温は高緯度・高標高の場所でより速い速度で進行する一方、降水に関しては地域的なばらつきが大きく予測が難しいことが分かっている。一般的な傾向としては、モンスーンの活発化によって、将来的にはアジア地域の降水量は増加しがちであると考えられている。ただしその中には、大規模な台風や豪雨に伴うものもあるので、降水の増加は一概に良い面ばかりとは限らない。生態系にも、台風や豪雨に伴う風害や土砂流出によってダメージが生じる場合がある (それをテーマにしたモデル研究も行われている)。また、平均的な降水量は増加するとしても、年々の変動幅が大きくなり、干ばつの強度や頻度は予想に反して増加する可能性も残されている。現在の生態系モデルは、大気湿度や土壌水分を介したストレス要因を取りこんでいるので、干ばつの影響をある程度まで評価することはできる。しかし、数十年に一度のような強い干ばつや熱波が生じた場合の、植生の大規模な枯死による影響を正しく再現することは難しい。対照的に、土壌では増加する結果だけでなく減少する結果が混在し、その幅はRCP8.5の方が大きかった。つまり、大気CO<sub>2</sub>濃度がより高くなるケースほど、一貫性のある予測結果を得ることが難しくなっていた。

土壌は、大気CO<sub>2</sub>濃度に直接応答することはほとんどないが、植生がCO<sub>2</sub>変化に応答し、枯死物の量や質 (例えば窒素含有量) が変化することで間接的に影響が及ぶ。また、土壌有機物の分解は、温度や水分条件に直接応答する。ここで生態系モデルの間で、温度や水分に対する応答感度が大きく異なっていることが指摘されており、それが大きな推定不確実性の原因となっている。今回の結果では、

標高の高いチベット高原などで特にモデル間のばらつきが大きいことが示されていた。東アジア地域では、土壌炭素は徐々に増加する結果となっているが、より高緯度のシベリアでは温度上昇が急速に進む結果、土壌有機物の分解が促進され、逆に炭素量の減少に繋がる場合もあった。このような炭素の放出は、大気CO<sub>2</sub>濃度の上昇を加速する方向に働くため、特に注視すべき結果と言える。

今回のシミュレーション結果では、気候予測・生態系モデル間でばらつきはあるものの、概ね生産力やバイオマスを増加させる方向で予測がなされていた。しかし、このようなモデル推定の結果の解釈には特に注意を払うべきである。地域スケールで生産力やバイオマスが増加することは、確かに生態系から人間社会に提供される公益的機能 (サービス) の向上を指す面もある。一方で、自然のリズムを乱す急速な変化は生態系のバランスを乱し、生物学的な多様性の低下や、別の変化に対する脆弱性をもたらす場合も考えられる。生態系に生じうるプラス・マイナスの影響を考慮に入れてモデル推定の結果を解釈すべきである。

ここでは主に私たちが住む東アジア地域の結果を紹介したが、生態系モデルを用いた影響評価は世界中で行われている。東南アジアや南米アマゾンなどの熱帯多雨林では、降水量の減少による干ばつの影響が深刻化する可能性がある。これは、人間活動による森林伐採、さらにそこで生じる火災の影響と相まって、予想以上に重大な影響となることが危惧されている。火災は、もともと落雷などが原因でも発生する自然現象であるが、温暖化に伴う乾燥によって大火災が起こりやすくなっていること、失火などの人間活動による出火が増えていること、そして居住範囲の拡大によって人家などが被災しやすくなっていることなどにより、火災への注目が高まっている。特に、2019～2020年にはアマゾン南部やオーストラリア、さらにシベリアなど北方で大規模な森林火災が発生している。火災は植生に被害を及ぼし、燃焼によりCO<sub>2</sub>やススなどを大気に放出するため、温暖化とも関係が深い現象である。熱帯林の多くは発展途上国に分布し、経済成長との兼ね合いによって、森林破壊や火災の防止による温暖化対策が先進国ほど積極的には行われにくいことも懸念材料である。一方、高緯度にある亜寒帯林は、人為的な

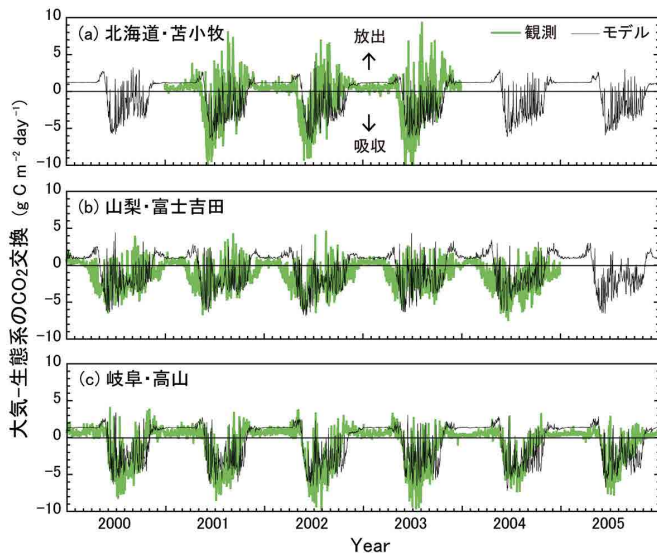


図-5 生態系のCO<sub>2</sub>交換に関するモデルと観測の比較<sup>2)</sup>

森林破壊には比較的曝されにくい、急速に進行する温度上昇の影響を被る可能性が高い。高緯度域は、冬季と夏季の季節変化が明瞭であり、現在の生物はその環境条件に適応している。しかし、温度上昇が進むと冬季が短く、かつ温度が下がりにくくなり、生物活動のリズム（フェノロジーと呼ばれる）が乱される恐れがある。実際に、植物の芽吹きや開花の時期は、長い観察記録を見ると徐々に早期化していることが示されている。もう一つの影響として、高緯度域を広く覆う永久凍土の融解がある。永久凍土は、年間を通じて零度未満にある土壌を指し、高緯度域の生態系分布や気候に強い影響を与えていると考えられる。そのため永久凍土の融解が起こると、高緯度域の水収支や生態系分布が一気に進行する可能性がある。このような、ある条件を境にして影響が急激に進み、しかも元に戻ることが困難な現象を「ティッピングエレメント」と呼び、温暖化研究の中でも注視すべき対象となっている。生態系モデルは、このように地域ごとに異なり、定期的にも変わっていく影響を評価する上で有効な手法として広く利用されている。

## 5. 生態系モデルの信頼性

現状把握や影響評価を行う場合、生態系モデルの予測には高い信頼性が求められる。生態系モデルの正しさを証明することは容易ではないが、基本的には様々な観測データと比較することで再現性の検証を行う。ここで取り上げた生態系のCO<sub>2</sub>交換を扱うモデルの場合、微気象学的手法によって測定されたCO<sub>2</sub>フラックスと比較を行う（図-5）。代表的な微

気象学的手法の一つが渦相関法と呼ばれるもので、森林など植生の中にタワーを建設し、植生キャノピーの上空で対象となるガスの濃度変動と風速を3次元的に測定することで、生態系と大気間のCO<sub>2</sub>交換速度を定量化するものである。現在では世界500地点以上、国内でも30地点以上にこのようなサイトが建設されている。そのデータは標準的なフォーマットでデータベース化されており、それをを用いることで世界各地の生態系において生態系モデルの推定結果と観測値を比較することが可能である。

人工衛星によるリモートセンシングは、地球観測データを取得する手法として不可欠であることはもちろん、広域スケールの生態系モデルにも重要な情報を提供している。2010年頃まで、人工衛星がもたらす生態系情報は、可視光や赤外域を見る光学的センサーで取得された反射スペクトルと、そこから得られる植生指標が主なものであった。それは光合成活性や植生の葉量と良い相関を示すため、生態系の変動を広い地域で把握する上で威力を発揮したが、それ以上の分析には限界があった。しかし、近年ではマイクロ波やレーザー光を用いることで植生のバイオマスや構造に関する情報が取得可能になり、また大気吸収スペクトルを詳細に測ることで大気中のCO<sub>2</sub>の分布も観測が可能になっている（世界初の温室効果ガス観測衛星は2009年に日本から打ち上げられた「いぶき」である）。そのデータを詳細に分析することで、地表におけるCO<sub>2</sub>交換の状況を把握することが可能となり、それは生態系モデルの検証にも貴重な情報源となっている。

## 6. おわりに

最後に、生態系モデル開発、温室効果ガス動態および温暖化関連研究を取り巻く国内外の状況について簡単に説明する（図-2も参照）。地球温暖化は、大気CO<sub>2</sub>濃度の上昇による温度上昇という気象学的な問いから始まり、現在ではCO<sub>2</sub>およびその他の温室効果ガスのグローバルな動態、そして温暖化対策に関する様々な社会経済的課題へと広がっている。その研究全容を総括的な報告書にまとめているのが「気候変動に関する政府間パネル（IPCC）」であり、科学的側面、影響と適応、対策に関する3分科会で全容をカバーしている。国際的な温暖化対策は「気候変動枠組み条約（UNFCCC）」の下で実施されており、特に2015年に締約国会議で採択されたパリ協定は、現在の温室効果ガス排出削減目標の基礎的な指針を与えている。このパリ協定では、将来の温度上昇を産業革命前と比べて2℃未満、できるだけ1.5℃未満に抑制する目標を掲げており、世界中の研究者がその実現のために研究を続けている。CO<sub>2</sub>などの温室効果ガス動態の現状を解明する、科学的活動も続けられている。代表的な活動がグローバルカーボンプロジェクト（GCP）であり、CO<sub>2</sub>については毎年、メタンなどその他の温室効果ガスについても2年に1回のペースで観測やモデル推定の結果をとりまとめた総括的レポートを出版している。本稿を通じて、筆者らのものを含め生態系モデル研究がどのようにこれらの活動に寄与し、温暖化防止をはじめとする環境問題の解決に貢献しようとしているかをご理解いただければ幸いである。

### 【参考文献】

- 1) Ito A, Nishina K, Noda HM (2016) Evaluation of global warming impacts on the carbon budget of terrestrial ecosystems in monsoon Asia: a multi-model analysis. *Ecological Research* 31: 459-474. DOI: 10.1007/s11284-016-1354-y
- 2) Ito A (2008) The regional carbon budget of East Asia simulated with a terrestrial ecosystem model and validated using AsiaFlux data. *Agricultural and Forest Meteorology* 148: 738-747.