

# 温暖化影響のいま —生態系と農林水産業への インパクト



[第3回]

## 陸域生態系炭素循環の モデリングと 長期的な気候変化予測

羽島 知洋 Tomohiro Hajima

海洋研究開発機構 地球環境変動領域  
気候変動リスク情報館生プログラム 特任研究員

清水 庸 Yo Shimizu

東京大学 大学院農学生命科学研究科 助教

大政 謙次 Kenji Omura

東京大学 大学院農学生命科学研究科 教授

### はじめに

これまで、化石燃料の燃焼や土地利用改変といった人間活動により、産業革命以前には考えられなかった量の二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)やその他の温室効果ガス(たとえばメタンや亜酸化窒素)が大気へと排出されてきた。そして、20世紀半ば以降に観測された世界平均気温の上昇のほとんどは、人為起源の温室効果ガスの増加によってもたらされた可能性がかなり高いことが、IPCC(気候変動に関する政府間パネル)の「第4次評価報告書」で報告されている。全球での気候変化(温暖化)は、今後、個々の生物だけでなく、生態系や農業に無視し得ない影響を与える可能性がある。また、生態系は、一方的に気候変化の影響を受けるだけではない。さまざまな過程を通じて気候システムに作用(フィードバック)する。気候変化が生態系に影響を与え、逆に、その変化が気候システムに作用する一連のプロセス、特に陸域生態系における炭素循環を介したプロセスが、さまざまな研究を通して明らかになりつつある。

ここではまず、陸域生態系がどのようにして気候システムに作用するのかを簡単にまとめる。次に、陸域生態系における炭素循環について説明したうえで、それらを理解するためにしばしば用いられる陸域生態系モデルについて紹

介する。最後に、陸域生態系の炭素循環が長期的な温暖化予測にどのように影響するのかについて説明する。

### 気候と陸域

地球の表面積はおよそ $510 \times 10^6$  km<sup>2</sup>であるが、そのうち陸地の占める面積は約29%である。陸地のうち約1割は氷床で覆われており、また砂れきや岩石から成る砂漠も陸地のおよそ約1割を占めている(ここでは衛星画像による土地被覆分類図から算出:図1上)。これらの地域にも固有の生態系が築かれているものの、気温が低かったり降水量がわずかであったりと、生物にとってきわめて厳しい環境にある。したがって、多くの生態系は残りの約8割弱の地域に広く分布している。温暖湿潤な赤道付近には熱帯雨林が成立し、その生産力も大きい(図1下)。極に近くなるほど植物の生産力は低くなり、植物の密度も疎なものとなる。

気象・気候が変化すると、陸域の生態系はさまざまな影響を受ける。たとえば、例年に比べて春先の気温が高ければ、雪解けが早まり、葉が芽吹くタイミングも変わる。また、より長い時間スケール、たとえば数万年以上の時間ス



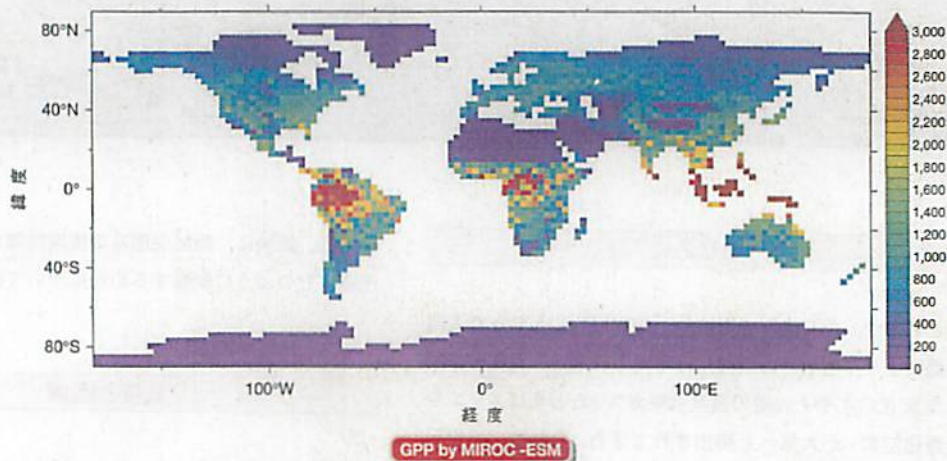
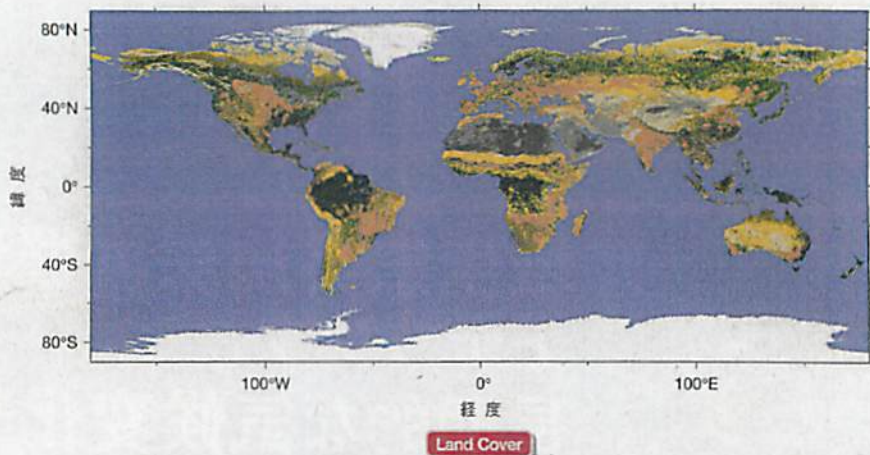


図1 衛星画像から得られる土地被覆分類図 (GLCNMO: 国土地理院・千葉大学・協働機関) (上) と地球システムモデルによって計算された総一次生産力 [ $\text{gC m}^{-2} \text{ year}^{-1}$ ] (下)

図上: ここでは常緑樹林 (深緑色), 落葉樹林・混交林 (緑色), 低木・灌木 (黄土色), 草本 (黄色), 疎な植生 (淡黄色), 農耕地等 (肌色), 砂漠 (灰色), 青 (水面), その他 (黒) に再分類している

図下: この地球システムモデルでは, 人間の土地利用変化は外部からの強制力として与えられるが, 生態系における炭素循環や植生の分布などはモデル内で数値的に計算が行われている

ケールで, 地球の地軸や軌道が周期的に変化したりすることにより気候が変化し, これにより全球の植生分布もまた大きく変化してきたと考えられている。このように, 気象・気候が変化すると, それにともない陸地の地表面の状態や生態系も変化するのであるが, 必ずしも気候が一方向的に陸の状態を決定するわけではない。逆に, 地表面の状態や生態系の構造・構成が変化することにより, 気候や気象にも影響が及ぶ。このような作用は, しばしば「フィードバック (feedback)」と呼ばれる。そもそも陸地は, 地球の表面上

に不均一に分布しており, これが気候パターンの分布形成に大きな違いを与えている。たとえば, 大気上端から地球表面を眺めた際, 海面と陸地では太陽光の反射率 (アルベド) が大きく異なる。陸域と海ではこの反射率や比熱が異なるうえに, 陸と海は地球表面上に非一様に分布しているために, 地球表面のエネルギーの収支にも空間的不均一が生じるのである。また, 同じ陸域であったとしても, 雪や氷で覆われている地域は太陽からの光を反射しやすく, 植物が繁茂している地域は, 光を吸収しやすい。このよう

に、陸域は気候から一方的な影響を受けるのではなく、地表面の状態や生態系の違いを通して気候へと作用しているのである。

### 陸域生態系から気候システムへのフィードバック

陸域生態系から気候システム（大気）に作用する過程は大きく分けて2つある。一つは「生物物理過程」と呼ばれ、生態系におけるエネルギーや水の流れに関連した過程である。たとえば、上述したように、陸域が受け取る太陽からのエネルギーは地表の反射率によって変化するが、この吸収されたエネルギーは潜熱や顕熱、長波放射などに使われる。このようなエネルギーの使われ方は、地表面の状態や植物の繁茂の度合い、気温や湿度といった大気環境や土壌の状態によって異なる。たとえば、太陽からの光のエネルギーを地表が吸収する場合、その地域が熱帯雨林で覆われていれば、吸収されたエネルギーの多くは潜熱によって消費される。一方、仮に同じ太陽エネルギーを吸収したとしても、その地域が砂漠であった場合、蒸発散はほとんどおこらず、エネルギーの多くは顕熱に使われるであろう。こ

のように生態系が異なれば、そこにおける水・エネルギーの流れも違った様相を示し、その結果、気候システムにも影響を与えることになる。

陸域生態系から気候システムへと作用するもう一つの過程は「生物地球化学過程」と呼ばれる。これは生態系における物質（炭素や窒素、リンや硫黄など）の流れによって形作られるプロセスであり、このようなプロセスを介して気候システムへとフィードバックが生じるのである。たとえば、植物は大気中の二酸化炭素を用いて光合成を行い、有機物を作り出して自身の生命活動に用いるが、他の生物もまたこの有機物を利用して生命活動を行っている。炭素の流れに注目してみると（図2）、植物の光合成により大気から陸域に炭素が固定され、バイオマスや土壌の有機物として蓄積される。これら有機物は植物・動物の呼吸によって再び二酸化炭素として大気へと失われる。このような生物地球化学過程、特に炭素循環についての詳細と、炭素循環を通してどのように気候システムへとフィードバックするのかについて、次に説明する。

### 陸域生態系の炭素循環とそのフィードバック

陸域生態系における炭素は、主に土壌有機物中と植物バイオマス中に存在している。大気中に二酸化炭素として存在している炭素量はおよそ800 Pg（Pは“ペタ”と読み、10の15乗を表す）であるが、植物バイオマス中には約600 Pg、土壌有機物中には約1,500 Pg存在すると見積もられている<sup>注1)</sup>。このような陸域生態系に蓄えられている炭素は、植物の光合成によって大気から固定される。光合成により固定される単位時間当たりの炭素量を「総一次生産力」と呼ぶが、世界の総一次生産力はおおよそ毎年120 Pgであると見積もられている。光合成によって大気から獲得した炭素は光合成産物として蓄えられるが、大雑把にみて総一次生産力の約半分が呼吸により消費され、二酸化炭素として大気へと失われる。つまり、毎年約60 Pgの炭素が大気から陸域生態系へと正味で運び込まれる（これを「純一次生産力」と呼ぶ）ことになるが、毎年ほぼこれに相当する量の炭素が、

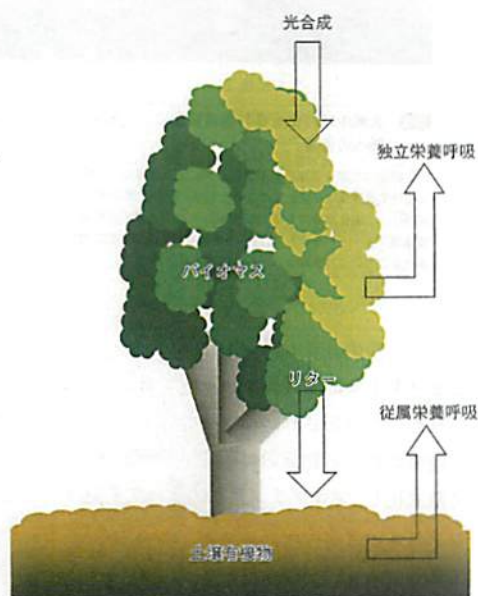


図2 陸域生態系における炭素循環の概略図

注1) ただし土壌有機物に含まれる炭素量は深さ約1 mまでの見積もりであり、対象とする土壌の深さによっては、3,000 Pgもの炭素が土壌中に存在するとも言われている。



落葉や枯死、脱落物として土壤に運び込まれる。これら枯死物は、土壤動物や土壤微生物により変質・分解され、土壤有機物を形作る。土壤有機物も長い時間を経て土壤微生物等の分解を受けることにより、最終的に二酸化炭素（場合によってはメタン）として大気へと放出される。陸域生態系ではこのような炭素循環が形成されている。

地球環境に大きな変化がみられない場合、陸域生態系の炭素循環は大きく乱されず、ほぼ定常的な状態にあると考えられる。つまり、そのような状態では、光合成により陸域生態系に固定される炭素量と、生態系全体の呼吸速度がほぼ釣り合っている（総光合成速度＝生態系呼吸速度）と見なせる。しかし、産業革命以降、人間は化石燃料を使用することにより積算でおよそ300 Pgもの炭素を大気へと排出し、同時に森林の伐採・燃焼等により、およそ150 Pgの炭素が陸域生態系から大気へと放出されてきた。大気中の二酸化炭素の増加は、気候だけでなく陸域の炭素循環にも影響を与える。まず、二酸化炭素は光合成を行うための“材料”であるため、大気中の二酸化炭素濃度が上昇すると光合成速度が増加し、それによりバイオマスが増加することが期待される（二酸化炭素の「施肥効果」と呼ばれる）。これにより、バイオマスや土壤への炭素蓄積が進む可能性があるのだが、このようなプロセスは「CO<sub>2</sub>-炭素循環フィードバック」と呼ばれる（図3青矢印）。

次に、二酸化炭素は温室効果をもつため、大気中の二酸化炭素濃度が上がると気候変化（温暖化）が生じ、これにより炭素循環に変化がもたらされる。たとえば、気温が上昇すると土壤の微生物の活動が盛んになり、貯留されている土壤炭素が減少するといった変化である。また、気温や降水量の変化といった環境変化にともなうストレスにより、植物の成長が阻害されたり死亡率が高まったりするといったこともありうる。このような過程は「気候-炭素循環フィードバック」と呼ばれる（図3赤矢印）。これら生態系の変化は、大気と陸域生態系間の正味の炭素収支を変化させ、さらには大気中の二酸化炭素濃度を変えることにより、気候システムへとフィードバックするのである。

### 陸域生態系の炭素循環モデル

陸域生態系における炭素循環過程の解明や生態系機能の評価、環境の変化に対する応答などを調べるため、コン

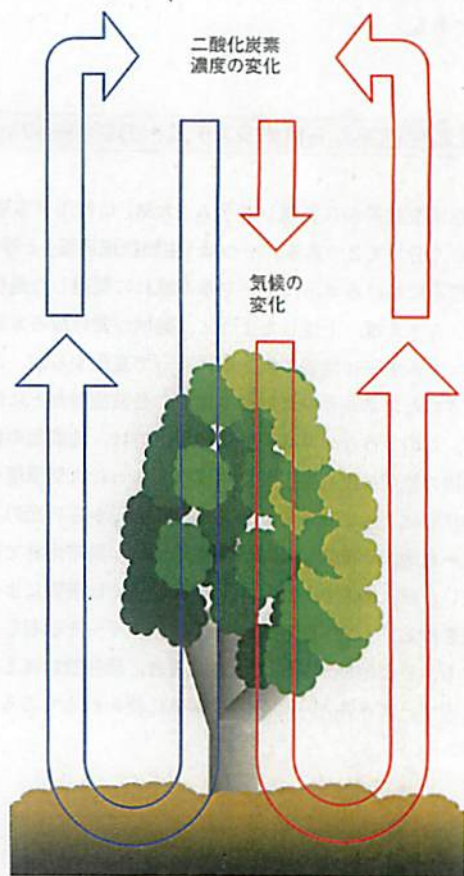


図3 大気中二酸化炭素の濃度変動による陸域生態系の炭素循環への影響

赤矢印は、二酸化炭素のもつ温室効果により温暖化・気候変化が生じ、それを受けて炭素循環が変化するという過程（気候-炭素循環フィードバック）。青矢印は、二酸化炭素のもつ「施肥効果」により生じる炭素循環の変化（CO<sub>2</sub>-炭素循環フィードバック）。どちらも最終的に、大気中の二酸化炭素濃度を変化させることにより気候システムへ作用する

コンピュータ上で数値計算が可能なシミュレーションモデルというものが開発され、用いられてきた。これは炭素といった陸域における物質の循環を、物理法則や経験式に基づいて数式化し、プログラム言語によって記述することにより、コンピュータ上でのシミュレーションを可能にさせたものである。ここでは簡単に、その概要を説明する。まず、陸域生態系における炭素収支は以下のように表される。

$$(\text{総炭素量の時間変化}) = (\text{総一次生産力}) - (\text{生態系呼吸速度}) \quad (1)$$



これを数式化(微分方程式化)すると以下ようになる。

$$\frac{dC_L}{dt} = GPP - ER \quad (2)$$

式(1)の左辺は、陸域生態系全体に存在する炭素量 $C_L$ の時間変化であり、GPPは総一次生産力、ERは生態系の呼吸速度である。なお、左辺と右辺の単位はともに、単位時間・単位面積当たりの炭素の質量で表される。これをさらに離散化する(数列における漸化式のようなものと捉えてもらえば良い)と

$$C_L(n+1) - C_L(n) = GPP - ER$$

となり

$$C_L(n+1) = C_L(n) + GPP - ER \quad (3)$$

と表される。式(3)が意味するところは、「ある時間 $n$ における生態系の総炭素量が $C_L(n)$ であったとき、総一次生産力GPPと生態系呼吸速度ERがわかれば次の時間 $n+1$ のときの総炭素量 $C_L(n+1)$ が求まる」ということである。仮にGPPとERが等しいと、GPP-ERはゼロであるため炭素量は変化しない。またGPPがERよりも大きくなる(小さくなる)と、陸に蓄積される炭素量が増える(減る)ことになる。ただしこのGPPやERは常に一定のものではなく、たとえばGPPであれば気温や日射量、大気 $CO_2$ 濃度、土壤水分量といった環境の変化や、植物種および植物の成長状態などによってさまざまに変化する。これを次々とコンピュータで計算してゆくことにより、陸域生態系の炭素の動態をシミュレートするのである。実際のシミュレーションでは、日々の気象条件や大気 $CO_2$ 濃度をシミュレーションモデルに与えることにより、日々の生産量や呼吸速度を計算し、植生や土壤に蓄積された炭素量を求めていく。このような原理を利用し、高度化したシミュレーションモデルがこれまで開発され(たとえば日本では伊藤&及川によるSim-CYCLE/VISITなど)、さまざまな研究に用いられている。

### 気候-炭素循環モデル

上述の炭素循環モデルは、単独で用いられるだけではなく、気候モデル(「大気-海洋結合大循環モデル」とも呼ばれる:連載第1回・第2回を参照)と連携することにより、長期的な気候変化の予測にも用いられている。陸域の炭素循環モデルを気候モデルと結合することにより、日々の気候の状態に応じ

て陸域の生態系が変化し、その生態系の変化がさらに気候システムへとフィードバックするという一連の流れを、気候の予測に反映させることができるのである。たとえば上にも述べたように、大気中の二酸化炭素が増加し温暖化すると、生態系の呼吸速度が上昇し、二酸化炭素濃度の増加に拍車がかかることが予想される。このような研究は、イギリスの研究者P. Coxらによって初めて行われた。Coxらの研究ではまず、気候モデルに陸域生態系や海洋における炭素循環モデルを組み込み、「気候-炭素循環モデル」(「地球システムモデル」とも呼ばれる)を作り上げた。そして、気候と生態系の相互作用を考慮したシミュレーション実験を実施したところ、当初見積もられていたよりも高い $CO_2$ 濃度と、高い気温上昇が見込まれることがわかった。この原因に関しては、2つの理由が考察されており、一つは全球の平均気温が上昇し南米の植生が一部失われ、この植生の衰退により全球の炭素吸収量が低下する、というものである。もう一つは、気温の上昇にともない、高緯度に存在する土壤炭素の有機物の分解が盛んになり、陸域の炭素放出量が増大した、という理由である。気候の変化を受けて陸域生態系の炭素循環が変化し、さらにその炭素循環の変化が気候システムへと作用するという一連のプロセスが、将来の気候変動予測をするうえで重要であるということを彼らは示したのである。

### 気候-炭素循環モデルを用いた予測実験の動向

Coxらの研究に端を発し、現在ではさまざまな気候-炭素循環モデルが世界で開発され、気候変化の予測や地球環境変動に関するさまざまな研究に用いられている。たとえば、日本では、海洋研究開発機構・東京大学大気海洋研究所・国立環境研究所の協力の下、独自の地球システムモデル(MIROC-ESM:渡辺らによる、図4を参照)が開発され、温暖化予測や地球環境変動の解明、古気候環境の研究等に用いられている。IPCCではまさに現在、次の報告書となる「第5次評価報告書」に向けて世界の専門家が執筆を行っているが、このような地球システムモデルによる予測結果も重要な結果の一つとして取り扱われるはずである。

気候変化の予測、特に長期的な予測では、その結果に不確実性が含まれるため、さまざまな地球システムモデルの予測結果を相互に比較しながら、気候や炭素循環の再現性、

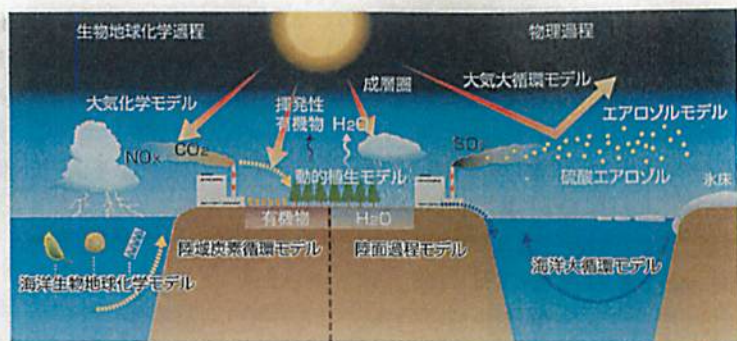
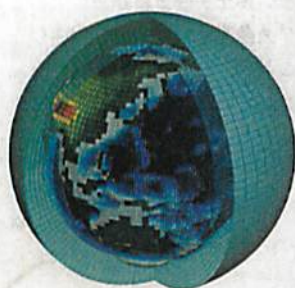


図4 地球システムモデルの概念図

全球の大気、海洋、陸面を3次元格子状に区切り(図左)、各格子内における物理過程に加えて大気化学/エアロゾル過程、海洋生態系や陸域生態系における物質循環のプロセス(図右)が数値的に計算される

(提供: 海洋研究開発機構)

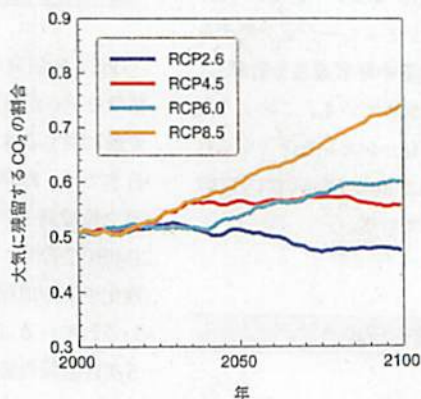
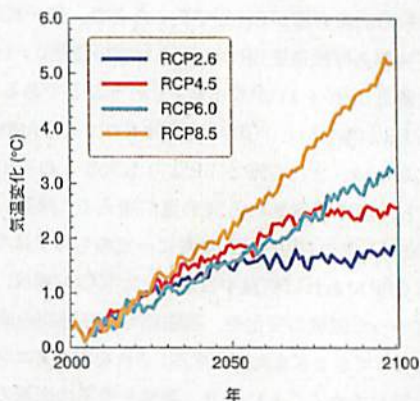
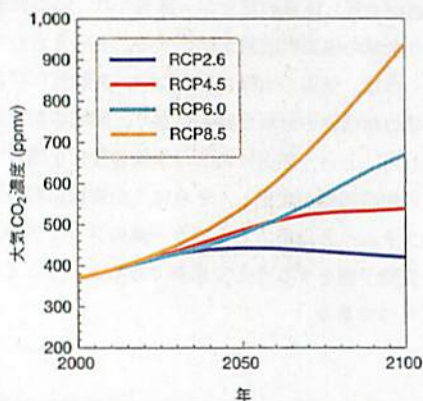


図5 図左上: モデル間相互比較プロジェクトCMIP5で用いられる大気CO<sub>2</sub>濃度シナリオ (Representative Concentration Pathways, RCP)

図右上: RCPシナリオを用いたときに地球システムモデルMIROC-ESMで予測される全球平均地上気温の変化(1990年代の平均を基準)

図下: 同実験で計算された、人為的に排出されたCO<sub>2</sub>がどの程度大気に残留するの割合を示したもの。陸域生態系および海洋によるCO<sub>2</sub>の吸収効率と関係する(積算排出量に対する割合として計算)





予測結果の妥当性がチェックされている。たとえば、近年実施されている相互比較プロジェクト CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5) では、取り決められた統一的な実験プロトコルに従いながら、世界の気候モデルや地球システムモデルの実験が行われ、それらの結果の比較が行われている。たとえば過去再現実験では、人為活動による毎年の温室効果ガスやエアロゾルの排出量、土地利用の変化や火山噴火イベント、太陽放射の周期的変化といったモデルを駆動させるための共通の外部強制力を用意し、それを使用してシミュレーションが実施される。

気候変化の予測では、「Representative Concentration Pathway; 代表的濃度経路」(図5左上)と呼ばれる新たな温室効果ガス排出シナリオ(4種)を用いて予測が行われている。MIROC-ESMを用いた予測実験では、2100年の気温は20世紀末に比べ、最大で約5.2°C上昇するとの結果が得られている(図5右上)<sup>注2)</sup>。また高緯度地域ほど温暖化が激しく、そのためにこれらの地域に蓄えられた大量の土壌有機物が分解されて二酸化炭素を放出するという、Coxらの研究と同様の結果も得られている。このような「気候の変化 → 炭素循環の変化 → 気候の変化……」という一連の流れを表す気候-炭素循環フィードバック(図3赤矢印)も重要であるが、それに加えCO<sub>2</sub>-炭素循環フィードバック(図3青矢印)もまた重要であることがわかってきた。CO<sub>2</sub>-炭素循環フィードバックは、大気CO<sub>2</sub>濃度が上昇するとその施肥効果により、陸域を正味の炭素吸収源にさせるプロセスである。そのため、このフィードバックは「大気中の二酸化炭素を増加させにくい」ように作用するが、このフィードバックがもつ気候への影響力はかなり大きく、また、その見積もりがさまざまな地球システムモデルの間で大きく異なっていることが、モデル間比較で明らかになっている。図5下は、二酸化炭素が人為的に排出された際、陸の生態系や海洋に吸収されずに大気に残留する二酸化炭素の割合(累積値で計算)を示しているが、これを見ると4つのシ

ナリオでその残留割合が大きく異なることがわかる。筆者の研究によると、これもまたCO<sub>2</sub>-炭素循環フィードバックと深く関係しているようであり、気候変化の予測精度を向上させるためには、このメカニズムを解明し、地球システムモデル内で適切に再現することが、今後重要であると考えられる。

## おわりに

本稿では、陸域生態系の炭素循環がもつ気候へのフィードバックに焦点を当てながら、長期的な気候変化の予測がどのように行われているのかを簡単に紹介した。気候変化の予測にはシミュレーションという手法が用いられているが、生態系内の諸過程には本質的に生命活動が関わっているため、それをシミュレーションに反映させる際には依然として困難も多い。しかしながら、遺伝子レベルのミクロなスケールでの研究や、生態調査および屋外での実験、CO<sub>2</sub>フラックス観測や人工衛星からの地球観測研究など、さまざまな研究領域と協業しながら、シミュレーションモデルも高度化を続けており、今後もその発展に期待していきたい。

## 【文 献】

- 1) Arora, V. K., Boer, G. J., Friedlingstein, P., Eby, M., Jones, C. *et al. J. Clim.*, doi: <http://dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00494.1> (2013).
- 2) Cox, P. M., Betts, R. A., Jones, C. D., Spall, S. A. & Totterdell, I. J. *Nature*, **408**, 184-187 (2000).
- 3) IPCC. In: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Marquis, M., Averyt, K. *et al.*, editors: *Climate change 2007: The physical scientific basis (AR4)*, Cambridge University Press, 2007.
- 4) Hajima, T., Ise, T., Tachiiri, K., Kato, E., Watanabe, S. & Kawamiya, M. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, **90**, 417-433 (2012).
- 5) Ito, A. & Oikawa, T. *Ecol. Model.*, **151**, 143-176 (2002).
- 6) Watanabe, S., Hajima, T., Sudo, K., Nagashima, T., Takemura, T. *et al. Geosci. Model Dev.*, **4**, 845-872 (2011).
- 7) 伊藤昭彦. 日本生態学会誌, **52** (2), 189-227 (2002).
- 8) 気象庁. IPCC 第4次評価報告書第1作業部会報告書 政策決定者向け要約, 2007. <http://www.data.kishou.go.jp/climate/cpdinfo/ipcc/ar4/index.html>

注2) モデル比較を通じ、このモデルの予測結果は他のモデルに比べてやや“悲観的”なものであると筆者は判断している。