

# 陸域生態系と 気候変化

国立研究開発法人 海洋研究開発機構 羽島 知洋  
 東京大学大学院農学生命科学研究科 清水 庸、大政 謙次

## 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、これら人間による影響が、20世紀半ば以降に観測された温暖化の支配的な原因であった可能性がきわめて高いとIPCC（気候変動に関する政府間パネル）の第5次報告書で報告されている<sup>1,2)</sup>。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、とく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上で、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、長期的な気候変化において陸域生態系の炭素循環がどのような役割を果たしているのかについて、気候-炭素循環モデルを用いた研究事例を取り上げて紹介する。

## 気候と陸域

地球の表面積はおよそ $510 \times 10^6 \text{ km}^2$ 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また陸地のおよそ約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）。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。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、それに伴い陸域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」とよばれる。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。さらに、陸域と海ではこの反射率や比熱が異なるために、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。1つは生物物理過程とよばれ、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中の水分の状態などによって異なる。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、蒸発散はほとんど起こらず、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1つの過程は生物地球化学過程とよばれる。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の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CO<sub>2</sub>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1)、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CO<sub>2</sub>として大気へと失われる。このような生物地球化学過程、とくに炭

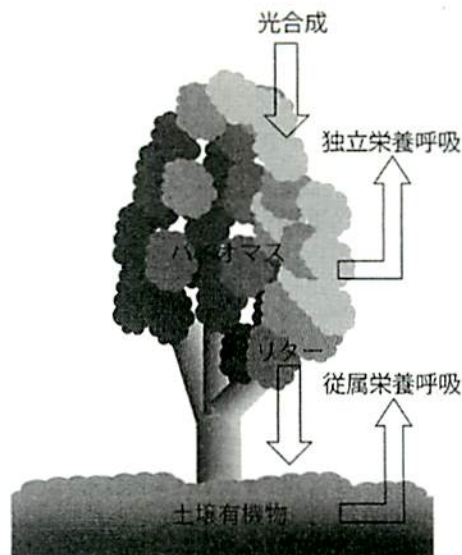


図1 陸域生態系における炭素循環の概略図

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、以下に説明する。

## 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、おもに土壌有機物中と植物バイオマス中に存在している。IPCCの第5次報告書によると、大気中にCO<sub>2</sub>として存在している炭素量はおよそ840Pg(Pは10の15乗を意味する、ペタ)であるが、植物バイオマス中には約450～650Pg、土壌有機物中には約1,500～2,400Pg存在すると見積もられている(ただし対象とする土壌の対象深さによっては、最大で約3,000Pgとの推定結果もある<sup>3)</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よぶが、世界の総一次生産力はおよそ毎年120Pg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、大雑把に見て総一次生産力の約半分が呼吸により消費され、CO<sub>2</sub>として大気へと失われる。つまり、毎年約60Pg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よぶ)ことになるが、毎年ほぼこれに相当する量の炭素が、落葉や枯死、脱落物として土壌に運び込まれる。これ

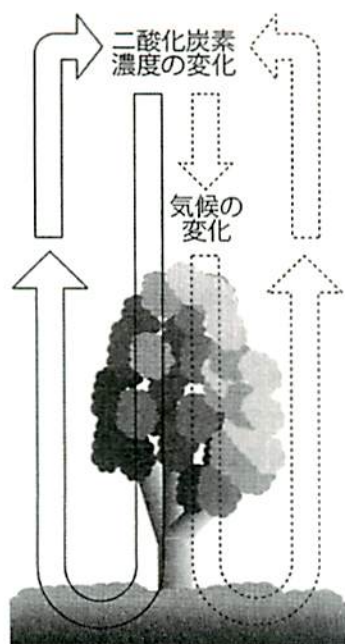


図2 大気中二酸化炭素の濃度変動による陸域生態系の炭素循環への影響

実線矢印は、二酸化炭素の持つ「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)。点線矢印は、二酸化炭素の持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)。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。

枯死物は、土壌生物/微生物により変質・分解され、土壌有機物を形作る。土壌有機物も長い時間を経て土壌微生物等の分解を受けることにより、最終的にCO<sub>2</sub>(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見られない場合、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)。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およそ380Pg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、おおよそ180Pgの炭素が陸域生態系から大気へと放出されてきた(ただし、これらの見積もりは不確実性を伴っている)。大気中のCO<sub>2</sub>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、CO<sub>2</sub>は光合成を行うための「材料」であるため、大気中のCO<sub>2</sub>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の増加が期待される。これはCO<sub>2</sub>の「施肥効果」とよばれ、これによりバイオマスや土壌への炭素蓄積が進む可能性がある。これら一連のプロセスをCO<sub>2</sub>-炭素循環フィードバックとよぶ(図2実線矢印)。次に、CO<sub>2</sub>は温室効果を持つため、大気中のCO<sub>2</sub>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壌の微生物の活動が盛んになり、貯留されている土壌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伴うストレスにより、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得る。このような過程は気候-炭素循環フィードバックとよばれる(図2点線矢印)。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CO<sub>2</sub>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、陸域生態系のシミュレーションモデルが開発され、用いられている。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、コンピューター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。

(総炭素量の時間変化)

$$= (\text{総一次生産力}) - (\text{生態系呼吸速度}) \quad (1)$$

これを数式で表現すると以下のようになる。

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

(2)式の左辺は、陸域生態系全体に存在する炭素量C<sub>L</sub>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。式(2)が意味するところは、「ある時間tにおける生態系の総炭素量がC<sub>L</sub>であったとき、総一次生産力GPP

と生態系呼吸速度ERがわかれば総炭素量の時間変化が求まる」ということである。仮にGPPとERが等しいと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<sub>2</sub>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ーで計算していくことにより、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<sub>2</sub>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Sim-CYCLE/VISIT<sup>4)</sup>など)、さまざまな研究に用いられている。

### 気候—炭素循環モデルを用いた予測実験

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よばれる)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。このような予測モデルは気候—炭素循環モデル、

もしくは地球システムモデルなどによれば、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<sup>5)</sup>、図3)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の第5次報告書においても、このような地球システムモデルによる予測結果は重要な結果の1つとして取り扱われている。

気候変化の予測、とく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、予測結果の妥当性がチェックされている。たとえば、近年実施されたモデル間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た。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た。気候変化の予測では、Representative Concentration Pathway(代表的濃度経路、図4左上)とよ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た。MIROC-ESMを用いた予測実験<sup>6)</sup>では、2100年の気温は20世紀末に比べ最大で約

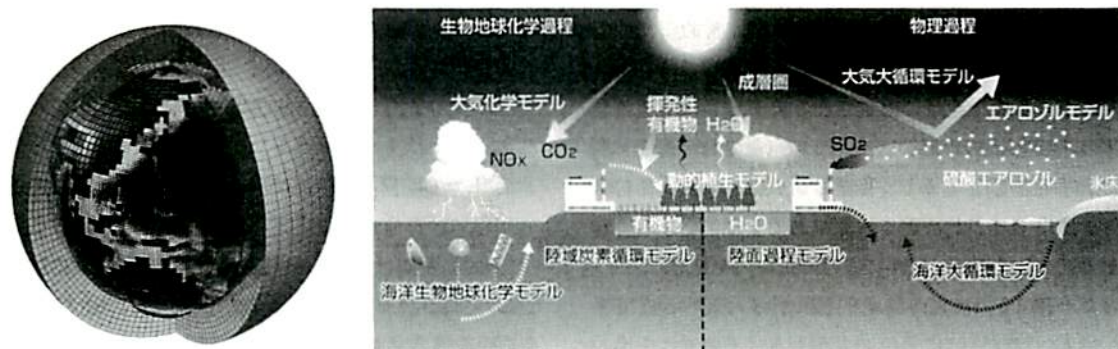


図3 地球システムモデルの概念図(提供:海洋研究開発機構)

全球の大気、海洋、陸面を3次元格子状に区切り(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(右)が数値的に計算される。

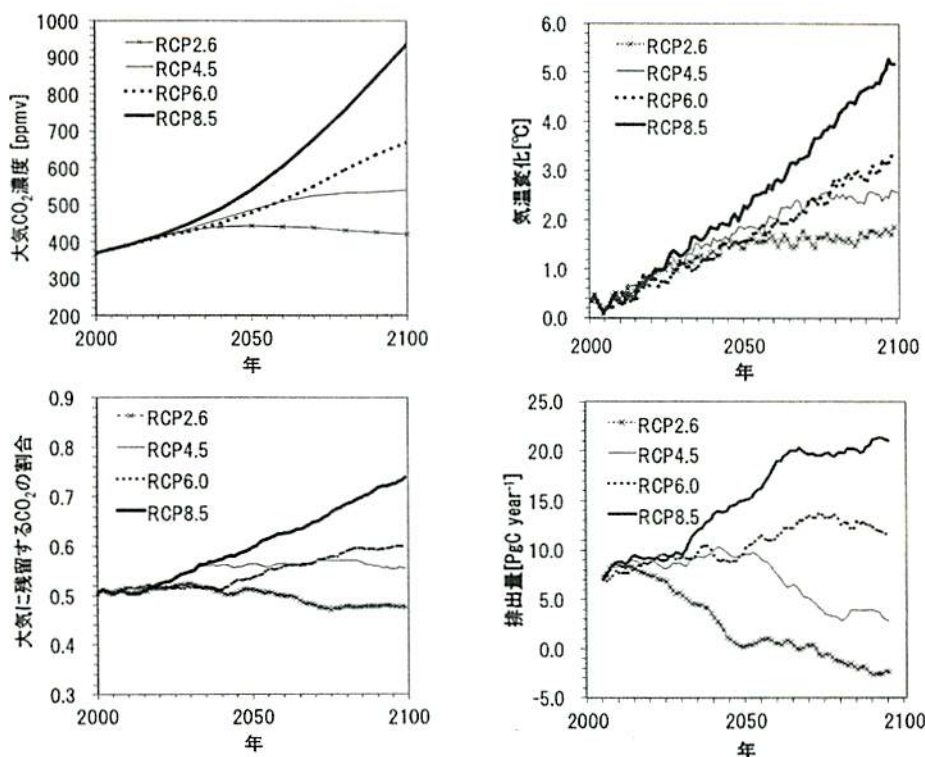


図4 地球システムモデルを用いたシミュレーション結果

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: 左上)。右上は、RCPシナリオを用いた時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)。左下は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かを割合で示したものであり、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)。右下は、RCP濃度シナリオを達成するために許容されるCO<sub>2</sub>排出量(化石燃料由来)。

5.2℃上昇するとの結果が得られている(図4右上、モデル比較<sup>7)</sup>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”なものであることがわかっている)。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CO<sub>2</sub>を放出するという、既存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2点線矢印)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2実線矢印)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CO<sub>2</sub>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持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

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<sup>7,8)</sup>。図4左下は、CO<sub>2</sub>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CO<sub>2</sub>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。地球システムモデルを用いた数値計算による研究例<sup>6)</sup>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ことが示されており、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。

前述の通り地球システムモデルでは、人為CO<sub>2</sub>排出量を与えることにより、海陸によって吸収される正味のCO<sub>2</sub>吸収速度とそれによって決まる大気CO<sub>2</sub>濃度を逐一計算し、その濃度に基づいて気候変化を予測することが可能である。これは現実の世界で生じている現

象の通りに順を追って計算しているのであるが、近年、異なる方法を用いた予測も行われている。その方法は、人為CO<sub>2</sub>“排出量”の代わりに大気CO<sub>2</sub>“濃度”を与え、このCO<sub>2</sub>濃度を達成するために許容されるCO<sub>2</sub>排出量を逆算する、というものである<sup>9)</sup>。この方法によって得られたMIROC-ESMによる許容CO<sub>2</sub>排出量が図4の右下である。大気CO<sub>2</sub>濃度が最も高く想定されているRCP8.5シナリオでは、温暖化の度合いは大きいものの、より大きなCO<sub>2</sub>排出が許容される。一方、21世紀中の大気CO<sub>2</sub>濃度低下が想定されているRCP2.6シナリオでは、温暖化の度合いは当然のことながら小さいことが期待されるものの、人間のCO<sub>2</sub>排出には厳しい制約が加わってしまう。このように、許容CO<sub>2</sub>排出量は政策決定に示唆を与え得る量であり、有用な情報を有している一方で、地球システムモデルによる予測の結果には多くの不確実性が含まれており、モデルで取り扱うプロセスの詳細化や観測研究との融合などにより、予測精度の向上が現在もなお続けられている。

## おわりに

本稿では、陸域生態系の炭素循環が持つ気候へのフィードバックに焦点を当てながら、長期的な気候変化において、陸域生態系がどのような役割を果たし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かかわっているため、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予測精度の向上や新たなモデル利用可能性を探求し、より有用な情報を社会へと提供していきたい。

## 【参考文献】

- 1) IPCC : Climate change 2013: The physical scientific basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In Stocker T F, et al., eds., Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, 2013.
- 2) 気象庁 : IPCC第5次評価報告書第1作業部会報告書政策決定者向け要約 (<http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ipcc/ar5/>), 2014.
- 3) 伊藤昭彦 : 日本生態学会誌, 52: 189-227, 2002.
- 4) Ito A and Oikawa T : Ecol. Model., 151: 143-176, doi:10.1016/s0304-3800(01)00473-2, 2002.
- 5) Watanabe S, et al. : Geosci. Model Dev., 4: 845-872, doi:10.5194/gmd-4-845-2011, 2011.
- 6) Hajima T, et al. : J. Meteorol. Soc. Jpn., 90: 417-433, doi:10.2151/jmsj.2012-305, 2012.
- 7) Arora V, et al. : J. Climate, 26: 5289-5314, doi: 10.1175/JCLI-D-12-00494.1, 2013.
- 8) Hajima T, et al. : J. Climate, 27: 3425-3445, doi: 10.1175/JCLI-D-13-00177.1, 2014.
- 9) Jones C, et al. : J. Climate, 26: 4398-4413, doi: 10.1175/JCLI-D-12-00554.1, 2013.