

306 : 411 (陸域の炭素循環)

## 5. 陸域生物圏の CO<sub>2</sub>収支

伊藤 昭彦\*

### 1. 地球システムの中の陸域生物圏

グローバルな CO<sub>2</sub>循環の中で、陸域生物圏は最も大きな不確定性を持つコンポーネントの1つと考えられる。それは、Global Carbon Projectが行っている炭素収支解析の中でも、陸域の正味収支は「その他の

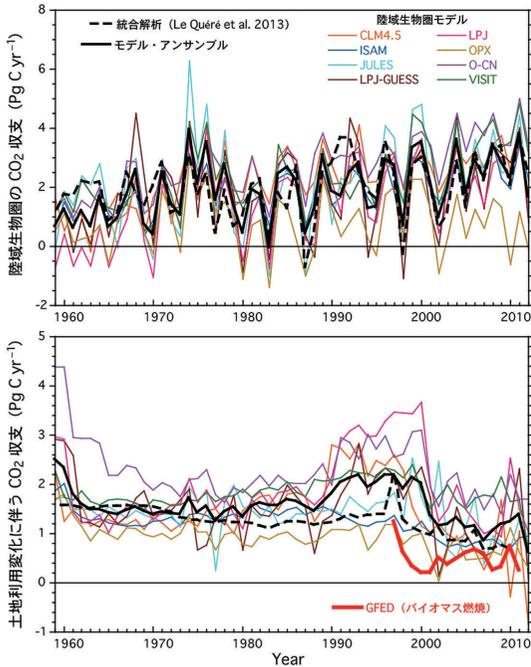
シンク (residual sink)」として、人為放出と大気への残存および海洋への吸収との差分から求められてきたことから窺える (Le Quéré *et al.* 2013 : 第1図)。1980年代までは、熱帯を中心に森林破壊が進み、そこからの大量放出により陸域は CO<sub>2</sub>のソースと考えられてきた (例えば Woodwell *et al.* 1983)。現在でも発展途上国において森林破壊は進行しており、化石燃料と並んで主要な人為放出源となっていることに変わりはない。しかし、森林資源の枯渇や保

---

\* 独立行政法人国立環境研究所。

itoh@nies.go.jp

© 2014 日本気象学会



第1図 陸域生物圏の炭素収支における年々変動。(上)生物圏活動によるCO<sub>2</sub>収支。(下)森林破壊など土地利用変化に伴うCO<sub>2</sub>収支。統合解析はGlobal Carbon Projectによる(Le Quéré *et al.* 2013)。そこで用いられた複数の陸域生物圏モデルによる推定結果、および衛星観測に基づくバイオマス燃焼放出の推定データ(GFED: van der Werf *et al.* 2010)も示した。

護活動により、近年の森林破壊によるCO<sub>2</sub>放出量は1950年代をピークとして漸減していると考えられる(また、以前の放出量見積もりが過大評価であった可能性も指摘されている)。多数の研究をまとめたIPCCの第5次報告書(IPCC 2013)によれば、近年の陸域生物圏では、森林破壊による $1.1 \pm 0.8 \text{ Pg C yr}^{-1}$ (= $\text{Gt C yr}^{-1}$ )の放出と、それ以外の生態系への $2.6 \pm 1.2 \text{ Pg C yr}^{-1}$ の吸収が生じている。ただし、河川を通じた陸域から水域への炭素移動と、それに相当する大気CO<sub>2</sub>の固定(それぞれ $1.7 \text{ Pg C yr}^{-1}$ で均衡)が別途生じている。このような全体像は得られているものの、推定間のばらつきの大きさに見られるように不確実性は大きく、地理的な分布も明確にはなっていない。

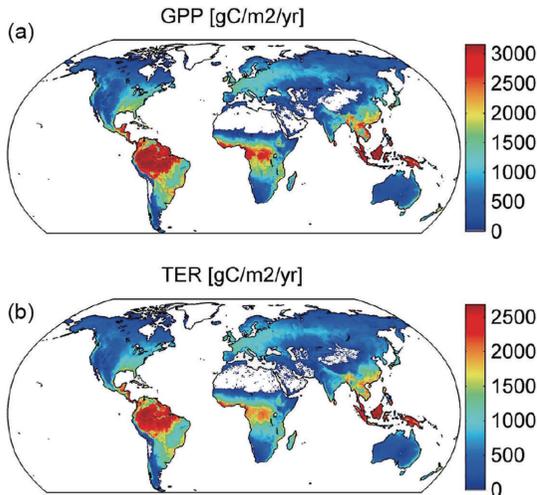
陸域生物圏におけるCO<sub>2</sub>収支の定量化が難しい理由はいくつかある。第1に、大気-陸域間のCO<sub>2</sub>交

換フラックスは非常に時間的・空間的な不均質性が大きく、地域スケールで直接観測を行うことが困難である。第2に、陸域生物圏が大気CO<sub>2</sub>の正味シンクとなる生物地球化学的なメカニズムが未確定であり、外挿が難しい。候補としては、①大気CO<sub>2</sub>濃度上昇による施肥効果、②気温上昇による植生の生育期間の延長、③過去にダメージを受けた植生の回復、④人為起源窒素酸化物の沈着に伴う施肥効果、などが挙げられているがいずれも確証は無い。第3に、上記2つとも関連するが、観測やメカニズム理解の不足により、陸域炭素循環をシミュレートするモデルの不確実性が大きいことが挙げられる。それでも研究の蓄積により陸域生物圏のCO<sub>2</sub>収支に関する理解は進みつつあり、本稿では、その現状を概観することにする。

## 2. 陸域におけるCO<sub>2</sub>収支観測

近年の大きな動向の1つとして、渦相関法に代表される微気象学的手法が開発され、サイトスケール(～数km<sup>2</sup>)では大気-陸域間のCO<sub>2</sub>フラックスが高い精度と時間分解能で連続観測することが可能になった(Baldocchi *et al.* 2001; 三枝 2010など)。それはFLUXNETと呼ばれる国際観測ネットワークを形成しており、その登録サイト数は683地点(2014年4月時点)となっている。最初の観測が米国ハーバード試験林で開始されて以来、最長で20年程度の連続観測データを提供しており、陸域CO<sub>2</sub>収支を決定する短期的応答だけでなく長期的な生態要因を含めた解析も行われつつある。例えば2003年に欧州を襲った熱波のような極端気象による影響も、長期モニタリングを実施することで検出が可能となった(Ciais *et al.* 2005)。各サイトがカバーする面積は小さいが、そのデータを気象要素やリモートセンシングによる植生指標と関連付けた統計モデルを開発することで、全陸域に外挿した集計やマップ化も行われている(Jung *et al.* 2011: 第2図)。

陸域生物圏で炭素を貯留するプールは、植生バイオマスと土壌有機物に大別されるが(岩石中の無機炭素や化石燃料は除く)、その総量と変化速度を長期・広域に定量化することはフラックス以上に困難であった。植生バイオマスについては、高分解能な光学センサーやライダー観測技術の開発により、グローバルな観測が試みられている。例えばSaatchi *et al.* (2011)はICESatに搭載されたライダー観測データを用いることで、アマゾンや東南アジアをカバーする熱帯林の



第2図 渦相関法による地上フラックス観測ネットワーク (FLUXNET: Baldocchi *et al.* 2001) のデータを経験的方法でグローバルにスケールアップして得られた陸域生物圏 CO<sub>2</sub>収支推定の分布。(a)年間の総光合成吸収。(b)年間の総呼吸放出。(Jung *et al.* (2011) より引用)

バイオマスマップを作成した。別な方法として、Pan *et al.* (2011) は FAO の森林センサスなど統計データ (インベントリ) を収集解析し、各地域の森林における炭素プールの変化を推定している (1990-2007年について全世界の森林で  $1.1 \pm 0.8 \text{ Pg C yr}^{-1}$  の正味シンク)。

土壌表面からの CO<sub>2</sub> 放出 (土壌呼吸と呼ばれる) は、陸域生物圏からの呼吸総 CO<sub>2</sub> 放出量の 8 割前後を占めると考えられている。Bond-Lamberty and Thompson (2010) は世界各地の観測データを集計して、その合計 (2008年) を  $98 \pm 12 \text{ Pg C yr}^{-1}$  と見積もっている。一方、土壌有機物プールの空間分布と変動については、リモートセンシングによる広域観測は難しく、現地観測データも不十分で推定には大きな不確実性が残されている (伊藤 2002 など)。

### 3. 火災放出および水域・岩石圏・人間圏への移動

陸域生物圏の炭素収支を細部まで詰めていくと、光合成や呼吸 (約  $120 \text{ Pg C yr}^{-1}$ ; IPCC 2013 など) 以外のマイナーな炭素フローの寄与が無視できなくなる。森林破壊や火災により、突発的に大きな CO<sub>2</sub> 放出が生じることは以前から知られており、インベントリや衛星観測データを用いて推定が行われてきた。バイオ

マス燃焼による放出量は約  $1.9 \text{ Pg C yr}^{-1}$  と考えられてきたが、最近の衛星観測で検出が困難な小規模の火災を含めた推定では約  $2.5 \text{ Pg C yr}^{-1}$  とされている (Randerson *et al.* 2012)。

陸域から水域 (河川、湖沼、海洋) への溶存態炭素や表土流亡による炭素輸送についても研究が行われている。Regnier *et al.* (2013) は多くの観測結果を総括して、陸域から水域への炭素移動量を  $1.9 \text{ Pg C yr}^{-1}$  と見積もっている。そのうち相当割合が堆積や分解を受けるため、海洋 (沿岸域) まで運ばれるのはその 50% 程度であるが、この量を考慮することで陸域と海洋の炭素収支の見積もりが  $0.1 \sim 0.35 \text{ Pg C yr}^{-1}$  ほど影響を受けるとされる。Ito (2007) は陸域炭素循環モデルに表土流亡スキームを組み込んで、土壌炭素の移動量を約  $1.6 \text{ Pg C yr}^{-1}$  と見積もっている。地質学的プロセスとして、岩石の化学的風化によって大気中の CO<sub>2</sub> が消費されるが、その量は世界で  $0.237 \text{ Pg C yr}^{-1}$  と推定されており、特に高温多雨なアジア地域や南米の赤道域、アルプスなどの山岳地でその速度が高いとされる (Hartmann *et al.* 2009)。

農作物や木材の収穫・利用といった人間活動に伴い、生物圏で CO<sub>2</sub> の正味固定、都市域での放出が発生する。Ciais *et al.* (2007) は、農作物の輸送と消費により全世界で  $1.29 \text{ Pg C yr}^{-1}$  の炭素輸送が生じていると見積もっており、それが大気 CO<sub>2</sub> の緯度勾配や経度勾配を拡大させていると述べている。また、Lauk *et al.* (2012) は、約  $0.3 \text{ Pg C yr}^{-1}$  の木材が都市域に運ばれ、また約  $7 \text{ Pg C}$  が家具や本などとして貯留されていると見積もっている。このようなマイナーな炭素フローは年間の規模は小さいものの、長期間積算されることで、グローバルな炭素収支に有意な影響を与える可能性がある。

### 4. 大気から見た陸域生物圏の CO<sub>2</sub> 収支

直接観測の困難さ (前述) にもかかわらず、陸域生物圏が正味の CO<sub>2</sub> シンクであり、その規模の概算が得られているのは大気観測に基づく推定結果に負うところが大きい。例えば Keeling *et al.* (1995) などの大気 CO<sub>2</sub> 濃度および安定炭素同位体比に基づく推定や、Keeling *et al.* (1996) などの大気 O<sub>2</sub> 濃度に基づく推定は、グローバルな炭素循環を整合的に説明する上で重要な証拠を示していた (森本 2014)。さらに、大気 CO<sub>2</sub> 濃度のモニタリングデータから、大気輸送拡散モデルを用いたインバージョンにより、陸域

CO<sub>2</sub>交換の空間分布や時間変動についての推定も行われている(真木 2014)。現在では、温室効果ガス観測技術衛星「いぶき」(横田 2014)などにより、大気CO<sub>2</sub>濃度の衛星観測が可能となり、それをを用いた地表CO<sub>2</sub>収支の分布推定が定常的に行われるようになってきている。近年の大気研究により、以前考えられてきたよりも熱帯の正味吸収が大きい可能性(Stephens *et al.* 2007)や、北半球中高緯度を中心とした季節変動幅の増大(Graven *et al.* 2013)など、陸域の炭素循環研究者にとって極めて重要な示唆がもたらされている。

### 5. 陸域生物圏モデルの開発

観測データの統合、広域スケールへの拡張、将来予測、感度実験など、陸域生物圏モデルは炭素循環研究において多くの役割を期待されている。大気CO<sub>2</sub>濃度上昇に伴う気候変動に注目が集まった1990年代以降、多数の陸域モデルが開発されてきた。近年の地上観測や衛星観測のデータを用いて、より高い精度と分解能で大気-陸域間CO<sub>2</sub>フラックスや炭素動態をシミュレートする方向に向かっている。しかしながら、陸域生態系の炭素循環に関する我々の理解は未だ不十分であり、生態系の多様性や不均質性を取り入れる方法も確立されていない。陸域生物圏モデルによる推計にどの程度の不確実性が残されているかを明らかにするため、いくつかのモデル相互比較研究が進められている。例えば、米国や欧州の研究グループを中心に、MsTMIP (Multi-scale Terrestrial Model Inter-comparison Project) が進められているが、そこでは20以上の陸域モデルが参加して共通の実験設定を用い、グローバルおよび北米を対象とした相互比較が行われている(Huntzinger *et al.* 2013)。またアジア地域では、国内および中国や韓国の研究者による陸域モデル相互比較が行われており、AsiaFluxのフラックス観測データを用いた比較解析などが実施されてきた(Ichii *et al.* 2013)。モデル推定を高度化する技術として、カルマンフィルターや変分法を用いたデータ同化の試みも始まっている(加藤 2013)。その一方、永久凍土の融解や泥炭地の火災など、潜在的には重要だが特殊なプロセスのモデル導入についてはなお課題が残されている。

### 6. おわりに

現在の陸域生物圏は、土地利用変化による放出とその他の生態系への吸収の合計として、年間約1.5 Pg C

(大気CO<sub>2</sub>濃度に換算して約0.7 ppmv)程度の正味CO<sub>2</sub>吸収源となっていると考えられる。この正味吸収は、光合成と呼吸・分解という大きなフローの差分であり、これらの生物学的プロセスが小幅でも変動することにより、正味収支は大きく変わりうることに注意すべきであろう。現実には、大気CO<sub>2</sub>濃度の上昇速度には顕著な年々変動が見られるが、それは陸域生物圏のCO<sub>2</sub>収支とかなり相補的な関係にあることが分かっている(すなわち、陸域への吸収が大きい年は大気CO<sub>2</sub>濃度の上昇速度が鈍化する)。このような全体像が得られたのは、過去30年以上にわたる、陸域での観測やモデル研究、さらに大気や海洋とも連携した炭素循環研究が進展し統合化されてきた成果である。

将来の気候変動予測において、陸域生物圏のCO<sub>2</sub>収支は大きな役割を果たす、つまり炭素循環フィードバックをもたらし可能性が高い。しかし、現在用いられている地球システムモデルでは、そのフィードバックの予測が非常に不確実であることが指摘されている(Friedlingstein *et al.* 2006; Hajima *et al.* 2014)。現在のCO<sub>2</sub>収支を解明することは、陸域生物圏の諸プロセスに関する理解を深化させ、ひいては予測信頼度の向上にもつながるはずである。今後も統合的な炭素循環研究を進展させていく必要がある。

### 参考文献

- Baldocchi, D. *et al.*, 2001: FLUXNET: a new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **82**, 2415-2434.
- Bond-Lamberty, B. and A. Thomson, 2010: Temperature-associated increases in the global soil respiration record. *Nature*, **464**, 579-582.
- Ciais, P. *et al.*, 2005: Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature*, **437**, 529-533.
- Ciais, P., P. Bousquet, A. Freibauer and T. Naegler, 2007: Horizontal displacement of carbon associated with agriculture and its impacts on atmospheric CO<sub>2</sub>. *Glob. Biogeochem. Cycles*, **21**, GB2014, doi:10.1029/2006GB002741.
- Friedlingstein, P. *et al.*, 2006: Climate-carbon cycle feedback analysis: Results from the C<sup>\*</sup>MIP model intercomparison. *J. Climate*, **19**, 3337-3353.
- Graven, H. D. *et al.*, 2013: Enhanced seasonal exchange of CO<sub>2</sub> by northern ecosystems since 1960. *Science*, **341**, 1085-1089.

- Hajima, T., K. Tachiiri, A. Ito and M. Kawamiya, 2014: Uncertainty of concentration —Terrestrial carbon feedback in Earth system models. *J. Climate*, **27**, 3425–3445.
- Hartmann, J., N. Jansen, H. H. Dürr, S. Kempe and P. Köhler, 2009: Global CO<sub>2</sub>-consumption by chemical weathering: What is the contribution of highly active weathering regions? *Glob. Planet. Change*, **69**, 185–194.
- Huntzinger, D. N. *et al.*, 2013: The North American Carbon Program Multi-scale Synthesis and Terrestrial Model Intercomparison Project: Part I —Overview and experimental design. *Geosci. Model Dev.*, **6**, 2121–2133.
- Ichii, K. *et al.*, 2013: Site-level model-data synthesis of terrestrial carbon fluxes in the CarboEastAsia eddy-covariance observation network: toward future modeling efforts. *J. For. Res.*, **18**, 13–20.
- IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Stocker *et al.* eds, Cambridge University Press, 1535pp.
- 伊藤昭彦, 2002: 陸上生態系機能としての土壌有機炭素貯留とグローバル炭素循環. *日本生態学会誌*, **52**, 189–227.
- Ito, A., 2007: Simulated impacts of climate and land-cover change on soil erosion and implication for the carbon cycle, 1901 to 2100. *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L09403, doi:10.1029/2007GL029342.
- Jung, M. *et al.* 2011: Global patterns of land-atmosphere fluxes of carbon dioxide, latent heat, and sensible heat derived from eddy covariance, satellite, and meteorological observations. *J. Geophys. Res.*, **116**, G00J07, doi:10.1029/2010JG001566.
- 加藤知道, 2013: データ同化と陸域生物圏モデル. *生物と気象*, **13**, 1–17.
- Keeling, C. D., T. P. Whorf, M. Wahlen and J. van der Plicht, 1995: Interannual extremes in the rate of rise of atmospheric carbon dioxide since 1980. *Nature*, **375**, 666–670.
- Keeling, R. F., S. C. Piper and M. Heimann, 1996: Global and hemispheric CO<sub>2</sub> sinks deduced from changes in atmospheric O<sub>2</sub> concentration. *Nature*, **381**, 218–221.
- Lauk, C., H. Haberl, K.-H. Erb, S. Gingrich and F. Krausmann, 2012: Global socioeconomic carbon stocks in long-lived products 1900–2008. *Environ. Res. Lett.*, **7**, 034023, doi:10.1088/1748-9326/7/3/034023.
- Le Quéré, C. *et al.*, 2013: The global carbon budget 1959–2011. *Earth Syst. Sci. Data*, **5**, 165–185.
- 眞木貴史, 2014: データ同化と大気輸送モデル. *天気*, **61**, 938–942.
- 森本真司ほか, 2014: 大気観測に基づく地球規模炭素循環の研究. *天気*, **61**, 922–926.
- Pan, Y. *et al.*, 2011: A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, **333**, 988–993.
- Randerson, J. T., Y. Chen, G. R. van der Werf, B. M. Rogers and D. C. Morton, 2012: Global burned area and biomass burning emissions from small fires. *J. Geophys. Res.*, **117**, G04012, doi:10.1029/2012JG002128.
- Regnier, P. *et al.*, 2013: Anthropogenic perturbation of the carbon fluxes from land to ocean. *Nat. Geosci.*, **6**, 597–607.
- Saatchi, S. S. *et al.*, 2011: Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents. *Proc. Nat. Acad. Sci.*, **108**, 9899–9904.
- 三枝信子, 2010: 森林生態系における炭素循環の観測的研究とそのアジアへの展開. *天気*, **57**, 819–833.
- Stephens, B. B. *et al.*, 2007: Weak northern and strong tropical land carbon uptake from vertical profiles of atmospheric CO<sub>2</sub>. *Science*, **316**, 1732–1735.
- van der Werf, G. R. *et al.*, 2010: Global fire emissions and the contribution of deforestation, savanna, forest, agricultural, and peat fires (1997–2009). *Atmos. Chem. Phys.*, **10**, 11707–11735.
- Woodwell, G. M., J. E. Hobbie, R. A. Houghton, J. M. Melillo, B. Moore, B. J. Peterson and G. R. Shaver, 1983: Global deforestation: contribution to atmospheric carbon dioxide. *Science*, **222**, 1081–1086.
- 横田達也, 2014: GOSAT および GOSAT-2 による CO<sub>2</sub> 観測. *天気*, **61**, 934–938.