

第5章 森林分野に関するCO₂排出・吸収量のグローバル及び国別の推定手法

：2023年に実施される「グローバル・ストックテイク」を見据えて

1. はじめに

気候変動枠組条約（UNFCCC）第21回締約国会議（COP21）において、気候変動による気温の上昇を1.5～2℃以内に抑えることを目標とした「パリ協定」が採択された。この「パリ協定」に基づき、締約国は気候変動の緩和・適応に関する「自国が決定する貢献（National Determined Contribution: NDC）」について目標を策定し、UNFCCCに提出している¹⁰。締約国はこの貢献目標を達成するために気候変動対策を実施し、その成果についてUNFCCC事務局からレビューを受けるサイクルが定められている。

その一環として、5年毎に全世界、グローバルレベルで長期目標の達成度合等や緩和・適応対策の進捗状況を評価する「グローバル・ストックテイク」の第一回目が2023年に実施される（Grassi et al. 2018）。このグローバル・ストックテイクは、情報収集、技術評価及び結果検討の3つフェーズから構成される¹¹。最初の情報収集のフェーズでは、NDCや科学研究、並びに締約国から提出されるカンントリーレポート等の情報が収集される。そこで本稿では、このグローバル・ストックテイクに向けて、IPCC特別報告書（土地関係報告書等）や関連文献を基にして、森林分野のCO₂排出・吸収量の推定方法や推定値について、グローバルレベル及び国レベルで整理し、比較検討する。

2. 森林分野のCO₂排出・吸収量のグローバル推定モデル

森林分野のCO₂排出・吸収量は、陸域における植生・土壌－大気間で輸送されるCO₂の移動量（フラックス）を捉えることで推定される（図4）。このため、まず陸域のCO₂フラックスを推定するための基礎となる陸域生態系モデルを例示する。次に、CO₂フラックスに影響を与える様々な要因について発生場所別に説明する。さらに、モデルや統計データ等を用いたCO₂排出・吸収量の推定手法及び人為的な土地利用に起因するCO₂フラックスの推定方法について整理する。最後に、各手法により推定されたグローバルレベルでのCO₂排出・吸収量を比較し、差異の要因を分析する。

¹⁰

<https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/nationally-determined-contributions-ndcs/nationally-determined-contributions-ndcs>

¹¹ <https://www.wri.org/paris-rulebook/global-stocktake>

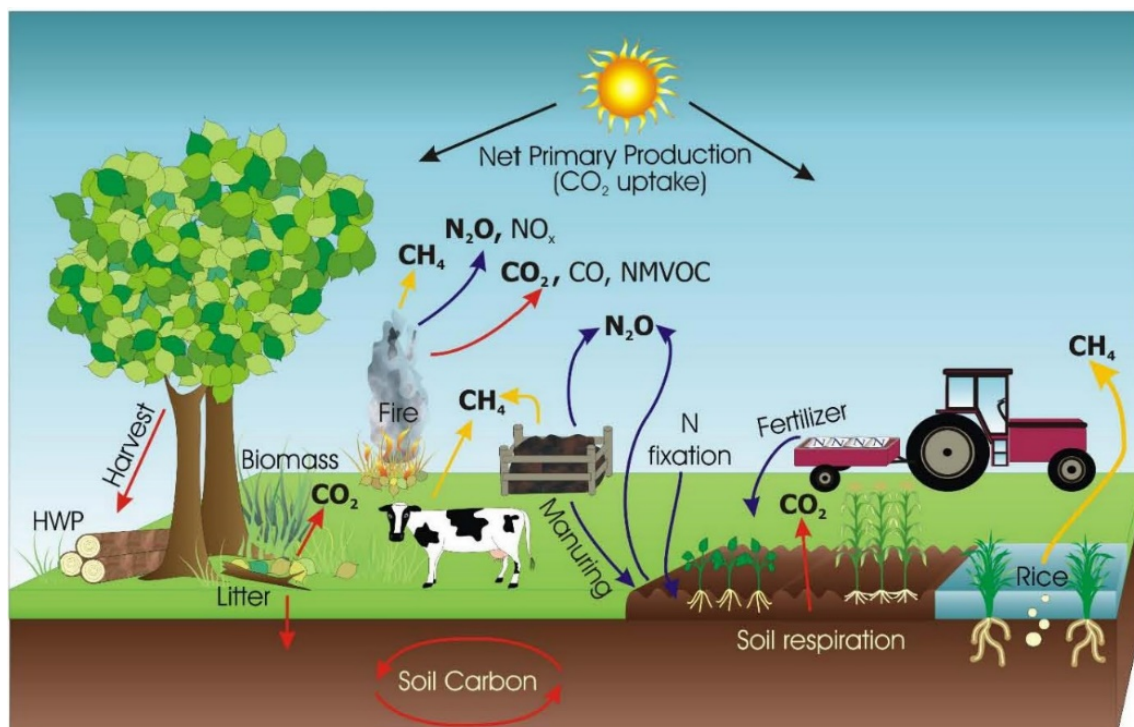


図 4 管理された生態系における主な温室効果ガス排出・吸収プロセス

出典：IPCC (2019b)

2.1. 陸域生態系モデル

陸域生態系モデルは、気象学の分野で開発された地球システムモデルに、植生の与える影響、すなわち植生遷移等の生態学的プロセスを取り入れたものである（三枝・柴田 2019）。この陸域生態系モデルは、把握する現象の時間スケールに応じて短期、中期、長期に分類され、生物地球化学モデル、植生分布モデル及び動的全球植生モデル（Dynamic Global Vegetation Model: DGVM）等がある（伊藤 2004）（表 1）。

このうち、生物地球科学モデルは中期スケールのモデルであり、CENTURY、Sim-CYCLE 及び VISIT 等がある。これらは、植物の光合成量と植物・微生物の呼吸量をそれぞれ計算して、植生・土壌－大気間の CO_2 移動量を求め、生態系に貯留されている炭素量の時間変化をシミュレートするものである。一方、植生分布モデルは長期スケールのモデルであり、MAPPS、BIOME3 等がある。これらは、植生の地理的分布の変化を推定するモデルである（伊藤 2004）。また、DGVM も長期スケールのモデルであり、CLM5.0、LPJ 及び SDGVM 等がある。これらは、個体群動態の定着、光や水を巡る競争、死亡及び攪乱を推定するモデルである（佐藤 2009）。

表 1 陸域生態系モデル

モデル	時間スケール	名称	引用文献
生物地球化学モデル	中期	CENTURY	Parton et al. (1993)
		Sim-CYCLE	Ito & Oikawa (2002)
		VISIT	Ito & Inatomi (2012)
植生分布モデル	長期	MAPPS	Neilson (1995)
		BIOME3	Haxeltine & Prentice (1996)
		BIOME4	Kalplan et al. (2003)
動的全球植生モデル (DGVM)	長期	CLM5.0	Oleson et al. (2013)
		LPJ-GUESS	Smith et al. (2014)
		LPJ	Poulter et al. (2011)
		ORCHIDEE-Trunk	Krinner et al. (2005)
		ORCHIDEE-CNP	Goll et al. (2017)
		SDGVM	Walker et al. (2017)

出典：Le-Quere et al. (2018)；三枝・柴田 (2019)

2.2. CO₂フラックスに影響を与える様々な要因

UNFCCC では、気候変動に対する人為的影響を重要視している。そこで、CO₂ 排出・吸収量の推定にあたっては、CO₂ フラックスが発生する場所と影響を与える要因を理解することが必要である。CO₂ フラックスの発生場所は、人為的影響の有無から「管理地」又は「非管理地」に分けられる（表 2）。推定に影響を与える要因には、人為的影響（直接的及び間接的）並びに自然的影響がある。「管理地」には、これらの全ての影響が及ぶのに対して、「非管理地」には、間接的な人為影響及び自然的影響のみが及び、直接的な人為影響は及ばない。直接的な人為影響の要因には、土地利用変化、伐採及びその他の管理活動があげられる。また間接的な人為的影響の要因には、気候変動により引き起こされる気温、降水量及び生育期間の変化等があげられる。一方、自然的影響の要因には、自然な経年変動及び自然攪乱等があげられる。

表 2 「管理地」及び「非管理地」における CO₂フラックスに影響を与える様々な要因

影響の種類	管理地	非管理地
直接的な人為的影響 ・土地利用変化 ・伐採、その他の管理	✓	
間接的な人為的影響 ・気候変動により引き起こされる、気温、降水量、成育期間の変化 ・大気中のCO ₂ 施肥と窒素沈着、大気汚染の影響、自然攪乱体制の変化	✓	✓
自然的影響 ・自然的な経年変動 ・自然攪乱	✓	✓

出典：IPCC (2019b)

2.3. CO₂ 排出・吸収量の推定手法

森林分野の CO₂ 排出・吸収量を推定する手法には様々なものがあり、代表的な推定手法が IPCC の特別報告書（土地関係報告書）に記載されている（IPCC 2019a）。これらの中から、グローバルレベルで CO₂ 排出・吸収量を推定するモデルである、Bookkeeping モデル、DGVM 及び大気輸送モデルについて説明する。その上で、国連食糧農業機関（FAO）が提供する統計データベースである FAOSTAT 統計を用いて推定した手法や国別 GHG インベントリ報告（National Greenhouse Gas Inventory Report: NIR）の報告値を積算して推定した手法と比較する（表 3）。

表 3 CO₂ 排出・吸収量を推定するための手法

手法	(詳細)	名称	引用文献
モデル	①Bookkeepingモデル	BLUE H&N2017	Hansis et al. (2015) Houghton & Nassikas (2017)
	②動的全球植生モデル (DGVM)	CLM5.0 LPJ-GUESS LPJ ORCHIDEE-Trunk ORCHIDEE-CNP SDGVM	Oleson et al. (2013) Smith et al. (2014) Poulter et al. (2011) Krinner et al. (2005) Goll et al. (2017) Walker et al. (2017)
	③大気輸送モデル	CTE	Van der Laan-Luijkx et al. (2017)
	④統計データベース	FAOSTAT統計	FAO(2020)*
統計及びモデル等	⑤インベントリ	GHGインベントリ	IPCC (2019a)

出典：Van der Laan-Luijkx et al. (2017)；Le-Quere et al. (2018)；三枝・柴田（2019）

*<http://www.fao.org/faostat/en/>

① Bookkeeping/accounting モデル

Bookkeeping モデルは、一般にバイオマス密度と成長／分解速度を用いて、土地利用変化に起因する正味の排出・吸収量及び吸収源の炭素蓄積変化を推定するものである。これには、バイオマス、枯死有機物及び土壌を対象としたモデル（Houghton 2003）やバイオマス及び土壌のみを対象としたモデル（Hansis et al. 2015）等がある。通常は、地上ベースで収集されたインベントリデータを基にして、パラメータ等を設定して推定される。また、このモデルには、Global Fire Emission Database（GFED）の推定に基づく、泥炭地の燃焼による CO₂ フラックスも含まれている（IPCC 2019a: SRCCL Chapter2 Box 2.2）。

② 動的全球植生モデル（DGVM）

DGVM は、様々な環境条件下¹²における、光合成、呼吸、分配、成長及び分解等の生態学的プロセスをシミュレートするモデルである。IPCC 第 5 次評価報告書（IPCC Fifth Assessment Report: AR5）以降、DGVM は改良されており、森林管理、火災、窒素及びその他の管理も対象に含むモデルも開発されている。さらに、森林から農地等への土地転用後の CO₂ 排出・吸収量も推定することが可能である（IPCC 2019a: SRCCL Chapter2 Box 2.2）。

③ 大気輸送モデル

大気輸送モデルは、インバースモデル解析に含まれる。インバースモデル解析では、観測から得られる全地球規模の CO₂ 濃度分布データを基にして、世界各地域の CO₂ 排出・吸収量を逆推定する。そのひとつとして、大気輸送モデルは、CO₂ の移動に関わる風向・風速や統計データ等を基にして、世界各地域における排出・吸収量をシミュレートする（高木 2009）。

④ 統計データベース

統計データベースの代表的なものに FAOSTAT 統計がある。FAOSTAT 統計においては、森林の CO₂ 排出・吸収量は、生体バイオマスプール（地上部バイオマス（AGB）及び地下部バイオマス（BGB））の炭素蓄積変化量から推定される（FAO 2020）。5 年毎に実施される FAO の世界森林資源評価（Global Forest Resource Assessment : FRA）の FRA カントリーレポートを通して、各国の森林面積と炭素蓄積量が FAO に報告される。そのデータを用いて、炭素蓄積変化法により、CO₂ 排出・吸収量が算定される（IPCC 2019a）（表 4）。

なお、FAOSTAT 統計では、森林面積を、UNFCCC や IPCC のように「管理された森林」と「管理されていない森林」に区別しておらず、一次林、二次林及び植林地に区別して排出・吸収量を算定している（IPCC, 2019a: SRCCL Chapter2, Box 2.2, Figure 2.6）。

¹² 気候システムのゆらぎ、気候システムの外側の変化、CO₂、窒素濃度

⑤ GHG インベントリ (Greenhouse Gas Inventory)

UNFCCC 締約国は、毎年の排出・吸収量を GHG インベントリとして報告している。この報告は、人為的影響の及ばない「非管理地」における排出・吸収量は対象としておらず、「管理地」における排出・吸収量のみを対象としている。さらに、UNFCCC の下で合意された「計上ルール」によって、自然攪乱及び林齢構成の影響を除外して報告すること等もできる。

表 4 FAOSTAT 統計及び FRA カントリーレポートに含まれる主要なデータ内容

情報・データの種類		FRA 報告書	FRA カントリーレポート	FAOSTAT 統計
森林面積	森林	○ ¹⁾	○	○
	その他の森林	○	○	— ²⁾
	森林拡大	○	○	—
	森林減少	○	○	—
	森林転用	—	—	○
	再造林	○	○	—
	一次林	○	○	—
	植林	○	○	—
	マングローブ	○	○	—
	森林全体	—	—	○
蓄積量	成長蓄積量	○	○	—
	バイオマス蓄積量	○	○	—
	炭素蓄積量	○	○	—
見かけの排出係数	森林	—	—	○
	森林転用	—	—	○
	森林全体	—	—	○
CO ₂ 排出・吸収量		—	—	○

出典：FAO（2015, 2020, 2021）

1) ○：含む

2) —：含まない

2.4. 各推定手法が対象とする CO₂ フラックス

推定手法毎にそれぞれ対象となる CO₂ フラックスが異なる。上記で提示した Bookkeeping モデル、DGVM 及び UNFCCC 報告に用いられている温室効果ガスインベントリ (GHGI) に関して、人為的又は非人為的影響並びに「管理地」又は「非管理地」という観点から、対象となる CO₂ フラックスを整理した (表 5)。

表 5 各推定手法が対象とする土地 CO₂ フラックス

影響の種類	Bookkeeping		DGVM		GHGI	
	管理地	非管理地	管理地	非管理地	管理地	非管理地
直接的な人為的影響	LUC ¹⁾		LUC		LULUCF ³⁾	
間接的な人為的影響	—	—	LUC	LS ²⁾	LULUCF	— ⁴⁾
自然的影響	—	—	LUC	LS	LULUCF	—

出典：IPCC（2019a）

1) LUC：土地利用変化

2) LS：土地吸収源

3) LULUCF：土地利用及び土地利用変化

4) —：含まない

① Bookkeeping/accounting モデル

Bookkeeping モデルが対象とする CO₂ フラックスは、「管理地」における土地利用変化（LUC）に関する直接的な人為的影響のみである。このモデルには、環境条件の変化に伴う間接的な影響は含まれていないが、パラメータとして使用されるバイオマス、成長率、枯死率等には間接的・潜在的な影響が含まれている。そのため、過去のフラックスが過大評価される可能性が指摘されている（IPCC 2019a: SRCCL Chapter2 Box 2.2、Figure 2.6）。

② 動的全球植生モデル（DGVM）

DGVM モデルが対象とする CO₂ フラックスは、「管理地」における土地利用変化に関して、直接的及び間接的な人為的影響並びに自然的影響である。一方で、「非管理地」においては、当然ながら直接的な人為的影響は対象とされないが、間接的な人為的影響及び自然的影響は、土地利用変化の有無にかかわらず土地吸収源（LS）として対象とされる。土地吸収源（LS）とは、人為的摂動による環境変化に対する土地の自然な応答であると仮定されているが、不確実性が大きいことが指摘されている。なお、DGVM には、経年的な気候変動の影響が含まれる。例えば、一部の DGVM には火災影響が含まれるが、その他の自然攪乱は含まれない（IPCC 2019a: SRCCL Chapter2, Box 2.2、Figure 2.6）。

③ GHG インベントリ（GHGI）

GHG インベントリが対象とする CO₂ フラックスは、「管理地」における土地利用及び土地利用変化（LULUCF）に関する直接的な人為的影響であるが、場合によっては間接的な人為的影響（通常は吸収源）及び自然的影響も含まれる。一方、「非管理地」における GHG フラックスは、全て非人為的であると仮定されているため、GHG インベントリでは報告対象とされていない。

2.5. グローバルレベルでの CO₂ 排出・吸収量の推定

上述の Bookkeeping モデル、DGVM、FAOSTAT 統計及び GHG インベントリについて、グローバルレベルで推定した CO₂ 排出・吸収量の比較を行い、その差異が生じる要因を分析した（表 6）。

● Bookkeeping モデルと FAOSTAT 統計の比較

2007～2016 年における、Bookkeeping モデル（農業、林業及びその他の土地利用（Agriculture, Forestry and Other Land Use: AFOLU））と FAOSTAT 統計（Land Use Total）の CO₂ 排出・吸収量を比較した。Bookkeeping モデルで推定された CO₂ 排出量は 4.0～6.7 GtCO₂/年であり、平均値は 5.2 ± 2.6 GtCO₂/年であった（IPCC 2013, 2019a）。一方、FAOSTAT 統計で推定された CO₂ 排出量は 0.8 GtCO₂/年であった（表 6）。この差異の要因として、活動量（面積）と排出係数（炭素蓄積係数）の両面が考えられる。面積については、Houghton の Bookkeeping モデルは、土地利用変化を FRA や FAOSTAT 統計の森林面積変化に基づいて特定しており、この点については FAOSTAT 統計と共通している。一方、バイオマスについては、FAOSTAT 統計では生体バイオマス（AGB 及び BGB）プールのみを対象としているのに対して、Bookkeeping モデルでは生体バイオマスに加えて、枯死有機物及び土壌プールも対象としている。これにより FAOSTAT 統計が CO₂ 排出量を過小評価している可能性が考えられる。また、FAOSTAT 統計に用いられている FRA カントリーレポートにおいて、材積量から生体バイオマスを推定する際に使用する変換係数の不確実性も指摘されている（Federici et al. 2015）。なお、Bookkeeping モデルには、パラメータとして用いられるバイオマス、成長率及び枯死率等に潜在的な影響が含まれるため、過去の排出量が過大推定となる可能性も指摘されている（IPCC 2019a）。

● Bookkeeping モデル、DGVM 及び FAOSTAT 統計の比較

2008～2017 年における、Bookkeeping モデル（AFOLU）、DGVM（AFOLU）と FAOSTAT 統計（Land Use Total）の CO₂ 排出・吸収量を比較した。Bookkeeping モデルで推定された CO₂ 排出量の平均値（ 5.5 ± 2.6 GtCO₂/年）は、DGVM による推定値（ 7.0 ± 2.2 GtCO₂/年）に比較的近い値を示した（表 6）。この差異の要因として、ほとんどの DGVM では、近年（AR5 以降）、森林伐採や焼畑のための土地開墾等の森林管理プロセスが対象として含まれていることが考えられる。一方、IPCC 特別報告書（土地関係報告書）によると、農地や草地以外の土地利用に森林が転用されている場合は、DGVM と比較して、Bookkeeping モデルの方が排出量が大きく推定される傾向があるとの指摘もある。

● Bookkeeping モデルと GHG インベントリの比較

2005 年から 2014 年における Bookkeeping モデルで推定された年間平均 CO₂ 排出量は、 5.1 ± 2.6 GtCO₂/年であった。一方、同期間における GHG インベントリを用いて推定された年間平均 CO₂ 排出量は、 0.1 ± 1.0 GtCO₂/年であった（Grassi et al. 2018）（表 6）。この差異要因として、Bookkeeping モデルが対象とする土地 CO₂ フラックスは土地利用変化（LUC）であるのに対して、

GHG インベントリが対象としているのは土地利用及び土地利用変化（LULUCF）であることが考えられる（表 6）。

表 6 グローバルレベルでの CO₂ 排出・吸収量の推定手法

モデル／データ名	方法	対象	引用文献	期間（年）	推定に用いられたデータ	年間排出・吸収量 (GtCO ₂ /年)
Bookkeeping モデル	シミュレーション	AFOLU	IPCC (2013, 2019a)	2007-2016	土地利用変化面積：FRA2010等、バイオマスデータ：観測データ等	5.2±2.6
			Houghton & Nassikas (2017)	2008-2017	土地利用変化面積（FRAおよびFAOSTAT）、バイオマスおよび土壌の炭素密度	4.0
			Hansis(2015)		土地利用変化面積（LUH2 ¹⁾ データ）、植生及び土壌の炭素蓄積	6.7
			Le Quere et al.(2018)	2005-2014	Houghton&Nassikas (2017)およびHansis (2015)の両データ	5.1±2.6 ²⁾
				2008-2017		5.5±2.6 ²⁾
DGVM	シミュレーション	AFOLU			土地利用変化面積（HYDE ³⁾ 土地利用変化データ）、植生成長・枯死量、有機物分解量、気候変動および大気中のCO ₂ への植生と土壌炭素の応答の	7.0±2.2 ⁴⁾
FAOSTAT 統計	蓄積変化法	Land Use Total ⁵⁾	FAO(2020)	2007-2016	活動データ: 森林情報に関するFAOへの国別報告や地理空間情報 炭素蓄積量：森林のAGB・BGB、および農業用の有機土壌の排水と有機土壌での火災を含むバイオマス火災からの炭素蓄積量変化	0.8
				2008-2017	同上	0.7
GHG インベントリ	ゲイン・ロス、蓄積変化等	Land Use Change	Grassi et al. (2018)	2005-2014	炭素蓄積量の変化、または活動データ等	0.1±1.0

1) LUH2: Harmonized land-use change data

2) Houghton & Nassikas（2017）及び Hansis（2015）の値の平均値

3) HYDE: History Database of the global Environment

4) 16 モデル利用 引用参照

5) Forest land , Cropland, Grassland, Burning biomass のみ

3. Global Forest Watch (GFW) と世界森林資源評価 (FRA) の森林面積データの比較

3.1. 世界レベルで代表的な森林面積データ

世界レベルで代表的な森林面積データとして Global Forest Watch¹³ (GFW) 及び FAO の FRA があげられる。

3.1.1. Global forest watch (GFW)

GFW は、森林に関する様々な情報が掲載された WEB プラットフォームであり、World Resource Institute (WRI) によって提供されている。GFW の森林面積の推定には、メリーランド大学が提供する Global Forest Change data¹⁴が用いられている。これは、約 5 億枚に上る Landsat 衛星画像を基にして、地理空間データと地球観測データを分析するためのクラウドプラットフォームである Google Earth Engine を使用して合成されたものである (Hansen et al. 2013)。

3.1.2. 世界森林資源評価 (FRA)

FAO は加盟各国と協力して、世界の森林と林業に関する最新情報を提供する目的で、1946 年以降 5～10 年間隔で世界の森林資源に関する評価 (FRA) を実施している (国際農林業協働協会 2010)。

3.1.3. GFW と FRA の森林面積比較

上述の通り、GFW では Landsat 衛星画像 (30m の分解能 (0.09ha)) を基にして、樹木被覆 (tree cover) を識別している。一方、FRA では森林を識別する際の定義として、最小面積 0.5ha が用いられている (FAO 2010)。樹高及び被覆率の定義は同じなので、GFW と FRA の森林面積に差異が見られる要因としては、この最小面積の定義の違いが考えられる (表 7)。

¹³ <https://www.globalforestwatch.org/>

¹⁴ https://earthenginepartners.appspot.com/science-2013-global-forest/download_v1.2.html

表 7 グローバルレベルでの森林・樹木被覆面積（2010 年）

データ名	元データ	対象	定義	面積 (Gha)	引用文献
Global forest watch	Landsat衛星画像等 をグーグルアースエ ンジンにより合成	樹木被覆	・面積0.09ha単位 ・樹高>5m ・樹木被覆率 >10%	4.8	Global Land Analysis & Discovery
FRA2010	各国のカントリー レポート	森林被覆	・森林面積>0.5ha, ・樹高>5m ・森林被覆率>10%	4.0	FAO(2010)

3.2. 国家 GHG インベントリ報告と FAOSTAT 統計における国別森林 CO₂ 排出・吸収量

主要国について、国家 GHG インベントリ報告（NIR）と FAOSTAT 統計における森林 CO₂ 排出・吸収量の推定方法を比較し、推定値に差異が生じる要因を分析する。なお、比較する対象年は、FAOSTAT 統計のデータソースである FRA カントリーレポート¹⁵の 2015 年とする。

3.2.1. NIR と FAOSTAT 統計の基礎情報

森林 CO₂ 排出・吸収量を推定するための算定対象プールについては、FAOSTAT 統計が AGB 及び BGB の 2 プールのみを対象としているのに対して、NIR は 5 プール全てを対象としている国が多い（表 8）。

表 8 NIR 及び FAOSTAT 統計において森林 CO₂ 排出・吸収量を推定するための基礎情報

データ/ 報告書	森林定義	データソース		対象プール					引用文献
		森林面積	炭素蓄積量	AGB	BGB	枯死木	リター	土壌	
NIR	各国独自	各国独自	各国独自	Y	Y	Y	Y	Y	各国NIR、及び UNFCCC(2018)
FAOSTAT 統計	最低樹冠被覆10% 最低面積0.5ha 最低樹高5m	FRAカントリー レポート	FRAカントリー レポート	Y ¹⁾	Y	— ²⁾	—	—	FAO(2020)

1) Y：推定されている

2) —：推定されていない

一方、主要国の NIR において、森林 CO₂ 排出・吸収量を推定するための基礎情報（森林定義、森林面積の推定方法及び対象プール）は各国でそれぞれ異なる（表 9）。

15

<http://www.fao.org/forest-resources-assessment/past-assessments/fra-2015/country-reports/en/>

表 9 主要国の NIR において森林 CO₂ 排出・吸収量を推定するための基礎情報

	森林定義	森林面積の推定方法	対象プール			
			生体 バイオ マス	枯死 有機物	土壌	
					鉱質 土壌	有機質 土壌
米国 NIR 2018	樹冠被覆率10%以上、面積0.4ha以上（樹冠幅36.6m以上）、成熟樹高5m以上。ただし、土地利用で農地及び都市に分類された場所は森林には含めない。	アメリカ農業省（USDA）の国家資源インベントリ	Y ¹⁾	Y	Y	Y
カナダ NIR 2018	樹冠被覆率25%以上、面積1ha以上、成熟樹高5m以上。	カナダ国家森林インベントリ（CanFI 2001）及びより最近の高い解像度のものが用いられる。	Y	Y	Y	IE ²⁾
豪州 NIR 2016	樹冠被覆率20%以上、最小面積0.2ha、最小樹高2m。	転用のない森林の中でのデータは、オーストラリア国家森林統計（ABARES 2016a）、オーストラリアの森林状況報告（ABARES 2013）およびLucas et al. (1997)に基づく。	Y	Y	Y	—
ニュージーランド NIR 2018	樹冠被覆率30%以上、面積1ha以上、樹高5m以上。森林の最小幅30m以上。	森林の推計に用いている衛星画像と現地調査などから把握。伐採面積についてはNational Exotic Forest Description (NEFD)が持つデータから推計。	Y	Y	Y	Y
ロシア NIR 2017	樹冠被覆率18%以上、最小面積1ha、成熟樹高5m以上。	Federal Service of State egristration, inventory and cartography (Russian State Tegner)と State forest registerのデータに基づく。	Y	Y	Y	Y
英国 NIR 2018	樹冠被覆率20%以上、面積0.1ha以上、樹高2m以上、森林の最小幅20m以上。伐採後、一時的に植生が失われた0.5ha以上の土地も含む。	毎年更新される空中写真と5年ごとの現地調査（約15kha）により国内すべての森林を0.5haスケールでマッピングしている。	Y	Y	Y	Y
フランス NIR 2015	樹冠被覆率10%以上、面積0.5ha以上、成熟樹高5m以上、森林の幅20m以上。	フランス本土：土地利用調査（TERUTI）、京都議定書の対象となる海外県のうちフランス領ギニア、グアドループ、マルティニーク、レユニオン（5州）：ONF-IGN調査、その他の地域：調査の実施なし。	Y	Y	Y	Y
スペイン NIR 2017	樹冠被覆率20%以上、面積1ha以上、成熟樹高3m以上。	国家森林インベントリ(NFI)を基にしている。	Y	Y	Y	Y
ドイツ NIR 2018	樹冠被覆率10%以上、面積0.1ha以上、樹高5m以上。	土壌図に国家森林インベントリ、赤外線航空写真、デジタル地形図、ランドスケープモデルを組み合わせて把握。	Y	Y	Y	Y
スイス NIR 2018	樹冠被覆率20%以上、面積0.0625ha以上、成熟樹高3m以上、面積幅25m以上。果樹園、公園等は森林定義を満たしていても森林に分類しない。	1990-2016年は、1haの解像度をもつ地理的に明示的な土地利用データを利用。	Y	Y	Y	Y
ノルウェー NIR 2018	樹冠被覆率10%以上、面積0.1ha以上、樹高5m以上、面積幅4m以上。	5年に1サイクルの国家森林インベントリ(NFI)を基にする。	Y	Y	Y	Y
フィンランド NIR 2018	条約下：樹冠被覆率10%以上、面積0.25ha以上、樹高5m以上。京都議定書下：樹冠被覆率10%以上、面積0.5ha以上、樹高5m以上。	国家森林インベントリ(NFI)を基にする。	Y	Y	Y	Y
ポーランド NIR 2018	樹冠被覆率10%以上、面積0.1ha以上、成熟林で樹高2m以上。幅10m以上。間伐・自然攪乱などで一時的に植生が見られない地域も含む。	国家森林インベントリ(NFI)を基にする。	Y	Y ³⁾	Y	Y ⁴⁾
バルトガル NIR 2018	樹冠被覆率10%以上、面積1ha、成熟林で樹高5m以上、幅20m以上。	空中写真マップおよび国家森林インベントリ(NFI)、総合農業センサスRGAを基にする。	Y	Y	Y	NO ⁵⁾
日本 NIR 2018	最小樹冠被覆率30%、最小面積0.3ha、最低樹高5m、幅20m。	2004年度以前は森林資源現況調査、2005年度以降は国家森林資源データベースを利用。森林計画対象の人工林、天然林、無立木地、竹林の面積を把握。	Y	Y	Y ⁶⁾ , IE ⁷⁾	IE ⁸⁾

出典：林野庁（2019）

- 1) Y：推定されている
- 2) IE：Included Elsewhere
- 3) 森林からの転用のみ
- 4) 転用のない森林及び転用された森林のみ
- 5) NO：Not Occurring
- 6) 転用のない及び転用された森林、森林から開発地への転用
- 7) 農地、草地、その他の土地
- 8) 森林からの農地への転用のみ

3.2.2. NIR と FAOSTAT 統計における森林 CO₂ 排出・吸収量

主要国の森林 CO₂ 排出・吸収量について、NIR 及び FAOSTAT 統計の推定値を比較したところ差異が見られた（表 10）。この差異要因として、推定対象となる土地カテゴリーが異なることが考えられる。それに加えて、推定に用いた基礎情報（森林定義、データソース及び対象プール）も異なることが考えられる。そこで、我が国（日本）及び差異の大きいカナダについて差異の要因を詳細に検討した。

表 10 日本及び主要国の森林 CO₂ 排出・吸収量（2015 年）

国名	NIR		FAOSTAT 統計	
	排出・吸収量 (1000tCO ₂ /yr)	対象土地 カテゴリー ²⁾	排出・吸収量 (1000tCO ₂ /yr)	対象土地 カテゴリー ³⁾
米国	-645,501	FF, LF, D	-459,348	FL
カナダ	-164,885	FF, LF	115,522	FL, FC
豪州	-39,911	FF, LF	-31,964	FL
ニュージーランド	-23,467	FF, LF	-17,853	FL, FC
ロシア	-640,014	FF, LF	-715,924	FL, FC
英国	-15,980	FF, LF	-11,939	FL
フランス	-54,130	FF, LF	-66,361	FL
スペイン	-37,785	FF, LF	-8,320	FL, FC
イタリア	-40,112	FF, LF	-35,461	FL
ドイツ	-57,927	FF, LF	-39,070	FL
スイス	-2,912	FF, LF	-2,512	FL, FC
ノルウェー	-29,367	FF, LF	-20,181	FL, FC
フィンランド	-36,095	FF, LF	-61,154	FL, FC
ポーランド	-30,623	FF, LF	-40,079	FL
ポルトガル	-11,082	FF, LF	-1,113	FL
日本	-63,085	FF, LF	-53,812	FL, FC

出典：NIR（2017）、FAO（2020）

1) FF: Forest land remaining forest land, LF: Land converted forest land, D: Drained organic soil

2) FL: Forest land, FC: Forest conversion

3.3. 主要国における NIR と FAOSTAT 統計の比較

3.3.1. 日本

日本の森林排出・吸収量の推定値が、NIR と FAOSTAT 統計で異なる要因として、両者の森林定義及び対象プールが異なることが考えられる（表 11）。NIR では、日本独自の最低樹冠被覆率 30%、最低面積 0.3ha、最低樹高 5m 及び最小幅 20m（森林総合研究所 2007）が森林定義として採用されているのに対して、FAOSTAT 統計では、FAO の基準である最低樹冠被覆率 10%、最低面積 0.5ha 及び最低樹高 5m が用いられている。また、対象プールについては、NIR では 5 プール全てを対象としているのに対して、FAOSTAT 統計では、AGB 及び BGB の 2 プールのみを対象としている。

表 11 日本の森林 CO₂ 排出・吸収量を推定するための基礎情報：
NIR と FAOSTAT 統計の比較（2015 年）

基礎情報		NIR	FAOSTAT 統計
森林定義	最低樹幹被覆	30%	10%
	最低面積	0.3ha	0.5ha
	最低樹高	5m	5m
	最低幅	20m	
森林面積		2004年度以前は森林資源現況調査、2005年度以降は国家森林資源データベース	森林資源現況調査
プール	AGB	Y ¹⁾	Y
	BGB	Y	Y
	枯死木	Y	— ²⁾
	リター	Y	—
	土壌	Y	—

出典：国立環境研究所（2017）、FAO（2014b, 2020）

1) Y：推定されている

2) —：推定されていない

日本の NIR においては、森林 CO₂ 排出・吸収量を推定・報告するシステムとして国家森林資源データベースが用いられている。森林面積については、2004 年以前は森林資源現況調査の結果が用いられ、2005 年以降は森林簿及び森林計画基本図などの行政情報が用いられている。また、調査実施年以外の年の森林面積は、調査年の面積を基に内挿又は外挿により推定されている（国立環境研究所

2017)。この面積等の位置情報については、オルソフォトや衛星画像を用いてクロスチェックが行われている（松本ら 2007）。生体バイオマス（AGB 及び BGB）の炭素蓄積量については、まず、国家森林資源データベースに格納されている樹種別・林齢別の林分面積に、収穫表の樹種別・林齢別の単位面積当たり材積をかけることによって材積が算定される。次に、求められた材積に各種変換係数を乗じて炭素蓄積量が推定される。その上で、蓄積変化法により CO₂ 排出・吸収量が推定される。この蓄積量等の情報については、森林生態系多様性基礎調査（旧森林資源モニタリング調査）を用いてクロスチェックが行われる（松本ら 2007）。枯死木、リター及び土壌の 3 プールについては、CENTURY-jfos モデルにより推定されている（国立環境研究所 2017）。

一方、FAOSTAT 統計に用いられている日本の FRA カントリーレポート（FAO 2014b）の森林面積及び炭素蓄積量は、各地域で 5 年ごとに実施される森林資源現況調査の森林面積及び材積量を基にして推定されている。その上で、蓄積変化法により CO₂ 排出・吸収量が算定されている（FAO 2020）。この森林資源現況調査の材積量は、国家森林資源データベースに格納されている樹種別・林齢別の収穫表ではなく、各都道府県や森林管理局等の樹種別・林齢別・地位別の収穫表に基づき推定されている。これらの違いが、NIR と FAOSTAT 統計で森林排出・吸収量の推定値が異なる要因であると考えられる。

3.3.2. カナダ

カナダでは、CO₂ 排出・吸収量を推定するために、カナダ森林セクター炭素収支モデル（バージョン 3）（version 3 of the Carbon Budget Model of the Canadian Forest Sector: CBM-CFS3）が用いられている（Kurz et al. 2009）。この CBM-CFS3 は、カナダ森林局によって開発されたもので、IPCC の基準に沿って生態系の炭素蓄積量を予測するモデルである（Petrescu et al. 2019）。CBM-CFS3 は、森林伐採と自然攪乱（火災、暴風雨等）のさまざまなシナリオの下での時系列並びに将来の林分及び景観レベルの炭素動態をシミュレートできる。算定対象プールは、生体バイオマス、枯死有機物及び土壌を網羅している。その算定対象林分は、地域、林齢、土地利用及び管理、並びに生態学的情報及び造林パラメータ（森林構成や管理戦略等）により最大 10 に分類されている。また、林分レベルの商用材積は、樹種別収穫表により求められ、樹種別アロメトリー式により地上バイオマスに変換される。このように CBM は様々なパラメータを用いることによって、LULUCF セクター下での政策の予測、定式化、評価の基礎情報としても利用される汎用性の高いモデルである。

カナダの NIR における森林 CO₂ 排出・吸収量もこの CBM-CFS3 で推定されている（Kurz et al. 2009）。一方、FAOSTAT 統計では、カナダの FRA2015 カントリーレポート（FAO 2014a）によると、バイオマス蓄積量は NFI 及びカナダの炭素モニタリング計上報告システム（Canada's National Forest Carbon Monitoring, Accounting, and Reporting System: NFCMARS）で推定されている。この NFCMARS にも CBM-CFS3 が用いられている（NIR 2018）ことから、NIR と FAOSTAT 統計では同様の値が報告されるはずである。しかしながら、両者の値は大きく異なっている（表 12）。

表 12 カナダの NIR 及び FAOSTAT 統計の森林 CO₂ 排出・吸収量

年	排出・吸収量 (1000tCO ₂ /yr)					
	NIR			FAOSTAT統計		
	Forest land	FF ¹⁾	LF ²⁾	Total Forest	FL ³⁾	FC ⁴⁾
2015	-164,885	-164,379	-506	115,522	22,976	92,546
2016	-152,891	-152,448	-443	15,397	-80,720	96,117
2017	-151,980	-151,590	-390	15,397	-80,720	96,117
2018	-140,324	-140,470	-334	15,397	-80,720	96,117

出典：NIR（2017, 2018, 2019, 2020）、FAO（2020）

1) FF：Forest land remaining forest land

2) LF：Land converted forest land

3) FL：Forest land

4) FC：Forest conversion

この差異要因として、カナダの NIR が「管理された森林」についてのみ報告されていることに対して、FAOSTAT 統計では、「管理された森林」と「管理されていない森林」が区別されておらず全森林が報告されていることが考えられる（Kurz et al. 2018）。また、NIR では、この「管理された森林」において人為的な影響のみを推定し、自然攪乱の影響を除外している（NIR 2018）。FAOSTAT 統計では、自然攪乱の影響を除外していないので、その分の排出量が計上されていると考えられる。カナダの自然攪乱は、主に森林火災及び虫害であり（Kurz et al. 2018）、「管理された森林」のうち転用のない森林において、自然攪乱による森林減少量が多いことが示されている（図 5）。

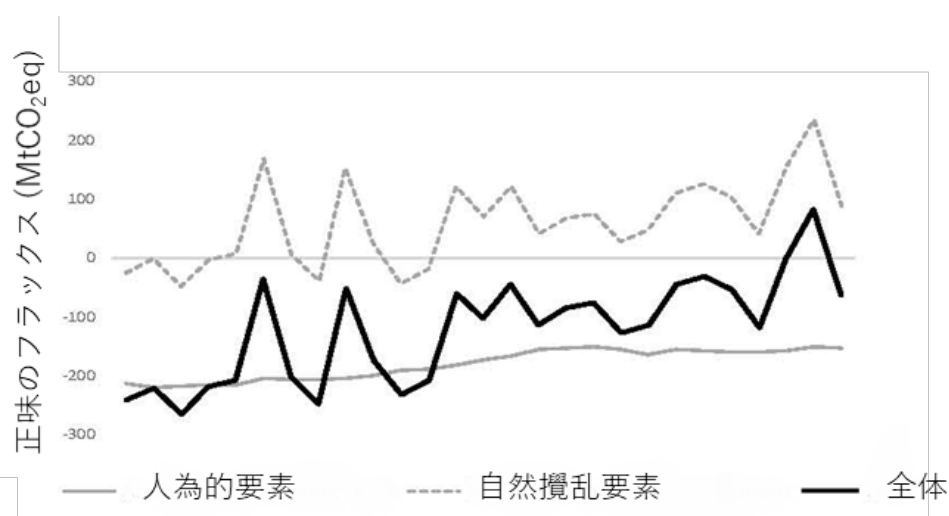


図 5 カナダの管理された転用のない森林における CO₂ フラックス

出典：IPCC（2019b）

なお、CBM-CFS3 については、アルゴリズムや投入データ、特にバイオマスの増加量並びに土壌及び枯死有機物の炭素動態をモデル化するために使用されるパラメータの不確実性が高いことも指摘されている（Metsaranta et al. 2017）。

また、NIRとFAOSTAT 統計の間で、カナダの森林 CO₂ 排出・吸収量が異なる要因として、両者の森林定義及び対象プールが異なることも考えられる（表 13）。NIR では、カナダ独自の最低樹冠被覆率 25%、最低面積 1ha 及び最低樹高 5m が森林定義として採用されているのに対して、FAOSTAT 統計では、FAO の基準である最低樹冠被覆率 10%、最低面積 0.5ha 及び最低樹高 5m が用いられている。また、対象プールについては、NIR では 5 プール全てが対象とされているのに対して、FAOSTAT 統計では、AGB 及び BGB の 2 プールのみが対象とされていることも差異要因として考えられる。

表 13 カナダの森林 CO₂ 排出・吸収量を推定するための基礎情報：
NIR と FAOSTAT 統計の比較（2015 年）

基礎情報		NIR	FAOSTAT 統計
森林定義		・ 樹冠被覆率 25% 以上 ・ 森林面積 1ha 以上 ・ 成熟樹高 5m 以上	・ 最低樹冠被覆 10% ・ 最低面積 0.5ha ・ 最低樹高 5m
森林面積		カナダ国家森林インベントリ（CanFI 2001）及びより新しい解像度の高い衛星画像が用いられる。	新しいカナダ国家森林インベントリ（Canada's NFI）が主に用いられる。
対象 プール	AGB	Y ¹⁾	Y
	BGB	Y	Y
	枯死木	Y	— ²⁾
	リター	Y	—
	土壌	Y	—

出典：NIR（2017）、FAO（2014a, 2020）

1) Y：推定されている

2) —：推定されていない

4. ヨーロッパにおける森林 CO₂ 排出・吸収量の推定モデル

4.1. 森林 CO₂ 排出・吸収量の推定モデルの概要

ヨーロッパでは、CO₂ 排出・吸収量を推定するために、Global Biosphere Management Model（GLOBIOM）や Global Forest Model（G4M）等のモデルが開発されている。また、カナダで開発された CBM も用いられている。

① GLOBIOM

GLOBIOM は、森林及び農業セクターのグローバルな CO₂ 排出・吸収量を推定するモデルである。

GLOBIOM は、6 つの土地被覆タイプ（農地、草地、その他の自然植生、「管理された森林」、「管理されていない森林」及びプランテーション）を対象として算定される（Frank et al. 2016）。その上で、土地被覆、土地利用、管理システム（下部）から、生産及び市場（上部）までの一連の流れが反映されるボトムアップアプローチが採用されている。

GLOBIOM は、ヨーロッパ全体の農林業セクターの CO₂ 排出・吸収量をより詳細に算定するように改良され、地域統計分類単位 2（Nomenclature of Units for Territorial Statistics 2（NUTS 2））レベルで面積、生産、収穫に関するデータが用いられている。参照シナリオの予測では、農地及び草地の管理に関連するバイオマス及び土壌からの CO₂ 排出量も推定されている。なお、森林については、生体バイオマス（AGB 及び BGB）の炭素蓄積量は、地理的情報を明示した G4M（後述）から提供される。この森林炭素蓄積量の推定値は FRA2010 と一致している。

② G4M

G4M は、バイオマスと炭素蓄積量について、林業活動（植林、森林減少、森林管理）の影響を推定するモデルである（Frank et al. 2016）。G4M は、森林の面積変化、炭素隔離と排出量及び炭素インセンティブの影響（例：森林減少の回避）並びに木材供給及びバイオエネルギーに関する値を推定できる。各森林面積単位において、純一次生産量（NPP）マップに基づき平均年間成長量が決定され、それを用いて利用可能な木質バイオマス資源量が推定される。また、国別の木材需要量の外部予測（GLOBIOM によって推定）を使用して、総伐採量が計算される。

G4M を用いて、植林率、森林減少率、森林管理オプション、CO₂ 排出・吸収量の予測並びに炭素税又はインセンティブ支払い等の気候政策に対する反応も予測できる（Gusti & Kindermann 2011）。この G4M によるシミュレーション結果は、京都議定書以降の気候変動枠組条約下における、AFOLU 及び REDD 等に関する国際交渉の政策評価にも有用であり、気候変動対策として森林投資を世界的に評価した「Eliash Review」、2012 年以降における地球規模の気候政策の経済的評価及び 2050 年に低炭素経済に移行するためのロードマップ等にも利用されてきた。

③ CBM

上述のカナダが開発した CBM は、上記モデル等の推定値を比較検証するツールとして用いられており、現在及び将来の森林炭素動態を推定する目的や、EU 法の LULUCF セクター政策をサポートする目的にも用いられている。2009 年以来、CBM は、欧州委員会（EC）の共同研究センターによってテスト及び検証され、ヨーロッパの森林に適合するよう改良されている。現在、EU 加盟国 26 カ国の国別及び NUTS2 レベルでも適用されている。

4.2. NIR、FAOSTAT 統計及び CBM の比較

EU 全体の森林 CO₂ 排出・吸収量について、NIR、FAOSTAT 統計及び CBM モデルによる 5 年間

隔の推定値¹⁶を比較した。その結果、CBM による吸収量が小さく推定されていた（図 6）。この差異は、国別に見るとフィンランド、ルーマニア、ラトビア及びデンマーク等の国々で顕著であった（Petrescu et al. 2019）。この差異の要因として、推定手法やデータソースが異なることが考えられる（表 14）。まず、NIR の推定値には、各国の国情に基づき独自の推定方法や IPCC ガイドラインのデフォルト値が用いられているために、比較的不確実性が高いことが指摘されている。次に、FAOSTAT 統計はモデルを使用せず、FRA カントリーレポートに基づく面積データと炭素蓄積量を用いて蓄積変化法により CO₂ 排出・吸収量を推定していることが指摘されている（Petrescu et al. 2019）。さらに、FAOSTAT 統計には植林／再植林が含まれているが、森林定義が異なるために CBM モデルのデータセットにはそれが含まれていないことも差異を生じる要因の一つとして考えられる。

インベントリ及びモデルの間に見られる差異の要因として、定義、投入データ及び構造的／パラメトリックなモデル自体の不確実性が指摘されている（Petrescu et al. 2019）。なお、NIR は排出・吸収量を毎年報告し、毎年正式に審査されるのに対して、FRA カントリーレポートは主に森林資源量を 5 年間隔で報告するという違いがあることも差異が発生する要因として考慮する必要がある。

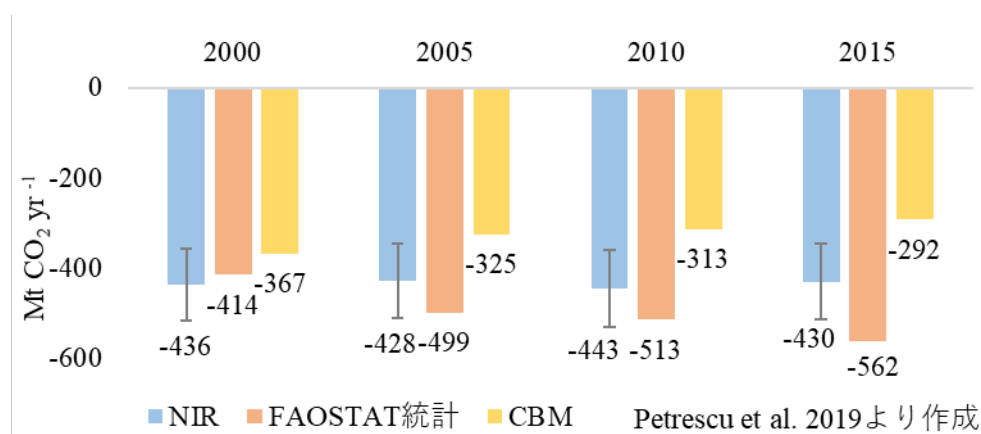


図 6 EU の正味の森林 CO₂ 排出・吸収量

出典：Petrescu et al. 2019

¹⁶ CBM モデルでは、攪乱の頻度とインパクトを加味して算出した長期間平均の純生態系生産量（Net Ecosystem Production: NEP）、すなわち純生物相生産量（Net Biome Production: NBM）が吸収源として推定されている。

表 14 EU における森林 CO₂ 排出・吸収量の推定モデル／データ

モデル／データ	方法論	データソース	排出・吸収量 ¹⁾ (MtCO ₂ /yr)
NIR	各国独自の方法	各国独自	-430
FAOSTAT統計	IPCC 蓄積変化法 (Tier1)	FRA カントリーレポート	-562
CBMモデル	—	国家森林インベントリ	-292

出典：Petrescu et al. (2019)

1) 対象プールを生体バイオマス (AGB, BGB) に限定して比較 (2015 年)

参考文献

- FAO (2010) Global Forest Resources Assessment 2010. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- FAO (2014a) Global Forest Resources Assessment 2015 Country Report Canada. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- FAO (2014b) Global Forest Resources Assessment 2015 Country Report Japan. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- FAO (2015) Global Forest Resources Assessment 2015 Desk reference. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- FAO (2020) FAOSTAT. <http://www.fao.org/faostat/en/#data>
- FAO (2021) Global Forest Resources Assessment 2015 Country Report. <http://www.fao.org/forest-resources-assessment/past-assessments/fra-2015/country-reports/en/>
- Federici S, Tubiello F N, Salvatore M, Jacobs H, Schmidhuber J. (2015) New estimates of CO₂ forest emissions and removals: 1990-2015. For Ecol. Manag. 352:89-98.
- Frank S, Forsell N, Gusti M, Havlík P. (2016) Methodology for estimation and modelling of EU LULUCF greenhouse gas emissions and removals until 2050 in GLOBIOM and G4M.
- Global Land Analysis and Discovery. <https://glad.umd.edu/>
- Goll D S, Vuichard N et al. (2017) A representation of the phosphorus cycle for ORCHIDEE (revision 4520) . Geosci Model Dev. 10: 3745–3770.
- Grassi G et al. (2018) Reconciling global model estimates and country reporting of anthropogenic forest CO₂ sinks. Nat. Clim. Chang 8: 914-920.
- Gusti M, Kindermann G. (2011) An approach to modeling landuse change and forest management on a global scale. Proc SIMULTECH 2011: 180-185.
- Hansen M C, Potapov P V et al. (2013) High-resolution global maps of 21st-century forest

- cover change. *Science*. 342: 850–853.
- Hansis E, S. J. Davis, J. Pongratz. (2015) Relevance of methodological choices for accounting of land use change carbon fluxes. *Glob Biogeochem. Cycles*. 29: 1230-1246.
- Haxeltine A & Prentice I C. (1996) BIOME3: An equilibrium terrestrial biosphere model based on ecophysiological constraints, resource availability, and competition among plant functional types. *Glob Biogeochem Cycles*. 10: 693-709.
- Houghton R A. (2003) Revised estimates of the annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use and land management 1850-2000. *Tellus B* 55: 378–390.
- Houghton R A, A A Nassikas. (2017) Global and regional fluxes of carbon from land use and land cover change 1850-2015. *Glob Biogeochem Cycles*. 31: 456-472.
- IPCC (2013) *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC (2019a) *Climate Change and Land: An IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*. In press.
- IPCC (2019b) 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/index.html>
- 伊藤明彦、市井和仁ら (2004) 地球システムで用いられる陸域モデル：研究の現状と課題. *天気*. 51: 227-239.
- Ito A & Inatomi M. (2012) Water-use efficiency of the terrestrial biosphere: a model analysis focusing on interactions between the global carbon and water cycles. *J Hydrometeor*. 13: 681-694.
- Ito A & Oikawa T. (2002) A simulation model of the carbon cycle in land ecosystems (Sim-CYCLE) : A description based on dry-matter production theory and plot-scale validation. *Ecol Model*. 151:147-79.
- Kalplan J O, Bigelow N H et al. (2003) Climate change and arctic ecosystems 2: modeling, paleodata-model comparisons, and future projections. *J Geophys Res*. 108: D19.
- 国立環境研究所 (2017) 日本国温室効果ガスインベントリ報告書 2017 年. <http://www.cger.nies.go.jp/ja/activities/supporting/publications/report/index.html>.
- 国際農林業協働協会 (2010) 世界森林資源評価 2010. 東京.
- Krinner G, Viovy N et al. (2005) A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system. *Glob Biogeochem Cycles*. 19: 1–33.

- Kurz W A, Dymond C C et al. (2009) CBM-CFS3: A model of carbon-dynamics in forestry and landuse change implementing IPCC standards. *Ecological Modelling* 220: 480–504.
- Kurz W A, Hayne S et al. (2018) Quantifying the impacts of human activities on reported greenhouse gas emissions and removals in Canada's managed forest: conceptual framework and implementation. *Can J For Res* 48(10): 1227-1240.
- Le Quere C. et al. (2018) Global Carbon Budget 2018. *Earth Syst Sci Data*.10: 2141-2194.
- 松本光朗、栗屋善雄、家原敏郎、高橋正通 (2007) 京都議定書に対応した国家森林資源データベースの開発. 森林総合研究所平成 18 年度研究成果選集 : 4-5.
- Metsaranta J M, Shaw C H et al. (2017) Uncertainty of inventory-based estimates of the carbon dynamics of Canada's managed forest (1990–2014). *Can J For Res* 47(8): 1082–1094.
- Neilson R P. (1995) A model for predicting continental-scale vegetation distribution and water balance. *Ecological Applications*. 5: 362-385.
- Oleson K, Lawrence D et al. (2013) Technical Description of version 4.5 of the Community Land Model (CLM), NCAR.
http://www.cesm.ucar.edu/models/cesm1.2/clm/CLM45_Tech_Note.pdf.
- Parton W J, Scurlock J M O et al. (1993) Observations and modeling of biomass and soil organic matter dynamics for the grassland biome worldwide. *Glob Biogeochem Cycles*. 7: 785-809.
- Petrescu A M R, Peters G P, Janssens-Maenhout G, Ciais P, Tubiello F N, et al. (2019) European anthropogenic AFOLU emissions and their uncertainties: a review and benchmark data. *Earth Sys Sc Data* 12(2):961-1001.
- Poulter B, Frank D C et al. (2011) Impacts of land cover and climate data selection on understanding terrestrial carbon dynamics and the CO₂ airborne fraction. *Biogeosciences*. 8: 2027-2036.
- 林野庁 (2019) 平成 30 年度森林吸収源インベントリ情報整備事業 (パリ協定の詳細ルール合意を見据えた技術的課題の分析・検討) 報告書 資料編.
- 三枝信子、柴田英昭編 (2019) 森林と地球環境変動. 森林科学シリーズ 6. 共立出版, 東京.
- 佐藤永 (2009) 生物地球化学モデルの現状と将来 – 静的モデルから動的モデルへの展開 – . *日本生態学会誌*. 58: 11-21.
- Smith B, Wårlind D et al. (2014) Implications of incorporating N cycling and N limitations on primary production in an individual based dynamic vegetation model. *Biogeosciences*. 11: 2027–2054.
- 高木宏志 (2009) 人工衛星のデータから世界各地域での二酸化炭素の吸収・排出量をどのように推定するか? –インバースモデル解析について–. *国立環境研究所ニュース* 28: 7-10.

- UNFCCC (2018) Support material for non-LULUCF experts Accounting of activities under Article 3, paragraphs 3 and 4, of the Kyoto Protocol in the second commitment period.
https://unfccc.int/sites/default/files/resource/Supportive%20material_ver.2_final%20201807_posted.pdf
- van der Laan-Luijkx, I.T. et al. (2017) The Carbon Tracker Data Assimilation Shell (CTDAS) v1.0: Implementation and global carbon balance 2001–2015. *Geosci Model Dev.* 10: 2785–2800.
- Walker A P, Quaife T et al. (2017) The impact of alternative traitscaling hypotheses for the maximum photosynthetic carboxylation rate (V_{cmax}) on global gross primary production. *New Phytol.* 215: 1370–1386.