

519
2022

Bulletin

国際酪農連盟 (IDF) ブリテン

C-Sequ

畜牛生産システムにおける
炭素隔離計算のための
ライフサイクルアセスメント
ガイドライン



C-Sequ

畜牛生産システムにおける炭素隔離計算 のためのライフサイクルアセスメント ガイドライン

発行番号／版：519/2022

発行年月：2022年 9月

Silver Building, Boulevard Auguste Reyers 70/B, B-1030 Brussels, Belgium 所在
の国際酪農連盟(IDF) AISBL発行

www.fil-idf.org

本刊行物に記載されている資料が本刊行物の著者もしくはIDFにより承認されている結果として個人のなす作為または不作為によって生じたいかなる損失および損害にも責任を負いません。C-Sequの取組みは、この複雑かつエキサイティングな機会に対する科学的根拠に基づく解決策を見出すため、以下の組織の貢献によって資金提供を受け、推進されてきました。

2022年 9月発行版

ISSN 0250-5118

© International Dairy Federation AISBL November 2020。本刊行物の著作権の全部または一部はIDF にあります。本文書内で明示的に許可された箇所および範囲内は別として、本作品のいかなる部分も、筆写、電子式、もしくは機械式(コピー、録画、磁気化、ウェブ配信など)を含むいかなる種類のいかなる手段によっても複製、利用してはなりません。ただし、IDFの書面による許可のあるものおよび現行の許可証の規則に適合するものを除きます。

以下の引用が必要となります：

IDF. 2022. Life cycle assessment guidelines for calculating carbon sequestration in cattle production systems. In: Bulletin of the IDF No. 519/2022. International Dairy Federation (ed.), Brussels.

翻訳(仮訳)：一般社団法人 Jミルク

编者注：仮訳の正確性、完全性、有用性等についてはいかなる保証をするものではありません。参考資料として扱い、内容に疑義が生じた場合は英文の原文をご確認ください。



プロジェクト連携組織

C-Seqの取組みは、この複雑かつエキサイティングな機会に対する科学的根拠に基づく解決策を見出すため、以下の組織の貢献によって資金提供を受け、推進されてきました。

アーラフーズ社

アンナ・フルファ
(Anna Flysjö)
アンナ＝カリン・モディン＝
エドマン
(Anna-Karin Modin-Edman)

マース社

オータム・フォックス
(Autumn Fox)
ローラ・オバートン
(Laura Overton)
アシュレー・アレン
(Ashley Allen)

フォンテラ社

ジェレミー・ヒル
(Jeremy Hill)
アンドリュー・ミラー
(Andrew Miller)
アンドリュー・フレッチャー
(Andrew Fletcher)

USデーリー・ イノベーションセンター

カール・チメック
(Karl Gzymmek)

マクドナルド社

ピーター・ガーバット
(Peter Garbutt)
サラ・クルーフ・モディン＝
エドマン
(Sara Kroopf Modin-Edman)

ダノン社

ハウーラ・エッソウシ
(Khaoula Essoussi)

フリースランド・カンピーナ社

マルリーズ・ゾンダーランド＝トマセン
(Marlies Zonderland-Thomassen)
パブロ・モダーネル
(Pablo Modernel)

ネスレ社

ウルス・シェンカー
(Urs Schenker)

ラボバンク社

マレイケ・スハウテン
(Marjke Schouten)

これらの連携組織は、不可欠なセクターの関与をもたらすために尽力いただいた二つの学術協力組織である、「国際酪農連盟(IDF)」と「持続可能な牛肉のための世界円卓会議」に感謝の意を表します。特に、パブリック・コンサルテーションの段階を監督していただいたIDFに特別の謝意を表します。

目次

プロジェクト連携組織	C
序文.....	E
謝辞	F
要約.....	H
用語解説.....	I
1. はじめに.....	1
2. ガイドライン作成の目的.....	3
3. 概念的な全体像.....	9
4. ガイドラインの概要.....	13
4.1. 責任期間の考慮と、基準状態の選択.....	13
4.2. インベントリの収集.....	13
4.3. インベントリの特性化.....	14
5. 責任期間と基準状態.....	15
6. インベントリの収集	17
6.1. 不確実性とデータ品質.....	17
6.2. インベントリ収集の一般原則.....	18
6.3. 土地管理変更	21
6.4. 継続的な営農	23
6.5. 鉱質土壌のCO ₂ 排出および貯留のインベントリ	23
6.6. 有機質土壌(泥炭地)における有機物の分解によるCO ₂ ストック排出のインベントリ.....	27
6.7. 多年生バイオマスに貯留されたCO ₂ のインベントリ	29
7. インベントリの特性化.....	34
8. その他の検討事項と次のステップ.....	36
8.1. LCAソフトウェアへの本手法の適用.....	36
8.2. 意思決定におけるその他の考慮事項.....	36
8.3. 次のステップ.....	37
9. 主な参考文献	38
付属書A.....	42
付属書B	45

2022年ブリテンの電子版購読料: 全号600ユーロ

ご注文はこちらへ: INTERNATIONAL DAIRY FEDERATION AISBL / FEDERATION INTERNATIONALE DU LAIT.

Boulevard Auguste Reyers, 70/B - 1030 Brussels (Belgium)

電話番号: +32 2 325 67 40 - E-mail: orders@fil-idf.org - http://www.fil-idf.org

謝辞

作成に関わった専門家の皆様

C-Sequ連携組織は、C-Sequガイドラインを作成するために、
時間と専門知識を自主的に投入していただいた以下の専門家の方々に感謝します。

ジョン・オルコック (Jon Alcock)、ヴィレスコ・ソリューションズ社、サステナビリティ・ディレクター
ミゲル・ブランダン博士 (Dr. Miguel Brandão)、スウェーデン王立工科大学、准教授
アクセル・ボドイ (Axelle Bodoy)、ボドイ・コンサルティング社
ダリオ・フォルナラー博士 (Dr Dario Fornara)、英国・ベルファスト、英国農業食糧生物科学研究所 (AFBI)
カレン・ハウゲン＝コズイラ (Karen Haugen-Kozyra)、ヴィレスコ・ソリューションズ社、社長
ジョン・ヒリアー博士 (Dr. Jon Hillier)、エディンバラ大学
ナタリー・クリス・ジョーンズ・バラホナ (Natalie Criss Jones Barahona)、コンソルシオ・レチエロ社
トーマス・シェツテレ (Thomas Kätterer)、スウェーデン農業科学大学、エコロジー学科、教授
ラタン・ラル (Rattan Lal)、米国・オハイオ州コロンバス、オハイオ州立大学、炭素管理・隔離センター (CMACS)、ディレクター兼土壌学特別荣誉教授
スチュアート・レドガード博士 (Dr Stewart Ledgard)、アグリサーチ社、主任科学者
アリシア・レド博士 (Dr. Alicia Ledo)、フリーランス科学者兼コンサルタント
ヤン・ペーター・レスチェン博士 (Dr. Jan Peter Lesschen)、オランダ、ワーヘニゲン大学
ブライアン・マコンキー (Brian McConkey)、ヴィレスコ・ソリューションズ社、チーフ・サイエンス・オフィサー
マリー・オバン＝ジュール (Marie Orvain-Jouault)、ヴェオリア・リサーチ・アンド・イノベーション社
ルアライド・ペートル (Ruairidh Petre)、持続可能な牛肉のための世界円卓会議、エグゼクティブ・ディレクター
グレッグ・トーマ (Greg Thoma)、アーカンソー大学、教授

コンサルテーション回答者

C-Sequ連携組織は、パブリック・コンサルテーション期間中に忌憚のないフィードバックを提供いただいた、多くの個人や組織にも感謝します。フィードバックの大部分が、本ガイドラインに反映されていることを期待します。

クアンティス社のチームが、プロジェクト連携組織と協力して、畜牛生産システムの隔離の可能性を定量化するための科学的根拠に基づく実践的な方法を模索することに、時間と専門知識をささげてくれたことに感謝します。

クアンティス社チーム

アレクシー・エアンストフ (Alexi Ernstoff)
パウラ・サンヒネス＝ディ＝カーセー (Paula Sanginés de Cárcer)
ヴィンセント・ロッシ (Vincent Rossi)
ニコラス・ハビスロイティンガー (Nicolas Habisreutinger)
フィリッポ・セッサ (Filippo Sessa)
マリコ・トルベッケ (Mariko Thorbecke)
エディス・マーティン (Edith Martin)
セバスティアン・フンベルト (Sebastien Humbert)

プロジェクト管理者:

ブライアン・リンゼー (Brian Lindsay)、リンゼー・コンサルティング社

プロジェクト管理組織:



GLOBAL DAIRY PLATFORM

C-Sequ

畜牛生産システムにおける炭素隔離計算のためのライフサイクルアセスメントガイドライン

要約

炭素隔離の概念は、農業にとって二酸化炭素を排出するだけでなく、貯留して大気から除去することが可能な方法として認識されています。これまで畜牛生産システムに適用して炭素除去量を定量化するための適切なLCAに基づく手法に関して統一見解は得られていません。常に排出量のみが焦点が当てられてきました。畜牛セクターがネットゼロを目指す中、GHGフットプリント報告の一環として、排出量だけでなく炭素除去量も考慮した科学的根拠に基づく適切な手法が求められているのです。

45ページ（A4）英語版

国際酪農連盟（IDF）ブリテン N° 519/2022 - 価格：無料

用語解説

二酸化炭素除去：大気中のガス状CO₂から炭素を補足し、有機物または無機物の炭素に貯留することで再排出されないようにするプロセス。

炭素隔離：大気からCO₂が除去され、有機物（土壌や樹木など）に貯留するプロセス。

炭素吸収源：大気からCO₂を除去するあらゆるプロセス、活動、またはメカニズム。

炭素ストック：炭素プール、すなわち地球システムの貯留層にある炭素の量。

炭素ストック排出量：炭素ストック排出量とは、基準状態を下回るストックの減少を指し、堆肥や残渣を通じて土壌に加えられた炭素分解による炭素排出量は含まれません。

特性化係数：インベントリ・フローに影響するカテゴリーの指標に変換するために適用する係数。気候変動の場合のCO₂eq（換算）など。

気候への便益：本ガイドラインの目的上、「気候への便益」という表現は、CO₂のネガティブエミッション（マイナスの排出）として算定される大気からのCO₂除去のことを指しますが、特定のシステムにおけるネガティブエミッションは地球規模の気候への便益と等しくないことが認められています。

気候への影響：本ガイドラインの目的上、「気候への影響」という表現は大気へのCO₂排出のことを指しますが、特定のシステムにおけるCO₂排出は地球規模の気候への影響と等しくないことが認められています。

離散事象：離散事象とは、土地利用変化、土地管理変更、洪水、火災、および炭素ストック量に変化をもたらすその他の事象のこと。

インベントリ：インベントリとは、1ヘクタールの土地から排出されるCO₂の量など、あるシステムへの投入や産出を説明するフローの算定のこと。

土地管理変更（LMC）：土地利用カテゴリー内で発生する土地管理の変更。

土地利用：土地の区画に適用される合意、活動、および投入物の全体。土地利用という用語は、土地管理の社会的および経済的目的（たとえば、放牧、材木伐採）の意味でも使用されます。土地利用は、IPCCの土地利用カテゴリーに従い、森林、農地（一年生および多年生）、草地、湿地、開発地、およびその他の土地に分類されます。

土地利用変化（LUC）：ある土地利用カテゴリーから別のカテゴリーへの変更。

中和：大気から（十分な時間にわたって）炭素を除去することによるCO₂排出量の「相殺」。

責任期間：生産システムが、隔離された炭素の増減による気候への影響または便益への責任を有する期間。責任期間は、基準状態と評価年に関連するインベントリの合計を決定します。

基準状態：基準状態は、正味の炭素ストック量の累積変化を考慮した、土地面積あたりの化学量論的CO₂の単位における炭素ストック量を指します。基準状態は、責任期間の開始直前のストック量として定義されます。

化学量論的CO₂：土壌やバイオマス中の炭素ストック量を、CO₂と炭素の分子量比44対12で調整することにより、CO₂単位で算出したもの。

貯留CO₂：本ガイドラインでは、貯留CO₂とは、炭素を大気から隔離したまま、炭素ストック内に留めておくことを指します。

1

はじめに

「もしそれが簡単なら、今頃すでに行われているはずだ」と人々は言います。炭素隔離について科学を実用的に適用し、農場レベルで目標を達成することは、まさにそれに当てはまります。

2018年に始まった本C-Sequプロジェクトは、この複雑なテーマの科学的根拠を理解し、異なる地理的条件における畜牛生産システムからの隔離を定量化するための方法論を構築する、乳牛および肉牛セクターの連携組織による努力のたまものです。炭素隔離は、温室効果ガス（GHG）削減のための主要なツールであるとよく言われます。この概念が適用され、望むような効果を生み出すためには、科学的根拠に基づく適用と定量化が基本的な前進のために必要です。本プロジェクトの連携組織は、炭素隔離がそれ自体で気候変動による危機を解決するものではないことを理解していますが、農業においては多くの場合、実質的な貢献をする可能性があることを認識しています。

C-Sequプロジェクトは、この難しく複雑な課題を科学的根拠に基づいてどのように農場規模で実用的に応用するかについて、一連の会議、ウェビナー、文書レビューを通して貴重な洞察を提供する、多数の世界的な学者、専門家、産業界のステークホルダーが関わる透明性のあるプロセスです。さらに、C-Sequの手法は、この分野における他の研究者による研究を考慮し、これらの開発と適切かつ可能な範囲で整合性をとっています。実際、C-Sequのプロセスはこれらの取り組みから提供された研究成果から直接的な恩恵を受けており、連携組織はそのことに感謝しています。またC-Sequの連携組織は、このプロジェクトの技術開発面においてクアンティス社によって提供された専門知識と指導にも感謝しており、この方法論が最新の科学、ガイドライン、最善策と整合することを保証しています。

当初の連携組織の考えは、既存のLCA方法論、特に国際酪農連盟（IDF）の「酪農乳業セクターのための共通カーボンフットプリント手法」のための「追加的」な機能を開発することでした。しかし入手可能なデータは限られており、不確実性のレベルが高いことから、「一つの数値」を持つことが透明性の観点から依然として課題であることが、開発段階を通して明らかになりました。既存バージョンの方法論ではISO14067に沿って、ライフサイクルアセスメント（LCA）のプロセスを通じて生成したカーボンフットプリントの結果とは別途、隔離を報告することを推奨しています。

C-Sequの連携組織は、やるべきことが相当あることを認識しており、実行可能なプロセスを標準化させるというこの初めての取り組みは、畜牛セクター（実際にはすべての農業）が正しい方向へ向かう最初の一步にすぎません。重要なことは、C-Sequが土壌や植生に炭素の保持を促進させるという積極的（追加的）な農場管理を、定量的に実施するように設計されている点です。

本ガイドラインは、C-Sequの連携組織の意欲を快く支持していただいた多くのステークホルダーの皆様が、2年におよんで費やした作業の集大成です

本ガイドラインには、2020年11月2日から12月9日に行われた、パブリック・コンサルテーションに基づいた変更が含まれています。このコンサルテーションでは、適切な手法を読み解くためのフィードバックも得られ、本ガイドラインに加えられました。たとえば、20年間の責任期間の要求は、コンサルテーションによる作業を通じて得られた全会一致の回答による結果です。

パブリック・コンサルテーションの段階に加え、この方法論はC-Sequの連携組織が様々な地域と様々な酪農生産システムで実施した50の農場レベルの実証実験からも成果を得ています。実証実験の過程では、非常に貴重な洞察が得られました。方法論を持つことは非常に良いことですが、その方法論を適用することはまた別の学習経験なのです。この方法論は、実証実験の過程に投資した結果、より強固なものになったことは確かです。

炭素隔離というテーマにおける科学と慣習の速いスピード感を考慮し、本ガイドラインは常に最先端であり続け、畜牛セクターが取り組みの定量化を強固で責任ある方法で行うことが確信できるよう、定期的に見直され、更新される予定です。

2

ガイドライン作成の目的

温室効果ガス削減戦略と組み合わせると、長期的なCO₂除去によって、1.5°Cの気候目標を達成する可能性が高まります（CanadellおよびSchulze 2014、Rogelj他 2018）。さらに、泥炭地やその他の土地で貯留された炭素の放出を減らすことは、気温上昇を産業革命以前のレベルよりも1.5°Cに抑えるための重要な緩和への道筋であるという統一見解があります(Rogelj他 2018)。

図1は、放牧された牧草地の炭素循環の概略図です。土壤有機炭素（SOC）は、直近で枯死した有機物（植物の残留物）、および過去の分解物からなる粒子状有機炭素、腐植土や分解されにくい有機炭素といったいくつかの炭素プールで構成されています。炭素プールには様々な化学組成があり、除去あるいは置換の速度（いわゆる、ターンオーバー）が異なります。土地の管理と自然条件は、あらゆる農業システムの炭素プールの組成に影響を与え、そのターンオーバーは、侵食、微生物の呼吸、下層土への移動、およびシステム内への有機物と栄養物の導入によって影響を受けます。牧草地をはじめとする多くの農業システムにおける炭素プールは、植物の残留物（芽と根の残留物）と粒子状有機炭素（大きさ0.053~2 mmの植物の残骸）で構成されており、これらは比較的ターンオーバーの速い「不安定炭素」です。不安定炭素は、関連する期間において土地管理の手法の影響をより受けます（BellおよびLawrence 2009）。本ガイドラインは、不安定炭素の管理の影響による、炭素ストック量の変化の算定方法に焦点を当てています。

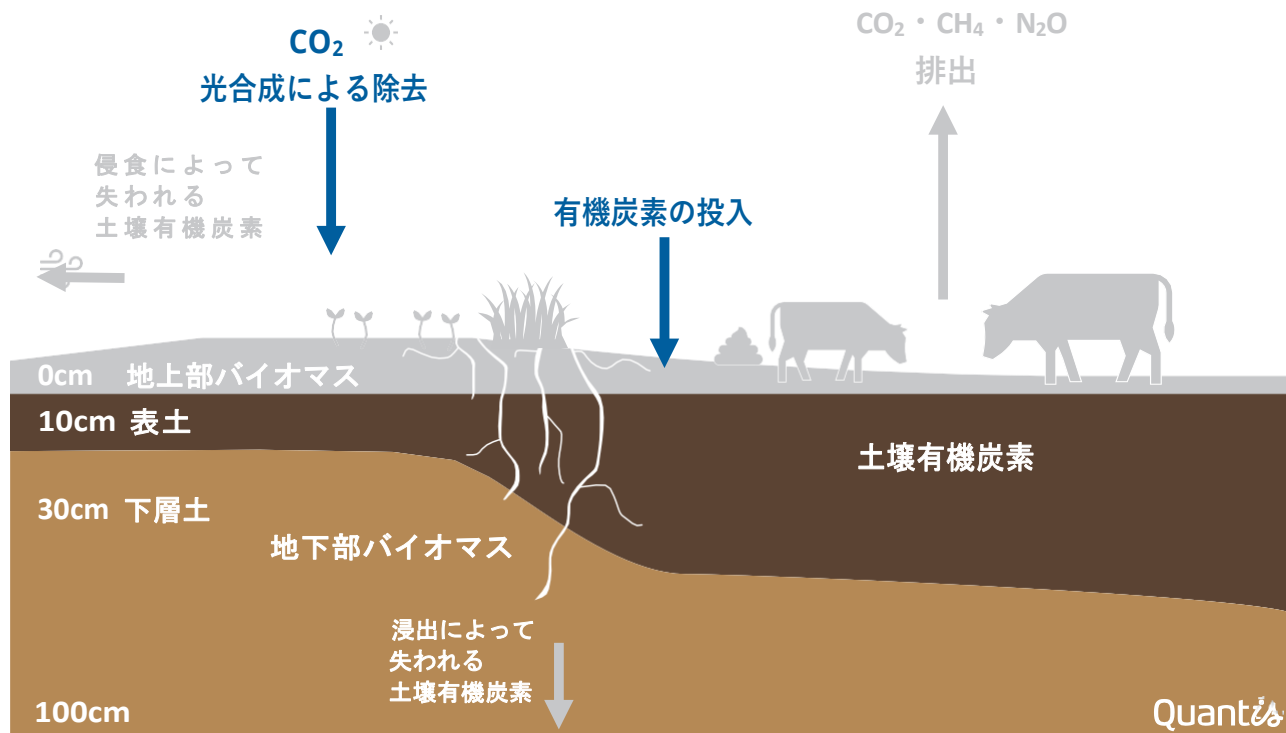


図1. 基本的な温室効果ガスのインベントリ：炭素循環

林業やバイオエネルギー分野における温室効果ガス（GHG）排出量の算定における課題からヒントを得て、大気からの可逆的なCO₂除去が気候に与える影響を定量化することを目的とする、ピアレビューされた多くの方法があります（Levasseur他 2011、Brandão他 2018、Cherubini、GuestおよびStrømman 2013、Guest他 2013、Breton他 2018、Bessou他 2019）。これらの方法は、一定期間において大気中に入出入りするCO₂の気候への影響と便益を定量化するためのさまざまな枠組みを提供します。CO₂の排出を遅らせたり、大気からCO₂を一時的に除去することによる気候への便益は、ほとんどの方法で同じ結果を示すと考えられています（LevasseurおよびBrandão 2012）。（この文書を通して、「影響」という用語は気候に関連するCO₂の排出を意味し、「便益」はネガティブエミッション（マイナスの排出）として算定される炭素隔離による大気からのCO₂の除去を意味しています。）レビューされたすべての方法は、大気からCO₂を長期間除去し、潜在的な再排出を遅らせることによる気候への便益を示しました。

これらすべての方法に共通しているのは、炭素の流れによる気候への影響が、以下の2つに数学的に結びついていることです。

1. 大気に追加、または大気から除去されたCO₂の量
2. 特定期間における、CO₂の基準パルス排出に関連した放射強制力の変化

LCA用語において、これら2つの側面は、1) インベントリ・フロー、2) 影響の特性化と呼ばれます。一般的に利用されるCO₂による特性化の枠組みは、気候変動に関する政府間パネル（IPCC）によって標準化されており、2013年に公表された第5次評価報告書¹がその例です。

1 <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>

CO₂換算による特性化の基本的な枠組みは、放射強制力による気候変動は、CO₂を含む大気中の相対的なGHG濃度の時間的な関数であることを意味しています。GHGの算定を標準化するために、CO₂換算（CO₂-equivalent：CO₂eq）という測定基準が開発されましたが、これはすべてのGHGの影響がCO₂の影響を基準にして考えることを意味しています。あらゆるGHG（一酸化二窒素<N₂O>やメタン<CH₄>など）のCO₂換算係数の基礎は、CO₂のパルス排出後の一定期間にわたってそれがもたらす気候への影響に関連した測定値です。この相対的な影響の比率が、CO₂換算単位で表された特性化係数です。従来より、CO₂換算による特性化の対象期間は、今日と次世代の地球上の人間の生命を守るため、100年とされています。これは地球温暖化係数（GWP100）と呼ばれ、一般的に使用される一連の特性化係数は、IPCCが2021年に公表したAR6（IPCC 2021）に参照されています。CO₂換算の観点から炭素隔離を算定する際に、この特性化の枠組みを考慮することが不可欠です。

実際、CO₂換算による算定の適用では、バイオマスや土壌に残留する有機炭素として1年間に貯留される1トンのCO₂は、長期間（たとえば、100年以上）貯留されるという保証がない限り、CO₂換算による1トンの排出の中和と同じではないことを示しています。したがって、ある評価年にのみ貯留される1トンのCO₂のインベントリは、大気中濃度に100年間影響を与える評価年の1トンのCO₂換算による化石燃料由来CO₂の排出を「相殺」することはできません。さらに、炭素隔離による大気からのCO₂除去は、排出源の縮小を意味する、排出量削減またはフットプリント削減と同じ概念ではありません。

長期的なCO₂除去が気候目標の達成に役立つという科学的根拠があることから、炭素隔離によって農業システムにCO₂を貯留することの可能性には関心が寄せられています。本ガイドラインでは、大気から除去されたCO₂が有機物（土壌や樹木など）として貯留されることを炭素隔離として定義しています。また、農業が行われる泥炭地などの土地で、（以前に）隔離された炭素の排出を回避または削減するために、農業手法を変えることにも関心が寄せられています。このテーマをめぐる昨今の活動と注目を考えると、乳牛と肉牛（またはその他の農業）のLCA、カーボンフットプリント、およびGHGの算定において、隔離された炭素の増減を算定する方法についての標準的な実施要領となるガイドラインが必要です。ガイドラインがないと、炭素隔離は常に現在のLCA手法に含まれるわけではないため、評価と手法の間に矛盾が生じます。

よくある矛盾の一つは、インベントリ化された「化学量論的CO₂」（樹木や土壌に貯留された炭素に分子量比44/12を乗じたもの）が、特性化された「CO₂換算」と等しいものであると誤って見なされることです。インベントリで報告される化学量論的CO₂は、国内インベントリ算定や炭素クレジット市場、その他の算定の枠組みで一般的に使用されています。化学量論的CO₂の使用は、インベントリの報告には適しているものの、（官民両方による）多くの評価では、化学量論的CO₂を誤ってCO₂換算された排出量から差し引いたり、

相殺に使用したりしています。このことは、不適切な方法での算出を混同させています。CO₂換算による算出を調整せずに化学量論的CO₂を算定すると、炭素隔離が永続的でない場合、気候への便益を過大評価してしまい、永続的である場合は、100年間の気候への便益を1年間に集中させてしまいます。この種の算定方法は、特定の年の「リアルタイム」のフローを表すことを求められることがあります。この論理では大気への100年間の影響を表すCO₂換算による算出と一致しません。

永続性の仮定と、それをどのように扱うかは、現在の評価の枠組み全体における、もう一つの矛盾です。もし農業システムで隔離された炭素が永続的であると仮定し、CO₂の除去によって今後100年間に見込まれる気候への便益全体を評価年に帰属させた場合、その年は発生しないかもしれない将来の気候への便益に対するクレジットを獲得することになります。バイオ炭の施用のように (Lehman他 2015、Paustian他 2019)、隔離が永続的または長期的であると仮定した場合、気候への便益全体 (GWP100の100年間) をどの年にクレジットさせるべきか (たとえば1年に集中させるべきか、あるいは複数年に配分させるべきか) という問題が残ります。永続的または長期的な炭素隔離は、気候目標を達成するための究極のゴールです。継続的に実践する意図があっても、土地管理変更や土地利用変化、その他の事象 (火災、洪水、霜など) によって、農業システムに隔離された炭素が元に戻り、CO₂が大気に再排出される可能性があります。

図2.で概念的に示されているように、いくつかの研究やモデル (Coleman および Jenkinson 1996、Peterson他 2013、Horrillo他 2020) では、ある年に土壌に投入された炭素 (堆肥、糞尿、残留物などを通して) の大部分が次の100年間に大気に戻ることが示されています。土壌に炭素を投入した後のそこからの炭素の排出量は、地理的条件 (土壌の種類、温度、水分など) や実践方法 (耕起など) によって異なります。したがって、時間をかけて炭素残留量 (すなわち貯留された炭素) を築き上げ、築き上げられた残留量を維持するために、有機炭素を継続的に土壌に添加する必要があります。堆肥、糞尿、残留物を土壌に投入して大気中に戻る炭素は、循環の速い炭素サイクルの一部であるため、通常は気候への影響はありません。しかし、堆肥が泥炭土や古い時代に生じた炭素でできている場合は、排出が気候に影響する可能性があります。

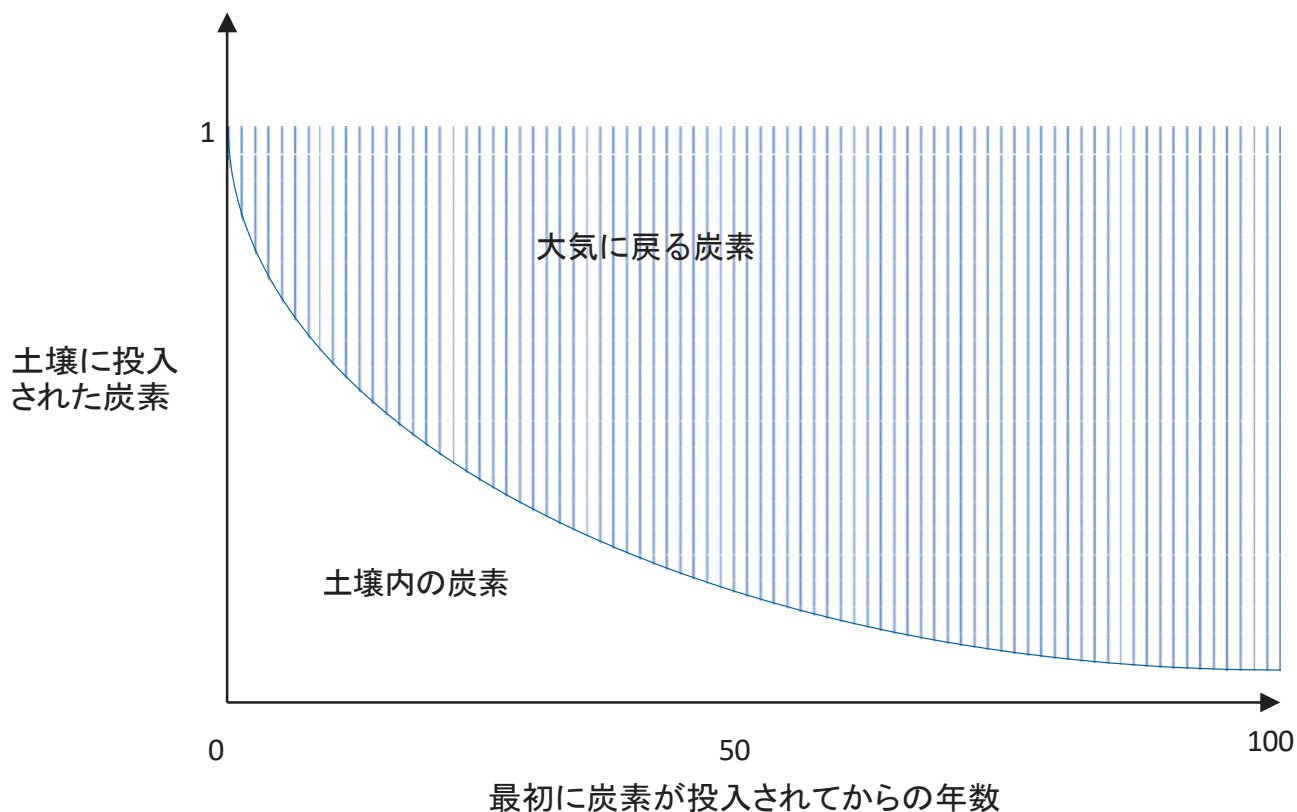


図2. 土壌への炭素の添加による結果の変化の概念図：時間軸ゼロの時点で土壌に炭素を追加した後、時間経過とともに土壌に残る炭素の割合が示されている（Petersen他 2013から引用）。

矛盾のある算定のもう一つの例は、土地管理によって隔離された炭素の放出に関するものです。土地利用変化（LUC）^{2,3}に関する現在のガイドラインには、農業活動によって土壌または樹木の炭素残留量が減少することによるCO₂排出量が含まれています。土地利用変化とは見なされない土地管理手法の変化も、炭素残留量の減少（もしくは増加）に影響を与える可能性があります。現在のLCAの手法においては、土地管理による炭素残留量の変化は、通常、気候に影響を及ぼすとは考えられていません。たとえば洪水による排水された泥炭地の再湿潤化などからCO₂排出を制限するために土地管理を変更することは、世界の気候目標を達成するための鍵であるという証拠が増えていることから、こうした排出を除外することには問題があります（Ekardt他 2020、Günther他 2020、LeifeldおよびMenichetti 2018）。

炭素隔離の算定におけるまた別の矛盾は、隔離された炭素の減少もしくは増加に対して企業などの組織が責任を負うべき期間についてです。一つの例として、LUCの算定には、実際のところ多くの場合20年間の責任期間にわたり影響の償却が行われます（事象発生後は、毎年、全体の影響の20分の1を取得します）。炭素隔離を算定するための償却期間や責任期間に関するガイドラインは存在しないため、評価間での矛盾が生じる可能性があります。

2 https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/Product-Life-Cycle-Accounting-Reporting-Standard_041613.pdf

3 <https://quantis.com/who-we-guide/our-impact/sustainability-initiatives/natural-climate-solutions>

最後に、もう一つの矛盾として、（炭素と生物多様性の両面で）土地に関する算定の枠組みにおいて、基準状態（歴史的状態、潜在的状态、平均または最大）をどのように選択するかについて議論が続いています。本ガイドラインでは、土地利用変化や土地管理変更を算定するための既存のガイドラインと整合されるために、歴史的な基準状態を推奨しています（WRI 2011）。しかしLCAの目的と範囲によっては、異なる基準状態が望まれることがあります(HauschildおよびHuijbregts 2015)。⁴

こうした矛盾と、時に不正確なGHG算定の例は、土地ベースのシステムにおける炭素隔離の増加と維持に関連する地球規模の気候目標達成に向けた、適切で実用的な戦略を特定することにリスクをもたらします。したがって、インベントリの収集、CO₂換算としての特性化、LUC以外の炭素残留量に影響を及ぼす事象の特定、および責任が取られる時間枠を明確にするために、炭素隔離の算定のための標準化されたガイドラインが必要です。本ガイドラインにおける概念的な手法は、しばしば「トンイヤー」法と呼ばれる炭素市場政策に関する先行研究（MurrayおよびKasibhatia 2013）、およびピアレビュー論文(Levasseur他 2011、Brandão他 2018、Cherubini、GuestおよびStrømman 2013、Guest他 2013、Breton他 2018、Bessou他 2019)で説明されている動的算定の手法に基づいて構築されています。本ガイドラインでは、農場レベルでの影響の年次算定に適した方法を提供し、実務者は、研究や意思決定の問題に応じて、さまざまな種類のLCA（結果的、帰属的、将来的など）を実行するためにこの概念を利用できます。「科学的根拠に基づいた目標（SBT）」やISOに準拠したLCAなどの、GHGプロトコルによる報告に炭素隔離を含めるための規則は現在（本ガイドライン作成時点で）開発中です。

4 Milà I Canals & de Baan によるChapter 11 “Land use” を参照

3

概念的な全体像

本ガイドラインは、農場レベルのLCAにおいて、炭素隔離の減少と増加がもたらす気候への影響と便益をどのように考慮するかについての枠組みを提示します。

これは、ある土地利用カテゴリーにおける土地管理変更に焦点を当て、土地利用変化の算定を補完します(ただし、置き換わるものではありません)。

本ガイドラインでは、以下の概念が詳述されています。

- 責任期間と基準状態
- 主要なインベントリ・フロー
 - 1) 貯留されたCO₂: 炭素隔離によって大気から除去されたCO₂を表し、基準状態を上回る炭素ストックが構築されることを意味する。例としては、樹木や生垣の植栽による炭素ストックの増加が挙げられる。
 - 2) 排出されたCO₂ストック: 基準状態を下回る炭素ストックの減少の結果で大気に排出されたCO₂を表す。このインベントリ・フローは、土地利用変化による生物起源のCO₂の放出に類似しています。インベントリは、一定期間の年平均値でもあります。
- 土地管理変更、継続的な営農、さまざまなインベントリ収集の方法。
- GWP100による算定に従った気候関連のCO₂換算による算出に到達するために、主要なインベントリ・フローに乗じる特性化係数。

インベントリ・フローの計算については、炭素ストックの変化の測定と推定は現在進行中の研究分野であり、研究ごとに異なる可能性があるため、本ガイドラインでは、ストックの変化を推定し測定するための単一のモデルや手法は要求していませんが、可能であればより高次のモデルを使用することを推奨します(セクション5.5を参照)。プロセスベースのモデルがある場合は、評価対象年のストックの変化を推定するためにそのモデルを使用することを推奨します。

インベントリの算定における重要な概念は、気候との関連性です(GWP100による算定期間など)。炭素隔離につながる土地管理変更は、最大限の気候への便益をもたらすために、長期にわたることを意図する必要があります。しかし、将来的な土地管理や土地利用、またはその他の事象(火災、洪水)により、土壌やバイオマスを介した炭素隔離は可逆的に変化します。この可逆性を考慮して、本ガイドラインでは、土地ベースの解決策を通して隔離された炭素はすべて元に戻る可能性があり、そうならばもはや気候への便益はない、という予防原則に則っています。

この算定の手法により、将来を考慮する必要がなくなり、継続的な営農を通してCO₂を貯留し続けることの便益について、継続的に算定することが可能になります。

GWP100とベルン炭素循環IPCCモデルに整合させるために提案された特性化係数は、欧州委員会による国際基準ライフサイクルデータ（ILCD）文書（JRC-IES 2010）による提案と、その他の著者（Brandão他 2019、LevasseurおよびBrandão 2012）によるレビューに従い、 $-0.01 \text{ kgCO}_2\text{eq/kgCO}_2\text{-year stored}$ （評価年の貯留量）となっています。この特性化係数の解釈は、炭素ストックの増加による中和の100%の便益は、100年間貯留された後にのみ達成できるというものです。

一定の土地管理の手法を100年間保証することは、ほとんどの管理上の決定や契約にとって適切な時間枠ではありません。したがって、ILCDの手法を補完するために、本ガイドラインでは、永続性を保証できない場合とできる場合の、二つの主要な値の選択肢を提示しています。永続性を保証できる条件は、本ガイドラインでは示されておらず、GHGプロトコルのような他のプロトコルや、欧州委員会の規則で提示される可能性があります。たとえば、欧州委員会のカーボン・ファーミング報告のセクション5.6では、異なる排出スキームで永続性を保証するさまざまな方法の概要を提示しています（COWI 2021）。

永続性が保証できない場合、完全な中和による便益は、関連する管理期間に分散されます。責任を有する時間枠の値の選択は、本ガイドラインでは責任期間と呼ばれ、前述の $-0.01 \text{ kgCO}_2\text{eq/kgCO}_2\text{-year stored}$ （評価年の貯留量）という特性化係数は、責任期間に適合するように調整されなければなりません。管理可能な期間で農業手法の変更を奨励するための値の選択として、本ガイドラインのパブリック・コンサルテーションの作業では20年間の責任期間を提案しました。この値の選択の解釈は、炭素ストックが毎年増加して残っている場合、20年間、 $-0.05 \text{ kgCO}_2\text{eq/kgCO}_2\text{-year stored}$ （評価年の貯留量）のクレジットを毎年受け取ることができるというものです。このことは、隔離された炭素が中和の便益の100%を20年にわたって（毎年5%ずつ）受けることを意味します。20年経過後にクレジットは失効し、貯留された炭素が放出された場合は、土地利用変化（LUC）の算定と同じ規則で扱われます。本ガイドラインでは、以前（たとえば20年以上前など）に貯留された炭素を保持することによって回避される排出量の算定については奨励していません。しかし、以前に貯留された炭素の放出は、気候変動に関連する排出につながります。

永続性が保証される場合（契約などを介して）、時間的制約のある特性化係数は必要なく、ストックの増加が発生した年にインベントリの完全な中和の便益を取得できます（これは基本的に、ガイドラインのセクション6にあるインベントリの特性化全体をスキップすることを意味します）。将来にわたってストックが減少する場合、LUCと同様に排出量を扱うことが奨励されます。

永続性の保証

便益のために償却期間なしに永続性を仮定したり、GWP100の枠組みにおいて気候への影響を算定するために特性化を使用しないことは、各種の炭素クレジットおよびLCAに関連しない炭素評価の典型です。炭素クレジット市場は、森林火災や洪水といった自然事象による非永続性を算定したり、一定の検証やモニタリングを必要とするために、リスク、緩衝作用、安全係数を適用することもあります。製品や企業のフットプリントを報告したり主張したりするにあたってLCAの永続性を仮定する場合、以下のような未解決の問題があります。管理の変化や隔離された炭素が永続的であることを保証するためには、どのような事実が必要でしょうか？どのようなモニタリングの規則が必要でしょうか？生物起源のCO₂放出を1 kgCO₂eq/1 kg生物起源CO₂排出量として特性化するなど、永続的ではない変化に対してのペナルティはあるでしょうか？これらの問題に回答することは、今回のバージョンのガイドラインでは焦点を当てていません。

概念的枠組みが提供されることによって、実務者は農場レベルでの算定のために炭素隔離の増減を算定することができます。このため、または収穫量の変動することを考慮して、本ガイドラインでは土地1ヘクタールあたりのインベントリを算定するための枠組みを提供します。単位をヘクタールからの生産のキログラムに移行する場合（つまり、「排出原単位」として表す場合）、実務者は既存の方法（たとえば、ヘクタールあたりの影響を収穫量で割るなど）に従うことができます。このとき既存のLCAガイドラインおよび一般的な慣行に従って、配分係数を適用する必要がある場合があります。例としては、欧州委員会の製品環境フットプリント法（PEF）と循環フットプリント式（CFF）を適用する場合、堆肥の施用に関連した炭素隔離の便益は、堆肥システムと農場システムの両方に配分されるべきであると解釈される可能性があります。このような配分によって、堆肥の生産と施用を等しく奨励することができます。

まとめると、本ガイドラインは、特に乳牛および肉牛セクターに焦点を当てた農場レベルの管理変更を支援するために、隔離された炭素の増減を算定する実用的なガイドラインを提供する最初の一步なのです。定量的な枠組みは、既存のピアレビューされた研究に基づいており、A) 大気からより多くのCO₂を長期間除去し、B) 土地やバイオマスに貯留された炭素が排出されないようにする土地管理を奨励することを目的としています。

本ガイドラインでは、実務者（LCAやGHG算定を行う訓練を受けた専門家）が、LCAおよびGHG算定の枠組みにおける学術的知識と実践の現状が一致した方法での炭素隔離を導入するための推奨事項を提供しています。

学術的知識と実践の間のギャップを埋めるために、本ガイドラインでは、実務者によって実行される手作業の数を少なくする実用的で強固な簡素化を推奨しています。すべてのGHGの算定と同様に、決められた規則には主観的な性質があるため、本ガイドラインでは、農場レベルのLCAにおいて、隔離された炭素の増減を算定する方法に関するガイドラインの提案を、透明性をもって提供することを目的としています。

公開される比較の主張はすべて、ISO14040規格に準拠したものでなくてはなりません。これはGHG算定の発展途上のトピックであり、本ガイドラインの概念的枠組みを使用して算出される結果は、特に公的なコミュニケーションに使用される場合、カーボンフットプリントの総量に関しては個別に報告されなくてはなりません。

4

ガイドラインの概要

本ガイドラインでは、実用的なLCAおよびGHG評価において、いつ、どのように農場レベルの炭素隔離の増減を算定するかについての推奨事項を提供します。まとめると、その手法は以下の枠組みによって概説されます（図3）。

4.1. 責任期間の考慮と、基準状態の選択

責任期間は、特定の年の行動による影響や便益が繰り越される年数のことです。実用的な理由から、本ガイドラインでは、実務者が過去にさかのぼって離散事象を検討できる年数を、責任期間と同じ年数とすることを提案しています。離散事象とは、土地利用変化、土地管理変更、洪水、火災、炭素ストックに変化をもたらすその他の事象のことを指します。離散事象は、排出や除去が気候に与える影響はその意図との関係で考慮されないため、炭素ストックの意図的な変化と意図していない変化の両方が含まれます。他のプロトコルやガイドライン文書では、意図的なものを区別する必要があります場合があります。評価のための基準状態は、責任期間における最初の離散事象の直前、または離散事象がない（すなわち継続的な営農）場合は責任期間の開始時の貯留量（土壌とバイオマス）であることが推奨されます。炭素ストックの関連する変化（基準状態からの変化）による気候への便益や影響は、責任期間にわたって繰り越されるものとします。ガイドライン案の実証実験では、管理手法が長期間実施され、炭素ストック量の増加の証拠がある場合、個別事象を特定することが困難であることが示されました。この事例は、「継続的な営農」（6.4節）をご参照ください。炭素ストックの関連する変化（基準状態からの変化）による気候への便益や影響は、責任期間にわたって繰り越されるものとします。20年間という責任期間は、パブリック・コンサルテーションの作業を通じて選択されました。責任期間は、最終的には特性化係数の調整も行います。本ガイドラインでは、一つの責任期間のみを提供しますが、特定の意思決定のシナリオにはさまざまな責任期間や振り返りの期間があることが適切である場合があります。

4.2. インベントリの収集

本ガイドラインでは、主に二つのインベントリ・フローに焦点を当てています。

1) 貯留されたCO₂と、2) 排出されたCO₂ストックです。気候に関連するインベントリは、土壌やバイオマスにおける炭素ストックの純増減を、基準状態に対する土地面積あたりの化学量論的CO₂の単位で把握しなければなりません。

4.3. インベントリの特性化

可逆的に基準状態を上回る可能性がある炭素ストックの特性化係数は、GWP100に合わせて100年間適用される $-0.01 \text{ CO}_2\text{eq}/\text{CO}_2 \text{ stored-year}$ （評価年の貯留量）が提案されます。炭素ストックの排出、すなわち基準状態を下回るストックの減少に対する特性化係数は、単年度で適用される、 $1 \text{ CO}_2\text{eq}/\text{CO}_2 \text{ stock emitted}$ （ストック排出量）が提案されます。これらの値の非対称性は、物理的には、ほとんどの炭素隔離は元に戻すことができるのに対し、排出は元に戻すことができないことを示しています。それでも、20年間の責任期間を考慮すると、最終的な調整後特性化係数は対称になります。本ガイドラインでは、20年間の責任期間にわたって影響と便益を均等に配分することを推奨しており、これによって最終的な調整後特性化係数は、ストックが増加する場合は $-0.05 \text{ CO}_2\text{eq}/\text{CO}_2 \text{ stored-year}$ （評価年の貯留量）、ストックが減少する場合は $0.05 \text{ CO}_2\text{eq}/\text{CO}_2 \text{ emitted-year}$ （評価年の排出量）となります。いずれの場合も、便益と影響は20年間繰り越されます。

1. 責任期間と基準状態

責任期間（20年間が提案されている）を特定し、基準状態、すなわち過去20年間(=RW)にどのような変化があったのかを特定します

2. LCI（ライフサイクル・インベントリ）

評価年の総除去量と排出量を定義します

- 土壌有機炭素（SOC）の実験的モデル（例：IPCCのTier I およびTier IIモデル）
- プロセスベースのSOCモデル（例：RothC、Century SOC Tier IIIモデル）
- 測定（例：土壌有機炭素サンプル）
- 多年生バイオマス樹木および生垣の相対成長式（例：IPCC Tier Iモデルや学術文献の手法）、および必要な関連入力変数（例：胸高直径、樹高）

3. 特性化

二酸化炭素換算（ CO_2eq ）での除去量と排出量の算定方法

- 可逆的除去量（貯留された炭素）が調整された特性化： $-0.05 \text{ CO}_2\text{eq}/\text{CO}_2 \text{ stored-year}$ （評価年の貯留量）
- 永続的除去量（貯留された炭素）： $-1 \text{ CO}_2\text{eq}/\text{CO}_2 \text{ stored permanently}$ （永続貯留量）（たとえば20年間といった、任意の償却を伴います）
- 炭素ストック排出量が調整された特性化： $0.05 \text{ CO}_2\text{eq}/\text{CO}_2 \text{ emitted-year}$ （評価年の排出量）（20年間の償却を伴う土地利用変化の算定と一致するようにします。そうでない場合は $1 \text{ CO}_2\text{eq}/\text{CO}_2 \text{ emitted-year}$ （評価年の排出量）にします）

図3. 炭素の除去量と排出量を定量化するための手順概要

これらのステップの実行の詳細については、次のセクションで説明します。

5

責任期間と基準状態

既存の土地ベースの炭素の算定では、多くの場合20年に設定されている償却期間への考慮が必要です。償却期間とは、影響に対する責任が繰り越され、配分される期間のことです。

GHGプロトコル農業ガイダンス⁵で概要が示されているように、土地利用変化（LUC）の算定では、償却期間と同じ長さの「振り返り」や評価期間に関して、基準状態（すなわち、以前の土地利用）を設定できます。本ガイドラインでは、「振り返り」期間と償却期間は同じ期間であることが推奨されており、これを「責任期間」と呼びます。そしてこれは、基準状態に関して隔離された炭素の増減に関連した気候への影響や便益に対して、システムが「責任を有する」期間のことです。

責任期間は離散事象によって開始されるものとし、GHGプロジェクト算定プロトコルのための土地利用、土地利用変化および林業に関するガイダンス⁶に沿って、**離散事象**とは、責任期間内（たとえば、過去20年間）の炭素ストックを中断させるような土地管理や土地利用の変化、またはその他の事象（たとえば火災）のことを指します。離散事象がない場合、責任期間は、評価年から責任期間の長さ（年数）を引いたものとして開始できます（**6.4節**）。20年の責任期間が提案されていますが、特に多年生植物や在来植生の再生の場合、責任期間は個々の判断によって左右されます（たとえば、責任期間は多年生植物の循環に適している必要があります）。

実務者は、農場管理者へのアンケート、衛星画像、または土地の利用と管理を認定する法的文書や証明書類を通して、「振り返り」期間を調査することが奨励されます。たとえば、責任期間が20年の場合、実務者は20年を振り返って（例えば、衛星画像や土地所有情報などを使用して）、離散事象の存在を判断しなくてはなりません。

インベントリの収集と期間中の結果の最終的な分配に関する責任期間には複数の意味があり、それは調整後特性化係数を利用して、実際的に計算をすることができます。責任期間とは、過去に発生した炭素隔離の増減に対して実務者が責任を負うことができる期間を示します。貯留された炭素の場合、ある評価年において過去に隔離された炭素がシステムに残ったままである場合にのみ、過去の年のインベントリ（つまり、5年前に開始された土地管理変更によって、毎年炭素が貯留されている場合）を考慮することができます。

5 <https://ghgprotocol.org/agriculture-guidance>

6 https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards_supporting/LULUCF%20Guidance_1.pdf

責任期間のもう一つの意味は、便益または影響全体が、責任期間にわたって配分されなければならないということです。たとえば、GWP100の枠組みでは、炭素隔離量増加の便益の特性化係数（CF）は $-0.01 \text{ kgCO}_2\text{eq/kgCO}_2 \text{ stored-year}$ （評価年の貯留量）であり、気候への便益全体を獲得するには100年が必要です。最終的な調整後特性化係数の式は次のとおりです。

$$CF_{\text{調整後}} = \frac{CF_{\text{対象期間=100}}}{RW} = CF_{\text{単年}} = \frac{100}{RW} \quad \text{方程式 1}$$

この場合、 $CF_{\text{対象期間=100}}$ は、GWP100のシナリオを考慮して、完全な環境への便益や影響を獲得するのに100年を考慮することを意味しますが、今回の責任期間（RW）は20年として推奨されています。たとえば1年間のCF、すなわち $CF_{\text{単年}} = -0.01 \text{ kgCO}_2\text{eq/kgCO}_2 \text{ stored-year}$ （評価年の貯留量）は、最終的に100年間で $CF_{\text{対象期間=100}} = -1 \text{ kgCO}_2\text{eq/kgCO}_2 \text{ stored-year}$ （評価年の貯留量）の完全な便益が得られます。RW=20の場合、調整後特性化係数としては年間5%、すなわち $-0.05 \text{ kgCO}_2\text{eq/kgCO}_2 \text{ stored-year}$ （評価年の貯留量）となります。また別の例として、排出が可逆的ではない場合、 $1 \text{ kgCO}_2\text{eq/kgCO}_2 \text{ emitted-year}$ （評価年の排出量）はすでに100年の対象期間の影響が算定されています。RW=20の場合、調整後特性化係数としては年間5%、すなわち $0.05 \text{ kgCO}_2\text{eq/kgCO}_2 \text{ emitted-year}$ （評価年の排出量）となります。

責任期間の選択に主観が伴うことから、責任期間の最終的な選択に向けた同意を得るために、パブリック・コンサルテーションが実施されました。20年、50年、そして100年の責任期間が提案され、パブリック・コンサルテーションの結果として、20年間の責任期間が選択されました。

提案された責任期間の長所と短所は付属書の表A1（パブリック・コンサルテーションに提出された責任期間）に記載されています。パブリック・コンサルテーションに提出された責任期間、すなわちこれらの要素の一般公開の意見聴取は、2020年11月2日から同年12月9日まで実施されました。現在の奨励事項は、隔離されたCO₂の増減について、責任期間は同じにするというものです。

6

インベントリの収集

ライフサイクルインベントリ（LCI）は、LCAの枠組みの重要な部分です。

本ガイドラインでは、気候に関連する二つの主要なインベントリ・フローが紹介されています。

- 1) 貯留されたCO₂：炭素隔離によって大気から除去されたCO₂を表し、基準状態を上回る炭素ストックの構築を意味します。例えば、追加的な樹木や垣根の植栽によるバイオマスとしての炭素ストックの増加や、有機炭素の高投入と省耕起への変更による土壌有機炭素としての炭素ストックの増加などが挙げられます。
- 2) 排出されたCO₂ストック：過去に隔離された炭素の減少によって大気に排出されたCO₂を表し、炭素ストックが基準状態よりも減少したことを表します。このインベントリ・フローは、土地利用変化による生物起源CO₂の放出に類似していません。

炭素の増減に関するインベントリ・フローは、別々に管理しなくてはなりません。すべてのフローは土地1ヘクタールあたりで考え、実務者は生産1キログラムあたりの最終的な影響（すなわち、排出原単位）に到達するため、既存のLCAの手法に従わなくてはなりません。インベントリの収集は、農場レベルのLCAに炭素隔離を含める際の最も困難な側面であることが、実証実験で確認されました。付属書B.には、特定されたモデルのまとめと、モデルを選択する際に考慮すべき基準のリスト、および実務者に支援を提供するためのデータベースが掲載されています。

6.1. 不確実性とデータ品質

インベントリの測定やモデル化のために使用される方法に関しては、不確実性とデータ品質を考慮する必要があります。ISO14067とGHGプロトコル（第8章）⁷のデータ品質の原則に従うものとし、特定のデータ品質要件は、LCA結果の使用状況によって異なります（たとえば、報告や公的なコミュニケーションに使用する場合や、内部スクリーニングやホットスポットの特定に使用する場合など）。

本ガイドラインでは、信頼できる第三者機関の検証を経たTier IIIモデル（例：サンプリングと組み合わせたプロセスベースのモデル）や高品質の一次データ測定が最高品質のデータを提供し、第三者機関の検証がない低階層の手法（例：IPCC Tier I）は低品質とみなしています。

⁷ https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/Product-Life-Cycle-Accounting-Reporting-Standard_041613.pdf

土壌炭素の一次データ測定は不確実性が高く、大きな空間変動を示すことがあります（FAO 2019）、専門家の判断では、分析的測定はデフォルトではモデル化よりも高品質であると見なすべきではないことが示唆されています。低品質のデータを使用する可能性のあるフットプリントやスクリーニングでは、特に意思決定のガイドラインを提供する際に、その結果が変わり易いことを考慮しなくてはなりません。

使用されるデータ、モデル、仮説（一般的なもの、もしくはサンプルから得られたもの）は透明性をもって伝えられなくてはなりません。炭素隔離や炭素ストックの減少のフットプリントが生産のフットプリントの10%以上を占める場合、実務者は特に結果を公表したり意思決定をする前に、データの不確実性と品質を検討し、公表しなくてはなりません。

6.2. インベントリ収集の一般原則

ガイドライン案の実証実験では、インベントリ収集が炭素隔離の算定における主要な課題であることが示されました。前節で説明したように、高次のモデル、すなわち土壌サンプルと組み合わせた（例えば校正した）プロセスベースのモデルは、土壌有機炭素の予想変化量を最も正確に推定できると思われませんが、このレベルの精度は実現が難しく、ガイドラインの適用によっては必要とならない場合もあります。例えば、このガイドラインが公的に比較される製品クレームに適用する場合は、このような高い精度が望ましいですが、企業内部の炭素査定にはこのような厳密さは必要ないかもしれません。

インベントリのための隔離された炭素の年間の減少と増加は化学量論的CO₂と見なし、土地面積（たとえば、ヘクタールあたり）の土壌と多年生バイオマスを考慮しなくてはなりません。本ガイドラインでは、実務者が基準状態に対する変化を算定する数年前からのインベントリを考慮する必要がある、繰越責任の概念（4章）を適用することを提案しています。基準状態とは責任期間開始直前のストック量として定義され、そこからの炭素ストックの増減が考慮される状態であり、それらの気候との関連性を決定するものです。実際、責任期間を考慮した評価年の関連するインベントリとは、責任期間開始から評価年までの毎年の正味の炭素ストックの変化量であることを意味しています。

関連するインベントリは、以下のように単純に計算ができます。

$$S_{LCI} = S_{n \text{ 評価年}} - S_0$$

方程式2A

S_{LCI} がLCIIに関連した正味の炭素ストック量である場合、 n は評価年、 S_n は評価年の総ストック量、 S_0 は責任期間開始直前である基準状態の総ストック量を表します。もう一つの方法として、これは次のように表すこともできます。

$$S_{LCI} = \sum_{n=1}^{n=RW} Y_n = \sum_{n=1}^{n=RW} (S_n - S_{n-1})$$

方程式2B

nは責任期間(RW)内の各年、 Y_n は年間の炭素ストック量の正味の増減、 S_n は責任期間内の各評価年における総ストック量、 S_{n-1} は評価年の前年のストック、 S_0 は基準状態となります。方程式2Bは、責任期間開始以降の各年の年間増減の積算となります。

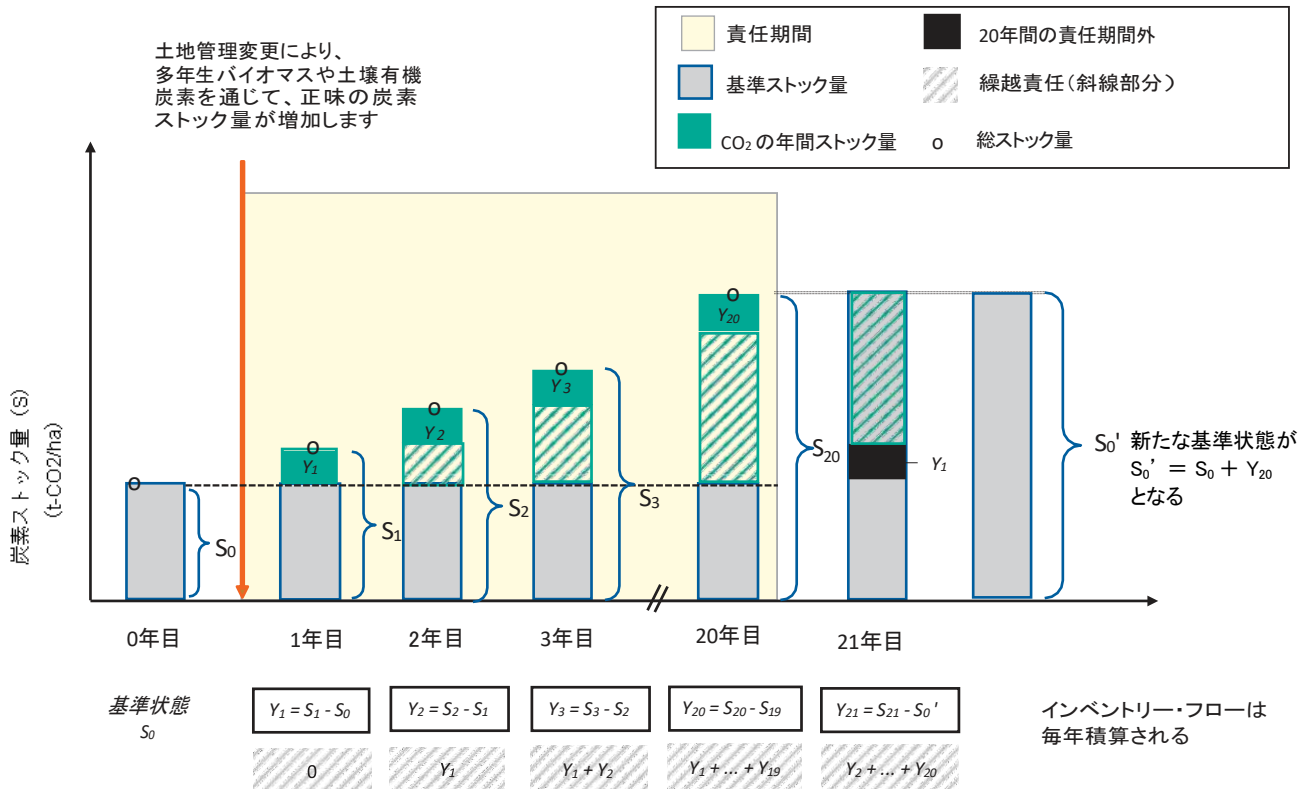


図4. 土地管理変更により、20年間にわたり毎年の炭素ストック量 (Y) が正味の増加につながるという仮説に基づいたインベントリの模式図。貯留されたCO₂として関連するインベントリは、責任期間 (RW) 全体にわたる年間ストック量の増加を積算したものである。この例では、責任期間 (RW) は20年に設定されている。時間の進行により、責任期間もLUCの算定と同様にシフトするものとする。この例では、21年目のインベントリに関連するストック量は S_0' で、21年目と1年目のストック量の変化を考慮している (評価年から20年を引いて、新しい責任期間が開始)。評価年における炭素ストック量の正味の変化は、評価年 (S_{20}) と基準状態 (S_0) の差異として (方程式2A)、または評価年とその前年の差異 (すなわち Y_n) の積算として (方程式2B) 計算することができる。

図4は、炭素ストック量が増加した場合のみの、土地管理変更以降の関連するインベントリを示しています。炭素ストック量の増加は、責任期間 (例: 20年間) 内においてのみ繰り越されることに注意してください。

炭素ストック量に増減がある場合、すなわち責任期間中にストック量に変化がある場合、実務者は S_{LCI} の2つの可能性のあるフローを個別にインベントリ化するものとします。

- 1) $S_n > S_0$ の場合に貯留されたCO₂としての S_{LCI}
- 2) $S_n < S_0$ の場合に排出されたCO₂ストックとしての S_{LCI}

図5は、土地管理変更の開始後、一定期間にわたり炭素ストック量の増減があるという仮説の例を示しています。この気候に関連するフローには、貯留されたCO₂とCO₂ストックの排出があり、これらのインベントリの繰越責任が責任期間に対して可視化されています。この例では、1年目には管理手法の変化による炭素ストックの増加があります（Y₁）。しかし予想に反して、2年目には前年に増加したストック量は生物起源のCO₂排出として失われ、追加のCO₂ストックは排出され（Y₂）、総ストック量が基準状態を下回ることになります。システム内の貯留がなくなったため、前年の貯留に対する繰越責任はありません。3年目には、同じ農業手法によって再び炭素ストックを構築（Y₃）することができ、システムから失われた前年（Y₂）のストック排出の繰越責任が相殺されます。4年目に、農業手法は継続され、新たな量の炭素を貯留（Y₄）し、1~3年前の排出と除去の責任を繰越します。21年目には、炭素ストック量は安定し、繰越責任に関連した便益と影響は責任期間から外れ始め、「責任期間外」の炭素ストック量は、もはやインベントリに関連があるとは見なされなくなります。

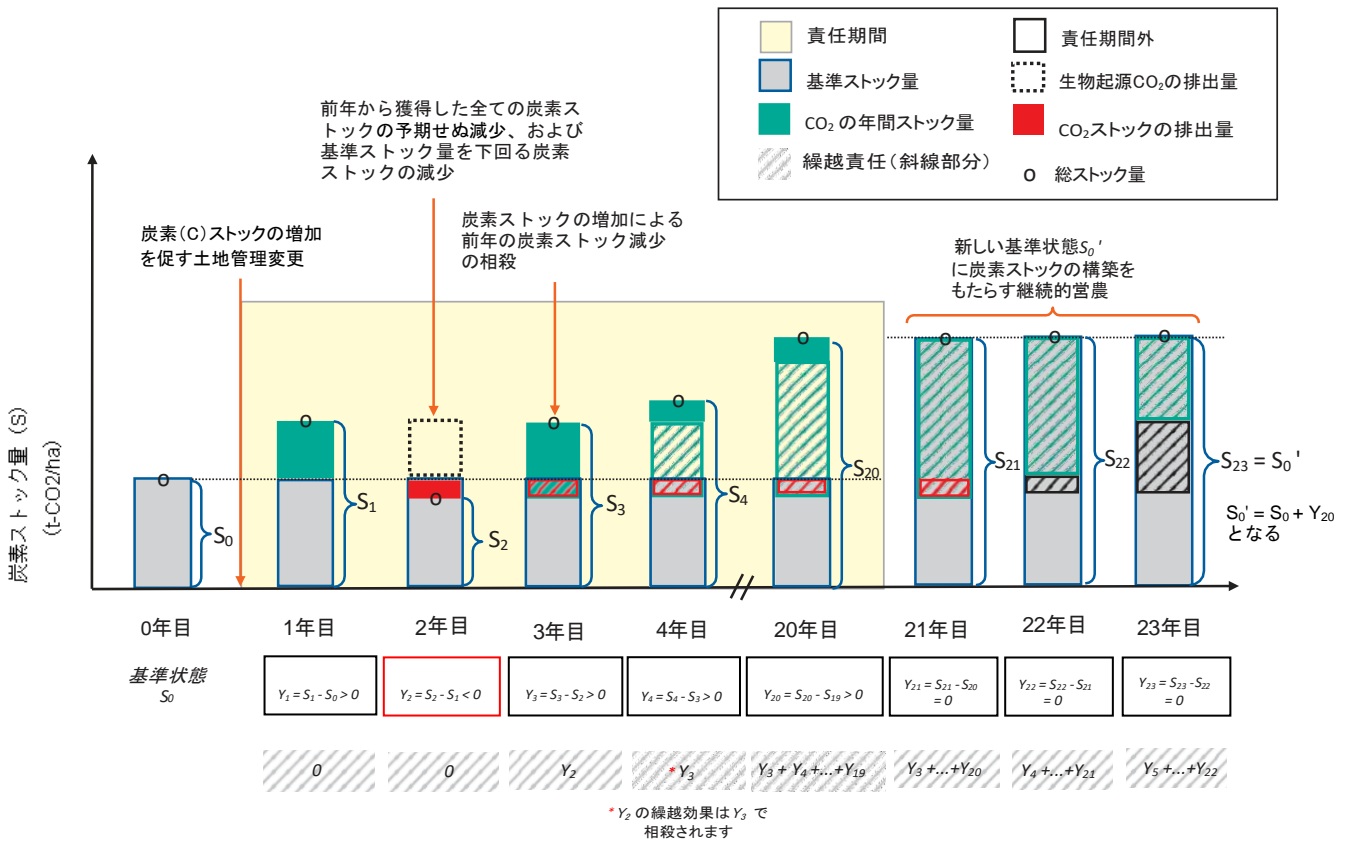


図5. 土地管理変更によりストックが変動し、その結果としてCO₂の貯留、CO₂ストックの排出、生物起源CO₂の排出をもたらす仮説に基づいたインベントリの模式図。関連するインベントリは責任期間（RW）全体を通して、年間のストック増加を考慮している。この例では、責任期間（RW）は20年に設定されている。時間の進行により、責任期間もシフトするものとする。この例では、貯留されたCO₂と排出されたCO₂ストックについては繰越責任を示すが、生物起源CO₂の排出は気候に関連していないため繰越されない。これは方程式2Bの説明となる。

たとえば、有機炭素を土壤に施用する際に排出される生物起源CO₂量（図2を参照）も含め、物質収支を確保するためにシステムを出入りするすべてのフローをインベントリ化することは優れた方法です。そのような高速循環型の生物起源CO₂放出（たとえば、最近光合成によって大気から除去されたCO₂である施用された糞尿や堆肥由来のCO₂放出）は、気候への影響を無視できる（特性化係数は0）というのが統一見解です（ただし、糞尿やその他の有機物から放出されるCH₄とN₂Oは、他のLCA算定ガイドラインに従って考慮されなくてはなりません）。例外として、堆肥として泥炭を使用する場合、泥炭地の炭素は数百年（もしくは数千年）にわたって隔離されており、その炭素の放出（土地管理を介してであろうと、堆肥といった他の手段を介してであろうと）は、気候に関連したCO₂排出であると見なされるべきです。そのため、このインベントリ・フローのモデル化の詳細は、隔離された炭素の増減による便益と影響に焦点を当てた現在のガイドライン案では網羅されていません。

一般に炭素隔離をモデル化する場合、生物起源のCO₂排出のフローは、農場に追加された炭素（堆肥や糞尿を介してなど）と、土壤有機炭素ストックの形で農場に残っている炭素の差として導き出すことができます。一例として、100年の時間枠で土壤に追加された全炭素の10%の炭素隔離が推定されています(Petersen他 2013)。

土地管理変更に対する主なインベントリ収集方法は以下のとおりです。

- **土壤有機炭素（SOC）の実験的モデル**（例：IPCCのTier I およびTier II モデル）
- **プロセスベースのSOCモデル**（例：RothC、Century SOC Tier III モデル）
- **測定**（例：土壤有機炭素サンプル）
- **多年生バイオマス樹木と生垣の相対成長式**（例：IPCC Tier I モデル、および学術文献の手法）、および必要な関連入力変数（例：胸高直径、樹さ）

本ガイドラインでは、インベントリは農場レベルでの評価のため、単位面積を参照しています。実務者はたとえば生産量や配分方法等を考慮し、LCAの既存の手法に従って、機能単位または質量単位ごとに結果を得る責任があります。

6.3. 土地管理変更

土地利用変化が土地ベースの炭素量算定に与える影響の算定は、GHGプロトコル農業ガイダンス⁸などで詳しく説明されているため、本ガイドラインは、土地管理変更に関する大きな知識のギャップを埋める役割を果たしています。

土地管理変更とは、農場の土壤やバイオマスの全体的な炭素ストックに影響を与える農業手法の変更のことを指します。この変更は、土地利用が変化しないような土地利用カテゴリーの範囲内で行わなければなりません（たとえば、耕起耕作地から不耕起耕作地への変更や、低投入から高投入の草地への変更など）。

⁸ <https://ghgprotocol.org/agriculture-guidance>

本ガイドラインにおいて、気候変動に関する政府間パネル（IPCC）によって定義されている関連する土地利用とは、耕作地と草地、および湿地（泥炭地）です。考慮すべき土地管理変更を非網羅的にリストアップしたものが、表1に挙げられています。表1に示された土地管理変更は、いずれの場合も必ずしも炭素ストックの変化につながるとは限らないため、各評価ではケースバイケースで土地管理変更を検討しなければなりません。農業システムが定常状態ではなく、継続的な営農によって正味の炭素ストック量に変化があるという証拠がある場合、表1にある以外の土地管理変更や継続的な営農が考慮されます。

インベントリの収集方法の例は、手法の有用性に関して提案されています。Tier I、II、およびIIIは、適用される方法論の複雑さ、モデルとなるパラメーターの地域特異性、および空間分解能の程度を表しています。Tier IIは、集約された実験データに基づいたデフォルト値を伴うよりシンプルな手法になります。Tier IIIにも、より高度なデータ分解（国レベルなど）を伴ったシンプルな方法が取り入れられています。Tier IIIには、モニタリングと一次データ収集（IPCC 2006）に基づくより複雑な手法と、IPCCによってまだ文書化されていない革新的なモデルが含まれています。データとリソースが利用でき、強固な意思決定に必要な場合は、常に上位階層（Tier）の手法が推奨されます。

表1. 地理空間条件および厳格な管理手法に応じて土壌やバイオマス中の炭素隔離またはCO₂排出が発生する可能性のある、乳牛および肉牛セクターに関連する土地管理変更の一部

土地管理変更	関連する炭素プール	インベントリ収集方法の例
低度あるいは高度の有機土壌改良剤（残留物、堆肥、糞尿など）を伴った、耕起から省耕起または不耕起への変更	土壌有機炭素	Tier I、II、IIIのいずれの方法も適用可能である
選択的植栽による草地管理の変更	土壌有機炭素	選択的植栽と草地管理は、その土地固有のものであり、非常に可変的であるため、Tier III 法を必要とする場合がある
土壌改良剤による炭素と窒素（C/N）の平衡状態の達成と制御	土壌有機炭素	Tier I、II、IIIのいずれの方式も適用可能である
断続的な裸地から、被覆作物または輪作を伴う管理への変更	土壌有機炭素	輪作に関する具体的なシナリオは、その土地固有のものであり、非常に可変的であるため、Tier III 法を必要とする場合がある
高強度放牧から低強度放牧への変更	多年生バイオマスと土壌有機炭素、またそのいずれか	Tier I、II、IIIのいずれの方法も適用可能である
適応型マルチパドック放牧といった放牧手法への変更	多年生バイオマスと土壌有機炭素、またそのいずれか	特殊な放牧手法は、その土地固有のものであり、非常に可変的であるため、Tier III 法を必要とする場合がある
在来種などの再生生育の容認	多年生バイオマスと土壌有機炭素、またそのいずれか	在来種の再生は、その土地固有のものであり、非常に可変的であるため、Tier III 法を必要とする場合がある

土地管理変更	関連する炭素プール	インベントリ収集方法の例
樹木や生垣がない、または少ない状態から、多くある状態への変更	多年生バイオマスと土壌有機炭素、またそのいずれか	樹木と生垣の追加は非常に可変的であり、その土地固有のものであるため、Tier III 法（すなわち、気候帯に敏感な相対成長式）を必要とする場合がある
泥炭地での排水または浸水手法の変更	泥炭炭素	泥炭地の管理は、その土地固有であり、非常に可変的であるため、Tier I および Tier II 法も可能であるが、Tier III 法を必要とする場合がある

6.4. 継続的な営農

継続的な営農の場合、1年あたりに減少・増加する炭素ストック量は、当年のストック量と20年前のストック量の差を20年で割ったもの、すなわち $1/20 \times S_{LCI} = 1/20 \times (S_n - S_{n-20})$ として算出できます。2A式に従うと、この場合の S_n は評価年、 S_{n-20} は評価年の20年前、つまり S_0 となります。

以下は、責任期間内に離散事象がない場合でも、炭素隔離が継続的な実践によって発生する可能性がある状況の例です。

例1: 責任期間は20年間に設定します。ある泥炭地が過去50年間排水されており、炭素ストック量が減少し続けているため、評価年のインベントリは、過去20年間の全炭素ストック量の損失に関連しています。

例2: 責任期間は20年間に設定します。地理空間条件（低温など）により、50年間にわたって継続的に炭素ストックを追加する管理を行ったとしても、土壌は最大の炭素ストック量に達していません。Tier I および Tier II のデフォルト値は平衡状態に達するまでの期間を20年と想定しているため、評価年のインベントリは、Tier III 方式に基づく必要があります。

継続的な営農の場合、関連するインベントリは責任期間にわたって繰り越すことができます。この種の算定では、土壌やバイオマス中の炭素を隔離する継続的な営農を推進し、炭素ストックを排出するような、たとえば土壌有機炭素やバイオマスを枯渇させる可能性がある手法を行わないようにできます。

6.5. 鉱質土壌のCO₂排出および貯留のインベントリ

土壌有機炭素のインベントリは、鉱質土壌および有機土壌の両方について、農場のヘクタールごと、もしくは単位面積ごとに計算されなければいけません。農場によっては、単位面積ごとの「区画」（土地の区域）によって生産手法が異なる場合や、農場全体で地理空間条件（土壌タイプなど）が異なる場合もあります。この場合、各区画（土地管理と地理空間条件の固有の組み合わせ）は、総農地面積を考慮した加重平均などによって算定される必要があります。

区画と同様に、作物や牧草の輪作（同じ土地単位での連続した利用）も、ある作物や牧草が輪作期間中に畑を占める時間の割合で処理することができます。たとえば、トウモロコシが典型的な輪作期間中に畑を20%占有する場合、代表的な単純化として、これはある年の畑の面積の20%と見なすことができます。農業者や専門家の知識に基づいて典型的な輪作を考え、複雑な輪作の場合は、できるだけ簡略化して計算することをお勧めします。図6に、様々な区画の輪作の例を示します。

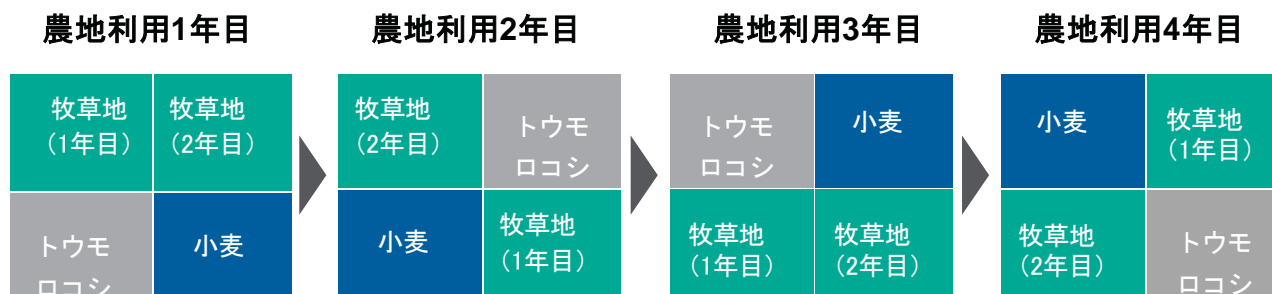


図6. 土地区画における様々な作物と牧草の輪作

図6を単純化して計算すると、どの年も牧草が50%（16区画のうち8区画が輪作）、トウモロコシ25%、小麦25%（16区画のうち4区画が輪作）となります。

FAO畜産環境評価成績（LEAP）ガイドライン⁹は、本ガイドラインでは取扱われていない土壤有機炭素のサンプリングを実施するための包括的な推奨事項と手順を提供しています。土壤有機炭素の測定に利用できるリソースがある場合、そちらを利用の方がモデル化よりも望ましいと思われませんが、データの変動性を考慮すると、土壤有機炭素の測定は長期的な時間スケールでのみ関連する可能性があり、いずれの年でもLCAやGHG算定評価を行うには実用的ではない場合があります。

特に鈹質土壌については、本ガイドラインでは、「2006年IPCC国別温室効果ガスインベントリガイドラインの2019年改良の第4巻、農業、林業、その他土地利用（AFOLU）」で記載されている情報を使用して鈹質土壌中の土壤有機炭素の増減を推定することを推奨しています。IPCCのデシジョンツリーは、より高い階層の手法が優先的に考慮される、適切な階層手法の選択（IPCC 19R、第4巻、図2.4を参照）を通して、利用者を誘導することができます。本ガイドラインは、LCAに炭素隔離を含めるための推奨事項を提供する最初のステップであるため、実務者がこれらのモデルの適切かつ正確な適用を可能にするリソース（専門知識、時間、資金）を入手できる場合、Tier IIIのプロセスモデルを使用することを推奨します。それ以外の場合は、土壤有機炭素（SOC）を考慮するための、よりシンプルなTier IおよびTier IIの実験的モデルが許容されます。いくつかの革新的な土地管理変更では、モデル化技術が利用できないこともあります。

9 <http://www.fao.org/3/ca2934en/CA2934EN.pdf>

Tier IおよびTier IIのSOC変化に関するIPCCの手法は同じモデルを使用していますが、Tier IIは場所が不明な場合に一般的なデフォルト値を使用し、Tier IIIは国や地域固有のデータを使用しているため、後者が優先的に利用されるべきです。

Tier IかTier IIのいずれかの方式を適用するには、（国別などの）固有の気候や土壌のタイプに関して区画エリアを定義することから始まります。一つの農場に、気候や土壌のタイプが異なる複数の区画エリアが存在する場合があります。次に、責任期間内で離散事象が発生した場合、参照表（たとえば、IPCC 2006第6章の表6.2にあるデフォルト値）から各区画の土壌有機炭素ストックの基準状態（SOC_{REF}）が定義されます。この基準ストックに、土地利用変化（FLU）、管理手法（FMG）、有機土壌改良材の投入（Fi）に関連した係数を乗じ、新しい基準ストック（SOC_{REF}）が得られます。両者の差は、2つの状態の間のSOCの変化であり、炭素ストックの増減につながります。同じ農場内で複数の土壌タイプ、気候地域、もしくは管理手法がある場合、この手法をそれぞれの区域に個別に適用しなければならず、それによって区画の「加重平均」を構築することができます。

被覆作物は実験的モデルでは明確に取扱われてはいませんが、「無糞尿で高い」FMG係数の使用によって、被覆作物やその他の植物の残留物、あるいは糞尿以外の有機物による土壌への炭素投入量の増加を考慮することができます。収穫などによって除去される可能性がある被覆作物中の炭素は、隔離された物質とは見なされません。

土壌は極めて複雑なシステムであり、家畜の生産下では、さらに複雑です。管理手法に対する土壌有機炭素の反応は、気候、土壌の種類、および植生に依存します。放牧システムでは、放牧の強度に関連した植物の除去や糞尿の投入などの追加的要因が土壌中の炭素蓄積に影響を与えます。放牧は種類が多く、植物種、土壌、および気候も多様であるため、放牧の影響を予測することは困難です。したがって、現在のところ、放牧地におけるSOCストック量とその変化を推定する適切な方法論についての統一見解はありません（FAO 2019）。

例

IPCCガイドライン（2006）のTier I方式による、草地におけるSOC変化量の算出例を以下に示しています。温暖湿潤地域の砂質土壌で過放牧されている草地を、放牧の圧力を緩和することで改良しています。責任期間は20年間に設定されています。

ステップ1

目的：土壌の種類を特定すること（有機質土壌か、鉱質土壌か）。

例：この場合、土壌は鉱質です。

ステップ2

目的：IPCCの表2.2を参考に、インベントリを作成する草地の各エリアの気候と土壌タイプに基づいてSOCの基準値を定義すること（IPCC 2006）。

例：この場合、深さ0～30cmでSOC_{REF}値が71トンC/haである単一のエリアが対象です。

ステップ3

目的：責任期間の開始時点（すなわち20年前）のSOC₀を算出すること。初期の管理手法の変動係数（F_{MG_0}）と有機物投入によるストックの変動係数（F_{I_0}）を選択します（IPCC 2006、第6章の表6.2のデフォルト値）。これらの係数にSOC基準値を乗じると、「初期」の土壤炭素ストック量（SOC₀）が得られます。

F_{LU_0}：1（土地利用変化がないため、草地のまま残ります）

F_{MG_0}：0.95（土地管理のための投入を受けていない過放牧または中程度に劣化した草地）

F_{I_0}：該当なし（改良された草地にのみ該当）

$$\text{SOC}_0 = \text{SOC}_{\text{REF}} \times F_{\text{LU}_0} \times F_{\text{MG}_0} \times F_{\text{I}_0}$$

$$\text{SOC}_0 = 71 \times 1 \times 0.95 \times 1 = 67.45 \text{ トンC/ha}$$

ステップ4

目的：この管理手法を20年続けた後の新しい平衡状態であるSOC_{REF}を計算すること。前のステップと同様に、土地利用変化がないため、F_{LU'} = 1となります。管理手法による変動係数（F_{MG'}）と、新しい管理手法に関連する炭素投入による変動係数（F_{I'}）（IPCC2006の表6.2のデフォルト値）を選択します。係数F_{LU'}、F_{MG'}、F_{I'}にSOC_{REF}を乗じると、土壤炭素ストック量（SOC_{REF'}）の新しい平衡状態が得られます。

例：

F_{LU'}：1（土地利用変化がないため、草地のまま残ります）

F_{MG'}：1.14（中程度の放牧の圧力を伴う草地の改良）

F_{I'}：1（追加的な管理投入のない改良された草地）

$$\text{SOC}_{20} = \text{SOC}_{\text{REF}'} \times F_{\text{LU}'} \times F_{\text{MG}'} \times F_{\text{I}'}$$

$$\text{SOC}_{20} = 71 \times 1 \times 1.14 \times 1 = 80.94 \text{ トンC/ha}$$

ステップ5

目的：責任期間（20年間）にわたるSOCの年平均変化量を算出すること。

例：

$$\Delta \text{SOC} = (\text{SOC}_0 - \text{SOC}_{20})/t = -13.49 \text{ t} / 20 = -0.67 \text{ トン C/ha年}$$

ステップ6

目的：SOCを化学量論的CO₂に変換すること。

例：

$$\text{CO}_2 \text{除去量} = 0.67 \times 44 / 12 = 2.46 \text{ トンCO}_2 \text{ C/ha年}$$

IPCCのSOC方程式はシンプルで使いやすい分、大きな制約があります。研究によっては、IPCCの方程式の適用が妥当であることを正当化するために、土壤有機炭素の変化を観察し、検証する必要があります。例えば、これらのIPCCの方程式は、あまり厳しくない放牧管理が炭素ストックの増加につながることを前提としていることが挙げられます。炭素ストックの増加については、農場で行われる他の手法と、気温、土壤、および植生といった地域の条件に左右されるため、放牧の手法を変更したとしても保証することはできません(Contant他 2017)。さらに、一部の地域では放牧と一年生作物の輪作を行うのが一般的であり、そのような輪作によって引き起こされるSOCの変化は、IPCCの方程式では明確に算定されません。SOCを作物と牧草の輪作に関連づける複数の研究（Garcia-Préachac他 2004、Grahmann他 2020）では、連作と比較して、SOC、窒素濃度、および収穫量の増加があることが示されています。しかしながら、そのような輪作やその他の放牧管理の手法が土壤の特性にどの程度影響するかについて、研究は現在も進行中です。本ガイドラインの改版時には、作物と牧草の輪作を含むさまざまな放牧管理の手法に関する進行中の研究を考察する必要があります。

Tier IおよびTier II方式に関する一般的な考察の概要：

- 土壤有機炭素（SOC）ストック量は、一定の気候、土壤タイプおよび土地管理で平衡状態に達します。
- 土地管理手法の変更が加えられると、土壤有機炭素ストック量は20年間と想定される（定常状態への）移行期間（D）の後に、新しい平衡状態に達します。
- 土壤有機炭素ストック量の推移は直線的です（すなわち、2つの炭素ストック量の差を20で割ったものです。IPCC 19R 第4巻、2.25の方程式を参照）

いずれの場合も、単位面積あたりの土壤有機炭素の単位で収集されるインベントリは、44/12（炭素に対するCO₂の分子量比率）を乗ずることによって、化学量論的CO₂に換算されるものとします。

6.6. 有機質土壤(泥炭地)における有機物の分解によるCO₂ストック排出のインベントリ

湿地とは、年間を通して、または1年のある期間が水で覆われているか、水が浸透している土地（泥炭地など）であり、その他の土地利用カテゴリー（森林、農地、草地および開拓地（IPCC 2006 付属書3A.5、第3章、第4巻））には分類されません。泥炭地は、一般に植物生産と泥炭蓄積の速度が有機物の分解速度を上回ることから、重要な炭素吸収源となっています。しかし、土地利用変化や持続不可能な土地管理（継続的な排水など）によって、泥炭地は長期的な炭素吸収源から最終的に炭素排出源へと変化します。

肉牛および乳牛のサプライチェーンに典型的な土地利用（すなわち、放牧と一年生耕作地）が、関連する期間で泥炭地に隔離される炭素の増加に繋がるという証拠はありませんが、管理手法によって排出量を削減できるという証拠はあります。排水は泥炭地での農業を可能にしてきた一般的な管理手法です。排水は人為的に地下水位を下げ、泥炭の酸化によって温室効果ガスの排出量（CO₂とN₂O）の増

加につながりますが、これは泥炭地の排水と酸化が続く限り、何世紀にもわたって継続する可能性があります。場合によっては、地下水位が高い排水溝でメタン生成が起こり、地表から20cm未満の排水で再湿潤化するとCH₄が排出される可能性があります、これも算定する必要があります。

さまざまな研究によって、たとえば再湿潤化といった泥炭地での管理手法を改善することで排出量を削減できないか検討されています。管理手法の一つは、農作業を引き続き実施できるように泥炭地を再湿潤化させることです。再湿潤化により泥炭地の地下水位が上昇・回復し、それによってCO₂とN₂Oの排出量が減少します。また暗渠（浸水）排水といった技術によって排出量が減少する可能性もあります。

現在のところ、泥炭地での農業の緩和策に関連する温室効果ガスを乳牛セクター内でどのように監視すべきかの基準はありません。本ガイドラインでは、炭素ストック量の正味の減少、つまりCO₂ストックの排出量を推定するために提示された手法は、2006年IPCC国別温室効果ガスインベントリガイドラインに対する2013年追補から得ています。たとえば、付属書Aで提示されているオランダで実施された研究（Lesschen他 2020）に基づいたTier II方式のように、より特定の地域で実施された数多くの研究があります（Tiemeyer他 2020）。気候との関連性を考慮すると、動水位データ、水位低下率、および浸水排水のデータなどの詳細なデータの改善が今後利用できるようになる可能性は高いです。特定の地域でこのような詳細なデータが利用できる場合は、泥炭地からのCO₂とN₂Oの排出量を推定する際にこれらのデータを含めることを推奨します。

湿地に関するIPCCガイドラインでは、排水された土地面積に排出係数を乗じることで、有機土壌からの現場での年間CO₂排出量と除去量を推定するための手法（方程式3）が提示されています。Tier I方式の、排出係数のデフォルト値は2013年IPCC報告書の表2.1をご参照ください。より詳細なデータが利用できる場合は、国別の排出係数や気候管理システムのより細かい分類に基づいてTier IIを適用することができます。IPCCガイドライン（IPCC 2013）のセクション2.2には、排水された有機土壌からの土壌炭素の直接損失と、溶存有機炭素（DOC）の損失とCO₂以外の排出による現場外での年間CO₂排出量の推定のための詳細な手順が示されています。

$$S_{LCl} = \sum_{c,n,d} EF_{c,n,d} \times \frac{44}{12} \quad \text{方程式3}$$

S_{LCl}が、土地利用カテゴリーにおける排水された泥炭地からの炭素ストックの年間減少量（トンCO₂ストック排出量）である場合、EFは、気候区分 c、養分状態 n、排水クラスdによる排水された泥炭地の排出係数（トンC/ha）であり、44/12はCO₂と炭素の分子量比、nは基準状態が開始されてからの年数です。この場合、排出係数はすでに基準状態と評価年の間の年次変化を算定しているため、その式は方程式 2A-Bの代わりに直接使用することができます。場合によっては、パラメーターc、n、dのさまざまな組み合わせが同じ農地で発生することもあります。この場合、各区画（土地管理と地理空間条件の固有の組み合わせ）は、たとえば農地の総面積で加重平均することによって、算定される必要があります。

泥炭地では、土地利用変化と見なされる離散事象がない場合、年間の排出が（管理の状況によっては）継続する可能性があるため、責任期間の概念は適切ではない可能性があります。従って、管理に応じた年間の総排出量は S_{LCI} で考慮することができます。

6.7. 多年生バイオマスに貯留されたCO₂のインベントリ

土壌と同様、多年生バイオマスのインベントリ収集は基準状態に関連しています。もし離散事象（たとえば、樹木や生垣を新たに植える、過去数年間に新たに多年生植物を再生させるなど）の前に多年生バイオマスが存在していない場合、バイオマスの基準状態は「0」であるため、インベントリは樹木に貯留されている化学量論的CO₂全体として实际的に計算することができます。しかしながら、以前から農場に存在する多年生バイオマスが離散事象の後に農場に残る場合、このストックは基準状態の一部であるため、ストック増加のインベントリに含めることは推奨されません。例として、森林地域を含む農場が購入された場合、森林地域は基準ストックに含まれ、伐採されない限り（伐採された場合は、気候への影響となる）気候に関連したインベントリに含めることはできません。このように、責任期間（RW）が有効であり、RW=20で、樹木が20年より前に植えられた場合、本ガイドラインでは、継続的な営農（6.4節）を考慮した算定を行うよう提案しています。同様に、RWを超える樹齢の農場内の樹木が伐採され、CO₂が放出される場合、この放出は土地利用変化のモデル化の計算に類似した気候への影響と見なされるものとします。植栽または、再生やその他の管理手法を許可する前に、焼却やその他バイオマス除去が行われる場合、除去されたバイオマスからのCO₂排出は、CO₂ストック排出（ S_{LCI} ）の関連インベントリに含まれるものとします。

以下は、それまで多年生バイオマスがなかった農場に、1ヘクタールあたり100本の樹木が植えられるという離散事象が発生する場合における計算例です。

例

100本の白樺（*Betula pendula* Roth）が、それまで多年生バイオマスがなかった1ヘクタールの土地に植えられます。責任期間は20年間に設定します。樹木は2010年に植えられ、現在は2020年です。衛星画像によると、1995年以前には多年生バイオマスが存在していた記録がないことが示唆されています。この地域は、温暖湿潤気候です。離散事象と土地管理変更が植林に関連していることから、基準状態は、多年生バイオマスが存在しない、植林という離散事象の直前の状態を表しており、それゆえに土地面積あたりの炭素ストックの基準状態が $S_0 = 0$ kg CO₂となります。

ステップ1

目的： 次のステップで基準状態を設定し、適切な相対成長式を選択するために、「振り返り」を行って、農場、既存のバイオマス、および気候条件に関する過去の情報を収集すること。

プロセス： 農場に存在する樹種とヘクタールあたりの樹木の数を特定します。過去20年間の衛星画像を調べます。気候条件を特定します。気候条件は通常、3つの降水区分と気候区分（熱帯または温帯）に分類されます。

表2－降水区分と気候区分

降水量 2000mm超	降水量 2000mm未満、1000mm超	降水量 1000mm未満
多雨	湿潤	乾燥

ステップ2

目的： 農場に存在する樹種ごとに、最も正確な相対成長式を選ぶこと。

プロセス： 農場にある樹木のそれぞれの種（もしくは種類）の「地上部バイオマス」（AGB）を計算するための相対成長式を選択します。相対成長式を選ぶ際は、気候条件よりも樹種を優先させます。もし自身の事例に樹木固有の方程式がない場合、IPCCで提案されているような、一般的な相対成長式を選択します。たとえば、IPCC付属書4A.1の温帯気候における広葉樹のバイオマス推定のための一般方程式があります。

$$AGB = 0.5 + \frac{25,000 \times DBH^{2.5}}{DBH^{2.5} + 246,872}$$

定義：

AGB＝地上部乾物バイオマス（kg）

DBH＝胸高直径（1.3 m）[cm]

炭素の研究によると (Uri他 2012)、温帯気候にある白樺の相対成長式は、以下の通りです。

$$ABG_n = (\alpha \times DBH^\beta) / 1000$$

定義：

AGB＝評価年内で樹齢が「n」時点での、地上部樹木乾物バイオマス（kg）

DBH＝胸高直径（1.3 m）[cm]

α＝第一パラメーター

β＝第二パラメーター

表3 – Uriらの研究(2012)による3つの土地におけるその土地固有の樹木パラメータ例

	α	β
低齢木 (樹齢0~17年)	136.03	2.331
中齢木 (樹齢18~45年)	182.94	2.309
高齢木 (樹齢45年超)	121.24	2.503

ステップ3

目的：評価の精度を高めるために地上部の物理的パラメーターを収集すること。

プロセス：評価される樹木の物理的パラメーターを収集します。少数の木の直径や高さといった地上部の物理的パラメーターを直接測定したり、測定されたサンプルの平均を求めたりすることができます。この作業が可能であれば、分析の精度を著しく高めることができます。この物理的パラメーターは、樹齢とパラメーターの関係式を通して推定する必要があり、時には、樹齢さえも推定する必要があります。

この例では、相対成長式はDBHのみを必要とします。測定は高さ1.3mの地点で行われ、センチメートルで報告される必要があります。

ステップ4

目的：収集したパラメーターに従ってAGBを計算すること。

プロセス：選択した相対成長式と収集した物理的パラメーターを使用して、バイオマスのAGBを計算します。

白樺のDBHを測定し、樹齢10年の時の評価年の値は5cmです。そして、そのAGBを計算することができます。

$$AGB_{10} = \frac{136.03 \times DBH^{2.331}}{1000} = \frac{136.03 \times 5^{2.331}}{1000} = 5.79 \text{ kg バイオマス/本}$$

下付き文字「10」は、評価年における樹齢を表しています。

立木密度（100本/ha）を乗じることで、農場の地上部バイオマスの総量を推定することができます。

$$AGB_{10} = 5.79 \frac{\text{kg}}{\text{本}} \times 100 \frac{\text{本数}}{\text{ha}} = 579 \frac{\text{kg}}{\text{ha}} = 0.579 \frac{\text{Mg (トン)}}{\text{ha}}$$

ステップ5

目的：算出したAGBに従ってBGBを計算すること。

プロセス：一貫性を保つため、地上部と地下部のバイオマスの定量化は、同じ情報源を使用することが可能な場合に推奨されます。Uriらの研究（2012）では、総バイオマスの19.3%は地下バイオマスとなっています。しかしここでは使いやすさを考慮し、IPCCが附属書4A.1で示した地下バイオマス（BGB）に関する方程式（単位：Mg/ha）を使用します。

$$BGB = \exp(-1.0587 + 0.8836 \times \ln(AGB) + 0.2840)$$

定義：

BGB=Mg/ha単位の樹木根乾物バイオマス

AGB=Mg/ha単位の地上部乾物バイオマス

ステップ6

目的：最終の S_{LCI} を得ること。

プロセス：必要な炭素ストックを合計し、 S_0 を差し引きし、化学量論的 CO_2 に換算します。

$$\text{総バイオマス} = AGB + BGB$$

$$\text{総バイオマス} = 579 \text{ kg AGB / ha} + 284 \text{ kg BGB / ha} = 863 \text{ kg 総バイオマス/ ha}$$

バイオマス中の炭素の比率（すなわち47%）を乗じます：

$$C_{(\text{mass-ha})} = 863 \times 0.47 = 406 \text{ kg C/ ha}$$

以前に多年生バイオマスが存在していなかったことから、関連する基準状態 $S_{0\text{-バイオマス}}$ は「0」です。炭素ストックの増加があるのみであり、また20年の責任期間が考慮されるため、方程式2Aが適用されます。

ヘクタールあたりの化学量論的 $kgCO_2$ では、評価年に関連するLCIである S_{LCI} ($kgCO_2$ stored-year（評価年の貯留量）/ha)は、以下によって推定されます。

$$S_{LCI} = S_{10} - S_{0\text{-バイオマス}} = 1,489 \text{ kg } CO_2/\text{ha}$$

$$S_{10} = C_{(\text{mass-ha})} \times \frac{44}{12} \quad \text{と定義します}$$

CO_2 と炭素の分子量比が44/12で、関連するストック量(S_{10})は、責任期間の開始後10年とします。

S_{LCI} ($kgCO_2$ stored-year(評価年の貯留量)／本数)を求める場合、立木密度(100本／ha)で割れば、樹木1本あたりの値は14.9 $kgCO_2$ となります。

評価年における樹木数が植林された本数と同じではない場合、枯死した樹木が植え替えられたかどうかを定義する必要があります。もし植え替えられている場合、立木密度は変わりません。しかし、植え替えがなく、枯死によって本数の差がある場合は、以下の方程式を使用しなければなりません。

$$N = N_{\text{植林されたもの}} - N_{\text{枯死したもの}}$$

枯死率がわかる場合、次の方程式を使用することができます。

$$N = N_{\text{植林されたもの}} - (N_{\text{植林されたもの}} \times \%_{\text{枯死率}})$$

7

インベントリの特性化

本ガイドラインでは、炭素隔離を算定するための2つの特性化係数を提案しています。

1) 基準状態からの炭素ストックの減少を表す隔離された炭素の放出(排出)、および2) 完全に可逆的と想定される基準状態を上回る隔離された炭素の増加(貯留)。

貯留されたCO₂として特性化される関連インベントリは、基準状態に対する炭素ストック(バイオマスまたは土壌有機炭素)の増加であり、CO₂ストック排出として特定化される関連インベントリは基準状態に対する炭素ストックの減少です。循環の速い生物起源のCO₂排出(すなわち、堆肥、作物残渣、落葉などによる炭素の減少)に関する新しいガイドラインは提供されておらず、(標準的な手法としての)特性化係数は0 kg CO₂eq/kg 生物起源CO₂ emitted-year(評価年の排出量)とすることが提案されています。例外として、数百年にわたって隔離されてきた泥炭や、その他の土地由来の有機炭素を堆肥または土壌改良材として使用する場合があります、その場合、排出量は1 kgCO₂eq/ kgCO₂ emitted-year(評価年の排出量)という特性化係数によって考慮される必要があります。

気候への関連性について最終結果を得るために、次のような計算を行います。

$$I = S_{LCI} \times CF$$

方程式3

kgCO₂eq単位の気候への影響または便益(I)は、インベントリ(S_{LCI})に関連する特性化係数(CF)を乗じたものであるとします。各インベントリ・フローに関連する特性化係数は表4にまとめてあります。図7は、LCIと特性化による結果の例を示しています。

表4. 特定の年のS_nにおいて基準状態S₀からの炭素ストックの純増減としてインベントリ化される排出されたCO₂および貯留されたCO₂における、ガイドラインで推奨されている特性化係数

インベントリ・フロー	インベントリ単位	特性化係数 (CF)	責任期間を20年とした場合の調整後特性化係数
S _{LCI} S _n < S ₀ の時	kgCO ₂ stock emitted-year (評価年のストック排出量)	1kgCO ₂ eq /kgCO ₂ stock emitted-year (評価年のストック排出量)	0.05 kgCO ₂ eq /kgCO ₂ stock emitted-year (評価年のストック排出量) (20年後に無効となる)
S _{LCI} S _n > S ₀ の時	kgCO ₂ stored-year (評価年の貯留量)	-0.01kgCO ₂ eq / kgCO ₂ stored-year (評価年の貯留量)	-0.05 kgCO ₂ eq /kgCO ₂ stored-year (評価年の貯留量) (20年後に無効となる)

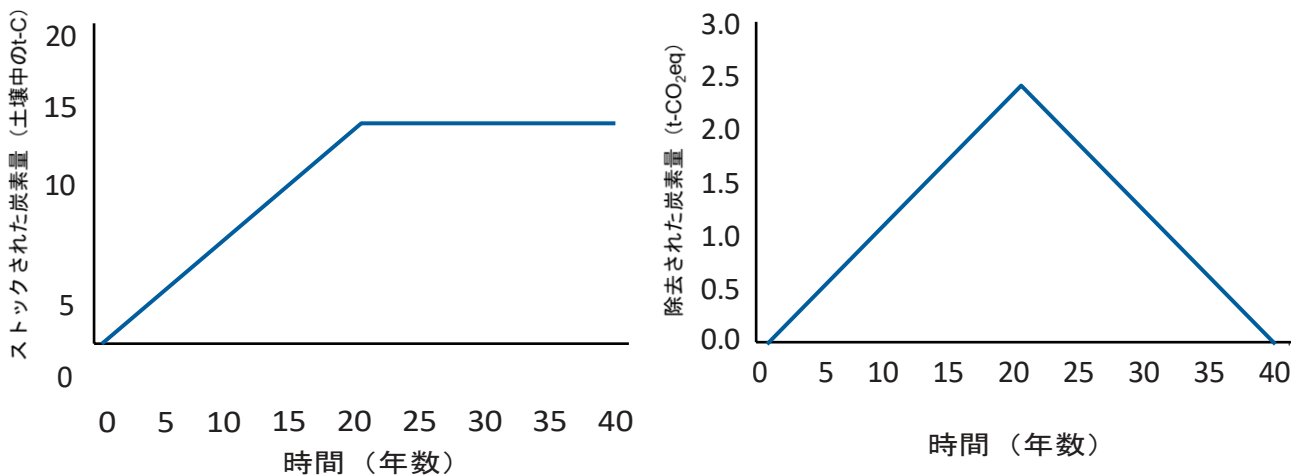


図6 20年目に定常状態に達した放牧地の土壌中において時間経過に伴って増加した炭素ストック (C) のトン数 (t) と、5%の係数を考慮して20年の責任期間にわたって中和効果が持ち越された二酸化炭素換算による除去された炭素の算定 (たとえば、40年目には追加の中和効果を主張することはできず、減少したすべてのストックは排出として扱われる)。

明確化のために、炭素ストックの損失やCO₂として排出があっても、炭素ストックが基準ストック (S₀) を上回って残っている場合、排出は報告されません (これは生物起源の炭素排出の標準的な手法に従います)。この失われた炭素は、隔離されているストック量を減少させる可能性があるため、除去量として主張すべきではありません。実際、このことは、糞尿、堆肥、および残渣からの生物起源CO₂の排出量は、気候に関連するCO₂排出量とは見なさないことを意味します。なぜならそのようなフローは、すでに大気中に存在した炭素が光合成によって除去され、土壌やバイオマスに断続的に貯留され、生物物理学プロセスによって農場から排出されたことを反映しているためです。

そのような循環の速いCO₂の気候への影響は無視できると想定されており、この排出量を追跡することは気候目標に対して関連性がありません。

隔離された炭素が増加する場合、特性化係数は、 $-1/100 \text{ kgCO}_2\text{eq/kgCO}_2 \text{ stored-year}$ (評価年の貯留量) の線形係数 (すなわち、貯留されたCO₂の1年間の気候への便益) であり、言い換えれば、 $-0.01 \text{ kgCO}_2\text{eq/kgCO}_2 \text{ stored-year}$ (評価年の貯留量) または、 -1% の炭素ストックの純増加分のクレジット (便益) と表され、つまり、特定の年における炭素ストック (S_n) が基準ストック (S₀) よりも多いことを示しています。この特性化係数は、安定的で科学的に健全でありながら、容易に適用できる方法を提供するために選択されました。この特性化係数は、欧州委員会による国際基準ライフサイクルデータ (ILCD) 文書 (JRC-IES 2010) によって提案され、複数の著者 (Brandão他 2019、LevasseurおよびBrandão 2012) によってレビューされています。この特性化係数によって次の2点が可能になります。1) 将来、炭素隔離の逆転があるとしても便益の過大評価はありません、2) 責任期間を考慮すると、炭素の貯留を続けることによって継続的なクレジットにすることができます。

8

その他の考慮事項と次のステップ

8.1. LCAソフトウェアへの本手法の適用

ソフトウェアを使用した場合、ソフトウェア構造に変更がなく、新たな特性化係数が加えられないことを想定すると、通常は、炭素ストックの増減(すなわち、~kgのCO₂の貯留、~kgのCO₂の排出)のLCIは、1 kgCO₂eq/CO₂kg(土地利用変化によって放出される化石燃料由来CO₂や生物起源CO₂の排出と同じ特性化係数)で特性化される(乗じる)CO₂フローとしてソフトウェアに入力するために、本ガイドラインで提案される最終的な調整後特性化係数によって調整されることが推奨されます。これは、データベース入力がいづ適用されるか(たとえば、管理変更後の20年間)についてのコメントを付けて、方程式としてソフトウェアに追加することができます。たとえば、評価年に潜在的な可逆性が考慮される場合、炭素ストック増加のLCIは、20年の責任期間では-0.05 kgCO₂eq/kgCO₂ stored-year(評価年の貯留量)によって調整され、土地利用変化に類似したCO₂フローとして入力され、その後、ソフトウェアによって単純に「1」が乗じられます。別の例としては、データベース入力がない農場レベルの情報がない状況で使用され、それが特定の時点での特定の永続的な手法を用いる農場を表す場合、現実的な手法は、たとえば20年間のSOCの増加による-20 tCO₂eqとして、特定の手法でマイナスのCO₂eqとして総炭素隔離量を推定し、100年間で割って年間平均値を得ることです。

8.2. 意思決定におけるその他の考慮事項

炭素隔離は、土地管理の潜在的な結果の一つです。土壌や樹木への炭素隔離を増加させる土地管理は、水分・栄養保持や動物福祉の改善、土地劣化を防止した場合の長期的な収穫量の増加(ただし、場合によっては短期的に収穫量が減少することもあります)といった、その他の便益をもたらす可能性があります。場合によっては、耕起を減らした場合、作物の収穫量を確保するために、害虫や雑草の機械的、化学的、生物的除去といった他の介入が必要になることがあります。本ガイドラインは、炭素隔離を増加させるための手法の変化をもたらす可能性がある便益や影響については網羅していません。いかなる意思決定を行う前にも、土地管理変更によって同時に発生する便益、影響、および意図しない結果について考慮する必要があります。

8.3. 次のステップ

炭素隔離に関する科学的研究がさらに進み、組織的な気候目標がより一般的になるにつれ、このテーマと意思決定への適用方法に関する集団的な理解が強まるでしょう。本ガイドラインは、特に乳牛と肉牛セクターに焦点を当て、LCAとカーボンフットプリントにおける炭素隔離による炭素除去の算定方法に関する統一見解を構築する最初の一步となります。本ガイドラインは、試験プロジェクトや企業の気候戦略プロジェクトでの適用などを通じて繰り返し検証される必要があり、他のセクター（多年生作物や林業など）でも検証および挑戦される可能性があります。今後のガイドラインの改訂では、IPCCの方程式を合理的な確実性を持って適用するために、どの程度のモニタリングと検証が必要であるかを検討する必要があります。本ガイドラインは、他のガイドラインや枠組み（製品環境フットプリントやGHGプロトコルなど）の炭素除去量の算定に関するルールや方法論を更新する際の足掛かりとしての役割を果たします。将来的には、温室効果ガスの算定は、ネットゼロの目標との整合に役立つはずであり、最大炭素隔離能とこの目標までの距離などを考慮することが、戦略を設定する上で重要な次のステップになることでしょう。

9

主な参考文献

1. Bell, M., Lawrence, D., 2009 "Soil Carbon Sequestration - myths and mysteries".The State of Queensland, Department of Primary Industries and Fisheries. <http://www.futurebeef.com.au/wp-content/uploads/2011/09/Soil-Carbon-Sequestration-Report.pdf>.
2. Bessou, Cécile, Aurélie Tailleur, Caroline Godard, Armelle Gac, Julie Lebas de la Cour, Joachim Boissy, Pierre Mischler, Armando Caldeira-Pires, and Anthony Benoist. 2019. "Accounting for Soil Organic Carbon Role in Land Use Contribution to Climate Change in Agricultural LCA: Which Methods? Which Impacts?" The International Journal of Life Cycle Assessment, December.<https://doi.org/10.1007/s11367-019-01713-8>.
3. Brandão, Miguel, Miko U. F. Kirschbaum, Annette L. Cowie, and Susanne Vedel Hjuler. 2019. "Quantifying the Climate Change Effects of Bioenergy Systems: Comparison of 15 Impact Assessment Methods." GCB Bioenergy 11 (5): 727–43. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12593>.
4. Brandão, Miguel, Miko U.F. Kirschbaum, Annette L. Cowie, and Susanne Vedel Hjuler. 2018. "Quantifying the Climate Change Effects of Bioenergy Systems: Comparison of 15 Impact-assessment Methods." GCB Bioenergy, no. June 2018 (December): gcbb.12593. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12593>.
5. Breton, Charles, Pierre Blanchet, Ben Amor, Robert Beauregard, and Wen-Shao Chang. 2018. "Assessing the Climate Change Impacts of Biogenic Carbon in Buildings: A Critical Review of Two Main Dynamic Approaches." Sustainability 10 (6): 2020. <https://doi.org/10.3390/su10062020>.
6. Canadell, Josep G., and E. Detlef Schulze. 2014. "Global Potential of Biospheric Carbon Management for Climate Mitigation." Nature Communications 5. <https://doi.org/10.1038/ncomms6282>.
7. Cherubini, Francesco, Geoffrey Guest, and Anders H Strømman. 2013. "Bioenergy from Forestry and Changes in Atmospheric CO₂: Reconciling Single Stand and Landscape Level Approaches." Journal of Environmental Management 129 (November): 292– 301. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.07.021>.

8. Coleman K., Jenkinson D.S. (1996) RothC-26.3 - A Model for the turnover of carbon in soil. In: Powlson D.S., Smith P., Smith J.U. (eds) Evaluation of Soil Organic Matter Models. NATO ASI Series (Series I: Global Environmental Change), vol 38. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-61094-3_17
9. COWI, Ecologic Institute and IEEP (2021) Technical Guidance Handbook - setting up and implementing result-based carbon farming mechanisms in the EU Report to the European Commission, DG Climate Action, under Contract No. CLIMA/C.3/ETU/2018/007. COWI, Kongens Lyngby.
10. Ekardt, Felix, Benedikt Jacobs, Jessica Stubenrauch, and Beatrice Garske. 2020. "Peatland Governance: The Problem of Depicting in Sustainability Governance, Regulatory Law, and Economic Instruments." *Land* 9 (3): 83. <https://doi.org/10.3390/land9030083>.
11. FAO. (2019). Measuring and modelling soil carbon stocks and stock changes in livestock production systems: Guidelines for assessment (Version 1). Livestock environmental assessment and performance (LEAP) partnership, 170.
12. Garcia-Préachac, Fernando, Oswaldo Ernst, Guillermo Siri-Prieto & José A. Terra. 2004. Integrating no-till into crop-pasture rotations in Uruguay. *Soil and Tillage Research*, 77(1), 1-13.
13. Grahmann, Kathrin, Valentina Rubio Dellepiane, José A. Terra & Juan A. Quincke. 2020. Long-term observations in contrasting crop-pasture rotations over half a century: Statistical analysis of chemical soil properties and implications for soil
14. Guest, Geoffrey, Ryan M. Bright, Francesco Cherubini, and Anders H. Strømman. 2013. "Consistent Quantification of Climate Impacts Due to Biogenic Carbon Storage across a Range of Bio-Product Systems." *Environmental Impact Assessment Review* 43: 21-30. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2013.05.002>.
15. Günther, Anke, Alexandra Barthelmes, Vytas Huth, Hans Joosten, Gerald Jurasinski, Franziska Koebisch, and John Couwenberg. 2020. "Prompt Rewetting of Drained Peatlands Reduces Climate Warming despite Methane Emissions." *Nature Communications* 11 (1): 1644. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-15499-z>.
16. Hauschild, Michael Z., and Mark A.J. Huijbregts, eds. 2015. Life Cycle Impact Assessment. LCA Compendium – The Complete World of Life Cycle Assessment. Dordrecht: Springer Netherlands. <http://link.springer.com/10.1007/978-94-017-9744-3>.
17. Hayek, Matthew N., et al. 2020- "The carbon opportunity cost of animal-sourced food production on land." *Nature Sustainability*: 1-4

18. Horrillo, Andrés, Paula Gaspar & Miguel Escribano. (2020). Organic farming as a strategy to reduce carbon footprint in dehesa agroecosystems: A case study comparing different livestock products. *Animals*, 10(1). <https://doi.org/10.3390/ani10010162> IPCC. 2013. "AR5 Climate Change 2013: The Physical Science Basis — IPCC." 2013. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>.
19. Kuikman, P. J., J. J. H. van den Akker, and F. de Vries. 2005. "Emissie van N₂O en CO₂ uit organische landbouwbodems." <https://research.wur.nl/en/publications/emissie-van-n2o-en-co2-uitorganische-landbouwbodems>.
20. Leifeld, J., and L. Menichetti. 2018. "The Underappreciated Potential of Peatlands in Global Climate Change Mitigation Strategies." *Nature Communications* 9 (1): 1071. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03406-6>.
21. Lesschen, J.P., T. Vellinga, A. van der Linden, and R.L.M. Schils. 2020. "Possibilities for Monitoring CO₂ Sequestration and Decomposition of Soil Organic Matter on Dairy Farms." Wageningen Environmental Research, Report 2993. <https://research.wur.nl/en/publications/possibilitiesfor-monitoring-co2-sequestration-anddecomposition->.
22. Levasseur, Annie, and Miguel Brandão. 2012. "Assessing Temporary Carbon Storage in Life Cycle Assessment and Carbon Footprint : Outcomes of an Expert Workshop, 7th-8th October 2010, Ispra (Italy)." Website. Publications Office of the European Union. <http://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/b79b90ba-9c4e-4004-9208-000662883318/language-en>.
23. Levasseur, Annie, Miguel Brandão, Pascal Lesage, Manuele Margni, David Pennington, Roland Clift, and Réjean Samson. 2011. "Valuing Temporary Carbon Storage." *Nature Climate Change* 2 (1): 6–8. <https://doi.org/10.1038/nclimate1335>.
24. Murray, Brian, Kasibhatla, Prasad. 2014. "Equating Permanence of Emission
25. Reductions and Carbon Sequestration: Scientific and Economic Foundations for Policy Options", Duke Environmental and Energy Economics Working Paper. https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2467567
26. Petersen, Bjørn Molt; Marie Trydeman Knudsen, John Erik Hermansen, Niels Halberg. 2013. "An approach to include soil carbon changes in life cycle assessments" *J. Clean. Prod.* 2013, 52, 217–224. Rogelj, J., D. Shindell, K. Jiang, S. Fifita, P. Forster, V. Ginzburg, C. Handa, et al. 2018. "Chapter 2: Mitigation Pathways Compatible with 1.5°C in the Context of Sustainable Development — IPCC." In *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5°C above Pre-Industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways, in the Context of Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty*. In Press. <https://www.ipcc.ch/report/sr15/mitigation-pathways-compatible-with-1-5c-in-the-context-of-sustainable-4-development/>.

27. Tiemeyer, Bärbel, Annette Freibauer, Elisa Albiac Borraz, Jürgen Augustin, Michel Bechtold, Sascha Beetz, Colja Beyer, Martin Ebli, Tim Eickenscheidt, Sabine Fiedler, Christoph Förster, Andreas Gensior, Michael Giebels, Stephan Glatzel, Jan Heinichen, Mathias Hoffmann, Heinrich Höper, Gerald Jurasinski, Andreas Laggner, Katharina Leiber-Sauheitl, Mandy Peichl-Brak and Matthias Drösler. 2020. "A new methodology for organic soils in national greenhouse gas inventories: Data synthesis, derivation and application." *Ecological Indicators* 109: 105838.
28. Uri, V., M. Varik, J. Aosaar, A. Kanal, M. Kukumägi, and K. Lõhmus. 2012. "Biomass Production and Carbon Sequestration in a Fertile Silver Birch (*Betula Pendula* Roth) Forest Chronosequence." *Forest Ecology and Management* 267 (March): 117–26. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.11.033>.
29. WRI. 2011. "Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard". Available online: https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/Product-Life-Cycle-Accounting-Reporting-Standard_041613.pdf

付属書 A

責任期間

異なる責任期間(すなわち、20、50、100年間)の長所と短所がパブリック・コンサルテーションに提出されました(表A1)。

表A1. 各責任期間の長所と短所

責任期間 (年数)	調整後特性化係数 (kgCO ₂ eq/kgCO ₂ stored-year (評価年の貯留 量))	長所	短所
20	5%	<ul style="list-style-type: none"> - LUC算定と整合性がある - 農地管理の現実的な期間である - 過去の変更に関するデータを見つけることが可能な期間である 	<ul style="list-style-type: none"> - 将来に逆転する場合、炭素隔離の便益が過大評価される(すなわち、特性化係数を0.01kgCO₂eq/kgCO₂ stored-year(評価年の貯留量)から0.05kgCO₂eq/kgCO₂ stored-year(評価年の貯留量)に調整) - 評価年の20年前以前に発生した手法の変更を捕えることができない
50	2%	<ul style="list-style-type: none"> - 農地管理上、ある程度現実的な期間である - 科学的根拠(Moura-Costa法など)に沿った炭素隔離の年間の便益を提供する 	<ul style="list-style-type: none"> - LUC算定と整合性がない - 過去を記録するためのデータを見つけるのが困難である
100	1%	<ul style="list-style-type: none"> - GWP100と整合性のある期間を提供する - 過去100年以内に発生した事例を捕えている 	<ul style="list-style-type: none"> - LUC算定と整合性がない - 土地管理変化の動機となるには期間が長すぎる - 過去の変化を記録するためのデータを見つけるのが困難である - 年間の影響や便益が小さすぎて、変化を抑制してしまう

泥炭地の例

オランダにおける地域別研究の一例として、Lesschen他（2020）は、排水された泥炭地からのCO₂ストックの排出量とN₂Oを計算するためのTier II方式を示しています（方程式A1とA2）。この方法では、Kuikman、AkkerおよびVries（2005）による記録にあるように、地下水位クラス、砂質または粘土質表土層の存在、および泥炭のミネラルの豊富さ（栄養レベル）に依存する予想表面低下を使用しません（表A2）。

方程式A1はオランダの泥炭地からのCO₂排出量（kg CO₂/ha）を計算するために使用され、国の排出インベントリに使用されています（Arets他 2019）。

$$S_{LCI} = C_{\text{ストック排出量}} \times \frac{44}{12}$$

$$C_{\text{ストック排出量}} = S_{mv} \times \rho_{so} \times fr_{os} \times fr_c \times 10^4 \quad \text{方程式A1}$$

S_{LCI}は、化学量論的CO₂のストック排出量（kgCO₂ストック排出量/ha）であり、

S_{mv} = 年間表面低下率（m 年⁻¹）

ρ_{so} = 未熟泥炭のかさ密度（kg m⁻³）

fr_{os} = 泥炭中の有機物画分（-）

fr_c = 有機物内の炭素画分（-）

と定義します。

年間表面低下率（S_{mv}）は、表A2を参照ください。オランダのCO₂排出量を計算するためにLesschen他（2020）が引用したデフォルト値は、泥炭のかさ密度（ρ_{so}）が140 kg soil m⁻³、泥炭中の有機物画分（fr_{os}）が0.8、泥炭中の炭素画分（fr_c）が0.55で、炭素をCO₂に換算するために係数44/12が使用されています。換算係数10⁴は、m²からヘクタールに換算するための係数です。

方程式A2によって、オランダの泥炭地からのN₂O排出の年間関連S_{LCI}の計算をすることができます(トンCO₂eq/ha)。

$$S_{LCI} = ((C_{\text{ストック排出量}} \times 14/12) \times 0.02) \times \frac{44}{12} \times 298 \quad \text{方程式A2}$$

Lesschen他（2020）による、C_{ストック排出量}を計算するためのデフォルト値は、方程式A1に記載しています。炭素ストックから窒素ストックへの変換には係数14/12を、窒素からN₂Oへの変換には係数44/28を使用しました。この場合、地球温暖化係数の特性化係数は298 kg CO₂eq/kgN₂Oとなります。実務者は、N₂Oに適用される特性化係数がLCAの他の部分と整合していることを確認しなければなりません。

Lesschenなど(2020)による方程式がIPCCの一般方程式より優れているのは、地下水位の深さを加えることによって、農場管理手法（排水や再湿潤の強度の違いなど）を含める方法を提供している点です。ただし、オランダ以外の泥炭地にこの方程式を適用する場合は注意が必要であり、専門家による確認が必要です。一般的に、国や地域固有の手法が望ましいとされています。

表A2. オランダ（主に草地）で農業に使用されている泥炭土壌の地下および地表面低下と推定C/N値データ

			水はけが悪い		適度な水はけ		水はけが良い		最終合計
表土	栄養レベル ¹	C/N値	年間地表面低下 (mm/年)	表面積 (ha)	年間地表面低下 (mm/年)	表面積 (ha)	年間地表面低下 (mm/年)	表面積 (ha)	表面積 (ha)
粘土質層	富栄養型	20	3	16149	8	17250	13	531	33929
	中栄養型	20	3	12780	8	22294	13	2863	37935
	貧栄養型	40	3	9421	8	10480	13	416	20315
泥炭 ²	富栄養型	20	6	16668	12	16846	18	206	33719
	中栄養型	20	6	18668	12	31607	18	7169	57443
	貧栄養型	40	6	8688	12	10054	18	1168	19911
泥炭コロニー	中栄養型	20	3	148	8	3184	13	4771	8102
	貧栄養型	40	3	27	8	760	13	2256	3041
砂質層	中栄養型	20	3	1365	8	3370	13	1318	6051
	貧栄養型	40	3	415	8	1450	13	836	2700
最終合計				84325		117291		21531	223147
%				37.8		52.6		9.6	100

¹ 泥炭のミネラルの豊富さを表す。貧栄養型は栄養素の少ない条件下で形成され、中栄養型および富栄養型は栄養素が中程度から高い条件下で形成される。

² 泥炭土壌とは、泥炭の層が薄い(40cm未満)土壌のこと。

引用： Kuikman、P.J.、J.J.H van den Akker & F. de Vries、2005、「有機農業土壌からのN₂OとCO₂の排出（Emission of N₂O and CO₂ from organic agricultural soils.）」表5より。Alterra, Wageningen, Alterra- rapport 1035-2. 66 blz.; 23. tab.; 5

付属書 B

特定された炭素隔離モデルおよびデータベース

モデル	引用元
CANDY	Franko et al., 1995
CCB	Franko et al., 2011
Century	Parton et al., 1992
Daycent	Parton et al., 1998
DNDC	Li et al., 1994
EPIC	Izaurrealde et al., 2006
NDICEA	Van Der Burgt et al., 2006
ORCHIDEE	Krinner et al., 2005
Roth C	Coleman & Jenkinson
C Tool	Taghizadeh-Toosi et al., 2014
IPCC	IPCC, 2019 https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/pdf/4_Volume4/19R_V4_Ch05_Cropland.pdf
ICBM	Andr�n & Katterer, 1997
CESAR	iTech & Universit� Gustave Eiffel
SOMM	Chertov & Komarov, 1997
Yasso15 soil carbon model	FMI, monitored by Liski et al.
DAISY	コペンハーゲン大学- Agrohydrology group
App SOC plus	http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1665-64232016000200135
TRIPLEX-GHG	Wang et al., 2017
TRIPLEX-MICROBE	Zhang et al., 2017
FullCAM	オーストラリア政府 - 産業・科学・エネルギー・資源省
CARBINE Soil Carbon Accounting Model: CARBINE-SCA	Forest research
Ex-Act	https://www.fao.org/in-action/epic/news-and-events/detail-events/ja/c/1417610/

モデルを選択する際の基準

- 開発チーム(民間、公共など)
- 発表された科学論文やその他の事例研究
- モデル検証方法
- 適用の有効性(地理的条件、土壌の種類、気候帯など)
- 必要な入力データの量と種類
- 出力データの種類と研究への適用性
- モデルの利用性(ライセンス、アップデートなど)

- モデルの種類(プロセスベース、経験的など)
- 時間スケールによる分析(例:月ごと、年ごと)
- 空間スケールによる分析
- 土壌の深さ
- 窒素の相互作用と排出量

データベース	引用元
WISE土壌特性データベース	https://www.isric.org/explore/wise-databases
LUCAS	https://esdac.jrc.ec.europa.eu/projects/lucas
世界の土壌有機炭素推定値	https://esdac.jrc.ec.europa.eu/ESDB_Archive/eusoils_docs/Other/EUR25225.pdf
Circumpolar Soil Carbon Database (NCSCD)	https://snd.gu.se/en/catalogue/study/ecds0148#:~:text=The%20Northern%20Circumpolar%20Soil%20Carbon,the%20northern%20circumpolar%20permafrost%20regions.The%20northern%20circumpolar%20permafrost%20regions.
GloSIS	https://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-maps-and-databases/global-soil-organic-carbon-map-gsocmap/en/
ヨーロッパ土壌データベース : ESDB	https://esdac.jrc.ec.europa.eu/content/european-soil-database-v20-vector-and-attribute-data
CIAT global soil organic carbon sequestration potential	https://ciat.cgiar.org/global-soil-carbon/
Harmonized world soil database	https://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/soil-maps-and-databases/harmonized-world-soil-database-v12/ru/
SOTWISデータベース	https://www.isric.org/projects/harmonized-continental-soter-derived-database-sotwis
U.S. General Soil Map (STATSGO2) by State	https://datagateway.nrcs.usda.gov/Catalog/ProductDescription/GSMCLIP.html
ASRIS	https://www.asris.csiro.au/
Soil Grids	https://www.isric.org/explore/soilgrids

非營利團體 國際酪農聯盟 (INTERNATIONAL DAIRY FEDERATION AISBL)
Boulevard Auguste Reyers, 70/B - 1030 Brussels (Belgium) - <http://www.fil-idf.org>