特集「食とみどりのLCA」

解説

農業のLCIデータベースをめぐる世界動向と農研機構の取り組み

林 清忠

Recent Trends in Life Cycle Inventories for Agriculture and Development of the NARO LCI Database

Kiyotada HAYASHI

Synopsis:

Objective. The purpose of this paper is to review recent trends in the development of life cycle inventories (LCI) for agricultural production systems and to introduce an LCI database for agricultural production and biomass utilization in Japan called the NARO LCI database.

Results and Discussion. Agricultural production systems differ in several important respects from industrial production systems and it necessitates the introduction of special features into LCI database construction. Although several agricultural LCI databases were already developed, there are many projects for developing LCI data for agricultural production. The NARO LCI database includes inventories for agricultural crops, seeds and seedlings, fertilizers and pesticides, bioenergy, agricultural work processes, machinery and buildings, and direct field emissions.

Conclusions. The development of the LCI database for agricultural production systems will facilitate the applicability of LCA to agriculture, although attention has to be paid to how to draw appropriate comparisons for decision making through the application of LCA.

Keywords: Agricultural production systems; biofuels; biomass utilization; database; life cycle inventories (LCI)

1. はじめに

有機農業（有機か慣行か）、地産地消（ローカルかグローバルか）、菜食主義（菜食か肉食か）、フェアトレード（公か私か、公平か利潤か）等の食に関する様々な問題への関心が高まっている。農業・食品のLCAも、それと軌を一にするように、人口に膾炙するようになった。財・サービスの環境影響を評価する手法として、農業・食品関連分野においてLCAは重要性を着実に増してきており、日本では1990年代後半より農業のLCAに関する研究プロジェクトが、国立農業試験研究機関を中心として開始されている。

LCAの一つの特徴は、計算方法とデータが一体化しているという点にあるため（Bauman, Tillman 2004）、多変量解析のような手法とは異なり、データベースの構築が手法の適用可能性を高める上で決定的に重要である。その点を確認するために、上記プロジェクトによって作成されたマニュアルを検討すると、次の点が明らかとなる。それは、そのプロジェクトの成果として説明されているLCAの計算方法が、データベースの構造化（モジュール化）の作業

を経ずに、フォアグラウンドプロセスである農業生産システムのデータから、産業連関表に基づいて得られる排出係数等を用いて環境影響を推定する方法であることである（農業環境技術研究所 2003）。この方法は、LCIデータが十分に整備されていないプロジェクト初期の段階で、研究対象である農業生産システムの環境影響を大雑把に推計する場合、政策立案等の必要性から農業生産システムの環境影響を早急に計算する必要がある場合には有効であると考えられる。しかしながら、新たに開発された農業生産システムの環境影響を評価する場合には不十分である。すなわち、産業連関表の排出係数は一般に、化学肥料に対して1つ、農業に対して1つであるため、具体的な施肥管理技術や病虫害防除技術を適切に評価することが困難となっている。詳細な排出係数があれば、より細かく技術開発過程を評価できるようになるが、結局そのためには詳細なLCI分析が必要であり、しかもシステムプロセス（CTG）のデータのみでは、環境負荷を上流に遡って検討し、ホットスポットを探し出すことが困難である。

これに対して、ヨーロッパでは、1990年代初頭より農業のLCAに取り組みられており（Audsley 1997）、農業生産システムのLCIデータベースも整備されてきている（Nemecek and Kägi 2007）。農業・食品分野の最近の動向として特記すべきことは、農業研究機関の研究者によるデータベース作成の動きがいくつかあることである。後述のように、一つはecoinventがバージョンアップされることに伴う動きであり、もう一つは環境ラベルに関する政策を実施する上での必要性からのデータベース作成の動きである。アジア地域においても農業のLCIデータベースに関する様々な展開が示されており、日本の農業試験研究機関はどのように取り組むべきかを検討することが重要な時期となっている。

そこで、この解説では、まず、LCIデータベースを作成するという観点から農業生産の特徴を説明し、その後、これまでにどのようなデータベースが作成され、現在どのようなプロジェクトが進行しているかを示す。その上で、我々の取り組み（農研機構LCIデータベース）を紹介し、データベース利用上の注意点に言及する。

2. 農業生産プロセスの特徴

農業生産プロセスの特徴を、データ入力の場合がイメージできるように、農業生産プロセスへの投入と同プロセスからの産出の種類（図1）ごとに示すと、表1のようになる。それらの特徴をもたらしているのは、技術が標準化されていないこと、自然に依存するところが大きいことであるが、投入・産出の種類別に検討していくと以下ようになる。第1に、環境からの投入として、作物によるCO₂の固定、土壌への炭素蓄積があることである。

図1 農業生産プロセスへの投入と同プロセスからの産出の種類

第2に、他のユニットプロセスからの投入が、地域ごと、経営体ごとに多様であることである。特定の作物（たとえば水稻）に限っても、特別栽培、有機栽培等の様々な栽培方法があり、しかもそれらが地域ごと農家ごとに異なっており、多様な資材（肥料、農薬等）が投入されている。これに対する直接的な対処方法は、多様な経営体についてLCIデータを作成することであると考えられる。ただし、ヨーロッパでは農業事業体の所得ならびに共通農業政策の影響を評価するためにFADN (Farm Accountancy Data Network) が構築されており、それに基づいたLCAが数多く実施されているが、日本ではそれに相当する体系的なデータ収集が行われていないため、統計データに基づくLCIデータ構築に困難をもたらしている。

第3に、環境への直接排出については、種類と量が相対的に大きく、排出量の変動が大きいという特徴がある。表2は、ecoinvent V3.0において農業のLCIデータを作成する際の適切な規範を説明した文書に基づいて作成した表である。「必須」は必ずインベントリの中に含まれるべき物資であることを示している。表のように、大気、表流水、地下水、農地のそれぞれについて必須項目があり、地球温暖化物質であるN₂O、CH₄のように、該当する影響領域の環境影響において大きな部分を占める物質も含まれている。これらの物質を圃場で測定し、正確なLCIデータを作成することは必ずしも容易でないため、作物土壌モデルの利用、不確実性の評価が重要な意味をもつと考えられる。

第4に、生産物に関する特徴としては、収量の年次変動が大きいこと、同一年次においても地域や圃場による違いが大きいことがある。先の規範文書においても、農業のLCIデータベースに関するドキュメント（メタ情報）の中には、単収に関する記述が必ず含まれるべきことが指摘されている。

第5は、多様な副産物と廃棄物が産出されることである。このことは、配分に関する重要かつ困難な問題を提起している。

表1 投入・産出の種類別にみた農業生産プロセスの特徴

投入・産出の種類		特徴
投入	環境から	作物によるCO ₂ 固定、土壌への炭素蓄積がある。
	他の単位プロセスから	地域ごと、経営体ごとに多様である（特定の作物に限っても、生産技術が標準化されていないため、多様な資材が投入されている）。
産出	環境へ	直接排出の種類と量が相対的に大きく、排出量の変動も大きい。それらの測定は一般に困難である。
	生産物	収量の年次変動が大きい。同一年次においても場所（圃場）による違いが大きい。
	副産物、廃棄物	多様な副産物と廃棄物が産出される。

表2 作物生産のインベントリにおける必須および選択項目*

入出力項目		必須・選択の別	物質等のリスト
資源		必須	土地占有 土地転換 CO ₂ (作物による固定分)
排出	大気	必須	NH ₃ N ₂ O NO _x CH ₄ CO ₂ (土壌有機物の変化分)
	表流水	必須	P(土壌侵食) PO ₄ (流出) N
		選択	重金属 (Cd, Cr, Cu, Pb, Hg, Ni, Zn) 農薬
	地下水	必須	NO ₃ PO ₄
		選択	重金属 (Cd, Cr, Cu, Pb, Hg, Ni, Zn)
	農地	必須	重金属 (Cd, Cr, Cu, Pb, Hg, Ni, Zn) 農薬 (散布された場合)
トラクタ作業		必須	排気ガス

* Nemecek et al.(2010) に基づいて作成。

3. 農業における LCI データベース構築の世界動向

以上の特徴を有する農業生産プロセスについては、特別の LCI データベースが作成される場合も多い。本解説では、表3のように、農業の LCI データベース、農業生産プロセスを含む LCI データベースの2つに分けて現状を検討したい。なお、本解説ではカーボンフットプリント用のデータベースは除外している。説明は国名の50音順である。

3.1 農業の LCI データベース

3.1.1 アメリカ

アメリカでは、現在、USDAのNAL(National Agricultural Library)において、所轄の統計データから、作物、生産手段、作業プロセス等の LCI データベースを作成するパイロットプロジェクトが進行している(McCarthy 2010)。LCI データフォーマットとしてEcoSpoldが用いられているが、特定の商用 LCA ソフトを前提としたものではなく、オープン LCA フレームワークが採用されている。

3.1.2 スイス

SALCA(Swiss Agricultural Life Cycle Assessment)データベースは、Agroscope Reckenholz-Tänikon(ART)研究所で作成されたデータベースであり、エクセルの入力シートが用意されている。本データベースは影響評価手法と一体的に利用されることが想定されている。その際には LCA ソフトウェアのTEAMが利用されてきたが(Nemecek 2007)、現在、SimaProへの変更作業が進行中である。このデータベースはecoinventの農業生産システムの部分の元となっている。

3.1.3 デンマーク

LCA Food Database(Faculty of Agricultural Sciences, Aarhus University)は、2000年から2003年に実施された「基礎的食料品のライフサイクルアセスメント」という研究プロジェクトの成果であり、デンマーク農業研究所(現オーフス大学)と2.0 LCA Consultantsによって作成された。現在、SimaProに含まれている。作物生産の単位プロセスの中身を検討すると、参照されている他の単位プロセスの数はecoinventに比べ相対的に少ないことがわかる。

3.1.4 日本

農研機構 LCI データベースについては第4節で説明する。

3.1.5 フランス

フランスでは、ADEME(環境エネルギー管理庁)による環境ラベルに関する政策の一環として、2010年から2012年までAgri-BALYSEという農産物の LCI データベースを開発するプロジェクトが実施される(Gaillard et al. 2010, van der Werf et al. 2010)。参画機関は、畜産部門(30~40生産物)を担当するINRA(フランス国立農業研究所)、耕種部門(30~40生産物)を担当するスイスのART(アグロスコープ・レッケンホルツ・テニコン研究所)、熱帯作物(5~6生産物)を担当するCIRAD(フランス国際農業開発センター)等15機関である。ISO14040、14044に加え、ILCDハンドブック等に従って作業が進められることになっている。注目されるのは、カーボンフットプリントとは異なり、多基準での評価を行うと宣言されていることである。作成されたデータベースは、無料公開される予定である。

表3 農産物に関するLCIデータベース*

種類	国	組織	データベース
農業のLCIデータベース	アメリカ	USDA	NAL LCA Database
	スイス	ART	SALCA Database
	デンマーク	DIAS (Aarhus University)	LCA Food Database
	日本	NARO	NARO LCI Database
	フランス	INRA	Agri-BALYSE
農業生産プロセスを含むLCIデータベース	アメリカ	NREL	U.S. Life Cycle Inventory Database
	オーストラリア	ALCAS	AusLCI
	オランダ	University of Amsterdam	IVAM LCA Data
	スイス	ecoinvent Center	ecoinvent
	スイス	ESU-services	ESU database
	タイ	National Project	n.a.
	ドイツ	PE	GaBi Databases
	マレーシア	National Project	MY-LCID

* Hayashi et al.(2010b) に基づいて作成。

3.2 農業生産プロセスを含むLCIデータベース

農業生産プロセスを含むLCIデータベースとしては、表3に示されているいくつかのデータベースがあるが、本節では、アメリカとヨーロッパの事例を略述する。

3.2.1 アメリカ

NREL(国立再生可能エネルギー研究所)で作成されているLCIデータベース(U.S. Life Cycle Inventory Database)の中には農産物のデータも含まれている(NREL)。本データベースは、EcoSpoldと互換性のある形式で構築されており、既にSimaProの中に含まれている。

3.2.2 オランダ

IVAM LCAデータベースは、IVAM(アムステルダム大学から独立した研究およびコンサルタント機関)によって開発され、SimaPro向けに販売されているデータベースであり、農産物のデータも充実している(van Ewijk et al. 2004)。

3.2.3 スイス

ecoinventは、最も充実した農業生産システムのデータベース(Nemecek and Kägi 2007)を含むと考えられるが、ecoinventは既によく知られたデータベースであるため、ここでの記述は省略する。ただし、Version 3には重要な変更が含まれている。スイスでは、この他にESUサービスが、ecoinventには含まれない野菜等の農産物のデータを作成している(ESU-services)。ただし、単位プロセスのデータ構築方法は、ecoinventの農業生産プロセスとは異なっている。

3.2.4 ドイツ

LCAソフトウェアGaBiの拡張データベースとして、ecoinventとは別に、農業関連のデータベース(114生産物)が用意されているが、システムプロセスとしてのみ提供されるため、農業生産システム(フォアグラウンドプロセス)の内容を詳細に検討することができない。

この他に、オーストラリア、タイ、マレーシア等においてLCIデータベース開発のプロジェクトがあり、その中には農産物のLCIデータも含まれている。

4. 農研機構LCIデータベースの開発

農研機構においても、以上の動向を背景として、農業のデータベース開発に取り組んでいる。以下では、その内容を説明する。

4.1 目的と方法

本データベースの開発目的は、農業生産システムおよびバイオマス利用システムのLCAを実施するための、代表的ならびに事例ベースのLCIデータを構築することにある。農研機構中期計画(平成18年~平成23年)に沿って開発されたデータベースであり、具体的な作業は、農林水産省委託プロジェクト研究「地域活性化のためのバイオマス利用技術の開発(モデル化およびマテリアル)」および農研機構交付金プロジェクト研究「有機農業の生産技術体系の構築と持続性評価法の開発」の中で進められた。そのため、現在のところ、データベースに含まれる主要作物は水稲作ならびに畑作となっている。理論面の検討には、その他に、日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究(C)(20580256)の支援を受けている。

データベース作成に用いた基本的な方法はモジュール化であり、各単位プロセスのデータを作成している。データ作成にあたり、SimaPro 7.2およびEcoSpold version 1を用いた。バックグラウンドプロセスのデータとして、JLCA-LCA データベース（2010年度3版）を利用しており、現在のところ115製品のインベントリデータをSimaProに入力した。

4.2 データベースの構造

データベースの構造は図2の通りである。この図は、SimaPro上のecoinventの分類に基づいている。以下ではその内容を順に説明する。

4.2.1 農産物

農業生産システムからの産出物である農産物として現在のところ、水稻（慣行、有機）、大豆（慣行、有機）、てんさい（慣行、改善）、ばれいしょ（慣行、改善）、ソルガム（慣行、改善）、かんしょ（慣行、改善）、さとうきび（慣行、改善）等が含まれる。ここで改善とは、エネルギー生産のための栽培技術の改善および品種改良等を指す。

4.2.2 種苗

種苗生産は、通常の農産物生産とは栽培管理が異なるため、専用のLCIデータを用意した。現在のところ、水稻、大豆、てんさいの種苗生産プロセスが作成されている。

4.2.3 肥料および農薬

化学肥料としては、硝酸アンモニウム、硫酸アンモニウム、リン酸アンモニウム等を、有機肥料としては、市販されている非堆肥系の有機質肥料、開放型・縦型発酵プラントで製造された牛ふん堆肥等を含む。農業には、主要な類型の薬剤に加え、水田用の一般的農薬（ベンスルフロンメチル等）がある。肥料と農薬は種類が膨大であるため、現在のところ、独自のデータの作成とecoinventの日本への適合化（単位プロセスのヨーロッパのバックグラウンドデータの日本のバックグラウンドデータへの変更）を併用している（de Eicker 2010, Griffin et al. 2010）。

4.2.4 バイオ燃料

バイオガス製造に関わる3種類の生産物（副産物）、エタノール製造に関わる11種類の生産物（副産物）のデータを暫定的に作成した。今後、修正と拡張を実施する予定である。

4.2.5 バイオマス発電プラント

木質チップ発電プラントのデータを作成した。今後、修正と関連するプロセスの追加を行う予定である。

4.2.6 農作業プロセス

耕起、施肥、薬剤散布、収穫、輸送等の合計117プロセスのデータを作成した。農業機械の製造プロセスは、この農作業プロセスから参照されている。

図2 農研機構LCIデータベースの構造 (2010年8月25日現在)
注：括弧内は生産物数を示す。

4.2.7 機械および施設

農業生産システムの環境影響を適切に評価するため、資本財をインベントリの中に組み入れた (Frischknecht et al. 2007)。現在のところ、仕様書、設計図等から作成した場合と、ecoinventを日本へ適合化した場合を含む。耐用年数の決定には困難が伴うが、可能な限り実態を反映させるように作成した (内田ら 2010)。

4.2.8 圃場からの直接排出

温室効果ガスの圃場からの直接排出は、現在のところ、日本国温室効果ガスインベントリ (国立環境研究所地球環境研究センター温室効果ガスインベントリオフィス 2009) に基づいているが、たとえば水稲作におけるメタンの排出は地球温暖化物質の排出量のかなりの部分を占めるため、他の方法も検討中である。他の排出については、物質収支に基づいて計算した場合、シミュレーションソフトウェアを利用した場合がある。後者については、たとえば、畑作物栽培に伴う硝酸性窒素排出量をSOILN-jpn (農業・食品産業技術総合研究機構) を用いて推計している。今後、このようなシミュレーションソフトウェアの利用は、LCIデータ作成上重要な意味を持つと考えられる (Uchida et al. 2010)。

5. むすびー比較 LCAにおける「比較」ー

このようなデータベースを構築する一つのメリットは、様々な比較、とりわけ海外における農産物生産との比較が容易に実施できるようになることである。しかしながら、意味のある比較を行い、それに基づいて適切な意思決定を行うためには、いくつかの注意点がある。以下では、この点に関する考察を行い、本解説の結びとしたい。

まず第1の注意点は、特定の指標で評価することの正当性である。たとえば、アジアにおける水稲生産とヨーロッパにおける小麦生産をカーボンフットプリントによって比較する状況を考えると、メタン排出量を根拠にあたかも水稲が劣等作物であるかのような議論も可能であるようにみえる。しかしながら、富栄養化等の他の影響領域を評価指標とすれば、水稲生産と小麦生産に関する数字の大小関係は逆転し得る。農産物を含むすべての財・サービスのカーボンフットプリントを求める試みがあるが (Berners-Lee 2010)、このトレードオフの関係には注意が必要である。農業のLCIデータを作成する際の適切な規範に関する最近の動き (第2節) はこの点と関わっており、より根本的には、多基準意思決定の基本 (Keeney 1992) に立ち返ることが重要であると考えられる。

第2の注意点は、アジアの水稲生産とヨーロッパの小麦生産の比較に、意思決定上どのような意味があるのかとい

う疑問と関わる。すなわち、LCAによって相互に比較される農業生産システムが意思決定の代替案として妥当かどうかという点である。ここでは、これまでの適用事例を踏まえ、施設野菜と露地野菜をGWPによって比較する状況を想定する。このとき、施設野菜生産におけるエネルギー投入量を根拠に、海外から露地野菜を輸入すべきであるというような結論が可能なのにもみえるが、ここにも比較に伴う問題点がある。すなわち、すでに指摘した任意の一指標での比較に伴う問題点、出荷時期が異なる生産物を比較することに伴う問題点に加え、海外生産については代替案が暗黙に想定されているという問題点がある。しかも、その際に、意思決定の代替案としてシナリオが具体的に考えられていない。明示的に代替案を定義し、その際には、海外のどこの土地で生産するのか、そのような土地が本当にあるのか、森林からの土地利用転換はないのか、その地域社会に園芸生産を仮に導入したとして、適切な労務管理は可能か (児童労働は生じないか) 等を検討する必要がある。

これらの注意点を踏まえた評価を実施することは、冒頭に記したいくつかの問題を明らかにするためには必須であると考えられ、また、そのための土台を構築することは、農業・食品分野におけるLCIデータベース開発の課題でもある。

(平成22年12月6日受付)

参考文献

- Audsley E. (1997): Harmonisation of Environmental Life Cycle Assessment for Agriculture, Silsoe Research Institute, Silsoe U.K., 140pp.
- Bauman H., Tillman A.-M. (2004): The Hitch Hiker's Guide to LCA, Studentlitteratur, Lund, 544pp.
- Berners-Lee M. (2010): How Bad Are Bananas? The Carbon Footprint of Everything, Profile Books, London, 239pp.
- de Eicker M.O., Hirschier R., Kulay L.A., Lehmann M., Zah R., Hurni H. (2010): Env. Imp. Ass. Rev., 30 (3), 192-199
- ESU-services, ESU life cycle inventory database on demand, ESU-servicesホームページ, 入手先 <<http://www.esu-services.ch/ourservices/lci/database/>>, (参照 2010-12-5)
- Faculty of Agricultural Sciences, Aarhus University, LCA Food Databaseホームページ, 入手先 <<http://www.lcafood.dk/>>, (参照 2010-12-5)
- Frischknecht R., Althaus H.J., Bauer C., Doka G., Heck T., Jungbluth N., Kellenberger D., Nemecek T. (2007):

- Int. J. LCA, 12(s1), 7-17
- Gaillard G., Koch P., Cros, C., Fourdrin E., Mousset J., Réthoré O., van der Werf H., Biard Y., Environmental Product Declaration in France, 41st LCA Discussion Forum, Bern, LCAinfo Switzerland ホームページ, 入手先 <http://www.lcainfo.ch/df/DF41/DF41-05-Gaillard-EPD_France.pdf>, (参照 2010-12-5)
- Griffing E., Overcash M., Hayashi K., Sato M. (2010): Proc. 9th Int. Conf. Ecobalance, Tokyo, 183-186
- Hayashi K., Uchida S., Hakazono S., Sato M. (2010a): Proc. 7th Int. Conf. LCA Agri-Food Sector, Bari, 455-460
- Hayashi K., Uchida S., Hakazono S., Sato M., Furushima Y., Ohtani T., Hada K. (2010b): Proc. 9th Int. Conf. Ecobalance, Tokyo, 404-407
- Keeney R.L. (1992): Value-Focused Thinking, Harvard University Press, Cambridge, MA, 82
- 国立環境研究所地球環境研究センター温室効果ガスインベントリオフィス (2009): 日本国温室効果ガスインベントリ報告書, 414pp.
- McCarthy S., A new initiative to bring U.S. Department of Agriculture data to the LCA community, American Center for Life Cycle Assessment ホームページ, 入手先 <<http://www.lcacenter.org/LCAX/presentations-final/78.pdf>>, (参照2010-12-4)
- National Renewable Energy Laboratory (NREL), U.S. Life Cycle Inventory Database, NRELホームページ, 入手先 <<http://www.nrel.gov/lci/>>, (参照 2010-12-5)
- Nemecek T. (2007): User Instructions for the SALCA-Crop Version 2.02
- Nemecek T., Gaillard G., Freiermuth R., Antón A., Wilfart-Monziols A., Hermansen J. (2010): ecoinvent V3.0: Good practice for life cycle inventories in agriculture (plant and animal production), ecoinvent Centre, 5pp.
- Nemecek T., Kägi T. (2007), Life Cycle Inventories of Agricultural Production Systems, Data v2.0. Final report ecoinvent report No. 15, Agroscope Reckenholz-Taenikon Research Station ART, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, 354pp.
- 農業環境技術研究所 (2003): LCA手法を用いた農作物栽培の環境影響評価実施マニュアル, 64pp.
- 農業・食品産業技術総合研究機構, SOILN-jpn 窒素溶脱解析ツール, SOILN-jpn ホームページ, 入手先 <<http://soiln.trg.affrc.go.jp/soiln-jpn/index.htm>>, (参照 2010-12-5)
- 内田晋, 林清忠, 外園信吾, 佐藤正衛 (2010): 第5回日本LCA学会研究発表会講演要旨集, 横浜, 208-209
- Uchida S., Hayashi K., Sato M., Hakazono S. (2010): Construction of agri-environmental data using computational methods: the case of life cycle inventories for agricultural production systems, Computational Methods for Agricultural Research: Advances and Applications, do Prado H., Luiz A.J.B., Filho H.C. eds., IGI Global, PA, USA, 412-433
- van der Werf H., Gaillard G., Biard Y., Koch P., Basset-Mens C., Gac A., Lellahi A., Deltour L. (2010): Proc. 7th Int. Conf. LCA Agri-Food Sector, Bari, 439-442
- van Ewijk H.A.L., Krutwagen B.T.J.M., Saft R.J. (2004): IVAM LCA Data 4: User's Guide, IVAM, 17pp.