慶應義塾大学学術情報リポジトリ
Keio Associated Repository of Academic resouces

Title	米作のライフサイクルアセスメント
Sub Title	
Author	松橋, 隆治(Matsuhashi, Ryuji) 星野, 達夫(Hoshino, Tatsuo) Breiling, Meinhard(Yoshioka, Kanji) 吉岡, 完治
Publisher	慶應義塾大学産業研究所
Publication year	1999
Jtitle	KEO discussion paper. G : 『アジア地域における経済および環境の相互依存と環境保全に関する学際的研究』 (KEO discussion paper. G : "Inter-disciplinary studies for sustainable development in Asian countries"). No.G-39
JaLC DOI	
Abstract	概要人類の持続可能な発展を考える上で、農業は最も重要な産業の一つである。日本の農業の中で作物としての生産額、生産資本としての土地利用面積、エネルギー、資源の投入量などの面から最も大きい作物は米である。そこで、本稿においては、米作のライフサイクルアセスメントをおこなった。まず、2章において、分析に用いたシステム連関分析によるLCA手法の枠組みについて述べた。次に、このLCA手法の適用対象として、生産地域別、生産規模別の米作を取り上げ、そのLCA比較をおこなった。この結果、肥料、農薬や機械の運転に要するエネルギーなどの原料投入によるCO2発生と機械設備などの製造に起因するCO2発生を含めたライフサイクルCO2発生量が算定され、生産規模、生産地域による相違も示された。これより、米作のLCAに固有の特徴が明らかにされた。その第一は、原料投入によるCO2発生よりも、むしろ農業機械の製造に起因するCO2発生の方が大きいということである。これは燃料投入によるCO2発生が殆ど(99%以上)を占める化石燃料発電所、走行モードにもよるが10.15モードでは走行によるCO2発生が3/4程度を占める乗用車と比較しても顕著な特徴である。生産規模に関しては、規模が大きくなるほどCO2発生が小さくなるという傾向が明瞭に現れたが、これも機械の利用が主な原因と考えられる。(規模の小さい水田でも各農業機械を一通り所有する傾向がある。)次に生産地域別の比較では、一般に寒冷地域の方が米の単位生産額当りのCO2発生が小さいという結果が得られた。これも気候条件の違いによる肥料や農薬投入の差異によるよりも、東北・北海道の方が関西・四国よりも平均生産規模が大きいという規模の影響が卓越した結果となっている。今後の分析の課題としては、CO2以外の温室効果ガスを含めた評価にすることが挙げられる。特に、メタン・亜酸化窒素の水田からの発生はGWPを用いた等価CO2発生量としては、大きいと考えられるので、信頼できるデータに基づく評価が急務である。また、これらの評価から、CO2の低減につながる建設的な方策を検討すること重要である。ここでは、生産側の事情をも考慮した実現可能な方策を考案する必要がある。
Notes	表紙上部に"日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業複合領域「アジア地域の環境保全」"の表示あり
Genre	Technical Report
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=AA12113622-00000039-0001

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the KeiO Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

米作のライフサイクルアセスメント

松　橋　　隆　治
星　野　　達　夫
Meinhard Breiling
吉　岡　　完　治

No.G-39

学振未来 WG2-17

米作のライフサイクルアセスメント

松橋隆治，星野達夫，Meinhard Breiling，吉岡完治

1999年3月

キーワード:ライフサイクルアセスメント，農業，米作,生産地域，生産規模，農業機械

概要

人類の持続可能な発展を考える上で、農業は最も重要な産業の一つである。日本の農業の中で作物としての生産額、生産資本としての土地利用面積、エネルギー、資源の投入量などの面から最も大きい作物は米である。

そこで、本稿においては、米作のライフサイクルアセスメントをおこなった。まず、2章において、分析に用いたシステム連関分析によるLCA手法の枠組みについて述べた。次に、このLCA手法の適用対象として、生産地域別、生産規模別の米作を取り上げ、そのLCA比較をおこなった。この結果、肥料、農薬や機械の運転に要するエネルギーなどの原料投入によるCO2発生と機械設備などの製造に起因するCO2発生を含めたライフサイクルCO_2発生量が算定され、生産規模、生産地域による相違も示された。これより、米作のLCAに固有の特徴が明らかにされた。その第一は、原料投入によるCO2発生よりも、むしろ農業機械の製造に起因するCO2発生の方が大きいということである。これは燃料投入によるCO2発生が殆ど（99%以上）を占める化石燃料発電所、走行モードにもよるが10.15モードでは走行によるCO2発生が3/4程度を占める乗用車と比較しても顕著な特徴である。生産規模に関しては、規模が大きくなるほどCO2発生が小さくなるという傾向が明瞭に現れたが、これも機械の利用が主な原因と考えられる。（規模の小さい水田でも各農業機械を一通り所有する傾向がある。）次に生産地域別の比較では、一般に寒冷地域の方が米の単位生産額当りのCO2発生が小さいという結果が得られた。これも気候条件の違いによる肥料や農薬投入の差異によるよりも、東北・北海道の方が関西・四国よりも平均生産規模が大きいという規模の影響が卓越した結果となっている。

今後の分析の課題としては、CO2以外の温室効果ガスを含めた評価にすることが挙げられる。特に、メタン・亜酸化窒素の水田からの発生はGWPを用いた等価CO2発生量としては、大きいと考えられるので、信頼できるデータに基づく評価が急務である。また、これらの評価から、CO2の低減につながる建設的な方策を検討すること重要である。ここでは、生産側の事情をも考慮した実現可能な方策を考案する必要がある。

米作のライフサイクルアセスメント

松橋隆治†, 星野達夫‡, Meinhard Breiling‡, 吉岡完治††

1999年3月

1. はじめに

人類の持続可能な発展を考える上で、農業は最も重要な要因の一つである。日本の農業の中で作物としての生産額、生産資本としての土地利用面積、エネルギー、資源の投入量などの面から最も大きい作物は米である。

そこで、本稿においては、米作のライフサイクルアセスメントをおこなった。まず、2章において、分析に用いたシステム連関分析によるLCA手法の枠組みについて述べた。次に、このLCA手法の適用対象として、生産地域別、生産規模別の米作を取り上げ、そのLCA比較をおこなった。この結果、肥料、農薬や機械の運転に要するエネルギーなどの原料投入によるCO2発生と機械設備などの製造に起因するCO2発生を含めたライフサイクルCO_2発生量が算定され、生産規模、生産地域による相違も示された。これより、米作のLCAに固有の特徴が明らかにされた。

＊ この研究は、学術振興会未来開拓技術研究推進事業「アジア地域の環境保全」Work Group2 における共同研究としておこなわれた。

† 東京大学大学院工学系研究科, ‡東京大学大学院農学系研究科, ††慶応義塾大学産業研究所

1. 目的

地球規模、地域規模環境問題の顕在化を反映し、製品や技術に関するライフサイクルアセスメント（ＬＣＡ）の必要性が高まってきた。LCAとは、製品や技術のライフサイクルにおける諸問題、特に資源、環境問題を中心に社会に与える影響を総合的に分析する方法である。しかし、ＬＣＡは手法上いくつかの問題点を抱えており、またその技術評価への利用法も確立しているとはいい難い。本論文では、新たなＬＣＡの枠組を提案し、これを米作に適用した結果を述べる。

2. プロセス連関モデルによるＬＣＡ手法の開発

2.1 プロセス連関モデルの基本概念

ＬＣＡのインベントリ分析において、最も基本的な手法は積み上げ法である。積み上げ法とは、評価対象となるシステム内の各々のプロセスにおける資源投入および生産物、副産物、排出物をリストアップし、プロセス間のリンクを考慮して文字通り積み上げる方法である。積み上げ法においては、プロセス間のリンクが複雑になった場合の波及の追跡が繁雑になり、結合生産（結合生産とは、単一のプロセスから、複数の生産物がある一定の関係のもとに生産されることをいう。）やリサイクルが生じた場合の複数の産物に対する資源投入や排出の割り当てが適切に行いにくいという問題点がある。

著者らは、上記の問題を克服するため、ＬＣＡのためのシステム連関モデルを開発し、積み上げ法の抱える波及追跡の繁雑さを解消すると共に、システム内の連関を考慮した配分手法を示した[1]。本論文では、この配分手法をさらに拡張する。すなわち、分析すべきシステムの各プロセスの入出力から、システム全体の入出力を算定するプロセス連関分析と、システム内に需要が生じた場合の配分手法を提案する。

2.2 プロセス連関モデルの定式化

文献[2]において著者らは、以下のようなシステム表現により、LCAのためのフレームワークを構築した。

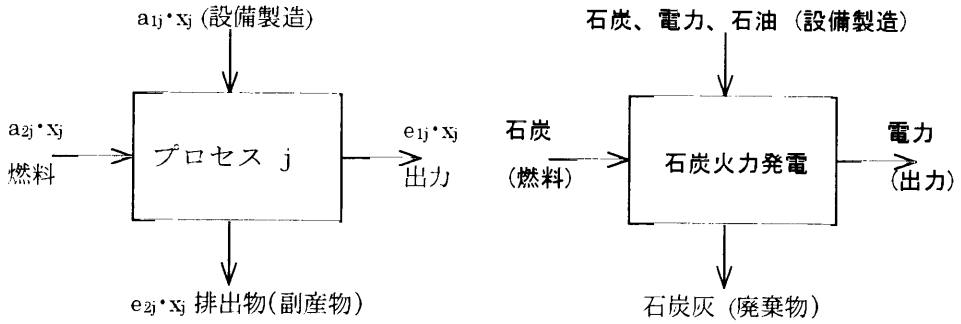


図１．プロセス（プラント）入出力のモデル化の概念

図１より、プロセスｊの活動Ｘｊに必要な全ての入力は下のようなベクトル形式で表される。

$$x_j a_j = x_j \begin{pmatrix} a_{1j} \\ \vdots \\ a_{ij} \\ \vdots \\ a_{nj} \end{pmatrix} \tag{1}$$

したがって、全てのプラントの全ての出力に必要な全ての入力は次式のように表される。

$$\sum_{j=1}^{n} x_j a_j = \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1j} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & \vdots & a_{2j} & \vdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nj} & \cdots & a_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_j \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} = Ax \tag{2}$$

一方、当該プロセス（プラント）からの主産物、副産物または排出物については、中間投入と同様に以下のような数学表現を取る。ここでは、産業連関分析の概念を拡張した枠組みを構築した。上記のように、ＬＣＡにおいては、単一のプロセスから生じる複数の産物および排出物を評価に含め、複数の産物間の資源投入や環境排出の配分をおこなう必要がある。ところが、産業連関分析は、ONE PROCESS-ONE PRODUCT (単一のプロセスからは、単一の製品が生産される) の原則で構成されており、副産物はマイナス投入方式による特殊な扱いを受けている。多様なシステムに対応するＬＣＡ分析をおこなうためには、この原則を崩すことが必要である。そこで、(2), (3)式のベクトルxは、物質ではなく、プロセスであることを明示し、Ax、Exはそれぞれ、プロセスに投入される物質およびプロセスから産出される物質であることを明示する。これにより、(3)式に単一のプロセスからの複数の産出物または排出物（CO_2, NO_x, SO_x, 重金属など）を含めることができる。

$$\sum_{j=1}^{n} x_j e_j = \begin{pmatrix} e_{11} & \cdots & e_{1j} & \cdots & e_{1n} \\ e_{21} & \vdots & e_{2j} & \vdots & e_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ e_{n1} & \cdots & e_{nj} & \cdots & e_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_j \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} = Ex \tag{3}$$

これらの結果から(4)式が得られる。(4)式においてベクトルfは一般の需要家が消費する最終需要を意味しており、これに対し、Axはプロセスベクトルxの稼動中に投入される中間需要である。また、Exはプロセスベクトルxから供給または排出される物質である。したがって、(4)式は供給＝需要の関係を表している。

$$Ex = Ax + f \tag{4}$$

$$x = (E - A)^{-1} f \tag{5}$$

$E-A=B_0$ とおくと、

$$x=B_0^{-1}f \tag{6}$$

$$y=Ex=EB_0^{-1}f \tag{7}$$

$$\frac{\partial y_k}{\partial f_i}=\sum_{j=1}^{m}\left(E_{kj}\times B^{-1}{}_{ji}\right) \tag{8}$$

すなわち、(8)式を用いて、資源消費、環境排出を各製品に配分することができる。例えば、(8)式のベクトルyのk行目がCO_2であり、最終需要ベクトルfのi行目が乗用車であるとすると、(8)式の右辺は、米の単位需要当たり、誘発される直接、間接のCO_2発生量に相当する。したがって、この値を米のCO_2に関するライフサイクル発生量と考えることができる。その他の資源消費に関しても同様に評価することができる。以上は、最終需要の各項目に資源・環境負荷を配分する手法であり、この配分原理を限界配分とよぶことにする。

積み上げ法とシステム連関分析における限界配分の結果の比較については、著者らによって詳細になされている[1]。これによると、ある製品Aから他の製品Bに転換したときのシステム全体での環境排出物の変化分が、限界配分の差に等しくなる。一方、積み上げ法によって算定された製品Aと製品Bの環境指標の差は、製品Aから製品Bに転換したときのシステム全体での環境排出物の変化分とは一致しない場合がある。したがって、本研究では、システム全体の評価と整合性のある限界配分によるLCA評価を採用した。

2.3 本論文におけるプロセス連関モデルの適用範囲

一般的にLCAをおこなう場合は、数十～数百種類の排出物を考慮する。これらの排出物の中には、地球環境関連の排出物だけでなく、重金属、有機塩素、その他の微量化学物質などが含まれる。上のプロセス連関モデルの枠組みにより、多様な排出物を考慮したLCAをおこなうことは可能である。ただし、考慮した全プロセスにおける全排出物のデータを集めて行列Eを作成する必要があるため、インベントリの精度が問題となる。重金属やダイオキシンなどによる汚染が緊急かつ重要な問題であることは論を待たないが、同時にLCAによってこうした排出物を評価すべきか否かについては議論が必要である。上述の微量化学物質の生態系に及ぼす影響は、排出のされ方や、周囲の地質、水環境などによって異なる。したがって、著者らは、こうした微量化学物質に対しては、LCA指標に基づく最終製品段階での規制によるよりも、むしろ工場立地地点における発生段階での規制などによる対処が有効ではないかと考えている。そして、プロセス間の複雑な波及を考慮して、新製品や新技術の環境評価をおこなうLCAの対象としては、排出地点や周囲の環境に影響されない温室効果ガスや資源・エネルギー消費などが適していると考えている。本論文において電気自動車とガソリン車のLCA比較をおこなうに当たり、エネルギー消費とCO_2発生量に焦点を当てているのは以上の理由による。

2.4 本論文におけるプロセス連関モデルの適用法

一般に、米作に起因する資源・環境負荷は、一年の中に消費される肥料や農薬などの原材料の投入によるものと、耐久材としての農業機械（トラクター、コンバイン刈り取り機など）の製造によるものに区分される。本論文では、地域別、生産規模別の米作のLCA比較をおこなうに際し、上述した双方の負荷を算定している。

一年の間に消費される原材料に起因する資源・環境負荷の算定では、３章に述べるデータを用いて、これらの投入量を算定している。これらの各原材料の消費量を(8)式の最終需要ベクトルfの需要量として代入し、そこからの波及、すなわち直接・間接に必要とされる資源消費や環境排出をプロセス連関モデル

によって評価している。

また、農業機械製造に起因する資源・環境負荷の算定では、３章に示すデータより、その投入を評価し、これを(8)式の最終需要ベクトルｆの需要量として代入し、そこからの波及をプロセス連関モデルによって評価している。

プロセス連関モデルのデータベースとなる行列AとEについては、吉岡らによって開発された環境分析用の産業連関表を用いる[2)]。これは、1990年の産業連関表を基に作成されているが、特にCO_2排出については、各プロセスからの排出の精度を高めたものである。

３．入力データ

ここでは、財団法人農林統計協会により発行されている「磁気媒体による農林水産統計提供一覧」の中の米及び麦類の生産費（米）のデータを用いた。これより、1990年における生産規模別、地域別にみた米生産60kg当りの費用内訳を算定した。その結果を表１，表２に示す。

表１．生産規模別にみた米生産６０ｋｇ当りの費用内訳

	0.3ha未満	0.5～1.0ha	1.5～2.0ha	2.5～3.0ha	5.0ha以上
育苗費	673	419	244	200	193
肥料費	1243	1115	948	1031	846
農業薬剤費	1057	931	827	778	714
光熱動力費	380	363	367	374	356
その他の諸材料費	330	288	212	157	264
水利費	766	730	688	806	703
賃借料および料金	2724	1620	836	675	504
建物および土地改良設備費	873	596	441	381	552
農機具費	6387	5733	4698	4110	3098
労働費	9752	7209	5082	4230	3363
費用合計	24185	19004	14346	12742	10593
副産物価格	741	584	364	452	339

表２．地域別にみた米生産６０ｋｇ当りの費用内訳

	全国	北海道	東北	北陸	関東	東海	近畿	中国	四国	九州
育苗費	340	178	278	519	337	456	418	333	470	290
肥料費	1028	777	1048	903	890	1208	1311	1423	1214	1008
農業薬剤費	865	722	763	854	697	977	885	1210	1153	1175
光熱動力費	364	377	331	364	381	337	372	372	464	395
その他の諸材料費	255	271	207	208	327	352	323	343	200	206
水利費	745	684	849	954	746	483	611	354	846	648
賃借料および料金	1197	735	1313	1047	1052	1896	1449	1179	887	1256
建物および土地改良設備費	538	637	407	661	459	607	731	661	1051	442
農機具費	4914	3142	3869	5138	5079	5820	7229	6756	7902	5195
労働費	5972	3704	4730	5811	6952	8043	8025	8508	8374	5814
費用合計	16218	11227	13795	16459	16920	20179	21354	21139	22561	16429
副産物価格	496	405	502	204	583	465	351	584	617	799

４．評価結果

図２、図３では、上のデータを用いて算定された米作百万円当りのCO2発生量を、それぞれ生産規模別、地域別に比較した結果を示す。米百万円の生産額は３章のデータより、約3.7ｔに相当する。ここでの評価結果より、農業機械生産に起因するCO2発生が圧倒的に多いことが分かる。これは、著者らの自動車LCAの結果と比較すると興味深い。[3]自動車LCAにおいては、走行に起因するCO2と製造に起因するCO2の比は、平均的な走行モードで３：１程度であり、渋滞の殆どない平均走行速度の高い領域（44km/ｈ程度）でも３：２程度で走行の割合が大きかった。ところが、米作においては、農業機械の製造に起因するCO2の発生が圧倒的に多くなっている。車としての走行距離を比較してみると、自動車の走行距離が年平均１万ｋｍとしていたのに対し、典型的な農業機械、例えば耕運機などでは、この数分の一から数十分の一にしかならないと考えられる。機械設備の比重が相対的に高くなってしまうのは、上のように稼働率が低いためと考えられる。

地域別、規模別に見ると、スケールメリットの影響が顕著に現れていることが分かる。地域別の変化においても、一般には寒い地域で肥料などの投入が多いと予想されていたのに対し、結果は寒冷地域の方が、CO2発生が少ないというものであった。これは日本の場合、温暖な四国や関西では、生産規模が一般に小さく、地域の影響よりも生産規模の影響が卓越したためと考えられる。

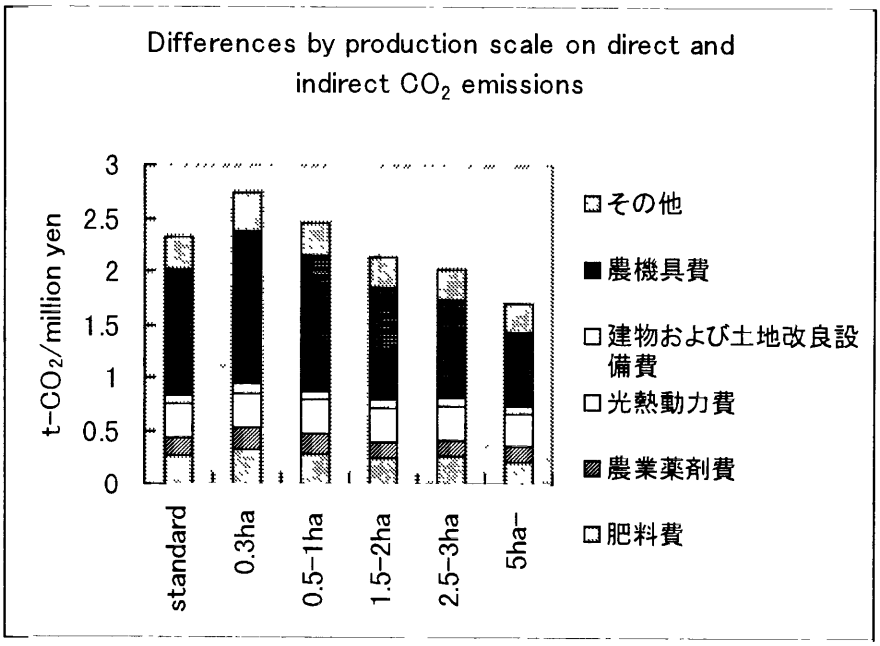


図2．生産規模別の米作百万円当りのC02発生量

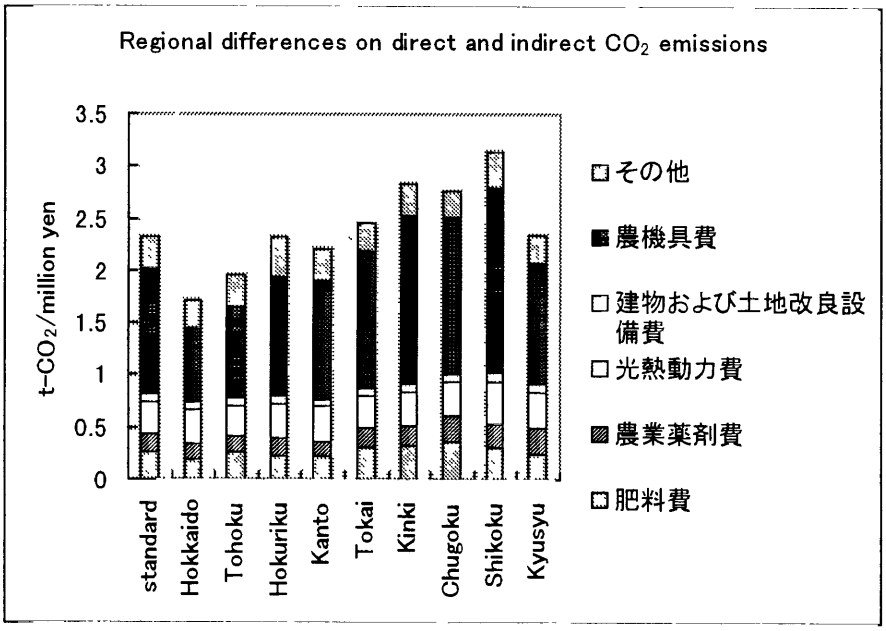


図3．生産地域別の米作百万円当りのC02発生量

5．結論

本稿においては、米作のライフサイクルアセスメントをおこなった。まず、2章において、分析に用いたシステム連関分析によるLCA手法の枠組みについて述べた。次に、このLCA手法の適用対象として、生産地

域別、生産規模別の米作を取り上げ、そのLCA比較をおこなった。この結果、肥料、農薬や機械の運転に要するエネルギーなどの原料投入によるCO2発生と機械設備などの製造に起因するCO2発生を含めたライフサイクルCO_2発生量が算定され、生産規模、生産地域による相違も示された。これより、米作のLCAに固有の特徴が明らかにされた。その第一は、原料投入によるCO2発生よりも、むしろ農業機械の製造に起因するCO2発生の方が大きいということである。これは燃料投入によるCO2発生が殆ど（99%以上）を占める化石燃料発電所、走行モードにもよるが10.15モードでは走行によるCO2発生が3/4程度を占める乗用車と比較しても顕著な特徴である。生産規模に関しては、規模が大きくなるほどCO2発生が小さくなるという傾向が明瞭に現れたが、これも機械の利用が主な原因と考えられる。（規模の小さい水田でも各農業機械を一通り所有する傾向がある。）次に生産地域別の比較では、一般に寒冷地域の方が米の単位生産額当りのCO2発生が小さいという結果が得られた。これも気候条件の違いによる肥料や農薬投入の影響よりも、地形・歴史的条件により、寒冷地域の方が温暖な地域よりも平均生産規模が大きいという規模の影響が卓越した結果となっている。

今後の分析の課題としては、まず、同様の分析を時系列におこなうことが挙げられる。Breiling[4]によると、日本の穀物栽培における単位面積当たりの機械投入台数は、ここ数十年間に 10 倍以上増加している。この背景には農業従事者の老齢化の問題などもあるが、LCA 的にみても、この影響は極めて大きいと考えられる。次の課題として、CO2 以外の温室効果ガスを含めた評価にすることが必要である。特に、メタン・亜酸化窒素の水田からの発生はGWP を用いた等価CO2 発生量としては大きいと考えられるので、信頼できるデータに基づく評価が急務である。また、今回データを利用した財団法人 農林統計協会では、米や麦など穀物の生産統計の他に、野菜の統計や肉牛、ブタ、ブロイラーなどの統計データも比較的安価に磁気媒体で販売している。しばしば言及される畜産への穀物飼料の投入や温室栽培などのLCA 評価をおこなう上でも有用であると考えられる。ただし、これらはあくまで地域別、規模別の平均化された費用データであるため、より詳細なLCA をおこなうためには、ヒアリングや実地調査などに基づく一次データの取得が必要であろう。また、これらの評価から、CO2 の低減につながる建設的な方策を検討すること重要である。ここでは、生産側の事情をも考慮した包括的で実現可能な方策を考案する必要がある。本研究は、未だその緒に就いたばかりであるが、今後上の点を考慮し、鋭意研究を進めていく予定である。

参考文献

1) M. Yoshioka, R. Matsuhashi and H. Ishitani, Study of methodology for life cycle assessment using related process model., International Journal of Global Energy Issues, Vol. 11, Nos. 1-4, pp 104-110 (1999)
2) 池田明由, 篠崎美貴, 菅幹雄, 早見均, 藤原浩一, 吉岡完治, 環境分析用産業連関表, 慶応義塾大学産業研究所(1996)
3) 松橋隆治, 石谷久, 菅幹雄, 吉岡完治, ガソリン自動車と電気自動車のライフサイクルアセスメント, 日本エネルギー学会、77巻12号 pp1184-1192(1998)
4) M. Breiling, T. Hoshino, R. Matsuhashi , Contributions of Rice Production to Japanese Greenhouse Gas Emissions applying Life Cycle Assessment as a Methodology, KEO Discussion Paper, Keio economic Observatory, Keio University (forthcoming)