

農業生産システムの環境影響評価 —OR と LCA—

林 清忠

持続可能な農業生産に転換する必要性が国の政策レベルでも指摘されるようになった。持続可能性を評価し適切な政策立案を行う上で、環境影響を統合化する作業が不可欠である。本稿では、農業生産システムの環境影響評価に適用されてきたLCA（ライフサイクルアセスメント）を取り上げ、OR、特に意思決定分析の視点から、これまでの問題点を再検討する。第1に、LCAにおける機能単位の定義に関する議論を行い、集約度と環境影響の関係も再吟味する。第2に、重み付けによる環境影響の統合化の可能性を検討し、これまでの論点を明らかにする。

キーワード：農業生産システム、意思決定分析、LCA（ライフサイクルアセスメント）、機能単位、統合化

1. はじめに

2005年の3月に農林水産省が公表した新たな「食料・農業・農村基本計画」の中に、「農業が本来有する自然循環機能を発揮することにより、農業生産の全体の在り方を環境保全に貢献する営みに転換していく」という表現がある。前半の自然循環機能の理解については、自然のサービス[6]と農業の機能の関係をより適切に認識する必要があると考える向きも多いと思われる。すなわち、土壌の水質浄化作用のように、それを自然のサービスとみるか、農業の機能とみるかについて、さらなる検討の必要性を感じる場合も多いと考えられる。しかし、後半についての異議は少ないのではなからうか。

そこでの「環境保全に貢献する営み」である農業とは、一般に持続可能な農業（sustainable agriculture）として近年注目されているものである。実際、持続可能な農業の一つと考えられる有機農業は、ヨーロッパにおいては日本の現状からは想像できないほど普及しており、有機農業研究所も多くの大学等に設置されている。世界的にみれば、有機農業以外にも、持続可能な農業と関わる様々な概念が提案されており、その確立と普及に向けた国際的プロジェクトも数多く実施されている[20]。他方で、できるだけ閉鎖的な環境の中で行う集約的生産も、持続可能な農業のもう一

つの姿であると考えられる。オランダの大規模施設園芸（植物工場）は周知のところであろうが、日本においても、食品加工業者が生鮮野菜の生産事業へ進出している。

それでは、多くの土地を必要とする粗放的農業と、土地を節約できる集約的農業のどちらを我々は志向すべきであろうか。農業の持続可能性と集約的生産活動に関する *Nature* 誌上のレビュー論文において、Tilman et al.[26]が指摘しているように、その判断は全体のコストとベネフィットの計算に基づくべきであり、しかも、エネルギー利用、製造および輸送過程等も考慮する必要がある。すなわち、求められているのは統合化とライフサイクル思考である。このことは、LCA（Life Cycle Assessment）を農業へ適用した事例の数が、近年増加していることから確認される[14]。

しかしながら、政策立案等の実際の場面でLCA等を利用するためには、多くの課題を解決する必要がある。すなわち、ORの視点からみればLCAは2つの部分からなるとみなすことができ、このそれぞれについて検討すべき問題がある。第1は、影響領域（地球温暖化等）や保護対象（人間の健康等）ごとにライフサイクル環境影響を見積る部分であり、これはLCI（Life Cycle Inventory）分析を経てLCIA（Life Cycle Impact Assessment）の正規化や重み付けの前までの段階に相当する。第2は、環境影響評価項目（影響領域や保護対象）を統合化するための多基準評価の部分である。本稿で検討するのは、主として前者

はやし きよただ

（独）農業・食品産業技術総合研究機構
〒305-8666 つくば市観音台3-1-1

と関わる環境影響を表す単位（機能単位）の選択の問題、および後者の多基準評価における重み付け（統合化）の問題である。これらの問題は、分析結果（複数の農業生産システム間の優劣関係）が主観に依存する問題とも言い換えられ、前者は分析者の主観、後者は主として意思決定者の主観と関わる。

これらの問題の抜本的解決は困難であると予想されるため、本稿では答えを得ることを直接の狙いとする代わりに、それらの検討を通してOR（特に意思決定分析）とLCAの2つの研究領域の接点（方法と問題点の共通性）を明らかにし、解決策を得るための手がかりを探りたい。以下では、まず第2節で農業生産システムに関する説明を行った後、第3節で機能単位、第4節で重み付けの問題を検討し、最後に若干の展望を行う。

2. 農業生産システムとは何か

農業生産システムは、一般のシステムと同様、複数の構成単位（要素技術）に分解できる。例えばスイスにおける包括的なLCIデータベースであるecoinventは、農業生産システムを4つのカテゴリー（機械・施設、機械・施設の利用、投入、産出）に渡る254の構成単位（module）に区分している[23]。逆からみれば、このことは農業生産システムが複数の要素技術の組合せとして構成できることを示している。すなわち、農業生産システムは意思決定における代替案であり、意思決定分析における戦略表[4]を用いて定義することができる。

意思決定分析とLCAに共通した近年の傾向は、実際の分析に先立つステップが重要視されていることである。Decision Analysis創刊号でKeefer et al.[17]は意思決定分析の適用論文の包括的なサーベイを行っているが、方法論の観点から論文を分類するために導入された8区分のうち2つ（戦略/目的の生成、問題の構造化/定式化）がその事前のステップに関する分類項目であり、戦略表は前者と関わる。LCAについてみると、SETAC（The Society of Environmental Toxicology and Chemistry）による初期のバージョンでは位置付けが与えられていない「目的と調査範囲の設定」のステップに対して、ISO 14040では重要な位置付けが与えられるようになった[2]。

本稿が対象とするのは、このような操作によって定義することが可能な代替案を含む問題である。これは、意思決定分析における離散的代替案の選択問題に相当

するとともに、LCAにおける比較LCA（comparative LCA）でもある。これらは望ましい代替案の文字通りの選択以外に、代替案の比較や順序付け等の実施を目的とするものを含む。

これまでの研究状況を概観すると次の通りである。まず、環境影響を考慮した農業生産システムの選択問題に対して多基準評価を適用する試みは1990年代の初頭からみられる[13]。これはLCAの視点からは、LCI分析の結果に対して直接重み付けを行う方法に相当する。1990年代の後半以降、代わって増加してきているのが、複数の農業生産システムを比較するLCAである[14]。例えば、有機生産、総合的生産（integrated production）、慣行生産を比較した例がみられる。

3. 機能単位の複数性とその含意

LCAにおける機能単位とは、「製品システムが提供する機能を示す性能の定量的尺度」である（ISO 14040）。この節で検討する問題は、分析者が機能単位をどのように定義するかによって、代替案である農業生産システム間の序列が異なり得ることである。機能単位の定義が重要であることは農業生産システムの評価に限られず、例えばBaumann and Tillman [2]は、機能単位の定義、システム境界の設定と配分（産出される財の数が複数の場合における環境負荷の各生産物への振り分け）、用いるデータのタイプ、影響評価手法の選択の4つがLCAを実施する上で重要であること、中でも機能単位がLCAの中心的な概念であることを指摘している。

一つのシステムが数多くの機能を有する場合は、ISO 14040においても指摘されているが、農業生産システムの評価において注目されるのは、複数の機能単位を利用した例が多いこと、および機能単位の複数性を農業の多面的機能論と結びつけて解釈している例があることである[14]。機能単位として用いられてきたのは、農場、面積、生産物等である。単純な生産物ではなく、特定成分の含有量を考慮した上での生産物が機能単位とされる場合もある。例えば、タンパク質含量を考慮した小麦生産量である。

これまでの適用事例は、こうした機能単位の違いによって結果（農業生産システム間の優劣関係）が異なり得ることを示している。典型的な例は、有機生産と慣行生産の比較であり、単位土地面積当たりでは有機生産の環境影響の方が小さいのに対して、単位生産物

当たりでは慣行生産の環境影響の方が小さいという分析事例がある[1]。この機能単位の複数性に関する多面的機能論からの解釈とは、例えば単位生産物当たりの環境影響は生産という基本的機能と関わり、単位面積当たりの環境影響は田園管理 (countryside stewardship) と関わるというものである。

機能単位の選択を検討することが農業生産システムの環境影響評価において重要な理由は、それが集約度と環境影響の関係と関わるからである。つまり、集約的に少ない面積を利用する農業が望ましいのか、有機農業のように粗放的に多くの面積を利用する農業が望ましいのかという議論と深く関わっているからである。もし仮に、社会的に必要とされる生産量が一定とすれば (あるいは途上国における食料需要の増大等を考慮すれば)、単位生産物当たり環境影響の小さい生産システムを採用する方が、社会全体としての環境影響は小さくなる。この結果、妥当なのは集約的農業であるという状況も考えられる。

これまでの分析事例をみると次の通りである。例えば、トマト生産において集約度の上昇過程を経時的に検討した例をみると、単位面積当たり施肥量の増加に伴い、単位面積当たり環境影響 (地球温暖化への影響) は当然ながら大きくなるが、単位生産物当たり環境影響は小さくなることが示されている[12]。また、リンゴ生産において複数農家のデータを基に横断面での傾向を検討した例をみると、単位面積当たりの粗収益が大きくなるにつれ、単位粗収益当たりの環境影響 (エネルギー利用や富栄養化等への影響) が小さくなることが示されている[21]。ここでは粗収益が機能単位である。ただし、これらの事例では、「ゆりかごから墓場まで」の完全なライフサイクルではなく、農産物出荷後の輸送や消費等の過程を含まない部分的なライフサイクルがシステム境界として設定されている。これは、上述の例だけに限定されることなく、農業生産システムの LCA 全般に対して言えることであり[14]、より一般的には生産プロセスの LCA に対して指摘できる[2]。

こうした集約度と環境影響の関係については検討課題も多く、実際にいくつかの関連した論争がある。例えば、食料需要が増大する中、生物 (鳥の種) の多様性を増大させる上で、有機農業のような野生生物にフレンドリーな農業生産と土地の必要量が小さい農業生産のどちらが良いかは、農産物の需要動向および単収増に対する種密度の反応のタイプに依存すること、さ

らにこれまでのデータが示しているのはむしろ後者の方ではないかということ指摘した論文が *Science* 誌に掲載されたが[10]、これに対する反論も出されている[28]。

「規模のエコロジー」をめぐる論争もある。ここでの関心は、規模 (単位面積当たり生産量) と環境影響 (単位生産物当たりエネルギー消費量) の関係である。上の集約度に関する議論の際の焦点は、集約度 (単位面積当たり投入量) と環境影響の関係である。Schlich and Fleissner[25]は、果汁と羊肉を事例にとり、事業規模が大きいほどエネルギー利用効率が良いこと、したがって、環境負荷が小さいことを示している。この「規模のエコロジー」は、日本でも推進されている「地産地消」の環境影響が相対的に小さいとは限らないことを意味し、それが成立するのであれば政策上も大きな含意があることになる。実際、「規模のエコロジー」には、遠距離の生産地から輸入 (移入) された食品を購入することが環境負荷を低減する消費者行動となり得るという含意があり、こうした一般の感覚に反する研究成果はドイツのマスコミでも大きく取り上げられたとのことである[16]。ただし、その論文にはシステム境界やデータ処理等に関する問題点があるとの指摘もある[16]。

Schlich and Fleissner[25]は、上述の結果から、経営管理 (業務効率とロジスティクス) がエネルギー利用効率を高める上で重要であると指摘している。輸送距離より経営管理が重要であると一般論として主張することには検討の余地があると思われるが、環境負荷の小さい適切な農業生産活動を実施する上で都合のよい生産規模があるとは言えそうである。すなわち、持続可能な農業生産システムを構築する上で効率性を高める経営管理が重要であり、それに適した集約度や規模があると解釈することができる。この解釈は、OR 的発想に基づくものであり、いかに生産効率を、さらには環境効率を改善するかという点に関心が向けられることになる。これは、生産増大と環境保全を同時に目指す二重の緑の革命 (doubly green revolution) [5]の方向でもある。

4. 重み付けによる統合化の可能性

前節での機能単位に関わる話題以上に、この重み付け (統合化) は論争のある分野である。ここでの問題は、主観的要素 (意思決定者の選好) を抜きにしては評価が完結しないこと、しかも主観を捉える方法の選

表1 環境影響の統合化における意思決定分析とLCAの比較

意思決定分析 選好モデルの類型	LCA	
	統合化の手法・概念	適用のレベル
「距離」に基づくモデル	DtT法	インベントリ, ミッドポイント
	パネル法	ミッドポイント, エンドポイント
「効用」に基づくモデル	経済評価法	エンドポイント
	DALY (QALY)	人間健康への被害評価

択(分析者の意思決定)に結果(代替案間の優劣関係)が依存することである。農業生産システムのLCAにおいては、目標値(基準値)からの距離に基づいて重み付けを行う方法(DtT法; distance-to-target method)が例外的に適用されている程度であるが[3], 評価の際には、とりわけLCAを意思決定に利用する際には、この重み付けに関わる問題は避けて通れない問題であるため、本節で検討したい。

LCIAに関するISO 14042において重み付けは任意要素とされており、競合する他社製品と自社製品の統合化による比較を外部に公表することは禁止されているものの、LCIAにおいて重み付けの方法は数多く提案されている[15, 27]。それらを整理すると表1のようになる。意思決定分析の視点からは、統合化に用いられているモデルは大きく「距離」に基づくモデルと「効用」に基づくモデルに分類できる。前者にはミンコフスキー距離によって意思決定者の選好を表現するモデルが含まれ、先のDtT法がここに属する。この方法は、基準値として環境規制等の値を用いる場合には、意思決定者の選好モデルには必ずしもなっていない点に注意が必要である。インベントリ(物質)レベルでこれを適用した例としてはJEPIX (Japan Environmental Policy Index)があり、ミッドポイント(地球温暖化等の影響領域)レベルで用いた例としてはEco-indicator 95が有名である。

後者は効用理論等に基づくモデルである。パネル法は個人または複数の人間から選好情報を聞き出す多様な方法の総称である。理論的には「距離」と「効用」の両方を用いることができるが、これまでLCIAに用いられてきたのは、後者であるとみなすことができる。この方法は、ミッドポイントおよびエンドポイント(人間健康等の保護対象)のレベルでこれまでに適用されている。有名なEco-indicator 99は、エンドポイントレベルで用いた例である。そこでは、Thompsonらの文化理論に基づいて3つの類型(階層主義者、平等主義者、個人主義者)が設定され、それに対応した3種類の係数が用意されている。経済評

価法としては、コンジョイント分析やCVM (Contingent Valuation Method; 仮想市場評価法)がエンドポイントレベルで適用されている。

Eco-indicator 99等の被害算定型のLCIAにおいては、人間健康に対する被害を表す指標としてDALY (Disability-Adjusted Life Year)が用いられている。健康経済学や医療行為の意思決定においてはQALY (Quality-Adjusted Life Year)が利用されることが多いが、DALYにおける年齢による重み付けと時間割引を考慮しない場合には、DALYは全体の面積(完全な健康状態で期待される寿命を全うした場合)からQALYを引いた部分に相当する。これらの概念も、効用理論に基づいているとみなすことができる。実際、QALYにおいて、QOL (Quality of Life)を示すHUI (Health Utility Index)やEuroQol等の既存の指標システムでは不十分であると判断された場合には、分析者は重みであるQOLを決定する必要があるが、その際に用いられる基準的賭け (standard gamble) という方法は、多属性効用関数におけるvariable probability methodという重み付け法と同じである[29]。

なお、「距離」に基づくモデルは効用理論の枠組で考えることもできるが、多目的計画法(目標計画法、妥協計画法、希求水準法等)と多属性効用関数を用いる方法の違いを考慮して表では別の分類とした。また、この2類型以外にアウトランキング法も知られているが、LCIAにおいて用いられた例はないようである(この分類等については林[11]等を参照)。

さて、統合化の何が問題なのであろうか。第1に注目したいのは、重みの意味、したがって測定法をめぐる論争である。多目的計画法の分野では、重み付けによる意思決定は有効ではないという指摘もあるが[22]、LCIAにおける手法開発の流れとしては、「距離」から「効用」へと関心が移ってきている[15]。しかし、代替案選択問題における重み付けについては、LCIAの文脈ではこれまでほとんど言及されなかった認識上の相違がある。有名な誌上論争の一つはManagement Science誌上のDyer[8]、およびそれをめぐる反論、再反論である。もう一つは、Journal of Multi-Criteria Decision Analysis誌上での、Salo and Hämmäläinen[24]、およびそれに関する6つのコメントと応答である。これらの論争から読み取れることの一つは、その認識上のギャップの大きさである(この点を説明した教科書・マニュアルにはGoodwin

and Wright[9], DETR[7]等がある)。

しかし、LCIAに話題を絞ると、DALY等の明確な単位で健康や環境への被害が評価されている場合には、単位を明示的に考慮した重み付けを実施した方が望ましいのではないかと最低限いえると思われる。そのためには、コンジョイント分析における選好モデルであるコンジョイントモデル、多属性効用理論における多属性価値関数等を選好モデルとして利用すること、すなわち、属性のいくつかの水準、あるいは属性水準のレンジを考慮した重み付けを行うことが必要である。この点は、価値のトレードオフを行う際によくみられる誤りとしてKeeney[18]が取り上げているところでもある。

LCAとは異なり間接的影響を考慮しない(つまりシステム境界に肥料製造過程等を含まない)方法ではあるが、農業生産システムの評価法として、MODSS(Multiple Objective Decision Support Systems)がUSDA(United States Department of Agriculture)等に所属する研究者のグループによって提案されたことがある(<http://www.coastal.crc.org.au/modss/index.html>等を参照)。これは、「効用」に基づくモデルをインベントリレベルで用いるという表1には存在しない方法であり、順序(多属性価値関数における属性の重み)の情報を与えれば代替案の評価ができる簡単な方法であると説明されている。しかし、ここにも上と同様の問題点がみられる。

第2の論点は、誰の選好をモデリングすべきか、社会的価値をいかに評価するかという点と関わる。これは、「人間は生物多様性より健康を(あるいは富栄養化より地球温暖化を)重要だと考えている。ゆえに社会はそれに対応した生産システムを選択すべきである(あるいは製品を供給すべきである)」という主張が妥当かどうかということである。ここで、「人間」は被験者、意思決定者、利害関係者、一般消費者、専門家等と、「社会」は地域、企業等と置き換え可能である。この問題は、LCIAにおいても既に検討されており、妥当でないと主張する場合に根拠とされるのは社会的価値の存在である[27]。類型論等を用いずに単一指標は存在するという前提で行ったコンジョイント分析の結果が重み付けに利用可能であるためには、上の主張が妥当でなければならない。しかし、地域政策にLCAを適用する場合ははじめ、再考を迫られる場面も多いと考えられる。ミクロ経済学と意思決定分析の双方の視点からのさらなる検討が必要であろう。

5. トランジション・マネジメント—むすびにかえて—

冒頭で引用した「食料・農業・農村基本計画」の中の表現が述べているのは、持続可能な農業生産システムへの転換(トランジション)の必要性である。本稿での方法論的検討は、トランジション・マネジメントでの利用を念頭において実施した作業である。取り上げた話題は主としてLCAと関わるものに限定したが、類似した評価構造をもつ方法は他にもある。例えば比較リスク分析であり、これはリスク評価と多基準評価を含む方法である[19]。これらをより包括的な視点から、しかも事例ベースで検討することが、様々な障壁を乗り越え転換を実現するための一助となるであろう。

謝辞 本稿の一部は、日本学術振興会の科学研究費補助金(基盤研究(C)16580194)の助成を受けて実施した成果である。

参考文献

- [1] Basset-Mens, C. and van der Werf, H. M. G.: "Scenario-based environmental assessment of farming systems: the case of pig production in France," *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 105: 1-2 (2005), 127-144.
- [2] Baumann, H. and Tillman, A.-M.: *The Hitch Hiker's Guide to LCA*, Studentlitteratur, Lund (2004).
- [3] Brentrup, F.: *Life Cycle Assessment to Evaluate the Environmental Impact of Arable Crop Production*, Cuvillier Verlag, Göttingen (2003).
- [4] Clemen, R. T.: *Making Hard Decisions*, 2nd edn., Duxbury Press, California (1996).
- [5] Conway, G.: *The Doubly Green Revolution*, Cornell University Press, New York (1997).
- [6] Daily, G. C. ed.: *Nature's Services*, Island Press, Washington, D. C. (1997).
- [7] DETR (Department of the Environment, Transport and the Regions): *Multi-Criteria Analysis: A Manual*, London (2000).
- [8] Dyer, J. S.: "Remarks on the Analytic Hierarchy Process," *Management Science*, 36: 3 (1990), 249-258.
- [9] Goodwin, P. and Wright, G.: *Decision Analysis for Management Judgment*, 3rd edn., John Wiley & Sons, Chichester (2004).
- [10] Green, R. E., Cornell, S. J., Scharlemann, J. P. W. and Balmford, A.: "Farming and fate of wild nature."

- Science*, 307 (2005), 550-555.
- [11] 林清忠：農業の意思決定分析：多基準と多主体のマネジメント，養賢堂，東京（2000）。
- [12] 林清忠：「農業生産システムの環境影響評価における機能単位の複数性—集約度と環境負荷の関係—」，第1回日本LCA学会研究発表会講演要旨集（2005），108-109。
- [13] Hayashi, K.: "Dealing with multiple objectives in agriculture," in Weintraub, A., Bjorndal, T., Epstein, R. and Romero, C. eds., *Handbook on Operations Research in Natural Resources*, Springer, Berlin (2006). (to appear)
- [14] Hayashi, K., Gaillard, G. and Nemecek, T.: "Life cycle assessment of agricultural production systems: current issues and future perspectives," *International Seminar on Technology Development for Good Agricultural Practice in Asia and Oceania*, Tsukuba (2005), 154-171.
- [15] 伊坪徳宏・稲葉敦（編著）：ライフサイクル環境影響評価手法，産業環境管理協会，東京（2005）。
- [16] Jungbluth, N. and Demmeler, M.: "The ecology of scale: assessment of regional energy turnover and comparison with global food" by Elmar Schlich and Ulla Fleissner," *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 10: 3 (2005), 168-170.
- [17] Keefer, D. L., Kirkwood, C. W. and Corner J. L.: "Perspective on decision analysis applications, 1990-2001," *Decision Analysis*, 1: 1 (2004), 4-22.
- [18] Keeney, R. L.: "Common mistakes in making value trade-offs," *Operations Research*, 50: 6 (2002), 935-945.
- [19] Linkov, I. and Ramadan, A. B.; *Comparative Risk Assessment and Environmental Decision Making*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht (2004).
- [20] McNeely, J. A. and Scherr, J.: *Ecoagriculture*, Island Press, Washington, D. C. (2003).
- [21] Mouron, P., Nemecek, T., Scholz, R. W. and Weber, O.: "Life cycle management on Swiss fruit farms: relating environmental and income indicators," *Ecological Economics* (2005). (accepted for publication)
- [22] 中山弘隆・谷野哲三：多目的計画法の理論と応用，計測自動制御学会，東京（1994）。
- [23] Nemecek, T., Heil, A., Huguenin, O., Erzinger, S., Blaser, S. and Dux, D.; *Life Cycle Inventories of Agricultural Production Systems*, Ecoinvent Report No. 15, Dubendorf (2004).
- [24] Salo, A. A. and Hämäläinen, R. P.: "On the measurement of preferences in the Analytic Hierarchy Process," *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 6: 6 (1997), 309-319.
- [25] Schlich, E. H. and Fleissner, U.: "The ecology of scale: assessment of regional energy turnover and comparison with global food," *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 10: 3 (2005), 219-223.
- [26] Tilman, D., Cassman, K. G., Matson, P. A., Naylor R. and Polasky, S.: "Agricultural sustainability and intensive production practices," *Nature*, 418 (2002), 671-677.
- [27] Udo de Haes, H. A. et al. eds.: *Life-Cycle Impact Assessment: Striving Towards Best Practice*, SETAC, Pensacola, Florida (2002).
- [28] Vandermeer, J. and Perfecto, I.: "The future of farming and conservation," *Science*, 308 (2005), 1257.
- [29] von Winterfeldt, D. and Edwards, W.: *Decision Analysis and Behavioral Research*, Cambridge University Press, New York (1986).