

農業生産システムにおけるトレードオフ —方法論をめぐる横断的展望—

農業・食品産業技術総合研究機構
中央農業総合研究センター
林 清忠

1. はじめに

農業生産におけるトレードオフの克服法を検討する際の出発点は、次の2つの区別であろう。第1は、技術的なブレークスルーによりトレードオフが解消される場合である。たとえば水田作において、一般的にはトレードオフにあると考えられているメタンと亜酸化窒素の双方の排出量を抑える施肥や水管理の技術が開発された場合である。また、人間の健康への影響や生態系への環境負荷がない農薬が開発された場合も相当する。第2は、トレードオフが存在する状況下で、望ましい答えを探索する場合である。これまで経済学、OR/MS (operations research and management sciences)、意思決定分析 (decision analysis)、リスク分析 (risk analysis) 等の研究分野が対象にしてきたのは後者であり、本報告においてもトレードオフの存在を前提とする。

このとき、トレードオフを克服するためには、(1)トレードオフがどこにあるか、(2)トレードオフをどのように測るか、(3)トレードオフにどのように対処するかを検討することが必要である (Winter, 2005)。本報告では、主として(2)に焦点を当て、農業生産におけるトレードオフに対処するための方法論に関する横断的な展望を試みる。

第2節では、農業分野の研究者の手によって開発された多基準評価手法を取り上げる。この手法は成功したとはいえなかったが、それはなぜであるか、また LCA のようなフレームワークが必要となる理由を説明する。第3節では、農業分野における LCA の適用状況を検討し、地球温暖化、富栄養化等の影響領域のレベルでのトレードオフを検討する。また、統合化の方法についても検討を加える。第4節は、LCA を発展させた持続可能性評価を検討対象とする。第5節では、多基準評価を再度取り上げ、代替案選択の際の重み付けの問題を検討する。これまでの複数の方法の間での対立点を明確化するとともに、方法論発展の今後の可能性を示す。

2. ナイーブな多基準評価

かつて、USDAARS に所属する研究者を中心とするグループによって、MODSS (Multiple Objective Decision Support Systems) という方法論が提示されていた (El-Swaify and Yakowitz, 1998; MODSS, 1999)。これは、離散型の多基準意思決定分析に分類される手法である。類似した視点からの研究活動は、Farming Systems Design という国際会議 (FSD, 2009) に引き継がれているようではあるが、つまり双方とも iEMSs (International Environmental Modelling and Software Society) と関係を有するという点で共通しているが、MODSS に関しては現在までに活動を停止したようである。

MODSS で用いられているのは、ウェイトの順序の制約下で、価値関数の値の加重和を最大化または最小化する以下の数理計画問題である (Hayashi, 2002)。

$$\begin{aligned} & \text{mimimize or maximize } v(a_i) = \sum_{j=1}^n w_j v_j(x_{ij}) \\ & \text{subject to } \sum_{j=1}^n w_j = 1 \\ & w_1 \geq w_2 \geq \dots \geq w_n \geq 0 \end{aligned}$$

ここで、 $v(a_i)$ は代替案 a_i の総価値、 w_j は第 j 属性に対するウェイト、 $v_j(\cdot)$ は第 j 属性に関する価値関数、 x_{ij} は代替案 a_i の第 j 属性のレベル、 n は属性の数である。

取り上げられている属性の例を示すと、次の通りである (Heilman et al., 1997)。経済性を表わす属性としては純収益が用いられている。環境影響については、施肥に起因する成分、薬剤散布に起因する成分、その他に区分されており、施肥に関する指標としては、表流水中の窒素量、浸透水中の硝酸性窒素量、薬剤散布に関する指標としては、表流水中のアトラジン量、沈殿物中のアトラジン量、表流水および地下水中のその他成分量、その他としては沈殿物量、表土剥離量である。

離散的な多基準分析によって、複数の農業生産システムから一つを選択するというような問題を解く試みには、上の MODSS 以外にも INRA における Girardin らの取り組み (Arondel and Girardin, 2000) 等がある。しかしながら、これら一連の方法にはいくつかの問題点があり、先に述べた MODSS の活動停止もそれらと関わっていると推察される。主要な問題点は以下の 2 つである (Hayashi, 2007)。

第 1 は、ウェイトに関わる問題点である。これは、ウェイトを直感的に相対的重要性として解釈することに伴う問題点、つまりトレードオフに適切に対処できていないという問題点である。この点は第 5 節でも検討する。第 2 は、問題の構造化である。物質 (インベントリ) レベルで意思決定者の選好を導き出すことには無理があり、LCA における影響領域 (地球温暖化、富栄養化等) のように、より上位の概念を導入する必要がある。次節で説明する LCA の適用数の増加も、この点が背景にあると考えられる。

3. ライフサイクルアセスメント (LCA)

(1) 影響領域の段階での評価

農業分野における LCA の適用事例数は、近年、急速に増加している。農業生産システムにおいても、ミッドポイントとエンドポイントの各水準でのトレードオフを検討することが重要であると考えられるが、実際には、ほとんどの適用事例はミッドポイントのタイプである。

本節では、影響領域の段階でのトレードオフを、有機農業と慣行農業の比較として検討する。表 1 は、パン用冬小麦の有機栽培を慣行栽培と比較した結果である (林, 2008)。このう

ち Nemecek ら (2005) はスイスの Therwil で 1978 年に開始された DOC-trial と呼ばれる長期圃場試験 (Mäder et al., 2002)、および Alberswil の Burgrain 実験農場で 1991 年に開始されたファーミングシステムの長期的な実行可能性の試験をベースとした LCA を実施している。前者については、必要な影響領域に関して分析結果が報告書からは得られないため、表には後者に関する情報のみを記載した。報告書ではスイスおよびドイツにおける慣行の値が使用されているが、表では Burgrain-trial での有機をスイスの慣行と比較している。

表 1 影響領域別にみた慣行農業に対する有機農業の環境影響

	Audsley et al. (1997)*	Nemecek et al. (2005)** per ha × year	per kg DM	Williams et al. (2006)***
資源消費		n.a.	n.a.	
土地利用 (占有)	++	n.a.	+****	++
気候変動			+	
光化学オキシダントの生成	+		+	n.a.
酸性化	++	++	++	+
富栄養化		+	+	++
エネルギー利用				

+ 有機農業の環境影響の方が、慣行農業の環境影響より大きい。

++ 有機農業の環境影響の方が、慣行農業の環境影響より 2 倍以上大きい。

* スイスにおける低投入有機システムが、イギリスにおける高投入システムと比較されている。機能単位は、タンパク含量 12% のパン小麦 1 トンである。

** スイスにおいて、Burgrain 圃場試験における有機生産システムが、慣行システム (モデル) と比較されている。

*** イギリスにおいて、有機パン小麦生産が非有機生産と比較されている。機能単位は、パン小麦 1 トンである。

**** レポートの単収に関する情報から計算された値である。

イギリスでの 2 事例 (Audsley et al., 1997; Williams et al., 2006) をみると、地球温暖化については有機栽培の方が小さい値となっているが、酸性化あるいは富栄養化については逆になっている。つまり、ここにはトレードオフがある。スイスの事例 (Nemecek et al., 2005) をみると、単位面積当たりの環境影響については同様であるが、生産物当たりの場合には異なった傾向となっている。

(2) LCA における統合化

それぞれの影響領域に関する評価を統合し、単一指標を得る方法として、LCA では、表 2 のような方法が用いられている (林, 2006)。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、Ecological Scarcity 法等の DtT (Distance-to-Target) 法が含まれる。ただし、「距離」として定義されているのは比率である。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。経済評価法としては、コンジョイント分析等がエンドポイントレベルで適用されている。

表2 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

以上のように、LCA は、問題の構造化が考えられているという点で、前節で検討したナイーブな多基準評価に比べ洗練されているといえる。しかしながらその反面で、多基準評価の視点から見ると、環境以外の側面が抜け落ちていることがわかる。そこで次に、環境の側面に加え、経済と社会の側面をも考慮する持続可能性評価を検討したい。

4. 持続可能性評価

持続可能性は、図1のように、環境、経済、社会の交わりとして定義される場合が一般的である。まず、上の LCA の流れとは別に展開されてきた、持続可能性指標および持続可能性基準を概観しておく。持続可能性指標は、評価対象を環境、経済、社会のそれぞれの視点から評価するための複数の指標であり、農業の分野においても適用事例がある。ただし、最大維持可能漁獲量(maximum sustainable yield)のような単一指標作成の試みも含まれる(Bell and Morse, 2008)。バイオ燃料に関する持続可能性基準および指標については、現在、GBEP (Global Bioenergy Partnership) 等において策定作業が続けられている。

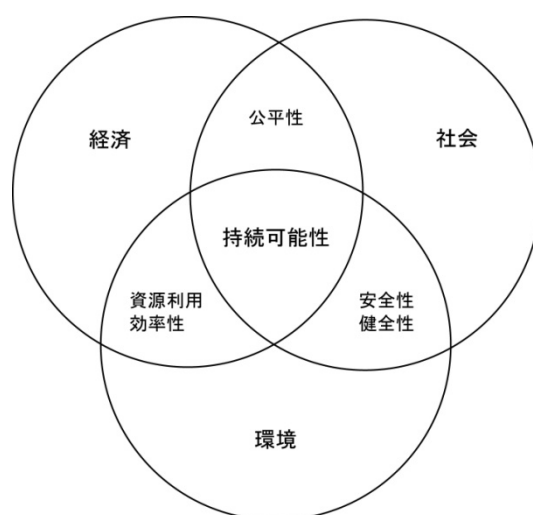


図1 持続可能性の概念図

次に検討するのは、LCA の発展形態としての持続可能性評価である。これは、環境の側面と関わる LCA、経済の側面と関わる環境 LCC (environmental life cycle costing)、社会の

側面と関わる社会 LCA (social life cycle assessment) からなる。環境 LCC と社会 LCA の要素を含むものを新たに LCA として理解する場合もある (Hunkeler et al., 2008)。社会 LCA については、最近、ガイドラインが公刊された (Benoît and Mazijn, 2009)。

さて、以上のように、環境の側面に加え、経済および社会の側面を評価の視野に入れた後に残された問題は、統合化である。

5. 多基準評価再訪

(1) Decision Analysis versus AHP

以上で検討した持続可能性評価において、最も望ましい代替案を選択する場合には、それぞれの指標の加重和を求めることが自然な方法であると考えられる。しかしながら、そのウェイトを求める方法ならびにその基となる理論は単一でなく、相互に対立している。有名な例は、*Management Science* での Dyer (1990) 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* における Salo and Hämäläinen (1997) およびそれに関する 6 つのコメントと応答である。

これらはいずれも、評価対象を表す数値 (属性のレベル) に基づいてウェイトが導き出される Decision Analysis と、言葉を用いた相対的重要性をウェイトとする AHP との対立である。持続可能性評価の中には AHP を利用している場合もあり、注意が必要である。

(2) Constructed Preference versus Stated Preference

複数の選好を何らかの形で合成して社会的な選好を導出し、それに基づき単一指標を得るという発想は、LCA の中にもみられる。その一例は、コンジョイント分析によって LCIA におけるウェイトを求めるという方法 (第 4 節における「経済評価法」) である。しかしながら、この方法には多くの批判がある。注目される批判は、岡 (2009) によるものである。その要点は以下のように要約できる。WTP (willingness to pay) によって推定された値に意味はなく、しかも不安定である。そのため、費用便益分析の実施は困難であり、費用効果分析的な手法に可能性がある。

ここでは、別の可能性を提示したい。岡が示している限界削減費用に基づく方法では、環境・経済・社会の全体に関わる持続可能性を評価することは容易でないと考えられるからである。すなわち、持続可能性評価における決定基準は費用有効度でなく、それを一般化した多属性効用の最大化である。

このとき有効な方法であると考えられるのは、**preference construction** である (Slovic, 1995; Bettman et al., 1998)。その背景となる考え方は、人間 (意思決定者、消費者等) は表明すべき明確かつ安定的な選好を有しておらず、決定プロセスにおいて選好は構築されるというものである。Slovic の論文では、適用領域の例として環境評価、インフォームドコンセント等が述べられているが、近年ではマーケティングの領域でも注目されている。

ここでの課題は、普遍的な係数を求めることではなく、グループの意思決定となる (Milch et al., 2010)。第 4 節で示したパネル法と類似してはいるが、その点は大きく異なり、これまで **decision conferencing** として検討されてきた内容に近づくとと思われる。

6. むすび

近年注目されているカーボンフットプリントは、ライフサイクルでの温室効果ガス排出量であり、LCAの複数の影響領域のうち、地球温暖化だけに注目した指標である。このことは、LCAがそもそも多基準評価としての特徴をもっていたことを考えると、皮肉でもある。地球温暖化とその他の影響領域とのトレードオフを考慮しないことを意味するからである。

農業生産においてもトレードオフは様々な場面にあり、それを明確に把握することは、トレードオフを解消する農業生産技術を開発する上でも重要である。そうした、いわばウィン・ウィンの技術開発は必ずしも容易ではないため、本論で検討したようなトレードオフ下での意思決定の方法論が有用となる場面も多いと期待される。

参考文献

- 1) Arondel C. and Girardin P. (2000) Sorting cropping systems on the basis of their impact on groundwater quality. *European Journal of Operational Research*, 127(3): 467–482.
- 2) Audsley E., Alber S., Clift R., Cowell S., Crettaz P., Gaillard G., Hausheer J., Jolliett O., Kleijn R., Mortensen B., Pearce D., Roger E., Teulon H., Weidema B. and van Zeijts H. (1997) *Harmonisation of Environmental Life Cycle Assessment for Agriculture*. Silsoe Research Institute.
- 3) Bell S. and Morse S. (2008) *Sustainability Indicators: Measuring the Immeasurable?* 2nd edn. Earthscan.
- 4) Benoît C. and Mazijn M. eds. (2009) *Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products*. United Nations Environmental Programme.
- 5) Bettman J.R., Luce M.F. and Payne J.W. (1998) Constructive consumer choice processes. *Journal of Consumer Research*, 25(3): 187–217.
- 6) Dyer J.S. (1990) Remarks on the Analytic Hierarchy Process, *Management Science*, 36(3): 249–258.
- 7) El-Swaify S.A. and Yakowitz D.S. eds. (1998) *Multiple Objective Decision Making for Land, Water, and Environmental Management*. CRC Press.
- 8) FSD (2009) *Farming Systems Design 2009: An International Symposium on Methodologies for Integrated Analysis of Farm Production Systems*.
- 9) Hayashi K. (2002) Weighting in MODSS: interpretation and effectiveness. In: Lawrence P.A. and Robinson J. eds. *Proceedings of the 2nd International Conference on Multiple Objective Decision Support Systems for Land, Water and Environmental Management (MODSS'99)*, Queensland Department of Natural Resources and Mines, Australia.
- 10) Hayashi K. (2007) Dealing with multiple objectives in agriculture. In: Weintraub A., Romero C. Bjørndal T. and Epstein, R. eds. *Handbook of Operations Research in Natural Resources*. Springer Verlag.

- 11) 林清忠 (2003) 農業環境問題と最適化. システム/制御/情報, 47(6): 259–264.
- 12) 林清忠 (2006) 農業生産システムの環境影響評価—OR と LCA—. オペレーションズ・リサーチ, 51(5): 268–273.
- 13) 林清忠 (2008) 有機農業は環境にやさしいのか: 農業の LCA が示すこと. 日本 LCA 学会誌, 4(2): 112–117.
- 14) Heilman P., Yakowitz D.S. and Lane L.J. (1997) Targeting farms to improve water quality. *Applied Mathematics and Computation*, 83(2–3): 173–194.
- 15) Hunkeler D., Lichtenvort K. and Rebitzer G. eds. (2008) *Environmental Life Cycle Costing*. CRC Press.
- 16) Mäder P., Fließbach A., Dubois D., Gunst L., Fried P. and Niggli U. (2002) Soil fertility and biodiversity in organic farming. *Science*, 296: 1694–1697.
- 17) Milch K.F., Weber E.U., Appelt, K.C., Handgraaf M.J.J. and Krantz, D.H. (2010) From individual preference construction to group decisions: Framing effects and group processes. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, 108(2): 242–255.
- 18) MODSS (1999) 2nd International Conference on Multiple Objective Decision Support Systems for Land, Water, and Environmental Management (MODSS'99) and community participation workshop: conference program and abstracts.
- 19) Nemecek T., Huguenin-Elie O., Dubois D. and Gaillard G. (2005) *Okobilanzierung von Anbausystemen im Schweizerischen Acker- und Futterbau*. Schriftenreihe der FAL, 58.
- 20) 岡敏弘 (2009) 費用便益分析と LCA. 日本 LCA 学会誌, 5(4): 562–566.
- 21) Salo A.A. and Hämmäläinen R.P. (1997) On the measurement of preferences in the Analytic Hierarchy Process, *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 6(6): 309–319.
- 22) Slovic P. (1995) The construction of preference. *American Psychologist*, 50(5): 364–371.
- 23) Williams A.G., Audsley E. and Sandars D.L. (2006) *Determining the Environmental Burdens and Resource Use in the Production of Agricultural and Horticultural Commodities*. Cranfield University and Defra.
- 24) Winter H. (2005) *Trade-offs: An Introduction to Economic Reasoning and Social Issues*. The University of Chicago Press.