

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 22 日現在

機関番号：82111

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26340110

研究課題名(和文) 食料生産と環境のトレードオフ解消のためのLCAベース意思決定支援手法の開発と適用

研究課題名(英文) Development and Applications of LCA-based Decision Support Methods for Resolving Trade-offs between Agricultural Production and the Environment

研究代表者

林 清忠 (Hayashi, Kiyotada)

国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構・農業環境変動研究センター 環境情報基盤研究領域・主席
研究員

研究者番号：40355475

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：持続可能な食料生産システムの構築に資するため、生産性と環境影響を総合的に把握するモデルを開発するとともに、集約度(農業生産における管理の強度)が生産性と環境に与える影響を評価した。まず、複数の農業生産システムを比較検討するため、単位面積当たり収量(生産性)と単位面積当たり環境影響からなる平面上での統合化の方法を示した。次いで、異なった肥料管理を行う3つの水稻生産システムの比較、有機および慣行輪作体系の比較を実施するため、この方法を適用した。さらに、集約度の環境影響評価の枠組みを拡張するという視点から、音響的多様性概念を用いた評価を検討した。

研究成果の概要(英文)：To support the establishment of sustainable food production systems, integrated models for assessing productivity and environmental impacts were developed with measuring the influence of management intensity on productivity and the environment. First, integrated methods were proposed on a two-dimensional plane with crop yields per area unit (productivity) and the environmental impact per area unit. Then, the methods were applied to the comparisons between three rice productions systems with different fertilizer management options and between organic and conventional crop rotation systems. Furthermore, the applicability of acoustic diversity was reviewed to extend the assessment framework for environmental impacts of management intensity.

研究分野：農業におけるライフサイクルアセスメント

キーワード：ライフサイクルアセスメント(LCA) 意思決定 トレードオフ 食料生産 持続可能性

1. 研究開始当初の背景

世界人口の増加、肉食への移行、バイオ燃料の利用拡大等に起因する世界の食料需要のさらなる増大に対応するため、環境への負荷が小さい食料生産を確立するための研究が世界的に実施されている。食料生産と環境のトレードオフを解消し、両者を両立させるための重要な研究の一つが、密度・収量関数（横軸の収量に対して縦軸に環境影響としての種密度が描かれる関数）から、land sharing と land sparing の優劣を明らかにしようとする研究である(Phalan et al., 2011)。Land sharing とは食料生産と環境保全を同一の土地で実現しようとするアプローチであり、land sparing とは高生産性農業により土地を節約し環境保全のための土地をより多く確保しようとするアプローチである。この2つのアプローチの対比は、近年、外国資本による農地買収 (land grabbing) が頻発していることから注目されている。

一方で、農業・食品分野におけるライフサイクルアセスメント (LCA) 研究が近年活発になってきており、国際会議も隔年で開催されている。その中で、食料生産と環境の両立は重要なテーマであり、有機栽培と慣行栽培の比較、集約的栽培と粗放的栽培の比較等も実施されている (Notarnicola et al., 2012; Van der Werf et al., 2014)。

2. 研究の目的

本研究は、上述したこれまでの研究を統合的に捉えることにより、持続可能な食料生産システムを構築するためのより操作的な決定支援手法を開発することを目的とする。そのための事例として、日本およびインドネシアにおける分析を行う。研究目的の詳細は、以下の通りである。

(1) 生産性と環境影響を総合的に把握するモデルを開発する。これまでの生産効率ならびに環境効率に関する研究を統合的に捉えたモデルを提示し、代替案(生産システム等)の選択に関する意思決定の支援に活用する方法を示す。

(2) 集約度 (農業生産における管理の強度) が生産性と環境に与える影響を評価するとともに、関連するデータを収集する。ライフサイクルでの環境影響が対象であるため、農業生産のバックグラウンドプロセスである肥料、農薬、農業機械の製造・輸送プロセスも対象に含む。生物多様性等についても、研究期間内に可能な範囲で収集する。

3. 研究の方法

(1) 単位面積当たり収量 (生産性) と単位面積当たり環境影響からなる平面を出発点とし、両者を統合する指標をどのように導出するかを検討する。これは、農業分野における

LCA でみられた機能単位に関する議論 (単位生産物当たり環境影響、単位面積当たり環境影響等の複数の指標を検討するという考え方) から、効率性の判断 (あるいは意思決定の支援) へ視点を移行させることを意味する。さらに、より現実的な判断を行うため、生産性の不確実性と環境影響の不確実性を同時に考慮する方法を検討する。

(2) 集約度 (農業生産における管理の強度) が生産性と環境影響に与える影響を評価する事例として、異なった施肥管理を実施する複数の水稻生産システムの比較 LCA、有機輪作体系と慣行輪作体系の比較 LCA を実施する。

(3) 近年その必要度が高まっている生物多様性の評価を、どの程度 LCA の中に組み込むことができるかを検討する。集約度が環境に与える影響を評価するという既述の視点を拡張し、これまでの研究をサーベイするとともに、現地でのモニタリング手法を視野に入れた検討を行う。

(4) 対象とした農業生産システムのライフサイクルインベントリ (LCI) データがどのように構築できるかを検討する。肥料製造等の農業投入財製造プロセスも対象とする。

4. 研究成果

(1) 比較検討の対象となる複数の農業生産システムを、単位面積当たり収量 (生産性) と単位面積当たり環境影響からなる平面にプロットすることにより、統合化の方法と結果 (農業生産システムの優劣) を示した (図 1 左) (Hayashi, Nagumo and Domoto, 2016)。これにより、LCA で一般的な判断を拡張した枠組を示すことができる。すなわち、通常の LCA における望ましさを順位 (原点を通る直線と横軸との角度である) の昇順) は、 b , a , c であるが、包絡線を引くことにより効率性を判断するトレードオフ分析においては、 a と b に優劣がつけられない状況となる。このとき、 a と b はパレート最適解である。

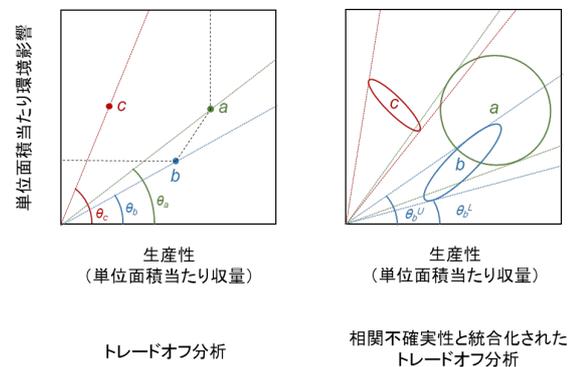


図 1. 生産性と環境影響を統合するモデル (不確実性を考慮したトレードオフ分析の拡張)

(2) 農業に特徴的と考えられる不確実性に対処するため、本研究では、さらに、この中に相関不確実性を組み入れたモデルを開発した(図1右)(hayashi, Nagumo and Domoto, 2016)。楕円の大きさが不確実性を表している。aにおいては、生産性と環境影響の相関が小さいこと、bにおいては正の相関があること、cにおいては負の相関があることを示している。bは、ポートフォリオ効果のみられる状況に相当し、高収量が高環境負荷によって相殺される状態にあることを示している。

(3) このモデルによって、異なった肥料管理を行う以下の3つの水稲生産システムを比較した(図2)(hayashi, Nagumo and Domoto, 2016)。化学肥料を利用したシステム(慣行) 開放攪拌により作成した鶏ふん堆肥を利用したシステム(低窒素) 密閉型発酵装置により作成した鶏ふん堆肥を利用したシステム(高窒素)。まず、「慣行」と「低窒素」の間にはトレードオフが存在することが示された。次いで、「低窒素」の楕円が大きいこと、「高窒素」と「慣行」の楕円は接していること、「慣行」と「高窒素」には、ポートフォリオ効果が見られることが示された。以上から、この事例においては、堆肥を用いる生産システムとしては、「低窒素」より「高窒素」に可能性があることが示された。

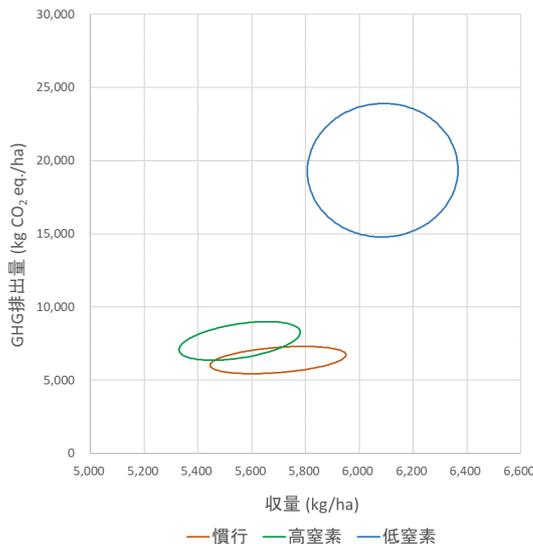


図2. 各生産システムの95%信頼区間

(4) 集約度の変化を検討する他の事例として、複数の慣行輪作体系と有機輪作体系を比較した(Hokazono and Hayashi, 2015)。分析に用いたモデルは、不確実性は考慮していないものの、図1と基本的に同じである(図3)。これはトレードオフがあるケース、は生産性(収量/面積)と環境影響(環境影

響/面積)をともに改善できるケースを説明している。

有機農業への転換の3つのケース

	トレード・オフ (左図)	環境影響/収量 (右図)
慣行→有機①	有	改善
慣行→有機②	有	改善
慣行→有機③	無	同上

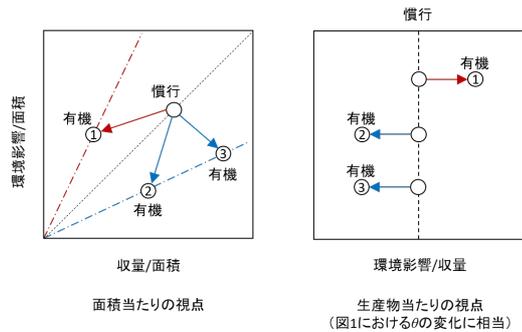


図3. 有機農業への転換の3つのケース

(5) 有機と慣行のそれぞれ複数の輪作体系を、既述のモデルを用いることによって比較した(図4)(Hokazono and Hayashi, 2015)。まず、輪作体系(1~7と「稲単作」)の各ポイントごとの比較を実施し、個々の輪作体系については、トレード・オフ(収量の低下とGHG排出量の低減)があることが示された。これは、図3のケースに相当する。次いで、本研究では、輪作体系を有機と慣行の間で全体として比較するため、包絡線(フロンティア)を比較する方法を適用した(図4における包絡線の比較)。その結果、2つの包絡線が交差していることが示され、有機輪作体系全体と慣行輪作体系全体の間にもトレードオフの関係があることが明らかとなった。

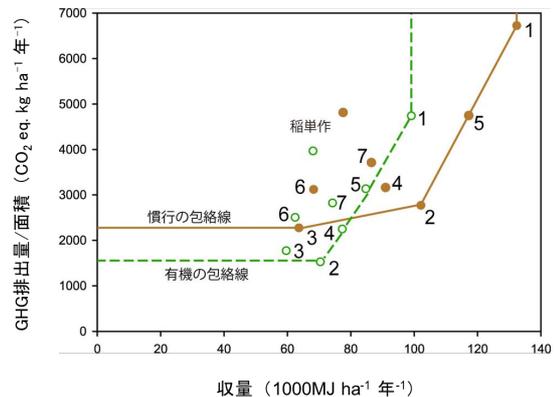


図4. 有機・慣行輪作体系の比較 LCA (影響領域のうち地球温暖化のみを例示)

注: 各番号は次の輪作体系を表している。: 1 (R-WB) 2 (S-WB) 3 (R-S) 4 (R-WB-S) 5 (R-WB-S-WB) 6 (R-R-S) 7 (R-R-WB-S) ただし、R:水稲、WB:大麦、S:大豆。

(6) LCA の枠組みにおいても、土地利用および土地利用変化の生物多様性への影響評価に関する研究が進展しているため、まず、既往研究のサーベイによって現状を明らかにした (Hayashi, Dhian Lelyana and Erwinsyah, 2016)。その結果、その手法には、空間的方法 (地理上の位置と土地利用類型から影響の程度を決定する方法) と構成的方法 (管理技術の種類、その強度等から影響の程度を決定する方法) の2つの類型があることが示された。また、前者の方法においては、集約度が扱えないため、有機栽培と慣行栽培の比較評価等が実施できないこと、後者の方法においては、集約度を評価可能であるが、全球同一の方法での評価は困難であることが明らかとなった。異なった農業生産システム間の比較を実施する本研究においては、前者の問題点は大きく、代替的な方法の必要性が示された。

(7) そこで本研究では、農業生産の現場における多様性を簡単にモニタリングする方法 (音響的多様性の概念の活用) の可能性を検討した (Hayashi, Dhian Lelyana and Erwinsyah, 2016; Hayashi, Dhian Lelyana and Erwinsyah, 2015)。LCA における土地利用の影響評価においては、一般に、 x (横) 軸を時間、 y (縦) 軸を生物多様性 (あるいは生態系) の質、 z 軸を土地面積とするモデルが用いられるが、その際の質の指標 (y 軸) としてモニタリングに基づいた指標を用いることを想定している。事例としたのは、持続可能なパームオイルに関する認証制度等において生物多様性が重要な論点になっているインドネシアであり、森林から農地への転換に関する現地調査を実施するとともに、南スマトラ (Dawas プランテーション) および西カリマンタン (Ngabang プランテーション) において、プランテーション、プランテーション内部の森林、隣接する保全林でのレコーディングを実施した。音響的複雑性 (多様性に対応) の計算結果は森林における値が大きいとは限らなかったものの、音響的非類似性 (多様性に対応) の計算結果から、プランテーションと森林との違いが識別できることが明らかとなり、土地利用の LCA における活用の可能性が示された。

(8) 本研究では、農業生産システムの比較 LCA を実施する過程で、LCI データを同時に構築した。世界的に標準として用いられている ecoinvent 等の既往の LCI データベースとの整合性をとりつつ、分析対象である農業生産システムの特徴を反映したデータがどのように作成できるかを検討した。その結果、農作業プロセスを構造化した農業生産プロセスの LCI を作成することにより、対象の特徴と統合的なデータが作成できると考えられた。また、肥料製造プロセスについても、構造化により機械製造プロセスを組み入れ

ることにより、対象の特徴を反映したデータ作成が可能になると考えられた。これらの方法により、データの汎用性が高まるとともに、関連する評価事例での利用可能性が高まることが期待された。

< 引用文献 >

Phalan, B., Onial, M., Balmford, A., Green, R.E. 2011. Reconciling food production and biodiversity conservation: land sharing and land sparing compared. *Science*. 333, 1289-1291.

Notarnicola, B., Hayashi, K., Curran, M. and Huisingsh, D. 2012. Progress in working towards a more sustainable agri-food industry. *Journal of Cleaner Production*. 28, 1-8.

Van der Werf, H., Garnett, T., Corson, M., Hayashi, K., Huisingsh, D. and Cederberg, C. 2014. Towards eco-efficient agriculture and food systems: theory, praxis and future challenges. *Journal of Cleaner Production*. 73, 1-9.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 4 件)

- 1) Kiyotada Hayashi, Yoshifumi Nagumo, Akiko Domoto, Linking environment-productivity trade-offs and correlated uncertainties: Greenhouse gas emissions and crop productivity in paddy rice production systems, *Science of The Total Environment*, 査読有, 571, 2016, 134-141, 10.1016/j.scitotenv.2016.07.138
- 2) Kiyotada Hayashi, Vita Dhian Lelyana, Erwinsyah, Using Acoustic Diversity in Life Cycle Assessment of Agriculture: Case Studies of Oil Palm Production in Indonesia, 10th International Conference on Life Cycle Assessment of Food 2016, Book of Abstracts, 査読有, 2016, A285-A290
- 3) Shingo Hokazono, Kiyotada Hayashi, Life cycle assessment of organic paddy rotation systems using land- and product-based indicators: a case study in Japan, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 査読有, 20, 2015, 1061-1075, 10.1007/s11367-015-0906-7
- 4) Kiyotada Hayashi, Akiko Domoto,

Yoshifumi Nagumo, Naoto Kato,
Introduction of uncertainty into
trade-offs between productivity and
life cycle environmental impacts in
rice production systems: Assessing the
effectiveness of nitrogen-concentrated
organic fertilizers, Proceedings of the
9th International Conference on Life
Cycle Assessment in the Agri-Food
Sector, 査読有, 2014, 517-522,
[http://lcafood2014.org/proceedings/LC
A_Food_2014_Proceedings.pdf](http://lcafood2014.org/proceedings/LC_A_Food_2014_Proceedings.pdf)

〔学会発表〕(計 9 件)

- 1) Kiyotada Hayashi, Yoshifumi Nagumo, Akiko Domoto, Does higher crop productivity coincide with increased environmental impacts? Implications of correlated uncertainties in comparative life cycle assessment of rice production systems, The 12th Biennial International Conference on EcoBalance, EcoBalance 2016, 2016 年 10 月 3 日 ~ 2016 年 10 月 6 日, 京都テルサ(京都府・京都市)
- 2) Kiyotada Hayashi, Decision analytic perspectives on life cycle assessment: how to use preferences, 3rd International Conference on Adaptive and Intelligent Agroindustry, 2015 年 8 月 3 日 ~ 2015 年 8 月 4 日, ポゴール(インドネシア)
- 3) Vita Dhian Lelyana, Erwinsyah, Kiyotada Hayashi, Development of life cycle inventories for palm oil in North Sumatra: modeling site-specific activities and conditions, 3rd International Conference on Adaptive and Intelligent Agroindustry, 2015 年 8 月 3 日 ~ 2015 年 8 月 4 日, ポゴール(インドネシア)
- 4) Kiyotada Hayashi, Vita Dhian, Erwinsyah, Applicability of acoustic diversity to life cycle assessment of land use: a case study of oil palm production in South Sumatra, SETAC Europe 25th Annual Meeting, 2015 年 5 月 3 日 ~ 2015 年 5 月 7 日, バルセロナ(スペイン)
- 5) 林 清忠, Vita Dhian Lelyana, Erwinsyah, 音響的多様性概念の LCA における利用可能性: 南スマトラにおけるオイルパーム生産を事例とした考察, 第 10 回日本 LCA 学会研究発表会, 2015 年 3 月 9 日 ~ 2015 年 3 月 11 日, 神戸大学六甲大第 1 キャンパス(兵庫県・神戸市)

- 6) Kiyotada Hayashi, Assessing impacts of land use change and management intensification: A life cycle perspective on agricultural production, The 11th International Conference on EcoBalance, 2014 年 10 月 27 日 ~ 2014 年 10 月 30 日, つくば国際会議場(茨城県・つくば市)
- 7) Kiyotada Hayashi, Recent trends in LCA databases for agriculture and food, Current situation of agriculture and food LCA databases: The 1st LCA food supply chain Asia international workshop, 2014 年 10 月 27 日, つくば国際会議場(茨城県・つくば市)
- 8) Kiyotada Hayashi, Koichi Shobatake, Current progress in Japan and Korea, Current situation of agriculture and food LCA databases: The 1st LCA food supply chain Asia international workshop, 2014 年 10 月 27 日, つくば国際会議場(茨城県・つくば市)
- 9) Kiyotada Hayashi, Koichi Shobatake, JALCA Database: Recent progress, LCA Agri-Food Asia 2014, 2014 年 5 月 22 日 ~ 2014 年 5 月 23 日, バンコク(タイ)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

林 清忠 (HAYASHI, Kiyotada)

国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構・農業環境変動研究センター 環境情報基盤研究領域・主席研究員

研究者番号: 40355475