

令和 5 年 6 月 15 日現在

機関番号：82111

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2022

課題番号：18K11745

研究課題名（和文）時間的・空間的シナリオ不確実性を組み入れたプロスペクティブLCAの構築

研究課題名（英文）Construction of prospective LCA through incorporating temporal and spatial scenario uncertainties

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・農業環境研究部門・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） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：ライフサイクルアセスメント（LCA）を活用し持続可能な調達を実現する上で、データの入手可能性に起因する不確実性を考慮することが重要である。そのため、対象とする不確実性をエピステミック（知識の不十分性に基づく）不確実性と明示化した上で、シナリオ不確実性を定式化した。まず、データの質に基づいた従来の方法ではなく、意思決定者の知識状態を組み入れた新たな方法を提示した。次いで、土地利用変化を事例とし、知識状態に対応したライフサイクルGHG排出量を求めるとともに、知識状態を考慮した確率分布を導出した。さらに、バリューチェーンに関する視点を持続可能な農業システムへの転換の視点と連結する方法を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ライフサイクルアセスメント（LCA）が様々な場面で利用されるようになったが、計算結果の信頼性については多くの課題が残されている。本研究では、不確実性を解析する視点からその課題にアプローチし、データの質ではなく、想定されているシナリオに起因する不確実性（エピステミック不確実性）を導出する方法を提案した。これにより、LCAを政策等で活用する場面において、様々なシナリオと不確実性分析を直接関連付けることが可能となり、農業技術改善の程度や環境ラベルの効果等をより現実的な視点から検討できるようになる。

研究成果の概要（英文）：Specifying uncertainties due to data availability is essential to achieve sustainable procurement through applying life cycle assessment (LCA). Therefore, the concept of epistemic uncertainty, which can be refined through knowledge acquisition, was employed, and scenario uncertainty was formulated. Firstly, a new method was developed to incorporate the decision-maker's knowledge, which departs from the conventional method based on data quality formulation. Subsequently, life cycle GHG emissions from land use change were calculated considering the state of knowledge, and the probability distribution was also derived using the knowledge information. Additionally, a framework was developed to establish a connection between the perspective of the food value chain and the transition to sustainable agricultural systems.

研究分野：農業生産システムの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） シナリオ不確実性 プロスペクティブLCA 意思決定 持続可能な調達

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ライフサイクルアセスメント(LCA)が、環境情報開示をはじめとする様々な分野で適用されるようになった。しかしながら、計算の前提となるシナリオの設定が不自然な場合がみられ、これが過大な GHG 排出量等の計算結果をもたらしている。そこでこの研究では、シナリオの設定に伴う不確実性を明示的に定式化することにより、この問題を解決する方法の確立を目指す。プロスペクティブ LCA 等におけるこれまでの定式化を検討した上で、食料生産、とりわけ土地利用変化を事例として取り上げ、シナリオ不確実性がどのように定式化できるかを、空間(立地)の不確実性も視野に入れつつ明らかにする。

2. 研究の目的

本研究では、ライフサイクルインベントリ分析の中に、時間的・空間的シナリオ不確実性を体系的に導入する方法を確立することを通して、より妥当な意思決定を行うための基盤となる LCA の方法論を提案する。第 1 に、意思決定者の知識状態、推論、判断を明示的に定式化することにより、時間的・空間的シナリオ不確実性を考慮したプロスペクティブ LCA を構築する。第 2 に、その方法論がどのように適用できるかを明らかにするため、土地利用変化を伴う食品原料調達に関する LCA を行う。

3. 研究の方法

本研究は、以下の 3 つのアプローチに基づいて実施する。第 1 は、意思決定者あるいは分析者の主観的情報を知識状態として、さらには推論、判断として定式化することである。これまでも、文化理論に基づく類型化を導入することにより、主観的情報を扱う方法は提案されているが、本研究で注目するのは、ecoinvent バージョン 3 で導入されたマーケットプロセスである。これを本研究では、生産の場所が特定できない状況(空間的情報に関して無知の状態)に対処するプロセスと把握する。第 2 は、シナリオ不確実性、さらにはシナリオ決定不能性を明示的に定式化することである。本研究では根源的な不確実性として捉えられるエピステミック(知識の不十分にに基づく)不確実性を対象とする。第 3 は、革新的生産技術導入に伴う時間的不確実性、および地域差に伴う空間的不確実性を統一的に分析することである。すなわち、これまでに研究されてきた時間的シナリオ不確実性に加え、空間的シナリオ不確実性を対象とする。

4. 研究成果

(1) 時間的・空間的不確実性を考慮するための事例として、持続可能な調達における土地利用変化の問題(インドネシアにおけるオイルパーム生産の上流)を検討した。インベントリデータ利用時に直面する不確実性を、エピステミック不確実性として把握した上で、フォアグラウンドとバックグラウンドの(参照する側と参照される側の)非整合性、シナリオの決定不能性の 2 つに区分した。

(2) 前者のフォアグラウンドとバックグラウンドの非整合性については、オイルパーム生産で使用される肥料の製造を事例として検討した。これまでのライフサイクル GHG 排出量の計算事例を検討した結果、想定されている肥料製造技術が旧来のものであること、本来の地域における肥料製造データでなく、他地域(ヨーロッパ)のデータが使用されている等の事例が散見された。この非整合性に由来する不確実性を実際に試算したところ、想定する肥料製造技術が利用可能な最善の技術である場合には、平均的な技術の場合に比べ、肥料製造からの排出量が最大で 0.4 程度、パームオイル生産からの排出量が最大で 0.85 程度となることが示された。また、ヨーロッパのデータの代用ではなく、本来の地域のデータが使用された場合には、肥料製造段階において最大で 2.6 倍程度、パームオイル生産段階において最大で 1.1 倍程度になると計算された。以上の結果は、フォアグラウンドとバックグラウンドの間での時間的・空間的非整合性が、シナリオ不確実性の原因となっており、この非整合性を可能な限り解消することが LCA を実施する上で重要であることを示唆している()。

(3) 後者に対する意思決定分析の適用可能性を検討するため、知識状態の変化に伴う解の変化を検討した。これにより、データの質(信頼性、代表性等を表すカテゴリカルな情報)に基づいた不確実性の導出(従来の方法)ではなく、意思決定者の知識水準を組み入れた新たなアプローチを提示した。事例として、南スマトラのオイルパームプランテーションからのライフサイクル GHG 排出量を、現地の調査データと ecoinvent のデータを組み合わせることによって評価した。多年生の農地への 5 つの土地利用変化シナリオ(草地、一次林、二次林、一年生の農地、多年生の農地から多年生の農地への変化)を取り上げ、5 つの仮定(a) 無知 1 (ラプラス基準)、(b) 無知 2 (区間推定)、(c) 生産量に関する知識有、(d) 衛星データから得た知識有、(e) 以前の土地利用に関する知識有)の下で計算された結果を比較した。置かれた仮定により GHG 排出量は大きく異なること、推計された区間には大きな幅(-0.70 ~ 1.89 kg CO₂ eq./kg FFB)があるこ

とが示された。また、情報獲得 (c)から(d)へ、(d)から(e)への変化)につれて、GHG 排出量が推計された区間の中央に近づいていく様子が示された。以上の結果は、ecoinvent におけるマーケットプロセスを、知識状態の記述の視点から捉え直した上で、シナリオ不確実性を分析する必要性を示している ()。

(4) 上記検討の中で区間数として定式化したシナリオ不確実性を、確率分布として導出する方法を開発した。すなわち、シナリオ不確実性をエピステミック不確実性として定式化することにより、知識水準に対応した確率分布を求める方法を確立した。この方法は LCA ソフトウェアには現時点で含まれないため、リスク分析ソフトウェアを援用した計算手順を示した。この方法により、インドネシアにおける多年生の農地への土地利用変化に起因するライフサイクル GHG 排出量の確率分布を算出し、マーケットプロセスに基づく従来の計算手順は過少推計をもたらすこと、環境ラベル等によって森林破壊がないことが保証される場合には、GHG 排出量が劇的に減少することが示された。これらの結果は、シナリオ不確実性下における持続可能な調達等の問題を解析する上で、環境基準や環境ラベルに対応したインベントリデータの構築が重要であることを示している ()。

(5) 環境ラベルに関するシナリオ不確実性の分析を、持続可能な農業システムへの転換(トランジション)の分析と連結することを意図し、生産物当たり環境影響を、収量増加の効果と面積当たり環境改善の効果に分解する方法を提示した。環境負荷低減を目指した農業技術開発に焦点を当て、これまでの分析事例(慣行農業から有機農業への転換等)を網羅的にサーベイし、データセットを作成した上で、この分解方法を適用した。その結果、食品バリューチェーンの視点は、農業システムの転換の視点と接続可能であること、食品バリューチェーンにおける環境負荷削減は、農業技術開発の過程における生産性と環境負荷のトレードオフと直結できることが明らかになった ()。

(6) 食料生産における土地利用変化を検討するためのもう一つの事例として、ベトナムメコンデルタにおけるエビ等の養殖を検討した。実態に即したシナリオ生成を行い、マングローブ林(保全林)内での養殖、養殖地内にマングローブ林を残した養殖、集約的養殖等の類型を設定した。その上で、インベントリデータの作成を通し、持続可能な調達への含意を示した。

(7) 土地利用変化が生物多様性に与える影響を LCA の枠組において処理することを意図し、音響的視点から生物多様性にアプローチする方法を用いることによって、ランドスケープとサウンドスケープを一体的に解析した。その中で、オイルパームプランテーションと周辺の森林との間には、ペアワイズ 多様性(対になった環境間での多様性の違い)に対応する音響的非類似性指標を用いることにより、違いが識別できることを線形混合効果モデルによって示した。これらの結果は、均質的な音響空間を多様化させることが、持続可能なプランテーションの確立の視点から有用であることを示唆している ()。

< 引用文献 >

Hayashi K (2019) Creating a “family tree” on fertilizer inventory use in life cycle assessment of oil palm: visualization of earlier studies and its implications. *Int J Life Cycle Assess* 24:1805–1815

Hayashi K (2020) Spatially prospective life cycle assessment to cope with scenario uncertainty in inventories: an approach to sustainable procurement of agricultural products. *Proceedings of the 12th International Conference on Life Cycle Assessment of Food*, 402–406

Hayashi K (2022) Integrating epistemic uncertainty quantification into life cycle assessment to visualize the influence of environmental standards and labels. *Proceedings of the 13th International Conference on Life Cycle Assessment of Food*, 205–208

Hayashi K (2022) Partitioning product footprint changes into yield and environmental improvement effects: toward life cycle assessment of agricultural system transitions. *Int J Life Cycle Assess* 28: 336–348

Hayashi K, Erwinsyah, Lelyana VD, Yamamura K (2020) Acoustic dissimilarities between an oil palm plantation and surrounding forests: analysis of index time series for beta-diversity in South Sumatra, Indonesia. *Ecol Indic* 112:106086

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 Kiyotada Hayashi	4. 巻 28
2. 論文標題 Partitioning product footprint changes into yield and environmental improvement effects: toward life cycle assessment of agricultural system transitions	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The International Journal of Life Cycle Assessment	6. 最初と最後の頁 336-348
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s11367-022-02112-2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Kiyotada Hayashi	4. 巻 -
2. 論文標題 Integrating epistemic uncertainty quantification into life cycle assessment to visualize the influence of environmental standards and labels	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the 13th International Conference on Life Cycle Assessment of Food (LCA Foods 2022)	6. 最初と最後の頁 205-208
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Kiyotada Hayashi	4. 巻 -
2. 論文標題 Spatially prospective life cycle assessment to cope with scenario uncertainty in inventories: an approach to sustainable procurement of agricultural products	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the 12th International Conference on Life Cycle Assessment of Food (LCAFood2020)	6. 最初と最後の頁 402-406
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Kiyotada Hayashi	4. 巻 25
2. 論文標題 Inconsistencies between regional- and field-scale biodiversity indicators within life cycle assessment: the case of rice production systems in Japan	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The International Journal of Life Cycle Assessment	6. 最初と最後の頁 1278-1289
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s11367-020-01749-1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Kiyotada Hayashi, Erwinsyah, Vita Dhian Lelyana, Kohji Yamamura	4. 巻 112
2. 論文標題 Acoustic dissimilarities between an oil palm plantation and surrounding forests: analysis of index time series for beta-diversity in South Sumatra, Indonesia	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Ecological Indicators	6. 最初と最後の頁 106086
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ecolind.2020.106086	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Kiyotada Hayashi	4. 巻 24
2. 論文標題 Creating a "family tree" on fertilizer inventory use in life cycle assessment of oil palm: visualization of earlier studies and its implications	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The International Journal of Life Cycle Assessment	6. 最初と最後の頁 1805-1815
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11367-019-01607-9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kiyotada Hayashi	4. 巻 -
2. 論文標題 Correlations between regional- and field-scale biodiversity indicators within life cycle assessment: the case of rice production systems in Japan	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Conference Proceedings, The 11th International Conference on Life Cycle Assessment of Food (LCA Food 2018)	6. 最初と最後の頁 84-86
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 Kiyotada Hayashi
2. 発表標題 Integrated landscape and soundscape management for agricultural sustainability: rethinking food production and forest conservation
3. 学会等名 10th International Workshop on Advances in Cleaner Production (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kiyotada Hayashi, Longlong Tang
2. 発表標題 Assessing future technologies for agricultural systems: how to cope with extreme hotspot values
3. 学会等名 ACLCA 2021 Virtual Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kiyotada Hayashi
2. 発表標題 Is LCA useful for sustainable procurement? Proposal of a spatially prospective approach
3. 学会等名 LCA XIX (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 林清忠、志村もと子、湯龍龍
2. 発表標題 農業生産システムのライフサイクルインベントリにおける技術と空間情報の統一的把握
3. 学会等名 第15回日本LCA学会研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kiyotada Hayashi
2. 発表標題 Establishment of sustainable oil palm management through life cycle assessment
3. 学会等名 The 6th Quadrennial International Oil Palm Conference (IOPC 2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kiyotada Hayashi, Koichi Shobatake, Naoki Makino, Masanori Saito
2. 発表標題 Developing life cycle inventories for agricultural production systems in Asian countries: lessons from LCA Food Supply Chains Asia Project
3. 学会等名 The 13th Biennial International Conference on EcoBalance (EcoBalance 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
インドネシア	インドネシアオイルパーム研究所			
ベトナム	ミエンタイ建築大学			
フィリピン	フィリピン稲研究所			