

## 論文の内容の要旨

論文題目      Life cycle design of packaging by integrating  
                                 environmental and functional aspects  
(環境性と機能性を統合した容器包装のライフサイクル設計)

氏 名      横川 直毅

容器包装は、その多彩な機能によって製品ライフサイクル中で人間に様々な便益をもたらす機能を持つ一方で、使用後は廃棄物になるために地球環境への配慮が求められる。そのため、容器包装は、環境性と機能性のトレードオフを考慮して設計される必要がある。現在の容器包装設計の中心は、様々な要求に応えるための機能であり、様々な機能性が評価されてきた。機能性に加え、持続可能な開発への要求が高まる中で、ライフサイクルにおける環境性も設計段階で考慮するべきとされてきた。既往の環境性に関する研究では、容器包装の環境影響評価として素材・製造プロセス・廃棄処理プロセスが主に議論されてきたが、こうした既往の評価は、容器包装の機能が製品ライフサイクルに与える影響を含んでいない。機能による影響を捉えるために、内容物のライフサイクルまで評価対象とする必要がある。

対象範囲を拡大した上で容器包装の環境性と機能性に着目すると、環境配慮設計に対して3つの方針が挙げることが可能となる。このうち方針2と3には、製品ライフサイクル中でトレードオフが生じている。例えば方針2では、高機能材料を使用して容器包装の環境影響を増加させても、賞味期限を延長して食品ロスを削減することでその増加を打ち消す場合がある。方針3では、消費者は環境性が高い製品よりも機能性が高い製品を選択する場合がある。方針1を採用することが理想ではあるが、方針2や3を採用せざるを得ない場合も多い。しかしながら、これらのトレードオフを定量的に把握する手法

は未確立である。容器包装の設計により製品ライフサイクルへの様々な波及効果（設計効果）を把握することを支援した上で、これらのトレードオフを評価する必要がある。生じたトレードオフを定量的に把握しつつ、得られた結果を意思決定で活用するための情報流が示される必要がある。

本研究の目的は、環境性と機能性を統合した容器包装のライフサイクル設計のための意思決定を支援することである。本研究におけるライフサイクル設計とは、持続可能な開発に資するために、「製品ライフサイクルへ波及する設計効果を考慮した設計をすることである。本博士論文では、以下の4つの課題に取り組むことで、容器包装設計者が持続可能な開発に貢献するための指針を示す。

- 課題 1: 容器包装の設計効果の可視化
- 課題 2a: 製品ライフサイクル中の環境影響のトレードオフ分析
- 課題 2b: 環境性と機能性のトレードオフ分析
- 課題 3: 意思決定支援フレームワークの構築

課題に取り組むために、ケーススタディを用いて容器包装の製品ライフサイクルへの設計効果を具体的に把握した。ケーススタディの対象製品として、容器包装の70%以上が食品・飲料用であることから、4つの食品（ハム・紙パック牛乳・カットキャベツ・ポテトサラダ）を選択した。また、本研究の有用性の確認と適用性を拡大するために、1つの日用品（衣料用液体洗剤）を選択した。環境影響評価としては、ライフサイクルアセスメント（LCA）を用いた。いずれの製品においても、容器包装と内容物の製造から廃棄までの一生を評価対象としている。また、アクティビティモデリング手法として、機能モデリング手法である IDEF0 を用いた。

容器包装設計者には、その設計が製品ライフサイクルに与える影響は不明瞭である。ライフサイクル設計の実施には、その設計が与える影響を設計段階で把握可能にする必要がある。そこでまず、設計効果を可視化することを目的とした。（課題1）

文献調査と産業界へのヒアリング調査により、製品ライフサイクルを構成する要素とそれらの関係を示すことで、設計効果を表した。設計者が、表した設計効果を把握可能にするために、Life Cycle Association Matrix（LCAM）とFunction Network Diagram（FND）という2つの設計支援ツールを作成した。この2つのツール上で設計効果を可視化することで、設計フローにおける設計案生成・設計案評価・設計案採択において設計者を支援することが可能となる。

製品ライフサイクルにおける設計効果を可視化することで、課題1に取り組んだ。これにより、設計者がその設計効果を把握することが可能となる。環境性と機能性において設計効果を把握することで、製品ライフサイクル全体における環境配慮設計の方針を決めることができる。その方針ごとに製品ライフサイクルにおいて生じるトレードオフ

が特定できるため、後述する課題2a・2bの議論が可能になった。

容器包装の環境配慮設計の方針2では、機能向上によって容器包装ライフサイクルの環境影響が増加しても、機能発現によって製品ライフサイクル全体では環境影響を下げることを目指す。この機能に由来する製品ライフサイクル内での環境影響のトレードオフを分析する手法が必要である。本研究では特に、食品ロス削減に着目し、容器包装の高機能化による食品ロス削減と環境影響増加のトレードオフを分析することを目的とした。（課題2a）

分析フレームワークとして、トレードオフを表す指標を計算する分析と、消費者行動のシナリオ分析により、機能向上の発現ポテンシャルを評価する分析を定義した。

容器包装に起因する環境影響のトレードオフを、食品ロスの削減に関して分析することで課題2aに取り組んだ。指標を導入することで、製品機能が発現すべき程度を示した。また、シナリオ分析によって製品機能が発現する消費者をより詳細に表した。本分析手法に則ることで、設計者が製品ライフサイクルにおける環境影響のトレードオフを把握することが可能となる。

容器包装の環境配慮設計の方針3では、機能を下げることによって製品ライフサイクルの環境影響を下げることを目指す。特に容器包装の環境影響が大きい製品では、容器包装由来の環境影響の削減が必要である。ゆえに、方針3における機能低下と環境影響削減のトレードオフを分析する手法が必要である。特に消費財を研究対象としていることから、機能の価値として消費者基準の価値を導入し、価値と環境影響のトレードオフを分析することを目的とした。（課題2b）

容器包装の消費者調査には、選択型コンジョイント分析を用いることで、製品機能と製品の価値を表した。ポテトサラダを対象に、容器包装の食器代替性などの機能を評価するとともに、機能向上によって生じる環境影響を特定した。これらを比較し、消費者の知覚価値を大きく損なうことなく、環境影響を削減するために選ぶべき機能を特定した。

容器包装に起因する環境影響と機能のトレードオフを、消費者の価値に着目して分析することで課題2bに取り組んだ。定量的に環境影響と価値を示すことで、環境影響を削減するための製品機能の選択が可能となる。本分析手法に則ることで、設計者が製品ライフサイクルにおける環境影響と機能的価値のトレードオフを把握することが可能となる。

得られた分析結果やツールを実際に容器包装設計の意思決定で活かすために、その設計中の情報流を表す必要がある。機能モデリング手法であるIDEF0を用いて、その情報流を記述することを目的とした。（課題3）

トップアクティビティを容器包装設計者視点での「容器包装のライフサイクル設計を実施する」として、アクティビティに必要な制御と機構を示し、それに伴う出力を示した。また、トップアクティビティを5つのサブアクティビティに分解し、既往の設計フローとの互換性をとりつつアクティビティモデルを構築した。各課題1・2a・2bに取り組んだことによって得られた研究成果が、設計フロー上でどのように役立つのかを示した。

ライフサイクル設計のための容器包装設計における意思決定をアクティビティモデルによって記述することで、課題3に取り組んだ。現在の機能を中心に捉える設計に沿う形で、本研究の結果を活かすための情報流を示すことで、各分析の結果の役割を明確にした。ケーススタディの結果を集約し、各アクティビティにおける既往の設計とライフサイクル設計の比較することで、ライフサイクル設計の意義を示した。

本研究では、環境性と機能性を統合した容器包装のライフサイクル設計のために、4つの課題に取り組んだ。まず、現在の機能中心の設計の流れに沿いつつ、製品ライフサイクルへの設計効果を把握できるツールを開発した。製品機能を中心に製品ライフサイクル中での関係を把握することで、製品ライフサイクルにおけるトレードオフを明らかにした。次に、環境影響間のトレードオフと環境性と機能性のトレードオフに関して分析した。さらに、そのトレードオフを把握できる意思決定支援フレームワークを示すことで、容器包装設計時の意思決定におけるライフサイクル設計の指針を示した。

ライフサイクル設計を導入し、製品ライフサイクルへの設計効果を環境性と機能性から捉えることで、容器包装の機能が与える人間と地球環境の両面に対する影響を考慮した容器包装の設計が可能となる。本研究で示した容器包装のライフサイクル設計の指針により、容器包装設計から持続可能な開発への貢献する一助となる。