

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 8 日現在

機関番号：12612

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2014

課題番号：23710182

研究課題名(和文) 製品再生ライフサイクル志向の循環型生産・物流システムのモデル化と評価

研究課題名(英文) Modeling and Evaluation of Product Recovery Lifecycle-oriented Closed-loop Production and Logistics Systems

研究代表者

山田 哲男 (Yamada, Tetsuo)

電気通信大学・情報理工学(系)研究科・准教授

研究者番号：90334581

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、リユース・リサイクルによる製品の資源循環におけるモノの流れに着目し、組立・分解作業に伴う製品/素材の価値・利益の創出とともに、物流のエネルギー消費で排出してしまう配送・回収のCO2排出量の削減を同時に目指して、資源循環による生産・物流の経済性と環境負荷についての見える化と評価を行った。具体的には、循環型と低炭素型のサプライチェーン設計課題の整理、環境に調和しかつ、経済的な生産・物流システム構成のモデル化および評価と、リサイクル率、CO2排出量および経済性の分解システム設計を行った。

研究成果の概要(英文)：This research modeled and evaluated closed-loop production and logistics systems for material circulation by reuse and recycling in terms of environment and economy. Main findings are as follows:

(1) Design issues in closed-loop and low-carbon supply chains which consisted of production and logistics systems were identified. (2) Environmental and economic system configurations were modeled for material sorting disassembly systems and supply chain networks between two countries. Also, the system performance were evaluated in terms of collected material weights or CO2 emissions, throughputs, non-stop rates and lead times. (3) Disassembly design methods with environmental and economic parts selection were proposed for recycling rate and costs.

研究分野：経営情報、サプライチェーン、経営工学

キーワード：循環型サプライチェーン 製品ライフサイクルマネジメント リサイクル 温室効果ガス削減 可視化
シミュレーション 環境対応 経営工学

1. 研究開始当初の背景

地球温暖化や資源・エネルギー枯渇など、なお深刻化する環境問題に対し、持続可能な社会を目指す人類は、生活を支える冷蔵庫・洗濯機、パソコン・携帯電話、自動車など、製品のモノづくりを環境へ調和させねばならなくなった。こうした製品はモノづくりの場である生産システムで日夜生み出され、世界中のあらゆる場所から陸海空運の物流システムを通じ配送されて、私たちのもとに届けられている。しかし、この豊かさ引き換えに、生産による資源消費と、物流によるCO₂ (二酸化炭素) 排出を、製品ライフサイクルの全般に渡って避けることができない。

金属やプラスチックなど素材資源の循環を促進させるには、循環型生産システム(木村ら, 2002)が必要である。このシステムは、製品の組立と、リユース・リサイクル(再生)の分解から構成され、欧米のみならず国内でも研究が進んできた(Seliger, 2007; Lambert and Gupta, 2008; 中島ら, 2003; 楠川ら, 2007, 山田ら, 2009 など)。

他方、生産された製品を配送・回収する物流はトラックなどの輸送機関が化石燃料を燃やして必要エネルギーを得ており、地球温暖化を抑制するCO₂削減のためには、環境物流システム(長谷川ら, 2005)が必要である。代表的な取り組みとして、トラック台数を削減する共同輸配送(中野・山田ら, 2010)や、トラックから排出量の少ない鉄道へ輸送手段を変更するモーダルシフト(小川・山田ら, 2009)がある。しかし、両システムを積極的に導入すべきモノづくり企業は、環境負荷の削減効果と経済効果との関係が見えないために、コスト増加を恐れて環境に調和したモノづくりを躊躇している現状がある。

研究代表者は、環境問題と生産管理について書籍執筆と講演の機会を得て(山田ら, 2010 など)モノづくりにおける地球環境問題について整理した。生産の3R(リユース・リサイクル等)と物流CO₂削減の両問題が相互に関連していることに改めて認識した。

例えば、3Rを推進して循環型生産システムを運用することは、資源循環の観点で有効である。しかし、独自の現地調査(Yamada, 2008 など)によれば、再生価値の高いリユースが行われる組立製品はわずか(10箇所中3製品)である。ライフサイクルが10年を経過することもある回収製品の素材や価値の陳腐化により、再生価値だけで循環型生産システムを経済的に成立させることは困難である。しかし、製品の配送や回収の環境物流によってCO₂量を削減できれば、エネルギー消費量すなわち燃料コストも削減することになり、経済的に成立させられるのではないだろうか？

従来、資源循環とCO₂削減の環境負荷の観点で別々に議論されることの多かった生産と物流のシステムは、統合によって経済的に

成立させる可能性が生じるのではないかと考えるに至った。

2. 研究の目的

本研究では、リユース・リサイクルによる製品の資源循環におけるモノの流れに着目し、組立・分解作業に伴う製品/素材の価値・利益の創出とともに、物流のエネルギー消費で排出してしまう配送・回収のCO₂排出量の削減を同時に目指して、資源循環による生産・物流の経済性と環境負荷についての見える化と評価を行う。

すなわち、市場価値と環境負荷の両方の観点から、製品ごとに異なる再生ライフサイクルを考慮して組立分解と配送・回収から成る循環型生産・物流システムをモデル化し、環境に調和しかつ経済的なシステムを評価して、設計基準を明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

本研究は、市場価値と環境負荷の両方の観点から、製品ごとに異なる再生ライフサイクルを考慮して組立分解と配送・回収から成る循環型生産・物流システムをモデル化する。

はじめに、資源循環の循環型生産システムについて、モノの流れと環境負荷をモデル化する。次に、CO₂削減の環境物流システムについて、生産と物流におけるモノの流れと環境負荷をモデル化する。最後に、国内外の実践工場・研究拠点を現地調査して、循環型生産・物流システムの設計課題を整理するとともに、モデルに反映させる。本研究では、次の3つの課題に取り組んだ。

(1) 循環型と低炭素型のサプライチェーン設計課題の整理

(2) 環境に調和しかつ経済的な生産・物流システム構成のモデル化と評価

(3) 環境配慮と経済性の分解システム設計

4. 研究成果

当初計画では、リユース・リサイクルの組立・分解作業における製品価値や利益の向上とともに、物流のエネルギー消費で排出する配送・回収のCO₂排出量の削減を同時に目指し、生産・物流の経済性および環境負荷の見える化と評価を行ってきた。代表的な研究成果は、以下である。

(1) 循環型と低炭素型のサプライチェーン設計課題の整理

生産・物流システムは、供給連鎖であるサプライチェーンとも呼ばれる。資源循環の循環型と、CO₂ 排出量削減の低炭素型のサプライチェーンに関して、環境に調和しかつ経済的な設計のための課題を整理した。そこでは、地球環境問題における資源循環と CO₂ 量削減は相互に関係しており、統合的に議論される可能性について言及した。

この統合的な課題の克服のために、リサイクル率・CO₂ 量の部品表、生産・物流システムの経済性評価・最適設計を組み合わせる体系化する設計アプローチを提唱し、循環型と低炭素型のサプライチェーン統合の必要性と課題を議論した(表 1)。

表 1 循環型・低炭素型サプライチェーンにおける環境負荷と経済性のある化の例

		評価関数	情報入手方法
循環型	経済性	リサイクルコスト 分解時間	3D-CAD リサイクル性評価法
	環境負荷	リサイクル率	3D-CAD リサイクル性評価法
低炭素型	経済性	再生素材価値 分解時間	3D-CAD リサイクル性評価法
	環境負荷	CO ₂ 排出量	3D-CAD インベントリ DB

DB: データベース

(2) 環境に調和しかつ経済的な生産・物流システム構成のモデル化と評価

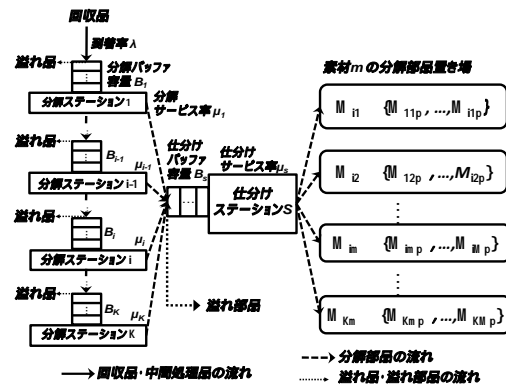
リサイクル素材仕分け分解システムにおいて、製品構成や作業先行関係を考慮して待ち行列シミュレーションによりモデル化し、システムの性能評価を行った(図 1)。さらに、具体的な製品 CAD モデルを適用した実験を行い、ある組立製品の部品・素材構成がシステムの直行率や各素材の回収率に与える影響を定量的に分析した。

その結果、各ステーションに適切なバッファ配分を行うことで、スループット、素材回収率や CO₂ 回収量を向上させるケースのあることを示した。

再生される素材価値を考慮したリサイクル生産システムについて、モデル化を行い、シミュレーション実験を行って再生素材価値の変化がもたらす経済的な影響を検討した。

2 国間のグローバル・サプライチェーンについて、待ち行列としてモデル化し、リード

タイムやその時間のバラつきを考慮したシミュレーション分析を行った。



$M_{i,m,p}$: 分解ステーション i で発生する
素材種類 m の部品 p

図 1 リサイクル素材仕分け分解システムのモデル

(3) 環境配慮と経済性の分解システム設計

使用済みの回収した組立製品について、リサイクル率を維持しながら利益を最大化するように、部品ごとに分解あるいは廃棄を決める最適な部品選択法を提案した。さらに、その分解部品選択によって、分解ラインの作業編成が変化することに着目し、最適な部品選択と作業編成を 2 段階で行う分解システム設計法を手順化した(図 2)。

本設計法を携帯電話、パソコンと掃除機の 3 次元 CAD モデルに適用し、製品タイプごとの特性を定量的に示した。

研究成果(3)の一つは、国際会議 APIEMS 2012 (タイ) の発表共著論文で、The Best Student Paper Award (研究協力者・五十嵐健人氏) を受賞した。

第1段階: 環境配慮と経済性を考慮した分解部品選択

- (1) 部品の環境負荷、リサイクルコストおよび分解時間の算出
- (2) 環境配慮と経済性を考慮した分解部品選択の最適化
- (3) 分解選択部品による先行順位図の作成



第2段階: 整数計画法によるラインバランシング

- (1) サイクルタイムの算出
- (2) 最小分解ステーション数の算出
- (3) 分解選択部品によるラインバランシングの最適化
- (4) 製品再生価値を考慮した分解ライン評価

図 2 環境配慮と経済性を考慮した分解システムの 2 段階設計法

得られた研究成果の一部は、計 26 件(雑誌論文 5 件、学会発表 19 件、図書 2 件)と

して公表し、国際会議・国内学会での研究発表のほか、国際セミナーや企業向け研究会での招待講演・論文や、洋書と和書の執筆を行って普及に努めた。

また、環境先進国ドイツをはじめ、国際会議に合わせて渡航した新興国や先進国の生産・物流システムの研究・実践拠点を複数訪問した。先端研究の実験室や工場の見学を行うとともに、研究者や実務家らと意見交換や、最新の研究や環境対応の現地事情について調査した。

今後の展望としては、本研究の展開によって、循環型生産・物流システムの設計が可能になってきた。しかし、循環型と低炭素型のサプライチェーンを統合して経済的に成立させる必要が生じている。また、最上流工程でライフサイクル全体に影響を与える製品設計や、企業の意思決定者である経営層にも環境経営情報を提供する必要もある。CO₂量の可視化については、ライフサイクルインベントリーデータベースと部品表を活用して、物流プロセスだけでなくサプライチェーンのCO₂算定方法が必要である。

本報告書を踏まえると、環境情報と経営情報を活用し、循環型と低炭素型の両サプライチェーンを統合する研究・開発が望まれる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 5 件)

Kento Igarashi, Tetsuo Yamada, Masato Inoue: "2-Stage Optimal Design and Analysis for Disassembly System with Environmental and Economic Parts Selection using the Recyclability Evaluation Method", Journal of Industrial Engineering and Management Systems, Vol.13, No.1, 52-66 (2014), 査読有,
<http://dx.doi.org/10.7232/iems.2014.13.1.052>

山田哲男, 奥寺勇人, 伊坪徳宏, 井上全人: "部品構成と作業先行関係を考慮した素材仕分け分解システムの性能評価", 日本設備管理学会誌, Vol.25, No.4, 178-185 (2014), 査読有

Kento Igarashi, T. Yamada, Masato Inoue: "Disassembly System Design with Environmental and Economic Parts Selection using the Recyclability Evaluation Method" Journal of Japan Industrial Management Association, Vol.64, No.2E, 293-302 (2013), 査読有,
<http://doi.org/10.11221/jima.64.293>

山田哲男: "持続可能なモノづくりのための循環型・低炭素型サプライチェーンの統合へ向けて", 経営システム, Vol. 22, 135-140 (2012), 査読無, 解説

山田哲男: "持続可能なモノづくりに向けた循環型・低炭素型サプライチェーンの設計と課題" 日本情報経営学会誌 Vol. 33, 94-100 (2012), 査読無, 招待論文

〔学会発表〕(計 19 件)

Kento Igarashi, Tetsuo Yamada, Surendra M. Gupta, Masato Inoue, Norihiro Itsubo: "Use of Multi Criteria Decision Making to Simultaneously Address Disassembly Cost, Recycling and CO₂ Saving Rates" Northeast Decision Sciences Institute, 2014 Annual Conference (NEDSI2014) (20140326-20140329), Philadelphia, USA

Kento Igarashi, Tetsuo Yamada, Masato Inoue, Norihiro Itsubo, Surendra M. Gupta: "Multi Criteria Optimization Model for Disassembly Cost, Recycling Rate and Carbon Emissions" The Decision Sciences Institute (DSI), The 44th Annual Meeting (20131116-20131119), Baltimore, USA

Tetsuo Yamada, Norihiro Itsubo, Yuto Okudera, Masato Inoue: "Environmental and Economic Buffer Allocation Problem in Sorting Disassembly System" 2013 INFORMS Annual Meeting (20131006-20131009), Minneapolis, USA

Tetsuo Yamada, Kento Igarashi: "Disassembly System Design with Environmental and Economic Parts Selection Toward Integration between Closed-loop and Low-carbon Supply Chain", 公益社団法人日本経営工学会生産物流研究部門「Lean supply chain management 構築要因に関する研究プロジェクト」国際ワークショップ. 産総研臨海副都心センター(東京都江東区) (20130720)

Tetsu Kawasaki, Tetsuo Yamada: "Simulation Analysis of Supply Chain Network with Stochastic Lead Time", International Symposium on Scheduling 2013 (ISS2013) (20130718-20130720), Tokyo, Japan

Tetsuo Yamada, Rizka Aisha Rahmi Hariadi, Shota Tsuchiya: "Queueing Modeling of Material Sorting Disassembly System with Overflows" International IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management, and Control 2013 (MIM' 2013)(招待講演) (20130619-20130621), St. Petersburg, Russia

Kento Igarashi, Tetsuo Yamada, Masato Inoue: "Optimal Design of

Disassembly System with Environmental and Economic Parts Selection using Recyclability Evaluation Method", The 13th Asia Pacific Industrial Engineering and Management Systems Conference (APIEMS 2012) (20121202-20121205), Bangkok, Thailand

奥寺勇人, 山田哲男, 伊坪徳宏: “素材仕分け分解システムのシミュレーションによる性能評価”, 一般社団法人日本設備管理学会平成 24 年度秋季研究発表大会, 名城大学天白キャンパス (愛知県) (20121117)

山田哲男: “サステナブルマネジメントのためのエコデザイン”, 環境管理会計研究所第 10 回サステナビリティ経営研究会第 3 回, 東京会場 (招待講演), 新宿 NSビル (東京都) (20121025)

山田哲男: “サステナブルマネジメントのためのエコデザイン”, 環境管理会計研究所第 10 回サステナビリティ経営研究会第 3 回, 大阪会場 (招待講演), 神戸大学梅田インテリジェントラボラトリ (大阪府) (20121011)

Tetsuo Yamada: “Design of Closed-Loop and Low-Carbon Supply Chains - A Perspective from Sustainable Manufacturing”, International Conference, JSPS Asian Core program: Sustainable Manufacturing and Environmental Management (招待講演) (20121006-20121008), Hanoi, Vietnam
Kento Igarashi, Tetsuo Yamada, Masato Inoue: “Disassembly System Design with Environmental and Economic Parts Selection using Recyclability Evaluation Method”, International Symposium on Reliability Engineering and Risk Management (ISRERM2012) (20120805-20120807), Yokohama, Japan
Tetsuo Yamada, Yusuke Kume, Hisashi Yamamoto: “Queueing Analysis of Disassembly Systems with Reverse Blocking in Consideration of Sorting Traffic and Buffer Capacities”, IIE Asian Conference 2012. (20120628-20120630), Singapore, Singapore

五十嵐健人, 山田哲男, 井上全人, 西隆之, 荒川雅裕: “リサイクル性評価法を用いた取り外し部品の選択を持つ分解システム設計”, 公益社団法人日本経営工学会平成 24 年度春季大会 (20120526-20120527), 法政大学市ヶ谷キャンパス (東京都)

山田哲男: “循環型・低炭素型のサプライ・チェーン設計と課題”, 公益社団法人日本経営工学会 循環型サプライ・チ

ーン研究部会シンポジウム (招待講演). (2012 年 2 月 28 日), 首都大学東京秋葉原サテライトキャンパス (東京都)
Tetsuo Yamada: “Designs and Challenges in Closed-Loop and Low Carbon Supply Chains for Sustainability”, Manufacturing and Environmental Management under Low-carbon Economy (S-2) (招待講演) (2012 年 1 月 21 日), 明治大学駿河台校舎 (東京都)

Yuto Okudera, Tetsuo Yamada, Tadayuki Masui, Norihiro Itsubo: “Sorting Process Location Problem in Disassembly System Configuration” 21th International Conference on Production Research (ICPR 21) (2011 年 8 月 3 日), Stuttgart, Germany

Tetsuo Yamada, Jun Kameda, Kento Igarashi: “Model and Design of Recycling Disassembly Systems with Material Recovery Values”, International Conference on Remanufacturing (ICoR 2011) (2011 年 7 月 29 日), Glasgow, UK

山田哲男: “環境イノベーションのための経営情報システム” (社)日本経営工学会平成 23 年度春季大会予稿集 (2011 年 5 月 29 日), 愛知学院大学日新キャンパス (愛知県)

〔図書〕(計 2 件)

高桑宗右工門 (編著), 山田哲男 (分担執筆, 5.2 節 持続可能なモノづくりに向けた循環型・低炭素型サプライチェーンの設計): モノづくりと環境のマネジメント, 中央経済社, 120, 131-140 (2013)

Soemon Takakuwa, Nruyen Hong Son, Nguyen Dang Minh (Eds.), Tetsuo Yamada (Chapter 6.2: Design of Closed-loop and Low-carbon Supply Chains for Sustainability): Manufacturing and Environmental Management, National Political Publishing House, 211-221 (2012)

〔その他〕

山田哲男研究室ホームページ
<http://tyamada-lab.inf.uec.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山田 哲男 (YAMADA, Tetsuo)
電気通信大学・情報理工学研究科・准教授
研究者番号: 90334581