

グローバル・クローズド・ループ・ サプライ・チェーン・モデルの 設計方法について

開沼 泰隆, スティーブ・ディズニー

日本企業はグローバル・サプライ・チェーン (GSC) の設計/再設計の分野で欧米企業に出遅れており、新たな知見を提供することは企業にとって大きな支援になることが期待できる。GSC の中でクローズド・ループ・サプライチェーンにおけるハイブリッド製造/再製造システムにおけるカニバリゼーション (共喰い効果) の効果を分析する。ハイブリッド製造/再製造システムとは、新しく製造される新製品、回収製品から得られた部品で再製造される再製造製品 (remanufactured products)、およびメンテナンス後の再利用製品 (refurbished products) から構成されるものである。本稿ではハイブリッド製造/再製造システムにおいて企業の総利益に及ぼす回収率、再製造率、および再利用率の影響を検討する。

キーワード：クローズド・ループ・サプライ・チェーン、ハイブリッド製造/再製造システム、カニバリゼーション

1. はじめに

わが国は、大量生産・消費・廃棄に基づく長期的な経済成長を遂げてきた。その結果、資源枯渇や環境問題に直面している。現在、企業は、製造活動における環境負荷や資源消費の削減に取り組んでおり、持続可能なシステムを目指している。クローズド・ループ・サプライ・チェーン (CLSC) システムを構築し、リユース、リサイクルを推進することは、これらを達成する一つの方法である。しかしながら、企業が CLSC を構築するうえで、さまざまな課題を有する。その課題の一つに新製品と再製造製品の競合問題が挙げられる。企業は再製造製品を販売することで新製品需要へ影響し、利益が減少することを懸念する。これまで、CLSC システムに関する利益について定量的に検討した研究はほとんどない。また、大部分の CLSC 研究は、新製品製造および再製造に関するものであるが、再利用製品は考慮されていない。再利用製品とは、軽度で使用された製品、またはわずかに損傷を受けた製品であり、再販売のために迅速に修理可能な製品

である。本稿では、製造、再製造、および再利用からなるハイブリッド製造/再製造を含んだ CLSC モデルを提案し、回収率、再製造率、再利用率が総利益に及ぼす影響について検討を行う。また、新製品と再製造製品のカニバリゼーション効果が需要に及ぼす影響についても検討している。さらに新製品だけではなく再製造製品を同時に販売することが、カニバリゼーションが発生しても企業の総利益を上昇させることを示す。

2. 関連研究

再製造に関する多くの研究は、ハイブリッド製造/再製造システムについて検討されてきた。Wang et al. [1] は、システムの総コストを最小限に抑えるために、確率的需要および回収比率を有するハイブリッド製造/再製造モデルを検討した。Kenne et al. [2] は、ハイブリッド製造/再製造システムにおける生産スケジューリングおよび在庫管理方法について研究している。Neto and Bloemhof [3] は、顧客の支払い意思額とエネルギー消費の関係において、新製品と再製造製品とを比較している。Qiang et al. [4] は、使用済み製品の回収を確立するために必要な投資について検討している。また、Qiang et al. [5] は、SC の再設計と、再製造された製品に対する消費者の認識とが、収益性と市場シェアに与える影響を検討した。

これらの研究は、製造および再製造のみを考慮したものであり、再利用の分析は考慮していない。ハイブ

かいぬま やすたか
東京都立大学システムデザイン学部
〒191-0065 東京都日野市旭が丘 6-6
kainuma@tmu.ac.jp
スティーブ・ディズニー
エクセター大学ビジネススクール
Exeter, Devon, EX4 4PU, UK
s.m.disney@exeter.ac.uk

リッド製造/再製造システム内の製品ライフサイクルの研究において、Umeda et al. [6] は、再利用の成功が製品ライフサイクルに依存することを示す「限界再利用率」と呼ばれる指標を提案した。Geyer et al. [7] は、再製造コストの節約が製品のライフサイクルおよび耐久性に影響することを実証した。Atasu et al. [8] は、製品ライフサイクルにわたる再製造の収益性を考慮し、製品ライフサイクルを強調することは、CLSC システムの開発において重要な役割を果たすことを明らかにしている。

Souza [9] は、再製造製品は、1) 市場拡大効果、2) カニバリゼーション効果の二つの消費者需要に影響を及ぼすことを示している。カニバリゼーション効果は、新製品の需要を抑制するため、利益を減少させるとしばしば言及される。しかしながら、Atasu et al. [10] は、再製造された製品は、さらなる市場拡大につながる可能性があることを報告している。Guide et al. [11] は、CLSC 研究においてカニバリゼーションの検討が必要であることを主張した。

Gallo et al. [12] は、再製造製品が第 2 の市場で販売されるモデルを提案した。そこで、回収率と回収品の品質を考慮したシナリオを作成した後シミュレーションを実施し、ハイブリッド製造/再製造システムの利益について検討を行った。しかし、ハイブリッド製造/再製造システムにおける新製品および再製造製品の需要の関係を検討しているが、再製造製品は新製品の需要に影響しないと見なして、カニバリゼーション効果の検討が実施されていない。

Fourt and Woodlock [13], Mansfield [14], Bass [15] は、製品のライフサイクルにわたる需要を表すために、Bass モデルとして知られるようになったモデルを提案し、Bass モデルを用いて、革新者と模倣者の特性を利用した新製品の販売量について検討した。Oshita and Kainuma [16] は、Bass モデルに基づくハイブリッド製造/再製造システムにおける新品および再利用部品のカスケードモデルと最適発注方を提案し、Bass 拡散モデルにおいて、市場拡大と新品・再製造製品需要への共食い効果を検討した。

Shahedi et al. [17] は、持続可能な CLSC ネットワークモデルを開発し、ネットワーク全体の総利益を最大化するネットワーク設計問題を検討した。Kainuma et al. [18, 19] は CLSC のハイブリッド製造/再製造システムにおける、再製造製品販売による需要への影響の定量的評価を試みた。また、Nanasawa and Kainuma [20] は、CLSC のハイブリッド製造/再製造

システムにおける消費者の支払い意思額 (WTP) を考慮した再製造製品の価格決定モデルについて検討している。

3. モデル

図 1 は、本稿で提案するモデルの概略図を示したものである。新製品の製造段階においては新製品が原材料を消費し、再製造段階では、回収された製品を検査し、その状態に応じて分類される。回収製品は、再製造、再利用、廃棄の三つのグループに分類される。新製品、再利用製品、再製造製品は以下のように定義される：

1. 新製品：原材料、部品すべて新しいものを使用して製造した製品。
2. 再製造製品：市場から回収した製品を分解、検査、洗浄、修理および再組立てを含むプロセスで再生した製品。
3. 再利用製品：市場から回収した製品のなかで使用期間が短いかもしくは展示品、多少の不具合で返品された製品を一部修繕、洗浄し、新品同様に市場で販売する製品。軽度の再製造製品と考える。

再利用製品は小規模なりマニュファクチャリングと考えることができる。再利用製品は新品として販売されるが、新製品や再製造製品とは異なる。

本稿におけるモデルは動的であるが、本質的に決定論的である。新製品の真の需要（カニバリゼーションが起こる前）は、Bass [15] の拡散モデルによって与えられている。

$$D_t^N = m_N \cdot \frac{(p+q)^2}{p} \cdot \frac{e^{-(p+q)t}}{\left(1 + \frac{q}{p}e^{-(p+q)t}\right)^2}, \quad (1)$$

ここで、 t は離散的（周期的）で、 m_N は新製品の市場ポテンシャルの最大の大きさ、 p は革新係数、 q は模倣係数である。ここでは、再製造製品需要も Bass モデルによって与えられると仮定する。

$$D_t^R = \begin{cases} 0 & \text{if } t < \Delta t \\ m_R \cdot \frac{(p+q)^2}{p} \cdot \frac{e^{-(p+q)(t-\Delta t)}}{\left(1 + \frac{q}{p}e^{-(p+q)(t-\Delta t)}\right)^2} & \text{if } t \geq \Delta t \end{cases}, \quad (2)$$

ここで、 m_R は再製造製品の最大の市場ポテンシャル、 Δt は再製造製品の需要を将来にシフトさせる遅延要因である。また、 p と q は新製品需要と再製造製品需要の両方について同じであると仮定し、二つの需要は

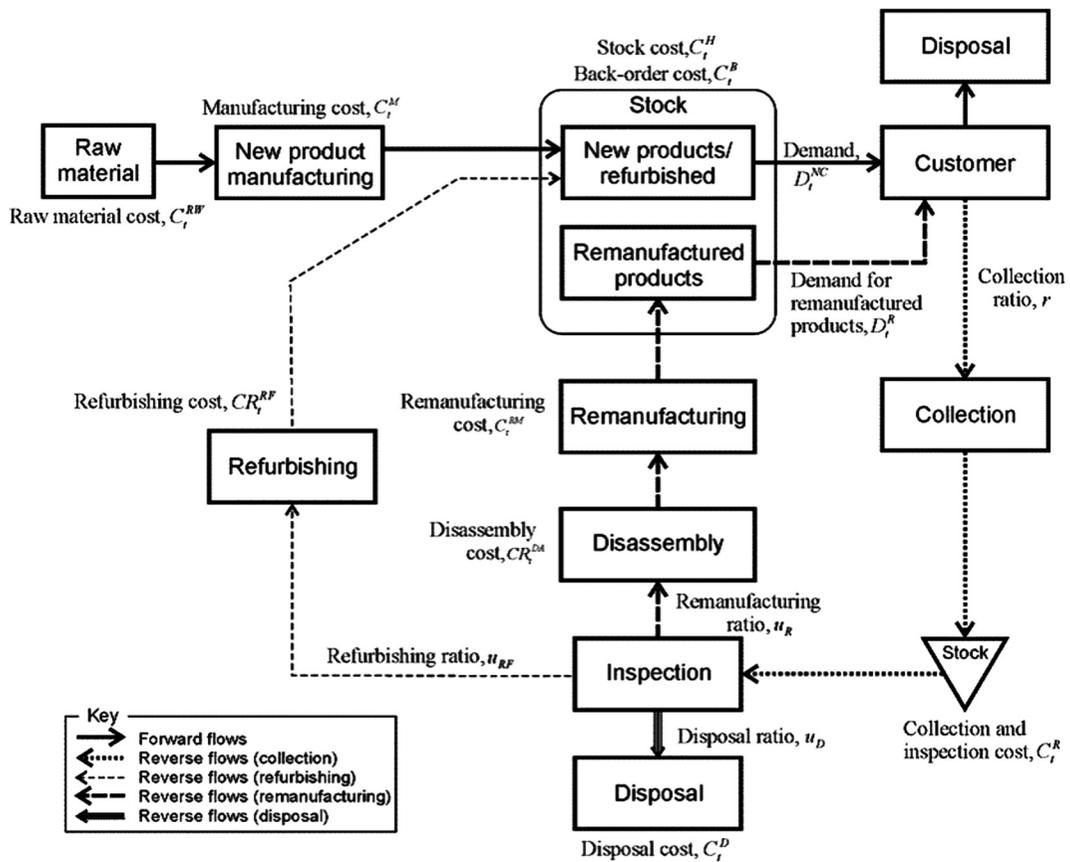


図1 ハイブリッド生産/再製造の模式図

同じ形状を有して。再製造製品の需要は、新製品の需要の一部を共食いさせる。その比率を $\alpha \in (0, 1)$ とする。再製造製品の需要が新製品の需要を共食いしたと仮定し、新製品に対する残りの需要は

$$D_t^{NC} = (D_t^N - \alpha D_t^R)^+ \quad (3)$$

となる。ここで、 $(\cdot)^+$ は次のような最大値演算子である。 $(x)^+ = \max(x, 0)$ 。

総需要は式 (4) で表される。

$$D_t^T = D_t^R + (D_t^N - \alpha D_t^R)^+ \quad (4)$$

t 期における回収量は、総需要の $r(\%)$ で式 (5) で表される。

$$v(t) = r D_t^T \quad (5)$$

比率 u_{RF} は回収量のうちの再利用の割合で、単位当たりのコストは CR_t^{RF} とする。再利用の総量 w_t^{RF} は式 (6) で表される。

$$w_t^{RF} = u_{RF} v(t) \quad (6)$$

比率 u_R は回収量のうちの分解・再製造の割合で、単位当たりのコストは $(CR_t^{DA} + C_t^{RM})$ とする。そして、再製造の総量 w_t^R は式 (7) で表される。

$$w_t^R = u_R v(t) \quad (7)$$

回収されたもののうち再利用も再製造もされなかったものは単価 C_t^D で埋め立て処分される。各期間に埋め立て処分される量は式 (8) で表される。

$$w_t^D = (1 - u_R - u_{RF}) v(t) \quad (8)$$

次いで、再製造製品は、在庫として貯えられ、再製造製品の需要を満たすために使用される。当初、再製造製品の需要はないので、 $(I - I_t^N)^+$ まで新製品の在庫を目標の在庫に引き上げる。ここで I は実在庫を表す。新製品を製造するためのリードタイムは1期間であり、したがって、完成品は以下のとおりである。

$$c_t^N = w_{t-1}^N \quad (9)$$

新製品および再利用製品の最終在庫は、次のように与えられる。

表 1 シミュレーション研究における数値設定

変数	説明	数値
P_N	パソコンの新製品・再利用製品の販売価格	¥100K
P_R	再製造パソコンの販売価格	¥60K
p	革新係数	0.015
q	模倣係数	0.2
m_N	新製品の市場ポテンシャル	800K
m_R	再製造製品の市場ポテンシャル	400K
Δt	遅延係数	20
α	カンニバイゼーション率	0.2
r	回収率	0.3
u_R	再製造比率	0.4
u_D	廃棄率	0.3
u_{RF}	再利用率	0.3
C_t^R	回収コスト	20
CR_t^{DA}	分解費用	5
C_t^{RM}	再製造原価	15
C_t^D	廃棄費用	5
CR_t^{RF}	再利用費用	5
tns^R	再製造製品の目標純在庫	100
tns^N	新製品の目標純在庫	100
C_t^H	在庫保管費	1
C_t^B	バックログコスト	9
C_t^M	製造コスト	30
C_t^{RM}	原料コスト	20
T	シミュレーション時間軸	100

$$EI_t^N = I_t^N + c_t^N. \quad (10)$$

十分な在庫がない場合、再製造製品の需要を満たすために使用される新製品の移転は、再製造製品在庫への移転後の新製品および再利用製品の在庫であり、

$$T_t = \min\{(tns^R - (I_{t-1}^R + w_t^R - D_t^R))^+, (EI_t^N)^+\} \quad (11)$$

となる。再製造と再利用の移転後の残りは、新製品と再利用製品の在庫となる。

$$EIAT_t^N = EI_t^N - T_t. \quad (12)$$

最後に、 C_t^H を $(EIAT_t^N)^+$ に対する単位在庫保持コスト、 C_t^B を $(-EIAT_t^N)^+$ に対する単位残高コストとする。

4. システムの動的応答

ここで、表 1 に示す数値を用いて、新製品と再製造製品の需要の関係を分析する。モデリングの対象は、パーソナル・コンピュータのサプライ・チェーンに基づいており、多くのコンポーネントがリサイクルの可

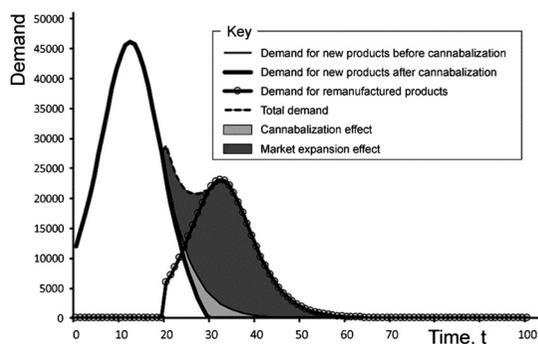


図 2 需要モデル

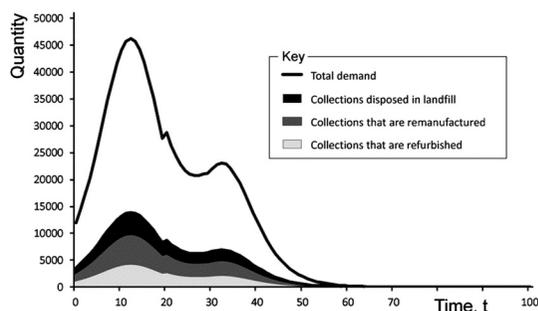


図 3 回収品の概要

能性を有している。今後数年間に廃棄されるパソコンの台数が増加することが予想される。また、日本では「循環型社会形成推進基本法」が導入・施行されており、市場から回収される再製造製品の数量は増加すると予想されている。

図 2 は、新製品と再製造製品の需要をプロットしたものである。革新者や模倣者の新製品需要への影響がはっきりとわかる。また、再製造工場での対応の遅れ、カンニバイゼーション効果、市場拡大効果なども確認できる。

図 3 は、総需要（線）を、回収された回収品のプロット（斜線領域）、 $v(t)$ とともに図示している。比率 u_D の回収品は、単価 C_t^D で埋立地に送られる。比率 u_{RM} の回収品は単価 $CR_t^{DA} + C_t^{RM}$ で分解され再製造される。比率 u_{RF} の回収品は、 CR_t^{RF} の単価で再利用され、その後新製品在庫となる。白い領域は、顧客によって使用中のままであるか、または廃棄された製品を表す。

図 4 は、在庫レベルの変化の概略を示す。当初、新製品の目標在庫を中心に変動し、時にはバックログであったり、それ以外の期間は在庫を保有した状態である。

一方、回収・再製造製品の在庫は、再製造製品の需要

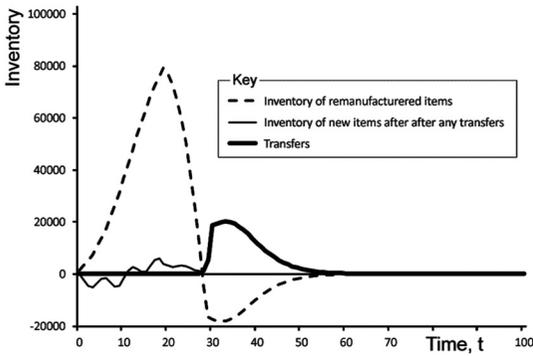


図4 在庫のグラフ

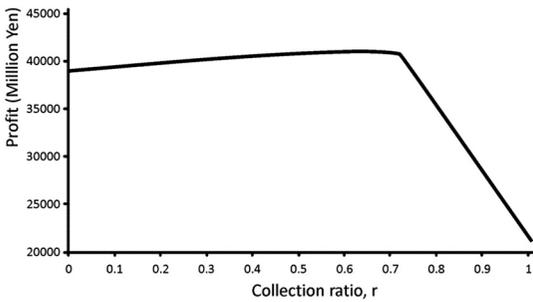


図5 回収率が利益に与える影響

が活性化するまで増加する。この時点で、再製造製品の在庫は減少する。回収初期に回収されたものは、再製造の需要を満たすには不十分である。したがって、新製品が製造され、再製造製品として販売される。もし α または r が大きくなれば、再製造された製品に対する需要よりも多くの回収品が存在し、永続的にかなりの量の在庫を保有することになる。

5. 期待利益

新製品および再利用製品の販売価格が、再製造製品の販売価格とは異なると仮定する。ここではシミュレーション期間にわたるハイブリッド製造/再製造システムからの期待利益は、次のように表わされる。

$$\Pi = \sum_{t=1}^T \left(\begin{array}{c} P_N D_t^{NC} + P_R D_t^R \\ - \left(\begin{array}{c} (C_t^{RM} + C_t^M) w_t^N \\ + C_t^H ((I_t^R)^+ + (EIAT_t^N)^+) \\ + C_t^B ((-I_t^R)^+ + (-EIAT_t^N)^+) \\ + w_t^R (C R_t^{DA} + C_t^{RM}) \\ + v(t) C_t^R + C R_t^{RF} w_t^{RF} \end{array} \right) \end{array} \right) \quad (13)$$

数値実験により、ハイブリッド製造/再製造システムの収益性を確認した。

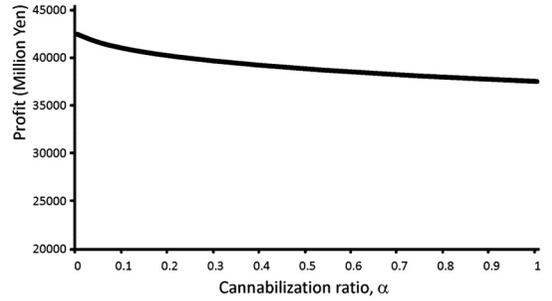


図6 カニバリゼーションが利益に与える影響

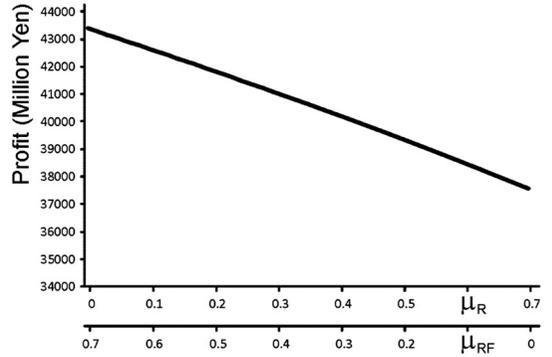


図7 再利用による利益への影響

図5は、回収率と利益の関係を通して市場拡大効果を表している。回収率が転換点に達するまで、より多くの製品が市場から戻されるにつれて、総利益が増加することがわかる。この転換点は、再製造需要が製造された在庫を吸収できないほど多くの回収がある場合に生じる。これは、製品のライフサイクルの終わり近くで、望ましくないリターンに負担をかけないように注意を払うべきであることを示している。

図6は、カニバリゼーション比率による利益への影響を表してしている。再生需要が新製品の需要を減らす可能性が高まるにつれて、利益は減少することがわかる。

図7は再利用率と再製造率が利益に与える影響を表している。この図より、再製造よりも多くの商品が再利用されることによって、総利益が増加することがわかる。

6. 結論

本稿では、CLSCの方策として、ハイブリッド製造/再製造モデルについて述べた。パソコンのサプライチェーンに基づいてシナリオを作成し、数値実験により検討を加えた。数値実験より得られた結果は、再利用を含むハイブリッド製造/再製造 CLSC モデルが、

再利用を含まないモデルよりも収益性が高いことを示している。

カニバリゼーション効果が大きい場合、製造コストによっては総利益が減少する場合もあるが、製造コストに対して適切な価格設定が行われている場合、新製品のみを販売していた場合より利益が増加する。さらに、マーケット・エクспанション効果を望める場合、利益としては再製造製品を販売することで新製品のみ販売した利益より増加するケースが増える。これは、企業にとって再製造製品販売におけるカニバリゼーション効果もたらす利益への影響を懸念する事案に対して、解消する一つの結果であるといえる。

海外に範囲を拡大し、グローバル CLSC に展開することにより、再利用、再製造のポテンシャルが高くなり、より収益性の高い CLSC が実現することができると考えられる。

参考文献

- [1] J. Wang, J. Zhao and X. Wang, "Optimum policy in hybrid manufacturing/remanufacturing system," *Computers & Industrial Engineering*, **60**, pp. 411–419, 2011.
- [2] J. P. Kenne, P. Dejax and A. Gharbi, "Production planning of a hybrid manufacturing-remanufacturing system under uncertainty within a closed-loop supply chain," *International Journal of Production Economics*, **135**, pp. 81–93, 2012.
- [3] J. Q. F. Neto and J. Bloemhof, "An analysis of the eco-efficiency of remanufactured personal computers and mobile phones," *Production and Operations Management*, **21**, pp. 101–114, 2012.
- [4] Q. P. Qiang, K. Ke, T. Anderson and J. Dong, "The closed-loop supply chain network with competition, distribution channel investment, and uncertainties," *Omega*, **41**, pp. 186–194, 2013.
- [5] Q. P. Qiang, "The closed-loop supply chain network with competition and design for manufacturability," *Journal of Cleaner Production*, **105**, pp. 348–356, 2015.
- [6] Y. Umeda, S. Kondoh and T. Sugino, "Analysis of reusability using 'marginal reuse rate'," *CIRP Annals*, **55**, pp. 41–44, 2006.
- [7] R. Geyer, L. N. V. Wassenhove and A. Atasu, "The economics of remanufacturing under limited component durability and finite product life cycles," *Management Science*, **53**, pp. 88–100, 2007.
- [8] A. Atasu, M. Sarvary and L. N. V. Wassenhove, "Remanufacturing as a marketing strategy," *Management Science*, **54**, pp. 1731–1746, 2008.
- [9] G. C. Souza, "Closed-loop supply chains: A critical review, and future research," *Decision Sciences*, **44**, pp. 7–38, 2012.
- [10] A. Atasu, V. D. R. Guide and L. N. V. Wassenhove, "So what if remanufacturing cannibalizes my new product sales?" *California Management Review*, **52**, pp. 1–21, 2010.
- [11] V. D. R. Guide and J. Li, "The potential for cannibalization of new products sales by remanufactured products," *Decision Sciences*, **41**, pp. 547–572, 2010.
- [12] M. Gallo, L. Guerra and G. Guizzi, "Hybrid remanufacturing/manufacturing systems: Secondary markets issues and opportunities," *WSEAS Transactions on Business and Economics*, **6**, pp. 31–41, 2009.
- [13] L. A. Fourt and J. W. Woodlock, "Early prediction of market success for grocery products," *Journal of Marketing*, **25**, pp. 31–38, 1960.
- [14] E. Mansfield, "Technical change and the rate of imitation," *Econometric Society*, **29**, pp. 741–766, 1961.
- [15] F. M. Bass, "A new product growth model for consumer durables," *Management Science*, **15**, pp. 215–227, 1969.
- [16] Y. Oshita and Y. Kainuma, "Remanufacturing operation in closed-loop supply chain," In *Proceedings of the 6th International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing*, 2009.
- [17] A. Shahedi, M. M. Nasiri, M. S. Sangari, F. Werner and F. Jolai, "A stochastic multi-objective model for a sustainable closed-loop supply chain network design in the automotive industry," *Process Integration and Optimization for Sustainability*, **6**, pp. 189–209, 2021.
- [18] Y. Kainuma and Y. Sasaki, "Investigation of cannibalization effect in multi-function printer (MFP) manufacturing/remanufacturing system," In *Proceedings of the 22nd Asia Pacific DSI Conference*, 2017.
- [19] Y. Kainuma, Y. Sasaki and S. Disney, "Impact of cannibalization in a remanufacturing supply chain," In *Proceedings of the 24th International Conference on Production Research*, 2017.
- [20] T. Nanasawa and Y. Kainuma, "Quantifying the cannibalization effect of hybrid manufacturing/remanufacturing system in closed-loop supply chain," *Procedia CIRP*, **61**, pp. 201–205, 2017.