東海大学紀要情報通信学部
Vol.10,No.1,2017,pp.45-55

論文

クローズドループ・サプライチェーンの社会的価値の評価に関する研究

山下 希[*1]，水野 浩孝[*2]

Study of Social Value Evaluation of Closed Loop Supply Chain

by

Nozomi YAMASHITA[*1] and Hirotaka MIZUNO[*2]

(received on Mar.27, 2017 & accepted on Jul.13, 2017)

あらまし

近年，サプライチェーンは，再生産，再利用を取り入れたクローズドループ・サプライチェーンへと移行してきている．クローズドループ・サプライチェーンの実施は企業経営に経済的な価値を与えるとはいえないが，環境対策や循環型社会への対応によって社会的に大きな価値を与えると考えられる．そこで本研究では，社会貢献などの価値を定量評価するSROI（Social Return on Investment）の概念を，サプライチェーンの評価基準に取り入れた．そして経済的評価と社会的価値を組み合わせた新たな評価方法で，クローズドループ・サプライチェーンの評価値が従来型サプライチェーンの評価値を上回る状態についてシミュレーションによって確認した．

Abstract

Recently supply chains has been shifted from open chains from closed loop supply chains adopting both recycle process and reuse processes. In order to spread closed loop supply chains, new measure of the values which closed loop supply chain produce have to be established. In this paper, SROI (Social Return on Investment) concept is employed, which evaluates the value of social contribution as well as value of traditional economic contribution of various social activities. Simulation experiments shows that SROI value of closed loop supply chains ca exceed that of open loop chains.

キーワード：クローズドループ・サプライチェーン， SROI，社会的価値，再利用，再生産
***Keywords**: Closed Loop Supply Chain, SROI, Social Value, Reuse, Recycle*

1. はじめに

これまでの製造業は，生産の向上による経済性のみを追求し続けて，資源を大量に消費することで大量の製品を製造していたが，近年のエコ意識や環境保全の観点から，原材料の調達から製品の生産，配送，販売までの流れを統合的に考えるサプライチェーンは，再利用，再生産を取り入れたクローズドループ・サプライチェーンへと移行してきている[1)-3)]．さらに，クローズドループ・サプライチェーンは，製品を購入して使用する消費者や株主などのステークホルダーからの要求によって，企業の社会的責任（CSR : Corporate Social Responsibility）となっているため，早急な構築が求められている．しかし，クローズドループ・サプライチェーンの実施が利益や生産活動への効果が不明確であるため多くの企業がクローズドループ・サプライチェーンの実施に踏み切れていない．クローズドループ・サプライチェーンと従来型のサプライチェーンを経済的に比較する評価すると，クローズドループ・サプライチェーンが企業経営に経済的に効果があるとはいえない．しかし，クローズドループ・サプライチェーンでは回収・リサイクルを通じて環境対策や循環型社会への対応が可能であり，社会的に大きな価値を与える．今後，企業での実施を促進するためには，クローズドループ・サプライチェーンのデメリットとなる課題を上回るような方法が必要となると考えられる．

そこで本研究では，クローズドループ・サプライチェーンの実施によって導出される社会的価値を定量的に評価することを目的とする．社会貢献などの慈善事業の価値を定量評価する際に使用される SROI（Social Return on Investment）という指標を，サプライチェーンの評価基準に取り入れる．SROI の概念をクローズドループ・サプライチェーンの評価に適用するために，評価手順に必要な項目の定義を行い，インパクトマップの作成をする．そして，クローズドループ・サプライチェーンの経済的評価と社会的価値を組み合わせた新たな評価方法で，クローズドループ・サプライチェーンの評価値が従来型サプライチェーンの評価値を上回る状態について分析する．

2. 先行研究と本研究のアプローチ

クローズドループ・サプライチェーンについての先行研究は，佐々木，開沼(2015)の「新規製造と再製造・再利用の需要を考慮したハイブリッド製造／再製造システム」，高橋，楠川(2015)の「製品需要量と使用済み製品回収量に不確実さを考慮したグリーンサプライチェーンの最適運用方策」などがある．佐々木，開

*1 情報通信学研究科 情報通信学専攻 修士課程
Graduate School of Information and Telecommunication Engineering, Course of Information and Telecommunication Engineering, Master`s Program
*2 情報通信学部 経営システム工学科 教授
School of Information and Telecommunication Engineering, Department of Management Systems Engineering, Professor

沼の研究では，再製造・再利用の実施による新規製造品の需要変動を考慮したクローズドループ・サプライチェーンモデルを提案し，総利益を目的関数としてクローズドループ・サプライチェーンの経済的評価の検討がされている[4]．高橋，楠川の研究は，使用済み製品の回収を取り入れたサプライチェーンにおいて，製品需要と使用済み製品回収可能量が確率的な状態での製品発注量，使用済み製品回収量，再生品質レベルの最適運用方策を検討している[5]．これらの研究では，経済的評価や在庫水準によってクローズドループ・サプライチェーンの評価をしている．しかし，クローズドループ・サプライチェーンの実施によって社会全体が取得する価値について評価する先行研究はない．

本研究では，クローズドループ・サプライチェーンの社会的価値の評価を行う．社会貢献などの慈善事業の価値を定量評価する際に使用される SROI という指標を，サプライチェーンの評価基準に取り入れる．また，クローズドループ・サプライチェーンの経済的評価と社会的価値を組み合わせた新たな評価方法で，クローズドループ・サプライチェーンの評価値が従来型サプライチェーンの評価値を上回る状態についてシミュレーションによって分析する．シミュレーションには，単一製品単一部品を扱う，Fig.1 のような消費者，小売店，メーカー，サプライヤからなる従来型サプライチェーンモデルと Fig.2 のような消費者，小売店，メーカー，サプライヤからなる従来型サプライチェーンモデルに回収・再利用業者を加えたクローズドループ・サプライチェーンモデルを対象とする．

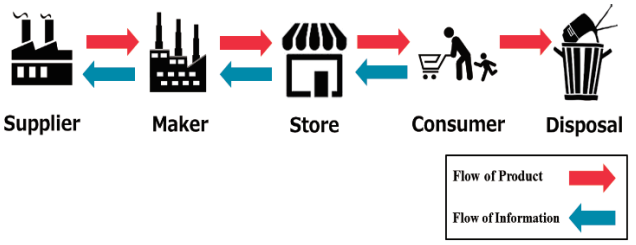


Fig.1 Conventional Supply Chain (Forward Supply Chain)

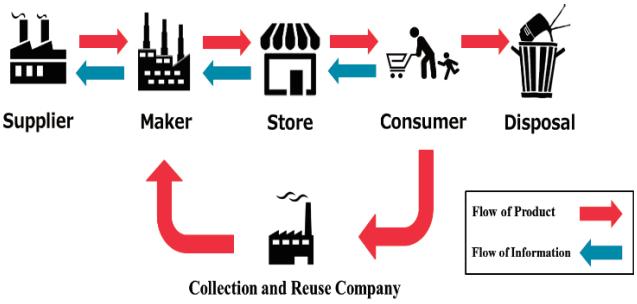


Fig.2 Closed Loop Supply Chain

3. 社会的価値を評価するクローズドループ・サプライチェーンの評価方法の提案

3.1 SROI の概要

SROI は，日本語では社会的投資収益率と呼ばれており，慈善事業などのソーシャルビジネスのパフォーマンスを測る指標として，1990 年代後半にアメリカの投資ファンドである REDF(Roberts Enterprise Development Fund)が開発した．SROI は，貨幣価値換算された社会的価値を投入された費用で除した値で表現される．式(1)に SROI の算出式を示す．

$$SROI(\%)=\frac{\text{貨幣価値化された社会的価値}}{\text{投入費用(コスト)}} \quad (1)$$

そして，事業によってもたらされた社会的価値をステークホルダーごとに明確にし，貨幣価値に換算することで事業がもたらす価値を定量的に表現するものである．SROI はこれまで計測が難しかった社会的収益についても貨幣価値換算化して評価対象とすることから，従来の評価指標よりも広い範囲で価値を測定できる評価方法として，近年，注目されつつある[6]．

3.2 クローズドループ・サプライチェーンへの適用検討

まず，クローズドループ・サプライチェーン内で社会的価値を得られると予測される受益者(ステークホルダー)を特定する．ここでは，クローズドループ・サプライチェーンの各段階を受益者として妥当であると判断し， Fig.2 のクローズドループ・サプライチェーンを構築する場合に必要となる，サプライヤ，メーカー，小売店，消費者，回収・再利用業者と定める．次に，クローズドループ・サプライチェーンにおけるインプット，アウトプット，アウトカムの各項目の定義を Table 1 とする．インプットは，生産活動内に回収製品を導入するために必要なクローズドループ・サプライチェーン構築費用とした．アウトプットは，従来型のサプライチェーンで実施される製品の生産活動，消費者によって使用され廃棄となる製品を回収しリユース・リサイクルを実施するために必要となるリバース・サプライチェーンの構築，リバース・サプライチェーンの構築によって消費者とリバース・サプライチェーン間で実施される販売製品の回収・リユース・リサイクルとする．

次に，SROI をクローズドループ・サプライチェーンの評価指標に取り入れるためにインパクトマップの作成を行う．インパクトマップとは，クローズドループ・サプライチェーンが特定したステークホルダーに対してどのような変化をもたらしたのかを明確化するために用いる．本研究では，クローズドループ・サプライチェーンで発生する全てのアウトカムを明示することは現実的に難しいと判断したため，SROI の実施例を参考に作成した代表的なアウトカムを提案するものとする．作成したクローズドループ・サプライチェーンの簡易的なインパクトマップを Fig.3 に示す．

このように，クローズドループ・サプライチェーンの活動を SROI の測定に必要な項目に当てはめて考えることが可能となる．このことから，クローズドルー

プ・サプライチェーンの社会的価値を評価するための手法としてSROIを適用することが可能といえると考えられる．

本研究で扱うクローズドループ・サプライチェーンは社会的価値を生み出すほかに，フォワード・サプライチェーンでの製品販売による利益も同時に経済的価値として導出される．クローズドループ・サプライチェーン構築の費用は，従来型サプライチェーンでの費用も含まれており，通常のSROIで評価する対象の事例の投入費用と比較すると高くなる．そのため，SROI値が正確に算出できないと考えられる．

そこで，クローズドループ・サプライチェーンの評価を経済的価値と社会的価値を組み合わせた新たな評価関数で実施する．経済的価値とは，ROI(Return On Investment)のことを指しており，投下した資本に対してどれだけ利益が上がったかを表す指標である[7]．事業や資産，設備の収益性を測る指標として一般的なもので，投資に見合った利益を生んでいるかどうかを判断するための重要な指標である．本研究で用いる経済的価値を，式(2)に記す．

$$\text{経済的価値：ROI}(\%) = \frac{\text{製品販売価格}}{\text{生産コスト}} \tag{2}$$

それに対して，社会的価値とは，クローズドループ・サプライチェーンの実施が要因となって発生した社会全体への影響を定量化したものを表している．この2つの価値を組み合わせた評価式をクローズドループ・サプライチェーンのSROI値としてクローズドループ・サプライチェーンを評価することで，従来型のサプライチェーンよりも多くの価値を生み出すことが可能であると考える．本研究で提案する評価式を式(3)に示す．

$$\text{提案する評価値} = \frac{(\text{製品販売価格} + \text{社会的価値})}{\text{投入費用(コスト)}} \tag{3}$$

この評価値が1.0を超えた場合，クローズドループ・サプライチェーンの実施のために投入した費用よりも製品利益と社会的価値が上回ること表している．この評価方法でクローズドループ・サプライチェーンの実施を評価することで，企業がクローズドループ・サプライチェーンの実施の踏み切る要因の一つとなると考える．

ここからは，本研究のシミュレーションで用いるアウトカムの選定を行う．Fig.3で作成したインパクトマップの中に記述されているアウトカムから，サプライヤ，メーカー，回収・再利用業者のアウトカムが定量化をすることが可能であると判断した．サプライヤのリユース・リサイクルによって新規資源投入が抑制されたことによる新規資源の減少については，各期間のクローズドループ・サプライチェーンでの再生産量と再利用量の数だけ新規資源の投入が減少したと定義する．メーカーの再利用部品の使用による新規資源の使用減少は，サプライヤでのアウトカムと重なるため，SROIの算出手順で行う割合価値の考慮に従い，定量化を行わないこととする．また，再生産製品と再利用部品を使用する設備の投入による雇用の拡大は，雇用者が支払う行政的費用や生活するための消費行動による費用を導出したと定義する．回収・再利用業者の消費者からの使用済み製品の回収による廃棄物の減少は，回収製品の数量分の廃棄製品を減少したといえる．そして，回収製品の分解・検査段階での雇用の増大については，メーカーのアウトカムと同様に，雇用者が支払う行政的費用や生活するための消費行動による費用を導出したと定義する．

以上のアウトカムの選定および各アウトカムの定義付けを用いて社会的価値の導出を行い，今後のシミュレーションを実施するものとする．

Table 1 Definition of Items necessary for Closed Loop Supply Chain Impact Map[8]

項目	例
ステークホルダー	クローズドループ・サプライチェーンの各段階
インプット(費用)	クローズドループ・サプライチェーン・サプライチェーン構築の費用
アウトプット(活動)	製品の生産活動 使用済み製品の回収などのリバース・サプライチェーンの構築 販売製品の回収、リユース、リサイクルの実施
アウトカム(効果)	新規資源投入の抑制による資源の低減 使用済み製品の廃棄量の低減 回収活動による雇用の増加

4. シミュレーション実験に用いるクローズドループ・サプライチェーンモデル

4.1 対象とするサプライチェーンモデルと前提条件

本研究では，Fig.1，Fig.2の2つのモデルを対象とする．シミュレーションでは，クローズドループ・サプライチェーンは再生産のみを実施する再生産型，再利用のみを実施する再利用型，再生産と再利用を併用するハイブリッド型の3つのパターンを用いる．

サプライヤ，製品メーカー，小売店から構成されるフォワード・サプライチェーンでは，各段階が発注，出荷によって製品や部品，資源を補充するものする．なお，発注は各段階とも定期発注方式を採用しており，製品や部品は期首に入庫して，期末出荷とする．小売店は，消費者からの最終需要量に従い，メーカーに製品の発注を行う．メーカーにおける製品の生産は，再利用部品と新規資源部品を併用して製品生産をするハイブリッド型の生産モデルを採用しており，小売店からの需要量に従い，製品の生産を行う．そして，サプライヤに製品の生産に必要な部品の発注を行う．サプライヤは，メーカーからの需要量に従い，部品の生産を行う．さらに，部品の生産に必要な新規資源の発注を上流段階に行うものとする．回収・再利用業者で構成されるリバース・サプライチェーンでは，ベルト

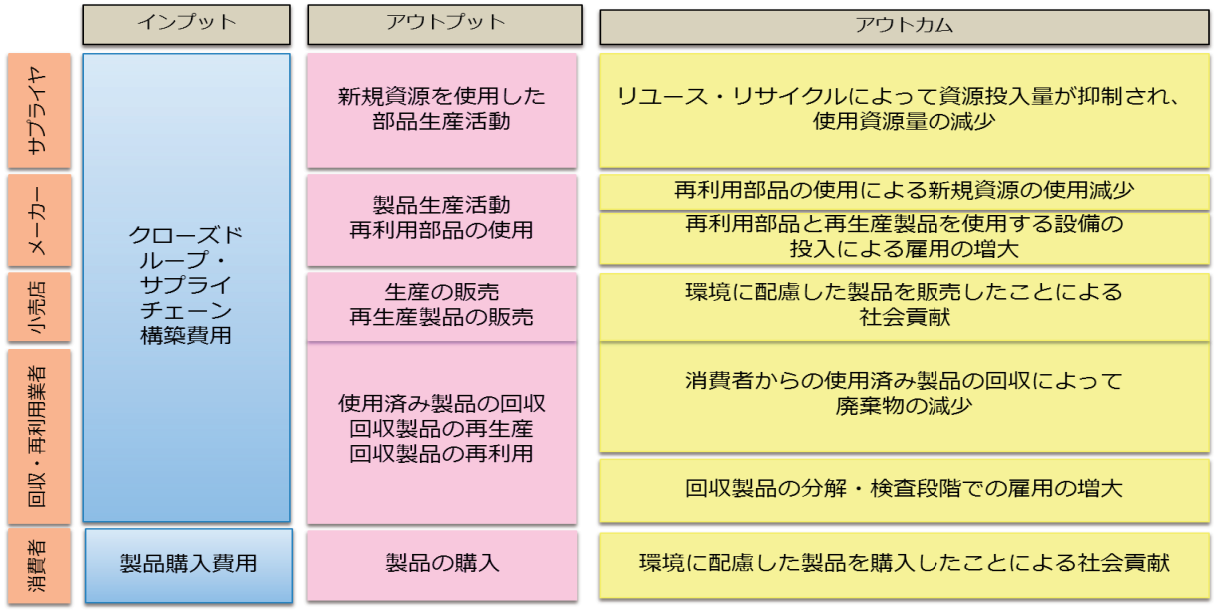


Fig.3 Created Impact Map of Closed Loop Supply Chain

コンベアのような流れ作業の方式を採用しており，各段階に作業期間を定めておき，その期間を終えると次の段階へ押し出されるように出荷する．これは，回収した使用済み製品は各段階で保管をしておく必要がなく，回収したら即座に分解・検査を行って，メーカーに出荷することが現実的であると判断したからである．また，製品メーカーは再利用部品を優先して製品の生産に使用するものとして，不足数を新規資源部品で補うこととする．再利用型は，分解・再利用業者において回収された製品に対して再生産のみを実施し，再生産された製品を再生産製品としてメーカーに引き渡す．再生産型は，分解・再利用業者において回収された製品に対して再利用のみを実施し，再利用された製品を再利用部品としてメーカーに引き渡す．ハイブリッド型は，分解・再利用業者において再生産と再生産を同時に行うハイブリッド型の回収モデルを採用している．回収された製品は，再生産可能値と再利用可能値のそれぞれの値に従って再生産，再利用され，再生産製品と再利用部品としてメーカーに引き渡すものとする．

4.2 記号の定義

本研究では以下の記号を用いる．

- t：シミュレーション期間 $(1 \leq t)$
- i：クローズドループ・サプライチェーンの各段階（1 を消費者，2 を小売店，3 をメーカー，4 をサプライヤ，5 を回収・再利用業者とする）
- L_i：段階 i の補充リードタイム
- d_t：期間 t における最終需要量
- $D_t^{(i)}$：段階 i での期間 t における $i-1$ 段階からの製品または部品の需要量
- $Y_t^{(i)}$：段階 i での期間 t における $i-1$ 段階への製品または部品の出荷量
- $REC_Y_t^{(i)}$：段階 $i=5$ での期間 t における $i-2$ 段階への再生産製品の出荷量
- $REU_Y_t^{(i)}$：段階 $i=5$ での期間 t における $i-2$ 段階への再利用部品の出荷量
- $Q_t^{(i)}$：段階 i での期間 t における $i-1$ 段階への製品または部品の発注量
- $X_i^{(t)}$：段階 i での期間 t における $i-1$ 段階からの製品または部品の入荷量
- $NEW_X_i^{(t)}$：段階 $i=2$ での期間 t における $i-1$ 段階からの新規資源部品の入荷量
- $REC_X_i^{(t)}$：段階 $i=2$ での期間 t における $i-2$ 段階からの再生産製品の入荷量
- $REU_X_i^{(t)}$：段階 $i=2$ での期間 t における $i-2$ 段階からの再利用部品の入荷量
- $IS_t^{(i)}$：段階 i での期間 t における期首在庫量
- $ES_t^{(i)}$：段階 i での期間 t における期末在庫量
- $NEW_IS_t^{(i)}$：期間 t における新規資源部品期首在庫量
- $NEW_ES_t^{(i)}$：期間 t における新規資源部品期末在庫量
- $REC_IS_t^{(i)}$：期間 t における再生産製品期首在庫量
- $REC_ES_t^{(i)}$：期間 t における再生産製品期末在庫量
- $REU_IS_t^{(i)}$：期間 t における再利用部品期首在庫量
- $REU_ES_t^{(i)}$：期間 t における再利用部品期末在庫量
- $P_t^{(i)}$：段階 i での期間 t における製品または部品の生産量
- CL_t：期間 t における機会損失量
- $SS^{(i)}$：段階 i での安全在庫量
- $\hat{D}_t^{(i)}$：段階 i での期間 t における需要量の予測値
- $\hat{X}_i^{(t)}$：段階 i での期間 t における入荷量の予測値

- REC_T_t：回収・再利用業者からメーカーへ伝えられる再生産製品量
- REU_T_t：回収・再利用業者からメーカーへ伝えられる再利用部品量
- p_i：段階 i での需要量と入荷量の予測時の移動平均計算期間
- rec：再生産可能値　　$(10 > reu > rec > 0)$
- reu：再利用可能値　　$(10 > reu > rec > 0)$
- $RECA$：再生産能力
- $REUA$：再利用能力
- $W_t^{(i)}$：期間 t における販売された製品に与える Weibull 分布
- $W_f_t^{(i)}$：期間 t おけるに販売された製品に与える故障率曲線
- W_m：Weibull 分布に使用する形状パラメータ
- W_n：Weibull 分布に使用する尺度パラメータ
- W_γ：Weibull 分布に使用する位置パラメータ
- $F_t^{(j)}$：期間 tにおける販売された製品の期間 j における故障度 $(t < j < t+N)$
- $W_T_t^{(j)}$：期間 t における販売された製品のうち期間 jに使用を終える製品量
- R_REC_t：期間 t における回収された再生産可能製品量
- R_REU_t：期間 t における回収された再利用可能製品量
- D_t：期間 t における廃棄となる製品量
- REC_M_t：期間 t における再生産製品の回収量
- REC_t：期間 t における再生産量
- REU_t：期間 t における再利用量
- N：製品の最大使用期間
- PUR：製品販売価格
- $L_t^{(i)}$：リバース・サプライチェーンにおける段階 i での作業時間
- SC_P_t：期間 t における従来型サプライチェーンの評価値
- $SC_C_t^{(i)}$：期間 t における従来型サプライチェーンの段階 i のコスト
- SC_B_t：期間 t における従来型サプライチェーンの収入
- $CLSC_P_t$：期間 t におけるクローズドループ・サプライチェーンの評価値
- $CLSC_C_t^{(i)}$：期間 t における従来型サプライチェーンの段階 i のコスト
- $CLSC_B_t$：期間 t におけるクローズドループ・サプライチェーンの収入
- $CLSC_SROI_t^{(i)}$：期間 t におけるクローズドループ・サプライチェーンの段階 i の社会的価値
- $SROI_t$：期間 t におけるクローズドループ・サプライチェーンの SROI 値
- S_t：期間 t におけるクローズドループ・サプライチェーンの社会的価値
- TP：雇用者の消費および納税費用
- $E^{(i)}$：段階 i における雇用者数
- NR_COST：新規資源購入費用
- NP_COST：新規資源部品製造費用
- P_COST：製品製造費用
- PUR：製品販売価格
- D_COST：製品廃棄費用
- B_COST：機会損失費用
- R_COST：使用済み製品回収費用
- REC_COST：再生産費用
- REU_COST：再利用費用
- PS_COST：製品保管費用
- NS_COST：新規資源部品保管費用
- RECS_COST：再生産製品保管費用
- REUS_COST：再生産部品費用

4.3 モデルの定式化

(a)フォワード・サプライチェーン

フォワード・サプライチェーンの各段階 i は，毎期以下の行動をとるものとする [9]．

1 上流段階 $i+1$ から入庫量 $X_t^{(i)}$が入庫
2 下流段階 $i-1$ から需要量 $D_t^{(i)}$を受注
3 下流段階 $i-1$ へ出荷量 $Y_t^{(i)}$を出荷
4 上流段階 $i+1$ へ発注量 $Q_t^{(i)}$を発注

このとき，上流段階 $i+1$ の期間 $t-L_i$ における出荷量と段階 i の期間 t における入荷量は等しいので，

$$X_t^{(i)} = Y_{t-L_i}^{(i+1)} \tag{4}$$

が成り立つ．段階$i=2$の場合，サプライヤから新規資源部品，回収・再利用業者から再生産製品と再利用部品が入荷するので，

$$NEW_X_i^{(t)} = Y_{t-L_i}^{(i+1)} \tag{5}$$

$$REC_X_i^{(t)} = REC_Y_{t-L_i}^{(i+2)} \tag{6}$$

$$REU_X_i^{(t)} = REU_Y_{t-L_i}^{(i+2)} \tag{7}$$

$$\begin{aligned} X_t^{(i)} &= NEW_X_i^{(t)} + REC_X_i^{(t)} + REU_X_i^{(t)} \\ &= Y_{t-L_i}^{(i+1)} + REC_Y_{t-L_i}^{(i+2)} + REU_Y_{t-L_i}^{(i+2)} \end{aligned} \tag{8}$$

となる．ここで，期間 t における段階 iの期首在庫量は，

$$IS_t^{(i)} = ES_{t-1}^{(i)} + X_t^{(i)} \tag{9}$$

となる．段階$i=2$の場合，サプライヤから新規資源部品，回収・再利用業者から再生産製品と再利用部品が

入荷するので，

$$\begin{aligned} IS_t^{(i)} &= NEW_IS_t^{(i)} + REC_IS_t^{(i)} + REU_IS_t^{(i)} \\ &= NEW_ES_{t-1}^{(i)} + NEW_X_i^{(t)} + REC_ES_{t-1}^{(i)} \\ &\quad + REC_{X_i}^{(t)} + REU_ES_{t-1}^{(i)} \\ &\quad + REU_X_i^{(t)} \end{aligned} \tag{10}$$

となる．また，在庫切れを起こしていない場合，期間 t における下流段階 $i-1$ への出荷量は期間 t における下流段階 $i-1$ からの需要量と等しいので，

$$Y_t^{(i)} = D_t^{(i)} \tag{11}$$

が成り立つ．在庫切れを起こしている場合，期間 t における下流段階 $i-1$ への出荷量は期間 t における段階 i の期首在庫量と等しいので，

$$Y_t^{(i)} = IS_t^{(i)} \tag{12}$$

が成り立つ．なお，段階 i における需要量 $D_t^{(i)}$ は以下の式で表される．

$$D_t^{(i)} = \begin{cases} d_t & (i=1) \\ Q_{t-1}^{(i-1)} & (i \geq 2) \end{cases} \tag{13}$$

次に発注量について定式化を行う．期間 t における期末在庫量 $ES_t^{(i)}$は，

$$\begin{aligned} ES_t^{(i)} &= ES_{t-1}^{(i)} + X_i^{(t)} - Y_t^{(i)} \\ &= ES_{t-1}^{(i)} + Q_{t-L_i-1}^{(i)} - D_t^{(i)} \end{aligned} \tag{14}$$

の関係にある．これは各段階が在庫切れを起こさずに需要量と同じ製品量または部品量を出荷できる場合の式である．在庫切れを起こしている場合の期間 t における期末在庫量 $ES_t^{(i)}$は，

$$\begin{aligned} ES_t^{(i)} &= ES_{t-1}^{(i)} + X_i^{(t)} - Y_t^{(i)} \\ &= ES_{t-1}^{(i)} + Q_{t-L_i-1}^{(i)} - IS_t^{(i)} \\ &= 0 \end{aligned} \tag{15}$$

となる．段階$i=2$の場合，新規資源部品と再生産製品，再利用部品が期末在庫量として存在するので，

$$\begin{aligned} ES_t^{(i)} = ES_{t-1}^{(i)} &+ REC_ES_{t-1}^{(i)} + REU_ES_{t-1}^{(i)} \\ &- (New_ES_t^{(i)} + REC_ES_t^{(i)} \\ &+ REU_ES_t^{(i)}) \end{aligned} \tag{16}$$

となる．次に，期間 t における段階 i の発注量 $Q_t^{(i)}$ は，定期発注方式を用いる場合は目標在庫量から有効在庫量を引いた数だけ発注を行うので，

$$\begin{aligned} Q_t^{(i)} = &\left\{(L_i+1)\widehat{D}_t^{(i)} + SS^{(i)}\right\} \\ &- \left(S_t^{(i)} + \sum_{k=1}^{L_i} Q_{t-k}^{(i)}\right) \end{aligned} \tag{17}$$

となる．ここで，需要量の予測値 $\widehat{D}_t^{(i)}$ は移動平均計算期間 p_i を用いて，

$$\widehat{D}_t^{(i)} = \frac{1}{p_i}\sum_{k=1}^{p_i} D_{t-k+1}^{(i)} = \frac{1}{p_i}\sum_{k=1}^{p_i} Q_{t-k}^{(i-1)} \tag{18}$$

となる．(15)，(16)，(17)より，各段階の発注量 $Q_t^{(i)}$ のモデル式は式(19)，式(20)となる．

$$Q_t^{(i)} = \left(1 + \frac{L_1+1}{p_1}\right) d_t - \frac{L_1+1}{p_1} d_{t-p_1} \quad (i=1) \tag{19}$$

$$\begin{aligned} Q_t^{(i)} = &\left(1 + \frac{L_i+1}{p_i}\right) Q_{t-1}^{i-1} \\ &- \frac{L_i+1}{p_i} Q_{t-p_i-1}^{i-1} \; (i=3) \end{aligned} \tag{20}$$

ここで，リバース・サプライチェーン工程と情報の共有を行う場合のモデルを今回は採用している[10].サプライヤへの発注より前の段階で再生産製品の入荷量 REC_t と再利用部品 REU_t を把握できるので，必要な部品量と再生産製品の入荷量の差分をサプライヤに発注する．したがって，発注量は以下の式となる．

$$\begin{aligned} Q_t^{(i)} = &\left(1 + \frac{L_i+1}{p_i}\right) Q_{t-1}^{i-1} - \frac{L_i+1}{p_i} Q_{t-p_i-1}^{i-1} \\ &- (REC_t + REU_t) \quad (i=2) \end{aligned} \tag{21}$$

製品メーカーでは，上流段階から部品を入手して下流段階からの需要量の数だけ製品の製造を行い，新規資源部品メーカーは，上流段階から資源を入手して需要量の数だけ部品の製造を行う．このときの製品または部品の生産量 $P_t^{(i)}$ は式(22)となる．

$$P_t^{(i)} = D_t^{(i)} \qquad (i=2,\ 3) \tag{22}$$

(b)リバース・サプライチェーン

リバース・サプライチェーンの各段階は毎期以下の行動をするものとする[11].

1. 消費者は，製品最大使用期間内に *Weibull* 分布に従って製品の使用を終え，使用済み製品を再生産製可能品もしくは再利用可能製品として回収・再利用業者に引き渡すか，廃棄製品として廃棄を選択する．
2. 使用済み製品は回収・再利用業者によって回収され，再生産可能な製品は簡易な修繕を行い再生産製品とし，再利用可能な製品は分解・検査を行い再利用部品とする．
3. その後，メーカーへと再生産製品と再利用部品の出荷量の通知を行い，再生産製品と再利用部品を検品して梱包を行いメーカーに出荷する．

まず，小売店から消費者へ渡った製品は *Weibull* 分布の確率密度関数に従って最大使用期間内に故障もしくは使用を終えるものとする．期間 t に消費者が

購入した製品に与える *Weibull* 分布$W_t^{(i)}$は，

$$W_t^{(i)} = \frac{W_m}{W_n} * \left(\frac{a - W_\gamma}{W_n}\right)^{W_m - 1} * e^{-\left(\frac{a-W_\gamma}{W_n}\right)^{W_m}} \quad (a = 1,\ 2,\ \cdot\ \cdot\ \cdot N) \tag{23}$$

となる．購入された製品が，最大使用期間 N までの各期間 j に故障もしくは使用を終える製品量は上記の式(23)を用いて以下の式で表す．

$$W_T_t^{(j)} = W_t^{(j)} * d_t \tag{24}$$

また，製品は使用期間ごとに Weibull 分布の故障率曲線に従い，故障度が増加していくものとする．このときに使用する故障率曲線$W_f_t^{(i)}$は，

$$W_{f_t}^{(i)} = \frac{W_m}{W_n} * \left(\frac{a - W_\gamma}{W_n}\right)^{W_m - 1} \quad (a = 1,\ 2,\ \cdot\ \cdot\ \cdot N) \tag{25}$$

となる．期間 t に販売された製品の期間 j における故障度$F_t^{(i)}$は，

$$F_t^{(i)} = \sum_{k=0}^{j} W_f_t^{(k)} \quad (j = 1,\ 2,\ \cdot\ \cdot\ \cdot N) \tag{26}$$

となる．使用済み製品は，式(26)と再生産可能値と再利用可能値を比較して再生産可能製品と再利用可能品として回収・再利用業者に運ばれる．ここで，再生産可能製品とは初期不良や軽微な補修等で新品の製品と同等の品質で市場に再度出荷できる製品のことを指し再利用可能製品とは製品として市場に出荷することはできないが，分解・洗浄・検査を実施して部品レベルで新品の製品に組み込むことが可能な品質の製品である．期間 t における再生産可能製品量R_REC_tと再利用可能製品量R_REU_t，使用済み製品廃棄量D_tは，それぞれ以下の式となる．

$$R_REC_t = \sum_{k=1}^{N} W_T_t^{(j)} \quad \left(F_t^{(i)} < \text{rec}\right) \tag{27}$$

$$R_{REU_t} = \sum_{k=1}^{N} W_{T_t}^{(j)} - R_{REC_t} \quad \left(F_t^{(i)} < \text{reu}\right) \tag{28}$$

$$D_t = \sum_{k=1}^{N} W_T_t^{(j)} - (R_REC_t + R_REU_t) \tag{29}$$

期間 t に回収した再生産可能製品と再利用可能製品は，t 期末に回収・再利用業者へと送られ，期間 t+1 に入荷する．よって，消費者から回収した再生産可能製品と再利用可能と，回収・再利用業者の入荷量の関係式は式(30)となる．

$$Y_t^{(i)} = R_REC_{t-1} + R_REU_{t-1} \quad (i = 5) \tag{30}$$

期間 t に送られてきた回収製品は，期間 t+1 に再生産，再利用される．このときの再生産量REC_tと再利用量REU_tは，

$$REC_t = R_REC_{t-2} \quad (R_REC_{t-2} \le RECA) \tag{31}$$

$$REU_t = R_REU_{t-2} \quad (R_REU_{t-2} \le REUA) \tag{32}$$

となる．ここで，回収・再利用業者で再生産された再生産製品量と再利用された再利用部品量をメーカーへと再利用部品量を伝達する．このときの関係式は，

$$REC_T_t = REC_X_{t+L_t^{(i)}+L_i}^{(i)} \tag{33}$$

$$REU_T_t = REU_X_{t+L_t^{(i)}+L_i}^{(i)} \tag{34}$$

となる．

ここからは，クローズドループ・サプライチェーンの利益の定式化を行う．期間 t における各段階の費用を以下の式(35)から式(38)に記す．

$$CLSC_C_t^{(i)} = ES_t^{(i)} * \text{PS_COST} + CL_t * \text{B_COST} \quad (\text{i=2}) \tag{35}$$

$$CLSC_C_t^{(i)} = P_t^{(i)} * \text{P_COST} + N_{ES_t}^{(i)} + \text{NS_COST} + REC_{ES_t}^{(i)} * \text{RECS_COST} + REU_ES_t^{(i)} \quad (\text{i} = 3) \tag{36}$$

$$CLSC_C_t^{(i)} = Y_t^{(i)} * \text{NR_COST} + ES_t^{(i)} * \text{NS_COST} + P_t^{(i)} * \text{NP_COST} \quad (\text{i} = 4) \tag{37}$$

$$CLSC_C_t^{(i)} = REC_t * REC_COST + REU_t * REU_COST + REC_ES_t^{(i)} * REUS_COST * 2 + REU_ES_t^{(i)} * REUS_COST * 2 \quad (\text{i=5}) \tag{38}$$

さらに，クローズドループ・サプライチェーンの社会的価値を定量的に表現するために，本研究では SROI の概念を取り入れる．各段階で導出される社会的価値は，前章で定義したクローズドループ・サプライチェーンの社会的価値を使用するものとする．期間 t における各段階で導出された社会的価値は，

$$S_t = \left(REC_X_i^{(t)} + REU_X_i^{(t)}\right) * \text{NR_COST} + E^{(3)} * \text{TP} + E^{(5)} + (R_REC_t + R_REU_t) * \text{D_COST} \tag{39}$$

となる．そして，サプライチェーンにおける収入は，製品販売価格によって収益のみであるため，期間 t

における収入SC_B_tは，

$$SC_B_t = d_t * \mathrm{PUR} \tag{40}$$

となる．したがって，クローズドループ・サプライチェーンの期間 t における利益と SROI 値は式(41)と式(42)となる．

$$CLSC_P_t = \frac{(S_t + SC_P_t)}{\sum_{k=2}^{4} SC_{C_t}^{(i)}} \tag{41}$$

$$SROI_t = \frac{(S_t + SC_P_t)}{\sum_{k=2}^{5} CLSC_C_t^{(i)}} \tag{42}$$

5. シミュレーションによる社会的価値を評価に取り入れた場合のクローズドループ・サプライチェーンの分析

5.1 シミュレーションの実験方法

(1) シミュレーション実験の目的

本研究では，提案するクローズドループ・サプライチェーンの経済的価値と社会的価値を組み合わせた評価方法を用いて，再生産型，再利用型，ハイブリッド型の 3 パターンのクローズドループ・サプライチェーンモデルの評価を実施し，クローズドループ・サプライチェーンの評価値が従来型のサプライチェーンの評価値を上回る場合の回収率を各パターン分析することを目的とする．

(2) 回収率と再生産可能値と再利用可能値の関係

期間 t の回収は，期間 t に初期不良または故障によって使用済みとなった製品の中で再生産または再利用が可能と判断された製品を対象として行われる．本シミュレーション内では厳密な回収率に従った回収行動を行っておらず，Weibull 分布によって発生させた確率密度関数で消費者が製品の使用を終える期間と使用を終える各期間の製品量を表現し，故障率曲線で故障度を定量的に表現して，再生産可能値と再利用可能値との比較によって回収量を決定している．したがって回収率は式(43)となる．

$$\text{回収率}(\%) = \frac{\sum_{k=1}^{t}(R_{REC_t} + R_{REU_t})/(R_{REC_t} + R_{REU_t} + D_t)}{t} \tag{43}$$

(3) 探索条件の定義と実験条件の設定

本研究では，提案する評価方法を用いて再生産のみ，再利用のみ，再生産，再利用のハイブリッド型の 3 パターンのクローズドループ・サプライチェーンモデルの評価を実施し，クローズドループ・サプライチェーンの評価値が従来型のサプライチェーンの評価値を上回る場合の回収率を各パターン分析することを目的とする．各パターンの再生産可能値と再利用可能値の関係について表に示す．また，クローズドループ・サプライチェーンの評価値には SROI 本実験で用いる探索条件を式(44)に記す．

$$\text{探索条件：} \sum_{k=1}^{t}(SC_P_t) > \sum_{k=1}^{t}(SC_P_t) \tag{44}$$

再生産可能値と再利用可能を 0 から 0．01 刻みで上昇させ，式(44)となる状態の回収率を分析する．また，再生産可能値と再利用可能値は常に再利用可能値が高いように設定する．

(4) シミュレーションの基本設定

本シミュレーションで使用する各パラメータの基準値を以下のように設定する．なお，最終需要量は正規分布に従うものとして，平均を μ，標準偏差をρとして$N(\mu,\ \rho^2)$ と表すものとする．例として，平均 1000 の標準偏差 10 の場合，$N(1000,\ 10^2)$ と表される．

- シミュレーション期間 t = 1000
- 移動平均期間 p_i = 5
- 製品の最大試用期間 N = 30
- 各段階の補充リードタイム L_i =2
- 最終需要量 d_t = N(1000, 10^2)
- Weibull 分布に使用する形状パラメータ W_m = 4
- Weibull 分布に使用する尺度パラメータ W_n = 2
- Weibull 分布に使用する位置パラメータ W_γ = 0
- 製品販売価格 PUR = 30
- リバース・サプライチェーンの作業時間 $L_t^{(i)}$ = 1
- 雇用者の消費および納税費用 TP = 100
- 段階 i における雇用者数 $E^{(i)}$ = 10 (i = 3)
  $E^{(i)}$ = 15 (i = 5)
- 新規資源購入費用 NR_COST = 8
- 新規資源部品製造費用 NP_COST = 3
- 製品製造費用 P_COST = 5
- 製品販売価格 PUR = 30
- 製品廃棄費用 D_COST = 5
- 機会損失費用 B_COST = 20
- 使用済み製品回収費用 R_COST = 10
- 再生産費用 REC_COST = 5
- 再利用費用 REU_COST = 6
- 製品保管費用 PS_COST = 3
- 新規資源部品保管費用 NS_COST = 1
- 再生産製品保管費用 RECS_COST = 3
- 再生産部品費用 REUS_COST = 2

本シミュレーションでは，観測期間の前に需要量，入荷量，出荷量，発注量，生産量，回収量，再生産量が，すべての段階で一定である準備期間を 10 期間設けることとする．回収・再利用業者における各期間の再生産能力と再利用能力は Table 2 に従うこととする．

Table 2 Ability of Recycle and Ability of Reuse in the Model

	Ability of Recycle	Ability of Reuse
Recycle Only	1000	0
Reuse Only	0	1000
Hyblid	500	500

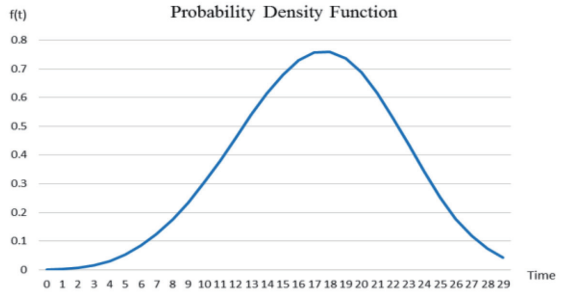


Fig.4 Probably Density Function
($W_m = 4$,　$W_n = 2$,　$W_\gamma = 0$)

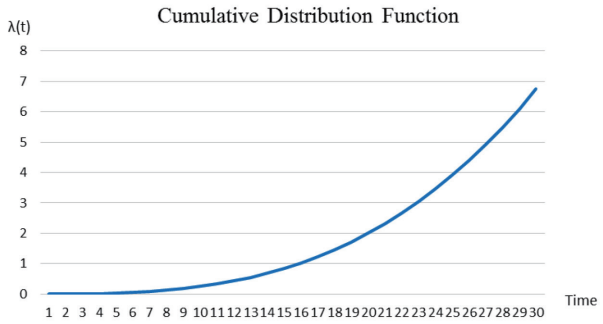


Fig.5 Cumulative Distribution Function
($W_m = 4$,　$W_n = 2$,　$W_\gamma = 0$)

また，Fig.4 と Fig.5 はシミュレーションで使用する Weibull 分布の確率密度関数と累積分布関数である．以上の条件でシミュレーションを行うものとする．

5.2 シミュレーション結果と考察

Fig.6，Fig.7，Fig.8，Fig.9 および Fig.10 からは，全てのパターンにおいてクローズドループ・サプライチェーンの評価値が従来型サプライチェーンの評価値を上まわっていることが判る．このことから，評価方法は，従来の経済性のみの評価方法では算出されなかったクローズドループ・サプライチェーンの社会的な側面を含めたような複合的な価値を導出できているものと考えられる．

また，Table 3 からは，再生産のみのクローズドループ・サプライチェーンでは 18%の回収率が見込めれば従来型サプライチェーンよりも評価値が高くなることが確認できる．回収率が低い場合では再生産のみを実施するクローズドループ・サプライチェーンが適切であると考えられる．再利用のみとハイブリッド型のクローズドループ・サプライチェーンの回収率は共に 51%，ハイブリッド型は再生産率が 3%，再利用率が 48%での回収率が見込めれば従来型のサプライチェーンより評価値が高くなると確認できる．再利用のみとハイブリッド型の回収率に大きな差はなく，その差異は少ないため，クローズドループ・サプライチェーンの評価値の高いハイブリッド型のクローズドループ・サプライチェーンを選択することが適切であると考えられる．

以上から，提案する評価方法によれば，クローズドループ・サプライチェーンを構成して運用することを考えるとき，回収率に不確実性が存在する，あるいは回収率が低い場合では再生産のみのクローズドループ・サプライチェーンを構築することで従来型サプライチェーンと同等以上の価値を生み出すことが可能であることが示唆される．また，一定レベル以上の回収率が見込める場合では，ハイブリッド型のクローズドループ・サプライチェーンを構築することで従来型のサプライチェーンと同等以上の価値を生み出すことが可能であることが示唆される．

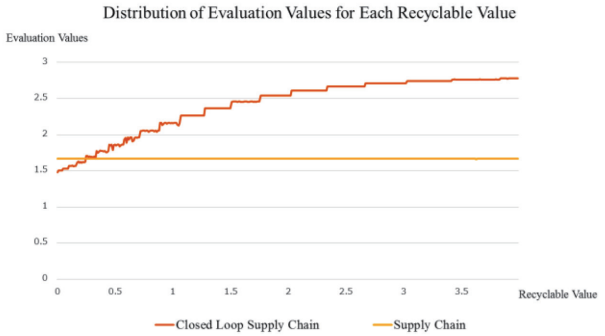


Fig.6 Distribution of Evaluation Values for Each Recyclable Value

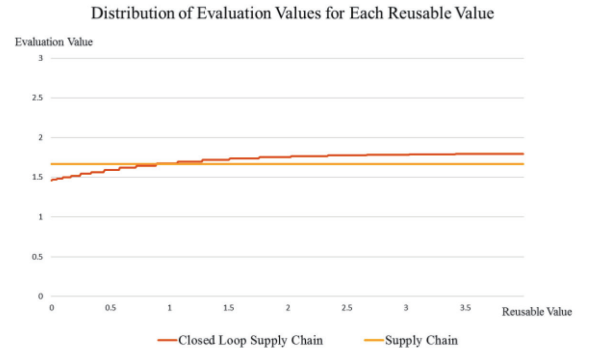


Fig.7 Distribution of Evaluation Values for Each Reusable Value

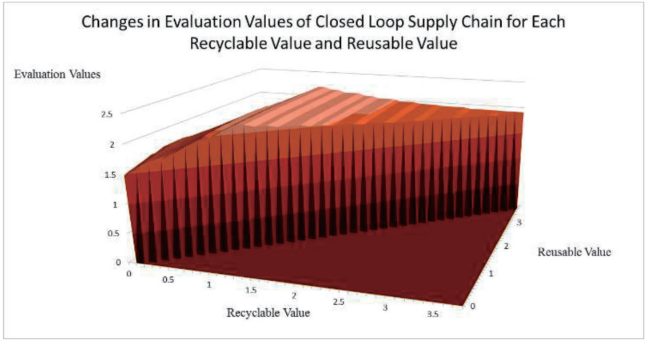


Fig.8 Changes in Evaluation Values of Closed Loop Supply Chain for Each Recyclable Value and Reusable Value

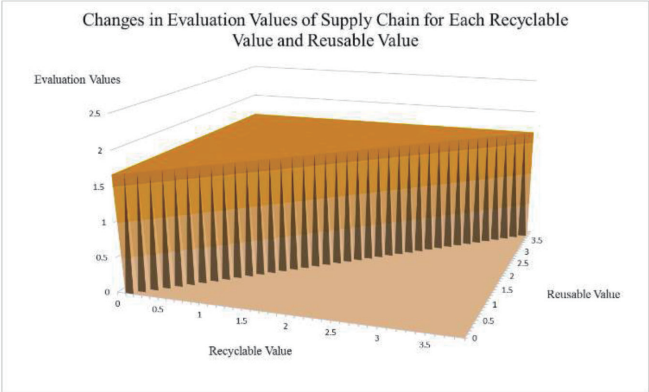


Fig.9 Changes in Evaluation Values of Supply Chain for Each Recyclable Value and Reusable Value

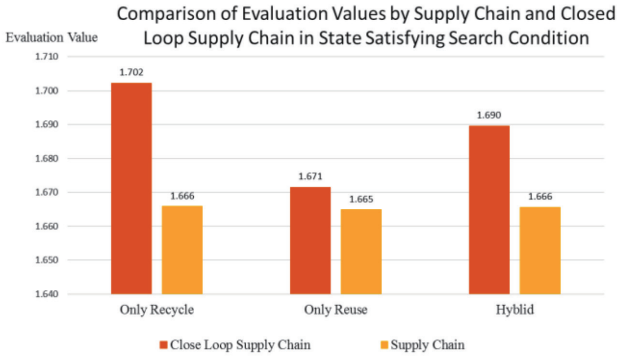


Fig.10 Comparing of Evaluation Values Supply Chain and Closed Loop Supply Chain in a State Satisfying Condition

Table 3 Recycle Value, Reuse Value, Collecting Rate, Recycle Rate and Reuse Rate of Each Model in a State Satisfying Condition

	Recycle Value	Reuse Value	Collecting Rate(%)	Recycle Rate(%)	Reuse Rate(%)
Only Recycle	0.35	0	18	18	0
Only Reuse	0	0.99	51	0	51
Hybrid	0.1	1	51	3	48

しかし，本研究ではクローズドループ・サプライチェーンで使用する各種パラメータを固定してシミュレーション実験を行っている．しかし，現実には，扱う製品によって投入する費用や導出される価値は異なるはずである．したがって，現実的なクローズドループ・サプライチェーンについてのデータを使用して，シミュレーションを実行することが今後は必要である．

6. おわりに

本研究では，資源を調達して製品の生産，販売をするサプライチェーンに，回収，再生産，再利用を加えたクローズドループ・サプライチェーンにおける社会的価値を評価するための手法を提案した．社会貢献などの慈善事業の価値を定量評価する際に使用されるSROI（Social Return on Investment）という指標を，サプライチェーンの評価基準に利用することを試みた．また，クローズドループ・サプライチェーンの経済的評価と社会的価値を組み合わせた新たに提案した評価方法を用いて，クローズドループ・サプライチェーンの評価値が従来型サプライチェーンの評価値を上回る状態があるかについて分析した．

そして，単一製品かつ単一部品を取り扱う単純なクローズドループ・サプライチェーンモデルを使用したが，多くの異なる部品を組み合わせて一つの製品を製造することが現実的である．今後は，複数部品から複数製品を製造／配送するような現実的なクローズドループ・サプライチェーンモデルへ拡張する必要がある．

提案手法を用いたシミュレーション実験ではモデル内のパラメータを固定してシミュレーションを行った．しかし，取り扱う製品によって回収率や投入する費用は異なるため，モデル内のパラメータを変化させた場合に評価値にどのような影響を与えるかを確認し，変化させたパラメータごとの評価値の分析を行う必要がある．

また，提案した手法の妥当性を検証するために，提案手法を用いて既にクローズドループ・サプライチェーンを実施している企業の評価を実施する必要があると考える．クローズドループ・サプライチェーンの実施が企業経営に対して良い影響を与える場合に提案した評価値が良い結果になり，企業経営に悪い影響を与えるクローズドループ・サプライチェーンの評価値は悪い結果になることを確認する必要がある．

参考文献

1) 曹徳弼，中島健一，竹田賢，田中正敏：「サプライチェーンマネジメント入門」，朝倉書店, pp.136-176, 2008
2) 中島健一：“循環型社会における生産マネジメントシステムに関する研究,” オフィス・オートメーション, Vol.27, No.4, pp.88-94, 2007
3) 有光大幸，中島健一，能勢豊一，栗山仙之介：“循環型生産システムの構築に関する研究,” 日本経営工学会論文誌, Vol.54, No.1, pp.19-25, 2004
4) 佐々木慶彦，開沼泰隆：“新規製造と再製造・再利用の需要を考慮したハイブリッド製造／再製造システム,” 日本経営工学会春季大会予稿集, pp.212-213, 2015
5) 高橋直人，楠川恵津子：“製品需要量と使用済み製品回収量に不確実さを考慮したグリーンサプライチェーンの最適運用方策,” 日本経営工学会秋季大会予稿集, pp.276-277, 2015
6) 山口高弘，武田佳奈，伊藤利江子：“ソーシャルイノベーションの加速に向けたSROIとSIB活用のススメ,” NRIパブリックマネジメントレビュー, February 2012 Vol.103, pp.1-7, 2012
7) 野村證券：https://www.nomura.co.jp/terms/ english/ r/roi.html (2017/2/15 現在)
8) 山下希，水野浩孝，森山弘海：クローズドループ・サプライチェーンの社会的価値の分析 –SROIの適用–，第57回

日本経営システム学会全国研究発表大会講演論文集, pp.278-279, 2016
9) 水野浩孝, 森山弘海, 羽田隆男：“最終需要情報共有型のサプライチェーンにおける非定常状態でのブルウィップ効果の分析,” 日本経営システム学会誌, Vol.29, No.3, pp.191-200, 2013
10) 山下希, 水野浩孝：“クローズドループ・サプライチェーンにおける情報共有方法の検討と有効性の評価,” 東海大学情報通信学部経営システム工学科2014年度秋学期卒業論文, 2014
11) 石川弘道：“クローズド・ループ・サプライ・チェーン・モデルの提案,” 高崎経済大学論集, Vol.51, No.4, pp.101-110, 2009