

クローズドループ・ロジスティクスネットワーク設計 問題の定式化

片山直登

1 はじめに

近年、インターネットショッピングの利用が大幅に増加している。インターネットショッピングでは、通常取引と比較して返品率が高い傾向にあり、さらに衣料品、メガネやシューズなどの色・サイズ交換無料や返品を前提とした販売モデルが急速に拡大しており、返品に対するロジスティクスの対応が重要な課題となっている。日本では国民性もあり、現在の時点ではインターネットショッピングにおける返品率は比較的低い水準にあるが、アメリカではアパレルなど色や試着の良し悪しが購入に影響する製品の場合は返品率が25～40%に上っている (JETRO 2018)。一方、環境への意識の高まりから、廃棄物、不用品、リサイクル品、パレットなどの回収の重要性も増している。

このような返品や回収などのモノの流れはリバース（静脈）物流とよばれ、これを取り扱うロジスティクス/サプライチェーンはリバースロジスティクス (Reverse Logistics: RL) やリバースサプライチェーン (Reverse Supply Chain: RSC) とよばれる。RL や RSC を中心としたネットワークの設計はリバースロジスティクス/サプライチェーンネットワーク設計とよばれる。さらに、通常の物流であるフォワード物流を含めた物流ネットワークの設計はクローズドループ（循環型）ロジスティクスネットワーク設計 (Closed-Loop Logistics Network Design: CLLND) またはクローズドループサプライチェーンネットワーク設計とよばれる。

近年、環境重視という時代の流れもあり、持続可能性や環境面を重視したグリーン物流などをキーワードとして、持続可能サプライチェーンマネジメント (Sustainable Supply Chain Management: SSCM)、グリーンサプライチェーンマネジメント (Green Supply Chain Management: GSCM)、リバースサプライチェーンマネジメント (Reverse Supply Chain Management: RSCM) やクローズドループサプライチェーンマ

ネジメント (Closed-Loop Supply Chain Management: CLSCM) やそれらのネットワーク設計の研究が数多く行われている。また、これらの研究の調査・整理を目的としたレビュー論文も多数発表されている。

Seuring and Muller (2008) は、1994年から2007年に発行された SSCM に関する191文献のレビューを提供し、これらの研究を環境、社会、持続可能性の3つの視点から分析している。Gold et al. (2010) は、環境および社会問題を通じて、組織間資源の価値生成と企業間の持続可能な競争優位性の要因から SSCM の文献を調査している。Carter and Easton (2011) は、1990年から20年間の主要なロジスティクスおよび SCM に関する論文誌における SSCM に関する80文献の体系的なレビューを行っている。Ashby et al. (2012) は、持続可能性のある社会および環境的な側面から、SCM の文献の体系的なレビューを行っている。Ahi and Searcy (2013) は、GSCM の22種類の定義と SSCM の12種類の定義を示し、2012年までの GSCM と SSCM の180文献について2つの特性から分析している。Winter and Knemeyer (2013) は、持続可能性と SCM の双方に関する1990年から2011年までの227文献について、物流 / SCM, 運用 / 生産管理, 社会 / 環境の面からレビューを行っている。Brandenburg et al. (2014) は、フォワードサプライチェーンの環境および社会的要因に焦点を当てた数学的モデルとその方向性を評価することを目的として、SCM の持続可能性を考慮した定量的モデルに関する134文献の分析を行っている。Eskandarpour et al. (2015) は、SSCM のネットワーク設計において考慮される環境および社会的基準、統合的な数学モデル、最適化手法および最適化ツールや現実問題への適用面から、87文献の体系的なレビューを行っている。Touboulic and Walker (2015) は、SSCM の発展の背景と概念を明確化するために、一般的理論の包括的マップを提案し、将来の研究に対する提案を行っている。Memari et al. (2016) は、CO₂排出に関する SCM 活動の計画と制御に焦点を当て、2001年から2015年までの GSCM とグリーンロジスティクスに関する31文献におけるオペレーションズリサーチの活用についてレビューを行い、今後の研究領域を提案している。Rajeev et al. (2017) は、業界と経済全体の傾向を分析し、2000年から2015年までの1068文献に対する包括的なテーマ分析を行い、多様な方法論を使用して持続可能性問題の今後の展開を明確にしている。Ansari and Kant (2017) は、2002年から2016年に発表された286文献を年度、ジャーナル、研究方法、OR/ 数学ツールおよびデータ分析手法、産業、多目的意思決定、著者、大学、国、障壁などのカテゴリで分類し、SSCM の研究の空白部分を特定し、今後の研究機会を明らかにした。Sharma et al. (2017) は、レビュー論文を含む広範な文献のレビューと産業の専門家への調査を行うことにより GSCM の実施基準を調査し、13種類のパフォーマンス指標と79種類のサブ指標を提示し、階層分析プロセスを使用して文献のランク付けを行った。Govindan et al. (2017) は、不確実性の下でのサプライチェーンネットワーク設計および RL ネットワーク設計の分野

におけるレビュー論文を含む171文献の包括的なレビューを行っている。Govindan and Soleimani (2017) は、2014年までに Journal of Cleaner Production に掲載された83文献について、新たなカテゴリーを用いた RL と CLSCM の傾向を明らかにし、新しい研究の方向性を示唆している。Islam and Huda (2018) は、廃電子機器に焦点を当てた RL および CLSCM 分野において、1999年から2017年までに発行された157文献を対象に分類し、コンテンツ分析を行っている。Tsenga et al. (2019) は、1998年から2017年に発行された Scopus および ISI Web of Science データベースから選択した GSCM の 880文献をレビューするとともにメタデータ分析を行い、研究の洞察と今後の方向性を示している。Kazemi et al. (2019) は、2000年から2017年までに International Journal of Production of Research に掲載された RL と CLSCM の分野の94文献の計量書誌分析とコンテンツ分析を示している。Rachih et al. (2019) は、RL に関する文献を調査・分類し、解析能力と柔軟性について解説している。Waltho et al. (2019) は、2010年から2017年までの GSC ネットワーク設計の文献について、炭素排出量と環境政策を含むモデルと方法論に焦点を当てたレビューを行っている。

近年、CLLND に対する多くの研究が行われてきた。Fleischmann et al. (2001) は、一般のロジスティクスモデルの拡張 RL モデルを混合整数線形計画モデルとして定式化し、物流ネットワークに対する返品フローの影響を分析した。Pati et al. (2008) は、多品目・多段階・多品種の古紙リサイクルロジスティクスシステムに対して、施設配置、輸送経路とフローを決定する複数目標をもつ整数目標計画モデルとしての定式化を示した。Govindan et al. (2009) は、遺伝的アルゴリズムと粒子群最適化法をタイヤ・プラスチック製品メーカーの受注生産・流通在庫サプライチェーンに適用した。Govindan et al. (2010) は、使用済み鉛蓄電池から回収された鉛リサイクルを対象とした多段階・多期間・多製品モデルを混合整数線形計画モデルとして定式化し、遺伝的アルゴリズムを適用した。Pishvae and Torabi (2010) は、ネットワーク設計と原材料フローを求めるための環境要因、不確実性とリスクを考慮した多目的混合整数計画モデルを提案し、従来の効率的な解法を組み合わせた対話型ファジィ解決法を開発した。Shi et al. (2011) は、生産能力制約のもとで新製品の生産量、再生製品の再生量と使用済み製品の取得価格を決定する期待利益最大化モデルを定式化し、ラグランジュ緩和に基づいた解法を開発した。Amin and Zhang (2012) は、供給業者選択基準を提案し、供給業者の重みを出力するファジィ供給業者評価法を提案し、供給業者と改修施設の選択のための多目的混合整数線形計画モデルを開発した。Amin and Zhang (2013) は、加重和と ϵ 制約法により環境要因を考慮した需要とリターンの不確実性を含む総費用最小化を目的とした混合整数線形計画モデルを提案し、シナリオベースによる確率的計画法を提案した。Soleimani et al. (2017) は、製品、コンポーネントと原材料リサイクルを対象とした環境の配慮、総利益最大化と労働損失日数削減のモデルを定式化し、複数シナリ

オに対する遺伝的アルゴリズムを開発した。Chen et al. (2017) は、太陽エネルギー産業を対象とし、持続可能性の観点から費用と CO₂ 排出量のトレードオフを考慮した多段階ネットワーク設計モデルを多目的混合整数線形計画モデルとして定式化し、混雑距離ベースの多目的粒子群最適化法を開発した。Sahebjamnia et al. (2018) は、タイヤ企業を対象とした総費用、施設設置とその環境への影響、タイヤ処理および輸送、雇用機会などの社会的影響を最適化する持続可能なネットワークを設計するための多目的混合整数線形計画モデルを開発し、4種類のハイブリッドメタヒューリスティックを開発した。Fang et al. (2017) は、RL を生産・配送経路問題に組み込んだ CO₂ 排出量の削減モデルを混合整数計画モデルとして定式化し、妥当不等式に基づいた分枝カットを用いた誘導探索アルゴリズムを提案した。Guo et al. (2018) は、施設位置、在庫と配送経路を考慮した費用最小化モデルを非線形整数計画モデルとして定式化し、シミュレーテッドアニーリングを適応型遺伝的アルゴリズムに組み込んだヒューリスティックを開発した。Sadeghi et al. (2019) は、多期間・多製品を対象とした施設設置と多種配送車の配送経路を求める混合整数線形計画モデルを開発し、イランの自動車用スペアパーツ企業に適用した。Govindan et al. (2020) は、総費用と在庫不足量の最小化を目的とし、マルチデポ、容量制約とグリーン配送、不確実性需要などを考慮し、ファジー最適化を用いた多目的混合整数線形計画モデルのハイブリッドアプローチを開発した。

このように、これまで CLLND 問題を始めとする数多くのロジスティクス/サプライチェーン設計問題の研究が行われてきた。それらの研究では組み合わせ最適化問題としての定式化が示され、定式化に基づいたメタヒューリスティックなどの数理解法が開発されている。しかしながら、大半の研究は個々に異なる事例を想定した異なる前提に基づいて定式化されており、統一的なモデル・定式化は示されていない。さらに、施設の種類や施設間経路にそれぞれの施設群や施設群間を表す変数やパラメータを割り当てることによって定式化が行われているため、対象となるモデルが複雑化するにつれて、変数、パラメータや制約式が膨大なものとなっている。本研究では、CLLND 問題を対象とし、できる限り多様な問題に対応が可能なような抽象化した数理モデル・定式化を示す。

2 CLLND モデルの定式化例

Govindan et al. (2020) は、ファジー計画モデルと多目的混合整数計画モデルを用いて、不確実性、供給業者選択、在庫配置と配送車両の割り当てを含むグリーン SCM を考慮した複数製品の CLLND のモデル化と解法を提案している。このモデルでは、施設は供給業者、配送センター、リサイクルセンター、回収センター、廃棄センターから構成されており、配送センターと顧客間は巡回配送を行うことを想定している。このモデ

ルでは多くの複雑な前提や条件を考慮しているため、その定式化は際限なく複雑なものとなっている。

この論文で示されている数理モデルの定式化のうちの第一目的関数を示す。なお、第二目的関数は品切れの最小化である。はじめに、目的関数で使用する添え字を示す。

- i : 製品 ($1 \leq i \leq I$)
- d : 配送センター候補 ($1 \leq d \leq D$)
- s : 供給業者候補 ($1 \leq s \leq S$)
- c, \hat{c} : 顧客 ($1 \leq c, \hat{c} \leq C$)
- o : 回収センター候補 ($1 \leq o \leq O$)
- n : リサイクルセンター候補 ($1 \leq n \leq N$)
- f : 廃棄センター候補 ($1 \leq f \leq F$)
- k : 価格レベル ($1 \leq k \leq K$)
- v : 配送車 ($1 \leq v \leq V$)

次に、目的関数で使用するパラメータを示す。

- $CSSP_s$: 供給業者 s とのコミュニケーション費用
- $CSDST_d$: 配置候補 d における配送センターの開設費用
- $CSCL_o$: 配置候補 o における回収センターの開設費用
- $CSRCY_n$: 配置候補 n におけるリサイクルセンターの開設費用
- $CSDS_f$: 配置候補 f における廃棄センターの開設費用
- $CSPSP_{is}$: 供給業者 s における製品 i の生産費用
- $CSPDST_{id}$: 配送センター d における製品 i の処理費用
- $CSPCL_{io}$: 回収センター o における製品 i の処理費用
- $CSPRCY_{in}$: リサイクルセンター n における製品 i のリサイクル費用
- $CSPDS_{if}$: 廃棄センター f における製品 i の廃棄費用
- $CSVH_v$: 配送車 v の固定費用
- $CSCSCL_{ico}$: 顧客 c から回収センター o への製品 i の輸送単価
- $CSCLDS_{iof}$: 回収センター o から廃棄センター f への製品 i の輸送単価
- $CSCLRCY_{ion}$: 回収センター o からリサイクルセンター n への製品 i の輸送単価
- $CSRCYSP_{ins}$: リサイクルセンター n から供給業者 s への製品 i の輸送単価
- $CSPDST_{isd}$: 供給業者 s から配送センター d への製品 i の輸送単価
- CSP_{iks} : 価格レベル k で供給業者 s から製品 i を購入するときの購入単価
- h_i : 製品 i の在庫保管単価
- f_v : 配送車 v の燃料消費量原単位
- δ : 温室効果ガスの費用換算係数

最後に、目的関数で使用する変数を示す。

- YSP_{iks} : 供給業者 s が価格レベル k で製品 i を購入するか否かを表す 0-1 変数
- $YDST_d$: 配送センター d が開設されるか否かを表す 0-1 変数
- YCL_o : 回収センター o が開設されるか否かを表す 0-1 変数
- $YRCY_n$: リサイクルセンター n が開設されるか否かを表す 0-1 変数

- YDS_f : 廃棄センター f が開設されるか否かを表す 0-1 変数
- β_{vd} : 配送車 v が配送センター d に割り当てられるか否かを表す 0-1 変数
- ZVH_v : 配送車 v が使用するか否かを表す 0-1 変数
- $Z_{v\hat{c}c}$: 配送車 v が顧客 \hat{c} から顧客 c へ配送するか否かを表す 0-1 変数
- $INVP_{ic}$: 顧客 c の製品 i の在庫量
- X_{ivdc} : 配送車 v による配送センター d ・顧客 c 間の製品 i の配送量
- $XCSCCL_{ico}$: 顧客 c ・回収センター o 間の製品 i の輸送量
- $XCLDS_{iof}$: 回収センター o ・廃棄センター f 間の製品 i の輸送量
- $XCLRCY_{ion}$: 回収センター o ・リサイクルセンター n 間の製品 i の輸送量
- $XRCYSP_{ins}$: リサイクルセンター n ・供給業者 s 間の製品 i の輸送量
- $XSPDST_{iksd}$: 配送センター d における供給業者 s からの価格レベル k での製品 i の購入量

ここで、Govindan モデルにおける第一目的関数を示す。

$$\begin{aligned}
& \min z^{cost} \\
& = \sum_v CSVH_v \times ZVH_v + \sum_{i,k,s} CSSP_s \times YSP_{iks} \\
& \quad + \sum_o CSCL_o \times YCL_o + \sum_n CSRCY_n \times YRCY_n \\
& \quad + \sum_f CSDS_f \times YDS_f + \sum_d CSDST_d \times YDST_d \\
& \quad + \sum_{i,c,o} CSPCL_{io} \times XCSCCL_{ico} + \sum_{i,o,n} CSPRCY_{in} \times XCLRCY_{ion} \\
& \quad + \sum_{i,o,f} CSPDS_{if} \times XCLDS_{iof} + \sum_{i,n,s} CSPSP_{is} \times XRCYSP_{ins} \\
& \quad + \sum_{i,s,d} CSPDST_{id} \times XSPDST_{iksd} \\
& \quad + \sum_{i,c,o} CSCSCCL_{ico} \times XCSCCL_{ico} + \sum_{i,k,s,d} CSSPDST_{isd} \times XSPDST_{iksd} \\
& \quad + \sum_{i,o,n} CSCLRCY_{ion} \times XCLRCY_{ion} + \sum_{i,o,f} CSCLDS_{iof} \times XCLDS_{iof} \\
& \quad + \sum_{i,n,s} CSRCYSP_{ins} \times XRCYSP_{ins} + \sum_{i,k,s,d} CSP_{iks} \times XSPDST_{iksd} \\
& \quad + \sum_{i,c} h_i \times INVP_{ic} \\
& \quad + \delta \times \left\{ \sum_{v,\hat{c},c} f_v \times Z_{v,\hat{c},c} \times DSCS_{\hat{c}} + \sum_{v,d,c} f_v \times (Z_{v1c} + Z_{vc1}) \times \beta_{vd} \times DS_{dc} \right\}
\end{aligned}$$

この第一目的関数式は費用であり、これを最小化する。第2行は配送車費用と供給業者とのコミュニケーション費用、第3行から第4行は各種センターの開設費用である。第5行から第7行は各種センターにおける製品の処理費用、第8行から第10行は各種センター間、センターと顧客間などの輸送費用と製品の購入費用である。第11行は顧客の在庫費用、第12行は配送車の温室効果ガスに関する費用である。

上述の定式化では、例えば、配送センターと回収センターのように、異なる施設には異なるパラメータと変数を割り当てている。このため、同様な特性をもつパラメータと変数であっても施設ごとに異なるものとして扱うことになり、多くの種類のパラメータと変数の定義が必要となる。

そこで、すべての施設と顧客に加えて製品の流れの始点と終点をノードで表し、ノード間の輸送経路をアークで表す。このようなノードとアークからなるネットワークを用いると、パラメータと変数をノードに関する費用と変数、およびアークに関する費用と

変数にまとめることができる。

コミュニケーション費用と開設費用はノードが使用されるときに限り一定額が生じる費用であるため、ノードに対する固定費用となる。製品の生産・処理費用や在庫費用は生産・処理量や在庫保管量に比例してノード上で発生する。しかし、これらの製品は必ず接続するアークを通るので、ノードから接続するアークに配分し直し、アークにおける変動費用とみなす。また、製品の輸送費用や購入費用は取扱量・購入量に比例することから、これらもアーク上の変動費用にまとめる。

したがって、配送車費用と温室効果ガスの項を除けば、Govindan モデルではノード選択をデザイン変数とし、フローを求めるネットワーク設計問題として捉えることができる。なお、配送車費用と温室効果ガスに対する費用は配送計画問題として扱うことができる。

配送計画問題を分離すると、ネットワークモデルを用いて目的関数は次のような式にまとめることができる。

$$\min \sum_n a_n y_n + \sum_{n,j,i} b_{nj}^i x_{nj}^i$$

ここで、 a_n はノード n を使用するとき発生する固定費用、 b_{nj}^i はアーク (n, j) を流れる品種 i の量に比例して発生する変動費用である。また、 y_n はノード n を使用するか否かを表す 0-1 変数、 x_{nj}^i はアーク (n, j) を流れる品種 i のフロー量を表す連続/整数変数である。

また、顧客への配送に関する費用は、次のような式にまとめることができる。

$$\sum_k d_k z_k + \sum_{l,m,k} g_{lm}^k v_{lm}^k$$

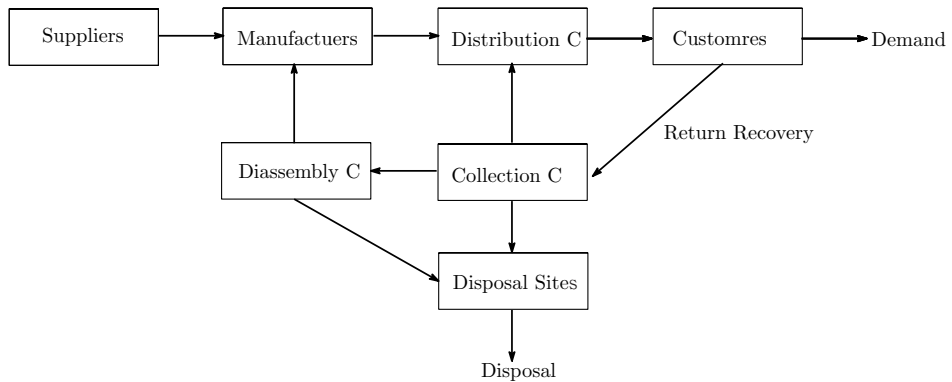


図 1 : Sample of Closed Loop Network

ここで、 d_k は配送車 k を使用するときの固定費用であり、 g_{lm}^k はアーク (l, m) 上の配送車 k が排出する温室効果ガスに関する費用である。また、 z_k は配送車 k を使用するか否かを表す 0-1 変数であり、 v_{lm}^k は配送車 k がアーク (l, m) を通るか否かを表す 0-1 変数である。

以上のように、ノードとアークからなるネットワークモデルに抽象化することにより、シンプルかつ汎用性の高いモデル化・定式化を行うことができる。対象とする事例に応じて、パラメータを適切に設定することによって、幅広い問題に適用することができる。

3 モデルと定式化

本論文で対象とする CLLND のモデルイメージの一例を図 1 に示す。これは、多品種の製品をまとめたイメージ図である。

施設としては、供給業者 (Suppliers)、生産工場 (Manufacturers)、配送センター (Distribution Centers)、回収センター (Collection Centers)、リサイクルセンター (Recycle Centers)、廃棄物処分場 (Disposal Sites) や顧客 (Customers) 等があり、それぞれ複数の候補が存在する。ここでは、顧客も候補として選択できるものとしておく。特定の製品が複数の供給業者から複数の生産工場、生産工場から複数の配送センター、配送センターから複数の顧客へなどと輸送される。顧客には製品ごとの需要 (Demand) が与えられているが、顧客に届いた製品のうち、製品・顧客ごとに一定の割合で返品され、返品された製品は回収センターに輸送される。

回収センターでは回収した製品を再生産し、一部の製品は配送センターやリサイクルセンターへ輸送され、残りは廃棄物処分場で処分される。リサイクルセンターでは製品を分解・リサイクルし、一部は生産工場へ輸送され、残りは処分される。図 1 は、クローズドループネットワークの一例であるが、センターの種類やそれらの間の経路が増減しても構わない。

CLLND 問題が一般的なネットワーク設計問題またはネットワークフロー問題と大きく異なる点を挙げておく。製品・顧客ごとの需要が与えられているが、顧客は受けとった製品の一部を所与の比率で返品し、これによりリバース物流が発生する。リバース物流における製品は、回収センターやリサイクルセンターなどいくつかの施設を経由し、再生、分解再生、廃棄等が行われ、所与の比率にしたがって、物流センター、生産工場等に輸送、または廃棄物処理場等に廃棄される。このように、施設や顧客上で所与の比率で後続の施設の種類が指定される。最終的に顧客の需要は満たされるが、生産された製品の一部は廃棄されるため、供給量・生産量と最終需要量は一致しない。また、製品である品種ごとの需要は始点・終点对に対する量として与えられるのではなく、製品を購入する顧客に対して与えられる。

生産工場、物流センターなど同一機能をもつ施設を同一グループに分類する。同一グループには、指定された製品・部品・材料が納入され、製品・部品・材料・廃棄物等に加工・処理され、これらが後続のグループに属する施設に供給・輸送・廃棄される。施設は、納入された製品・部品・材料等の処理能力の上限である容量をもつ。容量には、全取扱量に対する能力であるノード容量と同一グループから受け入れることができる製品・部品・材料等に対する処理能力であるグループ容量がある。

ノードは、実ノードとダミーノードで構成される。生産工場候補、配送センター候補、回収センター候補、リサイクルセンター候補、廃棄物処分場候補などの施設候補、供給業者候補および顧客候補等をノードとして表現し、これらを実ノードとする。一方、製品フローの発生や吸収を表すノードをダミーノードとする。ノード間の輸送経路候補等を向きのあるアークとして表現する。顧客・供給業者候補や各種施設を選択・利用・開設することをノードを使用すると表現する。なお、顧客も候補として選択・利用の有無があるものとして扱うが、顧客の需要を満たすモデルでは、顧客は必ず選択・利用される。

施設間、施設・顧客間で輸送することをアーク上をモノが流れるとし、モノの流れをフローと表現する。施設を選択・利用・開設するときに発生する様々な固定費用、例えば、土地費用、建屋費用、設備費用、人件費や運営費用などのうちの固定費用をノードの固定費用とする。また、施設間、施設・顧客間の輸送費用など実際にアーク上で発生する変動費用をアーク上の変動費用とする。供給業者、施設や顧客における処理量に比例して発生する生産・加工・処理・処分費用や返品費用などは、便宜上、取り扱いがアーク上で発生するとみなす。すなわち、ノードで取り扱われる製品等の取扱量をその製品等が輸送される後続のアークに配分し、これらのアークで発生する変動費用として取り扱う。このように表現することによって、固定費用はノードに関する費用、変動費用はアーク上のフローに関する費用に集約する。なお、このモデルではアーク上で固定費用が発生する場合の対応はしていないが、このような場合はアーク上の固定費用と変数を導入することにより定式化は可能である。

3.1 前提条件

前提条件を示す。

- 実ノードとダミーノードからなるノード集合が与えられる。
- ノード対の部分集合である向きをもつアーク集合が与えられる。
- グループ集合が与えられ、ノードはグループに分割される。
- 品種集合が与えられる。
- 品種に対して、ダミーノードである発生ノードおよび吸収ノードが与えられる。
- 顧客であるノードには、品種ごとの需要量が与えられる。

- ノードにはノード容量が与えられる。ノードを使用したときには、ノード容量までフローがノードを通過することができる。
- ノードには、グループに対するグループ容量が与えられる。ノードを使用したときには、グループ容量まで同一のグループからのフローがノードを通過することができる。
- 品種ごとに、ノードに入るフロー量に対して、単一のグループに含まれるノードへ出るフロー量の通過率が与えられている
- ノードを使用したときに、固定費用が発生する。
- アーク上を流れるフローに対して、フロー量に比例する変動費用が発生する。

3.2 問題と記号の定義

CLLND 問題では前述の前提条件のもとでネットワーク全体の固定費用と変動費用の合計を最小にするフローおよび使用するノードを求める。

定式化における使用する集合およびパラメータを示す。

- K : 品種集合
- G : グループ集合
- N : 実ノード集合
- O : 発生ノード集合
- D : 吸収ノード集合
- C^k : 品種 k の顧客集合
- A : アーク集合, $A \subset (N \cup O) \times (N \cup D) \setminus (C^k \times D)$
- N_n^+ : ノード n を終点とし, A に含まれるアークの始点であるノード集合
- N_n^- : ノード n を始点とし, A に含まれるアークの終点であるノード集合
- N_n^{g+} : ノード n を終点, グループ g に含まれるノードを始点とし, A に含まれるアークが存在するノード集合
- N_n^{g-} : ノード n を始点, グループ g に含まれるノードを終点とする A に含まれるアークが存在するノード集合
- c_{ij}^k : アーク (i, j) 上の品種 k のフローに対する単位当たりの変動費用
- f_i : ノード i を使用するときに発生する固定費用
- B_i : ノード i の容量
- E_i^g : ノード i におけるグループ g からのフローに対するグループ容量
- d_n^k : ノード n における品種 k の需要量

- α_n^{gk} : ノード n におけるグループ g に含まれるノード向けの品種 k のノード通過率 ($0 \leq \sum_{g \in G} \alpha_n^{gk} \leq 1$). ノードが顧客の場合は返品率, それ以外の場合は再生率

品種集合 K は製品の集合であり, 多品種を対象とする. グループ集合 G は供給業者, 生産工場, 配送センター, 収集センター, 再生センター, 廃棄処分場, 顧客等の同一機能をもつ施設を成分とする集合であり, 同一種類の施設は同一のグループ集合に含まれる. 実ノード集合 N は供給業者, 顧客と, 生産工場, 配送センター, 収集センター, 再生センター, 廃棄処分場等の施設で, 実在するものを表す. 発生ノード集合 O は製品の発生を表すダミーノード集合である. 各製品には一つの発生ノードがあり, 当該製品を扱う供給業者とアークで接続する. 吸収ノード集合 D は各製品の吸収を表すダミーノード集合である. 各製品には一つの吸収ノードがあり, 当該製品を購入する顧客, および廃棄処分場とアークで接続する. なお, 顧客と吸収ノードを接続するアークは返品を含まない需要, 廃棄処分場と吸収ノードを接続するアークは廃棄に対応する. 顧客集合 C^k は品種 k の顧客に対応するノード集合であり, 顧客集合の部分集合である. アーク集合 A は (発生ノード・実ノード) と (実ノード・吸収ノード) 間をつなぐものであり, 製品等が流れる経路である. ただし, 顧客と吸収ノード間のアークは A に含まれないことに注意する. ノード集合 N_n^+ は当該施設へ入る直送経路をもつ施設や発生ノードの集合であり, 当該ノードを終点とした A に含まれるアークの始点の集合である. ノード集合 N_n^- は当該施設から出る直送経路をもつ施設のノードと吸収ノードの集合であり, 当該ノードを始点とした A に含まれるアークの終点の集合であるが, 顧客と吸収ノード間のアークは含まない. ノード集合 N_n^{g+} は当該施設等へ直送する経路があり, 特定のグループに含まれる施設等のノード集合である. ノード集合 N_n^{g-} は当該施設等から直送する経路があり, 特定のグループに含まれる施設等のノード集合である. 変動費用 c_{ij}^k は輸送費用, 輸送元の施設における処理費用等であり, 処分場への輸送に対しては処分費用である. 固定費用 f_i は施設の開設・運営費用や製品の処理等に関する固定費用である. 容量 B_i は施設の処理能力である. グループ容量 E_i^g は特定の施設グループからの製品・部品・材料等に対する処理能力である. 需要量 d_n^k は製品ごとの顧客の需要量である.

定式化における使用する変数を示す.

- x_{ij}^k : アーク (i, j) 上を流れる品種 k のフロー量
- y_i : ノード i を使用するとき 1, そうでないとき 0 であるデザイン変数

図2のような対象となるモデルのイメージを用いて, いくつかのパラメータと変数等を説明する. 長方形は各種施設を表す実ノードであり, 丸は品種の発生ノード, 吸収ノードを表すダミーノードである. 破線で囲まれた範囲内にあるノードとアークは, そ

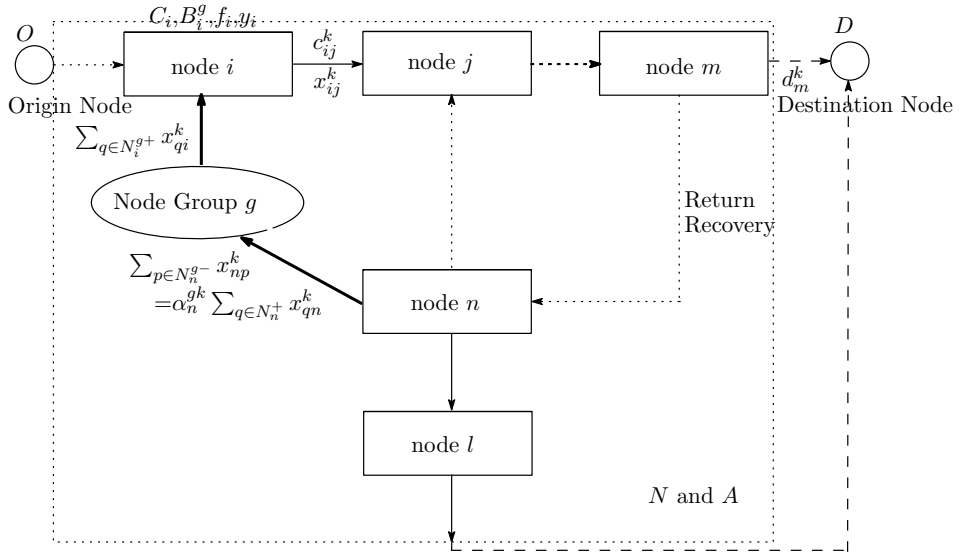


図 2 : Closed Loop Network Model for Commodity k

それぞれ実ノード集合 N およびアーク集合 A である。ネットワーク上の発生ノードと吸収ノードは N には含まれず、顧客であるノード m と吸収ノード間のアークは A に含まれない。実矢線はノード間のアークである、破矢線はアークまたはいくつかのノードを経由したパスを表す。太い矢線はノードとグループ間、グループとノード間のアーク集合を表す。ノード i には、容量 B_i 、グループ g に含まれるノードからのフローに対するグループ容量 E_i^g 、固定費用 f_i と変数 y_i が与えられる。アーク (i, j) には、品種 k に対する変動費用 c_{ij}^k と変数 x_{ij}^k が与えられる。顧客であるノード m に対しては、品種 k の需要 d_m^k が与えられる。

ノード n からグループ g に含まれるノードへ流出する品種 k のフロー量の合計は $\sum_{q \in N_n^+} x_{qn}^k$ であり、グループ g に含まれるノードへの流出量は流入量の通過率 α_n^{gk} 倍になることを表す。これらは、ノードを通過するフローに対して、流れる先のグループによって通過率や量が決まることを表す。また、グループ g に含まれるノードからノード i へ流入する品種 k のフロー量の合計は、 $\sum_{q \in N_i^{g+}} x_{qi}^k$ で表される。

4 モデルと定式化

ネットワークモデルによる定式化を示す。

$$\min \sum_{(i,j) \in A} \sum_{k \in K} c_{ij}^k x_{ij}^k + \sum_{i \in N} f_i y_i \quad (1)$$

subject to

$$\sum_{i \in N_n^+} x_{in}^k - \sum_{j \in N_n^-} x_{nj}^k = \begin{cases} d_n^k & \text{if } n \in C^k \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \forall n \in N, k \in K, \quad (2)$$

$$\sum_{j \in N_n^{g^-}} x_{nj}^k = \alpha_n^{gk} \sum_{i \in N_n^+} x_{in}^k \quad \forall g \in G, n \in N, k \in K, \quad (3)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in N_i^-} x_{ij}^k \leq B_i y_i \quad \forall i \in N, \quad (4)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{n \in N_i^{g^+}} x_{ni}^k \leq E_i^g y_i \quad \forall g \in G, i \in N \quad (5)$$

$$\sum_{j \in N_i^-} x_{ij}^k \leq \sum_{n \in C^k} d_n^k y_i \quad \forall k \in K, i \in N, \quad (6)$$

$$x_{ij}^k \geq 0 \quad \forall k \in K, (i, j) \in A, \quad (7)$$

$$y_i \in \{0, 1\} \quad \forall i \in N. \quad (8)$$

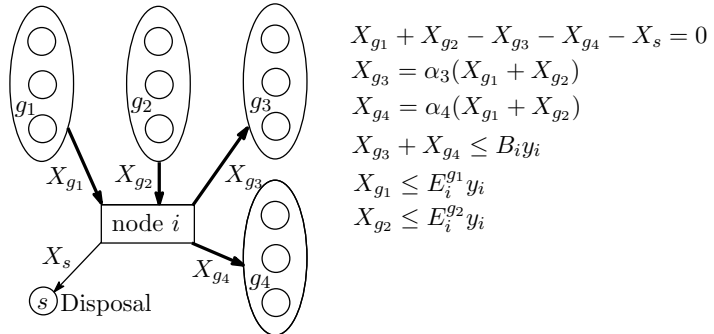


図 3 : Flows and Constraints at Node

(1)式は総費用を表す目的関数である。第一項はアークに関する変動費用であり、第二項はノードに関する固定費用である。(2)式はフロー保存式である。一般の多品種のネットワーク問題では、右辺に発生ノードに対する需要量があるが、このモデルにはない。これは、発生ノードから発生するフロー量および吸収ノードで吸収されるフロー量が定数ではなく変数となり、これらは左辺に含まれるためである。ここで、 N には発生ノードと吸収ノードが含まれていないことに注意する。(3)式は各グループの通過率を含むフロー保存式である。グループに対する通過率はグループに含まれる施設への返品率や再生率などを表しており、顧客における購入率および廃棄処理場等における廃棄率は $1 - \sum_{g \in G} \alpha_n^{gh}$ で表される。(4)式は、ノード i における容量制約式である。ここでは、ノードの内での処理量は流出量を用いて表す。(5)式は、同一のグループに含まれるノードからのフローの容量制約式である。同一のグループに含まれるノードからの処理量はノードへの流入量を用いて表す。(6)式は、一般に強制制約式とよばれる式である。同一の品種に対して、ノードが使用されたときのみ、その品種のフローの上限が品種の需要量になることを表す。(7)式は変数の非負条件、(8)式は変数の 0-1 条件である。

ここで、顧客 i が確定した需要をもつ場合は $y_i = 1$ が自明な解となるが、一般化するために変数としている。

5 制約式の例

いくつかの図を用いて、定式化における制約条件式を説明する。

図3は、フロー保存式である(2)式と(3)式、容量制約式である(4)式と(5)式の例である。 X_g は、ノードグループ g に含まれるノードからのフロー量の合計である。 $X_{g_1} + X_{g_2} - X_{g_3} - X_{g_4} - X_s = 0$ は、ノード i に対してグループ g_1 と g_2 に含まれるノードから流入するフロー量と、グループ g_3 、 g_4 に含まれるノードと廃棄ノード s への流出量が等しいことを表す。 $X_{g_3} = \alpha_3(X_{g_1} + X_{g_2})$ は、ノード i からグループ g_3 に含まれるノード

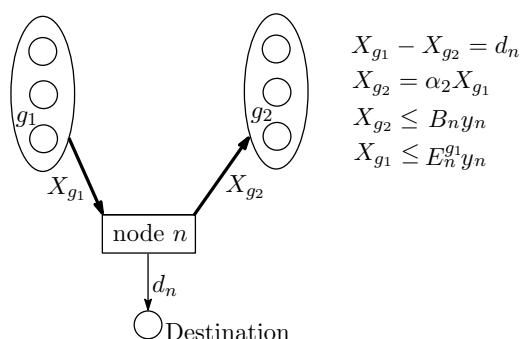


図4 : Flows and Constraints at Customer Node

ドへの流出量がグループ g_1 と g_2 に含まれるノードからの流入量の α_3 倍となることを表す。 $X_{g_4} = \alpha_4(X_{g_1} + X_{g_2})$ は、ノード i からグループ g_4 に含まれるノードへの流出量がグループ g_1 と g_2 に含まれるノードからの流入量の α_4 倍となることを表す。 $X_{g_3} + X_{g_4} \leq B_i y_i$ は、グループ g_3 と g_4 に含まれるノードへの流出量がノード i の容量 $B_i y_i$ 以下であることを表す。 $X_{g_1} \leq E_i^{g_1} y_i$ は、グループ g_1 に含まれるノードからのノード i への流入量がグループ g_1 のグループ容量 $E_i^{g_1} y_i$ 以下であることを表す。 $X_{g_2} \leq E_i^{g_2} y_i$ は、グループ g_2 に含まれるノードからのノード i への流入量がグループ g_2 のグループ容量 $E_i^{g_2} y_i$ 以下であることを表す。

図4は、顧客であるノード n におけるフロー保存式と容量制約式の例である。 $X_{g_1} - X_{g_2} = d_n$ は、ノード n に対してグループ g_1 に含まれるノードからの流入量とグループ g_2 に含まれるノードからの流入量の差が需要量となることを表す。 $X_{g_2} = \alpha_2 X_{g_1}$ は、グループ g_2 に含まれるノードへの流出量がグループ g_1 に含まれるノードからの流入量の α_2 倍となることを表す。ここで、 α_2 は返品率となる。 $X_{g_2} \leq B_n y_n$ は、グループ g_2 に含まれるノードへの流出量がノード n の容量 $B_n y_n$ 以下であることを表す。 $X_{g_1} \leq E_n^{g_1} y_n$ は、グループ g_1 に含まれるノードからの流入量がグループ g_1 のグループ容量 $E_n^{g_1} y_n$ 以下であることを表す。

6 おわりに

本研究では、CLLND問題を対象とし、できる限り多様な問題に対応が可能なような抽象化した数理モデルおよび定式化を示した。第一節でも示したように、CLLND問題には幅広い応用とそれに伴うモデルの拡張が行われている。主なものとして、次のような拡張がある。

- 多期間
- 多目的
- 在庫
- 不確実性
- シナリオ
- 配送経路
- 温暖化ガス

本研究で提案した定式化は、これらのすべての拡張モデルに問題なく使用することができる。

従来の多くの研究では個々に異なる事例を想定した異なる前提に基づいた定式化が行われてきたが、対象となるモデルが複雑化するにつれて、定式化における変数、パラメータや制約式が膨大なものとなっていた。本研究では、CLLND問題を対象とし、で

きる限り多様な問題に対応が可能なような抽象化した数理モデルおよび定式化を示した。拡張モデルを開発・提案する際には、モデル・事例・データ・パラメータを区別し、モデルは普遍性があり、広い範囲に適用できるように表現することが、本来、望ましいものとする。

本研究は科学研究費基盤研究 C（課題番号17K01268）による成果の一部である。

参考文献

- Ahi, P., C. Searcy. 2013. A comparative literature analysis of definitions for green and sustainable supply chain management. *Journal of Cleaner Production* 52 329–341.
- Amin, S.H., G. Zhang. 2012. An integrated model for closed-loop supply chain configuration and supplier selection: multi-objective approach. *Expert Systems with Applications* 39(8) 6782–6791.
- Amin, S.H., G. Zhang. 2013. A multi-objective facility location model for closed-loop supply chain network under uncertain demand and return. *Applied Mathematical Modelling* 37(6) 4165–4176.
- Ansari, Z., R. Kant. 2017. A state-of-art literature review reflecting 15 years of focus on sustainable supply chain management. *Journal of Cleaner Production* 142 2524–2543.
- Ashby, A., M. Leat, M.Hudson-Smith. 2012. Making connections: a review of supply chain management and sustainability literatures. *Supply Chain Management: An International Journal* 17(5) 497–516.
- Brandenburg, M., K. Govindan, J. Sarkis, S. Seuring. 2014. Quantitative models for sustainable supply chain management: developments and directions. *European Journal of Operational Research* 233(2) 299–312.
- Carter, C.R., P.L. Easton. 2011. Sustainable supply chain management: evolution and future directions. *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management* 41(1) 46–6.
- Chen, Y.W., L.C. Wang, A. Wang, T.L. Chen. 2017. A particle swarm approach for optimizing a multi-stage closed loop supply chain for the solar cell industry. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 43 111–123.
- Eskandarpour, M., P. Dejax, J. Miemczyk, O. Peton. 2015. Sustainable supply chain network design: an optimization-oriented review. *Omega* 54 11–32.
- Fang, X., Y. Du, Y. Qiu. 2017. Reducing carbon emissions in a closed-loop production routing problem with simultaneous pickups and deliveries under carbon cap-and-trade. *Sustainability* 9(12) 2198.
- Fleischmann, M., P. Beullens, J.M. Bloemhof-Ruwaard, L.N. Wassenhove. 2001. The impact of

- product recovery on logistics network design. *Production and Operations Management* **10** (2) 156–173.
- Gold, S., S. Seuring, P. Beske. 2010. Sustainable supply chain management and interorganizational resources: a literature review. *Corporate Social Responsibility and Environmental Management* **17**(4) 230–245.
- Govindan, K., M. Fattahi, E. Keyvanshokoo. 2017. Supply chain network design under uncertainty: A comprehensive review and future research directions. *European Journal of Operational Research* **263**(1) 108–141.
- Govindan, K., A. Noorul Haq, M. Devika. 2009. Analysis of closed loop supply chain using genetic algorithm and particle swarm optimisation. *International Journal of Production Research* **47**(5) 1175–1200.
- Govindan, K., H. Mina, A. Esmaeili, S. M. Gholami-Zanjani. 2020. An integrated hybrid approach for circular supplier selection and closed loop supply chain network design under uncertainty. *Journal of Cleaner Production* **242**.
- Govindan, K., P. Sasikumar, K. Devika. 2010. A genetic algorithm approach for solving a closed loop supply chain model: a case of battery recycling. *Applied Mathematical Modelling* **34** (3) 655–670.
- Govindan, K., H. Soleimani. 2017. A review of reverse logistics and closed-loop supply chains: A journal of Cleaner Production focus. *Journal of Cleaner Production* **142**(1) 371–384.
- Guo, H., C. Li, Y. Zhang, C. Zhang, Y. Wang. 2018. A nonlinear integer programming model for integrated location, inventory, and routing decisions in a closed-loop supply chain. *Complexity* **2018** 17.
- Islam, M. T., N. Huda. 2018. Reverse logistics and closed-loop supply chain of waste electrical and electronic equipment (WEEE) /E-waste: A comprehensive literature review. *Resources, Conservation and Recycling* **137** 48–75.
- JETRO. 2018. 米国における電子商取引市場調査. Tech. rep., 日本貿易振興機構ニューヨーク事務所.
- Kazemi, N., N. M. Modak, K. Govindanc. 2019. A review of reverse logistics and closed loop supply chain management studies published in IJPR: a bibliometric and content analysis. *Journal International Journal of Production Research* **57**(15-16) 4937–4960.
- Memari, A., A. Rahim, R. Ahmad, A. Hassan. 2016. A literature review on green supply chain modelling for optimising CO2 emission. *International Journal of Operational Research* **26** (4) 509–525.
- Pati, R.K., P. Vrat, P. Kumar. 2008. A goal programming model for paper recycling system. *Omega* **36**(3) 405–417.

- Pishvae, M.S., S.A. Torabi. 2010. A possibilistic programming approach for closed-loop supply chain network design under uncertainty. *Fuzzy Sets and Systems* **161**(20) 2668–2683.
- Rachih, H., F.Z. Mhada, R. Chiheb. 2019. Meta-heuristics for reverse logistics: A literature review and perspectives. *Computers & Industrial Engineering* **127** 45–62.
- Rajeev, A., R. Pati, S. Rupesh, K. Govindan. 2017. Evolution of sustainability in supply chain management: A literature review. *Journal of Cleaner Production* **162** 299–314.
- Sadeghi, A., H. Mina, N. Bahrami. 2019. A mixed integer linear programming model for designing a green closed-loop supply chain network considering location routing problem. *International Journal of Logistics Systems and Management* in Press.
- Sahebjamnia, N., A.M.F. Fard, M. Hajiaghahi-Keshteli. 2018. Sustainable tire closed-loop supply chain network design: hybrid metaheuristic algorithms for large-scale networks. *Journal of Cleaner Production* **196** 273–296.
- Seuring, S., M. Muller. 2008. From a literature review to a conceptual framework for sustainable supply chain management. *Journal of Cleaner Production* **16**(15) 1699–1710.
- Sharma, V. K., P. Chandna, A. Bhardwaj. 2017. Green supply chain management related performance indicators in agro industry: A review. *Journal of Cleaner Production* **141** 1194–1208.
- Shi, J., G. Zhang, J. Sha. 2011. Optimal production planning for a multi-product closed loop system with uncertain demand and return. *Computers & Operations Research* **38**(3) 641–650.
- Soleimani, H., K. Govindan, H. Saghafi, H. Jafari. 2017. Fuzzy multi-objective sustainable and green closed-loop supply chain network design. *Computers & Industrial Engineering* **109** 191–203.
- Touboulic, A., H. Walker. 2015. Theories in sustainable supply chain management: a structured literature review. *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management* **45**(1/2) 16–42.
- Tsenga, M., S. Islam, N Karia, F. Fauzib, S Afrin. 2019. A literature review on green supply chain management: Trends and future challenges. *Resources, Conservation and Recycling* **141** 145–162.
- Waltho, C., S. Elhedhli, F. Gzara. 2019. Green supply chain network design: A review focused on policy adoption and emission quantification. *International Journal of Production Economics* **208** 305–318.
- Winter, M., A.M. Knemeyer. 2013. Exploring the integration of sustainability and supply chain management: current state and opportunities for future inquiry. *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management* **43**(1) 18–38.