

令和 3 年 8 月 18 日現在

機関番号：32102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K01268

研究課題名(和文)統合的循環型サプライチェーンネットワーク設計問題の解析システムの開発

研究課題名(英文)Development of Analysis System for Integrated Closed-Loop Supply Chain Network Design Problems

研究代表者

片山 直登 (Katayama, Naoto)

流通経済大学・流通情報学部・教授

研究者番号：20194780

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：ネットワーク設計問題とは、ノードとアークからなるネットワーク構造とネットワーク上を流れるフローの経路を決定する問題である。物流・サプライチェーンネットワークでは、施設、輸送経路や配送経路、荷物や商品の流れを決定する。本研究では、物流・サプライチェーンネットワークにおいて、現実的な様々な条件(離散条件、木条件、資源バランス条件、区分条件など)および回収/再生産/廃棄などのフロー循環条件を考慮したネットワーク設計問題のモデルとその解法を開発する。

研究成果の学術的意義や社会的意義

今日まで、様々なネットワーク設計モデルとその解法が開発されてきた。多くの解法が提案され、解の精度が高まる一方で、解法の困難さや計算時間の増大の点から基本的な条件を考慮することができていなかった。また、回収や再生などを対象とした循環型モデルでは、個々の事例に合わせた複雑なモデルが提案されてきたが、一般化した包括モデルが必要となってきた。本研究では、新たな必要不可欠な条件をもつモデルと一般化した循環型モデルを開発した。

研究成果の概要(英文)：The network design model is the problem of determining the network structure consisting of nodes and arcs and the paths of flows flowing over the network. For the logistics/supply chain network, we must evaluate facilities, transportation routes, delivery routes, and goods flows. This research developed the models and the solution methods for the logistics/supply chain network models considering flow circulation conditions such as collection/reproduction/disposal flows and considering various realistic constraints such as discrete/integer, in-tree, resource balance, piecewise, etc.

研究分野：ネットワーク設計

キーワード：ネットワーク設計 ネットワークフロー 最適化 数理計画

1. 研究開始当初の背景

オンライン化の進展により、配送・輸送ネットワーク上の取扱量は増加の一途をたどり、現在のシステムでは取扱量が限界に達しており、現状の資源の活用と適切な設備投資による配送・輸送ネットワークの再編が急務である。

一方、世界的な環境問題への意識の高まりにより、環境破壊や資源枯渇を回避する持続可能な循環型社会の形成を目指す流れがある。個々の企業においても、製品の回収・リサイクルが求められるようになり、従来の動脈部中心のサプライチェーンに加え、リバース部の物流施設・設備・管理等の充実が課題となってきた。

このように、資源の有効活用面および環境面などから循環型のサプライチェーンネットワークのより効率的な設計が必要となっている。今日まで、多くのサプライチェーンネットワーク設計の研究が行われてきており、特に近年では無数の循環を考慮したネットワーク設計に対する研究が行われてきている。循環型ネットワーク設計では、事例問題の多様性から個々の事例のみに特有な条件や前提が多いため、個々の事例のみに対応できるモデルや解法が提案されてきた。その一方で、普遍的で幅広い事例に対応できるモデルや解法の研究が必ずしも行われてきていなかった。

2. 研究の目的

本研究では、従来のネットワーク設計モデルをもとに、様々な現実的な条件を付加したネットワーク設計モデルを開発する。さらに、現実的な条件を付加したネットワーク設計モデルに循環型フローおよび処理施設をモデルに加え、一般化された統合的な循環型ネットワーク設計モデルを開発する。

3. 研究方法

循環型ネットワーク設計モデルを確立するために、基本モデルに関連した条件を付加したモデルを開発および解法する。

循環型ネットワーク設計モデルは大規模なモデルとなることが考えられるため、大規模な基本モデルに対する高速な近似解法を開発する。

サービスのバランス条件は、配送車などの資源の一定期間内のスケジュール・循環を考慮した条件であり、資源のバランス式で表される。条件が付加されると初期の実行可能解の探索が必要となるため、実行可能解の探索を含めた近似解法を開発する。

区分的線形費用および整数資源条件は、配送車などの規模の経済性や複数台数を考慮したものである。多くの0-1変数が必要となり、また凹関数的な問題となる。このため、これらに対応した近似解法を開発する。

シングルパス条件および入木条件は、同一始点・終点間のフローは経路途中で分割されないこと、同一終点のフローは経路途中で分割されないことを表す条件である。これらの条件を考慮した問題ではフロー変数が0-1変数となるなどのため問題の困難性が増加し、また容量を満たす実行可能解の探索が困難になる。このため、これらに対応した近似解法を開発する。

循環型ネットワーク設計問題についてはきわめて多くの研究がなされているが、個々に異なる事例を想定し、異なる前提や条件を付加した研究ごとに異なる定式化がなされている。しかし、大半の条件や前提は統一的な条件やネットワークモデルとして集約することが可能である。そこで、多様な条件や前提を単一のネットワークモデルにまとめた統合的な循環型ネットワーク設計モデルを開発する。

4. 研究成果

(1) 容量制約をもつネットワーク設計問題

容量制約をもつネットワーク設計問題は、容量をもつアークとノードからなるネットワークと、ネットワーク上を流れる多品種の需要量が与えられたときに、アークに関する固定費用と品種に関する変動費用の合計が最小となるアークを選択し、各品種のフローの経路を求める問題である。これは、輸送・配送ネットワークの設計や通信ネットワークの設計など、幅広い分野で応用されている問題である。

中規模問題に適用可能な高速近似解法を開発した。提案した解法は、容量スケールリング法と貪欲解法であるリンク再経路法を組み合わせた解法である。ベンチマーク問題であるC問題およびR問題を用いた数値実験を行い、従来の解法と比べて高速で有効な近似解を算出できることを示した。

また、大規模問題に適用可能となるモデルと解法を開発した。提案した解法は、容量スケールリング法とMIP近傍探索法を組み合わせた近似解法を基本とし、容量スケールリング法と列生成法の高速度アルゴリズム、問題サイズの縮小化アルゴリズムを組み込んだものである。大規模ベンチマーク問題であるGT問題を用いた数値実験を行い、提案した解法が大規模な問題に対して有効な近似解を算出できることを示した。

(2) サービスネットワーク設計問題

サービスネットワーク設計問題は、サプライチェーンネットワークや輸送ネットワーク上に様々な資源を割り当てる問題である。資源は輸送車両やドライバーなどを表している。この問題は輸

送システムの運用の際に発生し、多期間における資源のバランスを保つネットワーク設計問題となる。

この問題に対して、列生成を用いたモデルの定式化を提案し、優れた近似解に含まれる可能性が高いアークを選定するための容量スケールリング法と解を改善するための MIP 近傍探索法を組み合わせた解法を開発した。初期実行可能解は、容量スケールリング法により得られたアーク集合に対して設計バランス問題を解くことにより生成した。実行可能解は MIP 近傍探索法によって改善した。

ベンチマーク問題である C 問題および R 問題を用いた数値実験を行い、提案した解法が妥当な計算時間内に高品質の解を生成できることを明らかにした。

(3) 区分的線形費用と階段状費用をもつネットワーク設計問題

区分的線形費用をもつネットワーク設計問題は、配送車両や輸送機関などのタイプの異なる資源に対応する費用である区分的線形費用を最小化するネットワークフロー/設計問題である。階段状費用をもつネットワーク設計問題は、アークは複数の資源とその固定費用をもつが、変動費用は考慮しないネットワークフロー/設計問題である。これらの問題に対して、パスフローによる定式化とアークフローによる定式化を提示し、容量スケールリング法、列・行生成法、制限付き分岐限定法と局所分枝法または MIP 近傍探索法を組み合わせた解法を開発した。列に対する被約費用を定義して、この被約費用を用いた効率的な新たな列生成法を開発した。

ベンチマーク問題である C および R 問題を用いて、モデルと解法の有効性を測定した。得られた数値結果は有効なものであり、すべてのインスタンスに対して優れた近似解または最適解を算出することができた。

(4) 整数資源を考慮したネットワーク設計問題

ネットワークにおける資源(輸送車両)数が整数であるネットワーク設計問題に対して、二種類のラグランジュ緩和法と MIP 近傍探索法を用いた近似解法を開発した。

ラグランジュ緩和法では、フロー保存式のラグランジュ緩和と接続式のラグランジュ緩和による緩和問題を示し、それぞれの緩和問題に対する解法を提案した。ベンチマーク問題を用いて、提案したラグランジュ緩和法による近似解法に対する数値実験を行った。強い定式化の線形緩和問題とラグランジュ緩和問題による下界値はほぼ一致し、緩和問題によって計算時間の特性が大きく異なることを明らかにした。

また、新たな定式化における被約費用を定義して、これを用いた効率的な整数資源問題に対するパス生成法と資源フロー生成法を用いた近似解法を開発した。初期実行可能解を見つけるための計算時間を短縮した容量スケールリングと解を改善するための MIP 近傍探索法を提案した。ベンチマーク問題に対して最適化ソルバーとの比較を行い、提案した解法は最適化ソルバーと同等または優れた近似解を相対的に短時間で算出することができた。

(5) 入木条件を考慮したネットワーク設計モデル

入木条件は、同一の終点をもつ需要のフローがこの終点を根とする入木を形成することを表している。現実の物流ネットワークでは、同一の着地をもつ荷物は途中の施設で分離されることがなく同一の後続の施設宛に出荷され、このような入木となることが一般的である。

入木条件を考慮した容量制約をもつネットワーク設計問題モデルに対するアークフローおよびパスフローを用いた定式化を示し、この定式化に対してパスフローに対する列生成法と容量スケールリング法が適用可能であることを示し、限定した分岐限定法と MIP 近傍探索法を組み合わせた解法を開発した。ベンチマーク問題である C 問題および R 問題に対して、数値実験を行い、最適化ソルバーによる解との比較を行った。C 問題では最適化ソルバーを用いて解く場合よりも優れた解を算出することができ、R 問題では一部のインスタンスを除けば最適化ソルバーを用いて長時間解く場合と同等の解を算出することができた。

また、入木条件を考慮したネットワーク設計問題に対して入木変数を用いた新たな定式化を示し、その線形緩和問題における三種類の入木生成方法を提案した。強制制約式を含まない弱い定式化に対しては、最短経路問題を解くことによる入木生成法を示した。強い定式化に対しては、線形緩和問題を用いたヒューリスティックアルゴリズムを示した。さらに、新たな入木フローに対する妥当不等式を提案し、切除平面に対する双対上昇法を示した。

(6) 循環型ネットワーク設計問題

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/リバースサプライチェーンとよばれる。さらに、通常の物流であるフォワード(動脈)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ネットワーク設計または循環型ネットワーク設計とよばれる。

これまで多くの循環型ネットワーク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

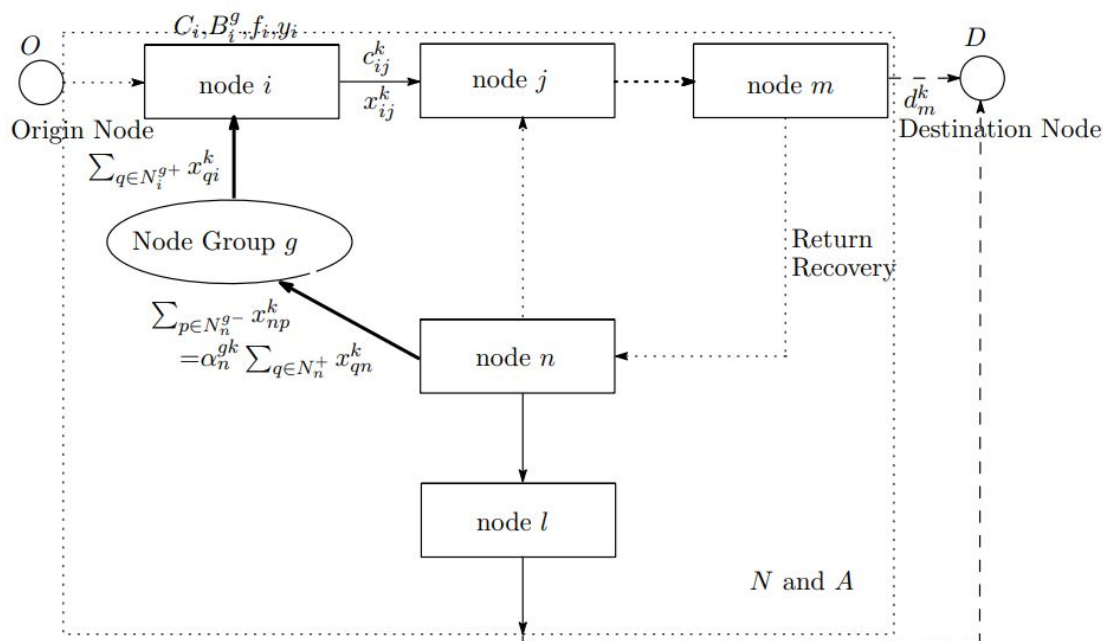


図 Closed Loop Network Model for Commodity k

基づく異なる定式化がなされており，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きたため，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．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望ましい．

施設候補が与えられ，施設は同一機能をもつグループに分類される．施設候補は全取扱量に対する処理能力であるノード容量と同グループからの処理能力であるグループ容量をもつ．ノードは施設候補である実ノードとフローの発生・吸収点であるダミーノードで構成される．アークは，輸送経路候補である．施設候補は固定費用，アークは変動費用をもつ．

定式化は，固定費用と変動費用からなる目的関数，需要が変数であるフロー保存式，グループ通過率を含むフロー保存式，ノード容量制約式，同グループからのフローの容量制約式，強制制約式などで構成される．循環型モデルのイメージ図を示す．

循環型ネットワークを対象とし，可能な限り多様な問題に柔軟に対応が可能である抽象化数理モデルおよび定式化を開発した．提案した抽象化数理モデルおよび定式化は，容易に様々な拡張モデルに問題なく使用することができる．

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計16件（うち査読付論文 4件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 12件）

1. 著者名 片山 直登	4. 巻 25(2)
2. 論文標題 入木条件を考慮したネットワーク設計モデルのMIP近傍探索法	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 流通経済大学流通情報学部紀要	6. 最初と最後の頁 7,28
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 片山 直登	4. 巻 25(2)
2. 論文標題 入木条件を考慮したネットワーク設計問題に対する入木生成法	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 流通経済大学流通情報学部紀要	6. 最初と最後の頁 29,42
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 片山 直登	4. 巻 25(1)
2. 論文標題 整数アセットを考慮したネットワーク設計問題のラグランジュ緩和	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 流通経済大学流通情報学部紀要	6. 最初と最後の頁 1,30
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 片山 直登	4. 巻 25(1)
2. 論文標題 整数アセットを考慮したネットワーク設計問題の近似解法	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 流通経済大学流通情報学部紀要	6. 最初と最後の頁 31,60
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 片山 直登	4. 巻 24(2)
2. 論文標題 整数アセット・アセットバランス・非分割・入木・ホップ数を考慮したネットワーク設計モデル	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 流通経済大学流通情報学部紀要	6. 最初と最後の頁 1,32
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 片山 直登	4. 巻 24(2)
2. 論文標題 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	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 流通経済大学流通情報学部紀要	6. 最初と最後の頁 33,50
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Katayama Naoto	4. 巻 37(3)
2. 論文標題 MIP Neighborhood Search Heuristics for a Capacitated Fixed-Charge Network Design Problem	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Asia-Pacific Journal of Operational Research	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1142/S0217595920500098	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Katayama Naoto	4. 巻 26(4)
2. 論文標題 MIP neighborhood search heuristics for a service network design problem with design-balanced requirements	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Heuristics	6. 最初と最後の頁 475,502
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10732-020-09437-x	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 片山 直登	4. 巻 24(1)
2. 論文標題 区分的線形費用と階段状費用を考慮した多品種流ネットワークフロー問題の近似解法	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 流通経済大学流通情報学部紀要	6. 最初と最後の頁 1,28
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Naoto Katayama	4. 巻 70(11)
2. 論文標題 A Combined Fast Greedy Heuristic for the Capacitated Multicommodity Network Design Problem	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of the Operational Research Society	6. 最初と最後の頁 1983,1996
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/01605682.2018.1500977	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 片山 直登	4. 巻 23(1)
2. 論文標題 シングルパスとデザインバランスを考慮したサービスネットワーク設計問題の近傍探索法	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 流通経済大学流通情報学部紀要	6. 最初と最後の頁 1,22
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 片山 直登	4. 巻 22(2)
2. 論文標題 非分割フローを考慮した容量制約をもつネットワーク設計のMIP近傍探索法	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 流通経済大学流通情報学部紀要	6. 最初と最後の頁 17,31
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 片山 直登	4. 巻 22(2)
2. 論文標題 アセットバランスを考慮したサービスネットワーク設計問題のMIP近傍探索法	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 流通経済大学流通情報学部紀要	6. 最初と最後の頁 1,16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 片山 直登	4. 巻 22(1)
2. 論文標題 容量制約をもつネットワーク設計問題に対するMIP近傍探索法	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 流通経済大学流通情報学部紀要	6. 最初と最後の頁 1,18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 片山 直登	4. 巻 22(1)
2. 論文標題 容量制約をもつネットワーク設計の大規模問題に対する近似解法	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 流通経済大学流通情報学部紀要	6. 最初と最後の頁 19,34
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Naoto Katayama	4. 巻 34(6)
2. 論文標題 A Combined Matheuristic for the Piecewise Linear Multicommodity Network Flow Problem	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Asia-Pacific Journal of Operational Research	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1142/S0217595917500336	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 片山 直登
2. 発表標題 大規模な容量制約をもつネットワーク設計問題の近似解法
3. 学会等名 日本ロジスティクスシステム学会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

流通経済大学 片山研究室 https://www2.rku.ac.jp/katayama/ KATAYAMA LAB https://www2.rku.ac.jp/katayama/index.htm
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	百合本 茂 (Yurimoto Shigeru) (90129015)	流通経済大学・流通情報学部・教授 (32102)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------