

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 15 日現在

機関番号：32102

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21510155

研究課題名（和文） 環境を考慮した統合的サプライチェーンネットワーク設計問題の実用モデルと解法の開発

研究課題名（英文） DEVELOPMENT OF INTEGRATED SUPPLY CHAIN NETWORK DESIGN PRACTICAL MODELS AND ANALYSIS SYSTEMS CONSIDERING ENVIRONMENTS

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

研究成果の概要（和文）：

サプライチェーン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の形状と多品種の輸送経路を求める問題である。本研究では、サプライチェーンネットワーク設計問題の中で、環境を考慮するような非線形関数を含む複数のネットワーク設計問題を対象とし、これらの設計問題に対するモデルを提案し、従来の研究と比較して精度の高い解を算出し、かつ計算時間を大幅に抑えることのできる近似解法群を開発した。

研究成果の概要（英文）：

A supply chain network design problem is the problem to find a network configuration and transportation paths for multi-commodities. In this study, several supply chain network design problems including non-linear functions to aim at environment issues are considered, and new models and new solution algorithms for the problems are developed. Our methods for capacitated, asset balanced and piecewise linear versions can be obtained better or best solutions and not increase computing time for the benchmark problems in comparison with previous researches.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	700,000	210,000	910,000
2010 年度	500,000	150,000	650,000
2011 年度	500,000	150,000	650,000
総計	1,700,000	510,000	2,210,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学，社会システム工学・安全システム

キーワード：ロジスティクス，ネットワーク設計，最適化モデル

1. 研究開始当初の背景

1980 年代以降の貿易摩擦や円高の影響を受けて、多くの企業は生産拠点を海外に移転し、さらに中国や東南アジア諸国の経済発展とともに市場の中心も海外にシフトし、ロジスティクスは地球規模で調達、生産、輸送、

販売を行うグローバルロジスティクスに進展してきている。このように、ロジスティクスはその規模を拡大し、サプライチェーンネットワークを最適に設計することが企業の最重要課題となっている。一方、2005 年に京都議定書が発効し、企業は地球温暖化ガス

の排出量を削減することが、費用削減とともに大きな目標となっている。

今日まで、多くの企業が生産拠点や物流拠点など拠点単独でのコスト削減や効率化に取り組んできた。しかし、欧州発の通貨危機の急激な拡大により、サプライチェーンネットワークの構造全体を通じた大幅な再編を行うことが急務となっている。

今日まで、多くのサプライチェーンネットワーク設計問題のモデルと解法が開発され、数多くの企業に適用されてきており、大きな成果を挙げてきている。しかし、近年では、グローバル化による大規模かつ環境を考慮できるサプライチェーンネットワークに適用できるモデルと高速で精度の高い解析システムの開発が望まれている。

2. 研究の目的

サプライチェーン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の形状と多品種のモノを輸送する経路などを求める問題である。本研究で対象とする問題は、多品種を考慮したサプライチェーンネットワーク設計問題であるアークに容量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、アセットバランスを考慮したネットワーク設計問題、非線形費用をもつサプライチェーンネットワーク設計問題、区分的線形費用サプライチェーンネットワーク設計問題、統合型グローバルサプライチェーンネットワーク設計問題である。これらの問題は数理面から最適に解くことが困難である NP 困難な問題のグループに属しているため、実用規模の問題に対する一般的、効率的な最適解法は存在していない。本研究では、限られた計算時間内で、より精度の高い解を算出するためのモデルおよび解法の開発を行なう。

3. 研究の方法

本研究で開発した解法は、一般的にはメタ解法とよばれる解法のグループに属するものであり、複数の近似解法と MIP ソルバーを組み合わせることによって、効率的な近似解を生成するものである。

容量スケールリング法は、容量制約をもつ問題に対する近似解法である。この手法は、その緩和問題を繰返し解き、緩和解を用いて容量を逐次変化させ、0-1 解を導く方法である。強い制約式を含む定式化を用いた場合、容量スケールリング法は良い近似解を生成することが知られている。

局所分枝法は、ある近似解の近傍に探索範囲を限定するという制約を付加した問題を繰返し解く近似解法である。一般的な変数固定法とは異なり、自由度が高く、近傍の最良解を効率的に探索することができる。

列生成法は、変数が多い最適化問題に対する解法である。限定された変数から始め、適時、被約費用が負であるような変数を生成することにより、すべての変数を列挙せずに最適解を効率的に得ることができる。

行生成法は、制約式が多い最適化問題に対する解法である。限定された制約式から始め、適時、列生成法により変数が生成されたときに、関連する制約を生成し、付加することにより問題の規模を縮小することができる。

切除平面法は、制約式が多い最適化問題に対する解法である。限定された制約式から始め、適時、緩和問題を満たさない制約式を生成し、付加することにより最適解を効率的に得ることができる。

MIP ソルバーは、一般的な数理計画問題を解くためのソフトウェアである。近年、その性能は向上し、組合せ問題であっても小規模であれば最適に解くことが可能となり、線形計画問題であれば数十万変数の大規模な問題であっても適切な時間で最適解を求めることができるようになってきている。

本研究では、いくつかのサプライチェーンネットワーク設計問題モデルを提案し、複数の近似解法と MIP ソルバーを組合せた解法を開発し、従来の研究による解法との比較を行なう。

4. 研究成果

(1) アークに容量をもつネットワーク設計問題に対する近似解法の開発

容量をもつネットワーク設計問題は、処理能力の制限をもつアークの選択を扱う設計問題である。ネットワーク設計問題の中でも最適に解くことが困難な問題であり、現在でも新たな解法が開発されている問題である。

本研究ではパスフロー変数を用いたモデルとアークフロー変数を用いたモデルを用い、それぞれに対する解法を開発した。

① パスフロー変数を用いたモデル

パスフロー変数の数は指数個あり、また強い制約である強制制約式の数も多い。そこで、パスフロー変数に対する列生成法、強制制約式に対する行生成法、容量スケールリング法および一部の変数を固定した分枝限定法である変数固定法を組み合わせ、さらに得られた近似解をもとにアークフロー変数による定式化に対して局所分枝法を適用するという近似解法を開発した。なお、線形計画問題と変数固定法・局所分枝法には MIP ソルバーである CPLEX を使用している。

局所分枝法を用いない解法は非常に高速であり、従来の高速解法である IP 探索法に比べるとベンチマーク問題に対する平均計算時間は 1/5 以下であり、平均誤差が IP 探索法よりも 0.5% 程度優れた解を算出することができた。局所分枝法と組み合わせた解法で

は、従来の最良の解法である MIP 探索法と比べて、平均誤差が 0.5%程度優れた解を算出することができ、平均計算時間も 1/5 以下となった。

② アークフロー変数を用いたモデル

パスフロー変数を用いたモデルでは、容量スケールリングにおいて、最適解に含まれるパスフロー変数が生成する前に解が収束してしまう可能性がある。一方、アークフロー変数を用いた場合、列生成法を効率的に活用できないために、強制制約式を含む問題を解くためには大きな計算時間を必要とする。そこで、強制制約式に対して切除平面法を適用することにより、計算時間を短縮することに成功した。なお、線形計画問題と変数固定法・局所分枝法には MIP ソルバーである CPLEX を使用している。

変数固定法と局所分枝法を組合せることにより、パスフロー変数を用いたモデルによる解法よりも優れた解を算出することができた。

(2) アークに区分的線形費用をもつネットワーク設計問題に対する近似解法の開発

CO2 排出などの環境問題を解決するためにはトラックから鉄道や船舶などへの輸送モードの転換、いわゆるモーダルシフトが必要となる。そのため、環境問題を考慮するモデルは、複数の輸送モードであるマルチモーダルのモデルとなる。このモデルでは、各モードごとにコスト関数が異なるために、全体のコスト関数は非線形となり、多くの場合は区分的線形として表されることになる。区分的線形費用をもつネットワーク設計問題は、このようなマルチモードを扱うネットワーク設計問題となる。

区分的線形関数費用をもつアークは、単一の容量をもつ複数のアークである多重アークに変換することができることから、多重アークに対する容量スケールリング法を開発した。パスフロー変数に対する列生成法、強制制約式に対する行生成法と容量スケールリング法を適用し、変数固定法により実行可能解を算出した。さらに、得られた近似解をもとに、アークフロー変数による定式化に対する局所分枝法を適用した。なお、線形計画問題と変数固定法・局所分枝法には MIP ソルバーを使用している。

従来の解法である閾値法と比べると、ベンチマーク問題に対して、平均誤差は 1/2 以下となった。また、閾値法では実行可能解を算出できない場合も数多くあったが、開発した解法ではすべての問題で実行可能解を算出することができた。

(3) アセットバランスを考慮したネットワーク設計問題に対する近似解法の開発

CO2 などの環境問題に対応するためには、輸送車や配送車単位のスケジュールを考慮することが必要となる。アセットバランスを考慮したネットワーク設計問題は、輸・配送車などのアセットのスケジュールも考慮した設計問題である。

基本的なアセットバランスを考慮したネットワーク設計問題は、容量をもつネットワーク設計問題に、アセットバランス制約を付加した問題となる。そのため、(1)で示した容量をもつネットワーク設計問題に対する解法が適用可能となる。

従来の最良解法であるパラレルタブー探索と比べると、ベンチマーク問題に対して、計算時間は 4 倍程度必要となるものの、平均誤差が 1/4 以下である優れた解を算出することができた。

(4) ノードに非線形費用をもつサプライチェーンネットワーク設計問題の近似解法の開発

ノードに非線形費用をもつサプライチェーンネットワーク設計問題は、施設や設備などのネットワーク上のノードに関する費用が非線形となる問題である。サプライチェーンネットワークで重要である在庫費用は、このような非線形関数となる。

開発したモデルは、多品種、施設と設備の容量を考慮したモデルである。また、開発した解法は、アークに容量をもつネットワーク設計問題に対する解法である容量スケールリング法と変数固定法を組み合わせた解法である。なお、線形計画問題と変数固定法には MIP ソルバーを使用している。

35 施設、175 設備、5 製品、50 顧客までの問題に対して数値実験を行ない、開発した解法の有効性を検証した。

(5) ノードに区分的線形費用をもつサプライチェーンネットワーク設計問題の近似解法の開発

ノードに区分的線形費用をもつサプライチェーンネットワーク設計問題は、施設や設備などのネットワーク上のノードに関する費用が区分的線形となる問題である。施設や設備の拡充費用などは、このような区分的線形関数となる。

開発したモデルは、多品種、施設と設備の容量を考慮したモデルである。また、開発した解法は、アークに容量をもつネットワーク設計問題に対する解法である容量スケールリング法と変数固定法を組み合わせた解法である。なお、線形計画問題と変数固定法には MIP ソルバーを使用している。

35 施設、175 設備、5 製品、50 顧客までの問題に対して数値実験を行ない、開発した解法の有効性を検証した。

(6) グローバルサプライチェーンネットワーク設計問題

グローバルサプライチェーンネットワーク設計問題は、複数の国にまたがる設計問題である。複数の国が関係するため、各国の税金、関税、およびグローバル企業内での取引価格である移転価格を考慮する必要がある。

開発したモデルは、移転価格と施設・設備配置および輸送量を変数とするモデルである。このモデルは2階層モデルであり、上位モデルはサプライチェーンネットワーク上の施設・設備の配置問題であり、下位モデルは移転価格と輸送量の決定問題である。

上位モデルは施設と設備容量を考慮したサプライチェーンネットワーク問題なるため、容量スケールリング法と変数固定法を組み合わせ合わせた解法を開発した。下位モデルは移転価格と輸送量を変数とする2次項を含む非線形最適化問題となることため、輸送量を定数とした移転価格を求める移転価格問題と、移転価格を定数とした輸送量を求める多品種フロー問題に分割する分解法を開発した。

20ヶ国、35施設、175設備、5製品、50顧客までの問題に対して数値実験を行ない、開発した解法の有効性を検証した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計11件)

- ① 鄭世雄, 片山直登, ロジスティクスネットワーク設計問題に対する近似解法, 日本物流学会誌, 査読有, No.17, p65-72, 2009.
- ② Seyu Tei, Naoto Katayama, Shigeru Yurimoto, A Supply Chain Network Design Problem with Concave Inventory Costs, 査読有, Proceedings of International Conference on Production Research, Vol.20, CD-ROM, 2009.
- ③ Naoto Katayama, Minzhe Chen, Mikio Kubo, A Capacity Scaling Procedure for the Multi-Commodity Capacitated Network Design Problem, Journal of Computational and Applied Mathematics, 査読有, Vol. 232, No. 1, p90-101, 2009.
- ④ 片山直登, 多品種を考慮したロジスティクスネットワーク設計問題の数理的解法に関する研究, 博士論文, 流通経済大学大学院物流情報学研究科, 査読有, 2010.
- ⑤ 黄大鵬, 百合本茂, 片山直登, 小売企業の配送センター立地問題, 日本物流学会誌, 査読有, No. 18, p57-64, 2010.
- ⑥ 片山直登, ロジスティクスネットワーク設計問題と最適化ソルバー, 流通ネット

ワーキング, 査読無, No. 6, p75-79, 2010.

- ⑦ 片山直登, 容量制約のないネットワーク設計問題の Lagrange 緩和法とソースコード, 流通経済大学流通情報学部紀要, 査読無, Vol.15, No.1, p1-34, 2010.
- ⑧ Naoto Katayama, Shigeru Yurimoto, Combining Capacity Scaling and Local Branch Approaches for the Logistics Network Design Problem, Proceedings of International Conference on Production Research, 査読有, Vol.21, CD-ROM, 2011.
- ⑨ 鄭世雄, 片山直登, 在庫費用を考慮したロジスティクスネットワーク設計問題, 日本ロジスティクスシステム学会誌, 査読有, Vol.12, No.1, p5-12, 2011.
- ⑩ 片山直登, 容量制約をもつネットワーク設計問題の研究の調査と数値実験の比較, 流通経済大学流通情報学部紀要, 査読無, Vol.16, No.2, p1-36, 2012.
- ⑪ 片山直登, アセットバランスを考慮した容量制約をもつネットワーク設計問題, 流通経済大学流通情報学部紀要, 査読無, Vol.17, No.1, p29-50, 2012.

[学会発表] (計4件)

- ① 鄭世雄, 片山直登, 在庫費用を考慮したロジスティクスネットワーク設計問題, 日本ロジスティクスシステム学会, 全国大会予稿集, p117-120, 2009.
- ② 黄大鵬, 百合本茂, 片山直登, 小売企業の配送センター立地問題—大連大商グループを事例に—, 日本物流学会, 全国大会報告要旨集, p189-192, 2009.
- ③ 鄭世雄, 片山直登, 区分的線形費用をもつロジスティクスネットワーク設計問題, 日本物流学会, 全国大会報告要旨集, p143-146, 2010.
- ④ 片山直登, 容量スケールリングと局所分枝を用いた容量制約をもつネットワーク設計問題の解法, 日本ロジスティクスシステム学会, 全国大会予稿集, p7-10, 2011.

[その他]

ホームページ等

<http://www.rku.ac.jp/~katayama>

6. 研究組織

(1) 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

(2) 研究分担者

百合本 茂 (YURIMOTO SHIGERU)
流通経済大学・流通情報学部・教授
研究者番号: 90129015

(3)研究協力者

鄭 世裕 (TEI SEYU)

流通経済大学大学院・物流情報学研究科・
大学院生