

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 22 日現在

機関番号：32102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25350454

研究課題名(和文) ロバストネスを考慮したグローバルサプライチェーンネットワーク設計問題の解法の開発

研究課題名(英文) Development of Algorithms for Robustness Supply Chain Network Design Problems

研究代表者

片山 直登 (Naoto, Katayama)

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)：本研究では、現実のネットワーク設計問題において考慮すべき様々な条件を考慮したモデルを提案し、これらに対する解析、および容量スケールリング法、限定した分枝限定法や行・列生成法などを含む解法の開発を行った。続いて、基本的な容量制約をもつネットワーク設計問題に対して、デリート法を改良した貪欲法と容量スケールリング法を組み合わせた高速な新しい貪欲法を開発した。この高速解法を確率的シナリオ解析モデルに組み込むことにより、ロバストネスを考慮した新しいサプライチェーンネットワーク設計モデルに対する解法を開発した。

研究成果の概要(英文)：In this study, we have developed various supply chain network design models considering conditions existing at the real world. For these models, we have developed the solution algorithms using a capacity scaling algorithm, restricted branch-and-bound, column generation and row generation. For the capacitated network design model, we proposed new fast greedy algorithms, which are combining the modified delete algorithm and the capacity scaling algorithm. We applied the fast new greedy algorithms to the probabilistic scenario analysis, and have developed the algorithm for the robustness supply chain network design model.

研究分野：ネットワーク設計

キーワード：サプライチェーン ネットワーク設計 最適化モデル ロバストネス シナリオ解析

1. 研究開始当初の背景

東日本大震災、タイの洪水や中国のスト・暴動などにより、サプライチェーンネットワーク上の一部機能が停止したことによる部品や原材料の不足が発生し、日本・欧米の多くの企業において最終製品の生産に大きな影響が発生した。今日まで企業はコスト最小化に重点をおいたグローバルサプライチェーンネットワークを展開してきたため、広大なグローバルサプライチェーン上の一工場の一部品の調達が可能となった場合であっても、その影響が直接サプライチェーン全体に及ぶという事態が発生している。従来型のサプライチェーンネットワーク設計は、コスト最小化を目指す確定型モデルが中心であるために、サプライチェーン上の一部が機能停止した際の代替性を十分に考慮することができず、今日の様々なリスクに迅速に対処することが困難となってきている。そのため、リスクに柔軟に対処でき、かつ頑強性(ロバストネス)をもつサプライチェーンネットワーク設計のための統合的なグローバルモデルおよび解析システムの開発が迫られている。

従来、多くのサプライチェーンネットワーク設計モデルや解法の開発、事例分析などが行われてきた。代表的な研究としては、Geoffrion-Graves(1974)の Benders 分解法、Brown(1987)のプライマル分解法、Vidal(2001)の移転価格モデル、Santoso(2005)や Birge(2011)の確率モデル、Snyder(2007)や Crainic(2012)のシナリオ解析モデル、Goetschalckx(2012)のグローバルモデルがある。また、Goetschalckx(2002)、Meixell(2005)、久保(2007)や黒田ら(2008)は詳細なサーベイを示している。これらの研究により、現実問題におけるサプライチェーンネットワークの構築・解析が可能となっている。しかし、コスト最小化、グローバル、確率解析やシナリオ解析といった個別のモデルに対する研究は進んではいないが、グローバルサプライチェーンネットワークをリスクモデルとして捕らえ、災害などのリスク面からの厳密な定量的分析と評価が行えるような統合的なモデルや解法の研究はほとんど行われていない。著者は、多くのサプライチェーン/ロジスティクスネットワーク設計のためのモデル、解法および解析システムを開発している。

著者らは、コスト最小化モデルでは、容量スケールリング、行・列生成や局所分枝法を組合せた大規模問題に対しても適用できる高速解法を開発している。非線形費用を含む生産・物流拠点立地モデルに対する容量スケールリング法や Lagrange 緩和法を用いた解法の開発、環境を配慮したモデルと解法の開発、グローバル企業における事例分析モデル・解法の開発、および配送車資源の割当を含むモデルの開発も行っている。また、共同研究によりグローバル設計モデルと高速解法の開

発に成功している。さらに、2008年にネットワーク設計に関するサーベイである著書を執筆し、2009年に研究成果をまとめた博士論文を完成している。これらでは、強力な定式化、容量スケールリング法、行・列生成法と局所分枝法を組合せることによって、従来の最良解法に比べ極めて短時間で最良解を算出可能な高速解法の開発に成功している。

2. 研究の目的

本研究では、著者らが開発してきた高速・効率的なネットワーク設計モデルを発展させることにより、さらなる高速化および効率化を図り、リスク評価と確率的シナリオ解析モデルを統合することにより、ロバストネスを考慮した新しいサプライチェーンネットワーク設計モデルを開発する。さらに、この設計モデルに対する高速解法を含む新たな解析システムを開発する。

3. 研究の方法

文献調査等により関連する研究の現状調査を実施し、これらの結果から得たさまざまな現実のサプライチェーンネットワークにおける条件を、著者らの開発したコスト最小化型の基本的なネットワーク設計モデルに組み込んだ拡張モデル提案し、これらのモデル化および解法を開発する。また、著者らの開発したコスト最小化型の高速解法をもとに、デリート法と呼ばれる貪欲法に Minoux の改良法を組み込むことによって、解の精度を維持しながら高速化を図る。続いて、開発したモデルと解法をリスクを考慮した確率的シナリオモデルに拡張し、さらにロバストネスを考慮したサプライチェーンネットワーク設計モデルを開発する。

4. 研究成果

(1) 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問題の解法の開発

通信ネットワーク上では、同一の始点と終点をもつパケットなどのフローは必ずしも単一の経路上で送信されるとは限らず、トラフィックの状態に応じて複数の経路上で分割されて送信されることが一般的である。一方、ロジスティクスやサプライチェーンのネットワーク上では、同一の発地と着地をもつ荷物が複数に分割され、別々の経路で輸送されることはなく、単一の経路上で輸送されるのが一般的である。このような分割されないフローを非分割フローとよび、この非分割フローを考慮した問題を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問題とよぶ。

本研究では、非分割フローを考慮した容量制約をもつ設計問題に対して、容量スケールリング法、限定分枝限定法、局所探索法およびパス再結合法を組合せた近似解法を提案したベンチマーク問題であるC問題に対して、数値実験を行い、従来の研究との比較を行っ

た。

その結果、従来の最良の解法であるガイドつき探索法を用いた解法をよりも平均で、0.14 ~ 0.28% 優れた解を算出することができた。また、提案した解法により、すべての問題に対して最適解または最良解を求めることができた。

(2) フロー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のモデルの開発と数値実験

輸送ネットワークでは、積替えターミナルや配送センターにおいて着ターミナル別に荷物がまとめられて輸送することが行われる。このため、同一の着ターミナルをもつ貨物は、途中の積替えターミナルで集約され、同一ターミナル宛の輸送便で輸送されることが一般的である。このような場合、貨物の流れであるフローは着ターミナルを根とするネットワーク上の木の上で輸送されることになり、この木をフロー木とよぶ。このようなフロー木条件と容量制約を考慮した問題をフロー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とよぶ。

本研究では、フロー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に対して、アークフローと木変数を用いたモデル、およびフロー木を用いたモデルを示した。続いて、アークフローと木変数を用いたモデルを用いて、最適化ソルバーを用いてベンチマーク問題を解き、問題の困難性を検討した。最後に、フローが連続変数である容量制約をもつネットワーク設計問題、および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問題の上界値と比較し、フロー木条件が上界値に及ぼす影響を考察した。

C問題の対する平均誤差は 1.60% であり、比較的小さなものとなった。その一方で、平均計算時間は 15 時間を超えている。このため、同程度の誤差で、計算時間を大幅に短縮できるような近似解法の開発が必要である。また、多くの問題で非分割フローを考慮した問題の上界値との差は小さく、非分割フローを考慮した問題はフロー木を考慮した問題の良い緩和問題となることが分かった。しかし、一部の問題では上界値の増加率が高くなる可能性があるため、注意が必要である。

(3) LTL ネットワーク設計問題のモデルの開発と数値実験

複数の発地と複数の着地の組み合わせをもつ輸送ネットワークでは、積替えターミナルにおいて荷物の積合せが行われ、積合せ貨物や混載貨物として輸送することが行われる。このような積合せ貨物輸送を LTL 輸送とよぶ。LTL 輸送に関するネットワーク上では、積替えターミナルの選択、積替えターミナル間の路線の選択、路線上の輸送車の配置や貨物の輸送経路の選定などの計画を行うことが必要である。このようなさまざまな計画を行

う問題を LTL ネットワーク設計問題とよぶ。

本研究では、LTL ネットワーク設計問題を対象として、サービス水準を考慮した LTL ネットワーク設計問題および離散容量をもつ LTL ネットワーク設計問題に対するモデルを示した。サービス水準を考慮した LTL ネットワーク設計問題に対しては、区分的線形関数を用いたモデル、拡張容量を用いたモデル、および木フローを用いたモデルを示した。離散容量をもつ LTL ネットワーク設計問題に対しては、複数容量を用いたモデル、区分を用いたモデル、および木フローを用いたモデルを示した。LTL ネットワーク設計問題では、回送便制約、積替回数制約、フロー木制約を考慮している。また、拡張容量を用いたモデルと複数容量を用いたモデルに対して、最適化ソルバーを用いた数値実験を行い、問題の定義やモデルによる解の変化を考察した。

OD ペア数が 40 を超える問題では CPLEX で最適解を求めることができない問題も多く存在するため、短時間で良い解を求める近似解法を開発することが必要である。また、OD ペア数の多い問題に対して、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は、LTL ネットワーク設計問題の良い近似問題となっていることが明らかになった。

(4) 容量制約をもつネットワーク設計問題に対する n 分割不等式の開発

容量制約をもつネットワーク設計問題は、アーク上のフロー量がアーク容量以下であるという容量制約をもつ設計問題である。アーク容量は通信回線容量や輸送能力に相当し、容量制約をもたないネットワーク設計問題に比べより現実的なモデルとなる。容量制約があるために、容量制約をもたない問題に比べて最適値と緩和問題の下界値とのギャップが大きくなる傾向がある。また、デザイン変数を固定したフロー問題がタイトな多品種フロー問題となるため、実行可能解を求めること自体に手間がかかるなど、難しい問題となる。

本研究では、向きのないアークを含む容量制約をもつネットワーク設計問題に対する 3・4 および n 分割不等式、3 および n 最小基数不等式、ならびに 3 および n 被覆不等式を提案した。本研究では、向きのないアークをもつ問題を対象とし、妥当不等式を示したにとどまっている。今後、向きのあるアークをもつ問題がより一般的であるため、向きのあるアークをもつ問題への拡張が必要である。また、提案した妥当不等式を問題へ追加した場合の有効性や分枝カット法への組み込みが必要である。

(5) 分枝価格法を用いた容量制約をもつネットワーク設計問題の解法の開発

ネットワーク設計問題は、ネットワーク上のアークにかかる固定的なデザイン費用

とフローにかかる変動的なフロー費用を考慮して、アークを適切に選択することによりネットワークを形成し、かつ異なる始点と終点もつ複数のフローを決める問題である。この問題は、輸送、ロジスティクス、通信や生産システムなどに幅広い応用分野をもつネットワークの構造を設計する問題である。

本研究では、アークに容量制約をもつネットワーク設計問題に対して分枝価格法を実装し、分枝時において限定されたパス変数をもつ問題に対する分枝限定法を適用することによる近似解法を提案した。また、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、従来の研究との比較を行った。

従来の研究の容量スケールリング・局所分枝法と比較すると誤差は大きいですが、それ以外の解法よりも誤差の小さい解を求めることができた。また、計算時間は、容量スケールリング・局所分枝法と比べて大きく削減することができている。しかし、現在のバージョンでは最適化ソルバー Gurobi に分枝価格法を直接組み込みことができず、プログラミング言語 Python にて分枝・限定操作を行い、緩和問題および近似解を算出するためのフロー変数を限定した問題のみを Gurobi で解いている。このため、強力な Gurobi の分枝限定法やマルチコアの機能を十分に活用することはできていない。また、分枝操作を単純な下界値優先則を用いているため、この工夫も必要である。

(6) ホップ数を考慮した容量制約をもつネットワーク設計問題の解法の開発

通信ネットワークにおいては、サーバー等の経由数であるホップ数の大小に通信のフローは大きな影響を受けない。一方、物流・ロジスティクスでは、配送センターを経由し、荷物の積替えを行うことによって輸送・配送を実現している。このような場合、配送センターでは積降し、積替え等の作業により多くの時間と費用が発生するため、経由する配送センターの数は限られたものとなる。本研究では、荷物の輸送経路上で経由する配送センター等の数に上限をもつような問題を対象とし、輸送経路上の輸送能力を考慮した問題を対象とする。このような問題を経由回数を考慮した容量制約をもつネットワーク設計問題またはホップ数を考慮した容量制約をもつネットワーク設計問題とよぶ。

本研究では、ホップ数を考慮した容量制約をもつネットワーク設計問題に対して、ホップ数変数によるモデルと限定されたパスによるモデルを示し、限定されたパスによるモデルに対して容量スケールリング法および局所分枝法を用いた近似解法を提案した。続いて、ホップ数変数によるモデルに対しては最適化ソルバーを用いた数値実験、限定されたパスによるモデルに対しては容量スケールリング法を用いた近似解法を用いて数値実験

を行ない、モデルと解法の有効性を検討した。ホップ数変数によるモデルと CPLEX を組合せた場合、誤差の小さな解を算出することができたが、大きな計算時間が必要となった。このため、数値実験で用いた問題よりもさらに大規模な問題に対しては、このまま適用することは困難である。一方、限定されたパスによるモデルと容量スケールリング法の組合せは、短時間で比較的良い近似解を算出することができた。さらに局所分枝法を組み合わせることによって、計算時間を抑えながら、誤差の小さな解を算出することができた。

(7) Development of Algorithms for a Combined Capacity Scaling and Local Branching Approach for Capacitated Multi-Commodity Network Design Problem

The capacitated multi-commodity network design problem (CMND) represents a generic network design model for applications used in designing construction and improvements to telecommunication, logistics, transportation, distribution, and production networks.

This study presents an approach combining capacity scaling and local branching for CMND. Capacity scaling is an approximate iterative solution approach for capacitated network problems based on the principle of changing arc capacities that depend on flow volumes on arcs. Local branching is a method of solving new restricted problems based on an exploration of solution neighborhoods defined as local branching constraints. Capacity scaling with a strong path flow based formulation including forcing constraints can produce high-quality solutions within a short period of time allotted for computation. By combined capacity scaling and local branching, the combined approach can offer one of the best current solutions compared to previous heuristics for CMND.

(8) Development of Algorithms for the Load Planning Problem for Less-than-Truckload Motor Carriers and a Solution Approach

The main stress in the load planning problem for less-than-truckload (LTL) motor carriers falls on determining how to consolidate freight on small-lot consignment over a load planning network including break-bulk terminals. The goal of this problem is to minimize the total line-haul cost under the condition that the minimum frequency of delivery per week between a pair of terminals must satisfy a given service level.

In this study, we propose a load planning

model and new algorithm using a Lagrangian relaxation method. Numerical experiments are presented to evaluate the effectiveness of our Lagrangian relaxation method.

(9) Development of Algorithms for a Combined Matheuristic for Service Network Design Problem

Service network design problem is a model of a network design problem related to services in transportation and logistics planning. In this paper, we consider the service network design problem with a single-asset type. This problem is particularly relevant to firms that operate consolidation transportation systems and makes the determination of the transportation network configuration and the characteristics of the corresponding assets, and can be represented as a capacitated multicommodity network design problem with design balance constraints.

This study presents a combined matheuristic with capacity scaling, restricted branch-and-bound and local branching for the service network design problem. By combining capacity scaling and restricted branch-and-bound for a strong path-flow based formulation and local branching for a strong arc-flow based formulation, this combined matheuristic can offer one of the best current solutions compared to previous heuristics.

(10) 容量制約をもつネットワーク設計問題の高速な貪欲法の開発

容量制約をもつネットワーク設計問題は、ノードおよび容量をもつアーク候補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、ネットワークのデザイン費用とフロー費用の合計が最小となるアークの選択と各品種のフローの経路を求める問題である。これは、通信ネットワークの設計や輸送・配送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。

本研究では、アークに容量制約をもつネットワーク設計問題に対して高速な貪欲法を提案し、さらに容量スケールリング法ならびに限定された分枝限定法を組合せた解法を提案した。また、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、従来の研究との比較を行った。

従来の研究の最良の解法の一つである容量スケールリング・局所分枝法と比較すると誤差は大きいですが、他の解法と同程度の誤差の解を求めることができた。また、計算時間は、従来の解法と比べて、1/10 から 1/100 と大きく削減することができた。この高速化

により、ロバスト性を考慮したネットワーク設計問題や不確実性を考慮した大規模なネットワーク設計問題に対して、高速解法を適用することが可能となった。

(11) Development of Algorithms for a Combined Capacity Scaling and Local Branching Matheuristic for the Hop-Constrained Multicommodity Network Design Problem

The network design problem is used to model a wide variety of problems in the design of and improvements to logistics, transportation, distribution, production, and telecommunication networks. For logistics or telecommunication network problems, each commodity is transported via transshipment facilities, such as distribution centers or routers. Generally, the number of transshipment facilities on the path of each commodity is small or at least limited. Conditions that limit the number of arcs between transshipment facilities on a commodity path are called hop-constraints.

In this paper, we consider the hop-constrained network design problem with multiple commodities and capacitated arcs. We present an approach that combines capacity scaling and a local branching matheuristic for the hop-constrained network design problem, and propose column-generation for the hop-constrained paths.

(12) ロバストネス性を考慮した容量制約をもつネットワーク設計問題の解法の開発

一般的な容量制約をもつネットワーク設計問題は、各品種の需要が既知として与えられている。しかし、現実的には、需要は不確実なものである場合が多い。このような需要の不確実性を取り扱った問題は、確率的な容量制約をもつネットワーク設計問題やロバストネス性を考慮した容量制約をもつネットワーク設計問題とよばれている。ロバストネス性は、需要の変動に対するネットワークの頑強性、すなわち様々な需要変動に対して適切に処理できる設計を行うことを意味している。

ロバストネス性を考慮した容量制約をもつネットワーク設計問題では、多くのシナリオを設定し、これらのシナリオに対して、平均的に優れたネットワーク設計を行うシナリオ解析が行われている。シナリオ解析は、不確実性要因に対処するための複数の異なる条件を設定したインスタンスであるシナリオを用意し、これらのシナリオに対して解析を行う手法である。このような問題を、シナリオ解析を用いたロバストネス性を考慮した容量制約をもつネットワーク設計問題

とよぶ。

本研究では、需要が不確実、すなわち需要のシナリオとその発生確率が与えられたもとで、ロバストネス性を考慮した容量制約のあるネットワーク設計問題に対して、高速な貪欲法を提案し、さらに容量スケール法ならびに限定された分枝限定法を組合せた解法を提案した。今後の課題として、ベンチマーク問題を用いた数値実験による従来の解法との比較や現実問題への適用が挙げられる。

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 12 件)

片山直登, 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問題, 流通経済大学流通情報学部紀要, 査読無, Vol.18, No.1, p1-19, 2013.

片山直登, フロー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, 流通経済大学流通情報学部紀要, 査読無, Vol.18, No.1, p21-34, 2013.

片山直登 LTL 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.18, No.1, p35-58, 2013.

片山直登, 容量制約をもつネットワーク設計問題に対する n 分割不等式, 流通経済大学流通情報学部紀要, 査読無, Vol.19, No.2, p23-32, 2015.

片山直登, 分枝価格法を用いた容量制約をもつネットワーク設計問題の解法, 物流問題研究, 査読無, Vol.63, p22-44, 2015.

片山直登, ホップ数を考慮した容量制約をもつネットワーク設計問題, 物流問題研究, 査読無, Vol.63, p45-59, 2015.

Naoto Katayama, A Combined Capacity Scaling and Local Branching Approach for Capacitated Multi-Commodity Network Design Problem, Far East Journal of Applied Mathematics, 査読有, 92(1), 1-30, 2015.

Naoto Katayama, Shigeru Yurimoto, The Load Planning Problem for Less-than-Truckload Motor Carriers and a Solution Approach in Developments in Logistics and Supply Chain Management: Past, Present and Future, Ed. Pawar,KS., Rogers, H., Potter, A and Naim, M, Palgrave Macmillan, 査読有, p240-249, 2015, UK.

Naoto Katayama, A Combined Matheuristics for Service Network Design Problem, The International Federation of Logistics and SCM Systems, 査読有, Vol.8, p11-20, 2015.
片山直登, 容量制約をもつネットワーク

デザイン問題の高速な貪欲解法, 流通経済大学流通情報学部紀要, 査読無, Vol.20, No.1, p1-24, 2015.

片山直登, ロバストネス性を考慮した容量制約をもつネットワーク設計問題, 創立五十周年記念論文集, 流通経済大学, 査読無, p515-530, 2016.

Naoto Katayama, A Combined Capacity Scaling and Local Branching Matheuristic for the Hop-Constrained Multicommodity Network Design Problem, Far East Journal of Applied Mathematics, 査読有, Vol.94(3), p185-215, 2016.

[その他]

ホームページ等

<http://www2.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: 20194870

(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