ORによる輸配送業務の課題解決

瀬戸　明嶺，細田　順子

ロジスティクス分野には，施設配置問題や配送計画問題など，OR の研究対象とされている問題が数多くあり，多彩な制約を取り込んだモデルや高速に求解するアルゴリズムが提案されている．一方で，実際の物流業務では学術的な研究では対象とされていない詳細な業務上の制約を取り込むことや，数多くの制約を同時に取り込むことといった課題が残されている．本稿では，物流業務の中でも特に輸配送業務に関する課題解決に着目し，物流業務で使えるソリューション開発という観点からモデルやアルゴリズムについて紹介する．

キーワード：物流，ヒューリスティック，混合整数計画法

1. はじめに

物流業界では，少子高齢化などに起因して 2000 年よりドライバ数が減少する傾向にあり，2015 年から 2030 年の 15 年間でドライバ数が 3 割減少するという推測もある [1]．さらに，2024 年 4 月に施行された働き方改革関連法による長時間労働規制 [2] が労働力不足に拍車をかけている．このような背景に加えて，利便性を求める人々による当日配送や時間指定といった高いサービスレベルへの要求や，脱炭素化社会に向けた環境負荷の低い輸配送への要求もあり，物流業界では厳しい事業環境下で生き残りをかけた業務効率化が進められている．本稿では，このような厳しい事業環境にある物流企業の輸配送業務に着目し，数理最適化技術と物流業務のノウハウを融合して課題を解決した例を紹介する．

2. 輸配送業務

物流企業の輸配送業務では，集荷地で集荷した荷物を，決められた配送期間内に配送地へ届ける．荷物の届け方には，直送とハブ＆スポーク型の 2 種類がある．直送は，集荷地で荷物を集荷した車両が直接配送地へ配送する方法である．最短時間で配送できる利点がある一方で，少ない荷物を遠方へ届ける場合には積載率の低い車両が遠距離を走行するため，物流企業全体として輸配送に必要な車両台数が増える欠点がある．ハブ＆スポーク型は，集荷した荷物を地域の集約倉庫に集め，複数の荷物をまとめて配送地の集約倉庫へ幹線輸送する方法である．ここで，幹線輸送とは，複数の荷物を集約して遠距離（たとえば東北地方から関東地方へ）運搬することを示す．一方，集荷地から集約倉庫，集約倉庫から配送地，もしくは集荷地から同じ集約地域の配送地までの運搬を配送と呼ぶ．

一般に，物流企業では輸配送に使用する車両台数を低減することを目的として，一つの集荷地から一つの配送地への輸配送量が多い場合には直送し，少ない場合にはハブ＆スポーク型で届けることで荷物を集約する．ハブ＆スポーク型の場合には，集荷地から集約倉庫という 1 階層だけでなく，図 1 に示すような複数階層の輸配送になることがある．本例では，図の左端にある個人宅などの集荷地で集荷された荷物は，集荷地域（たとえば都道府県）の地域倉庫に集められる．これらの荷物は，さらに集荷地域の集約倉庫へ運ばれる．集荷地域の集約倉庫から配送地域の集約倉庫へ幹線輸送し，配送地域の集約倉庫から地域倉庫を中継して，配送地へ届けられる．本稿では，配送のうち，集荷地や配送地と地域倉庫の間の荷物の運搬をラストマイル配送，地域倉庫と集約倉庫の間の運搬を支線配送と呼ぶ．

このような輸配送業務における意思決定は，その実施時期の違いに着目して，戦略段階，計画段階，実行段階の 3 段階に分けることができる（図 2）．最も長期的な意思決定段階である戦略段階では，数年先に向けた倉庫の配置と各倉庫の集約地域を決定する．計画段階では，倉庫に対し，必要に応じて集約地域を見直したうえで，翌週もしくは翌月に使用する車両台数やドライバ数を決定し，手配する．実行段階では，当日から当週における車両ごとの配送スケジュールを決定し，配送指示を作成する．本稿では，3 節で戦略段階のソリューションである CO_2 排出量を抑制する拠点配置最適化技術を，4 節で計画段階のソリューションである幹線輸送と支線配送を連携した輸配送最適化技術を，5 節で実行段階のソリューションである配送最適化技術を紹介する．

せと　あかね，ほそだ　じゅんこ
（株）日立製作所 研究開発グループ コネクティブオートメーションイノベーションセンタ 産業オートメーション研究部
〒 244–0817 横浜市戸塚区吉田町 292
akane.seto.ty@hitachi.com

 Copyright © by ORSJ. Unauthorized reproduction of this article is prohibited.

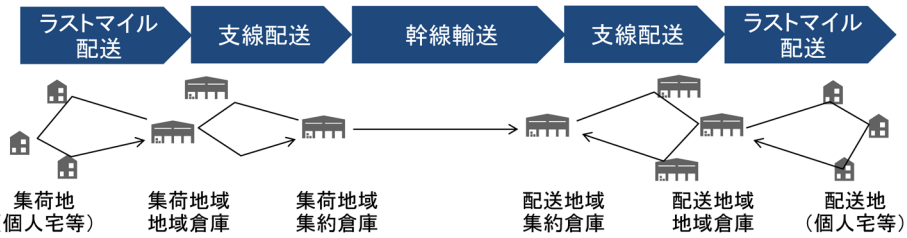

図 1　2 階層ハブ＆スポーク型輸配送の例

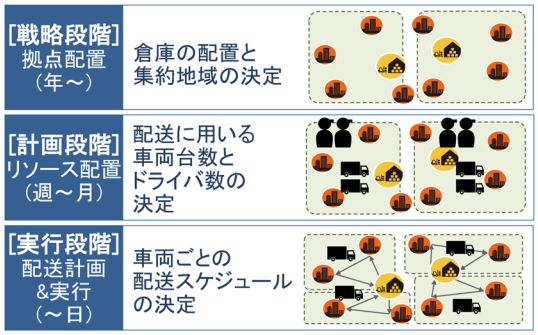

図 2　輸配送業務における意思決定の段階

3.　CO_2 排出量を抑制する拠点配置最適化

本節では，戦略段階のソリューションである，CO_2 排出量を抑制する拠点配置最適化技術について紹介する．（株）日立ソリューションズでは，脱炭素化社会の実現を目的として，地域ごとの CO_2 排出量が与えられた上限値以内に収まり，コストが最も安くなる調達・製造・物流拠点の配置と輸送経路・手段の選択を行う拠点配置最適化技術を開発した [3]．本技術の対象は多額の投資を決定する長期的な戦略決定であり，少しでもコストを安くすることが重要であるため，混合整数計画問題としてモデル化し，厳密解法で解く．

本技術の概要を図 3 に示す．本技術は施設配置問題 [4] の拡張であるサプライチェーン設計問題 [5] をベースに開発した．部品を購入・保管し，製品を製造・保管して市場へ供給するサプライチェーンを対象に，与えられた調達・製造・物流拠点候補（図 3 のサプライチェーンモデル）の中から使用する拠点を決定する．同時に，モノの輸送経路・手段も決定する．モノは，製造工程で部品表に従って異なるモノに変化する．便宜上，製造工程に投入するモノを部品，でき上がるモノを製品と呼ぶ．部品表には製品を 1 単位製造するために必要な部品の単位数が記載される．一般的なサプライチェーン設計問題では製造拠点単位で生産能力を設定するが，本技術では製造拠点の中に設置される製造ラインごとに生産能力を設定する．これは，実業務としてサプライチェーン設計を行う場合に，製造拠点に必要な製造ラインを設置できず，設計し直すことを防ぐためである．モノ・拠点・製造ライン別に定義される製造負荷を積み上げることで，消費する生産能力を計算する．モノは製造ラインに投入後，製造リードタイムの経過後に完成する．また，モノが拠点間を移動する際には，輸送リードタイムを要する．調達・製造・物流により発生する単価および拠点・製造ラインの固定費を与え，調達・製造・物流による変動費と拠点・製造ラインの固定費を最小化する [6]．

このような従来のサプライチェーン設計技術に対して，持続可能な社会の実現に向けた関心の高まりを受け，持続可能なサプライチェーン設計への拡張が行われるようになってきている [7]．本技術では，実業務の観点から CO_2 排出量の抑制に着目した．

図 4 にコストと CO_2 排出量のトレードオフの例を示す．サプライチェーンのコストを最小とするには，製造拠点を 1 箇所にして固定費を抑える案が考えられる．しかし，この場合には遠距離輸送が必要となり，CO_2 排出量が増加する．一方で，サプライチェーンの CO_2 排出量を最小とする場合には，市場近隣に製造拠点を設置して輸送による CO_2 排出量を抑制する案が考えられる．この場合には，製造拠点が 2 箇所となるためコストが増加する．したがって，持続可能なサプライチェーンを実現するためには，コストと CO_2 排出量のトレードオフを評価する必要がある．一般に，企業はコスト低減を目的とすることが多いため，本技術では CO_2 排出量に上限を設けることで CO_2 排出量を抑止する．CO_2 排出量の上限は国などにより異なることが考えられるため，定義した領域ごとに上限を設けることで，現実的な制約となった．

4.　幹線輸送と支線配送を連携した輸配送最適化

本節では，計画段階のソリューションの一つである，

Copyright © by ORSJ. Unauthorized reproduction of this article is prohibited.

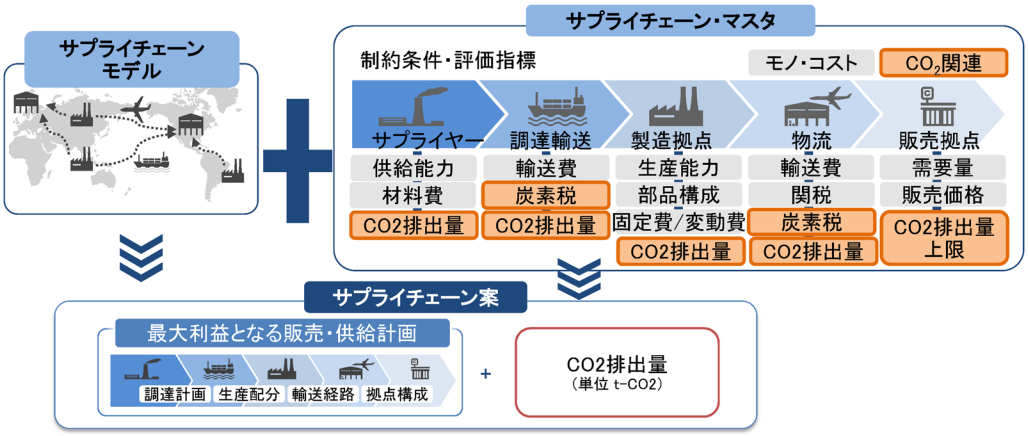

図 3　CO_2 排出量を抑制する拠点配置最適化技術の概要

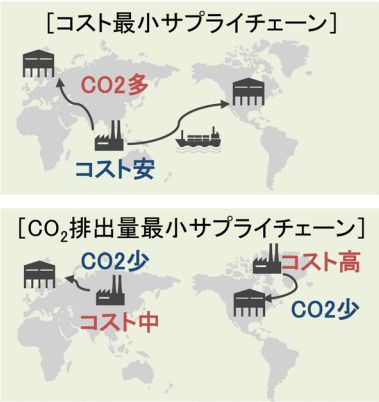

図 4　サプライチェーン設計におけるコストと CO_2 排出量のトレードオフの例

幹線輸送と支線配送を連携した輸配送最適化技術を紹介する．輸配送計画問題では，地域倉庫ごとの集約倉庫と，集約倉庫間の幹線輸送計画，支線内の配送計画，各荷物を輸配送する車両を決定する．この問題は，図 5 に示すように，(a) 倉庫クラスタリング問題，(b) 幹線輸送計画問題，(c) 支線配送計画問題の三つに分割して考えることができる．(a) 倉庫クラスタリング問題では，与えられた地域数に対し，集約倉庫と地域倉庫の移動距離の総和が最小となるように，各倉庫の地域への割当および各地域の集約倉庫を決定する．(b) 幹線輸送計画問題では，各倉庫の地域，集約倉庫および荷物を与え，幹線輸送コストを最小化するように，集約倉庫間の輸送車両の発着時刻と積載する荷物を決定する．(c) 支線配送計画問題では，配送コストを最小化するように，地域ごとの集約倉庫と地域倉庫間の配送計画を決定する．

従来研究では，(a) 倉庫クラスタリング問題と (b) 幹線輸送計画問題を統合した研究 [8] や，(b) 幹線輸送計画問題と (c) 支線配送計画問題を統合した研究 [9] などがある．しかし，三つの問題を統合した研究はなく，統合した大規模問題を解くために新しいアルゴリズムを開発する必要があった．そこで，(株) 日立製作所では，Exeter 大学（イギリス），Zuse Institute Berlin（ZIB，ドイツ）とともに，(a)(b)(c) を統合した輸配送計画問題を解く輸配送計画アルゴリズムを開発した [10]．本アルゴリズムは，ZIB にて開発している最適化ソルバ SCIP の UG フレームワーク [11] を用いて，緩和問題を用いた広域探索による下界値推定と，多腕バンディットアルゴリズムを適用した繰り返し計算による輸配送計画ヒューリスティック（Multi-armed bandit-based

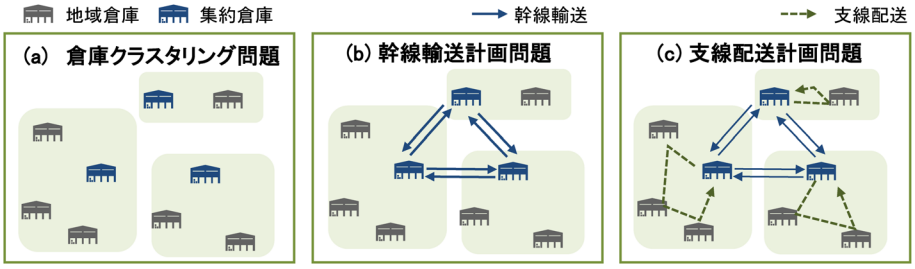

図 5　輸配送計画問題の構成

 Copyright © by ORSJ. Unauthorized reproduction of this article is prohibited.

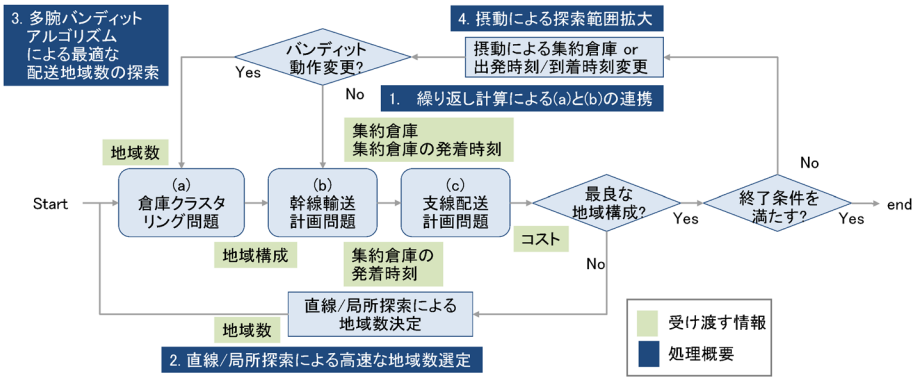

図 6　輸配送計画ヒューリスティック (MAB) の概要

heuristic，MAB と呼ぶ）を用いて実行可能解を探索する．

開発した MAB の概要を図 6 に示す．MAB では，地域数を与えて (a) 倉庫クラスタリング問題を解き，各倉庫の地域および地域数分の集約倉庫を決定する．次に，(b) 幹線輸送計画問題を解き，集約倉庫間の輸送計画を決定し，得られた幹線輸送の発着時刻を所与として (c) 支線配送計画問題を解く．得られた解が最良な地域構成であり，かつ，終了条件を満たせば終了する．最良でない場合は，直線探索もしくは局所探索により地域数を変更し，(a) へ戻る．終了条件を満たさない場合には，摂動により集約倉庫もしくは集約倉庫の発着時刻を変更する．さらに，多腕バンディットアルゴリズムにより，地域数を変更して (a) へ戻る，もしくは，(b) へ戻る，のいずれかを選択する．このような繰り返し計算を行うことで，100 地域倉庫の輸配送計画を 30 分以内に立案することが可能となった．

(a)(b)(c) を統合した輸配送計画問題において，輸送経路まで決定している配送計画問題を緩和して，車両積載量に対する荷物の割当を決定するパッキング問題に置き換える．また，線形緩和し計算時間を短縮する．本技術では，輸配送計画問題の緩和問題を解く緩和ソルバと MAB ソルバを任意に切り替えて起動することが可能であり，緩和ソルバで発見した緩和解を MAB ソルバに与え，MAB ソルバにて実行可能解を探索する．数値実験により，緩和解を用いて探索空間を限定することで，目的関数を最大で 25%改善できることを確認した．

5.　業務要件を取り込んだ配送最適化

本節では，実行段階のソリューションの一つである配送最適化技術について紹介する．（株）日立製作所では，図 1 の支線配送を対象に配送最適化技術を開発した．本技術は実業務に適用できる配送計画の立案を目的としている．当日の配送業務に適用するためには，配送する全荷物の情報を取得後 30 分以内に配送計画を立案することが必要となる．また，立案した配送計画を人手で修正する時間がないため，配送業務で考慮している条件をすべて満たす必要がある．そこで，本技術では，配送業務で考慮している条件をすべて取り込んだ混合整数計画問題を定義し，厳密解法とヒューリスティックを統合することで高速に良解を探索する配送計画アルゴリズムを開発した．以下，本技術にて定義した配送計画問題と開発したアルゴリズムについて述べる．

5.1　業務要件を取り込んだ配送計画問題

複数の車両を対象に，倉庫で荷物を積み，複数の配送地へ配送する配送順序を決定する配送計画問題 (Vehicle routing problem) は，学術界で古くから研究されており，多くのバリエーションが提案されている．Braekers et al. [12] は，144 論文を対象に，車両積載量制約を有する配送計画，納品時間枠を有する配送計画，複数車型を対象とした配送計画，複数倉庫を対象とした配送計画，戻り便を活用した配送計画などの 15 種類のバリエーションを報告している．これらの研究では，基本となる配送計画問題に，1〜3 種類程度の制約を追加した問題を定義し，その問題を解くアルゴリズムを提案している．

一方で，実際の配送業務では，図 7 に示すように，業務に応じてさまざまな条件を同時に考慮している．基本的にはすべての企業で，車型の最大積載可能量・重量・容量や，ドライバの勤務時間上限，道路の混雑度などに依存した時間帯別の移動時間と距離を考慮する．さらに，企業の配送業務に応じてその他の条件も考慮する．たとえば，日用品の配送では，2 種類の車型を使用して集荷と配送を行う．各拠点で決められた昼休憩

Copyright © by ORSJ. Unauthorized reproduction of this article is prohibited.

の時間帯には集荷や納品ができない．拠点によっては小型の車両のみ接車可能であるため，拠点別に接車可能な車型を考慮する．また，朝夕の混雑時に少し離れた場所に車両を駐車する必要がある拠点がある．そのため，車型・時間帯別に荷卸し時間が異なる．さらに，ドライバは数時間おきに休憩を取る必要がある．荷物の集荷時間枠と納品時間枠は指定されている．液体の配送では，3 種類の車型を使用する．このうち大型車は 2 荷室ある．荷物が液体のため，一つの荷室に複数の荷物を混載することはできない．また，特殊な免許をもつドライバのみ運転可能な車両もある．

5.2 厳密解法とヒューリスティックを統合した配送計画アルゴリズム

配送業務の対象とする問題の規模は，100 拠点，100 車両，100 ドライバ，100 荷物，1 車両当たり約 10 訪問先であるため，10 億個程度のバイナリ変数を扱う．このため，厳密解法では非常に長い計算時間を要し，業務要件である 30 分以内に解くことはできない．配送計画問題に対して多くの研究があるメタヒューリスティックは，条件が少ない問題に対して高速化の効果がある．しかし，実際の配送業務の解空間は実行不可能領域が広いため，短時間で実行可能解を求めることが難しい．配送計画問題で古くから研究されている構築法を使う場合には，対象とする問題は時間帯依存の制約が多いため，たとえば前詰めのようなルールベースで実行可能解を求めることが難しい．このように，厳密解法，メタヒューリスティック，ヒューリスティックのいずれかだけを使用した場合には短時間での良解探索が難しいため，厳密解法とヒューリスティックを統合した配送計画アルゴリズムを開発した．本アルゴリズムは挿入法 [13] をベースに，時間帯に依存しない制約と，時間帯依存の制約を緩和した制約を考慮して，配送順序を決定することで，実行不可能領域が広い問題の良解を高速に探索する．得られた配送順序を所与として厳密解法を用いることで，時間帯依存の制約を考慮した配送スケジュールを現実的な計算時間で決定する．本アルゴリズムでは，図 7 に示すすべての制約を考慮する．本アルゴリズムの特長は，拠点や車型，車両，2 拠点間，荷物，ドライバ，配送に関するさまざまな種類の条件を考慮できることである．

本アルゴリズムの概要を図 8 に示す．ステップ 1 では，はじめに，評価指標に従って積み込む荷物を一つ選択する．次に，選択した荷物に対して，緩和した時間枠制約とその他の制約をすべて満たすように，積み込む車両と配送するドライバを決定する．ステップ 2 では，厳密解法により時間枠制約を遵守する車両の配送スケジュール（各拠点への到着時刻と出発時刻）を決定する．その後，ステップ 1 に戻り，緩和した時間枠制約とその他の制約をすべて満たすように，評価指標に従って選択した車両でドライバが配送する荷物を追加する．追加する荷物がある場合には，ステップ 2 に移り，順序を制約として厳密解法にて配送スケジュールを決定する．荷物が追加できなくなり次第，ステップ 1 のはじめの荷物の選択に戻る．この手順を繰り返し，最終的にすべての荷物を車両とドライバに割り当てるか，積み込める車両と配送できるドライバがなくなった時点でアルゴリズムは終了する．

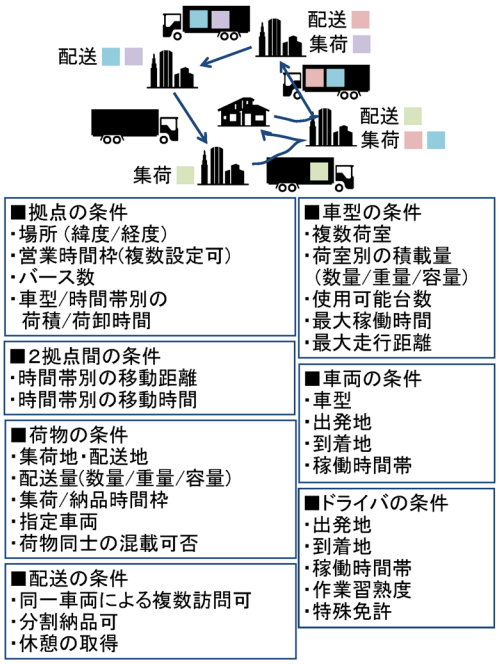

図 7 厳密解法とヒューリスティックを統合した配送計画アルゴリズムにて考慮する制約

本アルゴリズムを実装した配送計画ソリューションは実業務に適用されており，従来に比べて車両台数を約 10%削減する効果を上げている [14]．

6. おわりに

ロジスティクス分野には古くから OR の研究対象とされている問題が数多くある．しかし，研究成果を実際の物流業務に適用するためには，学術的な研究で取り込まれていない条件を考慮した大規模問題を短時間で解く必要があるなどの課題が残されている．

（株）日立製作所では，OR 技術を駆使し，実業務で使えるソリューションを開発してきた．本稿では，(1)

 Copyright © by ORSJ. Unauthorized reproduction of this article is prohibited.

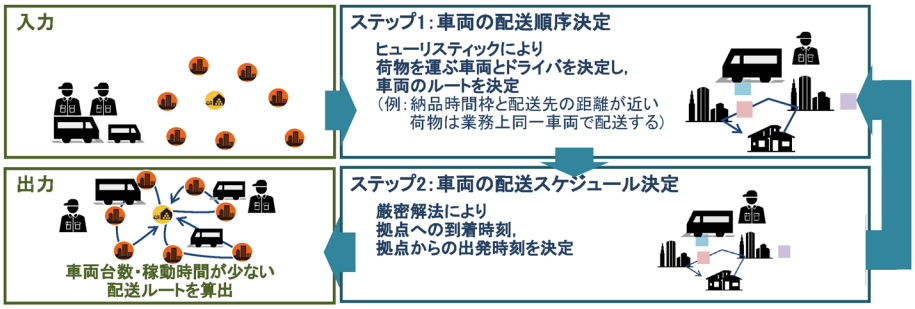

図 8　厳密解法とヒューリスティックを統合した配送計画アルゴリズムの概要

脱炭素化社会の実現に向けて，地域ごとの CO_2 排出量の上限値を満たすように，コスト最小となる調達・製造・物流拠点および輸送経路を決定する，CO_2 排出量を抑制する拠点配置最適化技術，(2) 多腕バンディットアルゴリズムベースの専用ヒューリスティックにより良解を高速に探索し，また，緩和問題を使って専用ヒューリスティックの探索範囲を限定して解精度を向上する，幹線輸送と支線配送を統合した輸配送計画技術，(3) ヒューリスティックによる車両とドライバへの荷物割付・ルート決定と厳密解法による車両のスケジュール決定を融合し，実業務に必要となる多彩な条件を取り込んだ配送計画を 30 分以内に立案する配送計画技術，の三つの技術を紹介した．

これらの例を通じて，物流業務の効率化において OR が役立っていることをお伝えできたならば幸いである．

参考文献

[1] 公益社団法人日本ロジスティクスシステム協会，「ロジスティクスコンセプト 2030」，https://www1.logistics.or.jp/date/concept.html（2024 年 7 月 22 日閲覧）

[2] 公益社団法人全日本トラック協会，トラック運送業界の 2024 年問題について，第 2 回持続可能な物流の実現に向けた検討会 資料 3，2022.

[3]（株）日立ソリューションズ，「サプライチェーン全体の CO2 発生量をシミュレーションできる「グローバル SCM シミュレーションサービス」の最新版を販売開始」，https://www.hitachi-solutions.co.jp/company/press/news/2022/0419.html（2024 年 7 月 22 日閲覧）

[4] 日本オペレーションズ・リサーチ学会，「施設配置問題」，https://orsj-ml.org/orwiki/wiki/index.php?title =《施設配置問題》（2024 年 7 月 22 日閲覧）

[5] M. T. Melo, S. Nickel and F. Saldanha-Da-Gama, “Facility location and supply chain management: A review,” *European Journal of Operational Research*, **196**, pp. 401–412, 2009.

[6] J. Hosoda, K. Funaki and T. Chida, “Recent issues in international supply chain network design: Economic partnership modeling,” *Optimization in the Real World: Toward Solving Real-World Optimization Problems*, K. Fujisawa, Y. Shinano and H. Waki (eds.), Springer Tokyo, pp. 139–155, 2016.

[7] S. Joshi, “A review on sustainable supply chain network design: Dimensions, paradigms, concepts, framework and future directions,” *Sustainable Operations and Computers*, **3**, pp. 136–148, 2022.

[8] M. Drexl and M. Schneider, “A survey of variants and extensions of the location routing problem,” *European Journal of Operational Research*, **241**, pp. 283–308, 2015.

[9] J. Medina, M. Hewitt, F. Lehuédé and O. Péton, “Integrating long-haul and local transportation planning: The service network design and routing problem,” *EURO Journal on Transportation and Logistics*, **8**, pp. 119–145, 2019.

[10] J. Hosoda, S. J. Maher, Y. Shinano and J. C. Villumsen, “A parallel branch-and-bound heuristic for the integrated long-haul and local vehicle routing problem on an adaptive transportation network,” *Computers & Operations Research*, **165**, 106570, 2024.

[11] Y. Shinano, T. Achterberg, T. Berthold, S. Heinz and T. Koch, “ParaSCIP: A parallel extension of SCIP,” *Competence in High Performance Computing 2010*, Springer, pp. 135-148, 2011.

[12] K. Braekers, K. Ramaekers and I. Van Nieuwenhuyse, “The vehicle routing problem: State of the art classification and review,” *Computers & Industrial Engineering*, **99**, pp. 300–313, 2016.

[13] M. M. Solomon, “Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints,” *Operations Research*, **35**, pp. 254–265, 1987.

[14]（株）日立製作所，「トラック配送計画の DX で物流業界が変わる！ 三井物産グループで「配送計画システム」が稼働」，https://social-innovation.hitachi/ja-jp/article/mitsui/（2024 年 7 月 22 日閲覧）

Copyright © by ORSJ. Unauthorized reproduction of this article is prohibited.