

(論文内容の要旨)

本論文は、効率性及び環境負荷低減を目指した都市内貨物車交通施策を実現するために、都市内配車配送計画のモデル化を行ったものである。特に配車配送計画において、遅刻ペナルティを課すソフトタイムウィンドウの到着時間制約がある場合の厳密解を、列生成法および分枝価格法とラベリングアルゴリズムを用いて求める方法論を開発している。また、開発した方法を、ベンチマーク問題および東京の現実の道路ネットワークにも適用し、効率的かつ環境にやさしい配車配送計画の実現可能性を示している。

第 1 章は、序論であり、貨物車輸送の共同化、貨物車の積載率規制、高度情報システムの活用など、シティロジスティクス施策の重要性と、施策を評価するためにモデル化が必要であることを述べている。モデル化の中でも、到着時間制約がある場合の配車配送計画モデル(VRPTW: Vehicle Routing and scheduling Problem with Time Windows)が中心的な役割を果たす。従来は、顧客位置における早着・遅刻を許さないハードタイムウィンドウの到着時間制約付き配車配送計画 (VRPHTW: Vehicle Routing and scheduling with Hard Time Windows)についての厳密解が求められてきた。しかし、ここでは、現実の配車配送計画においてよく見られる、遅刻に対してペナルティが課せられるセミソフトタイムウィンドウの到着時間制約付き配車配送計画(VRPSSTW: Vehicle Routing and scheduling with Semi-Soft Time Windows)の厳密解を求める方法論を開発する。

第 2 章は、既往文献のレビューであり、多くの文献が VRPHTW の厳密解法を取り扱っており、VRPSSTW については、ヒューリスティクス手法を用いた近似解が示されていることを述べている。VRPHTW は NP 困難な問題であるが、厳密解法としては、動的計画法、ラグランジュの緩和法、列生成法などがある。

第 3 章は、列生成法を用いた VRPSSTW の厳密解法について述べている。Dantzig-Wolf の分解法によって、VRPSSTW を、集合分割問題の主問題と Elementary Shortest Path Problem with Resource Constraints and Late Arrival Penalties (ESPPRCLAP)と呼ばれる子問題に分解した。VRPSSTW においては、早着の場合にペナルティが 0 で、遅刻の場合のみにペナルティが課せられるので、コストは非減少関数であり、dominance 則が適用できる。さらに ESSPRCLAP に対する新しいラベリングアルゴリズムを開発した。一般に、VRPSSTW の解空間は、VRPHTW の解空間に比べて非常に大きくなるため、新しい path extension 則を開発し、適用した。VRPSSTW において、分枝価格法を用いるが、その場合の分枝の方法、上界値、下界値の決定法についての議論を行っている。

第4章は、ここで開発した方法を、Solomonのベンチマーク問題に適用し、分枝価格法により、上界値と下界値が一致して整数解となったときに厳密解に到達することを確認している。また、VRPSSTWの最適解におけるコストと待ち時間および使用する車両台数は、VRPHTWの最適解に比べて大幅に削減された。しかし、VRPSSTWにおいては、より大きい空間を探索しなければならず、また整数ギャップも大きいので、VRPHTWに比べて、計算時間が増大することを示している。また、タイムウィンドウを10分緩和することにより、配送コストが14.54%削減され、20分緩和することにより、配送コストが21.04%削減されることがわかった。

さらに、この方法を東京の現実の道路ネットワークにも適用した。この道路ネットワークは、実際のコンビニエンスストアにおける商品の配車配送計画に用いられているものに基づいている。デポ数は1、顧客数は38である。このケースについて、厳密な最適解を求めるとともに、道路リンクの車両速度からNO_x, CO₂ およびSPMの排出量を計算した。その結果、VRPSSTWのコストは、VRPHTWに比べて、16.34%削減され、待ち時間は83.4%削減された。トラックが時間待ちをする場合、路上駐停車を行う場合が多いので、待ち時間の減少は、交通渋滞の緩和に貢献できる。また、VRPSSTWのNO_x, CO₂ およびSPMの排出量は、VRPHTWに比べて、全排出量で18%以上の削減がみられた。VRPSSTWにおけるNO_x, CO₂ およびSPMの最大排出量は、使用した道路リンクの70%以上において、VRPHTWの場合よりも小さかった。

第5章は、VRPSTW: Vehicle Routing and scheduling with Soft Time Windowsに対するハイブリッド手法を用いた近似解法を示している。顧客位置において、遅刻ペナルティのみならず、早着ペナルティも課すVRPSTWについて厳密解を求めることは困難であるので、ここでは、列生成法と遺伝的アルゴリズム(GA: Genetic Algorithms)を用いたハイブリッド手法を開発した。VRPSTWについて、ハイブリッド手法を適用すると、通常のGAを用いるよりも、より最適解に近い解が得られることがわかった。

第6章は結論であり、本論文で得られた成果について要約するとともに、将来の研究課題について述べている。ここで開発したVRPSSTWの厳密解法によって得られる最適解は、物流事業者にとって、VRPHTWに比べて、コストや待ち時間の削減においてより良い配車配送計画となるのみならず、行政や住民などのシティロジスティクスにおける他の利害関係者にとっても、NO_x, CO₂ およびSPMの排出量が削減され、交通渋滞の緩和に貢献するので、大変魅力的な選択枝となる。一方、荷主にとっては、若干の配送時間の遅れが発生するかもしれないが、物流事業者のコスト削減による運賃の低下やペナルティによって、この不便益を相殺できる可能性がある。

(論文審査の結果の要旨)

本論文では、都市内貨物配送を効率化する配車配送計画において、遅刻ペナルティを課すソフトタイムウィンドウの到着時間制約がある場合の厳密解を、列生成法および分枝価格法とラベリングアルゴリズムを用いて求めることに成功している。得られた研究成果は、次のようにまとめられる。

1. 到着時間制約があり、遅刻に対してペナルティが課せられるセミソフトタイムウィンドウの到着時間制約付き配車配送計画(VRPSSTW: Vehicle Routing and scheduling with Semi-Soft Time Windows)の厳密解を求める方法論を開発した。すなわち、Dantzig-Wolfの分解法によって、VRPSSTWを、集合分割問題の主問題とElementary Shortest Path Problem with Resource Constraints and Late Arrival Penalties (ESPPRCLAP)と呼ばれる子問題に分解した。さらにESSPRCLAPに対する新しいラベリングアルゴリズムを開発した。主問題と子問題(ESSPRCLAP)の間で分枝価格法によるイテレーションにより、上界および下界を求め、両者が一致し、整数解となった時に厳密解に達する。
2. ここで開発した方法をSolomonのベンチマーク問題に適用した結果、VRPSSTWにおいては、配送コスト、顧客位置における待ち時間、使用する車両台数がVRPHTW(Vehicle Routing and scheduling with Hard Time Windows)に比べて削減された。また、タイムウィンドウを10分緩和することにより、配送コストが14.54%削減され、20分緩和することにより、配送コストが21.04%削減されることがわかった。
3. また、この方法を東京における現実の道路ネットワークにおける配車配送計画に適用した結果、VRPSSTWのコストは、VRPHTW に比べて、16.34%削減され、待ち時間は83.4%削減された。さらにVRPSSTW のNO_x, CO₂ およびSPMの排出量は、VRPHTWに比べて、全排出量で18%以上の削減がみられた。
4. 結論として本論文は、都市内配送において(1) 遅刻ペナルティを課すソフトタイムウィンドウの到着時間制約がある場合の厳密解を求める方法を開発したこと、また(2)この厳密解法を現実の配車配送計画に適用した結果、効率性の向上と同時に環境への負荷の低減も可能であることを示している。

以上の内容より、数理計画における配車配送計画において、従来はVRPHTWについては厳密解法が提案されていたが、本論文ではVRPSSTWに対して、列生成法および分枝価格法とラベリングアルゴリズムを用いて厳密解法を新たに開発している。この点に本論文の学術的新規性が認められる。また開発されたVRPSSTWを、東京の現実の道路ネットワークにも適用していることより、効率的かつ環境にやさしい配車配送計画の実現可能性を示しており、学術上・実用面への応用上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成20年7月24日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。