

## 天災発生時における医薬品の最適配送計画 Optimal delivery plan for pharmaceuticals in the event of a natural disaster

尾崎 俊哉\*      高橋 由泰\*      野中 洋一\*  
Shunya Ozaki      Yoshiyasu Takahashi      Youichi Nonaka

### 1 はじめに

国土の約半分が豪雪地帯である日本 [1] では、積雪時の配送がライフラインである物流の重要課題である。特に医薬品のように特定時間内に配送が必要な喫緊性が高い物資では、当日の積雪状況を踏まえた着実な配送計画が求められている。しかし従来の配送手段であるトラックは降雪の影響を受けやすく、医薬品が指定時間内に届かない問題が頻発している。Murray ら [2] によって提案されたトラック-ドローン連携配送は、トラック配送が交通網の影響を受けやすい課題と、ドローン配送が積載容量やバッテリーに制限がある課題を、補完して解決する方法を提案した。

Amila の研究 [3] では、配送計画において気象ウィンドウと呼ばれるタイムスロットを用い、各気象ウィンドウ毎で気象条件に伴う配送時間の遅れなどを加味して配送計画を立案しているものの、気象条件の影響で経路が通行不可能となるような状況は考慮されていない。本研究では、気象条件の影響で経路が通行不可能となるような場合においては、代替手段であるドローンで配送することを計画に加味することで、より多様な気象条件にも対応できる配送システム構築を研究課題とする。

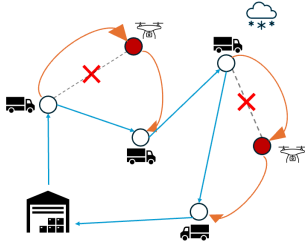


Figure 1. 医薬品混載のトラック-ドローン配送計画のイメージ

[Figure1] は本研究で提案する配送システムの全体図を示したものである。左下の倉庫の絵は配送拠点であるデポを表し、白丸は配送顧客、赤丸は医薬品配送を必要とする顧客の位置を表している。青矢印はトラックでの配送経路を表すが、積雪時においてトラックでの通行が不可能については赤バツが付けられている。橙色の矢印はドローンでの配送経路を表し、トラック配送が不可能な経路において代替手段として用いられる。

### 2 提案方法

本研究の対象である、医薬品のような喫緊性が高い物資とそれ以外の物資を混載するトラック配送を対象としたと

き、先行研究の提案方法では、一般物資は時間内に配送できることと配送コストのバランスを考慮する必要がある一方で、医薬品には配送コストが高くても時間内に配送できることを有する要件に応えられないこと、が課題である。

そこで本研究では、a. 先行研究で考慮している積雪によるトラック配送の遅延や迂回路、を考慮するだけでなく、b. 平時では医薬品と一般物資を混載して配送コストを抑えると共に、c. 積雪及び配送遅延リスクが閾値を超えた場合には医薬品を貨物から取り出してドローンで特別に配送して喫緊性に応える方法を新たに提案する。

提案方法では、配送計画において、計画時間を分割した時間ウィンドウと、配送ルートを分割した顧客間ノードの組み合わせで数理モデル化する。この組み合わせにおいて、刻々と変化する道路の積雪深を各ウィンドウに特徴量として付与し、積雪深が閾値の範囲内の場合には迂回路を含めたトラック配送で対応し、積雪深が閾値を超えた場合には医薬品を貨物から問い出してドローンで特別に配送して喫緊性に応える数理モデルを、MILP (Mixed-Integer Linear Programming) として以下のように定式化する。

$$\text{Max} \sum_{t \in W} \left( \sum_{i \in N} \sum_{j \in N_g} x_{ij}^t + \sum_{i \in N} \sum_{j \in N_g} \sum_{k \in N} y_{ijk}^t \right) \quad (1)$$

s.t.

$$\sum_{t \in W} \left( \sum_{i \in N} x_{ij}^t + \sum_{i \in N} \sum_{k \in N} y_{ijk}^t \right) = 1 \quad \forall j \in N_m \quad (2)$$

$$x_{ij}^t \leq U_{ij}^t \quad \forall i, j \in N, \forall t \in W$$

$$\left( U_{ij}^t := \begin{cases} 1 & \text{if } p_{ij}^t + q_{ij}^t \leq l, \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \right) \quad (3)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \frac{d_{ij}^T}{v^T} x_{ij}^t \leq 1 \quad \forall t \in W \quad (4)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N_C} \sum_{k \in N} \left( \frac{d_{ij}^D + d_{jk}^D}{v^D} \right) y_{ijk}^t \leq 1 \quad \forall t \in W \quad (5)$$

(6)

制約条件 (2) は、医薬品配送の着実な期間内配送を保証する。 $W$  は気象ウィンドウの集合、 $N$  は全顧客ノードの集合、 $N_m$  は全医薬品顧客ノードの集合とする。決定変数  $x_{ij}^t$  は気象ウィンドウ  $t \in W$  において、トラックが経路  $(i, j)$  を通過する場合に 1、それ以外の場合は 0 となるバイナリ変数で、決定変数制約  $y_{ijk}^t$  は気象ウィンドウ  $t \in W$  において、トラックが経路  $(i, j)$ 、 $(j, k)$  を通過する場合に 1、それ以外の場合は 0 となるバイナリ変数である。制約条件 (3) はトラックの通行可否制約である。刻々と変化する路面の積雪状況に対応し、各経路のスタック状況をパラメータ  $U_{ij}^t$  で表すことでトラックの通行可否を表現する。ウィンドウ  $t$  開始時の経路  $(i, j)$  の積雪深を  $p_{ij}^t$ 、 $t$  間の降雪量を  $q_{ij}^t$ 、積雪深の閾値を  $l$  で表している。制約条件 (4), (5) は、各気象ウィン

\*京都大学 Kyoto University

ドゥ内でのトラック及びドローンの移動が気象ウィンドウの長さである1時間以内に収まることを保証する。 $d_{ij}^T$ ,  $d_{ij}^D$  はそれぞれトラック、ドローンによる経路  $(i, j)$  の距離を表す。 $v^T$ ,  $v^D$  はそれぞれトラック、ドローンの移動速度を表す。

目的関数 (1) は、配送期間内における一般貨物の総配送件数の最大化を表す。 $N_g$  は全一般物資顧客ノードの集合を表す。上で説明した最適配送計画立案問題の要件である、医薬品が必要な顧客への着実な期間内配送を実現しつつ、一般貨物を注文した顧客への総配送件数を最大化するというものを、制約条件 2 と目的関数 1 を用いて表した。

トラックやドローンが各ノードに訪問したことを表すバイナリ決定変数  $x_{ij}^t$ ,  $y_{ijk}^t$  の値と、その訪問順序を決定することにより、具体的な最適配送計画が得られる。

### 3 評価

本研究で設計した気象ウィンドウを用いた積雪時のトラック-ドローン連携配送による、医薬品の最適配送計画立案問題の実現可能性及び有用性を確認するため、第2章で定式化した数理モデルを用いて数値実験を行った。

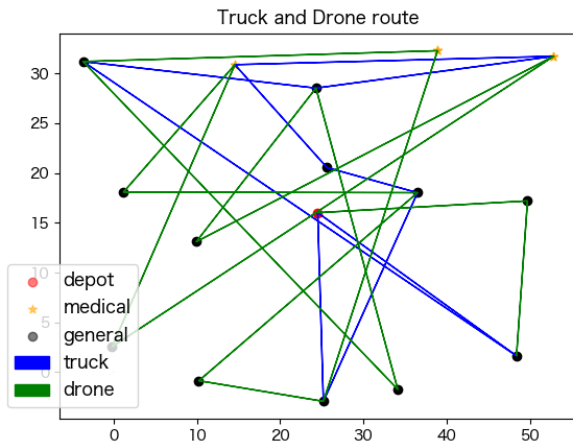


Figure 2. トラック-ドローン連携配送経路

[Figure2] と [Figure3] は実験結果を表す。全顧客件数を15件、医薬品顧客を3件とした。トラック-ドローン連携配送モデルは医薬品が必要な顧客への期間内配送を全て実現し、12件の一般貨物配送を実現した。対してトラック単独配送モデルは医薬品が必要な顧客への期間内配送を全て実現したもの、10件の一般貨物配送しか実現できなかった。実験結果から、提案システムを用いて医薬品の期間内配送が実現できることが分かり、ドローンを導入することで一般貨物の配送件数が増加し、提案システムの有用性が示された。しかし [Figure2] から、提案システムではドローンが遠回りな経路を選択していることが分かり、ドローンのバッテリー制約を考慮することが今後の課題としてあげられる。

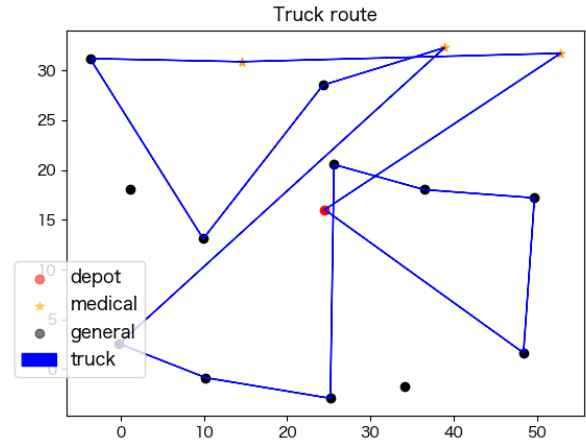


Figure 3. トラック単独配送経路

### 4 まとめと今後の展望

本豪雪地帯が多い日本の配送システムについて、医薬品のような喫緊性が高い物資とそれ以外の物資を混載するトラック配送を対象として、積雪によるトラック配送の遅延や迂回路を考慮するだけでなく、平時では医薬品と一般物資を混載して配送コストを抑えると共に、積雪による配送遅延リスクが閾値を超えた場合には医薬品を貨物から取り出してドローンで特別に配送して喫緊性に応える方法を新たに提案した。提案方法を用いた数値実験により、1. 時間ウィンドウを導入することで、積雪による路面状況の変化に適応して、医薬品の期間内配送を実現できること、2. ドローンを代替手段として適用することで、一般物資の配送件数も増加させることができること、の二点が確認でき、提案方法の有効性を確認できた。また、ドローンのバッテリー制約を考慮した配送経路の最適化が残課題であることが確認できた。今後は、

- ドローンの積載容量・バッテリー制約
- 医薬品の指定時間配送制約
- 積雪深や降雪量の実測データの利用

等の数理モデルへの導入にも取り組み、社会実装を目指す。

### References

- [1] 国土交通省.: “豪雪地帯・特別豪雪地帯の指定 (令和7年4月1日現在) ”, <https://www.mlit.go.jp/kokudoseisaku/chisei/content/001881217.pdf>
- [2] Chase C. Murray and Amanda G. Chu.: “The flying sidekick traveling salesman problem: Optimization of drone-assisted parcel delivery” *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, volume 54, 86-109(2017).
- [3] Amila Thibbotuwawa, et al.: “Planning deliveries with UAV routing under weather forecast and energy consumption constraints” *Management and Control*, volume 52, 820-825(2019).