

大規模災害の初動物流におけるトラック×ドローン協調配送の最適化

福島 浩貴[†] 山口 一章^{††} 中村 匡秀^{†,††}

[†] 神戸大学

〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1

^{††} 追手門学院大学

〒567-0013 大阪府茨木市太田東芝町 1-1

^{†††} 理化学研究所 革新知能統合研究センター

〒103-0027 東京都中央区日本橋 1-4-1

E-mail: [†]hiroki-f@es4.eeddept.kobe-u.ac.jp, ^{††}ka-yamaguchi@otemon.ac.jp, ^{†††}masa-n@cmds.kobe-u.ac.jp

あらまし 災害時には道路寸断により孤立集落が発生し、トラック単独では到達できない需要が生じる。本研究は、トラックに専属するドローンを用い、トラック間およびトラック・ドローン間の物資積み替えを許容した協調配送計画を提案する。需要割当・配送順序・物資受け渡しの三層構造で計画を表現し、中継拠点への補給や分割配送を含む実行可能スケジュールを焼きなまし法で探索する。成分間グラフに基づく初期解生成、動的計画法による補給挿入、依存関係 DAG によるシミュレーションを組み合わせ、大規模分断道路網における有効性を評価した。

キーワード 災害物流, トラック・ドローン協調配送, 中継・積み替え, 焼きなまし法, シミュレーション

Optimization of Truck-Drone Cooperative Delivery in Initial Logistics for Large-Scale Disasters

Hiroki FUKUSHIMA[†], Kazuaki YAMAGUCHI^{††}, and Masahide NAKAMURA^{†,††}

[†] Kobe University

1-1 Rokkodai-cho, Nada-ku, Kobe, Hyogo 657-8501, Japan

^{††} Otomon Gakuin University

1-1 Ota-Toshibacho, Ibaraki, Osaka 567-0013, Japan

^{†††} RIKEN Center for Advanced Intelligence Project

1-4-1 Nihonbashi, Chuo-ku, Tokyo 103-0027, Japan

E-mail: [†]hiroki-f@es4.eeddept.kobe-u.ac.jp, ^{††}ka-yamaguchi@otemon.ac.jp, ^{†††}masa-n@cmds.kobe-u.ac.jp

Abstract Road disruptions in disasters create isolated areas that trucks alone cannot reach. This study proposes a cooperative truck-drone delivery plan that allows transshipment between trucks and between trucks and drones while assigning each drone to a specific truck. The plan is modeled in three layers—demand allocation, delivery order, and material transfer—and feasible schedules with relay replenishment and split deliveries are explored via simulated annealing. We combine inter-component graph-based initialization, dynamic programming for replenishment insertion, and a dependency-DAG simulation to evaluate performance on large, fragmented road networks.

Key words Disaster logistics, Truck-drone cooperation, Relay and transshipment, Simulated annealing, Simulation

1. 背景と目的

災害時には道路寸断によりトラックのみでは到達不能な孤立集落が発生し、迅速かつ確実な物資配送の計画が課題となる。トラック・ドローン協調配送は、トラックの大容量性とドローンの到達性を補完的に用いる有力な枠組みである。既存研究の

多くは、ドローンが発進・回収とも同一トラックに同期するペア運用を前提としている [1]~[3]。一方で、災害物流における配送計画は優先度や不確実性に焦点が当たり [4]、到達不能性を解消する多段階中継や物資積み替えを明示的に扱う枠組みは限定的である。

本研究は、ドローンの専属運用を維持しつつ、トラック間お

よびトラック・ドローン間の物資積み替えを許容する協調配送計画を提案する。需要割当・配送順序・物資受け渡しの三層構造で配送計画を表現し、中継、ピストン輸送、分割配送を含む実行可能なスケジュールを探索する。

2. 問題設定

2.1 集合とパラメータ

記号を導入する前に、本研究で想定する運用前提を整理する。

- (1) 拠点 V_{base} ではトラックが容量上限まで再補給できる。
- (2) ドローンは初期割当トラックに専属し、発進・回収は同一トラックで行う。
- (3) 需要は分割配送を許容し、中継ノード在庫を介した受け渡しを認める。
- (4) 全需要をできるだけ充足しつつ、完了時刻 T_{max} を最小化する。

ノード集合を V 、拠点集合を V_{base} とする。トラック集合を K 、ドローン集合を L とし、トラック $k \in K$ の速度・容量を v_{track}^k, Q_{track}^k 、ドローン $l \in L$ の速度・容量・航続距離（片道）を $v_{drone}^l, Q_{drone}^l, D_{max}^l$ とする。各ドローンは初期割当 k_{assign}^l に専属し、発進・回収は同一トラックで完結する [1], [6]。同一トラックに割り当てられるドローンは同一仕様とし、航続距離はトラック単位の D_{max}^k で表す。作業時間パラメータとして、トラックの積み込み時間 t_{load} 、トラックの積み下ろし時間 t_{unload} 、ドローン配送先での荷下ろし時間 $t_{delivery}$ を定義する。

ノード間のユークリッド距離を d_{ij} 、道路グラフ上の最短距離を D_{ij} とする。トラック移動可能性は D_{ij} が有限であるかで判定し、ドローンは $d_{ij} \leq D_{max}^{k_{assign}^l}$ を満たす場合にのみ飛行できる [5]。トラック k の初期位置を S_{track}^k とすると、トラック到達性とドローン航続距離を同時に満たす配送可能集合を次で定義できる。

$$N_k^{dm}(i) = \{j \in V \mid D_{S_{track}^k, i} < \infty \wedge d_{ij} \leq D_{max}^k\} \quad (1)$$

すなわち、トラックが到達できる射出地点 i から、専属ドローンが航続距離内で到達可能なノードのみを配送候補とする。

2.2 決定変数

各トラック・ドローンの行動は操作列として表現し、厳密な MIP ではなく操作列を決定するスケジューリング問題として扱う [8]。需要点 i の需要量を q_i 、トラック k とドローン l の配送量を $y_{k,i}, y_{l,i}$ とし、需要充足は次式で表す。

$$\sum_{k \in K} y_{k,i} + \sum_{l \in L} y_{l,i} = q_i, \quad y_{k,i}, y_{l,i} \geq 0 \quad (2)$$

中継は積み替えに加え、拠点・中継点への再補給を伴うピストン輸送、需要の分割充足を含む広い概念として定義する [7]。

2.3 移動時間と制約

時間は離散化し、移動時間は天井関数で評価する。

$$t_{track}^k(i, j) = \lceil D_{ij} / v_{track}^k \rceil, \quad t_{drone}^l(i, j) = \lceil d_{ij} / v_{drone}^l \rceil \quad (3)$$

主要な制約は以下である。

- (1) **需要充足**: すべての需要は終了時までには充足される。
- (2) **容量**: トラック・ドローンの積載量は上限を超えない。
- (3) **航続距離**: ドローンは片道航続距離内のみ飛行する。
- (4) **同期**: ドローンの発進・回収は同一トラックと同時刻・同一ノードで行う [6]。
- (5) **在庫と中継**: 中継ノードの在庫は非負であり、搬入完了後のみ回収できる。

中継点 j の在庫 $I_j(t)$ は搬入・搬出量で更新される。ここで $\mathcal{A}^{in}(j, t), \mathcal{A}^{out}(j, t)$ は時刻 t における搬入・搬出作業の集合である。

$$I_j(t+1) = I_j(t) + \sum_{a \in \mathcal{A}^{in}(j, t)} q_a - \sum_{a \in \mathcal{A}^{out}(j, t)} q_a, \quad I_j(t) \geq 0 \quad (4)$$

中継点 j への搬入完了時刻を $\tau_{release}(j, m)$ 、下流トラックの受取開始時刻を $t_{start}^k(j)$ とすると、次の時間同期制約を課す。

$$t_{start}^k(j) \geq \tau_{release}(j, m) \quad (5)$$

2.4 目的

全需要を充足し、すべてのエージェントの完了時刻の最大値を最小化する。

$$T_{max} = \max \left(\max_{k \in K} C_k^{track}, \max_{l \in L} C_l^{drone} \right) \quad (6)$$

3. 提案手法

3.1 手法の流れ

提案手法は以下の手順で実行される。

- (1) 距離行列と到達可能集合の前処理を行う。
- (2) 連結成分を抽出し、成分間グラフを構築する。
- (3) 幅優先探索により中継パスを決め、初期解を生成する。
- (4) 中継挿入の動的計画法で実行可能な補給計画に補正する。
- (5) 焼きなまし法で近傍探索し、DAG シミュレーションで評価する。

3.2 前処理

前処理でトラックの最短距離行列 D_{ij} を算出し、トラック到達可能ノードとドローン配送可能集合を事前に列挙する。ノード数は数百程度を想定し、全点対最短路計算でも実用的な計算量に収まる。道路網が分断された場合は無向グラフとして連結成分を抽出し、成分間にドローン到達リンクを張った成分間グラフを構築する。成分内はトラックのみで到達可能であり、成分間はドローンの空路で接続される。成分間グラフは「トラック到達可能成分」と「ドローン飛行可能リンク」を統合した抽象グラフであり、中継の候補位置と到達順序を明示的に扱える点が特徴である。

3.3 初期解生成

成分間グラフ上で到達可能性を確認し、拠点成分から孤立成分への最小中継回数の経路を決定する。成分間グラフに対して

幅優先探索を行い、中継回数が最小となるパスを初期解の骨格として採用する。各トラックには拠点からの供給パスを割当て、中継ノードへの搬入・搬出の順序を決めることで初期解を構成する。この手順により、拠点成分から孤立成分へ段階的に物資を前進させる初期中継計画を得る。

成分間グラフで得られた中継順序は、孤立成分の優先度を保つため基本的に維持し、必要に応じて一時補給点を追加することで実行可能性を確保する。また、ドローン空輸とトラック移動の役割分担を操作単位で切り替えることで、道路分断の影響を受けにくい計画へ段階的に改善する。

3.4 中継挿入と近傍探索

配送順序が与えられたとき、中継拠点への補給タイミングを動的計画法で決定し、積載容量と作業時間を満たすスケジュールへ補正する。状態は訪問順序位置、残容量、中継利用状況で表し、到達可能な状態のみを展開する。候補補給点 u を経由する場合の所要時間 $T_{via}(u)$ を評価し、最小の T_{via} と直行配送 T_{direct} を比較して更新する。メモ化により再計算を避け、実験規模で計算可能な範囲に収める。

$$dp[i, w, s] \leftarrow \min(dp[i, w, s], T_{direct}, \min_u T_{via}(u)) \quad (7)$$

ここで、 i は訪問順序上のタスク位置、 w はその時点のトラック積載残量、 $s = (s_1, \dots, s_R)$ は各中継候補の利用回数ベクトルを表す。また、 T_{direct} は補給を挟まず直行する場合の所要時間、 $T_{via}(u)$ は補給候補ノード u を経由する場合の所要時間である。容量は離散化されているため、状態数は訪問順序長と離散容量に比例して増加し、中継候補を限定することで探索量を抑制できる。初期解に対して焼きなまし法を適用し、(1) 需要割当の変更、(2) 配送手段・順序の変更、(3) 中継構造の変更、の近傍操作を確率的に適用する。悪化解も温度パラメータに応じて確率的に受理し、局所最適からの脱出を図る。評価値差を Δ 、温度を T とすると受理確率は次式で表される。

$$P_{\text{accept}} = \begin{cases} 1, & \Delta \leq 0 \\ \exp(-\Delta/T), & \Delta > 0 \end{cases} \quad (8)$$

温度は幾何冷却で減衰させ、探索反復回数に達した時点で停止する。

3.5 近傍操作の例

主要な近傍操作を表 1 に示す。

表 1 近傍操作の例

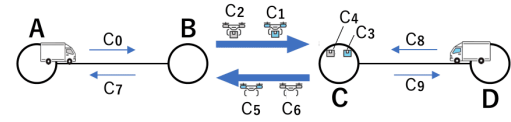
カテゴリ	操作内容
需要割当	需要量の交換, 近傍トラックへの再割当
配送手段	トラック配送とドローン配送の切替え
配送順序	訪問順序のシャッフル
中継構造	中継地点の追加・削除
中継位置	中継ノードの近傍移動
供給元	中継への供給トラックの変更

3.6 評価シミュレーション

候補解は依存関係 DAG に基づく離散事象シミュレーション

で評価する。在庫不足時は搬入完了まで待機し、依存関係にサイクルが生じる解は棄却してデッドロックを回避する。搬入イベント発生時に保留タスクを再評価し、条件を満たすタスクを実行集合へ戻す。各イベントの発生時刻に基づきタスクを逐次実行することで、積み替え遅延やドローン待機がメイクスパンに与える影響を直接評価できる。

シナリオ



依存関係

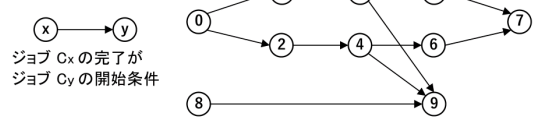


図 1 依存関係 DAG に基づく配送タスクの例。

4. 実験設定

1,000 × 1,000 の 2 次元平面にノードを配置し、ノード数 $|V| = 15 \sim 100$ 、拠点は約 1 割とした。距離単位を DU、時間単位を TU と定義し、作業時間 (t_{load} : 積み込み, t_{unload} : 積み下ろし, $t_{delivery}$: ドローン荷下ろし) は $t_{load} = t_{unload} = t_{delivery} = 1$ とした。物資の最小単位は 5 とし、需要量および積載量は 5 の倍数に離散化した。道路網はドロネー三角形分割により候補辺を生成し、道路破壊率 $p\%$ に応じて辺を除去する。トラックは速度 5 ~ 20、容量 50 ~ 250、ドローンは速度 30 ~ 60、容量 5 ~ 50、航続距離 100 ~ 300 とし、ドローン数はトラックごとに 5 機刻みでランダム (最大 500 機) とした。探索反復回数は 100,000 回とした。

表 2 主要パラメータの範囲

項目	設定
マップサイズ	1,000 × 1,000 [DU]
ノード数 $ V $	15 ~ 100
拠点数	約 1 割 (最小 1)
トラック速度	5 ~ 20 [DU/TU]
トラック容量	50 ~ 250
ドローン速度	30 ~ 60 [DU/TU]
ドローン容量	5 ~ 50
ドローン航続距離	100 ~ 300 [DU]
反復回数	100,000

5. 結果と考察

5.1 定性的評価

図 2 に評価に用いた初期フィールドを示す。拠点を含む連結成分から到達不能な孤立成分が複数存在し、トラック単独では全需要を充足できない構成である。

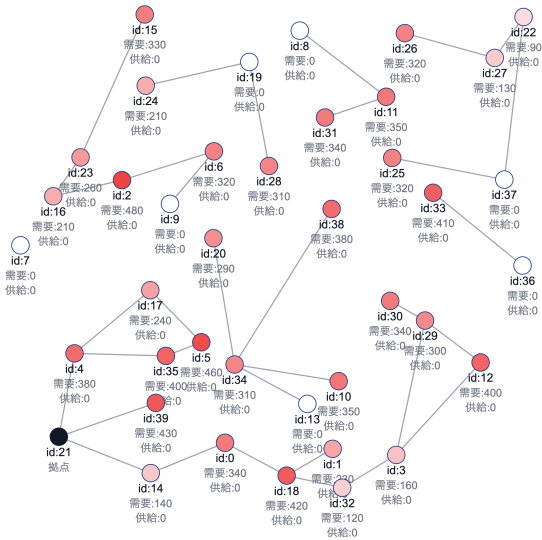


図2 評価に用いた初期フィールドと道路網の例.

図3は、多段階中継により物資が連鎖的に前進する様子を示す。トラックが到達可能な前線まで物資を運び、ドローンで中継ノードへ先行配置することで、厳密同期を避けながら孤立成分へ供給できることを確認した。図4は在庫の時系列推移を示し、搬入完了が先行し、後続トラックが在庫を回収する非同期連携が機能していることが分かる。

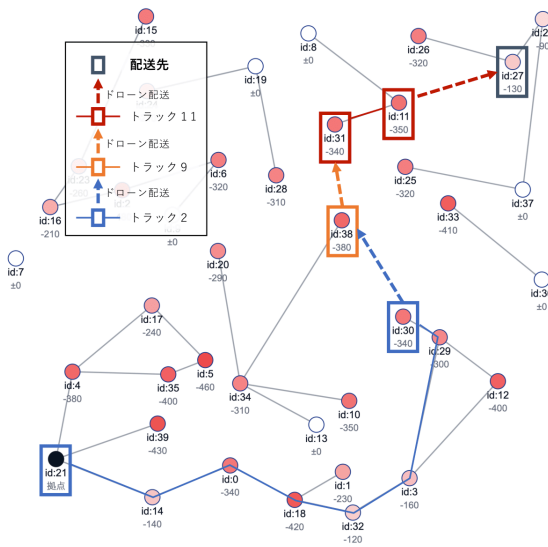


図3 中継在庫を介した多段階中継の概念図.

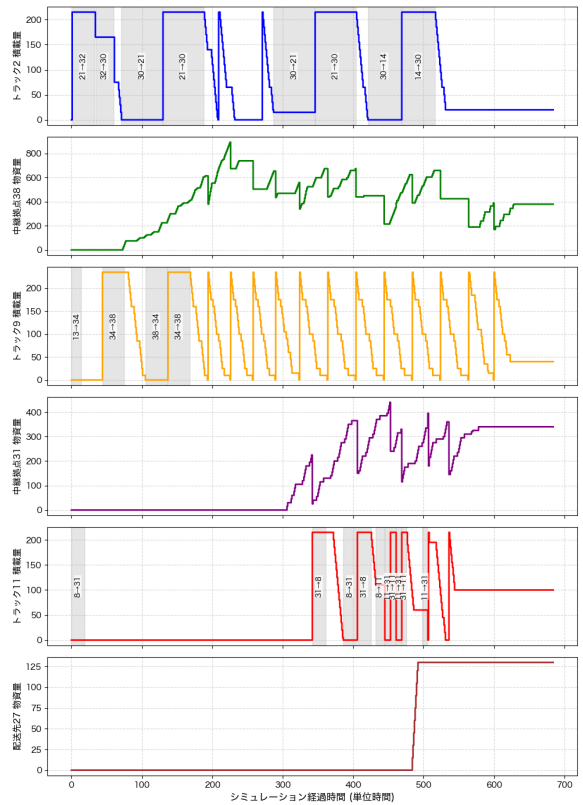


図4 中継在庫と配送量の時系列推移 (代表例).

5.2 定量的評価

本節では提案手法を、トラックのみ手法と中継なしペア配送手法と比較する。評価指標は配送完了率と配送完了時刻（メイクスパン）である。道路破壊率を0%～100%（10%刻み）で変化させた結果、提案手法は高破壊率条件でも配送完了率を維持した（図5）。低～中破壊率（0%～60%）では、トラックのみ手法が40%付近から低下し、60%で約80%まで落ち込む一方、提案手法とペア配送は概ね95%以上を維持した。高破壊率（70%～100%）では差が拡大し、破壊率80%でトラックのみ約20%、ペア配送約55%に対し、提案手法は約80%を維持した。破壊率90%でも提案手法は約60%を保ち、破壊率100%でも約40%の配送完了率を確保した。これは、中継在庫を介して複数トラックの到達圏を段階的に接続できるためである。

道路網が連結な条件のメイクスパン比較（図6）では、ペア配送と提案手法の中央値はトラックのみより大幅に小さく、約250 TU付近に集中した。一方で提案手法は積み替え処理や待機が増えるため、中央値ではペア配送と同等かやや不利な試行もある。ただし分布上端では提案手法の悪化が抑えられ、需要集中時に中継で負荷分散できる点が最大遅延の抑制に寄与した。

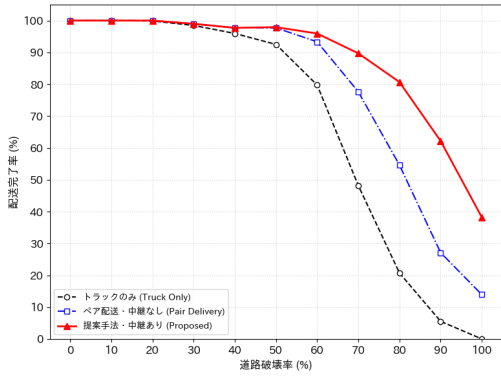


図5 道路破壊率に対する配達完了率の推移。

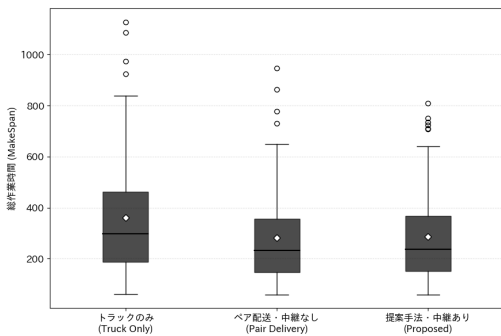


図6 道路網が連結な条件における配達完了時刻の比較。

5.3 アルゴリズムの評価

初期解生成には乱数要素を含むため、初期解依存性を評価した。100 試行で初期解コストと最終解コストの相関を調べたところ、相関係数は $r \approx 0.36$ であり、弱い正の相関にとどまった。この結果は、初期解の良し悪しに関わらず焼きなまし探索で一定水準まで改善できることを示す。

さらに 50 試行の探索ログを集計すると、探索前半は需要割当変更 (Allocation) が主に効き、中盤以降は中継構造変更 (Transfer) が継続的に改善を牽引し、終盤は配送順序変更 (Routing/Mode) が微調整として寄与した。すなわち、本手法は「大域構造の決定 → 中継ネットワーク再編 → 局所経路調整」の段階的な最適化過程を持つことが確認された。

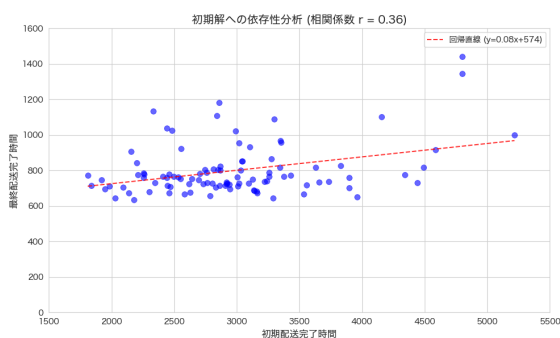


図7 初期解と最終解の関係 (100 試行)。

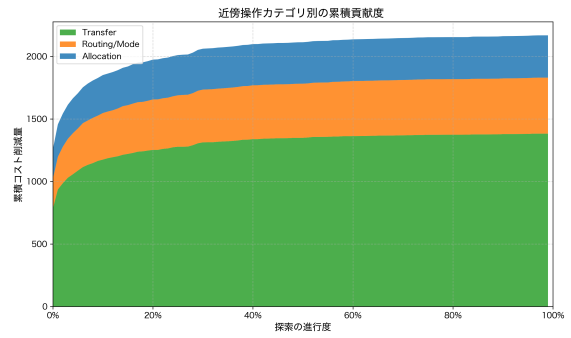


図8 近傍操作カテゴリ別の累積貢献度 (50 試行)。

5.4 自治体支援への応用

提案シミュレータを自治体判断支援に用いる例として、道路復旧優先度と中継拠点配置の 2 課題を評価した。道路復旧では、候補 3 区間の比較で Case B (5-34) が最良 (平均 463.9 TU)、次いで Case C (9-17, 489.7 TU), Case A (1-13, 577.9 TU) の順となり、復旧対象の選択で完了時間が約 20% 変化した。図 9 に道路を復旧させる候補位置を示す。

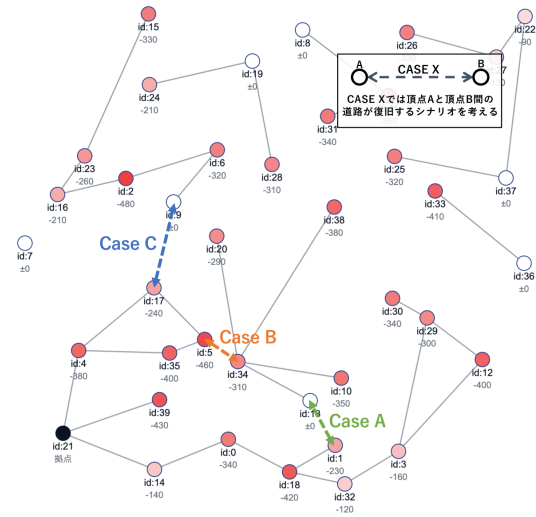


図9 道路を復旧させる候補位置を示した図。

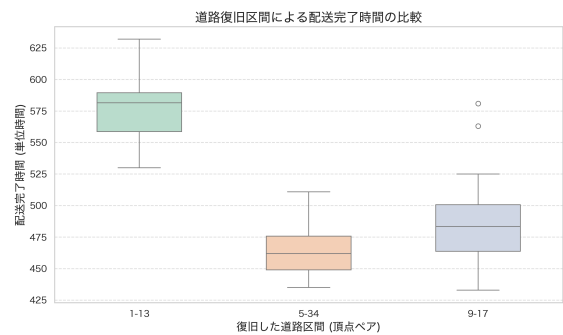


図10 道路復旧候補の比較 (自治体支援評価)。

中継拠点配置では、候補ノード 3, 4, 18, 29 から 2 点を選ぶ比較で、ペア (18,29) が最良、(3,4) が最下位となった。これは、拠点からの搬入リードタイムと、ドローン側の搬出需要のバラ

ンスが配置効果を左右することを示している。以上より、本手法は「どの道路を先に啓開するか」「どこを一時保管拠点にするか」を定量的根拠で比較可能な意思決定支援基盤として有効である。図 11 に中継拠点を配置する可能性がある頂点を示す。

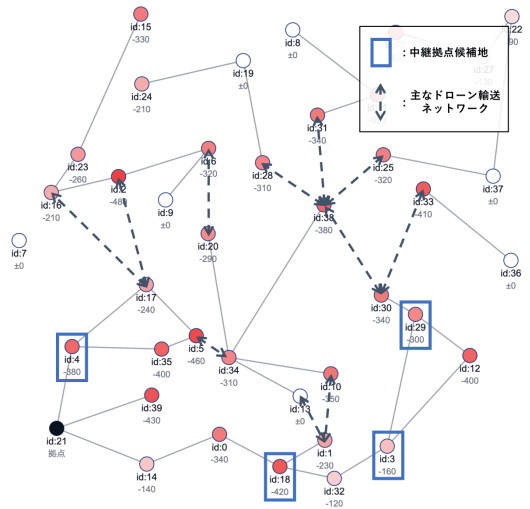


図 11 中継拠点を配置する可能性がある頂点を示した図。

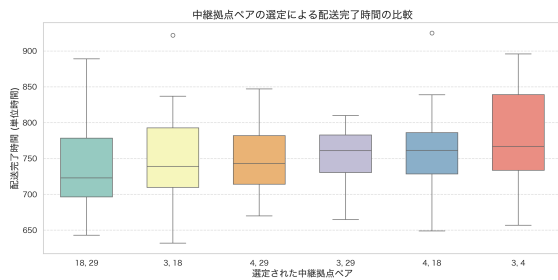


図 12 中継拠点配置の比較 (自治体支援評価)。

5.5 考 察

提案手法は、(i) 中継在庫を介した非同期連携により到達不能性を緩和し、(ii) トラックとドローンの役割分担を動的に切り替えることで効率を改善できる。特に、高破壊率条件で優位性が拡大した点は、「トラックの物理到達可能域」と「ドローンの空輸可能域」を中継で接続する設計が災害時の頑健性に有効であることを示す。

一方で、中継操作の増加は待機時間と計画複雑性を高めるため、軽度被害条件では単純なペア配送が有利な場合もある。今後は、需要優先度と道路復旧見込みを取り込んだ中継選択、ならびに計算時間制約下での近傍探索配分の最適化が課題である。

6. 結 論

災害時の到達不能性を前提に、トラック専用ドローン運用と物資積み替えを両立する協調配送計画を提案した。中継・分割配送を含む三層構造の計画表現、成分間グラフに基づく初期解生成、依存関係 DAG による同期シミュレーションを組み合わせることで、分断道路網における頑健な配送を実現できることを示した。

謝辞 本研究の一部は JSPS 科研費 JP25H01167, JP25K02946, JP25K24389, JP24K02765, JP24K02774, JP23K17006, JP23K28091, JP23K28383 の研究助成を受けて行われている。

文 献

- [1] C. C. Murray and A. G. Chu, “The flying sidekick traveling salesman problem: Optimization of drone-assisted parcel delivery,” *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 54, pp. 86–109, 2015.
- [2] N. Agatz, P. Bouman, and M. Schmidt, “Optimization Approaches for the Traveling Salesman Problem with Drone,” *Transportation Science*, vol. 52, no. 4, pp. 965–981, 2018.
- [3] S. Dang, Y. Liu, Z. Luo, Z. Liu, and J. Shi, “A survey of the routing problem for cooperated trucks and drones,” *Drones*, vol. 8, no. 10, Art. 550, 2024.
- [4] L. Zhang, Y. Ding, and H. Lin, “Optimizing synchronized truck-drone delivery with priority in disaster relief,” *Journal of Industrial and Management Optimization*, vol. 19, no. 7, pp. 5143–5162, 2023.
- [5] K. Dorling, J. Heinrichs, G. G. Messier, and S. Magierowski, “Vehicle Routing Problems for Drone Delivery,” *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, vol. 47, no. 1, pp. 70–85, 2017.
- [6] M. Drexler, “Synchronization in vehicle routing—A survey of VRPs with multiple synchronization constraints,” *Transportation Science*, vol. 46, no. 3, pp. 297–316, 2012.
- [7] P. Toth and D. Vigo (eds.), *Vehicle Routing: Problems, Methods, and Applications, 2nd ed.*, SIAM, 2014.
- [8] M. L. Pinedo, *Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems, 6th ed.*, Springer, 2022.