

ドローン運用のための戦略立案および市場設計に資するシミュレーションモデルの開発 Development of a simulation model that contributes to strategic planning and market design for drone delivery

中西 研介[†] 篠原 滉[†]
Kensuke Nakanishi Hiroshi Shinohara

松崎 健[‡]
Ken Matsuzaki

毛利 研[†]
Ken Mohri

1. はじめに

航空法が 2021 年 6 月 11 日に改正され、2023 年以降、飛行経路下への第三者の立入りを管理せずに操縦者から目の届かない距離まで無人航空機（以降、ドローン）を飛行させる「目視外、補助者なし、立入管理なし」（レベル 4）飛行が可能となる見込みとなった。ここで、ドローンとは航空法第 2 条第 22 項の「無人航空機」の定義に準じ「航空の用に供することができる機器で、構造上人が乗ることができないもののうち、遠隔操作又は自動操縦により飛行させることができるもの」とする。これにより、ラストワンマイル配送の一部にドローンが導入されることで配送事業の輸送エネルギーを再構築できる可能性があると言われている [1, 2, 3]。

本研究においては、2030 年以降における効率的なドローン運用のための事業戦略立案や市場設計を見据えて既存輸送モードにおけるラストワンマイル配送に注目、その結果として削減される CO₂ 排出量を計算機シミュレーションにより試算する。

2. 計算機シミュレーション概要

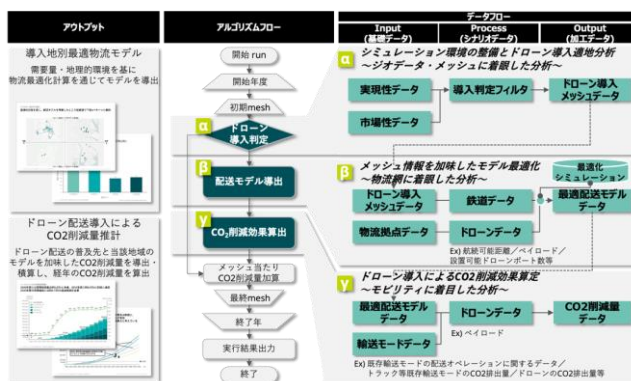
現時点（2023 年 3 月末）において、ドローン配送の実用化に向けた計画策定や機体の導入等に対する支援が国により行われているほか、全国各地で多様な実証事業が進められている [4]。未来をより現実的に見通すため、ドローン配送が実施されている市区町村をベースシナリオとして与えることなく、統計データおよび計算機シミュレーションに基づいて推定したことが本研究の特徴である（2.2 節参照）。

本研究では、配送ネットワークをモデル化し（図 2-3 参照）、ドローン導入に伴う CO₂ 排出削減量を計算する範囲を絞り込む（2.1 節参照）。その後、市町村区域における気象条件や地形、土地利用、公共施設などの国土に関する基礎的な情報を加味、最も効率よくドローンが飛行する配送経路を導出する（2.3 節参照）。

現時点におけるドローン配送シミュレーションの多くは、単一のエンドユーザの荷物を積載する場合のみを考慮する配送が前提となっている [4]。そこで本研究において、将来のドローン配送運用を想定の上、輸送コスト削減の観点から異なるエンドユーザの荷物をとりまとめ、ひとつの貨物とする「混載」まで議論できるようにする。ドローンが一度に運搬できる荷物容量（以降、ペイロード）に対して単位時間あたりの需要を満たすための平均混載パターンを推定することで、ラストワンマイル配送に必要な平均的なドローン台数が求められる（2.4 節参照）。

既存配送において品目毎に排出される CO₂ 量は異なる。そのため、品目別の需要量から排出される CO₂ 量を算出する。さらに、既存配送における CO₂ 排出量と求めたラストワンマイル配送に必要なドローンが排出する CO₂ 量の差を

算出する。この計算を日本全国の市町村区域毎に実施することで、ある時点のドローンラストワンマイルにより削減される CO₂ 量を求める。今回は、2023 年から 2040 年までを試算する。なお、本研究にて構築したドローン配送シミュレーションの概要を図 2-1 に示す。



ユレーションの概要を図 2-1 に示す。

図 2-1 ドローン配送シミュレーション概要

2.1 配送ネットワークにおけるラストワンマイル配送

本研究における配送ネットワークは、中心拠点（Hub）に貨物を集約させ、拠点（Spoke）毎に仕分けて運搬する輸送方式の Hub and Spoke 型 [5,6,7] を仮定し、有向グラフによってモデル化する。グラフを構成するノードに対し、その配送上での役割を考慮、取り得る親子関係を検討する。その結果、図 2-3 に示すようにラストワンマイルを担うドローン配送は、以下に示される部分ネットワークに限定することができる。

- (i) 配送拠点からドローンの配送先との接点となるドローンポート
- (ii) ドローンポートからドローンポート



図 2-2 東京都中央区近辺の 500m 矩形メッシュ別将来推計人口データ

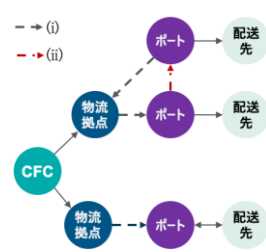


図 2-3 ラストワンマイル配送の配送ネットワーク

2.2 ドローン導入地域の推定

日本全国を 500m 矩形メッシュ領域に分割する。任意の市区町村内における 500m 矩形メッシュ領域に点在する配送拠点（図 2-2 参照）のある年度におけるドローン導入は、以下に示す「(i) 市場性」、「(ii) 実現性」と定義した指標から判断する。ある年度の任意矩形メッシュ領域において市場性と実現性がともに 1 の場合は最もドローンが導入さ

[†] 有限責任監査法人トーマツ デロイト アナリティクス
Deloitte Analytics, Deloitte Touche Tohmatsu LLC

[‡] デロイト トーマツ コンサルティング 合同会社
パブリックセクター

Government & Public Sector, Deloitte Tohmatsu Consulting LLC

れるポテンシャルが高いことを示し、逆に、0 に近い場合は低いことを意味する (図 2-4 参照)。

- (i) 市場性：規格化した顕在需要量
- (ii) 実現性：規制・気象・墜落リスクの逆数

それぞれの指標で使われる統計量について表 2-1 に示す。

市場性と実現性のどちらが重視されるかについては、議論の余地がある。本研究では導入が進むにつれて社会のドローン配送への許容は実現性重視から市場性重視へシフトしていくと想定する。これをパラメータとして重視項目の切り替え年度を設定しシナリオを決定、ドローン導入判定の領域を (1,1) を中心とする楕円によって判定する (図 2-4 参照)。

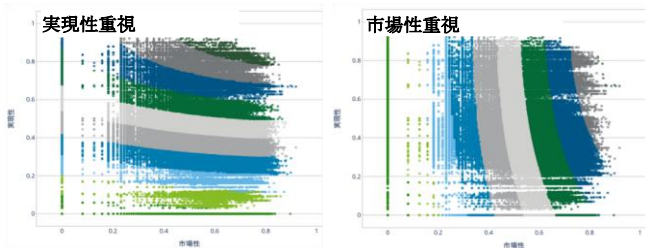


図 2-4 全国矩形メッシュ領域における導入ポテンシャル

表 2-1 「市場性」および「実現性」の統計量

大区別	統計量	データ参照元
市場性	配送量	デロイト独自推計データ(品目別)
	配送面積	ドローンポート数
	普及曲線	イノベータ理論に基づくパラメータ
実現性	鉄道路線	国土数値情報ダウンロードサービス
	重要施設	国土数値情報ダウンロードサービス
	都市区分	総務省統計局 社会・人口統計体系
		都道府県データ 社会生活統計指標
	気象条件 (風速, 降雨, 積雪)	国土交通省 気象庁 過去の気象データ・ダウンロード (2018/1/1 - 2022/12/31)

2.3 配送需要を担当する配送拠点割り当て

市区町村単位の対象地域における任意の 500m 矩形メッシュ内で発生した単位あたり時間の需要に対して、どの配送拠点からドローン配送が実施されるかについて「割り当てる」ことで飛行経路が定まる。矩形メッシュの配送需要を担当する配送拠点割り当ては、施設配置問題 [8] において総飛行距離と配送する需要量の積を最小化することで決定する。ただし、この割り当てを考える前に以下に示す 3 つの場合分けをする。

- (a) 配送拠点が 1 つのみの場合：その配送拠点が割り当てられる
- (b) 配送拠点が 2 つ以上ある場合：施設配置問題を解く
- (c) 配送拠点が存在しない場合：いずれの割り当ても行われず、その地域ではドローン配送は行われない

さらに、ある矩形メッシュについて、特定の配送拠点の割り当てが問題上可能であっても、以下のような場合には当該矩形メッシュへの割り当ては実施されないこととする。

- (a) 上空の飛行が制度上禁止されている皇居や空港等の重要施設を持つ矩形メッシュ (以降、飛行禁止区域)
- (b) 飛行禁止区域は通過することも不可のため、矩形メッシュと配送拠点の線分上にこれがある場合
- (c) 配送拠点からの距離がドローンの飛行可能な距離を超える場合
- (d) 需要やドローンポートを持たない矩形メッシュ

各配送拠点はドローン配送需要に対応できる「キャパシティ」が存在するため、施設配置問題として計算する際の制約として設ける。キャパシティは、各配送拠点に導入可能なドローン台数や離発着場所の面積など実質的な制約を与えるために利用できる。ここで、配送需要量が配送拠点のキャパシティを超える場合など、制約を満たす解が存在しないことがあり得る。このような場合、ドローンで対応できない需要は既存配送にて実施されることを想定する。ドローン配送シミュレーションにおいては、段階的に 1 より小さい係数で各矩形メッシュの配送需要量に抑制かける。このように均質な制限を設けることで、解が存在しない実行不能な問題が生じないように対処する。

2.4 平均混載パターンに基づく必要ドローン台数の推定

ドローンの混載パターンは、ドローンポート毎の近隣で確率的に発生するエンドユーザの需要量に依存する。そこで、ドローンポートに近隣するエンドユーザ数を仮定、単位時間当たりの平均需要量に基づきポアソン乱数を生成する。平均需要量は配送品目ごとに設定されるものとし、それぞれについて乱数を生成する。このように生成したエンドユーザの需要量に対し、効率的な輸送が行われる前提のもと、ビンパッキング問題 [8] を解いて混載パターンを得る。このような確率的な実験結果を多数取得することで、単位時間あたりの需要を満たすための平均混載パターンを算出する。

ペイロードや需要量、ドローンポート近隣のエンドユーザ数等は経年で変化する。日本全国に想定したドローンポートについて、上記のシミュレーションを実行するとかなりの計算量を要することとなる。そこで、市区町村毎の地域に点在するドローンポートを地域種別と近隣のエンドユーザ数でまず層別し、次に近隣の平均需要量の重さを表すベクトルにもとづいてクラスタリングを実施する。これを配送事業者別に行い、それぞれのクラスタリングの代表点について、上記のモンテカルロシミュレーションを実行する。

このように混載パターンが必要となる際には、上記で最も近い結果を参照することで計算量を削減する。また、ビンパッキング問題の求解においても計算量を考慮し、列生成法にもとづく近似解法を利用する [8]。

2.5 ドローン配送導入に伴う CO₂ 削減量

ある年度の配送拠点における事業者毎のドローン配送導入に伴う CO₂ 削減量は、以下に示す「(i) 代替される既存配送」と「(ii) ドローン配送」それぞれにおける CO₂ 排出量の差を取ればよい。

- (i) 2.2 節に従い推定されたドローン導入地域における”2tトラック”や”軽トラック”など複数の既存配送モード別に CO₂ 排出量を算出
- (ii) 2.3 節にて推察された割り当てパターンを利用、ドローンが出発地点から到着地点まで直線的に飛行することを仮定、2.4 節で算出される最小ドローン台数に基づく「飛行回数」と「往復の飛行距離」、 「単位距離あたり CO₂ 量排出量」の積にて算出

なお、血液や重要書類、オンデマンド配送など、通常の配送と異なり、送り手から直接エンドユーザへと配送される

場合がある。このような場合においても、個別に同様の計算にて CO₂ 削減量を算出することが可能である。

ドローンによって代替される配送量は、既存配送モード別「① 1 便あたりの配送荷物量」とそれぞれの「② 便数」の積によって計算される。ドローンによる配送量の代替は、これらの片方あるいはその両方が減少すると考える。ここで、1 便あたりの配送量を増やし、そもそもの便数を減らすような効率化の工夫は、簡単のため考えないこととしている。そのため本研究では、「① 1 便あたりの配送荷物量」がドローン配送により代替されることを「部分置き換わり」、「② 便数」自体の代替を「全体置き換わり」と表現する。部分置き換わりでは既存配送に対してドローンは 1 便の総距離を減少させる寄与となる、一方、全体置き換わりは便自体がなくなるため両者の CO₂ 削減効率が異なる。また、人件費や配送手段の維持コストを考慮しても全体置き換わりの方が好ましい。よって、全体置き換わりを積極的に実現したい動機のもと、配送拠点にて単位時間に発生する需要量が既存配送における 1 便の荷物量を超える分を全体置き換わり、残った分を部分置き換わりと想定、それらの比率を見積もる。

3. 計算機シミュレーション結果

3.1 前提条件

事業者ヒアリング及びデスクトップ調査に基づき [9]、パラメータ設定、計算機シミュレーションを実行した。ただし、考察の簡単化のため以下の設定を追加している。まず配送事業者を主要 2 社とし、統合した 1 社として扱った。これは、将来的にドローンやドローンポート、配送拠点等、無人配送ソリューションを実行する上で必要な機械・設備の他業種・競合とのシェアリングを進める方針に基づく [9]。さらに、現状、鉄道上空は飛行禁止区域であるが、将来的に解除されること、それがいつであるかの検討を回避するため、飛行禁止区域の条件から除外した。

3.2 計算機シミュレーション結果

図 3-1 に施設配置問題の結果例を示す。図 3-1 は、十分にドローン導入が進んだ 2040 年の結果である。都市区分が大都市である東京都足立区と過疎地域である新潟県長岡市の結果を示す。東京都足立区には、配送拠点が密に存在し、各配送拠点が担当する地域数は少なく、飛行距離も短いことがわかる。逆に、新潟県長岡市では、需要に対して必ず近隣に配送拠点があるわけではなく、飛行距離が比較的長くなっている。施設配置問題を解くことによって、地域差を反映した配送の想定がたてられていることがわかる。

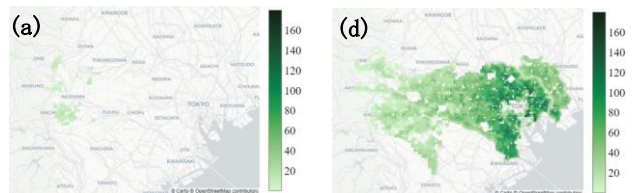


図 3-1 (a) 東京都足立区と (b) 新潟県長岡市における施設配置問題の結果

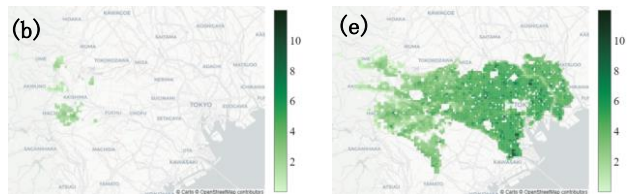
図 3-2 に東京都のドローン配送需要量、1 時間あたりのドローンの飛行回数、ドローン導入による CO₂ 削減量の見積もりを示す。なお、左列に 2025 年、右列に 2035 年の図を示す。図 3-2 上段 (a), (d) は需要量のヒートマップであり、これは計算機シミュレータへの入力情報の一部である。2025 年は東京都の西側で少し需要があり、2035 年には東京全域で需要がある。これに対する必要なドローン飛行回数を、図 3-2 中段 (b), (e) に示す。図 3-2 (a) と (b) にヒートマップの濃淡の差があまり見られないのに対し、(d) と (e) を比較すると、(e) のほうが均質なヒートマップに見える。これは、経年でエンドユーザごとの需要量が上昇するにつれて、同時発送が可能となる確率も上昇し、ドローン配送において混載が実施された結果と考えられる。図 3-2 の (c) と (f) は CO₂ 削減量の見積り値のヒートマップを示す。需要に比例するような CO₂ 削減量の見積りが示された。

最後に、図 3-3 に 2040 年を 1.0 とした、日本全体における経年の CO₂ 削減量を示す。本研究にて設定したパラメータでは、2030 年ごろに都心部に導入が広がり、大きく削減量が伸びて行く結果となった (図 3-4 参照)。

ドローン配送需要量 (単位: kg)



1 時間あたりのドローンの飛行回数 (単位: 回/単位時間)



CO₂ 削減量の見積り値 (単位: kg)

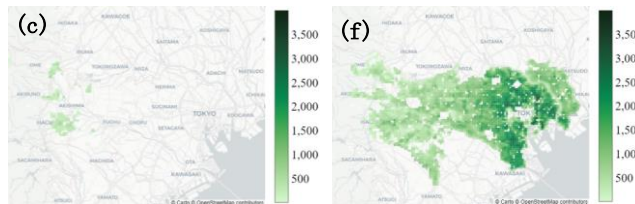


図 3-2 左列:2025 年、右列:2035 年における東京都のドローン配送需要量、1 時間あたりのドローンの飛行回数、ドローン導入による CO₂ 削減量の見積もり

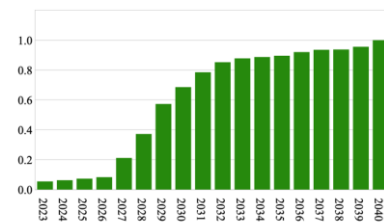


図 3-3 2040 年を 1.0 とした、日本全体における経年の CO₂ 削減量の見積もり結果

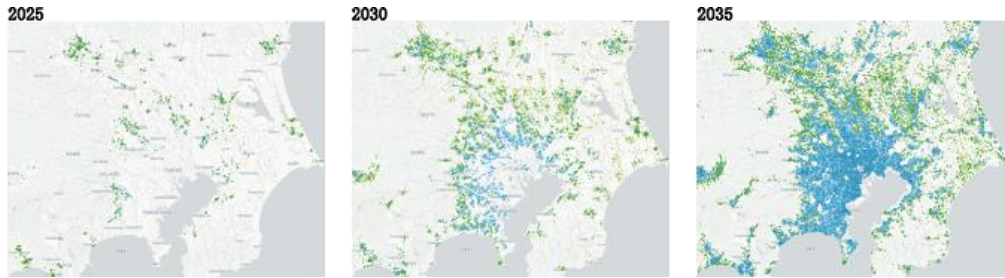


図 3-4 2025 年, 2030 年, 2035 年における関東地方周辺でのドローン配送による CO₂ 削減量

4. おわりに

現時点では配送を行う車両における動力の多くが、化石燃料を使用しており、これをドローンに置き換えると以下の理由から CO₂ の排出量を削減できるとされている。

- ① バッテリーで飛行するドローンへの置き換えによる、排気ガスの形で排出される CO₂ の削減
- ② 配送効率化による使用されるエネルギー量の抑制

本研究において、日本全国を 500m 矩形メッシュで分割、将来予測も含めてドローンを使って配送を行った場合に他の手段よりもエネルギー消費量を削減できることを想定し、CO₂ 削減量を推定する計算機シミュレータを開発した。その結果、日本全国においてドローン配送の初期参入点の特定のみならず、時空間的にどのようにドローン配送が広がっていくのかを可視化でき、その際の CO₂ 削減量の見積もり値を得ることができた。

今後の課題として、上記計算機シミュレーションをより精緻なものにするため中央省庁のロードマップや発行物をベースに、事業者の実装方針・技術開発動向等を参考に普及シナリオを作成、精緻な CO₂ 削減量の見積もり値を得ることが必要である。具体的には、①マーケット/②規制/③事業者(技術・サービス)/④事業性を左右するステークホルダーの 4 観点から、各種動向を調査し、シナリオを作成することが求められる。マーケット動向においては、2023 年から過疎地を中心に社会実装開始、2030 年から都心郊外部に進出していくものと想定される。規制についてはレベル 4 解禁を前提とする必要がある。また、事業者については特に配送効率改善・配送網の在り方に影響する航続距離・ペイロード等、経年技術進展があるものと想定される。最後に、ステークホルダーは特に鉄道上空における飛行可否の動向を設定するため、更なる調査と本研究にて構築した計算機シミュレータによる検証が必要となる。

最後に、本研究で開発した計算機シミュレータは大型のドローンで重量のある荷物を運ばせた場合や、悪天候時の消費エネルギーの変化も加味できる。それは、将来的にドローン導入に際する CO₂ 削減量の見積もり値を推定したが、ドローン導入を検討するために参考となる損益分岐点や地理的特性に即したドローン配送経路(パターン)を計算することを想定しているためである。

本研究において、ドローンが他の輸送手段よりもエコな選択肢になり得ることは一定程度示すことができた。今後は配送の効率化やスピードアップといった観点からだけでなく、過疎化や地方創生をはじめとする都市化の観点からもドローン配送を議論していきたい。

謝辞

本論文を推敲するにあたりビジネス上の示唆を与えてくださったデロイトトーマツコンサルティング合同会社 高柳 良和さんに、謹んで感謝の意を申し上げます。

また、本研究にてジオアナリティクスデータの収集と加工の支援をしてくださった株式会社 truestar のデータエンジニアの方々には心より感謝を申し上げます。

最後に、Deloitte Analytics の研究開発部門をリードしている神津 友武さんには、本研究の進行から本論文への推敲まで終始適切な御助言と御指導を賜りました。心から敬意と感謝の意を表します。

参考文献

- [1] J.K. Stolaroff, C. Samaras, E.R. O'Neill, A. Lubers, A.S. Mitchell, and D. Ceperley, "Energy use and life cycle greenhouse gas emissions of drones for commercial package delivery", *Nature Communications*, Vol.9, No.409 (2018).
- [2] O. Dukkanci, B.Y. Kara, and T. Bektaş, "Minimizing energy and cost in range-limited drone deliveries with speed optimization", *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol.125 (2021).
- [3] T.A. Rodrigues, J. Patrikar, N.L. Oliveira, H.S. Matthews, S. Scherer, and C. Samaras, "Drone flight data reveal energy and greenhouse gas emissions savings for very small package delivery", *Patterns*, Vol.3, No.8 (2022).
- [4] 安部 遼祐, 西田 聡美, 鈴木 淳一郎, "地域の輸送資源を活用した物流ネットワーク最適化に関する調査研究(中間報告)", *国土交通政策研究*, 第 169 号 (2022).
- [5] Y.S. Chang and H.J. Lee, "Optimal delivery routing with wider drone-delivery areas along a shorter truck-route", *Expert Systems with Applications*, Vol.104, No.15 (2018).
- [6] C.F. Gao, Z.H. Hu, and Y.Z. Wang, "Optimizing the hub-and-spoke network with drone-based traveling salesman problem", *Drones*, Vol.7, No.1 (2023).
- [7] Y. Liu, "An elliptical cover problem in drone delivery network design and its solution algorithms", *European Journal of Operational Research*, Vol.304, No.3 (2023).
- [8] 梅谷 俊治, "しっかり学ぶ数理最適化", 講談社, (2020).
- [9] 国土交通省 総合政策局 物流政策課物流効率化推進室, "ドローン物流の利活用に関するセミナー", https://www.mlit.go.jp/report/press/tokatsu01_hh_000671.html, (2023).