

新型コロナウイルス感染症のパンデミックにおける緊急時の都市内配送マネジメント

京都大学学際融合教育研究推進センター・レジリエンス実践ユニット 特任教授 ○ 谷口栄一
京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻 准教授 Ali Gal Qureshi

1. はじめに

新型コロナウイルス感染症によるパンデミックのために、店舗の自粛によって従来の買い物が難しくなりネットショッピングが増加し、またテレワークの導入による巣ごもり需要の増加などの影響で、eコマースの需要が増え、宅配の物流量が急激に増加した。例えばある食品宅配サービスにおいて、2020年4月の配送量は前年同期比でコメが75%増、冷凍食品が37%増、生活雑貨が29%増となっている。また従来からのドライバーの人手不足のために、需要が急増したとしても急に宅配の配送トラック台数を増やすことは困難である。このような状況において、宅配のサービスレベルを維持し、市民生活を守るために、緊急時の都市内配送を最適化するための様々な施策を実施する必要がある。今回の新型コロナウイルス感染症によるパンデミックは突然世界中に広がったものであり、また感染リスクを下げるために人との接触を避けなければならないという状況において、対応が困難であった。今後また、新型の感染症によるパンデミックが起こることが想定されるため、宅配需要が急激に増加した場合に、都市内配送のサービスレベルを維持するために人工知能(AI: Artificial Intelligence)を用いた配送ロボットなどの新技術を活用した緊急の対応策を考えておくことが必要である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、前述の課題を解決するために、新型コロナウイルス感染症のパンデミックなどによる急激な宅配需要増加に対応して、配送ロボットを活用して配車配送計画を最適化する方法を開発し、緊急時の都市内配送のサービスレベルを維持するための施策についてその効果を明らかにすることである。また、ここで開発した方法を大阪市の道路ネットワークに適用し、配送ロボットの活用による総配送コストの削減、他の交通機関との連携、共同配送などの施策の効果を明らかにし、今後の緊急時の都市内配送マネジメントに貢献する方法論を示す。

3. 従来の研究

近年、都市内配送における自動運転配送トラックおよび配送ロボットの利用に関する研究が行われるようになった。Taniguchiら(2020)は、都市内配送において自動運転配送トラックおよび配送ロボットを利用することによって、配送コストおよび環境負荷を低減する効果があることを指摘した。Boysenら(2018)は、都市内配送において、トラックをベースとする配送ロボットによる物資配送について、配送スケジュールを最適化するモデルを用いて、顧客への配送遅れを最小化する方法を検討した。Simoniら(2020)は、トラックと配送ロボットを用いたシステムによる端末配送について研究を行い、もし配送ロボットが交通混雑の激しい地域において用いられれば、効果が大きいことを指摘した。Chenら(2021)は配送ロボットがCOVID-19のパンデミックのような場面において用いられれば、接触リスクを最小化させることができることを示した。Figliozzi and Jennings(2020)は、配送

ロボットを用いることによってエネルギー消費および CO₂ 排出量をかなり削減できることを示した。

4. 大阪市の都市内配送における配送ロボットの活用に関する研究

新型コロナウイルスによるパンデミックにおける都市内配送において、通常のディーゼルトラックに代わって電動の配送ロボット（写真1参照）を活用することによって、どのような効果が得られるかという点について、配車配送計画問題として、大阪市中心部を対象として研究を行った。また、動くハブ(moving hub)としてマザーシップバン(mothership van)を用いて複数の配送ロボットを顧客の近傍まで輸送し、そこから配送ロボットによる配送を行う方法（Boysen ら、2018）、タクシーとの連携、共同配送を導入した場合の効果についても検討を行った。以下に研究の方法、大阪市中心部への適用、結果および考察について述べる。



写真1 配送ロボットを用いた藤沢市における配送実験（出所：東洋経済オンライン）

4. 1 研究方法

本研究においては、都市内配送において、物流事業者が配送拠点であるデポから出発して複数の顧客に物資を配送するケースを考える。一般に、都市内の物資配送は、小型のディーゼルトラックを用いて行われる。このような問題は、配車配送計画問題として把握することができる。数理モデルを定式化して最適解を求めることもできるが、本研究においては、物流事業者の実際の配送について調査を行った配送トラックのプローブデータが得られているので、このプローブデータを用いて研究を行う。ケース1として、ディーゼルエンジンの配送トラックによる実際の物資配送を取り上げる。配車配送計画において、顧客が物資を配送してほしい時間帯、すなわちタイムウィンドウ(time windows)が与えられており、そのタイムウィンドウを満たしながら配送トラックは顧客に物資配送を行う。次にケース2として、同じデポと顧客の位置、タイムウィンドウの設定が与えられているときに配送トラックの代わりに配送ロボットを用い、配送ロボットがデポから直接顧客に物資を配送するケースを取り上げる。ケース3としては、配送ロボットを用いるケース2に加えてタクシーとの連携を考慮する場合を考える。ケース4においては、配送トラックの代わりに配送ロボットを用い、デポからマザーシップバンが配送ロボットを顧客近傍まで輸送し、マザーシップバンからロボットが出発して顧客に物資配送を行う場合を考える。ケース5においては、複数の物流事業者間で共同配送を導入する場合を考える。

(ケース1) 通常の配送トラックを用いて配送を行う。

(ケース2) 配送トラックの代わりに配送ロボットを用い、配送ロボットがデポから直接顧客に物資を配送する。配送ロボットは、積載量が限られるので、デポと顧客間のピストン配送を行い、ルート配送は行わないと仮定する。

(ケース3) (ケース2)に加えてタクシーとの連携を行う。配送ロボットによるデポから顧

客への往復配送時間が 40 分以上となる場合にタクシーに転換させる。

- (ケース 4) 配送トラックの代わりに配送ロボットを用い、デポからマザーシップバンが顧客近傍まで行き、マザーシップバンからロボットが出発して顧客に物資配送を行う。
- (ケース 5) 複数の物流事業者間で共同配送を導入する。

各ケース 2、3、4、5 における総配送コストについて、ケース 1 との比較を行って考察を加える。配送ロボットは電気で走行するため、走行時に地球温暖化に関する CO₂ やローカルな大気汚染に関する NO_x などは排出しない。また、トラック配送のように、物資配送時にドライバーが顧客と接触することがないので、新型コロナウイルスによる感染のリスクは低い。配送ロボットによる配送は従来のディーゼルトラックによる配送に比べて、このような利点を持っているが、導入にあたっては、コスト面における検討が必要であるので、ここでは配送ロボットを導入した場合の総配送コストについて主に検討する。

物流事業者へのヒアリングに基づいて、検討に用いた小型配送トラックのコストは、固定コスト 10,417 円/日、運行コスト 14.02 円/分とした。配送ロボットの固定コスト、運行コストについてはまだ実際のロボットの運用が行われておらず、不明な点が多いので、配送ロボットの実験を行っている企業へのヒアリングに基づいて、値をいくつか変化させてその影響を検討した。なお、配送ロボットの速度は人間が歩く速度 (約 4 km/時) と同じと仮定した。タクシー料金については、2 km までは 500 円、その後 80 円/300m とした。また、顧客位置に配送ロボットが到着後、顧客が配送ロボットから物資を受け取るまでに 10 分かかるものと仮定した。



図 1 大阪市中心部における物流事業者 A、B のデポと顧客の位置

4. 2 大阪市中心部への適用

上記のような配車配送計画問題を、大阪市中心部を対象として適用した。図1に大阪市中心部における物流事業者 A、B のデポおよび顧客の位置を示す。なお、顧客位置は、2014年9月28日における配送トラックのプロブデータから推定した。物流事業者 A の顧客の数は33、物流事業者 B の顧客の数は170である。なお、顧客への物資配送の指定時刻帯（タイムウィンドウ）は、午前8時—午後2時、午後2時—4時、午後4時—6時、午後6時—8時である。

配送ロボットの初期コスト、運行コストが配送のパフォーマンスに影響を及ぼすと考えられるので、表1に示すような4つのシナリオを設定して、感度分析を行った。配送ロボットの初期コストについては、配送ロボットのメーカーへのヒアリングに基づいて設定した。また、配送ロボットの運行コストについては、データがないので、小型電気トラックの運行コストの約1/2 および約1/4と設定した。

表1 設定したシナリオ

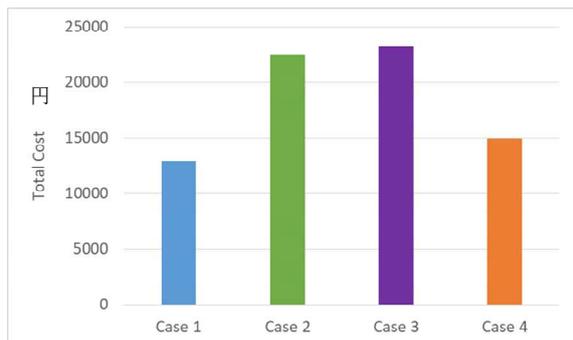
シナリオ	配送ロボットの初期コスト (円/日)	配送ロボットの運行コスト (円/分)
1	1,200	5.0
2	1,200	2.5
3	600	5.0
4	600	2.5

4. 3 結果および考察

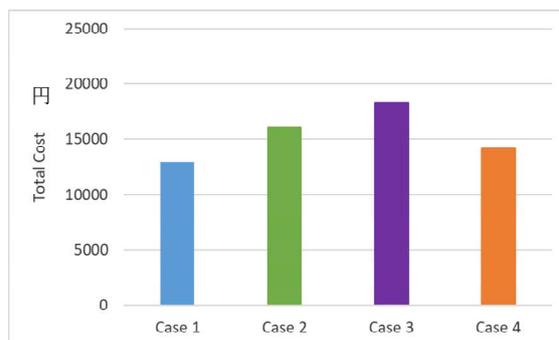
図2は、物流事業者Aの配送について、各シナリオの総配送コストの比較を示している。図2 (a) の配送ロボットの初期コストが1,200円/日、運行コストが5.0円/分のシナリオ1においては、ケース2の配送ロボットがデポから直接各顧客に配送しデポに戻る場合、およびケース3のタクシーと連携する場合は、ともにケース1よりもコストがかなり増加している。ケース4のマザーシップバンが顧客近傍まで行く場合には、ケース1よりも若干高めの総配送コストとなっている。図2 (b) において、配送ロボットの初期コストはシナリオ1と同じ1,200円/日とし、運行コストをシナリオ1の半分の2.5円/分としたシナリオ2においては、ケース2、3の総配送コストはケース1より大きい、シナリオ1に比べるとケース1との差は少ない。ケース4の総配送コストはケース1とほぼ同程度となっており、配送ロボットの運行コストを下げることによる総配送コストへの影響がかなり大きいことが分かる。図2 (c) の運行コストをシナリオ1と同じ5.0円/分とし、初期コストをシナリオ1の半分の600円/日としたシナリオ3においては、シナリオ2と同程度の効果がみられる。最後に図2 (d) の配送ロボットの初期コストをシナリオ1の半分の600円/日とし、運行コストをシナリオ1の半分の2.5円/分としたシナリオ4においては、ケース2の総配送コストがケース1よりも小さくなっており、この程度の初期コスト、運行コストになれば、配送ロボットによる直接配送の総配送コストが、従来の配送トラックによる配送よりも小さくなることが分かる。また、ケース3、4においても総配送コストはケース1とほぼ同程度になっている。したがって、配送ロボットの初期コスト、運行コストがかなり低くなった場合には、配送ロボットの運用として直接顧客に配送する場合も、マザーシップバンを用いる場合も、従来の配送トラックを用いる場合とほぼ同程度の総配送コストになり、配送ロボットの活用がコスト面において可能であることを示

峻している。また、タクシーとの連携も可能性があることが分かる。

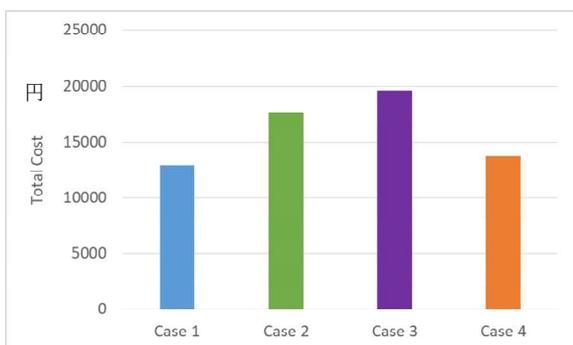
表 2 は、これらのシナリオで必要となるトラックあるいはマザーシップバン、配送ロボット、タクシーの台数を示している。4つのシナリオにおいて、これらの台数は結果としてすべて同じであった。ケース 2 においては、8 台の配送ロボットが必要であるが、ケース 4 において、1 台のマザーシップバンを用いることによって必要な配送ロボット台数を 2 台に削減することができる。またケース 3 において、タクシーとの連携をはかることによって必要な配送ロボット台数を 6 台に削減することができる。



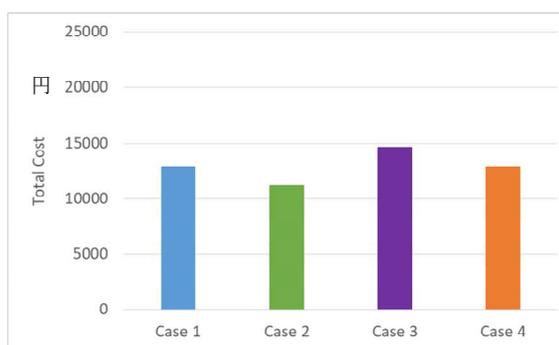
(a) シナリオ 1 : 配送ロボットの初期コスト 1,200 円/日、運行コスト 5.0 円/分



(b) シナリオ 2 : 配送ロボットの初期コスト 1,200 円/日、運行コスト 2.5 円/分



(c) シナリオ 3 : 配送ロボットの初期コスト 600 円/日、運行コスト 5.0 円/分



(d) シナリオ 4 : 配送ロボットの初期コスト 600 円/日、運行コスト 2.5 円/分

図 2 物流事業者 A の総配送コストの比較

表 2 配送に必要となるトラックあるいはマザーシップバン、配送ロボット、タクシーの台数 (シナリオ 1 - 4 で同じ)

ケース	トラックあるいはマザーシップバンの台数	配送ロボットの台数	タクシーの台数
1	1	0	0
2	0	8	0
3	0	6	7
4	1	2	0

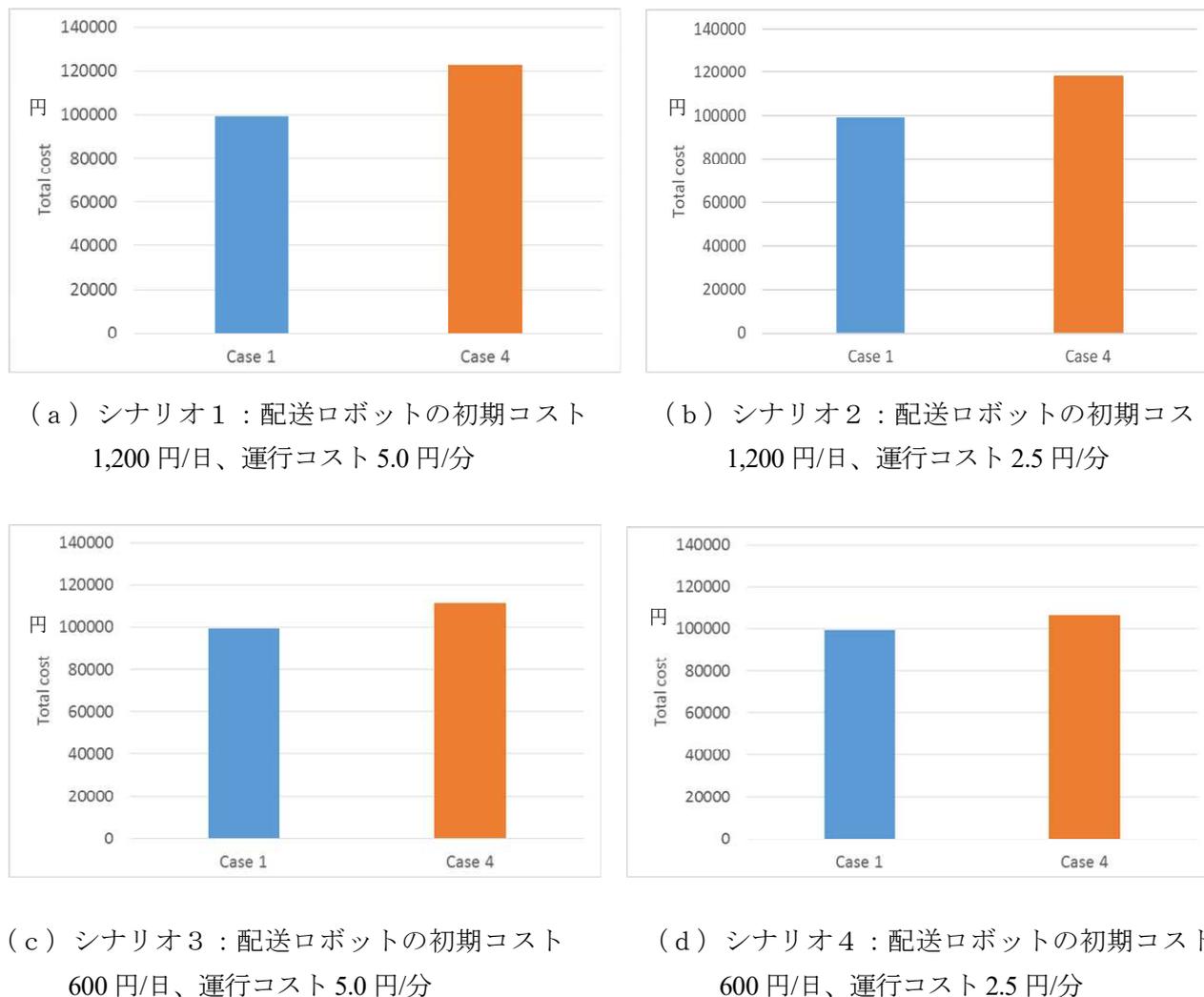
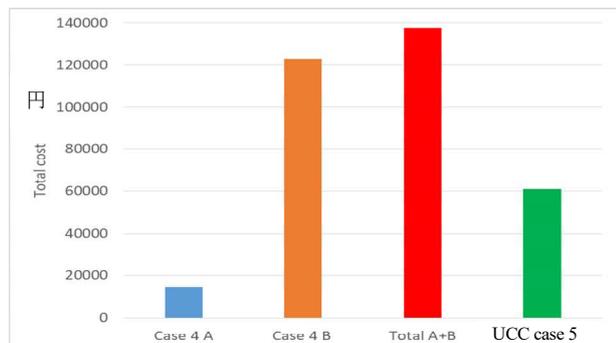


図 3 物流事業者 B の総配送コストの比較

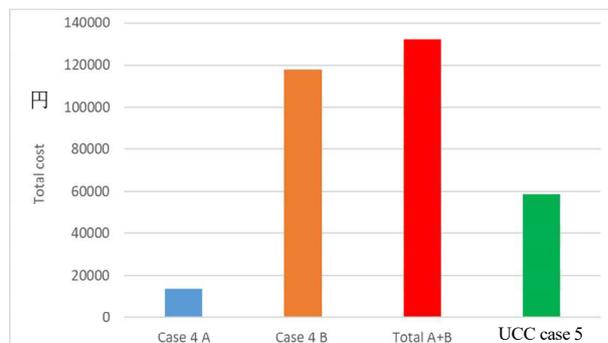
図 3 に物流事業者 B の各シナリオの総配送コストの比較を示す。物流事業者 B のデポから配送先の顧客までの距離が約 8 km あり、ケース 2、3 の配送ロボットによるデポからの直接配送が現実的でないので、ケース 4 のマザーシップバンからの配送ロボットによる配送のみを計算した。なお、物流事業者 B のケース 1 においては配送トラックを 8 台用いているので、ケース 4 においても 8 台のマザーシップバンを用いると仮定した。図 3 において、シナリオ 1 - 4 のいずれにおいてもケース 4 の総配送コストはケース 1 の総配送コストより大きくなっている。しかし、シナリオ 4 の配送ロボットの初期コストが 600 円/日、運行コストが 2.5 円/分の場合には、ケース 4 の総配送コストはケース 1 の総配送コストと同程度まで下がってきている。シナリオ 1 - 4 のいずれの場合においても用いられる配送ロボットの台数は 2-3 台であり、マザーシップバンの台数を削減して配送ロボットの台数を増やすことによって総配送コストを減少させる可能性があるのではないかと考えられる。

図 4 に、ケース 5 の物流事業者 A、B が配送ロボットを用いて共同配送を導入する場合とケース 4 の物流事業者 A、B が個別に配送する場合の総配送コストの比較を示す。共同配送センター (UCC: Urban Consolidation Center) の位置は、図 1 に示すように物流事業者 A と B の顧客の中間に設置すると仮定した。ケース 5 において、与えられた顧客に物資を配送するために必要となるマザーシップバンおよび配送ロボ

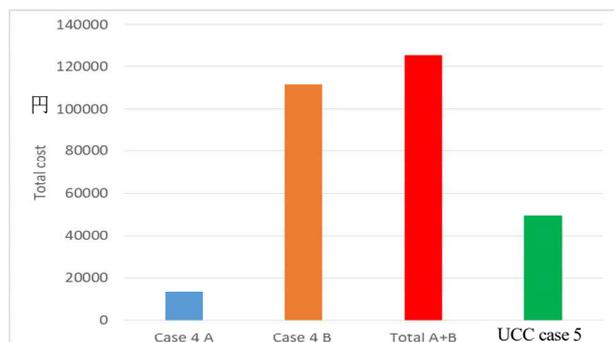
ットの台数を決定するために、顧客のマザーシップバンへの割り当て問題をビンパッキング問題として解き、それぞれの必要台数を決定した。シナリオ 1、2 において、共同配送センターを設けてそこからマザーシップバンと配送ロボットを用いて配送する場合の総配送コスト（図 4 の UCC case 5）は、物流事業者 A と B が個別に配送する場合の総配送コストの合計（図 4 の total A+B）に比べて、約 44%に削減でき、シナリオ 3、4 の場合には、共同配送の場合の総配送コストが約 40%に削減できることが分かる。



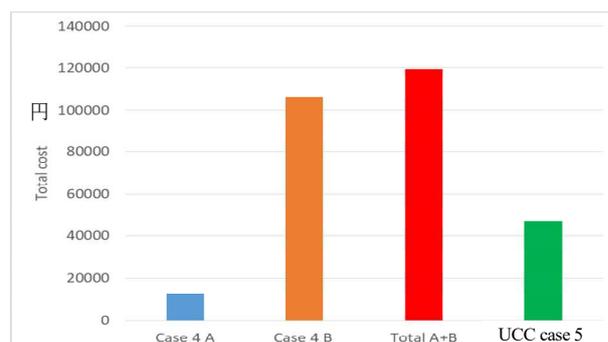
(a) シナリオ 1：配送ロボットの初期コスト 1,200 円/日、運行コスト 5.0 円/分



(b) シナリオ 2：配送ロボットの初期コスト 1,200 円/日、運行コスト 2.5 円/分



(c) シナリオ 3：配送ロボットの初期コスト 600 円/日、運行コスト 5.0 円/分



(d) シナリオ 4：配送ロボットの初期コスト 600 円/日、運行コスト 2.5 円/分

図 4 配送ロボットを用いて共同配送を導入する場合（ケース 5）と物流事業者 A、B が個別に配送する場合（ケース 4）の総配送コストの比較

表 3 配送ロボットを用いて共同配送を導入する場合（ケース 5）と物流事業者 A、B が個別に配送する場合（ケース 4）に必要なマザーシップバンおよびロボットの台数（シナリオ 1 - 4 で同じ）

ケース	マザーシップバンの台数		配送ロボットの台数	
	物流事業者A	物流事業者B	物流事業者A	物流事業者B
5	1	2	2	17
4	1	8	2	3

表 3 は、ケース 5 の共同配送を導入する場合に必要なマザーシップバンおよびロボットの台数および比較のために物流事業者 A、B が個別に配送するケース 4 の同様の台数を示している。物流事業者 B について、共同配送を導入していないケース 4 と比較すると、ケース 5 において必要となるマザーシップバンの台数が 8 台から 2 台に減少し、ロボット台数が 3 台から 17 台に増加している。共同配送センターが顧客の近傍にあることによってこのような戦略が可能になり、結果として総配送コスト削減に効果があったと考えられる。

5. 結論

本研究においては、新型コロナウイルス感染症のパンデミックにおいて、都市内物流の末端配送に配送ロボットを用いた場合の効果について研究を行った。大阪市中心部を対象として、物流事業者 2 社の物資配送データを用いて、配送ロボット導入による総配送コストの変化について検討した。その結果、配送ロボットの初期コスト、運行コストが総配送コストに与える影響が大きく、これらのコストを下げることであれば、配送ロボットによる直接配送あるいはマザーシップバンを動くハブとして用いてそこから配送ロボットを出発させて配送する方法を用いることによって、従来のトラック配送と同程度あるいは若干高めの総配送コストになることが分かった。したがって、配送ロボットによる物資配送は、顧客との接触がないので新型コロナウイルスの感染リスクが低く、また需要が急増した場合にも柔軟に対応できるというメリットがあり、配送ロボットの普及などによって初期コストおよび運行コストを下げることによって、コスト面においても従来のトラック配送に対して競争力を持つものと考えられる。また、配送ロボットを用いて共同配送を導入した場合には、物流事業者が個別に配送する場合に比べて、総配送コストを約 40-44% に削減できることが明らかになった。

なお、配送ロボットはまだ本格的に導入されていないので、本研究においては、配送ロボットの初期コスト、運行コストを企業へのヒアリングに基づいて推定したが、今後、実際の配送ロボットの運用データが得られれば、より正確な検討が可能になる。さらに、今回の計算ではマザーシップバンの停車位置を顧客の近傍の 1 か所に固定としたが、マザーシップバンを巡回させる戦略についても研究が必要である。

参考文献

- Taniguchi, E., Thompson, R.G. and Qureshi, A.G. (2020). Modelling city logistics using recent innovative technologies, *Transportation Research Procedia* **46**, 3-12.
- Boysen, N., Stefan Schwerdfeger, S. and Weidinger, F. (2018). Scheduling last-mile deliveries with truck-based autonomous robots, *European Journal of Operational Research*, **271**, 1085–1099.
- Simoni, M.D., Erhan Kutanoglu, E. and Claudel, C.G. (2020). Optimization and analysis of a robot-assisted last mile delivery system, *Transportation Research Part E*, **142**, 102049.
- Chen, C., Demir, E., Huang, Y. and Qiu, R. (2021). The adoption of self-driving delivery robots in last mile logistics, *Transportation Research Part E*, **146**, 102214.
- Figliozzi, M. and Jennings, D. (2020). Autonomous delivery robots and their potential impacts on urban freight energy consumption and emissions, *Transportation Research Procedia*, **46**, 21-28.