

オフィスビルの貨物量調査および配送計画に関する研究

—配送ロボットの活用に着目して—

濱野 百恵 南部 世紀夫

(技術研究所) (技術研究所)

Freight Amount Survey and Delivery Planning in Office Buildings

—Focusing on the Utilization of Delivery Robots—

Moe Hamano and Sekio Nambu

オフィスビルで発生する貨物量とビル内配送運用の関係を考慮することで、より合理的なビルサービスの提供が可能となる。本研究では、オフィスビルにおける不特定多数の貨物の搬入・搬送に関する物流情報をビル内の映像記録により取得した。得られたデータに基づき、貨物の大きさを踏まえた発生量を算出するとともに、ビル内の貨物処理能力を考慮して仮置き貨物量を定式化した。それらを踏まえてビル内の配送条件が仮置き貨物量などに与える影響を定量的に分析した。その結果、搬入情報の事前取得による配送計画により、ロボット台数を一定に保ちながらビル内配送の総所要時間および配送頻度を削減できる可能性があることを示した。

By considering the relationship between the freight amount generated in office buildings and the operational aspects of in-building delivery, it becomes possible to provide more rational building services. In this study, logistics information regarding the freight amount and transportation in office buildings was obtained through video image within the building. Based on the acquired data, the volume of cargo generated was calculated taking into account cargo size, and the amount of temporarily stored cargo in the loading/unloading space was formulated based on the in-building cargo handling capacity. Building on these findings, the impact of in-building delivery conditions on the amount of temporarily stored cargo and other factors was quantitatively analyzed. The results revealed that delivery planning through advance acquisition of loading information has the potential to reduce both the total time required for in-building delivery and delivery frequency while maintaining a constant number of robots.

1. はじめに

自律走行ロボット技術の発達により、オフィスビル内でロボットによる貨物の配送が行われ始めている。配送ロボットの活用は、館内配送における省力化だけでなく館内配送の共同化による縦持ち^{注1)}回数削減や駐車場回転率向上が期待できる。従来のオフィスビルの物流計画は、ビルの規模や用途から、荷さばきスペースの広さや運用の人員数が計画されてきた。しかしながら、ビル内に搬入される貨物が想定を大きく上回る、あるいは、下回る場合に、非効率な往復配送や荷さばきスペースの不足が発生する。このような状況に対して、ビル内における荷受けや配送の需要量、貨物処理能力^{注2)}の情報を活用し、ビル内の配送コスト

や施設計画を統合的に合理化することで、施設の設計と運用の両面から、配送の観点でより適切なオフィス環境を計画できると考えられる。

既往のビル内における貨物発生量の特定を目的とする調査¹⁾⁻³⁾では、代表日における貨物数や物流車両台数の発生集中原単位が算出されているものの、複数日にわたる物流動態の変動、貨物の大きさ、ビル内の貨物処理能力といった荷さばきスペースの設計やビル内配送運用において考慮すべき要素については検討されていない。また、オフィスビルにおけるロボットの配送計画では、ロボットが自己生成した地図上での効率的な配送ルートの設計は可能であるが、それだけではビル内全体の配送タスクに対する柔軟な配送計画の立案は困難である。

以上のことから、ロボットを最大限活かしてビル内の適切な配送管理・計画・評価を行うためには、ビルで発生する配送需要量や貨物処理能力を特定するための貨物調査手法とロボット活用を考慮した配送計画手法が必要である。

本研究では、不特定多数の貨物を搬入・搬送するオフィスビル内の物流情報の計測を試行し、取得したデータを用いてビル内の配送計画を作成することによる効果を分析し、ロボット活用を考慮したビル内配送計画手法の構築に向けた知見を得ることを目的とする。方法として、まず、計測対象とするビル内の物流活動を整理し、それを踏まえて貨物情報の取得方法を検討した。さらに、得られたデータに基づき、原単位法を用いて貨物の大きさを考慮した貨物発生量を算出し、待ち行列理論を用いて貨物処理能力(人やロボットによる時間当たりの貨物処理量)を考慮した滞留貨物量を定式化した。そして、定式化したモデルを用いてビル内における配送条件の違いによる滞留貨物量等への影響をシミュレーション分析し、結果比較を行った。なお、本論文は文献⁴⁾⁻⁷⁾にすでに掲載されたものを再構成、加筆修正したものである。

2. オフィスビルの映像記録を用いた貨物量調査

2.1 従来の貨物量調査手法・本調査の位置づけ

貨物や物流車両の発生量の特定では、物流センサスや都市圏物資流動調査のデータにより、物資流動量の傾向を把握することができる。また、ビル内における貨物発生量の特定では、端末物流調査に代表される紙ベースの事業者アンケート調査や路上観察調査により、用途別建物延床面積の構成比を考慮した貨物や物流車両の発生集中量を把握することができる。しかしながら、従来の貨物量調査手法では、施設設計やビル内配送運用で考慮されるべき貨物の

大きさやビル内の貨物処理能力といった物流実態に関連するデータの蓄積・定量把握は十分ではない。本調査では、不特定多数の貨物を搬入・搬送するオフィスビル内の物流情報を計測するため、ビル内の映像記録を用いた貨物調査を計画し、搬入貨物やビル内物流活動の一元的な情報を取得することを目的とする。

2.2 貨物情報の取得方法

調査は、都心部に立地する2棟のオフィスビルを対象として実施した(表-1)。調査対象ビル(1)は単独企業が占有する自社ビル、調査対象ビル(2)は複数企業が入居するテナントビルである。映像記録による観測を行い、搬入貨物の配送の時刻歴、貨物の形状・寸法およびビル内の物流動態を調査した(表-2)。

図-1に調査対象ビル(1)における配送先別の配送フローを示す。調査対象ビル(1)は館内共同配送を実施しており、配送先によって配送方法が異なる。ビル内における配送方法は、①館内配送業者が一括荷受けして各フロアへ配送、②卸売業者等が直接各フロアへ配送、③一括荷受けされた貨物を個人が直接受け取りに行く、の3つに区分される。③については、対象貨物がビルに搬入された時刻と個人が貨物を受け取った時刻の結合が難しいため、調査手法を映像調査から調査票に変更して実施した。調査対象ビル(2)では物流業者の館内共同配送契約の有無によってビル内における配送方法が以下のように区分される。①物流業者が館内の配送業者に配送業務を委託している場合は館内配送業者が一括荷受けして各テナントへ配送を行い、②物流業者が館内配送業者に配送業務を委託していない場合は物流業者が直接各テナントへ配送を行う。調査対象ビル(2)の物販系テナントは、搬入経路上における映像記録装置の仮設置が困難であったため、本調査の対象から除外した。

表-1 調査対象ビルの概要

調査対象	調査対象ビル(1)			調査対象ビル(2)		
建物用途	事務所			事務所		
ビル形態	自社オフィスビル(入居者単独)			テナントオフィスビル(入居者複数)		
階数	地上22階、地下3階、塔屋1階			地上14階		
用途別構成比	用途	構成比(%)	延床面積(m ²)	用途	構成比(%)	延床面積(m ²)
	オフィス	63.4%	約 32,000 m ²	オフィス	87.8%	約 67,000 m ²
	飲食系 ^{*1}	4.1%	約 2,000 m ²	飲食系	1.4%	約 1,080 m ²
	物販系 ^{*2}	0.2%	約 90 m ²	物販系	1.2%	約 890 m ²
	駐車場	8.7%	約 4,500 m ²	会議室	1.6%	約 1,230 m ²
	その他	23.7%	約 12,000 m ²	駐車場	7.3%	約 5,550 m ²
※1,2 セキュリティエリア内のためわいせつ部外者の利用不可						
館内共同配送	担当業務：荷受・仕分・保管・配送・取次 受取対象：社外からの貨物(郵便・貨物) 配送対象：郵便、特定の部署宛の貨物 配送頻度：午前・午後1回			担当業務：荷受・仕分・保管・配送・取次 受取・配送対象：館内配送を委託する物流業者15社が搬入する貨物(2021/9時点) 配送頻度：8:00～19:00の間で随時配送		

表-2 調査の概要

調査対象	調査対象ビル(1)			調査対象ビル(2)		
配送方法	①館内配送業者	②卸売業者	③個人受取り ^{*1}	② 館内配送業者	②卸売業者 ^{*3}	
配送先	搬入貨物の多い特定の部門・部署 <small>サプライ品・消耗品の納入先(共用部、備蓄庫等)</small>	搬入貨物の少ない部門・部署 <small>搬入貨物の少ない部門・部署</small>	全フロアが配送対象			
調査期間	2020年12月10日(木)～16日(水) 06:00～20:00			2021年9月27日(月)～10月3日(日) 08:00～19:00		
調査手法	館内の映像記録を用いた観測調査	館内の映像記録を用いた観測調査	調査票	館内の映像記録を用いた観測調査		
調査項目	• 貨物のビル搬入時刻：運送業者の搬入扉/ゲート通過時刻を使用 • 貨物のビル内配送開始時刻：配送者の荷さばきスペース出発時刻を使用 • 貨物の配送完了時刻：配送者の荷さばきスペース戻り時刻を使用 • 貨物の宛先階 • 貨物形状、サイズ • 配送所要時間					
特記事項	貨物のビル到着時刻無し ^{*2}	—	搬入フロアの到着時刻無し	—	—	—

*1 個人受取りで受渡しが日を跨ぐ調査票は除外した(期間中2件)

*2 館内配送業者は午前・午後1回ずつ郵便と特定フロアの貨物配送を行う特定フロアの貨物の殆どが09:30迄に到着することから、貨物搬入の時刻を08:30と設定し、データの補完を行った

*3 調査対象ビル(2)の物販系テナントは、搬入経路上における映像記録装置の仮設置が困難であったため本調査の対象から除外



図-1 配送先別の配送フロー

図-2 にカメラ映像の取得と出力データのイメージを示す。カメラは、ビル内の物流動線上である荷さばき駐車場・荷さばきスペース・配送通路・貨物用エレベーター内部を撮像する箇所に仮設置した。設置したカメラに録画された映像から同一貨物のビル内移動の経路を追いかけることで、荷さばき駐車場での貨物トラック停車から、配送先フロアへの配送完了までの貨物情報と時刻歴のデータ化を行った。調査の結果、調査対象ビル(1)では、郵便を除く貨物個数として、映像調査2,153個、調査票480個の貨物記録が取得された。また、調査対象ビル(2)では、1,586個の貨物記録が取得された。

2.3 搬入貨物量の傾向

調査データを用いて貨物発生量の傾向を把握するための基礎的な分析を行った。

配送方法と曜日別の搬入貨物個数を表-3に示す。曜日別にみると、調査対象ビル(1)では金曜日の搬入(933件)が最も多く、次いで月曜日(492件)であった。一方、調査対象ビル(2)では月曜日(414件)の搬入が

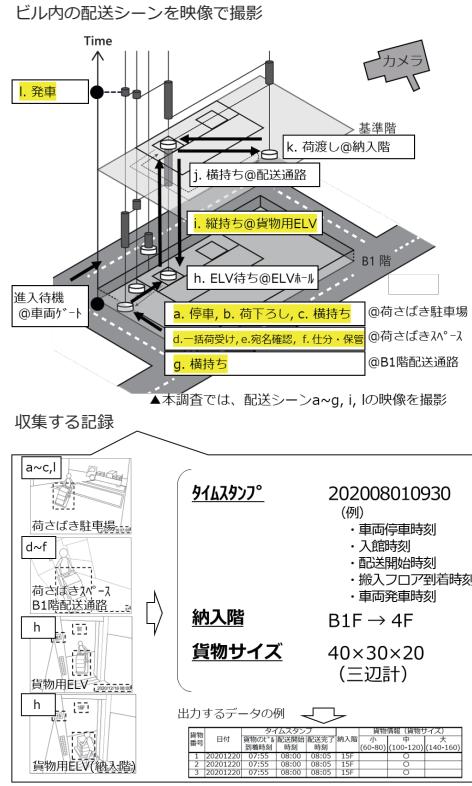


図-2 映像取得・出力データのイメージ

最も多く、次いで金曜日(303件)であった。貨物を受け取れない休日前後に貨物量が多くなる一般的な傾向⁸⁾と同様の傾向が、当該ビルにおいても確認された。次に、平日5日間における時間帯別の平均搬入貨物個数を図-3に示す。時間帯別にみると、調査対象ビル(1),(2)とともに、午前の時間帯で搬入個数が多くなっている。宅配便等の貨物を運搬する営業用トラックは日時指定貨物の比率が年々高まっており、特に午前に出荷されることが多い⁹⁾ことからも日時指定が搬入時間に影響していることが推察される。

2.4 貨物集中原単位の算出

ビル内の物流施設の計画やロボット活用を考慮した配送計画の策定では、物理的な施設規模や配送能力の設定において、貨物の大きさが重要な指標となる。そこで本節では、貨物体積に着目して貨物集中原単位を算出する。調査では、段ボール箱の規格サイズ¹⁰⁾と大手運送会社の定番宅配サイズを参考に60~160の基準値を参考に計測を行った。調査により得られた貨物個数と表-4に示す体積の平均値を用いて、貨物量を体積換算した。換算した貨物量を用いて貨物集中原単位を算出した結果を表-5に示す。貨物集中原単位は、施設内におけるオフィス床と商業床を区分し、それぞれの貨物量を用途別延べ床面積で除して求めた。両ビルにおいて、早朝および夕方の時間帯では、オフィス床と比較して商業床の値が顕著に高い傾向が確認された。

次に、今回の調査結果の妥当性を検証するために関連する既存研究¹¹⁾との原単位の比較を行った(表-6)。複合オフィスビルBは他のビルと比較すると商業床の値で差が大きい。これは、複合オフィスビルBにおける物販系テナントの床面積が大きいことに起因するものと考えられる(表-7)。物販系テナントは飲食系テナントと比較して小口・多頻度配送が多いという搬入特性を持つため、この特性が原単位の差に影響を与えたと推察される。以上の結果から、商業床の貨物集中原単位を設定する際には、飲食系と物販系の構成比率に留意する必要がある。また、両業種はピーク時刻と貨物集中原単位においてそれぞれ固有の規則性が存在することが予想される。

表-4 貨物サイズの基準

項目 基準	小	中	大		
荷姿サイズ	60	80	100	120	140 160
体積(cm ³)	7,020	11,040	29,754	42,688	96,000 132,000
平均値(cm ³)		9,030		36,221	114,000

表-3 配送方法と曜日別の搬入貨物個数

調査対象ビル(1) :

配送方法 曜日	月	火	水	木	金	土	日	NA	総計
館内配送業者	41	33	25	32	41	0	0	0	172
卸売業者	326	271	256	274	782	20	0	52	1,981
個人受取	125	58	74	98	110	0	0	15	480
総計	492	362	355	404	933	20	0	67	2,633

調査対象ビル(2) :

配送方法 曜日	月	火	水	木	金	土	日	NA	総計
館内配送業者	195	127	151	134	165	16	3	0	791
卸売業者	219	159	137	79	138	32	31	0	795
総計	414	286	288	213	303	48	34	0	1,586

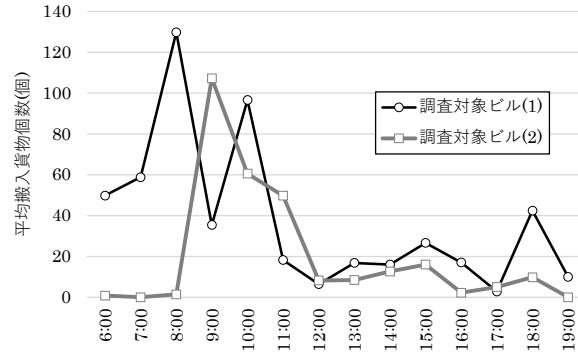


図-3 時間帯別の平均搬入貨物個数(平日)

表-5 床用途別の貨物集中原単位

時刻 用途	調査対象ビル(1)		調査対象ビル(2)	
	オフィス床	商業床 (飲食・物販系)	オフィス床	商業床 (飲食系)
06:00~07:00	2.2	604.3	0.0	12.3
07:00~08:00	43.3	205.3	0.0	0.0
08:00~09:00	117.6	88.6	0.0	29.3
09:00~10:00	28.7	20.6	46.8	51.2
10:00~12:00	45.3	27.9	66.2	287.2
12:00~18:00	43.7	458.5	30.4	915.7
18:00~20:00	6.6	409.4	0.0	569.7
計	287.4	1814.6	143.4	1865.4

(単位 : cm³/m²・時間帯)

表-6 床用途別貨物集中原単位の比較

ビル名 用途	オフィス床	商業床(飲食・物販)
調査対象ビル(1)	287.4	1814.5
調査対象ビル(2)	143.4	1865.4
複合オフィスビルA	78.6	2150.0
複合オフィスビルB	135.5	985.0
複合オフィスビルC	137.2	1601.7

(単位 : cm³/m²・日、既往研究¹²⁾より作成)

表-7 ビル毎の床用途別の延床面積

ビル名 用途	オフィス床	商業床(飲食)	商業床(物販)
調査対象ビル(1)	約 32,000	約 2,000	約 90
調査対象ビル(2)	約 67,000	約 1,080	約 0
複合オフィスビルA	約 72,000	約 3,400	約 0
複合オフィスビルB	約 54,000	約 3,400	約 812
複合オフィスビルC	約 80,000	約 4,400	約 220

(単位 : m²)

3. 荷さばきスペースの仮置き貨物量モデル化

3.1 従来の荷さばきスペースの計画手法・本検討の位置づけ

ビル内の配送を人的運搬からロボット運搬へ移行する際には、搬入された貨物をビル内で稼働するロボットへ積み替える作業が必要となる。このようなロボット運搬を実現するためには、ビル側で貨物を一括荷受けする館内共同配送の実施が前提条件となる。館内共同配送をビルサービスとして提供する場合、館内配送業者による貨物の一括荷受け・保管・配送・荷渡し作業が発生する。この時、一括荷受けした貨物を一時的に保管するための荷さばきスペースをビル内に確保する必要がある。

仮置きされる貨物スペースの検討では、物流ターミナルなどにおいて、施設内に滞留または格納される貨物量を貨物の発生量と処理量を用いて求められることが知られている^{12),13)}。オフィスビルにおける荷さばきスペースの検討では、ビルの規模や用途から経験則により計画が行われてきた。しかしながら、仮置きのための荷さばきスペースが過大であると空間に無駄が生じ、貸室面積割合の低下につながる。逆に、過小であるとビル内の貨物配送能力を超える貨物が搬入された場合に仮置きスペースから貨物が溢れ、作業効率や運用効率が低下する可能性がある。

調査対象ビル(1)では、館内共同配送の対象貨物が特定の部署を宛先とする6フロア分の貨物に限定されていた。そのため、ロボットを活用したビル全体の配送計画を評価する上で、ビル内の配送量・配送頻度の特性を把握するためのデータとしては不十分である可能性が高いと考えられる。そこで、以降の分析では、ビル内の事務所用途の全フロアを館内共同配送の対象としてサービスを提供する調査対象ビル(2)を分析対象とした。本節では、対象とするオフィスビルの発生貨物量が所与の場合について、貨物の受け渡し時に仮置きされる貨物量をモデル化し、ビル内の作業量・配送頻度と仮置き貨物量の関係を分析することで、適切な荷さばきスペースを計画するための知見を得ることを目的とする。

3.2 分析の概要

調査対象ビル(2)における搬入貨物量の特性を把握するため、曜日別の貨物個数および体積の集計結果を図-4に示す。個数・体積ともに月曜日の搬入量が他の曜日と比較して最も多いことが確認された。また、曜日別の搬入貨物量の時間的推移を図-5

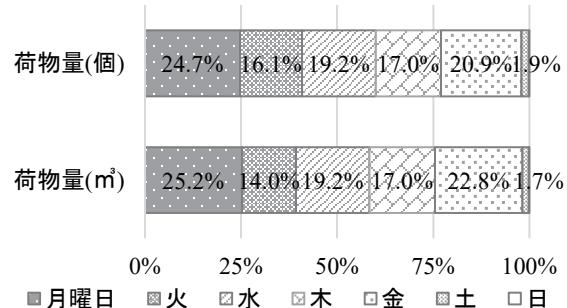


図-4 曜日別の搬入貨物の個数と体積の比較

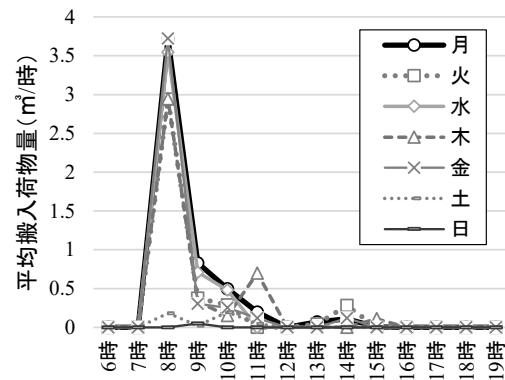


図-5 曜日・時間帯別の発生貨物量

に示す。館内配送の貨物は午前中に集中して搬入されており、搬入貨物量のピーク時間帯は8時台であることが確認された。以上の結果から、対象ビルにおける館内配送の搬入貨物量は月曜日が最大であり、その約98%が午前中に集中していることが明らかとなった。館内の配送能力が曜日や時刻によらず一定であると仮定した場合、貨物の仮置き量は月曜午前にピークを迎えると予想される。したがって、本研究では分析対象期間を月曜午前の時間帯(8:00～13:00)に限定して考察を行うこととした。

調査対象ビル(2)では、館内配送は4名の配送員によって行われ、配送員ごとに配送担当のフロアが割り当てられている。貨物処理能力の特性として、表-8に各配送員の担当フロアと配送頻度、平均配送貨物量、平均所要時間、平均処理率を示す。平均処理率をみると、配送員間でばらつきが確認された。これは担当フロアごとの移動距離や貨物量の相違によるものと推察される。

施設内に仮置きされる貨物量については、鶴田ら¹³⁾によって、物流ターミナルにおいて待ち行列理論に基づく格納貨物量の分析が行われている。本節では、待ち行列理論の(滞留量)=(流入量)-(流出量)の考え方¹⁴⁾に則って、オフィスビルにおける仮置き貨物量をモデル化する。考察対象期間内に荷さばきスペースに仮置きされる貨物量は、オフィスビルにお

ける貨物発生率と貨物の処理率の差であり、時間経過に伴い滞留する仮置き貨物量は次式で表される。

$$L_{q,t_{n+1}} = L_{q,t_n} + A_{t_{n+1}} - D_{t_{n+1}} \quad (1)$$

ここに、

- $L_{q,t_{n+1}}$: 時刻 t_{n+1} における仮置き貨物量 (m^3)
 L_{q,t_n} : 時刻 t_n における仮置き貨物量 (m^3)
 $A_{t_{n+1}}$: 時刻 t_n から時刻 t_{n+1} の貨物発生率 (m^3)
 $D_{t_{n+1}}$: 時刻 t_n から時刻 t_{n+1} の処理率 (m^3)
 ただし、 $t_n \in \{0, 10, 20, \dots, 300\}, n = 0, 1, \dots, 30$.

作成したモデルを用いて、ビル内の配送処理率を変動させた場合に、処理率が仮置き貨物量に及ぼす影響について検討する。なお、処理率は1回の配送貨物量を1回の配送所要時間で除して求められる。貨物発生率は調査により得られた実測値を利用し、処理率は貨物の処理パターンごとに一定値の処理率関数を作成して分析を行った。**表-9**に処理率の設定方法を示す。処理率 D_{t_n} は2種類のパターンを用いて設定した。パターンAは、1回の配送量を最大で行ったときの状態を想定して処理率を設定した。1回の配送量の最大値は、当該ビルの貨物用ELVの積載容積と館内配送で用いられる手押し台車の積載容量の最大値を参考とした。次に、パターンBは、配送ロボットを使用して配送を行う場合を想定して設定した。1回の配送貨物量はロボット積載量の最大値とし、配送頻度は一定とする。人が手押し台車を押す時の推進速度は0.5~1.0m/秒程度^{15),16)}と言われている。本検討で想定する配送ロボットは、速度0.1~1.0m/秒で走行する機体のため、本分析ではロボットは概ね人が台車を押す走行速度と同等であると仮定して、人が配送した場合の実測値に基づく配送所要時間を用いて処理率を設定した。

3.3 結果・考察

図-6に処理パターンごとに算出した仮置き貨物量と実測値の比較結果を示す。ここでの実測値とは、各館内配送員の処理能力(**表-8**)から算出した仮置き貨物量を指す。パターンAの結果をみると、仮置き貨物量は約50分後にピークとなり、約140分後に滞留する仮置き貨物量はほぼなくなる結果を得た。この結果から、当該ビルでは、処理率最大で配送する場合も仮置き貨物量のピーク量を許容する規模の荷さばきスペースが必要であることが読み取れる。パターンBの結果をみると、実測値の仮置き貨物量

表-8 館内配送員別の処理能力

	担当フロア (階)	配達 頻度 (回)	平均配達 貨物量 (m^3 /回)	平均所要 時間 (分/回)	平均処理率 (m^3 /10分)
配送員 A	7, 9, 11F	6	0.095	17.18	0.053
配送員 B	5, 6F	7	0.249	22.70	0.111
配送員 C	-	3	0.306	26.26	0.110
配送員 D	13, 14F	4	0.212	24.28	0.092
平均			0.204	22.61	0.090

※考察対象期間：9/27(月)AM(8:00~13:00)

※担当フロア：対象期間中に配達実績のあるフロアのみ記載

※配送員Cは担当フロア不明のため未記載

表-9 処理レベルの設定

パターンA	1 配送の最大配達容積 a (m^3)を、期間 T における館内配達の平均所要時間 b (分/回)で割って時間当たり平均処理率 $D_{At_n} = 0.320$ (m^3 /分)を設定		
	a	1 配送の最大配達容積(m^3)	調査ビルの手押し台車・貨物用ELV実測より、 $a = 0.72(m^3)$
パターンB	1 配送の最大配達容積 c (m^3)を、期間 T における館内配達の平均所要時間 b (分/回)で割って時間当たり平均処理率 $D_{Bt_n} = 0.075$ (m^3 /分)を設定		
	c	1 配送の最大配達容積(m^3)	使用を想定するロボット機器仕様より、 $c = 0.17(m^3)$
期間 T : 考察対象期間			2021/9/27(月) 08:00~13:00, Δt : 時間間隔(分)、 $\Delta t = 10$ (分) $t_n \in \{0, 10, 20, \dots, 300\}$, $n = 0, 1, \dots, 30$.

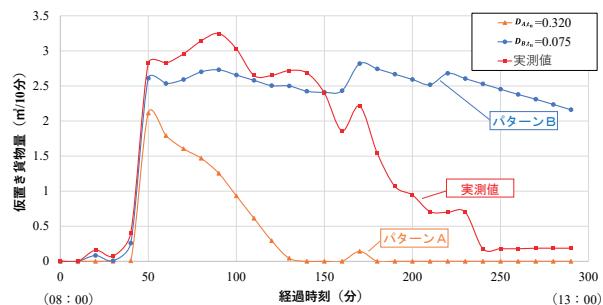


図-6 処理率と仮置き貨物量の関係

のピークを下回る結果を得た。これは、パターンBで設定したようにロボットが人と同等の速度で走行することができれば、現状の仮置きスペースに大きな影響を与える可能性があることを示唆する。

本分析の今後の課題を以下に示す。①今回仮定値としたパターンBの処理率をロボットの運用を反映した値を用いてより実環境に近い状態で検討する。②仮置き貨物量の算出結果は、貨物の体積を足し合わせた値を示す。これは、貨物を隙間なく並べた時の外形寸法を示すものであり、ビル内における荷さばきスペースの規模算定ではさらなる検討を進める必要がある。

4. ビル内における配送計画の分析

4.1 従来の配送計画手法・本分析の位置づけ

物流現場における配送計画は、配送計画問題(VRP: Vehicle Routing Problem)として定式化され、これは、我が国では最も普及しているロジスティクス・ツールである配送計画の基幹を成すモデルである¹⁶⁾。配送計画問題が対象とする輸送手段は、複数の配送先へ複数の貨物を配送する形態であれば、トラックに限定されず多様な輸送手段に適用可能である¹⁷⁾。一方、実務の配送計画に反映するには、対象とする事象別に様々ある制約を考慮したモデル構築と求解手法の検討が求められる。ビル内におけるロボットによる効率的な配送経路生成手法では、SLAM技術を用いて周囲の環境をマッピングし、自己位置を把握しながら最適な配送ルートを計画する方法が実用的・一般的であり、ドローンやAGVなどさまざまな自律型ロボットに適用されている。また、ビルサービスとしてロボットを活用した配送計画では、スマートスタートで固定的な時間帯・経路において配送が計画されている。

ロボットを活用して配送運用を行うビル管理者にとっては、運用(配送所要時間、配送頻度等)、運用経費ならびに荷さばき施設設計が合理的に計画されていることが望ましい。しかしながら、従来のビル内におけるロボットの配送計画手法では、貨物量の繁閑差やロボット運用の複雑化への対応は困難である。これは、ビル内でよりよい配送を計画しようとする時、入力値となる配送需要量が未知であることが大きな要因である。3章のとおり、貨物発生量は床用途によってある程度の規則性を持つものの、ビルに貨物が届くタイミングや品目まで正確に予測して配送計画へ反映することは現実的ではない。そのため、それらの変動を考慮しようとすると、ピーク量を想定した設計となり過大な計画となる可能性が高い。ビル内全体の配送タスクに対する柔軟な配送計画立案のためには、1日の時系列的な配送需要量が既知で、配送の事前計画がたてられる状態が望ましい。物流分野では、物流・商流データ基盤の構築・実装に向けた取り組みが始まっている¹⁸⁾、これら基盤技術の高度化により、物流の上流から下流まで広範囲を含む物流システムの発展が期待される。本分析では、物流分野における基盤技術の高度化によるビル内配送運用効率化に着目し、ビル内の配送需要を既知と想定する場合に、貨物搬入情報の事前取得とビル内配送計画の事前策定がビル内の配送運用効

率に与える影響について、配送所要時間、配送頻度及び仮置き貨物のピーク量の観点で結果比較を行う。

4.2 分析の概要

本節では、貨物搬入情報の事前取得の有無が配送運用に与える影響を明らかにするためのシミュレーション分析を実施する。分析では、事前に貨物搬入情報を取得してビル内配送計画を策定する場合と、事前情報なしで計画を策定する場合の2つのシナリオを設定し、配送所要時間、配送頻度および仮置き貨物のピーク量という3つの評価指標を用いて比較検証を行う。事前取得する貨物搬入情報とは、1日にビルに搬入される貨物量、貨物寸法、貨物別ビル搬入時刻および貨物別宛先階の情報を指す。

所要時間を効率化するには、近接する宛先階をまとめて配送することに加えて、ロボットに積載する貨物量を最大化することでより効率的に配送できるものと考えられる。したがって、配送する貨物の選択は、同一あるいは近接する宛先階のグループに対して、ロボットに積載する貨物体積が最大となるように貨物選択を行う。貨物の選択は、次式により算定される。

$$\text{Max} \sum_{i=1}^n V_i \times x_i \quad (2)$$

Subject to

$$\sum_{i=1}^n V_i \times x_i \leq \sum_{j=1}^u k_{vj} \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^n W_i \times x_i \leq \sum_{j=1}^u k_{wj} \quad (4)$$

$$x_i \in \{0,1\}, i = 1, \dots, n. \quad (5)$$

ここに、

V_i : 貨物 i の体積(m^3)

x_i : 貨物 i のバイナリ変数(1:選択、0:未選択)

k_{vj} : ロボット j の最大積載容積(m^3)

W_i : 貨物 i の重量(kg)

k_{wj} : ロボット j の最大積載重量(kg)

計算では、貨物搬入情報を事前取得してビル内配送計画を作成する場合と事前取得せず作成する場合に共通して、次の条件を仮定する。 $\textcircled{1}$ 使用するロボットは1台とし、 $k_v = 0.1693 m^3$ 、 $k_w = 50 \text{kg}$ とする。

②ロボットは、ビルの荷さばきスペースで荷積みを行った後に宛先階へ向かい、配送需要がなくなるまで繰り返し配送を行う。③ロボット積載容積・重量の上限値を超える場合、かつ、複数の宛先階の配送需要がある場合、より低層の貨物を優先して配送する。④計算を簡単にするため、配送の特性値(縦持ち所要時間、横持ち^{注3)}所要時間、荷役時間)は調査対象ビル(2)の調査結果を参考に单一値を使用し、配送の時間枠制約は考慮しないものとした。⑤式(5)の貨物*i*は、貨物搬入情報を事前取得してビル内配送計画を作成する場合と事前取得せず作成する場合において、表-10の条件で個別に設定される。

3章における分析対象と考察対象期間の考え方と同様に、本分析も調査対象ビル(2)の月曜午前の時間帯(8:00～13:00)を検討の対象とした。使用するデータに基づき、分析用に追加で作成したデータを表-11に示す。

4.3 結果・考察

搬入情報を事前取得している場合と事前取得していない場合の計算結果が図-7に示されている。搬入情報を事前取得することで、総配送所要時間と配達頻度ともに減少する結果を得た。総配送時間と配達頻度を効率化できた要因は、事前情報の取得により、複数の宛先貨物を選択することによる混載配達の回数が減少したため、結果として所要時間が削減されていることがある。加えて、事前情報の取得により、選択肢となる貨物の集合が増加したこと、より良い組み合わせの解を見つられる可能性が高まることによるものである。この結果から、総配送所要時間と配達頻度では、事前に貨物情報を取得した配達計画を作成することで、使用ロボット台数を維持した状態で時間と頻度を低減できる可能性があることが読み取れる。一方、仮置き貨物のピーク量は増加し、対象ビルにおける荷さばきスペースの許容量を超える結果を得た。仮置き貨物のピーク量が増えた要因は、事前情報なしで行われていたピストン配達的な状態に対し、考察対象期間内の全貨物を対象に積載効率を優先した貨物で組み合わせたことが影響している。事前に取得した貨物搬入情報を用いてビル内配達計画を立案する際、考察対象を午前の時間帯(8:00~13:00)に設定した。その結果、到着時刻の異なる貨物を同一配達グループに集約したことで、配達開始までの待機時間が生じ、これに伴い一時保管を要する貨物量が増大した。すなわち、貨物情報を事前に取得して策定する配達計画において

表-10 貨物集合の計算条件

	貨物搬入情報を事前取得しない場合	貨物搬入情報を事前取得する場合
1回目の配送	配送開始時点で荷さばきスペースに到着する貨物の中から積載する貨物を選ぶ	考察対象期間内で荷さばきスペースに到着する貨物の中から積載する貨物を選ぶ
2回目の配送	1回目の配送が終了し、荷さばきスペース帰着時点で荷さばきスペースに到着する貨物の中から積載する貨物を選ぶ	考察対象期間内で荷さばきスペースに到着する貨物のうち1回目に配送した貨物を除外して積載する貨物を選ぶ
3回目以降	上記方法を荷さばきスペースに貨物が無くなるまで繰り返す	上記方法を荷さばきスペースに貨物が無くなるまで繰り返す

表-11 追加データの作成内容

作成データ	作成方法
貨物の重量	<ul style="list-style-type: none"> ・ 貨物の三辺合計から推定される重量を設定した。重量の設定では、宅配業者掲載のサイズ別重さ上限の値を参考とし、上限の $1/2$ を推定重さとして設定した。
配送作業に 要する 各特性値	<ul style="list-style-type: none"> ・ 平均縦持ち時間(1階層分、往復)：ELV の縦持ち時間の平均値を使用。実測より 9.38秒。 ・ 宛先階における平均横持ち時間(1階層分)：宛先階における横持ち時間と荷渡し時間を合算した平均値を使用。実測より 462秒。 ・ 荷さまき\rightarrow一階における横持ち時間：荷さまき\rightarrow一階における横持ち時間と荷積み時間を合算した仮定値として 180秒と設定。



図-7 搬入情報の事前取得の有無による比較

ては、検討対象期間の設定方法および計算条件を適切に調整し、貨物が荷さばきスペース内に収容可能となるよう計画を再検討する必要性があることを確認した。また、事前に貨物情報を取得することでビル内における配送全体の所要時間や配送頻度の効率化を実現できる可能性はあるが、これらは一時保管する仮置き貨物量の増加を許容することにより成立している。このことは、対象とするビルの要求次第で、目的関数式(2)に対し、追加の制約条件(例えば、仮置き貨物量とのバランス)を考慮した求解が求められる可能性があることを意味する。

5. おわりに

本研究は、不特定多数の貨物を搬入・搬送するオフィスビル内の物流情報の計測を試行し、得られたデータに基づき、貨物の大きさを考慮した貨物発生量の算出、ビル内の貨物処理能力を踏まえた仮置き貨物量定式化を行った。さらに、配送条件の違いによる仮置き貨物量等への影響について、配送ロボット活用の観点から把握を試みた。以下に成果を記載する。

- 1) ビル内の映像記録による貨物調査手法を検討し、荷さばき施設の設計・運用の指標となりうる貨物の大きさを考慮した貨物集中原単位を算出した。映像調査手法を用いることで、複数日にわたる貨物搬入量の変動を定量的に把握し、1つの貨物単位を追跡することにより対象ビル内における貨物の処理プロセスや処理特性を明らかにした。従来の調査手法では困難であった、貨物単位での時系列的な追跡とビル内部での処理実態の両面を同時に捉えることができた点が、本調査の独自性である。
- 2) 得られたデータに基づき、貨物の大きさを踏まえた貨物集中原単位を算出した結果、ピーク時刻はオフィス床と比べて商業床の原単位が大きく上回る値となる傾向がみられた。1日を通して物の出入りが多いオフィス床と商業床はそれぞれ固有の変動特性を有する可能性があることを確認した。また、同一の商業床であっても、テナント構成比によって原単位の傾向に差異が生じることを確認した。飲食系テナントと物販系テナントでは、搬入頻度や搬入時間帯の特性が異なるため、両者の構成比率によってビル間でばらつきが確認された。この結果は、商業床の貨物集中原単位を設定する際、単に商業床面積のみで一律に扱うのではなく、飲食系と物販系の構成比率を考慮する必要があることを示唆している。
- 3) ビル内の荷さばきスペースにおける仮置き貨物量のモデル化を行い、配送処理率の変動が仮置き貨物量に与える影響を定量的に分析した。分析は、ロボットが人と同等の走行速度を有するという条件を設定し、ロボット活用を想定した処理率でシミュレーションを実施した。その結果、仮置き貨物量のピーク値は実測値を下回ることが確認された。この結果は、ビル内物流におけるロボット導入の可能性を示唆するものである。適切なロボットの活用方法を選択す
- 4) ビル内の計画手法構築に向けた知見を得ることを目的として、貨物搬入情報の事前取得と配達計画の事前策定がビル内の配達運用効率に与える影響を評価した。評価指標として、配達所要時間、配達頻度、仮置き貨物のピーク量の3つの観点からシミュレーション分析を実施した。その結果、搬入情報を事前取得することにより、総配達所要時間の短縮と配達頻度の削減効果が確認された。この結果は、事前情報の活用がビル内配達全体の効率化に寄与することを示している。一方、制約条件の課題として、仮置き貨物のピーク量増加による荷さばきスペースの許容量の超過が確認された。この結果は、ビル内の配達効率の向上と物理的な制約の間にトレードオフが存在することを示唆している。すなわち、今回の範囲では配達所要時間と配達頻度の削減は、一時保管する仮置き貨物量の増加を許容することで実現される。したがって、対象ビルの特性や運用要件に応じて、仮置き貨物量とのバランスを考慮して追加の制約条件を導入した計画手法が必要となる可能性がある。これは、ビル内の配達計画において、運用の効率化だけでなく、物理的制約との整合性を保った計画策定手法が求められることを意味する。

ることで、既存の仮置きスペースを維持したまま、人的運搬からロボット運搬へ移行できる可能性がある。

- なお、本分析ではロボット配達の特性値として、配達処理率、縦持ち・横持ちの所要時間ならびに荷役時間に仮定値を設定し、配達の時間枠制約は考慮しないものとして分析を実施した。したがって、実環境に即したビル内ロボット配達の分析を行うためには、ビル内におけるロボットの走行特性、ビルの物理的特性、実運用における要件を考慮した配達計画手法の構築が必要である。今後の展開として、ビル内ロボット配達に関する実測データを蓄積し、これを分析モデルへ反映することで、複数の配達シナリオでより効果的な配達条件を検証する予定である。

謝辞

本論文で示したビル内における貨物量調査の計画・原単位の算出は、日本大学理工学部 小早川悟教授、田部井優也助手(当時)との共同研究で取り組んだものであり、貴重なご意見をいただきました。ここに感謝の意を表します。

<参考文献>

- 1) 清水真人, 岩尾詠一郎, 藤崎和久, 入江直弘, 石井文悟, 苦瀬博仁：“末端物流施策を考慮した荷捌き駐車スペース数算定式に関する研究”, 日本物流学会誌第, 16号, pp.177-184, 2008.
- 2) 高橋洋二, 苦瀬博仁, 鈴木信彰, 清水真人：“建物用途構成を考慮した物流車駐停車需要の推定法と施設整備の考え方に関する研究”, 日本都市計画学会学術研究論文集, Vol.29, pp.289-294, 1994.
- 3) 高橋洋二, 石田宏之, 水口雅晴, 折原清, 最首恵：“丸の内における交通・環境改善及び物流効率化のための実証実験, 日本都市計画学会学術研究論文集”, Vol.37, pp.241-246, 2002.
- 4) 濱野百恵, 小早川悟, 田部井優也：“オフィスビルの荷さばき施設計画と貨物の発生集中原単位に関する研究”, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.823-824, 2021.
- 5) 濱野百恵, 南部世紀夫, 小早川悟, 田部井優也：“オフィスビルの映像記録を用いた館内貨物量調査の基礎的研究”, 日本物流学会誌, No.30, pp.139-145, 2022.
- 6) 濱野百恵：“オフィスビルにおける仮置き荷物量のモデル化”, 第39回日本物流学会全国大会研究報告集, pp.113-116, 2022.
- 7) 濱野百恵：“ビル内配送における搬入情報の事前取得が運用効率に与える影響に関する基礎的研究”, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.97-98, 2025.
- 8) 国土交通省：“全国貨物純流動調査報告書”, p.179, 2007.
- 9) 国土交通省：“全国貨物純流動調査報告書”, p.183, 2015.
- 10) 日本産業標準調査会：“外装用段ボール箱(規格番号 JISZ1506)”, <https://kikakurui.com/z1/Z1506-2003-01.html>
- 11) 篠田歩美：“貨物車が複合ビル内に搬入する荷物量に関する基礎的研究”, 日本大学理工学部交通システム工学科卒業論文, 2021.
- 12) 市来寄治, 片桐健悟, 稲田周平, 河野宏和：“滞留量に着目した並列型フローシステムへの流動数分析の応用方法”, 日本経営工学論文誌, Vol.68, No.3, pp.191-200, 2017.
- 13) 鶴田三郎, 黒川久幸, 森田朋子：“物流ターミナルの流通保管エリアのレイアウト方式について CFS フロアレイアウトの作業面からの比較検討”, 日本物流学会誌, No.5, pp.110-118, 1996.
- 14) 高橋幸雄, 森村英典：“混雑と待ち, 朝倉書店, 2001.
- 15) ユニバーサル工業株式会社 HP：“用語集「台車」”, <http://www.uni-kk.co.jp/>
- 16) 中部産業株式会社 HP：“台車とキャスター物流機器情報”, <https://www.chubu-sangyo.co.jp/>
- 17) 久保幹雄：“Pythonによる実務で役立つ最適化問題 100+ (3) -配達計画・パッキング・スケジューリング”, 朝倉書店, 2022.
- 18) 貞広幸雄, 山田育穂, 石井 儀光：“空間解析入門—都市を測る・都市がわかるー”, 朝倉書店, 2018.
- 19) 内閣府 戰略的イノベーション創造プログラム (SIP) 第2期 スマート物流サービス 物流情報標準化検討委員会：“物流情報標準ガイドライン”, ver.3.00, 2025.

<注釈>

- 注1) 縦持ちとは、建物内において貨物を運搬する場合に、エレベーター等を用いて上下階間で貨物を運搬させるための垂直方向の移動を指す。
- 注2) ここでの貨物処理能力とは、人やロボット等による時間当たりの貨物処理量を指す。
- 注3) ここでの横持ちとは、建物内において貨物を運搬する場合に、荷さばきスペースから貨物の宛先までの水平方向の移動を指す。