

倉庫配置と配送経路に着目した 倉庫シェアリングサービスの最適化

池宮 大智¹・山田 忠史²・Qureshi Ali Gul³・本田 智巳⁴

¹学生員 京都大学大学院工学研究科 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂C1)

E-mail: ikemiya.daichi.33c@st.kyoto-u.ac.jp

²正会員 京都大学経営管理大学院教授 (工学研究科併任) (同上)

E-mail: yamada.tadashi.2x@kyoto-u.ac.jp

³正会員 京都大学大学院工学研究科准教授 (同上)

E-mail: qureshi.aligul.4c@kyoto-u.ac.jp

⁴学生員 京都大学大学院工学研究科 (同上)

E-mail: honda.tomomi.45a@st.kyoto-u.ac.jp

わが国の物流は、交通問題や土地利用問題などの社会問題の一因となっている。一方、物流業界においては最近、倉庫シェアリングと呼ばれる、短期的な倉庫賃貸を斡旋するプラットフォームビジネスが登場している。本研究では、そのような倉庫シェアリングに着目し、倉庫配置や配送経路の最適化を包含することにより、倉庫シェアリングがもたらす企業効果と社会的効果について考究した。その際、荷主企業、倉庫企業、プラットフォーム企業意思決定を、割当問題、Location Routing Problem(LRP)、マッチングシミュレーションを用いて表したうえで、割当問題やLRPを同時に求解する手法としてメタタブーサーチを提案した。実例を基にした数値計算を行った結果、企業効果として、輸送費用の削減による総費用の低減を、社会的効果として、総走行距離の抑制と、それに伴う環境負荷の低減を、それぞれ確認した。

Key Words : *warehouse sharing, allocation problem, LRP, tabu search, social impact*

1. はじめに

物流に関する社会的問題の一つが、倉庫などの物流施設と居住地の用途混在である。用途混在は、土地利用の不整合をもたらす、騒音、環境悪化、交通事故などの原因となっている。一方、物流業者も、物流施設の新設・更新、集配頻度の増加、貨物車の積載率低下¹⁾などの課題を抱えており、物流業務の効率化が喫緊の課題となっている。さらに、SDGsやカーボンニュートラルなどの持続可能性が物流業者にも強く求められている。

最近では、プラットフォームビジネスが盛んになってきている。物流におけるその一例として、倉庫シェアリングサービスがある²⁾。その特徴は、季節の需要などに合わせた倉庫の短期間の賃貸が可能なことである。倉庫シェアリングサービスは、自社倉庫の乱立を防止し、既存の遊休倉庫の有効活用を促すので、上述の土地利用の不整合が緩和・解決される可能性がある。また、複数の荷主企業による共同配送を促し、社会全体の物流効率化が促進される可能性もある。さらに、このサービスに倉

庫配置や配送経路の最適化が組み込まれれば、物流費用の削減につながるだけでなく、貨物車の走行距離抑制や環境負荷抑制などの社会問題の解決にも繋がる。プラットフォームビジネスは、必ずしも企業と社会の双方に有益であるとは限らないが、倉庫シェアリングサービスは、企業と社会のwin-winをもたらす、持続可能性にも貢献する可能性がある。

本研究では、倉庫配置と配送経路の最適化を包含した倉庫シェアリングサービスが、企業と社会の双方に有益であることを示す。なお、本研究における倉庫配置とは、倉庫の新設における立地選択ではなく、既存の倉庫からシェアリングに使用する倉庫を選択することを意味する。企業側の効果は、総費用(輸送費用、倉庫費用、荷役費用の総和)で計測し、社会的効果は、貨物車の台数、総走行距離、CO₂排出量、トンキロに注目する。

本研究が対象とする問題は、「工場→倉庫」と「倉庫→配送先」という二段階のサプライチェーンである。

「工場→倉庫」においては巡回を考慮せず(出発地から目的地まで直線的に移動する)、「倉庫→配送先」にお

いては巡回経路を考慮する。「工場→倉庫」の区間における割当問題と「倉庫→配送先」の区間における配置配送計画問題（Location Routing Problem, 以下、LRPと称する）が同時に考慮される。

割当問題は、錦織ら³が述べるように、0-1整数計画問題であり、ある期間（場所）に、ある資源（人数、設備、資金など）を最適に割り当てる問題である。物流への適用には、例えば、サプライチェーン上の工場への貨物割当と配送先別の輸出拠点を決断する問題⁴や、サプライチェーン上の輸送経路への貨物割当と輸送業者の運行スケジュールを決定する問題⁵などがある。LRPは、一定の貨物需要量を有する顧客（配送先）へ貨物を輸送する際に、最適な物流施設配置と巡回型配送経路を同時に求める組み合わせ最適化問題である。LRPの研究事例は多数存在し、例えば、倉庫を対象とした定式化と近似解法の提案⁶や、LRP-2E（Two-Echelon LRP）の定式化と、マルチスタートを内包したタブーリスト付き局所探索法の提案⁷などがある。

一般に、割当問題やLRPはNP困難な問題である⁸ため、それらの解法にはメタヒューリスティクスが用いられることが多い。タブーサーチ、遺伝的アルゴリズム、局所探索法を用いた解法が多く、二段階タブーサーチ⁹のような発展的解法も見られる。本研究の先行研究である本田ら¹⁰は、割当問題とLRPを同時に考慮する問題を対象に、二段階タブーサーチを提案している。二段階タブーサーチは同時に求解する性質が弱いので、本研究では、タブーサーチにタブーサーチを内包したメタヒューリスティクス（一種のメタタブーサーチ）へと拡張した。本研究では、さらに、本田ら¹⁰のモデルにマッチングモデル（マッチングシミュレーション）を内包してしている。物流・ロジスティクス分野の既往研究において、割当問題やLRPをマッチングモデルに組み込んだ研究は見られない。

2. 問題の定式化と解法

本研究では、倉庫を賃貸する荷主企業と倉庫企業のマッチングを行うマッチングモデルと、荷主企業や倉庫企業の意思決定を表すモデル（それぞれ、荷主企業モデル、倉庫企業モデルと称する）の三種類のモデルを構築する。

(1) マッチングモデル

本研究で対象とする倉庫シェアリングサービスは、一般に両面性市場と言われ、倉庫を借りたい荷主企業と倉庫を貸したい倉庫企業の2主体間で生じる倉庫賃貸を、プラットフォーム企業が仲介する構図となっている（図-1）。マッチング方法には多様なものが考えられるが、

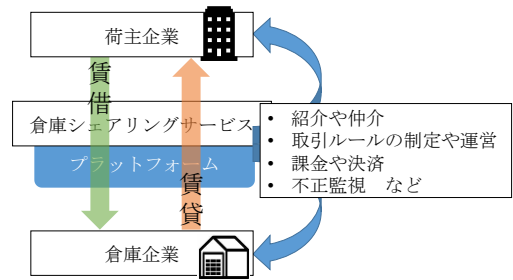


図-1 対象とする倉庫シェアリングサービス

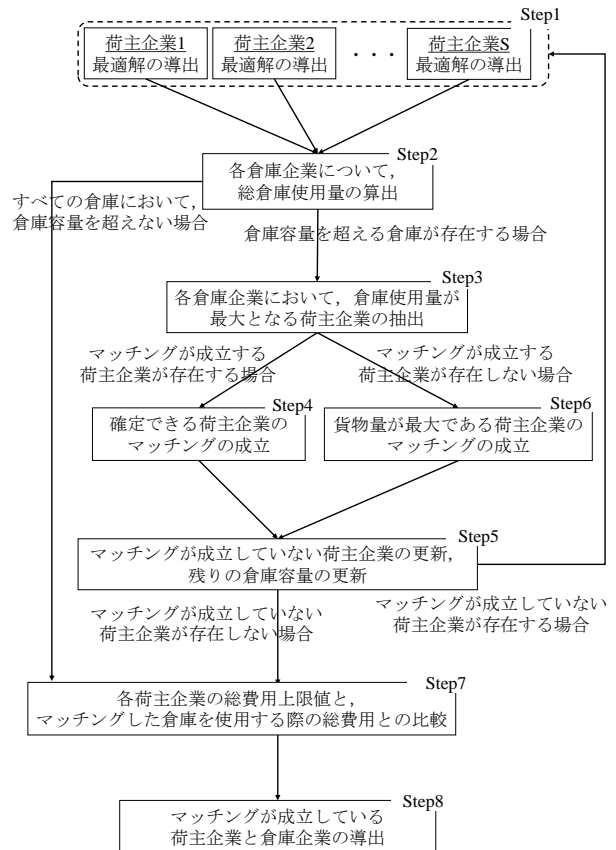


図-2 マッチング手順

実際に倉庫シェアリングサービスを営む物流プラットフォーム企業へのシェアリングの結果、本研究においては、荷主企業を重視した、段階的なマッチングモデルを構築する。そのシミュレーション手順を図-2と以下に示す。

- Step1 : 各荷主企業の最適な倉庫とその使用量を導出する。（後述の荷主企業モデル）
- Step2 : 各倉庫企業について、荷主企業らの貨物需要に基づいて、総倉庫使用量を算出する。その際、すべての倉庫企業において、保有する各倉庫の総使用量が容量を超えない場合、マッチングが成立したとして、step7へ進む。
- Step3 : 各倉庫企業が、最適な荷主企業を抽出する。（後述の倉庫企業モデル）
- Step4 : 荷主企業が選択する倉庫（倉庫企業）と、倉庫企業の荷主企業選択が一致した場合、その荷主企業と倉庫企業はマッチングが成

- 立したものとする。マッチングが成立した荷主企業が存在しない場合、step6へ進む。
- Step5 : マッチングが成立していない荷主企業や、各倉庫企業における賃貸可能な倉庫容量の更新を行い、step1へ進む。また、マッチングが成立していない荷主企業が存在しない場合、step7へ進む。
- Step6 : 貨物量が最大である荷主企業と、その荷主企業にとって最適な倉庫企業のマッチングが成立するものとして、Step5へ進む。
- Step7 : 各荷主企業の総費用上限値と、マッチングした倉庫を使用する際の総費用とを比較して、総費用が上限値を上回る場合には、マッチング不成立とする。
- Step8 : マッチングが成立している荷主企業と倉庫企業を導出する。荷主企業の使用倉庫、最適配送経路、総費用を算出する。

$$\sum_{w \in W} \sum_{j \in N} x_{wjk} \leq 1, \forall k \in K \quad (9)$$

$$\sum_{i \in C} y_{iw} d_i \leq q_w, \forall w \in W \quad (10)$$

$$z_{ik} + 1 - \text{bigM}(1 - x_{ijk}) \leq z_{jk}, \quad \forall i \in N, j \neq i \in C, k \in K \quad (11)$$

$$v_{fw} \geq 0, \forall f \in F, w \in W \quad (12)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\}, \forall i \in N, j \in N, k \in K \quad (13)$$

$$y_{iw} \in \{0,1\}, \forall i \in C, w \in W \quad (14)$$

$$z_{ik} \geq 0, \forall i \in C, k \in K \quad (15)$$

(2) 荷主企業モデル

各荷主企業は、工場で生産した貨物を倉庫に保管し、そこから各配送先へ配送するものとする(図-3)。本研究では、実際の例を参考にして、輸送費用や、使用量に応じて被る倉庫費用と荷役費用を設定した。このモデルにおいては、「工場で生産した貨物をどの倉庫に保管するか」という割当問題と、「どの倉庫からどの配送先を巡回して出発した倉庫に戻るか」というLRPが組み込まれる。目的関数は、総費用の最小化とし、最適な配送経路と倉庫選択の組み合わせを求解する。荷主企業モデルを定式化すると、式(1)~(15)ようになる。なお、定式化に使用される集合、パラメータ、決定変数を表-1に整理する。

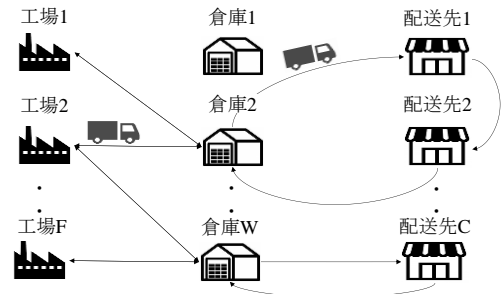


図-3 対象とするサプライチェーン

表-1 定式化に使用する集合、パラメータ、決定変数 (荷主企業モデル)

集合	
F	工場の集合
W	倉庫(倉庫企業)の集合
C	配送先の集合
N	倉庫と配送先の集合: $C \cup W$
K	「倉庫→配送先」における貨物車の集合
パラメータ	
p_f	工場 f の生産量(パレット)
q_w	倉庫 w の容量(坪)
a_w	倉庫 w の倉庫費用(円/坪)
l_w	倉庫 w の荷役費用(円/パレット)
d_i	配送先 i の貨物需要量(パレット)
c_{ij}	i, j 間の輸送費用(円) ($i, j \in N \cup F$)
Q	貨物車の容量(パレット)
決定変数	
v_{fw}	工場 f から倉庫 w に配送される貨物量(パレット)
x_{ijk}	貨物車 k を使用して i, j 間を輸送する場合を1, 輸送しない場合を0とする0-1変数
y_{iw}	配送先 i が倉庫 w を含む経路に含まれる場合を1, 含まれない場合を0とする0-1変数
z_{ik}	倉庫を含まない経路(subtour)を排除するための変数(配送先 i が、貨物車 k を使用した巡回経路において何番目に配送されるかを示す)

$$\min \quad 2 \sum_{f \in F} \sum_{w \in W} c_{fw} \left| \frac{v_{fw}}{Q} \right| + \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{k \in K} c_{ij} x_{ijk} + \sum_{w \in W} a_w \sum_{f \in F} v_{fw} + \sum_{w \in W} l_w \sum_{f \in F} v_{fw} \quad (1)$$

s.t.

$$\sum_{w \in W} v_{fw} = p_f, \forall f \in F \quad (2)$$

$$\sum_{f \in F} v_{fw} = \sum_{i \in C} y_{iw} d_i, \forall w \in W \quad (3)$$

$$\sum_{w \in W} y_{iw} = 1, \forall i \in C \quad (4)$$

$$\sum_{j \neq i \in N} \sum_{k \in K} x_{ijk} = 1, \forall i \in C \quad (5)$$

$$\sum_{j \in N} x_{ijk} = \sum_{j \in N} x_{jik}, \forall i \in N, k \in K \quad (6)$$

$$\sum_{i \in C} \sum_{j \in N} d_i x_{ijk} \leq Q, \forall k \in K \quad (7)$$

$$\sum_{j \in N} x_{ijk} \leq y_{iw} - \sum_{j \in N} x_{wjk} + 1, \quad \forall i \in C, k \in K, w \in W \quad (8)$$

目的関数の第一項は、「工場→倉庫」における輸送費用（往復分）を、第二項は「倉庫→配送先」における輸送費用を、第三項は倉庫費用を、第四項は荷役費用を、それぞれ示している。式(2)は、工場 f の生産量と工場から各倉庫へと配送される貨物の合計量が等しいことを表しており、式(3)は、各工場から倉庫 w に配送される貨物の合計量と、倉庫 w から各配送先へ配送される貨物の合計量が等しいことを表している。また、式(4)は、配送先 i が、いずれか一つの倉庫に必ず接続されることを示している。式(5)は、配送先 i から出発する経路が一つだけであることを、式(6)は、貨物車 k が、配送先 i に立ち寄った後に必ず配送先 i から出発することを意味している。式(7)は、貨物車 k の使用経路における総貨物量が貨物車の容量を超えないことを、式(8)は、配送先 i が複数の配送経路には含まれないことを表している。さらに、式(9)は、貨物車 k が複数経路の配送を行わないことを、式(10)は、倉庫 w から配送する配送先の総貨物需要量が、倉庫 w の容量を超えないことを、式(11)は、倉庫を含まない経路が存在しないことを、それぞれ意味している。

(3) 倉庫企業モデル

倉庫企業は、最適な荷主企業を選択する。具体的には、荷主企業からの貨物需要が集中し、倉庫容量を超える場合には、最適な荷主企業を選択する。そのため、このモデルは、「どの荷主企業に倉庫を貸すか」という倉庫の割当問題となる。各倉庫企業について、倉庫使用量最大化を目的関数（以下の式(16)）として定式化すると、式(16)~(19)のようになる。なお、表-1に追加して、定式化に使用される集合、パラメータ、決定変数を表-2にまとめる。

$$\max \sum_{s \in S} r_{sw} u_{sw}, \forall w \in W \tag{16}$$

s.t.

$$\sum_{s \in S} r_{sw} u_{sw} \leq q_w, \forall w \in W \tag{17}$$

$$\sum_{w \in W} r_{sw} u_{sw} = b_s, \forall s \in S \tag{18}$$

$$u_{sw} \in \{0,1\}, \forall s \in S, w \in W \tag{19}$$

式(17)は、倉庫企業 w が受け入れる荷主企業の総貨物需要量が、倉庫 w の容量を超えないことを表している。式(18)は、荷主企業 s の貨物需要量が総倉庫使用量と等しくなることを意味している。

(4) 解法

荷主企業モデルにおいては、LRPなどの組み合わせ最適化問題への適用実績が多い¹¹⁾¹²⁾タブーサーチを適用する。タブーサーチでは、局所的最適解に陥るのを避けて、探索空間の多様性を高めるタブーリスト⁹⁾が用いられ、

表-2 定式化に使用する集合、パラメータ、決定変数（倉庫企業モデル（表-1の追加分））

集合	
S	荷主企業の集合
パラメータ	
b_s	荷主企業 s の貨物量（パレット）
r_{sw}	荷主企業 s の倉庫 w への貨物需要量（倉庫使用量）（パレット）
決定変数	
u_{sw}	倉庫企業 w が荷主企業 s の貨物需要を受け入れる場合を1、受け入れない場合を0とする0-1変数

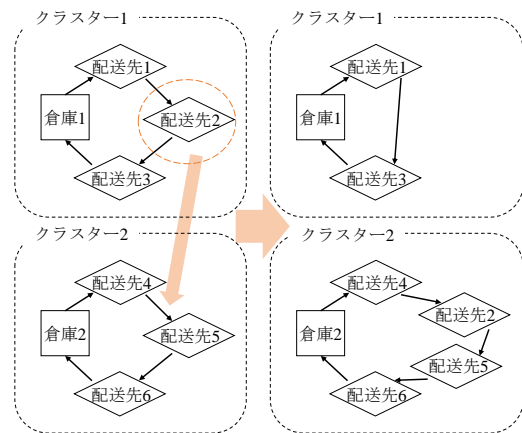


図-4 排出・挿入

解の改善方向への遷移¹³⁾が許容される。本研究では、割当問題とLRPを同時に解くことが可能なメタタブーサーチを適用する。

倉庫企業モデルでは、厳密解法を適用する。一般に、組み合わせ最適化問題はNP困難であると知られているが、本研究で対象とする問題規模においては、厳密解法によって現実的な時間で求解可能である。

タブーサーチに組み込まれる近傍探索法には、本田ら¹⁰⁾と同様に、排出・挿入、交換、追加、突然変異を用いた。排出・挿入は、ある配送経路に含まれている配送先を選択し、その配送先を経路から一度抜き取った後に、別の配送経路の適当な位置に挿入する（図-4）。交換は、同一の配送経路の配送先、または、異なる配送経路の配送先を選択し、それらの配送先を入れ換えて、新たな配送経路を作成する（図-5）。追加は、ある配送経路に含まれている配送先を選択し、経路から抜き出して、倉庫と接続することにより、新たな配送経路を作成する（図-6）。突然変異は、配送経路上の倉庫を選択し、配送経路から取り除いて、別の倉庫に置き換える（図-7）。

荷主企業モデルの解法手順を示したものが図-8である。以降では、LRPを解くタブーサーチを「TS-LRP」、割当問題を解くタブーサーチを「TS-AP」とする。TS-LRPがTS-APを包含した、メタ構造のタブーサーチである。TS-

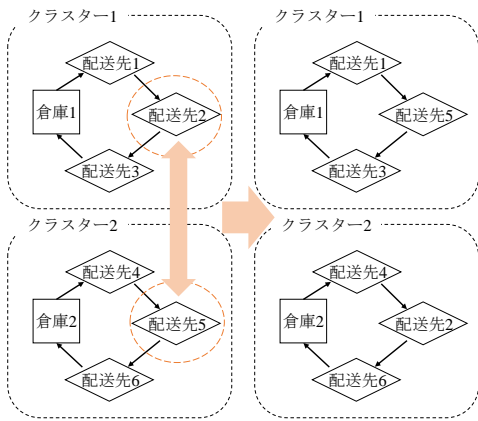


図-5 交換

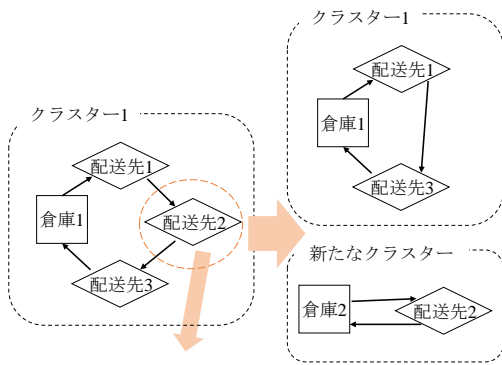


図-6 追加

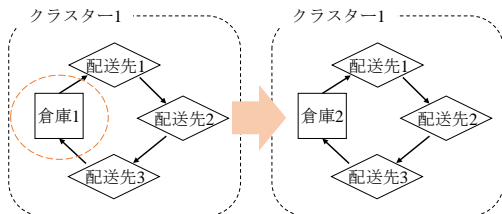


図-7 突然変異

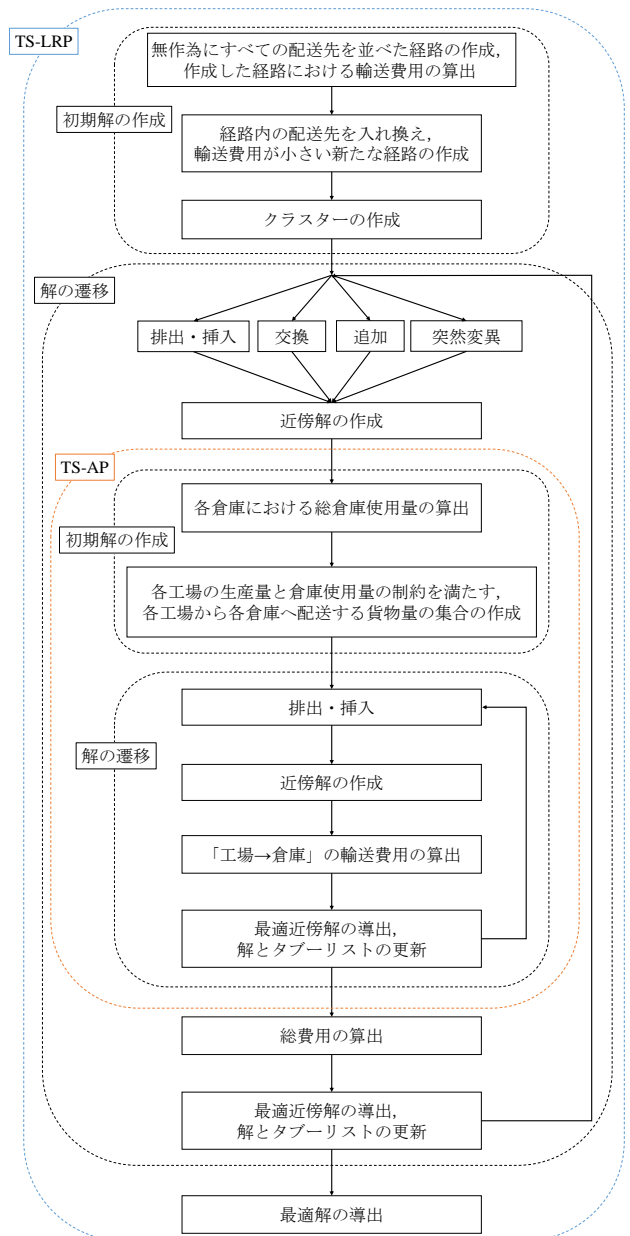


図-8 計算手順（荷主企業モデル）

LRPでは、まず、無作為にすべての配送先を並べた集合を、既定回数だけ交換の操作を行うことにより、比較的距離の近い配送先が順になった集合を作成する。つぎに、この集合を無作為に分けた配送先の集合と倉庫を接続する。これらの倉庫と配送先の集合（クラスター）を初期解とする。続いて、このクラスターに対して、排出・挿入、交換、追加、突然変異の4種類の操作から1つを既定の確率で適用して、解を遷移させる。マルチスタート数は8回、近傍探索数は100回、解の遷移回数は400回とした。タブーリスト数は20とし、総費用の最小化に基づいてタブーリストを更新する。なお、総費用を最小化するために、すべての近傍解においてTS-APを適用する。

TS-APでは、TS-LRPにより得られたクラスターを基にして、無作為に各工場から各倉庫へ配送する貨物量の集合を、初期解として作成する。続いて、排出・挿入を用

いて、解の遷移を行い、総費用最小化を目的関数として、最適解を導出する。近傍探索数は30回、解の遷移回数は30回、タブーリスト数は10とした。なお、トンキロを算出する際には、巡回経路が時計回りか反時計回りかによって差異が生じることから、それらの小さい方の値を採用した。このメタタブーサーチの計算精度を調べるに際しては、最適解が自明である仮想問題を構築して、10回の計算を実行した。目的関数の最良値、最悪値、平均値、および、1回あたりの平均計算時間を調べることにより、提案した解法が良好な性能を示すことを確認した。

3. 計算結果と考察

計算対象とする問題は、実際に倉庫シェアリングサー

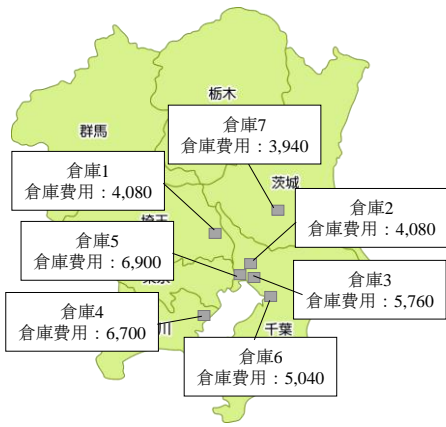


図-9 倉庫の所在地と費用（単位：円/坪）

ビスを営む物流プラットフォーム企業のデータを活用して作成した。荷主企業が3社と倉庫企業が7社（倉庫が7箇所）である。倉庫企業の所在地と費用は、図-9に示す通りである。各荷主企業を順に、荷主企業1、荷主企業2、荷主企業3とし、マッチングモデルを適用して、荷主企業ごとに最適解を導出する。その比較対象として、各荷主企業が実際に利用する、または、使用する可能性が高い倉庫にすべての貨物を保管した場合を、「実際に生じうる状態」として想定し、その状況下で、荷主企業モデルを適用して導出した最適解を「現状推定値」とする。

(1) 荷主企業1の結果

工場、配送先はそれぞれ、2箇所、15箇所である。各拠点の所在地は、図-10に示す通りである。図中の括弧内の数値は、工場の生産量と配送先の需要量（いずれも単位はパレット）を表している（以降の図-13、図-16についても同様である）。

現状推定値においては、倉庫1だけを使用するという制約下で最適化計算を行うことにより、図-11に示すような倉庫の利用状況と配送経路が推定された。一方、最適解における倉庫の利用状況と配送経路を示したものが、図-12である。各種費用と社会的効果を比較した表-3より、最適解において、倉庫費用は現状推定値と変わらない一方で、輸送費用は減少している。また、貨物車台数は変わらないものの、総走行距離、環境負荷、トンキロのいずれもが削減されている。輸送費用や総走行距離の減少は、「倉庫→配送先」の配送経路の効率化によって、貨物が複数の倉庫に分散された効果であると考えられる。また、環境負荷とトンキロの抑制は、総走行距離の減少に起因するものと推察される。

(2) 荷主企業2の結果

工場、配送先はそれぞれ、2箇所、7箇所である。各拠点の所在地は、図-13に示す通りである。倉庫1だけを使用するという制約下で最適化計算を行った結果が現状推

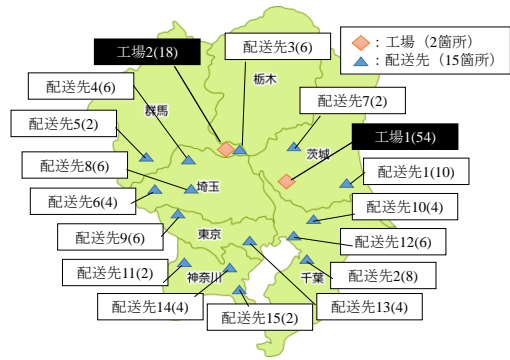


図-10 工場と配送先の所在地（荷主企業1）

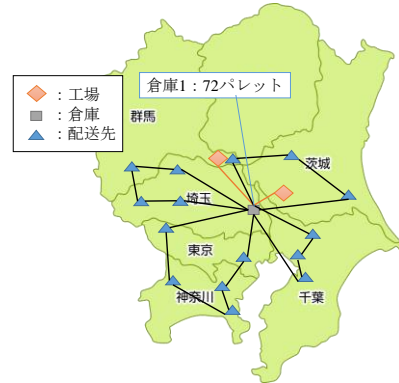


図-11 倉庫利用と配送経路（荷主企業1、現状推定値）

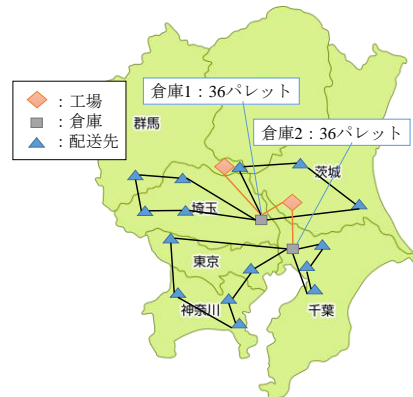


図-12 倉庫利用と配送経路（荷主企業1、最適解）

表-3 各種費用と社会的効果（荷主企業1）

	現状推定値	最適解
倉庫費用（円）	73,440	73,440
荷役費用（円）	20,880	21,240
輸送費用（工場→倉庫）（円）	38,020	47,180
輸送費用（倉庫→配送先）（円）	102,720	90,150
輸送費用合計（円）	140,740	137,330
総費用（円）	235,060	232,010
貨物車台数（台）	8	8
総走行距離（km）	1,032	921
環境負荷（kg-CO2）	5,485	4,891
トンキロ（t・km）	2,994	2,590

表-4 各種費用と社会的効果（荷主企業2）

	現状推定値	最適解
倉庫費用（円）	57,120	57,120
荷役費用（円）	15,660	15,840
輸送費用（工場→倉庫）（円）	61,260	65,960
輸送費用（倉庫→配送先）（円）	85,320	74,490
輸送費用合計（円）	146,580	140,450
総費用（円）	219,360	213,410
貨物車台数（台）	6	6
総走行距離（km）	1,048	983
環境負荷（kg-CO2）	4,175	3,919
トンキロ（t・km）	2,780	2,423

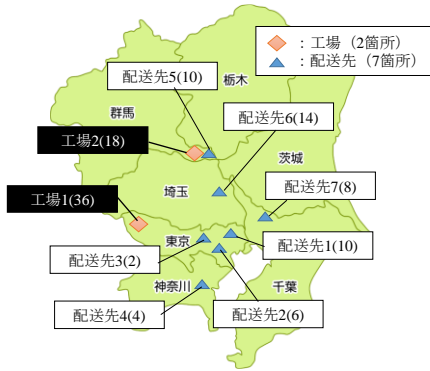


図-13 工場と配送先の所在地（荷主企業2）



図-14 倉庫利用と配送経路（荷主企業2, 現状推定値）

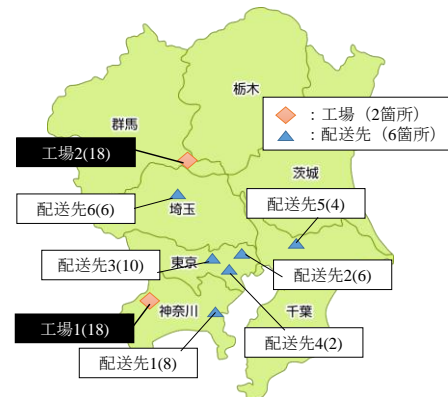


図-16 工場と配送先の所在地（荷主企業3）

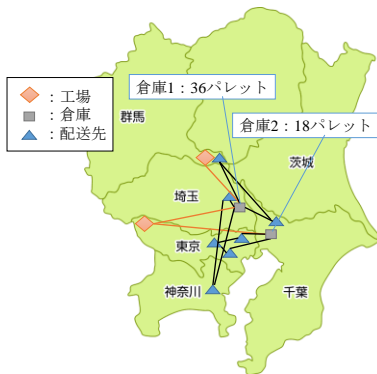


図-15 倉庫利用と配送経路（荷主企業2, 最適解）

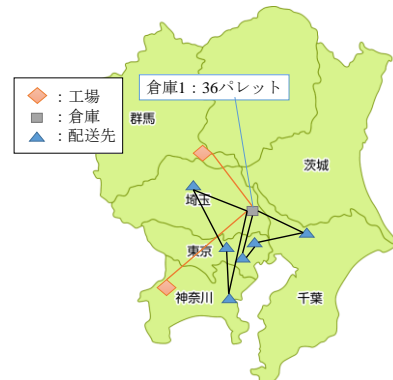


図-17 倉庫利用と配送経路（荷主企業3, 現状推定値）

定値であり、図-14 に示すような倉庫の利用状況と配送経路が推定された。最適解における倉庫の利用状況と配送経路を示したものが、図-15 である。各種費用と社会的効果を比較した表-4 より、最適解において、荷主企業 1 と同様の効果が窺える。荷主企業 2 においても、「倉庫→配送先」の配送経路効率化による、複数倉庫への貨物分散効果によるものと考えられる。

(3) 荷主企業3の結果

工場、配送先が、それぞれ2箇所、6箇所であり、各拠点の所在地は、図-16 に示す通りである。現状推定値においては、倉庫 1 だけを使用するという制約下で最適化計算を行うことにより、図-17 に示すような倉庫の利

用状況と配送経路が推定された。一方、最適解における倉庫の利用状況と配送経路を示したものが図-18、各種費用と社会的効果を示した表-5である。

最適解においては、倉庫費用が増加する一方で、輸送費用は減少し、結果として総費用が削減されている。また、貨物車台数は変わらないものの、総走行距離、環境負荷、トンキロのいずれもが削減されている。これらの結果は、荷主企業3においても、「倉庫→配送先」の配送経路効率化がもたらす、倉庫分散効果であると推察される。

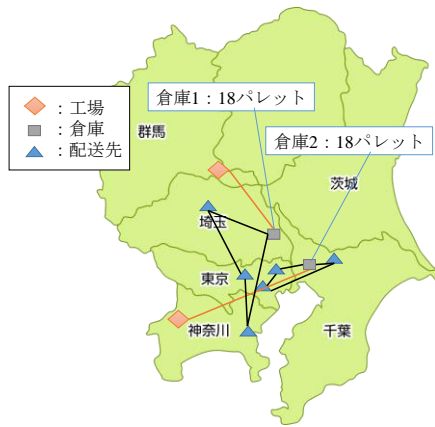


図-18 倉庫利用と配送経路（荷主企業3，最適解）

表-5 各種費用と社会的効果（荷主企業3）

	現状推定値	最適解
倉庫費用（円）	36,720	40,800
荷役費用（円）	10,440	10,620
輸送費用（工場→倉庫）（円）	49,280	49,420
輸送費用（倉庫→配送先）（円）	66,630	56,110
輸送費用合計（円）	115,910	105,530
総費用（円）	163,070	156,950
貨物車台数（台）	4	4
総走行距離（km）	844	751
環境負荷（kg-CO2）	2,243	1,994
トンキロ（t・km）	2,483	2,078

表-6 各種費用と社会的効果（全体）

	現状推定値	最適解
倉庫費用（円）	167,280	171,360
荷役費用（円）	46,980	47,700
輸送費用（工場→倉庫）（円）	148,560	162,560
輸送費用（倉庫→配送先）（円）	254,670	220,750
輸送費用合計（円）	403,230	383,310
総費用（円）	617,490	602,370
貨物車台数（台）	18	18
総走行距離（km）	2,924	2,655
環境負荷（kg-CO2）	11,903	10,804
トンキロ（t・km）	8,257	7,091

(4) 全体的な効果

荷主企業3社の費用と効果の総計を表-6に示す。対象とするサプライチェーンの全体においても、総費用の低減、総走行距離、環境負荷、トンキロの抑制が確認された。これらの結果は、倉庫配置と配送経路の最適化を包含した倉庫シェアリングサービスが、企業と社会の双方にとって有益であることを示唆するものと考えられる。

4. おわりに

本研究では、新しいプラットフォームビジネスである倉庫シェアリングサービスに注目し、そこに倉庫配置や配送経路の最適化を組み込むことが、企業と社会の双方に有益であることを示した。最適な倉庫配置と配送経路を求めるに際して、実際の倉庫シェアリングサービスを参考にして問題設定を行うとともに、「工場→倉庫」と「倉庫→配送先」の二段階のサプライチェーンを考慮した。また、割当問題とLRPを同時に考慮する新しい問題を定式化し、マッチングモデル、荷主企業モデル、倉庫企業モデルを含む最適化計算に、メタブーサーサーチや列挙法を用いて、最適解の導出を行った。最適解と現状推定値（実際に生じる状態）を比較することにより、企業効果と社会的効果を推定した結果、倉庫シェアリングサービスに倉庫配置と配送経路の最適化を組み込むことにより、輸送費用の抑制による総費用の低減（企業効果）と、走行距離の抑制や、それに伴う環境負荷の低減（社会的効果）が確認された。

本研究から得られた知見は、倉庫シェアリングサービスを営むプラットフォーム企業や、サービス利用企業に対して、倉庫シェアリングサービスが、企業と社会の双方に利益をもたらすことができるビジネスモデルであること、ならびに、双方にいつその利益がもたらされるよう、倉庫配置や配送経路を最適化すべきであることを示唆するものである。また、行政が、倉庫賃貸システムをマネジメントすることも可能であることから、都市計画において、倉庫シェアリングサービスが、新たな物流施策を企図するための一助となる可能性もある。わが国では、総合物流施策大綱¹⁴や総合効率化法（物効法）¹⁵に、様々な物流施策が既に示されているが、それら施策に加えて、倉庫シェアリングサービスと、それに倉庫配置や配送経路の最適化を包含することが、すなわち、賃貸を通じた既存倉庫の有効活用が、新たな有効施策であることを、本研究は示唆しているとも考えられる。

謝辞：本研究の成果は、倉庫シェアリングサービスを営む実際の企業からいただいた、貴重なデータと助言に支えられたものである。ここに記して、謝意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省 HP：物流を取り巻く動向と物流施策の現状について、https://www.mlit.go.jp/common/00135469_0.pdf（最終アクセス日：2022.02.03）
- 2) LNEWS HP：souco/物流倉庫マッチングシステムのサービス開始、https://www.lnews.jp/2019/06/106273_08.html（最終アクセス日：2022.02.03）
- 3) 錦織昭峰，一森哲男，渡辺展男，金指正和，青木兼一：優先順位を考慮した大規模一般化割当問題のた

- めの近似解法, 情報処理学会研究報告ハイパフォーマンスコンピューティング, Vol.26, pp.1-10, 1991.
- 4) 片山直登: ロジスティックネットワークにおける製品の工場割当問題, 日本物流学会誌, Vol.12, pp.111-118, 2004.
 - 5) 岡野裕之, 柳沢弘揮, 依田邦和: 時間制限付き混載輸送ネットワーク最適化問題, 第 18 回 RAMP シンポジウム予稿集, pp.77-91, 2006.
 - 6) Perl, J. and Daskin, M.S.: A warehouse location-routing problem, *Transportation Research Part B*, Vol.19(5), pp.381-396, 1985.
 - 7) Nguyen, V.P., Prins, C. and Prodhon, C.: A multi-start iterated local search with tabu list and path relinking for the two-echelon location-routing problem, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol.25(1), pp.56-71, 2012.
 - 8) Nagy, G. and Salhi, S.: Location-routing: Issues, models and methods, *European Journal of Operational Research*, Vol.177(2), pp.649-672, 2007.
 - 9) Tuzun, D. and Burke, L.I.: A two-phase tabu search approach to the location routing problem, *European Journal of Operational Research*, Vol.116(1), pp.87-99, 1999.
 - 10) 本田智巳, 山田忠史, Qureshi Ali Gul, 西田壮汰: 倉庫マッチングシステムを対象とした倉庫配置と配送経路の最適化, 土木計画学研究・講演集, Vol.63, CD-ROM, 2021.
 - 11) Glover, F.: *Tabu Search Fundamentals and Users*, Technical Paper, University of Colorado, 1995.
 - 12) Glover, F. and Laguna, M.: *Tabu Search, Handbook of Combinatorial Optimization*, Kluwer Academic Publishers, 1993.
 - 13) 大植裕之, 大西克実, 中野秀男, 榎原博之: 巡回セールスマン問題を対象とした並列タブーサーチにおけるプロセス間通信の効果について, 情報処理学会研究報告, MPS, 数理モデル化と問題解決研究報告, Vol.62, pp.33-36, 2006.
 - 14) 国土交通省 HP: 総合物流施策大綱 (2017 年度~2020 年度), <https://www.mlit.go.jp/common/001201971.pdf> (最終アクセス日: 2022.02.03)
 - 15) 国土交通省 HP: 物流総合効率化法 (流通業務の総合化及び効率化の促進に関する法律) の概要, <https://www.mlit.go.jp/common/001374409.pdf>, (最終アクセス日: 2022.02.03)