

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

本田 智巳¹・山田 忠史²・Qureshi Ali Gul³・西田 壮汰⁴

¹非会員 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: thonda@trans.kuciv.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: nishida.sota.47m@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発生源ともなっている。物流ビジネスにおいては、プラットフォーム型ビジネスの一種である、短期的な倉庫賃貸に関するマッチングビジネスが登場してきている。本研究では、そのような倉庫マッチングシステムに着目し、割当問題とLocation Routing Problemを同時に解く問題を定式化したうえで、タブーサーチを用いた解法アルゴリズムを用いることにより、最適な倉庫配置と配送経路の導出手法を組み込むことの効果を推定した。さらに、最適解における企業の効果と社会的効果を推定し、効果をもたらす要因について考察した。その結果、企業の効果として、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、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 matching, allocation problem, LRP, tabu search, social impact

1. はじめに

物流は社会に不可欠の業務である一方で、解決すべき多くの社会的問題をかかえている。倉庫などの物流施設と居住地の混在は、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。自動車に過度に依存するわが国の物流¹⁾は、交通混雑やエネルギー消費、環境負荷などの問題を生じさせている。一方、物流業者も集配頻度の増加や、貨物車の積載率低下²⁾などの課題を抱えており、物流業務の効率化が業界全体の喫緊の課題となっている。さらに、近年、SDGsと呼ばれる国際社会共通の目標達成が課されるなど、持続可能性が物流業界にも強く求められている。

最近では、AmazonやFacebookに代表されるプラットフォームビジネスが盛んになっている。物流業界においても、その一例として、倉庫を借りたい主体と倉庫を貸したい主体のマッチングを行う、倉庫マッチングシステムが登場している³⁾。このシステムの最大の特徴は、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。倉庫マッチングシステムは、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。さらに、このシステム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も図れる。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なわけではないが、倉庫マッチングシステムは、企業と社会のwin-winをもたらす可能性があり、SDGsの進展にも貢献可能である。わが国では、総合物流施策大綱⁴⁾や総合効率化法(物効法)⁵⁾に、有効な物流施策が示されているが、倉庫マッチングシステムと、それに倉庫配置や配送経路の最適化を包含することの有用性が示されれば、賃貸を通じた既存倉庫の有効活用が、新たな施策であることも示唆できる。

本研究では、倉庫マッチングシステムに注目し、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、既存の倉庫から倉庫マッチ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（輸送費用と倉庫費用の和）で計測し、社会的効果は、貨物車の台数、総走行距離、環境負荷（CO₂排出量）、トンキロに注目する。「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を設定し、巡回を考えない（出発地から目的地まで直線的に移動する）場合と、「倉庫→配送先」において巡回経路を考慮する場合の二種類の問題を設定した。後者の問題では、「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⁶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定する問題⁷や、サプライチェーン上の輸送経路への貨物割当とキャリアの運行スケジュールを決定する問題⁸などがあるが、倉庫マッチングシステムへの適用例は見られない。

LRPは、一定の要求量を持つ顧客へ貨物を輸配送する際に、最適な物流施設配置と巡回型配送経路を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LRPと、そのヒューリスティクス解法の提案⁹や、LRP-2E (Two-Echelon LRP) と、マルチスタートを採用したタブーリスト付き局所探索法の提案¹⁰などがある。しかし、本研究のように、割当問題とLRPを同時に考慮していること、および、その求解手法を提案している研究は存在しない。また、倉庫配置や配送経路を考慮した倉庫マッチングシステムの有用性や効率化に着目した研究も見られない。

一般にLRPはNP困難な問題である¹¹ため、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。タブーサーチや遺伝的アルゴリズム、局所探索法を用いた解法は、特に多く見られ、二段階タブーサーチ¹²のような発展的解法も見られる。本研究でも、二段階タブーサーチを採用する。また、タブーサーチに組み込まれる近傍探索法についても、様々な工夫が施されてきている。配送経路最適化に有効な排出(eject)と挿入(insert)¹³、交換(swap)、Or-opt、追加(add)¹⁴などであり、後述のように、本研究においても、それらを活用する。

2. 問題の定式化と解法

(1) 巡回経路を考慮しない場合

実際の倉庫マッチングシステムを参考にして、「工場→倉庫」と「倉庫→配送先」の二段階のサプライチャー

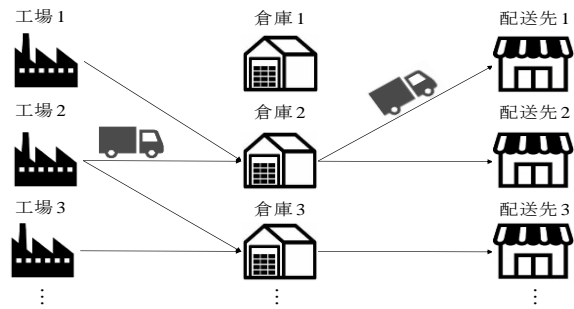


図-1 対象とするサプライチェーン
(巡回経路を考慮しない場合)

表-1 定式化に使用する集合, パラメータ, 決定変数

集合	
F	工場の集合
W_f	工場 f で生産される貨物の集合 ($f \in F$)
M	倉庫の集合
C	配送先の集合
N	$C+M$
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 (トン)
s_w	貨物 w の量 (パレット) ($w \in W_f$)
q_m	倉庫 m の容量 (坪)
a_m	倉庫 m の倉庫費用 (円/坪)
d_i	配送先 i の需要量 (パレット)
c_{ij}	ij 間の輸送費用 (円) ($i, j \in N + F$)
Q	貨物車の容量 (パレット)
決定変数	
x_{ijk}	貨物車 k を使用して ij 間を輸送する場合1, 輸送しない場合0とする0-1変数
z_{im}	配送先 i が倉庫 m を含む経路に含まれる場合1, 含まれない場合0とする0-1変数
y_{wm}	貨物 w が倉庫 m に配送される場合1, 配送されない場合0とする0-1変数

ンにおいて、工場で生産された貨物はいったん倉庫に保管され、そこから各配送先へ配送されるものとする（図-1）。各区間において、巡回を考慮しないので、出発地から目的地まで直線的に移動するものとし、複数の拠点に立ち寄ることはないものとする。実際の例を参考にして、輸送費用を設定し、各倉庫には、使用量に応じて課される倉庫費用を設定した。

この問題においては、「工場が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、「配送先が要求する量の貨物をどの倉庫から配送されるか」という割当問題の二つが組み合わせられる。総費用の最小化を目的関数とし、最適な配送経路と倉庫選択の組み合わせを導出する。この問題を定式化すると、式(1)~(10)のようになる。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。

$$x_{ijk} \in \{0,1\}, \forall i \in M, j \in C, k \in K \quad (22)$$

$$z_{im} \in \{0,1\}, \forall i \in C, m \in M \quad (23)$$

$$y_{wm} \in \{0,1\}, \forall w \in W_f, m \in M \quad (24)$$

$$u_{ik} \geq 0, \forall i \in N, k \in K \quad (25)$$

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、それぞれ示している。式(12)~(14)、式(19)、式(20)は、それぞれ式(2)~(4)、式(6)、式(7)と同様の意味を表している。式(15)は、配送先*i*から出発する経路が一つだけであることを表しており、式(16)は、貨物車*k*が、配送先*i*に立ち寄った後に必ず配送先から出発することを表している。また、式(17)は、貨物車*k*を使用した経路における貨物の合計量が貨物車の容量を超えないことを表しており、式(18)は、配送先*j*が複数の配送経路に含まれることはないことを表している。式(21)は、倉庫を含まない経路が存在しないことを表している。

(3) 解法

本研究では、LRPなどの組み合わせ最適化問題の適用実績が多い^{15,16}タブーサーチを適用する。タブーサーチにおいては典型的に、局所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¹⁹が用いられ、解の改悪方向への遷移¹⁷が許容することが許される。本研究では、巡回を考慮しない場合と考慮する場合の二種類を対象とする。考慮する問題に対しては、割当問題とLRPを段階的に解くことが可能な二段階のタブーサーチを適用する。以降では、考慮しない問題の解法を「解法1」、考慮する問題の解法を「解法2」とする。

タブーサーチに組み込まれる近傍探索法には、排出・挿入、交換、追加を用いた。排出・挿入は、ある配送経路に含まれている顧客を選択し、その顧客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-3）。交換は、異なる配送経路の顧客を選択し、それらの顧客を入れ換えて、新たな配送経路を作成する（図-4）。追加は、配送経路上の拠点を選択し、その拠点を配送経路から取り除く代わりに、別の拠点を配送経路の適当な位置に追加する（図-5）。

解法1の手順を示したものが図-6である。初期解の作成においては、最初に、各配送先を無作為に倉庫に割り当てた。つぎに、各工場の貨物を各貨物の単位ごとに分割し、それぞれの貨物がどの倉庫に配送されるかを決定した。その後、近傍探索法を用いて解を探索し、タブーリストを更新した。近傍探索法には、交換と追加の二種類を用いた。局所最適解に陥ることが多くみられたことから、500回の解の遷移のうち、350回目までは倉庫費用の最小化を目的関数とし、その後に総費用の最小化を目

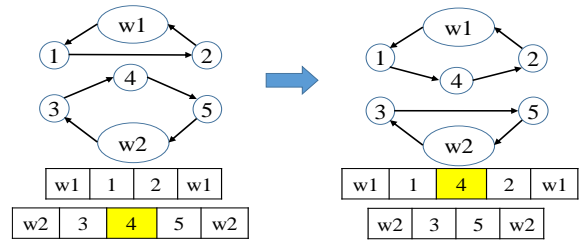


図-3 排出と挿入

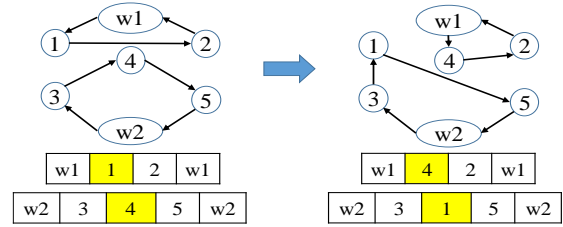


図-4 交換

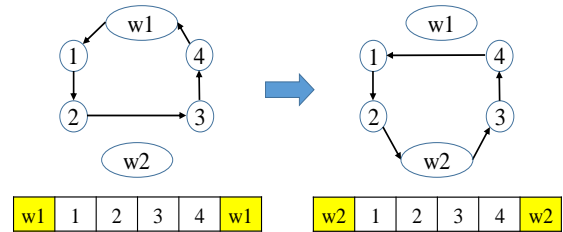


図-5 追加

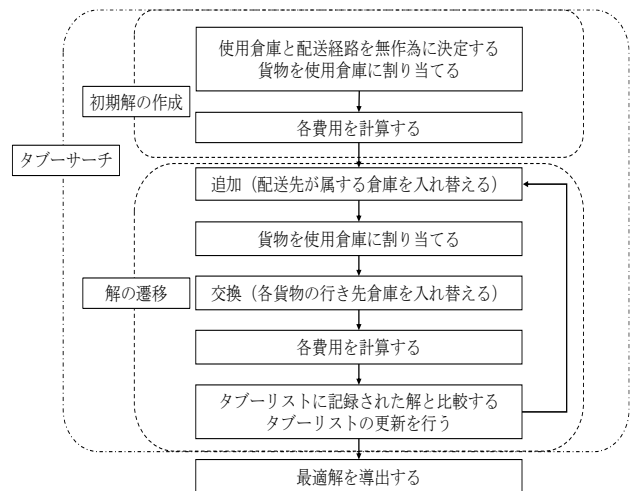


図-6 計算手順（解法1）

的関数とする工夫を行った。使用した各種パラメータは、マルチスタート回数が80回、解の遷移先候補作成数が200個、タブーリスト数が40個である。解の遷移回数とは、解の遷移先候補の探索を繰り返した回数、タブーリスト数とは、最適解の候補をタブーリストに記録した個数を、それぞれ示している。

解法2は、図-7のように、巡回を考慮する場合の二段階タブーサーチである。一段階目では、距離の近い配送先どうしをまとめた集合（配送先クラスター）を作成し、

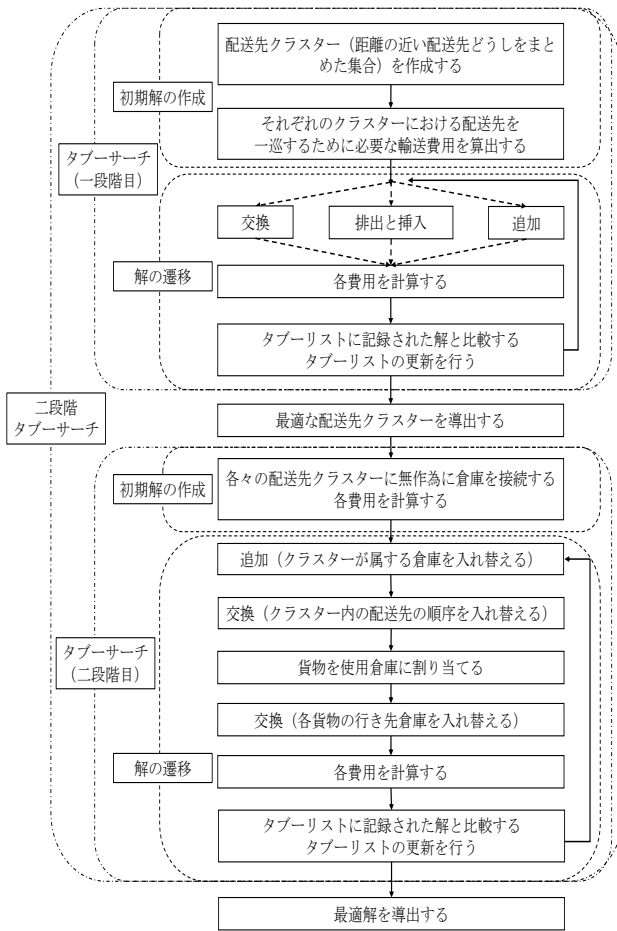


図-7 計算手順（解法2）

各クラスター内の配送先を一巡することで、初期解とした。続いて、各クラスターに属する配送先に対して、排出・挿入、交換、追加の三種類の近傍探索法の中から一種類を無作為に用いて、解の遷移を行った。解の遷移候補は200個作成し、解の遷移回数は200回である。タブーリスト数は30個とし、輸送費用の最小化に基づいてタブーリストを更新することで、配送先を倉庫に接続せず、配送先クラスターを最適化することとした。二段階目では、一段階目で得た各配送先クラスターに対して無作為に倉庫を接続して、初期解を作成した。続いて、交換と追加を用いて、解の遷移を行い、総費用の最小化を目的関数とし、最適解の導出した。解の遷移候補を100個作成し、タブーリスト数は30個とした。解法2においても、局所最適解に陥ることが多くみられたことから、500回の解の遷移のうち、200回目までは倉庫費用の最小化を目的関数とし、その後、総費用の最小化を目的関数とした。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、小さい方の値を採用した。

解法1と解法2の計算精度を調べるにあたり、最適解が自明である二種類の仮想問題を構築し、それぞれの問題に対して解法アルゴリズムを10回実行した。その際、目

的関数値の最良値、最悪値、平均値、および、解法アルゴリズムを1回実行する際の平均計算時間を調べることにより、提案したが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

前章で示した手法を、実際に倉庫マッチングビジネスを営む物流プラットフォーム企業Aのデータを活用した問題に適用する。

(1) 巡回を考慮しない場合（数値計算例1）

工場、倉庫、配送先がそれぞれ、1箇所、7箇所、20箇所であり、各拠点の所在地は、図-8と図-9に示す通りである。配送先が全国に分布しており、かつ、それぞれの



図-8 配送先の所在地（数値計算例1）

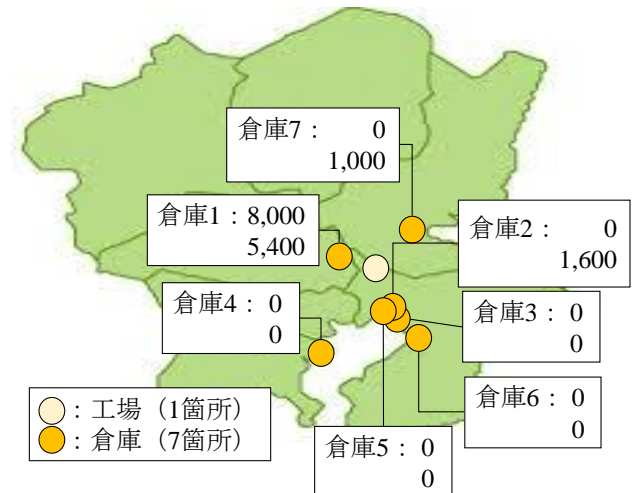


図-9 倉庫利用状況（数値計算例1）

（単位：パレット、上段が現状推定値、下段が最適解）

表-2 各種費用と社会的効果の推定値 (数値計算例 1)

	現状	最適解
倉庫費用 (円)	8,160,000	8,115,000
荷役費用 (円)	2,320,000	2,336,000
輸送費用 (工場→倉庫) (円)	1,993,600	2,280,850
輸送費用 (倉庫→配送先) (円)	10,743,000	10,253,410
輸送費用合計 (円)	12,736,600	12,534,260
総費用 (円)	23,216,600	22,985,260
貨物車台数 (台)	896	896
総走行距離 (km)	152,296	148,673
環境負荷 (kg-CO ₂)	90,634,883	88,478,752
トンキロ (t・km)	939,354	917,279

配送先における貨物需要量も大きいので、配送先の巡回は行われず、巡回経路を考慮しない問題として、解法1で求解する。倉庫費用は、使用する坪数に応じて課される倉庫賃料に加えて、保管するパレット数に応じて課される荷役費用を考慮した。輸送費用は、配送時間に応じて加算される貨物車使用料と、有料道路使用料を考慮した。工場の生産量を8000パレット、貨物車の容量を18パレットとし、倉庫賃料は50坪単位で加算されるものとした。坪とパレットの対応は、1坪あたり4パレットである。

企業Aの実際の倉庫活用状況に基づいて、各種数値を推定した結果を「現状」とする。最適解は、図-9の通りであり、各倉庫からの配送先は、倉庫1から配送先5-9, 11~15, 20に、倉庫2から配送先10, 16~19に、倉庫7から配送先1~4に、それぞれ配送することとなった。現状と最適解を比較した結果が、表-2である。最適解においては、倉庫費用と輸送費用の双方が減少している。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。輸送費用合計や総走行距離の減少は、「倉庫→配送先」の配送経路が効率化されるように、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) 巡回を考慮する場合 (数値計算例2)

数値計算例1に工場を1箇所追加して、工場、倉庫、配送先をそれぞれ、2箇所、7箇所、15箇所とする。各拠点の所在地は、図-10に示す通りである。巡回経路を考慮する問題であるので、解法2を用いて最適解を導出する。

企業Aが実際に利用する倉庫に全ての貨物を保管した場合を、実際に生じる状態として想定し、そのときの各種推定値を「推定値」と記述する。このとき、倉庫1だけを使用するという制約下で最適化計算を行い、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。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示した表-3より、最適解においては、倉庫費用は変わらない一

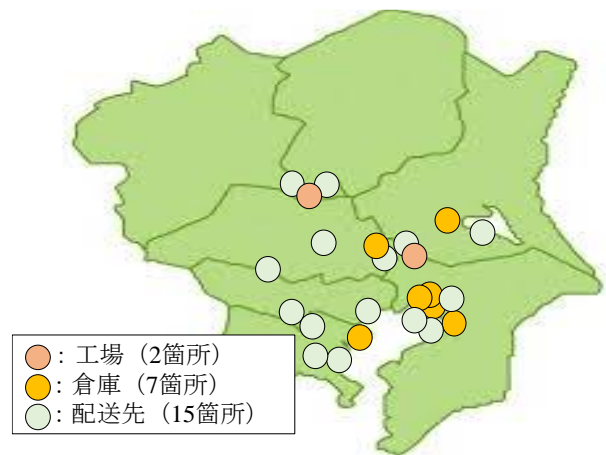
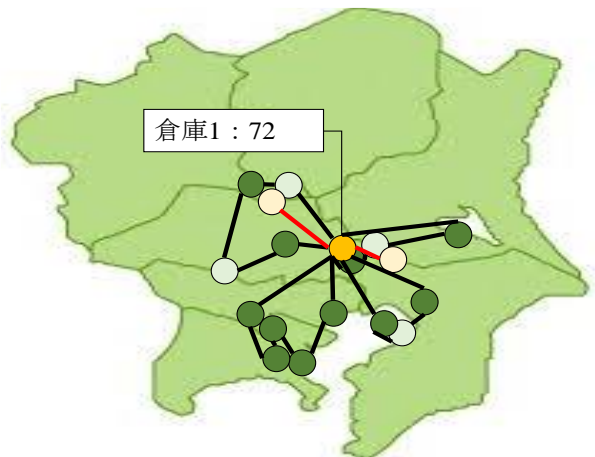
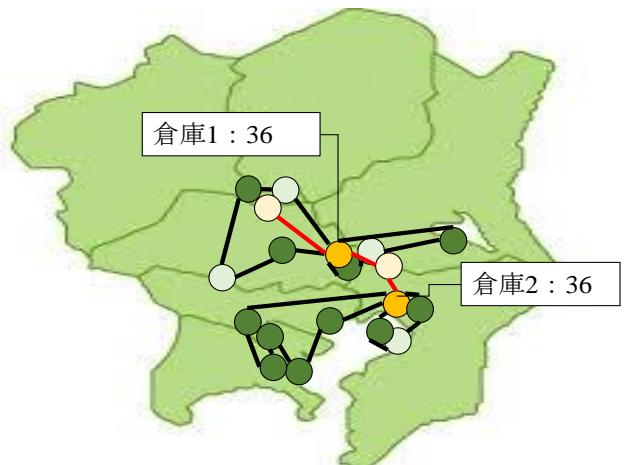


図-10 工場、倉庫、配送先の所在地 (数値計算例 2)

図-11 倉庫利用状況と配送経路 (推定値)
(単位 : パレット)図-12 倉庫利用状況と配送経路 (最適解)
(単位 : パレット)

方で、輸送費用は減少している。また、数値計算例1と同様に、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、数値計算例2においても、「倉庫→配送先」の配送経路が効率化されるように、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。

表-3 各種費用と社会的効果の推定値 (数値計算例 2)

	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-CO ₂)	5,485	4,891
トンキロ (t・km)	2,994	2,590

4. おわりに

本研究では、物流に関する社会問題の解決に有効な手段として、倉庫マッチングシステムに注目し、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あたり、実際の倉庫マッチングシステムを参考にして、「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うえで、問題に応じてカスタマイズしたタブーサーチを用いて、最適解の導出を行った。その際、割当問題とLRPを同時に考慮する新しい問題を定式化した。さらに、提案した手法を用いて、実際的な問題を対象として、最適解における企業の効果と社会的効果の推定も行った。その結果、倉庫マッチングシステムに倉庫配置と配送経路の最適化を組み込むことにより、輸送費用の削減による総費用の低減（企業の効果）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、倉庫マッチングシステムのプラットフォームや利用企業に対して、倉庫マッチングシステムが、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り、双方にいつその利益がもたらされるよう、最適化が包含されたモデルへと拡張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、都市物流計画において、倉庫マッチングが、新たな施策の企画の一助となる可能性もある。

謝辞：本研究は、実際の企業からの貴重なデータと助言に支えられたものである。ご協力いただいた企業に対して、御礼申し上げます。

参考文献

1) 国土交通省 HP：物流を取り巻く動向について 令和 2

年 7 月, <https://www.mlit.go.jp/common/001354692.pdf> (最終アクセス日: 2020.12.20)

- 2) 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/001354690.pdf> (最終アクセス日: 2020.12.20)
- 3) 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/2019/06/10627308.html> (最終アクセス日: 2020.2.23)
- 4) 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: 2021.01.02)
- 5) 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: 2021.02.07)
- 6) 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クスコンピューティング, Vol.26, pp.1-10, 1991.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) Perl, J. and Daskin, M.S.: A warehouse location-routing problem, *Transportation Research Part B*, Vol.19(5), pp.381-396, 1985.
- 10) 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.
- 11) Nagy, G. and Salhi, S.: Location-routing: Issues, models and methods, *European Journal of Operational Research*, Vol.177(2), pp.649-672, 2007.
- 12) 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.
- 13) Gendreau, M., Guertin, F., Potvin, J.Y. and Seguin, R.: Neighborhood search heuristics for a dynamic vehicle dispatching problem with pick-ups and deliveries, *Transportation Research Part C*, Vol. 14(3), pp.157-174, 2006.
- 14) Jarboui, B., Derbel, H., Hanafi, S. and Mladenovi, N.: Variable neighborhood search for location routing, *Computers & Operations Research*, Vol.40, pp.47-57, 2013.
- 15) Glover, F.: *Tabu Search Fundamentals and Users*, Technical Paper, University of Colorado, 1995.
- 16) Glover, F. and Laguna, M.: *Tabu Search*, *Handbook of Combinatorial Optimization*, Kluwer Academic Publishers, 1993.
- 17) 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.