

倉庫シェアリングサービスを踏まえた  
利潤追求型 SCN の倉庫配置計画

東京大学工学部システム創成学科

4年 森島 周亮

講師 川崎智也

## 要旨

近年物流における倉庫利用の形態として倉庫シェアリングサービスというものが普及し始めている。これは遊休スペースを活用したいと考えている倉庫事業者がデジタルプラットフォームを介して倉庫を寄託型の契約でそのスペースを貸し出すというビジネスモデルであり、そのサービスがもつ従量課金制で倉庫を即座に利用可能という特徴は荷主に従来の集約型の倉庫利用とは異なる分散型の利用の可能性をもたらしている。これは分散型の利用であればより短い時間で需要地に貨物を輸送できるためであり、従来のコスト削減型のサプライチェーンネットワークから利潤追求型のサプライチェーンネットワークの構築を可能にする。

本研究では卸売と小売の機能を有している企業を対象として、その企業が得る利潤を最大化する施設配置問題として混合整数線形計画法によって解いた。企業が工場から製品を入荷して需要地へ製品を販売するまでに生じる全ての収入と費用を計上することによって目的関数を構築し、その目的関数を利用する倉庫の数毎に解くことによって倉庫の数に対して利潤がどのように変化するのかを観察して最適な倉庫の集約度合いを検討した。ここでは関東圏内にある倉庫シェアリングサービスで用いられている実際の倉庫データを用いてケーススタディを行った。また、倉庫の集約・分散や倉庫シェアリングサービスの利用に影響すると考えられるシナリオ分析として小売店集合の地理的变化、貨物の時間価値の変化、需要の時間的分散に関して分析を行った。

これらの分析から SCN での倉庫小売店間の配送時間を短くすることは売上、費用の両面から見て利潤に好影響を与えることがわかった。SCN において利潤を追求する際には、倉庫を増やし倉庫小売店間の配送時間を減らすことで得られる利潤の増加分と利用倉庫を増やすために必要な費用のバランスを考えながら利用する倉庫を増やし分散利用するのが好ましく、特に利用倉庫を増やす際に必要な費用を抑えることができる倉庫シェアリングサービスは分散型の倉庫配置に適していると推察される。

# 目次

1	はじめに	1
2	既往研究の整理と本研究の位置付け	3
2.1	既往研究のレビュー	3
2.2	本研究の目的	4
3	手法	5
3.1	モデルの対象と構成	5
3.2	ネットワークと計算の流れ	6
3.3	目的関数の説明	7
3.3.1	目的関数と決定変数	8
3.3.2	売上	8
3.3.3	施設費用	9
3.3.4	機会費用	9
3.3.5	取引費用	9
3.3.6	発注費用と在庫関連費用	10
3.3.7	輸送費用	12
3.3.8	販売機会損失費用	13
3.3.9	最適化問題と制約条件	13
4	ケーススタディ	15
4.1	利用するデータ	15
4.2	結果	17
5	シナリオ分析	22
5.1	シナリオの設定	22
5.2	シナリオ I：小売店の位置と密度の変化	23
5.3	シナリオ II：貨物の時間価値の変化	29
5.4	シナリオ III：需要の季節性	34
6	おわりに	40
	参考文献	42

# 1 はじめに

近年物流における倉庫利用の形態として倉庫シェアリングサービスというものが普及し始めている。2021年6月に閣議決定された「総合物流施策大綱」では、現代においてEC事業の拡大等に伴って荷物の保管需要の多様化が進展していることから、倉庫において保管需要の変化に迅速かつ的確に対応していくために物流業界における労働生産性の改善に向けた革新的な取組の一つとして倉庫シェアリングサービスが挙げられている<sup>[1]</sup>。この倉庫シェアリングという考え方はシェアリング・エコノミーという個人が保有する遊休資産（スキルのような無形のものも含む）の貸出しを仲介するサービス<sup>[2]</sup>から生まれたものであり、同様の考え方から生まれた代表的なサービスとしてはエアビーアンドビー（Airbnb）やウーバー（Uber）などが挙げられる。シェアリング・エコノミーは環境意識の高まりと、大規模なシェアを可能にする情報通信技術の発達が結びついたことで徐々に普及していったと考えられており<sup>[3]</sup>、この新しいビジネスモデルは効率的で持続性のある社会の構築への一助になると期待されている。

ここで倉庫シェアリングサービスとは、倉庫の遊休スペースを有効活用したい倉庫事業者側と新規で貨物を保管するためのスペースを確保したい荷主側を結びつけるマッチングプラットフォームサービスを指している（Fig. 1.1）。従来荷主が新規で倉庫を利用したい場合賃貸契約によって倉庫を借りることになるが、賃貸契約においては決まったスペースを月額で契約し、その契約期間は半年から数年という形態になっているため、荷主側はその借りたスペースの利用実態に関わらず一定期間の間定められた賃料を支払い続ける必要がある。また、賃貸契約を締結するまでには倉庫スペックの詳細確認、賃貸条件の交渉、契約手続きといった様々な手続きが必要であり倉庫の利用開始までには長めのリードタイムがかかる。それに対して一般的な倉庫シェアリングサービスでは、荷主側はそのサービスを通して倉庫と寄託契約を結び、従量課金制の契約料を支払うような仕組みとなっている。つまり1日あたり1パレットあたりという形態で倉庫を利用した貨物分・日数分の料金のみを支払うことになるため、荷主の利用実態に適した費用のみがかかる。また倉庫事業者が提供している倉庫に関する情報をプラットフォーム側が一括で管理しているため、荷主が倉庫を利用できるまでにかかるリードタイムが比較的短くなるという特徴もある。そのため、利用できるスペースは遊休スペースであることからキャパシティが小さいという制約もあるが、荷主企業が持つ多様な保管需要に対して柔軟に応えることができるのが倉庫シェアリングサービスといえる。

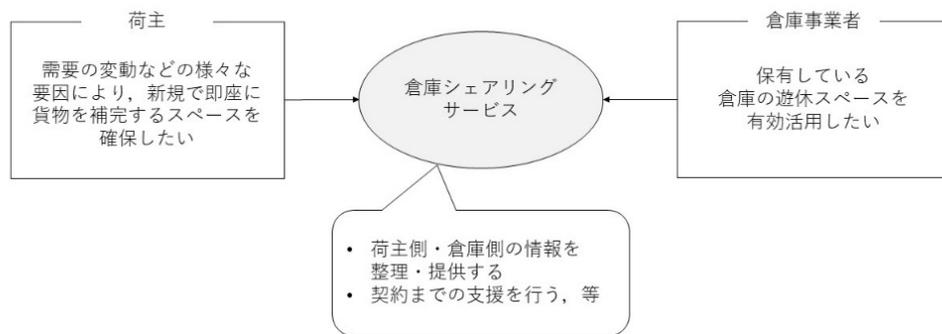


Fig. 1.1 Overview of shared warehousing (compiled from [1] and [2])

これらの倉庫シェアリングの特徴は荷主企業に倉庫利用の新たな選択肢をもたらし、複数の倉庫を利用してより需要地に近い位置から配送を行うというサプライチェーンネットワーク（SCN）を構築する可能性を提示した<sup>[4]</sup>。これはつまり、賃貸契約型の倉庫利用ではなく寄託契約型の倉庫シェアリングであれば分散型の倉庫配置の方が集約型の倉庫配置よりも優位である可能性を示唆している。従来、企業は物流に対して物流費用最小化という考えの下意思決定を下すことが一般的であり、その考えの下で在庫の管理費用や人件費を削減するために物流拠点を集約するのが主流であった。それに対して、分散型の倉庫配置であれば倉庫から顧客への距離が近いこと顧客の要望に対応する時間を短くできる<sup>[5]</sup>ことから顧客へ与える価値を大きくすることができると思われる。そのため費用を抑えながら利用する倉庫の数を増やすことができる倉庫シェアリングサービスを利用して分散型のSCNを構築することは、企業が得る利潤を大きくする可能性がある。

本論文は次のように構成される。次の第2章ではシェアリング・エコノミーや倉庫の集約・分散に関連する既往研究の整理を行い、本研究の位置づけと目的を明らかにする。第3章では本研究の範囲や目的関数について述べる。第4章では第3章で立てた目的関数の下データを入力し計算を行う。第5章では目的関数を用いてシナリオ分析を行い、入力値に対してどのように結果が変化するかを観察する。最後に第6章で本研究をまとめ、今後の展望について議論する。

## 2 既往研究の整理と本研究の位置付け

### 2.1 既往研究のレビュー

シェアリング・エコノミーの考え方を物流業界に応用して新たなビジネスモデルを生み出すことに対してはここ数年で注目度が高まり多くの実務家、業界アナリスト、コンサルタントが積極的に関心を持っている<sup>[4], [6]</sup>が、活動実績がまだ少ないこともありそれに関連する学術的な論文はまだ少ない<sup>[7]</sup>。ただその限られた活動事例に対してシェアリング・エコノミーの有効性に関する研究が進められており、例えば Melo<sup>[8]</sup>らはポルトガルの都市で実施されたケーススタディを基に、自治体もつ物流用駐車場インフラのシェアリングを行うことで平均移動時間や燃料消費量が削減され、シェアリング・エコノミーという文脈の中で資産を共同で利用することでより利することができる結論付けている。また仮想のシナリオを設定しシェアリング・エコノミーの有効性について議論した例として、伊東<sup>[9]</sup>らは需要の不確実性を考慮したトラックシェアリングネットワークの最適化モデルを提案し、需要の不確実性が高い状況においてシェアリングが有効であることを示した。

倉庫シェアリングに関連した研究として、Franklin と Spinler<sup>[10]</sup>や Meller ら<sup>[11]</sup>は定性的な議論から倉庫などの物流資産を複数の企業でシェアしてより効率的・効果的に用いることで、企業は費用及びリスクを減ずることができると述べたが、ここで議論されている倉庫シェアリングはデジタルプラットフォームを介して資産の貸し借りをするというシェアリング・エコノミーの定義から外れている。シェアリング・エコノミーの文脈の上で行われた研究として、L'Hermitte ら<sup>[7]</sup>はトラックや倉庫といったロジスティクス資源に関する情報をデジタルプラットフォームにて統合して即座に発信することで、災害時により適切な救援活動を可能にするという主張した。これは倉庫シェアリングの有効性については触れているが、主に議論されているのは有事の際の有効性であり平時における倉庫シェアリングの利用については述べられていない。

倉庫の集約型と分散型についての比較に関しては様々な研究がなされているが、それらは主に集約型の方が優位であるという結果を示している。Eppen<sup>[12]</sup>は需要の不確実性の下では集中在庫戦略が分散在庫戦略に対して在庫システムにおける期待保有コストとペナルティコストの合計を削減できることを示した。また Chang と Lin<sup>[13]</sup>は Eppen の単期間在庫モデルに輸送コストを加えることで拡張を行い、集中型と分散型のコストの差は需要の分散と需要間の相関に依存していると指摘した。これらはシステムの費用に関する議論であったが、利潤に着目して倉庫配置の最適化を試みた研究として Liu<sup>[14]</sup>らの研究がある。そこでは価格とリードタイムに敏感な需要をもった市場を対象とするサプライチェーンにおいて、シュタッケルベルグゲームを基に集中型と分散型のサプライチェーンのパフォーマンスを評価した結果、そこでは一般的に分散化されたシステムは非効率的であるということを示した。

しかし外的要因に応じて最適な倉庫の集中度は変化することもわかっており、Schmitt<sup>[15]</sup>らは供給が途絶える可能性のあるサプライチェーンについて、集中型在庫システムと分散型在庫システムの両方においてシステムの期待コストとコスト分散を分析した。分析の結果、分散型の在庫設計を用いるとリスク分散効果により在庫コスト分散が減少するためリスク回避的な企業群は分散型の倉庫利用が最適であると示した。地理的な要因を踏まえた上で分析した例としてはDasとTyagi<sup>[16]</sup>やKang<sup>[17]</sup>の研究があり、前者はアメリカの南東地域にある8つの都市を対象として物流拠点の在庫管理コスト、安全在庫コスト、輸送コストの有無に応じて5つのシナリオを構築し、各シナリオにおける物流拠点の集約の最適な度合いを比較検討した。そのシナリオ群では物流拠点が在庫を行わず輸送拠点としてのみ機能する場合で分散型の配置が優位であると述べたが、在庫を行うような場合でも取り扱う貨物や顧客の地理的集中度によっては拠点を分散化した方が優位である可能性についても言及した。また後者はアメリカの48の都市圏を用いて貨物輸送量と地価の空間分布によって倉庫や配送センターの分散化の度合いが変化することを検証した。結果は地価が高いと特に大規模な倉庫は都市圏の中心から離れて設置されて集約化されるが、貨物需要や地価がそれほど高くない場合は分散化することを示した。

以上のように倉庫シェアリングに関する既往研究は現状では少なく、平時での倉庫利用に関する議論は現状ではなされていない。また倉庫利用における倉庫の集約と分散についても、その多くで倉庫は集約化して配置することが望ましいとされているが、需要や地理的要因によってその最適な集約化の度合いは異なり場合によっては分散型の倉庫配置を行った方が効果的である可能性がある。

## 2.2 本研究の目的

前節で述べた通り、一般的には倉庫は分散型よりも集約型で運用する方が良いとされている。ただしこれらの議論は賃貸型の倉庫利用や自社倉庫を用いる場合でのものであり、倉庫シェアリングサービスを利用した上での議論は筆者が知る限りまだされていない。分散型の倉庫配置のメリットは顧客への距離が短くなることによる顧客に与えられる価値の増大であると考えられるため、分散型の倉庫配置にすることは利潤の追求であるといえる。そこで本研究では、倉庫シェアリングサービスを踏まえ、SCN内で利用する倉庫数の変化に対してどのように利潤が変化するかを観察することで最適な倉庫利用を検討することを目的とする。

## 3 手法

### 3.1 モデルの対象と構成

本研究は単一製品複数倉庫の SCN を仮定し、卸売と小売の機能を有している企業を対象として分析を行う。このような企業は流通系の大企業に多く、例えばイオングループはイオングローバル SCM 物流センターを国内に 71 拠点有しており、それら倉庫からイオングループ各店舗に配送される。その対象とする企業が SCN の中で得る収入と費用の差分として得られる利潤を最大にする倉庫数を求める。定式化は Location-Inventory Problem (LIP)<sup>[18]</sup>といわれる施設配置問題をベースにして行う。LIP とは、所与の有限個の配送拠点の集合の中から最適な数と位置を決定し、その各拠点に有限個の需要地を割り当て利用する拠点を選択することでシステム内の費用や利潤の最適化を目的とする問題である。決定変数は、各配送拠点が利用されているか否かについての変数と各配送拠点から各需要地が結ばれているか否かについての変数という 2 種類のもので設定される。本研究においては利用する拠点の数による出力値の変化を観察したいため、3.2 節で具体的な方法は述べるが利用する拠点数についての制約条件を設けることで LIP を拡張し計算を行う。

本モデルを構築するにあたっていくつかの仮定をおいたためそれらを以下に列挙する。

- 単一製品で複数倉庫を用いる。
- 利用可能な工場の選択肢集合が所与である。
- 各小売店が倉庫から調達する場合、一つの倉庫からのみ調達する。
- 倉庫を利用する場合は、その利用している倉庫から少なくとも一つの小売店へ配送される。
- 一年間の期間を想定し、需要は年間を通して一定である。
- 各需要地では同一の需要関数を持つ。

一つ目から三つ目の仮定は設定する SCN の概要を示している。実際には単一の製品が複数の倉庫から一つの小売店へ出荷されている場合もあるがその状況はあまり一般的ではないため、問題の単純化を行った。四つ目は計算の都合上、ある倉庫を利用していてもその倉庫から小売店へ貨物を出荷していないという状況が現れるためそれを防ぐために加えた仮定である。五つ目と六つ目は需要地の状況について説明したものである。

### 3.2 ネットワークと計算の流れ

本研究では Fig. 3.1 で示すようなネットワークを対象として計算を行う。ネットワーク内には一つの工場、 $N$ 個の倉庫集合 $W$ 、 $J$ 個の小売店集合 $R$ が存在しており、このうち倉庫集合と小売店集合で発生する売上及び費用を取り扱う。

計算の流れとしては、まずネットワーク内の利用する倉庫の数を $n$ 個として固定し、Location-Inventory Problem をソルバー (Gurobi) によって解く。ここで決定変数とするのは倉庫 $i$ を利用しているかどうかを判別する変数 $X_i$ と、倉庫 $i$ から小売店 $j$ に貨物が配送されるかどうかを判別する変数 $Y_{ij}$ であり、これらは共にバイナリ変数であるため混合整数線形計画問題となる。利用する倉庫の数が $n$ 個であるという条件の下、利潤が最大になるような決定変数を求めることでそのネットワークでの利潤の最大値が得られる (Fig. 3.2 参照)。次に $n$ を $[1, N]$ の中の適当な範囲で動かしながらこの最適化問題を解くことで、各 $n$ に対して利潤の最大値を得ることができるため、その数値の比較を行えば与えられた条件を満たすようなネットワークの内最適な倉庫の利用が得られる。すなわちそのモデルについて倉庫は集約した方が良いのか分散させた方が良いのかという示唆を以上の最適化問題を解くことに得られると考えられる。

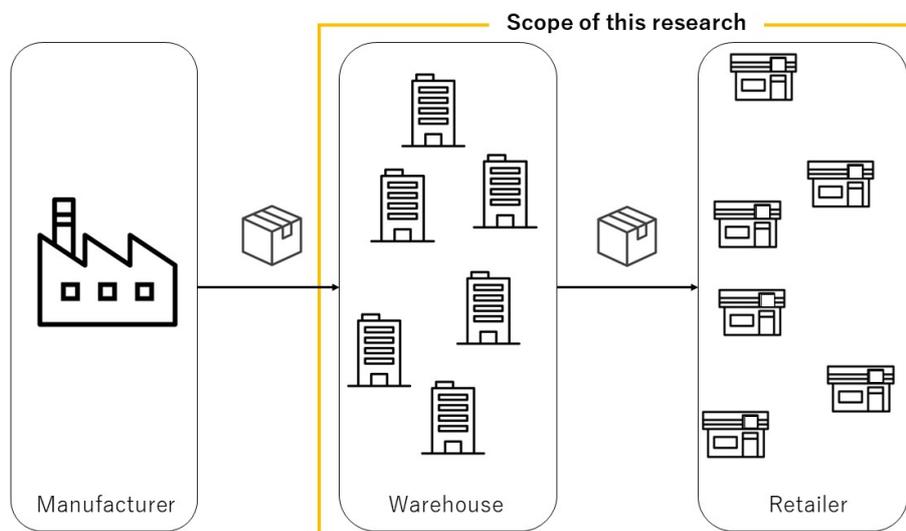
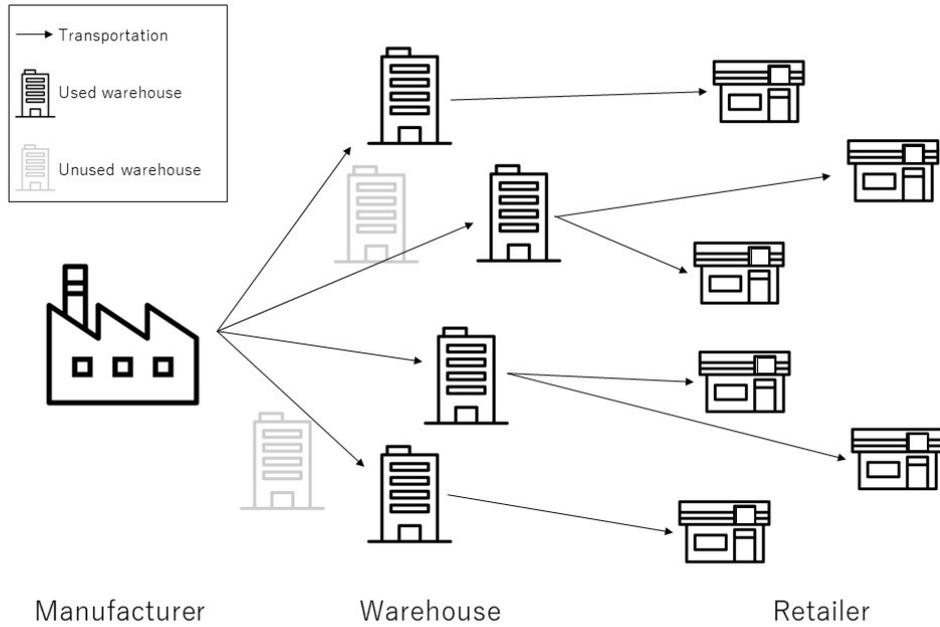


Fig. 3.1 Overview of the network ( $N = 6, J = 6$ )

Fig. 3.2 Example of optimized network ( $n = 4$ )

### 3.3 目的関数の説明

3-1 節で述べたように、目的関数は卸売と小売の機能を有している企業が貨物を工場から仕入れ、小売店にて市場へ販売するまでに発生する売上と費用を考慮して組み立てられる利潤関数とする。その際にかかる売上と費用は以下 Table 3.1 のようになる。

Table 3.1. List of revenue and cost

売上	費用
<ul style="list-style-type: none"> <li>● 製品を需要地に売る (<b>Rev</b>)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 倉庫の契約費用（施設費用：<math>FC</math>）</li> <li>● 利用する倉庫の探索（機会費用：<math>OC</math>）</li> <li>● 貨物の購入（取引費用：<math>TRC</math>）</li> <li>● 倉庫での貨物の発注及び積み下ろし（発注費用：<math>IOCw</math>）</li> <li>● 倉庫で在庫を行う（在庫関連費用：<math>IOCw</math>）</li> <li>● 倉庫から小売店への輸送（輸送費用：<math>TC</math>）</li> <li>● 小売店での販売機会損失（販売機会損失費用：<math>LSC</math>）</li> <li>● 小売での貨物の発注及び積み下ろし（発注費用：<math>IOC_r</math>）</li> <li>● 小売店で在庫を行う（在庫関連費用：<math>IOC_r</math>）</li> </ul>

これらの売上及び費用の要素を定式化することで得られる目的関数は、

$$Profit = Rev - (FC - OPC - TRC - IOCw - TC - LSC - IOCr) \quad (1)$$

のように記述でき、この関数が制約条件の下最大になるような決定変数を求める。以下各式の項についての詳しい定式化を行っていく。

### 3.3.1 目的関数と決定変数

目的関数 $Profit$ は企業が得る売上から生じる費用を減じることで得ることができる利益を記述したものになっている。この目的関数で決定変数として与えるのは以下の二変数である。

$X_i$	倉庫 <i>i</i> が利用されているかどうかを判別するバイナリ変数； 1 なら利用されていて 0 なら利用されていない。
$Y_{ij}$	倉庫 <i>i</i> から小売店 <i>j</i> まで貨物が輸送されているかを判別するバイナリ変数； 1 なら輸送されていて 0 ならされていない。

### 3.3.2 売上

ここでの企業の売上は需要地で発生する需要に応えることによって得られる売上である。ここで、需要地で配送時間に反応するような需要が発生していると仮定すると、小売店*j*で応える需要 $\lambda_j$ は、

$$\lambda_j = \Lambda^R - \alpha p_{rd} - \beta \sum_{i \in W} Y_{ij} t_{ij}^{WR} \quad (2)$$

と表すことができる<sup>[19],[20]</sup>。Liu ら<sup>[19]</sup>によると、顧客は自身の需要が満たされることによって小売店への信頼性を高め、また素早く自身の需要を満たそうと考えているため配送時間は価格と同様に顧客にとって重要な要素である。つまり顧客は自身が製品に対して許容できる価格や配送時間であるときにはじめて製品を購入すると考えられることから、顧客の期待効用が製品を得るために必要な費用 $p_{rd} + s_w t$ 以上になるときに購入に至る。よって需要関数は(2)式のような製品の価格や配送時間に対してトレードオフの関係を持つものになる。

この $\lambda_j$ を用いて、この企業が対象とする SCN で得ることができる全売上 $Rev$ は、

$$Rev = \psi \sum_{j \in R} \lambda_j^R p_{rd} \quad (3)$$

というように記述することができる。倉庫配置数が増加すると平均配送時間が減少することが期待されることにより、倉庫配置数の増加に従って売上も共に増えると予想される。

$\lambda_j$                       需要地*j*における需要（単位/日）

$p_{ra}$	工場と倉庫 <i>i</i> 間の単位貨物あたりの取引価格 (円/単位)
$t_{ij}^{WR}$	倉庫 <i>i</i> から小売店 <i>j</i> までの配送時間 (時)
$\alpha$	取引価格の需要への感度係数
$\beta$	時間の需要への感度係数
$\Lambda^R$	需要の最大値 (単位)
$\psi$	一年間における営業日数 (日)

### 3.3.3 施設費用

施設費用は倉庫における初期費用や、材料費、設計費、建築費、設備維持費といった倉庫にかかる定期的な費用である。ここでは従来の賃貸型の倉庫を利用する際にのみ発生する費用と考え、月毎にかかるシステム利用料及び業務管理料を指す。その値 $FC$ は以下(4)式のように記述される。施設費用は利用倉庫ごとにかかる費用のため、倉庫配置数が増加すると共に増加する。

$$FC^W = \frac{\psi}{30} \sum_{i \in W} X_i f_i^W \quad (4)$$

$f_i^W$  倉庫*i*の年間固定施設費用 (円/年)

### 3.3.4 機会費用

機会費用 $OC$ は倉庫を契約する際に必要な人的資源を費用換算したものである。実務家へのインタビューより、倉庫シェアリングサービスを通じての倉庫契約は従来の賃貸型と比べてこのような人的費用を抑えることができるというメリットがあると判明したためその特徴を表すための項になっている。機会費用は施設費用と同様に利用倉庫ごとにかかる費用のため、倉庫配置数が増加すると共に増加する。

$$OC^W = \sum_{i \in W} X_i oc_i \quad (5)$$

$oc_i^W$  倉庫*i*における機会費用 (円/年)

### 3.3.5 取引費用

取引費用 $TRC$ は企業が工場から製品を仕入れる際に発生する製品の購入費用である。経済産業省<sup>[21]</sup>の調べによると、卸売業の売上原価率が約 87.6%、小売業の売上原価率が約 71.4%であるため、 $0.876 \cdot 0.714 \doteq 0.62$  より取引費用は売上の 62%として計算する。取引費用は製品の小売価格に応じて変動するため、利用倉庫数が増加して平均配送時間が短くなることで取引費用も増加する。

$$TRC = 0.62Rev \quad (6)$$

### 3.3.6 発注費用と在庫関連費用

これらは在庫関連の費用である。発注費用とは商品を発注する度に生じる人件費や通信費、作業費といった発注及び処理に関連する費用である。発注費用と在庫を保管する際に製品単位ごとに発生する在庫保管費用は経済的ロットサイズモデルに基づいて在庫費用として換算することが可能である [22]。

経済的ロットサイズモデルは以下のように説明される。まず、Fig. 3.3 で示されるような一定期間の倉庫における在庫レベルの変化を想定する。

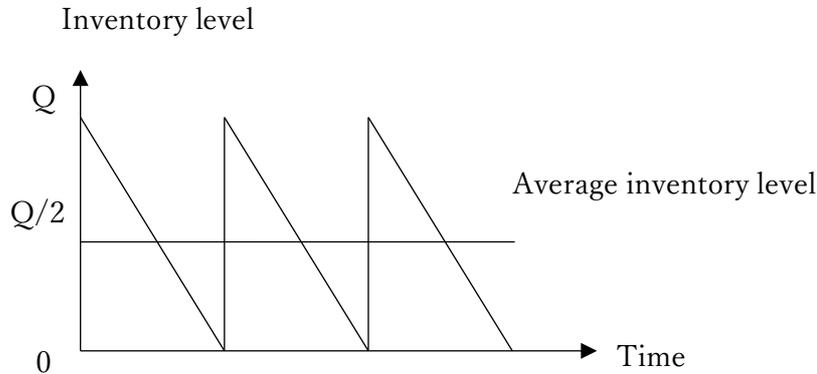


Fig. 3.3 Economic order quantity model

この一定期間内に発生する需要の合計を $D$ ，一回当たりの発注量を $Q$ ，発注一回あたりの発注費用を $A$ ，単位在庫当たりの在庫管理費用を $h$ とする。このとき期間内に行う発注の回数は $D/Q$ 回であるため期間内に発生する総発注費用は $AD/Q$ と表せる。また，この期間内の平均の在庫レベルは $Q/2$ であるため期間内の総在庫管理費用 $hQ/2$ となる。以上より，期間内の在庫費用は，

$$IOC = \psi \sum \left( A \frac{D}{Q} + h \frac{Q}{2} \right) \quad (7)$$

となる。また，この在庫費用を最小にする $Q$ は， $Q^* = \sqrt{2AD/h}$ で与えられるため，これを(7)式に代入すると，

$$IOC = \psi \sum \sqrt{2AhD} \quad (8)$$

として在庫費用が得られる。また，安全在庫費用については，

$$SC = \sum z_{\theta} \psi h \sqrt{t} \left( \sum \sigma \right) \quad (9)$$

で与えられる。よって最終的な倉庫及び小売店についての在庫関連費用 $IOC_w$ ， $IOC_r$ は，

$$IOC_w = \psi \sum_{i \in W} \sqrt{2A_i h_i^W D_i} + \sum_{i \in W} z_{\theta} \psi h_i^W \sqrt{t_i^{MW}} \left( \sum_{j \in R} \sigma_j Y_{ij} \right) \quad (10)$$

$$IOCr = \psi \sum_{j \in R} \sqrt{2A_j h_j^R \lambda_j} + \sum_{j \in R} z_\theta \psi h_j^R \sqrt{t_{ij}^{WR} \sigma_j} \quad (11)$$

と記述できる。在庫費用は取り扱っている製品量に比例して増加するため、倉庫と小売店共に倉庫配置数の増加により、需要が増加するため在庫費用も増加すると考えられる。それに対して安全在庫費用について、小売店では倉庫小売店間配送時間が短くなることで安全在庫の量も減ることから利用倉庫数の増加により費用は抑えられると考えられるが、倉庫では@@@増加すると予想される。

$A_i$	倉庫 <i>i</i> における一回当たりの発注費用（円/回）
$A_j$	小売店 <i>j</i> における一回当たりの発注費用（円/回）
$D_i$	倉庫 <i>i</i> における一日あたりの需要; $D_i = \sum_{j \in R} Y_{ij} \lambda_j$ （単位）
$h_i^W$	倉庫 <i>i</i> の単位取扱/在庫費用（円/単位*日）
$h_j^R$	小売店 <i>j</i> の単位取扱/在庫費用（円/単位*日）
$t_i^{MW}$	工場から倉庫 <i>i</i> までにかかる所要時間（時）
$t_{ij}^{WR}$	倉庫 <i>i</i> から小売店 <i>j</i> までにかかる所要時間（時）
$\sigma_j$	小売店 <i>j</i> における需要の標準偏差（単位）
$z_\theta$	安全在庫費用

ここで、 $IOCw$ 及び $IOCr$ の第一項には決定変数が平方根内に含まれているためこのままの式では最適化問題全体が混合整数非線形計画問題となり、現実的な時間で大域的最適解を得るのが困難になる。故に、本モデルにおいてはこれらの非線形の項に区分線形近似を行うことで混合整数線形計画問題に落とし込むことを行う。

例として $f(D_i) = \sqrt{2A_i h_i D_i}$ に区分線形近似の適用を試みる 参考:[23]。  $D_i$ の定義域は、在庫が一切ない状態が最小値、小売店すべての需要をその一つの倉庫でまかなうという状態が最大値であるため、 $[0, D_{Max}]$ （ただし、 $D_{Max} = \sum_{j \in R} \Lambda^R - \alpha p_{rd} - \beta t_{ij}^{WR}$ ）と設定できるため、まずこの定義域を  $K$  個の区間に分ける。このとき、区分関数  $g(D_i)$  上の点  $(D_i, g(D_i))$  は  $D_i$  の定義域を  $K$  個に区分した内の  $k$  個目の点と  $k + 1$  個目の点を用いて、

$$(D_i, g(D_i)) = v_k(a_i, f(a_i)) + v_{k+1}(a_{k+1}, f(a_{k+1})) \quad (12)$$

と表すことができる。(12)式を一般化すると、

$$(D_i, g(D_i)) = \sum_{k=0}^K v_k(a_k, f(a_k)) \quad (13)$$

となる。ここで連続変数 $v_k$ は新たに導入される決定変数であり、定義域が $[0,1]$ で、高々2つの隣り合う $v_k$ が正である。

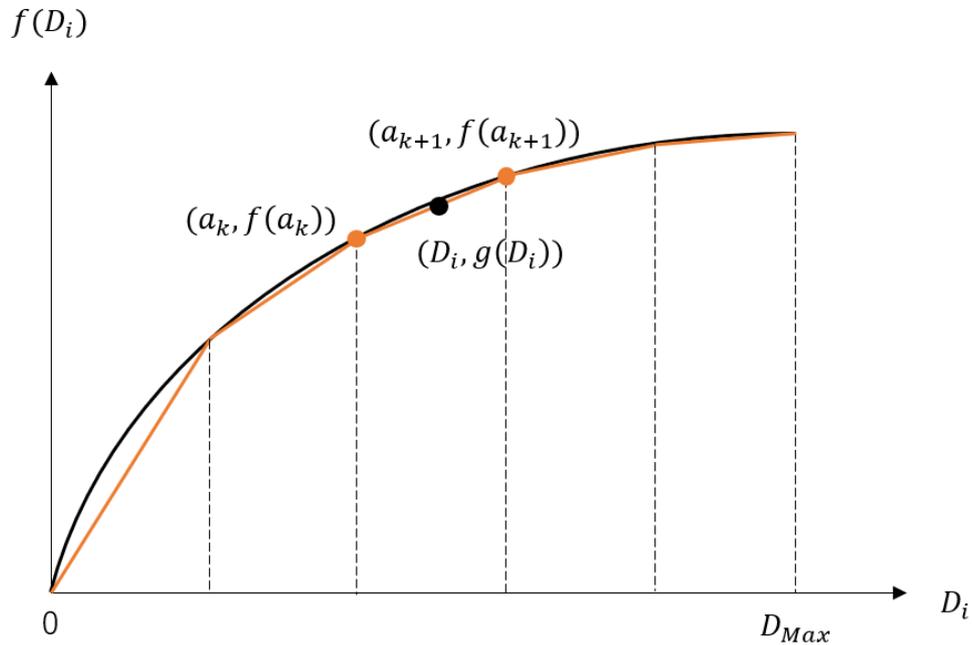


Fig. 3.4 Piecewise linear approximation ( $K = 5$ )

以上の区分線形近似を(10)式及び(11)式に適用したものが以下の式になる。

$$IOCw = \psi \sum_{i \in W} \sum_{k_i=0}^K \sqrt{2A_i h_i^W k_i \frac{D_{Max_i}}{K} v_{k_i}} + \sum_{i \in W} z_\theta \psi h_i^W \sqrt{t_i^{MW}} \left( \sum_{j \in R} \sigma_j Y_{ij} \right) \quad (14)$$

$$IOC_r = \psi \sum_{j \in R} \sum_{l_j=0}^L \sqrt{2A_j h_j^R l_j \frac{\lambda_{Max_j}}{L} w_{l_j}} + \sum_{j \in R} z_\theta \psi h_j^R \sqrt{t_{ij}^{WR}} \sigma_j \quad (15)$$

ただし、

$$D_i = \sum_{k_i=0}^K k_i \frac{D_{Max_i}}{K} v_{k_i} \quad (16)$$

$$\lambda_j = \sum_{l_j=0}^L l_j \frac{\lambda_{Max_j}}{L} w_{l_j} \quad (17)$$

である。なお、上の例では $K = 5$ としたが実際の計算では $K = 2000$ ,  $L = 100$ とする。

### 3.3.7 輸送費用

倉庫から小売店への輸送費用 $TC$ は一回の輸送ごとにかかる固定費と、輸送する貨物の量及び所要時間に比例する変動費の合計値となる。倉庫配置数の変化により倉庫小売店間配送時間が変動するため、輸送費用の内変動費用の値が変化すると予想される。

$$TC = \psi \sum_{j \in R} \left( g_{ij}^{WR} + \sum_{i \in W} c_{ij}^{WR} t_{ij}^{WR} \lambda_j^R Y_{ij} \right) \quad (18)$$

$g_{ij}^{WR}$	倉庫 <i>i</i> から小売店 <i>j</i> に運ぶ際の輸送固定費用（円）
$c_{ij}^{WR}$	倉庫 <i>i</i> から小売店 <i>j</i> まで運ぶのにかかる単位輸送費用（円/単位*時）
$t_{ij}^{WR}$	倉庫 <i>i</i> から小売店 <i>j</i> までにかかる所要時間（時）

### 3.3.8 販売機会損失費用

販売機会損失費用*LSC*とは、貨物がもつ時間価値を考慮することで発生する費用である。貨物の時間価値とは、貨物の荷受人が貨物の輸送時間を短縮することに対して支払ってもよいと考える金額<sup>[24]</sup>である。つまり荷受人がそれだけの金額であれば販売機会の損失を防ぐために追加で費用を払ってもよいと考えているので、ここでは貨物の時間価値をそのまま「販売機会の損失によって発生する費用」として考え費用の項に加える。販売機会損失費用は配送時間に比例して変化する費用であるため、利用倉庫数が増加することによって費用は減少すると考えられる。

$$LSC = \sum_{j \in R} \sum_{i \in W} \lambda_j u t v^{WR} t_{ij}^{WR} Y_{ij} \quad (19)$$

### 3.3.9 最適化問題と制約条件

以上の(3)(4)(5)(6)(14)(15)(18)(19)式を(1)式に代入することで、本研究で用いる目的関数を得る。最終的な最適化問題は以下のようなになる。

$$\max_{X_i Y_{ij} v_{k_i} z v_{k_i} w_{l_j} z w_{l_j}} Profit = Rev - (FC - OPC - TRC - IOCw - TC - LSC - IOCr) \quad (20)$$

Subject to.

$$\sum_{i \in W} X_i = n \quad (21)$$

$$\sum_{i \in W} Y_{ij} = 1 \quad \forall j \in R \quad (22)$$

$$Y_{ij} \leq X_i \quad \forall i \in W, j \in R \quad (23)$$

$$X_i \leq \sum_{i \in W} Y_{ij} \quad \forall i \in W \quad (24)$$

$$\sum_{j \in R} \mu_j Y_{ij} \leq w_i \quad \forall i \in W \quad (25)$$

$$\sum_{k=0}^K v_{k_i} = 1 \quad \forall i \in W \quad (26)$$

$$D_i = \sum_{k_i=0}^K k_i \frac{D_{Max_i}}{K} v_{k_i} \quad \forall i \in W \quad (27)$$

$$v_{0_i} \leq zv_{0_i} \quad \forall i \in W \quad (28)$$

$$t_{k_i} \leq zv_{k-1_i} + zv_{k_i} \quad \forall i \in W, k = 1, \dots, K-1 \quad (29)$$

$$t_{K_i} \leq zv_{K-1_i} \quad \forall i \in W \quad (30)$$

$$\sum_{k_i=0}^{K-1} zv_{k_i} = 1 \quad \forall i \in W \quad (31)$$

$$\sum_{l_j=0}^L w_{l_j} = 1 \quad \forall j \in R \quad (32)$$

$$\lambda_j = \sum_{l_j=0}^L l_j \frac{\lambda_{Max_j}}{L} w_{l_j} \quad \forall j \in R \quad (33)$$

$$w_{0_j} \leq zw_{0_j} \quad \forall j \in R \quad (34)$$

$$t_{k_j} \leq zw_{l-1_j} + zw_{l_j} \quad \forall j \in R, l = 1, \dots, L-1 \quad (35)$$

$$t_{L_j} \leq zw_{L-1_j} \quad \forall j \in R \quad (36)$$

$$\sum_{l_j=0}^{L-1} zw_{l_j} = 1 \quad \forall j \in R \quad (37)$$

$$X_i \in \{0,1\}, Y_{ij} \in \{0,1\}, v_{k_i} \in [0,1], zv_{k_i} \in \{0,1\}, w_{l_j} \in [0,1], zw_{l_j} \in \{0,1\}$$

$$\forall i \in W, \forall j \in R, k = 0, \dots, K, l = 0, \dots, L \quad (38)$$

(21)式は利用する倉庫が $n$ 個という条件である。(22)式は各小売店が一つの倉庫からのみ貨物を輸送されることを保証する式である。(23)式と(24)式は倉庫と小売店の対応関係を示しており、各倉庫は利用される場合少なくとも一つの小売店へ貨物を輸送し、各小売店は利用されている倉庫からのみ配送されている状態を保証する。(25)式は各倉庫における容量の制約式であり、 $w_i$ は倉庫 $i$ の容量を示している。(26)式から(31)式及び(32)式から(37)式は区分線形近似を行う際に必要な制約条件である。ここでバイナリ変数 $zv_{k_i}$ 及び $zw_{l_j}$ はそれぞれ、 $v_{k_i}$ と $w_{l_j}$ の高々隣り合う2つの変数が正であることを保証するために導入した決定変数である。

## 4 ケーススタディ

### 4.1 利用するデータ

本節では3章で立てた目的関数の各パラメータへの入力値について説明する。ベースケースにおける各パラメータの入力値の一覧は以下の Table 4.1 のようになる。また、倉庫に関するデータと工場、小売店の位置情報については Fig. 4.1 ~ Fig. 4.5 に記す。

Table 4.1. List of input data

parameter	input	Reference
$p_{ra}$	200 (¥)	Assumption from database
$\alpha$	1	[20]
$\beta$	4	[20]
$\Lambda^R$	260 (unit)	Assumption from database
$\psi$	365 (days)	Assumption
$f_i^W$	Rental warehouse: 60000 (¥/month) Shared warehouse: 0 (¥/month)	Assumption from expert interview
$oc_i^W$	Rental warehouse: 269230 (¥) Shared warehouse: 57692 (¥)	Assumption from expert interview
$t_i^{MW}$	Set for each warehouse $i$	Data from WareX [27]
$t_{ij}^{WR}$	Set for each warehouse $i$ and retailer $j$	Data from WareX [27]
$A_i$	Set for each warehouse $i$	Data from WareX [27]
$A_j$	0.78 (¥/unit)	Assumption
$h_i^W$	Set for each warehouse $i$	Data from WareX [27]
$h_j^R$	0.16 (¥/unit)	Assumption
$\sigma_j$	18 (unit)	Assumption from database
$w_i$	370 (unit)	Assumption
$g_{ij}^{WR}$	13975 (¥)	[25]
$c_{ij}^{WR}$	5.4 (¥/unit/hour)	[25]
$utv^{WR}$	1.82 (¥/unit/hour)	[26]

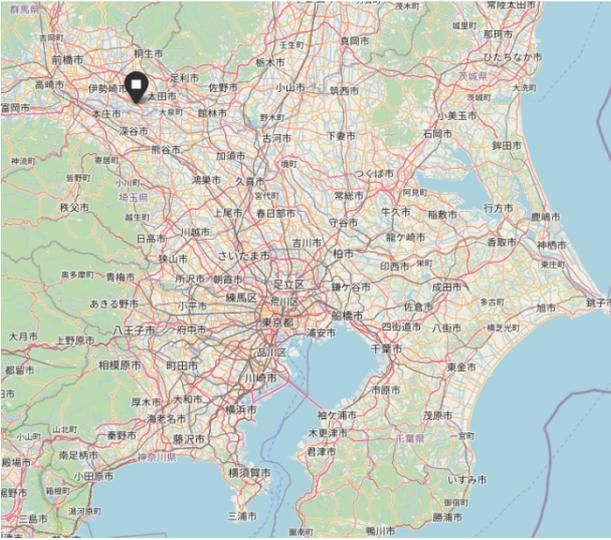


Fig. 4.1. Location of manufacturer

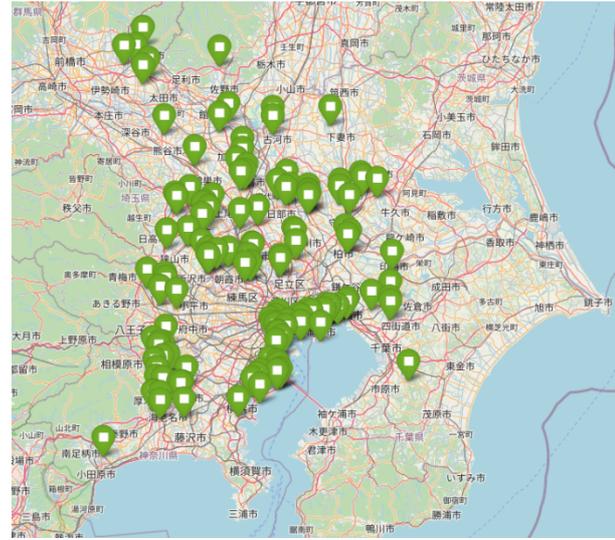


Fig. 4.2. Location of warehouse

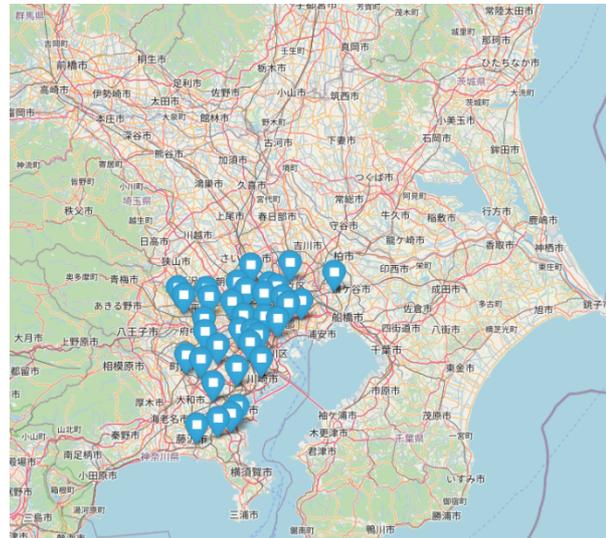


Fig. 4.3. Location of retailer

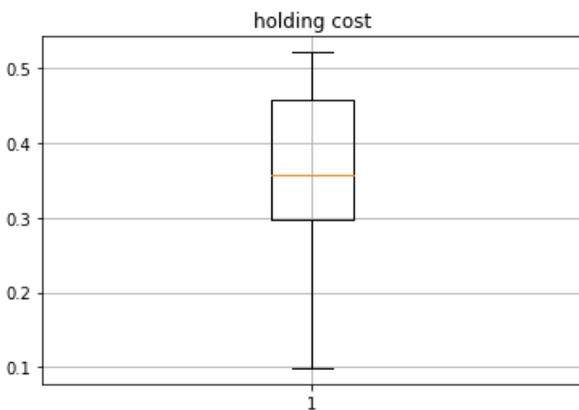


Fig. 4.4. Boxplot of holding cost of warehouses

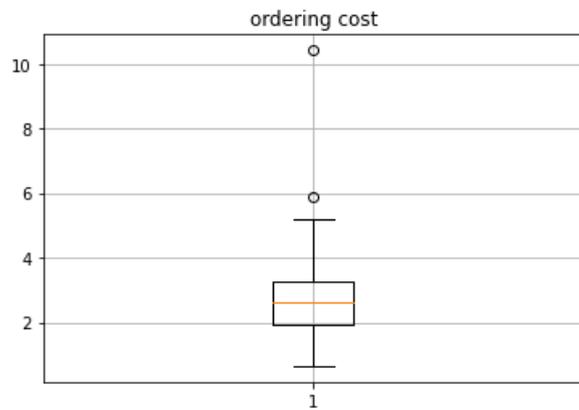


Fig. 4.5. Boxplot of ordering cost of warehouses

ここでの倉庫は全部で 132 個存在し、これは株式会社 Gaussy が運営している倉庫シェアリングサービスの WareX<sup>[27]</sup>より新宿区から半径 100km 以内に存在する倉庫について 2023 年 1 月 18 日時点での情報を取得したものである。各倉庫の単位取扱/在庫費用 $h_i^W$ や発注費用 $A_i^W$ は各倉庫についてこれらの実データに基づいて設定される。Fig. 4.4 と Fig.4.5 はそれぞれ各倉庫の単位取扱/在庫費用と単位発注費用についての概観を示す箱ひげ図である。また、工場や小売店のデータに関しては某小売業のデータより取得しており、工場は 1 個、この小売業が卸している小売店は 36 個存在している。よって工場倉庫間配送時間 $t_i^{MW}$ と倉庫小売店間配送時間 $t_{ij}^{WR}$ はこれらの位置データから計算される距離と、関東圏内における平均旅行速度である 32.1km/h<sup>[28]</sup>より計算される。

## 4.2 結果

以上の入力値を用いて倉庫シェアリングサービスを利用した場合の最適化問題を解いた結果を以下に示す。またケーススタディにおいては賃貸型倉庫よりも厳しい容量制約が存在している倉庫シェアリングサービスを利用している都合上、利用する倉庫数が少ないと最適化問題が解なしになってしまうため倉庫の利用数の下限を 6 として計算を行った。

Fig. 4.6 と Fig. 4.7 はそれぞれ今回の入力値に対する結果を示している。利潤についての図である Fig. 4.6 より、倉庫シェアリングサービスの利用においては倉庫の数が 7 のときに最大値を取ることが分かった。利潤は上に凸な変化をしており、これは倉庫を完全に集約させるのではなくある程度分散させた方がよいということを示唆している。そのためどのような要因で上に凸な変化をしているのかを分析する。

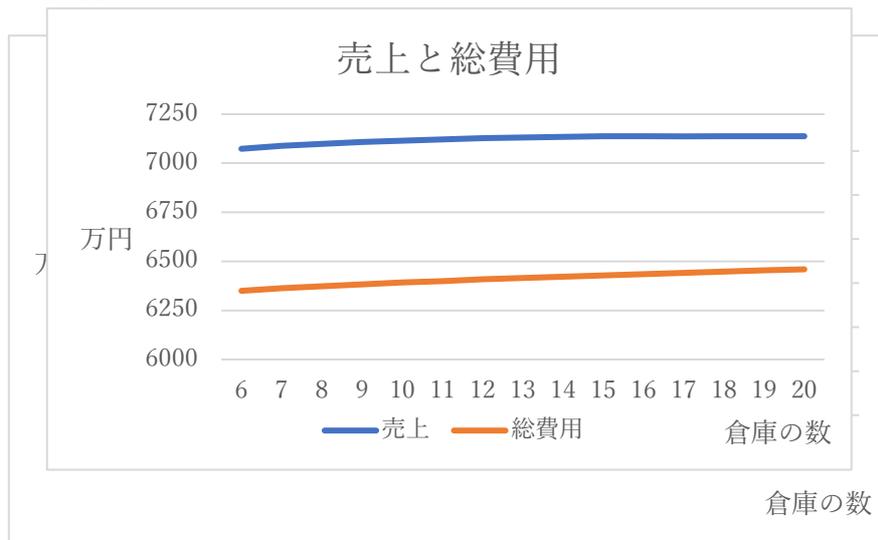


Fig. 4.6. Result for optimization (Profit)

まずこのケーススタディにおいて、最適な状態のときにどのように倉庫を利用しているのかを分析する。Fig. 4.8 は  $n = 7$  において利用されている倉庫と小売店集合が示されている図である。緑色のマーカーが倉庫の位置を示し、青色のマーカーが小売店の位置を示している。各倉庫が持っている特徴として、発注費用、保管費用、倉庫の位置があるが、この図より倉庫の選ばれ方としてそれらの内倉庫の位置が最も強く働いているというように推察できる。例えば発注費用が 1.30 (円/単位)、保管費用が 0.098 (円/単位) であり発注費用が全体で 6 番目、保管費用は全体で 1 番低い倉庫として川越市にある倉庫が挙げられる (Fig. 4.8 中の赤い点) がこの倉庫は最適な倉庫として選ばれていない。対して選ばれている倉庫としては東京湾沿いや東京都内といった比較的これらの費用が高い倉庫が選ばれており、Fig. 4.9 からこの結果は推察できる。この図は全倉庫の費用に関する散布図で  $n = 7$  において利用されている倉庫は緑色で示している。利用されている倉庫の散布図における位置を見るとこれらは必ずしも低い費用をとっているわけではないことがわかる。これらの結果より、最適な SCN を構築する際は各小売店への距離が短くなるような倉庫を利用する方がより利潤を生むと推察できる。

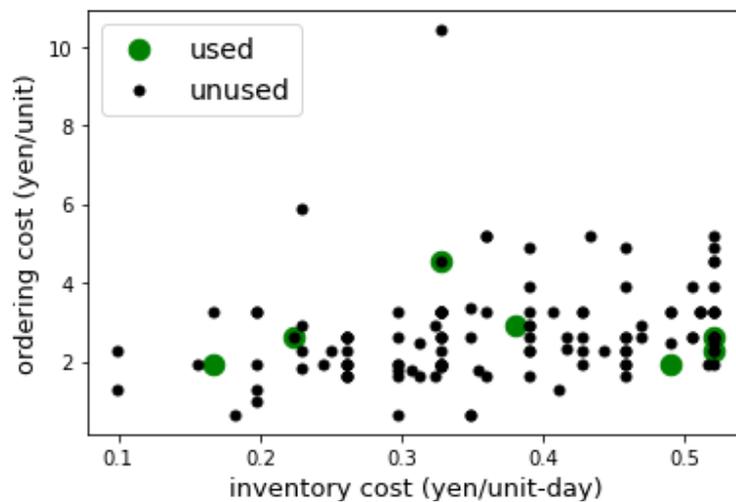


Fig. 4.9. Cost of used and unused warehouses ( $n = 7$ )

実際に費用の内訳の変化をみるとそのような傾向をより見て取ることができる。Fig. 4.10 は倉庫小売店間の配送時間を示すグラフで、Fig. 4.11 は各費用が倉庫の数の変化に応じてどのように変化しているのかを示すグラフである。倉庫の数の変化に応じて主に減少しているのが倉庫小売店間の輸送費、販売機会損失費用、小売店の在庫関連費用である。倉庫小売店間の輸送費は、輸送費を構成する固定費と変動費の内固定費は変化せず輸送量及び配送時間に影響される変動費が配送時間の短縮のために減少した。販売機会損失費用は貨物を素早く送り届けることができたことにより減少した。小売店の在庫関連費用は在庫量が増えたことによる取扱費用の増加分よりも配送時間が短縮したことによって減少した安全在庫費用の方が大きかったことにより全体的には減少した。つまりこれらは Fig. 4.11 で示される倉庫小売店間の平均配送時間と同様の変化が起こっており、倉庫の利用数が7で利潤の最大を取ったのは配送時間の短縮が大きく影響したためである。

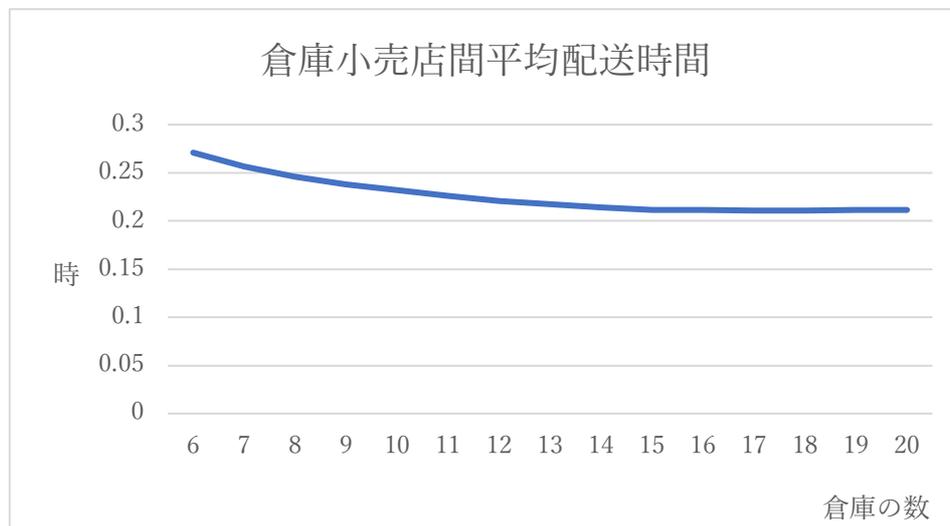


Fig. 4.10. Graph of average delivery time between warehouse and retailer

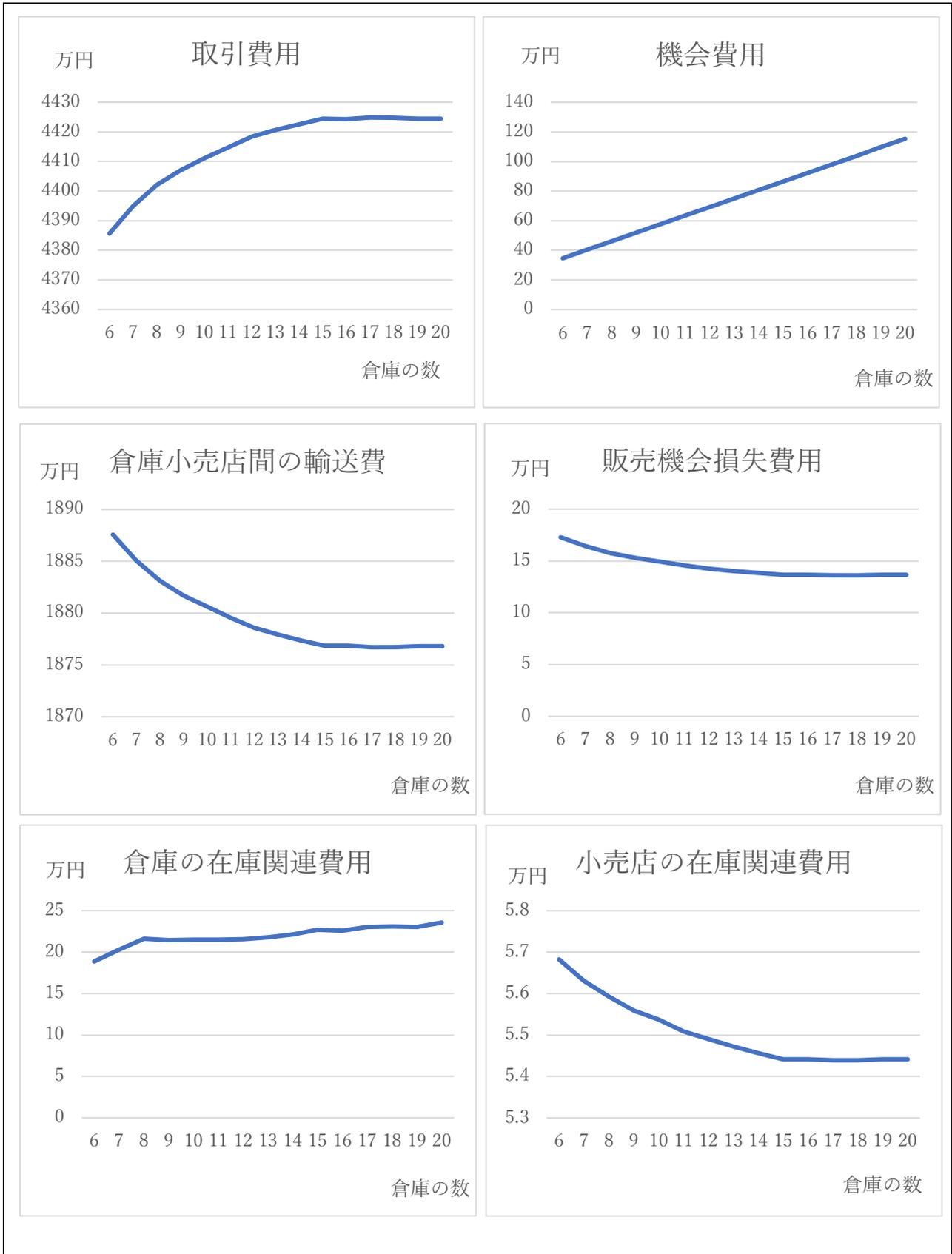


Fig. 4.11. Graphs of each cost

倉庫シェアリングサービスで利用する倉庫を増やしていった場合、需要地まで素早く配送できるような倉庫を増やしていくのが利潤を高めるのに最適であるということは明らかになったため、次はどの程度倉庫を増やしていけばよいのかについて議論を行う。Fig. 4.10 は各費用及び売上について、利潤を増加させるような変化をした項と利潤を減少させるような変化をした項が各倉庫数が変化したときにどの程度の量変化したかを観察するグラフである。つまり倉庫数が6から7に変化した際は合計で利潤を減少させるような項の総変化量に比べて利潤を増加させるような項の総変化量の方が大きかったため利潤も増加した。このグラフを見ると利潤を減らす項として大きく寄与しているのが機会費用である。つまり倉庫を増やし倉庫小売店間の配送時間を減らすことで得られる利潤の増加分が倉庫を増やすために必要な費用（≒機会費用）を上回れば、倉庫を増やし分散型の利用を行う利点が現れるという洞察を得ることができる。

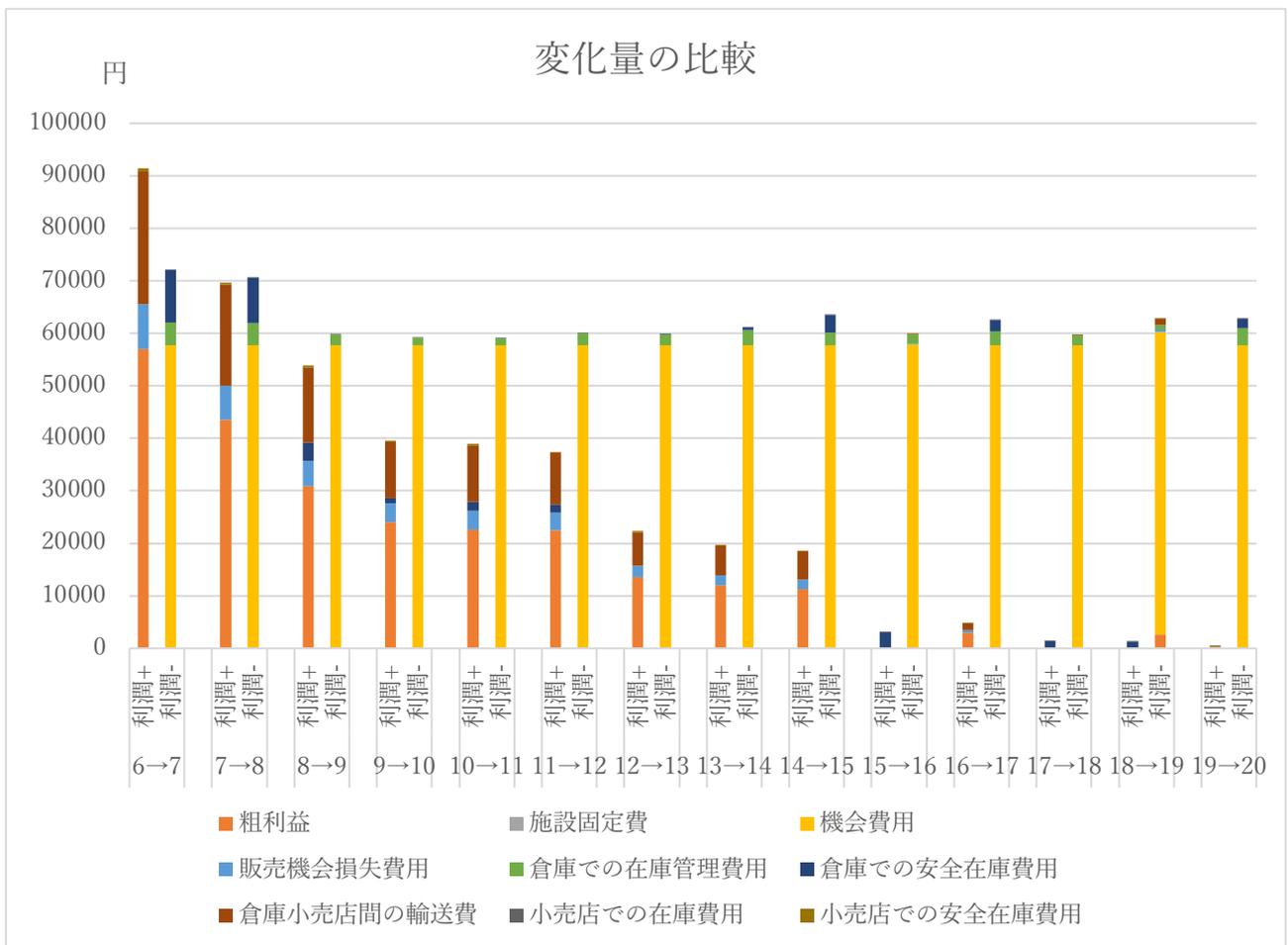


Fig. 4.12. Amount of changes in each terms. Left bar represents terms that increase profit and right bar represents terms that decrease profit.  
Revenue and transaction cost are added as gross profit.

## 5 シナリオ分析

### 5.1 シナリオの設定

5章においては開発したモデルを下に倉庫の利用における分散の度合いや倉庫シェアリングの利用に影響を及ぼすと考えられる入力値を変化させ、その結果を考察する。本節ではその際に設定するシナリオの詳細と変化させる入力値についてまとめる。

Table 5.1. List of scenarios

シナリオ	元の入力値	変化後の入力値
I - 小売店の位置と密度の変化	Fig. 4.3 参照 点間平均距離 20km	I - i : Fig. 5.1 参照 (点間平均距離 2km) I - ii : Fig. 5.2 参照 (点間平均距離 11km) I - iii : Fig. 5.3 参照 (点間平均距離 37km) I - iv : Fig. 5.4 参照 (点間平均距離 55km)
II - 貨物の時間価値の変化	$utv^{WR} = 1.82$	II - i : $utv^{WR} = 0.92$ II - ii : $utv^{WR} = 3.70$
III - 需要の季節性	年間を通して一定の需要	III - i : ベースシナリオの需要に加えて、需要量が2倍である30日間の需要が1回発生する。 III - ii : ベースシナリオの需要に加えて、需要量が2倍である30日間の需要が2回発生する。

## 5.2 シナリオ I : 小売店の位置と密度の変化

本シナリオでは小売店の位置情報に関する入力値を変化させることで、需要地の地理的分散の程度によってどのように倉庫シェアリングサービスの有効性が変わるのかを検証する。ここで、小売店の位置情報について定量的な比較を行えるようにするために点間平均距離という尺度を導入する。点間平均距離はある点間集合がどの程度散らばっているのかを測るための尺度であり、

$$\text{average distance of nodes} = \frac{1}{N C_2} \sum_i^N \sum_{j \neq i}^N \text{distance}_{ij} \quad (39)$$

と計算される。この式は $N$ 個の点集合に対して点 $i$ と点 $j$ の点間距離 $\text{distance}_{ij}$ を点の全組み合わせについて計算し足し合わせた後その組み合わせ数で割ることで点間距離の平均を取ったものである。また、小売店は各シナリオでケーススタディと同じ数である36個用意する。

このシナリオ群で入力する小売店の位置情報及びそれらの点間平均距離を以下に示す。

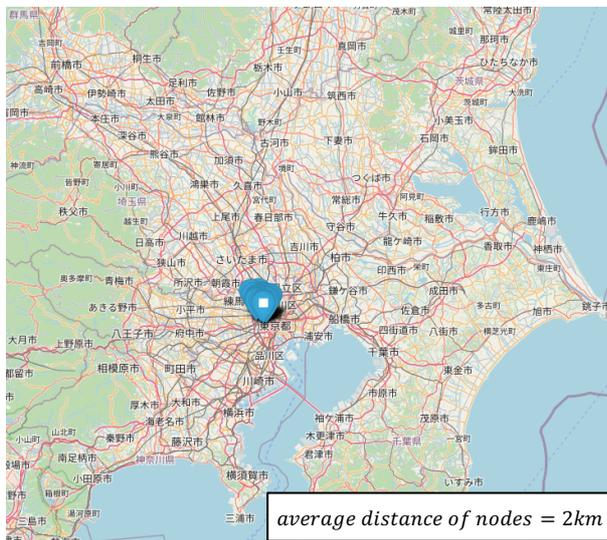


Fig. 5.1. Retailer for scenario I - i

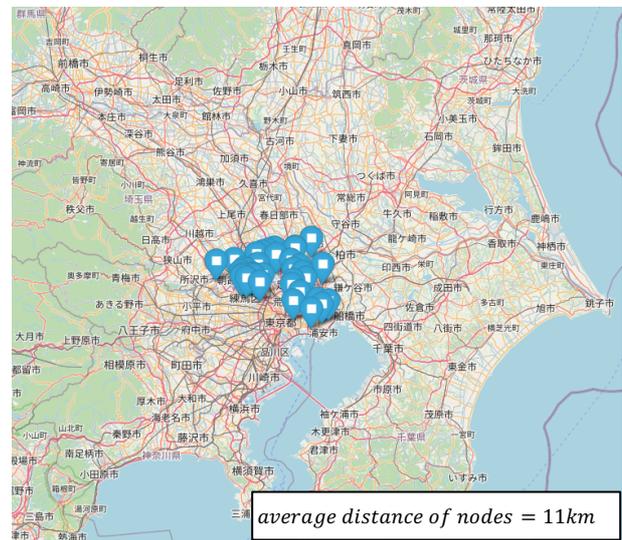


Fig. 5.1. Retailer for scenario I - ii

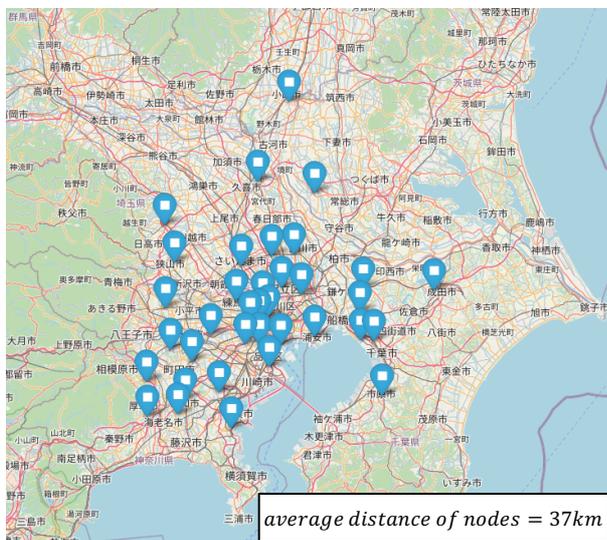


Fig. 5.3. Retailer for scenario I - iii

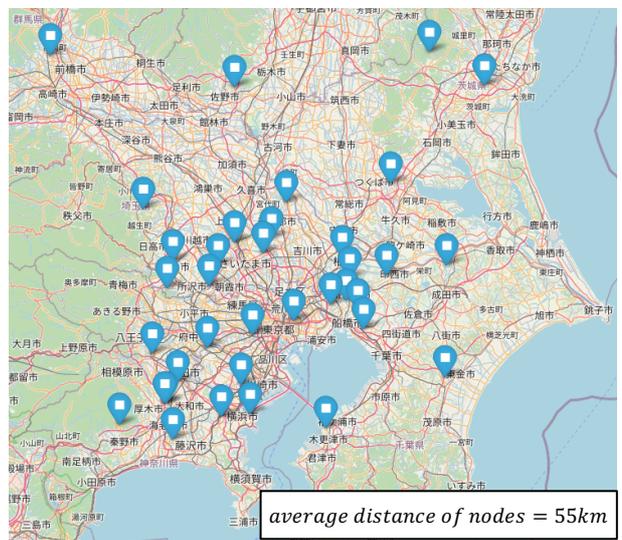


Fig. 5.4. Retailer for scenario I - iv

これらの点間平均距離はそれぞれ2km, 11km, 37km, 55km (cf. ケーススタディでは20km) となっており、関東圏内で段階的に点間平均距離が長くなっていくような小売店集合を選んだ。またそれぞれの小売店集合に対して実データより需要関数のパラメータの推定値を変化させたためその入力値を Table 5.2 に示す。

Table 5.2. List of changed parameters.

	I - i	I - ii	I - iii	I - iv
$\Lambda^R$ 需要の最大値 (単位)	221	225	237	260
$\sigma_j$ 小売店 $j$ における需要の 標準偏差 (単位)	1.7	6.7	22.1	36.1

Fig. 5.5 及び Fig. 5.6 は各シナリオにおける利潤、売上と総費用、倉庫小売店間平均時間の結果を表している。このグラフより、小売店の集合が密であればあるほど倉庫の分散利用は向かず、逆もまた然りであるという結論が得られる。これは4.2節で得た、「倉庫を増やし倉庫小売店間の配送時間を減らすことで得られる利潤の増加分が倉庫を増やすために必要な費用を上回れば、倉庫を増やす利点が現れる」という結果を補強するものになった。つまり企業はシナリオ I - i やシナリオ I - ii のように需要地が密である場合は倉庫を集約させて利用させた方がよく、シナリオ I - iii やシナリオ I - iv のように需要地が疎である場合は倉庫を分散させて利用させた方が利益的であると考察される。実際需要地が密であるような状況においては徒に利用倉庫を増やしてもかえって倉庫小売店間の配送時間を増加させてしまい、結果として Fig. 5.7 で示されるように利潤の増加にどの項も寄与していないという結果が得られる。それに対して、需要地が疎であれば利用する倉庫を1個増やして分散させることによる配送時間の短縮分が大きい（例えばシナリオ I - iii は全体で平均して約0.1時間の短縮になったのに対して I - iv は約0.2時間）、Fig. 5.10 で示されるように倉庫を増やし続けても利潤の増加分と減少分がある程度均衡し利用倉庫を増やすことへのインセンティブが得られる。また、Fig. 5.11, Fig. 5.12, Fig. 5.13, Fig. 5.14 は各シナリオにおいて利潤が最大になっている際に利用されている倉庫の位置を小売店集合と共に図示した図及び利用されている倉庫の単位在庫費用及び単位発注費用の散布図についての図の組である。これらの図からも在庫費用や発注費用を小さい倉庫より倉庫小売店間の配送時間を短くするような倉庫を選択することで利潤を最大化させることが可能であると推察できる。

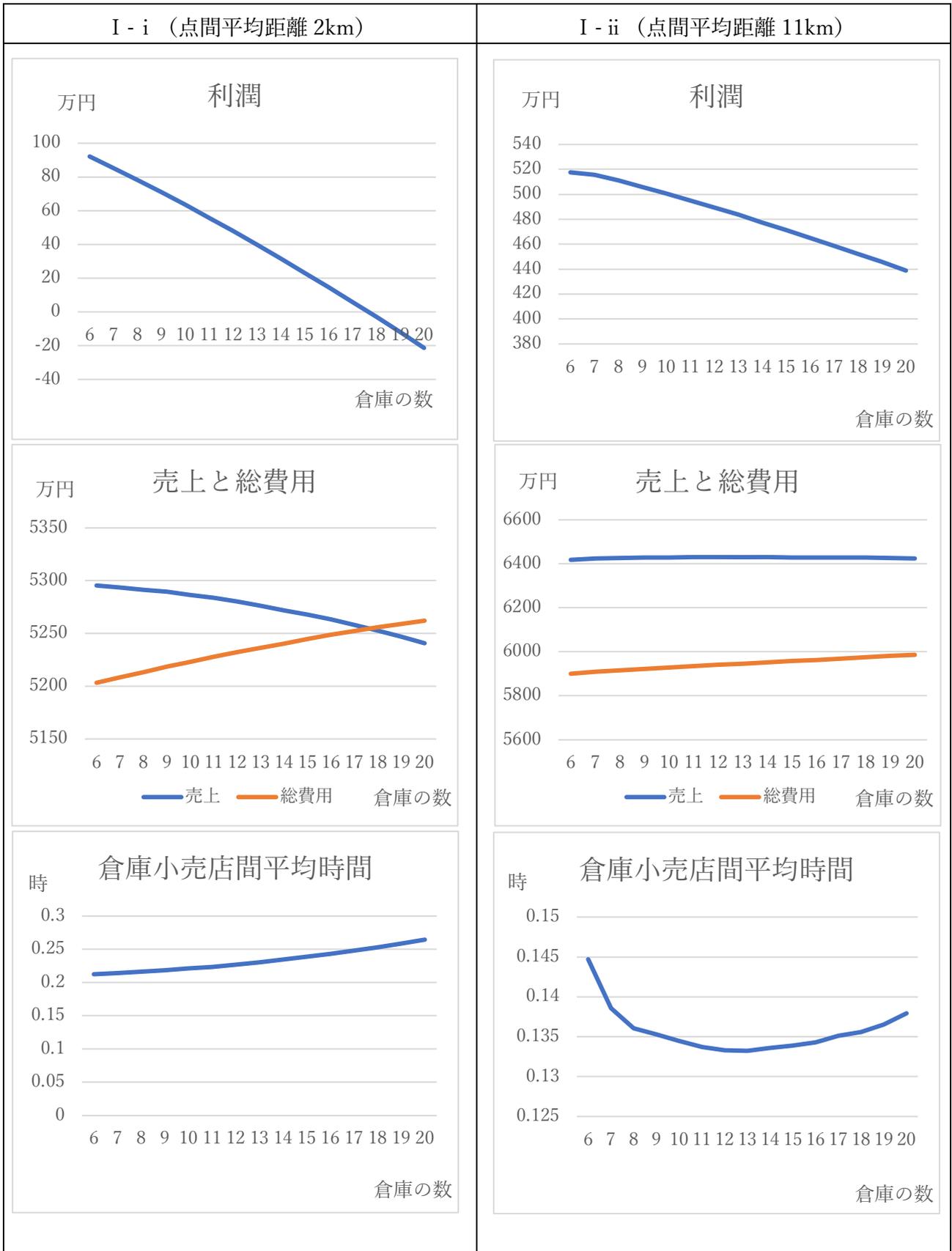


Fig. 5.5. Result of scenario I - i and scenario I - ii

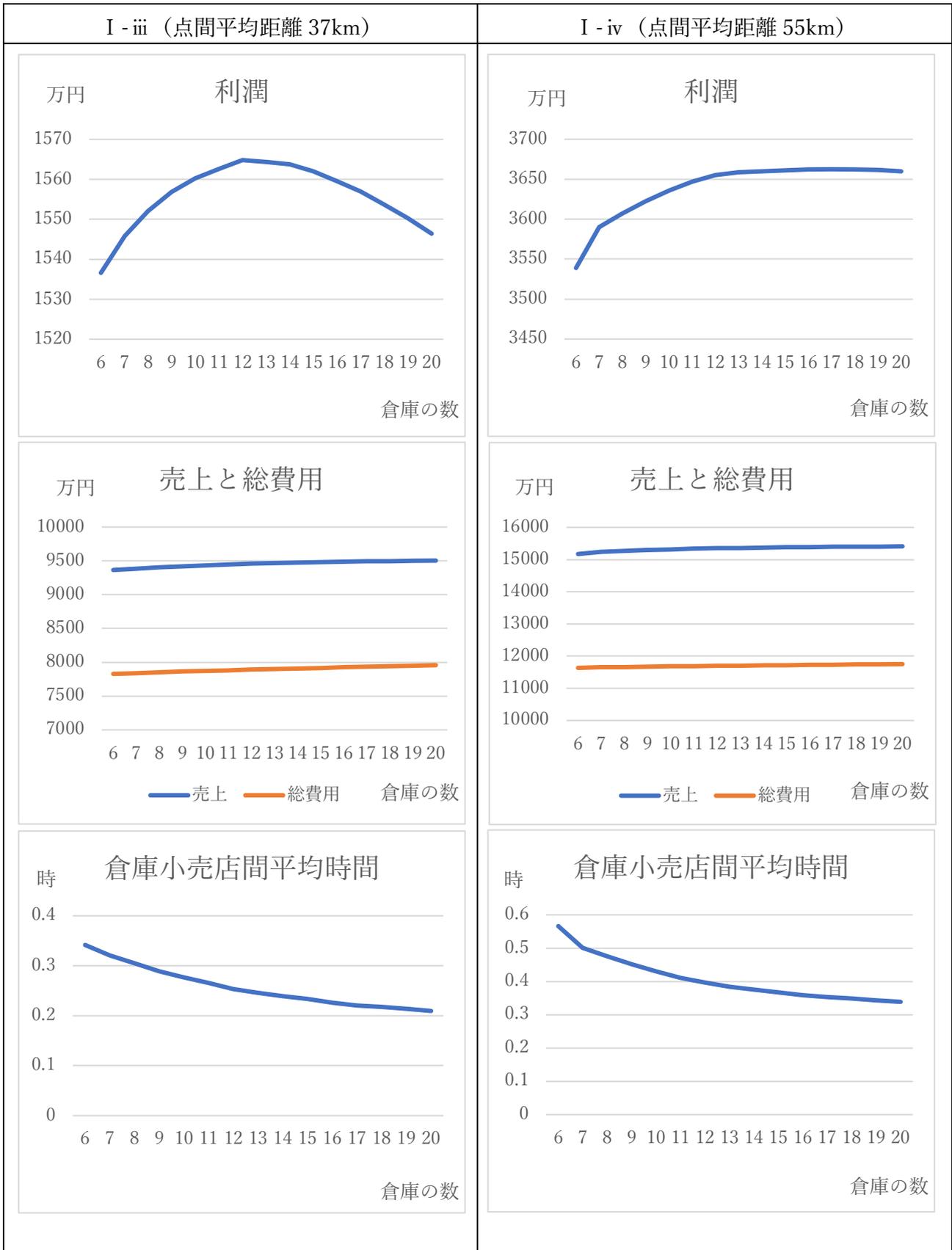


Fig. 5.6. Result of scenario I - iii and scenario I - iv



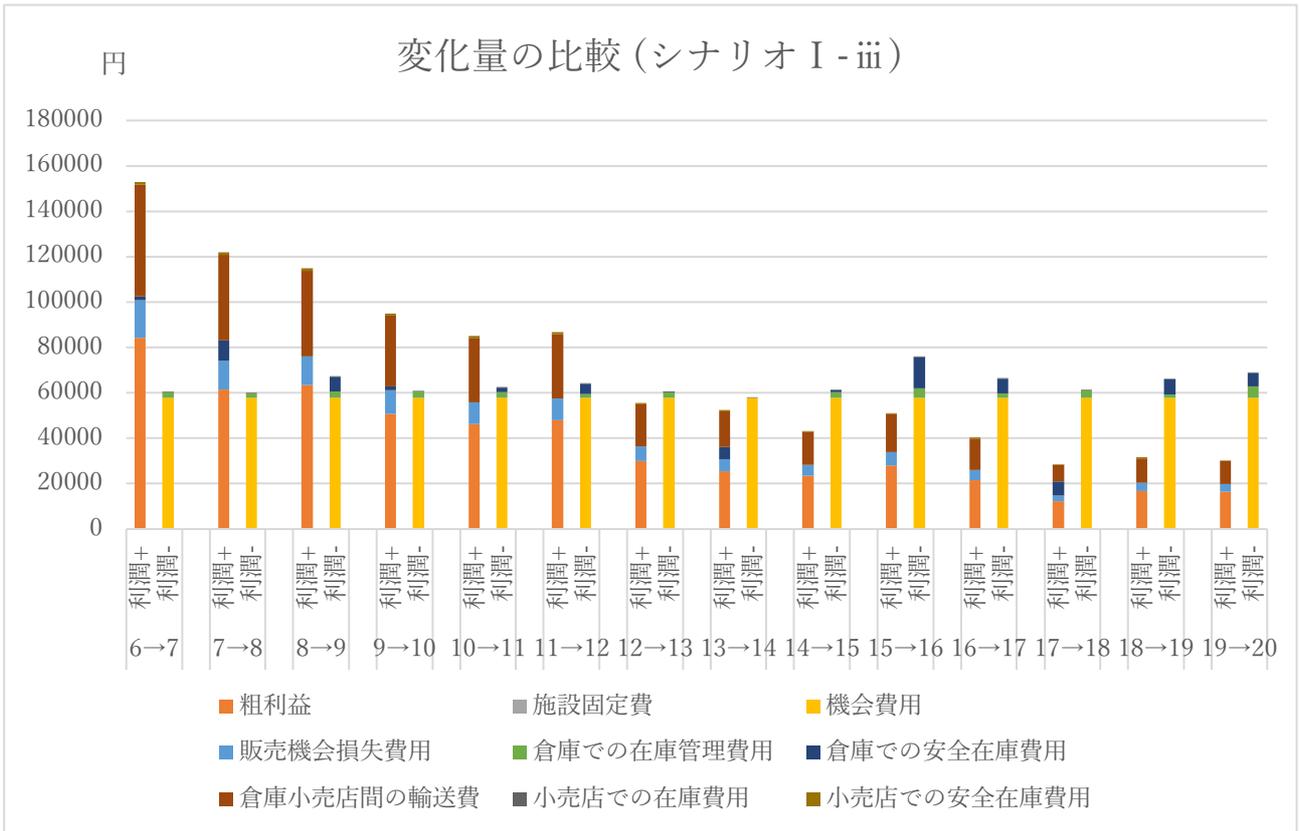


Fig. 5.9. Amount of changes in each terms. (Scenario I - iii)

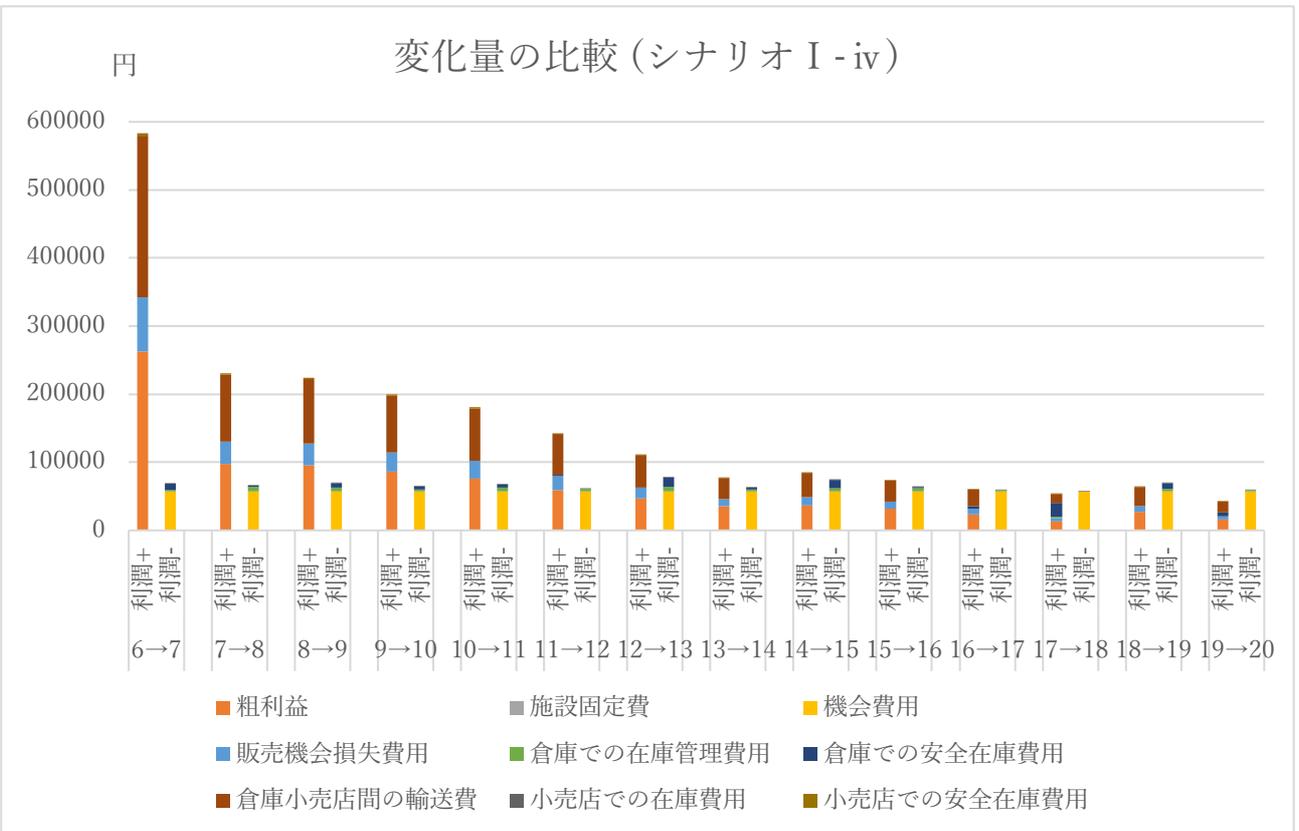


Fig. 5.10 Amount of changes in each terms. (Scenario I - iv)

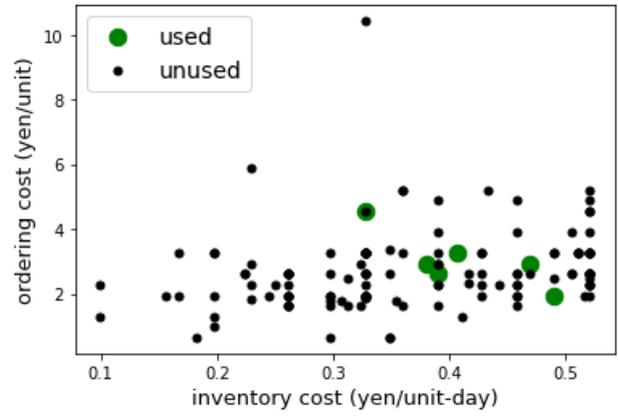


Fig. 5.11. Location plot and scattered plot of used warehouses in optimized situation.

Scenario I - i ,  $n = 6$

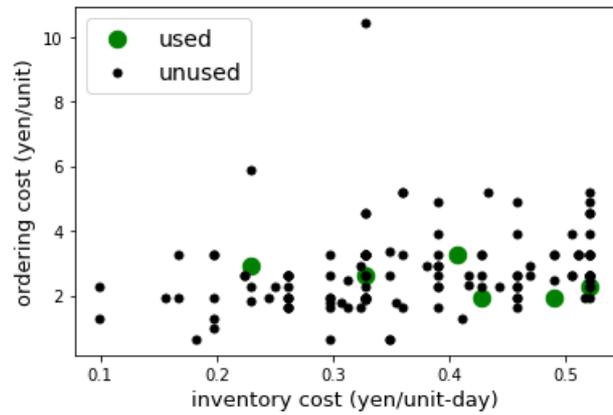


Fig. 5.12. Location plot and scattered plot of used warehouses in optimized situation.

Scenario I - ii ,  $n = 6$

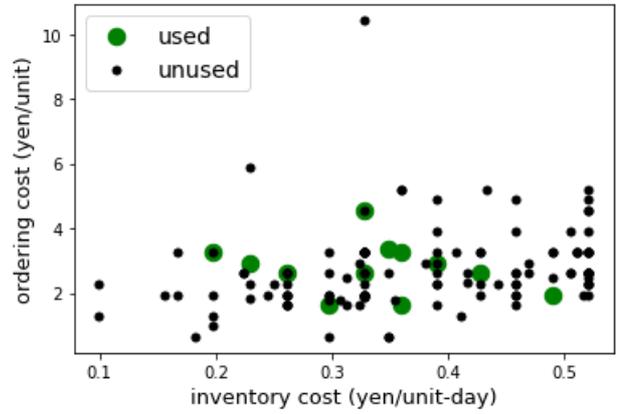


Fig. 5.13. Location plot and scattered plot of used warehouses in optimized situation.

Scenario I - iii,  $n = 12$

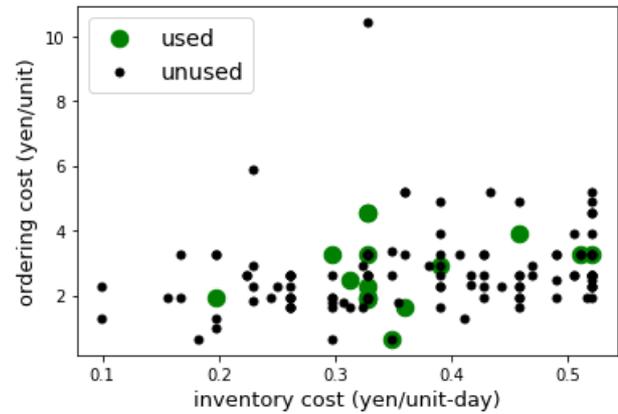


Fig. 5.14. Location plot and scattered plot of used warehouses in optimized situation.

Scenario I - iv,  $n = 16$

### 5.3 シナリオⅡ：貨物の時間価値の変化

倉庫の分散利用によって大きな変化が生まれる要素の一つとして小売店までの配送時間の短縮が挙げられるのは4.2節で確認した通りである。ここで、貨物の時間価値が増加すれば素早く送り届けることへの意義がより強くなるため倉庫の分散利用がより促進されると推察される。そのためシナリオⅡでは貨物の単位当たりの時間価値をベースシナリオの値に対して約半分である状況と約2倍である状況を与えて、その際の倉庫利用の状況の変化を観察する。

Fig. 5.15は各シナリオにおける利潤、売上と総費用、販売機会損失費用の変化を表した図である。販売機会損失費用LSCについてのみ変化させただけであるため利潤のグラフの概形はベースシナリオの結果であるFig. 4.6と大きくは変わらないが、単位当たり時間価値 $utv$ を約2倍にしたシナリオⅡ-iiにおいては利潤のピークをとる利用倉庫数が7から8に変化した。これはFig. 5.16より、販売機会損失費用の変化分が利潤の増加により大きく寄与したためであることが理解できる。対してFig. 5.17より貨物の時間価値が小さいような場合は、貨物を素早く届けることのメリットが利潤追求という意味では小さくなってしまうため倉庫の数を増やして倉庫を小売店へより近づける意義が薄れる。以上より企業は取り扱う製品によって倉庫の集約度を変化させることでより多くの利潤を得ることができる可能性があり、素早く届けることで例えば市場に売れ行きの製品をはやく揃えることができるようになるなどの荷受人に価値を付与できるような製品であれば倉庫を分散させて利用するのが利益的であるという洞察を得られた。

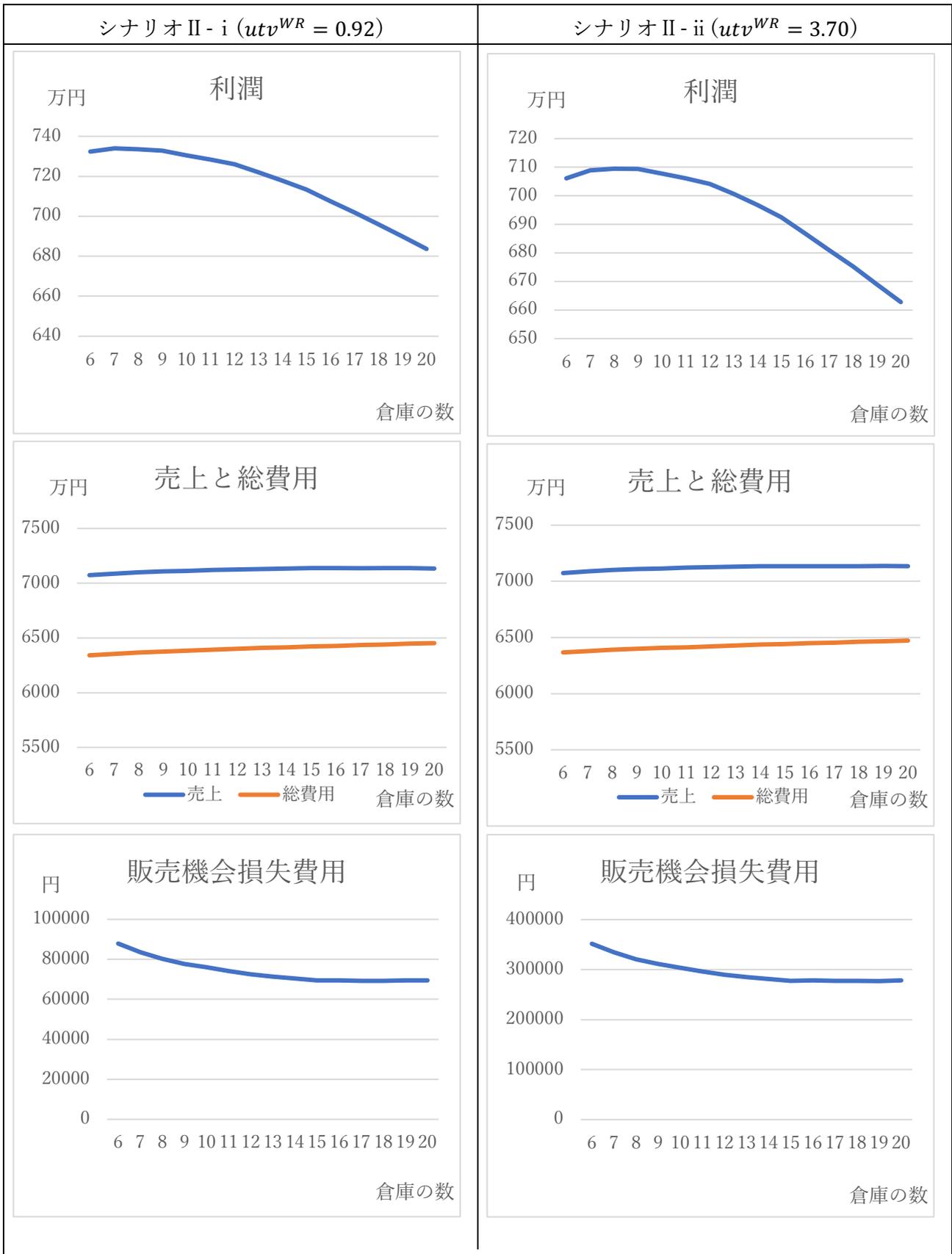


Fig. 5.15. Result of scenario II - i and scenario II - ii

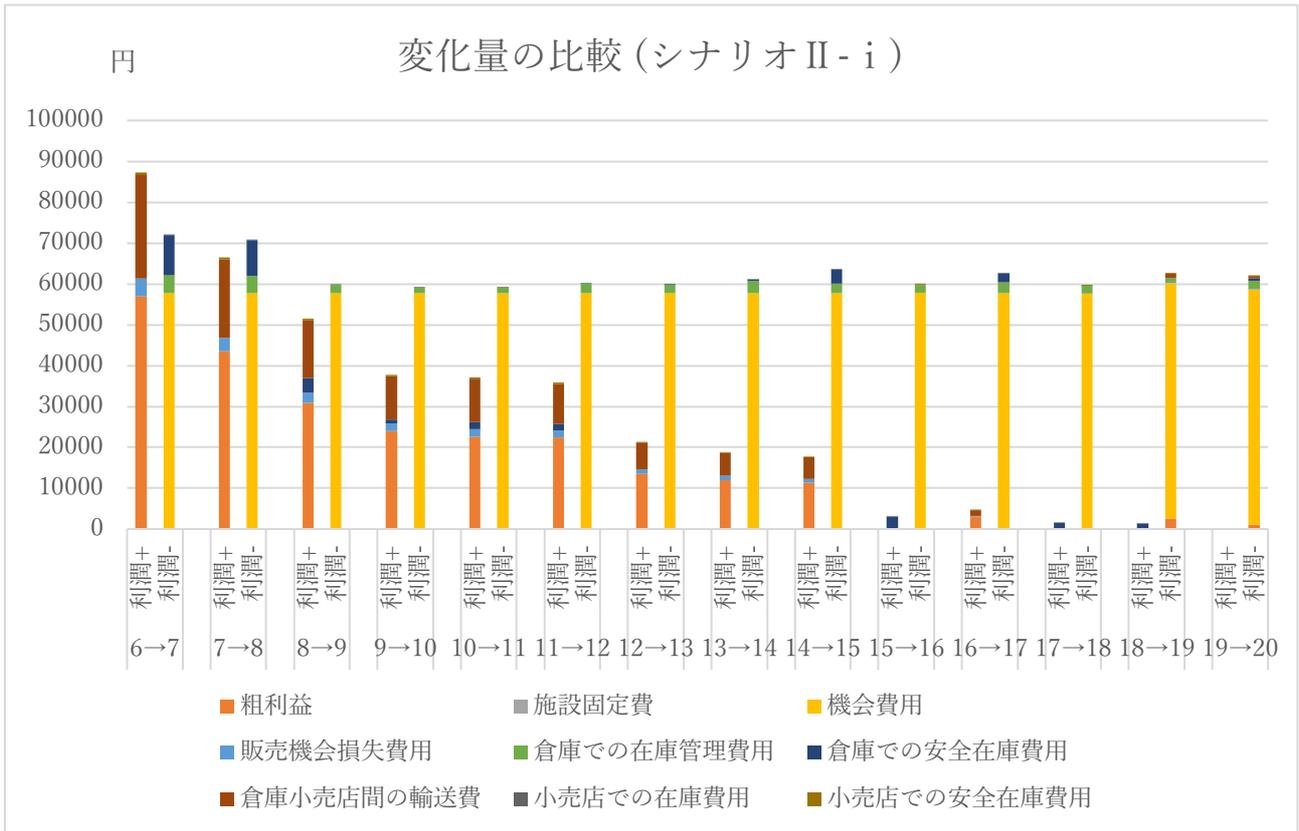


Fig. 5.16 Amount of changes in each terms. (Scenario II - i)

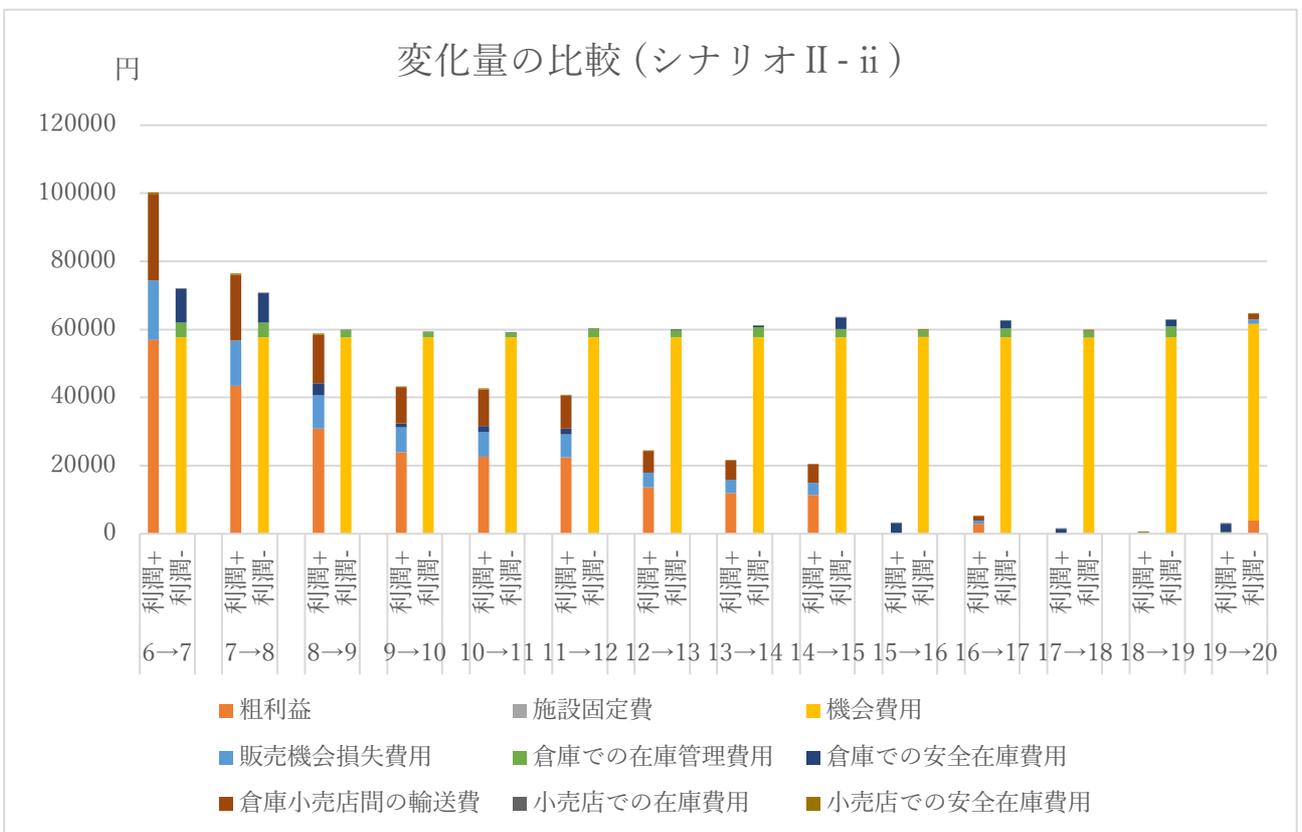


Fig. 5.17 Amount of changes in each terms. (Scenario II - ii)

## 5.4 シナリオⅢ：需要の季節性

シナリオⅢにおいては倉庫シェアリングサービスの特徴が発揮されるような状況について考察する。倉庫シェアリングサービスは荷主にとって借りたいときに使う分だけ即座に借りることができるというメリットがあることから、急な需要の増加に大きなコストをかけることなく対応することができるかと推察できる。そのため本シナリオでは需要が特定の時期に大きくなるような状況を想定し、通年で需要が発生するのはベースシナリオと同じであるが、それに加えて年に数回大きな需要が発生するような状況を作る。より具体的には需要を30日間通常の2倍に増加させて、その増加させた需要に対応するために増やした利用倉庫の数に対して利潤がどのように変化したのかを観察する。シナリオⅢ-iではそのような需要の増加期間が1回、シナリオⅢ-iiでは連続していない異なる時期に2回発生する。実際の計算においては、まず通常の需要が発生しているときと2倍の需要が発生しているときそれぞれの状態について最適化問題を解く。そこで、通常の需要が発生しているときにおいては利潤が最大となるような倉庫利用（このときに利用している倉庫群を*Ware\**と呼ぶことにする）を行っているものと仮定する。そこで、2倍の需要が発生したときに*Ware\**から増やした利用倉庫の数に対して需要の増加期間中の売上及び費用の項がそれぞれどの程度増減したのかを観察することによって、需要の増加に対してどの程度利用する倉庫を増やせばよいのかを示唆を得ることが目的である。

また、本シナリオでは倉庫シェアリングと賃貸型倉庫の比較も行う。つまり上記で述べたような需要の変動に対して対応する際に、倉庫シェアリングサービスのみを利用した場合と賃貸型倉庫のみを利用した場合の2パターンで各シナリオの分析を行う。これは現実のビジネスにおける課題において、企業が急な需要の増加に対して倉庫シェアリングサービスを利用した方が利益的であるか否かを調べるための分析であり、より実用的な示唆を得ることを目的としたものである。このときに賃貸型倉庫として利用する倉庫の位置情報はFig. 5.18の通りであり、全部で4つの倉庫が存在する。賃貸型倉庫の場合は在庫保管費用として、毎月10坪借りることによる費用を計上しておりその際に利用する倉庫ごとの月坪は実務家へのインタビューをもとにした推定値を用いている。よってシナリオⅢにおいては、倉庫シェアリングサービスを利用するシナリオⅢ-i-a, Ⅲ-i-bと、賃貸型倉庫を利用するⅢ-ii-a, Ⅲ-ii-bの計4パターンを実験する。シナリオ分析の前にまず賃貸型倉庫のみを利用してSCNを構築した場合の結果を見る。利用する入力値はすべてケーススタディと同じで倉庫情報だけ変更する。それにより得た結果がFig. 5.19, Fig. 5.20, Fig. 5.21である。この結果より賃貸型倉庫のみを利用してSCNを構築する際は倉庫を集約させて利用した方が利益的であるということが明らかになった。これは賃貸型倉庫において倉庫を増やすことによって倉庫小売店間の配送時間は減少している（Fig. 5.22）が、それ以上に倉庫ごとの機会費用及び施設費用が大きく配送時間を下げることによる利潤増加分を上回ったためであると考えられる。

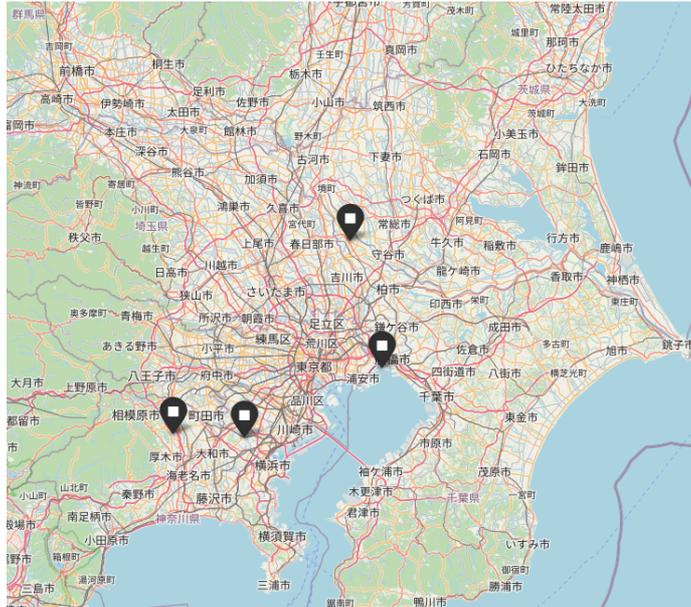


Fig. 5.18. Location of rental warehouse

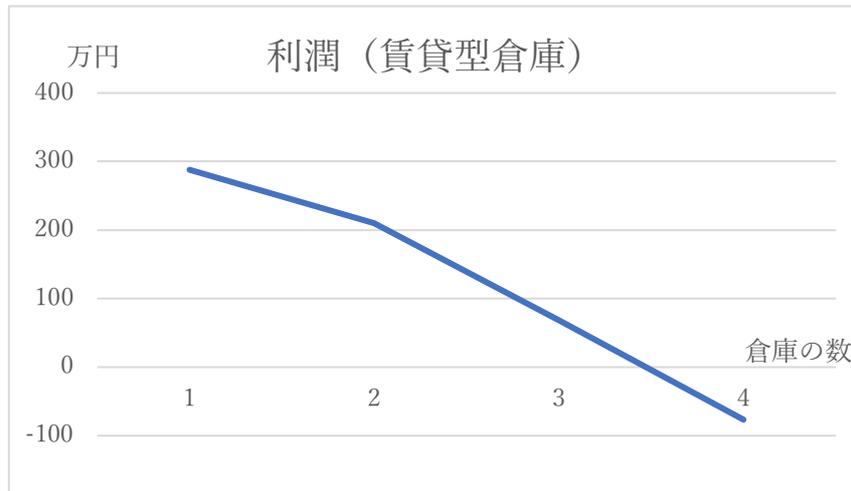


Fig. 5.19 Result of optimization (rental warehouse)

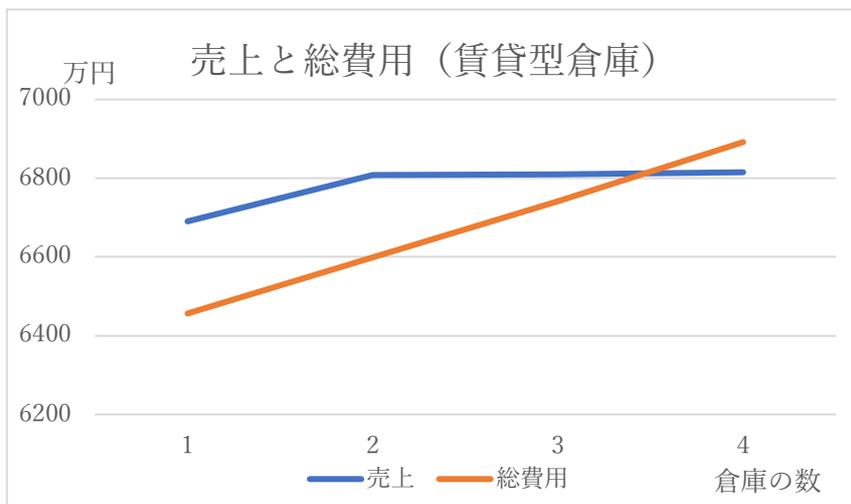


Fig. 5.20 Revenue and cost (rental warehouse)

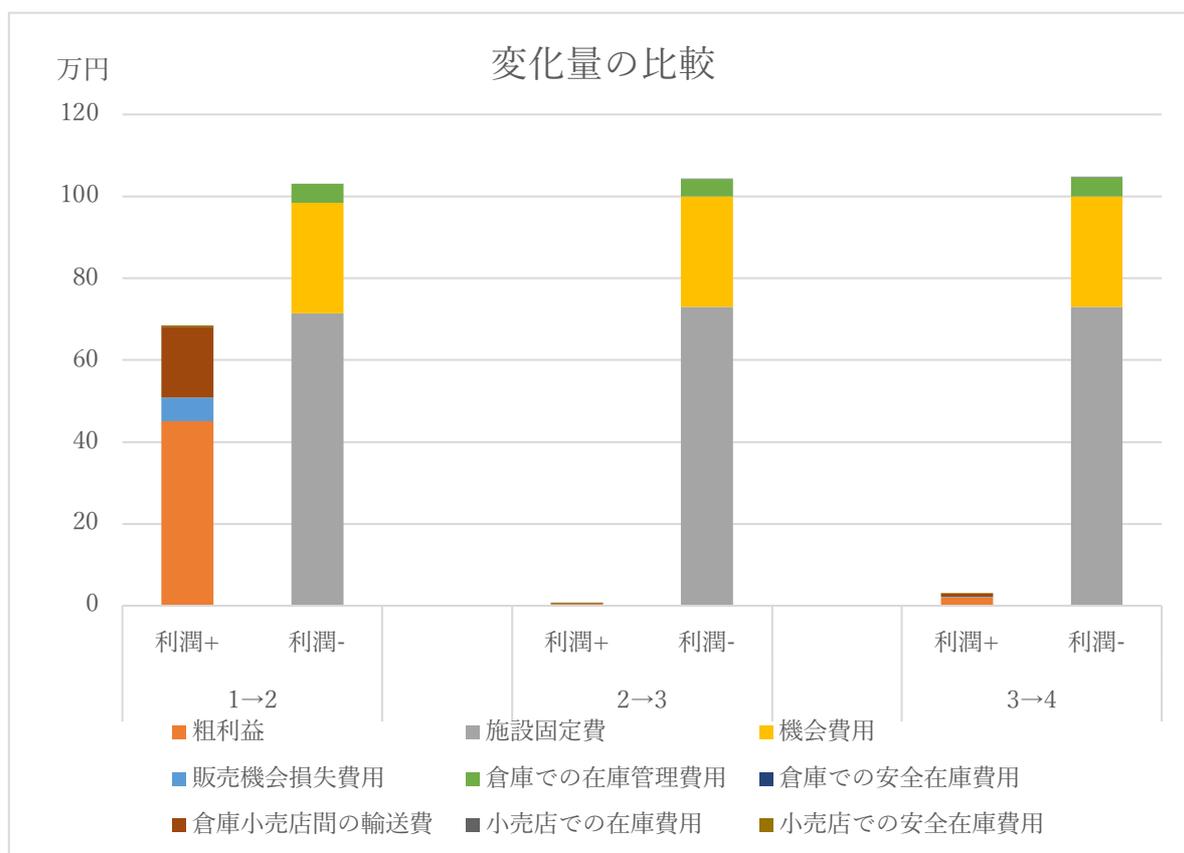


Fig. 5.21 Amount of changes in each terms. (Rental warehouse)

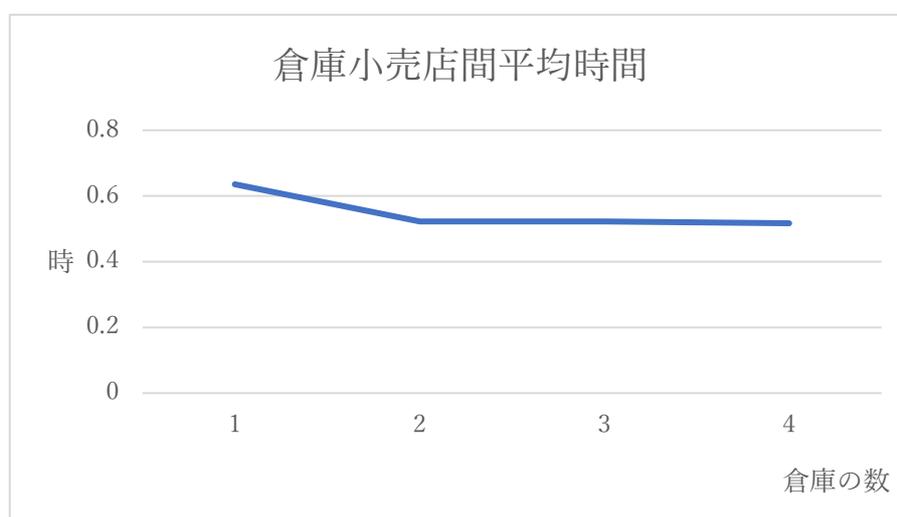


Fig. 5.22 Average delivery time between warehouses and retailers. (Rental warehouse)

倉庫シェアリングと賃貸型倉庫におけるWare\*はそれぞれ $n = 7$ ,  $n = 1$ のときである。よって以下では、倉庫シェアリングにおいては $n = 7$ 、賃貸型倉庫の場合は $n = 1$ のときに対して増加した需要に対応するために増やした利用倉庫数と、その時の利潤の変化を観察する。なお倉庫シェアリングにおいては容量の制約上追加した利用倉庫数が5の点から計算を行う。

Fig. 5.23 及び Fig. 5.24 より、倉庫シェアリングにおいては倉庫の数を増やすことによって利潤の変化分が増加していく様子は観察できなかった。これは与えられた小売店集合に対してすでに最適な倉庫群である *Ware\** を利用していたため、これ以上倉庫の数を増やしてもより利潤を追求できるような SCN を構築することができなかったためであると考えられる。賃貸型倉庫に関してもシナリオ III-ii-a, III-ii-b 共に、 $n = 1$  のときが与えられた小売店集合に対して最適な倉庫群であったため、需要が増大してもなるべく倉庫を増やさずに対応するのが最も利潤が高いという結果が得られた (Fig. 5.25, Fig. 5.26)。

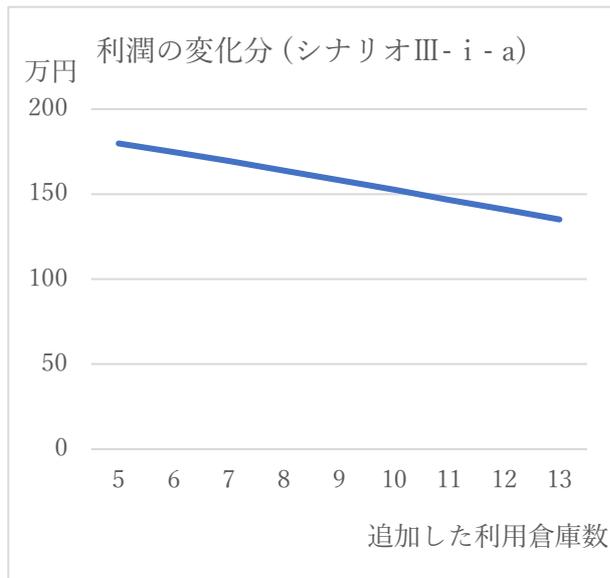


Fig. 5.23. Change of profit (III-i-a)

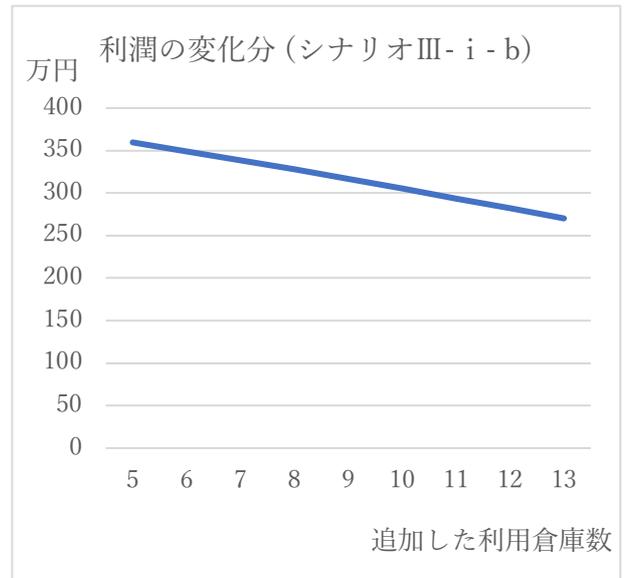


Fig. 5.24. Change of profit (III-i-b)

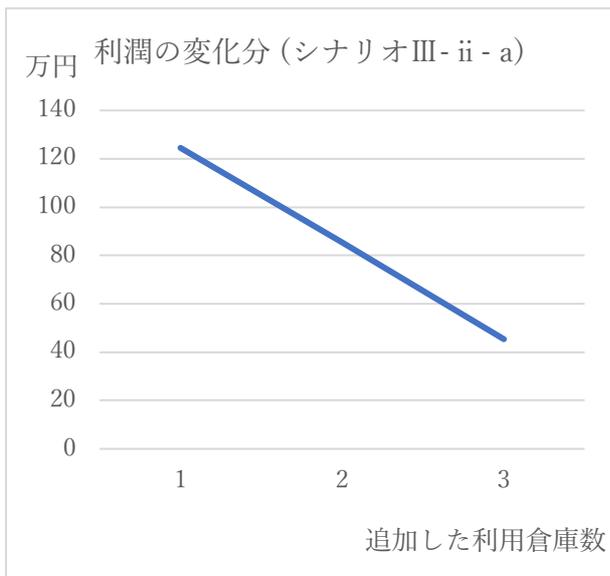


Fig. 5.25. Change of profit (III-ii-a)

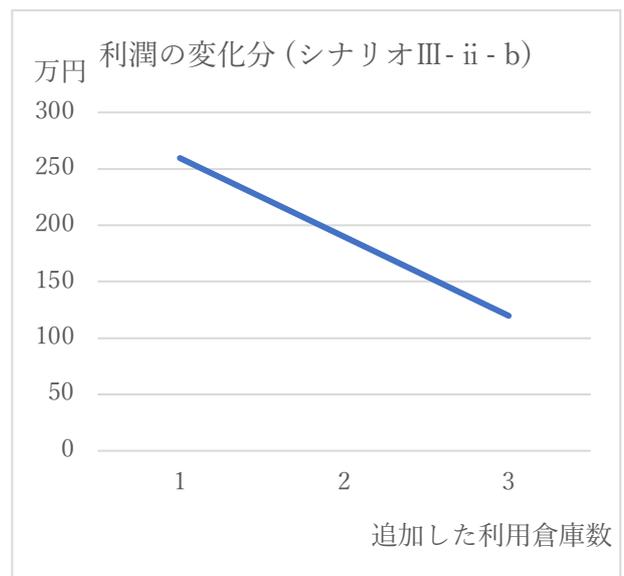


Fig. 5.26. Change of profit (III-ii-b)

これらより倉庫シェアリングのみ、賃貸型倉庫のみを利用して需要の季節性に応じる際に利用倉庫を増やすメリットは得ることはできなかったが、次に倉庫シェアリングと賃貸型倉庫を組み合わせることによってどのような変化が生じるのかを観察してみる。現状において倉庫シェアリングサービスは一般的に普及しているわけではなく、荷主企業は賃貸型倉庫を利用してSCNを構築しているのが実情である。そのような状況において企業が需要の急な増加に対応する際の利潤の変化の様子は賃貸型倉庫を利用する場合においてはシナリオIII-i-a, III-ii-aのようになると考えられるが、賃貸型倉庫のみを利用していた企業が倉庫シェアリングサービスを組み合わせることで需要の増加に応じた場合その企業の利潤の変化がどのように変わるのかをシナリオIII-iiiとして実験する。具体的にはWare\*を賃貸型倉庫を利用している $n=1$ の時として、そこから短期間の需要が発生した際に追加する利用倉庫数とそのときの利潤の変化分を観察する。

その結果がFig. 5.27である。利潤が最も増大したときは追加した倉庫数が4個増えた時であり、この結果は需要が増大した際倉庫シェアリングサービスを通じて適切な倉庫を選び利用すれば得られる利潤をさらに大きくすることができるということを示唆している。Fig. 5.28がその利潤の内訳になるがこの図より、利潤を増大させる項として主に粗利益、減少させる項として機会費用の項があるが、倉庫を増やし配送時間が減少することによる粗利益の増加分と利用倉庫を増やすことによって増加する機会費用のバランスによりどの程度倉庫を増やして増加需要分に対応すべきかが決定することがわかった。倉庫小売店間の配送時間は最適な追加数(=4)であるときに約半分になっており (Fig. 5.29), また, Fig. 5.30 からわかるようにこれは小売店との距離が短くなるように倉庫を配置したためであるとわかる。

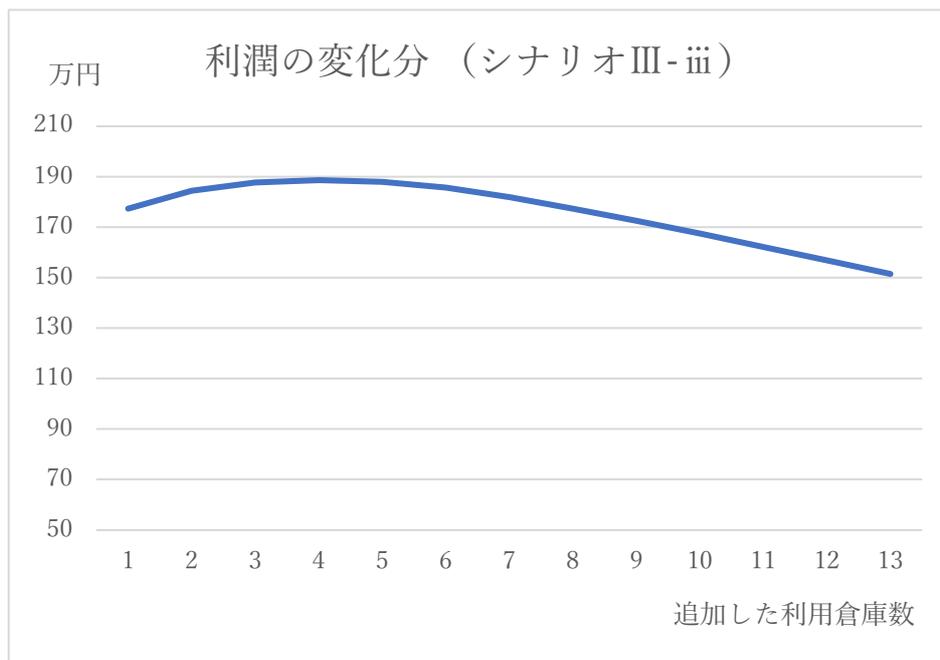


Fig. 5.27. Change of profit (Scenario III-iii)

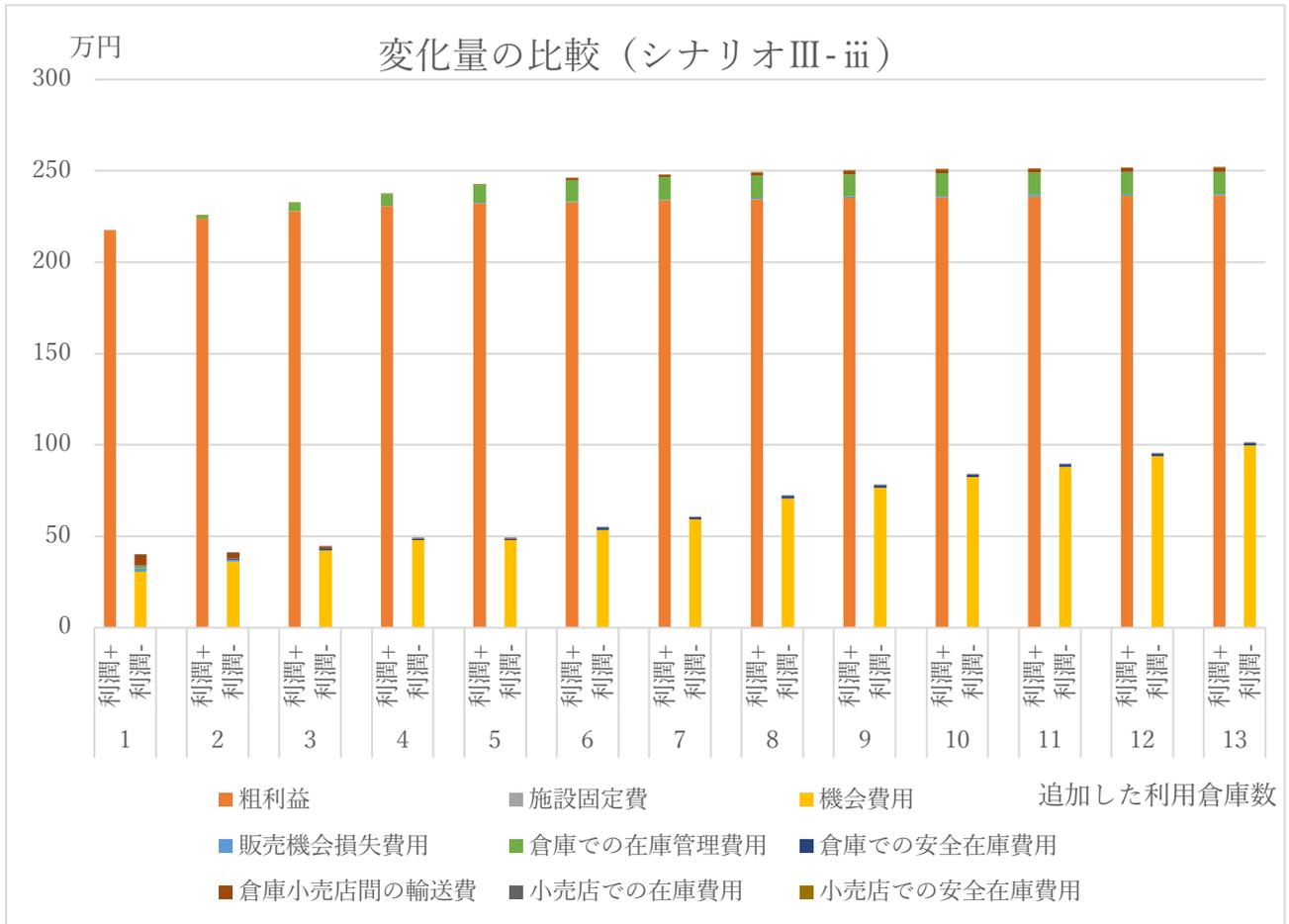


Fig. 5.28. Amount of changes in each terms. (ScenarioIII- iii)

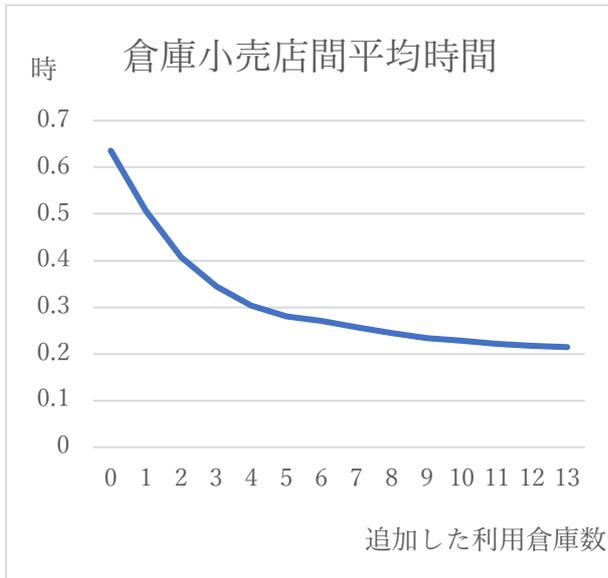


Fig. 5.29.

Delivery time between warehouse and retailers  
(ScenarioIII- iii)



Fig. 5.30.

Location of used warehouses  
(ScenarioIII- iii)

## 6 おわりに

本研究では倉庫シェアリングサービスという新たな倉庫利用の形から、企業が利潤を追求するという意思決定を下すという仮定の下倉庫利用の状況を変化させることで企業が得られる利潤にどのような変化が生じるのかを観察した。ここで行ったケーススタディとシナリオ分析より、倉庫シェアリングサービスを用いてSCNを構築する場合には製品を出荷する小売店集合の位置と密度や扱っている製品がもつ時間価値によって利用する倉庫の数を増やし分散型のSCNを構築した方が利潤を得られるということが明らかになった。そして、その分散の度合いは利用する倉庫を1個増やした際に短くできる配送時間の影響による利潤の増加分と、倉庫を1個契約する際にかかる費用の均衡によって定められるという知見を得た。また通常時には賃貸型倉庫を利用して製品を供給しているような企業が一時的な需要の増大に直面した場合には、一時的に倉庫シェアリングサービスを利用することにより企業が得られる利潤を大きくすることができるという示唆も得た。これは現実のビジネスシーンにおける実用的な倉庫シェアリングサービスの利用法であり、従来では集約させて倉庫を利用していたような荷主企業に需要や需要地などの外的要因に応じて分散型の倉庫利用を提案するような結果となっている。

今後の研究課題についてまず挙げられることとしては、本研究においては卸売業と小売業が一体となった企業を取り扱ってその企業の利潤に関する最適化問題を解いたが、実際には工場、卸売業、小売業がそれぞれ別の企業であることも多くそのような企業に関しては今回の議論が適するとは言い難い。例えば工場と各倉庫間の輸送費用について輸送費はSCNの上流側が負担するという考えの下今回のモデルに費用として含めなかったが、その輸送費用自体は利用する倉庫を増やすにつれて増加している (Fig. 6.1)。このように現状のモデルでは全体最適の形を取っていないため、今後の研究ではより一般的な議論を進めるために対象とする企業に関する仮定を取り除きサプライチェーンネットワークに属する各プレイヤーについて最適であるようなナッシュ均衡解を求めるようなモデルを構築することが望まれる。また本研究の結果としては倉庫を増やした方が良いという示唆を得たが、現実における物流課題としてトラックドライバーが不足しているという問題がある<sup>[29]</sup>。そこで、使用する倉庫を増やすとその分必要なトラックも増えるがそれに対応する人的資源は確保できるのかという懸念点が生じる。本モデルは倉庫シェアリングサービスの利用を記述するには一定の成果を収めたが実際のビジネス上の課題点を十全に組み込めてはいないため、現実により即するようなモデルの構築を今後の課題としたい。

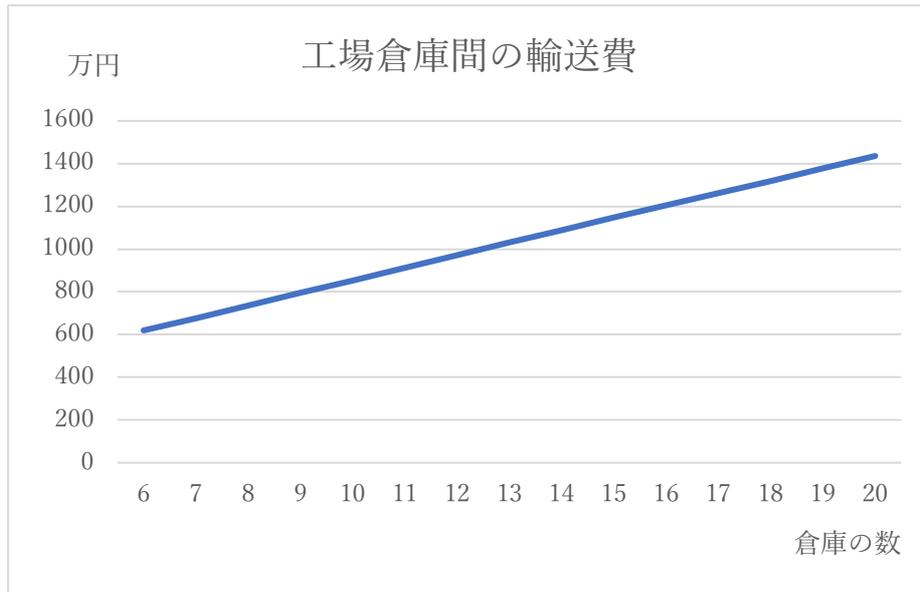


Fig. 6.1. Transportation cost between manufacturer and warehouse (base scenario)

## 参考文献

- [1] 国土交通省. (2021). 総合物流施策大綱 (2021 年度～2025 年度). 2023 年 1 月 23 日取得.  
<https://www.mlit.go.jp/seisakutokatsu/freight/content/001409564.pdf>
- [2] 総務省. (2015). 平成 27 年版 情報通信白書. 2023 年 1 月 23 日取得.  
<https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h27/html/nc242110.html>
- [3] Cohen, B., & Kietzmann, J. (2014). Ride on! Mobility business models for the sharing economy. *Organization & Environment*, 27(3), 279-296.
- [4] Gesing, B. (2017). Sharing economy logistics: Rethinking logistics with access over ownership. DHL Customer Solutions & Innovation.
- [5] Simchi-Levi D. Kaminsky P. & Simchi-Levi E. (2000). Designing and managing the supply chain : concepts strategies and case studies. Irwin/McGraw-Hill.
- [6] Deloitte. (2016). The rise of the sharing economy: impact on the transportation space. 2023 年 1 月 24 日取得. <https://www2.deloitte.com/us/en/pages/consumer-business/articles/the-rise-of-the-sharing-economy-impact-on-the-transportation-space.html>
- [7] L'Hermitte, C., & Nair, N. K. C. (2021). A blockchain - enabled framework for sharing logistics resources during emergency operations. *Disasters*, 45(3), 527-554.
- [8] Melo, S., Macedo, J., & Baptista, P. (2019). Capacity-sharing in logistics solutions: A new pathway towards sustainability. *Transport Policy*, 73, 143-151.
- [9] 伊東明日美, 貝原俊也, 國領大介, & 藤井信忠. (2021). 不確実性を考慮したシェアリングロジスティクスネットワーク設計に関する研究. In 自動制御連合講演会講演論文集 第 64 回自動制御連合講演会 (pp. 467-470). 自動制御連合講演会.
- [10] Franklin, R., & Spinler, S. (2011). Shared warehouses-sharing risks and increasing eco-efficiency. *International Commerce Review: ECR Journal*, 10(1), 22.
- [11] Meller, R. D., Ellis, K. P., & Loftis, B. (2012). From horizontal collaboration to the Physical Internet: Quantifying the effects on sustainability and profits when shifting to interconnected logistics systems. Center for Excellence in Logistics and Distribution, University of Arkansas.
- [12] Eppen, G. D. (1979). Note—effects of centralization on expected costs in a multi-location newsboy problem. *Management science*, 25(5), 498-501.
- [13] Chang, P. L., & Lin, C. T. (1991). On the effect of centralization on expected costs in a multi-location newsboy problem. *Journal of the Operational Research Society*, 42(11), 1025-1030.
- [14] Liu, L., Parlar, M., & Zhu, S. X. (2007). Pricing and lead time decisions in decentralized supply chains. *Management science*, 53(5), 713-725.

- [15] Schmitt, A. J., Sun, S. A., Snyder, L. V., & Shen, Z. J. M. (2015). Centralization versus decentralization: Risk pooling, risk diversification, and supply chain disruptions. *Omega*, 52, 201-212.
- [16] Das, C., & Tyagi, R. (1997). Role of inventory and transportation costs in determining the optimal degree of centralization. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 33(3), 171-179.
- [17] Kang, S. (2020). Why do warehouses decentralize more in certain metropolitan areas?. *Journal of Transport Geography*, 88, 102330.
- [18] Farahani, R. Z., Rashidi Bajgan, H., Fahimnia, B., & Kaviani, M. (2015). Location-inventory problem in supply chains: a modelling review. *International Journal of Production Research*, 53(12), 3769-3788.
- [19] Liu, L., Parlar, M., & Zhu, S. X. (2007). Pricing and lead time decisions in decentralized supply chains. *Management science*, 53(5), 713-725.
- [20] Zhu, S. X. (2015). Integration of capacity, pricing, and lead-time decisions in a decentralized supply chain. *International Journal of Production Economics*, 164, 14-23.
- [21] 経済産業省. (2021). 2021年企業活動基本調査確報－2020年度実績－. 2023年1月24日取得.  
[https://www.meti.go.jp/statistics/tyo/kikatu/result-2/2021kakuho/pdf/2021\\_allgaikyou.pdf](https://www.meti.go.jp/statistics/tyo/kikatu/result-2/2021kakuho/pdf/2021_allgaikyou.pdf)
- [22] Wilson, R. H. (1934). "A Scientific Routine for Stock Control". *Harvard Business Review*. 13: 116-28.
- [23] 梅谷俊治. (2020). しっかり学ぶ数理最適化: モデルからアルゴリズムまで. 講談社.
- [24] 瀬木俊輔. (2016). 在庫管理モデルを応用した貨物の時間価値に対する理論的アプローチ. *土木学会論文集 D3 (土木計画学)*, 72(2), 113-127.
- [25] 全日本トラック協会. (2021). 今すぐわかる標準的な運賃. 2023年1月26日取得.  
[https://jta.or.jp/wp-content/uploads/2021/05/hyoujun\\_imasugu.pdf](https://jta.or.jp/wp-content/uploads/2021/05/hyoujun_imasugu.pdf)
- [26] Konishi, Y., Mun, S. I., Nishiyama, Y., & Sung, J. E. (2014). Measuring the value of time in freight transportation. *The Research Institute of Economy, Trade and Industry*, Tokyo.
- [27] WareX. (2022). 全国の倉庫がすぐに見つかる | WareX ウェアエックス. 2023年1月18日取得. <https://warex.ai/>
- [28] 国土交通省. (2015). 平成27年度全国道路・街路交通情勢調査 一般交通量調査 集計結果整理表. 2023年1月21日取得.  
<https://www.mlit.go.jp/road/census/h27/data/pdf/syuukei05.pdf>
- [29] 国土交通省. (2021). 物流標準化と物流現場の現状. 2023年1月27日取得.  
<https://www.mlit.go.jp/seisakutokatsu/freight/content/001410731.pdf>