

# EC 物流における商品ポートフォリオ最適化

## Product Portfolio Optimization in EC Logistics

小池和弘<sup>1\*</sup> 宮澤典友<sup>1</sup> 町田賢一<sup>1</sup> 川村真澄<sup>1</sup> 竹中一晃<sup>1</sup>  
佐川大志<sup>2</sup> 田中謙司<sup>2</sup>

Kazuhiro Koike<sup>1</sup> Noritomo Miyazawa<sup>1</sup> Kenichi Machida<sup>1</sup> Masumi Kawamura<sup>1</sup> Kazuaki Takenaka<sup>1</sup>  
Daishi Sagawa<sup>2</sup> Kenji Tanaka<sup>2</sup>

<sup>1</sup> アスクル株式会社

<sup>1</sup> ASKUL Corporation

<sup>2</sup> 東京大学

<sup>2</sup> The University of Tokyo

**Abstract:** In the EC logistics business, which ships products upon receiving orders from customers via the Internet, determining the products to be handled and their inclusion ratios are a fundamental problem to be solved to increase the expected profit. It is difficult to find a good solution in a finite time because the number of products handled in EC is more than several million and the number of combinations increases explosively in the order of  $n$ th power. We formulated this problem as a portfolio optimization problem and tested whether it is possible to find an optimal or good solution using Markowitz's mean-variance model. The motivation for applying the mean-variance model, which is usually used for diversified investment in stocks, to EC logistics is that the model is very simple because it is obtained by the expected value and its variance, and it is easy to apply to the modeling of indicators such as sales and inventory cost in EC logistics. In logistics, it is easier to control inventory management and logistics costs if demand fluctuations are mitigated and leveled out as much as possible. The mean-variance model, which considers fluctuations as risks, is easy to apply to EC logistics because fluctuations tend to lead to higher costs. In this study, we constructed a mean-variance model of sales and inventory turnover using actual EC logistics data, and confirmed the effectiveness of the method for determining a preferred product portfolio from both EC and logistics perspectives.

## 1 はじめに

インターネットを通じて顧客から注文を受け、商品を配送するビジネス形態である EC 事業では、顧客需要を満たす商品ラインアップと需要の変化に対応した継続的な入れ替えが経営上求められる。また、商品を入荷・在庫し、注文に応じて出荷・配送する物流機能を提供する場合、物流倉庫の地理的な位置や容積、出荷能力などの物理的制約の中で、注文の当日・翌日配送など顧客の効用を維持しながら顧客の需要を満たすことが課題となっている。つまり、在庫商品の適切な選択と物流の高効率化が要求される。

商品選択を困難にする主な要因は 2 つあり、一つはトレンドや季節性など商品需要の時間的変動である。時系

列予測の研究は 1927 年に Yule が自己回帰 (AR) モデルや移動平均 (MA) モデルの概念を初めて定式化して以降大きな進展があった [1]。近年機械学習など複数の予測モデルを組み合わせて予測精度を向上させる方法など様々な手法が提案されている [2]。もう一つはサプライチェーンの構造的な要因であり、直列につながったサプライチェーンを下流から上流に向かって需要の波が増幅しながら時間的遅延を伴って伝搬するブルウィップ効果と呼ばれる現象である。ブルウィップ効果は過剰在庫や欠品に繋がるため、発生メカニズムと抑制手法は長年に渡り研究対象となっている [3]。筆者らは深層強化学習によって単純化した環境下においてブルウィップ効果を軽減する手法を提案した [4][5]。しかし需要変動とサプライチェーンの構造上発生する変動は様々な要因が複雑に関連しており、その個々の要因を分析して織り込んだ上でこれから売れる商品を予測して適切な品

\*連絡先：アスクル株式会社  
〒135-0061 東京都江東区豊洲 3-2-3  
E-mail: kazuhiro.koike@askul.com

揃えを決定することは難しい。

視野を広げてみると、株式市場においては成長期待、需給バランス、金利や為替変動、地政学的リスクなど様々な要因が株価という数値データに集約されている。同様に EC 物流の変動要因が注文数、在庫数、出荷数に全て反映されていると考えると、投資戦略手法である現代ポートフォリオ理論によって、EC 物流ビジネスの経営的な要求、すなわち顧客需要を満たす品揃えを決定し、需要の変化に応じた継続的な入れ替えをすることを実現できるのではないかと考えた。これが本研究の動機である。

金融市場と EC 物流はいくつかの点で類似点もある。

1. 日次の過去データがある

日足の株価に相当する計量データとして日々変動する商品毎、顧客毎の日次売上データがある。加えて商品毎の在庫、出荷データがある。数年間の継続的かつ頻度が揃った計量データがあるということは重要である。

2. 変動がリスクである

物流においては需要の変動をなるべく緩和し平準化した方が在庫管理や物流コストのコントロールがし易い。変動はコスト上昇につながり易いため、変動をリスクと考える平均・分散モデルは EC 物流にも馴染みやすい。倉庫の容積はピークに合わせて設計する必要があるため、変動の山と谷の差が大きいと無駄が発生する。差が小さい方が倉庫を有効活用できる。また変動の仕方は商品毎に異なるので組合せによっても大きく異なる。例えば図 1(a) はある商品 A と B の売上金額の推移、図 1(b) は商品 A と C の売上金額の推移を示している。A と B は弱い負の相関関係(相関係数  $-0.1234$ )であり、A と C は強い正の相関関係(相関係数  $0.8490$ )である。この場合ピークの高さが(a)より(b)の方が高くなる。従って相関が弱いか逆相関になる商品の組合せによってポートフォリオ効果で変動を打ち消し合うことを期待できる。

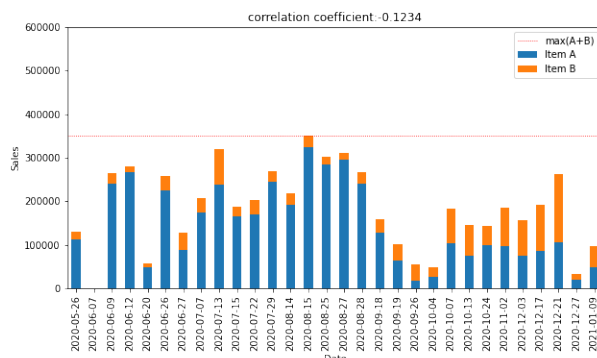
3. ポジションの考え方

金融商品の投資において一定の資金(例えば 1000 万円)でロングポジションをとるということは、EC 物流においては限られた容積(例えば  $1000\text{m}^3$ )の倉庫に在庫するということに相当する。

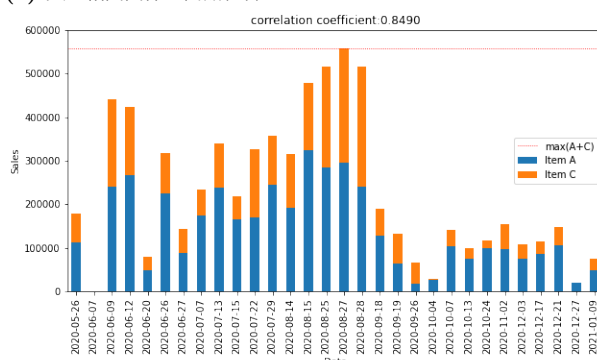
一方で次の相違点がある。

1. 売買は一方通行である

参加者がオープンな市場で自由に売買するのではなく、常に売り手は EC 業者で買い手は顧客である。



(a) 負の相関関係の商品組合せ



(b) 正の相関関係の商品組合せ

図 1: 売上変動と相関関係

2. 空売りがない

株式投資では下落局面において手元にない株式を信用取引で売り、価格が下がったところで買い戻して株式を返済して利益を得る空売りという方法があるが、EC 物流にはない。従ってポートフォリオの組入比率はマイナスにはならない。理論上は EC 物流でも他社から商品を借りてきて売り、後で現物で返済するという事は可能だが一般的な商習慣としては行われていないので、EC 物流における空売りはないものと考えられる。

3. 物理的な制約が強い

ポジションの考え方は類似点に挙げたが EC 物流の方が物理的な制約を強く受ける。金融商品投資でポジションを倍の 2000 万円に増やすことと、倉庫の容積を倍の  $2000\text{m}^3$  に増やすことはコスト的に同等ではない。

## 2 問題設定

本研究では現代ポートフォリオ理論の古典的な手法であるマーコウィッツの平均・分散モデルを採用した[6]。一般的には株式や債券など金融商品の分散投資戦略に用いられる手法であるが、このモデルが金融のみな

らずプロダクト・ポートフォリオの設計と管理のためのツールとして有望であることが示されている [7]. 平均・分散モデルは非常に簡明なモデルでありリターンの期待値とその分散によって得られることから, 日々変動する計量データがあれば, 売上だけでなく EC 物流における複数指標への適用と連携が可能となると期待できる. 例えば物流のパフォーマンス指標の一つとして在庫回転率がある. これは一定期間に在庫が何回転したかを示すものである. 例えば 1 日に 1 個売れる商品の場合, 月初にまとめて 30 個仕入れて在庫すると 30 日間で全て売れるので 30 日間で在庫回転率は 1.0 となる (図 2(a)). 仕入れを 2 回に分け, 1 回の仕入れ数を半分の 15 個にすると在庫は 30 日間で 2 回転するので在庫回転率は 2.0 である (図 2(b)). 需要が 2 日に 1 個に減った場合, 需要の変化を察知して 2 回目の仕入れをしなかった場合は在庫回転率は 1.0 となる (図 2(c)). 2 回目の仕入れをした場合は 2 回目の仕入れ分は売れ残ってしまうので在庫回転率は 0.5 となる (図 2(d)). このように在庫回転率は需要の変動だけでなく仕入れ回数と仕入れ数によって変化する指標である.

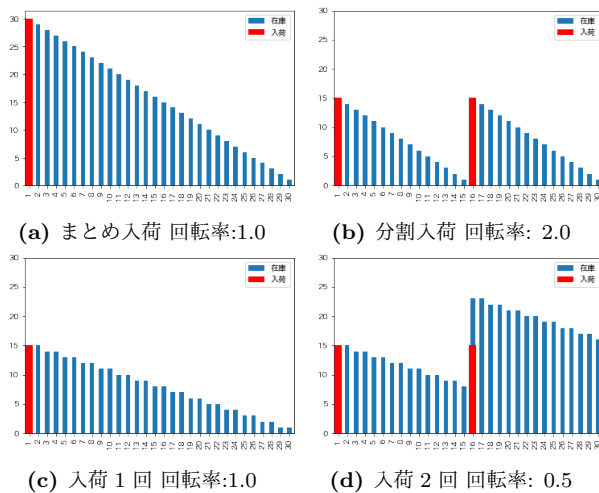


図 2: 在庫回転率

本研究では次の研究課題について実際の EC 物流データを使ってマーコウィッツの平均・分散モデルで分析と実証をおこなった.

1. 平均・分散モデルを使って売上と在庫の複数指標で評価し, 最適な品揃えと組入比率, すなわち商品ポートフォリオを決定する.
2. 商品ポートフォリオを継続的にリバランスする.

マーコウィッツの平均・分散モデルによるポートフォリオ候補は, 式 (1) で定式化される 2 次計画問題を解くことで得られる.  $\mu$  は商品の期待リターンベクトル,  $w$  は商品の組入比率ベクトル,  $\rho$  は所与の目標リターン,  $\Sigma$

は分散共分散行列,  $\mathbf{1}$  は成分が全て 1 のベクトル,  $w_i$  は  $w$  の  $i$  番目の成分である. なおリターンは売上モデルでは売上金額であり, 在庫モデルでは在庫回転率である.

$$\begin{aligned} & \text{minimize} && w^T \Sigma w \\ & \text{subject to} && w^T \mu \geq \rho \\ & && w^T \mathbf{1} = 1 \\ & && w_i \geq 0 \end{aligned} \quad (1)$$

ポートフォリオ候補は効率的フロンティアと呼ばれる二次関数の曲線上に存在し, その中からシャープレシオが最大となるポートフォリオを選択する. シャープレシオ  $SR$  は, 単位リスク (volatility) あたりのリスクフリーレートを超えるポートフォリオの収益率であり, 式 (2) で求められる. リスクフリーレートは EC 物流において該当する概念がないので本研究では 0 とした.

$$SR = \frac{R_p - R_f}{\sigma}$$

$R_p$  ポートフォリオリターン

$R_f$  リスクフリーレート

$\sigma$  ポートフォリオ超過収益率標準偏差

図 3(a) は 30 個の商品の売上平均・分散モデルであり, 図 3(b) は同じ 30 商品の在庫回転率平均・分散モデルである. 黒「 $\cdot$ 」は個々の商品を示し, 青曲線は効率的フロンティアを示し, 赤「 $\times$ 」はシャープレシオ最大化ポートフォリオを示す. 一方のモデルに他方のモデルのシャープレシオ最大化ポートフォリオをたすき掛けにして赤「 $*$ 」でプロットしてみると, 一方のシャープレシオ最大化解は他方ではそうではないことがわかる. 棒グラフはそれぞれのモデルのシャープレシオ最大化ポートフォリオの組入比率を示している.

一つ目の研究課題は売上と在庫回転率の二つの指標でバランスの良い解を探索するという問題であり, 二つ目の研究課題はポートフォリオの組入比率の変化をどのように評価するかという問題である.

## 3 提案方法

### 3.1 商品ポートフォリオ決定

商品ポートフォリオ決定は売上と在庫回転率の平均・分散モデルを作成しランダムシミュレーションを行なってシャープレシオが最大となる組入比率を求めることで決定する. 具体的には次の手順で行う.

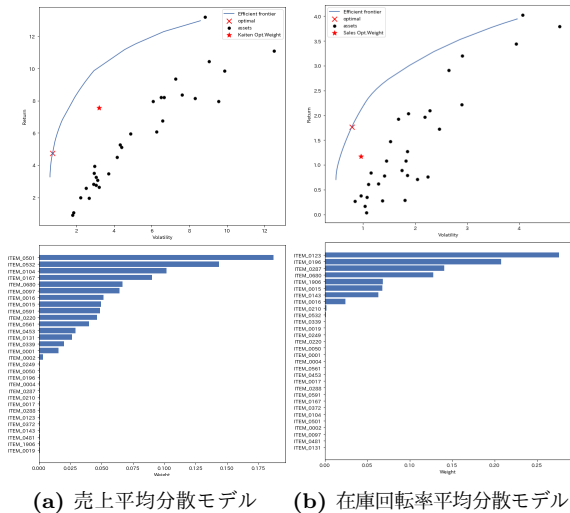


図 3: 売上と在庫回転率の相互関係

- 100 商品の商品組入比率 ( $> 0$ ) の合計が 1.0 となる組み合わせをディクレ分布によってランダムに 20000 パターン生成する。
- 売上と在庫回転率それぞれについて過去実績データを使って平均と分散共分散行列を求める。
- 売上と在庫回転率それぞれについて平均, 分散共分散行列, 組入比率ランダムパターンからポートフォリオの期待リターン, リスク, シャープレシオを求める。
- 売上シャープレシオと在庫回転率シャープレシオをチャートにプロットし, 売上シャープレシオが最大となるポートフォリオを選択する。
- 選択した組入比率パターンを組入比率降順にソートし, 上位から任意番目までの商品を選択する。

### 3.2 商品ポートフォリオのリバランス

リバランスと結果の評価は次の手順でおこなう。

- 101 人の顧客について 30 商品のうち過去に購入した商品組入比率を取り出す。
- 売上と在庫回転率それぞれの平均と分散共分散行列を求める。
- 平均, 分散共分散行列, 101 人の顧客の組入比率から期待リターン, リスク, シャープレシオを求める。
- 101 人の顧客について 30 商品のうち過去に購入していない商品の中からランダムに 1 個追加し比率を等分とする。(リバランス)

- 商品 1 個追加した組入比率について期待リターン, リスク, シャープレシオを求める。
- 売上と在庫回転率のそれぞれについてリバランス後とリバランス前のシャープレシオの差分をとる。差分が正数なら改善したものとする。
- 差分の符号の組合せによって四象限分析をする。差分がともに負数の場合は第 1 象限, 売上が正数, 在庫回転率が負数の場合は第 2 象限, 売上が負数, 在庫回転率が正数の場合は第 3 象限, 売上と在庫回転率ともに正数の場合は第 4 象限とし, 各象限の数で評価を行う。第 4 象限の数が多く, 第 1 象限の数が少ないことが望ましい。

## 4 データセット

本研究ではアスクル株式会社の企業向け EC サービスの売上と在庫データを使用した。

- ・期間: 2020-01-21 から 2022-01-20 までの月次データ
- ・顧客数: 101 人

ある程度アクティブな顧客を選ぶため, 上記期間中に特定の販売促進イベントに反応した顧客の正規分布から標準偏差  $+1\sigma$  以上の顧客をサンプリングした。

- ・商品数: 30

任意の顧客群が購入した任意の商品群の商品数をみると 0 が多くスパースなデータになるため実験の効果が見えにくい。なるべく多くの顧客から購入されている商品を選ぶため, 上記でサンプリングした顧客が購入した商品のうち購入した顧客数の多い順に 30 商品をサンプリングした。図 4(a) は横軸に商品, 縦軸に顧客として顧客毎の商品購入数の比率をヒートマップで表したものである。顧客の購入商品種類数の分布は図 4(b) に示した通りであり, 30 商品のうち少なくとも 1 個以上購入実績があり最大は 8 個, 平均は 3 個である。商品は日常的に利用される商品であり, 表 1 に示した商品カテゴリのいずれかに属する。

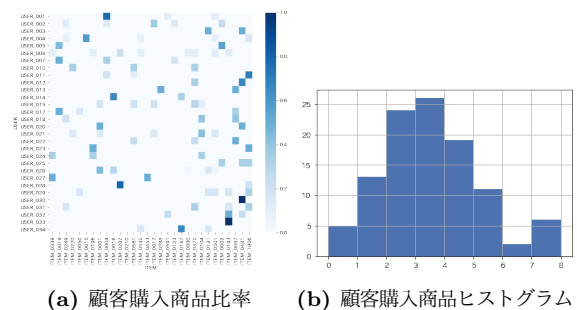


図 4: 顧客と商品データ

表 1: 商品カテゴリ

中カテゴリ	小カテゴリ
クリアホルダー	クリアホルダー
クリップ	ゼムクリップ
コピー用紙	アスクルマルチペーパースーパーホワイト (国産)
ゴミ袋	ゴミ袋 (半透明)
ゴミ袋	ゴミ袋 (黒)
ティッシュペーパー	ティッシュペーパー (汎用)
トイレトペーパー	トイレトペーパー (再生紙)
ペーパータオル	ペーパータオル (中判)
ペーパータオル	ペーパータオル (小判)
ボールペン替芯	油性インク
マーカー	油性マーカー
布テープ	布テープ
掃除用洗剤	トイレクリーナーシート
掃除用洗剤	トイレ用洗剤
衛生材料	消毒液入製品
電池	アスクルアルカリ乾電池

## 5 実験結果

### 5.1 商品ポートフォリオ決定

図5は横軸に在庫回転率のシャープレシオ、縦軸に売上のシャープレシオをとりランダムに生成した20000パターンの中の100商品の組入比率のポートフォリオの在庫回転率平均・分散モデルでのシャープレシオと売上平均・分散モデルでのシャープレシオをプロットした結果である。赤で示した点は売上平均・分散モデルのシャープレシオが最大化する商品組入比率であり、図6は組入比率降順に表したものである。ここでは厳密な最適解を提示することを目的とするものではなく、シミュレーション結果からどの組入比率パターンを採用するか、また組入比率の上位何パーセントを採用するかは経営的判断で決める余地がある。

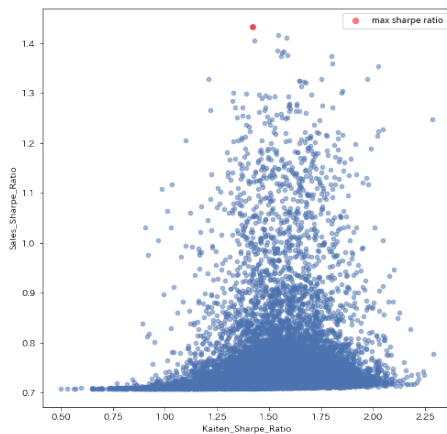


図 5: 売上と在庫回転率のシャープレシオ

### 5.2 商品ポートフォリオのリバランス

101人の顧客について購入商品ポートフォリオをオリジナルとして、そこにランダムに1商品を追加して比率を均等にリバランスした結果、平均・分散平面上でどのように変化したか3つの例を図7に示した。図の

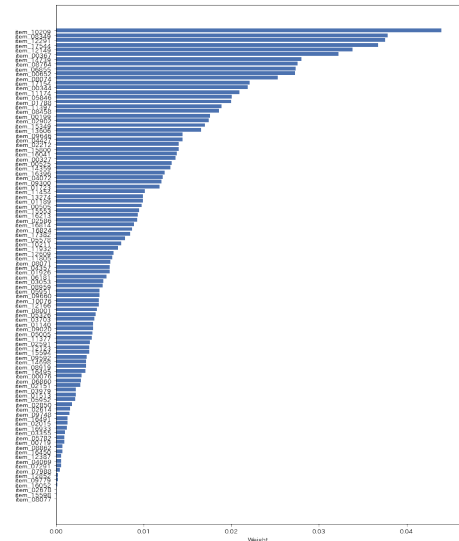


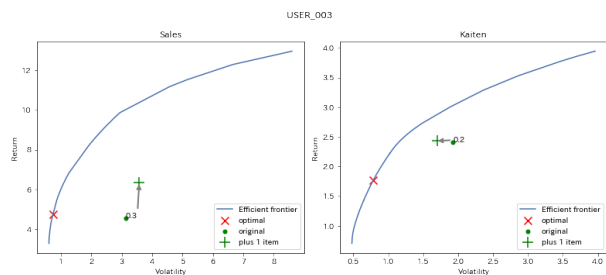
図 6: 売上シャープレシオ最大化組入比率

左が売上平均・分散平面で右が在庫回転率平均・分散平面である。横軸がリスク (Volatility) で縦軸がリターンである。青線は Efficient frontier (効率的フロンティア) であり組合せ可能なポートフォリオの中で、あるリスク水準で最大のリターンが得られるポートフォリオの集合を示している。赤「×」(Optimal) は効率的フロンティア上でシャープレシオが最大化するポートフォリオを示す。青「・」はリバランス前すなわち実績値であり、緑「+」はランダムシミュレーションによるリバランス後である。矢印はリバランス前からリバランス後への変化の方向と大きさを示している。図7(a)は売上はリスクはあまり変わらずリターンが向上しており、在庫回転率はリターンは変わらずリスクが低下しているので、望ましい変化の例といえる。(b)は売上はハイリスク・ハイリターンからローリスク・ローリターンへ変化した、在庫回転率は逆にローリスク・ローリターンからハイリスク・ハイリターン方向に変化している。(c)は(b)の逆パターンである。

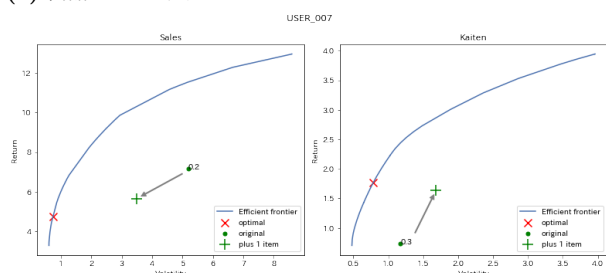
図8は101人の顧客についての変化の結果を4象限分析した結果である。実験では100回試行して平均を取った(表2参照)。実験結果からは各顧客がランダムに1商品購入することで売上、在庫回転率ともにシャープレシオが向上することを示唆している。

## 6 結論

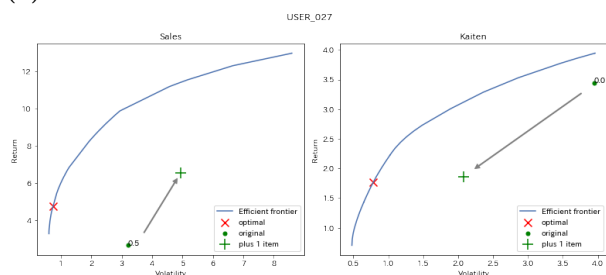
マーコウィッツの平均・分散モデルを使うことで、売上と在庫回転率の2視点でEC物流の商品ポートフォリオを決定し、継続的にリバランスする提案手法が有効であることを数値実験で確認した。



(a) 商品ランダム追加ケース 1



(b) 商品ランダム追加ケース 2



(c) 商品ランダム追加ケース 3

図 7: 商品ランダム追加とリバランス

## 7 おわりに

本研究は EC 物流分野に金融工学を活用する着想検証の第一歩である。小規模なデータセットでの実験を行ったが、目標は 1800 万商品から 33 万商品を選択することであり現実的な時間枠内で商品ポートフォリオ決定の手法を実現することが次の研究課題である。

## 謝辞

本研究は東京大学大学院工学系研究科技術経営戦略学専攻田中謙司研究室とアスクル株式会社の共同研究によるものであり、関係者の皆様には有益なご助言及び温かいご指導を賜りました。心より感謝申し上げます。

## 参考文献

[1] Jan G De Gooijer and Rob J Hyndman. 25 years of time series forecasting. *International journal of*

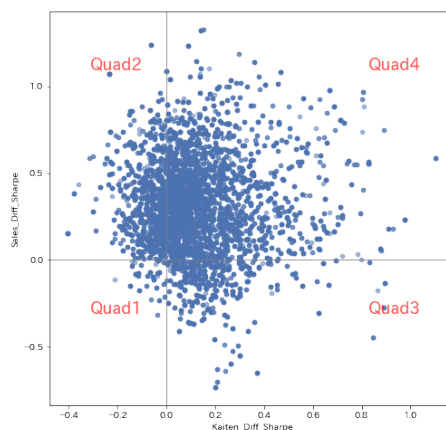


図 8: 四象限分布

表 2: 四象限分析結果

	Quad1	Quad2	Quad3	Quad4
mean	1.01	21.23	10.98	67.78
std	0.88	3.30	2.86	4.02
min	0.00	15.00	4.00	59.00
25%	0.00	19.00	9.00	65.00
50%	1.00	21.00	11.00	67.50
75%	1.00	23.25	13.00	71.00
max	5.00	31.00	18.00	77.00

*forecasting*, Vol. 22, No. 3, pp. 443–473, 2006.

[2] Derek W Bunn. Combining forecasts. *European Journal of Operational Research*, Vol. 33, No. 3, pp. 223–229, 1988.

[3] Hau L Lee, Venkata Padmanabhan, and Seungjin Whang. Information distortion in a supply chain: The bullwhip effect. *Management science*, Vol. 43, No. 4, pp. 546–558, 1997.

[4] Kazuhiro Koike and Yingsha Yang. Optimization method for labor control in net shopping logistics. In *Transdisciplinary Engineering for Complex Socio-technical Systems*, pp. 603–612. IOS Press, 2019.

[5] 小池和弘. 深層強化学習による物流プロセスの全体最適化. 人工知能学会全国大会論文集 第 33 回 (2019), 2019.

[6] Harry Markowitz. Portfolio selection\*. *The Journal of Finance*, Vol. 7, No. 1, pp. 77–91, 1952.

[7] Richard N. Cardozo and David K. Smith. Applying financial portfolio theory to product portfolio decisions: An empirical study. *Journal of Marketing*, Vol. 47, No. 2, pp. 110–119, 1983.